

分类号: _____ 密级: _____
UDC : _____

武汉科技大学
硕 士 学 位 论 文

除尘灰使用对烧结过程及节能降耗的影响研究

The Research on dust using effect on sintering process and
saving energy and reducing consumption

江 剑

指导教师姓名: 杨大兵 副教授
武汉科技大学 资源与环境工程学院

申请学位级别: 硕士 专业名称: 矿物加工工程
论文定稿日期: 2013 年 5 月 15 日 论文答辩日期: 2013 年 5 月 20 日
学位授予单位:
学位授予日期:

答辩委员会主席: 张一敏 教授
评 阅 人: 钱功明 副教授
刘 曙 高工



武汉科技大学
研究生学位论文创新性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立进行研究
所取得的成果。除了文中已经注明引用的内容或属合作研究共同完成的工作
外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本
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。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名： 江 剑 日期： 2013.5.24

研究生学位论文版权使用授权声明

本论文的研究成果归武汉科技大学所有，其研究内容不得以其它单位的
名义发表。本人完全了解武汉科技大学有关保留、使用学位论文的规定，同
意学校保留并向有关部门(按照《武汉科技大学关于研究生学位论文收录工作
的规定》执行)送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅，同意
学校将本论文的全部或部分内容编入学校认可的国家相关数据库进行检索和
对外服务。

论文作者签名： 江 剑
指导教师签名： 杨 斌
日 期： 2013.5.24

摘 要

铁矿石需求量的不断增加致使矿石价格不断上涨,而钢材价格指数变化明显滞后,面对困境,钢铁企业必须想方设法在降低生产成本的同时也要减轻对环境的危害。为充分利用首钢水城钢铁(集团)有限责任公司的除尘灰,在减少环境污染的同时实现除尘灰的资源化再利用。采用单因素试验法研究了除尘灰对比烧结生产原料的造粒、料层透气性、烧结矿质量、燃料消耗以及设备利用系数的影响情况。结果表明,当除尘灰的添加量为 2% 时,混合料的造粒效果最好, +3mm 粒级占 57.8%, 烧结速度达到 26.32mm/min, 料层收缩率为 14%、燃耗为 80.8kg/t, 设备的利用系数为 1.93t/m²·h, 烧结矿质量较好。

添加 2% 的除尘灰后,采用单因素试验法研究燃料用量、燃料粒度以及原料温度等对烧结矿质量的影响情况。结果表明,当燃料用量为 5%、燃料中粒度-3 mm 颗粒所占比例为 88%、原料温度为 60℃时,烧结矿质量较高,所制烧结矿的落下强度、转鼓指数分别为 72.18%、76.07%, FeO 含量为 7.23%、成品率为 85.66%。按此配比可节省约 194.0 万元的燃料成本,节省约 380 万的原料成本。

最后通过正交试验发现:各影响因素对转鼓指数的影响程度大小依次为原料温度>燃料用量>燃料粒度,对落下强度和 FeO 含量的影响程度大小依次为燃料用量>燃料粒度>原料温度,对成品率的影响程度大小依次为燃料用量>原料温度>燃料粒度。对比单因素试验找到的最佳条件,发现这三个影响条件间存在一定的相互影响性。

关键词: 烧结生产; 除尘灰; 原料配比; 烧结矿; 节能降耗

Abstract

Increasing demand for iron ore make the prices of ore continue to rise, but the index of steel price change is obviously lagging behind, facing difficulties, enterprises of iron and steel must try various devices to reduce production cost and reduce harm to the environment . In order to make full use of the dust of Shougang Shuicheng Iron & Steel (Group), to realize resource and recycling of the dust while reducing environmental pollution. Studied the content of the dust influence on the ratio of raw materials, the permeability of layers, the sinter quality, fuel consumption and coefficient of the equipment utilization through single factor test method. Test showed that, when the adding quantity of dust is 2%, the granulation and the permeability of layers is better, the accounted of +3mm size is 57.8%, speed of sintering reaches 26.32mm/min, the shrinkage of material layer rate was 14%, fuel consumption is 80.8kg/t, the utilization coefficient of equipment is 1.93t/m²·h, the sinter quality is better and the sinter indexes were higher .

After adding 2% dust , studied the consumption of the fuel and particle size of the fuel and the temperature of the sintering raw material influence on the quality of the sinter of Shuicheng iron & steel through the single-factor test. The results show that, when the fuel quantity is 5%, the fuel particle size of less than 3 mm particles accounted for 88%, material temperature is 60 °C, the sinter quality is higher, the sinter tumbler index and drop strength is 72.18%, 76.07%, FeO content is 7.23%, the rate of finished products is 85.66%. According to this ratio can save about 1.94 millions yuan in fuel costs, save about 3.8 millions of the cost of raw materials.

Finally, through orthogonal test showed that: the influence of each factor on the drum index order is material temperature>fuel usage>fuel size, influence on the drop strength and content of FeO are fuel usage>fuel size>material temperature, the influence on finished product rate is fuel usage>material temperature>fuel size. Comparing with the best condition through single factor experiment found that there is a certain interaction effects between these three conditions.

Key words: The sintering production; dust; The ratio of raw materials; sinter; energy saving and discharge reduction

目 录

摘 要	I
Abstract	II
目 录	III
前 言	1
第一章 文献综述	2
1.1 我国铁矿石需求情况及价格变化	2
1.2 除尘灰的性质及其对烧结生产和环境的影响	3
1.2.1 除尘灰的种类和性质	3
1.2.2 除尘灰对烧结生产以及环境的影响	4
1.2.3 除尘灰烧结技术的理论可行性	4
1.2.4 除尘灰的资源化再利用	5
1.3 烧结生产概述、发展情况及存在的问题	5
1.3.1 烧结生产概述	5
1.3.2 烧结技术的发展情况	6
1.3.3 烧结生产的意义及发展趋势	6
1.3.4 烧结生产存在的问题	7
1.4 烧结生产节能降耗的主要方法及研究现状	8
1.4.1 节能降耗的主要方法	8
1.4.2 除尘灰的使用及节能降耗的研究现状	10
1.5 论文的提出及意义	14
第二章 试样性质研究	16
2.1 基本物化性能	16
2.1.1 原料的化学组成	16
2.1.2 研究内容	17
2.2 试验的理论基础与方法	17
2.2.1 试验理论基础	17
2.2.2 试验方法及具体步骤	17
2.3 试验设备	19
第三章 除尘灰添加量对烧结生产的影响	22
3.1 除尘灰添加量对烧结原料制粒效果的影响	22
3.2 除尘灰添加量对烧结原料的透气性的影响	23
3.3 除尘灰添加量对烧结矿转鼓指数和 FeO 含量的影响	24
3.4 除尘灰添加量对烧结矿成品率和落下强度的影响	24

3.5 除尘灰添加量对燃料消耗以及设备利用系数的影响..... 25

3.6 本章小结..... 26

第四章 添加除尘灰后不同反应条件对烧结矿质量的影响..... 28

4.1 燃料用量对烧结矿质量的影响..... 28

4.2 原料温度对烧结矿质量的影响..... 29

4.3 燃料粒度对烧结矿质量的影响..... 30

4.4 不同灰分的燃料对烧结矿质量的影响..... 31

4.5 正交试验对比..... 32

4.6 本章小结..... 35

第五章 除尘灰的资源化的效益评估..... 37

5.1 环境效益分析..... 37

5.2 经济效益评估..... 37

第六章 结论..... 39

参考文献..... 40

致 谢..... 43

攻读硕士期间发表及待发表论文..... 44

前 言

随着科学发展观的不断发展和深入,清洁生产和节能降耗越来越受到人们的重视,一批又一批高能耗、重污染的项目被政府部门责令整改或叫停。钢铁行业作为高能耗的低端产业尤其受到政府和公众的注意,但是人类社会在很长的一段时间内都无法脱离钢铁行业而独立发展,所以降低钢铁行业的能耗和污染,寻求可能的钢铁替代品无疑是后人研究与探索的目标。

21 世纪以来,随着经济快速发展,我国对于铁矿石的需求与日俱增,国内产量远远无法满足需求,铁矿进口量不断增加使我国成为了世界铁矿石市场最大的买主,名副其实的“全球吸铁石”大国。面对我国铁矿石贫、细、杂而不能直接入炉的困境,烧结法和球团法被引入钢铁行业,一定程度上解决了我国部分铁矿石难以利用又危害环境的难题。除尘灰是钢铁生产不可避免要产生的副产品,大量堆积不仅浪费大量资源,还会对环境造成很大的危害。

这些年来关于如何循环再利用钢企现有以及新产生的除尘灰,实现资源循环再利用的同时也能解决部分环境问题的探索从来都没有停止过。为充分回收首钢水城钢铁(集团)有限责任公司(以下简称水钢)除尘灰中的有价铁元素,减轻除尘灰对环境的压力,同时也为实际生产提供一定的理论支持,在现有实验室条件下对水钢提供的原料进行试验研究,目的是研究除尘灰添加量对烧结生产的影响,主要包括对制粒效果,烧结速度、燃料用量以及设备的利用率等。同时还研究了添加除尘灰后其他因素对烧结矿质量的影响情况,在保证水钢烧结矿质量的前提下尽可能的增加除尘灰的用量,真正起到既降低污染又节省成本,实实在在的为企业创造收入的目的。

第一章 文献综述

钢铁作为一个国家乃至整个人类社会的脊梁,为人类社会的发展进步做出了巨大的贡献。作为社会发展最基本的必需品,钢铁促使人类社会不断发展、不断进步,也正是钢铁见证了人类不断走向文明、走向辉煌、走向幸福的光辉历程。

作为用途最广、生产最多的基本材料,钢铁产量和质量一直被作为衡量一个国家工农业、国防、科技等实力的重要标志。

1.1 我国铁矿石需求情况及价格变化

作为钢铁生产最主要的原材料,铁矿石价格的变化直接影响企业的生产成本和钢材市场的稳定。21 世纪以来,随着国家一系列措施的不断实施和深入,经济平稳较快发展,致使铁矿石需求量远远超过了国内的产量,进口铁矿石成为钢铁企业的必然选择,进口量由此逐年攀升,所占比重也不断增加^[1]。

2008 年,进口铁矿石超过 4.4 亿吨,增长速度惊人使我国一跃成为了世界最大的铁矿石进口国^[2]。2009 年进口铁矿石 6.2778 亿吨,同比增长 41.6%; 2010 年进口铁矿石 6.186 亿吨,比 2009 减少 899 万吨,幅度为 1.4%, 12 年来铁矿石进口量首次下降; 2011 年我国铁矿石进口 6.86 亿吨,同比增长 10.9%; 均价 163.8 美元/吨,同比增长 27%; 2012 年我国进口铁矿石 7.4 亿吨,增加 8.4%, 均价 128.6 美元/吨,下跌 21.6%。我国的铁矿石自产与进口的数量如图 1.1 所示。

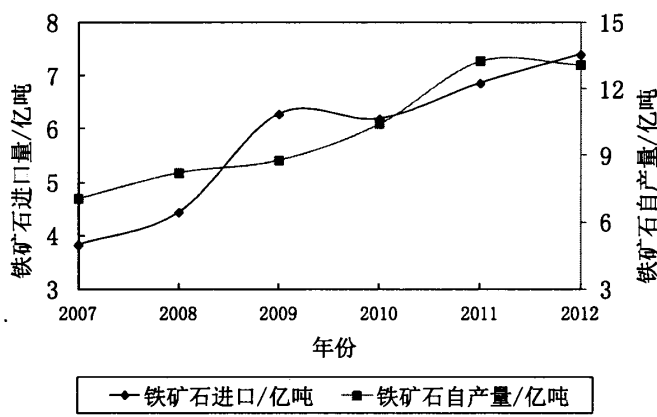


图 1.1 我国铁矿石自产与进口数量图

从图中可以看出铁矿石进口量和自产量都在不断增加,而钢铁的销量又受到地产等行业的严重影响而出现大量滞销,最终造成了钢铁和铁矿石双双过剩,供大于求,严重影响钢铁相关企业的生存和发展。

由于我国高度依赖国际铁矿石市场,国际铁矿石供应商纷纷提价,铁矿石价格不断上扬,而我国的钢铁产品市场却低迷不振,钢材价格指数变化明显滞后于铁矿石价格的波动幅度。下图是我国铁矿石的进口价格以及钢材价格指数的变化情况:

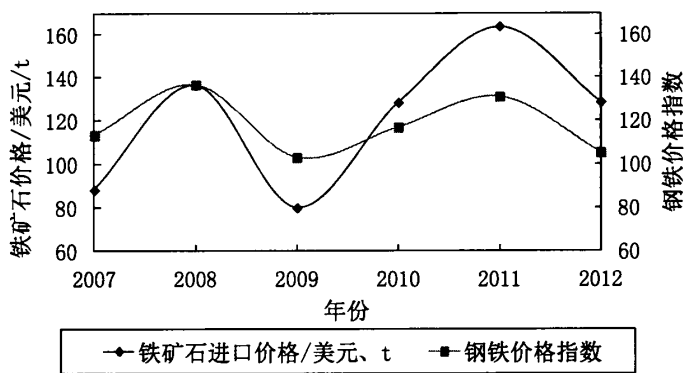


图 1.2 我国铁矿石的进口价格以及钢材价格指数

从上图可以看出，相对于钢铁价格指数的波动幅度而言，铁矿石价格波动幅度明显过大。这势必增加钢企的压力，迫使企业寻求转型升级。

2011 年以来受国家房产等政策影响，钢铁企业再次遭遇前所未有的寒冬，供过于求十分严重，出现了一斤钢比不上 2 两猪肉的论断，出现了谁生产谁亏本的怪象，出现了武钢投资 390 亿发展非钢产业的爆炸性新闻，铁矿石进口在增加，钢铁销量在减小，导致国内铁矿石价格不断下跌，影响本国相关企业的生存和发展。为了改变严峻的形势，让钢铁行业早日度过寒冬，也为了减少对国际市场铁矿石的依赖，钢铁企业必须不断提高技术，既要充分利用国内的贫、细、杂的铁矿资源，也要想方设法节省钢铁的生产成本，真正为实现资源节约和环境保护做出贡献。

1.2 除尘灰的性质及其对烧结生产和环境的影响

钢企的能耗高一直都制约着企业的发展，同时钢铁生产的污染也饱受媒体大众的诟病。除尘灰是钢铁生产过程中不可避免而产生的副产品，对资源节约和环境保护意义重大。我国每年生产约4亿t钢，除尘灰的产量按15kg/t计算，则年排放除尘灰达600万t，堆积如山的除尘灰会污染土壤及地下水，在风力作用下四处飘散还会增加空气中PM_{2.5}的值，对资源、环境以及人体健康都存在巨大的威胁。^[3]

除尘灰粒度-5um 约占 60%、含铁量约 50%，还含有如 C、Pb、Zn、CaO、Al₂O₃ 等其他成分，循环再利用，不但能减轻对环境的压力，还可以增加资源的供应量，很大程度上能够降低企业生产成本，造福祖国和人民，除尘灰资源化能够变“废”为宝，对经济的发展和人民生活水平的提高贡献巨大^[4]。

1.2.1 除尘灰的种类和性质

钢企生产中会产生大量除尘灰、氧化铁皮等，一般都有很大的利用价值。按除尘设置的需求和性质，将除尘灰大致分成烟气除尘灰和环境除尘灰两类^[5]。环境除尘灰主要是由原料装卸、转运等产生的细粒粉尘，通常都是在常温下聚集，粉尘性质变化不大，对生产基本无危害，利用起来比较简单高效。

经高温后产生的烟气除尘灰理化性质发生了很大变化，危害生产过程，难以较好利用。干法除尘产生的高炉煤气除尘灰的成分主要是 Fe 和 C，可以全部作为烧结的原料返回到

烧结生产中。

含铁量 50%以上的转炉煤气电除尘灰,部分以烧结原料的形式再利用,部分以球团原料的方式再利用。除尘灰配比较小对球团矿产量、质量影响不大。电炉除尘灰中的 Fe 通过冷压块技术回收利用^[6]。除尘灰在烧结过程中循环利用也存在部分问题,主要包括:

(1) 除尘灰种类繁多、总量巨大、成分差异大、难以精确定量配料,导致烧结矿各项指标不稳定。

(2) 除尘灰烧结性能差,研究发现:除尘灰过多添加会降低烧结设备的生产能力。

(3) 烟气除尘灰中 K、Na、Cl、Zn、Cd、Pb 等元素的富集会损害烧结、炼铁的生产设备,导致烧结台车糊蓖条,风机叶片挂泥,除尘器负荷加大、效率降低,烟尘污染加重,设备维护工作量和难度加大,影响生产的顺利进行甚至酿成事故^[7]。

(4) 除尘灰运输困难,在装、卸现场及运输途中会发生多次扬尘,污染环境^[8]。

大量除尘灰的简单、低水平的循环利用势必要投入大量人力物力,造成能源浪费的同时还会造成二次污染,导致生产效率降低。

除尘灰具有以下特性:

1) 粒度小,粒径大多在 0.074mm 以下,在除尘系统中会发生恶性循环^[9]。

2) 价值高,化学成分和性质都与烧结矿接近,同时还含有较多的其他有价资源,回收利用会产生较高的价值^[10]。

总体而言,由于除尘灰粒度细,易于四处飘动和扩散,加工处理比较困难,会给环境保护带来不小的压力。除尘灰过多参与烧结会影响料层的透气性,不利于烧结,但除尘灰含有价成分较多,循环利用效益十分显著。

1.2.2 除尘灰对烧结生产以及环境的影响

除尘灰的高潜在价值驱使人们不断研究怎样将其充分利用,烧结除尘灰性质和成分与烧结料较接近,能够较好利用,少量的添加能以返矿为核心制粒,改变混合料的粒度分布,从而改善料层的透气性,保证了燃料的充分燃烧以及热量的快速有效传递,有利于烧结生产的顺利进行;环境除尘灰成分复杂,含 Fe 量低,不适合通过烧结加以利用,参与烧结会恶化烧结过程,增加返矿量,达不到降低生产成本的目标^[11]。

由于除尘灰粒度细,亲水性能不是很好,堆积效果不佳,遇到暴雨、地震等灾害时,易发生滑坡等次生灾害,同时除尘灰的堆积会占用大量土地,且其中部分元素还会对土壤产生污染,不利于植物的正常生长,除尘灰在风力的作用下会以粉尘的形式漂浮于空气中,对空气能见度以及人民的身体健康都会产生严重影响。

除尘灰这一放错地点的资源本身就该得到合理的利用,随着科学发展观的不断深入,清洁生产的理念深入人心,越来越多的企业开始在烧结和球团生产过程中少量的添加除尘灰,某种程度上为除尘灰的资源化再利用指明了方向,库存及新产生的除尘灰都能逐步转化成宝贵的资源,节约资源的同时又能保护环境。

1.2.3 除尘灰烧结技术的理论可行性

除尘灰因为其特有的性能,添加到烧结原料中具有可行性,主要原因如下:

(1) 含Fe较高, 烧损较大, 理论上可直接作烧结原料参与烧结^[12]。

(2) CaO含量14.78%, SiO₂含量6.69%, 在烧结过程中能够产生足够的液相, 增强矿粒间的粘结力, 还可以减少熔剂的添加量, 节省熔剂成本。

(3) 粒度细, 经高温会在氧化气氛中生成氧化铁, 氧化铁会与氧化钙反应生成铁酸钙, 降低固体燃耗的同时烧结矿还原性和抗压强度也得到了提高。配加除尘灰后, 混合原料的制粒效果得到改善, 烧结料层的透气性变好, 烧结矿各项指标较好。较低温度即可使细粒级除尘灰发生熔化, 对周围颗粒的润湿能力以及粘结能力都增强, 烧结矿强度以及设备的利用系数由此提升, 返矿和固体燃耗双双减少^[13]。

1.2.4 除尘灰的资源化再利用

除尘灰的资源化再利用越来越受到人们的关注, 各项技术也日臻成熟, 已用于制造活性炭、水泥原料、还原铁粉、磁性材料、铁氧体等, 还可以通过与返矿混合、制成团块等, 作为炼钢原料加以利用^[14]。

具体的利用方式主要有以下几个方面:

1) 除尘灰主要作为烧结原料回收利用是可行的, 但其负面影响也越来越受到人们的重视。针对不同除尘灰的特性, 采用烧结配料、料场混匀、造球成块等技术分别处理, 多措并举。能够降低除尘灰的处理难度, 实现资源再利用以达到节省成本的目的。

2) 除尘灰集中后参与烧结生产循环再利用, 通过分类处理、分区利用、减量消化等方式能够达到一定的效果^[15]。但技术水平相对缺乏, 对环境危害大, 有害元素和除尘灰通过烧结、转炉、高炉富集, 严重危害烧结生产的正常进行。

3) 综合国内外多种利用方法的优点和不足发现, 环境类除尘灰可以作为部分原料参与烧结生产, 烟气类除尘灰不能在烧结生产过程中循环利用^[16]。

4) 粒度均匀成球性好的除尘灰还可以先造球, 球体粒度均匀、透气性好, 参与烧结或单独焙烧都能回收其中含有价成分, 实现资源循环再利用。

除尘灰的资源化日益受到人们的重视, 美、德等西方国家等都有专门回收利用除尘灰的化工厂。他们主要利用除尘灰的不同特性采用不同的方式处理除尘灰, 回收其中的有用资源, 制成高纯度的 Fe₂O₃, 颜料、催化剂等。

1.3 烧结生产概述、发展情况及存在的问题

1.3.1 烧结生产概述

烧结是将粉状物料转变为致密体的过程。人类很早就将该工艺用于制造陶瓷、生产耐火材料和超高温材料、将粉矿变为符合生产需求的原料等^[17]。粉料经过烧结后会生成由晶体、玻璃体和气孔组成的密体多晶材料。晶粒尺寸、形状及分布受烧结过程的直接影响。含铁粉矿、熔剂、燃料等按比例配合后, 经过混匀、加水润湿制成烧结原料, 布料后点火烧结, 燃料燃烧产生高温以及C的存在会使烧结原料在总体氧化局部还原的氛围中发生一系列反应, 生成的CaO·Fe₂O₃软化熔融成液相会润湿粘结周围的颗粒物, 冷却成型后变成粒度及性质都发生根本性变化的烧结矿产品。其过程是混合料借点火和抽风, 使其中的碳

燃烧产生热量,并使混合料在总体氧化、局部还原的气氛中发生的很多理化反应的综合过程^[18],同时矿物间发生固、液相互转变,最终生成各项指标都符合要求的成品矿。

烧结在钢铁工业中地位十分显著,主要是烧结矿的质量直接影响高炉的生产情况,且烧结生产的能耗高,对高炉的焦比影响很大。烧结是一系列复杂的物理、化学反应的综合过程。燃料燃烧和热量交换,烧结原料的软化、熔融、结晶等一系列过程都在烧结过程中同时进行,且互相之间存在一定的影响。按料层温度变化和烧结过程所发生的物理、化学反应情况,将烧结料层分为烧结矿带、燃烧带、预热带、干燥带、过湿带。^[19]随烧结过程的不断深入,五带逐步下移和消失,最终生成成品烧结矿。

铁矿石在开采和预处理时都会产生一定的粉矿,粉矿的合理利用技术的不断成熟,粉矿烧结迅速成为了钢铁工业中的重要生产环节和规模巨大的造块作业。烧结生产的主要目的如下:

- (1) 改变粉料的形状、成分、性质等,为冶炼提供高质量的精料。
- (2) 促进矿石冶金性能的改善,使高炉的生产环境改善、生产成本降低。
- (3) 从资源节约和环境保护的角度回收有价值元素、去除杂质,降低生产成本^[20]。

烧结生产主要向高炉炼铁提供精料,烧结矿是人工制造的矿石,相比天然矿石有许多优点,含铁量高、粒度组成均匀、气孔率大、成分稳定、还原性好、含碱性熔剂时,造渣性能好。另外,烧结矿质量提高、燃耗降低、污染物排放量减少等都会对资源和环境产生很大的潜在和实际价值^[21]。

1.3.2 烧结技术的发展情况

烧结生产起源于英国和德国,约 1870 年这些国家开始使用烧结锅。用来处理矿山开采、冶金工厂、化工厂的废弃物。1892 年美国出现了烧结锅。1910 年美国投产使用了世界第一台面积 8.325m^3 的带式烧结机。当时用于处理高炉炉尘,每天生产烧结矿 140t,给烧结生产带来了革命性的变化,带式烧结机从此逐步占据了烧结生产的舞台。

甲午战争后,日本人在辽东取得了采矿权、筑路权,1908 年,进入辽东半岛的日本资本家、科考队,在鞍山地区发现了储藏量丰富的大量铁矿。于是,在 1926 年后在鞍山相继建成 4 台 $21.63\text{m}^2(1.067\text{m}\times 20.269\text{m})$ 带式烧结机,日产 1200t。1935~1937 年,又相继建成 4 台 50m^2 的烧结机,年产 19 万吨烧结矿。

1952 年,鞍钢从苏联引进 75m^2 烧结设备和技术。这套当时具有国际先进水平的设备,对新中国的烧结事业起到了示范作用。目前,国内已拥有: 13m^2 、 18m^2 、 24m^2 、 36m^2 、 50m^2 、 75m^2 、 90m^2 、 130m^2 、 182m^2 、 265m^2 、 450m^2 等规格的烧结机。

设备大型化是烧结设备的发展趋势, 600m^2 烧结机已在日本投产使用,具有技术经济,效益明显的优点。据日本消息,烧结面积从 18.8m^2 增加到 130m^2 、 500m^2 时,生产率由 17.2 提高到 43、162,烧结矿成本价也随之降低。据德国报报道,基建面积虽烧结机面积的增大而减小, 150m^2 、 200m^2 、 300m^2 烧结机基建费用分别占 100m^2 烧结机的 0.9、0.8、0.75^[22]。

1.3.3 烧结生产的意义及发展趋势

烧结作为钢铁生产中的一个重要环节,对企业生产的意义如下:

(1) 为高炉提供质量合格的优质精料, 是铁矿资源能得到合理的利用, 矿石预处理产生大量的粉矿, 无法入炉的粉料, 低品位料以及除尘灰等含铁废料经过造块后都能很好的利用^[23]。

(2) 粉料混匀过程能使烧结矿成分更均匀, 加入的CaO、MgO会参与烧结反应, 有利于烧结矿的还原与造渣, 同时还能除去S、F等有害杂质, 烧结矿的各项性能都比传统矿石更优越, 还能减少熔剂的消耗量, 能够为高炉提供高品质的精料, 实现了高炉的优质、高产和低耗, 有利于高炉产品的各项指标的稳定与提升^[24]。

(3) 回收利用除尘灰、轧钢皮、钢渣等冶金及化工废料, 降低成本的同时既回收资源又减少污染, 经济效益与社会效益明显提升^[25]。

科技的不断进步和创新促使烧结工艺不断发展和成熟, 烧结工艺呈现出新的特点。烧结生产的发展趋势如下^[26-27]:

1. 圆筒混合机、烧结机等设备都向大型化发展。
2. 冷却烧结矿, 优化整粒工艺, 使精料质量符合高炉生产的需求, 优化高炉产品。
3. 筛分在烧结矿处理中应受到重视, 烧结矿经热破碎和热筛分后冷却, 再经 1~2 次破碎和 2~4 次冷筛分, 整粒后粒度上限应控制在 40mm、50mm 以下, 成品矿-5mm 的粒度在 10%以下。
4. 高料层、大风量、高负压烧结, 烧结机的风量一般为 $90\sim 100\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{min})$, 料层高度 400~500mm, 负压 $(1.3\sim 1.6)\times 10^4\text{Pa}$, 有些厂料层厚度超过 500mm, 负压高达 $2\times 10^4\text{Pa}$ 。
5. 混合料点火作业有待加强, 点火器的面积日益扩大, 多为二段或三段。将点火器分为点火、加热、保温三段, 并将冷却前和烧结后的热风回收至保温段, 能改善液相结晶的条件、减少热应力, 从而提高烧结矿的强度和成品率, 降低成品矿中的 FeO 含量, 获得高品质的烧结矿^[28]。
6. 高碱度烧结会产生较多还原性好、粘结力强的铁酸钙, 铁酸钙的存在会使烧结矿结晶效果和强度更好, 所以高碱度烧结在烧结领域得到广泛运用。

1.3.4 烧结生产存在的问题

烧结生产在钢铁企业充分利用粉矿资源, 减少资源浪费上发挥了不可替代的作用。但烧结生产也不是有百利而无一害, 作为钢铁生产的耗能大户, 工序能耗约占吨钢综合能耗的 10%, 烧结生产还存在生产环境恶劣, 破碎、落下、筛分等都会产生大量粉尘、除尘灰等污染物等问题, 给环境造成很大的压力, 同时设备大多在高温下运行, 设备损耗较大。

对多家钢企烧结能耗情况进行统计分析, 得出烧结工序能耗的分布情况如图 1.3 所示^[29]。由图 1.3 可以看出烧结工序能耗主要由固体燃耗、电能耗和煤气能耗三部分构成, 其中固体燃耗占比最大, 占 79.80%; 其次为电能耗, 占 13.49%; 点火能耗占 6.49%, 其他能耗占比极小, 为 0.22%。所以从降低烧结生产成本的目标出发, 烧结工序节能降耗可以着重从降低固体燃耗、电耗及点火能耗等方面出发, 还可以将烧结生产中的余热进行回收利用。

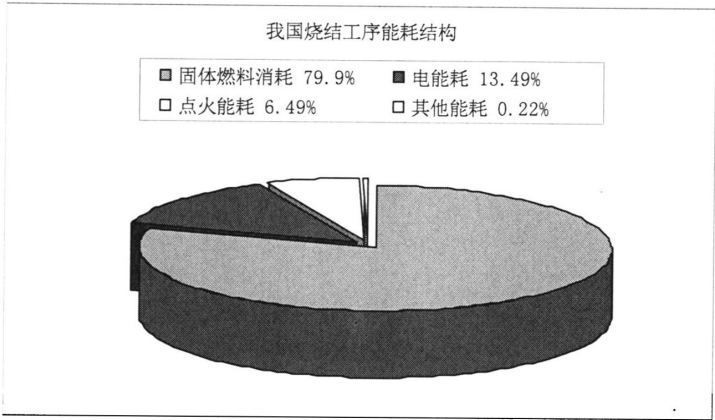


图 1.3 我国烧结工序能耗结构

目前我国烧结工序能耗较高，而且各企业的差别很大，近年来烧结能耗虽有所下降，但依然远高于世界先进国家，烧结生产节能降耗潜力很大。我国烧结生产能耗高的原因有：

- (1) 烧结机机型小，生产工艺不完善，装备水平低，一些新技术和节能措施难以采用。
- (2) 生产能力与高炉生产能力不匹配，烧结生产压力大，过度注重增产，而相对忽略了能耗问题。
- (3) 烧结生产的技术水平总体上仍处于较低层次，和国际先进水平相比差距较大。

因此，烧结生产的节能降耗，应包含工序中有能耗的每个环节，可以主要采取以下措施：采用厚料层烧结以降低固体燃料配比；采用新型节能点火器以节约点火煤气；加强管理维护以降低设备漏风率，减少抽风电耗；积极推广余热回收利用技术，尽可能回收二次能源等。

1.4 烧结生产节能降耗的主要方法及研究现状

1.4.1 节能降耗的主要方法

烧结矿的产量和质量的不断提升才能使高炉生产的在高效、低耗的情况下稳定进行，产量足够、粒度均匀、还原性好、成份稳定等指标都必须符合高炉的要求。燃料特性、工艺参数、设备状况及操作条件等都会对烧结生产产生较大的影响，通过精心备料，强化混合制粒，优化工艺参数，改进操作条件，采用新技术、新工艺等来实现烧结生产的节能降耗都是企业不断探索和追求的课题。烧结生产节能降耗的途径主要措施包括原料结构的改变、工艺创新、余热回收利用等。在保证烧结矿质量的情况下尽可能的降低能耗，具体包括以下几个方面^[30]。

(1) 原料组分改变

烧结原料主要由铁矿粉、熔剂、燃料等组成，在熔剂中增加生石灰以减少石灰石配量，减少碳酸盐分解的热量消耗。一些含铁废弃物，如除尘灰、钢渣、氧化铁皮、瓦斯灰等含铁量较高，与烧结原料性质相似，同时又含有烧结生产所需的碳、熔剂等，适当掺入烧结原料不仅能回收废弃物中的 Fe，还能降低生产成本，对节约资源和保护环境意义重大。

优化原料组分,还能改善料层透气性,在抽风功率和电耗稳定的前提下,通过风量的增加来实现烧结速度的提升,从而提高烧结矿质量,使设备生产率升高。

(2) 燃料优化^[31]

燃料优化可以有效降低燃耗,产出高质量的烧结矿。燃料方面的研究目前主要集中在燃料的分次添加和燃料粒度变化上,在保证烧结矿质量的同时尽量降低燃料用量,从而降低生产成本。

燃料分次添加主要基于厚料层烧结中上层热量不足、下层热量过剩的不合理现象提出来的。分别向烧结机供给配碳量不同的两种混合料,将含碳量低的料布于下层,含碳量高的布于上层,可以使料层在烧结过程中上、下部的温度分布更均匀,以解决下部烧结矿过熔和 FeO 含量高的问题。同时,布料分两次完成,可以防止布料时下层料层被压实,有利于改善料层的透气性,提高烧结矿的质量。

不同原料对燃料配比和粒度分布的需求是不同的,粒度均匀可以使烧结矿质量高、燃耗低。粗颗粒燃料周围会形成大孔薄壁结构,烧结矿强度低,还原性差。细颗粒燃料燃烧速度过快,达不到烧结生产所需的高温保持时间,烧结矿强度差,同时,燃料粒度小(-0.5mm)使料层透气性变坏,且细粒燃料易被气流抽走。所以燃料粒度适宜能够降低生产成本、节能降耗。

(3) 烧结生产方法优化^[32]

烧结生产方法的优化主要包括富氧烧结、低温厚料层烧结等。

富氧烧结主要通过提高点火助燃空气和抽入料层空气的含氧量,使料层中的燃料充分燃烧,提高燃料利用率,延长保温时间,使生成的液相量增加。富氧烧结能有效提高烧结矿的成品率及转鼓指数,还能提高了设备的生产效率。

低温厚料层烧结是现今普遍采用的烧结工艺,料层厚度增加,自动蓄热能力增强。另外,低碳厚料层烧结增强了烧结的氧化性气氛,使料层温度分布更均匀,低价氧化物氧化放热增加,高价氧化物分解吸热减少,从而减少燃料用量。

(4) 降低电耗

风机是烧结厂最大的耗电设备,其电耗约占烧结生产总电耗的 80%,漏风率是影响风机电耗的重要因素。实践证明,漏风率每增加 1%,电耗就增加 $0.12\text{kW}\cdot\text{h/t}\sim 0.15\text{kW}\cdot\text{h/t}$ ^[33]。漏风率过大,则总排气量增大,增加了风机负担,使电耗增加。国内外一些烧结厂实践证明:漏风率每减少 10%,可增产 5%~6%,吨烧结矿可减少电耗 2KW/h,减少焦粉使用量 1kg,减少煤气能耗 1680KJ,烧结矿成品率可提高 1.5%~2.0%,同时还能减少设备的噪音,改善环境,因此降低漏风率是降低电耗的有效措施。日本某厂烧结机漏风率降低 12.5%,电耗降低了 $1.96\text{kW}\cdot\text{h/t}$,相当于每降低 10%的漏风率,电耗降低 $1.56\text{kW}\cdot\text{h/t}$ 。

另外还可以采用变频装置控制主抽风机来实现节能降耗。国内已建成的大型烧结机主抽风机采用变频器启动,节能效果非常明显。济钢的 400m^2 烧结机主抽风机采用变频器控制,保守估算节电近 $10\text{kW}\cdot\text{h/t}$ ^[34]。

(5) 降低点火能耗

采用先进的点火保温炉提高点火强度且降低煤气消耗,点火应有足够高的点火温度和一定的点火时间,适宜的点火负压,点火烟气中氧含量充足,点火要均匀。因此,研制和改进烧结点火器,是节能降耗的一个重要方向。

双斜带式烧结点火保温炉采用双斜交烧嘴直接点火,高温火焰带宽度适宜,温度均匀,燃烧完全,点火效率高,料面点火质量好,能耗低。点火能耗占烧结工序总能耗的 6.49%,降低点火能耗的主要途径有:严格控制点火温度与时间、采用点火节能炉、控制点火负压、预热助燃空气等措施。点火温度不够,供给烧结表层烧结料的热量无法满足烧结生产正常进行的需求,成品矿产量低,能耗必然增加;过高温点火,料层表面经高温熔化使料层透气性变差,不利于空气的上下流通与热量的有效传递,烧结生产能耗由此升高。所以 1000℃~1100℃时点火是比较合适的条件,点火时间受温度和原料性质的影响,低温点火应增加点火时长,高温点火应减少点火时间。

点火器长度的缩短以及炉膛高度的降低不仅能减少点火过程中的热损失,还能集中燃烧产生的热量快速、高效地点燃烧结原料中的燃料,使燃料充分燃烧,从而降低烧结生产的能耗。改进点火设备后煤气消耗量下降了 50%以上,节省约 2~3Kg 标煤/吨矿^[35]。

点火负压接近大气压,能够减少侵入的空气量,提高点火器内的废气温度和周围环境温度,能够节约点火燃耗,利用热废气作助燃空气也能降低点火煤气的消耗。研究表明,将助燃空气预热到 300℃,理论上可以节约点火煤气 24%^[36]。

(6) 余热回收利用

烧结生产中约有 50%的能量被烧结烟气和冷却机废气带走,因此余热回收利用价值巨大。余热回收方式主要有:用作点火、保温炉的助燃空气以节约煤气;预热混合料以降低燃耗;用于余热锅炉产生蒸汽以部分代替燃料锅炉蒸汽,用于余热发电等^[37]。

预热混合料就是利用冷却机或烧结机的热废气来提高料温降低固体燃耗。将热废气直接对点火炉前的烧结机上层混合料进行预热、干燥,由于焦粉预热后才进行燃烧反应,预热混合料会使燃烧效率提高,从而降低焦粉消耗和点火煤气的使用量^[38]。另外将高温热返矿直接加入原料中进行预热效果较好。两种方法目的一样、方式不同,最终都达到了预热原料从而节省能耗的目的。

1.4.2 除尘灰的使用及节能降耗的研究现状

为回收除尘灰中的铬、镍、铁等氧化物,太钢不锈钢股份有限公司在除尘灰中配加还原剂和结合剂压制成球,压球在回转窑中经高温烧结后作为电炉原料。他们发现除尘灰配加还原剂、粘结剂压球后经高温烧结,可明显提高压球强度,同时还能以较低的成本回收利用除尘灰中的铬、镍、铁等元素,对降低生产成本、提高资源利用率、减少环境污染效果明显^[39]。

钢铁生产过程中产生的大量含铁、碳废料,如氧化铁皮、除尘灰、瓦斯灰等,不回收不仅污染环境,还会造成资源浪费^[40]。氧化铁皮含铁量高达 72%,FeO 含量也有 60%左右,FeO 氧化会放热,使用 1kg 氧化铁皮,大约可节省 0.1kg 无烟煤。废料不仅含铁,还含有一定的碳,瓦斯灰含碳量在 50%以上,可节省部分燃料。这些废料混匀后参与配料,

其混合后铁品位在 50%左右, 含碳量为 12%~13%, 还含有一定的熔剂。2007 年通过回收利用含碳废料, 烧结车间消耗二次废料 16.79 万 t, 若按含碳量 12%计算, 仅此一项即可节省约 2 万 t 燃料, 济效效益约 800 万元。

莱钢对烧结除尘灰和高炉瓦斯灰采用不同的选矿工艺, 用二级磁选—浮选—重选工艺来处理高炉瓦斯灰, 在去锌、提铁、提碳上取得了较好的效果, 含 Fe 量达 55%以上, 可作为烧结原料, C 含量达 75%以上可作高炉喷煤再利用, 尾泥富集 Zn 等有害杂质可作建筑材料再利用。用浮选—重选工艺处理烧结除尘灰, 精矿含 Fe 达 60%以上, 能通过造块技术循环再利用, 尾矿可用于建筑材料。无论是去杂后的铁精粉还是用于高炉喷煤的碳精粉, 都能得到高效利用。有害物质被根除, 消除了除尘灰中 K_2O 、 Na_2O 、Zn、Pb 等有害物质对生产设备的恶性影响, 保证了生产的顺利进行^[41]。

安钢对除尘灰的添加方式进行改革, 由集中放灰变为连续放灰, 做到放灰“细水长流”。连续均衡的放灰使灰量较少且相对稳定, 减小了烧结矿质量的波动幅度, 便于烧结生产的配碳、水份、混匀料上料量、烧结机机速等多种技术参数的控制, 从而使烧结矿的质量明显改善。除尘灰影响配料、混料、造粒、烧结、循环返矿等过程, 对烧结矿的质量指标影响较大, 尤其对烧结矿的粒度组成、-5mm 的含粉率、循环返矿影响极大, 会使烧结矿质量差。调整放灰制度后, 烧结生产整体稳定, 烧结矿质量大大提高, 特别是 5~10mm 合格率有大幅度的提高, 一级品率、转鼓指数等也明显改善。均衡放灰制度使少量的除尘灰均匀分布于混合料中, 且水分基本均匀, 减轻了过湿带对炉篦条造成的结垢和堵塞, 明显改善了料层的透气性^[42]。

莱钢的刘德军、郝博、马光宇等将除尘灰与粉煤一同喷入高炉, 完全克服了含铁粉尘“返回烧结、球团工艺”利用方式的缺陷, 消除了粉尘湿度无法控制的问题, 混合不均及喷吹系统磨损的问题一定程度上也得到了改善。他们发现除尘灰与粉煤一同喷入高炉的利用法优于重返烧结、球团工艺参与配料造块方法, 能够降低生产的成本^[43]。

烧结自产除尘灰与外来除尘灰充分混匀、润湿后进入烧结系统, 利用其造球性能好来达到稳定生产, 增产降耗的目的。这一方法符合烧结生产的稳定规律, 使配水、配碳操作稳定性提高, 烧结矿 FeO 合格率达 100%, 混合料偏析降低, 燃烧层液相量增加, 烧结矿强度提高, 烧结设备利用系数提高。利用系数从 $1.99t/(m^2 \cdot h)$ 提高到 $2.05t/(m^2 \cdot h)$, 按烧结厂烧结面积 $100m^2$, 作业率 96%, 吨矿利润为 12 元计算, 年增产 5.05 万 t, 直接经济效益 60.55 万元, 既回收利用了除尘灰, 又提高了烧结矿的质量^[44]。

将除尘灰造小球掺合烧结, 不仅可以稳定水碳、改善料层透气性、增加烧结矿的产量, 还能降低能耗, 提高烧结矿的质量。彭志坚、张斌等通过研究发现: 掺合 6%~8%的小球时烧结生产各项指标较好, 掺合量大时, 要提高料层厚度才能保证烧结矿的质量。要改善除尘灰的成球性能, 可以将多种除尘灰优势互补, 配成混合型除尘灰^[45]。

将多种除尘灰配合造小球参与烧结结果表明: 掺入 3~8mm 的除尘灰小球 4%~10%, 能较好地改善料层透气性, 增加产量降低能耗, 可实现节能减排效果。小球掺入烧结, 能起到成球核心及二次资源再利用的双重作用, 同时其配矿成分较稳定, 对烧结矿的铁分和

碱度波动影响不大, 烧结料层厚度为 600mm~700mm 时, 适宜的小球掺入量为 6%~8%, 其配量可与收尘量维持平衡^[46]。

厚料层烧结是现今普遍采用的一种烧结方式, 料层厚度增加, 自动蓄热能力增强^[47]。当料厚由 180mm~220mm 增加到 400mm 时, 蓄热量在热量总收入中的比例由 35%~45% 提高到了 55%~60%。储热能力增强, 热量的损失减少, 从而减少燃料的用量^[48]。

为降低固体燃料耗, 鞍钢 360m² 烧结机采用燃料分加技术, 在确定了合理的燃料内外分加比例, 严格控制了燃料粒度后, 生产燃料有很大程度的降低。占工序能耗 25% 左右的电耗也是降低生产成本值得研究的方向, 烧结设备中完整的整粒和除尘系统消耗大量的电能, 风机是消耗能量的最主要设备^[49]。风机的反复开关机不仅消耗巨大的电能还会缩短设备的使用寿命, 烧结机停机较短时间时不能关闭抽风机, 当设备故障频繁时, 电能消耗巨大^[50]。为此, 烧结厂通过加强设备点检, 合理分配运行和检修时间, 在降低电耗的同时确保设备的正常运转, 作业率得到了明显的提升, 改变生产方式后作业率和电耗分别为 94.14% 和 38.24kW·h/t, 比原有水平有较大的改进和提升。另外, 漏风率是电耗居高不下的重要因素^[51]。通过定期检测漏风率以进行堵漏工作, 将风量的损失变为产量的提升, 实现节电增产的目标。

鞍钢采用特殊设计的旋流式烧嘴点火器, 使周围空气含氧量高, 燃烧更集中更充分, 产生的能量能够尽可能多的被利用于生产中, 降低了煤气的消耗量。通过风量的增加来促使低温点火得以实现的低温点火方式, 点火温度下降了约 300℃, 较好的解决了烧结矿表面过熔、透气性差、下层烧不透等一系列问题, 烧结矿质量得到很大提升的同时, 煤气消耗量减少了 30% 左右^[52]。同时, 热废气的回收利用也能实现一定程度的节能降耗, 热废气可以参与热风助燃, 也可用于安装余热锅炉产生蒸汽, 并单独设管道通入二次制粒, 用于混合料的保温, 提高热利用率, 充分实现了余热的回收利用^[53]。

配碳和 SiO₂/CaO 比的提高能够使制粒效果变好, 透气性由此增强致使还原反应速度加快, 烧结矿质量提高, 生产成本降低^[54]。本溪钢铁使用了燃料分加技术、强化烧结原料的制粒效果、厚料层低温烧结、配加除尘灰等含铁废料、热风烧结等技术。能耗和生产成本不断下降, 相反烧结矿质量不断提升, 操作环境也有很大程度的改善。济钢通过研究轻烧白云石部分替代生石灰的烧结试验过程, 发现配加 40% 轻烧白云石所得烧结矿的多项性能指标明显提高^[55]。

高铁低硅条件下进行烧结入炉烧结矿 Fe 品位明显提升, 但烧结矿强度、粒度、冶金性能却出现了明显的下降^[56]。湘钢在烧结生产中添加蛇纹石后烧结矿中 SiO₂ 含量基本不变, 高铁低硅烧结过程中液相少、强度差的问题得到了很好的解决, 返矿量、固体燃料耗量实现了双下降, 烧结矿还原与软熔性能也得到了提升。高炉渣 Al₂O₃ 含量高, 烧结矿强度受烧结原料中 MgO 的含量的影响, 刘竹林、陈子林^[57]等用将白云石经过适度的煅烧后用于调节烧结矿的碱度, 结果表明烧结矿转鼓指数和产量变化不大, 固体燃料耗和焦比下降幅度较大, 高炉炉渣流动性有很大的改善, 设备利用系数明显升高。质量分数 3% 的 CaCl₂ 溶液喷洒到高炉内后烧结矿低温还原粉化率明显降低, 烧结矿冷态强度在 w(SiO₂) 低于

5.25%的情况下降低的问题得到了解决,真正实现了低硅、高品位烧结;蛇纹石作为提供硅源的载体参与烧结可使烧结矿强度符合高炉的要求,能够降低生产的能耗,起到“提铁降硅”的作用。高炉炉料 Al_2O_3 较高炉渣粘度高,需通过提高烧结矿中的 MgO 含量使高炉中的反应得以顺利进行,同时轻烧白云石能够降低部分燃料和熔剂的需求量,使烧结矿品位与冶金性能得到改善。 Cl 能够通过化学吸附于烧结矿表面,增强烧结原矿的还原性以及玻璃相的断裂韧性,是玻璃相的裂纹扩展和延伸缓慢,低温粉化率由此降低, CaCl_2 熔点较低,超过 600°C 就开始挥发, 900°C 全部挥发而脱离烧结矿,不会影响烧结矿的还原速度^[58]。

安钢 360m^2 烧结机投入运行后,烧结矿转鼓指数水平较低、波动较大,远不能满足 2200m^3 高炉冶炼对烧结矿强度的要求,邢建民、高丙寅^[59]等进行了提高烧结矿强度的工艺研究,使烧结矿强度大幅度增加,转鼓指数达 80% 以上,满足了高炉冶炼的要求。他们发现:合理的原料结构是获得高强度烧结矿的基础,稳定混合料水、碳,适当增加固体燃料配量以及适宜的烧结工艺参数均有利于烧结矿强度的稳定和提高。低硅条件下烧结可适当放宽固体燃料粒度限制,降低燃料燃烧的速度,延长高温保持时间,有利于改善烧结矿强度。提高碱度,有利于烧结生产过程液相量的生成,强度会有所提高,但碱度的提高受炼铁高炉原料结构的限制。安钢现有条件碱度应控制在 2.0 以上,最低不宜小于 1.9。

鞍山矿业公司的陈平、王常秋^[60]发现用浮选法选别后的赤铁精矿具有细、粘等特点,烧结过程中表现为混匀难、造球难、烧结难、能耗高。烧结厂采用浮选赤铁细精矿烧结节能降耗效果显著,能耗降低了 39.5%。对于粒度较细的无烟煤等燃料,加工会使其过粉碎更加严重,从提高燃料质量出发,能够探索出进一步节能降耗的方法。

马钢一铁的张永中、曹建民^[61]通过改变烧结生产中的部分工艺,使返矿在烧结过程内部不断循环,从烧结过程动力学方向研究出发,借鉴和吸收各类烧结生产的技术优势,进行了生产的改进和技术的提升,让烧结生产体系在一种平衡理念的指导下稳步进行,能耗明显降低,生产环境明显改善,副产品除尘灰等产量明显减少,各项指标都日益接近国内先进水平,经济效益和环境效益十分明显,为构建资源节约和环境友好型社会指明了方向。

湘潭钢铁公司的宋国良、付志华、张全^[62]根据烧结机能耗现状和热平衡测试结果分析了该烧结机能耗高的原因,从降低固体燃料、电耗、点火热耗、余热回收和提高烧结过程自动化水平等方面提出增产节能措施,为节能降耗的实施提供了思路与对策。他们主要采用小球烧结和燃料分加技术、厚料层低温烧结、降低设备漏风率和提高设备作业率、应用高效节能点火器、余热回收以及提高自动化水平和改善操作条件等措施,烧结机工序的能耗(碳当量)由原来的 85.3kg/t 下降至 77kg/t ,平均每年下降 1.66kg/t ,按烧结机年产 82.89 万吨烧结矿,每吨标准煤 800 元计算,一年内烧结工序可节约 110.08 万元,经济效益相当可观。

FeO 含量是反映烧结矿性能的一个重要指标,控制好 FeO 含量,有利于降低固体燃料,增加生铁产量,降低焦比。湖南冶金职业技术学院的刘竹林^[63]分析了影响 FeO 在烧

结矿中的比重的因素及影响情况。研究显示：精粉率与烧结合铁原料氧化度成反比，高精粉率会使 FeO 在烧结合矿中的比重增加。料层厚度的增加、透气性的改善以及碱度的提高都有利于 $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 的生成，从而会降低 FeO 在烧结合矿比重；燃料的增加会使烧结合生产的还原气氛明显增强，成品矿 FeO 含量会大幅上升。从成品矿矿相看， FeO 含量与 $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 的生成量成反比，与硅酸二钙生成量成正比，当 FeO 含量在 7%~8% 以下时 $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量变化不多，因此烧结合矿 FeO 含量 7%~8% 较合适。

河北理工大学的郝素菊，蒋武锋等^[64]用扫描电镜分析了不同活性度石灰的形貌，并对配加不同活性度石灰的烧结合矿进行了矿相分析来研究石灰活性对烧结合矿中铁酸钙的结晶形态及数量的影响情况。结果表明：石灰活性影响烧结合矿中铁酸钙的结晶形态及铁酸钙数量，活性度高的石灰有利于细针状和针状铁酸钙的形成。当石灰活性度为 350ml 时，烧结合矿中铁酸钙以细针状形态存在，当石灰活性度为 280ml 时，烧结合矿中铁酸钙以针状形态存在，当石灰活性度为 210ml 时，烧结合矿中铁酸钙以板柱状形态存在，随着石灰活性度提高，烧结合矿中铁酸钙含量逐渐降低。

鞍钢球团矿产能增大，球团矿的入炉比例增加，需要提高烧结合矿的碱度以满足高炉生产的要求。为了考察提高碱度对烧结合矿产量、质量的影响，于素荣、周节旺^[65]等研究了烧结合生产的碱度从 2.0 逐步增加到 2.8 时烧结合矿的变化情况。结果表明：随着碱度的提高，设备利用系数呈逐渐提高趋势，转鼓强度有明显提高，铁酸钙含量亦逐渐增加，冶金性能亦得到改善，为高炉冶炼提供了较好的精料。

新疆八一钢铁使用全生石灰消化烧结合，合理使用各种冶金废杂料，运用节能降耗新工艺、新技术、降低漏风率，提高设备作业率、控制烧结合温度，干预烧结合过程，提高固体燃料的破碎质量以及使用单一的混匀料等措施，使能耗逐年下降，工序能耗由 72kg/t 降到了 45kg/t，居国内先进水平^[66]。采用制粒与布料新工艺，利用外界显热及料层自动蓄热作用降低能耗。这些工艺主要包括：

- (1) 利用环冷机的高温废气来预热与维持烧结合料的温度。
- (2) 利用加热炉预热混合料。
- (3) 采用厚料层烧结合的方式，使烧结合生产能耗不断降低。

同时，企业通过改进松料器的形式以及混合机的给水方式等措施使混合料的粒度分布有了很大的改善，烧结合生产的成本下降的同时烧结合矿的质量也有一定程度的提高。

1.5 论文的提出及意义

随着科学发展观的不断发展与深入，清洁生产和节能降耗越来越受到人们的重视，一批又一批高能耗、重污染的项目被政府部门责令整改或叫停。钢铁行业作为高能耗的低端产业也引起了政府和公众的注意，但是人类社会在很长的一段时间内都不可能脱离钢铁行业而独自向前发展，所以说降低钢铁行业的能耗和污染，寻求可能的钢铁替代品无疑是后人研究与探索的目标。

21 世纪以来，随着经济快速发展，我国对于铁矿石的需求与日俱增，国内产量远远无法满足需求，铁矿进口量不断增加使我国成为了世界铁矿石市场最大的买主，名副其实

的“全球吸铁石”大国。面对我国铁矿石贫、细、杂而不能直接入炉的困境，烧结法和球团法被引入钢铁行业，一定程度上解决了我国部分铁矿石难以利用又危害环境的难题。目前钢铁企业朝着大型化、集约化的方向不断发展，烧结生产作为源源不断的向高炉提供原料铁前作业，其涉及的步骤和流程过于繁琐，任何一项细微的技术创新和工艺改进都能在烧结生产过程中实现节能降耗，给企业带来的经济效益是不可小嘘的。因此，烧结生产节能降耗一直都是各大企业研究和探索的重要课题。

这些年来关于如何改进烧结生产的原料配比和工艺以实现烧结生产的节能降耗的探索从来都没有停止过。首钢水城钢铁（集团）有限责任公司（以下简称水钢）265m²投产 after 能耗居高不下，同时大量除尘灰的处理也成为企业发展的棘手问题。为了充分利用水钢库存和新产生的除尘灰、改善烧结矿的质量，实现烧结生产节能降耗，同时也为实际生产提供一定的理论支持。在现有实验室条件下对水钢提供的烧结原料进行试验研究，目的是在保证烧结矿质量的前提下，充分利用除尘灰。同时，还要找到各种原料组分的最佳配比，尽可能的多利用除尘灰这种难处理的“资源”，在保证烧结生产正常进行的前提下，降低生产的成本，同时也减对环境的危害，真正起到为企业节省成本、创造收入的作用。

第二章 试样性质研究

研究所用所有原料均为水钢提供，除尘灰为烧结厂电除尘灰，所有原料的化学成分和组成如下。

2.1 基本物化性能

2.1.1 原料的化学组成

主要原料及其化学成分如表 2.1 所示。所用燃料为煤粉和焦粉，其成分分析结果如表 2.2 所示。部分原料的粒度组成和堆积密度如表 2.3 所示。除尘灰的粒度组成如表 2.4 所示。

表 2.1 原料的化学成分 (%)

原料	TFe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	烧损	H ₂ O
混匀料	59.15	5.10	6.08	2.99	3.16	0.85	3.65	8.10
高炉返矿	52.77	8.42	6.39	2.44	12.19	2.42	3.62	0
内返矿	53.42	7.65	6.25	2.74	13.10	2.56	0.45	0
除尘灰	46.68	3.83	6.69	2.21	14.78	3.00	5.75	0.07
白云石	-	-	0.88	0.40	29.01	21.29	45.95	2.30
生石灰	-	-	3.05	0.67	78.88	1.73	9.36	0
石灰石	-	-	2.03	0.34	49.92	0.75	42.17	3.13

表 2.2 燃料的成分分析结果

燃料	(%)							发热量/ kJ·kg ⁻¹
	灰分	挥发分	固定碳	硫	空气干基 水分	烧损	水分	
煤粉	23.09	9.14	67.12	2.0	0.65	76.91	8.33	26191.2
焦粉	23.12	2.48	74.17	0.58	0.81	76.88	10.17	25019.4

表 2.3 原料的粒度组成和堆积密度

原料	粒度/mm				堆积密度/g·cm ⁻³
	<3	3~5	5~8	>8	
混匀料	54.56	14.73	18.90	9.89	1.92
高炉返矿	60.18	20.08	17.26	2.48	2.09
内返矿	70.33	21.22	7.07	1.38	1.90
煤粉	78.92	16.40	4.08	0.60	0.71
焦粉	80.61	15.23	3.45	0.71	0.74

表 2.4 除尘灰的粒度组成/%

粒级/mm	<0.074	0.074~0.090	0.090~0.106	0.106~0.125	0.125~0.150	>0.150
比例	58.56	7.08	0.21	5.66	5.55	22.94

2.1.2 研究内容

(1) 研究了添加除尘灰对烧结生产过程的影响情况, 包括对烧结混合料的制粒效果、料层的收缩率、烧结矿质量、烧结速度、燃料的消耗量以及设备的利用系数等的影响, 以此来确定除尘灰是否能够添加到烧结生产中循环再利用。

(2) 在确定了除尘灰的添加量的基础上主要研究了烧结生产中燃料的添加量和粒度、不同灰分的燃料、混合料温度等分别对烧结矿质量(主要以烧结矿转鼓指数、落下强度、成品率和 FeO 含量等指标来衡量)的影响情况, 对试验结果进行进一步的分析, 确定添加除尘灰后使烧结矿综合指标较好的其他反应条件的最佳组合, 然后通过正交试验研究了不同条件对烧结矿指标的影响情况, 对比单因素试验找到的最佳条件探索各个影响条件之间是否存在交互影响的可能。

(3) 评估经过一系列试验得出的生产配比和方案能否循环再利用除尘灰这种“资源”, 以及除尘灰添加后能否降低烧结生产的成本, 是否存在一定的经济效益和环境效益, 能否为水钢在实现生产中再利用除尘灰、节能降耗提供参考。

2.2 试验的理论基础与方法

2.2.1 试验理论基础

实验主要是研究高碱度烧结, 通过配加过量的碱性熔剂(以 CaO 、 CaCO_3 为主), 使其在高温条件下与铁矿粉形成具有较低熔点的液相化合物, 液相化合物在大颗粒周围逐渐熔化, 形成低共熔点的混合物将大颗粒粘结和包裹, 冷却结晶从而生成烧结矿。

高碱度烧结矿中所产生的低共熔点混合物主要是由 CaO 与 Fe_2O_3 在 $1100^\circ\text{C}\sim 1300^\circ\text{C}$ 温度情况下进行固相反应形成 $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, 铁酸钙具有强度高、还原性好等特性, 熔化后的液相会在烧结生产中起主要粘结作用, 以高铁低硅矿粉的高碱度烧结尤其需要依靠铁酸钙作烧结粘结相。研究表明: 虽然 CaO 在较低温度下即可以较高的速度与 Fe_2O_3 发生固相反应生成铁酸钙, 但一旦烧结料中出现熔融液相, 烧结矿的最终成分即取决于熔融体的结晶规律。由于熔融物中 CaO 与 SiO_2 和 FeO 的结合能力比 Fe_2O_3 的结合能力强的多, 这样, 最初以 $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 形式进入熔体中的 Fe_2O_3 会析出, 甚至被还原成 FeO , 从而导致液相量不够, 烧结矿的强度不够, 无法达到降低生产成本目的。只有 CaO 含量足够大, 与 SiO_2 、 FeO 等完全结合后多余的 CaO 才会生成铁酸钙晶体, 此时高碱度烧结矿中铁酸钙液相才能起主要作用。因此, 在保证液相量足够、铁酸钙生成量适宜的情况下, 如何尽量多的利用除尘灰, 产出高品质的烧结矿的同时降低生产成本是本次研究的目标。

2.2.2 试验方法及具体步骤

本试验主要从以下方面着手进行研究。

(1) 首先对烧结原料进行初步探索, 主要是通过检测研究各烧结原料的化学成分, 由此了解它们的性质, 从而为下一步的研究提供理论支持。

(2) 弄清楚矿样的特点后首先研究除尘灰的添加量对烧结生产的影响情况, 在保证烧结矿质量的前提下尽可能多的利用除尘灰, 回收铁资源的同时也能为企业处理掉库存和

新产生的除尘灰。除尘灰是烧结生产的副产物,作为原料返回烧结生产源头再利用,已成为企业资源化再利用除尘灰的重要议题。目前针对不同除尘灰的原料特性,研究除尘灰配比对烧结生产的影响至关重要,如何以较合适的除尘灰配比产出合格烧结矿是很值得研究和探讨的课题。

(3) 研究除尘灰的添加对烧结生产过程以及烧结矿质量的影响情况,找出除尘灰的适宜添加量,以后的试验都在此添加量基础上继续进行。

(4) 从燃料添加量和粒度方面进行研究探讨,进行一系列试验找出燃料的最佳添加量以及与原料匹配的最佳燃料粒度,研究燃料用量和粒度对烧结矿产量及质量的影响情况。旨在降低燃料配加量的同时还能生产出高质量的烧结矿,从而实现燃料被充分有效的利用,降低烧结矿的生产成本。

(5) 研究不同灰分的燃料对烧结生产(包括制粒效果、烧结速度、收缩率以及燃料用量、设备利用率等)及成品烧结矿质量的影响情况,探究煤质稍差的燃料是否能被烧结烧结生产利用,在保证强度和成品率情况下可最大限度的节省燃料,为企业生产节约能耗、降低成本。

(6) 通过正交试验与单因素试验的最佳配比进行对比,看各影响条件在烧结过程中是否存在相互影响性,最后评估了烧结生产能否利用现有的除尘灰,以及除尘灰使用后能否产生一定的经济效益和环境效益,以求为水钢的实际生产提供一定的理论和技术支持。

基于上述对此次烧结过程的研究方法的探讨,采取单因素试验与正交试验法,对影响烧结矿质量的可变因素进行了一系列的研究与探讨,具体试验步骤如下:

将除尘灰、混匀料、返矿等烧结原料、燃料、水等按一定比例混合,经过人工和混合机充分混匀后,检测混合料的水分和粒度。然后将混合料装入烧结杯中,在 1050℃下点火 2min,控制点火负压和烧结负压分别为 6.6kPa 和 9kPa,记录烧结过程中废气温度的变化、烧结完成时所用的时间以及料层的收缩率。

试验过程中在高碱度条件下进行,烧结混合原料的碱度为 2.03,除尘灰自身的碱度为 1.998,除尘灰的加入对烧结原料碱度的整体变化影响不大。完成烧结后的烧结矿依次经过单辊破碎、4 次落下和多层筛分,整粒后选取一定量的适宜粒级的烧结成品矿进行转鼓强度试验。采用混合料的粒度分布来表示除尘灰对烧结原料的制粒效果的影响情况,记录烧结过程耗用的时间、燃料的消耗量,计算垂直烧结速度和设备的利用率等,以此来对比探究除尘灰对烧结生产过程的影响,主要采用烧结成品矿的 ISO 转鼓指数、成品率、落下强度和 FeO 含量等指标来表征烧结矿质量的优劣。试验的整个的流程如下图所示:

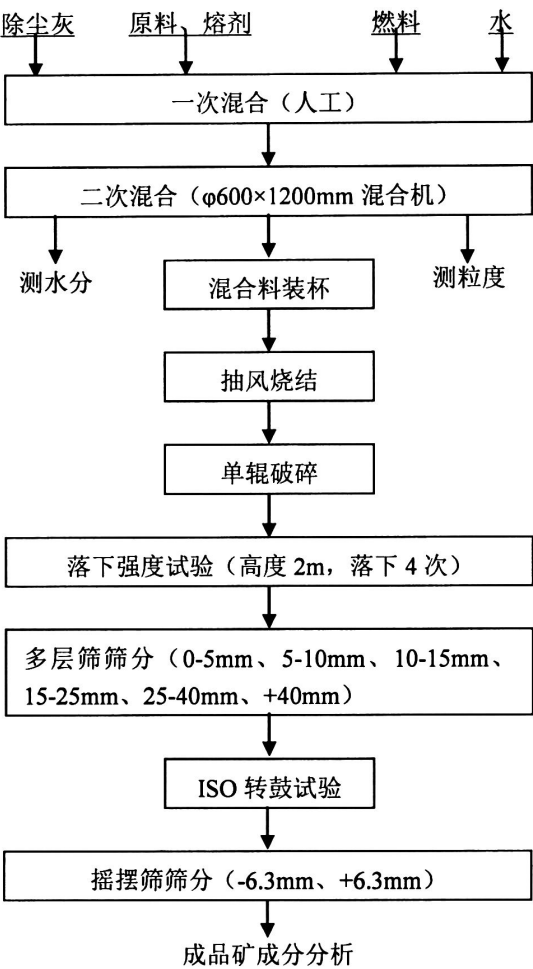


图 2.1 烧结生产试验流程

2.3 试验设备

实验所使用的设备如下图所示。

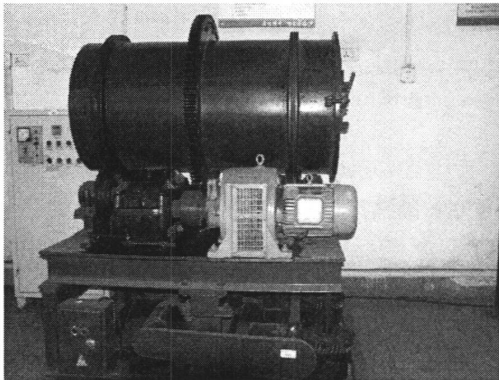


图 2.2 φ600×1200 的圆筒混合机

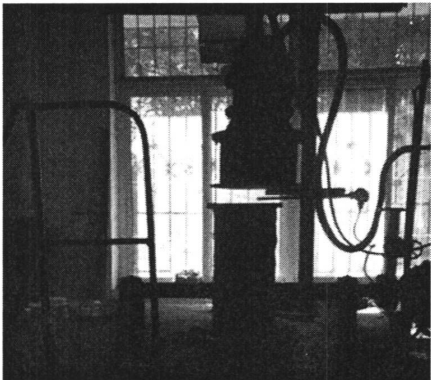


图 2.3 实验室用的烧结机

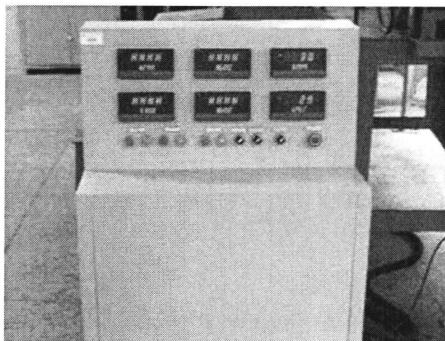


图 2.4 烧结系统电控柜



图 2.5 正在烧结中的烧结矿

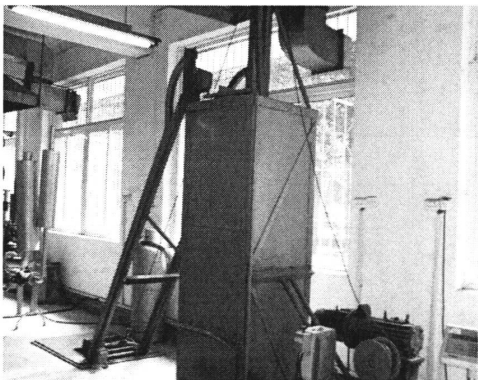


图 2.6 2 米落下试验装置

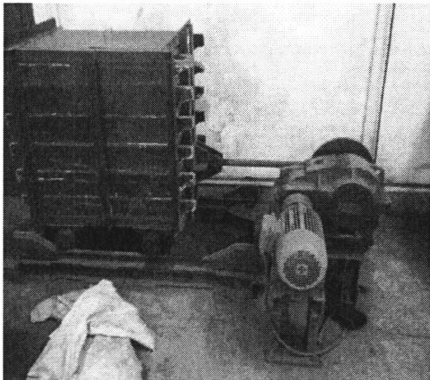


图 2.7 多层筛筛分装置

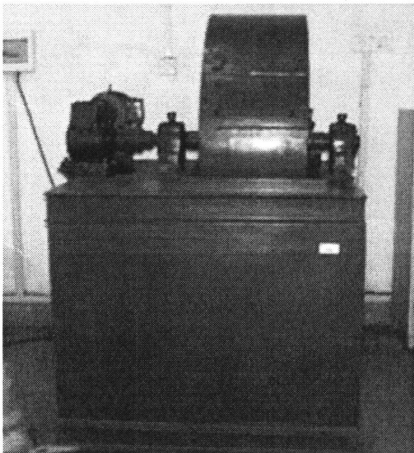


图 2.8 ISO 转鼓试验装置

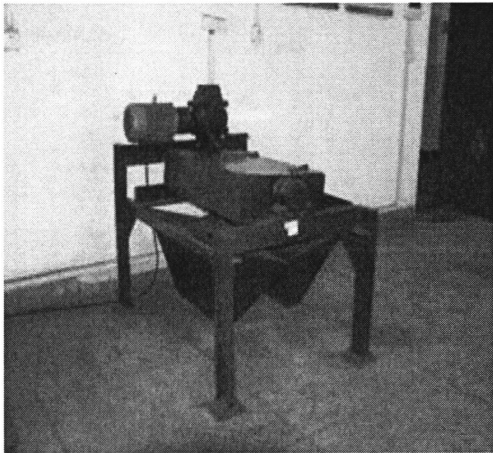


图 2.9 摇摆筛筛分装置

烧结原料经过烧结生产也就是通过这一系列设备之后生成的烧结成品矿，烧结生产前后矿样的对比如图 2.10 和 2.11 所示。

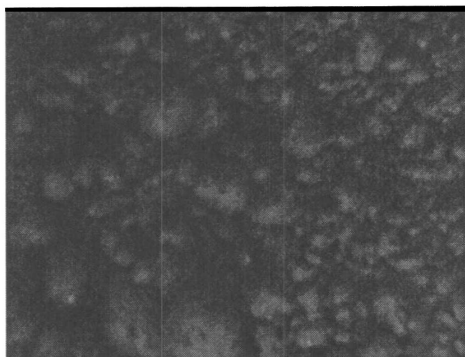


图 2.10 烧结混合料

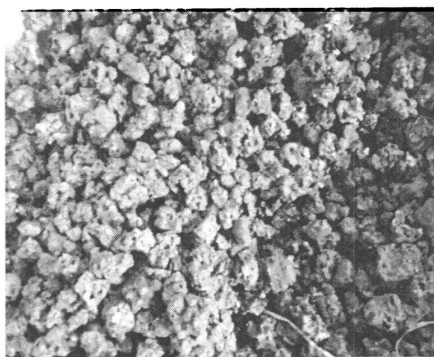


图 2.11 成品烧结矿

粒度异常不均匀的烧结原料经烧结后无论从形态还是化学成分、性质上都发生了巨大的变化，经过烧结过程后原来无法直接入高炉的粉料、低品位的原料以及让企业为之焦虑的除尘灰等含铁“废料”都实现了充分的利用，降低成本的同时也给环境减轻了压力。

第三章 除尘灰添加量对烧结生产的影响

3.1 除尘灰添加量对烧结原料制粒效果的影响

原料中混匀料占 56%、高炉返矿占 7%、内返矿占 21%、煤粉和焦粉各占 2.5%、石灰石占 4%、生石灰占 3%、白云石占 4%，此时混合料的碱度为 2.03，除尘灰的自身碱度为 1.998，混合料的水分为 7%~8%。除尘灰添加量分别为原料总量的 0、1%、2%、3%和 4%，经过一混和二混之后取 1000g 混合料用套筛检测原料的粒度组成，经过筛分称重得出各粒级的数据如表 3.1 所示。

表 3.1 混合料粒度组成/%

除尘灰添加量/%	烧结原料制粒后的粒度百分数/%			
	0-3mm	3-5mm	5-8mm	+8mm
0	46.7	28.3	15.6	5.7
1	45.8	25.5	16.9	8.9
2	39.2	33.0	15.5	9.3
3	43.9	30.0	16.1	6.7
4	45.2	28.9	16.5	6.2

（注：表中各粒级的数值为百分数，是由各粒级重量占总重的百分比换算而来。由于原料经二混后含有水分较多，在筛分时会有部分矿样和水分损失于筛面上，故总和小于 100%。）

从表 3.1 可以看出，随着除尘灰添加量的增加，-3mm 粒级的比例呈先下降后上升的趋势，主要原因是除尘灰粒度小、比表面积大，在混合过程中被水浸湿后极易粘结于返矿等大颗粒的表面，从而减少混合料中-3mm 粒级的比例。另外除尘灰中 CaO 和 MgO 的含量分别为 14.78%和 3%，CaO 的含量较高，一定程度上增强了除尘灰的亲水性，使其亲水而有利于在混匀过程中制粒，也会使烧结混合料中-3mm 粒级的量逐渐减少，+3mm 粒级所占百分数因此而增加。当除尘灰的添加量超过 2%时，由于返矿也就是制粒核心不足，造成大部分除尘灰不能粘结在粗颗粒返矿的表面，只能互相粘结，从而使混合物料中小颗粒数量增加。经计算，随着除尘灰添加量的增加混匀后的混合料中+3mm 粒级的比例如下图所示。

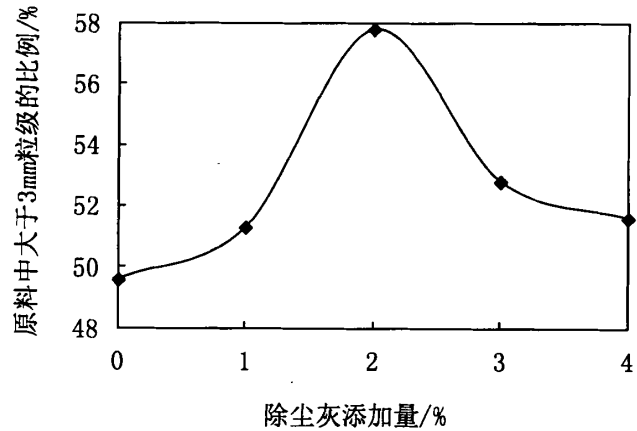


图 3.1 除尘灰添加量对烧结原料制粒效果的影响

从上图可以看出，随着除尘灰添加量的增加，混合料中+3mm 粒级的比例先增加再减小。这主要是由于除尘灰粒度细、有较好的造粒效果，加入混合料后会以返矿等粗颗粒为造粒核心成球，随着水分的加入和混合料的不断滚动而不断长大，以致于混合料中+3mm 粒级不断增多；当除尘灰添加过多后，由于返矿等粗颗粒造球核心不足，造成除尘灰自身相互粘结，且造好的颗粒间互相影响导致-3mm 粒级反而增多、大颗粒相对减少。

3.2 除尘灰添加量对烧结原料的透气性的影响

原料配比同 3.1，混匀装料后进行烧结实验直到实验结束，记录烧结生产所用时间以计算烧结速度，同时测量不同条件下烧结完成后料层的收缩率。不同除尘灰添加量对应的烧结速度和料层收缩率的关系如下图所示。

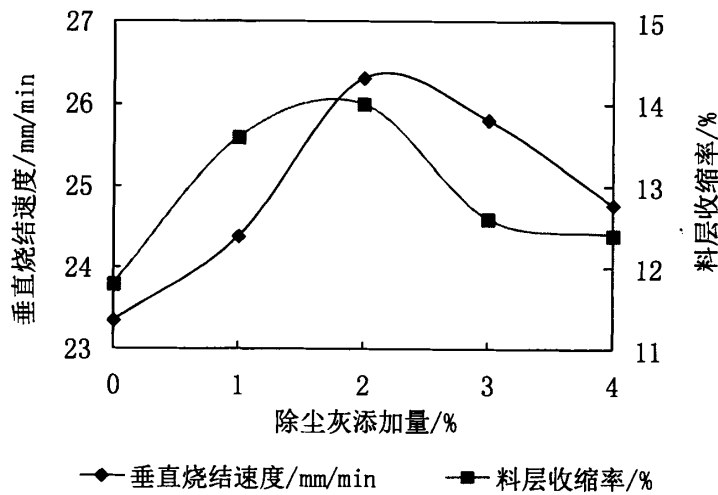


图3.2 除尘灰添加量对烧结速度和料层收缩率的影响

由上图可以明显看出，随着除尘灰添加量的增加，烧结速度和料层的收缩率都呈现出先增加后减小的变化趋势。随着除尘灰添加量的增加，混匀料的造粒效果增强，从而使烧结料层的透气性变好，有利于烧结燃料的充分燃烧和热量的迅速传递，从而加快烧结速度，

使烧结矿结晶效果更好；当添加过多的除尘灰后，由于燃料粒度组成中-3mm 粒级增多，导致烧结原料粉料过多、透气性不好，细粒级的除尘灰造好的小球由于烧结环境温度升高会发生爆裂或粉化，热量将会随着粉状除尘灰被抽风气流带走，严重恶化料层的透气性的同时也造成了部分热量的损失，使烧结矿不易形成有效黏结液相，减慢烧结生产的速度，这必将降低烧结生产的效率和烧结设备的利用率。当除尘灰的添加量为 2%时，垂直烧结速度达到最大为 26.32mm/min，料层收缩率为 14%。

3.3 除尘灰添加量对烧结矿转鼓指数和 FeO 含量的影响

原料配比同 3.1，混匀烧结完成后对烧结成品矿的转鼓指数和 FeO 含量进行检测，所制烧结矿的转鼓指数和 FeO 含量如下图所示。

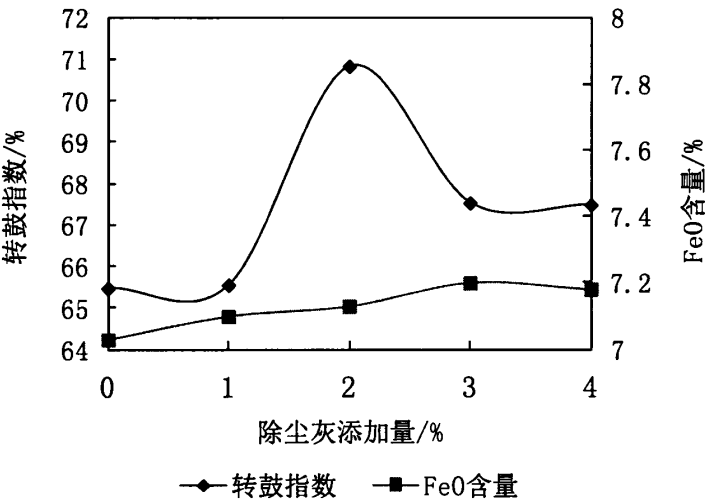


图 3.3 除尘灰添加量对烧结矿转鼓指数和 FeO 含量的影响

由上图可见，随着除尘灰添加量的增加，烧结矿的转鼓指数先增加后减小，FeO 含量则比较稳定。添加 2%的除尘灰时，烧结矿的转鼓指数为 70.83%，FeO 含量为 7.13%。

在烧结的过程中，由于除尘灰烧损的存在，造粒后的混合球体中的除尘灰经过高温分解，使致密的烧结矿中产生了气孔，致使烧结矿的强度明显下降；同时过多的除尘灰混在烧结原料中阻碍了烧结过程的顺利进行，导致液相量不足，矿物结晶不充分，烧结矿呈脆性结构，造成产品的转鼓强度下降，表现为烧结矿的转鼓指数下降。过多的除尘灰会严重恶化烧结过程，转鼓指数下降会导致返矿明显增多，这将增加烧结生产的能耗和设备的负荷，与节能降耗的目的相去甚远。

3.4 除尘灰添加量对烧结矿成品率和落下强度的影响

原料配比同 3.1，混匀烧结完成后对烧结成品矿的成品率和落下强度进行检测，所制烧结矿的成品率和落下强度如下图所示。

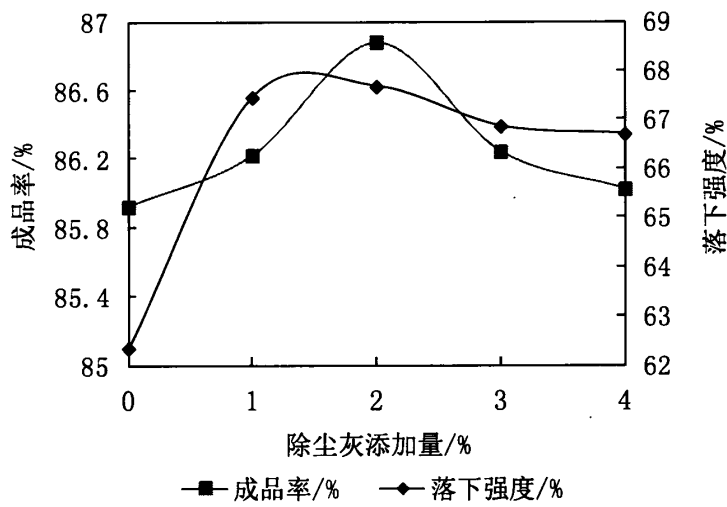


图3.4 除尘灰添加量对烧结矿成品率和落下强度的影响

由图 3.4 可见，随着除尘灰添加量的增加，烧结矿的成品率和落下强度均先增后减，当除尘灰添加量为 2%时，成品率和落下强度均达到最大值，分别为 86.88%和 67.68%。究其原因这是由于除尘灰粒度小、比表面积大等特性。适量的添加能够起到增强原料的制粒效果，起到改善烧结料的粒度组成的作用，从而增强烧结料的透气性，强化烧结过程，使烧结矿的落下强度和成品率都升高。

但是，除尘灰的自身碱度为 1.998，略低于烧结原料的碱度（2.03），随着除尘灰添加量的增加，势必使烧结原料的碱度逐渐下降，导致生产的 $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 等液相量不足，烧结矿强度下降。同时，过量添加除尘灰，混合料中造好的小球在烧结过程中会发生爆裂，产生较多的碎料，反而会影响料层的透气性，也严重影响了液相量的生产，表现为烧结矿强度指标降低，返矿量增加，成品率下降。

另外，除尘灰的大部分化学成分都很接近烧结原料，尤其是其含铁量达 46.68%，充分利用除尘灰能够在减轻环境污染的同时充分利用其中的铁资源。且其中又含较多的 CaO 和 MgO ，能够减少白云石和石灰石的消耗量。

3.5 除尘灰添加量对燃料消耗以及设备利用系数的影响

原料配比同 3.1，混匀烧结完成后对烧结成品矿的燃料消耗以及设备的利用系数进行检测，烧结生产过程中的燃料消耗以及设备的利用系数如下图所示。

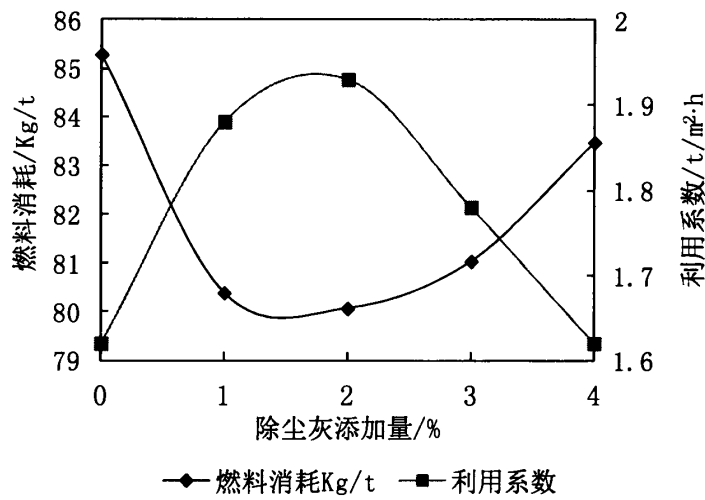


图3.5 除尘灰添加量对燃料消耗以及设备利用系数的影响

由上图可以看出随着除尘灰添加量的增加，燃料的消耗量呈先减小后增大的趋势，这是由于加入除尘灰后充分利用了除尘灰中的铁资源的同时也引进了少部分的 C 资源，以致于生产单位质量的烧结矿的燃耗相对有所降低，同时除尘灰的加入一定程度上改善了料层的透气性，使燃料能够更充分有效的燃烧，且热量的传递能够迅速有效，从而有效的节省了部分燃料。然而过量添加除尘灰会降低烧结原料中的 Fe 品位，粉状除尘灰过多的包裹着烧结原料，在烧结原料表层形成一层“隔离层”，这很大程度上阻止了空气的传入以及热量的传出，影响了燃料的充分燃烧，以致单位质量的烧结矿的燃耗上升。

除尘灰的加入在影响烧结生产的进程和烧结矿质量的同时也影响了烧结设备的利用系数，除尘灰添加量在有利于进行烧结生产的范围内，烧结生产的能耗有所降低，烧结矿质量也有所提高，烧结设备利用系数自然呈现出增长的趋势；过多的添加除尘灰不利于烧结，致使烧结燃耗增加，烧结矿指标下降，返矿量增加，设备单位时间生产的合格的烧结矿数量减少，设备的利用系数降低。当除尘灰添加量为 2% 时，燃耗为 80.8kg/t，设备的利用系数为 1.93t/m²·h。

3.6 本章小结

除尘灰是钢铁企业不可避免要产生的也是让钢铁企业十分头疼的副产品，具有其特有的性能和特点。除尘灰粒度细，以粉尘的形式存在于空气中会威胁人体的身体健康。堆积如山的除尘灰会占用大量土地，由于粒度细、库存量大，遇到地震或洪涝等地质灾害还会出现滑坡和溃坝等严重的次生灾害，威胁人民的生命财产安全。除尘灰中还含有部分微量的难处理的元素会对土壤和地下水等造成污染；风力的作用会使得除尘灰四处飘散，污染物四处转移不利用集中控制和处理，给人们的生存环境带来巨大压力，成为制约钢铁行业发展的巨大瓶颈。

危害性众多的同时除尘灰也有自身的优势，除尘灰含铁量高，其性质和成分也都比较

接近烧结原料,其中还含有一些很有回收利用价值的资源,在资源紧缺的时代想办法利用除尘灰中的有价资源也不失为一个比较稳妥的办法,根据除尘灰和烧结矿性质的相似性而将除尘灰加入烧结矿中以烧结的方式循环再利用除尘灰是人们一直在探索和研究的课题。

添加除尘灰对烧结生产存在正反两反面的影响,对环境保护和资源的再利用有利。综合除尘灰对烧结生产的过程以及对烧结矿质量的影响的情况全面考虑,除尘灰少量添加有利于资源再利用,过量添加则会严重影响烧结矿质量。当除尘灰的添加量为 2%时,既能保证烧结生产的顺利进行,也能利用部分除尘灰以增加资源的循环再利用,同时还能降低烧结生产的能耗实现节能降耗的目的。

试验表明:当除尘灰的添加量为 2%时,烧结混合料的造粒效果最好, +3mm 粒级所占百分数为 57.8%,在此条件下烧结生产的垂直烧结速度达到 26.32mm/min,料层收缩率为 14%、烧结矿中的 FeO 含量为 7.13%,转鼓指数、成品率和落下强度均达到最大值,分别为 70.83%、86.88%和 67.68%,烧结矿能耗为 80.8kg/t,烧结生产设备的利用系数为 1.93t/m²·h。

第四章 添加除尘灰后不同反应条件对烧结矿质量的影响

4.1 燃料用量对烧结矿质量的影响

原料中混匀料占 58%、除尘灰占 2%、高炉返矿占 7%、内返矿占 22%、石灰石占 4%、生石灰占 3%、白云石占 4%。燃料配加量分别为原料总量的 6%、5%、4.5%、4.2%和 4%。烧结混合料的碱度为 2.03，混合料的水分分为 7%~8%，生产的烧结矿的各项指标如图 4.1 和图 4.2 所示。

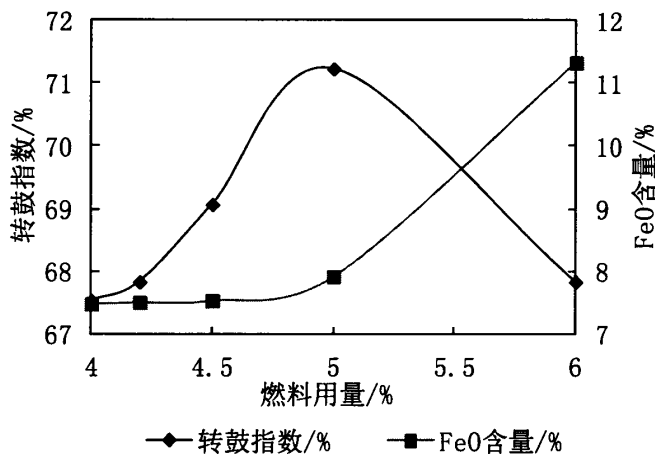


图 4.1 燃料用量对烧结矿转鼓指数和 FeO 含量的影响

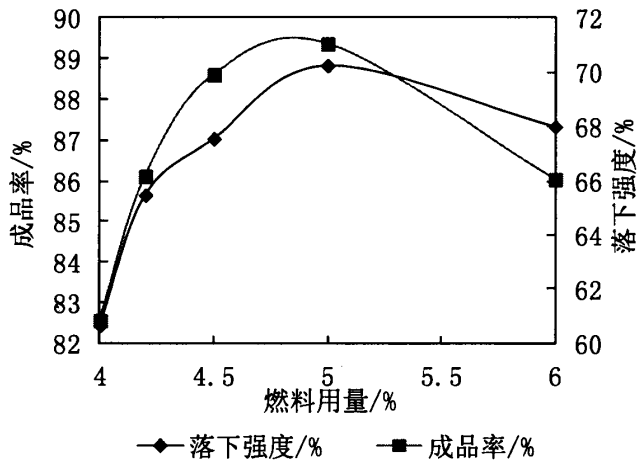


图 4.2 燃料用量对烧结矿成品率和落下强度的影响

由上图可见，随着燃料用量增加，烧结矿的转鼓指数、成品率和落下强度均先增后减，FeO 含量则开始比较稳定，然后迅速增大。当添加 5% 的燃料时，转鼓指数、成品率和落下强度均达到最大值，分别为 71.23%、88.83%和 70.04%，FeO 含量为 7.91%。

燃料用量会影响烧结生产的垂直烧结速度，从而影响烧结矿的产量。燃料用量过少，达不到必要的烧结温度，烧结生产中的液相量不足，烧结过程进行不完全，反应不充分，

烧结矿各项指标下降；燃料用量过多，燃烧层温度过高，液相过多，出现了烧结矿的过熔现象，当料层较厚时，透气性差，会导致料层下部烧不透，烧结矿的各项指标也不理想。温度过高还会对设备的损耗较大，也会恶化烧结生产的环境。结合本次研究的目的，即降低烧结能耗和提高烧结矿质量，确定燃料用量为 5%较合适，相比水钢目前 5.6%的添加量有一定程度的提升。

4.2 原料温度对烧结矿质量的影响

原料配比及其他条件与 4.1 节中的相同，燃料用量为 5%。将烧结原料混匀加水制粒后加热，分别加热到 20℃、40℃、50℃、60℃、70℃后迅速装入烧结杯进行烧结，不同温度下进行烧结生产，所制烧结矿的各项指标如图 4.3 和图 4.4 所示。

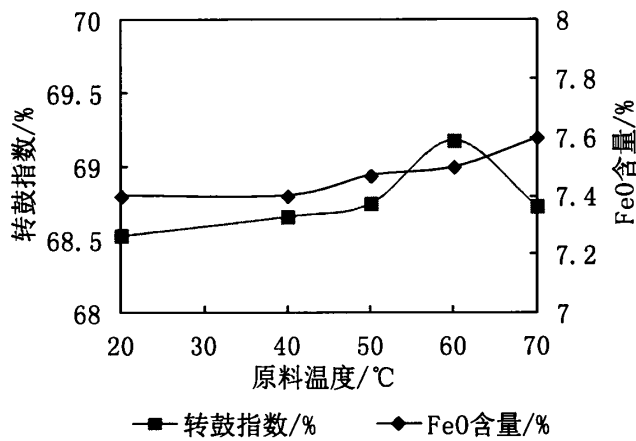


图 4.3 原料温度对烧结矿转鼓指数和 FeO 含量的影响

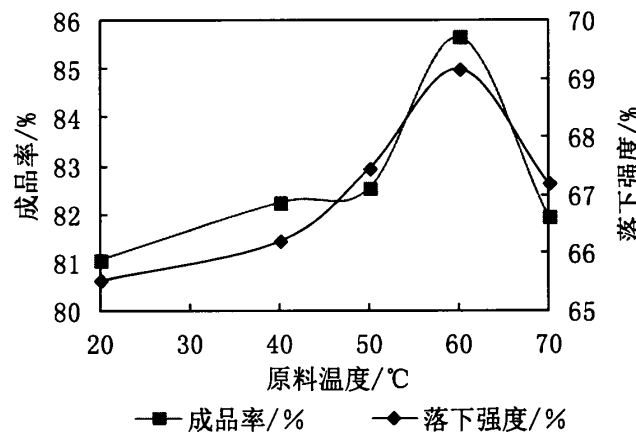


图 4.4 原料温度对烧结矿成品率和落下强度的影响

由图 4.3 和图 4.4 可见，随着烧结原料温度的升高，烧结矿的转鼓指数、成品率和落下强度均先增后减，FeO 含量则略微增加。当原料温度为 60℃时，转鼓指数、成品率和落下强度均达到最大值，分别为 69.18%、85.66%和 69.16%，FeO 含量为 7.5%。

进入烧结的原料起始温度在一定程度上影响干燥速度。起始温度高，干燥速度快，对烧结有利，不仅可以提高烧结矿的质量，还可以节省碳耗。但起点温度过高时，水分蒸发速度快于其扩散速度，会导致部分球粒碎裂，造成料层透气性下降。根据试验结果，选择原料温度为 60℃ 较为合适。

4.3 燃料粒度对烧结矿质量的影响

原料配比与 4.1 节中的相同，燃料用量为 5%。将燃料中粒度-3 mm 的颗粒所占比例 w 分别控制在 80%、83%、88%、92%、95%。原料混匀加热到 60℃ 后进行烧结试验。所制烧结矿的各项指标如图 4.5 和图 4.6 所示。

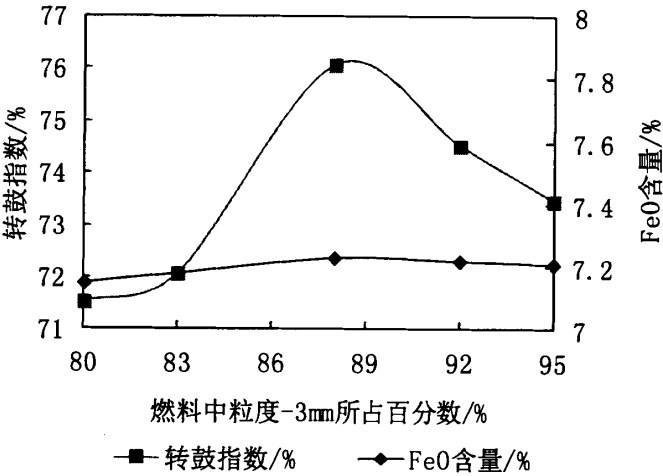


图 4.5 燃料粒度对烧结矿转鼓指数和 FeO 含量的影响

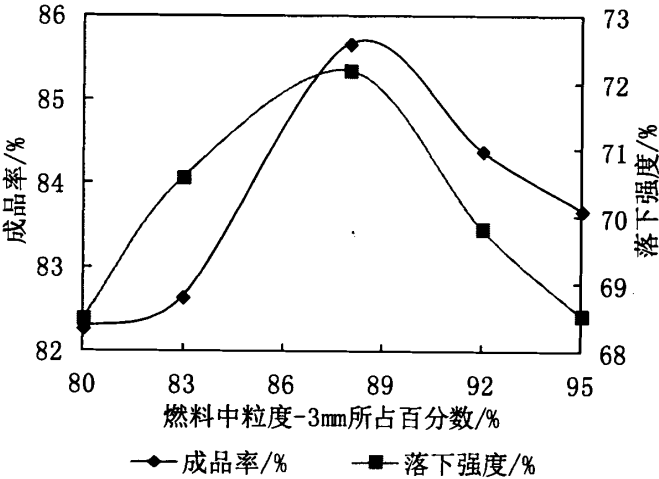


图 4.6 燃料粒度对烧结矿成品率和落下强度的影响

由上图可见，随着燃料中粒度-3mm 颗粒所占比例的增加，烧结矿的转鼓指数、成品率和落下强度均先增后减，FeO 含量变化不大。当燃料中粒度-3mm 的颗粒所占比例为 88% 时，转鼓指数、成品率和落下强度均达到最大值，分别为 76.07%、85.66%和 72.18%，FeO

含量为 7.23%。

燃料粒度过细会使燃烧速度快，高温时间短，烧结原料周围所需热量不足，从而生成的液相量不足，难以在自身周围建立起成块的烧结矿，并且细粒级的燃料也容易随气流被吹到下层，从而使燃料分布不均而影响了烧结矿强度。燃料粒度过小还会使料层透气性变差，烧结矿产量低。燃料粒度较大（+3mm）时，燃料分布不均匀，燃料多的地方会出现过熔燃料少的地方烧结生产进行不完全，且大颗粒的燃烧时间延长，燃烧速度降低，燃烧层变厚，也会使料层透气性变差。根据试验结果，燃料中粒度-3 mm 颗粒所占比例为 88% 时较为合适。

4.4 不同灰分的燃料对烧结矿质量的影响

在 4.3 节确定的最佳条件下，研究不同灰分的燃料对烧结矿性能及指标的影响，进而探索在保证烧结矿质量的情况下是否能用质量稍差的燃料代替现有燃料，从而节省部分选煤和购买优质煤的费用，以达到降低生产成本的目的。

试验前先通过计算，将几种灰分不同的燃料按一定的配比进行混合，使混合后的燃料中的灰分呈递出一定的梯度，从而能用灰分作为影响燃料质量的主要因子，将配好的燃料分别加入烧结原料中进行烧结生产，得到灰分不同的几种燃料对成品烧结矿的影响情况如下图。

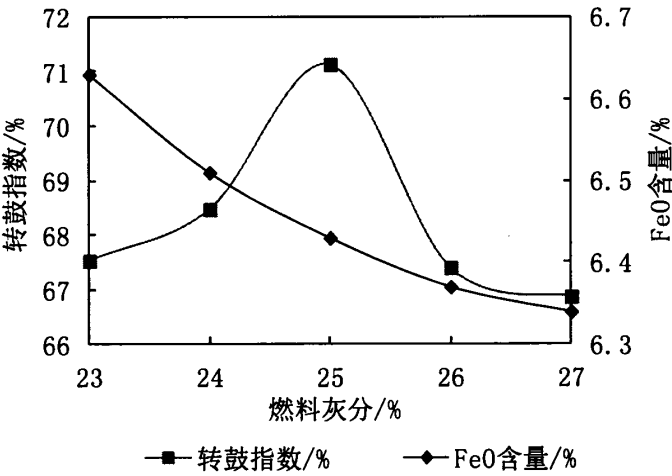


图 4.7 不同灰分的燃料对烧结矿转鼓指数和 FeO 含量的影响

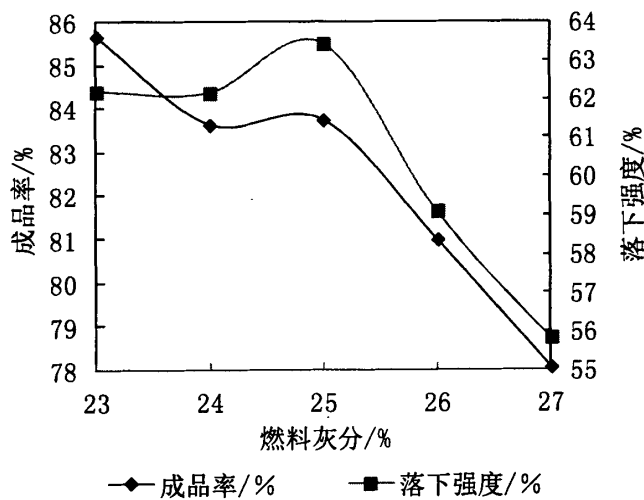


图 4.8 不同灰分的燃料对烧结矿成品率和落下强度的影响

由上图可见，随着燃料灰分的增加，烧结矿的转鼓指数、落下强度均呈现出先增大后减小，FeO 含量不断减小，成品率先减小再趋于稳定之后继续不断减小。当添加灰分为 25% 的燃料时，转鼓指数和落下强度均达到最大值，分别为 71.13% 和 63.43%，此时的成品率为 83.73%，FeO 含量为 6.43%。

燃料燃烧后的灰分过多，燃烧后灰分会以细粉的形式在燃料和烧结原料之间成层，这必然会影响燃烧过程中热量向烧结原料传输的速度和效率，同时也影响碳对烧结原料的还原效果，燃料燃烧后的热量不能完全高效的用于烧结和还原烧结原料，致使成品烧结矿中的 FeO 含量不断下降。灰分过多的燃料在燃烧时间上相对较长，能够满足烧结生产对高温保持时间的部分需求，转鼓指数和落下强度会有一定程度的提升。燃料的灰分过多燃料的质量会很差，燃烧过程中料层中细粒级增多，料层的透气性显著恶化。以 SiO_2 和 Al_2O_3 为主要成分的灰分，是一种高熔点的惰性物质，会降低烧结生产的碱度，与 CaO 、 MgO 等熔剂反应生成新的化合物，同时，成品矿的 Fe 品位也会受其影响而降低，各项指标均变差。

4.5 正交试验对比

通过单因素试验法研究了烧结生产过程中燃料用量、混合料温度、燃料粒度（主要以 -3mm 粒级的百分数表示）对烧结矿质量的影响情况，选取这些因素进行 3 因素 3 水平的正交试验，看有没有比单因素试验找到的最优化的生产条件更好的生产条件，同时也可以通过正交试验观察在烧结过程中是否存在各因素互相影响的情况。正交试验的生产条件安排以及不同条件下生成的成品烧结矿的各项主要指标如下表所示。

表 4.1 正交试验原料配比安排及成品矿质量指标

试验号	影响因素			成品烧结矿指标			
	A	B	C	Y_i	X_i	Z_i	W_i
	燃料用量 /%	混合料温 度/℃	燃料中粒 度-3mm 粒级/%	落下强度 /%	转鼓指数 /%	成品率/%	FeO 含量/%
1	4.5	50	83	68.96	68.73	86.94	7.38
2	4.5	60	88	69.7	68.96	87.02	7.48
3	4.5	70	92	69.56	68.58	86.84	7.36
4	5	50	88	67.62	68.78	82.84	7.47
5	5	60	92	69.83	74.53	84.39	7.22
6	5	70	83	67.05	68.7	81.24	7.54
7	6	50	92	66.94	68.63	84.76	10.75
8	6	60	83	67.08	68.82	87.25	11.03
9	6	70	88	67.03	68.74	86.04	11.08
I_j	208.22	204.52	203.09				
II_j	204.5	206.61	204.35	$T=613.7$	$T=624.4$	$T=767.3$	$T=77.31$
III_j	200.05	203.64	206.33	7	7	2	
R_j	8.17	2.97	3.24				

表中记号 I_j 、 II_j 、 III_j 分别指的是对应 j 列因素取水平“1”、“2”、“3”的指标和，如：

$I_A=Y1+Y2+Y3=68.96+69.7+69.56=208.22$

$II_B=Y2+Y5+Y8=69.7+69.83+67.08=206.61$

...

...

...

$R_j=\max\{ I_j , II_j , III_j\}-\{ I_j , II_j , III_j \}$

$R_A=208.22-200.05=8.17$

对水平效应的估计数据模型为：

$Y_1=\mu+a_1+b_1+c_1+\varepsilon_1 \quad Y_2=\mu+a_1+b_2+c_2+\varepsilon_2 \quad Y_3=\mu+a_1+b_3+c_3+\varepsilon_3$

$Y_4=\mu+a_2+b_1+c_2+\varepsilon_4 \quad Y_5=\mu+a_2+b_2+c_3+\varepsilon_5 \quad Y_6=\mu+a_2+b_3+c_1+\varepsilon_6$

$Y_7=\mu+a_3+b_1+c_3+\varepsilon_7 \quad Y_8=\mu+a_3+b_2+c_1+\varepsilon_8 \quad Y_9=\mu+a_3+b_3+c_2+\varepsilon_9$

其中 $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$, $i=1, 2, \dots, 9$ 为试验的随机误差, a_i, b_i, c_i ($i=1, 2, 3$) 为因素 A,

B, C 的水平效应, 满足 $\sum_{i=1}^3 a_i = \sum_{i=1}^3 b_i = \sum_{i=1}^3 c_i = 0$, μ 为试验数据的总均值。

将 $Y_1 \sim Y_9$ 9 个式子相加得 $\sum_{i=1}^9 Y_i = 9\mu + \sum_{i=1}^9 \varepsilon_i \Rightarrow \hat{\mu} = \bar{Y}$

将含 a_1 的式子相加得 $\hat{a}_1 = \frac{1}{3}(Y_1 + Y_2 + Y_3) - \bar{Y} = \frac{I_A}{3} - \bar{Y}$

将含 a_2 的式子相加得 $\hat{a}_2 = \frac{1}{3}(Y_4 + Y_5 + Y_6) - \bar{Y} = \frac{II_A}{3} - \bar{Y}$

将含 a_3 的式子相加得 $\hat{a}_3 = \frac{1}{3}(Y_7 + Y_8 + Y_9) - \bar{Y} = \frac{III_A}{3} - \bar{Y}$

类似的可以得出 $\hat{b}_1 = \frac{I_B}{3} - \bar{Y}$, $\hat{b}_2 = \frac{II_B}{3} - \bar{Y}$, $\hat{b}_3 = \frac{III_B}{3} - \bar{Y}$

$\hat{c}_1 = \frac{I_C}{3} - \bar{Y}$, $\hat{c}_2 = \frac{II_C}{3} - \bar{Y}$, $\hat{c}_3 = \frac{III_C}{3} - \bar{Y}$

主次要因素的确定是根据极差 R 的大小来表征的, 主要影响因素对应的极差 R 较大, 次要影响因素相应的 R 值就小, 按 R 值的大小对各因素的影响程度大小进行排序, 对烧结矿的落下强度而言, 三个因数的影响水平为: $R_A > R_C > R_B$ 即燃料用量 > 燃料中-3mm 粒级的比例 > 烧结混合料的温度。

9 次试验中, 可以落下强度指标最优的水平组合作为较优的生产条件, 在表 4.1 中的各组数据中经过观察, $Y_5 = 69.83$ 最大, 故 $A_2B_2C_3$ 为落下强度较优的生产条件。由于是通过观察找出来的, 故该条件为“看一看”好条件。

还有其他的水平组合没有进行试验 (共有 27 个水平组合, 正交试验只选了其中的 9 个组合做试验), 因此“看一看”好条件并不一定是全面试验中的最好条件, 故可以通过简单计算寻找全面试验中的最好条件。

由于烧结矿的落下强度指标大一些为好, 因 $I_A = 208.22 > II_A = 204.5 > III_A = 200.05$, 所以因素 A 选水平 A_1 , 同样的分析, 因素 B、C 选水平 B_2 、 C_3 , 综合得到“算一算”的最好条件 $A_1B_2C_3$,

该水平组合在正交试验中并未进行试验。

参照数据模型可知: $\hat{Y}_{A_1B_2C_3} = \bar{y} + \hat{a}_1 + \hat{b}_2 + \hat{c}_3$

带入 a_1, b_2, c_3 后有 $\hat{Y}_{A_1B_2C_3} = \bar{y} + (\frac{I_A}{3} - \bar{Y}) + (\frac{II_B}{3} - \bar{Y}) + (\frac{III_C}{3} - \bar{Y}) = \frac{I_A}{3} + \frac{II_B}{3} + \frac{III_C}{3} - 2\bar{y} = 70.66$

可知在燃料用量为 4.5%, 混合料温度 60°C , 燃料中粒度-3mm 粒级为 92% 时, 落下强度理论上应该为 70.66% 左右。

以转鼓指数、成品率、FeO 含量分别作为评价指标时, 计算方法同上, 计算所得数据列于表 4.2 中。

表 4.2 正交试验结果分析表

	转鼓指数/%			成品率/%			FeO 含量/%		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
I _j	206.27	206.14	206.25	260.8	254.54	255.43	22.22	25.6	25.95
II _j	212.01	212.31	206.48	248.47	258.66	255.9	22.23	25.73	26.03
III _j	206.19	206.02	211.74	258.05	254.12	255.99	32.68	25.98	25.33
R _j	5.82	6.29	5.49	12.33	4.54	0.47	10.64	0.38	0.7

由表 4.2 可以看出，当转鼓指数作为评价指标时，各影响因子对烧结过程的影响大小为 $R_B > R_A > R_C$ ，由 $II_A = 212.01 > I_A = 206.27 > III_A = 206.19$ ，选取 A_2 为最好条件，B、C 因素分别选 B_2 、 C_3 为最好条件，能够保证转鼓指数较高。此时烧结矿的转鼓指数为：

$$\hat{X}_{A_2B_2C_3} = \bar{X} + (\frac{II_A}{3} - \bar{X}) + (\frac{II_B}{3} - \bar{X}) + (\frac{III_C}{3} - \bar{X}) = \frac{II_A}{3} + \frac{II_B}{3} + \frac{III_C}{3} - 2\bar{X} = 73.25$$

当成品率作为评价指标时，各影响因子对烧结反应的影响大小为 $R_A > R_B > R_C$ ，由 $I_A = 260.8 > III_A = 258.05 > II_A = 248.47$ ，选取 A_1 为最好条件，B、C 因素分别选 B_2 、 C_3 为最好条件，能够保证较高的成品率。

$$\hat{Z}_{A_1B_2C_3} = \bar{Z} + (\frac{I_A}{3} - \bar{Z}) + (\frac{II_B}{3} - \bar{Z}) + (\frac{III_C}{3} - \bar{Z}) = \frac{I_A}{3} + \frac{II_B}{3} + \frac{III_C}{3} - 2\bar{Z} = 90.78$$

当 FeO 含量作为评价指标时，各影响因子对烧结反应的影响大小为 $R_A > R_C > R_B$ ，由于烧结矿 FeO 含量要求小，由 $III_A = 32.68 > II_A = 22.23 > I_A = 22.22$ ，选取 A_1 为最好条件，B、C 因素分别选 B_1 、 C_3 为最好条件，能够保证烧结矿的 FeO 含量最低。

$$\hat{W}_{A_1B_1C_3} = \bar{W} + (\frac{I_A}{3} - \bar{W}) + (\frac{I_B}{3} - \bar{W}) + (\frac{III_C}{3} - \bar{W}) = \frac{I_A}{3} + \frac{I_B}{3} + \frac{III_C}{3} - 2\bar{W} = 7.2$$

通过正交试验得出对烧结矿的落下强度、成品率和 FeO 含量而言，燃料用量是起主要作用的，混合原料的预热温度对烧结矿的转鼓指数的影响较大。由于正交试验的检验都是以单一的指标来研究评价各因素的影响水平的，而烧结矿的质量受到多个指标的影响，在某一水平达到最佳值时其他相应的指标不一定也是最好的，这就需要综合全面的探索和对比各项指标找到一个整体较好的指标。通过正交试验和单因素试验的结果对比验证了各个影响因素之间存在着互相影响的情况，也验证了通过单因素试验找到的最优化的配比方案确实是现有条件下的最好条件，能够较好的实现烧结生产节能降耗，对水钢的扩大生产具有一定的参考价值。

4.6 本章小结

烧结生产中原料的性质和组分都对烧结生产的过程和能耗有很大的影响，改变烧结生产中原料的配比能够降低生产的成本，实现一定程度上的节能降耗。保证原料中部分组分的含量如下：混匀料占 58%、除尘灰占 2%、高炉返矿占 7%、内返矿占 22%、石灰石

占 4%、生石灰占 3%、白云石占 4%, 分别研究燃料用量、原料温度、燃料粒度对烧结矿质量的影响情况。

添加 5% 的燃料时, 转鼓指数、成品率和落下强度均达到最大值, 分别为 71.23%、88.83% 和 70.04%, FeO 含量为 7.91%, 在此条件下, 当混合原料温度为 60℃ 时, 转鼓指数、成品率和落下强度均达到最大值, 分别为 69.18%、85.66% 和 69.16%, FeO 含量为 7.5%。

燃料粒度的选取一定程度上也与烧结原料的粒度分布有关, 不同的原料都应有其适宜的燃料匹配粒度。一般来说, 烧结混合料中的粉/核比对于烧结生产的顺利进行时非常重要的。实践证明, 焦粉中 -0.5mm 和 +3mm 粒级的存在对烧结生产是不利的, 将燃料粒度控制在 0~3mm 时, 烧结矿各项指标较好。

在添加 5% 的燃料, 混合原料温度为 60℃ 的条件下, 当燃料中粒度 -3mm 的颗粒所占比例为 88% 时, 转鼓指数、成品率和落下强度均达到最大值, 分别为 76.07%、85.66% 和 72.18%, FeO 含量为 7.23%。

通过正交试验发现: 各影响条件对转鼓指数的影响程度大小依次为原料温度>燃料用量>燃料粒度, 对落下强度和 FeO 含量的影响程度大小依次为燃料用量>燃料粒度>原料温度, 对成品率的影响程度大小依次为燃料用量>原料温度>燃料粒度, 对比单因素试验找到的最佳条件, 发现这三个影响条件间存在一定的相互影响性。

第五章 除尘灰的资源化的效益评估

5.1 环境效益分析

除尘灰是钢铁企业生产过程中无法避免而产生的“废物”，因其特有的性质和成分对环境有较大的影响和潜在危害，影响了钢铁企业的不断发展壮大。近年来我国钢铁产量飞速增长，年产量已超过 4 亿 t，如果按生产每吨钢排放 15kg 除尘灰计算，则除尘灰年排放量就达 600 万 t。除尘灰的资源化再利用在环境保护方面存在巨大的潜力，将重点解决以下几个方面的问题：

(1) 除尘灰堆积如山不仅占用大量的土地，给我国的可利用土地资源造成巨大的压力，同时这一庞大的固体废弃物的处理也需要花费庞大的人力物力。

(2) 粒度细的除尘灰在风力的作用下会四处飘散，以粉尘的形式存在于空气中，使空气中的 $PM_{2.5}$ 值明显增加，影响了城市的形象，不仅加大了环保部门治理的难度，更严重威胁人类的身体健康。

(3) 除尘灰含有的 Cr、Fe、Ca、Mg、Si、C、Mn、Mg、Pb、Zn 等元素，在长期堆积的情况下，部分元素会对土壤和地下水产生污染，不利于植物的生长和地下水的饮用，威胁人类的生存。

(4) 除尘灰长期堆积还存在很大的安全隐患，在遇到地震或者暴雨等灾害时会产生滑坡等次生灾害，威胁人民群众的生命财产安全。

如果除尘灰配入量按 2% 计，钢铁生产的庞大需求能够很快消耗掉库存的除尘灰，日后钢厂生产的除尘灰也都能得到较好的利用从而很好的解决上述一系列问题，实现除尘灰在钢铁企业内部的循环利用也符合清洁生产的理念。所以，烧结利用除尘灰对环保的潜在效益是巨大的，这也可以说钢铁企业转型的一个不错的选择。

5.2 经济效益评估

当除尘灰的配加量为 2% 时，烧结生产能充分利用库存除尘灰及新产生的除尘灰，除尘灰的利用一直都是钢铁企业研究和讨论的热门话题。除尘灰中含有大量有价值的成分，使用除尘灰进行烧结生产对资源节约型社会的建设有重要的意义。充分利用这一“放错地点的资源”是钢铁企业不断发展壮大的过程中必须迈过的一道坎，也是节能降耗得以实现的不错的选择。

优化试验后的烧结原料中燃料消耗由原来的 5.6% 降低到了 5%，对比烧结矿的生成量计算，折算成烧结矿能耗大约节省燃料 0.66kg/t 烧结矿。按烧结矿年产量 300 万吨，焦粉价格为 980 元/t，产生的直接经济效益为： $300 \times 0.66 / 1000 \times 980 = 194.04$ 万元。

除尘灰加工成本为 100 元/t，10kg 除尘灰加工成本为 1 元。10kg 除尘灰产生效益为：降低钢铁料 $10 \times 46.68\% \times 75\% = 3.5\text{kg}$ ，降低钢铁料成本为 $3.5 \times 3 = 10.5$ 元（除尘灰含 Fe 量 46.68%，钢铁料产生的效益 3 元/kg，Fe 回收率 75% 计算）。

10kg 除尘灰能创造的收入为： $10.5-1=9.5$ 元，每吨除尘灰的经济价值为 950 元。若年消耗除尘灰的量 4000 吨，产生的效益约为 $4000 \times 950 = 380$ 万。全国的除尘灰都能得到合理的利用那为钢铁企业创造的收入将是非常巨大的。当然，这是在忽略除尘灰配入对烧结过程的负面影响的情况下估算出来的。

另外，除尘灰中 CaO 含量为 14.78%，含量较高，参与到烧结过程中可以减少石灰石和白云石等熔剂的需求量，一定程度上也为熔剂的采购节省了成本，优化后的烧结设备的利用系数有一定量的增加，单位时间内产生的合格烧结矿的数量也有一定量的提升，为企业节省时间成本也是变相的为企业创造了收入。

第六章 结论

(1) 烧结生产配加除尘灰能消化库存及新产出的除尘灰, 对节约资源和保护环境意义重大。适量加入除尘灰有利于烧结原料的造粒, 当除尘灰添加量为 2% 时, 烧结原料中 +3mm 的粒级含量达到 57.8%, 这对烧结生产的顺利进行以及烧结矿的质量的提高都有利, 此时烧结生产的垂直烧结速度达到最大为 26.32mm/min, 料层收缩率为 14%。

(2) 当除尘灰添加量为 2% 时, 成品烧结矿各项指标均达到最佳值且都符合炼铁对烧结矿的指标要求, 转鼓指数、成品率和落下强度分别为 70.83%、86.88% 和 67.68%, FeO 含量为 7.13%。

(3) 除尘灰的添加在一定程度上能降低烧结矿的燃耗, 增加设备的利用系数。当除尘灰的添加量为 2% 时, 燃耗为 80.8kg/t, 设备的利用系数为 1.93t/m²·h, 既能节省烧结原料, 又能实现节能降耗的目标。

(4) 除尘灰添加量为 2% 的情况下, 通过单因素试验法得出的最佳工艺参数是: 燃料用量为 5%、燃料中粒度-3 mm 的颗粒所占比例为 88%, 原料温度为 60 °C。在上述工艺条件下, 烧结矿质量较好, 其落下强度为 72.18%, 转鼓指数为 76.07%, FeO 含量为 7.23%, 成品率为 85.66%, 按此条件生产, 约能为水钢节省 194.04 万元的燃料成本。

(5) 烧结生产对燃料灰分的要求是比较高的, 当燃料的灰分为 25% 时, 转鼓指数和落下强度均达到最大值, 分别为 71.13% 和 63.43%, 此时的成品率为 83.73%, FeO 含量为 6.43%, 灰分的波动不能太大, 否则会严重影响烧结矿的质量。

(6) 对转鼓指数的影响程度大小依次为原料温度>燃料用量>燃料粒度, 对落下强度和 FeO 含量的影响程度大小依次为燃料用量>燃料粒度>原料温度, 对成品率的影响程度大小依次为燃料用量>原料温度>燃料粒度, 对比单因素试验找到的最佳条件, 发现这三个影响条件间存在一定的相互影响性。

(7) 除尘灰作为“废物”的同时本身也存在很大的环境价值和经济价值, 在不考虑除尘灰给烧结生产带来的负面影响的情况下, 每吨除尘灰的经济价值约为 950 元。若年消耗除尘灰的量 4000 吨, 产生的效益约为 4000×950=380 万, 试验确定的最佳生产方案, 一定程度上能够为水钢实现烧结生产的节能降耗, 达到了合理利用二次资源以及节能降耗的目的, 对水钢的现场试验具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 叶卉, 孙锡丽. 进口铁矿石现状分析及策略研究[J]. 金属矿山, 2008(9): 7-10.
- [2] 李宜军. 我国进口铁矿石现状及发展趋势[J]. 运输市场, 2005(1): 65-67.
- [3] 陈铁军. 铁矿烧结理论与实践[M]. 武汉: 武汉科技大学出版社, 2006.
- [4] 郭昌, 翟有有. 不锈钢除尘灰利用途径简析[J]. 甘肃冶金, 2012, 34(1): 33-35.
- [5] 温丽霞, 李新兵等. 永通公司低成本烧结的实践[J]. 河北冶金, 2010(2): 24-26.
- [6] 孙秀丽. 本钢三烧节能降耗的措施及效果[J]. 烧结球团, 2009, 34(2): 56-58.
- [7] M. L. Sammut, Y. Noack, J. Rose. Speciation of Cd and Pb in dust emitted from sinter plant [J]. Chemosphere, 2010, 78(4): 445-450.
- [8] 唐先觉. 我国烧结行业的技术进步[J]. 烧结球团, 2008, 33(2): 1-4.
- [9] Palencia I, Romero R, Iglesias N. Recycling EAF Dust Leaching Residue to The Furnace:A Simulation Study[J]. JOM, 1999, 51(8): 28-32.
- [10] Kokura S W. Dry Removal Method of Zinc from Blast Furnace Dry Dust[J]. Trans of Iron and Steel Inst of Japan, 1986, 1(2): 167-169.
- [11] B. Das, S. Prakash, P. S. R. Reddy, V. N. Misra. An overview of utilization of slag and Sludge from steel industries[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2007(50): 40-57.
- [12] 赵家彦. 钢铁企业降低烧结工序能耗的分析[J]. 科技信息, 2008(34): 151-157.
- [13] Miller, G.A. and Azad, S. influence of solid type on stabilization with cement kiln dust[J]. Cement and building materials, 2000, 4(2): 89-97.
- [14] 徐景海, 李洪革等. 烧结除尘灰的提前制粒工艺[J]. 烧结球团, 2001, 26(4): 45-49.
- [15] 邓德君. 烧结工序节能降耗的措施分析[J]. 矿业工程, 2011, 9(3): 36-39.
- [16] 朱晓华. 南钢烧结降低工序能耗生产实践[J]. 金属材料与冶金工程, 2009, 37(6): 56-58.
- [17] 赵金龙, 冯少武. 石钢烧结厂配用除尘灰的生产实践[J]. 烧结球团, 2001, 26(6): 42-44.
- [18] 赵家彦. 钢铁企业降低烧结工序能耗的分析[J]. 科技信息, 2008(34): 25-27.
- [19] 徐冬华. 南钢 130m² 烧结机节能降耗技术的应用[J]. 冶金能源, 2006, 25(3): 35-37.
- [20] Duan Ning dong, Huang Yun jie. Measures for energy saving and emission reduction in chinese tobacco industry[J]. ScienceDirect, 2011(5): 818-823.
- [21] 薛俊虎. 烧结生产技能知识问答[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- [22] 唐先觉. 浅论我国烧结球团事业 50 年来的技术进步[J]. 烧结球团, 2004, 29(6): 1-3.
- [23] 毛艳丽, 陈妍, 曲余玲. 烧结工序节能降耗的技术措施[J]. 冶金能源, 2010, 29(5): 9-11.
- [24] H. J. Lehmkuhler, H. Staeubner, R. H. Hanewald. Reclamation of iron and steelmaking Dusts, Sludge and Scales using the INMETCO Technology[C]. Pretreatment and Reclamation of Dusts, Sludge and Scales in steel Plants, McMaster Symposium, 1993, 21: 237.

- [25] E. Furlani, G. Tonello, S. Maschio. Recycling of steel slag and glass cullet from energy Saving lamps by fast firing production of ceramics Waste Management[J]. 2010, 30: 1714-1719.
- [26] 张瑞年. 浅谈烧结节能降耗的技术途径和措施[J]. 烧结球团, 2003, 28(3): 18-20.
- [27] 梁雪梅, 朱德庆, 姜涛等. 烧结节能技术现状与发展[J]. 烧结球团, 2000, 25(4): 1-4.
- [28] 王炜, 王珂, 李连海等. 莱钢降低 265m² 烧结机工序能耗的实践[J]. 冶金丛刊, 2011(1): 35-38.
- [29] 周继程, 郇秀萍, 上官钦等. 我国烧结工序能耗现状及节能技术和措施冶金能源, 2010, 29(2): 23-26.
- [30] 冯娟. 首钢烧结节能的实践[J]. 烧结球团, 2004, 29(1): 53-55.
- [31] Ball D Fetal. Agglomeration of Iron ores[M]. London: Heine inann Educational Books Limited, 2003: 21-27.
- [32] Ryan Robinson. High temperature properties of by-product cold bonded pellets containing blast furnace flue dust [J]. Thermochemica Acta, 2005, 432: 112-123.
- [33] 韩晓东, 刘艳辉. 鞍钢炼铁总厂 360m² 烧结机的节能降耗实践[J]. 烧结球团, 2010, 35(1): 56-58.
- [34] Loo C E, Hutchens M F. Quantifying the Resistance to Airflow During Iron Ore Sintering [J]. ISU Int, 2003, 43: 630-633.
- [35] 王中林. 烧结机降低工序能耗技术措施的研讨[J]. 冶金动力, 2005(2): 83-84.
- [36] B·Vanderhyden, I Borlee, J M·Brouhon. Impact of waste gas recycling on sintering performances and emissions[C]. IRO·NMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS, 1996: 389-397.
- [37] 庞秋林, 万爱福, 李新兵. 降低烧结返矿率攻关实践[J]. 烧结球团, 2004, 29(5): 55-57.
- [38] 邢宏伟, 李东亮, 张玉柱等. 配加高磷铁矿的烧结杯实验[J]. 河北冶金, 2012(3): 3-8.
- [39] 刘卫东. 不锈钢除尘灰的再利用研究与实践[J]. 炼钢, 2011, 27(6): 66-69.
- [40] Hannu Tapani Makkonen, Jyrki Heino, Leena Laitila. Optimisation of steel plant recycling in Finland: dusts, scales and sludge[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2002, 35: 77-84.
- [41] 王玮, 孟令和. 除尘灰综合利用技术的开发与应用[J]. 中国资源综合利用, 2011, 29(2): 23-26.
- [42] 申勇, 张海民, 孙江美. 均匀配加除尘灰措施在安钢 360m² 烧结系统的应用[J]. 河南冶金, 2008, 16(4): 32-33.
- [43] 刘德军, 郝博, 马光宇. 炼铁除尘灰再利用方法研究[J]. 莱钢技术, 2012, 374(2): 9-14.
- [44] 赵金龙, 冯少武. 石钢烧结厂配用除尘灰的生产实践[J]. 烧结球团, 2001, 26(6): 42-44.
- [45] 彭志坚, 张斌, 郑银珠等. 水钢混合型除尘灰造小球二次利用试验研究[J]. 矿产综合

- 利用, 2010(2): 10-11.
- [46] 彭志坚, 陈黔湘, 张东升等. 水钢烧结料掺入除尘灰小球的试验研究[J]. 钢铁研究, 2010, 38(3): 36-40.
- [47] Z. C. Guo, Z. X. Fu. Current situation of energy consumption and measures taken for energy saving in the iron and steel industry in China [J]. Energy, 2010, 35(11): 4356-4360.
- [48] 杨华明, 邱冠周, 唐爱东. CaCl_2 对烧结矿 RDI 的影响[J]. 中南工业大学学报, 1998, 29(3): 229-230.
- [49] 张展雷, 吕娟珍. 提高烧结料层透气性的实践[J]. 烧结球团, 2004, 29(4): 52-54.
- [50] 张克诚, 朱德庆, 李建. 高铁低硅高料层烧结研究[J]. 烧结球团, 2003, 28(2): 1-5.
- [51] 张玉柱, 冯向鹏, 李振国. 提高低硅烧结矿强度的研究及在生产上的应用[J]. 钢铁, 2004, 39(8): 39-40.
- [52] 苏彦辉, 黄亚玲, 齐凤来等. 唐钢降低烧结固体能耗的实践[J]. 冶金能源, 2011(5): 10-11.
- [53] 孙秀丽. 本钢三烧新建工程的节能降耗措施[J]. 金属世界, 2009(6): 15-17.
- [54] Wang S, Gao W, Kong L. Formation mechanism of silicoferrite of calcium and aluminium in sintering process[J]. Iron making and Steelmaking, 1998, 25(4): 296-301.
- [55] 唐贤容. 烧结理论与工艺[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1996.
- [56] 欧大明, 孙骐, 沈红标. 焦粉粒度对铁矿石烧结过程的影响[J]. 钢铁, 2008, 43(10): 8-12.
- [57] 刘竹林, 陈子林, 汤乐云. 烧结工艺优化的试验研究[J]. 钢铁, 2006, 41(5): 15-19.
- [58] PENG Cui, GUO Zhan cheng, ZHANG Fu li. Existing state of potassium chloride in Agglomerated sintering dust and its water leaching kinetics[J]. ScienceDirect, 2011, 21(8): 1847-1854.
- [59] 邢建民, 高丙寅等. 安钢烧结厂提高烧结矿强度的措施[J]. 烧结球团, 2008, 33(3): 43-46.
- [60] 陈平, 王常秋. 浮选赤铁精矿烧结节能降耗的实践[J]. 烧结球团, 2004, 29(5): 51-54.
- [61] 张永中, 曹建民. 马钢一铁烧结系统的技术进步与节能降耗[J]. 烧结球团, 2006, 31(3): 37-40.
- [62] 宋国良, 付志华, 张全. 烧结机增产节能的途径[J]. 钢铁研究学报, 2000, 12(6): 26-29.
- [63] 刘竹林. 烧结矿 FeO 含量的影响因素探讨[J]. 重庆科技学院学报, 2005, 7(1): 8-9.
- [64] 郝素菊, 蒋武锋, 白彦东等. 石灰活性对烧结矿中铁酸钙结晶形态的影响[J]. 烧结球团, 2007, 32(5): 5-7.
- [65] 于素荣, 周节旺, 于淑娟等. 碱度对鞍钢烧结矿产、质量的影响[J]. 烧结球团, 2007, 32(5): 8-10.
- [66] 彭丹. 八钢 265m² 烧结机节能降耗实践[J]. 新疆钢铁, 2011(4): 27-29.

致 谢

光阴荏苒，不知不觉间三年的美好时光就要结束了，将要离开美丽的武汉科技大学校园，心中些许不舍。在这学习的三年，是我人生中最美好的时光，感谢这些年一路陪我走过的老师和同学们。

本论文是在杨大兵老师的悉心指导下完成的，从论文选题到完成，杨老师都倾注了大量的心血，在实验过程以及论文撰写等方面精心指导、悉心教诲，在此向他表示深深的感谢，他渊博的知识、严谨的治学态度以及对事业的执着追求使我受益匪浅。另外，实验过程中还得到了沈进杰、王永刚、许光、徐佳鑫、丁宝成等同学的大力帮助，在此一并表示感谢。

最后还要感谢我的家人。他们时刻牵挂着我，支持着我，鼓舞着我，是他们的默默付出为我创造了安心学习的条件，是他们的不懈支持给了我永不放弃的勇气，使我能够不断成长，不断进步。要感谢的人很多，不能一一道谢。我会永远怀着一颗感恩的心记住那些曾经帮助过我的人，你们留给我的，是最美好的回忆；你们教给我的，是最宝贵的财富！

攻读硕士期间发表及待发表论文

- [1] 杨大兵, 江剑等. 水钢烧结工艺参数优化的试验研究[J]. 武汉科技大学学报, 2013, 31(1): 6-9.
- [2] 杨大兵, 江剑等. 添加除尘灰对烧结生产的影响的试验研究[J]. 武汉科技大学学报(已录).