



申请同济大学工程硕士学位论文

# 自来水厂脱水污泥用于多孔砖 与陶粒生产的资源化研究

(国家“十一五”科技支撑计划(编号: 2006BAJ08B06); 国家 863 高  
技术研究发展计划资助项目(编号: 2002AA601130))

培养单位: 环境科学与工程学院

一级学科: 土木工程

二级学科: 市政工程

研究生: 朱 斌

指导教师: 高乃云 教授

二〇〇九年三月





A dissertation submitted to  
Tongji University in conformity with the requirements for  
the degree of Master of Engineering

**Study on Dewatered Sludge Sources for  
Production of Cork Brick and Porcelain  
Granule in Waterworks**

National 11th Five-Year Plan Program (No. 2006BAJ08B06); The  
National High Technology Research and Development Program of  
China (863 Program) ( No. 2002AA601130 )

Department: College of Environmental Science and  
Engineering

Discipline: Civil Engineering

Major: Municipal Engineering

Candidate: Zhu Bin

Supervisor: Gao Nai-yun (Professor)

**March, 2009**



# 声 明

本人郑重声明:本论文是在导师的指导下,独立进行研究工作所取得的成果,撰写成博士/硕士学位论文“\_\_\_\_\_”。

除论文中已经注明引用的内容外,对论文的研究做出重要贡献的个人和集体,均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表或未公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名: 朱文斌

2007 年 3 月 23 日



## 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：朱斌

2009 年 3 月 23 日

-----

经指导教师同意，本学位论文属于保密，在        年解密后适用本授权书。

指导教师签名：

学位论文作者签名：

年    月    日

年    月    日



## 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日



## 摘要

课题深入研究了水厂脱水污泥化学组成组分，污泥岩相鉴定以及污泥颗粒粒径大小和污泥塑性。这为水厂脱水污泥改性、筛选合理的原料配方、利用污泥制多孔砖和烧结轻质陶粒提供了科学依据。

本课题对水厂污泥进行科学地改良，通过掺入不同品种和不同百分比含量的外加剂，共组成 14 组配方，分别制成生料球，并在不同的预热时间、预热温度以及不同焙烧时间、焙烧温度下进行反复试验，最后筛选出水厂脱水污泥烧结陶粒三组原料配方。

采用粉磨法对水厂脱水污泥进行深度加工，并选择外加剂科学组合配制的陶粒原料，确保原料中  $\text{SiO}_2$  有所增高、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  有所降低、增加了原料的塑性，解决了生料球不密实、强度低、易断裂的缺陷。控制合理的热工制度能确保料球在预热和焙烧过程中不使料球产生炸裂。控制合理的主辅原料配比，粉磨法生料球制备科学控制预热与焙烧温度，可以防止陶粒生料球炸裂现象的产生。控制主辅原料的化学组分含量，解决了陶粒焙烧膨胀性达不到要求的技术难点。年产 2000 万块多孔砖（50%污泥）的投资回收期为 7.71 年，年产 10 万方轻质陶粒（80%污泥）投资回收期 5 年。

关键词：脱水污泥，污泥粒径，粉磨法，吸水率



## ABSTRACT

Chemical composition of waterworks sludge after dewatering was investigated deeply. Sludge lithofacies, sludge particles size and sludge plastic was also studied. Some scientific basis for waterworks sludge modification, raw material mixture ratio, cork brick preparation and sintering lightweight porcelain granule was provided based on above-mentioned study.

This issue of waterworks sludge was scientifically improved by adding different varieties and percentage of admixture. There were 14 group composed formula. The green stock ball was made according to repetitive experiment in different preheating temperature and time, different baking time and temperature. Three group composed formula were finally selected from 14 group composed formula.

Waterworks dewatering sludge was processed deeply using grinding method, and scientific composition admixture with scientific composition was selected to ensure  $\text{SiO}_2$  to increase and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  to decrease in raw material. In addition, raw material plastic was also increased, and imperfect that raw cook ball is low intensity and is easy to break was solved.

Reasonable control of the thermal system can ensure that raw cook ball do not burst in preheating and roasting process. Reasonable control the ratio of raw materials and preparation of raw cook ball by powder method can also burst. auxiliary grinding method preparation raw calcination temperature preheating and scientific control, can prevent taoli master-rule ball burst. Reasonable control of the chemical composition of main and auxiliary materials solved technical difficulties that roasting dilatibility of porcelain granule can not reach requirements. The investment capital producing 20 million pieces of porous brick (50% sludge) can be recovered in 7.71 years, and The investment capital producing 100 thousand square lightweight porcelain granule (80% sludge) can be recovered in 5.0 years.

**Key Words:** dewatered sludge, sludge grain diameter, powder method, hygroscopic coefficient



# 目录

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 第 1 章 概述.....                    | 1  |
| 1.1 概述.....                      | 1  |
| 1.2 自来水厂污泥来源.....                | 2  |
| 1.3 自来水厂污泥产量.....                | 2  |
| 1.4 国外对污泥处理处置概况.....             | 3  |
| 1.5 国内对污泥处理处置概况.....             | 12 |
| 第 2 章 水厂污泥组分及特性.....             | 15 |
| 2.1 前言.....                      | 15 |
| 2.2 水厂污泥的物理性质.....               | 15 |
| 2.3 水厂污泥化学组成及组分.....             | 24 |
| 第 3 章 利用水厂脱水污泥烧结多孔砖生产试验.....     | 32 |
| 3.1 前言.....                      | 32 |
| 3.2 烧结粘土多孔砖对粘土的要求.....           | 33 |
| 3.3 脱水污泥直接塑化法烧结多孔砖生产试验过程.....    | 35 |
| 3.4 水厂污泥烧结多孔砖质量检测结果与分析.....      | 42 |
| 3.5 水厂脱水污泥粉磨法烧结多孔砖生产试验.....      | 44 |
| 3.6 水厂脱水污泥粉磨法烧结多孔砖质量检测结果与分析..... | 47 |
| 3.7 结论.....                      | 49 |
| 第 4 章 利用水厂脱水污泥直接塑化法造粒烧结陶粒生产试验..  | 51 |
| 4.1 水厂污泥制陶粒研究状况.....             | 51 |
| 4.2 水厂脱水污泥拟作烧结陶粒原料分析.....        | 52 |
| 4.3 水厂脱水污泥直接塑化法造粒烧结陶粒生产试验.....   | 55 |
| 4.4 水厂脱水污泥直接塑化法烧结陶粒样品检测结果分析..... | 57 |
| 4.5 结论与讨论.....                   | 67 |
| 第 5 章 水厂脱水污泥烧结陶粒实验室研究试验.....     | 69 |
| 5.1 水厂脱水污泥直接塑化法烧结陶粒存在的技术难点.....  | 69 |
| 5.2 水厂脱水污泥烧结陶粒主辅原料的检测.....       | 71 |
| 5.3 水厂脱水污泥烧结陶粒生料球造粒方法选择试验.....   | 82 |
| 5.4 水厂脱水污泥烧结陶粒原料配方筛选.....        | 88 |



|      |                                              |     |
|------|----------------------------------------------|-----|
| 5.5  | 水厂脱水污泥烧结陶粒工艺参数选择.....                        | 94  |
| 5.6  | 水厂脱水污泥实验室烧结陶粒产品质量检测结果.....                   | 104 |
| 5.7  | 水厂脱水污泥实验室烧结高强陶粒试验.....                       | 105 |
| 5.8  | 水厂脱水污泥实验室烧结陶粒试验小结.....                       | 106 |
| 第6章  | 水厂脱水污泥粉磨法烧结陶粒生产试验.....                       | 110 |
| 6.1  | 生产试验工艺流程.....                                | 110 |
| 6.2  | 生产试验主要设备介绍.....                              | 110 |
| 6.3  | 生产试验陶粒制造过程.....                              | 112 |
| 6.4  | 生产试验陶粒制造过程相关事宜说明.....                        | 113 |
| 6.5  | 生产试验生料球制备.....                               | 115 |
| 6.6  | 生产试验相关参数设定与产品检测结果.....                       | 115 |
| 6.7  | 生产试验小结.....                                  | 118 |
| 第7章  | 陶粒及陶粒制品应用.....                               | 120 |
| 7.1  | 陶粒及陶粒制品简介.....                               | 120 |
| 7.2  | 国内外陶粒生产概况.....                               | 121 |
| 7.3  | 陶粒的应用前景.....                                 | 121 |
| 7.4  | 陶粒市场销售.....                                  | 123 |
| 7.5  | 水厂脱水污泥烧结的陶粒制轻集料混凝土小型空心砌块.....                | 123 |
| 7.6  | 水厂脱水污泥烧结的陶粒制陶粒增强加气砌块.....                    | 126 |
| 第8章  | 水厂脱水污泥烧结多孔砖和轻质陶粒技术经济分析....                   | 128 |
| 8.1  | 利用水厂脱水污泥年产10万m <sup>3</sup> 轻质陶粒工程经济技术分析.... | 128 |
| 8.2  | 利用水厂脱水污泥年产2000万块多孔砖工程经济技术分析.....             | 133 |
| 8.3  | 结论与讨论.....                                   | 137 |
| 第9章  | 结论与建议.....                                   | 139 |
| 9.1  | 结论.....                                      | 139 |
| 9.2  | 建议.....                                      | 151 |
| 参考文献 | .....                                        | 152 |



## 第1章 概述

### 1.1 概述

自来水厂（以下简称水厂）排泥与滤池反冲洗水中的污泥和水厂脱水污泥的区别，仅仅是污泥含水率的改变，也就是含水污泥体积的改变并没有达到对污泥最终处置的目的。

如果脱水污泥处置不当就进入环境，不仅会对周围环境造成一定的危害，而且会造成资源和能源的浪费，因此如何将大量的自来水厂污泥经过科学处理后，使其减量化、稳定化、无害化和资源化，已成为我国给水行业广泛关注的课题之一。

当水厂排泥水处理工程投入运行以后，使水厂排泥水有效地进行了固液分离，减少了排泥水直接排入江河，改善了水域环境质量，减少了河道淤塞速度，提高了航道运行能力。但是水厂排泥水处理以后，所产生的大量脱水污泥（含固率40%—50%），如何处置和综合利用仍须进一步深入思考和研究。

如果大量的给水厂污泥不能科学处置，使其减量化、稳定化、无害化和资源化，而直接进入环境，必会造成对生态环境的危害。

虽然给水厂污泥成份，污染物含量远比城市污水厂污泥清洁得多，但是给水厂污泥在机械脱水时加入了高分子絮凝剂改变了污泥物理性质和化学性质。若给水厂污泥进入农田，将造成土壤物理和化学环境的变化，会引起土壤“板结”酸化等一系列危害其生态功能的后果。

若给水厂污泥堆置，同样会通过侵占土地空间造成地表与地下径流的化学性质改变等对环境形成不利的影响。

对水厂污泥处理和处置技术研究过程中，将污泥作为一种资源加以利用，应用实例还很少。文献报告也不多，课题试图将上海各水厂所产的脱水污泥作为粘土资源制作多孔砖和陶粒产业化研究。其目的之一是对给水厂污泥能否作为有效资源再利用进行实践，尽最大可能为改善环境质量，促使社会经济保持循环持续发展。

若要寻求降低水厂污泥处理费用，视脱水污泥作为粘土和亚粘土资源加以综合利用，必须将水厂污泥处置按政策和经济规律重新认识，只有将水厂污泥试制多孔红砖（政策许可）和利用转窑烧制粘土陶粒研究，才能进入产业化进程。才能最大限度将水厂污泥处置既考虑社会效益和环境效益，又考虑到企业的经济效益，才能促使企业持续健康协调发展。

## 1.2 自来水厂污泥来源

上海各家自来水厂在制水过程中取原水（黄浦江水、长江水源（陈行水库水）），经投加混凝剂（铝盐或铁盐）后的混凝、沉淀、过滤和氯消毒等常规工艺处理净化成自来水，通过输配水管道供应用户。原水利用率约95%左右，其余5%的水量随沉淀池排泥水和快滤池反冲洗水排出净水工艺系统之外<sup>[1-5]</sup>。

由于原水中含有浑浊的颗粒悬浮物、溶解性胶体、部分大分子有机物和微生物、藻类以及胶体状金属氧化物等杂质，当原水中投加化学电介质絮凝剂铝盐或铁盐，再经混凝搅拌促使原水中杂质与混凝剂絮凝，形成“矾花”，使水澄清。当“矾花”逐渐变大、沉降，进入沉淀池底部形成浓缩污泥，在沉淀池底部，利用虹吸原理，将浓缩污泥随排泥水排出。滤池在过滤水过程中，截留悬浮颗粒物，当运行一定时间需对滤池进行反冲洗，反冲洗水中同样含有污泥，其污泥氧化物组分和沉淀池排泥水污泥氧化物组分相似，唯一区别使污泥颗粒粒径更为细小<sup>[6-12]</sup>。

因为水厂沉淀池排泥水和滤池反冲洗排泥水经沉降后所形成的污泥是水厂污泥主要来源。其次还有反应池、清水库清洗时所形成的污泥是水厂污泥次要来源。

## 1.3 自来水厂污泥产量

水厂污泥产量一般以沉淀池排泥水中污泥量为主。若平流式沉淀池每立方米排泥水量产干污泥固体量约为5—20Kg，即5000—20000mg/L，高效澄清池排泥水含固率一般为0.2—0.5%，即2000—5000mg/L，快滤池反冲洗水污泥含固率一般为0.05—0.15%，即500—1500mg/L<sup>[13-15]</sup>。

影响水厂污泥产量除了制水量外，原水水质也决定了给水处理需去除的物质数量和去除的难易程度，并牵涉到处理药剂的用量多少。若原水中要去除的杂质越多，杂质的可混凝沉降性越差，则处理药剂用量越多，相应给水厂污泥产率就越大，所以原水水质好坏亦决定了给水厂污泥产率的最主要影响因素。

水厂污泥产量一般采用下列公式计算<sup>[16-19]</sup>

$$DS=SS+0.2A+1.53B$$

式中 DS：原水中干污泥含量 mg/L，

SS：原水中悬浮物固体含量 mg/L，

A：水中去除的色度（以度计），

B：投加的硫酸铝（以氧化铝计）。

例如某水厂每天产自来水10万 m<sup>3</sup>，原水悬浮物为100 mg/L，投加硫酸铝（折

结晶硫酸铝) 50 mg/L, 自来水色度比原水色度降低 10 度, 则计算产污泥量 (干基)

$$100000\text{m}^3/\text{d} \times [(100+0.2 \times 10+1.53 \times 7.66) \times 10^{-6} \text{t}/\text{m}^3] = 11.37 \text{t}/\text{d}$$

目前上海市属四大自来水公司 (2001 年数据) 制水能力为 720 万  $\text{m}^3/\text{d}$ , 按平均每千吨水产干污泥 100Kg 计, 则水厂排泥水工程全部投入运行后, 全市给水厂将产生干污泥 720t/d, 年产干污泥 262800 t/年, 折算湿污泥 (含固率 40%) 每天将产 1800 吨, 每年将产 657000 吨<sup>[20-25]</sup>。

## 1.4 国外对污泥处理处置概况

### 1.4.1 污泥施肥、堆肥、填埋、焚烧处理处置情况

视城市污水厂污泥为有机肥料, 直接利用生活污水单纯作肥源施入农田。美国农田消纳污泥的比例从 1982 年的 40% 增至 1992 年的 49%, 目前英国、法国、瑞士、瑞典和荷兰等国城市污泥的农用量大于 50%, 卢森堡达到 80%。到 2005 年估计其农用量污泥比例将比 20 世纪 80 年代中期提高 10%, 达  $4.5 \times 10^6 \text{t}/\text{d}$ 。英国因禁止污泥投海处置, 而使农用量污泥比例大大增加<sup>[26-27]</sup>。

污泥堆肥在美国、德国、荷兰等发达国家大多由污水处理厂出资, 国家资助并交专业公司承包产业化经营。日本用于农林地的污泥堆肥中心到 90 年代末就建设成 35 座。污泥堆肥主要利用污泥中有机物在堆肥时发热、高温消毒及逐渐对有机物进行腐熟过程, 这样既可杀灭污泥中有害菌体, 又可利用微生物的作用, 降解污泥中有机物, 使堆肥产品成为一种良好的有机肥料<sup>[28-35]</sup>。

污泥填埋是污泥最终处置的另一种方法。欧盟国家对污水厂污泥消纳总量中有 40% 污泥进行填埋, 像瑞典就将部分城市污泥填埋在不渗透的山谷中。实施污泥填埋处置, 必须有防渗透措施, 避免对环境 (地下水) 造成不利影响。

污泥焚烧亦称污泥热化学处理。日本近 50% 的污泥采用焚烧的方法进行处置, 欧盟各国采用焚烧方法处置污泥也超过了 10%, 估计到 2005 年这一比例将增加 38%。

从焚烧产物来看, 干污泥颗粒可用于水泥添加剂、污泥砖、污泥陶粒等建筑材料。

### 1.4.2 世界各国污泥产量及处置方法

世界主要发达国家的污泥主要处置途径为农用量、填埋和焚烧, 由于对海洋环境保护越来越高的要求, 许多国家正停止使用污泥排海处置, 污泥焚烧以日本、

奥地利、丹麦等国占比例最高，见表 1.1。

表 1.1 世界各国的污泥产量和处置方法

| 国家  | 农业 (%) | 填埋 (%) | 焚烧 (%) | 海洋 (%) | 污泥总量 (吨干污泥/年) |
|-----|--------|--------|--------|--------|---------------|
| 美国  | 45     | 21     | 3      | 30     | 7690000       |
| 奥地利 | 28     | 35     | 37     | —      | 250000        |
| 比利时 | 57     | 43     | —      | —      | 350000        |
| 丹麦  | 43     | 29     | 28     | —      | 150000        |
| 法国  | 27     | 53     | 20     | —      | 900000        |
| 德国  | 25     | 65     | 10     | —      | 2750000       |
| 原西德 | 32     | 59     | 8      | —      | 2000000       |
| 希腊  | 10     | 90     | —      | —      | 200000        |
| 爱尔兰 | 23     | 34     | —      | 43     | 23000         |
| 意大利 | 34     | 55     | 11     | —      | 800000        |
| 卢森堡 | 80     | 20     | —      | —      | 15000         |
| 荷兰  | 53     | 29     | 10     | 8      | 280000        |
| 葡萄牙 | 80     | 12     | —      | 8      | 200000        |
| 西班牙 | 61     | 10     | —      | 29     | 300000        |
| 瑞典  | 60     | 40     | —      | —      | 180000        |
| 瑞士  | 50     | 30     | 20     | —      | 250000        |
| 英国  | 51     | 16     | 5      | 28     | 1500000       |
| 日本  | 9      | 35     | 55     | —      | 3000000       |

来源: Oslo Commission. Water Research Center. Water Services Association  
EWPCA

为避免污泥对环境的二次污染，各国政府及研发机构对污泥的最终处置问题十分重视，并根据各国的国情制定出相应的法规和具体方案，农用和陆地填埋是大多数国家污泥处置的两种最主要的方法。近年来，德国、意大利、丹麦等国污泥农用比例不断降低，而污泥填埋比例有增加的趋势，但有一些国家，如美国、英国和日本等污泥农用比例却呈增加趋势，填埋呈减少趋势<sup>[36]</sup>。

世界各国污泥处置的标准是不同的，各国都根据本国的实际情况制定和规范了污泥处置的标准，见表 1.2。

表 1.2 国外污泥处置的标准（最大施用量） 单位：mg/kg

| 国家  | 年    | Cd  | Cu     | Cr      | Ni    | Pb     | Zn      | Hg    | As   |
|-----|------|-----|--------|---------|-------|--------|---------|-------|------|
| 欧盟  | 1986 | 1-3 | 50-140 | 100-150 | 30-75 | 50-300 | 150-300 | 1-1.5 |      |
| 法国  | 1988 | 2   | 100    | 150     | 50    | 100    | 300     | 1     |      |
| 德国  | 1992 | 1.5 | 60     | 100     | 50    | 100    | 200     | 1     |      |
| 意大利 |      | 3   | 100    | 150     | 50    | 100    | 300     |       |      |
| 西班牙 | 1990 | 1   | 50     | 100     | 30    | 50     | 150     | 1     |      |
| 英国  | 1989 | 3   | 135    | 400     | 75    | 300    | 200     | 1     |      |
| 丹麦  | 1990 | 0.5 | 40     | 30      | 15    | 40     | 100     | 0.5   |      |
| 芬兰  | 1995 | 0.5 | 100    | 200     | 60    | 60     | 150     | 0.2   |      |
| 挪威  |      | 1   | 50     | 100     | 30    | 50     | 150     | 1     |      |
| 瑞典  |      | 0.5 | 40     | 30      | 15    | 40     | 100     | 0.5   |      |
| 美国  | 1993 | 20  | 750    | 1500    | 210   | 150    | 1400    | 8     |      |
| 日本  |      | 5   |        |         |       |        |         | 2     | 50   |
| 加拿大 |      | 20  | 500    | 1000    | 500   | 200    | 2000    |       | 2000 |

1.4.3 欧盟各国污泥处理处置概况

欧盟各国到 2005 年污泥产量将比 1994 年上升 55%，可达  $10.1 \times 10^6 \text{t/d}$ ，从图 1.1 可以看出欧盟各国污泥产量比率，污泥稳定化技术应用以及污泥脱水技术应用率和污泥处置技术应用率。

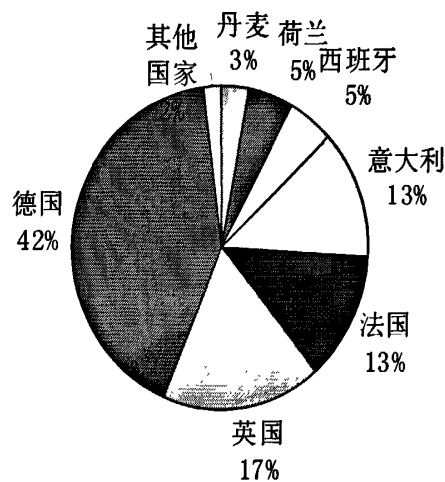


图 1.1 (a) 污泥产生分配率

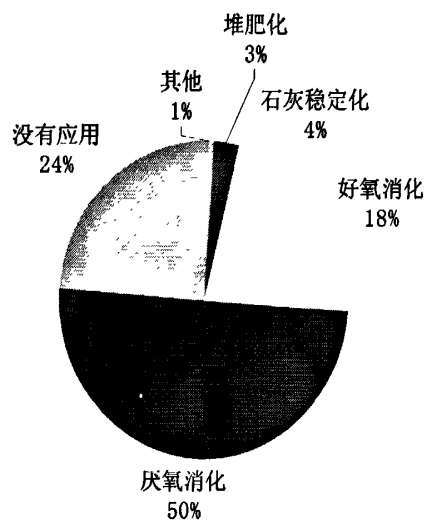


图 1.1 (b) 污泥稳定化技术应用率

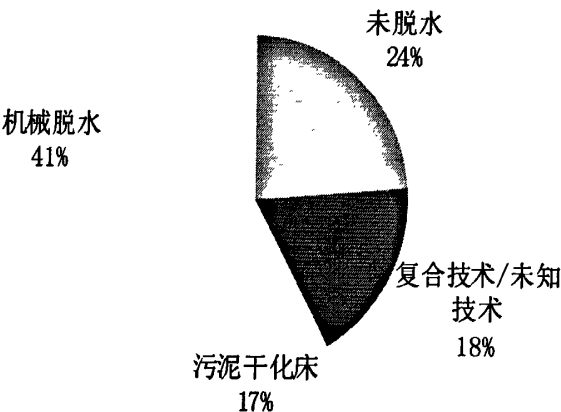


图 1.1 (c) 污泥脱水技术应用率

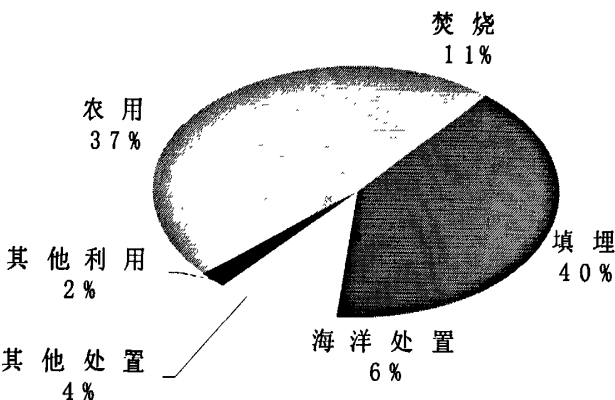


图 1.1 (d) 污泥处置技术应用率

注：引自何品晶，顾国维，李笃中等. 2003. 城市污泥处理与利用. 北京：科学出版社

整个欧盟处理的污泥中有 85%由法国、德国、意大利和英国产生。四国的污水处理厂数量又占欧盟污水处理厂总数的 82%，因此污水处理系统发达的国

家污泥生产率就较高，因为这些国家污水处理厂多数采用二级或三级处理工艺（其中包含接纳工业废水和给水厂排泥水）。表 1.3 可以看出欧盟各国污水处理厂服务人口与污泥处置总量。

表 1.3 欧盟各国污水处理厂服务人口与污泥处置（1991~1992）

| 成员国    | 总人口/10 <sup>6</sup><br>人 | 接入排水系统人口<br>比例/% | 污水厂服务人口<br>比例/% | 污泥处置（以干物质计）          |                   |
|--------|--------------------------|------------------|-----------------|----------------------|-------------------|
|        |                          |                  |                 | t/a                  | g/（人·d）           |
| 比利时    | 9.9                      | 70               | 28              | 59000                | 58                |
| 丹麦     | 5.1                      | 93               | 92              | 17000                | 99                |
| 法国     | 56.9                     | 65               | 50              | 850000               | 82                |
| 德国     | 79.7                     | 89               | 83              | 2700000              | 111               |
| 希腊     | 10.2                     | 45               | 34              | 48000 <sup>(1)</sup> | 40 <sup>(2)</sup> |
| 爱尔兰    | 3.5                      | 67               | 45              | 37000                | 64                |
| 意大利    | 57.7                     | 75               | 60              | 820000               | 65                |
| 卢森堡    | 0.4                      | 97               | 87              | 7900                 | 62                |
| 荷兰     | 15.0                     | 97               | 88              | 322900               | 67                |
| 葡萄牙    | 9.9                      | 52               | 20              | 25000 <sup>(1)</sup> | 35 <sup>(2)</sup> |
| 西班牙    | 39.0                     | 70               | 59              | 350000               | 42                |
| 英国     | 57.5                     | 96               | 85              | 1100000              | 62                |
| 总值（平均） | 344.8                    | (79)             | (66)            | 6489800              | (78)              |

- 1) 引自 Hall J E.Sewage Sludge Production. Treatment and Disposal in the European Union. J. of CIWEM, 1995, 9 (4): 335~343。
- 2) 估计的上限值。

1.4.4 日本对污水厂污泥处置及利用概况

由于日本人口密度较高（约 350 人/km<sup>2</sup>），多山地，日本政府十分重视境内地表植被的保护，对城市建设用地进行严格控制，污泥处置与利用方面，填埋及土地利用方面明显低于其他发达国家，下表为 1997 年日本污泥的处置和利用情况。

表 1.4 日本的污泥处置和利用情况 1) (1997 年 单位: m3)

|                | 卫生填埋       | 污泥填海       | 有效利用       | 其他         | 合计 (所占比例 /%) |
|----------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| 脱水泥饼           | 770000     | 250000     | 530000     | 60000      | 1600000(68)  |
| 焚烧灰渣<br>2)     | 100000     | 150000     | 100000     | 12000      | 360000(15)   |
| 干化污泥           | 14000      | 0          | 160000     | 110000     | 190000(8)    |
| 消化污泥           | 0          | 0          | 0          | 210000     | 210000(9)    |
| 合计(所占<br>比例/%) | 882000(37) | 393000(17) | 790000(33) | 296000(13) | 2400000(100) |

- 1) 引自 Hoyland G. Shanghai Workshop Sewage Sludge Disposal Regulations and Strategy. Shanghai: Shanghai Water & Environment Construction Co. Ltd. 2001。
- 2) 焚烧污泥灰渣量折算为脱水泥饼时, 应乘以 10~13; 折算为干化污泥时应乘以 5~7。

日本污泥利用方面典型的例子就是利用污泥厂污泥焚烧灰制砖和制轻质骨料, 下面分别作一介绍。

1.4.5 日本利用污泥焚烧灰制砖

污泥焚烧灰成分与制砖黏土成份比较。

表 1.5 污泥焚烧灰成份与制砖黏土成份比较

|            | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO      | MgO     |
|------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------|---------|
| 污泥焚烧灰      | 17~30            | 8~14                           | 8~20                           | 4.6~38   | 1.3~3.2 |
| 制造砖的黏土成份要求 | 57~89            | 4.0~20.6                       | 2.0~6.6                        | 0.3~13.1 | 0.1~0.6 |

注: 引自张自杰等.排水工程(第四版). 北京: 中国建筑工程出版社, 2002

根据表 1.5 分析结果, 利用污泥焚烧灰制砖时添加适量黏土和硅砂, 提高制砖原料中 SiO<sub>2</sub> 含量。其原料配比为污泥焚烧灰: 自然黏土: 硅砂=1: 1: (0.3~0.4) (质量比), 制成污泥砖物理性能如下表。

表 1.6 污泥砖的一般物理性能

| 焚烧灰: 黏土 | 平均抗压强度/<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) <sup>2)</sup> | 平均抗折强度/<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) <sup>2)</sup> | 成品率/% | 鉴定标号 |
|---------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------|------|
|---------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------|------|

|      |     |    |    |    |
|------|-----|----|----|----|
| 2: 1 | 82  | 21 | 83 | 75 |
| 1: 1 | 100 | 45 | 90 | 75 |

注：1) 引自张自杰等.排水工程（第四版）. 北京：中国建筑工程出版社，2002。

2)  $1\text{ kg/cm}^2=9.80665\times10^4\text{Pa}$ 。

污泥焚烧灰制成的污泥砖工艺流程如下：

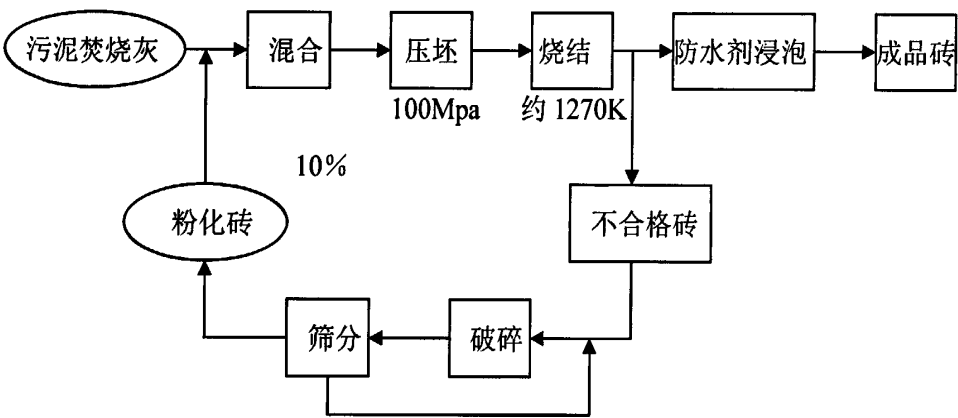


图 1.2 日本东京都污泥焚烧灰制砖工艺流程

污泥焚烧灰与粘土混合制成的污泥砖其工艺同单纯粘土制砖相近，主要有制坯、烧成和养护处理等。

污泥焚烧灰与粘土混合制成的污泥砖与纯自然粘土制成的砖其质量比较见下表。

表 1.7 污泥砖与粘土砖的质量比<sup>1)</sup>

| 项目                        | 污泥砖      | 粘土砖      |
|---------------------------|----------|----------|
| 抗压强度/（N/mm <sup>2</sup> ） | 15~40    | 4~17     |
| 吸水率（质量分数）%                | 0.1~10   | 16       |
| 磨耗/g                      | 0.01~0.1 | 0.05~0.1 |
| 抗折强度/（N/mm <sup>2</sup> ） | 80~200   | 35~120   |

1) 引自 Spinosal L et al. Sludge into Biosolids: Processing, Disposal and Utilization. London:IWA Publishing, 2001

日本东京都下水道利用污泥焚烧灰制成的铺路砖在公共场所人行道铺设应用。在质量上有三点不利因素。

第一，污泥砖铺设在潮湿和阳光不足的路面上苔藓生长茂盛；

第二，地砖表面在无雨的冬天出现薄冰；

第三, 地砖表面出现  $\text{CaCO}_3$  结晶使地砖表面形成白斑。

#### 1.4.6 日本利用污泥焚烧灰制轻骨料

日本东京都污泥焚烧厂处置污泥能力为 500kg/h, 将污泥焚烧灰添加水和酒精蒸馏残渣、混合造粒在 270℃ 烘干 7—10min, 然后输入流化床烧结窑在 1050℃ 烧结成污泥焚烧灰制的轻质骨料颗粒时进行空气冷却, 其产品表面硬质膜覆盖, 内部多孔球形轻质骨料, 密度在 1.4—1.5g/cm<sup>3</sup>, 产品可广泛使用在建筑墙面、绿化园林、节能隔热、给水滤料等方面。

#### 1.4.7 日本对自来水厂污泥泥饼处置及利用情况

在日本, 1976 年就颁布法律, 供水能力在 1 万 m<sup>3</sup>/d 以上的自来水厂必须对水厂排泥水进行处理, 禁止直接排放江河, 且必须对污泥泥饼进行无公害化处置。1990 年日本水道协会对全日本具有排泥水处理设备的 342 家自来水厂污泥泥饼处理处置情况进行了调查, 其结果如下:

- 泥饼处置的方式

填埋处置, 有 199 家水厂, 占给水污泥处置份额 64.6%

有效利用, 有 51 家水厂, 占给水污泥处置份额 18.4%

混合处置, 有 22 家水厂, 占给水污泥处置份额 7.9%

(其中填埋占 65.1%, 有效利用占 28.4%, 其他占 6.4%)

其他方法处置, 有 25 家水厂, 占给水污泥处置份额 9.1%

- 泥饼有效利用范围

1) 造房屋基地垫土

2) 土壤改良用土、园艺、苗圃、农田用土;

3) 制作培养土、营养土;

4) 制作人造砂用于运动场、网球场;

5) 水泥掺合料;

6) 制砖、制瓦添加土。

- 给水厂污泥泥饼有效利用利弊分析

1) 冻结溶解污泥泥饼, 作为草莓、菊花、甜瓜等的培养土对农田有利;

2) 对投加过高分子絮凝剂脱水污泥泥饼, 再经过热处理可用于网球场、运动场填土, 亦可用于园艺、水稻育苗土、水果、叶栽根栽, 但不能用于水田;

3) 水厂脱水污泥泥饼用于制砖、陶器、瓦类、窑制品, 易于龟裂, 不能直接利用;

4) 水厂脱水污泥泥饼(无臭气发生)可作为水泥原料掺合料;

5) 水厂脱水污泥泥饼经处理和水泥混合可作配水管的填埋土。

● 水厂脱水污泥泥饼利用探索研究案例

1) 日本横滨市西谷水厂将污泥泥饼干燥、破碎,加工成适当粒度和含水率作园艺栽培土出售;

2) 神奈川县横滨水道局于 1982 年建成小雀水厂脱水污泥改良土加工厂,制造质量良好的回埋土(改良土),解决了自来水埋管工程的填埋土问题;

3) 茨城县日立市水道局曾委托窑业厂家,将水厂脱水污泥作为陶瓦、陶管原料的试验,其结果由于污泥含有有机物成份多,烧成品收缩率大,认为水厂脱水污泥不适合作陶瓦、陶管原料;

4) 香川县高松市水道局曾委托窑业业主,将水厂脱水污泥作为烧制花盆、砖瓦的黏土原料(污泥的混合比例为 20%)试生产上述产品。经过试验,烧制的产品易产生裂缝,进入商品化有待进一步研究;

5) 石川县企业局水道供水企业,对给水厂脱水污泥泥饼利用研究后认为用于制造瓦片的粘土中再添加 3%的脱水污泥,可以降低产品吸水率,提高产品的耐水性;

6) 琦玉县企业局在烧制砖瓦的粘土中掺和 10%水厂脱水污泥泥饼,可以烧制成砖瓦,但产品质量下降,实际利用方面有待研究;

7) 德岛市水道局曾将给水厂脱水污泥作为窑业用粘土使用的研究,结论不适合应用;

8) 广岛县福山市水道局曾在 1998 年委托窑业企业将给水厂脱水污泥进行陶制品方面试验,其试验结果证明不能将水厂脱水污泥作为陶制品的原土使用。

综合上述,日本对自来水厂脱水污泥泥饼利用探索研究案例来分析,直接取给水厂污泥泥饼作为粘土原料烧制砖瓦及陶制品基本不适合。这可能和给水厂脱水污泥中有机物成份,制水时硫酸铝投加量多少等因素密切关联着,从而改变了污泥塑性和烧制时收缩率。

## 1.5 国内对污泥处理处置概况

### 1.5.1 国内利用污水处理厂污泥施肥

污泥处理厂污泥作为有机肥料直接施入农田被土地利用方面在我国案例很多。在 20 世纪 80 年代,天津纪庄子污水处理厂污泥被附近郊区农民运走,全部用于郊区农田,北京高碑店污水处理厂所产污泥同样消纳在郊区农田之中。

### 1.5.2 国内污水处理厂污泥制陶粒案例

广州华穗轻质陶粒制品厂采用城市污水厂污泥代替河道淤泥或部分粘土烧制轻质陶粒获得成功,已经应用于实际生产,日处理量已达 300t/d。

### 1.5.3 国内给水行业自来水污泥处置情况

我国给水厂污泥处理处置工作起步较晚,至今绝大多数水厂还将未经处理的给水厂排泥水直接排入附近河流,致使水域环境受到一定程度的污染。随着“中华人民共和国水法”和“中华人民共和国水污染防治法”等法规先后颁布实施,目前许多大城市环保部门正积极督促自来水厂实施排泥水处理和脱水污泥处置。到目前为止所了解的自来水排泥水工程已投入运行的有上海闵行第二水厂、北京水源九厂、深圳梅林水厂、石家庄润石水厂、广州西州水厂等。但对脱水污泥最终处置未作研究,一般采取车运填埋填坑或堆积在荒地农田,但给水厂需付较大运输费用。

由于相关环保法律的出台,目前国内许多给水厂正在筹措资金实施给水厂排泥水处理工程,如天津新开河水厂、大庆中引水厂、大连沙河口水厂、深圳朱坳水厂、广西三津水厂、长沙第三第八水厂等以及上海长桥水厂、月浦水厂、大场水厂、临江水厂等。因此在自来水行业中着手研究如何解决水厂脱水污泥泥饼最终处置已提到了议事日程。处置后给水厂污泥应该具备稳定化、无害化和资源化,这样才能促使自来水行业健康协调发展。处置给水厂脱水污泥要以人为本,保护环境为宗旨,视污泥为资源化进行利用研究,降低水厂排泥水处理成本,降低水厂污泥处置成本,提高给水行业经济效益,才能使社会效益、环境效益、经济效益同步持续发展。

### 1.5.4 国内给水厂污泥研制陶粒的探索研究

1992 年上海市建筑科学研究院(以前称所)曾承担了“中德合作有害废弃物前期基础研究之一污泥制陶粒研究”,曾将南市自来水厂沉淀池污泥为原料进行烧结陶粒试验。研究结论认为:选择适当的工艺条件,可以将自来水厂沉淀污泥作为原料,在 1150—1200℃之间烧结出轻质膨胀陶粒,其吸水率在 15%左右,松散容重在 200—300kg/m<sup>3</sup>,符合国标 GB2838—81 的要求(国标要求陶粒吸水率不大于 22%,按目前国标吸水率为 10%/h)<sup>[37-46]</sup>。

另外在研究水厂污泥制陶粒时,发现水厂沉淀池污泥有机质含量不十分丰富,污泥长时间堆放或高温预热会失去污泥中大部分有机物质,使污泥中氧化铁不能充分进行还原反应,这将阻碍料球的膨胀,在试验生产过程中发现料球不经过预热而直接焙烧是不可能的,所以应尽可能采取低温短时间预热,以确保污泥

中部分有机物不会失落，促使陶粒球坯进行膨胀<sup>[47-56]</sup>。

## 第2章 水厂污泥组分及特性

### 2.1 前言

水厂污泥的来源和处理方法在很大程度上决定了污泥的性质和化学组成。

水厂原水水源取自江河湖泊,其形式的污泥中有机物组分和无机物组份都不一样。原水澄清时,投加的混凝剂品种(铝盐、铁盐)和投加量多少都会影响水厂污泥的化学组成和含量。另外,水厂浓缩污泥脱水时投加高分子絮凝剂PAM品种(阳、阴、非)和加注量都影响着污泥的颗粒粒径和污泥的可塑性。

水厂污泥来源由沉淀池排泥水沉淀污泥和快滤池反冲洗水沉淀污泥组成,将二处排泥水收集浓缩形成浓缩污泥(含固率大于3%)输入脱水机械脱水后形成泥饼(含固率大于35%),本课题任务是如何合理处置水厂脱水污泥和利用脱水污泥制建筑材料(空心粘土砖和陶粒)的研究,因此在研究水厂脱水污泥合理处置之前有必要了解一下水厂污泥的物理性质和化学组成。

### 2.2 水厂污泥的物理性质

#### 2.2.1 污泥含水率与含固率

污泥中所含水分的多少称含水量,污泥含水量用含水率来表示,即单位重量的污泥所含水分重量百分数。

污泥的含水率可用下列公式计算:

$$P_w = \frac{W}{W + S} \times 100\% \quad (1)$$

$P_w$  : 污泥含水率(%)

$W$  : 污泥中水分重量(g)

$S$  : 污泥中总固体重量(g)

污泥的含固率可用下列公式计算:

$$P_s = \frac{S}{S + W} \times 100\% = 100 - P_w \quad (2)$$

$P_s$  : 污泥含固率%

$S$  : 污泥中总固体重量(g)

$W$  : 污泥中水分重量 (g)

水厂沉淀池排泥水含固率在 0.2—2%之间, 滤池反冲洗水含固率在 0.05—0.15%之间。

污泥中的水份其存在状态可能有四种存在状态, 即污泥中存在着间隙水份、表面水份、结合水份和自由水份。

自由水份是污泥中流动不受限止的水份, 间隙水份是以毛细管力受污泥固体限止的水份, 表面水份以吸附力与污泥固体结合, 结合水则是固体的一部分。污泥中水的存在状态是污泥可脱水性的依据。利用机械应力脱除污泥水份的极限是全部自由水份和一部分间隙水份, 污泥中表面水份和结合水份只能以热力干燥等方法才能脱除。

污泥中自由水份溶解了各种有机物质和无机物质, 污泥机械脱水后其分离水中, 水溶性污染物成份要比地面水污染物浓度要高得多, 分离水中  $COD_{Cr}$  和  $BOD_5$  值都很高, 所以分离水不能直接排入江河而需进行再净化处理。

## 2.2.2 污泥相对密度与污泥干固体相对密度

污泥的密度是指单位体积污泥的质量。

污泥相对密度通常以污泥重量与同体积水的重量之比来表示。

污泥相对密度的计算公式如下:

$$\gamma = \frac{100\gamma_s}{Pw\gamma_s + (100 - Pw)} \quad (3)$$

$\gamma$ : 污泥相对密度 ( $g/cm^3$ );

$\gamma_s$ : 污泥中干固体相对密度 ( $g/cm^3$ );

$Pw$ : 污泥含水率%。

污泥干固体相对密度与污泥中有机物和无机物比例有关, 污泥干固体相对密度可通过下列公式计算

$$\gamma_s = \frac{100\gamma_f\gamma_v}{100\gamma_v + Pv(\gamma_f - \gamma_v)} \quad (4)$$

$\gamma_s$ : 污泥干固体相对密度 ( $g/cm^3$ );

$\gamma_f$ : 污泥中无机物相对密度, 平均值取 2.5 ( $g/cm^3$ );

$\gamma_v$ : 污泥中挥发性有机物固体相对密度, 有机物的相对密度  $\gamma_v$  约等于 1;

$Pv$ : 污泥干固体中挥发性固体有机物所占的比例。

如果闵行自来水厂输入离心机脱水的浓缩污泥含水率为 92%, 而污泥中 90% 的固体物质是由无机物组成, 10% 的固体物质由有机物组成, 则可以分别计算

出污泥干固体的相对密度  $\gamma_s$  和污泥的相对密度  $\gamma$ 。

污泥干固体的相对密度:

$$\gamma_s = \frac{100\gamma_f\gamma_v}{100\gamma_v + P_v(\gamma_f - \gamma_v)} = \frac{100 \times 2.5 \times 1}{100 \times 1 + 10 \times (2.5 - 1)} = \frac{250}{100 + 15} = 2.174 \text{ g/cm}^3$$

污泥的相对密度:

$$\gamma = \frac{100\gamma_s}{P_w\gamma_s + (100 - P_w)} = \frac{100 \times 2.174}{92 \times 2.174 + (100 - 92)} = \frac{217.4}{208.008} = 1.045 (\text{g/cm}^3)$$

### 2.2.3 污泥体积

污泥体积为污泥中的水份与固体体积之和采用下列公式可以计算出污泥体积

$$V = \frac{W}{P_w} + \frac{S}{P_s}$$

$V$  : 污泥体积 ( $\text{cm}^3$ ) ;

$S$  : 污泥中总固体重量 (g);

$W$  : 污泥中水分重量 (g);

$P_w$  : 污泥中水的密度 ( $\text{g/cm}^3$ ), 一般水的密度取 1;

$P_s$  : 污泥中干固体密度 ( $\text{g/cm}^3$ )。

如闵行水厂污泥经离心机机械脱水后脱水污泥含水率为 60%，称脱水污泥 100g，其中污泥中干固体物质由 90% 无机物组成，10% 由有机物组成，则脱水污泥体积:

已知闵行水厂污泥干固体的相对密度为  $2.174 \text{ g/cm}^3$ ，则脱水污泥体积

$$V = \frac{W}{P_w} + \frac{S}{P_s} = \frac{60}{1} + \frac{40}{2.174} = \frac{60 \times 2.174 + 40}{2.174} = 78.40 \text{ cm}^3$$

### 2.2.4 污泥比阻

污泥比阻常用来衡量污泥的脱水性能，它反映了水分通过污泥颗粒形成泥饼时所受阻力的大小，比阻越小，则表示污泥中水份越容易过滤，在水厂浓缩污泥内若投加了 PAM 絮凝剂能改变水厂脱水污泥的比阻。

污泥比阻公式阐述了单位重量的污泥在一定压力下过滤时，单位过滤面积上的阻力，即单位过滤面积上滤饼单位干重所具有的阻力，单位为 ( $\text{cm/g}$ )。

污泥比阻计算公式如下:

$$\gamma = \frac{2PA^2 \cdot b}{\mu c}$$

- γ：污泥比阻 (cm/g);  
P：污泥抽率恒定真空压力 (Mpa);  
A：滤纸过滤面积 (cm²);  
b：(T/V) / V 关系曲线的斜率;

$$(Pa \cdot s) = \frac{0.00178}{1 + 0.337t + 0.00022t^2} (Pa \cdot s)$$

- μ：粘滞系数  
C=Wb/Vf ;  
Wb：干污泥重量 (g);  
Vf：滤液体积 (ml);  
T：℃水温。

水厂浓缩污泥未投加 PAM 的污泥比阻和投加 PAM 的污泥比阻见图 2.1—图 2.3。

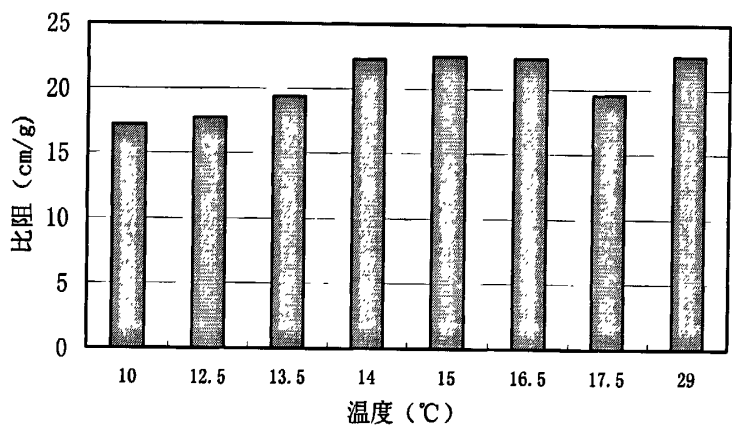


图 2.1 水厂污泥中未投加 PAM 的污泥比阻

排泥水含固率为 3.4%

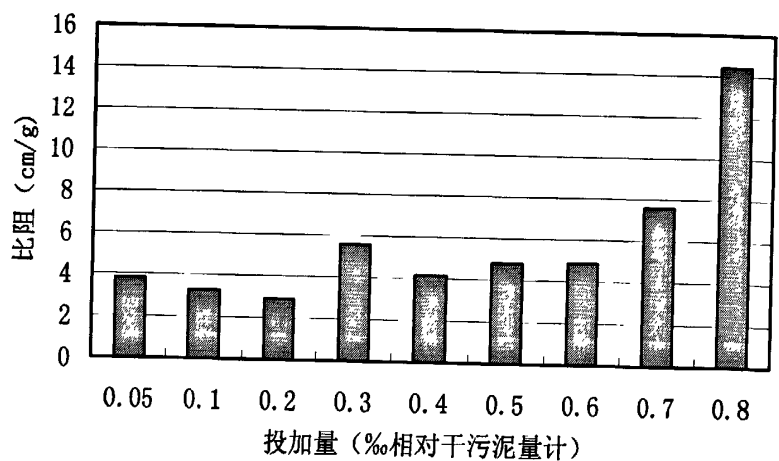


图 2.2 水厂污泥中投加 AN910PWG 型 PAM 污泥比阻

t=14°C 排泥水含固率为 3.4%

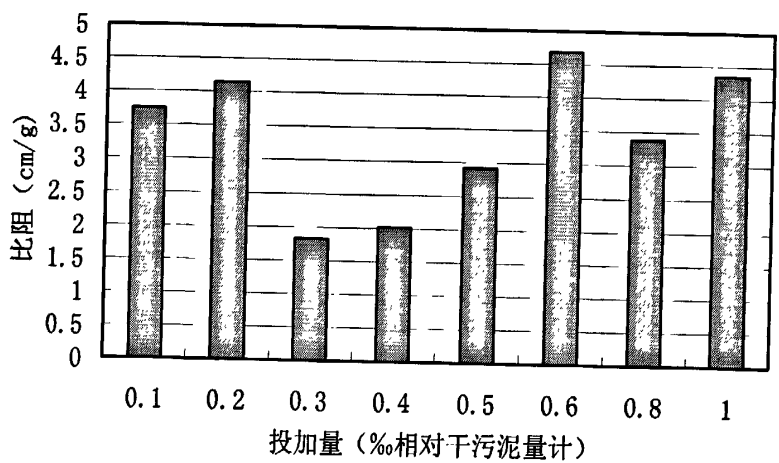


图 2.3 水厂污泥中投加 FA920PWG 型 PAM 污泥比阻

t=13.5°C 排泥水含固率为 3.5%

从图 2.1—图 2.3 来分析污泥中适量投加 PAM 高分子絮凝剂，能使污泥比阻降低近一个数量级，使污泥的脱水性能大大改善。

2.2.5 污泥颗粒粒径

水厂污泥颗粒粒径大小影响着污泥的可塑性，以及排泥水中污泥自然沉降特性和浓缩污泥的压密性能。为研究黄浦江水源，黄浦江引水水源和长江水库水源，

其原水悬浮物形成的污泥颗粒粒径大小,分别取了闵行水厂浓缩污泥、闵行水厂脱水污泥(投加过阳离子 PAM 和投加过阴离子 PAM),以及杨树浦水厂(上游引水)浓缩污泥和月浦水厂(长江陈行水库原水)浓缩污泥经自然晾干,送检测单位将污泥经过超声波震荡溶解后进行颗粒粒径分布测定,其结果见表 2.4 和表 2.5。

表 2.1 不同水源给水厂污泥颗粒粒径分布测试值

| 样品名称                      | 闵行水厂<br>浓缩污泥 | 闵行水厂脱<br>水污泥(阳) | 闵行水厂脱水<br>污泥(阴) | 杨树浦水<br>厂浓缩污<br>泥 | 月浦水厂<br>浓缩污泥 |
|---------------------------|--------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------|
| 粒径范围<br>( $\mu\text{m}$ ) | 累积重量百分率(Wt%) |                 |                 |                   |              |
| <0.03                     | 5.8          |                 |                 |                   | 12.6         |
| <0.50                     | 14.9         |                 | 12.6            | 12.5              | 22.1         |
| <0.70                     | 18.8         |                 |                 |                   | 35.8         |
| <1.00                     | 22.9         | 12.8            | 21.4            | 20.6              | 42.0         |
| <2.00                     | 33.5         | 22.0            | 33.8            | 32.0              | 58.4         |
| <4.00                     | 42.2         | 31.6            | 46.6            | 44.5              | 74.6         |
| <7.00                     | 57.4         | 42.5            | 63.2            | 56.3              | 83.8         |
| <10.00                    | 64.2         | 47.4            | 71.2            | 62.0              | 87.2         |
| <15.00                    | 76.6         | 57.4            | 79.2            | 75.2              | 90.2         |
| <20.00                    | 84.6         | 67.5            | 83.4            | 83.8              | 92.2         |
| <25.00                    | 97.2         | 74.4            | 91.6            | 92.1              | 100.0        |
| <30.00                    | 100.0        | 79.4            | 93.8            | 94.4              |              |
| <40.00                    |              | 91.3            | 100.0           | 100.0             |              |
| <50.00                    |              | 98.7            |                 |                   |              |
| <60.00                    |              | 100.0           |                 |                   |              |
| 中心粒径                      | 5.5          | 11.2            | 4.6             | 5.4               | 1.5          |

|      |  |  |  |  |  |
|------|--|--|--|--|--|
| (μm) |  |  |  |  |  |
|------|--|--|--|--|--|

备注： 测定方法：光透沉降法  
测定单位：中国科学院上海硅酸盐研究所。

表 2.2 不同水源给水厂污泥颗粒粒径分布值

| 颗粒名称         | 砂粒   |         |        | 粉粒    |      | 粘粒   | 备注            |
|--------------|------|---------|--------|-------|------|------|---------------|
|              | 粗    | 中       | 细      | 粗     | 细    |      |               |
| 颗粒直径<br>(μm) | >250 | 250-100 | 100-74 | 74-10 | 10-5 | <5   |               |
| 闵行水厂<br>污泥   | 0    | 0       | 0      | 35.8  | 22.0 | 42.2 | 浓缩污泥          |
| 闵行水厂<br>污泥   | 0    | 0       | 0      | 52.6  | 15.8 | 31.6 | 加阳离子 PAM 脱水污泥 |
| 闵行水厂<br>污泥   | 0    | 0       | 0      | 28.8  | 24.6 | 46.6 | 加阴离子 PAM 脱水污泥 |
| 杨树浦水<br>厂污泥  | 0    | 0       | 0      | 38.0  | 17.5 | 44.5 | 浓缩污泥          |
| 月浦水厂<br>污泥   | 0    | 0       | 0      | 12.8  | 12.6 | 74.6 | 浓缩污泥          |

从表 2.1 和表 2.2 污泥颗粒粒径分布结果分析可得出如下结论：

① 根据污泥颗粒粒径大小分类,粗砂粒径大于 250μm 中砂粒径在 250—100 μm 之间,细砂粒径在 100—74μm 之间,粗粉粒粒径在 74—10μm,细粉粒粒径在 10—5μm,粘粒粒径小于 5μm。通过污泥粒径分布测定知道不论黄浦江上游水源水厂,引黄浦江上游水源水厂,长江陈行水库水源水厂,其原水中悬浮物经水厂净化后所形成的沉降污泥颗粒都很细小,处于砂粒粒径范围内的污泥颗粒粒径所占比例为零。处于粗粉粒粒径范围所占比例最大值 52.6%是闵行水厂脱水污泥(投加过阳离子 PAM 高分子絮凝剂),处于粗粉粒范围最小值 12.8%是月浦水厂浓缩污泥。

② 通过对三个水源所形成的污泥颗粒粒径分布测定,长江陈行水库水源原水悬浮物形成的污泥颗粒粒径更为细小,小于 5μm 粘粒约占 75%,小于 1μm

粘粒约占 40%以上。粒度细小的粘粒所组成的污泥必定会造成污泥在自然沉降时速率减缓,形成的浓缩污泥压密性能降低。

黄浦江水源原水悬浮物形成的污泥颗粒粒径分布,其小于  $5\mu\text{m}$  和小于  $1\mu\text{m}$  粘粒分别占污泥 40%左右和 20%左右,其污泥沉降浓缩性能和压密脱水性能要优于前者。

③一般情况下,污泥粘粒组分越多,其污泥粘性越大,粘性越大,污泥可塑性越好,通常判断污泥中粘粒组分大于 15%,污泥属粘土或亚粘土范围(当然污泥成分属硅酸盐类)。

④另外,污泥颗粒粒径组成对于污泥烧结时膨胀性能的好坏有直接影响,在一般情况下,粘土的细颗粒含量愈多,膨胀性能愈好。自然粘土是由各种大小不同的颗粒组成的,不同粒径的颗粒,其矿物种类,化学成份不同,因而物理、化学性质也不同。下面将粘土的粒径划分及土粒特征列入表 2.6。

表 2.3 粘土的粒径划分及土粒特征

| 粒组名称 | 粒径范围 (mm)                                               | 一般特征                                          |
|------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 砂粒   | 粗: 2-0.5<br>中: 0.5-0.25<br>细: 0.25-0.1<br>极细: 0.1-0.075 | 易透水,无粘性,遇水不膨胀,干燥时分散,毛细水上升高度不大,随粒径度小而增大。       |
| 粉粒   | 粗: 0.075-0.01<br>细: 0.01-0.005                          | 透水性小,湿时稍有粘性,遇水膨胀小,干时稍有收缩,毛细水上升较大,较快,极易出现冻胀现象。 |
| 粘粒   | < 0.005                                                 | 透水性小,湿时有粘性,可塑性,遇水膨胀大,干时收缩显著,毛细水上升高度大,但速度缓慢。   |

### 2.2.6 污泥塑性

对自然粘土,如颗粒很细,所含粘土矿物成份较多,故水对其性能影响也较大。

粘土从泥浆到坚硬,经历了几个不同的物理状态,当含水量小时,粘土呈半坚硬状态,当进一步增加粘土中水的含量,此时粘土中土粒与土粒之间距离加大,粘土呈现可塑状态,如粘土中再注入较大水量时,粘土就变成液体流动状态,体积增加。由此可知:粘土随着含水量的增加可分别处于固态、半固态、可塑状态和流动状态。粘土的塑性指数即可测定粘土的塑限和液限所得。

水厂脱水污泥干枯后经测试液限 WL 为 55.6，塑限 WP 为 42.6，污泥塑性指数为 8—13，具体测定结果见表 2.3。

表 2.3 闵行水厂脱水污泥可塑性测定结果

| 土样名称                    | 液限 (WL) | 塑限 (WP) | 塑性指数 |
|-------------------------|---------|---------|------|
| 05-1# (05 年 2 月) 水厂脱水污泥 | -       | -       | 8    |
| 05-2# (05 年 8 月) 水厂脱水污泥 | 55.6    | 42.6    | 13.0 |

2.2.7 水厂污泥岩相鉴定

水厂污泥岩相鉴定结果见表 2.4。

表 2.4 水厂脱水污泥岩相鉴定结果

| 编号    | 鉴定样品名称日期                                       | 镜下描述                                                                                                                                   |
|-------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 05-1# | 2005 年 2 月<br>闵行水厂脱水污泥块样本：<br>淡绿色、结构均一         | 该土块具粉砂结构，以粉砂为主，泥质次之。粉砂(0.01~0.1mm)以石英为主，棱角状、次棱角状，另有云母少量。泥质物 (<0.01mm)，以水云母为主，可能会有蒙脱石、高岭石等，粘土少量，土块成份结构均一，若经成岩作用会变为泥质粉砂岩，物质构成主要泥质物，粉砂结构。 |
| 05-2# | 2005 年 8 月<br>闵行水厂脱水泥块样本：<br>淡绿色，结构均一，遇水无明显变化。 | 物质组成：主要为粉砂，泥质物次之。泥土具粉砂结构。以粉砂为主，泥质物次之。粉砂 (0.01-0.1mm) 为石英，次棱角状，泥质物 (<0.01mm) 以水云母为主，可能含少量蒙脱石或                                           |

|  |  |                                                    |
|--|--|----------------------------------------------------|
|  |  | 高岭石，均呈微细鳞片集合体，泥土中发现少量铁质。泥土成份、结构均一，分选性中等，鉴定结论，泥质粉砂。 |
|--|--|----------------------------------------------------|

注：样品鉴定均由中国地质部杭州中心实验室检测。

2.3 水厂污泥化学组成及组分

2.3.1 水厂污泥无机矿物质组成组分

污泥的无机矿物质组分，主要是硅 Si、铁 Fe、铝 Al、钙 Ca 等元素的氧化物和氢氧化物组成，水厂污泥中这些无机矿物质通常对环境而言是惰性的，但水厂污泥无机矿物质各元素含量的多少对污泥综合利用、特别对污泥作为粘土资源用于制砖、瓦、陶粒等建筑材料的适用性有较大的影响，以及污泥中无机矿物质组分含量还影响着污泥中重金属的存在形态和可溶性比例。

表 2.5 为不同原水给水厂污泥烧失减重与污泥无机氧化物组分测定，结果表明，黄浦江水源原水、长江水库水源原水在自来水净化后形成的沉淀浓缩污泥和机械脱水污泥中无机矿物质组分有一定的差异。

表 2.5 不同原水给水厂污泥烧失减重与污泥无机氧化物组分测定

| 测定<br>结果 (%)<br>测定项目           | 样品名称<br>闵行水厂<br>浓缩污泥 | 闵行水厂浓缩<br>污泥投加阳<br>PAM 脱水污泥 | 闵行水厂浓缩<br>污泥投加阴 PAM<br>脱水<br>污泥 | 杨树浦水<br>厂脱水污<br>泥 | 月浦水厂<br>脱水污泥 |
|--------------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------|--------------|
| 烧失减重                           | 12.84                | 11.32                       | 15.20                           | 14.04             | 13.08        |
| SiO <sub>2</sub>               | 52.82                | 57.06                       | 49.30                           | 50.62             | 46.46        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20.05                | 18.48                       | 21.66                           | 21.34             | 24.18        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6.22                 | 5.58                        | 6.14                            | 6.17              | 7.37         |
| CaO                            | 1.34                 | 1.31                        | 1.33                            | 1.37              | 1.72         |
| MgO                            | 2.17                 | 2.02                        | 2.16                            | 2.26              | 2.72         |

|         |      |      |      |      |      |
|---------|------|------|------|------|------|
| $K_2O$  | 2.21 | 2.15 | 2.40 | 2.43 | 3.05 |
| $Na_2O$ | 1.29 | 1.38 | 0.92 | 1.01 | 0.61 |
| $MnO_2$ | 0.43 | 0.34 | 0.63 | 0.19 | 0.21 |
| $TiO_2$ | 0.38 | 0.36 | 0.37 | 0.39 | 0.39 |

注：① 表 2.5 污泥样品经 105℃ 烘干后测定。

② 表 2.5 数据由中科院上海硅酸盐研究所测试。

从表 2.5 污泥无机氧化物组分测定结果分析可以得出如下诸点结论：

① 泥取样具有代表性：

水厂污泥矿物质组分含量测试为水厂污泥综合利用能否实施提供依据，故考虑污泥样品采集要有代表性，即含黄浦江水系（上游引水原水，直接取黄浦江上游原水）又含长江水系（陈行水库水源原水）。以及三个代表性水厂（闵行水厂、杨树浦水厂、月浦水厂）和三种代表性污泥来源（浓缩污泥、投加阳离子聚丙烯酰胺脱水污泥、投加阴离子聚丙烯酰胺污泥）。

② 对污泥样品共进行了九项无机氧化物组分含量测定，除了其中具有代表性矿物质元素  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $CaO$  等四项氧化物组分测定而外，还对  $MgO$ 、 $K_2O$ 、 $Na_2O$ 、 $TiO_2$ 、 $MnO_2$  等五项无机氧化物进行了组分含量的测定。

除了烧失减重、二氧化硅、三氧化铝、三氧化铁各水厂污泥组分含量略有差异之外，其他六项无机氧化物组分含量大致相同。

③ 从分析数据来看，水厂污泥  $SiO_2$  组分含量大致在 46%—57%， $Al_2O_3$  组分含量在 18%—24% 之间， $Fe_2O_3$  组分含量大致在 5%—7% 之间， $CaO$  含量大致在 1%—2% 之间。

④ 污泥中  $SiO_2$  含量多少和原水浑浊度有很大关系，一般情况下原水悬浮物高浑浊度就高，水厂沉淀污泥中相对来说  $SiO_2$  含量就高，污泥中  $SiO_2$  含量较高时，将水厂污泥用于制砖、瓦、陶粒等建筑材料以及作水泥烧制熟料的参合料有很大的综合利用价值。

⑤ 污泥  $Al_2O_3$  来源除了原水中含少量铝元素而外，大部分  $Al_2O_3$  含量是在水厂净水过程中投加混凝剂硫酸铝或聚合硫酸铝或氯化铝。 $Al_2O_3$  含量的高低影响着污泥制粘土砖和粘土陶粒烧结质量和烧结温度范围。

水厂污泥  $Al_2O_3$  组分含量较高时，可在浓缩污泥中投加适量硫酸提取再生混凝剂硫酸铝。这也是水厂污泥综合利用的另一种方法。日本横滨小雀水厂就因污泥含铝较高，采取再生硫酸铝回收。

⑥ 水厂污泥  $SiO_2$  组分含量与  $Al_2O_3$  存在一定的比值关系。污泥中  $SiO_2$  组分含

量与  $Al_2O_3$  组分含量比值闵行水厂污泥为 2.65，杨树浦水厂污泥为 2.37，月浦水厂污泥为 1.92。二者比值越大，排泥水污泥沉降速率越快，沉降后的浓缩污泥越容易压密脱水，反之排泥水沉降速率越慢，浓缩污泥越不容易压密脱水。

另外比值大小还影响着脱水污泥干燥后板结程度的大小，比值越小，污泥干燥后板结程度越大。

### 2.3.2 水厂污泥毒害性无机物组成组分

检测水厂污泥中毒害性无机物主要包括砷 (As)、镉 (Cd)、铬 (Cr)、汞 (Hg)、铝 (Al)、锌 (Zn)、镍 (Ni) 等 8 种元素。测定污泥中毒害元素可通过污泥各毒害元素的生物水溶液，酸性水溶液和络合可交换态比例或采用等离子体发射光谱和原子荧光光度计来测试污泥中毒害元素含量，从而确认对水厂污泥合理处置和综合利用的可行性，因为水厂污泥重金属含量的高低是直接影响环境的可接受性。污泥中含毒害重金属对动植物生长和人类健康会造成很大影响。

不同水源给水厂污泥中重金属含量测定值见表 2.6。

表 2.6 不同水源给水厂污泥中重金属含量测定 (单位 mg/Kg)

| 测定参数   | 闵行水厂污泥 | 闵行水厂污泥 (阳) | 闵行水厂污泥 (阴) | 杨树浦水厂污泥 | 月浦水厂污泥 | 检测限    |
|--------|--------|------------|------------|---------|--------|--------|
| 砷 (As) | 40.2   | 16.9       | 39.2       | 51.8    | 66.0   | 2.00   |
| 镉 (Cd) | 0.175  | 0.152      | 0.155      | 0.170   | 0.205  | 0.100  |
| 铬 (Cr) | 180    | 184        | 193        | 164     | 155    | 0.400  |
| 汞 (Hg) | 0.235  | 0.182      | 0.223      | 0.255   | 0.476  | 0.0005 |
| 铜 (Cu) | 68.5   | 62.3       | 61.3       | 64.6    | 82.5   | 0.100  |
| 锌 (Zn) | 202    | 211        | 188        | 198     | 177    | 0.100  |
| 铅 (Pb) | 35.0   | 32.9       | 37.0       | 36.4    | 43.4   | 1.00   |
| 镍 (Ni) | 58.7   | 52.9       | 53.3       | 60.9    | 52.4   | 1.00   |
| 硒 (Se) | ND     | ND         | ND         | ND      | ND     | 2.00   |
| 锰 (Mn) | 3190   | 2680       | 4070       | 1510    | 901    | 0.100  |

注：① 表 2.6 数据由上海市环境监测中心测试。

② ND 表示低于检测限。

#### 2.3.2.1 关于毒害重金属元素毒害性

砷 (As) 砷是一种有毒的金属，煤燃烧会产生大量的砷，排放到环境中，早

期的农药和煤烟一样含有大量有毒的砷化合物,美国环保局已将砷列为人类的致癌物质。

镉(Cd) 镉来源于电镀和采矿废物,镉与锌的化学性质相似,它可以置换锌,并表现出剧烈的镉毒性(肾脏损伤、高血压和血红细胞破坏)美国环保局正将镉列为人类的可疑致癌物质。

铬(Cr) 铬来源于电镀和采矿废物,它是一种微量元素,美国已将六价铬列为人类的致癌物质。

铜(Cu) 铜来源于工业废弃物的排放,采矿废物及矿物淋洗,铜也是一种痕量元素,对动物毒性不大,但中等含量就会对植物和藻类产生毒害作用,铜不是致癌物质。

铅(Pb) 铅源于工业冶炼和采矿业,以及铅管工程,含铅矿物和含铅汽油等,它可导致肾脏、生殖系统、肝脏、脑得病及中枢神经系统功能紊乱等,美国环保局正将铅列为人类的可致癌物质。

汞(Hg) 汞是受到关注最多的重金属污染物,它来源于矿业、矿物煤燃烧物、农药、电池和药物分析产物。汞可产生神经系统的损坏,呼吸的阻碍、抑郁症等,汞可以以可溶性有机汞化合物的形成在海洋食物中积累,美国环保局到目前为止还没有指出汞的致癌性,尚缺乏足够的证据。

镍(Ni) 镍源于矿物和工业废物的排放,镍的缺乏并没有被证明会对动物和植物的正常生长发育产生负面影响,但过量的镍却会对动物和人类产生毒害作用。美国环保局已将镍列为人类的可疑致癌物质。

锌(Zn) 锌源于工业废物、金属电镀和制铅工业,锌是许多金属酶所必需的元素,并且有助于伤口愈合,但含量过高会对植物产生毒害作用。污泥中若有相当数量的锌含量,必然限制了污泥土地的利用价值。

硒(Se) 硒源于矿物、煤和工业废物,自然界需要少量的硒,但高浓度时具有一定的毒害作用,由于缺乏足够的证据,美国环保局还没有确定硒的致癌性。

钼(Mo) 钼来源于自然资源及工业废弃物,它对动物可能具有毒性影响,而作用于植物的毒性则已经得到确定,由于缺乏足够的证据,美国环保局没有把钼列为致癌物质。

2.3.2.2 水厂污泥毒害金属含量与国家土壤环境质量比较

闵行水厂浓缩污泥脱水污泥和杨树浦水厂浓缩污泥以及月浦水厂浓缩污泥重金属含量检测结果与表 2.7 土壤环境质量(GB15168—95)比较:

表 2.7 土壤环境质量标准(GB15168—95) (单位: mg/kg)

| 级别 | 一级 | 二级 | 三级 |
|----|----|----|----|
|----|----|----|----|

| 土壤 pH 值 | 自然背景 | <6.5 | 6.5-7.5 | >7.5 | >6.5 |
|---------|------|------|---------|------|------|
| 镉≤      | 0.20 | 0.30 | 0.30    | 0.60 | 1.0  |
| 汞≤      | 0.15 | 0.30 | 0.50    | 1.0  | 1.5  |
| 砷水田≤    | 15   | 30   | 25      | 20   | 30   |
| 旱地≤     | 15   | 40   | 30      | 25   | 40   |
| 铜农田等≤   | 35   | 50   | 100     | 100  | 400  |
| 果园≤     |      | 150  | 200     | 200  | 400  |
| 铅≤      | 35   | 250  | 300     | 350  | 500  |
| 铬水田≤    | 90   | 250  | 300     | 350  | 400  |
| 旱地≤     | 90   | 150  | 200     | 250  | 300  |
| 锌≤      | 100  | 200  | 250     | 300  | 500  |
| 镍≤      | 40   | 40   | 50      | 60   | 200  |

砷 (As)：含量除闵行水厂污泥（投加过阳离子 PAM）符合土壤环境质量二级、三级标准外，其余四份样品砷含量均超出水田、旱地一级、二级、三级土壤环境质量标准。

镉 (Cd)：五份泥样中只有月浦水厂浓缩污泥镉含量 0.205mg/kg，微量超出土壤环境质量一般标准，其余样品污泥全部符合土壤环境一、二、三级质量标准。

铜 (Cu)：五份水厂污泥样品铜含量都超出土壤环境质量一级标准和酸性土壤二级标准。

铅 (Pb)：五份水厂污泥样品含量测定结果，基本上符合农田土壤环境质量二级三级标准。

汞 (Hg)：五份水厂污泥样品中，汞含量超出土壤环境质量一级标准，但符合二级土壤环境质量标准。

2.3.2.3 水厂污泥重金属含量检测结果与农用污泥中污染物控制标准比较

水厂污泥重金属含量检测结果与农用污泥中污染物控制标准比较水厂五份污泥样品重金属检测结果,其含量远低于我国农用污泥中污染重金属控制的各项指标,见表 2.8 农用污泥中污染物控制标准以及世界代表性国家重金属含量控制范围。

表 2.8 农用污泥中污染物控制标准 (GB4284—84) 以及世界代表性国家重金属控制范围  
(单位: mg/kg)

| 测定<br>参数 | 农业部规定农用污<br>泥标准 |             | 美国污水<br>污泥 (94) | 英国污水<br>污泥 (94) | 瑞典污水<br>污泥 (94) | 日本污水<br>污泥 (94) |
|----------|-----------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|          | 酸性<br>土壤        | 中性或碱<br>性土壤 |                 |                 |                 |                 |
| 砷 (As)   | 75              | 75          | —               | —               | —               | 1.4             |
| 镉 (Cd)   | 5               | 20          | 12              | 107             | 6.7             | 2.1             |
| 铬 (Cr)   | 600             | 1000        | 380             | 887             | 86              | 49              |
| 汞 (Hg)   | 5               | 15          | —               | —               | —               | —               |
| 铜 (Cu)   | 250             | 500         | 700             | 1121            | 560             | 210             |
| 锌 (Zn)   | 500             | 1000        | 2200            | 2874            | 1570            | 1200            |
| 铅 (Pb)   | 300             | 1000        | 480             | 900             | 180             | 52              |
| 镍 (Ni)   | 100             | 200         | 52              | 201             | 51              | 39              |
| 钼 (Mo)   | —               | —           | —               | —               | —               | —               |

注: 引自陈同斌等.中国城市污泥重金属含量及其变化趋势.环境科学学报  
2003.23 (5) 561—569

2.3.2.4 水厂污泥重金属含量与上海土壤背景调查结果相比

表 2.9 上海市三次土壤背景调查结果 (单位: mg/kg)

| 年份   | 项目  | Cd    | Zn   | Cu   | Pb   | Ni | Cr   | Hg    | As   |
|------|-----|-------|------|------|------|----|------|-------|------|
| 1978 | 代表值 | 0.134 | 76.8 | 23.5 | 21.3 |    | 64.6 | 0.216 | 8.95 |

|      |     |       |       |       |       |       |       |       |      |
|------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 1983 | 代表值 | 0.15  | 81.2  | 24.6  | 19.3  |       | 69.1  | 0.15  | 8.88 |
| 1987 | 代表值 | 0.12  | 83.68 | 28.37 | 25.35 | 31.19 | 74.88 | 0.092 | 8.76 |
| 平均   |     | 0.135 | 80.56 | 35.49 | 21.98 | 31.19 | 69.53 | 0.153 | 8.86 |

表 2.9 上海市三次土壤背景调查结果与表 2.10 不同水源给水厂污泥中重金属含量相比,五份泥样中, Cd、Zn、Cu、Pb、Ni、Hg、As、Cr 八项重金属含量全部超出上海市土壤环境背景值。

### 2.3.3 水厂污泥中有机物质组分

由于污泥中有机物分子结构组成状况十分复杂,不能将污泥中有机物组分一一测定,但是污泥中有机物大致包含毒害性有机物、有机生物物质、有机官能化合物、微生物等组成。为了考虑水厂污泥中特殊有机物成份含量进行了测定(见表 2.14)。如动植物油、石油类、苯胺类、硝基苯类、苯并( $\alpha$ ) 芘等项目。

检测结果,黄浦江水源原水沉降污泥与长江水库水源原水沉降污泥都未检出硝基苯和苯并( $\alpha$ ) 芘,但前者污泥中动植物油和石油类含量要大 3—10 倍。

测定水厂污泥中有机物含量还可以用烧失减重来衡量,污泥中有害有毒有机物、氯苯类、木质素、脂肪类微生物、寄生虫卵等都可以通过灼烧而减量。通过对闵行水厂、杨树浦水厂、月浦水厂污泥烧失减重,测定结果:水厂污泥烧失减重在 10%—16%之间,不同水源给水厂污泥特殊成份测定结果见表 2.14。

污泥烧失减重数值大小对污泥综合利用有很大影响,特别是污泥制作窑制品砖瓦建材的利用关系密切,烧失减重越大,砖瓦泥坯在晾干时易出现裂缝,泥坯高温烧结再冷却后易出现龟裂现象。加过高分子絮凝剂阳离子 PAM 闵行水厂脱水污泥烧失减重大于 15%,更不利于直接利用污泥烧结砖瓦。

但是烧失减重较大的污泥说明此污泥含有一定有机物质和热值可利用,此污泥制陶粒有利于烧结温度的降低和制品堆积密度的降低。

表 2.10 不同水源给水厂污泥特殊成分测定结果

| 测定项目 | 闵行水厂污泥 | 闵行水厂污泥阳 | 闵行水厂污泥阴 | 杨树浦水厂污泥 | 月浦水厂污泥 | 检出极限 |
|------|--------|---------|---------|---------|--------|------|
| pH 值 | 7.66   | 7.14    | 7.24    | 7.53    | 7.74   | /    |

|                  |      |      |      |      |      |      |
|------------------|------|------|------|------|------|------|
| 动植物油             | 27.0 | 80.0 | 47.8 | 26.0 | 8.1  | 0.1  |
| 石油类              | 162  | 142  | 97.2 | 123  | 20.0 |      |
| 挥发酚              | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | 0.02 |
| 硫化物              | 0.74 | 0.75 | 0.95 | 0.58 | 0.92 | 0.05 |
| 苯胺类              | ND   | 0.56 | ND   | ND   | 0.81 | 0.2  |
| 硝基苯类             | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | 1.3  |
| 甲醛 <sup>1</sup>  | 0.16 | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.15 | 0.05 |
| 氟化物 <sup>1</sup> | 2.09 | 1.28 | 1.10 | 1.33 | 0.48 | 0.05 |
| 苯并(α)芘           | ND   | ND   | ND   | ND   | ND   | 0.05 |

备注：① 表 2.10 数据由上海市环境检测中心测试；  
② 上标为 1 的参数表示浸出液所用单位为 mg/L；  
③ 其余参数除 pH 值外，所有单位为 mg/Kg；  
④ ND 表示低于检出极限。

2.3.4 水厂污泥放射性物质测定

水厂污泥放射性检测值基本上和自然界粘土检测值接近，检测结果见表 2.11。

表 2.11. 不同水源给水厂污泥放射性物质测定结果

| 测定项目    | 闵行水<br>厂污泥          | 闵行水厂<br>污泥阳         | 闵行水厂<br>污泥阴         | 杨树浦水<br>厂污泥         | 月浦水<br>厂污泥          | 检出<br>极限 |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------|
| 总 α 放射性 | 4.2×10 <sup>3</sup> | 4.2×10 <sup>3</sup> | 4.8×10 <sup>3</sup> | 4.0×10 <sup>3</sup> | 4.7×10 <sup>3</sup> |          |
| 总 β 放射性 | 5.6×10 <sup>2</sup> | 4.7×10 <sup>2</sup> | 4.8×10 <sup>2</sup> | 5.0×10 <sup>2</sup> | 7.4×10 <sup>2</sup> |          |

备注：① 表 2.11 数据由上海市辐射环境监测站测试。  
② 放射性单位为 Bq/Kg。

## 第3章 利用水厂脱水污泥烧结多孔砖生产试验

### 3.1 前言

上海地区先天不足的是极其缺乏天然烧结材料——粘土资源,为了保护土地资源,保护生态环境,提倡使用保温节能墙体材料,2000年10月12日上海市政府颁发了“上海市禁止和限止使用粘土砖管理暂行办法”的通知,规定了禁止和限止了上海地区对土地资源的采掘,同时也禁止和限制了粘土砖的生产和使用,更不准生产实心普通平板红砖。

上海是著名的国际大都市,正朝着国际金融中心、经贸中心、信息中心、航运中心的目标迈进,然而,上海又是一个综合性的工业基地,每天产生众多的各类工业废弃物,因此,探索和研究工业废弃物的利用技术,促使走经济的可持续发展道路,以弥补天然建材资源的不足,这既是当前经济建设的需要,又是社会发展、环境保护的要求,因此具有深远的现实意义。

上海市自来水闵行有限公司2002年在“水厂污泥处置及综合利用的研究”课题中,利用闵行一水厂排泥水处理后的离心机“脱水污泥”代替天然粘土烧结普通实心砖,经检测抗压强度平均值达13.6Mpa,硬度等级达Mpa10。根据粘土砖管理暂行办法的相关精神,上海市水务局、上海市闵行区发展新型墙体材料办公室、上海市自来水闵行、浦东、市南、市北公司等单位在2004年重新立题“水厂脱水污泥建材利用和产业化关键技术研究”,进一步探索利用上海各给水厂每年产脱水湿污泥(含固率40%)657000吨(折算干基污泥262800吨)重点开发研究水厂脱水污泥烧结多孔红砖(符合节能环保墙体材料发展趋势的要求)。若此项探索研究获得进展,对水厂脱水污泥最终处置和利用确是一个突破,既符合相关墙体材料要求,又能较大量消纳水厂脱水污泥排出量。

目前制砖行业每亩地取土 $666\text{m}^3$ ,取土费每亩6000元,每立方运费约10元,每吨土制砖330块,每块砖制造成本约0.14—0.15元,目前每块砖销售价格约0.24—0.25元,则每块砖差价为0.10元。

按脱水污泥干基262800吨

① 年可省取土费 $[6000 \div (666 \times 2)] \times 262800 = 1183784$ 元

- ② 年可省开采农地  $262800 \div (666 \times 2) = 197$  亩
- ③ 年泥量可以制空心红砖  $330 \text{ 块} \times 262800 = 86724000$  块
- ④ 按每块砖差价 0.1 元计, 则可获利  $0.1 \times 86724000 = 8672400$  元

上述推理在水厂脱水污泥可能制砖的情况下, 其结果只能通过生产试验加以证实。

## 3.2 烧结粘土多孔砖对粘土的要求

### 3.2.1 适合制砖的天然粘土组分及特征

粘土是由天然岩石经过长期自然风化作用形成的, 其组成可分为两部分: 一是粘土矿物, 如叶蜡石 ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )。粘土矿物使粘土具有可塑性及粘性。另一部分使杂质矿物, 如石英砂、云母、长石、黄铁矿、硫酸盐以及有机物, 杂质使粘土熔融温度降低及影响其可塑性。

粘土由不同颗粒组成。粘土质颗粒粒径小于 0.005mm, 尘土颗粒粒径 0.005—0.15mm。根据含粘土质颗粒不同, 分为粘土、亚粘土(砂质粘土)及砂土。制粘土多孔红砖必须为粘土和亚粘土, 亚粘土中粘土质颗粒含量要大于 15%。粘土中烧失减重(有机物含量)较低, 粘土为可塑性较好。

按耐火度粘土可分为: 耐火粘土, 融化温度在 1580℃以上, 用来制造耐火砖及其他陶瓷制品。易熔粘土, 融化温度低于 1350℃, 主要用来制造普通砖, 难熔粘土, 融化温度在 1350—1580℃之间, 主要用于制造铺路砖及陶瓷。

### 3.2.2 水厂污泥组分及特征

要探索水厂脱水污泥制砖的可能性, 特别是水厂脱水污泥制多孔红砖的可能性, 必须分析水厂脱水污泥与天然粘土在化学组分、污泥颗粒粒径大小、污泥的可塑性及干污泥再加水的可塑性是否具备与天然粘土性质相似之特征。

① 水厂污泥化学组分中  $\text{SiO}_2$  组分大致在 49—57%之间,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  组分大致在 18%—22%之间,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  组分大致在 5%—6%之间, 水厂污泥主要化学组分基本上和天然粘土组分成份相接近。 $\text{SiO}_2$  含量略偏低,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  略偏高。

② 水厂污泥颗粒级配分布。污泥属粘土范围，粒径都小于 74 μ m，无砂粒存在，粉粒约占 60%，粘粒约占 40%，湿污泥非常细腻。

③ 水厂污泥中杂质最大含量为烧失减重 11—15%，这对污泥制砖坯和烧结成品砖是最不利因素之一，因为烧失减量越大，说明污泥中有机物含量越大，制砖坯时，晾干裂缝可能性就越大，砖坯进窑烧结时龟裂程度就越大。

④ 水厂污泥可塑性是一个不可逆的现象，脱水污泥含水率在 40—50%时污泥可塑性极佳，随着日晒或风吹，污泥中表面水分逐渐丢失后，污泥逐渐变硬，边角锋利，污泥中细微颗粒逐渐变粗，失去可塑性能，若再向变硬的污泥中注入水分，经研磨污泥就变成细砂，完全失去了粘性和可塑性，这就说明水厂脱水污泥可塑性呈单向存在，而不可逆再生，这可能和脱水污泥中投加了高分子 PAM 有着密切的关系，若改变污泥塑性，可将硬块污泥磨细成粉再重新加入可塑性的材料，才能恢复污泥的塑性指标。

3.2.3 水厂脱水污泥和天然粘土性质异同分析

天然粘土和水厂脱水污泥组成组分和特征加以比较，水厂脱水污泥化学组成组分与天然粘土化学组成组分基本相似，污泥颗粒粒径要比天然粘土颗粒粒径更细小，刚从脱水机外排的水厂脱水污泥可塑性不亚于天然粘土可塑性。

水厂脱水污泥中杂质（有机物或烧失减重）要比天然粘土大，见表 3.1 天然粘土和水厂脱水污泥性质异同比较。

表 3.1 天然粘土和水厂脱水污泥性质异同

| 对比项目 | 天然粘土 | 水厂脱水污泥 |
|------|------|--------|
|------|------|--------|

|      |   |                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                             |
|------|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 化学组分 | 同 | 天然粘土组分由两部分组成：<br>粘土矿物和杂质矿物。前者主要成份为高岭土（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）和铝酸盐矿物，如叶蜡石（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ）；后者含有石英砂、云母、长石、黄铁矿、硫酸盐以及有机物等杂质。 | 水厂脱水污泥主要成份 $\text{SiO}_2$ 含量 50% 左右。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量占污泥组分 20% 左右。其他组分和有机物约为 30%。 |
|      | 异 | 天然粘土杂质组分中含有机物量小。                                                                                                                                                                                                                  | 水厂脱水污泥是无机矿物质组分含有机质烧失减量高达 15%。                                                               |
| 粒径大小 | 同 | 天然粘土由不同颗粒组成：粘土质粒径较小，小于 0.005mm，尘土质粒径中等 0.005—0.15mm，砂土质粒径较粗 0.15—5mm。制粘土陶粒为粘土和亚粘土，粘土质颗粒含量大于 15%。                                                                                                                                  | 水厂污泥颗粒由：<br>粗粉粒（28.8%—52.6%）、<br>细粉粒（15.8%—28.6%）、<br>粘粒（31.6%—46.6%）。                      |
|      | 异 | 天然粘土、砂粒、粉粒、粘粒级配齐全粘土由不同颗粒组成。                                                                                                                                                                                                       | 水厂脱水污泥颗粒只有粉粒和粘粒组成，缺少砂粒。                                                                     |
| 可塑性  | 同 | 粘土和亚粘土加入适量水调制后，可捏塑成各种形状，既不裂缝又能保持原形。当粘土质颗粒含量多，颗粒细级配好时，颗粒比表面积大，吸水多，胶体多，可塑性好。                                                                                                                                                        | 根据水厂污泥颗粒粒径级配组成，属亚粘土。当机械脱水后的水厂污泥（含固率 40% 左右）可堆积，但成型较差，当在堆场滞放二、三日后，其含固率达 70% 左右，这时的污泥可塑性很好。   |
|      | 异 | 当天然粘土晾干后加入适量水分可以恢复粘土的可塑性。                                                                                                                                                                                                         | 当污泥干枯，经粉碎再加入适量水分调制后污泥失去粘性和可塑性，特别脱水污泥加过阳离子 PAM。                                              |

3.3 脱水污泥直接塑化法烧结多孔砖生产试验过程

3.3.1 水厂脱水污泥直接塑化法烧结多孔砖原料制备

由于窑厂制砖选用的自然粘土在制成砖坯时，对自然粘土含水率有一定的要求，但是水厂脱水污泥从离心机卸下时含水率在 35%—45%之间，不能直接用于砖坯制造，故进行水厂污泥平摊晾晒试验和水厂污泥堆积晾晒试验。现将晾晒试验结果介绍如下。

3.3.1.1 污泥平摊晾晒试验

平摊晾晒天数与脱水污泥含水率关系见下表 3.2 和图 3.1。

表 3.2. 污泥平摊晾晒天数与污泥含水率关系

| 晾晒天数 | 天气 | 含水率(%) |
|------|----|--------|
| 1    | 阴  | 57.22  |
| 3    | 阴  | 54.54  |
| 5    | 晴  | 60.05  |
| 7    | 晴  | 61.22  |
| 8    | 晴  | 56.68  |
| 11   | 晴  | 50.56  |
| 15   | 晴  | 50.94  |

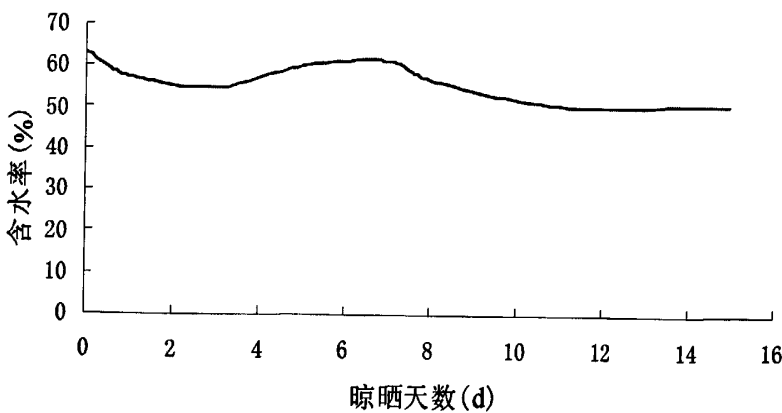


图 3.1. 污泥平摊晾晒天数与污泥含水率关系

水厂污泥晾晒条件，晾晒试验面积为 10m<sup>2</sup>，污泥晾晒高度为 20cm，脱水污

泥的初始含水率为 63%。

污泥晾晒试验结果分析：

- ① 水厂脱水污泥平摊晾晒，随着晾晒天数的增加，污泥的含水率会逐步下降。
- ② 天气对污泥的晾晒有着较大的影响；
- ③ 相邻天数里污泥的含水率变化不大，甚至有所升高；
- ④ 取样点的选取对污泥含水率的测定有很大的影响；
- ⑤ 通过晾晒可以使水厂脱水污泥再脱水，但需要人工翻晒。
- ⑥ 水厂脱水污泥靠自然晾晒费时费工，晾晒面积要大，而且很难掌握制砖坯需要的污泥含水率。

通过试验可以得出结论：脱水污泥靠摊晒，很难把握脱水污泥含水率恰好符合制砖坯所需要的污泥湿度。

3.3.1.2 污泥堆积晾晒试验

污泥堆积和晾晒时间以及污泥深度与污泥含水率关系见表 3. 3a、3. 3b、3. 3c 和图 3. 2。

表 3. 3a 水厂脱水污泥堆积晾晒一个月  
纵深污泥含水率变化情况

| 纵深(cm) | 天气 | 含水率(%) |
|--------|----|--------|
| 0      | 晴  | 15.19  |
| 10     | 晴  | 49.59  |
| 30     | 晴  | 61.57  |
| 40     | 阴  | 59.37  |
| 50     | 晴  | 65     |

表 3. 3b 水厂脱水污泥堆积晾晒二个月  
纵深污泥含水率变化情况

| 纵深(cm) | 天气 | 含水率(%) |
|--------|----|--------|
| 0      | 晴  | 13.34  |
| 10     | 晴  | 46.65  |

|    |   |       |
|----|---|-------|
| 30 | 晴 | 58.19 |
|----|---|-------|

表 3.3c 水厂脱水污泥堆积晾晒三个月

纵深污泥含水率变化情况

| 纵深(cm) | 天气 | 含水率(%) |
|--------|----|--------|
| 0      | 多云 | 10.56  |
| 10     | 多云 | 35.73  |
| 30     | 多云 | 49.59  |

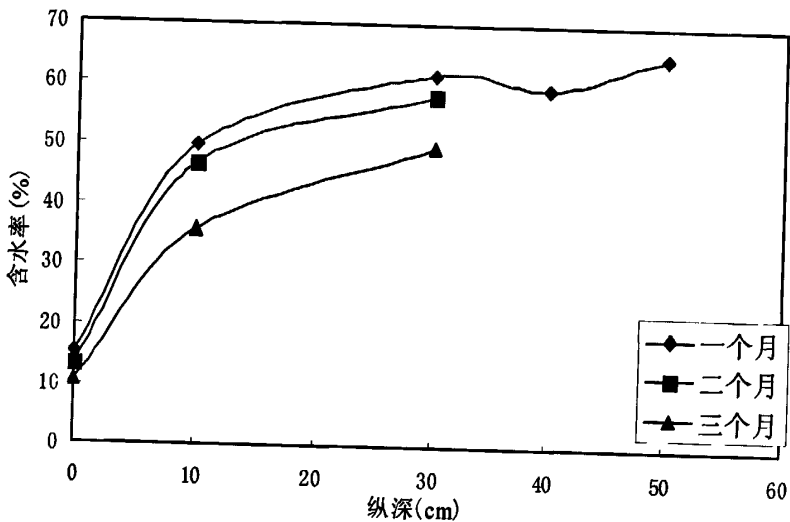


图 3.2 水厂脱水污泥堆积晾晒月数与纵深污泥含水率关系

水厂脱水污泥堆积晾晒条件：

- ① 滤水砖面积 9 平方米，试图污泥水分能从滤水砖下方流出；
- ② 脱水污泥堆积成金字塔型，模拟将来污泥堆积形式；
- ③ 脱水污泥堆积高度 2 米；
- ④ 污泥含水率取样点为堆积中心。

污泥堆积晾晒试验结果分析：

- ① 随着纵深的增加，堆晒污泥的含水率逐渐增大，说明加过 PAM 污泥堆积

中心失水能力很差；

- ② 天气对污泥堆晒的影响较小；
- ③ 投加了 PAM（阴离子）的污泥渗水性能较差；
- ④ 通过堆晒，可以使水厂脱水污泥再脱水，不需要人工翻晒，但耗时长。

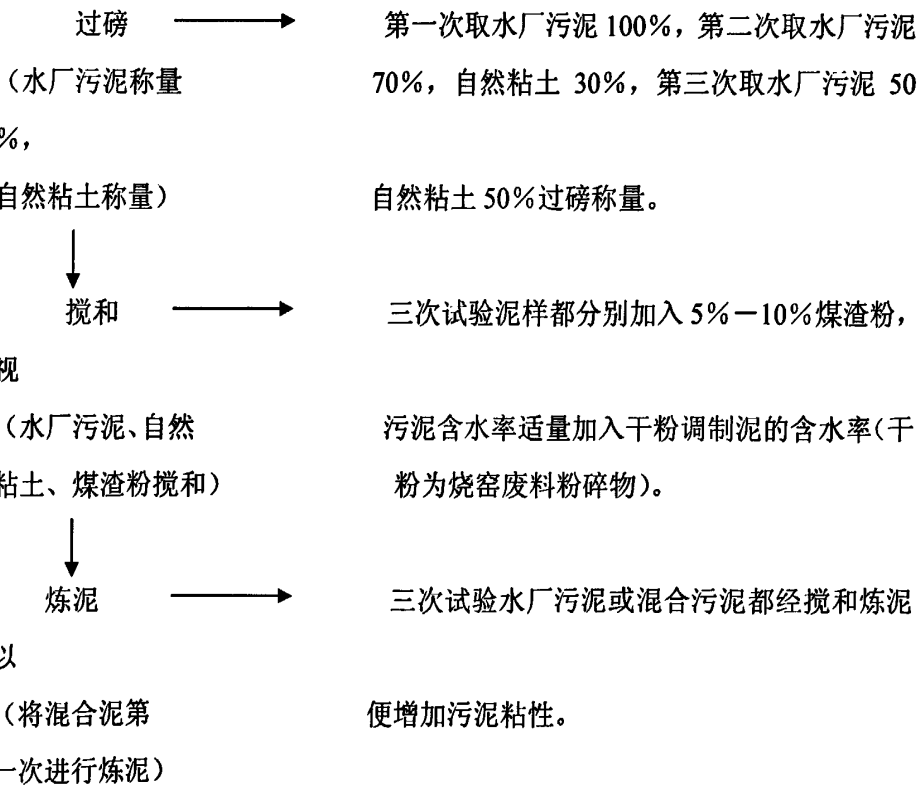
3.3.1.3 晾晒后的水厂脱水污泥运抵沪新窑厂

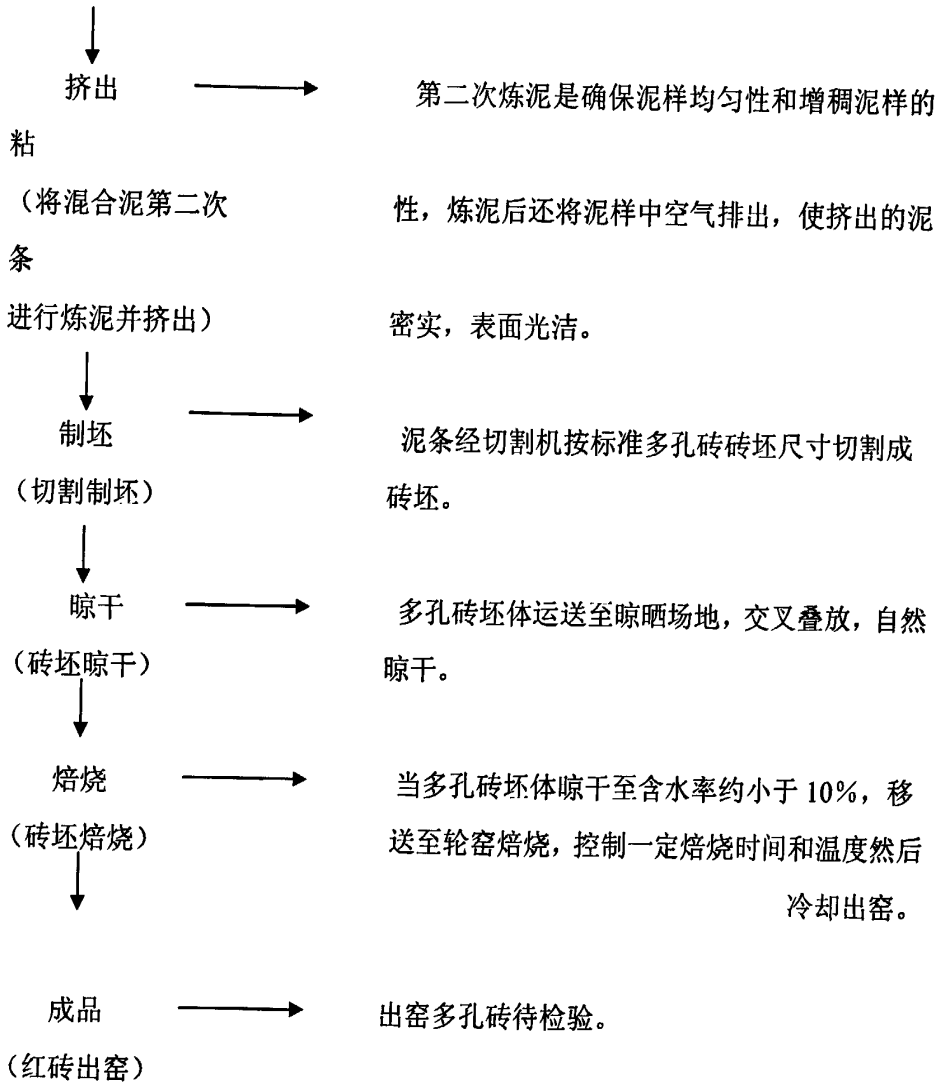
由于水厂脱水污泥刚从离心机卸下时含水率在 60%左右，对制砖坯要求粘土含水率达 10%左右，相差甚远，因此课题组相关人员根据沪新窑厂要求对污泥晾晒，当含水率达到一定程度再运抵窑厂制砖坯。

晾晒过的污泥含水率在 10—15%，沪新窑厂同意污泥运抵窑厂 30 吨污泥进行制砖坯和烧结多孔砖试验。

2004 年 11 月 8 日沪新窑厂厂长章根德本人参与污泥装车，第一辆卡车装 15 吨污泥含水率约 10—15%，第二辆卡车装 5 吨含水率约 10—15%污泥和 10 吨含水率约 50%污泥。

3.3.2 水厂脱水污泥直接塑化法烧结多孔红砖生产试验工艺介绍





### 3.3.3 水厂污泥直接塑化法制多孔砖生产试验过程

#### 3.3.3.1 100%水厂污泥制多孔红砖生产试验

过磅称量水厂脱水污泥含水率约 10%—15%3000 kg，另外加入 10%左右煤渣粉并适量加入干粉，将水厂污泥搅和、经过二次循环炼泥，然后将污泥挤压泥条切割，发现制成的砖坯有毛刺和开裂，并在炼泥过程中发现晾晒太干污泥在滚轮挤压过程中难以压碎并在搅拌机内有打滑现象，所以只制得砖坯约 200 块。

#### 3.3.3.2 70%水厂污泥制多孔红砖生产试验

取水厂污泥约 1400 kg（经过二次炼泥的水厂污泥），然后掺入 600 kg 自然土，再加入 5% 煤渣粉和适量干粉，将污泥样搅和，并再将污泥循环炼泥 2 次（实际水厂脱水污泥参与炼泥四次），经挤压成泥条切割成砖坯质量较好，开裂、毛刺现象大为减少，制得砖坯约 600 块。

3.3.3.3 50%水厂污泥制多孔红砖生产试验

取水厂脱水污泥 600 kg，再过磅称量自然粘土 600 kg，然后加入 10% 煤渣粉和适量干粉，混合经两次循环炼泥，经挤压切割制得砖坯 600 块，砖坯质量较好，无毛刺无开裂。

3.3.3.4 砖坯进窑焙烧

砖坯在晾干过程中发现有裂缝，50% 水厂污泥和 50% 自然粘土混合泥制得得砖坯裂缝略少，2004 年 11 月 29 日进窑烧制。

3.3.4 粘土或污泥制多孔砖焙烧时的物理化学变化

砖坯在干燥和焙烧过程中体积发生收缩，干燥过程的收缩称为气缩。气缩时砖坯中自由水分蒸发，粘土颗粒互相靠近的结果。含水量大，可塑性好的粘土气缩大，普通粘土砖气缩 5—12%。由于加入煤粉或煤渣粉等内燃粘土坯体的气缩大大减少。

砖坯体在焙烧过程中，由于化合水的排除和部分烧结物质填入空隙后，体积缩小，成为烧缩。烧缩率一般为 1—2%，掺入适量的石英类砂粒，可以使制品尺寸准确。自然粘土及水厂脱水污泥掺合制成的砖坯烧结多孔砖的烧成温度在 900—1050℃，若要坯体烧成合格产品，烧成温度必须根据水厂污泥特性和化学组成组分以及掺合自然粘土比例分别加以控制和试验，本次试验未对烧成温度加以研究。

焙烧温度的变化对砖坯体变成红砖制品的过程与焙烧时污泥化学变化有着直接的影响，见表 3.4 污泥、粘土焙烧时的物理化学变化。

表 3.4 污泥、粘土焙烧时物理化学变化

| 焙烧温度 | 物理化学变化 | 变化说明 |
|------|--------|------|
|------|--------|------|

|           |                                                                                                                                                                        |                      |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 20—110℃   | 自由水分蒸发，吸附水开始蒸发                                                                                                                                                         | 现象变干                 |
| 430℃以上    | 高岭土逐渐失去结构水                                                                                                                                                             | 不再有可塑性               |
| 750℃      | 结构水完全失去，形成偏高岭石 ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ )                                                                                                          | 有机物全部被烧掉             |
| 800—900℃  | 碳酸盐分解放出 $\text{CO}_2$ ，生产 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 及 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ， $4\text{FeS}_2 + 11\text{O}_2 \longrightarrow 8\text{SO}_2 + 2\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 空隙变大，坯体颜色变红          |
| 900—1050℃ | 偏高岭土开始分解出游离 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和游离 $\text{SiO}_2$                                                                                                                 | 开始出现液相               |
| >1050℃    | $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 反应生成易熔硅酸盐，将其他杂质固体粘结起来                                                                           | 液相增加，烧结收缩，空隙率下降      |
| 温度更高      | 结晶生成 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 及 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 两种新的铝酸盐                                                                  | 制品强度提高，耐热性提高，化学稳定性提高 |

### 3.4 水厂污泥烧结多孔砖质量检测结果与分析

水厂污泥烧结多孔砖因水厂泥量掺合比不一样，100%水厂污泥制成的砖坯在晾干过程中就发现砖坯开裂现象严重，故没有将 100%污泥制成的砖坯装入轮窑焙烧。现将掺合 75%水厂污泥和掺合 50%水厂污泥制成的砖坯烧结成的多孔砖，经上海市建筑科学研究院检测站质量检测结果见表 3.5。75%水厂污泥烧结多孔砖质量检测值，以及表 3.6。50%水厂污泥烧结多孔砖质量检测值。

表 3.5 75%水厂污泥烧结多孔砖质量检测值

| 检验项目 (单位) | 本产品标准       | 检验结果 | 单项判定 |
|-----------|-------------|------|------|
| 抗压强度：     |             |      |      |
| 平均值 (Mpa) | $\geq 10.0$ | 6.0  | 不合格  |
| 标准值 (Mpa) | $\geq 6.5$  | 4.5  |      |
| 泛霜性能      | 无严重泛霜       | 无泛霜  | 合格   |
| 石灰爆裂      | 见<标准>       | 符合   | 合格   |
| 尺寸偏差：     |             |      | 不合格  |

|                                   |                                      |                                           |     |
|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|-----|
| 平均 (mm)                           | 长±3.0, 宽±2.5, 高±2.0<br>长≤8, 宽≤7, 高≤6 | 长:-13.4 宽:-4.7<br>高:-2.5<br>长:8, 宽:5, 高:2 |     |
| 极差 (mm)                           |                                      |                                           |     |
| 外观质量 (mm)                         | 见<标准>                                | 符合                                        | 合格  |
| 孔洞率 (%)                           | ≥25                                  | 34                                        | 合格  |
| 饱和系数:<br>平均值<br>单块最大值             | ≤0.88<br>≤0.90                       | 0.90<br>0.93                              | 不合格 |
| 5h 煮沸吸水率:<br>平均值 (%)<br>单块最大值 (%) | ≤23<br>≤25                           | 30<br>32                                  | 不合格 |
| 检验结论                              | 本样品不合格                               |                                           |     |

表 3.6 50%水厂污泥烧结多孔砖质量检测值

| 检验项目 (单位)                       | 本产品标准                                | 检验结果                                      | 单项判定 |
|---------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------|------|
| 抗压强度:<br>平均值 (Mpa)<br>标准值 (Mpa) | ≥10.0<br>≥6.5                        | 6.3<br>5.0                                | 不合格  |
| 泛霜性能                            | 无严重泛霜                                | 无泛霜                                       | 合格   |
| 石灰爆裂                            | 见<标准>                                | 符合                                        | 合格   |
| 尺寸偏差:<br>平均 (mm)<br>极差 (mm)     | 长±3.0, 宽±2.5, 高±2.0<br>长≤8, 宽≤7, 高≤6 | 长:-10.1<br>宽:-3.1 高:-1.4<br>长:4, 宽:5, 高:3 | 不合格  |
| 外观质量 (mm)                       | 见<标准>                                | 符合                                        | 合格   |
| 孔洞率 (%)                         | ≥25                                  | 33                                        | 合格   |
| 饱和系数:<br>平均值<br>单块最大值           | ≤0.88<br>≤0.90                       | 0.90<br>0.91                              | 不合格  |

|           |        |    |     |
|-----------|--------|----|-----|
| 5h 煮沸吸水率： |        |    |     |
| 平均值（%）    | ≤23    | 30 | 不合格 |
| 单块最大值（%）  | ≤25    | 30 |     |
| 检验结论      | 本样品不合格 |    |     |

检测结果分析：

① 水厂污泥掺合比 75%和 50%制成的多孔砖经质量检测，八项指标四项合格，四项不合格，总体而言，检测的样品为不合格产品。

② 水厂污泥制多孔砖，外型尺寸收缩，故以检测项目不合格，多孔砖标准尺寸为 240×115×90（mm），但水厂污泥由于含有 12—15%有机物，故制成的标准砖坯经烧结后都呈现很大程度的收缩率，平均砖长收缩 13.4mm 和 10.1mm，多孔砖宽收缩 4.7mm 和 3.1mm，高度收缩 1.4mm 和 2.5mm。

③ 不论掺合 75%和 50%水厂脱水污泥制成的多孔砖抗压强度都不合格。平均值（Mpa）只能分别达到 63%和 60%，其标准抗压强度（Mpa）也只能分别达到 69%和 76%，此值是衡量多孔砖质量的主要指标，从试验结果分析：随着水厂污泥掺合量的增加，制得的多孔砖的抗压强度值亦逐渐变小的现象。

④ 含 75%和 50%水厂脱水污泥制得的多孔砖，5h 煮沸吸水率检测值都不合格，其原因可能水厂污泥中含有机物，故砖坯焙烧时，烧去了砖坯内有机物质和挥发性物质，从而使多孔砖体内留下了较多的孔隙，故增加了 5h 煮沸吸水率。另一个原因是污泥在制砖坯时往污泥中投加少量干粉，故在制砖坯时也影响了泥坯抽真孔度，使砖坯体密实程度受到了影响，同样也会增加烧结后砖体的空隙率，从而进一步增大了 5h 煮沸吸水率。

3.5 水厂脱水污泥粉磨法烧结多孔砖生产试验

3.5.1 背景

由于水厂污泥脱水时投加了 PAM 高分子絮凝剂，因此对污泥物理特性有很大的改变，特别在脱水污泥逐渐失去水分时，污泥可塑性变得很差，干枯后的脱水污泥边角锋利。若将较干燥的脱水污泥与自然粘土混合制多孔砖坯时，混合泥样在炼泥时很难均匀，甚至硬的泥块还可能影响滚轴的正常运转，在泥样

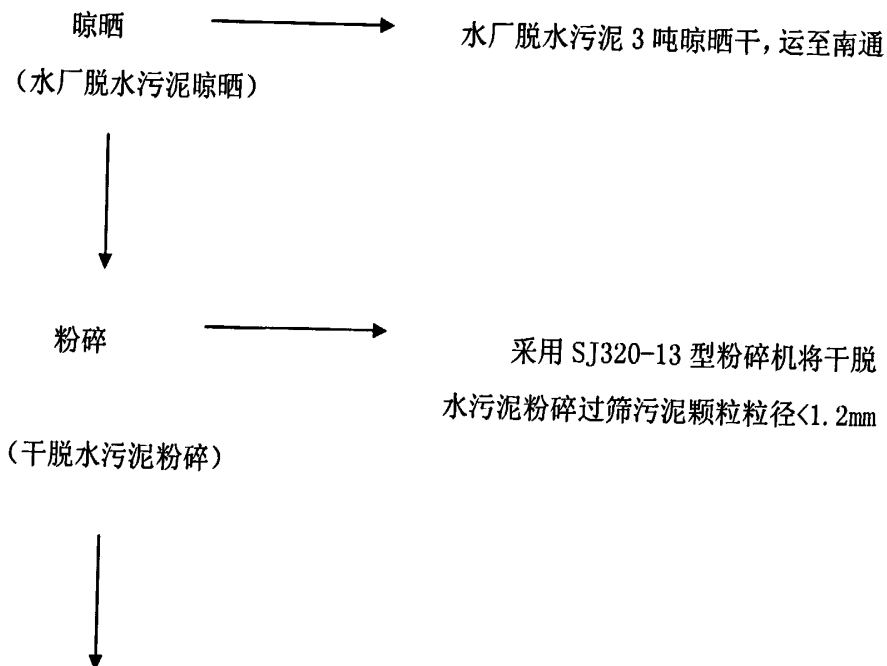
抽砖坯时，影响泥样的抽真空度，切割后的砖坯存在大量毛刺和裂纹，造成焙烧后的多孔砖产品抗压强度降低，吸水率增大。

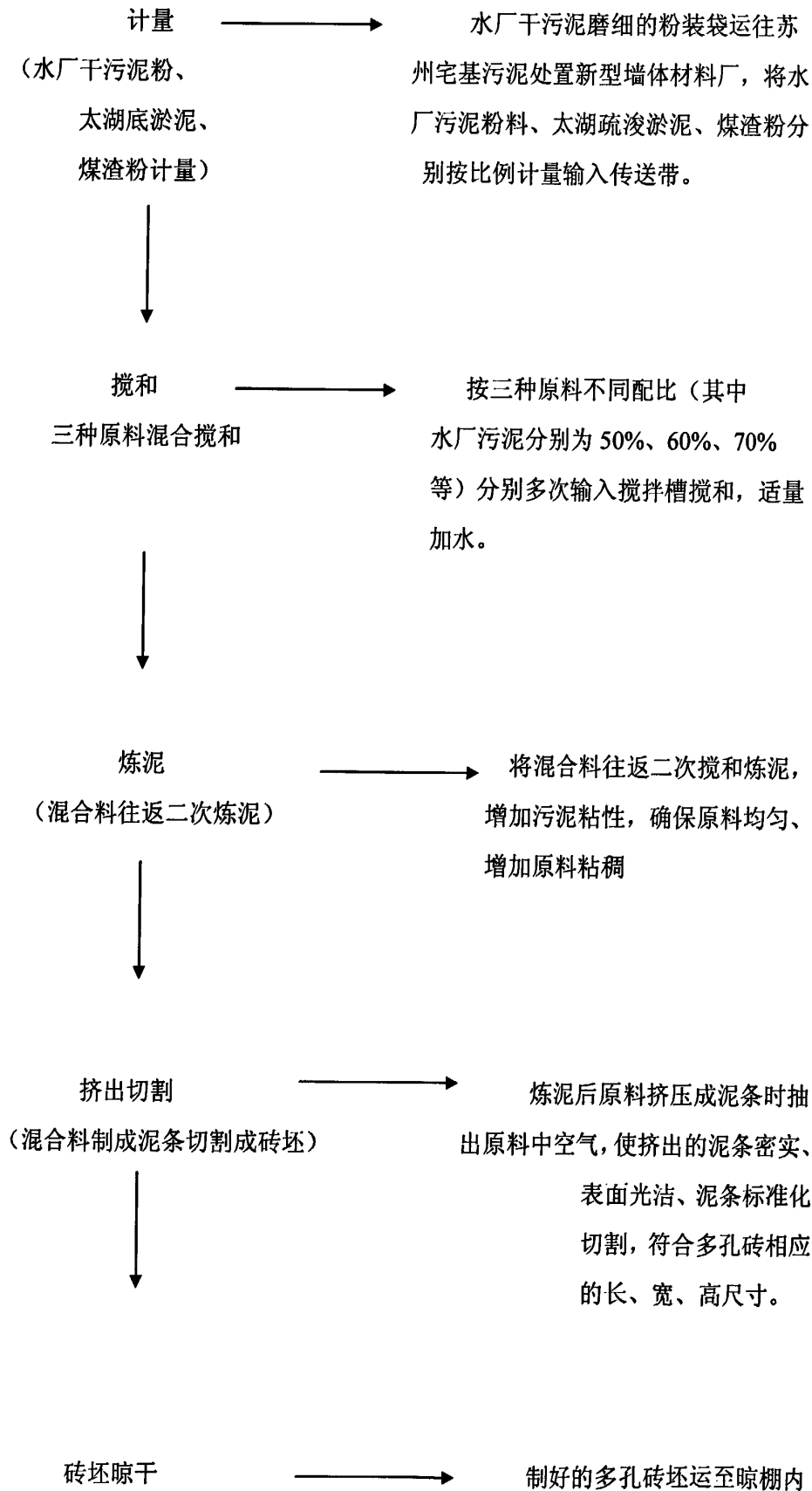
同样采用较湿的水厂脱水污泥与自然粘土混合制多孔砖坯时，往往需要在原料输送带上添加一些干粉（废砖屑粉碎后的粉粒）经搅拌、炼泥、压条，同样对原料抽真空度产生影响，制出的砖坯裂纹毛刺亦较多，当然焙烧后多孔砖在抗压强度和吸水率等质量指标均不及格。

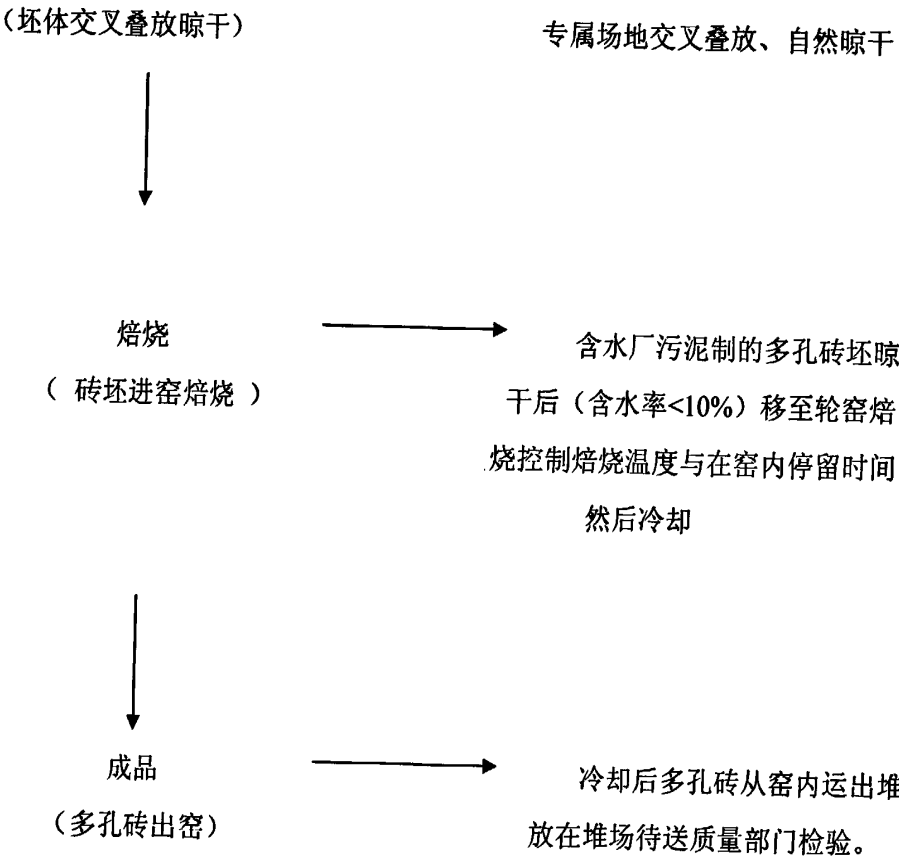
在进行水厂污泥制陶粒的生产试验过程中，对原料前处理的启发，因此第二次进行水厂脱水污泥烧结多孔砖生产试验时，重点将水厂脱水污泥晒干、粉磨、过筛、加水、配料、炼泥挤条切割、砖坯晾干、进窑焙烧、成品出窑全过程跟踪研究。

现将水厂脱水污泥 50%、60%、70%和太湖淤泥混合制得的多孔砖生产试验工艺情况介绍如下：

### 3.5.2 水厂脱水污泥粉磨法烧结多孔砖生产试验工艺介绍







本工艺制得含：50%水厂污泥多孔砖 1800 块；  
60%水厂污泥多孔砖 160 块；  
70%水厂污泥多孔砖 180 块。

3.6 水厂脱水污泥粉磨法烧结多孔砖质量检测结果与分析

3.6.1 水厂脱水污泥粉磨法烧结多孔砖抗压强度检测

表 3.7 水厂脱水污泥粉磨法不同掺入量烧结多孔砖抗压强度检测结果

| 检测项目    | 本产品标准 | 检测结果 |      |      |
|---------|-------|------|------|------|
| 抗压强度    |       | 50%  | 60%  | 70%  |
| 平均值 Mpa | ≥10.0 | 13.2 | 12.5 | 11.7 |
| 标准值 Mpa | ≥6.5  | 10.0 | 8.1  | 8.4  |

备注：① 50%、60%、70%分别为多孔砖内掺入水厂脱水污泥百分比。

② 多孔砖抗压强度检测由上海市建科院检测站承担，检验依据按 GB13544-2000《烧结多孔砖》。

检测结果分析：

① 水厂脱水污泥通过粉磨、掺入湖泊淤泥制成的多孔砖，不论含水厂脱水污泥 50%、60%还是 70%，其抗压强度平均值 Mpa、标准值 Mpa 都符合国标 GB13544-2000《烧结多孔砖》要求。

② 水厂脱水污泥制多孔砖随着污泥掺入量的增加，抗压强度平均值 Mpa 和标准值 Mpa 亦逐渐下降，说明水厂污泥制多孔砖为了达到标准抗压强度，适当掺入塑性指数较大的河道淤泥或湖泊淤泥是必要的。

3.6.2 50%水厂脱水污泥粉磨法烧结多孔砖质量检测

表 3.8 50%水厂脱水污泥粉磨法烧结多孔砖质量检测结果

| 检测项目（单位） | 本产品标准           | 检测结果 | 单项判定 |
|----------|-----------------|------|------|
| 抗压强度：    |                 |      |      |
| 平均值 Mpa  | ≥10.0           | 15.6 | 合格   |
| 标准值 Mpa  | ≥6.5            | 10.0 |      |
| 泛霜性能     | 无严重泛霜           | 无泛霜  | 合格   |
| 石灰爆裂     | 见《标准》           | 符合   | 合格   |
| 尺寸偏差：    |                 |      |      |
| 平均（mm）   | 长±3.0 宽±2.5 高±2 |      |      |
| 极差（mm）   | 长≤8 宽≤7 高≤6     |      |      |
| 外观质量     | 见《标准》           |      |      |
| 孔洞率      | ≥25             | 28   | 合格   |

|            |       |      |    |
|------------|-------|------|----|
| 饱和系数:      |       |      |    |
| 平均值        | ≤0.88 | 0.80 | 合格 |
| 单块最大值      | ≤0.90 | 0.81 |    |
| 5h 煮沸吸水率%: |       |      |    |
| 平均值        | ≤23   | 21   | 合格 |
| 单块最大值      | ≤25   | 24   |    |
| 检测结果       |       |      |    |

备注：多孔砖质量检测由上海市建科院检测站承担。

根据表 8 检测结果可以得出如下结论：

- ① 水厂脱水污泥制多孔砖必须先破坏脱水污泥内泥粒与泥粒之间的网状结构，然后才能将脱水污泥资源化利用与河道淤泥制成合格的多孔砖。
- ② 50%水厂脱水污泥（粉磨）与 50%湖泊污泥制成的多孔砖质量检测结果，全部符合国标 GB13544-2000《烧结多孔砖》国家标准（除尺寸偏差未测）。

3.7 结论

- 1. 水厂脱水污泥化学组成组分与天然粘土、河道淤泥化学组成组分基本相似，但是水厂脱水污泥基本上以粉砂级配为主，颗粒粒径相对较细小，烧失量较大，况且脱水污泥投加过高分子絮凝剂聚丙烯酰胺，故晾干后污泥塑性较差。若将水厂脱水污泥作为粘土资源加以利用，必须破坏脱水污泥中高分子聚丙烯酰胺网状结构，并适量掺入自然粘土或河道淤泥，改变脱水污泥中粉砂粒级配和降低污泥烧失减量，才能将水厂脱水污泥作为制多孔砖粘土原料。
- 2. 水厂污泥从脱水机械卸下时其含水率在 55%—65%之间，很难符合制砖时对原料含水率的要求。若将水厂污泥晾晒和堆晒都很难保持水厂脱水污泥含水率的均一性，故水厂脱水污泥不能直接作为粘土资源利用制取多孔砖。
- 3. 由于水厂污泥在机械脱水时投加过高分子絮凝剂，对污泥塑性指数有很大影响，干燥后的水厂脱水污泥硬度增大，边角锋利。若将含硬块的水厂脱水污泥和自然粘土输入制砖坯流水线时，影响炼泥工艺，影响对压滚轮正常运行，

故不能直接利用水厂脱水污泥制多孔砖。

4. 采用自然粘土分别掺入 50%、75%水厂脱水污泥组合成的制砖原料（掺入 5%煤渣粉），采用直接塑化法制砖，经搅和、炼泥、挤出制坯、晾干、焙烧，其成品多孔砖都不合格（其原因为：原料塑性差，含水率难控制，掺入干粉影响了烧制品含水率和抗压强度。）。

5. 采用太湖淤泥分别掺入 50%、60%和 70%粉磨法脱水污泥另加 5%煤渣粉组合的制砖原料通过搅和、炼泥、挤出、切割、砖坯晾干、焙烧等工艺过程，生产试验产品多孔砖抗压强度 Mpa 平均值、标准值等指标全部符合国家相关标准。

6. 由于水厂脱水污泥投加过 PAM 造成污泥晾干后坚硬、遇水不塑化，只有粉磨后污泥才彻底破坏了泥粒与泥粒之间的网状结构，粉磨后污泥与自然土或河道湖泊淤泥混合炼泥制坯才能制成合格的多孔砖。

7. 50%水厂粉磨脱水污泥掺入 50%湖泊淤泥制成的多孔砖，经质量检测，结果各项指标全部符合国家 GB13544-2000《烧结多孔砖》国家标准（除尺寸偏差未测）。

## 第4章 利用水厂脱水污泥直接塑化法造粒烧结陶粒生产试验

### 4.1 水厂污泥制陶粒研究状况

#### 4.1.1 上海市建筑科学研究所曾用南市水厂沉淀池污泥研制陶粒研究情况

1992年4月上海市建筑科学研究所曾承担中德合作项目“固体废弃物处理前期基础研究”课题分课题三“自来水厂沉淀污泥研制陶粒”进行了试验研究，其内容概括如表4.1所示。

表4.1 南市水厂沉淀池污泥、青浦区自然粘土本底和宝钢电厂粉煤灰化学组组成百分率  
单位(%)

| 样品名称<br>测定项目                   | 南市水厂沉淀污泥 | 青浦自然粘土 | 宝钢粉煤灰 |
|--------------------------------|----------|--------|-------|
| 烧失减重                           | 10.97    | 4.87   | 4.37  |
| SiO <sub>2</sub>               | 54.98    | 69.64  | 49.70 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 18.08    | 13.23  | 33.44 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.68     | 4.88   | 8.16  |
| CaO                            | 2.61     | 2.64   | 2.56  |
| MgO                            | 2.09     | 0.4    | 0.81  |
| SO <sub>2</sub>                | 0.4      | —      | —     |
| R <sub>2</sub> O               | 2.14     | 3.58   | 0.45  |

① 对水厂沉淀污泥、青浦区自然粘土本底和宝钢电厂粉煤灰化学组分进行了测试，见表4—1，认为水厂沉淀污泥的化学组分以硅Si和铝Al为主，与自然粘土较为接近，该组成基本上位于生产良好发泡的粘土组成范围内，有利于烧出容重较轻的陶粒。

② 给水厂污泥制成的生料球，不经预热，料球烧胀温度范围在1150—1190

℃之间，烧结温度范围在 1150—1190℃之间（1190℃料球体积最小，坯体开始膨胀）。

③ 预热时间及温度对水厂污泥烧结陶粒容重有着十分重要的影响，随着预热时间的延长和预热温度的升高，陶粒容重增加明显，因为长时间或高温预热会烧去污泥中大部分有机物，使氧化铁的还原反应不能充分进行，阻碍了料球的膨胀，因此生料球预热时间在 5min 之内，预热温度在 600℃之内。

④ 烧结污泥粉煤灰陶粒，认为污泥掺量在 40%—60%时制得的生料球的抗压强度及热强度较高，烧结温度范围在 1170℃—1250℃之间，焙烧后的陶粒吸水率在 15%左右，松散容重为 800 kg/m<sup>3</sup>。

#### 4.1.2 闵行水厂曾采用水厂脱水污泥轮窑烧制陶粒研究情况

2002 年上海市自来水闵行有限公司采用闵行一水厂脱水污泥掺入适量辅料、粉碎搅和、炼泥造粒、坯体晾干置轮窑烧结，温度控制 950—1050℃，出窑陶粒经测试堆积密度为 920 kg/m<sup>3</sup>，筒压强度为 7.9Mpa，颗粒级配为 10—16mm 单粒级，检测结果表明其堆积密度在等级范围，普通轻粗集料筒压强度及颗粒级配均符合 GB—17431.1—1998 中有关陶粒产品性能的要求。另外进一步验证陶粒制造建筑材料混凝土砌块能否达到性能参数要求，进行了合理配比研究。

轻集料陶粒混凝土配比，陶粒 780 kg/m<sup>3</sup>，水泥 350 kg/m<sup>3</sup>，黄沙 650 kg/m<sup>3</sup>，水 130 kg/m<sup>3</sup>，按此配比制成的混凝土砌块，经 28 天养护测试其抗压强度为  $R_{28}=33.1$  Mpa，密度为 1900 kg/m<sup>3</sup>，性能指标符合轻集料混凝土建材的国家标准。注：陶粒性能测试、陶粒混凝土性能测试均由上海市建筑科学研究院工程材料技术研究所承担。

### 4.2 水厂脱水污泥拟作烧结陶粒原料分析

#### 4.2.1 水厂脱水污泥组成组分

要研究水厂脱水污泥制陶粒的可能性特别是水厂脱水污泥烧制超轻陶粒的可能性，必须分析水厂脱水污泥与天然粘土在化学组分、污泥颗粒粒径大小、污泥的可塑性及干污泥再加水的可塑性是否具备与天然粘土性质相似之特征。

① 污泥化学组分： $\text{SiO}_2$ 组分大致在 49—57%之间， $\text{Al}_2\text{O}_3$ 组分大致在 18%—22%之间， $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 组分大致在 5%—6%之间，水厂污泥主要化学组成组分基本上和天然粘土组成组分相接近， $\text{SiO}_2$ 含量略偏低， $\text{Al}_2\text{O}_3$ 略偏高。

② 水厂污泥颗粒级配分布：污泥属粘土范围，粒径都小于  $74\mu\text{m}$ ，无砂粒存在，粉粒约占 60%，粘粒约占 40%，湿污泥非常细腻。

③ 水厂污泥中杂质最大含量为烧失减重在 11—15%，这对污泥制砖坯和烧结成品砖是最不利因素之一，因为烧失减量越大，说明污泥中有机物含量越大，制砖坯时，晾干裂缝可能性就越大，砖坯进窑烧结时龟裂程度就越大。

④ 水厂污泥可塑性是一个不可逆的现象，脱水污泥含水率在 40—50%时污泥可塑性极佳，随着日晒或风吹，污泥中表面水份逐渐丢失后，污泥逐渐变硬，污泥中细微颗粒逐渐变粗，失去可塑性能，若再向变硬的污泥中渗入水份，经研磨污泥就变成细砂，完全失去了粘性和可塑性，这就说明水厂脱水污泥可塑性呈单向存在，而不可逆再生，这可能和脱水污泥中投加了高分子 PAM 有着密切的关系，若改变污泥塑性，必须重新加入可塑性的材料，才能提高污泥的塑性指数。

### 4.2.2 天然粘土和水厂污泥组分及特性差异

天然粘土和水厂脱水污泥组分和特征加以比较，水厂脱水污泥化学组分与天然粘土化学组分基本相似，污泥颗粒粒径要比天然粘土颗粒粒径要细小，刚从脱水机外排的水厂脱水污泥可塑性不亚于天然粘土可塑性，

水厂脱水污泥中杂质（有机物或烧失减重）要比天然粘土大，见表 4.2，天然粘土和水厂脱水污泥性质异同。

表 4.2 天然粘土和水厂脱水污泥性质异同

| 对比<br>项目 | 天然粘土 | 水厂脱水污泥 |
|----------|------|--------|
|          |      |        |

|      |   |                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                             |
|------|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 化学组分 | 同 | 天然粘土组分由两部分组成：粘土矿物和杂质矿物。前者主要成份为高岭土 ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 和铝酸盐矿物，如叶蜡石 ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )；后者含有石英砂、云母、长石、黄铁矿、硫酸盐以及有机物等杂质。 | 水厂脱水污泥主要成份 $\text{SiO}_2$ 含量 50% 左右。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量占污泥组分 20% 左右。其他组分和有机物约为 30%。 |
|      | 异 | 天然粘土杂质组分中含有机物量小。                                                                                                                                                                                                                 | 水厂脱水污泥是无机矿物质组分含有机质烧失减量高达 15%。                                                               |
| 粒径大小 | 同 | 天然粘土由不同颗粒组成：粘土质粒径较小，小于 0.005mm，尘土质粒径中等 0.005—0.15mm，砂土质粒径较粗 0.15—5mm。制粘土陶粒为粘土和亚粘土，粘土质颗粒含量大于 15%。                                                                                                                                 | 水厂污泥颗粒由粉粒：<br>粗 28.8%—52.6，<br>细 15.8%—24.6%，<br>粘粒 31.6—46.6%。                             |
|      | 异 | 天然粘土、砂粒、粉粒、粘粒级配齐全粘土由不同颗粒组成。                                                                                                                                                                                                      | 水厂脱水污泥颗粒只有粉粒和粘粒组成，缺少砂粒。                                                                     |
| 可塑性  | 同 | 粘土和亚粘土加入适量水调制后，可捏塑成各种形状，既不裂缝又能保持原形。当粘土质颗粒含量多，颗粒细级配好时，颗粒比表面积大，吸水多，胶体多，可塑性好。                                                                                                                                                       | 根据水厂污泥颗粒粒径级配组成，属亚粘土。当机械脱水后的水厂污泥（含固率 40% 左右）可堆积，但成型较差，当在堆场滞放二、三日后，其含固率达 70% 左右，这时的污泥可塑性很好。   |
|      | 异 | 当天然粘土晾干后加入适量水分可以恢复粘土的可塑性。                                                                                                                                                                                                        | 当污泥干枯，经粉碎再加入适量水份调制后污泥失去粘性和可塑性能，特别脱水污泥加过阳离子 PAM。                                             |

### 4.3 水厂脱水污泥直接塑化法造粒烧结陶粒生产试验

#### 4.3.1 泥样制备

水厂脱水污泥烧结陶粒在南通市大地陶粒公司共进行二次生产性试验，因此运往南通脱水污泥也分两次进行。

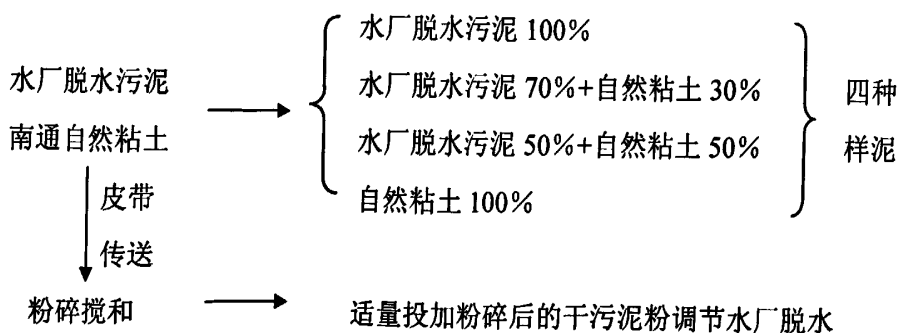
第一次水厂脱水污泥烧结陶粒生产试验在 2004 年 7 月，共运去水厂脱水污泥 10 吨，污泥含水率约 45—50%，该脱水污泥投加过阳离子聚丙烯酰胺。在进行生产试验时，水厂污泥堆积表面已干枯变硬，但泥堆下面 15cm 仍然粘稠潮湿，故在进行塑化法造粒时，投加了适量烟道粉煤灰，调节了水厂污泥含固率在 85% 左右进行污泥造粒。

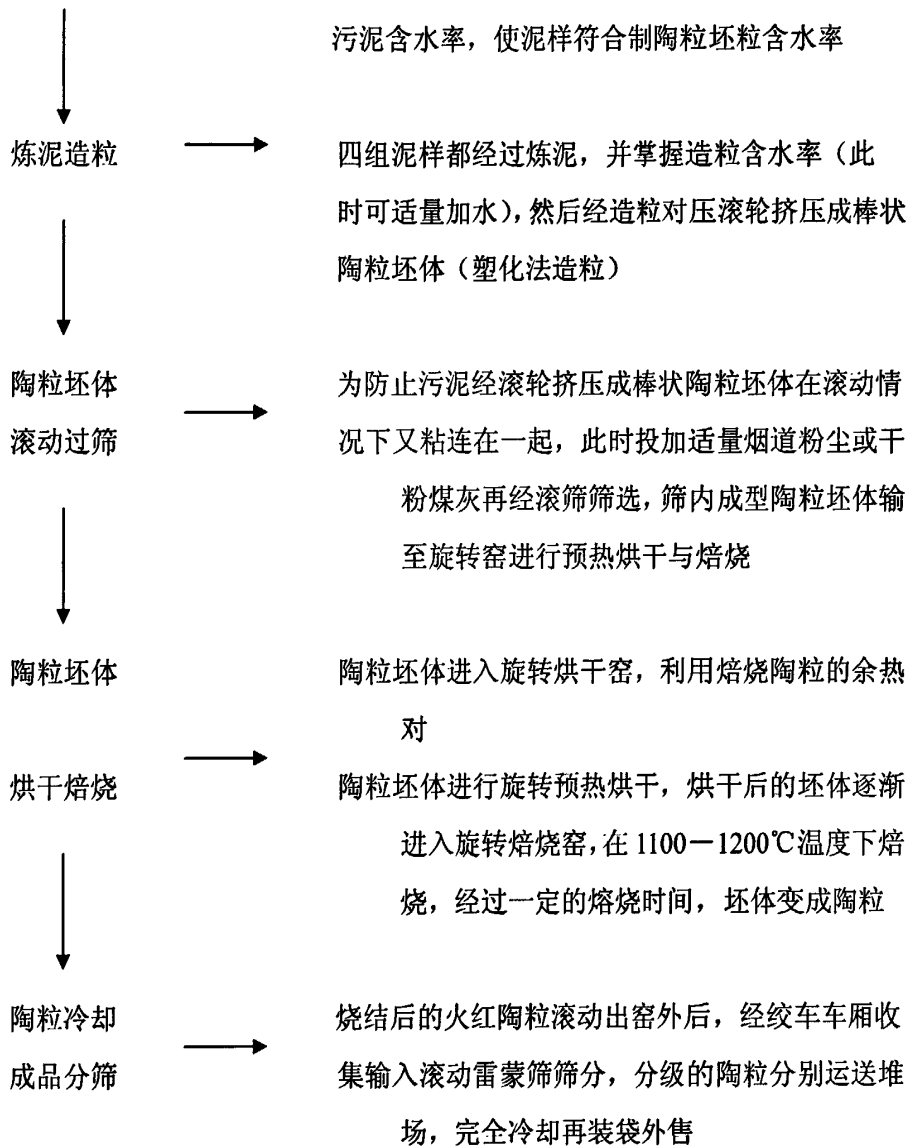
第二次水厂脱水污泥制陶粒生产试验在 2004 年 12 月，共运去闵行水厂脱水污泥 100 吨，其中 10 吨左右污泥经过滩晒其含水率在 10% 左右，另外 90 吨污泥含水率在 50% 左右，此污泥在离心脱水时投加过阴离子聚丙烯酰胺，在污泥制陶粒坯体前，先将 10 吨干污泥粉碎成粉状物，作污泥造粒时调节污泥含水率之用。

#### 4.3.2 水厂脱水污泥直接塑化法造粒烧结陶粒工艺介绍

污泥（城市污泥）制轻质陶粒有两种工艺，第一种工艺是利用城市污泥或发酵污泥的焚烧灰造粒后烧结陶粒的工艺，该工艺在 20 世纪 80 年代趋于成熟。另一种污泥制陶粒工艺是近年来开发的新工艺，是直接以污泥为原料烧制的陶粒，前者不足之处是需要单独建造焚烧炉，污泥中的有机物成份没有得到有效利用，而后者污泥中有机物组分得到了充分利用。

下面介绍水厂脱水污泥直接塑化法烧结粘土陶粒工艺流程：





4.3.3 水厂脱水污泥直接塑化法造粒烧结陶粒生产试验过程

南通大地陶粒公司提供水厂污泥烧结陶粒试验生产线，第一次为 2 号线（2004 年 7 月），第二次为 3 号线（2004 年 12 月），该公司在正常情况下，每条陶粒生产线能生产自然粘土陶粒为 50—60m<sup>3</sup>，陶粒容重小于 600 kg/m<sup>3</sup>，筒压强度达 5.1MPa，粒径在 5—20 mm，生产时窑内一般无结块和结窑情况。

在二次试验过程中，发现污泥含水率较难掌握，为了使水厂污泥含水率适合挤压造粒时的含水率，故第二次试验准备了已粉碎的干水厂污泥，通过滚轮

挤压后的原料坯体（生料）粒子密实度不够，特别 100% 水厂脱水污泥更显粒性不够（可塑性比较差）。当生料球通过输送烘干后有相当数量生料球变碎，所以出窑的陶粒不规则。

另外，由于料球粒径不一致，故在转窑内产生和吸收热量不均匀，小颗粒料球已产生了熔融液相，而大颗粒料球还在窑内滚动、烧结、膨胀，随着时间的延长，熔融液相小颗粒包裹着大颗粒料球产生结块和结窑现象，况且大地陶粒公司靠人工经验来掌握陶粒烧结温度和膨胀温度，此窑内温度较难掌握。100% 水厂脱水污泥烧结的陶粒基本呈灰色，陶粒外壳很薄，很少有浅黄色。70% 水厂脱水污泥掺合 30% 自然粘土制出的生料球成型率有明显改善（此时不用干的水厂脱水污泥调节含水率），但烧结的陶粒粒径仍不均匀，此时陶粒大部分呈浅黄色，小部分呈灰色。

当采用水厂脱水污泥 50% 掺入大地制陶粒原料自然粘土 50% 组成的试验料通过搅拌、挤压的生料粒子，密实度增强，粘合性较好，生料粒输入窑内烘干、烧结、膨胀较为正常，产生的结块结团现象明显减少，陶粒的强度也明显提高，从陶粒外表观察，陶粒颗粒略有光泽。

## 4.4 水厂脱水污泥直接塑化法烧结陶粒样品检测结果分析

### 4.4.1 样品检测结果

闵行水厂脱水污泥（投加过阳离子 PAM 和阴离子 PAM）烧制陶粒共进行二次试验（2004 年 7 月和 2004 年 12 月），试验三种类型陶粒。100% 水厂污泥制陶粒，70% 水厂污泥制陶粒，50% 水厂污泥制陶粒。试验六种品种陶粒进行陶粒性能测试，样品经上海市建筑科学研究院检测站检测，检测结果见表 4.3—4.8。

表 4.3 制粘土陶粒主原料：100% 水厂脱水污泥（水厂浓缩污泥脱水时投加过阳离子 PAM）烧结陶粒检测结果，其产品属不合格产品。

其中：颗粒级配符合 5—16 mm 连续颗粒。

堆积密度测定值为  $690 \text{ kg/m}^3$ ，符合  $610—700 \text{ kg/m}^3$ （本产品标准值），所以单项判定为合格产品。

筒压强度测定值为 4.4MPa, 符合本产品标准值 $\geq 3.0$ MPa, 所以单项判定为合格产品。

陶粒检测的其他项目: 吸水率、软化系数、粒型系数, 检测结果均超出本产品质量控制要求, 所以单项判断都不合格。

表 4.4 制粘土陶粒主原料: 100%水厂脱水污泥(水厂浓缩污泥脱水时投加过阴离子 PAM) 烧结陶粒检测结果, 其产品属不合格产品。

其中: 颗粒级配符合 5—16 mm 连续颗粒。

堆积密度样品测定值为  $760 \text{ kg/m}^3$ , 符合本标准值 700—800  $\text{kg/m}^3$ 。

软化系数样品测定值为 1.0, 符合本产品标准值软化系数 $\geq 0.8$ 。

粒型系数样品测定值为 1.5, 符合本产品标准值粒型系数 $\leq 1.6$  圆球型合格品。

筒压强度测定值为 2.4MPa, 本产品标准值 $\geq 4.0$ MPa, 所以单项判定为不合格产品。另外, 吸水率测定值为 19%, 本产品标准值为 $\leq 10\%$ , 此单项判断为不合格。

表 4.5 制粘土陶粒样品主原料由 70%水厂脱水污泥添加 30%南通自然粘土制成粒坯烧结而成的陶粒, 经测定:

颗粒级配符合 5—16 mm 连续颗粒。

堆积密度样品测定值为  $700 \text{ kg/m}^3$ , 符合本标准值 610—700  $\text{kg/m}^3$ 。

筒压强度测定值为 4.5MPa, 符合本产品标准值 $\geq 3.0$ MPa。

由于污泥中掺入 30% 自然粘土, 烧制的陶粒样品筒压强度 Mpa 有较大提高。

其他指标: 软化系数样品测定值为 0.8, 符合本产品标准值软化系数 $\geq 0.8$ 。

粒型系数样品测定值为 1.5, 符合本产品标准值粒型系数 $\leq 1.6$  圆球型合格品。

但 70%水厂脱水污泥(投加过阴离子 PAM) 制的陶粒试验样品:

本试验陶粒样品吸水率测定值为 16%, 不符合本产品标准值为 $\leq 10\%$ , 故本产品单项指标吸水率不合格。

表 4.6 供测定的粘土陶粒样品, 制陶粒主原料由 50%水厂脱水污泥和 50%南通自然粘土制成粒坯烧结而成的陶粒。检测结果虽然属不合格产品, 单项

判定指标只有吸水率指标不合格,测定值为12%,标准值为 $\leq 10\%$ 。

其中,颗粒级配符合5—16 mm连续颗粒。

堆积密度样品测定值为 $630\text{ kg/m}^3$ ,符合本标准值 $610\text{—}700\text{ kg/m}^3$ 。

筒压强度测定值为 $6.1\text{ MPa}$ ,符合本产品标准值 $\geq 3.0\text{ MPa}$ 。经初步分析,这是由于水厂脱水污泥中掺入50%自然粘土,改变了泥样品Si和Al的百分含量,相应地也改变了泥样中的灼烧减重,从而使试验样品在烧结过程中熔融状态达到最佳,故样品筒压强度增加值非常明显,达到 $6.1\text{ MPa}$ 。

其他指标项目如软化系数样品测定值为0.8,符合本产品标准值软化系数 $\geq 0.8$ 。

粒型系数样品测定值为1.4,符合本产品标准值粒型系数 $\leq 1.6$ 圆球型合格品。

表4.7 陶砂样品(本样品为100%水厂脱水污泥制成地陶粒泥坯在进入转窑预热和烘干、焙烧过程中,由于经转窑滚动窑内温度不断提升,坯体在不同温度范围内发生爆裂,爆裂下来的不规则的碎粒一部分烧结成熔融粘稠块状,一部分就成了不规则的碎陶砂。当陶粒烧成出窑时,经雷蒙筛分级筛下陶质碎料,送检测,本样品只进行二项指标检测

①颗粒级配不符合本产品标准颗粒级配。

②堆积密度样品测定值为 $820\text{ kg/m}^3$ ,符合本标准值 $910\text{—}900\text{ kg/m}^3$ 。

表4.8 本样品制粘土陶粒原料取100%自然粘土烧结陶粒,从而了解原料(粘土)和设备(窑)的本底状况。

烧结的陶粒样品经检测除颗粒级配不符合标准颗粒级配之外,其他陶粒性能指标全部合格。

① 堆积密度样品测定值为 $680\text{ kg/m}^3$ ,符合本标准值 $610\text{—}700\text{ kg/m}^3$ 。

② 筒压强度测定值为 $6.9\text{ MPa}$ ,符合本产品标准值 $\geq 3.0\text{ MPa}$ 合格品。

③ 吸水率测定值为8%,符合本产品标准值 $\leq 10\%$ 。

④ 软化系数样品测定值为1.0,符合本产品标准值软化系数 $\geq 0.8$ 。

⑤ 粒型系数样品测定值为1.5,符合本产品标准值粒型系数 $\leq 1.6$ 圆球型

合格品。

表 4.3. 水厂脱水污泥（100%）烧制粘土陶粒检测结果

| 检测项目, 单位                |           | 本产品标准             | 检测结果                | 单项判定                 |
|-------------------------|-----------|-------------------|---------------------|----------------------|
| 颗<br>粒<br>级<br>配        | 圆孔筛孔径, mm | 各筛号的累积筛余(按质量计), % | 各筛号的实测累积筛余(按质量计), % |                      |
|                         | 40.0      | —                 | —                   | 符合<br>5~16mm<br>连续颗粒 |
|                         | 31.5      | —                 | —                   |                      |
|                         | 20.0      | 0~5               | 0                   |                      |
|                         | 16.0      | 0~10              | 2                   |                      |
|                         | 10.0      | 20~60             | 58                  |                      |
|                         | 5.00      | 85~100            | 100                 |                      |
|                         | 2.50      | 95~100            | 100                 |                      |
| 堆积密度, kg/m <sup>3</sup> |           | 610~700           | 690                 | 合格                   |
| 筒压强度, MPa               |           | ≥3.0 (合格品)        | 4.4                 | 合格                   |
| 吸水率, %                  |           | ≤10%              | 15                  | 不合格                  |
| 软化系数                    |           | ≥0.8              | 0.7                 | 不合格                  |
| 粒型系数                    |           | ≤1.6 (圆球型合格品)     | 1.8                 | 不合格                  |
| 检测结论                    |           | 不合格品              |                     |                      |

备注:

1. 样品检测依据: GB/T17431.1—1998《轻集料及其试验方法》。
2. 样品数量 15 kg, 检测时间 2004.11。
3. 水厂脱水污泥投加过高分子聚丙烯酰胺阳离子。
4. 样品密度等级 700 级。
5. 检测单位: 上海市建筑科学研究院检测站。

表 4.4 水厂脱水污泥（100%）烧制粘土陶粒检测结果

| 检测项目，单位                |              | 本产品标准                | 检测结果                   | 单项判定                 |
|------------------------|--------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| 颗<br>粒<br>级<br>配       | 圆孔筛孔<br>径，mm | 各筛号的累积筛余（按<br>质量计），% | 各筛号的实测累积筛<br>余（按质量计），% |                      |
|                        | 40.0         | —                    | —                      | 符合<br>5~16mm<br>连续颗粒 |
|                        | 31.5         | —                    | —                      |                      |
|                        | 20.0         | 0~5                  | 0                      |                      |
|                        | 16.0         | 0~10                 | 3                      |                      |
|                        | 10.0         | 20~60                | 42                     |                      |
|                        | 5.00         | 85~100               | 88                     |                      |
|                        | 2.50         | 95~100               | 99                     |                      |
| 堆积密度，kg/m <sup>3</sup> |              | 710~800              | 760                    | 合格                   |
| 筒压强度，MPa               |              | ≥4.0（合格品）            | 2.4                    | 不合格                  |
| 吸水率，%                  |              | ≤10%                 | 19                     | 不合格                  |
| 软化系数                   |              | ≥0.8                 | 1.0                    | 合格                   |
| 粒型系数                   |              | ≤1.6（圆球型合格品）         | 1.5                    | 合格                   |
| 检测结论                   |              | 不合格                  |                        |                      |

备注：

- 1.样品检测依据：GB/T17431.1—1998《轻集料及其试验方法》。
- 2.样品数量 50 kg，检测时间 2005.2.17—3.5。
- 3.水厂脱水污泥投加过高分子聚丙烯酰胺阴离子。
- 4.样品密度等级 800 级。
- 5.检测单位：上海市建筑科学研究院检测站。

表 4.5 水厂脱水污泥（70%）烧制粘土陶粒检测结果

| 检测项目, 单位                |               | 本产品标准                 | 检测结果                    | 单项判定                 |
|-------------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|----------------------|
| 颗<br>粒<br>级<br>配        | 圆孔筛孔<br>径, mm | 各筛号的累积筛余(按<br>质量计), % | 各筛号的实测累积筛<br>余(按质量计), % |                      |
|                         | 40.0          | —                     | —                       | 符合<br>5~16mm<br>连续颗粒 |
|                         | 31.5          | —                     | —                       |                      |
|                         | 20.0          | 0~5                   | 0                       |                      |
|                         | 16.0          | 0~10                  | 2                       |                      |
|                         | 10.0          | 20~60                 | 51                      |                      |
|                         | 5.00          | 85~100                | 97                      |                      |
|                         | 2.50          | 95~100                | 98                      |                      |
| 堆积密度, kg/m <sup>3</sup> |               | 610~700               | 700                     | 合格                   |
| 筒压强度, MPa               |               | ≥3.0 (合格品)            | 4.5                     | 合格                   |
| 吸水率, %                  |               | ≤10%                  | 16                      | 不合格                  |
| 软化系数                    |               | ≥0.8                  | 0.8                     | 合格                   |
| 粒型系数                    |               | ≤1.6 (圆球型合格品)         | 1.5                     | 合格                   |
| 检测结论                    |               | 不合格                   |                         |                      |

备注:

- 1.样品检测依据: GB/T17431.1—1998《轻集料及其试验方法》。
2. 样品数量 50 kg, 检测时间 2005.2.17—3.5。
- 3.水厂脱水污泥投加过高分子聚丙烯酰胺阴离子。
- 4.样品密度等级 700 级。
- 5.70%水厂脱水污泥, 30%南通农田自然粘土。
- 6.检测单位: 上海市建筑科学研究院检测站。

表 4.6 水厂脱水污泥（50%）烧制粘土陶粒检测结果

| 检测项目，单位                |              | 本产品标准                | 检测结果                   | 单项判定                 |
|------------------------|--------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| 颗<br>粒<br>级<br>配       | 圆孔筛孔<br>径，mm | 各筛号的累积筛余（按<br>质量计），% | 各筛号的实测累积筛<br>余（按质量计），% | 符合<br>5~16mm<br>连续颗粒 |
|                        | 40.0         | —                    | —                      |                      |
|                        | 31.5         | —                    | —                      |                      |
|                        | 20.0         | 0~5                  | 0                      |                      |
|                        | 16.0         | 0~10                 | 2                      |                      |
|                        | 10.0         | 20~60                | 59                     |                      |
|                        | 5.00         | 85~100               | 99                     |                      |
|                        | 2.50         | 95~100               | 100                    |                      |
| 堆积密度，kg/m <sup>3</sup> |              | 610~700              | 630                    | 合格                   |
| 筒压强度，MPa               |              | ≥3.0（合格品）            | 6.1                    | 合格                   |
| 吸水率，%                  |              | ≤10%                 | 12                     | 不合格                  |
| 软化系数                   |              | ≥0.8                 | 0.8                    | 合格                   |
| 粒型系数                   |              | ≤1.6（圆球型合格品）         | 1.4                    | 合格                   |
| 检测结论                   |              | 不合格                  |                        |                      |

备注：

- 1.样品检测依据：GB/T17431.1—1998《轻集料及其试验方法》。
- 2.样品数数量 50 kg，检测时间 2005.2.17—3.5。
- 3.水厂脱水污泥投加过高分子聚丙烯酰胺阴离子。
- 4.样品密度等级 700 级。
- 5.水厂 50%脱水污泥添加 50%自然粘土。
- 6.检测单位：上海市建筑科学研究院检测站。

表 4.7 水厂脱水污泥（100%）烧制粘土陶粒雷蒙筛分筛后筛下陶砂检测结果

| 检测项目, 单位                |               | 本产品标准                 | 检测结果                     | 单项判定                                        |
|-------------------------|---------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------------------------|
| 颗<br>粒<br>级<br>配        | 圆孔筛孔<br>径, mm | 各筛号的累积筛余(按<br>质量计), % | 各筛号的实测累积筛<br>余 (按质量计), % |                                             |
|                         | 40.0          | —                     | 0                        | 细度模数<br><br>(4.4)<br><br>不符合<br>标准颗粒<br>级配。 |
|                         | 31.5          | —                     | 10                       |                                             |
|                         | 20.0          | 0~5                   | 64                       |                                             |
|                         | 16.0          | 0~10                  | 88                       |                                             |
|                         | 10.0          | 20~60                 | 95                       |                                             |
|                         | 5.00          | 85~100                | 97                       |                                             |
|                         | 2.50          | 95~100                | 99                       |                                             |
| 堆积密度, kg/m <sup>3</sup> |               | 810~900               | 820                      | 合格                                          |
| 筒压强度, MPa               |               | —                     | —                        | —                                           |
| 吸水率, %                  |               | —                     | —                        | —                                           |
| 软化系数                    |               | —                     | —                        | —                                           |
| 粒型系数                    |               | —                     | —                        | —                                           |
| 检测结论                    |               | 不合格                   |                          |                                             |

备注:

- 1.样品检测依据: GB/T17431.1—1998《轻集料及其试验方法》。
- 2.样品数量 50 kg, 检测时间 2005.2.17—3.5。
- 3.水厂脱水污泥投加过高分子聚丙烯酰胺阳离子。
- 4.样品密度等级 900 级。
- 5.检测单位: 上海市建筑科学研究院检测站。

表 4.8 100%南通自然粘土烧结粘土陶粒检测结果

| 检测项目, 单位                |               | 本产品标准                 | 检测结果                    | 单项判定               |
|-------------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|
| 颗<br>粒<br>级<br>配        | 圆孔筛孔<br>径, mm | 各筛号的累积筛余(按<br>质量计), % | 各筛号的实测累积筛<br>余(按质量计), % |                    |
|                         | 40.0          | —                     | —                       | 不符合<br>标准颗粒<br>级配。 |
|                         | 31.5          | —                     | —                       |                    |
|                         | 20.0          | 0~5                   | 1                       |                    |
|                         | 16.0          | 0~10                  | 10                      |                    |
|                         | 10.0          | 20~60                 | 97                      |                    |
|                         | 5.00          | 85~100                | 100                     |                    |
|                         | 2.50          | —                     | 100                     |                    |
| 堆积密度, kg/m <sup>3</sup> |               | 810~900               | 680                     | 合格                 |
| 筒压强度, MPa               |               | ≥3.0 (合格品)            | 6.9                     | 合格                 |
| 吸水率, %                  |               | ≤10%                  | 8                       | 合格                 |
| 软化系数                    |               | ≥0.8                  | 1.0                     | 合格                 |
| 粒型系数                    |               | ≤1.6 (圆球型合格品)         | 1.5                     | 合格                 |
| 检测结论                    |               | 不合格                   |                         |                    |

备注:

- 1.样品检测依据: GB/T17431.1—1998《轻集料及其试验方法》。
- 2.样品数量 50 kg, 检测时间 2005.2.17—3.5。
- 3.样品密度等级 700 级。
- 4.检测单位: 上海市建筑科学研究院检测站。

4.4.2 检测结果分析

① 100%水厂脱水污泥直接塑化法烧结陶粒筒压强度值较小 (2.4MPa), 由于水厂脱水污泥制陶粒生料球时含水率较难控制, 故在制粒时加入干粉 (脱水干污泥粉碎粉或烟道干粉) 使料球炼泥不均匀, 粘合性较差, 从而使生料球抗压强度和热强度变小, 而且造成生料球易碎, 烧结、膨胀受热不均匀, 故烧结

后陶粒筒压强度偏低。

#### ② 水厂脱水污泥直接塑化法烧结的陶粒吸水率偏高。

由于生料球不密实的原因，其抗压强度和热强度都不能满足大地公司输送工艺要求，从而生料球在烘干、烧结、膨胀过程中不断有料球发生断裂、爆破现象，产生大量小颗粒不规则碎料，在与大颗粒并存的情况下，其吸热和放热不一致，熔融时间的不一致，从而使陶粒烧结后釉层外壳很薄，包裹不严，必然吸水率偏高。

#### ③ 水厂脱水污泥直接塑化法烧结陶粒呈灰色

由于水厂脱水污泥化学组分中烧失减重达 15% 左右，污泥制成的生料球在预热烘干过程中，预热时间可能过长，预热温度可能偏高，此时大部分有机物质被烧掉使氧化铁的还原反应不能充分进行，所以烧结后陶粒呈灰色，而且膨胀程度也不够。

#### ④ 生料球爆裂现象产生碎粒陶砂

关于生料球爆裂现象经初步分析，由于生料球不密实和水厂污泥的化学组分所引起，当生料球在不同温度下预热烘干、烧结膨胀时发生了不同程度的爆裂，根据相关资料介绍，料球在 400℃ 左右情况下，料球中（污泥组分中）结构水开始逐渐失去，此时料球若密实度不够，可能引起第一次爆裂，当料球加热到 800℃ 以上，此时料球密实度差，气体释放过程会使料球第二次爆裂（如

$$\text{FeS}_2 + 11\text{O}_2 \rightarrow 8\text{SO}_2 + 2\text{Fe}_2\text{O}_3$$

）若窑温控制过高（超过 1100℃—1200℃）已经生产熔融硅酸盐将其他固相粘结时又可能发生爆裂，产生碎粒。这当然和焙烧窑转速、温度和停留时间等参数也有着密切的关系。

总之要研究水厂脱水污泥烧制陶粒，必然解决污泥造粒时泥的可塑性问题即如何增强污泥的粘性，这样才能解决生料球的密实性能，抗压强度和热强度。而后选择合理的烘干、烧结烧胀温度范围和停留时间，才能将水厂脱水污泥烧成粘土陶粒合格产品。

⑤ 水厂脱水污泥中掺入自然粘土越多，其陶粒性能质量指标筒压强度越大，反之则越小，其吸水率随着陶粒生料球掺合的自然粘土越多，其陶粒产品吸水率越小。见表 4.9 和图 4.1、图 4.2。

表 4.9 水厂脱水污泥掺入自然粘土烧结的陶粒质量性能比较

| 料球原料组成          | 陶粒筒压强度  | 陶粒吸水率 |
|-----------------|---------|-------|
| 100%水厂污泥        | 2.4 MPa | 19%   |
| 70%水厂污泥+30%自然粘土 | 4.5 MPa | 16%   |
| 50%水厂污泥+50%自然粘土 | 6.1 MPa | 12%   |
| 100%自然粘土        | 6.9 MPa | 8%    |

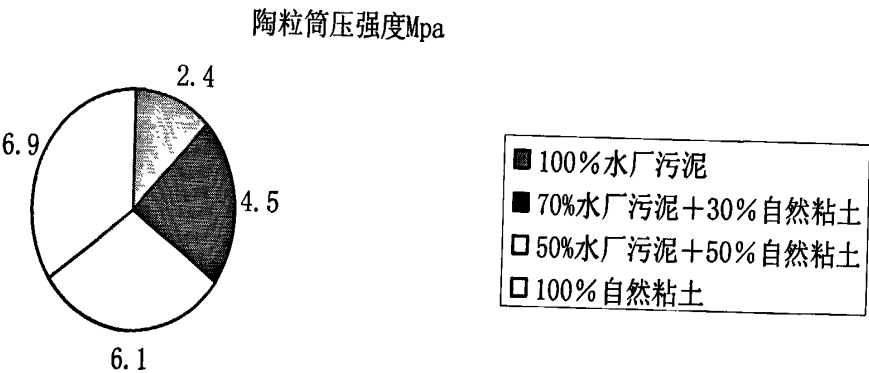


图 4.1 烧结陶粒的筒压强度

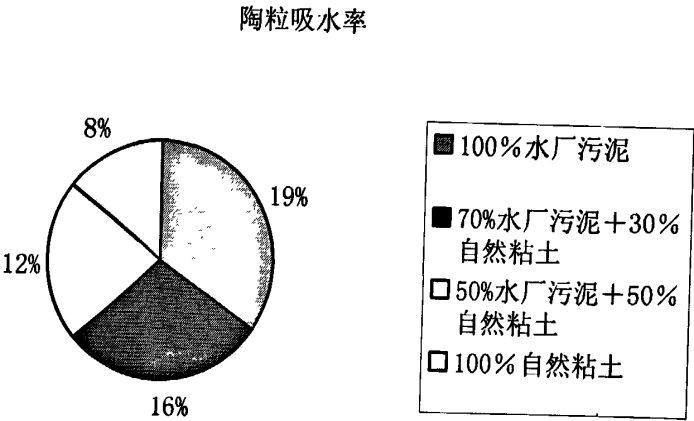


图 4.2 烧结陶粒的吸水率

4.5 结论与讨论

### 4.5.1 结论

① 烧结陶粒原料100%水厂脱水污泥通过南通大地陶粒公司陶粒制造厂现有生产设备和工艺条件很难生产出合格陶粒产品。因为南通陶粒厂转窑温度靠人工经验掌握，链条式带动转窑滚动，采用对轮挤压式造粒很难适应原料可塑性差的生料球粒在烘干、烧结、膨胀的时间和温度的变化过程。

② 在南通大地公司现有制陶粒厂工艺设备不变情况下，降低造粒原料百分比率，使水厂脱水污泥降低到70%以下，掺入自然粘土30%以上，对轮挤压的生料球密实性增大，抗压强度和热强度有所提高，并进一步摸索生料球预热烘干温度，烧结烧胀温度及时间等工艺参数，使水厂脱水污泥为主的原料才能烧结成粘土陶粒合格产品。

### 4.5.2 讨论

① 水厂脱水污泥中， $\text{SiO}_2$ 含量在50%左右， $\text{Al}_2\text{O}_3$ 在20%左右，基本上和天然粘土组分相接近。另外，水厂脱水污泥中含有有机物质较高（烧失减量达15%左右，铁的含量达6%左右，并在污泥中存在碳酸盐和硫酸盐等化学组分，这些物质组分在加热时能产生大量气体，在高温焙烧陶粒时所产生熔液能束缚住所产生的气体，从而形成多泡体，降低了骨料的容重。因此只要调节污泥原料中增塑性原料组分，适量增加 $\text{SiO}_2$ 成份，相应降低 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 组分，能够烧结成容重较轻的粘土陶粒。

② 水厂脱水污泥制造粘土陶粒工艺流程和工艺参数需进行考证和试验后确定。

第一，解决污泥制陶粒生料球密实度问题首先需解决污泥的粘性即可塑性问题。解决办法是将污泥直接塑化法成球改成粉磨法成球，这样能使污泥粒度更细，粘性更好，可塑性指数增大，料球成型密实性会更好，当然污泥造粒会增加设备和投资成本。

第二，解决生料球在输送和烘干预热过程中易爆裂现象。在解决第一个问题的基础上，通过制陶粒特定设备，探索原料配方，生料球烘干、烧结、烧胀温度和时间等工艺参数，能够将水厂污泥制成合格的陶粒产品。

## 第5章 水厂脱水污泥烧结陶粒实验室研究试验

### 5.1 水厂脱水污泥直接塑化法烧结陶粒存在的技术难点

#### 5.1.1 生料球强度低易断裂

利用水厂脱水污泥在南通大地陶粒厂双筒嵌入式转窑烧结陶粒时,采用对辊挤压塑化法造粒,由于水厂脱水污泥塑性差,原料含水率难以控制,在炼泥时投加干粉或烟道灰,从而制出的生料球强度低、易断裂成碎块。

#### 5.1.2 生料球进窑烧结料球炸裂现象严重

造成水厂脱水污泥采用塑化法造粒进焙烧窑出现料球爆炸的原因初步分析,可能有多种原因:首先生料球不密实,由于料球在 400℃ 左右烘干时,料球中组水和结构水开始逐渐失去,可能引起第一次爆炸。这当然和水厂脱水污泥塑性差亦有相当的关系,造成料球挤压时,密实程度不够。

其次料球焙烧时炸裂原因和水厂脱水污泥化学组成组分不符合粘土陶粒原料成分密切相关。若污泥中碱金属碱土金属在适当温度时所产生的熔融物质不能及时包住原料中碳酸盐硫酸盐在 800℃ 以上分解的气体,这就可能引起第二次料球炸裂。

最后转窑热工参数控制不当,窑温过高超过 1100—1200℃ 时,料球已经生成的熔融硅酸盐又可能和其他固相物质再次粘结,从而造成新的爆裂,产生碎粒。

#### 5.1.3 陶粒产品筒压强度偏低

由于水厂脱水污泥塑性较差,特别在炼泥时投加过干粉或烟道灰后粘性更差,造成生料球抗压强度和抗热强度变小,料球烘干烧结烧胀过程,物质受热不均,所烧结成的陶粒筒压强度必然偏低。

#### 5.1.4 陶粒产品吸水率偏高

由于生料球的不密实所引起的抗压强度和热强度都不能达到工艺参数要求,因此生料球在预热烘干、烧结烧胀过程中伴随着料球爆裂现象,产生大小不一的碎料,与大颗粒物料共同存在高温转窑内,其吸热、放热、熔融时间的不一致,从而导致烧结的陶粒外壳釉层包裹不严,釉层很薄,因此单位时间内吸水率偏高。

### 5.1.5 水厂脱水污泥烧结的陶粒呈灰褐色

水厂脱水污泥由于含铁量没有得到充分利用,在污泥制成的生料球,在焙烧时预热时间预热温度偏长偏高的情况下,污泥中有机物含量过早被烧掉,使料球中氧化铁应该还原时而不能得到充分还原反应,所以出窑后的陶粒产品绝大部分呈灰褐色。

### 5.1.6 陶粒产品堆积密度大,膨胀程度低

水厂脱水污泥在南通大地陶粒厂生产试验烧结的陶粒堆积密度基本在  $600\sim 800\text{kg}/\text{m}^3$ ,而且陶粒膨胀程度也不够,这和制陶原料化学成分有很大关系。

制陶粒的原料(污泥)成陶成份必须含有  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 等,约占原料主体 75%左右;另外原料中须有助熔氧化物,如碱金属氧化物( $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ )、碱土金属氧化物( $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ )及  $\text{FeO}$ 等;最重要的一点促使陶粒在焙烧过程中达到良好的膨胀性能,其原料中必须含有发气物质,如碳酸盐类,有机质,硫化物。

制陶粒原料中含有氧化铁和矿物结晶水,在陶粒坯体中经加热会分解产生气体,如原料中吸附水,矿物结晶水的挥发,有机物质分解产生  $\text{CO}$  及  $\text{CO}_2$ ;碳酸盐类热分解产生  $\text{CO}_2$ ;铁氧化物的还原作用生成  $\text{CO}_2$ 及  $\text{H}_2\text{O}$ ;硫化物热分解产生  $\text{SO}_x$

等等，这些新产生的物质都是陶粒膨胀的必要条件，概括起来制陶粒原料中满足陶粒膨胀时必须具备两个条件：

- ① 陶粒原料应当有一定的化学组成，并有一定数量的对于  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  起助熔作用的熔剂，使物料在高温下产生足够粘稠的熔融物，以便能够产生包住由高温下产生的气体。
- ② 原料应当含有一种物质，在物料达到上述熔融温度时能够分解出气体，或是与其它物质反应放出气体。

5.2 水厂脱水污泥烧结陶粒主辅原料的检测

5.2.1 水厂脱水污泥烧结陶粒主原料的检测

若利用水厂脱水污泥作为烧结陶粒主要原料，必须知道主原料化学组成及组分含量，然后研究与世界及国内典型陶粒厂生产粘土陶粒主原料化学组成组分的差异，以及水厂脱水污泥的特性，再来选择辅料外掺料的品种及掺入量的多少。

5.2.1.1 典型烧结粘土陶粒原料化学组成组分分析

典型烧结粘土陶粒原料化学组成组分见表 5.1。

表 5.1 典型烧结粘土陶粒原料化学组成组分分析

| 编号 | 成分%<br>产地 | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}+\text{MgO}$ | $\text{R}_2\text{O}$ | 有机质     | 烧失量  |
|----|-----------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|---------|------|
| 1  | 杭嘉湖河道淤泥   | 63.40          | 16.80                   | 9.40                    | 3.80                    | 4.10                 | /       | 5.10 |
| 2  | 前苏联高膨性土   | <60            | 14~20                   | 6~10                    | <7                      | 3~5                  | 1~2     |      |
| 3  | 丹麦（莱卡型）   | 48~68          | 14~20                   | 2~9                     | 0~8                     | 1~5                  |         |      |
| 4  | 新疆粘土      | 53~58          | 16~20                   | 5~6                     | 4.4~6.8                 | 2.7~3.9              | 0.5~1.1 |      |
| 5  | 黄河淤泥（山东）  | 52~60          | 13~15                   | 4.5~5                   | 11.3                    | 3.68                 |         | 6~10 |
| 6  | 台湾石门水库淤泥  | 59.31          | 19.97                   | 6.53                    | 1.4~2.0                 | 0.5~1.0              | 2.9     | 7.7  |

|   |                        |       |       |      |     |     |  |     |
|---|------------------------|-------|-------|------|-----|-----|--|-----|
| 7 | 高强陶粒<br>原料             | 55~65 | 18~25 | 6~10 | 4~6 | 2~5 |  | 3~5 |
| 8 | CM.Riley<br>适宜粘度<br>原料 | 53~79 | 12~26 | 8~24 |     |     |  |     |

5.2.1.2 水厂脱水污泥化学组成组分测定

测定结果见表 5.2。

表 5.2 水厂脱水污泥化学组分含量测试结果

| 测试<br>组分 (%)                   | 上海<br>2004.11 |       |       | 新疆<br>2005.2 | 浙江<br>2005.9 | 平均    |
|--------------------------------|---------------|-------|-------|--------------|--------------|-------|
|                                |               |       |       |              |              |       |
| SiO <sub>2</sub>               | 52.82         | 57.06 | 49.30 | 49.00        | 50.71        | 51.78 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20.05         | 18.48 | 21.66 | 19.92        | 20.84        | 20.19 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6.22          | 5.58  | 6.14  | 6.94         | 5.27         | 6.03  |
| CaO+MgO                        | 3.51          | 3.33  | 3.49  | 3.53         | 3.18         | 3.41  |
| R <sub>2</sub> O               | 3.50          | 3.53  | 3.32  | 3.14         | 1.83         | 3.06  |

续表 5.2. 水厂脱水污泥化学组分含量测试结果

| 测试<br>组分 (%) | 上海<br>2004.11 |       |       | 新疆<br>2005.2 | 浙江<br>2005.9 | 平均    |
|--------------|---------------|-------|-------|--------------|--------------|-------|
|              |               |       |       |              |              |       |
| 有机物          |               |       |       | 3.42         | 4.45         | 3.94  |
| 烧失量          | 12.84         | 11.32 | 15.20 | 13.0         | 13.46        | 13.16 |

备注：水厂脱水污泥化学组分含量分别由中国科学院上海硅酸盐研究所无机材料分析测试中心和新疆维吾尔自治区建筑材料构件产品质量监督检验站，以及中国地质矿产部杭州检测中心进行测试。

从表 5.2 可知, 水厂脱水污泥化学成分含量平均值  $\text{SiO}_2$  51.78,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  20.19,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  6.03,  $\text{CaO}+\text{MgO}$  3.41,  $\text{R}_2\text{O}$  3.06, 有机物含量 3.94, 烧失量为 13.16。

从水厂脱水污泥化学组分含量与世界及国内典型陶粒厂制陶粒主要原料的化学组分含量分析, 基本上符合粘土烧结陶粒原料相关化学组分要求, 但水厂脱水污泥  $\text{SiO}_2$  组分含量稍低, 烧失量含量偏高。因此水厂污泥烧结粘土陶粒原料需适量掺入外加料, 才能满足污泥烧制陶粒相关化学组分含量要求。

5.2.1.3 水厂脱水污泥岩相鉴定

水厂脱水污泥实验室制陶粒研究过程中, 分别两次送检水厂脱水污泥岩相鉴定, 现将水厂污泥岩相鉴定结果列入表 5.3。

从表 5.3 中水厂脱水污泥岩相鉴定结果可以得出如下结论:

① 水厂脱水污泥(干基块)岩相鉴定均由国家地质部杭州中心实验室检测, 分别于 2005 年 2 月和 8 月两次检测, 其结果基本一致, 鉴定结论: 水厂脱水污泥为粉砂结构, 以粉砂为主, 泥质物次之。

② 粉砂(0.01-0.1mm)主要为石英, 呈次棱角状, 泥质物(<0.01mm)以水云母为主, 可能会有蒙脱石、高岭石, 呈微细鳞片集合体。

③ 水厂脱水物泥若作为泥土资源烧结轻质陶粒, 污泥中明显缺少粘土矿物质、斜长石、蒙脱石、伊利石等成份。

表 5.3 水厂脱水污泥岩相鉴定结果

| 编号    | 鉴定样品名称日期                               | 镜下描述                                                                                                                      |
|-------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 05-1# | 2005 年 2 月<br>闵行水厂脱水污泥块样本:<br>淡绿色、结构均一 | 该土块具粉砂结构, 以粉砂为主, 泥质次之。粉砂(0.01~0.1mm)以石英为主, 棱角状、次棱角状, 另有云母少量。泥质物(<0.01mm), 以水云母为主, 可能会有蒙脱石、高岭石等, 粘土少量, 土块成份结构均一, 若经成岩作用会变为 |

|       |                                                        |                                                                                                                                            |
|-------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|       |                                                        | 泥质粉砂岩，物质构成主要泥质物，粉砂结构。                                                                                                                      |
| 05-2# | 2005 年 8 月<br>闵行水厂脱水泥块样<br>本：<br>淡绿色，结构均一，遇<br>水无明显变化。 | 物质组成：主要为粉砂，泥质物次之。泥土具粉砂结构。以粉砂为主，泥质物次之。粉砂（0.01-0.1mm）为石英，次棱角状，泥质物（<0.01mm）以水云母为主，可能含少量蒙脱石或高岭石，均呈微细鳞片集合体，泥土中发现少量铁质。泥土成份、结构均一，分选性中等，鉴定结论，泥质粉砂。 |

注：样品鉴定均由中国地质部杭州中心实验室检测。

5.2.1.4 台湾和新疆陶粒原料岩相鉴定

台湾石门水库淤泥和新疆粘土用于烧结粘土陶粒的原料岩相鉴定结果见表 5.4。

从表 5.4 与表 5.3 相比可知，水厂脱水污泥泥矿物质组分中缺少粘土矿物高岭石和伊利石，影响着污泥的可塑性。

表 5.4 部分地区陶粒原料岩相鉴定比较

| 编号 | 名称       | 镜下描述                                             |
|----|----------|--------------------------------------------------|
| 1  | 台湾石门水库污泥 | 台湾石门水库淤泥矿物成份：淤泥主要由石英、绿泥石、斜长石、伊利石等矿物组成。           |
| 2  | 新疆粘土     | 岩相分析，镜下观察，主要为粘土矿物（高岭石、伊利石），大部分为呈显微隐晶质，碎屑物石英、长石等。 |

5.2.1.5 污泥颗粒粒径分析

水厂污泥颗粒粒径大小影响着污泥的可塑性，污泥颗粒粒径组成对于污泥烧结陶粒时膨胀性能的好坏也有着直接的影响，在一般情况下，粘土的细小颗粒含

量越多，膨胀性能越好，自然粘土是由各种大小不同的颗粒组成的，不同粒径的颗粒，其矿物质种类、化学成分都不同，因而物理化学性质亦不同，通常粘土中由砂粒、粉粒和粘粒组成，其表现特征列表 5. 5。

表 5. 5 土粒的粒组划分及土粒特征

| 粒组名称 | 粒径范围 (mm)                                               | 一般特征                                          |
|------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 砂粒   | 粗: 2-0.5<br>中: 0.5-0.25<br>细: 0.25-0.1<br>极细: 0.1-0.075 | 易透水，无粘性，遇水不膨胀，干燥时粉散，毛细水上升高度不大，随粒径变小而增大。       |
| 粉粒   | 粗: 0.075-0.01<br>细: 0.01-0.005                          | 透水性小，湿时稍有粘性，遇水膨胀小，干时稍有收缩，毛细水上升较大，较快，极易出现冻胀现象。 |
| 粘粒   | < 0.005                                                 | 透水性小，湿时有粘性，可塑性，遇水膨胀大，干时收缩显著，毛细水上升高度大，但速度缓慢。   |

研究利用水厂脱水污泥烧结陶粒，有必要对污泥颗粒粒径大小进行测试，测定结果见表 5. 6、表 5. 7。

表 5. 6 水厂污泥颗粒粒径分布测试值

| 样品名称                      | 闵行水厂浓缩污泥    | 闵行水厂脱水污泥<br>(阳) | 闵行水厂脱水污泥<br>(阴) |
|---------------------------|-------------|-----------------|-----------------|
| 粒径范围<br>( $\mu\text{m}$ ) | 累计重量百分率 (%) |                 |                 |
| <0.30                     | 5.8         |                 |                 |
| <0.50                     | 14.9        |                 | 12.6            |
| <0.70                     | 18.8        |                 |                 |
| <1.00                     | 22.9        | 12.8            | 21.4            |
| <2.00                     | 33.5        | 22.0            | 33.8            |
| <4.00                     | 42.2        | 31.6            | 46.6            |
| <7.00                     | 57.4        | 42.5            | 63.2            |

|                           |      |      |      |
|---------------------------|------|------|------|
| <10.00                    | 64.2 | 47.4 | 71.2 |
| <15.00                    | 76.6 | 57.4 | 79.2 |
| <20.00                    | 84.6 | 67.5 | 83.4 |
| <25.00                    | 97.2 | 74.4 | 91.6 |
| <30.00                    | 100  | 79.4 | 93.8 |
| <40.00                    |      | 91.3 | 100  |
| <50.00                    |      | 98.7 |      |
| <60.00                    |      | 100  |      |
| 中心粒径<br>( $\mu\text{m}$ ) | 5.5  | 11.2 | 4.6  |

备注：测定方法：光透沉降法

测定单位：中国科学院上海硅酸盐研究所。

表 5.7 水厂污泥颗粒粒径分布值

| 编号 | 颗粒名称                      | 砂粒   |             |            | 粉粒        |      | 粘粒   | 备注                     |
|----|---------------------------|------|-------------|------------|-----------|------|------|------------------------|
|    |                           | 粗    | 中           | 细          | 粗         | 细    |      |                        |
|    | 颗粒直径<br>( $\mu\text{m}$ ) | >250 | 250<br>-100 | 100-<br>74 | 74-<br>10 | 10-5 | <5   |                        |
| 1  | 闵行水厂<br>污泥                | 0    | 0           | 0          | 35.8      | 22.0 | 42.2 | 浓缩污泥                   |
| 2  | 闵行水厂<br>污泥                | 0    | 0           | 0          | 52.6      | 15.8 | 31.6 | 加阳离子PAM脱水污泥            |
| 3  | 闵行水厂<br>污泥                | 0    | 0           | 0          | 28.8      | 24.6 | 46.6 | 加阴离子PAM脱水污泥            |
| 4  | 闵行水厂<br>脱水污泥              | 11.9 |             |            | 13.2      |      | 24.5 | 2005.8 月采集干枯脱水<br>污泥测定 |

备注：① 编号 4 测试单位中国地质矿产部杭州中心实验室。

## ② 单位为污泥颗粒占百分率%。

从表 5.6、5.7 测试结果可以知道, 污泥颗粒粒径在粘粒范围内(粒径小于 0.005mm)占 24.5-46.6%, 污泥在此粒径范围内: 比表面积较大, 是矿物组分中最活跃的成分, 这对污泥可塑性和烧制陶粒时膨胀性能都能带来正面效应。

另外污泥颗粒越细, 污泥塑性就越好, 若水厂污泥干枯后粉磨达到理想的可塑性, 但水量加大, 这对正常利用污泥制陶粒生料球影响较大。

可塑性是半干法生产陶粒原料重要工艺指标之一, 它的大小决定于粘土的矿物成份, 粘土颗粒大小及其分散度, 非粘土矿物杂质的含量、有机质含量及其结构组成等, 这些都直接影响着粘土成球的性质。

### 5.2.1.6 水厂脱水污泥塑性

粘土从泥浆到坚硬, 要经历几个不同的物理状态, 当粘土含水量小时, 呈半固体坚硬状态, 当含水率适当增加, 粘土颗粒之间距离就会增大, 粘土呈可塑状态, 如含水量再逐渐增加, 粘土中就会出现较多的自由水份, 粘土变稠而成液体流动状态, 体积增加。归纳起来, 粘土随着含水量的增加分别处于固态、半固态、可塑态和流动状态。

因此, 粘土的塑性指数即由测定粘土的塑限及液限所得。

## ① 塑性:

粘土由可塑状态变为半固体状态的界限含水量为塑限, 其试验时, 取少量(粘土)试验料在手中搓揉, 然后将其放在玻璃板上, 用手掌把(粘土)试料搓成细长条, 由于手的温度和自然干燥状态作用, (粘土)使试验料的含水量不断减少, 直到玻璃上的(粘土)试验料搓成直径 3mm 时粘土条时, 粘土条正好断成数截, 这时粘土条的含水率即为塑限。

## ② 液限

液限是细土粒由可塑状态转入到流动状态的界限含水量。

## ③ 塑性指数

粘土的液限含水量与塑限含水量的变化之差即为塑性指数。

塑性指数可用图式表示, 即:

$$\text{塑性指数} = W_L - W_p$$

粘土的稠度界限见图 5.1

干土的休止角一般为  $43^\circ - 46^\circ$ 。

水厂脱水污泥干枯后经测试液限  $W_L$  为 55.6, 塑限  $W_p$  为 42.6, 污泥塑性指数为 8-13, 见表 5.8. 闵行水厂污泥可塑性测试结果。

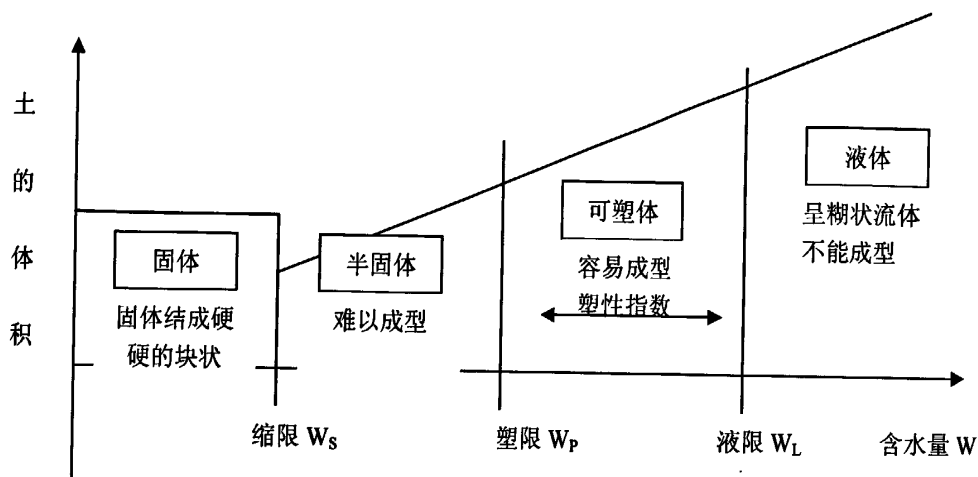


图 5.1 稠度界限

表 5.8 闵行二水厂脱水污泥可塑性测定

| 土样名称                        | 液限<br>WL | 塑限<br>WP | 塑性<br>指数 |
|-----------------------------|----------|----------|----------|
| 05-1#<br>(05 年 2 月)<br>脱水污泥 |          |          | 8        |
| 05-2#<br>(05 年 8 月)<br>脱水污泥 | 55.6     | 42.6     | 13.0     |

根据水厂污泥可塑性测定结果,若利用脱水污泥烧结合格陶粒产品还存在一定的难度,因为水厂脱水污泥干燥后不易塑化。污泥中含粉砂成分较多,污泥脱水时又在污泥中加入一定量高分子聚丙烯酰胺,从而使污泥进一步改变了物理性能。磨细后加水塑化性能仍然不佳,成球后有沁水现象。在制陶粒生料球时,料

球强度低。在烧制陶粒时,膨胀温度范围窄而易炸裂,因此要想烧出合格的陶粒产品,必须添加一定数量的其他原料,调整脱水污泥原料的组成,增加原料塑性,改变原料焙烧性能。

### 5.2.2 水厂脱水污泥烧结陶粒辅助原料检测

#### 5.2.2.1 外加剂选择

粘土膨胀性能的好坏,视粘土中含结晶矿物质的多少,以及粘土中化学组分和矿物组分是否符合粘土膨胀所需的相关要素。

水厂脱水污泥通过岩相分析,其矿物成分以粉砂为主、粘土次之,显然污泥中缺少相关物质,使污泥烧结时膨胀程度欠佳。

一般情况下,采用粘土烧结陶粒时,若试烧粘土膨胀不够理想时,必须调整原料中化学成分或降低焙烧温度,此时选择煤粉、铁粉渣油、硫铁矿渣、活性白土废渣等作为外加剂改变粘土组分,促使粘土烧成理想的陶粒产品,以水厂脱水污泥为主要原料烧制陶粒,若外加剂选择上述任何一种物质都有困难,由于掺量较少,工艺较难控制,原料混合较难均化,上述方案较难实施。

因此我们选择了沪杭嘉湖地区河道淤泥作为水厂脱水污泥主要掺入外加剂,来增加脱水污泥的粘土成分,提高原料的塑性指数(杭嘉湖淤泥颗粒细度较细,塑性指数达到15),另外掺入外加剂选择了印染厂污泥来增加脱水污泥中铁和有机物含量(相关研究证明,原料中增加有机质,污泥球体在高温情况下,能通过气、固二相反应促使粘土(污泥)膨胀,有机质中的碳氢化合物受热放出的气体,特别是 $H_2$ 是造成 $Fe_2O_3$ 还原的重要条件)。

选择上述辅料,符合资源再利用原则,而且原料充足、价格低廉、选择的外掺料相关测试数据介绍如下:

#### 5.2.2.2 外掺料河道淤泥的化学组成组分测定

河道淤泥又称次生粘土,是原生粘土经过风化、搬运和沉积而迁移到其他地方的,它遍布全国各地,尤其江浙等南方地区为多,颜色不一。主要以

黑黄色为主，有的江河淤泥具有良好的可塑性和良好的膨胀性能。

本项目在研究过程中分别选用了浙江杭嘉湖平原河道网淤泥和江苏常州宏云陶粒厂河道淤泥，其化学成分检测结果列表 5.9。

表 5.9 河道淤泥化学组成组分测定

| 序号 | 成份(%)<br>产地   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO+MgO | R <sub>2</sub> O | 有机质  | 烧失量  |
|----|---------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------|------------------|------|------|
|    |               |                  |                                |                                |         |                  |      |      |
| 1  | 浙江杭嘉湖平原河道网淤泥  | 63.40            | 16.00                          | 6.3                            | 3.85    | 4.10             |      | 5.0  |
| 2  | 江苏常州宏云陶粒厂河道淤泥 | 64.50            | 13.86                          | 4.88                           | 2.34    | 1.84             | 3.01 | 8.72 |

5.2.2.3 河道淤泥可塑性、颗粒组成、堆积密度

河道淤泥颗粒分析和塑性指数测定结果列表 5.10。河道淤泥干堆积密度 820-840kg/m<sup>3</sup>，细度<20mm，土黄色，遇水易于塑化。

表 5.10 河道淤泥颗粒分析和塑性指数测定结果

| 淤泥样品采集地       | 淤泥颗粒组分% |      | 淤泥塑性指数 |      |      |
|---------------|---------|------|--------|------|------|
|               | 粉粒      | 粘粒   | 流限     | 塑限   | 塑性指数 |
| 浙江杭嘉湖平原河道网淤泥  | 76      | 19   | 35     | 20   | 15   |
| 江苏常州宏云陶粒厂河道淤泥 | 80.2    | 15.9 | 42.4   | 25.9 | 16.9 |

5.2.2.4 河道淤泥岩相鉴定

外加剂采用江苏常州宏云陶粒厂采集的河道淤泥，岩相如下：

泥土具粉砂结构，以粉砂为主，水云母为次，蒙脱石少量。粉砂(0.01-0.1mm)为棱角状，水云母(<0.01mm)与蒙脱石(<0.01mm)呈细微鳞片状集合体。泥土中局域见少量铁质物富集(褐铁矿)。泥土成分结构较均一，鉴定结论：泥质粉砂、浅黄色、较软、遇水膨松。

### 5.2.2.5 膨润土化学组成组分

膨润土矿石，外观呈块状，蜡状光泽，贝壳状质轻，指甲能刻划，亦能划出蜡状刨花，矿石浸水膨胀，失水后干裂崩解，砖红色矿石干裂后硬度较大。膨润土矿石从颜色来看，主要有紫红色(或砖红色)，以及青灰色两大类，矿石的矿物成分以蒙脱石为主，含少量高岭土、绿泥石、水云母等泥土矿物，浅黄色矿石含蒙脱石达90%以上，紫红色矿石含蒙脱石达70-90%，其碱性系数为0.02-0.16，属钙基膨润土。产于江苏省金坛市膨润土，其储量约为2000万吨，现已大量开采。膨润土的化学组成组分如下：

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| SiO <sub>2</sub>               | 49—55% |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11—18% |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4—9%   |
| CaO                            | 0.9—6% |
| MgO                            | 2—5%   |
| K <sub>2</sub> O               | 1—2%   |

膨润土又称膨土岩，属强可塑性粘土，以蒙脱石为主，比重为2.4—2.8，干膨润土<2mm，颗粒堆积密度为780—820kg/m<sup>3</sup>。

在水厂脱水污泥中掺入少量膨润土，可增加陶粒原料的可塑性和膨润性，使烧制的陶粒强度增大，并能减少陶粒的吸水率。掺入水厂脱水污泥烧制的陶粒质量显著提高，效果非常明显。

### 5.2.2.6 印染厂污泥化学成分测定

纺织印染工业废水的主要来源是印染废水，其废水量大、色度高、成分复杂，废水中有染料、浆料、助剂、纤维杂质及无机盐等。废水经混凝沉淀池沉淀，底

部形成印染浓缩污泥，经板框压滤，卸下印染污泥泥饼。按污泥所含成分的不同又可分为印染有机污泥和印染无机污泥两大类，有机污泥是以有机物为主要成分，典型的有机污泥是剩余生物污泥，油脂厂废水污泥等。

印染厂污泥作为水厂脱水污泥制陶粒外加剂，主要是利用其含有大量有机物质及  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等成分。印染厂污泥为砖红色，有异味，干燥后不易塑化，本研究曾对浙江、江苏两地印染厂污泥作如下测试研究，其结果见表 5.11：

表 5.11 江浙两地印染厂污泥化学成分测定值

| 泥样采集地<br>测定项目                                | 浙江海宁地区印<br>染厂                               | 江苏江阴地区印<br>染厂                               | 江苏江阴<br>某印染厂                                |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 挥发性固体<br>(燃烧)                                | 42.5%                                       | 31%                                         | 烧失量/ $10^{-2}\text{kg/m}^3$<br>28.34        |
| 灰分<br>燃烧残渣                                   | 52.5%                                       | 69%                                         | —                                           |
| $\text{SO}_3/10^{-2}\text{kg/m}^3$           | —                                           | —                                           | 5.76                                        |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3/10^{-2}\text{kg/m}^3$ | —                                           | —                                           | 41.54                                       |
| 堆积密度<br>(干污泥)                                | $\leq 20\text{mm}$ 颗粒<br>$600\text{kg/m}^3$ | $\leq 20\text{mm}$ 颗粒<br>$600\text{kg/m}^3$ | $\leq 20\text{mm}$ 颗粒<br>$600\text{kg/m}^3$ |

备注：样品由国土资源部杭州矿产资源监督检测中心测试。

5.3 水厂脱水污泥烧结陶粒生料球造粒方法选择试验

5.3.1 水厂脱水污泥塑化法造粒

5.3.1.1 100%水厂脱水污泥塑化法造粒烧结陶粒试验

塑化法在粘土陶粒的生产方法中较为普遍，其方法是在加工过程中原料在各相应的设备上被粉碎，以破坏其原始结构，清除大块的杂质，必要时洒水及掺入外加剂搅拌和碾细，直至均匀。采用塑化法对粘土原料加工时应保证制得匀质的泥料，并制备适宜的粒径原料球。很多工厂目前采用带孔对辊机成型原料球。用

对辊挤压成球（制粒）生产的陶粒产品级配较差，以京、津、沪以前的老厂产品来看，陶粒粒径为10~20mm，颗粒含量占90%以上，而且10mm以下不足10%。陶粒长径比往往达到2~2.5，与成球盘成球工艺相比其粒径偏粗。

塑化法与粉磨成球法主要区别为原料制备部分，塑化法即将进场原料经对辊破碎机破碎至3mm以下，加水塑化挤压成球，料球的质量好坏与原料塑化程度，加水多少等均有很大关系。

100%水厂脱水污泥采用塑化法生产陶粒，考虑到污泥原料的预均化及陈化，使样品污泥化学成份和物理性能的均匀性，因此将水厂脱水污泥先进行自然干燥后，经对辊机破碎后，经筛分，不同粒级的原料再经加水手工成球和不同粒级的原料加水后陈化24小时手工成球，分别在自然环境中放置一昼夜之后，放入105±5℃恒温干燥箱中烘干，取出泥球后放入一台硅碳棒高温炉内，400℃恒温预热20min，最后将泥球移至另一台硅碳棒高温炉内焙烧，温度控制在1175℃，焙烧10min，现将100%水厂脱水污泥塑化法烧结陶粒情况列入表5.12。

表 5.12 100%水厂脱水污泥不同细度塑化法造粒烧结陶粒比较

| 试验结果 | 细度 (mm)      | <5   | <2.5 | <1.25 | <0.63 | <0.315 | 备注        |
|------|--------------|------|------|-------|-------|--------|-----------|
|      |              |      |      |       |       |        |           |
| 纯料   | 表观密度 (kg/m³) | 1243 | 1258 | 1081  | 1133  | 1197   | 立即加水成球    |
|      | 1h 吸水率 (%)   | 7.6  | 9.3  | 8.4   | 7.1   | 6.8    |           |
| 纯料   | 表观密度 (kg/m³) | 1046 |      |       |       | 1078   | 陈化 24h 成球 |
|      | 1h 吸水率 (%)   | 7.5  |      |       |       | 5.5    |           |

注：① 预热温度 400℃，预热时间 20min，焙烧温度 1175℃，焙烧时间 10min。  
② 污泥加水成球自然干燥 24 小时。  
③ 污泥加水陈化 24 小时成球再自然干燥 24 小时。

从表 5.12，100%水厂脱水污泥不同细度塑化法制陶粒焙烧比较结果可以得出如下结论：

① 水厂污泥干燥后经粉碎加水一昼夜陈化后塑化成球试烧成陶粒表现密度稍小些。污泥细度<0.315mm，未陈化料塑化成球焙烧陶粒其表现密度为1197kg/m³。陈化 24 小时塑化成球焙烧陶粒，其表现密度为 1078kg/m³。

② 水厂污泥干燥后，粉碎细度<0.315mm 污泥未陈化塑化成球焙烧陶粒，其

产品 1h 吸水率为 6.8%。经陈化后污泥塑化成球焙烧陶粒，其产品 1h 吸水率为 5.5%。

③ 水厂脱水污泥塑化法制陶粒，污泥原料陈化比未陈化塑化造粒更好。

5.3.1.2 水厂脱水污泥添加外加剂塑化法造粒烧结陶粒试验

添加外加剂的目的是设法降低污泥塑化法制陶粒其表观密度和延长焙烧温度范围。水厂污泥外加剂不同配比不同焙烧温度试验结果见表 5.13 和水厂污泥外加剂不同细度塑化法烧结陶粒比较见表 5.14。

表 5.13 水厂污泥外加剂不同配比和不同焙烧温度试验

| 温度(℃)<br>试烧结果 |                                      |                              | 1050 | 1100 | 1125 | 1150 | 1175 | 1200 |
|---------------|--------------------------------------|------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|               |                                      |                              |      |      |      |      |      |      |
| I             | 纯料 85%<br>河泥 15%                     | 表观密度<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) | 1458 | 1400 | 1250 | 1212 | 975  | 870  |
|               |                                      | 1h 吸水率<br>(%)                | 21.4 | 13.1 | 8.0  | 6.5  | 5.5  | 6.8  |
| II            | 纯料 85%<br>河道泥 10<br>%<br>工业污泥<br>10% | 表观密度<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) | 1363 | 1250 | 1034 | 875  | 715  | 690  |
|               |                                      | 1h 吸水率<br>(%)                | 20.0 | 8.0  | 9.0  | 7.4  | 7.3  | 8.0  |

注：1.预热 400℃，预热时间 20min。  
2. 编号 II 在焙烧 1200℃，10min 陶粒稍粘结。  
3.烧结陶粒原料细度<0.315mm。

表 5.14. 水厂脱水污泥外加剂不同细度塑化法造粒烧结陶粒比较

| 细度 (mm)<br>试烧结果              |                              | <5  | <2.5 | <1.25 | <0.63 | <0.315 | 备注        |
|------------------------------|------------------------------|-----|------|-------|-------|--------|-----------|
|                              |                              |     |      |       |       |        |           |
| 纯料 85%<br>河道泥 10%<br>工业污泥 5% | 表观密度<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) | 820 | 645  | 720   | 684   | 715    |           |
|                              | 1h 吸水率<br>(%)                | 5.8 | 6.0  | 6.7   | 7.2   | 7.3    |           |
| 纯料 85%<br>河道泥 10%<br>工业污泥 5% | 表观密度<br>(Kg/m <sup>3</sup> ) | 824 |      |       |       | 840    | 陈化 24h 成球 |

|  |               |     |  |  |  |     |  |
|--|---------------|-----|--|--|--|-----|--|
|  | 1h 吸水率<br>(%) | 7.3 |  |  |  | 6.7 |  |
|--|---------------|-----|--|--|--|-----|--|

注：预热温度 400℃，预热时间 20min；焙烧温度 1175℃，焙烧时间 10min。

从表 5.13、表 5.14 所列数据可以得出如下结论

① 水厂脱水污泥塑化法焙烧陶粒加不同外加剂之后可以延长焙烧温度范围，能降低陶粒表观密度，但烧出的陶粒表皮较厚。

② 水厂脱水污泥制陶粒外加剂配方：85%水厂脱水污泥+10%河道淤泥+5%印染污泥，符合制轻质陶粒原料基本要求，但烧成范围只有 50℃左右。虽然脱水污泥掺入外加剂比纯水厂污泥焙烧的陶粒表观密度要小一些，但欲烧出优质超轻陶粒其加工要更精细，操作要更严格。

5.3.2 水厂脱水污泥粉磨成球法造粒烧结陶粒试验

5.3.2.1 100%水厂脱水污泥粉磨成球法造粒烧结陶粒试验

试验步骤如下：

(1) 水厂脱水污泥干燥细磨

将脱水污泥在 105±5℃恒温干燥箱内烘干至含水量<2%以下，并将水厂污泥在磨机内磨细。

污泥磨后细度控制 4900 孔/cm<sup>2</sup> (160 目) 过筛，筛余<20%。

(2) 粉状水厂脱水污泥加水成型

细泥粉内加水 35%左右，手工成球粒径为 φ8-12mm，自然干燥一昼夜。

(3) 生料球烘干预热

球体放入 105±5℃恒温干燥箱内烘干 24 小时。

干燥后的球体移入预热高温炉预热温度 400℃，预热时间 20min。

(4) 料球焙烧结果

不同焙烧温度污泥制陶粒试验，结果见表 5.15。

(5) 结果分析

① 水厂脱水污泥属不均质低膨胀原料，根据原料分析，水厂污泥烧结陶粒，污泥中有一定的化学组成，当达到一定温度后能产生粘稠的熔融物包住气体，并在产生熔融物时能产生一定气体，而且熔融物能对原料中 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 起助熔作用。

表 5.15 100%脱水污泥粉磨成球法制陶粒在不同温度下

焙烧试验结果

| 项目 \ 序号                   | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 焙烧温度 (°C)                 | 1050 | 1075 | 1100 | 1125 | 1150 | 1175 | 1200 | 1225 |
| 焙烧时间 (min)                | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   |
| 预热时间 (min)                | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   |
| 预热温度 (°C)                 | 400  | 400  | 400  | 400  | 400  | 400  | 400  | 400  |
| 表观密度 (kg/m <sup>3</sup> ) | 1670 | 1560 | 1335 | 1200 | 1040 | 1090 | 955  | 890  |
| 推算堆积密度                    | 1000 | 940  | 800  | 720  | 630  | 650  | 580  | 535  |
| 1h 吸水率 (%)                | 12   | 8.7  | 6.5  | 6.5  | 8.3  | 5.6  | 6.3  | 7.8  |
| 备注                        |      |      |      |      |      |      |      | 粘连   |

但根据试验结果，脱水污泥纯料虽然经烘干磨细增加了原料的匀质性，改善了成球质量，但在 1075-1175℃ 的温度范围内试烧成的陶粒，且堆积密度仍大于 650 kg/m<sup>3</sup>，不属超轻陶粒范围。

② 水厂脱水污泥虽然通过粉磨后，颗粒变小，原料得到了均化处理，膨胀性能有所改善，但是本原料中污泥矿物成份以砂质原料为主，又有碎屑矿物石英，由于难熔矿物高岭石、石英以及颗粒粗大的粉砂存在，在一定烧成温度下熔融物还没产生料球即已炸裂，还有自来水在净化过程中加入一定量的铝盐，从而造成污泥中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 偏高。污泥在脱水过程中又加入高分子絮凝剂，改变了污泥原来的一些性质，因此造成污泥制陶粒焙烧温度高，降低了膨胀性能。

③ 目前国外（如丹麦）强调生产轻质陶粒的粘土原料必须以伊利石为主，次之蒙脱石，而高岭石因铝含量高，粘度大，不利于气体膨胀。

为了使污泥原料烧结时弱膨胀性提高，必须调整污泥原料中粘土质成份，降低铝质含量，增强在一定温度范围内的熔融物和发气体质含量，改善原料的焙烧性能。通过掺入外加剂比较，最后选择了掺入沪杭嘉湖地区丰富的江河淤泥及印染厂污泥组合污泥原料进一步进行粉磨法制陶粒试验。

5.3.2.2 水厂脱水污泥掺入外加剂粉磨成球法造粒烧结陶粒试验

掺入外加剂不同配比试烧结果

水厂脱水污泥掺入河道淤泥和印染厂污泥，不同配合比试烧结果见表 5. 16。

表 5. 16 不同温度不同外加剂配合比水厂脱水污泥粉磨成球法

制陶粒试烧结果

| 编号 | 工艺方法 | 配合比 (%) |      |      | 不同焙烧温度下表观密度、堆积密度、1h 吸水 |     |      |          |     |       |
|----|------|---------|------|------|------------------------|-----|------|----------|-----|-------|
|    |      | 脱水污泥    | 河道淤泥 | 工业污泥 | 焙烧 1150℃               |     |      | 焙烧 1175℃ |     |       |
|    |      |         |      |      | 表观                     | 堆积  | 1h 吸 | 表观       | 堆积  | 1h 吸  |
| 1# | 磨细   | 100     | 0    | 0    | 1040                   | 624 | 8.3  | 1090     | 654 | 5.6   |
| 2# | 磨细   | 95      | 0    | 5    | 700                    | 420 | 8.0  | 635      | 385 | 11.70 |
| 3# | 磨细   | 85      | 10   | 5    | 640                    | 390 | 6.5  | 615      | 365 | 8.9   |
| 4# | 磨细   | 75      | 20   | 5    | 486                    | 295 | 9.8  | ——       | ——  | ——    |

备注：1) 预热温度为 400℃，时间 20min，焙烧时间 10min；  
2) 其中编号 1#堆积密度>500kg/m<sup>3</sup>，编号 2#陶粒脱皮、强度低，编号 3#产品好（相关指标已经符合超轻陶粒质量要求），编号 4#强度低，1175℃焙烧粘结。

从表 5. 16 中分析可得如下结论：

① 从水厂脱水污泥掺入外加剂配方筛选结果分析，3#配方最好（85%水厂脱水污泥+10%河道污泥+5%印染污泥），实验室试烧的陶粒产品品质最好，其堆积密度<500 kg/m<sup>3</sup>。

② 3#配方，将水厂污泥粉磨成球法实验室试烧的小批量陶粒，送新疆维吾尔自治区建筑材料建筑构件产品质量监督检验站按国标 GB/T 17431.1-1998《轻集料及其试验方法》对小试产品测试结果：水厂脱水污泥制的陶粒堆积密度 430 kg/m<sup>3</sup>，表观密度 780 kg/m<sup>3</sup>，筒压强度 2.00MPa，1h 吸水率 9.0%，软化系数 0.9，粒型系数 1.3，空隙率 45%，颗粒级配 2.5~16mm，此产品符合国标规定的一等品要求。

5. 3. 2. 3 选择最佳配合料粉磨成球法料球强度试验

(1) 原料配方

85%水厂脱水污泥+10%杭嘉湖地区河道淤泥+5%印染厂污泥。

(2) 磨细过筛

将配方原料烘干按比例混合磨细至 4900 孔/cm<sup>2</sup> 过筛，160 目筛余<20%。

(3) 加水陈化

磨细的原料加水陈化 24 小时。

(4) 手工成球

将陈化后的原料手工成球  $\phi$  5-15mm，自然干燥一昼夜。

(5) 料球烘干

将自然干燥一昼夜的料球放入 105±5℃烘干箱内烘干，以备试验。

(6) 料球强度测试

表 5.17 料球在不同温度下烘干 1.5m 自由落下破碎率

| 编号 | 料球烘干温度 (℃) | 烘干时间 (min) | 1.5m 自由落下料球破碎率(%) |
|----|------------|------------|-------------------|
| 1  | 105        | /          | 0                 |
| 2  | 200        | 20         | 20                |
| 3  | 300        | 20         | 20                |
| 4  | 400        | 20         | 0                 |

选择不同温度下烘干的料球强度测试，温度选择为 105℃、200℃、300℃、400℃状况下烘干料球，然后分别将料球离地面 1.5m 高自由落下，观察料球在何种温度下烘干，料球强度最大，试验见表 5.17。

从表 5.17 试验结果，生料球预热温度选择 400℃和预热时间 20min 料球在 1.5m 自由落下破碎率为最小。

## 5.4 水厂脱水污泥烧结陶粒原料配方筛选

### 5.4.1 原料配方筛选目的

为了确保水厂脱水污泥为主原料烧结轻质陶粒生产性试验的成功，并为今后建厂设计提供科学的工艺参数，在掌握了水厂脱水污泥、河道淤泥、印染污泥等外加剂，化学成分和含量、岩相鉴定、塑限、流限、塑性指数、污泥颗粒大小等物料相关参数的基础上，能科学地对水厂脱水污泥进行改良，使原料可塑性能增强，改善原料的焙烧性能，减少和避免陶粒生料球进预热窑和焙烧窑产生的炸裂现象。为解决这些技术难点，特进行水厂脱水污泥烧结陶粒物料外加剂品种和配合比筛选。

通过水厂脱水污泥掺入不同品种的和不同百分比含量外加剂配制成的原料，摸索何种配方能使制陶粒原料可塑性能增加，因此选择了河道污泥和高可塑性膨润土（水厂脱水污泥塑性指数  $1P=8\sim13$ ，河道淤泥塑性指数  $1P=16.9$ ），将 80% 水厂脱水污泥加 15%河道淤泥再加 5%印染污泥所组成的混合原料其塑性指数  $1P=17.5$ ，因此通过配合料配方的筛选和试焙烧，这样可以选择出焙烧性能优良、生料球不易炸裂、焙烧温度范围宽的配合比配方，从而保障今后生产试验时生产正常稳定、产品合格。

5.4.2 水厂脱水污泥制陶粒原料配方筛选

通过对水厂脱水污泥、河道淤泥、印染厂污泥、膨润土、不同级配比例，共组成 14 组，见表 5.18 以及表 5.19，并将表 5.19 相关数据绘成曲线图 5.2。

表 5.18 水厂脱水污泥掺入不同外加剂组成的原料配合比例汇总表

| 原料<br>编 号          | Z<br>(%) | H<br>(%) | GW<br>(%) | P<br>(%) | 成球粒径<br>(mm) | 成球方法       | 备注 |
|--------------------|----------|----------|-----------|----------|--------------|------------|----|
| 1 <sup>#</sup>     | 70       | 25       | 5         |          | 10~12        | 手工成球       |    |
| 2 <sup>#</sup>     | 70       | 15       | 5         | 10       | 10~12        | 手工成球       |    |
| 3 <sup>#</sup>     | 80       | 15       | 5         |          | 10~12        | 手工成球       |    |
| 4 <sup>#</sup>     | 80       | 10       | 5         | 5        | 10~12        | 手工成球       |    |
| 5 <sup>#</sup>     | 70       | 20       |           | 10       | 10~12        | 手工成球       |    |
| 6 <sup>#</sup>     | 90       | 5        | 5         |          | 10~12        | 手工成球       |    |
| 7 <sup>#</sup>     | 90       | 5        |           | 5        | 10~12        | 手工成球       |    |
| 8 <sup>#</sup>     | 80       | 15       |           | 5        | 10~12        | 手工成球       |    |
| 9 <sup>#</sup>     | 80       | 10       |           | 10       | 10~12        | 手工成球       |    |
| 10 <sup>#</sup> -1 | 80       | 20       | 5         |          | 10~12        | 手工成球       |    |
| 10 <sup>#</sup> -2 | 80       | 20       | 5         |          | 10~12        | 仿成球盘<br>成球 |    |

|       |    |     |   |     |       |            |  |
|-------|----|-----|---|-----|-------|------------|--|
| 11*-1 | 80 | 10  | 5 | 5   | 10~12 | 手工成球       |  |
| 11*-2 | 80 | 10  | 5 | 5   | 10~12 | 仿成球盘<br>成球 |  |
| 12*   | 80 | 7.5 | 5 | 7.5 | 10~12 | 仿成球盘<br>成球 |  |

注：Z——闵行自来水脱水污泥      H——常州宏云陶粒厂河道淤泥  
GW——三杰印染厂污泥      P——金坛膨润土

表 5.19 水厂脱水污泥掺入不同外加剂原料配合比  
制陶粒试焙烧结果汇总

| 项目<br>编号 | 预热条件      |             | 焙烧条件      |             | 1 小时<br>吸水率<br>(%) | 表观密度<br>(km/m <sup>3</sup> ) | 堆积密度<br>(km/m <sup>3</sup> ) | 备注  |
|----------|-----------|-------------|-----------|-------------|--------------------|------------------------------|------------------------------|-----|
|          | 温度<br>(℃) | 时间<br>(min) | 温度<br>(℃) | 时间<br>(min) |                    |                              |                              |     |
| 1#       | 400       | 20          | 1100      | 10          | 9.3                | 830                          | 500                          |     |
|          |           |             | 1125      | 10          | 6.3                | 550                          | 330                          |     |
|          |           |             | 1150      | 10          | 5.0                | 500                          | 300                          |     |
|          |           |             | 1175      | 8           | 18                 | 440                          | 270                          | 粘结  |
| 2#       | 400       | 20          | 1100      | 10          | 12.3               | 580                          | 350                          |     |
|          |           |             | 1125      | 10          | 11.0               | 450                          | 270                          |     |
|          |           |             | 1150      | 8           | 8.0                | 380                          | 230                          | 稍粘结 |
|          |           |             | 1175      | 8           | 5.6                | 350                          | 210                          | 粘结  |
| 3#       | 400       | 20          | 1100      | 10          | 9.4                | 1070                         | 640                          |     |
|          |           |             | 1125      | 10          | 7.4                | 755                          | 450                          |     |
|          |           |             | 1150      | 10          | 9.2                | 615                          | 370                          |     |
|          |           |             | 1175      | 10          | 11.6               | 520                          | 315                          | 粘结  |
|          |           |             | 1175      | 8           | 9.6                | 590                          | 350                          |     |
| 4#       | 400       | 20          | 1100      | 10          | 6.9                | 620                          | 370                          |     |
|          |           |             | 1125      | 10          | 8.5                | 500                          | 300                          |     |

|  |  |  |      |   |      |     |     |    |
|--|--|--|------|---|------|-----|-----|----|
|  |  |  | 1150 | 8 | 9.6  | 410 | 250 |    |
|  |  |  | 1175 | 8 | 21.0 | 400 | 240 | 粘结 |

续表 5.19 水厂脱水污泥掺入不同外加剂原料配合比  
制陶粒试焙烧结果汇总

| 项目<br>编号       | 预热条件       |             | 焙烧条件       |             | 1 小时<br>吸水率<br>(%) | 表观密度<br>(km/m <sup>3</sup> ) | 堆积密度<br>(km/m <sup>3</sup> ) | 备注 |
|----------------|------------|-------------|------------|-------------|--------------------|------------------------------|------------------------------|----|
|                | 温度<br>(°C) | 时间<br>(min) | 温度<br>(°C) | 时间<br>(min) |                    |                              |                              |    |
| 5 <sup>#</sup> | 400        | 20          | 1100       | 10          | 6.9                | 1030                         | 620                          |    |
|                |            |             | 1125       | 10          | 12.1               | 970                          | 580                          |    |
|                |            |             | 1150       | 8           | 10.3               | 780                          | 470                          |    |
|                |            |             | 1175       | 8           | 2.2                | 750                          | 450                          |    |
| 6 <sup>#</sup> | 400        | 20          | 1100       | 10          | 7.0                | 1010                         | 610                          |    |
|                |            |             | 1125       | 10          | 8.0                | 820                          | 500                          |    |
|                |            |             | 1150       | 10          | 9.5                | 750                          | 450                          |    |
|                |            |             | 1175       | 10          | 13.0               | 630                          | 380                          |    |
| 7 <sup>#</sup> | 400        | 20          | 1100       | 10          | 5.0                | 1220                         | 730                          |    |
|                |            |             | 1125       | 10          | 5.0                | 1090                         | 650                          |    |
|                |            |             | 1150       | 10          | 7.8                | 980                          | 590                          |    |
|                |            |             | 1175       | 10          | 11.0               | 910                          | 550                          |    |
| 8 <sup>#</sup> | 400        | 20          | 1100       | 10          | 5.5                | 1250                         | 750                          |    |
|                |            |             | 1125       | 10          | 6.0                | 1100                         | 660                          |    |
|                |            |             | 1150       | 10          | 8.8                | 960                          | 580                          |    |
|                |            |             | 1175       | 10          | 12.0               | 850                          | 510                          |    |

续表 5. 19. 水厂脱水污泥掺入不同外加剂原料配合比

制陶粒试焙烧结果汇总

| 项目<br>编号               | 预热条件      |             | 焙烧条件      |             | 1 小时<br>吸水率<br>(%) | 表观密度<br>(km/m <sup>3</sup> ) | 堆积密度<br>(km/m <sup>3</sup> ) | 备注 |
|------------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|--------------------|------------------------------|------------------------------|----|
|                        | 温度<br>(℃) | 时间<br>(min) | 温度<br>(℃) | 时间<br>(min) |                    |                              |                              |    |
| 9 <sup>#</sup>         | 400       | 20          | 1100      | 10          | 6.0                | 1020                         | 610                          |    |
|                        |           |             | 1125      | 10          | 8.0                | 910                          | 550                          |    |
|                        |           |             | 1150      | 10          | 9.5                | 830                          | 500                          |    |
|                        |           |             | 1175      | 10          | 13.0               | 760                          | 460                          |    |
| 10 <sup>#</sup> -<br>1 | 400       | 20          | 1100      | -           | -                  | -                            | -                            |    |
|                        |           |             | 1125      | 10          | -3.5               | 810                          | 490                          |    |
|                        |           |             | 1150      | 10          | 8.3                | 630                          | 380                          |    |
|                        |           |             | 1175      | 8           | 15.5               | 540                          | 320                          | 粘结 |
| 10 <sup>#</sup> -<br>2 | 400       | 20          | 1100      | -           | -                  | -                            | -                            |    |
|                        |           |             | 1125      | 10          | 5.1                | 840                          | 510                          |    |
|                        |           |             | 1150      | 10          | 8.9                | 665                          | 400                          |    |
|                        |           |             | 1175      | 8           | 10.4               | 610                          | 370                          |    |
| 11 <sup>#</sup> -<br>1 | 400       | 20          | 1100      | -           | -                  | -                            | -                            |    |
|                        |           |             | 1125      | 10          | 9.1                | 570                          | 340                          |    |
|                        |           |             | 1150      | 10          | 12.2               | 450                          | 270                          |    |
|                        |           |             | 1175      | 8           | 16.4               | 440                          | 260                          | 粘结 |

续表 5. 19 水厂脱水污泥掺入不同外加剂原料配合比

制陶粒试焙烧结果汇总

| 项目<br>编号               | 预热条件       |             | 焙烧条件       |             | 1 小时<br>吸水率<br>(%) | 表观密度<br>(km/m <sup>3</sup> ) | 堆积密度<br>(km/m <sup>3</sup> ) | 备注 |
|------------------------|------------|-------------|------------|-------------|--------------------|------------------------------|------------------------------|----|
|                        | 温度<br>(°C) | 时间<br>(min) | 温度<br>(°C) | 时间<br>(min) |                    |                              |                              |    |
| 11 <sup>#</sup> -<br>2 | 400        | 20          | 1100       | -           | -                  | -                            | -                            |    |
|                        |            |             | 1125       | 10          | 4.3                | 640                          | 380                          |    |
|                        |            |             | 1150       | 10          | 8.5                | 485                          | 290                          |    |
|                        |            |             | 1175       | 8           | 12.4               | 450                          | 270                          | 粘结 |
| 12 <sup>#</sup>        | 400        | 20          | 1100       | 10          | 5.9                | 730                          | 440                          |    |
|                        |            |             | 1125       | 10          | 7.2                | 670                          | 400                          |    |
|                        |            |             | 1150       | 10          | 7.5                | 500                          | 300                          |    |
|                        |            |             | 1175       | 5           | 1400               | 480                          | 290                          | 粘结 |

根据图 5.2，水厂脱水污泥掺入不同外加剂在不同焙烧温度下，与陶粒表观密度的关系所绘制的曲线来分析，可以得出如下结论：

- ① 14 组配方主原料均为水厂脱水污泥，但掺入量从 70-80-90%，，虽然各配方所制得的生球料在相同预热温度，相同预热时间，相同焙烧时间，不同焙烧温度情况下，其陶粒产品表观密度相差很大。
- ② 除了主原料中掺入河道淤泥和印染厂污泥以外，主原料所占比例越大，在相同焙烧温度下其表观密度越大。
- ③ 主原料（水厂脱水污泥）中若掺入膨润土量越大，陶粒表观密度越小。
- ④ 根据水厂脱水污泥综合利用的宗旨，污泥烧制建筑材料尽量提高水厂脱水污泥掺入量的原则，选择 3<sup>#</sup>，10-2<sup>#</sup>，11-2<sup>#</sup>配方供生产试验配方。

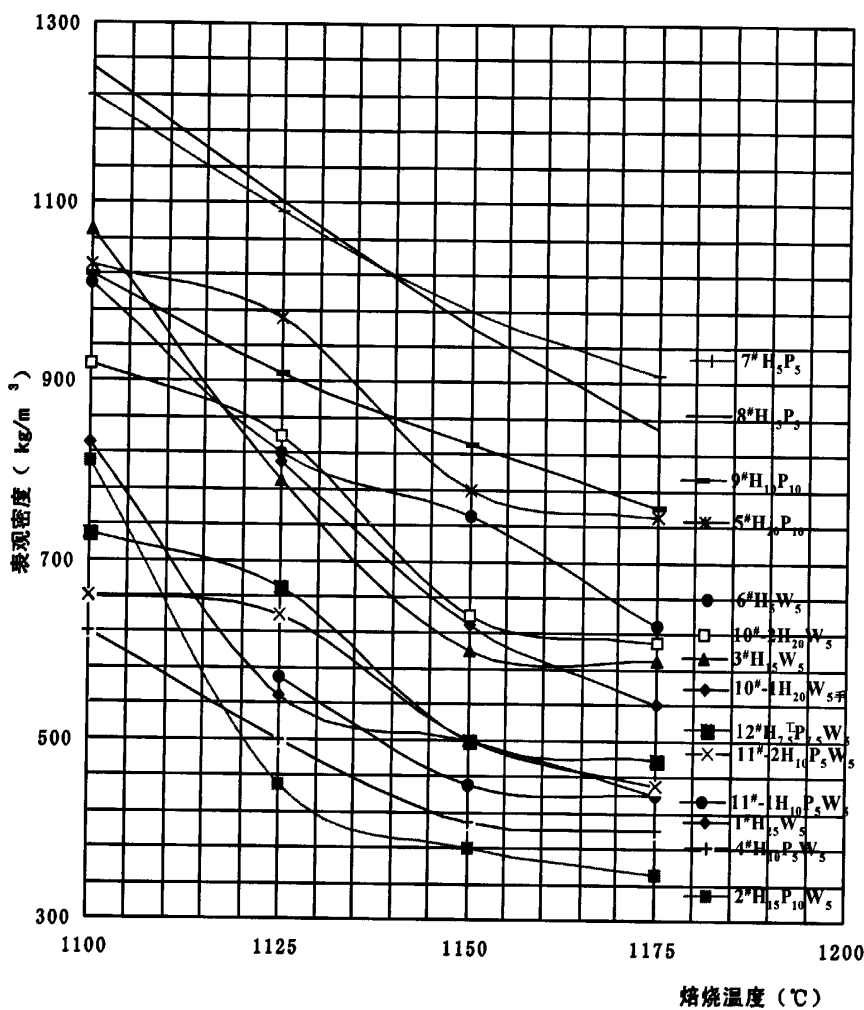


图 5.2 水厂脱水污泥掺不同外加料不同焙烧温度下与表观密度的关系曲线

5.5 水厂脱水污泥烧结陶粒工艺参数选择

5.5.1 3#-0 配方预热时间选择试验

经 105±5℃ 干燥后生料球，由硅碳棒高温炉进行预热和焙烧，预热温度为 400℃，焙烧温度为 1150℃，焙烧时间为 10min，选择最佳的预热时间，陶粒产品

试烧结果见表 5. 20。

表 5. 20 水厂污泥 3#-0 配方生料球烧结陶粒

不同预热时间产品试烧结果

|              |      |      |      |      |      |
|--------------|------|------|------|------|------|
| )            | 400  | 400  | 400  | 400  | 400  |
| 预热时间 (min)   | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   |
| 表观密度 (kg/m³) | 854  | 800  | 784  | 839  | 867  |
| 1h 吸水率 (%)   | 6. 3 | 7. 5 | 6. 3 | 6. 5 | 5. 0 |

备注：① 成球原料：水厂污泥 85%，杭嘉湖河道淤污泥 10%，印染厂污泥 5%。

② 粒度 5~15mm。

③ 焙烧温度 1150℃，焙烧时间 10min。

从表 5. 20 可以看出，焙烧温度为 1150℃，焙烧时间为 10min，预热温度 400℃，预热时间 20min，此时陶粒表观密度和单位时间吸水率指标比较好。

5. 5. 2 3#-0 配方预热温度选择试验

经 105±5℃ 干燥后生料球，由硅碳棒高温炉进行不同预热温度试验，但是预热时间固定为 20min，焙烧温度为 1150℃，焙烧时间 10min，陶粒产品试验结果见表 5. 21。

表 5. 21 水厂脱水污泥 3#-0 配方生料球烧结陶粒

不同预热温度产品试烧结果

|              |      |     |     |     |      |
|--------------|------|-----|-----|-----|------|
| 预热温度 (℃)     | 300  | 350 | 400 | 450 | 500  |
| 预热时间 (min)   | 20   | 20  | 20  | 20  | 20   |
| 表观密度 (kg/m³) | 697  | 721 | 784 | 862 | 1338 |
| 1h 吸水率 (%)   | 10.2 | 9.0 | 6.3 | 6.3 | 3.7  |

备注：① 成球原料：水厂污泥 85%，杭嘉湖污泥 10%，印染厂污泥 5%

② 粒度 5~15mm

③ 预热温度低，放入焙烧，炉内有炸裂。

④ 焙烧温度 1150℃，焙烧时间为 10min。

从表 5. 21 可以看出，焙烧温度为 1150℃，焙烧时间 10min 预热时间固定，预热温度 400℃，此时制陶粒产品表观密度和吸水率指标都比较好。

5. 5. 3 3#-0 配方焙烧温度和焙烧时间选择试验

经 105±5℃ 干燥后生料球，由硅碳棒高温炉进行预热和焙烧，预热温度定为 400℃，预热时间定为 20min，选择不同焙烧温度和不同焙烧时间最佳结果，陶粒产品试烧结过见表 5. 21。

从表 5. 22 可以看出，预热温度为 400℃、预热时间为 20min，焙烧温度在 1150-1175℃，焙烧时间在 8-10min，其产品质量表观密度和吸水率都比较理想，其吸水率 1h 为 5. 9-8. 3%，表观密度为 810-1192kg/m³，最后参数选择焙烧时间 10min，焙烧温度为 1175℃。

表 5. 22 水厂脱水污泥 3#-0 配方生料球烧结陶粒  
不同焙烧温度和不同焙烧时间产品试烧结果

|                 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |          |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| 焙烧温度<br>(℃)     | 1000 | 1050 | 1075 | 1100 | 1125 | 1150 | 1150 | 1175 | 1175 | 1200 | 1200     |
| 焙烧时间<br>(min)   | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   | 8    | 10   | 8    | 10   | 8    | 10       |
| 表观密度<br>(kg/m³) | 1538 | 1443 | 1333 | 1176 | 930  | 810  | 784  | 708  | 692  | 粘结   | 粘结<br>严重 |
| 1h 吸水率<br>(%)   | 16.7 | 12.1 | 7.5  | 6.5  | 7.5  | 5.9  | 6.3  | 7.1  | 8.3  |      |          |

备注：① 成球原料、水厂污泥 85%、杭嘉湖河道淤泥 10%、工业印染污泥 5%  
② 粒度 5~15mm  
③ 预热温度 400℃，预热时间 20min

5. 5. 4 3#、10-2#、11-2#配方生料球预热时间选择试验

三组配方制成的陶粒生料球在 105±5℃ 烘干后，分别送入硅碳棒高温炉内

进行预热时间选择试验。3<sup>#</sup>配方焙烧温度为 1175℃。10<sup>#</sup>-2、11<sup>#</sup>-2 配方焙烧温度为 1150℃，三组配方焙烧时间均为 10min，预热温度皆为 400℃，三组配方陶粒产品试烧结果见表 5. 23。

表 5. 23 水厂脱水污泥为主原料三种配方  
生料球烧结陶粒不同预热时间产品烧试结果

| 配方<br>编号           | 预热时间<br>测定项目             | 10min | 15min | 20min | 25min | 30min |
|--------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    |                          |       |       |       |       |       |
| 3 <sup>#</sup>     | 表观密度(kg/m <sup>3</sup> ) | 570   | 540   | 530   | 580   | 620   |
|                    | 1 小时吸水率(%)               | 15.4  | 9.2   | 9.0   | 5.8   | 6.8   |
|                    | 备 注                      | 稍粘    | 稍粘    |       |       |       |
| 10 <sup>#</sup> -2 | 表观密度(kg/m <sup>3</sup> ) | 720   | 770   | 665   | 825   | 890   |
|                    | 1 小时吸水率(%)               | 10.9  | 8.3   | 8.9   | 9.0   | 6.6   |
|                    | 备 注                      | 热炸    |       |       |       |       |
| 11 <sup>#</sup> -2 | 表观密度(kg/m <sup>3</sup> ) | 530   | 550   | 485   | 530   | 560   |
|                    | 1 小时吸水率(%)               | 10.2  | 6.8   | 8.5   | 6.8   | 6.0   |

- 注：① 焙烧温度 3<sup>#</sup>为 1175℃，10<sup>#</sup>-2、11<sup>#</sup>-2 为 1150℃  
② 3<sup>#</sup>、10<sup>#</sup>-2、11<sup>#</sup>-2 焙烧时间 10min，预热温度 400℃  
③ 3<sup>#</sup>成球原料：水厂污泥 80%，河道淤泥 15%，印染污泥 5%  
④ 10<sup>#</sup>-2 成球原料：水厂污泥 80%，河道淤泥 20%，印染污泥 5%  
⑤ 11<sup>#</sup>-2 成球原料：水厂污泥 80%，河道淤泥 10%，印染污泥 5%，膨润土 5%  
⑥ 3<sup>#</sup>、10<sup>#</sup>-2、11<sup>#</sup>-2 粒度 5-15mm

从表 5. 23 分析可以看出，在预热温度 400℃ 情况下，相同焙烧温度 1150—1170℃ 之间，焙烧时间 10min 情况下，三个料球配方预热时间 20min 产品质量最佳，陶粒表观密度可控制在 485—665kg/m<sup>3</sup>，一小时吸水率可控制在 8. 5—9. 0%，而且生料球不易粘结和热炸，故建议生产试验料球预热时间为 20min 左右为佳。

5. 5. 5 3<sup>#</sup>、10<sup>#</sup>-2、11<sup>#</sup>-2 配方生料球预热温度选择试验

三组配方制成的陶粒生料球在 105±5℃ 烘干后分别移入硅碳棒高温炉进行

不同预热温度试验，但是三组配方生料球预热时间皆为 20min，焙烧时间皆为 10min，3<sup>#</sup>配方生料球焙烧温度为 1175℃、10<sup>#</sup>-2、11<sup>#</sup>-2 焙烧温度为 1150℃，三组配方陶粒产品试烧结果见表 5. 24、图 5. 3。

表 5. 24 水厂脱水污泥为主原料三组配方生料球  
烧结陶粒不同预热温度产品试验结果

| 配方编号               | 温度<br>项目                 | 300℃ | 350℃ | 400℃ | 450℃ | 500℃ |
|--------------------|--------------------------|------|------|------|------|------|
|                    |                          |      |      |      |      |      |
| 3 <sup>#</sup>     | 表观密度(kg/m <sup>3</sup> ) | 580  | 540  | 530  | 780  | 1200 |
|                    | 1h 吸水率(%)                | 14.0 | 13.3 | 9.0  | 4.9  | 3.4  |
|                    | 备 注                      | 粘结   |      |      |      |      |
| 10 <sup>#</sup> -2 | 表观密度(kg/m <sup>3</sup> ) | 620  | 720  | 665  | 960  | 1470 |
|                    | 1h 吸水率(%)                | 13.6 | 10.9 | 8.9  | 5.9  | 3.2  |
|                    | 备 注                      | 热炸   | 热炸减轻 |      |      |      |
| 11 <sup>#</sup> -2 | 表观密度(kg/m <sup>3</sup> ) | 480  | 510  | 485  | 720  | 1310 |
|                    | 1h 吸水率(%)                | 13.6 | 10.4 | 8.5  | 3.4  | 3.2  |
|                    | 备 注                      | 热炸   | 热炸减轻 |      |      |      |

备注：① 焙烧温度：3<sup>#</sup>为 1175℃，10<sup>#</sup>-2，11<sup>#</sup>-2 为 1150℃。  
② 3<sup>#</sup>、10<sup>#</sup>-2、11<sup>#</sup>-2 焙烧时间：10min，预热时间：20min。

由表 5. 24 和图 5. 3 可以看出，生料球在焙烧温度为 1150—1175℃ 之间，焙烧时间 10min，其最佳预热温度为 400℃，而且在此预热温度情况下，产品陶粒球在窑内不易粘结和热炸。三组配方采用预热温度为 400℃ 时，对应产品表观密度在 485—665kg/m<sup>3</sup>，对应产品 1 小时吸水率在 8. 5—9. 0%之间。故提供生产试验生料球预热温度控制在 400℃ 左右。

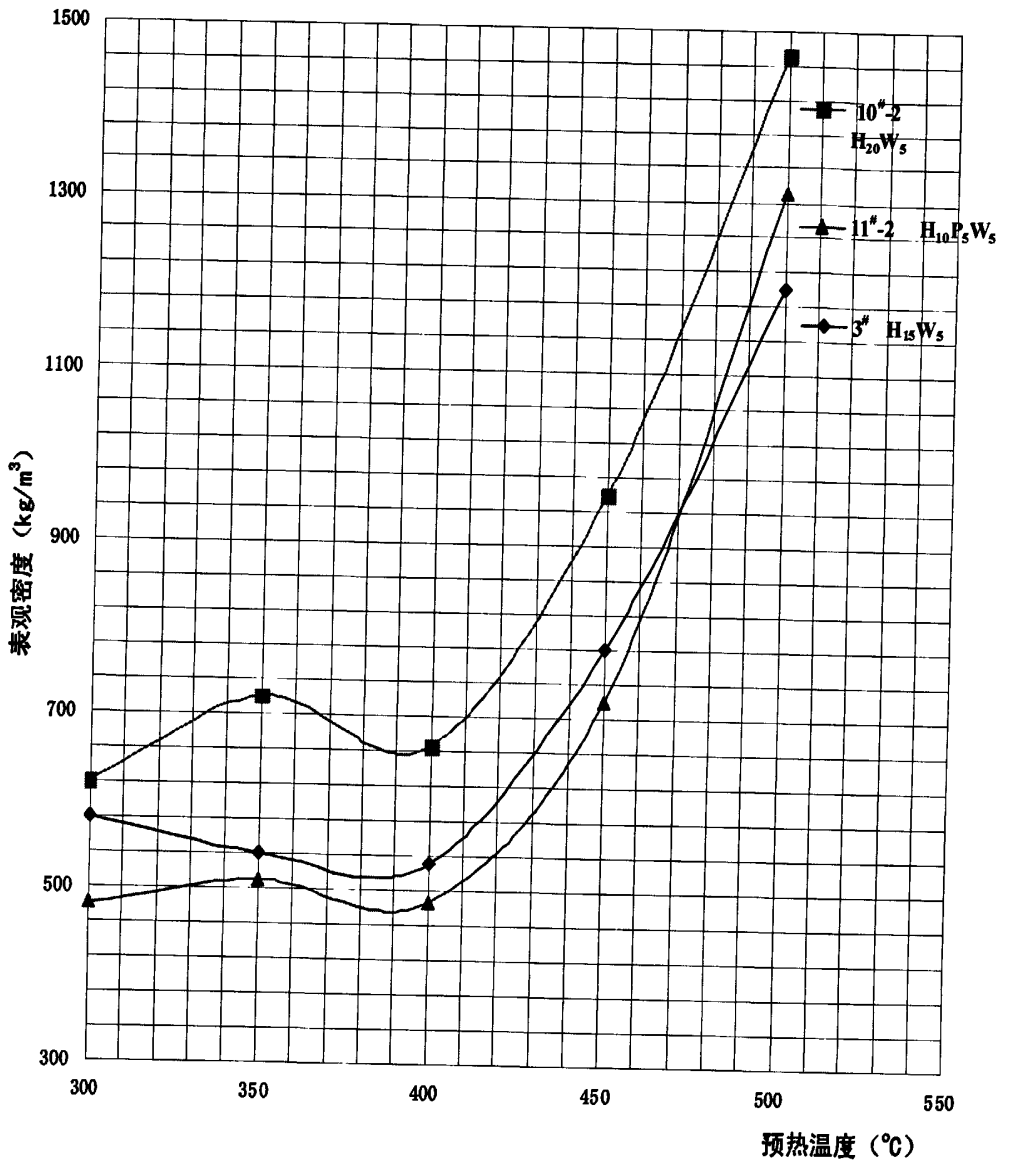


图 5.3 3#、10#-2、11#-2 配方料在不同预热温度下与表观密度的关系曲线

(焙烧温度 1150 °C、1175 °C，焙烧时间 10min，预热时间 20min)

#### 5.5.6 3#、10#-2、11#-2 配方生料球焙烧温度与焙烧时间选择试验

三组配方制成的陶粒生料球在  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  烘箱内烘干后，分别移入硅碳棒高温炉内进行生料球焙烧温度与焙烧时间选择试验。

此时三组配方生料球预热温度皆为  $400^\circ\text{C}$ ，预热时间皆为 20min。

三组配方陶粒产品试烧结果见表 5. 25:

表 5. 25 水厂脱水污泥为主原料三组配方生料球烧结陶粒不同焙烧温度与焙烧时间产品试验结果

| 焙烧温度℃<br>编号        |                              | 1000 | 1050 | 1100 | 1125 | 1150 | 1175 |      | 1200 |      |
|--------------------|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 3 <sup>#</sup>     | 焙烧时间(min)                    | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   | 8    | 10   | 4    | 8    |
|                    | 表观密度<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 1330 | 1160 | 1010 | 755  | 615  | 590  | 520  | 500  | 480  |
|                    | 1h 吸水率(%)                    | 15.9 | 13.6 | 6.2  | 7.7  | 9.1  | 9.6  | 11.6 | 13.4 | 13.4 |
|                    | 备 注                          |      |      |      |      |      |      |      | 稍粘   | 粘结   |
| 10 <sup>#</sup> -2 | 焙烧时间(min)                    | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   | 8    |      | 5    |      |
|                    | 表观密(kg/m <sup>3</sup> )      | 1400 | 1380 | 920  | 840  | 665  | 610  |      | 630  |      |
|                    | 1h 吸水率(%)                    | 16.5 | 10   | 8.7  | 5.1  | 8.9  | 10.4 |      | 11.5 |      |
|                    | 备 注                          |      |      |      |      |      | 稍粘   |      | 粘结   |      |
| 11 <sup>#</sup> -2 | 焙烧时间(min)                    | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   | 8    |      | 5    |      |
|                    | 表观密(kg/m <sup>3</sup> )      | 1530 | 1250 | 660  | 640  | 485  | 450  |      | 430  |      |
|                    | 1h 吸水率(%)                    | 13.7 | 10.6 | 7.6  | 4.3  | 8.5  | 12.4 |      | 17.0 |      |
|                    | 备 注                          |      |      |      |      |      | 稍粘   |      | 粘结   |      |

注：三组配方制成的生料球预热温度皆为 400℃、预热时间皆为 20min。

由表 5. 25 分析可以得出如下结论：

- ① 料球开始膨胀温度为 1050℃，料球最佳膨胀温度在 1150—1175℃之间，三个配方料球的膨胀温度范围在 75℃以上。
- ② 配方 11<sup>#</sup>-2 原料中加入膨润土，因此料球从 1100℃开始，产品陶粒表观密度大大降低，这充分说明了水厂污泥掺入一定量膨润土后制成的生料球焙烧性能更加良好。
- ③ 三种配方制成的生料球在相同预热温度（400℃），相同预热时间

20min 和相同焙烧温度 1100—1150℃范围内，其陶粒产品表观密度 3#为 1010—615 kg/m<sup>3</sup>，10#-2 为 920—665 kg/m<sup>3</sup>，11#-2 为 660—485 kg/m<sup>3</sup>。其 1 小时吸水率（%），3#为 6.2—9.1%，10#-2 为 8.9—5.1%，11#-2 为 8.5—4.3%，其指标都能符合国家相关标准。

故建议生产试验焙烧温度在 1125—1175℃之间，陶粒焙烧时间为 8-10min。

5.5.7 五组配方（0#、3#-0、3#、10#-2、11#-2）焙烧温度与陶粒表观密度（膨胀关系）试验

水厂脱水污泥 100%以及水厂污泥掺入不同外加料和不同百分率制成的生料球（不同原料配方）在相同预热温度、预热时间、相同的焙烧时间，不同的焙烧温度各配方组其陶粒膨胀结果都不一样，试验结果见表 5.26 与图 5.4。

根据表 5.26 和图 5.4，水厂脱水污泥纯料及掺入外加料烧结膨胀结果比较，可以得出如下结论：

- ① 100%水厂脱水污泥制成的陶粒生料球，与其他几组掺入不同外加料配方制成的生料球焙烧结果相差很大（在相同预热温度、预热时间、焙烧时间），尤 11#-2 配方最为显著，表观密度达到 450kg/m<sup>3</sup>；而 3#配方虽然没有加入膨润土，最低表观密度亦能达到 520 kg/m<sup>3</sup>；100%纯水厂脱水污泥最低表观密度也超过 1000 kg/m<sup>3</sup>。而生料球在预热和焙烧过程中还伴随着炸裂现象的产生。
- ② 在分析五组制陶粒配方原料中，除纯水厂脱水污泥而外，其他四种配方中都加入印染污泥 5%。其影响产品陶粒表观密度大小因素是随主原料水厂脱水污泥掺入量的多少而改变的，若掺入量越少，陶粒产品表观密度越小。制陶粒原料中掺入膨润土越多，产品表观密度越小。

表 5.26 5 组生料球原料配方陶粒不同烧结温度烧胀结果比较

| 配方<br>编号 | 焙烧温度 ℃                    | 1050 | 1075 | 1100 | 1125 | 1150 | 1175 |
|----------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|
|          | 表观密度 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |      |      |      |      |      |

|                    |                                             |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|---------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 0 <sup>#</sup>     | 水厂脱水污泥 100%                                 |      | 1560 | 1335 | 1200 | 1040 | 1090 |
| 3 <sup>#</sup> -0  | 水厂脱水污泥 85%<br>河道淤泥 10%<br>印染污泥 5%           |      | 1363 | 1250 | 1034 | 875  | 715  |
| 3 <sup>#</sup>     | 水厂脱水污泥 80%<br>河道淤泥 15%<br>印染污泥 5%           | 1160 |      | 1010 | 755  | 615  | 520  |
| 10 <sup>#</sup> -2 | 水厂脱水污泥 80%<br>河道淤泥 20%<br>印染污泥 5%           | 1380 |      | 920  | 840  | 665  | 610  |
| 11 <sup>#</sup> -2 | 水厂脱水污泥 80%<br>河道淤泥 10%<br>印染污泥 5%<br>膨润土 5% | 1250 |      | 660  | 640  | 485  | 450  |

备注：预热温度 400℃，预热时间 20min

焙烧时间 10min

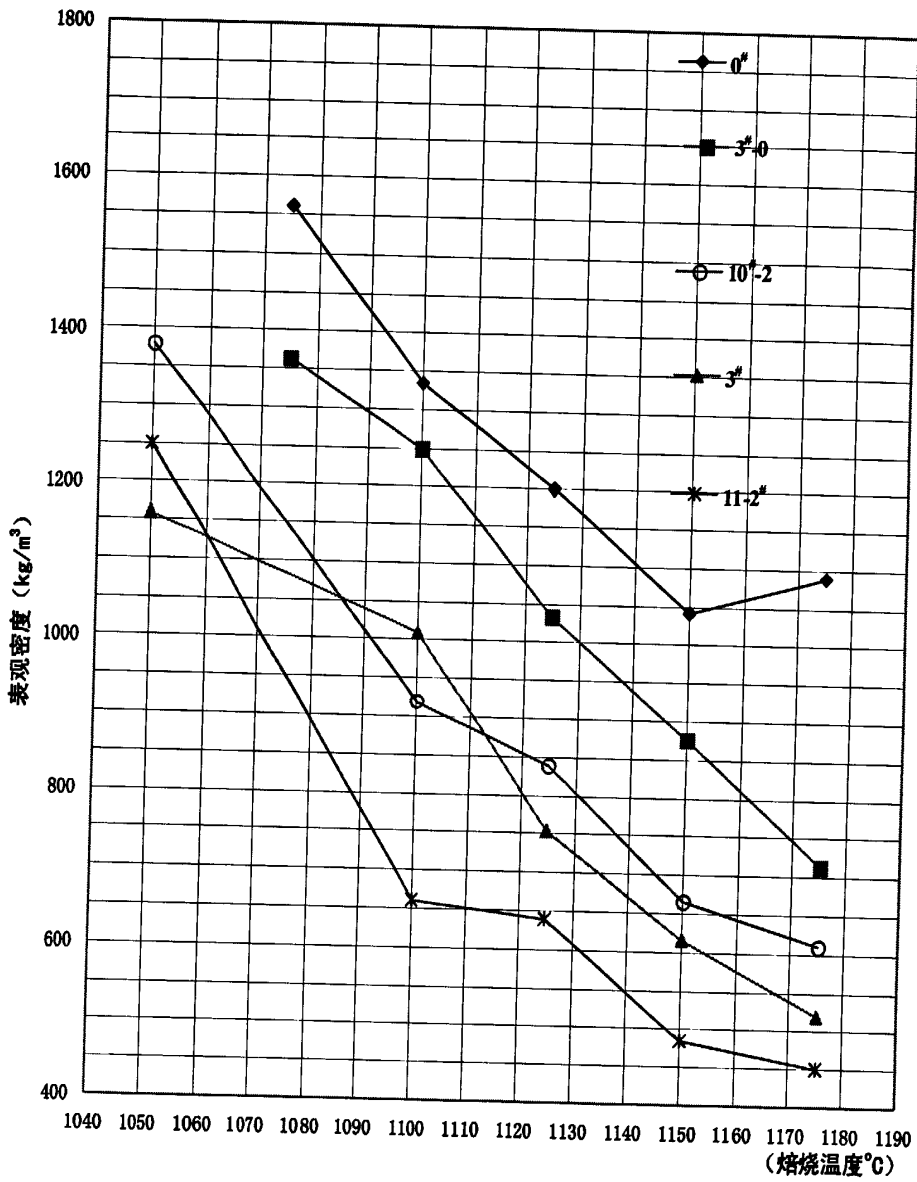


图 5.4 水厂脱水污泥纯料及加入不同外加料烧胀结果比较

(预热温度 400℃, 预热时间 20min, 焙烧时间 10min)

5.6 水厂脱水污泥实验室烧结陶粒产品质量检测结果

5.6.1 3#-0 生料球原料配方与工艺参数

- ① 生料球最佳配料：成球原料水厂污泥 85%，杭嘉湖河道淤泥 10%，印染厂污泥 5%。
- ② 预热温度 400℃，时间 20min.
- ③ 焙烧温度：1075-1175℃，随着温度的升高，陶粒表观密度下降，焙烧温度范围为 100℃，最佳焙烧温度 1150-1175℃。

5.6.2 3#-0 原料配方生料球焙烧陶粒产品质量检测结果

从表 5.27 检测结果可以得出如下结论：

- ① 利用闵行二水厂脱水污泥 85%掺入河道淤泥 10%和印染厂污泥 5%为原料，可以生产出容量轻的超轻陶粒，堆积密度≤500 kg/m<sup>3</sup>。
- ② 水厂污泥掺入少量外加剂后可以烧出堆积密度小（440kg/m<sup>3</sup>），筒压强度高（2.0Mpa），吸水率小（8.3-9.0%/1 小时吸水率）。
- ③ 表 5.27 检测结果，全部达到 GB/T17431.1-1998<轻集料>标准规定的一等品要求。

表 5.27 水厂脱水污泥为主原料制的生料球烧结陶粒产品质量检测结果

| 测试单位<br>测试项目             | 江阴污泥处置研究所 | 新疆建筑材料、建筑构件产品质量监督检验站 |
|--------------------------|-----------|----------------------|
| 堆积密度（kg/m <sup>3</sup> ） | 440       | 430                  |
| 表观密度（kg/m <sup>3</sup> ） | 755       | 780                  |
| 筒压强度（Mpa）                | 2.57      | 2.00                 |
| 1h 吸水率（%）                | 8.3       | 9.0                  |
| 软化系数                     | ——        | 0.9                  |
| 粒型系数                     | ——        | 1.3                  |
| 空隙率（%）                   | 41.7      | 45                   |

| 颗<br>粒<br>级<br>配 | 公称粒径 (mm)       |               | 31.5 | 20.0 | 16.0 | 10.0 | 5.0  | 2.5   | 筛<br>底 |
|------------------|-----------------|---------------|------|------|------|------|------|-------|--------|
|                  | 累 计<br>筛 余<br>% | 江阴污泥处置研究<br>所 | 0    | 0    | —    | 61.7 | 99.7 | 99.95 | 100    |
|                  |                 | 新疆建筑产品质检<br>站 | 0    | —    | 2    | 60   | 99   | 100   |        |

备注：1.成球原料，水厂污泥 85%，杭嘉湖河泥 10%，印染厂污泥 5%，  
粒度 5-15mm。

2. 试验按 GB/T17431.1-1998 标准执行，各项性能指标全部达标，  
产品经新疆建筑材料、建筑构件产品质量监督检验站测试达到国标  
规定一等品要求。附 2005 新建质检（委）字第 011 号。

5.7 水厂脱水污泥实验室烧结高强陶粒试验

5.7.1 烧结高强陶粒对原料的要求

烧制高强陶粒其原料的化学组成不但决定着原料的膨胀性能，也决定着陶粒的强度，首先要求原料要具有较少的氧化硅含量和较高的氧化铝含量。

前苏联陶粒研究机构曾提出陶粒强度大小与制造原料中氧化物百分含量存在着相关关系即统计的直线方程。

$$fa = 1.103 - 0.026SiO_2 + 0.1272(Fe_2O_3) + 0.0746Al_2O_3 + 0.065\rho$$

式中：fa——陶粒的筒压强度 Mpa；

$\rho$ ——陶粒的堆积密度 kg/m³。

式中推算 SiO<sub>2</sub> 含量与陶粒强度成反比，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Fe 总含量与陶粒强度成正比。

5.7.2 水厂脱水污泥烧结高强陶粒配方及产品测试结果

根据高强陶粒对原料烧失量应控制在 3~5%，本脱水污泥烧失量达到 13%，其它化学成份接近对高强陶粒原料的成份要求。本污泥高强陶粒经掺入一定量其它外加原料后，进行如下处理：

①细度：原料细度对高强陶粒的强度有很大关系，控制磨细后的细度 4900

孔过筛，筛余<10%，混合料干容重 900~1100 kg/m<sup>3</sup>；

②制粒：生产高强陶粒应采用“高密度造粒”，我们在试验采用手工成球，粒径  $\phi$  5-15mm 之间。

③试烧：经过筛选，选择如下配方进行试烧：脱水污泥：耐火粘土：膨润土：高铝土=50：30：15：5，高强陶粒应以膨胀且有微小孔结构为好，这样具有吸水率小，强度高，预热温度 400℃、预热时间 20min，其烧成温度控制在 1180~1250℃，焙烧时间 10min，结果如下：

本次试验焙烧主要技术指标如下：

表观密度：1220 kg/m<sup>3</sup>

堆积密度：730 kg/m<sup>3</sup>

筒压强度：7.9 Mpa

1h 吸水率：4.75%

我国研制的粉煤灰高强陶粒及页岩高强陶粒，其中筒压强度与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub> 含量关系：

粉煤灰高强陶粒：

堆积密度：840 kg/m<sup>3</sup>；

原料成份：SiO<sub>2</sub> ——55.95%；

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ——29.48%。

页岩高强陶粒：

堆积密度：840 kg/m<sup>3</sup>；

筒压强度：5.8Mpa；

原料成份：SiO<sub>2</sub> ——65%；

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ——17.28%。

因此，生产高强陶粒的原料首先要选用含氧化铝成份高的或通过掺入一定量的含氧化铝高的外加剂将原料调整到适合生产高强陶粒所需的化学成份。

本脱水污泥的化学成份与某地粉煤灰、页岩比较：

本脱水污泥：SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=49+19.9=68.9

某地粉煤灰：SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=85.43

某地页岩： SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=82.28

## 5.8 水厂脱水污泥实验室烧结陶粒试验小结

### 5.8.1 水厂脱水污泥及外掺料基本特性测定结果

|            |       |                           |
|------------|-------|---------------------------|
| ① 闵行水厂脱水污泥 | 干堆积密度 | 680~720 kg/m <sup>3</sup> |
|            | 污泥粒径  | <30mm                     |
|            | 塑性指数  | IP=8~13                   |

|           |       |                           |
|-----------|-------|---------------------------|
| ② 陶粒厂河道污泥 | 干堆积密度 | 820~840 kg/m <sup>3</sup> |
|           | 污泥粒径  | <20mm                     |
|           | 塑性指数  | IP=16.9                   |
| ③ 印染厂淤泥   | 干堆积密度 | 600 kg/m <sup>3</sup>     |
|           | 淤泥粒径  | <20mm                     |
| ④ 膨润土     | 干堆积密度 | 820~980 kg/m <sup>3</sup> |
|           | 膨润土粒径 | <20mm                     |
| ⑤ 配制混合料   | 干堆积密度 | 1380 kg/m <sup>3</sup>    |
|           | 混合料粒径 | <20mm                     |
| ⑥ 粉磨混合料   | 干堆积密度 | 860—900 kg/m <sup>3</sup> |
|           | 粉磨料粒径 | 4900 孔筛筛余<20%             |

### 5.8.2 水厂脱水污泥制陶粒筛选的三种原料配方

#### ① 3<sup>#</sup>配方比

80%水厂脱水污泥+15%河道淤泥+5%印染厂污泥。

#### ② 10<sup>#</sup>-2 配方比

80%水厂脱水污泥+20%河道淤泥+5%印染厂污泥。

#### ③ 11<sup>#</sup>-2 配方比

80%水厂脱水污泥+10%河道淤泥+5%印染厂污泥+5%膨润土。

### 5.8.3 水厂脱水污泥制陶粒选择的工艺参数（三组配方）

① 生料球预热温度 400℃。

② 生料球预热时间 20min。

③ 陶粒焙烧温度 1125~1175℃。

④ 陶粒焙烧时间 8~10min。

### 5.8.4 三组原料配方制成的陶粒性能指标

① 试验陶粒产品的堆积密度及1小时吸水率%见表5.28和表5.29。

表 5.28 三组配方生料球烧结陶粒产品质量检测结果

| 陶粒 \ 指标            | 堆积密度 kg/m <sup>3</sup> | 1 小时吸水率% | 是否符合国家相关标准 |
|--------------------|------------------------|----------|------------|
| 3 <sup>#</sup>     | 315~450                | 7.7~11.6 | 符合         |
| 10 <sup>#</sup> -2 | 370~510                | 5.1~10.4 | 符合         |
| 11 <sup>#</sup> -2 | 270~380                | 4.3~12.4 | 符合         |

② 试验抽样产品测试结果见表 5.29

表 5.29 3<sup>#</sup>、11-2<sup>#</sup>配方生料球烧结陶粒产品测试结果

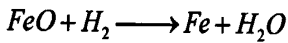
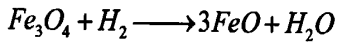
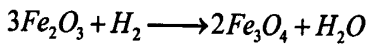
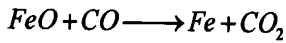
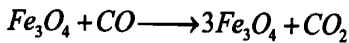
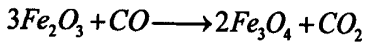
| 测试项目 \ 抽样产品        | 粒径范围 mm | 堆积密度 kg/m <sup>3</sup> | 筒压强度 MPa | 1 小时吸水率% | 表观密度 kg/m <sup>3</sup> |
|--------------------|---------|------------------------|----------|----------|------------------------|
| 3 <sup>#</sup>     | 2.5~16  | 450                    | 2.68     | 6.5      | 770                    |
| 11 <sup>#</sup> -2 | 2.5~16  | 390                    | 1.46     | 9.2      | 595                    |

5.8.5 原料配方中遵循的原则，生料球中必须富含铁的成分才能使烧结后陶粒表观密度大幅下降

从不同外加剂和掺入外加剂数量组成的 14 组配合比原料试烧结果可以看出，原料中只要掺入印染厂污泥后在同样温度和时间条件下焙烧，其产品陶粒表观密度有很大的降低，因为印染厂污泥主要成分含三氧化二铁 41.54%，含三氧化硫 5.96%，烧失减量 28.34%。这在很大程度上保障了原料中具有很好的膨胀性能，能确保焙烧出的陶粒产品表观密度大幅下降，使陶粒表观密度——温度曲线变得较为平缓，可确保在较宽的温度范围内焙烧出表观密度较小的轻质陶粒。

5.8.6 原料配方中要富含碳氢化合物是构成生料球高温膨胀的重要因素

从筛选的三组配方原料中所含化学元素来分析，配方原料中都富含碳氢化合物，当配合料经粉磨成球后，料球在预热和焙烧时，能逐步分解释放出 CH<sub>4</sub>、CO、H<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>等气体。另外配合料中含有可燃成分和碳酸盐矿料，因此生料球在高温情况下都能释放出 CO、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>，当遇到原料中铁的氧化物，从而进行如下还原反应。



总之，碳氢化合物受热分解能释放出气体，尤其是氢气，能造成三氧化二铁还原的重要条件，而铁的氧化物还原反应产生的气体也是构成料球高温膨胀的另一个重要因素。

#### 5.8.7 原料配方中掺入少量膨润土，可增加陶粒原料的可塑性及膨胀性能，并使焙烧后陶粒产品强度增高，减少陶粒的吸水率

本试验配方 11-2 由于原料中含有 5% 膨润土，烧结的陶粒产品不但堆积密度下降明显（270~380 kg/m<sup>3</sup>），而且 1 小时吸水率又小（4.3~12.4%）。因此水厂脱水污泥中掺入外加剂膨润土能使陶粒产品堆积密度减幅增大。

#### 5.8.8 通过实验室试验研究解决了水厂脱水污泥制陶粒存在的相关技术难点

以水厂脱水污泥为主原料≥80%，适量掺入外加剂可以科学地配制出合理配方。粉磨法制成的生料球强度高，生料球输入高温炉预热和焙烧，控制最佳预热温度和时间 and 选择焙烧温度和时间，生料球在转窑内部无炸裂现象产生，陶粒产品膨胀性能好、堆积密度小、吸水率低和产品筒压强度相对较高，陶粒产品在炉内得到充分氧化，颜色呈红褐色。

## 第 6 章 水厂脱水污泥粉磨法烧结陶粒生产试验

### 6.1 生产试验工艺流程

水厂脱水污泥粉磨法烧结陶粒生产试验工艺流程见图 6.1 和图 6.2。

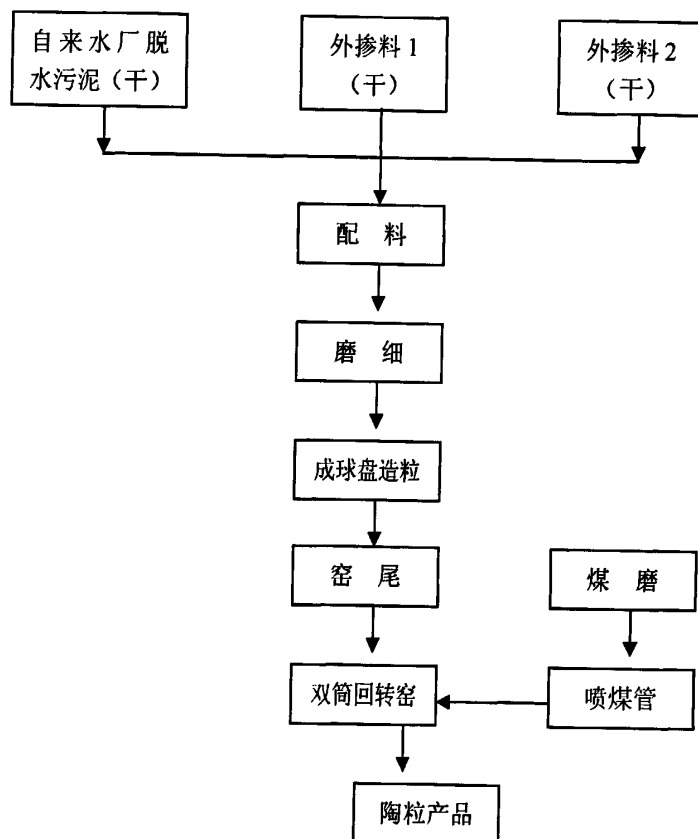


图 6.1 水厂脱水污泥粉磨法烧结陶粒生产试验工艺流程

### 6.2 生产试验主要设备介绍

水厂脱水污泥粉磨法烧结陶粒生产试验选点在江苏省常州市宏云陶粒厂，该厂年产 20000m<sup>3</sup> 塑化法生产线其主要设备介绍如下：

- 1、 $\phi 1.45\text{m} \times 12.5\text{m} / \phi 1.05\text{m} \times 20\text{m}$  插入式双筒回转窑一台，焙烧、预热窑均为不能调速的普通电机、动力为 7.5kw，5 转/分，鼓风机风量为 3000 m<sup>3</sup>/min

2、配套双轴搅拌机及对辊造粒机、皮带输送机等。

制粒机为双辊  $\Phi 600 \times 500\text{mm}$

产量：3.0—4.0  $\text{m}^3/\text{h}$ ，动力为 11kw

双轴搅拌机为  $2000 \times 600\text{mm}$ ，动力为 22kw

3、3R 雷蒙磨：主要磨制煤粉

4、热工窑炉系统含：喷煤装置、窑衬层、尾烟沉降室、进料管、烟道、烟道闸门、钢烟囱等。

5、为了进行粉磨成球工艺试验，试验小组加工制作  $\Phi 1000\text{mm}$  成球盘一台。

主要技术数据：

盘边高 250mm，盘转速 0-25 转/分钟

倾斜角度 35—55°

生产能力：1t/h

生产时人工加料加水

6、焙烧窑、预热窑改装调速电机

焙烧窑改装后 1-5 转/分

预热窑改装后 1-4 转/分

7、尾冷烟室加装热电偶测温仪一套。

### 6.3 生产试验陶粒制造过程

制造过程如图 6.2 所示。

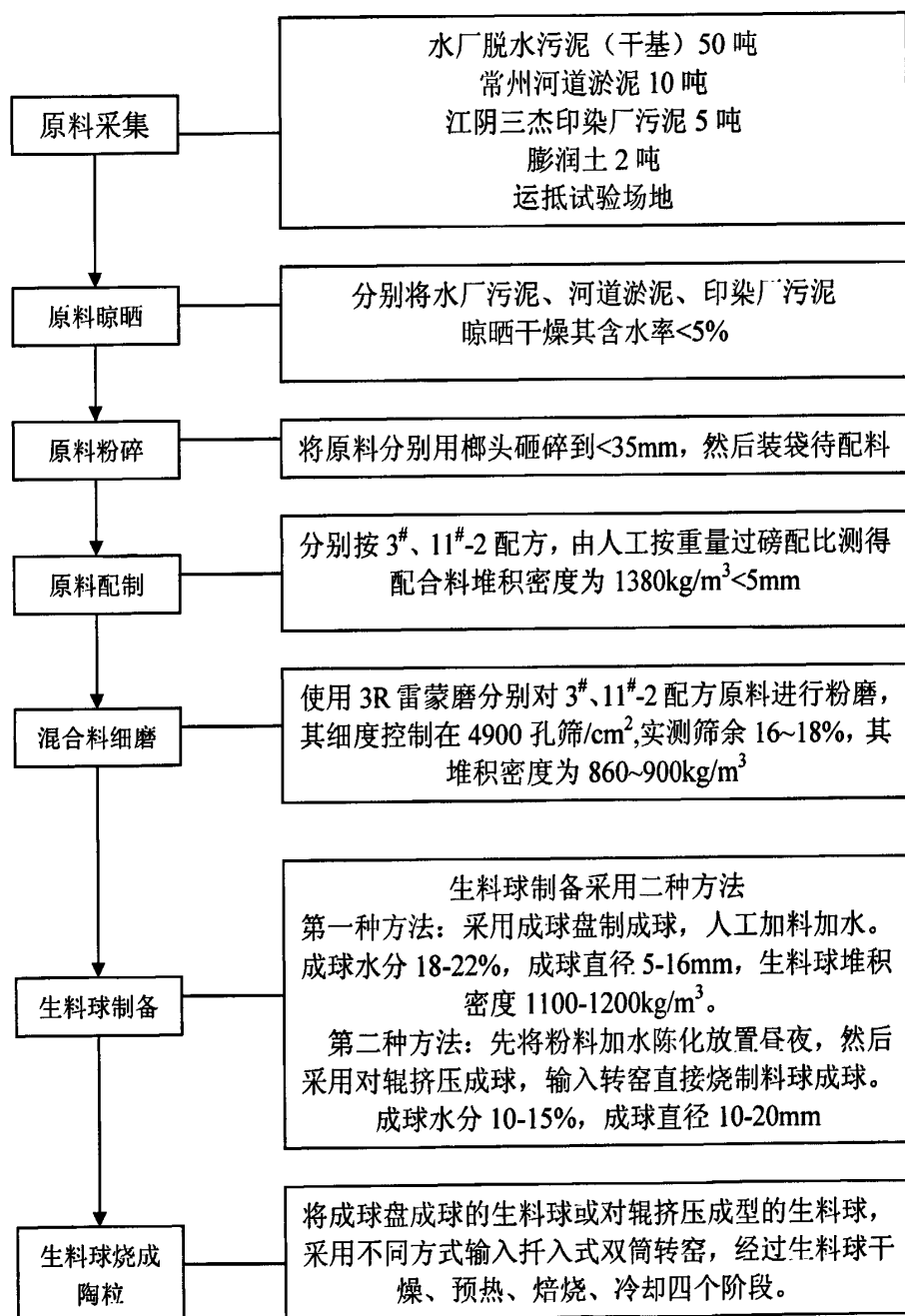


图 6.2 生产试验陶粒制造过程

在生料球烧成陶粒的步骤中,主要包括四个过程。

在干燥过程中,料球经加热至 200℃时,生料球内物理水开始蒸发,在这个阶段,必须控制合适的干燥速度,以防止生料球的炸裂。

从 200℃升温至 950℃,这阶段可将残存的物理水和原料球中化学结合水相继排出,有机物开始氧化,碳酸盐、硫化物分解。本阶段主要特征是料球内相关化学元素进行了氧化、分解反应。反应产物主要为  $H_2O$ 、 $CO$ 、 $CO_2$  气体。此阶段对烧成陶粒质量影响非常大,因此必须科学地掌握适宜的预热温度和预热时间。料球(物料)从 950℃至烧成温度本阶段除了物料继续进行氧化、分解,还有碳酸盐进一步分解,氧化铁在碳、氢还原性物质存在的情况下,开始发生分解和还原反应,物料中某些固相物质逐渐溶解于液相中,形成了新的结晶,随着温度不断上升,料球逐渐烧成陶粒,在烧成阶段中,必须准确掌握和判断陶粒的烧成质量,烧成的陶粒需要慢慢冷却,否则会影响陶粒强度。

因此在陶粒烧制过程中,要科学地掌握转窑内火焰温度、气流压力、烟气沿窑长形成合理的分布,使物料在一定的窑体转速情况下,分别以适当的时间完成上述四个过程的烧成制度所规定的内容。

料球(物料)至陶粒烧成在窑内总停留时间 45~50min,窑尾控制温度在 180~190℃,烧成带温度控制在 1150~1170℃,烧成产品陶粒堆积密度为 480~520kg/m<sup>3</sup>。

## 6.4 生产试验陶粒制造过程相关事宜说明

### 6.4.1 生产试验时间

第一次试验时间,2005.9.28~2005.10.6。通过试验,初步掌握了相关设备运行性能参数,确立了预热窑和焙烧窑转速,陶粒在窑内最佳停留时间以及燃料质量对焙烧的陶粒产品质量的影响,试烧出部分水厂污泥制的陶粒合格产品。

第二次试验时间,2005.10.15~2005.11.15。燃料采用优质煤粉(细度 4900 孔筛/cm<sup>2</sup>,筛余<10%),预热窑和焙烧窑转速分别控制 2.4 转/分和 2.93 转/

分, 产品陶粒全部符合质量指标。

### 6.4.2 生产试验工厂简介

水厂脱水污泥制陶粒生产试验工厂选址在常州宏云陶粒厂, 该厂是 70 年代末 80 年代初建成的小型塑化法陶粒厂, 生产设备陈旧, 煤粉燃烧器, 一次风机, 风量调节阀, 煤粉喷嘴及喷煤管都不能伸缩自如到达喷煤位置。该厂主体设备杆入式双筒回转窑(预热窑和焙烧窑)均不能分别调速, 试验时另安装二台调速电机, 使预热窑和焙烧窑都能分别控制 1~5 转/分。试验期间, 预热窑控制在 2.4 转/分, 焙烧窑控制在 2.93 转/分。窑尾冷烟室新装热电偶测温仪一套, 可随时掌握转窑内温度变化情况。

### 6.4.3 生产试验燃料质量控制

水厂脱水污泥制陶粒对燃料煤的质量有一定的要求, 特别生产轻质陶粒, 煤的挥发份高低对陶粒烧成有很大的影响。挥发份过低, 煤粉燃烧时热力集中, 形成短焰急烧; 挥发份过高, 煤粉燃烧时火头缩短, 热力分散, 形成的火焰软弱无力的火苗。另外灰分熔点对陶粒烧成也是非常重要的指标, 适合陶粒生产的燃料煤应能满足下列要求。

- ① 煤的发热量  $\geq 2300 \times 10^3$  焦/kg
- ② 挥发份  $\geq 20\%$
- ③ 灰分熔点  $> t + 1000^\circ\text{C}$  ( $t$  为烧成温度范围的上限  $^\circ\text{C}$ )
- ④ 煤粉细度 0.08mm, 筛余  $< 10\%$
- ⑤ 含水率  $< 2\%$

在陶粒生产过程中, 当煤粉随空气喷入窑内后, 呈悬浮状态, 如果煤粉过粗, 含水量又高, 煤粉燃烧的火头就会变长, 火焰发浑又不明亮, 甚至看到窑内很多飞舞的小火星纷纷落到料球上。这样窑内便会造成还原性气氛, 促使煤的熔点下降, 造成料球与煤灰结块、结圈, 最后影响正常生产。

第二次陶粒生产试验使用的煤质量达到下列指标。

应用基低位热值 26.15MJ/kg (62535.9 卡/克)

挥发份 34.29%

灰分 5.88%

全硫量 0.58%

煤粉细度 4900孔筛/cm<sup>2</sup>, 筛余<15%

## 6.5 生产试验生料球制备

原料成球是造粒型人造轻骨料生产的一个关键工序, 料球的质量、产量、强度、耐爆性和耐磨性对成品的质量及成品合格率均有很大的影响, 因此成球盘的边高、倾斜度、转速、刮刀位置、加水加料位置在工艺上都有一定的技术要求。

本次生产试验的操作人员经培训, 逐步掌握了原料经成球盘造粒成球的生产技术, 完成混合料配方3#、11#-2的造粒成球任务。

配合料(3#、11#-2)堆积密度(料球) 1100-1200kg/m<sup>3</sup>;

粉料加水量 20%左右;

造粒粒径 5-16mm。

部分3#混合料成球是原料粉磨后加水陈化昼夜输入对辊机塑化法成球, 输入窑内预热和焙烧。

## 6.6 生产试验相关参数设定与产品检测结果

① 制陶粒原料: 包括水厂脱水污泥、河道淤泥和印染厂污泥, 晒干至含水率<5%

② 制陶粒原料配比:

3#配方: 80%水厂脱水污泥, 15%河道淤泥和5%印染厂污泥。

11#-2 配方: 80%水厂脱水污泥, 10%河道淤泥, 5%膨润土, 5%印染厂污泥。

③ 混合料细度: 最大泥块直径<35mm。

④ 混合料堆积密度: 细度<5mm, 堆积密度1380kg/m<sup>3</sup>。

⑤ 混合料粉磨细度: 细度4900孔/cm<sup>2</sup>筛筛余16~18%, 堆积密度860~900kg/m<sup>3</sup>。

⑥ 陶粒生料球制成方法:

成球盘成球,成球水份 18~22%,成球粒径 5~16mm,堆积密度 1100~1200kg/m<sup>3</sup>。

对辊成球,原料加水陈化数昼夜,成球水份 10~15%,成球粒径 10~20mm。

⑦ 造粒机设备:成球盘,具体参数为直径 1000mm,边高 250mm,转速 0~5 转/min,倾角 45° 。

⑧ 燃料质量指标:应用基低位热值 26.15MJ/kg(6253.59 卡/克),挥发份 34.29%,灰份 5.88%,含硫量 0.58%,煤粉细度 4900 孔/cm<sup>2</sup>筛筛余 16~18%,含水率<2%。

⑨ 陶粒焙烧制度:

陶粒焙烧制度见表 6.1。

表 6.1 陶粒焙烧制度

| 窑种类<br>焙烧参数                | 焙烧窑          | 预热窑        |
|----------------------------|--------------|------------|
| 窑体规格 (m)                   | Φ 1.45×12.5m | Φ 1.05×20m |
| 窑体斜率                       | 3.5%         |            |
| 窑转速 (转/min)                | 0~5          | 0~4        |
| 试验转速 (转/min)               | 2.93         | 2.4        |
| 窑内停留时间 (min)               | 45           |            |
| 鼓风机风量 m <sup>3</sup> /min  | 3000         |            |
| 窑尾温度℃                      | 180~190      |            |
| 烧成带温度℃                     | 1150~1170    |            |
| 烧成陶粒堆积密度 kg/m <sup>3</sup> | 480~520      |            |

⑩ 产品测试结果:

A. 11<sup>#</sup>-2 配方各项性能指标测试结果见表 6.2

表 6.2 11#-2 配方中试产品自测各项性能

| 测试项目        |              | 测试结果 | 试 验 方 法                         |      |      |      |      | 备 注                    |  |
|-------------|--------------|------|---------------------------------|------|------|------|------|------------------------|--|
| 堆积密度(kg/m³) |              | 470  | 按 GB/T17431.2-1998《轻集料及其试验方法》操作 |      |      |      |      |                        |  |
| 表观密度(kg/m³) |              | 755  | 同 上                             |      |      |      |      |                        |  |
| 1 小时吸水率(%)  |              | 12.4 | 同 上                             |      |      |      |      |                        |  |
| 空隙率(%)      |              | 37.7 | 同 上                             |      |      |      |      |                        |  |
| 筒压强度(Mpa)   |              | 2.6  | 同 上                             |      |      |      |      | 粒径取 5-20mm; 填充系数取 1.05 |  |
| 软化系数        |              | 0.85 | 同 上                             |      |      |      |      | 粒径取 5-20mm; 填充系数取 1.05 |  |
| 平均粒型系数      |              | 1.18 | 同 上                             |      |      |      |      |                        |  |
| 筛<br>分<br>析 | 筛孔尺寸<br>(mm) | 31.5 | 20.0                            | 16.0 | 10.0 | 5.0  | 2.5  | 筛底                     |  |
|             | 累计筛余(%)      | 0    | 0.3                             | 56.6 | 64.5 | 99.8 | 99.9 | 100                    |  |

B. 生产试验陶粒产品抽样送检性能指标测试结果见表 6. 3。

表 6.3 上海市建筑科学研究院检测站对中试产品检测结果（11#-2）

| 检验项目单位           |               | 本产品标准               | 检验结果                  | 单项判定                  |
|------------------|---------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| 颗<br>粒<br>级<br>配 | 园孔筛孔<br>径: mm | 各筛号的累计筛<br>余(按质量计)% | 各筛号的实测累计筛<br>余(按质量计)% | 符合<br>5-20mm 连续粒<br>级 |
|                  | 40.0          | .....               | .....                 |                       |
|                  | 31.5          | 0-5                 | 0                     |                       |
|                  | 20.0          | 0-10                | 2                     |                       |
|                  | 16.0          | ——                  | 29                    |                       |

|                        |      |                                  |     |    |
|------------------------|------|----------------------------------|-----|----|
|                        | 10.0 | 40-80                            | 68  |    |
|                        | 5.00 | 90-100                           | 96  |    |
|                        | 2.50 | 95-100                           | 99  |    |
| 堆积密度 kg/m <sup>3</sup> |      | 410-500                          | 480 | 合格 |
| 筒压强度 Mpa               |      | ≥1.5                             | 2.7 | 合格 |
| 吸水率%                   |      | ≤15                              | 11  | 合格 |
| 软化系数                   |      | ≥0.8                             | 1.0 | 合格 |
| 粒型系数                   |      | ≤1.6(合格品)                        | 1.2 | 合格 |
| 表观密度 kg/m <sup>3</sup> |      |                                  |     |    |
| 检验结论                   |      | 合格（500 级超轻陶粒）                    |     |    |
| 说 明                    |      | 检测依据：GB/T17431.1—1998《轻集料及其试验方法》 |     |    |

6.7 生产试验小结

① 水厂脱水污泥烧制陶粒生产试验结果证明，水厂脱水污泥适量掺入外加剂，原料经晾干、配料、磨细、成球盘造粒或对辊挤压造粒，然后输入杆入式转窑，干燥、预热、焙烧、冷却四个阶段，能烧制成品质优良的轻质陶粒。经对生产试验产品质量检测，符合国标（GB/T 17431.1-1998）。

② 生产试验过程中采用了二组物料成球方法，3# 配方原料细磨后采用塑化对辊挤压法成球，11#-2 配方原料采用粉磨成球法造粒。二组生料球都可以焙烧出优质轻质陶粒，但前者陶粒产品粒径偏粗，后者陶粒产品堆积密度≤500kg/m<sup>3</sup>，达到超轻陶粒产品质量，而且陶粒颗粒级配可以达到连续粒级（5～20mm）。

③ 水厂脱水污泥作为主要原料烧制轻质陶粒，需要对水厂污泥进行前处理，使水厂污泥所含化学成分及矿物成分作适当调整，这样可以烧出堆积密度

≤500kg/m<sup>3</sup>的优质超轻陶粒。

④ 水厂脱水污泥制超轻陶粒,建议设计建厂时造粒成球工艺采用粉磨成球法成球盘造粒,焙烧工艺采用双筒回转窑为好。

⑤ 通过水厂污泥制陶粒生产试验结果证明,水厂脱水污泥是一种可利用的粘土资源,是作为烧制粘土陶粒的主要原料,加以再利用,这将对环境效益、社会效益、经济效益都会产生积极影响,这也符合国家可持续发展的长远战略。

## 第7章 陶粒及陶粒制品应用

### 7.1 陶粒及陶粒制品简介

陶粒也称人造石子,根据原材料不同,生产工艺也有区别。目前我国有粘土陶粒、页岩陶粒、粉煤灰陶粒、煤矸石陶粒、沸石陶粒等品种。

制造陶粒一般由粘土、泥质岩石(页岩、板岩等)、工业废料(煤矸石、粉煤灰、给水污泥、河道淤泥、城市污水厂污泥)作主辅原料,经造粒、熔烧等工艺制成粒状陶质物。

陶粒外形呈浑圆状,外壳坚硬,并有一层隔水、保气的栗红釉层包裹,内部多孔,呈现黑色蜂窝状,其松散密度在  $200-1000\text{ kg/m}^3$ ,通常将粒径大于5毫米的称为陶粒,粒径小于5毫米的称为陶砂。

陶粒的堆积密度一般在  $900\text{ kg/m}^3$  以下,根据堆积密度的大小分为三种类型陶粒,一.超轻陶粒,堆积密度在  $200-500\text{ kg/m}^3$ ;二.普通陶粒(结构保温),堆积密度在  $500-700\text{ kg/m}^3$ ;三.高强陶粒,堆积密度在  $700-900\text{ kg/m}^3$ 。采用上述三种类型的陶粒分别可配制密度在  $600-1200\text{ kg/m}^3$  超轻陶粒混凝土砌块,密度在  $1200-1600\text{ kg/m}^3$  普通陶粒混凝土砌块和密度在  $1600-2000\text{ kg/m}^3$  高强陶粒混凝土砌块。其相应的抗压强度分别可达到  $3.5-15\text{ MPa}$ ,  $15-30\text{ MPa}$ ,  $30-50\text{ MPa}$ ,比同等强度普通砂石混凝土轻得多。

所以陶粒性能具有质轻、高强、隔音、隔热、多功能等优点,可以替代天然石子配制应用于保温结构的保温用墙面板、屋面板或结构用的轻骨料混凝土,如桥面板等轻质构件。

根据统计陶粒应用领域由如下四方面和消耗陶粒所占的百分比。

- ① 陶粒混凝土小型砌块占陶粒(超轻陶粒、普通陶粒)  $70-80\%$ 。
- ② 采用超轻陶粒和普通陶粒制陶粒隔墙板、复合保温板、屋面板和楼板等现浇屋面保温垫层等约占陶粒总用量的  $8-13\%$ 。
- ③ 全部采用高强陶粒搅拌机送现浇高层建筑混凝土立楼和楼板以及大型桥梁工程等,约占陶粒用量的  $2-3\%$ 。
- ④ 陶粒在其他领域应用如园艺、花卉、隔音隔热吸声制品约占  $10-14\%$ 。

## 7.2 国内外陶粒生产概况

2002年美国陶粒产量达1800万 $\text{m}^3$ ,俄罗斯约1200万 $\text{m}^3$ ,北欧和西欧约1600万 $\text{m}^3$ ,我国二十世纪八十年代陶粒平均年产量约60万 $\text{m}^3$ ,到了九十年代获得较快发展,2002年全国陶粒年产量约360万 $\text{m}^3$ 。

但是利用污泥作主要辅助原料生产节能型人造轻骨料陶粒是在1994年美国威斯康辛公司建成世界上第一家利用城市污泥(主原料为粉煤灰)生产陶粒的工厂,年产陶粒10万 $\text{m}^3$ 。由于产品质量好,得到政府和污水处理厂补贴,每吨污泥补贴6—12美元,企业经济和社会综合效益得到完美结合,到2002年底,美国已建成六家同类型工厂,欧洲和日本也正在建设利用污泥生产陶粒的工厂。

我国广州华穗轻质陶粒制品厂自2000年起利用当地污水处理厂产出的污泥作主要辅助原料(日处理污泥量达300吨)(主原料是粘土或河道淤泥)生产超轻陶粒,产品质量好,生产成本低(污水处理厂污泥每处理一吨补贴20—30元),企业经济效益好(享受国家税收优惠政策),这有效地保护了生态环境、水质资源和土地资源,并生产出使用价值高的节能型新型墙体材料——陶粒,适应市场要求,企业和社会效益获得了协调发展。目前华穗轻质陶粒制品厂年产陶粒18.8万 $\text{m}^3$ ,年产轻质陶粒砌块18万 $\text{m}^3$ 。

## 7.3 陶粒的应用前景

建筑业已成为支柱产业,在寸土如金、地基又软的上海,高架道路及公路网、超高、大跨度建筑、利用地下空间的建筑、轻轨铁路等工程建设项目采用陶粒或高强陶粒混凝土,将会产生明显技术经济效益。先就以下五方面应用前景作初步预测。

### ① 道路建设

在水网地区公路桥改建和公路网建设方面,如使用C40—C60陶粒混凝土制作桥梁和铺设路面,将使混凝土结构自重减轻约30%,可以增加公路桥的承载力和通航能力。用高强陶粒作为桥头填筑材料,因其自重轻、压缩变形小、透水性好等功能,可明显改善公路和桥梁连接部位的质量,减少维修工作量。可以在保留原基础和桩柱的情况下增加车道。

## ② 舒适、耐久、节能型建筑

这一领域对兼有隔热保温及结构增强功能的陶粒及其制品需求迫切。上海是外商投资的热土，国外对陶粒和陶粒混凝土十分熟悉，有不少国外设计的建筑希望采用陶粒混凝土（又名“轻骨料混凝土”）。

## ③ 混凝土及混凝土制品

以泵送混凝土为主体的预拌混凝土工业在上海有了令人瞩目的发展，上海预拌混凝土年产量在未来10年中预期能维持在1000万 $\text{m}^3$ 的水平。如按20%预拌混凝土转为C20—C50等级的预拌陶粒混凝土，用于现浇结构混凝土或预制钢筋混凝土构件，则高强陶粒年用量可达160万立方米。

## ④ 功能性新型房建材料

轻质陶粒用于生产轻质建筑砌块和轻质板墙代替传统的烧土砖，具有外观质量好、不易破碎、易抹灰、易装饰等特点，对室内湿度的调节功能及隔热保温隔音功能明显优于普通混凝土空心砌块，可与砖混结构媲美。因此，发展节能型轻质陶粒可为上海发展功能性新型墙体材料提供基本原材料，从而为住宅建筑商和建筑师提供更多的创新机会。

上海已拥有50多家混凝土小型空心砌块厂，总生产能力达130万 $\text{m}^3$ /年，其中年产5万 $\text{m}^3$ /年以上的大厂（都为引进设备）有4家。预测到2010年，混凝土空心砌块成型机十分适合陶粒混凝土砌块的制作。如果以50%陶粒混凝土小砌块作为2000年上海混凝土小砌块发展规划之一，则上海砌块工业能用轻质节能型陶粒50~70万 $\text{m}^3$ /年。

## ⑤ 其它用途

结合今后十至十五年国民经济发展重点，预计节能型陶粒应用技术会不断发展，涉及工业、农业、环保、土壤改良等各个方面，举例如下：

### ● 预拌干砂浆

陶砂作为原材料在预拌干砂浆中也有一席之地。它还可作为泡沫混凝土和商店地面砂浆的细骨料。此外，还特别适宜作为隔热砂浆的骨料，用于建筑和装修工程。

### ● 防火材料

无砂陶粒混凝土可作为耐火材料使用，这种混凝土不会发生因膨胀而导致的从钢材表面分离的现象，因而，这种混凝土具有过热状态下保护钢材的功能，改善了钢结构建筑的耐火性。

### ● 制管工业

陶粒的新用途仍在不断地开发。如：石油工业中，将喷射陶粒混凝土作为防腐蚀隔热层用于输油钢管内衬。因为自重轻，它比其它防腐蚀材料具有明显的优点。

- 无土繁殖介质
- 净水介质
- 绿化工程
- 土壤改良及填筑造地工程

7.4 陶粒市场销售

由于国家建筑标准设计图集 01J304，01（03）J304 规定了住宅屋面等必须使用保温节能陶粒混凝土等要求，目前市场陶粒产品基本上畅销，目前某建材公司陶粒销售单价摘录如表 7.1 所示。

表 7.1 目前某建材公司陶粒销售单价

| 序号 | 产品名称                                | 容重（级配）  | 规格   | 单价      |
|----|-------------------------------------|---------|------|---------|
|    |                                     | （公斤/m³） | （mm） | （元/ m³） |
| 1  | 轻质粘土陶粒                              | 500-700 | 5-25 | 340     |
| 2  | 轻质粘土陶粒                              | 300-500 | 5-25 | 320     |
| 3  | 轻质粘土陶粒                              | 260-300 | 5-25 | 280     |
| 4  | 轻质粘土陶粒                              | 330-400 | 4-10 | 680     |
| 5  | 轻质粘土陶粒                              | 700     | 2-6  | 860     |
| 6  | 页岩陶粒                                | 600-700 | 5-30 | 380     |
| 7  | 页岩陶粒                                | 700-800 | 5-30 | 400     |
| 8  | 本单价不含开税发票的税收款在内，需方需要供方提供发票税收按 6%另加。 |         |      |         |

7.5 水厂脱水污泥烧结的陶粒制轻集料混凝土小型空心砌块

7.5.1 轻集料混凝土小型空心砌块配方

轻集料混凝土砌块配方见表 7.2。

表 7.2 轻集料混凝土砌块配方

| 轻集料混凝土小型空心砌块配方 |        |        |        |        |        | 陶粒掺入数量级规格  |           |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|-----------|
| 编号             | 原料名称   | 陶粒     | 水泥     | 石屑     | 炉渣     | 陶粒直径<br>mm | 占百分率<br>% |
|                | 单位     | kg     | kg     | kg     | kg     |            |           |
| 1*<br>双排孔      | 掺入数量   | 360    | 172    | 403    | 137    | < 8        | 10        |
|                |        |        |        |        |        | 8-10       | 40        |
|                | 掺入百分率% | 33. 58 | 16. 04 | 37. 59 | 12. 78 | 10-15      | 50        |
| 2*<br>双排孔      | 掺入数量   | 540    | 222    | 222    | 237    | <8         | 6. 7      |
|                |        |        |        |        |        | 8-10       | 46. 7     |
|                | 掺入百分率% | 44. 23 | 18. 18 | 18. 18 | 19. 41 | 10-15      | 46. 6     |
| 3*<br>三排孔      | 掺入数量   | 360    | 172    | 403    | 137    | <8         | 10        |
|                |        |        |        |        |        | 8-10       | 50        |
|                | 掺入百分率% | 33. 58 | 16. 04 | 37. 59 | 12. 78 | 10-15      | 40        |
| 4*<br>三排孔      | 掺入数量   | 540    | 222    | 222    | 237    | <8         | 6. 7      |
|                |        |        |        |        |        | 8-10       | 46. 7     |
|                | 掺入百分率% | 44. 23 | 18. 18 | 18. 18 | 19. 41 | 10-15      | 46. 6     |
| 5*<br>无孔       | 掺入数量   | 540    | 172    | 222    | 137    | <8         | 12. 5     |
|                |        |        |        |        |        | 8-15       | 12. 5     |
|                | 掺入百分率% | 50. 42 | 16. 06 | 20. 73 | 12. 79 | >15        | 75        |

注：试验工厂：上海贝赛尔建材发展有限公司

7.5.2 轻集料混凝土小型空心砌块墙体保温性能检测

7.5.2.1 试件规格品种

轻集料（陶粒）混凝土小型空心砌块，

规格 390×190 ×190mm, 双排孔 MD5.0

### 7.5.2.2 墙体试件构成

•墙体试件构成: 轻集料(陶粒)混凝土小型空心砌块, 水泥砂浆砌筑, 两面各粉水泥砂浆 15mm, 总厚 220mm。

•墙体试件尺寸为 1000×1000×220mm 四周密封。

•墙体试件经自然养护后加热烘干。

### 7.5.2.3 检测方法

墙体保温性能检测根据国标《民用建筑热工设计规范》和 JGJ132-2001《采暖居住建筑节能检验标准》要求。试件表面温度和热室空气温度的测定采用铜-康铜热电偶作感温元件(空气温度热电偶测点其感温部位作了防辐射热处理); 二次仪表采用数字温度巡回记录仪。热流传感器采用 WYP 型板式测头, 测头系数:  $11.6\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{mv})$ — $19.4\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{mv})$ 。

### 7.5.2.4 计算公式

1、墙体的热阻( $R$ )和传热阻( $R_0$ )按下式计算:

热阻:  $R=(T_1-T_2)/Q$

传热阻:  $R_0=R_i+R+R_e$

式中:  $T_1$ —墙体内表面平均温度( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_2$ —墙体外表面平均温度( $^{\circ}\text{C}$ );

$Q$ —通过墙体的热流量平均值( $\text{W}/\text{m}^2$ );

$R_i$ 、 $R_e$ —内外表面换热阻( $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ )。

2、墙体的传热系数( $K$ )按下式计算:

传热系数:  $K=1/R_0$

式中:  $R_0$ —传热阻。

### 7.5.2.5 检测结果

经对墙体试件在稳定传热条件下连续近 72 小时检测(2006.8.5—8.8 间), 墙体保温性能检测结果见表 7.3。

表 7.3 墙体保温性能检测结果

| 项目                                             | 数据    |
|------------------------------------------------|-------|
| 墙体内表面温度 $T_1(^{\circ}\text{C})$                | 47.3  |
| 墙体外表面温度 $T_2(^{\circ}\text{C})$                | 32.2  |
| 墙体内外表表面温度差( $^{\circ}\text{C}$ )               | 15.1  |
| 墙体热流量值 $Q\text{ (W/m}^2\text{)}$               | 26.1  |
| 墙体热阻值 $R\text{ (m}^2\cdot\text{K/W)}$          | 0.580 |
| 外墙传热阻值 $R_0\text{ (m}^2\cdot\text{K/W)}$       | 0.730 |
| 外墙传热系数 $K(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$ | 1.37  |
| 内墙传热阻值 $R_0(\text{m}^2\cdot\text{K/W)}$        | 0.800 |
| 内墙传热系数 $K(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$ | 1.25  |

注：测试单位 上海市建筑科学研究院检测站

7.5.2.6 墙体保温性能评价

测试结果表明：轻集料（陶粒）混凝土小型空心砌块：390×190×190mm，双排孔，MD5.0，水泥砂浆砌筑，两面各粉水泥砂浆 15mm，总厚 220mm。墙体热阻  $R=0.580\text{m}^2\cdot\text{K/W}$ ，作外墙时，传热系数  $K=1.37\text{W}/\text{(m}^2\cdot\text{K)}$ ；作内墙时，传热系数  $K=1.25\text{W}/\text{(m}^2\cdot\text{K)}$ 。

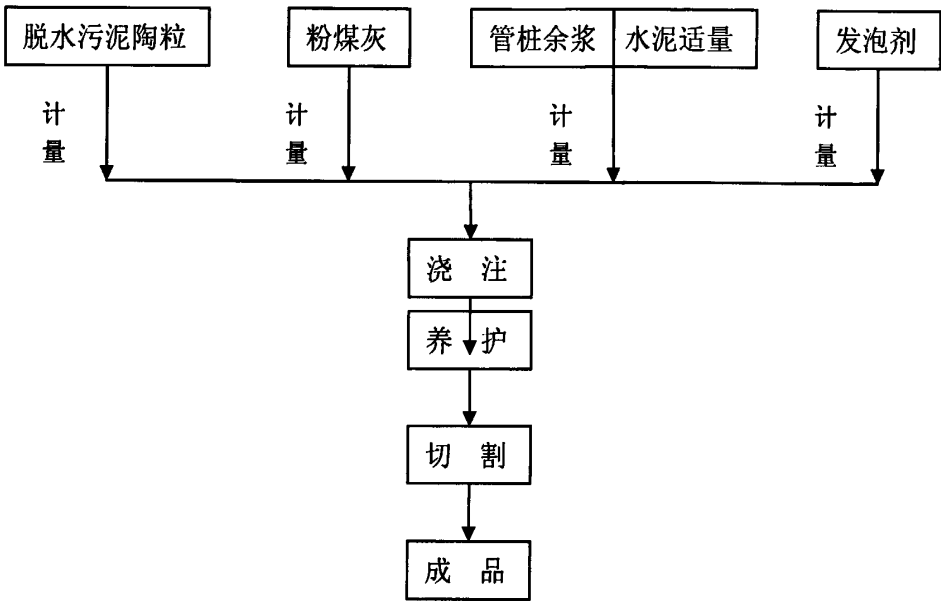
7.6 水厂脱水污泥烧结的陶粒制陶粒增强加气砌块

7.6.1 陶粒增强加气砌块特点

- ① 轻质：陶粒增强加气砌块体积密度为 450—750kg/m³ 为粘土砖的 1/3，混凝土的 1/4 重量，可有效减轻建筑物的自重。
- ② 高强： 可以直接用建筑外墙，同等体积密度较普通蒸压加气砌块抗压强度高一个等级，其抗压强度在 3.5—7.5Mpa。
- ③ 保温：用于外墙结构，可大幅降低采暖制冷的能耗，产品导热系数在 0.11—0.18w/m·K。

7.6.2 陶粒增强加气砌块试制工艺

试制工艺见下图：



7.6.3 水厂脱水污泥烧结的陶粒制成的陶粒增强加气砌块指标参数

指标参数见表 7. 4。

表 7. 4 陶粒增强加气砌块指标参数

| 强度级别                    |           | A5.0 |      |    |
|-------------------------|-----------|------|------|----|
| 抗压强度<br>(Mpa)           | 平均值       | 5.6  |      | 实测 |
|                         | 最小值       | 4.7  |      | 实测 |
| 体积密度                    |           | B07  |      |    |
| 干体积密度 kg/m <sup>3</sup> |           | ≤710 |      | 实测 |
| 干燥收缩值                   | 快速试验法     | mm/m | 0.63 | 实测 |
|                         | 标准法       | mm/m | 0.42 | 实测 |
| 抗冻性                     | 质量损失%≤    | 5.0  |      |    |
|                         | 冻后强度 Mpa≥ | 4.0  |      |    |
| 导热系数（干态）w/mK≤           |           | 0.15 |      |    |

注：浙江上虞多元新型墙体有限公司检测

第 8 章 水厂脱水污泥烧结多孔砖和轻质陶粒技术经济分析

8.1 利用水厂脱水污泥年产 10 万 m³ 轻质陶粒工程经济技术分析

8.1.1 工程投资

表 8.1 利用水厂脱水污泥为主原料建年产 10 万 m³ 陶粒工程投资估算表

| 序号    | 工程投资内容    | 估算金额    | 占总投资  |
|-------|-----------|---------|-------|
| 1     | 机械设备和电气设备 | 700 万元  | 46.7% |
| 2     | 土建投资      | 400 万元  | 26.7% |
| 3     | 非标设备定制与加工 | 200 万元  | 13.3% |
| 4     | 设备安装费     | 70 万元   | 4.7%  |
| 5     | 设计及技术服务费  | 50 万元   | 3.3%  |
| 6     | 工程不可预见费   | 80 万元   | 5.3%  |
| 合计总投资 |           | 1500 万元 |       |

备注：投资估算、不含土地购置费或土地租赁费。

利用水厂脱水污泥为主原料建一座年产 10 万 m³ 陶粒生产线总投资 1500 万元，其中机械设备和电气设备投资约为 700 万元，占整个工程投资的 46.7%；土建投资约为 400 万元，占整个投资费用的 26.7%（不含土地购置或土地租赁费）；非标设备费为 200 万元，占整个投资费用的 13.3%。另外设备安装费和设计及技术服务费分别为 70 万元和 50 万元，各占整个投资费用的 4.7%和 3.3%。

最后一项工程不可预见费为 80 万元，占整个投资费用的 5.3%，详见表 8.1。

8.1.2 产品成本技术经济分析

1、基本条件设置

- ① 生产规模：年产陶粒 10 万 m³。
- ② 流动资金估算：按正常年经营成本的 20%计算为 323.56（万元）。
- ③ 本项目的使用期为 20 年，其中建设期为一年，生产期为 19 年，计划

第一年生产能力为 80%，第二年生产能力达到设计能力。

- ④ 固定资产形成率为 92%。
- ⑤ 固定资产残值以 5%计为 70.0 万元。
- ⑥ 固定资产折旧率以 5.5%计，年折旧费为 75.9 万元。
- ⑦ 大修理费为固定资产原值的 2%计，每年为 27.6 万元。

2、陶粒单位成本核算

陶粒单位成本及各单项所占成本百分率见表 8.2。

表 8.2 水厂脱水污泥生产陶粒单位成本（元/m<sup>3</sup>）统计表

| 序号 | 名 称              | 计算依据                                            | 单位金额<br>(元/m <sup>3</sup> ) | 占整个<br>成本% |
|----|------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------|------------|
| 一  | 原 料 <sup>①</sup> |                                                 | 21.60                       | 13.35      |
| 1  | 脱水污泥             | 每 m <sup>3</sup> 陶粒耗污泥 0.5t，每吨污<br>泥按 40 元计     | 20.0                        |            |
| 2  | 河道淤泥             | 每 m <sup>3</sup> 陶粒耗淤泥 0.11t，每吨<br>淤泥按 10 元计    | 1.1                         |            |
| 3  | 水                |                                                 | 0.50                        |            |
| 二  | 燃料及动力            |                                                 | 90.00                       | 55.63      |
| 1  | 燃 煤              | 每 m <sup>3</sup> 陶粒耗煤 0.1t，每吨煤按<br>500 元计       | 50.00                       |            |
| 2  | 电                | 每 m <sup>3</sup> 陶粒耗电 40kwh，每 kwh<br>电按 1.00 元计 | 40.00                       |            |
| 三  | 工人工资<br>附加费      |                                                 | 15.00                       | 9.27       |
| 四  | 维 修 费            | 按固定资产原值的 6%计(含大<br>修费)                          | 6.62                        | 4.09       |
| 五  | 低值易耗             |                                                 | 5.00                        | 3.09       |

|     |              |                                              |         |       |
|-----|--------------|----------------------------------------------|---------|-------|
| 六   | 车间经费         | 按固定资产原值的 2% 计                                | 2. 21   | 1. 37 |
| 七   | 企业管理费        | 按车间成本的 5% 计                                  | 5. 65   | 3. 49 |
| 八   | 无形资产<br>递延资产 | 按 10 年 分 摊                                   | 1. 50   | 0. 93 |
| 九   | 折 旧 费        |                                              | 7. 60   | 4. 70 |
| 十   | 销售费用         | 按销售收入的 3% 计<br>(陶粒销售价 200 元/m <sup>3</sup> ) | 6. 00   | 4. 08 |
| 合 计 |              |                                              | 161. 78 |       |

备注：① 陶粒单位成本不包含外加剂费用

② 陶粒单位成本未包含贷款付息费用

③ 原料费中污泥运费按 40 元/吨计（包含 15 公里运费）。

### 8.1.3 利润预测分析

#### 1、财务基本条件

① 陶粒销售价：按目前江浙沪一带超轻陶粒及特种陶粒价格平均值为 230 元/m<sup>3</sup>，我们按 220 元/m<sup>3</sup> 计算。

② 销售收入：

投产年：80000×220=1760（万元）

正常年：100000×220=2200（万元）

① 销售成本：

投产年：161.78 元/m<sup>3</sup>×80000m<sup>3</sup>=1294.24(万元/年)

正常年：161.78 元/m<sup>3</sup>×100000m<sup>3</sup>=1617.80(万元/年)

② 销售税金：

本项目产品综合税按 10% 计

投产年：1760×10%=176（万元/年）

正常年：2200×10%=220（万元/年）

⑤ 所得税按销售利润总额的 33%（本产品免税三年）所得税：

[ (220-161.78) ×100000-2200000] 万元×33%=119.53 (万元/年)

2、销售利润预测

表 8.3 水厂脱水污泥为主原料年产 10 万 m3 陶粒利润预测统计表 (单位: 万元)

| 序号 | 项目    | 第 2 年                         | 第 3 年   | 第 4-20 年            |
|----|-------|-------------------------------|---------|---------------------|
| 1  | 销售收入  | 1760.00                       | 2200.00 | 2200.00×17=37400.00 |
| 2  | 销售成本  | 1294.24                       | 1617.80 | 1617.80×17=27502.60 |
| 3  | 产品综合税 | 176.00                        | 220.00  | 220.00×17=3740.00   |
| 4  | 销售利润  | 289.76                        | 362.20  | 362.20×17=6157.40   |
| 5  | 所得税   | —                             | —       | 119.53×17=2032.01   |
| 6  | 净利润   | 289.76                        | 362.20  | 242.67×17=4125.39   |
| 7  | 利润总额  | 289.76+362.20+4125.39=4777.35 |         |                     |

① 投产年:

销售收入-销售成本-销售税金=1760-1294.24-176=289.76 (万元/年)

② 正常年:

销售收入-销售成本-销售税金=2200-1617.80-220=362.20 (万元/年)

水厂脱水污泥为主原料新建 10 万 m³/年陶粒厂利润预测分析见表 8.3。

3、投资利润率:

投资利润率 (毛利)= $\frac{\text{平均利润总额}}{\text{项目总投资}} \times 100\%$

$= \frac{362.2\text{万元}}{1500\text{万元}} \times 100\%$

= 24.15%

投资利润率 (净利)= $\frac{\text{销售利润}-\text{所得税}}{\text{项目总投资}+\text{流动资金}} \times 100\%$

$$= \frac{362.2 \text{万元} - 119.53 \text{万元}}{1500 \text{万元} + 323.56 \text{万元}} \times 100\%$$

$$= \frac{242.67 \text{万元}}{1823.56 \text{万元}} \times 100\%$$

$$= 13.31\%$$

#### 4、盈亏平衡点

##### ① 生产能力利用率 (BEP)

$$BEP = \frac{\text{总成本} - \text{可变成本}}{\text{年销售收入} - \text{销售税金} - \text{年可变成本}} \times 100\%$$

$$= \frac{1617.8 \text{万元} - 1116.0 \text{万元}}{2200 \text{万元} - 220 \text{万元} - 1116.0 \text{万元}} \times 100\%$$

$$= \frac{501.8 \text{万元}}{864 \text{万元}} \times 100\% = 58.08\%$$

注：可变成本含原料费、燃料费和动力费。

##### ② 平衡点产量

$$100000 \text{m}^3 \times 58.08\% = 58080 \text{m}^3$$

即陶粒的产销量为 58080m<sup>3</sup>，企业可实行盈亏平衡。

#### 5、投资回收期：(所得税免三年)

$$\frac{\text{项目总投资} - \text{投产年销售利润} - \text{正常年销售利润} \times 2}{\text{正常年净利润 (税后)}} + 3$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1500 - 289.76 - 362.2 \times 2}{362.2 - 119.53} + 3 \\ &= 5.00(\text{年}) \end{aligned}$$

静态投资回收期为 5.00（年），即项目投产后 5.00（年）收回全部项目投资。

8.2 利用水厂脱水污泥年产 2000 万块多孔砖工程经济技术分析

8.2.1 工程投资

利用水厂脱水污泥为主原料建一座年产 2000 万块多孔砖厂，总投资约 292 万元人民币（不包括土地购置费或者土地租赁费），其中工艺设备（制砖机引风机、破碎机等主要设备）投资约 60.5 万元，占整个工程投资的 20.72%，电气设备（变压器、电缆电气）投资约 60 万元，占整个投资的 20.55%。辅助设备（车辆及厂内运输工具等）投资约 71.5 万元，占整个投资费用的 24.49%，土建工程（生产车间，28 门轮窑一座，仓库和机修车间）投资约 100 万元，占整个投资的 34.25%，详见表 8.4。

表 8.4 利用水厂脱水污泥为主原料建年产 2000 万块多孔砖工程投资估算表

| 序号  | 工程投资内容    | 合计金额（万元） | 占总投资% |
|-----|-----------|----------|-------|
| 1   | 工艺设备（含安装） | 60.5     | 20.72 |
| 2   | 电气设备（含安装） | 60.0     | 20.55 |
| 3   | 辅助设备（含安装） | 71.5     | 24.49 |
| 4   | 土建工程      | 100.0    | 34.25 |
| 总投资 |           | 292.0    |       |

备注：投资估算、不包括购地或租地费用。

## 8.2.2 产品成本技术经济分析

## 1、基本条件设置

- ① 生产规模 生产多孔砖 2000 万块。
- ② 流动资金估算按正常年经营成本 635.12 万元的 10%计为 63.51 (万元)。
- ③ 本项目的使用期为 20 年建设期为 1 年, 生产期为 20 年, 计划第一年生产能力为 80%, 第二年达到生产设计能力。
- ④ 固定资产形式率为 90%以 263 万元计。
- ⑤ 固定资产残值以 5%计, 13.2 万元。
- ⑥ 固定资产折旧率以 5%计 13.15 万元。
- ⑦ 大修理费用为固定资产原值的 5%计, 每年为 13.15 万元。

## 2、多孔砖单位成本核算

目前市场价每块多孔砖售价为 0.386 元计, 年销售收入约  $0.386 \text{ 元} \times 2000 \text{ 万块} = 772 \text{ 万元人民币}$ 。

多孔砖单位成本以及各单位支出所占成本百分率见表 8.5。

表 8.5 水厂脱水污泥生产多孔砖万块单位成本统计表

| 序号 | 名称    | 计算依据                                      | 单位金额<br>元/万块 | 占整个<br>成本% |
|----|-------|-------------------------------------------|--------------|------------|
| 一  | 原料    |                                           | 1056         | 33.25      |
| 1  | 水厂污泥  | 万块砖用泥 15T 按 40 元/T 计                      | 600          |            |
| 2  | 河道淤泥  | 万块砖用泥 15T 按 5 元/T 计                       | 75           |            |
| 3  | 煤渣    | 万块砖用煤渣 3T 按 100 元/T 计                     | 300          |            |
| 4  | 水     | 万块砖用水 $3\text{m}^3$ 按 2 元/ $\text{m}^3$ 计 | 6            |            |
| 二  | 燃料动力  |                                           | 90           | 2.83       |
| 1  | 煤及引火料 | 万块砖用 100kg 煤 500 元/吨计                     | 50           |            |
| 2  | 电     | 万块砖耗电 40kwh, 1 元/度计                       | 40           |            |
| 三  | 场地租费  | 平均万块砖                                     | 100          | 3.15       |

|   |              |            |        |       |
|---|--------------|------------|--------|-------|
| 四 | 工资附加费        | 以万块砖计      | 1100   | 34.64 |
| 五 | 企业管理费        | 按成本 5%计    | 150.8  | 4.75  |
| 六 | 低值易耗<br>塑膜调换 |            | 300    | 9.45  |
| 七 | 资产折扣         | 以 5%计      | 131.5  | 4.14  |
| 八 | 大修理费         | 按固定资产的 5%计 | 131.5  | 4.14  |
| 九 | 销售费用         | 按销售收入的 3%计 | 115.8  | 3.65  |
|   |              | 合计         | 3175.6 |       |

备注：① 万块砖制造销售成本未包含贷款付息费用  
② 原料费中污泥运费按照 40 元/吨计算（包含 15 公里运费）。

8.2.3 利润预测分析

1、财务基本条件

• 销售收入

目前多孔红砖售价为 0.386 元/块计。

每年销售量为 2000 万块计，合计每年销售人民币为 0.386 元×2000 万块=772 万元。

• 销售成本

销售成本 3175.6 元/万块×2000 万块=635.12 万元。

• 综合税

综合税按 10%计，772 万元×10%=77.2（万元/年）

• 所得税按销售利润总额的 33%（本产品免税三年）所得税计

[（3860 元-3175.6 元）×2000-772000]×33%=19.69 万元

2、销售利润预测

销售收入-销售成本-销售税金

=772 万元-635.12 万元-77.2 万元=59.68 万元（所得税前）

销售利润-所得税=59.68-19.69=39.99 万元

水厂脱水污泥为主原料新建 2000 万块多孔砖利润预测分析见表 8.6。

表 8.6 水厂脱水污泥为主原料年产 2000 万块多孔砖利润预测统计

(单位: 万元)

| 序号 | 项目    | 第 2 年                             | 第 3 年  | 第 4-20 年                      |
|----|-------|-----------------------------------|--------|-------------------------------|
| 1  | 销售收入  | 617.6                             | 772    | $772 \times 17 = 13124$       |
| 2  | 销售成本  | 508.096                           | 635.12 | $635.12 \times 17 = 10797.04$ |
| 3  | 产品综合税 | 61.76                             | 77.2   | $77.2 \times 17 = 1312.4$     |
| 4  | 销售利润  | 47.74                             | 59.68  | $59.68 \times 17 = 1014.56$   |
| 5  | 所得税   | —                                 | —      | $19.69 \times 17 = 334.73$    |
| 6  | 净利润   | 47.74                             | 59.68  | $39.99 \times 17 = 679.83$    |
| 7  | 利润总额  | $47.74 + 59.68 + 679.83 = 787.25$ |        |                               |

3、投资利润率

$$\begin{aligned} \text{投资利润率} &= \frac{\text{销售利润} - \text{所得税}}{\text{项目总投资} + \text{流动资金}} \times 100\% \\ &= \frac{59.68 - 19.69}{292 + 63.51} = \frac{39.99}{355.51} = 11.25\% \end{aligned}$$

4、盈亏平衡点

① 生产能力利率 (BEP)

$$\begin{aligned} BEP &= \frac{\text{总成本} - \text{可变成本}}{\text{年销售收入} - \text{销售税金} - \text{年可变成本}} \\ &= \frac{635.12 - 229.2}{772 - 77.2 - 229.2} \times 100\% \\ &= \frac{405.92}{465.6} \times 100\% = 87.19\% \end{aligned}$$

② 平衡点产量

2000 万块 $\times$ 87.19%=1743.81 万块

即多孔砖年销量为 1743.81 万块企业可实行盈亏平衡。

### 5、投资回收期

$$\text{投资回收期} = \frac{\text{项目总投资(含流动资金)} - \text{投产年销售利润} - \text{正常年销售利润} \times 2}{\text{正常年净利润(税后)}} + 3$$

$$= \frac{292 + 63.51 - 47.74 - 59.68 \times 2}{39.99} + 3$$

$$= 4.71 + 3 = 7.71(\text{年})$$

静态投资回收期为 7.71 (年), 即项目投资后 7.71 年全部回收项目投资。

## 8.3 结论与讨论

1、利用 80%水厂脱水污泥为主原料掺入外加剂, 经混料配制、粉磨、造粒、烧结等工艺可以制成合格的轻质陶粒, 经工厂化批量生产试验证明在技术上是可行的。

2、利用 50%水厂脱水污泥为主原料, 粉磨掺入河道湖泊污泥, 煤渣粉, 经炼泥、压条、切割、制坯、晾干、烧结等工艺可以制成合格的多孔砖, 经生产试验证明在技术上是可行的。

3、利用水厂脱水污泥为主原料建年产 10 万  $\text{m}^3$  陶粒生产线, 投资费用 1500 万元 (不含地土租费)、流动资金 323.56 万元, 生产期为 20 年。

正常年利润预测为 362.20 万元, 净利润为 242.67 万元, 投资利润率 13.31%, 投资回收期 (所得税免三年) 为 5.0 年。

4、利用水厂脱水污泥为主原料建年产 2000 万块砖厂生产线投资费用为 292 万元, 流动资金为 63.51 万元, 生产期为 20 年

正常年利润预测, 销售利润为 59.68 万元, 净利润为 39.99 万元。投资利润率为 11.25%, 投资回收期为 7.71 年。

5、走持续循环经济是中国国情所决定。从节约资源、节约能源，大力发展节能型保温墙材料等综合因素考虑，建议水厂脱水污泥应作为轻质陶粒生产的主原料，组织倡导扶持陶粒生产厂的诞生。考虑到水厂污泥产出量亦可特批水厂污泥多孔窑厂的投资新建，从而彻底解决水厂污泥的综合利用的难题。

## 第9章 结论与建议

### 9.1 结论

#### 9.1.1 课题研究和测试了水厂脱水污泥化学组成组分、污泥岩相鉴定、污泥颗粒粒径大小以及污泥塑性指数

课题深入研究了水厂脱水污泥化学组成组分，污泥岩相鉴定以及污泥颗粒粒径大小和污泥塑性。这为水厂脱水污泥改性、筛选合理的原料配方、利用污泥制多孔砖和烧结轻质陶粒提供了科学依据。

水厂脱水污泥（长江水源污泥、黄浦江水源污泥）通过化学组成组分测试，其  $\text{SiO}_2$  组分含量大致在 46—57%， $\text{Al}_2\text{O}_3$  组分含量大致在 18—24%， $\text{Fe}_2\text{O}_3$  组分含量大致在 5—7%， $\text{CaO}$  组分含量大致在 1—2%，烧失减重大致在 11—15%。与天然粘土化学组成组分基本相似，但  $\text{SiO}_2$  偏低， $\text{Al}_2\text{O}_3$  偏高，烧失减重偏大。

水厂脱水污泥颗粒粒径要比天然粘土颗粒粒径更为细小，污泥颗粒粒径范围处在粉粒与粘粒之间。长江水源污泥粉粒约占 25%（ $74-5\mu\text{m}$ ）粘粒颗粒约占 75%（ $<5\mu\text{m}$ ），长江水库水源污泥中心粒径在  $1.5\mu\text{m}$ ，污泥颗粒非常细小，污泥属粘土范畴。

黄浦江水源污泥处于粉粒范围，污泥颗粒约占 60%（ $75-5\mu\text{m}$ ），处于粘粒范围污泥颗粒约占 40%（ $<5\mu\text{m}$ ），其污泥中心粒径在  $4.6-11.2\mu\text{m}$  之间，污泥亦属粘土范畴。

岩相鉴定也证明了水厂脱水污泥为粉砂结构，以粉砂为主、泥质物次之，而粉砂（ $0.01-0.1\text{mm}$ ）主要为石英，泥质物以水云母为主，可能会有蒙脱石、高岭石，呈微细鳞片集合体。

水厂脱水污泥塑性指数在 8—13 之间，对泥土而言，塑性指数属于中等，

但是水厂脱水污泥干枯后不易塑化，污泥中含粉砂成分较多，况且污泥脱水时加入聚丙烯酰胺高分子使污泥颗粒与颗粒之间形成网状结构，改变了污泥物理特性，降低了污泥塑性指数。

掌握了水厂脱水污泥化学组成组分和特性，为了改变污泥组成组分和特性，首先在污泥中掺入适量河道淤泥，能提高污泥中  $\text{SiO}_2$  组分含量，相对降低污泥中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  组分含量，并且能提高污泥塑性指数，使污泥颗粒级配得到合理的分布。

在水厂污泥中适量掺入印染厂污泥和膨润土，能提高污泥中  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  组分含量和有机质含量以及增加污泥中粘土矿物质组分斜长石、蒙脱石和伊利石。掺入这些物料对污泥烧结陶粒提高膨胀性能都能起到积极的作用。因此掌握了水厂污泥相关组成组分和污泥特性，选择合适的外加剂，筛选合理的原料配方，可为水厂污泥建材利用提供科学依据。

### 9.1.2 不能直接利用水厂脱水污泥烧结多孔砖

水厂脱水污泥化学组成组分与天然粘土、河道淤泥化学组成组分基本相似，但是水厂脱水污泥基本上以粉砂级配为主，颗粒粒径相对较细小，烧失减量较大（11—15%），况且水厂浓缩污泥在脱水时投加了高分子絮凝剂聚丙烯酰胺，故污泥晾干后加水污泥塑性较差，若将变硬的水厂脱水污泥和自然粘土或河道淤泥共同组合输入制砖坯流水线时，影响原料搅和、炼泥等工艺，同时影响了对压滚轮正常运行，故而不能直接利用水厂污泥烧结多孔砖。

若将水厂脱水污泥作为粘土资源加以利用，一方面需要适量掺入自然粘土或河道淤泥，以改变脱水污泥中砂粒级配和降低污泥烧失减量。另一方面需破坏脱水污泥中高分子聚丙烯酰胺使污泥颗粒与颗粒之间所形成的网状结构。这样才能利用水厂脱水污泥作为烧结多孔砖粘土原料。

### 9.1.3 不能直接利用水厂脱水污泥塑化法烧结轻质陶粒

直接利用水厂脱水污泥塑化法烧结陶粒，很难控制水厂污泥含水率，太

潮湿污泥炼泥时掺入干泥粉碎粉或烟道灰使生料球粘合性能差, 炼泥不均匀, 从而使生料球抗压强度差、热强度变小, 而且造成生料球易碎, 烧结膨胀过程中不断有料球发生断裂和炸裂现象产生。在转窑转动的情况下, 小颗粒与大颗粒并存, 但由于其吸热和放热的不一致, 熔融时间亦不一致, 从而造成陶粒烧结后釉层外壳很薄, 包裹不严, 最终陶粒产品筒压强度偏低, 吸水率偏高。

为了使生料球成型率提高, 生料球含水率必然偏高, 烘干、预热时间偏长, 故料球中有机物提前被烧掉, 从而使料球中氧化铁的还原反应不能充分进行。烧结的陶粒膨胀程度不够, 外壳无釉彩, 陶粒呈灰色。

### 9.1.4 50%水厂脱水污泥粉磨法与自然粘土或河道淤泥组合能够烧结出合格的多孔砖

利用 50%水厂脱水污泥为主原料 (采用粉磨法对污泥进行粉碎、细磨、破坏污泥中由高分子絮凝剂所造成的污泥颗粒与颗粒相连接的网状结构。) 掺入 40%河道淤泥和 10%煤渣粉组合的原料。通过搅和、炼泥、挤压切割、砖坯晾干、轮窑焙烧、多孔砖成品出窑等工艺, 其产品经质量检测, 多孔砖抗压强度 Mpa、5h 煮沸吸水率%等各项指标均符合国家 GB/T13544-2000《烧结多孔砖国家标准》。其多孔砖抗压强度 Mpa 平均值 15.6、标准值 10.0, 5h 煮沸吸水率%单块最大值 24%、平均值 21%。

通过水厂脱水污泥烧结多孔砖工业生产试验结果显示, 利用水厂脱水污

泥烧结多孔砖，能节约资源、节省能源、大量消纳水厂污泥、为科学、合理地利用水厂脱水污泥提供了一个可选择的途径。

9.1.5 80%水厂脱水污泥掺入外加剂采用粉磨法造粒能够烧结出合格的轻质陶粒

利用 80%水厂脱水污泥为主原料掺入 20%外加剂组合的原料通过晾干、配料、磨细、成球盘造粒或对辊挤压造粒，然后输入转窑干燥、预热焙烧、冷却等工艺，能烧结成品质优良的轻质陶粒，经产品质量检测，符合国家（GB/T-17431.1-1998）标准。

|                            | GB/T-17431.1-1998 产品<br>标准 | 生产试验陶粒产品检测<br>结果 |
|----------------------------|----------------------------|------------------|
| ①堆积密度<br>kg/m <sup>3</sup> | 410-500                    | 480              |
| ②筒压强度<br>Mpa               | ≥1.5                       | 2.7              |
| ③吸水率%                      | ≤15                        | 11               |
| ④软化系数                      | ≥0.8                       | 1.0              |
| ⑤粒型系数                      | ≤1.6                       | 1.2              |

|       |  |                |
|-------|--|----------------|
| ⑥颗粒级配 |  | 符合 5-20mm 连续级配 |
|-------|--|----------------|

通过水厂污泥烧结陶粒工业生产试验研究结果证明水厂脱水污泥是一种可利用的粘土资源，可作为烧结粘土陶粒的主要原料加以利用，这必将对环境效益、社会效益、经济效益产生积极影响，这也符合国家资源循环使用，经济持续发展的长远战略。

9.1.6 水厂脱水污泥烧结陶粒原料配方筛选与确立是水厂脱水污泥建材利用和产业化关键技术的突破

水厂脱水污泥为主原料掺入外加剂，通过合理地配方筛选试验，有效地从 14 组配方中筛选出二组配方，经生产试验结果证明了水厂脱水污泥制陶粒建材利用和产业化关键技术有了突破。

为了确保水厂脱水污泥为主原料烧结轻质陶粒生产试验的成功，并为今后产业化建厂设计提供科学的工业参数，在掌握水厂脱水污泥、河道淤泥，印染厂污泥、膨润土等外加剂化学组成组分、岩相鉴定、塑限、液限、塑性指数、污泥颗粒级配等物料相关参数的基础上，对水厂污泥进行科学地改良，通过掺入不同品种和不同百分比含量的外加剂，共组成 14 组配方，分别制成生料球，并在不同的预热时间、预热温度以及不同焙烧时间、焙烧温度下进行反复试验，其目的选择配方原料塑性好、焙烧性能好、预热和焙烧生料球都无炸裂现象等技术难点，经反复实验最后筛选出水厂脱水污泥烧结陶粒三组原料配方<sup>[57-63]</sup>。

第 3<sup>#</sup>原料配方：80%水厂脱水污泥+15%河道淤泥+5%印染厂污泥；

第 10<sup>#</sup>-2 原料配方：80%水厂脱水污泥+20%河道淤泥+5%印染厂污泥；

第 11<sup>#</sup>-2 原料配方：80%水厂脱水污泥+10%河道淤泥+5%印染厂污泥+5%膨润土。

上述 3<sup>#</sup>配方和 11<sup>#</sup>-2 配方通过生产试验验证结果，二组配方生产的生料球不论成球盘造粒还是对辊挤压造粒，生料球都能满足抗压强度和热强度的冲击。

控制最佳预热时间和温度，掌握陶粒焙烧温度和时间，窑内生料球-陶粒无炸裂现象产生，陶粒膨胀性能好、产品堆积密度小、吸水率低和筒压强度相对高，陶粒氧化充分，外壳呈红色，其产品质量符合国家相关标准。

因此配方的筛选与配方的确定是水厂脱水污泥建材利用产业化关键技术突破。

#### 9.1.7 水厂脱水污泥为主原料烧结轻质陶粒选择外加剂原则

利用水厂脱水污泥烧结轻质陶粒选择外加剂的原则是掺入外加剂物料必须能使烧结的陶粒产品表观密度下降，必须能促进生料球在高温焙烧时处于最佳膨胀状态。因此外加剂必须富含碳氢化合物，选择外加剂还必须能提高污泥的塑性指数，可增加陶粒原料的可塑性和膨润性<sup>[64-66]</sup>。

在水厂污泥制陶粒实验室研究过程中发现，原料中只要掺入印染厂污泥

后在同样温度 and 时间的条件下, 焙烧其产品陶粒表观密度有很大的降低, 其原因是印染厂污泥富含  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  高达 41.5%、 $\text{SO}_3$  高达 5.96%, 烧失减量高达 28.34%。

这在很大程度上保障了原料中具有很好的膨胀性能, 能确保焙烧出的陶粒表观密度—温度曲线变得较为平缓, 可确保在较宽的温度范围内焙烧出表观密度较小的轻质陶粒。

另外配方原料中若富含碳氢化合物, 当配合料粉磨成球后, 料球在预热和焙烧时, 能逐步分解释放出  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{N}_2$  等气体, 当遇到生料球中铁的氧化物就能促进氧化铁起还原作用, 而铁的氧化物还原反应产生的气体也是构成生料球高温膨胀的另一个重要因素。

水厂脱水污泥掺入少量外加剂膨润土(属强可塑性粘土, 以蒙脱石为主)可增加陶粒原料的可塑性和膨润性, 使烧制的陶粒产品强度增大, 并能减少陶粒产品的吸水率, 掺入膨润土的水厂脱水污泥烧结的陶粒产品质量能显著提高, 效果非常明显。

#### 9.1.8 通过课题研究试验解决了水厂脱水污泥资源利用几点关键技术难点

① 粉磨法改变了水厂脱水污泥存在状态, 解决了水厂污泥制多孔砖、炼泥工艺不能正常运行、砖坯多毛刺多裂纹, 晾干坯体有裂缝等弊端, 以及坯体进窑烧结产品龟裂严重等诸多缺陷。

由于粉磨法破坏了高分子絮凝剂使脱水污泥泥粒与泥粒之间所形成的网状结构,另一方面,由于原料中掺入了河道淤泥,改善了水厂脱水污泥纯粹粉砂的单一级配,提高了制砖原料的可塑性能,塑性指数值有了较大幅度提升,从而使得原料在进行制砖工艺流程时炼泥工序得以正常运行。泥条切割后砖坯无毛刺和裂纹,晾干砖坯无大面积裂缝,烧结无龟裂的现象。产品基本达到国家相关标准。

② 水厂脱水污泥烧结陶粒直接塑化法造粒生料球强度低、不密实、易断裂,生料球进窑预热和焙烧料球除了易爆炸外还易结块,出窑产品陶粒筒压强度低、堆积密度大、膨胀程度低、吸水率高,并且陶粒呈灰褐色。

采用粉磨法对水厂脱水污泥进行深度加工,并选择外加剂科学组合配制的陶粒原料,确保原料中  $\text{SiO}_2$  有所增高、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  有所降低、增加了原料的塑性,解决了生料球不密实、强度低、易断裂的缺陷。

控制合理的热工制度能确保料球在预热和焙烧过程中不使料球产生炸裂。

确保料球在焙烧过程中有足够碱金属和碱土金属所产生的熔融物料能够即时包裹着原料中碳酸盐分解所产生的气体,以及能将熔融铝硅酸盐固定在外壳之内,外壳釉层包裹严实,陶粒烧胀充分,氧化铁得到充分还原,因此采用粉磨法对水厂脱水污泥和外加剂进行深度处理,不论是成球盘造粒还是塑化对辊造粒,通过生料球预热和焙烧能够解决陶粒筒压强度低、堆积密度大、膨胀程度低、吸水率高等技术难点。

③ 控制合理的主辅原料配比,粉磨法生料球制备科学控制预热与焙烧温度,可以防止陶粒生料球炸裂现象的产生。

造成陶粒生料球在预热和焙烧过程中发生炸裂的原因很多,其中原料化学组成组分含量是否合理、原料颗粒级配是否均匀可以通过配料与原料粉磨方法解决。但是生料球进入转窑后,科学地、合理地掌握预热时间和预热温度、料球的焙烧温度与时间等相关工艺参数是非常重要的,本项目经实验室反复试验研究,得出结论:生料球预热温度为 400℃,预热时间为 20min,陶粒焙烧温度为 1125—1175℃,陶粒焙烧时间为 8—10min。通过筛选的热工参数经水厂脱水污泥制陶粒生产试验验证,陶粒生料球在窑内预热和焙烧过程中无炸裂现象的产生,该热工参数科学合理。

④ 控制主辅原料的化学组分含量,解决了陶粒焙烧膨胀性达不到要求的技术难点。

主原料 80%水厂脱水污泥与 20%外掺辅助原料配制的混合料中,需满足原料中富含碳氢化合物,构成了生料球高温膨胀的重要物质因素,还需要原料中可燃成分及碳酸盐矿料来满足生料球在预热和焙烧过程中逐渐释放出  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{N}_2$  等气体。尤其物料中释放的氢气能造成三氧化二铁还原的重要条件,而铁的氧化物还原反应产生的气体也是构成料球高温膨胀的另一个重要因素。

#### 9.1.9 通过水厂脱水污泥烧结陶粒实验室和工业生产试验研究,掌握了水

## 厂污泥烧结陶粒相关工艺参数

### 污泥烧结陶粒相关工艺参数

#### ① 烧结陶粒原料配方:

- 80%水厂脱水污泥+15%河道淤泥+5%印染厂污泥
- 80%水厂脱水污泥+10%河道淤泥+5%印染厂污泥+5%膨润土

#### ② 生料球造粒

- 粉磨法成球盘造粒
- 粉磨法对辊挤压造粒

#### ③ 生料球预热焙烧热工参数

- 生料球预热温度 400℃
- 生料球预热时间 20min
- 陶粒焙烧温度 1125—1175℃
- 陶粒焙烧时间 8—10min

#### ④ 预热窑和焙烧窑转速

- 预热窑转速 2.4 转/min
- 焙烧窑转速 2.93 转/min

#### ⑤ 窑尾控制温度 180—190℃

### 9.1.10 水厂脱水污泥烧结的轻质陶粒所制成的二种陶粒制品是符合绿色

## 建筑的三个要求

三个要求即：节约能源，保护环境，提供健康、安全、舒适的居住环境。

第一种陶粒制品为轻集料（陶粒）混凝土小型空心砌块制品，规格  $390 \times 190 \times 190\text{mm}$  共试制五种品种三种型号，对其中的双排孔 MD5.0 进行了墙体保温性能测定，采用水泥砂浆砌筑，两面各粉水泥砂浆 15mm，总厚度 220mm，墙体热阻  $R=0.580\text{m}^2 \cdot \text{k}/\text{w}$ ，作外墙时传热系数  $k=1.37\text{w}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$ ，作内墙时传热系数  $k=1.25\text{w}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$ 。上述传热系数完全达到国家墙体材料节能标准（ $k=1.5\text{w}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$ ）。水厂脱水污泥生产的陶粒产品应用于轻集料（陶粒）混凝土小型空心砌块生产是今后的发展方向。

第二种陶粒制品为陶粒增强加气砌块。

由水厂脱水污泥制得的陶粒增强加气砌块质量轻，其干体积密度为  $710\text{kg}/\text{m}^3$ ，是粘土砖重量的  $1/3$ ，是混凝土重量的  $1/4$ ，其抗压强度高，平均值为  $5.6\text{Mpa}$ ，最小值为  $4.7\text{Mpa}$ ，产品保温性能好，产品导热系数为  $0.15\text{w}/\text{m} \cdot \text{k}$ 。

此产品具有潜在的发展优势，开发此产品能有效减轻建筑物的自重，推广应用该产品对节省能源具有重大意义。

### 9.1.11 50%水厂脱水污泥烧结多孔砖和 80%水厂脱水污泥烧结轻质陶粒技术经济分析

一、生产多孔砖（利用 50%水厂脱水污泥）

① 投资年产 2000 万块多孔砖工程投资费用 292 万元（不含土地购置或租赁费）；

② 多孔砖制造成本 3175.6 元/1000 块；

③ 多孔砖销售收入 3860 元/1000 块；

④ 多孔砖年销售收入 3860 元/1000 块 $\times$ 2000 万块=772 万元；

⑤ 年净利润 39.99 万元/年（扣除生产成本，综合税和所得税）；

⑥ 投资利润率 11.25%；

⑦ 盈亏平衡点：生产能力利用率 BEP 87.19%

⑧ 盈亏平衡点：平衡点产量 1743.81 万块砖/年

⑨ 2000 万块砖厂投资回收期为 7.71 年。

二、轻质陶粒生产（利用 80%水厂脱水污泥）

① 投资年产陶粒 10 万方，工程投资费用 1500 万元。

（不含土地购置费和土地租赁费）

② 陶粒制造成本 161.78 元/ $\text{m}^3$

③ 陶粒销售价（暂定）220 元/ $\text{m}^3$

④ 陶粒年销售收入 220 元/ $\text{m}^3 \times 100000 \text{m}^3 = 2200$ （万元）

- ⑤ 投资利润率（毛利）24.15%
- ⑥ 投资利润率（净利）13.31%
- ⑦ 盈亏平衡点：生产能力利用率（BEP）58.08%
- ⑧ 平衡点产量：58080m<sup>3</sup>/年
- ⑧ 投资回收期：5.00年

## 9.2 建议

### 9.2.1 水厂脱水污泥产业化应用方向

水厂脱水污泥应用于建材、烧结多孔砖、烧结轻质陶粒不仅能够彻底解决水厂污泥稳定化、无害化的处置途径。还可以大量消纳污泥，保护自然资源、节约耕地、利废增效，同时还能完善墙体材料的革新。从生产工艺、产品特性与应用前景来分析，结合上海发展需求，利用水厂脱水污泥生产轻质陶粒是产业化应用的主要方向之一，其次是利用水厂脱水污泥与河道淤泥组合生产多孔砖。

### 9.2.2 水厂脱水污泥建材利用应制定优惠政策

水厂脱水污泥作为城市废弃物的主要种类之一，应从国家、地方政府层面制定合理的政策导向，以产业化市场运作制定优惠税收政策，将水厂脱水污泥作为废弃物资源加以利用，在排泥水处理的同时将污泥变废为宝这种化害为利、变废为宝的资源综合利用，是保证资源循环利用的有效途径和实现可持续发展战略的重大举措，也是国民经济和社会发展的一项长远战略方针，只有这样上海才能实现建设资源节约型环境友好型城市的目标。

## 参考文献

1. 陈同斌, 黄启飞, 高定, 等 中国城市污泥重金属含量及其变化趋势. 环境科学学报 2003.23 (5) 561—569
2. Oslo Commission. Water Research Center. Water Services Association EWPCA
3. 何品晶, 顾国维, 李笃中, 等.城市污泥处理与利用.科学出版社
4. Hall J E.Sewage Sludge Production. Treatment and Disposal in the European Union. J. of CIWEM, 1995, 9 (4): 335~343.
5. Hoyland G. Shanghai Workshop Sewage Sludge Disposal Regulations and Strategy. Shanghai: Shanghai Water & Environment Construction Co. Ltd. 2001
6. 张自杰等.排水工程(第四版).中国建筑工程出版社, 2002
7. Spinosal L et al. Sludge into Biosolids: Processing, Disposal and Utilization. London:IWA Publishing, 2001
8. 尹军, 谭学军.污水污泥处理处置与资源化利用.化学工业出版社
9. 范锦中.利用污泥生产节能型人造轻骨料——陶粒.轻骨料协会年会论文集
10. Schmitt C R, Hall J E. Analytical characterization of water treatment plant sludge .Jour. AWWA, 1975,67, 67 (1) :40 .
11. 陈列芳.试论粉煤灰陶粒发展方略.轻骨料专业委员会年会资料
12. 自来水厂沉淀污泥研制陶粒的试验研究.建筑科学研究报告第 9208 号
13. 朱斌, 王海亮.给水厂脱水污泥烧结陶粒试验.给水排水 2005-2
14. 谢容珍. 国内城市污水厂污泥的资源化利用[J]广东化工, 2008,(08) .
15. 郑彦华,王增长. 给水厂污泥脱水与处置[J]科技情报开发与经济, 2007,(07):236-239 .
16. 李怀正,洪祖喜,邢绍文,喻文熙,郑鸿. 对上海给水厂污泥处理的规划设想[J] 给水排水, 2005,(12): 35-39 .

17. 李淑展. 污水厂脱水污泥制陶质地砖及填埋场防渗衬层材料研究[D].湖南大学, 2007.
18. 李南生. 利用粉煤灰陶粒生产工艺处理剩余污泥的技术[J]粉煤灰, 1995,(03): 59-65.
19. 咎元峰,王树众,沈林华,段百齐,林宗虎. 污泥处理技术的新进展[J]中国给水排水, 2004,(06): 39-45.
20. 黄晓明,张书生,廖公云. TR 型土壤固化剂路用性能试验研究[J]公路交通科技, 2002,(03): 37-42.
21. Sarfert F, Jekel M, Wichmann K. Treatment and utilization of waterworks sludges in Germany .Water Supply, 1994,12, 12 (1-2) :ss3 .
22. 赵丽君,张大群,陈宝柱. 污泥处理与处置技术的进展[J]中国给水排水, 2001,(06): 26-31.
23. 王敦球,解庆林,李金城,张学洪. 城市污水污泥农用资源化研究[J]重庆环境科学, 1999,(06): 55-59.
24. 张瑞荣,候浩波. 固体废物填埋场粉煤灰衬垫渗透系数的影响因素分析[J]粉煤灰综合利用, 2002,(04):69-75.
25. 任伯帜,龙腾锐,陈秋南. 粉煤灰-粘土砖烧制过程处理城市污水污泥的试验研究[J]环境科学学报, 2003,(03): 33-38.
26. 阮燕,方坤河,曾力,吴定燕. 固化粉煤灰防渗铺盖材料的研制[J]哈尔滨工业大学学报, 2003,(07):56-59.
27. 张鹏,吴志超,陈绍伟,章非娟,员小峰,秦峰,陈善平. 污水厂污泥作填埋场覆盖材料的试验研究[J]环境科学研究, 2002,(02):22-26.
28. Brain Hemphill. Fluid Bed Technology for Sludge Destruction .Water Engineering &Management, 1988,12, 12 :37~40 .
29. 谢敏,施周,李冬梅,李淑展,邓军. 基于静沉试验的给水厂污泥重力浓缩池的设计探讨[J]给水排水, 2006,(12):45-50.

30. 王铁军,刘志生,赵勇胜. PACI 强化混凝 AS 助凝去除水中有机物的试验研究[J]. 吉林农业大学学报, 2007,(05):36-39.
31. 谢敏. 净水厂排泥水浓缩脱水特性及调质形态学研究[D].湖南大学, 2007.
32. 严捍东. 生活污水改性烧制超轻陶粒的研究[J]. 环境污染与防治, 2005,(01): 69-75.
33. 许国仁,邹金龙,孙丽欣. 污泥作为添加剂制备轻质陶粒的试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007,(04): 69-72.
34. 张云峰,盛金聪. 城市污水厂污泥制备陶粒的试验研究[J]. 砖瓦世界, 2007,(05): 39-43.
35. 杜欣,金宜英,张光明,王兴润,聂永丰. 城市生活污水污泥烧制陶粒的两种工艺比较研究[J]. 环境工程学报, 2007,(04):53-58.
36. Cornwell D A, Carel Vandermeiden, Gail Dillow, et al. Landfilling of water treatment plant coagulant sludges .Denver, CO: AWWARF, 1992, :12-15 .
37. 李翠华. 陶瓷滤料过滤性能试验研究[D].武汉理工大学, 2005 .
38. 范锦忠. 利用污泥生产节能型人造轻集料-陶粒[J]. 粉煤灰, 2006,(05):21-26.
39. 金宜英,王兴润,杜欣,聂永丰. 城市生活污水处理厂污泥烧制制陶粒技术可行性研究[J]. 有色冶金设计与研究, 2007,(Z1):33-39.
40. 刘莲香. 污水处理厂污泥于陶粒生产中的综合利用[J]. 陶瓷研究与职业教育, 2003,(01):74-79.
41. 范学斌. 厦门市翔安区供水工程可行性研究[D].同济大学, 2006 .
42. 史文杰. 浙江省诸暨市城西工业新城给水规划研究[D].同济大学, 2007 .
43. 王南威. 给水厂的污水及污泥处理设计研究[D].重庆大学, 2004 .
44. 聂小保. 深圳市给水厂生产废水高效处理技术实验研究[D].西安建筑科技大学, 2004 .
45. 汤朝诚. 陶粒在我省建筑工程中的应用[J]. 云南建材, 1996,(01):39-42.
46. 杨时元 , 谈培夫 , 许绍群. 陶粒——砖厂转产的一种理想产品[J]. 砖瓦,

- 2004,(06):39-45.
47. 何添. 陶粒——砖瓦企业转产新产品的又一途径[J]. 砖瓦, 1996,(04):52-59.
48. 林常青, 姜涵. 我国陶粒混凝土发展前景初探[J]. 建设科技, 2003,(07):34-38.
49. 范锦忠. 粘土陶粒生产线技术改造途径[J]. 房材与应用, 1998,(01):36-39.
50. 范峥, 李南生. 适应上海城市建设需要大力发展陶粒生产[J]. 上海建设科技, 1995,(05):21-25.
51. 贺君, 王启山, 任爱玲. 污水厂污泥制轻质陶粒研究现状及应用前景[J]. 城市环境与城市生态, 2003,(06)5-9.
52. Elliott H. A, Dempsey B A. Agronomic effects of land application of water treatment sludges .Jour. AWWA, 1991,83, 83 (4) :126-131 .
53. 杨时元. 对建设陶粒生产线有关问题的探讨[J]. 墙材革新与建筑节能, 2001,(05):23-29.
54. Graveland A, Sarfert F, Aktor, H. Treatment and Disposal of waterworks Sludge .Water Supply. 1994,ss 3-6 .
55. 张刚. 水厂排泥水造粒流化床浓缩中试实验研究[D].西安建筑科技大学, 2004.
56. 姜谊. 旅游城市高等院校中水回用研究与应用[D].西安建筑科技大学, 2006.
57. 刘晓红. 炼铁厂给排水的无废少废工艺—闭路循环系统研究及应用[D].西安建筑科技大学, 2006.
58. 赵建伟. 陇东油田采出水系统腐蚀及防护研究[D].西安建筑科技大学, 2003 .
59. 杨占峰. 白云鄂博矿区饮用水混凝过滤除氟的研究[D].西安建筑科技大学, 2003.
60. 蔡昌凤,徐建平,褚倩,王玉莲. 粉煤灰/污泥烧结陶粒的研制与应用[J]. 环境污染与防治, 2007,(01) .
61. Cornwell D A, Susan J. Charaterristics of acid-treated alum sludges .Jour. AWWA, 1979,71, 71 (10):604-611.

62. 谭兴立, 吴林森, 符巩固. 陶粒开发应用现状及在湖南的发展前景[J]. 湖南地质, 1997,(01): 21-26.
63. 刘瑾, 陈晓明, 张峰君, 朱文锋. 高分子土固化剂的合成及固化机理研究[J]. 材料科学与工程, 2002,(02):25-30.
64. Cornwell D A, Bishop M M, Gould R G, et al. Water treatment plant waste management .Newport NewsVirginia: Environ Engrg & Technol,Inc, 1987,13, 13 :1-5 .
65. 王自强. 开发陶粒和陶粒混凝土 推动重庆建筑节能与墙材改革[J]. 中华手工, 1999,(03):27-32.
66. 王兴润,金宜英,杜欣,聂永丰. 城市污水厂污泥烧结制陶粒的可行性研究[J]. 中国给水排水, 2007,(07):36-39.