

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得宁夏大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名： 

时间： 2015 年 5 月 30 日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解宁夏大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意宁夏大学可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

研究生签名： 

时间： 2015 年 5 月 30 日

导师签名： 

时间： 2015 年 5 月 30 日



摘 要

近年来,随着各专业学科研究的交叉融合和推动,新型建筑材料的研究和实用也正以十分惊人的速度发展着,将不同功能属性的矿物掺合料加入混凝土中的探索和实践,已经成为建筑材料重要的发展趋势之一。Ⅲ级粉煤灰是火力发电厂产生的主要工业废料,其被称为“人工沙尘暴”,产量巨大,不仅占用土地,影响环境,又对很多产业带来了经济压力。结合市场调查和分析,借鉴前人已研究的相关成果,确定了Ⅲ级粉煤灰在常用 C30 混凝土中的应用研究这一课题。

以高效和广泛地利用为研究最终目标,确定以常用强度等级 C30 混凝土为主要研究对象,Ⅰ级粉煤灰掺量为基准,设定砂率 S_p 、泵送剂掺量 PA 、Ⅲ级粉煤灰的等效率 E_p 为主要因素,设计正交试验 $L_9(3^4)$ 方案和以Ⅲ级粉煤灰等效率 E_p 为因素的单因素试验方案,研究掺Ⅲ级原状粉煤灰对混凝土强度的作用规律,探究其在 C30 混凝土中应用的可能性和合理掺量。试验研究表明:Ⅲ级粉煤灰混凝土强度与砂率值呈负相关关系,随等效率、泵送剂掺量的增大,呈先增大到一个峰值后再下降的关系,等效率 E_p 最优值为 1.0 左右(合理值 0.8 左右),最优组合为:砂率 36%、泵送剂掺量 2.8%、等效率 1.0。其中,影响Ⅲ级粉煤灰混凝土强度较大的是等效率和砂率。

在强度试验结果的基础上,以Ⅲ级粉煤灰取代率 f 和镁渣掺量 m 为因素,设计混合均匀试验方案 $U_{12}(6,4)$,探索Ⅲ级粉煤灰和镁渣耦合对混凝土抗压强度与碳化深度 C_d 的作用规律。对试验数据结果进行最小二乘的拟合,建立非线性关系数学模型。研究表明:关于混凝土的强度,镁渣掺量的影响大于粉煤灰取代率的影响,镁渣掺量不大于 49% 时为正效应,粉煤灰取代率为负效应,二者的耦合效应为正,有利于混凝土强度的增长,合理组合为 $f=36\%$, $m=5\%$ 。关于混凝土的碳化,镁渣掺量的影响低于粉煤灰取代率的影响,粉煤灰取代率为正效应,镁渣掺量不大于 33.8% 时为负效应,二者耦合为负效应,有助于混凝土的抗碳化。

用Ⅲ级粉煤灰可配制满足和易性、强度和抗碳化性能要求的 C30 混凝土。

关键字:Ⅲ级粉煤灰,混凝土,力学性能,耐久性能

Abstract

In recent years, with interdisciplinary research merging and promoting, research and practical on new building materials are developing in a rapid rate. The functional properties of different mineral admixtures are mixed in concrete have been explored and practiced, also it has become an important research trend. Grade III fly ash is the main industrial scrap from the electric field, been called "artificial sandstorm", grade III fly ash has a huge production, not only occupy the land and impact environment, also bring the economic pressure on some companies, combining with the market research and analysis, learning from the results of previous studies, defining the study named the research of the C30 concrete mixed grade III fly ash.

In order to make use of grade III fly ash effectively and fully, to C30 concrete that used commonly as the research object, in the test, with the grade I fly ash as the basis, sand coarse aggregate ratio, pumping agent dosage, equivalent efficiency of grade III fly ash etc. as the factors, the the scheme L₉(3⁴) orthogonal test and single factor test were designed. Then, action law of the basis and original grade III fly ash influence on the workability and compressive strength of concrete was contrasted and studied, also mechanism, possibility, and reasonable dosage are studied. The results shows that: the compressive strength of concrete mixed grade III fly ash decreases with the increase of the sand coarse aggregate ratio and increases at first then decreases with the increase of equivalent efficiency and the quantity of pumping agent, and the optimal equivalent efficiency is 100 percent. (reasonable value about 80%). The best combination is: sand coarse aggregate ratio 36%, pumping agent dosage 2.8%, equivalent efficiency 1.0. The main factors influencing the strength of concrete is fly ash replacement rate and sand coarse aggregate ratio.

On the basic of compressive strength of concrete, Using the grade III fly ash replacement rate and magnesium slag content as the factors the mixed test scheme U₁₂(6,4) test was designed, research on the strength and carbonization rules of concrete by experiment in two factors coupling conditions was designed. The results were dealt by using least squares, building the nonlinear regression mathematical model to exploring the action law of strength and carbonization depth for concrete. The results shows that: The effect of grade III fly ash replacement rate on strength of concrete is negative, of magnesium slag content when not greater than 49% is positive, the coupling effect of fly ash and magnesium slag is positive. reasonable combination of grade III fly ash and magnesium slag is f=36%, m=5%. In carbonization test, the main factors influencing the carbonization of concrete is fly ash replacement rate, followed by magnesium slag content. The effect of grade III fly ash replacement rate on carbonization of concrete is positive, of magnesium slag content when not greater than 33.8% is negative, the coupling effect of fly ash and magnesium slag is negative. Also inhibiting the growth of carbonation depth.

Grade III fly ash can made qualified concrete with workability, strength and carbonation.

Key Words: grade III fly ash, concrete, strength performance, durability performance

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 建筑与建材行业的发展与趋势.....	1
1.1.2 混凝土的发展.....	2
1.1.3 配合比设计方法.....	3
1.1.4 粉煤灰与粉煤灰混凝土.....	4
1.1.5 III级粉煤灰混凝土研究的必要性.....	4
1.2 III级粉煤灰混凝土研究现状.....	5
1.3 研究内容.....	7
1.4 研究目标.....	8
1.5 本研究拟解决的关键问题.....	8
1.6 研究方法.....	8
1.7 技术路线.....	9
第二章 混凝土配合比设计原理.....	10
2.1 初步配合比设计.....	10
2.1.1 水胶比 W/B	10
2.1.2 用水量和外加剂.....	11
2.1.3 胶凝材料、掺合料和水泥用量计算.....	12
2.1.4 砂率.....	12
2.1.5 粗、细骨料用量.....	12
2.2 配合比试拌与调整.....	13
2.2.1 流动性调整.....	13
2.2.2 保水性调整.....	13
2.2.3 粘聚性调整.....	14
2.2.4 混凝土配合比强度测定.....	14
2.3 III级粉煤灰 C30 混凝土概念设计.....	14
2.4 本章小结.....	14
第三章 原材料试验及其基本性质.....	15
3.1 胶凝材料.....	15
3.1.1 水泥.....	15
3.1.2 粉煤灰.....	15
3.1.3 镁渣.....	16
3.2 骨料.....	16
3.2.1 粗骨料.....	16

3.2.2 细骨料.....	17
3.3 外加剂.....	17
3.4 拌合水和养护水.....	17
3.5 本章小结.....	17
第四章 III 级粉煤灰混凝土力学性能试验.....	18
4.1 方案设计.....	18
4.1.1 单因素试验方案设计.....	18
4.1.2 正交试验方案设计.....	18
4.1.3 混合均匀试验方案.....	19
4.2 试验原材料.....	21
4.3 试验方法.....	21
4.3.1 混凝土拌合方法.....	21
4.3.2 混凝土坍落度与扩展度试验方法.....	21
4.3.3 混凝土试件成型及养护方法.....	21
4.3.4 混凝土立方体抗压强度测定方法.....	22
4.4.5 单因素试验结果与分析.....	23
4.5 正交试验结果与分析.....	24
4.5.1 混凝土抗压强度的极差分析.....	25
4.6 混合均匀试验结果与分析.....	27
4.6.1 模型建立.....	28
4.6.2 效应分析.....	28
4.6.3 单因素效应.....	28
4.6.4 边际效应.....	29
4.6.5 耦合效应.....	30
4.6.6 强度预测.....	30
第五章 III 级粉煤灰混凝土耐久性能试验.....	32
5.1 混凝土碳化机理.....	32
5.2 影响混凝土碳化的因素.....	32
5.3 试验原材料.....	33
5.4 方案设计.....	33
5.5 混凝土碳化深度测定方法.....	33
5.6 结果与分析.....	34
5.6.1 模型建立.....	36
5.6.2 效应分析.....	39
5.6.3 单因素效应.....	39
5.6.4 边际效应.....	40
5.6.5 耦合效应.....	40

第六章 结论与展望.....	41
6.1 结论.....	41
6.2 存在的不足及展望.....	42
参考文献.....	43
致 谢.....	46
个 人 简 介.....	47
论文发表情况.....	47

1 绪论

1.1 研究背景

1.1.1 建筑与建材行业的发展与趋势

改革开放以来,我国经济建设、城镇化和基础设施建设得到了快速蓬勃发展^[1,2],建筑行业作为地方性支柱产业也有了突飞猛进的进步和发展。城市中高楼林立,各种民用、商用、辅助性地标建筑^[3,4]如春笋般拔地而起。从结构体系的日益成熟到建筑外观的唯美多变^[5,6],再到建筑材料的快速更新换代^[7,8],建筑行业可谓百花齐放。同时,宁夏地区从中阿经贸洽谈、双区(综合保税区、内陆经济开放区)建设的国家战略基础阶段迈入了综合发展的冲刺阶段^[9],成为了我国面向阿拉伯国家合作的桥头堡与西部经济发展阵地。因此,在该大背景下带动了宁夏的建筑行业的大发展,如银川市阅海中央商务区的工程建设。作为面向世界的合作地区,为尽快与国际化都市接轨,宁夏地区的工程建设亦需要走在发展前沿。

随着工业、化学、物理等专业的深刻发展,建筑行业发展也是蒸蒸日上、日新月异,新技术、新工艺、新材料更叠待出,带动了整个行业和其他产业的积极发展。其中,绿色建筑作为国际共识与我国建筑行业发展政策要求,已经成为建筑行业的发展方向,其中“最大限度的节约资源”^[10,11]是绿色建筑概念的重要一环,为全面实现建筑材料的合理利用和变废为宝,选择何种建筑材料对各类工程建设起着至关重要的作用,其不仅能从经济成本上得到控制,同时对环境产生了积极影响。所以,建筑材料的科学研究也成为当今建筑行业发展趋势的重要分支,这也要求混凝土这一最重要的工程材料有更为广阔的进步,在保证其工作性、强度、抗碳化能力等功能要求的基础上,如何利用其他工业废料和掺合料,变废为宝,遏制生态环境恶化是亟待解决的社会化和科学性问题。前人已经在这些方面做了大量的研究和贡献,如工业废料转化生产为建筑砌块、建筑砂浆^[12,13]等,推动了建筑行业的发展,一定程度上也减少了开山挖地带来的不利影响,产生了积极的市场和环境保护效应。但是,如今仍有大部分工业废料不能得到深入和广阔的应用,这也成为了当前建筑材料研究的难点、热点和急需解决的问题。宁夏地区自本世纪伊始,建筑行业得到了飞速发展,基础设施建设突飞猛进,然而在建筑材料的科学利用上仍与其他省市有很大距离,工业废料利用率不高,如大量应用的粉煤灰主要以 I 级和 II 级为主,只占该废灰的 1/3 左右,剩余 2/3 的 III 级粉煤灰尚没有得到有效利用^[14],不仅制约了行业的可持续发展,同时对大自然生态体系的维护工作产生了极大的危害。

宁夏地区混凝土生产企业数量较多,但近年来的科学生产和可持续发展势头不高,进步不大,限制了自身和行业发展。宁夏众昊混凝土有限公司力求科学发展,本着满足工程质量要求,减少生产成本,加强新产品的研发应用为目的,提出了与高校联合研究,对“III级粉煤灰在 C30 混凝土中的应用研究”这一课题进行研究,本文的研究内容属该课题的一部分。

近年来,建筑新材料的深入研究和应用已经成为了建筑行业研发和发展的重要趋势,工业废料运用于混凝土的研究和实际应用也得到了长足的进步,但大量的工业废料仍以掩埋、堆放等形式存

在,产生了其他的社会和经济问题。因此,深化利用现存废料和变废为宝是当前亟待解决的行业问题。

1.1.2 混凝土的发展

从近两百年的实用历史和对未来预测来看,混凝土作为当今工程界最广泛和最重要的建筑材料的地位仍然无法动摇。其运用在建筑工程中,对人们的生活带来便利,同时在水利、桥梁道路、港口航天等方面,也起到了无法替换的作用和贡献。随着工业技术的发展,混凝土的生产方式也有了极大改变,从传统的工程现场配制到如今的工厂机械化预拌制^[15,16],其生产效率和质量得到了极大的改善。自混凝土材料诞生以来,经过前人的不懈研究和努力,其由传统的四组份量体逐渐发展成为较多的组分量体,如掺入粉煤灰、减水剂、镁渣、硅灰等掺合料,实用目的在于:不仅使混凝土的质量和工可性得到了提高,功能化得到了多样性应用,同时还一定程度的降低了成本,利用了长久以来难以处理的各类工业废料,保护了生态环境。随着研究的深入,混凝土材料按照其历史发展和性能,基本可以分为以下几个类别:

(1) 普通混凝土(传统混凝土)

普通混凝土是混凝土材料出现的最初形式,也称:传统混凝土。其由水、水泥、粗骨料、细骨料四组分组成,强度较低,工作性能较差,但能够满足基础生产和大部分日常使用。经过长时间的研究和实际验证,普通混凝土的配制理论成熟,生产形式方法简单,是早期工程建设的最主要使用材料。抗压强度与水灰比的线性关系这一研究成果^[17]是混凝土强度设计的标杆性理论。经理论研究和实际验证,影响普通混凝土泵送性及和易性的因素有很多,如单位用水量、砂率、砂的级配、砂的粗细、粗骨料的类型等。普通混凝土的耐久性能取决于各组分之间的相互作用、原材料的质量和属性,同时提出了抗碳化性能、抗冻性能、抗腐蚀性能等理论体系。

(2) 高强度混凝土

规范定义高强度混凝土是指其强度不小于 C60 的混凝土。经过前人的研究和努力,现今已经能够试验配制和生产出超过 C120 甚至更高的混凝土^[18],中联重科于 2010 年将 C120 混凝土泵送高度达到了 316 米,标志着高强混凝土实际工程应用走向了新的高度^[19]。为达到高强度的特点,高强混凝土的水胶比较低,因此其配制需要掺入外加剂,保证其和易性能,即高效减水剂的辅助性改善。相比普通混凝土,高强混凝土对于原材料的要求较高,如粗骨料的饱和单轴抗压强度、粒形、粒状、粒径等有明确的标准^[20-21]要求。高强度混凝土的强度和耐久性能还主要取决于其密实程度等,普通混凝土的力学破坏主要是其结构内部水泥石与集料界面处产生了不紧密又存在孔隙裂隙的力学传导缺陷地带,从而造成了强度等下降。因此,高强混凝土配制的关键在于如何提高密实度减少微观力学缺陷。

(3) 高性能混凝土

经使用常见混凝土工程材料和生产工艺方式配制而成的满足高和易性、泵送性、力学性能、稳定性和耐久性的混凝土,被称为高性能混凝土。高性能混凝土较普通混凝土掺入了各类具有特殊物理性质、化学成分和明显作用的掺合料,用以提高或满足其不同的使用功能,如粉煤灰、早强剂、粘合胶等。不同矿物掺合料对不同功能的混凝土起着不一样的贡献和作用,如引气剂提高抗渗能力,

粘合剂提高钢筋和混凝土的错动摩擦力,掺早强剂混凝土能够迅速使机场路面得到修复,混凝土的产物性能得到了改观。工业产和化学制备出的掺合料有很多,如掺加粉煤灰的混凝土,其掺合料具有减水效力,降低水灰比的作用,且后期强度增长周期长,有利于建造年代久远的混凝土结构^[14]。同时,各类外加剂的出现也使得高性能混凝土得到了长足的发展,如聚羧酸、葡萄糖酸钠缓凝剂等。高性能混凝土是可以依据不同建设要求而设计制备的建筑材料,其功能性多样,具有良好的实际生产导向性,在 21 世纪建筑材料行业中有着重要地位。

1.1.3 配合比设计方法

将品质合格的胶材、掺合料、骨料等原材料按各自比例占值系数混合搅拌,使获得的混凝土具有良好的力学特性,满足工程现场工作性和不同环境下的耐久性,就形成了混凝土配合比设计的科学理论和实现方法^[22-23]。混凝土配合比设计是以原材料的比率关系值的确定为计算目标,配制成所期望的混凝土,同时尽力减少材料成本和生产经济成本,达到工程现场需求和高效能应用。因混凝土原材料的属性不同,科学的配比、机理配合、平衡关系是配合比设计的重中之重。设计计算理论分类:

(1) 普通混凝土的配合比设计理论

先进行理论计算再进行试验配制,根据混凝土的各项性能指标,最终通过比例关系调整是普通混凝土配合比最为常用的设计方法。其设计方式又可分为假定容重法和绝对体积法来进行组分比例的计算确定。

假定容重法主要是以混凝土振捣密实后的湿容重假定值为设计基础,以水泥、水、粗骨料、细骨料的比重为组合依据,进行整体计算。其设计方法较为简单,但需要测定原材料的物理性质等,同时大方量生产混凝土时,假定容重法的计算可能会导致原材料用量的不准确。

绝对体积法也是一种常用的配合比设计方法,在设计理念上是不同于假定容重法的。其是将混凝土各原材料进行颗粒组合和逐级填充进行计算,以水泥、水、粗细骨料的绝对体积与混凝土结构内部孔隙空气的体积之和来权衡设计,即水泥、水和细骨料组成砂浆整体,逐步填充在粗骨料的空隙中,最终形成完整稳定的骨架形态的结构体系^[24]。

利用以上两种配合比设计方法,在经过初步计算组合后,得出混凝土组分比例系数和材料用量,经过拌制、成型、标准养护、力学性能及耐久性能的试验工作后,对其和易性、抗压强度等进行检验,若各项性能达到规范标准的要求,则可使用该配合比进行生产运用;如不能满足使用要求,则需要进一步对该配合比进行调整设计,直到其满足要求。

经过多年研究,假定容重法和绝对体积法对设计普通混凝土的技术已经十分成熟,其计算简单,运用范围广。

(2) 高性能混凝土的配合比设计理论

这一设计概念首先由西方欧美国家提出,有以下特点:综合性能好,自流性和自密实性好,力学特性优良,抗碳化、抗冻、耐腐蚀、抗高温等耐久性能好,体积、结构性稳定、轻质高强等。

经过不懈地研究,高性能混凝土的设计方法、方式、思路概念等可谓百花齐放。其中,革命性的做法是加入了各类取代物及矿物掺合料。许多矿物掺合料的化学成分、粒体结构等,都成为研究

高性能混凝土的设计依据。具有类似水泥功能、能够产生胶合粘结、膨胀性的矿物掺合料以不同比例取代传统胶凝材料，经与其他原材料拌制成型，对试配出的混凝土进行试验检测和相关调整，形成了一套理论与实践相结合的设计方法，如粉煤灰的革命性利用，是一次历史性的跨越。

逆填配比设计法^[25]，组分材料的四项全计算方法^[26]等高性能混凝土的设计计算方法也相继出现，使其得到实践运用并拓展了工程技术人员的思路和视野，弥补了理论不足，也开启了新的研究篇章。

1.1.4 粉煤灰与粉煤灰混凝土应用

粉煤灰是火力发电厂经燃煤后产生的黑灰色细粒粉末，常常作为工业生产废弃物为人们所摒弃。其产量巨大、污染环境、存放占用土地，因此如何开发性的利用和消除其影响已成为世界各国学者努力研究的工作。随着电子显微镜、化学科学等技术的突破，研究人员们越来越深化和全面的了解了粉煤灰，其应用方面也得到了拓展：

(1) 建材方面的应用

粉煤灰的突出性能是其化学离子成分，如硅离子、铝离子等，此外其具有类似圆球的光润玻璃珠体态、活泼的化学反应能力(活性)、胶合效应和微小集料填充效应^[11]等特点，所以可以用作取代水泥和其他集料的掺合料运用在混凝土中，其改善了混凝土的流动性、可泵送性，提高混凝土的抗拉劈裂及抗压强度，亦减小收缩裂缝、防渗和抗氯离子腐蚀等，其突出的表现已被广大技术人员接纳和得以推广，市场需求大幅提高。

某些大体积、大方量混凝土的工程建设当中也能看到粉煤灰的身影，中国的长江三峡水电站坝体结构中掺加了部分 I 级灰，显著的降低了结构内部温度，抑制了因温度持续增高而产生的混凝土结构内部裂隙，改善了混凝土的亚微结构，后期强度得到了长久的发展，同时提高了水电站的安全性能。

与此同时，粉煤灰在建筑砌块、砂浆、胶材等方面的应用也很广泛，如制备水泥、隔墙砌块等。各类交通工程，水利工程等建设中也广泛的应用到了粉煤灰混凝土。

(2) 农业方面的应用

技术研究人员利用粉煤灰特有的属性和功能已探索生产出很多农业肥料，并予以了实用。如硅钾肥中的粉煤灰含有大量的 Si、Ca、Mg、Fe 等利于作物生长的化学元素，其作为农产品所需的微量元素肥料应用在了农业生产中。此外，粉煤灰肥料可合理的调节土壤酸碱度并平衡农用土壤组分营养，改良了菌类、青菜等农产品的品质并提高了产量和经济产值^[27]。

1.1.5 III 级粉煤灰混凝土研究的必要性

本文以 C30 III 级粉煤灰混凝土为研究对象。关键研究内容和技术包括抗压强度、工作性、耐久性等，结合可持续发展这一战略目标，III 级粉煤灰混凝土的研究应时而生。我国官方发布了其使用的相关规定，规范地区分了不同级别粉煤灰在钢筋混凝土构件中的应用范围和主要功能，对设计、施工和工程材料的选取提供了建议^[28]。对试验对象的研究必要性主要归纳总结如下：

(1) 市场需求凸显

I级和II级粉煤灰已经取得了大量工程技术人员的广泛认可并积极应用在了相关工作之中,然而其数量较少,且只占粉煤灰产生总量的3/10左右,夏季施工高峰时出现了供应与需求不平衡的紧张情况,然而III级粉煤灰虽然产量巨大,但未受到应有的高效开发应用,多废弃于灰场致使环境污染,浪费稀缺土地资源又增加了电厂经营费用。因此,从理论和技术手段上研究III级粉煤灰的力学性能、耐久性、工作性等方面,对于III级粉煤灰的增效利用有着十分重要的意义,同时可以平衡市场供应需求,以废渣变宝的方式保护生态环境,且减少不必要的经济开支。

宁夏粉煤灰资源丰富,主要为F类低钙灰,因此,进行III级粉煤灰在常用强度等级C30混凝土中的应用研究与开发,对劣质粉煤灰的资源化利用和节能减排具有重要意义,同时对于实现III级粉煤灰的地区化综合利用有重要的现实意义。

(2) 绿色建筑与节约资源需求

绿色建筑的核心概念之一是“节约资源”,然而自工业革命以来,人类的生产生活活动产生了大量的工业废料,如III级粉煤灰。随着人们对环境保护的迫切希冀,废渣废料的处理亟不可待。同时,资源成本的逐渐升高,混凝土行业的生产成本也随之增加,建筑行业亟待出现经济成本低、环保可循环利用的建筑材料的诞生。因此,如何做到变废为宝、循环利用废料成为一项重要的研究内容。

(3) 环境保护

大量的工业废渣被遗弃在大自然当中,对水资源、大气、土地资源造成了十分恶劣的影响。III级粉煤灰被很多人称为“人工沙尘暴”,对大气环境产生了不利影响。

综上所述,结合绿色建筑的节约资源这一概念,同时考虑环境保护和混凝土功能性的发展需要,本文认为以掺工业废料等为主的混凝土是今后研究生产发展的重要分支和趋势。其中,对III级粉煤灰作为一个分支进行研究,结合市场走向和建筑行业发展认为是必要的。

1.2 III级粉煤灰混凝土研究现状

因为粉煤灰品质及属性不一,以其颗粒细度、烧失量等参数分为三个等级:即I级、II级、III级^[29]。其因组分复杂,颗粒缺陷、吸水性大且化学反应不活泼^[29,30],一般只能低限度地、简单地进行使用,此外其通常以素混凝土的形式用于路面、道牙砖等强度要求等级低的建筑材料中^[31]。一些文献进行了III级高钙粉煤灰混凝土强度、抗渗、抗碳化及与钢筋配合使用地探究^[14,32-36]。

表 1-1 粉煤灰分级和质量指标

粉煤灰等级	细度(45 μ m)		需水量比 (%)	含水量(%)	Cl ⁻ (%)	SO ₃ (%)	混合砂浆活性指数	
	气流筛, 筛 余量)(%)	烧失量(%)					7d	28d
I	≤12	≤5	≤95	≤1.0	<0.02	≤3	≥75	≥85(75)
II	≤25	≤8	≤105	≤1.0	<0.02	≤3	≥70	≥80(62)
III	≤45	≤15	≤115	≤1.5	--	≤3	--	--

Ⅲ级粉煤灰的性质特点:

(1) 一般来说, 由于Ⅲ级粉煤灰的颗粒较粗, 且颗粒表面有部分裂隙(品质差), 因此其在火山灰反应时, 消耗水量较多, 即: 需水量比高。导致火山灰反应速率缓慢, 从而影响了混凝土的强度及增长速度。同时, 需水量大, 亦会影响其运用在混凝土中的工作性。

(2) Ⅲ级粉煤灰中存在一些灼烧未完全的碳质等杂质, 此类杂质阻碍了Ⅲ级粉煤灰颗粒的水化, 同时当其应用在混凝土中时, 易产生裂隙, 降低了局部密实度, 产生缺陷。长久来看, 会对混凝土的强度及耐久性产生负面影响, 影响混凝土质量。

(3) 灰质废料, 易飞扬, 影响环境, 储存费用高。Ⅲ级粉煤灰被许多人称作“人工沙尘暴”, 呈灰白色或灰黑色, 由于其总体颗粒小, 质量轻, 易受风的携带, 从而在一些城市中导致空气质量下降, PM2.5 指数增高。同时, 很多电厂为防止Ⅲ级粉煤灰的污染, 大多进行填埋或专门储存管理, 不仅浪费了土地, 也增加了相应的管理费用, 造成一定的经济损失。

飞灰是国外学者对粉煤灰的定义和称谓, 他们对其做了很多前沿性工作和研究^[37, 38], 在我国, 各个专业生产领域中都能见到其活跃的身影, 同时已取得成果带动了生产力和社会影响力。综合品质不佳的Ⅲ级粉煤灰亦得到了深化研究和实际工程认可, 上世纪九十年代于西南部建设的普定水电站坝体因施工期间对混凝土方量需求量极大而缺少品质较好的粉煤灰, 致使相关单位和技术人员应用Ⅲ级粉煤灰加入了混凝土。在竣工几年后, 坝体混凝土各项指标和性能都满足要求, 且至今未发生不良问题, 在行业内启发了研究的高潮, 指出了新的研究方向^[39]。

随着近些年越来越多学者对Ⅲ级粉煤灰更加深入的研究和已实施的大量试验和实践, 对Ⅲ级粉煤灰的品质、属性有了更为准确的认识和评价, 其用作掺合料对混凝土的作用和贡献产生了富有预见性的成果。

杨东宁^[40]等人研究了用Ⅲ级粉煤灰代替水泥砂浆中的细砂, 分析研究了其掺加量等因素对砂浆强度的作用并提出结论: 对砂浆强度影响作用最明显的是Ⅲ级灰掺量, 且其品质的好坏优劣不会在水胶比较低情况下与其他等级灰质产生差别。

蒋晓曙^[29]等人测定了Ⅲ级灰细度并将试验混凝土的胶凝砂浆用量减少, 由此提出了超量取代这一概念, 所得出的混凝土耐磨性和力学性能数据经分析表明: 在减水剂和低品质较粗粉煤灰合理的共同作用下, 抗折强度结果与一般混凝土相差不大且耐冲耐磨损失不大, 属良好, 亦可节约水泥, 降低生产成本。

卢光全^[31]结合襄樊某学校的大面积空旷场地的基础垫层, 采取了Ⅲ级粉煤灰取代水泥百分之十五的配合比设计和跟踪分析, 后期的检测分析说明: 该灰质配制的垫层强度达到了业主要求的 15Mpa 以上, 满足设计单位的初衷并对其施工工艺做出了说明。

苏英^[41]等人使用不同优劣品质粉煤灰以求配制强度大于 30Mpa 等级的混凝土, 结果如下: 在试验内对于低品质灰混凝土强度来说, Ⅲ级灰掺量是主要影响, 且与一些优质灰混凝土的强度较为近似。

林志平^[42]将低品质粉煤灰(细度 30.2%, 属Ⅲ级灰)掺量水平定为 20%-50%, 以研究混凝土强度、弹性模量受灰质品质的影响。结果表明: 品质较低灰质的掺量可达 50%左右但不影响混凝土的性能需求, 其与基准组相比有一定不足但可以接受。

谷章昭^[43]等人以Ⅲ级粉煤灰(超量系数为 2.0)超量代替水泥的设计方法配制 C28 混凝土并评

价其受 Cl^- 侵蚀的影响, 试验中以 III 级粉煤灰作胶材代替水泥时, 水泥用量按照其取代值扣除减少。试验结果表现为: 掺 III 级粉煤灰组别的混凝土 Cl^- 扩散和钢筋锈蚀程度大于 I 级灰、但小于 II 级灰。因此地面及水位以下的混凝土结构可以使用 III 级灰混凝土, 并能满足相关性能要求。

赵亚明^[44]等人使用干排和湿排劣质级粉煤灰(细度分别为 43%、55% 三级粉煤灰)作为水泥的代替品, 引入取代量和超量系数, 取代率分别为: 0、10、15、20, 超量系数分别为: 0、1.3、1.5, 研究所配制混凝土的抗冻性能。经标准养护和龄期后, 掺干灰混凝土强度的发展速度高于掺湿灰, 说明干灰的化学活泼性较佳。冻融循环试验表明 III 级灰能够用作抗冻混凝土中且其取代率小于 15% 为宜。

蒋林华^[32]等人运用化学助剂与 III 级粉煤灰的化学反应原理研制出一种活性启发剂, 并对防止混凝土碳化做了大量研究工作。结果表明: 与众多研究结果相同的是, 试验内二氧化碳浓度为主要影响因素, 且启发剂能够激发 III 级灰的潜在性能以达到抗碳化和抗锈蚀的技术标准要求。

王元^[36]等人使用模糊数学理论, 建立数学模型对 III 级粉煤灰的品质进行评价并用其作为钢筋混凝土掺合料进行研究。通过理论研究和试验研究表明: 掺 III 级粉煤灰 10% 的混凝土, 其满足抗压强度、劈裂强度的使用要求, 与试验内的基准混凝土相比, 其耐久性结果也相差不大。因此试验内容不仅对 III 级粉煤灰在钢筋混凝土的实用提供了意见, 还打消了工程技术人员的使用顾虑。

张超^[45]等人以 III 级粉煤灰混凝土抗压强度为考核、评定依据, 并研究和分析了 III 级粉煤灰颗粒填充效应和水化性能在混凝土中的作用效果和机理。研究表明: 在该试验中所用的 III 级粉煤灰虽然品质不高, 但其物理性质较近似于 II 级粉煤灰, 灰质稳定且漂珠和多孔玻璃质颗粒数量接近, 其他杂质对品质作用很小。

应德标^[46]等人使用机械滚磨的方式对 III 级粉煤灰进行了加工处理, 使其产生不同细度梯度, 得出若在一定的细度和掺量水平范围内经过加工的灰质能够提升其活性和物理性能这一结论。

本课题源于对市场、粉煤灰行业及前人研究情况的调查和综合分析而来。经过对宁夏西夏热电厂的考察和走访, 了解到该厂的 I 级、II 级粉煤灰销往部分商混站, III 级粉煤灰均免费运往赛马水泥厂进行了二次加工, 同时, 运输费用由西夏热电厂负担, 每年的管理和运输费用近 10 万元, 对电厂的经济效益造成了一定的损失。宁夏众昊砷业有限公司, 每年 6-10 月因为粉煤灰供需不足, 导致部分生产的停产, 影响其经济效益。

结合对市场的走访和调查, 发现相关企业对于 III 级粉煤灰的再利用有很大需求, 因此结合市场需求, 同时从宏观上力求解决 III 级粉煤灰的污染、储存和占地等问题, 利用宁夏本地的原材料进行关键技术的研究, 为 III 级粉煤灰在宁夏地区的使用打下理论基础, 努力弥补每年因供需问题导致的经济效益不足, 因此, 本课题认为对 III 级粉煤灰工程化和材料化再利用研究有着现实意义。

1.3 研究内容

本文首先对相关试验的原材料的技术指标进行了规范的试验研究测定和检验, 之后采用正交试验的研究方法, 在作用机理上分析各因素对 III 级粉煤灰混凝土工作性和力学特性的影响规律和程度, 并使用数值分析方法(极差分析)综合的进行优化合理选择。同时, 以等效率 E_p 为单因素取 1.0、1.1、1.2、1.3、1.4 五个水平设计单因素试验方案。运用混合均匀试验方案 $U_{12}(6, 4)$, 研究 III 级粉煤灰取代率 f 和镁渣掺量 m 二因素耦合对强度和碳化深度的作用规律。本论文主要的研究内容是:

(1) 粗骨料的主要技术指标要求：含泥量、粒形、强度、级配及风化石含量。细骨料的主要技术指标要求；

(2) 掺合料的主要技术指标要求（Ⅲ粉煤灰、镁渣的细度、化学成分等）；

(3) 砂率、外加剂掺量、Ⅲ粉煤灰等效率对 C30 混凝土的工作性、强度的影响；

(4) Ⅲ级粉煤灰与镁渣耦合对 C30 混凝土抗压强度和碳化深度的影响；

(5) 机理分析与数学模型的建立。

1.4 研究目标

以Ⅲ级粉煤灰对 C30 混凝土的工作性、力学性能（抗压强度）、抗碳化等关键问题的作用规律为研究目标，为Ⅲ级粉煤灰在 C30 混凝土中的使用提供理论支撑和依据。

1.5 本研究拟解决的关键问题

(1) Ⅲ粉煤灰不同掺量下对 C30 混凝土强度特性的作用；

(2) Ⅲ粉煤灰与其他掺合料（镁渣）耦合作用下对 C30 混凝土强度和耐久性的影响；

1.6 研究方法

(1) 调查研究，查阅相关资料，通过阅读大量文献，熟悉混凝土的发展现状、基本的物理、化学特性；熟悉研究混凝土的基本理论研究方法、基本思路，为试验的顺利实施打下基础。

(2) 对试验用原材料进行基本指标的测定试验，尤其对Ⅲ粉煤灰的物理化学特性进行分析；

(3) Ⅲ粉煤灰等效率 E_p 、砂率 S_p 、外加剂掺量 PA 为因素设计正交试验方案 $L_9(3^4)$ 。等效率 E_p 的水平分别是 80%、100%、120%，砂率 S_p 的水平分别是 36%、40%、44%，外加剂掺量 PA 的水平分别是 2.6%、2.8%、3.0%，以研究上述因素对混凝土强度及和易性的作用机理。

(4) 设计单因素试验方案，着重研究Ⅲ粉煤灰混凝土工作性和强度随等效率变化的规律，以及确定正交试验方案中等效率的合理水平范围，等效率分别为 1.0、1.1、1.2、1.3、1.4。

(5) 以Ⅲ粉煤灰与镁渣耦合设计混合均匀试验方案 $U_{12}(6,4)$ ，对数据结果进行最小二乘回归拟合建立混凝土抗压强度、碳化深度 Cd 与粉煤灰取代率 f 和镁渣掺量 m 间的数学关系模型，研究二者耦合下混凝土的强度和碳化深度 Cd 变化规律和机理作用。

1.7 技术路线

本课题的技术路线如图 1-1 所示：

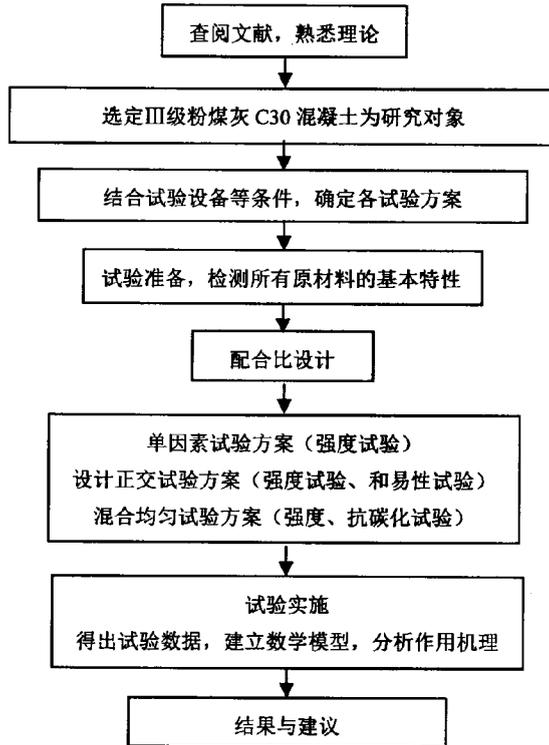


图 1-1 试验技术路线图

2 混凝土配合比设计原理

2.1 初步配合比设计

混凝土配合比设计的科学性和合理性是其能满足工程实际需要强度和耐久性的重要一环。

2.1.1 配制强度的确定

(1)根据国家规范，当强度等级不大于 C60 时其配制强度按公式 (2-1-1) 进行计算：

$$f_{cu,0} = f_{cu,k} + 1.645\sigma \quad (2-1-1)$$

式中：

$f_{cu,0}$ ——混凝土配制强度，kPa；

$f_{cu,k}$ ——混凝土立方体抗压强度标准值，kPa；

$f_{cu,i}$ ——第 i 组试件的强度，kPa；

(2)公式 (2-1-1) 中， σ 为混凝土强度标准差，计算公式如下：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_{cu,i}^2 - nm^2}{n-1}} \quad (2-1-2)$$

亦可查表取得，见表 2-1。

表 2-1 混凝土强度标准差

混凝土强度标准值	≤C20	C25~C45	≥C50
σ (kPa)	4.0	5.0	6.0

(3) 公式 (2-1-2) 中， m 代表 n 组试件的强度平均值，单位 kPa； n 代表参与统计的试件组数，不少于 30；试件的强度平均值计算如下：

$$m = \frac{\sum f_{cu,i}}{n} \quad (2-1-3)$$

2.1.2 水胶比 w/B

根据配制强度计算水胶比如下：

$$B/w = \frac{f_{cu}}{a_a f_b} + a_b \quad (2-1-4)$$

$$w/B = \frac{1}{B/w} \quad (2-1-5)$$

$$f_b = \gamma_m f_{ce} \quad (2-1-6)$$

$$\gamma_m = \gamma_1 \gamma_2 \cdots \gamma_n \quad (2-1-7)$$

式中:

w/B ——水胶比;

a_a 、 a_b ——回归系数, 按表 2-2 取值;

f_b ——胶凝材料 28d 胶砂抗压强度, kPa;

f_{ce} ——水泥 28d 胶砂抗压强度, kPa;

γ_m ——胶凝材料强度系数;

γ_i ——第 i 个胶凝材料强度系数, 与胶凝材料的种类、掺量有关。

表 2-2 回归系数 a_a 、 a_b 选用表

回归系数	碎石	卵石
a_a	0.53	0.49
a_b	0.20	0.13

2.1.3 用水量和外加剂

配合比设计时所要求的坍落度是确定单位用水量的主要依据。所用的水泥, 掺合料, 粗骨料, 细骨料, 外加剂的基本物理性质和化学性质也是影响坍落度的重要因素。进行配合比设计过程中, 单位用水量依据骨料类型及粗细程度进行确定, 可以查表获得。掺加外加剂时按以下步骤进行:

(1) 单位用水量计算

$$m_{w0} = m'_{w0} (1 - \beta) \quad (2-1-8)$$

式中:

m_{w0} ——实际用水量, kg;

m'_{w0} ——设计单位用水量, kg;

β ——外加剂的减水率, %。

(2) 外加剂掺量如下计算:

$$m_{a0} = m_{b0} \beta_a \quad (2-1-9)$$

式中:

m_{a0} ——外加剂用量, kg/m^3 ;

β_a ——外加剂掺量, %;

m_{b0} ——胶凝材料用量, kg/m^3 。

2.1.4 胶凝材料、掺合料和水泥用量计算

(1) 胶凝材料用量计算:

$$m_{b0} = m_{w0} B / w \quad (2-1-10)$$

(2) 掺合料用量计算:

$$m_{f0} = m_{b0} \beta_f \quad (2-1-12)$$

(3) 水泥用量的计算, 用胶凝材料总量减去掺合料用量即可获得。

2.1.5 砂率

砂率是配合比设计和实际工程应用当中至关重要的一个因素。

合理的砂率值选择是评价混凝土骨料填充度、自流密实和骨架强度作用的重要部分。当砂率过高时, 砂子与水泥浆组成的砂浆会出现干涩散落现象从而导致混凝土胶结能力变差, 砂浆对石子的包裹能力下降, 粘结摩擦带动石子流动的能力降低, 导致混凝土流动性不足; 当砂率过低时, 砂浆包裹石子不充分, 粘聚性变差, 流动性降低, 易发生泌水、泌浆现象, 亦会使泵送难度加大, 造成施工困难。同时, 混凝土保水性变弱, 对混凝土的运输和保塌产生了不利影响。

在强度方面, 不合理的砂率会导致强度下降。砂率过高或过低, 都会对砂浆与石子的粘聚能力起到下降作用, 导致混凝土内部结构出现应力传导缺陷的空隙, 加剧混凝土的受力破坏。同时, 低砂率影响砂子对石子的填充效应, 难以形成整体受力骨架;

同时, 要对砂率的含水率、含泥量进行严格测定。含水率的不同, 导致实际砂率的变化。若砂子中的含水率过高, 实际砂子总量减少, 无形间导致单位用水量的增多, 影响水胶比, 导致混凝土的和易性和强度发生变化。因此, 生产前严格查验含水率且进行“加砂减水”是科学确定砂率方法的重要环节。

砂率值可依据规范中的表格进行确定, 砂子的粗细、石子种类、粒径, 水胶比是确定砂率的重要因素。

2.1.6 粗、细骨料用量

石子和砂子的用量一般可以采用两种方法确定, 即体积法和质量法。相比体积法的精确优势, 质量法计算相对简单、实用。在一般的配合比设计中, 质量法被经常实用和推广。石子和砂子用量的计算过程如下式:

$$m_{b0} + m_{w0} + m_{a0} + m_{s0} + m_{g0} = m_{cp} \quad (2-1-13)$$

$$\beta_s = \frac{m_{s0}}{m_{s0} + m_{g0}} \times 100\% \quad (2-1-14)$$

$$m_{sg} = m_{cp} - (m_{b0} + m_{w0} + m_{a0}) \quad (2-1-15)$$

$$m_{s0} = m_{sg} \beta_s \quad (2-1-16)$$

$$m_{g0} = m_{sg} - m_{s0} \quad (2-1-18)$$

式中:

m_{s0} ——细骨料用量, kg/m^3 ;

m_{g0} ——粗骨料用量, kg/m^3 。

m_{cp} —— 1m^3 混凝土的假定质量, kg 。

β_s ——砂率, %;

2.2 配合比试拌与调整

配合比试拌是确定混凝土最终配合比和进行其他更深入研究的基础和前提工作。依据已经设计出的配合比进行混凝土拌制, 对其流动性、保水性、粘聚性等进行实际检查和分析, 由此找出问题和不足, 再进行配合比的调整和修正。配合比调整是依据试拌结果进行材料用量修正的过程。

2.2.1 流动性调整

流动性是混凝土施工和泵送的重要因素。经过试拌后, 测定其坍落度和扩展度, 比对设计坍落度是否相近。实际建设工程中, 驻工地现场的监理等其他技术人员要对混凝土进场坍落度进行检查, 且其值需在 $120-180\text{mm}$ 才算作符合质量要求, 因此制备混凝土时考虑其经时塌损且适当提高混凝土出场坍落度。

一般使用适当加水、调节外加剂掺量和砂率等方法来对混凝土的流动性进行控制和调整。合适范围内控制单位用水量 and 外加剂掺量是有效的, 但掺加过量易导致泌水离析和强度下降现象的发生。相比二者来说, 一般经验是改变外加剂掺量为主要调整方式, 若两者都无法解决问题, 则选择利用砂率或改变原材料的方式进行调整。

2.2.2 保水性调整

对保水性不佳的混凝土, 使用恒定水胶比且适当地变化砂率和胶凝材料用量, 会使得保水性能加强, 同时可用粉煤灰等亲水性强和细度低的材料进行调整控制。

2.2.3 粘聚性调整

在进行混凝土试拌后，观察和分析混凝土表征，若产生干散、泌水现象或石子颗粒突出堆摞，则粘聚性需要调整。砂率过高或过低，水泥和矿物掺合料用量过多或过低都会导致粘聚性不良，砂子级配不佳，也会对粘聚性产生影响。用水量过高过低，亦会影响。

因此，对混凝土粘聚性的调整方法主要是：调整合理砂率等。

2.2.4 混凝土配合比强度测定

经试拌且和易性合格后，使用最终配合比进行混凝土试件的成型养护，并在试验所要求龄期内对试件进行抗压强度检测和数据处理分析。一般来说，试件的强度应达到试验方案设计要求的强度等级才能进行后期其他性能的试验。

2.3 III 级粉煤灰 C30 混凝土概念设计

(1) 引入等效率概念：I 级粉煤灰中小于 $45\mu\text{m}$ 的颗粒含量与 III 级粉煤灰中小于 $45\mu\text{m}$ 的颗粒含量的比值此文称之为等效比。以等效比与 I 级粉煤灰掺量的积作为 III 级粉煤灰的基准掺量，实际掺量与基准掺量的比称为等效率 E_p 。

(2) 从化学成分和微观离子反应方面对 III 级粉煤灰与镁渣进行合理分析，且在二者耦合条件下进行混凝土抗压强度、抗碳化性能研究。

2.4 本章小结

本章主要介绍了配合比设计基本原理并对其计算过程与步骤做了说明，对配合比试拌的调整方法进行了总结，对 III 级粉煤灰 C30 混凝土的关键概念设计进行了归纳。本文中的所有试验均依照以上内容严格进行。

3 原材料试验及其基本性质

3.1 胶凝材料

3.1.1 水泥

本试验采用的两种 P.O42.5R 普通硅酸盐水泥分别为宁夏赢海建材集团生产的赢海牌水泥和宁夏赛马水泥厂生产的赛马牌水泥。赢海牌水泥检测结果见表 3-1, 赛马牌水泥检测结果见表 3-2, 其各项性能符合国家规范^[47]。

表 3-1 赢海牌 P. 042. 5R 水泥物理性能检测结果

测试 指标	凝结时间 (min)		抗压强度 (Mpa)		抗折强度 (Mpa)		安 定 性
	初凝≥ 45	终凝≤ 600	3d	28d	3d	28d	
实测 结果	90	170	28.7	48.4	5.1	7.8	合格

表 3-2 赛马牌 P. 042. 5R 水泥物理性能检测结果

规范 指标	凝结时间 (min)		抗压强度 (Mpa)		抗折强度 (Mpa)		安 定 性
	初凝≥ 45	终凝≤ 600	3d	28d	3d	28d	
实测值	100	150	32.1	48.6	5.7	8.1	合格

3.1.2 粉煤灰

本试验采用了两种类别的粉煤灰：I 级粉煤灰取自宁夏灵武电厂，III 级粉煤灰取自银川市西夏区电厂。检测结果详见表 3-3, 表 3-4, 其各项性能符合国家规范^[48]。

表 3-3 I 级粉煤灰的物理性能

组别	指 标	细度			SO ₃ 含量%	CL ⁻ 含量%
		(0.045mm 筛余量)	烧失量 %	需水比%		
	国家标准	≤12	≤5.0	≤95	≤3.0	≤0.2
1		6.70	2.50	93.0	0.29	0.19
2		11.50	3.40	95.0	0.31	0.20

表 3-4 III 级粉煤灰的物理性能

组别	指 标	细度			SO ₃ 含量%	CL ⁻ 含量%
		(0.045mm 筛余量)	烧失量 %	需水比%		
	国家标准	≤45	≤15.0	≤115	≤3.0	-
1		46.0	4.80	108	0.34	0.22
2		45.2	4.70	110	0.35	0.24

3.3.3 镁渣

镁渣来自宁夏某化工企业，主要化学矿物组成为 γ -C₂S、 β -C₂S、MgO 等及游离态的 CaO^[49]，其颗粒大小不一，且颗粒较粗的镁渣活性低、易压碎，因此其将提前用水浸泡、烘干、并过 2.0mm 筛待用以满足混凝土强度。

3.2 骨料

3.2.1 粗骨料

粗骨料的物理属性对混凝土强度有很大的影响，其岩石类别、体态、表面棱角性或光滑性、强度等是满足混凝土使用要求的重要物理指标。在选取粗骨料作为混凝土集料时，必须对其整体性指标进行测定，即测定其级配、含泥块量等，同时对颗粒形状进行检查，亦采用圆方且棱角多的颗粒，对骨料中的风化石进行检查和避免。

本试验采用取自宁夏灵武市东山 5-20mm、5-25mm 的连续级配碎石，经试验测定，其物理指标合格^[50]，如表 3-5 所示：

表 3-5 粗骨料物理指标检测结果

组别	检测项目	最大粒径	含泥量 (%)	泥块含量 (%)	针片颗粒含量 (%)	压碎指标 (%)
1	测量值	20	0.20	0.18	1.1	8.0
2		25	0.20	0.17	1.3	8.3

3.2.2 细骨料

本试验采用的砂子详见表 3-6, 表 3-7。

表 3-6 细骨料基本物理性能指标

组别	指标名称	细度模数	含泥量 (%)	含水率 (%)
1	测量值	2.3	3.7	0.2
2		2.7	2.8	0.3

3.3 外加剂

为满足混凝土工作性、运输泵送等功能要求, 外加剂的选择和使用已经成为了当前工程生产建设不可或缺的化学助剂。传统萘系和聚羧酸减水剂在混凝土的生产中已经得到了广泛的应用, 其取代了以水为调节混凝土性能的传统方式。引气剂等提高了混凝土的抗冻、抗渗等耐久性能, 本试验采用了两种泵送剂:

- (1) 泵送剂 1, 由萘系减水剂、葡萄糖酸钠缓凝剂和引气剂复合而成, 减水率>20%。
- (2) 泵送剂 2, 由聚羧酸减水剂、葡萄糖酸钠缓凝剂配制而成, 减水率>20%。

3.4 拌合水和养护水

本试验用水为洁净自来水。

3.5 本章小结

试验原材料的合理科学选择和良好品质是影响混凝土力学特性、工作性、耐久性的重要部分, 依照实际工程中混凝土的功能导向, 不同的原材料组合可以使混凝土的某项功能性得到凸显。

本试验所采用的水泥、I 级粉煤灰、III 级粉煤灰、镁渣、粗骨料、细骨料、泵送剂和水经检测均能满足试验的要求, 这对试验的科学性和准确性打下了基础, 对后期混凝土的各项性能的研究提供了保证。

4 III 级粉煤灰混凝土力学性能试验

4.1 方案设计

4.1.1 单因素试验方案设计

单因素多水平试验方案着重研究混凝土工作性和强度随等效率变化的规律, 以及确定正交试验方案中等效率的合理水平范围。混凝土试件抗压强度值为考核指标, 以 I 级粉煤灰等效率的试件为基本标准组, III 级粉煤灰等效率分别为 1.0、1.1、1.2、1.3、1.4 作为试验对照组, 计算分析 III 级与 I 级粉煤灰混凝土强度的比值, 用以分析 III 级粉煤灰混凝土强度和等效率 E_p 的关系及作用机理。试验配合比如表 4-1 所示。

表 4-1 单因素试验配合比基本参数

灰水比	用水量	砂率	取代率	超量率	泵送剂	等效比
2.06	165.0	44.0	25.0	10	2.8	1.66

其中, 基准组配合比如下: 以 1 个方量为计算单位, 初步计算的水泥为 333kg, 为计算方便和实际称量的准确性取水泥用量为 340kg。粉煤灰取代率 25.0%, 求得其用量为 85kg, 根据超量率计算出超出值是 34kg, 则 I 级粉煤灰 119kg, 340kg 减去 119kg 等于 225kg 为最终水泥量, 进而求出砂石用量及外加剂用量。根据 III 级粉煤灰等效率, 计算出 1m³ III 级粉煤灰混凝土各组材料用量, 如表 4-2 所示。

表 4-2 单因素试验 1m³混凝土材料用量表 (kg/m³)

试验号	砂子	石子	水泥	粉煤灰	外加剂	加水量	粉煤灰类别
Y30101	817.51	1040.46	254.93	118.97	10.47	157.67	I
Y30102	782.51	995.92	254.93	197.85	12.68	156.13	III
Y30103	773.73	984.74	254.93	217.64	13.23	155.74	III
Y30104	764.95	973.57	254.93	237.42	13.79	155.35	III
Y30105	756.17	962.40	254.93	257.21	14.34	154.96	III
Y30106	747.39	951.22	254.93	276.99	14.89	154.57	III

4.1.2 正交试验方案设计

正交试验方案试验研究各因素作用的重要性次序和最优组合, 所设因素水平详见表 4-3。配合比设计保持水泥, 单位用水量和粉煤灰取代率不变, III 级粉煤灰超出 I 级粉煤灰的用量等量取代细料。以砂率、泵送剂掺量、等效率为因素, 设置三个水平, 确定本试验的正交方案为 $L_9(3^4)$, 并以

混凝土的坍落度、扩展度及抗压强度为考核指标，坍落度、扩展度符合实际施工要求即可，同时考核其流动性、保水性和粘聚性等，对抗压强度结果进行极差分析，并根据结果选择合理配合比、最优配合比，同时分析抗压强度与各因素之间的作用规律和机理。正交试验方案因素水平表 $L_9(3^4)$ 见表 4-3， 1m^3 混凝土材料用量见表 4-4。

表 4-3 因素水平表

L	砂率 $S_A(\%)$	泵送剂掺量 $PA(\%)$	等效率 $E_A(\%)$
1	36.0	2.6	80.0
2	40.0	2.8	100.0
3	44.0	3.0	120.0

其中，配合比设计时，灰水比为 2.10，单位用水量 $165\text{kg}/\text{m}^3$ ，超量率 10%，取代率 25% 保持不变。

表 4-4 1m^3 混凝土材料用量表 (kg/m^3)

因素	灰水比	用水量	砂率	泵送剂	等效率	水泥	III级粉煤灰	泵送剂	砂子	石子
CF01	2.1	165	36	2.6	0.8	259.88	174.08	11.28	647.16	1150.50
CF02	2.1	165	36	2.8	1	259.88	217.60	13.37	631.27	1122.25
CF03	2.1	165	36	3	1.2	259.88	261.11	15.63	615.36	1093.97
CF04	2.1	165	40	2.6	1	259.88	217.60	12.41	701.52	1052.28
CF05	2.1	165	40	2.8	1.2	259.88	261.11	14.59	683.85	1025.78
CF06	2.1	165	40	3	0.8	259.88	174.08	13.02	718.86	1078.29
CF07	2.1	165	44	2.6	1.2	259.88	261.11	13.55	752.38	957.57
CF08	2.1	165	44	2.8	0.8	259.88	174.08	12.15	790.86	1006.55
CF09	2.1	165	44	3	1	259.88	217.60	14.32	771.42	981.81

4.1.3 混合均匀试验方案

以粉煤灰取代率 f 和镁渣掺量 m 为因素，粉煤灰取代率 f 等量取代水泥，设 10.0%、15.0%、20.0%、25.0%、30.0%、35.0% 六个水平，镁渣掺量 m 等量取代砂子，设 0%、5.0%、10.0%、15.0% 四个水平，设计混合均匀 $U_{12}(6,4)$ 试验方案，试验结果应用最小二乘回归拟合并建立混凝土抗压强度与粉煤灰取代率 f 和镁渣掺量 m 间的数学关系模型，粉煤灰超量率取其取代率的 50% 左右^[51]，取镁渣超量率为粉煤灰取代率的 45%。试配强度为 38.2Mpa 确定出初步配合比：单位用水量 170kg ，水泥 347kg ，砂子 832kg ，石子 1059kg ，减水剂 2.8kg 。 $U_{12}(6,4)$ 混合均匀试验方案见表 4-5， $U_{12}(6,4)$ 标准方案表见表 4-6， 1m^3 混凝土配合比见表 4-7。

表 4-5 U12(6, 4)混合均匀试验方案

水平	$f\%$	$m\%$
1	10.0	0.0
2	15.0	5.0
3	20.0	10.0
4	25.0	15.0
5	30.0	
6	35.0	

表 4-6 U12(6, 4)标准方案表

试验号	A	B
1	3	3
2	6	2
3	3	1
4	6	4
5	2	2
6	5	1
7	2	4
8	5	3
9	1	1
10	4	4
11	1	3
12	4	2

表 4-7 混凝土配合比见表 4-7 (kg/m^3)

组别	$f\%$	$m\%$	水泥	III级粉煤灰	煤渣	砂子	石子	减水剂	水用量
1	20	10	277	108	35	780	1037	2.8	170
2	35	5	225	189	17	785	1021	2.8	170
3	20	0	277	108	0	815	1037	2.8	170
4	35	15	225	189	52	750	1021	2.8	170
5	15	5	295	81	17	802	1043	2.8	170
6	30	0	243	162	0	806	1026	2.8	170
7	15	15	295	81	52	767	1043	2.8	170
8	30	10	243	162	35	772	1026	2.8	170
9	10	0	312	54	0	823	1048	2.8	170
10	25	15	260	135	52	759	1032	2.8	170
11	10	10	312	54	35	789	1048	2.8	170
12	25	5	260	135	17	793	1032	2.8	170

4.2 试验原材料说明

(1) 单因素试验方案、正交试验方案 $L_9(3^4)$ 采用以下原材料:

赢海牌普通硅酸盐水泥, 粗骨料为 5-20 连续级配碎石, 中砂含泥量 3.7%。I 级灰 45 μm 筛余量 6.7%, 原状 III 级灰 45 μm 筛余量 46.0%, 萘系减水剂, 以上原材料其他基本性质详见第三章。

(2) U12(6, 4) 混合均匀试验方案采用以下原材料:

赛马牌普通硅酸盐水泥, I 级灰 45 μm 筛余量 11.5%, 原状 III 级灰 45 μm 筛余量 45.2%, 粗骨料为 5-25 连续级配碎石, 中砂含泥量 2.8%。聚羧酸减水剂, 镁渣等其他原材料基本性质详见第三章。

4.3 试验方法

4.3.1 混凝土拌合方法

根据国家标准规范, 按照以下步骤对混凝土进行拌合:

(1) 对原材料进行检查, 尤其是砂石的含水率、水泥品质。按照配合比称量石子、砂子、水泥、矿物掺量等干料, 依次倒入试验前已潮湿的搅拌机中, 30 秒干拌;

(2) 观察搅拌机中干料已混杂在一起时, 将称量完成的外加剂和水均匀的加入干料拌合物中, 搅拌 5 分钟;

(3) 观察搅拌机内, 混凝土的拌制情况, 若目测混凝土和易性不佳, 则继续进行拌制;

(4) 待混凝土拌制完成后, 将拌合物卸在潮湿光滑的地面或钢板上, 经人力拌合几次后, 将进行坍落度与成型步骤。

4.3.2 混凝土坍落度与扩展度试验方法

坍落度和扩展度的测量按标准进行^[52], 以下分别说明:

(1) 坍落度的测定: ①人工拌制几次拌合物, 将混凝土分三次灌入标准塌落筒且每次按标准竖直下捣 25 次, 最后填满抹平。②匀速缓慢的拔起塌落筒, 混凝土依靠自重流动, 用直尺测出拌合物最高点和筒高距离值, 即坍落度。

(2) 扩展度的测定: ①使用直尺测量拌合物塌落流动停止时的最大直径, 垂直第一次测量的方向, 再进行一次测量并记录。②求出两次数据的平均值并重复测三遍, 得出的三组数据的平均值即为混凝土的扩展度。

4.3.3 混凝土试件成型及养护方法

混凝土试件的成型和养护方法如下:

(1) 混凝土抗压强度的试件成型一般采用边长 150mm 方块试模, 本试验中因试验设备的原因, 取边长 100mm 方块试模, 三个一组;

(2) 成型之前, 将试模进行清理, 并涂刷机油便于后期拆模; 将拌制混凝土装入试模中, 且

置于振动台进行振实，直至表面“跳浆”，用抹子刮平；

(3) 将成型的试块放在 $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ 的养护地，待其基本硬化后，进行拆模；

(4) 拆模后，最好放置于混凝土养护箱内养护，本试验因试验条件的原因，以 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 的水中养护。

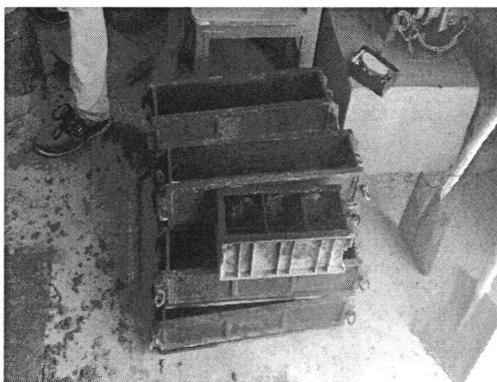


图 4-2 试验模具



图 4-3 混凝土立方体试块成型

4.3.4 混凝土立方体抗压强度测定方法

(1) 混凝土试件达到试验设计的龄期后，对其表面进行检查并风干^[53]；

(2) 将试块的两个平整光滑侧面放置在压力机的面板上，平稳加载至试件破坏并记录极限荷载；

(4) 抗压强度计算如下式：

$$f_{ce} = F / A \quad (4-3-1)$$

式中： f_{ce} 为混凝土抗压强度， F 为所记录的极限破坏荷载，单位：牛， A 为受压面积，单位：平方毫米。

(5) 所测每组混凝土抗压强度值若离散较大，即每组中间值与较大值较小值差别在 15% 以外，视为数据无效，反之，数据可采用。

(6) 本试验采用边长 100mm 的方块进行抗压强度的测定，根据规范要求，本试验取试块的尺寸换算系数为 0.8 计算强度。

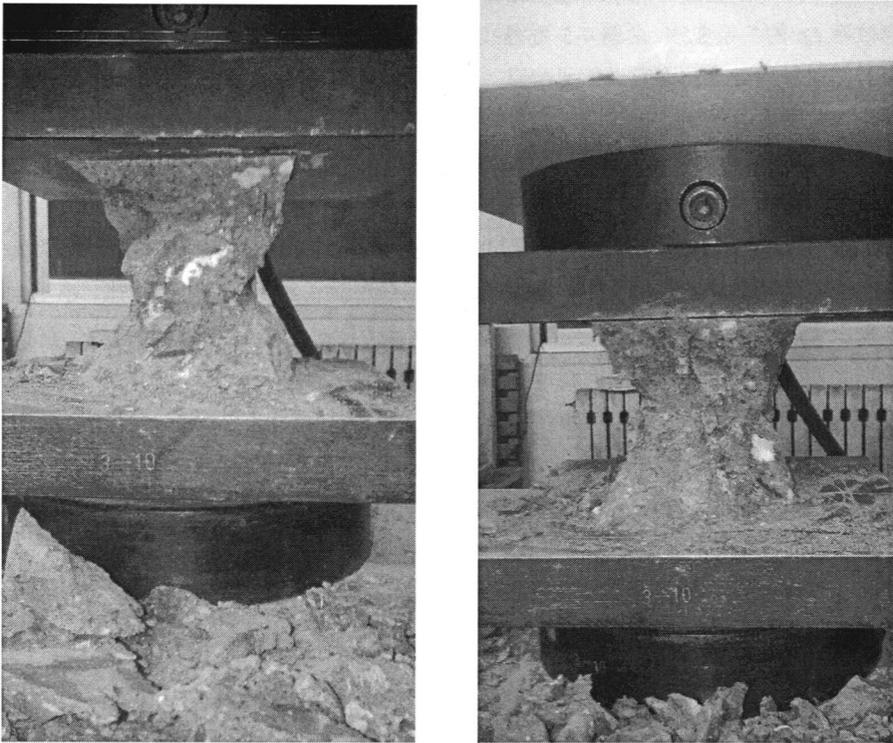


图 4-4 混凝土抗压强度测定

4.4.5 单因素试验结果与分析

单因素试验结果详见表 4-9。可见，随 III 级粉煤灰等效率 E_p 的梯度性增加引起了混凝土的坍落度、扩展度、强度的逐渐降低。龄期延长使混凝土抗压强度逐渐增大，且 28、56d 抗压强度均满足配制强度要求，认为各组能够符合设计之初的概念设计假想。

表 4-9 单因素试验结果

$E_p(\%)$	坍落度 (mm)	扩展度 (mm)	强度(MPa)		
			7d	28d	56d
基准	250	610	32.6	47.4	53.8
100.0	245	600	36.4	51.2	55.8
110.0	240	590	36.1	50.1	55.4
120.0	230	575	34.9	47.9	52.8
130.0	225	560	34.2	46.8	52.0
140.0	200	530	33.1	44.7	49.8

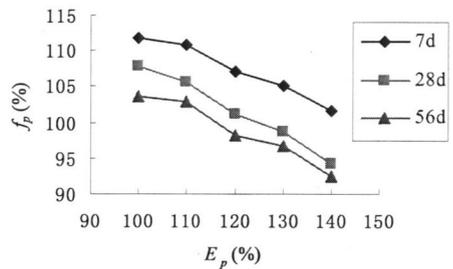


图 4-5 强度比与单因素关系曲线

以III级与I级灰混凝土的混凝土强度比作为参数来评价强度作用效应。图4-5为强度比与III级粉煤灰等效率 E_p 的关系曲线,由图4-5可得:①等效率不大于110%时,各龄期强度比均大于100%,此时,III级粉煤灰混凝土的强度大于基准组,可见,大于 $45\mu\text{m}$ 的颗粒对混凝土强度具有一定的贡献,是强度增长的主要因素;②混凝土的强度比随等效率 E_p 的增大而减小。从理论上讲,等效率 E_p 存在一个最佳值,且最佳值不大于100%,从强度等效来讲,所需III级粉煤灰掺量不大于基准掺量。上述规律解释如下:

(1)火山灰效应。III级粉煤灰中,大于 $45\mu\text{m}$ 的部分颗粒较细的粉煤灰因化学性活泼使得其很容易与水 and 氢氧化钙发生反应,等效率为100%时,III级粉煤灰和I级粉煤灰相比,小于 $45\mu\text{m}$ 的颗粒相等,大于 $45\mu\text{m}$ 的颗粒较多但后期能发生二次水化。同时,大于 $45\mu\text{m}$ 的颗粒也存在一定的活性,只是水化速度较慢,但最终使混凝土的强度增强。

(2)微集料效应。III级粉煤灰细度较部分细骨料的大,适当的掺量能使骨料级配提升、混凝土的工作性和界面状态得到改善,原生裂隙减少,整体密实程度加强,颗粒均匀性和粘结面粘接能力增高使混凝土强度上升。然而,过多的III级粉煤灰掺量反而会使骨料级配恶化,需水量增大甚至使胶材砂浆不足,导致混凝土的密实性降低,产生不均匀和传导应力缺陷的空隙裂缝,使强度降低。

在早期,混凝土强度主要体现为III级粉煤灰的微集料效应,后期主要体现为火山灰效应,且随龄期而逐渐增强。

4.5 正交试验结果与分析

表4-9为测定的混凝土坍落度与扩展度结果,由表可见,其流动性较高,粘聚性、保水性良好,满足试验所要求的流动性。

III级粉煤灰混凝土3个龄期的抗压强度正交试验结果列于表4-10,与砂率、泵送剂掺量和等效率率的趋势图分别示于图4-6~图4-8,极差图示于图4-9。

表4-9 坍落度、扩展度、和易性结果

组别	坍落度 mm	扩展度 mm	工作性描述	
			粘聚性	保水性
CF01	210	520	良好	良好
CF02	245	580	良好	良好
CF03	240	580	良好	良好
CF04	245	550	良好	良好
CF05	245	590	良好	良好
CF06	240	590	良好	良好
CF07	215	540	良好	良好
CF08	225	550	良好	良好
CF09	230	580	良好	良好

表 4-10 正交试验结果

组别	$S_p(\%)$	$PA(\%)$	$E_p(\%)$	强度(MPa)		
				7d	28d	56d
G1	36.0	2.6	80.0	33.9	44.4	52.3
G2	36.0	2.8	100.0	35.6	50.5	57.2
G3	36.0	3.0	120.0	33.0	45.8	53.4
G4	40.0	2.6	100.0	34.3	48.5	55.3
G5	40.0	2.8	120.0	32.4	44.0	52.1
G6	40.0	3.0	80.0	32.8	43.8	53.1
G7	44.0	2.6	120.0	28.5	37.3	45.1
G8	44.0	2.8	80.0	33.9	45.7	52.8
G9	44.0	3.0	100.0	30.4	45.5	55.6

由表 4-10 可以看出, 等效率为 80.0% 时, 混凝土 7d 龄期的强度约 33.0MPa, 28d 龄期的强度约 44.0MPa, 56d 龄期的强度不小于 52.0MPa, 满足配制强度的设计初衷。且每组混凝土的抗压强度随天数的增长而产生了长久的增大, 由表 4-10 可见 28d 龄期内增长幅度较大, 主要原因是前期水泥的水化作用, 之后强度增长幅度较低, 但总体保持增长趋势, 视为 III 级粉煤灰的返程水化和大于 45 μ m 颗粒的深化反应。

4.5.1 混凝土抗压强度的极差分析

表 4-11 至表 4-13 分别为试验内混凝土各龄期的强度极差分析表。

7d 时, 砂率 S_p 是影响混凝土强度的首要因素, 等效率 E_p 次之, 外加剂掺量 PA 影响最小。28d 时, 首要因素是等效率, 其次是砂率, 最后是外加剂掺量。56d 时, 首要因素是等效率, 其次是外加剂掺量, 最后是砂率。

表 4-11 混凝土 7d 抗压强度极差分析表

考核指标	砂率	外加剂掺量	等效率
	S_p	PA	E_p
\bar{K}_1	34.15	32.20	33.50
\bar{K}_2	33.15	33.95	33.44
\bar{K}_3	30.92	32.08	31.28
R	3.23	1.88	2.21
主→次	1	3	2

表 4-12 混凝土 28d 抗压强度极差分析表

考核指标	砂率 S_p	外加剂掺量 PA	等效率 E_p
\bar{K}_1	46.89	43.39	44.62
\bar{K}_2	45.42	46.73	48.16
\bar{K}_3	42.83	45.02	42.37
R	4.05	3.33	5.79
主→次	2	3	1

表 4-13 混凝土 56d 抗压强度极差分析表

考核指标	砂率 S_p	外加剂掺量 PA	等效率 E_p
\bar{K}_1	54.31	50.91	52.74
\bar{K}_2	53.51	54.05	56.03
\bar{K}_3	51.17	54.02	50.22
R	3.14	3.15	5.81
主→次	3	2	1

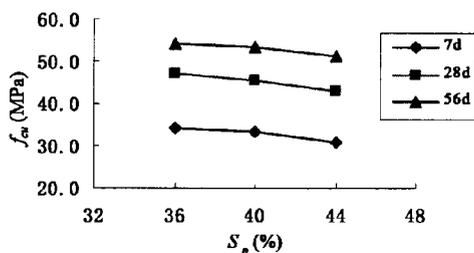


图 4-6 强度与砂率的关系曲线

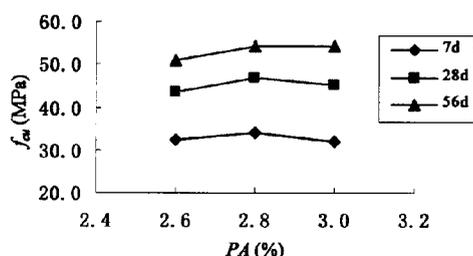


图 4-7 强度与泵送剂掺量的关系曲线

图 4-6~图 4-8 表示混凝土各个龄期的抗压强度与砂率为负相关关系,即强度由砂率增大而降低。随等效率和泵送剂掺量的增大, 强度变化是先增长至一个峰值后而逐渐降低的过程。最优组合为: 砂率 S_p 36%、泵送剂掺量 PA 2.8%、等效率 E_p 100%。III 级粉煤灰混凝土, 粉煤灰掺量大, 砂率增加,

细颗粒的组分增多，致使级配恶化，水泥浆体不足以包裹细集料，存在粘结缺陷，而使混凝土的抗压强度降低。泵送剂掺量适当，混凝土拌合物的工作性改善，均匀性提高，界面结合水膜变薄，强度提高。泵送剂掺量过大，混凝土中自由水增多，拌合物的粘聚性、保水性和均匀性变差，界面结合水膜变厚与骨料之间产生粘结真空区，同时自由水使水胶比增大致使强度降低。

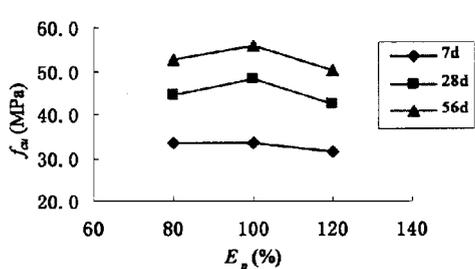


图 4-8 强度与等效率的关系曲线

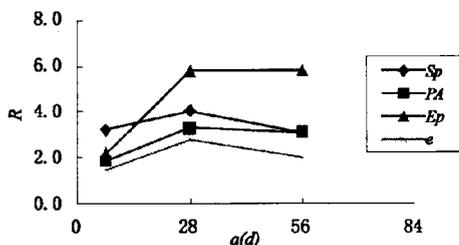


图 4-9 强度极差

图 4-9 为混凝土的强度极差图。7d 龄期，砂率是强度发展的主要影响因素。28d 时，等效率上升为重要因素，砂率次之，泵送剂最小；56d 龄期，等效率仍为重要因素，泵送剂次之，砂率降到最小。混凝土初期，粉煤灰的水化作用较弱，强度发展主要来源于水泥的水化和骨料的骨架作用，砂率对混凝土的强度影响最大。随龄期的增大，粉煤灰的长久性水化功能逐渐体现出来，等效率成为影响混凝土抗压强度的重要因素。

4.6 混合均匀试验结果与分析

U12(6, 4) 混合均匀试验方案及 III 级粉煤灰混凝土强度试验结果列于表 4-14，由表 4-14 可见各组混凝土 28d 的强度均不小于试配强度，能满足 C30 混凝土强度的要求。

表 4-14 混合均匀试验方案与试验结果

组别	f /%	m /%	f_{cu} /MPa
G1	20	10	42.1
G2	35	5	38.4
G3	20	0	40.3
G4	35	15	39.7
G5	15	5	41.8
G6	30	0	38.5
G7	15	15	43.0
G8	30	10	40.1
G9	10	0	42.1
G10	25	15	41.3
G11	10	10	43.2
G12	25	5	39.5

4.6.1 模型建立

混凝土的抗压强度与III级粉煤灰粉煤灰取代率近似呈线性负相关关系^[35,51],与镁渣掺量呈先增大后减小的二次函数关系^[54],应用最小二乘回归拟合,得出抗压强度与镁渣掺量 m 、III级粉煤灰粉煤灰取代率 f 的二元非线性回归数学模型。

$$f_{cu} = 43.85 - 0.1802f + 0.1282m - 0.00003f^2 - 0.0013m^2 + 0.0012mf \quad (4-6-1)$$

对模型进行显著性检查,得 $F=54.9$,远大于其临界值 $F_{0.99}(5,6)=8.75$,说明混凝土抗压强度与镁渣掺量 m 、III级粉煤灰取代率 f 之间的回归关系模型极其显著,说明试验数据离散性较小,数据较为准确。模型的相关拟合系数 $R^2=0.9786$,相关性好。因此,使用拟合出的方程进行强度预测,具有很高的准确性和可信度。

4.6.2 效应分析

模型中一次项粉煤灰取代率 f 的系数大于镁渣掺量 m 的系数,可以看出粉煤灰取代率对混凝土强度的影响大于镁渣掺量的影响,粉煤灰取代率是最重要的影响因素且应受到科学合理地控制。

4.6.3 单因素效应

处理回归模型,将 f 或 m 定为0,就可得出另一因素的数学表达式。

$$\text{粉煤灰取代率: } f_{cu} = 43.85 - 0.1802f - 0.00003f^2 \quad (4-6-2)$$

$$\text{镁渣掺量: } f_{cu} = 43.85 + 0.1282m - 0.0013m^2 \quad (4-6-3)$$

粉煤灰取代率和镁渣掺量的单因素效应分别示于图 4-10 和图 4-11。

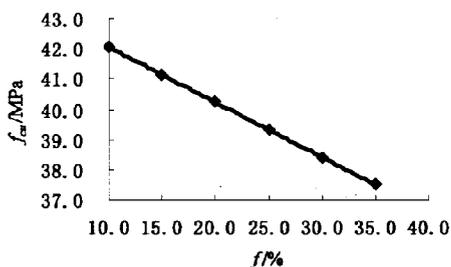


图 4-10 粉煤灰取代率的单因素效应

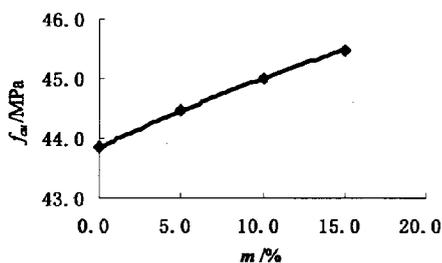


图 4-11 镁渣掺量的单因素效应

III级粉煤灰取代率 f 对混凝土的强度表现为负效应，随III级粉煤灰取代率 f 的增加混凝土的强度近似线性减小，且负效应有所增强，但很弱。III级粉煤灰取代率 f 在 10.0-35.0 范围内，没有明显削弱混凝土的强度。III级粉煤灰具有一定的火山灰活性，其活性虽不如 I、II 级粉煤灰的高，但合理的超量掺加使混凝土的强度得以部分补偿。此外，III级粉煤灰的颗粒粒径小于细骨料，其填充效应和微集料效应也对混凝土的强度有一定的贡献。应用III级粉煤灰取代部分水泥，并合理超量掺加，可以配制出强度满足 C30 强度等级要求的混凝土。

混凝土的强度与镁渣掺量 m 呈二次抛物线关系，在研究的镁渣掺量范围内 (0.0-25.0%)，混凝土的强度呈增长的趋势，可见镁渣掺量 m 低时，对混凝土的强度有增强效应。镁渣具有一定的活性，能独立水化，生成具有胶结能力的水化产物，是使混凝土强度提高的根本原因。镁渣颗粒细，掺量合适能改善细骨料的级配，混凝土的保水性、粘聚性、界面状态和均匀性，提高混凝土的强度；掺量过大则使细骨料的级配恶化，混凝土的粘聚性降低、微缺陷增多，如缺乏水泥的团粒，致使混凝土强度降低。同时，镁渣中的 MgO 遇水有一定膨胀效应，填补了混凝土结构内部空隙，增强了混凝土的密实度，提高了混凝土强度。根据图 4-11 呈现的二次抛物线，镁渣的掺量应严格控制，避免因过量掺合而导致的混凝土强度下降。

4.6.4 边际效应

边际效应的分析可以评价出相关因素对结果的增减速率，对上述数学表达式进行偏导求解， f 、 m 的边际效应方程如下：

$$\text{粉煤灰取代率 } f: f_{cu} = -0.1802 - 0.00006f \quad (4-6-3)$$

$$\text{镁渣掺量 } m: f_{cu} = 0.1282 - 0.0026m \quad (4-6-4)$$

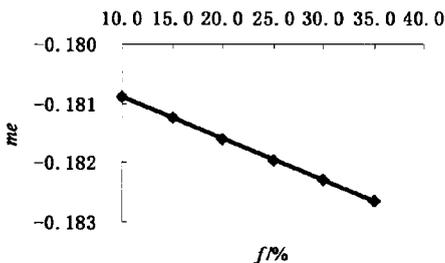


图 4-12 粉煤灰取代率单因子的强度效应

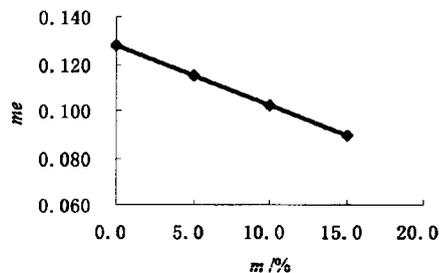


图 4-13 镁渣取代率单因子的强度效应

III级粉煤灰取代率 f 和镁渣掺量 m 的边际效应见图 4-12，图 4-13。粉煤灰取代率 f 的边际效应为负值，且呈现微弱的递减趋势，可见粉煤灰取代率对混凝土强度的负效应逐渐增加。镁渣掺量 m

的边际效应呈现递减趋势，由正值将逐渐过度到负值。当边际效应为 0 时，计算出混凝土的强度对应的镁渣掺量最优镁值为 49.1%，图 4-13 反应其小于 49.1% 时，对其效应为正效应，反之为负效应。

4.6.5 耦合效应

回归模型中粉煤灰取代率 f 与镁渣掺量 m 的积的二次项，反映了二者的耦合效应。模型中二次项的系数为正值，说明二者耦合对混凝土的强度增长有利。镁渣经过水解产生的钙离子是推动粉煤灰水化反应的辅助动力和化学物质根源，其使得胶凝材料浆液中的氢氧根离子和钙离子的数量急剧增多，反过来粉煤灰颗粒中的化学物质：硅酸盐、铝酸盐又受到氢氧离子的分解作用，电解出了铝酸根离子和硅酸根离子，与水泥和粉煤灰原有的钙离子发生化学反应，产生了具有粘结力的网状拉结性的硅酸盐和铝酸盐结构体，从而在混凝土内部产生了更多的、错综复杂的交叉结构，提高了粘结力。同时，粉煤灰水化反应又消耗了钙离子从而继续诱导镁渣的水解，二者之间相互促进和深化反应引起了混凝土强度升高^[32]。

4.6.6 强度预测

应用回归模型预测的混凝土强度值列于表 4-15，由表 4-15 可见：①模型预测值与试验得出的值相差无几，说明该数学模型作为理论支撑是较为准确和可应用的。②粉煤灰取代率 f 大时，镁渣掺量 m 的正效应增大，镁渣掺量 m 大时，粉煤灰取代率 f 的负效应减小；③预测强度与 C30 混凝土试配强度接近的组合为 ($f=30.0\%$, $m=0.0\%$) 和 ($f=35.0\%$, $m=5.0\%$)，综合考虑混凝土的工作性、强度、经济性和废渣利用，以 $f=35.0\%$, $m=5.0\%$ 为合理组合。

表 4-15 混凝土强度预测/MPa

$f/\%$	$m/\%$			
	0	5.0	10.0	15.0
10.0	42.0	42.7	43.3	43.9
15.0	41.1	41.8	42.5	43.0
20.0	40.2	41.0	41.6	42.2
25.0	39.3	40.1	40.8	41.4
30.0	38.4	39.2	39.9	40.6
35.0	37.5	38.3	39.1	39.8

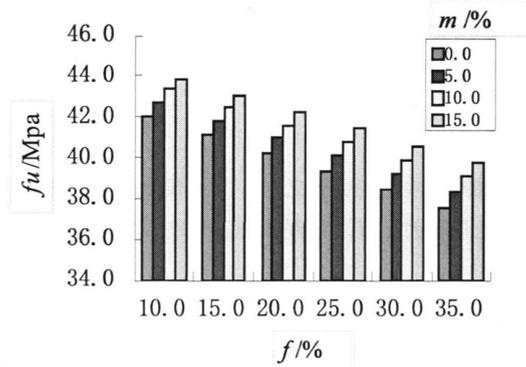


图 4-14 混凝土强度预测/MPa

从图 4-14 可见，混凝土强度与粉煤灰、镁渣耦合的关系是有一定规律和趋势的。同时，由图可知：在试验范围内，当粉煤灰取代率 f 一定时，镁渣掺量 m 越高，混凝土强度越高；当镁渣掺量 m 一定时，粉煤灰取代率 f 越高，抗压强度越低。因此，在试验范围内，粉煤灰取代率增值对混凝土强度为负效应，镁渣掺量增加对其强度为正效应。

5 III 级粉煤灰混凝土碳化性能试验

5.1 混凝土碳化机理

碳化现象越来越成为影响混凝土性能的因素之一，其不仅会降低混凝土强度，还可能引发钢筋混凝土结构中钢筋的锈蚀等问题^[55]，因此搞清楚混凝土碳化的基本过程和机理是研究如何克服它的前提和基本目标。

混凝土碳化过程如下：

混凝土经拌制后，在其硬化过程中，混凝土中的水泥等矿物掺合料发生水化反应导致内部结构发生变化。混凝土收缩，同时内部自由水蒸发，在混凝土内部产生了孔隙、泡孔及通道。空气中的 CO_2 接触到混凝土表面，通过孔隙和通道进入混凝土内部，与混凝土中的水产生 H_2CO_3 ， H_2CO_3 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaSiO_2 发生化学反应，产生了 CaCO_3 和水。 CaCO_3 是一种疏松物质，在混凝土表面产生一层易脱落的层体，同时在反应过程中，混凝土的碱度降低，这对于混凝土的性能产生了极大影响。同时，被碳化的混凝土降低了其对钢筋的钝化保护^[56,57]，使钢筋混凝土构件保护层的保护功能削弱，进而导致了钢筋的锈蚀^[55]，对钢筋混凝土构件的使用功能产生了破坏。

5.2 影响混凝土碳化的因素

通过前人大量的研究和工程实例，当前对混凝土碳化的研究已经有了比较成熟的理论体系。经研究总结，影响混凝土碳化的因素有很多，如 CO_2 浓度、原材料、混凝土所处外界环境等，归纳影响混凝土碳化的主要因素有以下几点^[58]：

(1) CO_2 浓度。随着工业经济的发展，造成大量的工业废气排放，其中大气中 CO_2 的排放量逐年升高。上世纪九十年代大气中的 CO_2 浓度为历史最高的 0.035%，估计到 21 世纪二十年年代年左右 CO_2 浓度将增加大约 2 倍^[59]。因此，外界环境中的二氧化碳浓度的增加对混凝土的碳化产生了深远影响，也对其抗碳化性能提出了更为苛刻的要求。

(2) 原材料与配合比参数。不同品种水泥的碱性不一样，根据混凝土碳化机理，不同品种水泥受碳化影响不一，如矿渣硅酸盐水泥、粉煤灰水泥抗碳化能力大于硅酸盐水泥。骨料的粒径及级配亦是因素之一，细骨料级配良好，能够高效的填充到粗骨料孔隙中产生紧密的界面，提高密实度，减少混凝土结构内部空隙等通道，抑制了 CO_2 的侵入；粉煤灰颗粒较细，能够填充砂浆和各组分的孔洞，镁渣遇水有一定的膨胀性，二者提高了混凝土密实度，减低碳化影响。同时，引气剂等可抑制很多连通开放的孔洞和通道产生，从根源上使得二氧化碳隔离在混凝土结构以外，不同原材料组分比例也与碳化有关系。

(3) 环境因素。

环境湿度和温度是混凝土碳化速度和深度的两个重要原因。

环境湿度影响混凝土碳化，湿度越高导致结构内部水分相对多， CaCO_3 产量增多推进了碳化过程。湿度低，混凝土内部相对干燥， H_2CO_3 产量少，即与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaSiO_2 产生的 CaCO_3 数量

减少，碳化速度和深度较低。

外界温度越高，造成化学分子、离子运动活跃，加速了碳化。反之，低温下水分子及其他离子活动缓慢，碳化速度和深度降低。

5.3 试验原材料

该试验原材料详见 4.2 章节的相关内容。

5.4 方案设计

同 4.6 相关内容，本章主要对试验设计的 III 级粉煤灰混凝土碳化性能做以研究分析。

5.5 混凝土碳化深度测定方法

本试验依照国家标准^[60]中有关混凝土碳化性能的试验方法内容进行。对 4.1.3 中混合均匀试验方案所制备的混凝土试件进行碳化性能的研究。

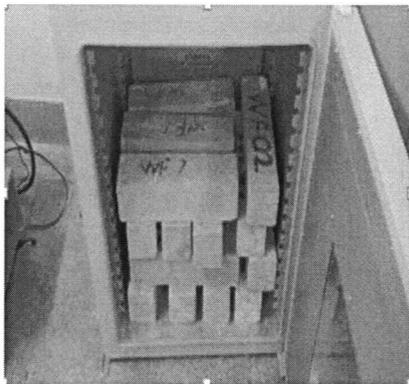


图 5-1 混凝土试件的烘烤



图 5-2 混凝土碳化箱与试件摆放

根据规范，碳化试验所采用的试件其高宽比不小于 3，本试验采用所使用的试件尺寸为：横截面边长为 100mm 的正方形，纵向长度为 400mm，对碳化深度的测定方法具体如下：

(1) 提前 2 天将已经在养护室或养护箱中养护 28d 试件取出，放入烘箱，调节温度为 60℃，烘烤 2 天；待烘烤两天后，将试件擦净并对其进行封蜡密封，封蜡过程中预留下两个相对的纵向侧面使其与 CO₂ 接触，同时在该侧面的长度方向画出平行线，间距为 10mm，作为测量点；

(2) 试件经蜡封后，将其间隔统一地放入混凝土碳化箱内，关闭箱门，并检查密封情况，打开 CO₂ 气瓶阀门灌入气体且控制浓度在 20±3% 范围内，相对湿度为 70±5%，温度 (20±2)℃；

(3) 准确记录试验日期，试件经标准要求的四个龄期后，取出试件并进行切除劈裂，本试验切除厚度为 50mm 左右。对切除后的试件端口进行封蜡，放置于混凝土碳化箱内直至全部龄期碳化深度测定完毕；

(4) 擦除切除部分试件的端口粉磨，均匀的对端口面喷洒 1% 浓度的酚酞酒精溶液。溶液与混凝土端口面反应 30 秒后，以之前画出的测量点为准，测量试件两个侧面上的混凝土碳化深度。应注

意的是，测量点处正好位于石子相接面时，根据标准要求进行测量。

(5) 混凝土平均碳化深度如下式

$$\bar{d}_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (5-1-1)$$

上式中， \bar{d}_t 为试件碳化测量龄期 t 天后的平均碳化深度，单位 mm； d_i 为各测点的碳化深度，单位 mm； n 为测点的总数。

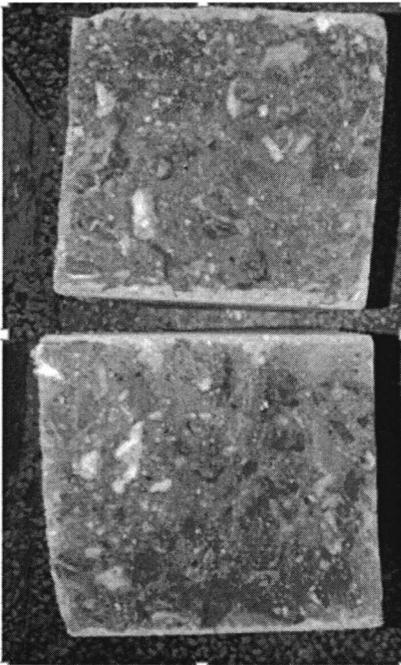


图 5-3 混凝土碳化深度示意



图 5-4 混凝土碳化深度测定

5.6 结果与分析

U12(6, 4) 混合均匀试验方案及试验结果列于表 5-1，由表可见各组混凝土 28d 的强度均不小于试配强度，能满足 C30 混凝土强度的要求。试件碳化 3d 的碳化深度较小，规律性不明显，碳化 7、14、28d 的碳化深度有明显的规律性，且与强度有明显的相关性，强度大的试件，碳化深度较小。同时，前 3d 碳化深度增幅不大，后期碳化深度增速明显增快。

表 5-1 混合均匀试验方案与试验结果

组别	f /%	m /%	C_d /mm				f_{cu} /MPa
			3d	7d	14d	28d	
G1	20.0	10.0	0.3	3.1	5.3	6.1	42.1
G2	35.0	5.0	0.8	5.7	9.2	10.6	38.4
G3	20.0	0.0	0.5	4.0	7.1	7.6	40.3
G4	35.0	15.0	0.6	4.7	6.3	8.2	39.7
G5	15.0	5.0	0.3	3.6	4.7	6.5	41.8
G6	30.0	0.0	0.5	4.7	7.4	9.1	38.5
G7	15.0	15.0	0.3	3.1	4.2	5.3	43.0
G8	30.0	10.0	0.4	4.6	6.3	8.1	40.1
G9	10.0	0.0	0.3	2.1	4.7	5.4	42.1
G10	25.0	15.0	0.4	3.3	5.7	7.2	41.3
G11	10.0	10.0	0.2	1.3	3.4	3.8	43.2
G12	25.0	5.0	0.7	3.7	6.8	7.6	39.5

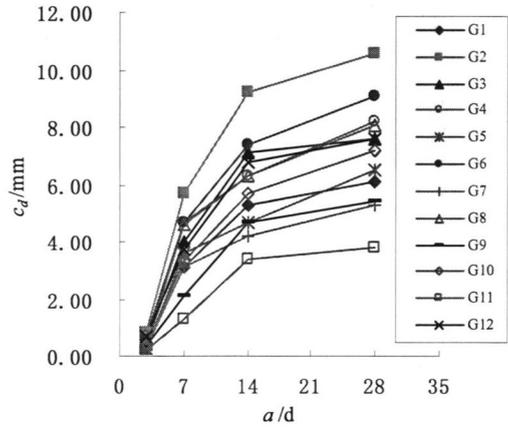


图 5-5 碳化深度与碳化时间关系曲线

各组试件的碳化深度与碳化时间的关系示于图 5-5，试件的碳化深度随时间的延长而逐渐加深，早期速度很快，后期碳化速度逐步放缓。两者之间呈对数或幂指数关系。

根据表 5-1、5-2，可知本试验混凝土抗碳化评定等级为 IV 级^[60]，能满足一般钢筋混凝土结构对防止碳化侵蚀的要求。

表 5-2 混凝土抗碳化评定等级表

碳化 28d 的碳化深度 (mm)	≥ 30	≥ 20	≥ 10	> 0	测不出
		< 30	< 20	< 10	
抗碳化等级	I	II	III	IV	V

如图 5-6 至图 5-9 是选取的某组 III 级粉煤灰与镁渣耦合 3、7、14、28 天混凝土碳化深度的发展状况，其随二氧化碳侵蚀天数的增长而深度加深。

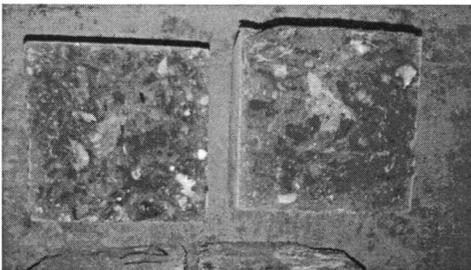


图 5-6 混凝土碳化深度 (3d)

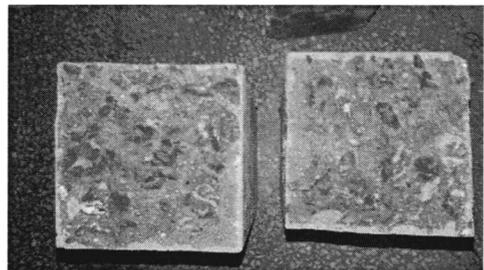


图 5-7 混凝土碳化深度 (7d)

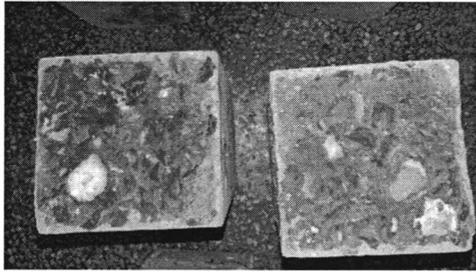


图 5-8 混凝土碳化深度 (14d)



图 5-9 混凝土碳化深度 (28d)

5.6.1 模型建立

文献^[61]用二次函数关系拟合混凝土的强度与粉煤灰取代率 f 、镁渣掺量 m 的关系，所得模型具有很好的相关性和极高的显著性。碳化深度 C_d 与强度有明显的相关性，故碳化深度与粉煤灰取代率 f 、镁渣掺量 m 也采用二次函数关系拟合。应用最小二乘回归拟合，得出试件碳化7、14、28d的碳化深度 C_d 与镁渣掺量 m 、粉煤灰取代率 f 的二元非线性回归数学模型。

$$C_d = C_0 + C_1f + C_2m + C_3f^2 + C_4m^2 + C_5mf \quad (5-6-1)$$

模型的回归系数及检验值列于表5-3。由表可见 C_d 模型的 F 值随碳化时间的增大而增大，显著性提高，碳化深度 C_d 与镁渣掺量 m 及粉煤灰取代率 f 之间的回归关系模型是显著的 ($F_{0.95}(5,6)=4.39$, $F_{0.99}(5,6)=8.75$)，相关系数 R^2 都比较大，相关性很好。

表 5-3 回归系数及检验值

a/d	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	R^2	F	显著性
7	0.55	0.1775	-0.0193	-0.0009	0.0004	-0.0014	0.8649	7.68	显著
14	2.49	0.2192	-0.0687	-0.0008	0.0005	-0.0031	0.9056	11.51	极显著
28	2.98	0.2402	-0.0878	-0.0007	0.0013	-0.0019	0.9430	19.84	极显著

表 5-3 所示为混凝土的回归系数等，将其 7d、28d、56d 的回归系数代入公式 (5-6-1)，可得出三个龄期混凝土碳化深度 C_d 与镁渣掺量 m 、粉煤灰取代率 f 的数学模型。同时，将二因素的混合均匀试验方案的各个水平代入各自龄期模型，即得到二因素耦合下，混凝土碳化深度 C_d 的值。详见表 5-4 至表 5-6，并做图 5-10 至 5-12。

表 5-4 7d 混凝土碳化深度/mm

$f_c/\%$	$m/\%$			
	0	5.0	10.0	15.0
10.0	2.2	2.1	1.9	1.8
15.0	3.0	2.8	2.6	2.5
20.0	3.7	3.5	3.3	3.1
25.0	4.4	4.2	3.9	3.7
30.0	5.1	4.8	4.5	4.2
35.0	5.7	5.3	5.0	4.7

表 5-5 14d 混凝土碳化深度/mm

$f_c/\%$	$m/\%$			
	0	5.0	10.0	15.0
10.0	4.6	4.1	3.7	3.2
15.0	5.6	5.0	4.5	4.0
20.0	6.5	5.9	5.3	4.7
25.0	7.4	6.7	6.0	5.4
30.0	8.3	7.5	6.8	6.0
35.0	9.1	8.3	7.4	6.6

表 5-6 28d 混凝土碳化深度/mm

$f_c/\%$	$m/\%$			
	0	5.0	10.0	15.0
10.0	5.3	4.8	4.4	4.0
15.0	6.4	5.9	5.4	5.0
20.0	7.5	6.9	6.4	5.9
25.0	8.6	7.9	7.3	6.8
30.0	9.6	8.9	8.3	7.7
35.0	10.6	9.8	9.2	8.5

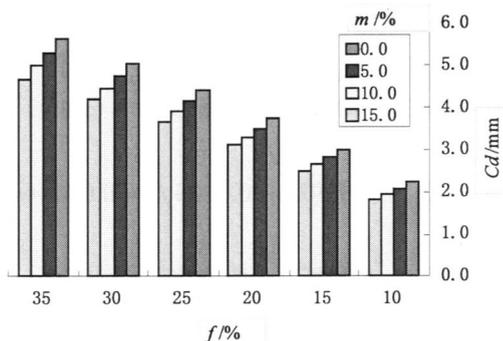


图 5-10 混凝土碳化深度与 m, f 关系图 (7d)

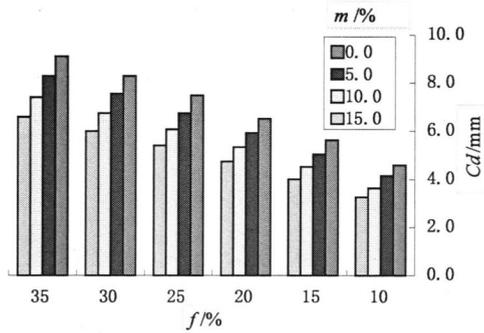


图 5-11 混凝土碳化深度与 m, f 关系图 (14d)

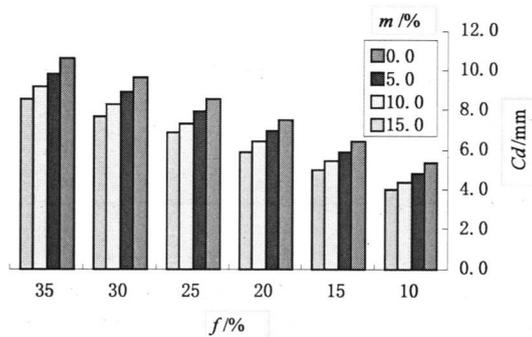


图 5-12 混凝土碳化深度与 m, f 关系图 (28d)

从图 5-10 至图 5-12 可见，混凝土碳化三个龄期 7d，14d，28d 的碳化深度趋势一致。同时，由图可知：在试验范围内，当粉煤灰取代率 f 一定时，镁渣掺量 m 越高，碳化深度 C_d 越小；当镁渣掺量 m 一定，粉煤灰取代率 f 越高，深度越高。因此，在试验范围内，粉煤灰取代率增值对混凝土碳化深度为正效应，镁渣掺量为负效应。即试验范围内，粉煤灰掺量加速混凝土碳化，而镁渣掺量可抑制其碳化速度和深度。

混凝土碳化 7d、14d、28d 的数学模型见公式 (5-6-2) - (5-6-4)。

$$C_d = 0.55 + 0.1775f - 0.0193m - 0.0009f^2 + 0.0004m^2 - 0.0014mf \quad (5-6-2)$$

$$C_d = 2.49 + 0.2192f - 0.0687m - 0.0008f^2 + 0.0005m^2 - 0.0031mf \quad (5-6-3)$$

为便于叙述，以混凝土碳化 28 天的数学模型进行分析和研究。28d 混凝土碳化深度 C_d 与镁渣掺量 m 、粉煤灰取代率 f 的数学模型如下：

$$C_d = 2.98 + 0.2402f - 0.0878m - 0.0007f^2 + 0.0013m^2 - 0.0019mf \quad (5-6-4)$$

模型的常数项和一次项系数的绝对值均随碳化时间的增加而增大, 增幅逐渐减小。回归系数在不同碳化时间具有相同的正负号, 说明碳化深度随镁渣掺量和粉煤灰取代率变化的规律是基本相同的。为了便于叙述, 仅以碳化 28d 的模型进行效应分析。

5.6.2 效应分析

模型中一次项粉煤灰取代率的系数大于镁渣掺量的系数, 可见粉煤灰取代率对混凝土碳化深度的影响大于镁渣掺量的影响, 粉煤灰取代率是最重要的影响因素, 在混凝土生产中应严格控制。

5.6.3 单因素效应

同 4.6.3 内容得以下方程。

$$\text{粉煤灰取代率: } C_d = 2.98 + 0.2402f - 0.0007f^2 \quad (5-6-5)$$

$$\text{镁渣掺量: } C_d = 2.98 - 0.0878m + 0.0013m^2 \quad (5-6-6)$$

镁渣掺量和粉煤灰取代率的单因素效应分别示于图 5-13 和图 5-14。

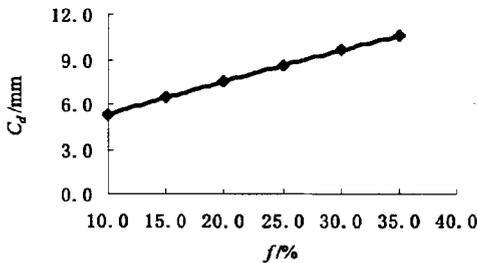


图 5-13 粉煤灰取代率的单因素效应

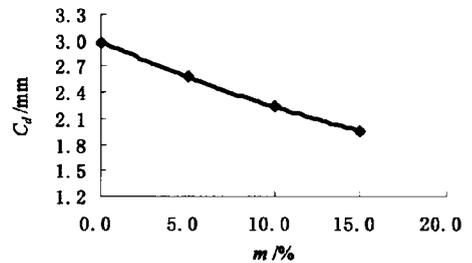


图 5-14 镁渣掺量的单因素效应

III 级粉煤灰取代率对混凝土的碳化深度表现为正效应, 随 III 级粉煤灰取代率的增加混凝土的碳化深度近似线性增大。试验结果有正效应也有负效应, 一方面, 粉煤灰后期反应消耗了大量的氢氧化钙, 致使混凝土结构内部 PH 值下降而加深了碳化。另一方面, 粉煤灰的减水效应、颗粒填充效果及良好粘结能力使混凝土的胶结面得以改善, 应力连续传导性增强、整体密实度提高, 碳化深度减小。由于 III 级粉煤灰颗粒较粗, 减水效应和填充效应较差, 水化效应较弱, 对混凝土的孔隙结构改善有限, 所以整体上表现出混凝土的碳化深度随 III 级粉煤灰取代率的增加而加深。

混凝土的碳化深度与镁渣掺量呈倒二次抛物线关系, 在研究的镁渣掺量范围内 (0.0-15.0%),

碳化深度呈现逐渐减小的态势，可见镁渣掺量低时，掺加镁渣有利于减小混凝土的碳化。同时，镁渣的 MgO 等活性成分，MgO、β-C₂S 和游离态的 CaO 水化后均生成 Ca(OH)₂，因此使混凝土的碱性备用量增多，减小了碳化发展。此外，镁渣的膨胀补偿效应也有利于碳化深度的减小。但如果掺入过量的镁渣则会使混凝土各组分紧密联系度和密实度下降，引发碳化深度的增长。

5.6.4 边际效应

对一元子模型求一阶偏导，得III级粉煤灰取代率 f 和镁渣掺量 m 的边际效应方程如下：

$$\text{粉煤灰取代率 } f: \quad C'_d = 0.2402 - 0.0014f \quad (5-6-7)$$

$$\text{镁渣掺量 } m: \quad C'_d = -0.0878 + 0.0026m \quad (5-6-8)$$

III级粉煤灰取代率和镁渣掺量的边际效应如图 5-15 和图 5-16 所示。粉煤灰取代率的边际效应呈递减趋势，极值点对应的粉煤灰取代率为 171.6%，实际工程中粉煤灰取代率不可能大于 100%。在粉煤灰取代率可能的值域内，粉煤灰取代率的边际效应为正值，混凝土的碳化深度随粉煤灰取代率的增大而增大。镁渣掺量的边际效应呈递增趋势，由负值将逐渐过度到正值。边际效应为 0 时对应的镁渣掺量为最优镁渣掺量，此值为 33.8%。镁渣掺量小于 33.8%时，边际效应为负值，混凝土的碳化深度随镁渣掺量的增大而减小。镁渣掺量大于 33.8%时，边际效应为正值，混凝土的碳化深度随镁渣掺量的增大而加深。

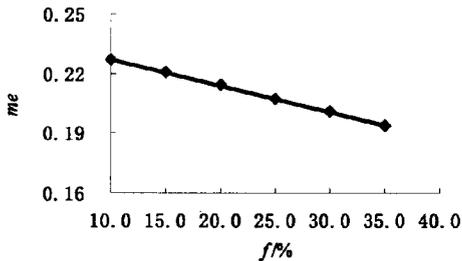


图 5-15 粉煤灰取代率单因子的碳化效应

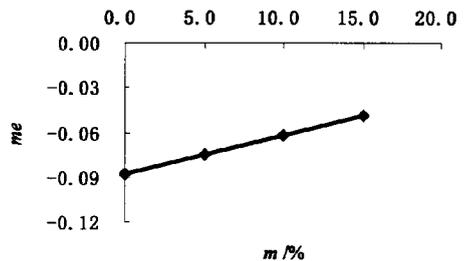


图 5-16 镁渣取代率单因子的碳化效应

5.6.5 耦合效应

回归模型中粉煤灰取代率与镁渣掺量的积的二次项为负值说明二者耦合对混凝土的碳化有抑制作用。镁渣经过水解产生的钙离子是推动粉煤灰水化反应的辅助动力和化学物质根源，其使得胶凝材料浆液中的氢氧根离子和钙离子的数量急剧增多，反过来粉煤灰颗粒中的化学物质：硅酸盐、铝酸盐又受到氢氧离子的分解作用，电解出了铝酸根离子和硅酸根离子，与水泥和粉煤灰原有的钙离子发生化学反应，产生了具有粘结力的网状拉结性的硅酸盐和铝酸盐结构体，从而在混凝土内部产生了更多的、错综复杂的交叉结构，提高了密实度。同时，粉煤灰水化反应又消耗了钙离子从而继续诱导镁渣的水解，二者之间相互促进和深化反应引起了混凝土碳化深度的降低。

6 结论与展望

6.1 结论

综合所做的Ⅲ级粉煤灰混凝土抗压强度与碳化试验,结合单因素、正交试验和混合均匀试验方案,对本文的结论做以下归纳:

(1) 在单因素试验中,得出以下结论:①Ⅲ级粉煤灰混凝土等效率 E_p 小于 110%时,各龄期混凝土的强度比均大于 100%,大于 $45\mu\text{m}$ 的颗粒对混凝土强度具有一定的贡献②混凝土的强度比随等效率 E_p 的增大而减小,即混凝土的强度随Ⅲ级粉煤灰掺量的增大而逐渐减小,等效率存在一个最佳值且小于 100%。

(2) 正交试验中,Ⅲ级粉煤灰混凝土的强度随砂率的关系为负相关,随等效率和泵送剂掺量的增大,呈现先上升到一峰值后逐步减小的过程,最优等效率约为 100.0%。最优组合为: S_p : 36%、 P_A : 2.8%、Ⅲ级粉煤灰 E_p : 100%。

(3) 可使用Ⅲ级粉煤灰配制强度等级 C30 的混凝土,合理等效率约为 80.0%。

(4) Ⅲ级粉煤灰与镁渣的耦合对混凝土强度的混合均匀试验中,得出粉煤灰取代率 f 与镁渣掺量 m 耦合对强度的数学模型,如下:

$$f_{cu} = 43.85 - 0.1802f + 0.1282m - 0.00003f^2 - 0.0013m^2 + 0.0012mf$$

(5) Ⅲ级粉煤灰与镁渣的耦合对混凝土强度的效应为正效应,二者耦合有利于混凝土的强度增长。

(6) Ⅲ级粉煤灰取代率对混凝土的强度为负效应,且其于 35%时,强度可以满足 C30 的要求。

(7) 在Ⅲ级粉煤灰混凝土抗压强度实验中,镁渣取代水泥的范围内,镁渣的强度效应为正效应,掺加适量的镁渣可改善混凝土的工作性,提高混凝土的强度。

(8) 配制 C30 强度等级的混凝土,粉煤灰和镁渣的合理组合为 $f=36\%$, $m=5\%$ 。

Ⅲ级粉煤灰与镁渣的耦合对混凝土强度的混合均匀试验中,得出粉煤灰取代率 f 与镁渣掺量 m 耦合对 28d 碳化深度的数学模型,如下:

$$C_d = 2.98 + 0.2402f - 0.0878m - 0.0007f^2 + 0.0013m^2 - 0.0019mf$$

(9) 在Ⅲ级粉煤灰混凝土碳化实验中,Ⅲ级粉煤灰与镁渣的耦合对碳化深度综合为负效应,镁渣掺量 m 小于 33.8%时,镁渣为负效应,且最优掺量 33.8%,Ⅲ级粉煤灰取代率 f 为正效应,混凝土的碳化深度随粉煤灰取代率的增大而加深,二者耦合有利于抑制混凝土的碳化。

6.2 存在的不足及展望

(1) 存在的不足

本文在混凝土配合比, III级粉煤灰混凝土抗压强度及耐久性方面做了相关试验和研究分析, 因受原材料、试验条件和时间的限制, 本论文今后还需继续研究的问题和不足如下:

①在III级粉煤灰混凝土力学性能的研究方面, 缺少系统性的理论输出, 对混凝土的劈裂试验等力学性能没有做到全方面的研究。

②单因素试验中, 对III级粉煤灰不同细度与混凝土抗压强度影响的研究欠缺, 不能全面的对III级粉煤灰混凝土的理论进行补充。

③在III级粉煤灰与镁渣耦合对混凝土碳化的试验中, 缺少相关 CO_2 浓度、环境温度、湿度对混凝土碳化的研究, 没有形成整体理论体系。

④试验中只对III级粉煤灰混凝土抗碳化性能做了部分研究, 未对其他耐久性问题研究。

(2) 未来展望

掺III级粉煤灰的混凝土仍未被建筑行业及技术人员认可, 其产量巨大, 成本低, 若形成系统的研究和实践对今后混凝土行业的发展会有一定的贡献。同时, 对于一些火力发电厂能够减少因掩埋、管理带来的不便。因此, 不管从环境保护还是经济价值方面, III级粉煤灰混凝土都有着广泛适用的意义和希望。

今后对III级粉煤灰混凝土有待加强研究的内容如下:

①对III级粉煤灰混凝土强度特性进行更深入的研究, 输出全面可行的理论体系, 并能实用在实践工程中;

②对III级粉煤灰混凝土耐久性进行更广的研究, 使其能够广泛的运用在建筑行业, 如性能更优的建筑砌块等;

④对相关化学启发剂的研究, 研究出能够充分激发III级粉煤灰活性等性能的化学助手;

⑤对III级粉煤灰加工处理方法进行研究, 使其经加工后, 能够应用在更广泛的行业中, 如粉磨处理等。

参考文献

- [1]周静海.对我国城镇化建设发展的思考[J].沈阳建筑大学学报,2014,6(02):120-123.
- [2]朱丕荣.世界城市化发展与我国城镇化建设[J].世界经济与政治论坛,2013,(06):29-32.
- [3]王雄星.民用建筑工程的绿色施工技术探讨[J].河南建材,2014,(06):94-94.
- [4]张亮.新型商业模式对城市商业建筑的影响[J].安徽建筑工业学院学报,2006,14(04):47-49.
- [5]刘特尔.商业建筑外观设计—以营造商业气氛为例[J].四川建材,2015,41(01):60-62.
- [6]赵星.建筑外观的个性化造型设计刍议[J].建设科技,2013,(08):34-35.
- [7]王庚.浅谈新型建筑材料及其发展状况[J].科技导向,2014,(33):173-174.
- [8]徐熙文.材料发展对建筑装饰设计影响的研究[J].西安建筑科技大学学报,2014,33(02):64-66.
- [9]白楠.宁夏的“走出去”“引进来”与中阿经贸论坛[J].改革与开放,2011,(11):33-34.
- [10]中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T50378-2014.绿色建筑评价标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [11]于春普.关于推动绿色建筑设计思考[J].建筑学报,2003,(11):50-52.
- [12]许国东.水泥-粉煤灰改性脱硫石膏基自保温砌块的研究[J].混凝土与水泥制品,2014,(12):80-82.
- [13]刘秀伟.复掺磷渣粉与粉煤灰对预拌砂浆性能的影响[J].混凝土,2014,(11):136-138.
- [14]方坤河,陈昌礼.III级粉煤灰应用于碾压混凝土坝的可行性分析[J].人民长江,2012,43(10):24-26.
- [15]张雪飞.大面积混凝土整体地坪机械化施工[J].施工技术,2014,43(12):380-382.
- [16]纪宪坤.预拌混凝土搅拌站绿色生产技术探讨[J].施工技术,2014,43(24):24-26.
- [17]段岳强,张天聪.机制砂混凝土抗压强度与灰水比的关系分析[J].城市道桥与防洪,2011,(09):23-24.
- [18]李金伟.C120 高强混凝土的试验研究[J].混凝土,2009,(03):110-122.
- [19]中联重科C120混凝土泵送高316 m创纪录[R].混凝土,2010,(11):33-34.
- [20]周春雨,孙咏梅,葛兆明.利用本地资源对C60、C70、C80高强泵送混凝土配制技术的研究[C].第五届全国高性能混凝土学术交流会论文,2004:302-306.
- [21]冷发光等.C60~C100高强高性能混凝土的试验研究[J].建筑结构,2011,41(11):155-158.
- [22]邵阵.基于Matlab及ANN模型的高性能混凝土配合比优化设计[D].安徽合肥:合肥工业大学,2007.
- [23]谢卓然,解松芳,阿力坦巴根那.混凝土配合比优化设计的进展[J].内蒙古农业大学学报,2007,28(04):234-237.
- [24]王晓飞.高强高性能混凝土配合比优化设计[D].陕西西安:西安建筑科技大学,2012.
- [25]黄兆龙.混凝土性质与行为[M].台湾:詹氏书局,1997:292.
- [26]陈建奎.高性能混凝土(HPC)配合比设计新法—全计算法[J].硅酸盐学报,2000,28(02):194-198.
- [27]靳朋勃.粉煤灰农业利用现状[J].安徽农业科学,2007,35(18):5544-5545.
- [28]中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T 1596-2005.用于水泥和混凝土中的粉煤灰[S].北京:中国标准出版社,2005.
- [29]蒋晓曙.III级粉煤灰用于道路混凝土[J].南京化工大学学报,1998,(12):39-43.

- [30]乔秀臣.废弃粉煤灰火山灰活性的研究[J].武汉理工大学学报,2003,(08):28-37.
- [31]卢光全.Ⅲ级粉煤灰在无筋混凝土基层中的应用[J].粉煤灰综合利用,2011,(03):38-39.
- [32]蒋林华,刘振清,叶义群.大掺量Ⅲ级粉煤灰混凝土耐久性研究[J].建筑材料学报,2004,7(03):328-331.
- [33]林旭健,张生营,季韬.中、高掺量Ⅲ级粉煤灰混凝土抗氯离子侵入试验[J].福州大学学报,2005,33(06):798-802.
- [34]颜承越.Ⅲ级粉煤灰混凝土的试验与应用[J].混凝土与水泥制品,1991,(02):12-14
- [35]贺鸿珠.掺碱性减水剂及Ⅲ级粉煤灰的混凝土力学性能、耐久性能及有关特性试验[J].混凝土与水泥制品,1995,(05):22-25.
- [36]王元.Ⅲ级粉煤灰品质的综合评价及其作钢筋混凝土掺合料的研讨[J].硅酸盐建筑制品,1993,(01):5-7.
- [37]Langley W S, Carrette G G, Malhotra V M. Structural concrete incorporating high volumes of ASTM Class F fly Ash[J]. ACI Material Journal,1989,(86):507-514.
- [38]Neeru Chaudhary. Removal of phenol using fly ash and impregnated fly ash: An approach to equilibrium, kinetic, and thermodynamic study[J]. Separation Science and Technology, 2015, 50 (05), 690-699.
- [39]陈昌礼.高掺粉煤灰的碾压混凝土在普定水电站拱坝中的应用[J].混凝土与水泥制品,1997,(03):24-27.
- [40]杨东宁.Ⅲ粉煤灰代替细砂的试验研究[J].混凝土,2006,(08):44-46.
- [41]苏英.大掺量低质粉煤灰配制中高强度混凝土试验研究[J].混凝土,2006,(03):37-39.
- [42]林志平.低品质粉煤灰混凝土基本力学性能试验研究[J].福建建筑,2013,(03):37-39.
- [43]谷章昭.掺Ⅲ级粉煤灰的混凝土特性[J].混凝土与水泥制品,1992,(06):4-7.
- [44]赵亚明.掺低品质原状粉煤灰的混凝土强度及抗冻性研究[J].房材与应用,2002,(06):28-29.
- [45]张超.大掺量低品质粉煤灰在中高强砼中的作用机理分析[J].粉煤灰综合利用,2005,(02):34-35.
- [46]应德标.Ⅲ级粉煤灰掺量、细度对水泥强度发展的影响[J].中国粉体技术,2006,(01):31-32.
- [47]中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T 175-2007.普通硅酸盐水泥[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [48]中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T 1596-2005.用于水泥和混凝土中的粉煤灰[S].北京:中国标准出版社,2005.
- [49]崔自治.镁渣火山灰活性试验研究[J].宁夏工程技术,2007,6(02):160-163.
- [50]中华人民共和国住房和城乡建设部.JGJ52-2006.普通混凝土砂、石质量及检验方法标准[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [51]王锋峰,崔自治,马成功等.Ⅲ级原状粉煤灰混凝土的强度特性研究[J].混凝土,2014,(06):141-143.
- [52]中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T50080-2002.普通混凝土拌合物性能试验方法标准[S].北京:中国标准出版社,2002.
- [53]中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T50081-2002.普通混凝土力学性能试验方法标准[S].北京:中国标准出版社,2002.

- [54]崔自治,周康等.镁渣细骨料混凝土的强度特性研究[J].混凝土,2013,(06):67-69.
- [56]黄春霞.大掺量粉煤灰混凝土碳化深度预测模型试验研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2011.
- [57]刘斌.大掺量粉煤灰混凝土的抗碳化性能[J].混凝土,2003,(03):44-47.
- [58]沈旦申.粉煤灰混凝土[M].中国铁道出版社,2007.
- [59]尚玉昌.普通生态学[M].北京:北京大学出版社,2002.
- [60]中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T 50082-2009.普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]北京:中国标准出版社,2009.
- [61]崔自治,王锋峰,熊芳等.III级粉煤灰与镁渣耦合对 C30 混凝土抗压强度的影响研究[J].中国农村水利水电(录用).

致 谢

首先感谢我的导师崔自治教授近两年的教导和帮助，本文不论从论文选题，试验筹备、开题、方案的设计和论文修改都凝聚了崔老师的大量心血和奉献。两年来，在我的研究生生活和学习中，崔老师都给予了非常大的帮助，他不仅教授我专业知识，还教了我很多做人的道理。崔老师对科学研究的孜孜不倦、进取精神、实事求是也深深的影响着我，另我钦佩和感动。日常生活中，崔老师非常关心我的发展，经常的谈心交流，是一位可亲 and 令人尊重的学者。在此论文结束与毕业之际，感谢崔老师的知遇之恩和培养之情，谨向崔老师致以崇高的敬意和由衷的感谢。

感谢我的父母和姐姐在我求学道路上的抚养和支持，他们默默无闻地付出和辛苦地工作，就是为了我有更好地发展。我定当继续努力，报答他们的养育之恩。

感谢建筑科学研究院有限公司熊芳老师的悉心指导。

同时，感谢学院的各位领导老师对我的帮助。在学习期间，张文博、车佳玲等老师对我的专业学习进行了大量的帮助；在日常生活工作方面，王德全、张强、郭利、叶新才、陈筱莉、华晨男、朱磊等老师也教会了我很多，在此对以上老师的付出和支持表示衷心的感谢。

本论文的试验有一部分是在宁夏众昊砼业有限公司完成的，得到了公司的大力支持，同时感谢总经理孙生、实验室主任焦鸿庆及其他同事的帮助和指导。

在学校期间，还要感谢王文孟、马成功、李存云、李姗姗、付杰等同学对试验部分的帮助，没有你们的帮助，我的实验无法有效地完成。

感谢宁夏大学和土木与水利工程学院对我的培养，并向其他帮助、关心和鼓励过我的老师、同学、朋友表示感谢。

最后，感谢参加答辩的各位专家老师，感谢您在百忙之中给予的指导，谢谢！

王锋峰

2015年3月15日

个人简介

王锋峰, 男, 回族, 1989年3月出生, 宁夏银川人。2009年9月于宁夏大学土木与水利工程学院本科就读, 土木工程专业, 于2013年6月毕业且获学士学位; 2013年9月于宁夏大学土木与水利工程学院攻读水利工程专业硕士学位。

论文发表情况

- (1) 王锋峰, 崔自治, 马成功, 等. III级原状粉煤灰混凝土的强度特性研究[J]. 混凝土, 2014, (6):141-143.
- (2) 杨维武, 王锋峰, 崔自治. III级粉煤灰与镁渣耦合对C30混凝土碳化的影响研究[J]. 科学与工程与技术, 2015, (6):250-253.
- (3) 崔自治, 王锋峰, 熊芳等. III级粉煤灰与镁渣耦合对C30混凝土抗压强度的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 已录用.