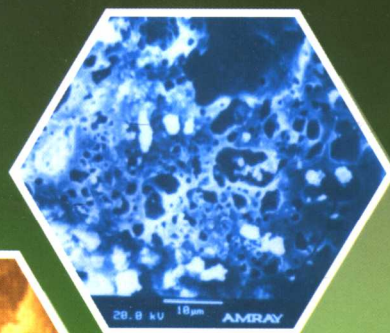
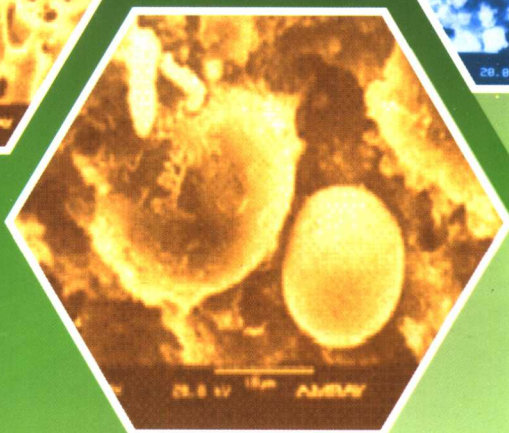
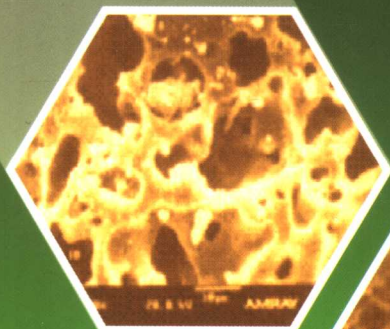
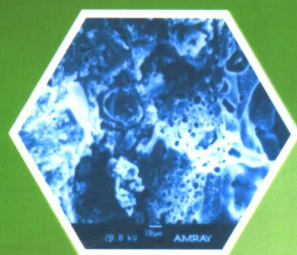




高掺量粉煤灰 固结材料

刘文永 付海明 冯春喜 王新刚 编著

GAOCHANLIANG FENMEIHUI
GUJIE CAILIAO

中国建材工业出版社

高掺量粉煤灰固结材料

刘文永 付海明 冯春喜 王新刚 编著

中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

高掺量粉煤灰固结材料/刘文永等编著. —北京:中国建材工业出版社, 2007. 11
ISBN 978-7-80227-351-1

I. 高… II. 刘… III. 粉煤灰水泥—研究 IV. TQ172.71

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 171491 号

内 容 简 介

本书主要介绍了高掺量粉煤灰固结材料试验的研究成果, 包括高掺量粉煤灰建筑材料、高掺量粉煤灰注浆材料和高掺量粉煤灰干粉砂浆材料。

本书为电厂、建材厂了解、掌握高掺量粉煤灰固结技术提供了完整的技术资料。本书还可作为相关的研究院、所技术人员的参考资料。本书对高等院校无机材料专业教师、学生进行比较系统的粉煤灰材料力学试验, 使用 X 射线衍射、扫描电镜分析试验技术研究无机材料的矿物成分、微观结构提供了参考。

高掺量粉煤灰固结材料

刘文永 付海明 冯春喜 王新刚 编著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 12.5

字 数: 234 千字

版 次: 2007 年 11 月第 1 版

印 次: 2007 年 11 月第 1 次

书 号: ISBN 978-7-80227-351-1

定 价: 29.00 元

本社网址: www.jccbs.com.cn

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前 言

本书主要介绍了高掺量粉煤灰固结材料试验的研究成果,包括高掺量粉煤灰建筑材料、高掺量粉煤灰注浆材料和高掺量粉煤灰干粉砂浆材料。高掺量粉煤灰标砖在粉煤灰掺量达到 80% ~ 85% 的条件下,粉煤灰砖强度达到 10MPa (承重砖标准) 以上,冻融后强度不但没有降低反而提高了 25%,解决了粉煤灰材料抗冻性差的问题。我们通过单轴、三轴力学试验研究了高掺量粉煤灰固结材料的力学性质,测定、分析和研究了高掺量粉煤灰固结材料的主要力学参数和强度特性;重点试验研究了高掺量粉煤灰固结材料的强度变化规律和影响因素。通过 X 射线衍射、扫描电镜分析研究了高掺量粉煤灰固结材料的矿物成分和微观结构,参照前人对粉煤灰的水化反应过程研究和热力学研究的研究成果说明高掺量粉煤灰固结材料的反应机理;介绍高掺量粉煤灰建筑材料研究成果的应用,推荐生产工艺参数;介绍了采用北京真然绿色建材科技有限公司的粉煤灰固化剂配制高掺量粉煤灰注浆材料的配制,以及对已研制成功的高掺量粉煤灰注浆材料的各项性能的试验研究,包括该注浆材料浆液的初凝和终凝时间、黏度、密度、结石率、析水率及析水时间,结石体的抗压强度、抗折强度等,并进行了与现有的最新型水泥—粉煤灰注浆材料的对比研究;介绍了高掺量粉煤灰砂浆材料,通过正交试验方法如何配制不同强度等级的高掺量粉煤灰干粉砂浆。同时,采用对比试验方法,系统研究粉煤灰干粉砂浆的主要性能,试验结果表明,与传统的砂浆相比,掺粉煤灰的干粉砂浆性能更优良,当粉煤灰以 30% ~ 45% 取代水泥时,明显地改善了新拌砂浆的和易性,并提高了收缩性能和耐久性,推荐介绍了高掺量粉煤灰干粉砂浆的生产和施工工艺。

课题组经过几年对高掺量粉煤灰固结材料的试验研究,形成了包括粉煤灰激活素、粉煤灰固化剂、高掺量粉煤灰建筑材料、高掺量粉煤灰注浆材料和高掺量粉煤灰砂浆材料在内的一整套技术体系,本书是对这一技术体系的总结。

随着国家环保政策的加强，对成熟的粉煤灰利用技术的需求日益增加，希望本书能为电厂、建材厂了解掌握高掺量粉煤灰固结技术提供完整的技术资料，也可以作为相关的研究院、所技术人员的参考资料，特别是对高等院校无机材料专业教师、学生进行比较系统的粉煤灰材料力学试验，使用 X 射线衍射、扫描电镜分析试验技术研究无机材料的矿物成分、微观结构可提供参考。

目 录

1 绪 论	1
1.1 引 言	1
1.2 国内外相关研究动态综述	2
1.2.1 国内研究状况	2
1.2.2 国外研究状况	5
1.3 本章小结	8
2 粉煤灰的物理化学特性	9
2.1 粉煤灰的分类和分级	10
2.1.1 粉煤灰的分类	10
2.1.2 粉煤灰的分级	12
2.1.3 粉煤灰的颗粒特性	13
2.1.4 粉煤灰的细度	13
2.2 粉煤灰的矿物组成	14
2.2.1 粉煤灰中主要矿物的形成	14
2.2.2 粉煤灰中的矿物相	15
2.2.3 我国粉煤灰的矿物组成	16
2.2.4 粉煤灰中的晶体矿物相	17
2.3 粉煤灰的物理化学分析	18
2.3.1 粉煤灰的物理特性	18
2.3.2 粉煤灰的活性	19
2.3.3 粉煤灰的放射性	21
2.4 本章小结	22
3 高掺量粉煤灰建筑材料	24
3.1 高掺量粉煤灰建筑材料的力学试验方法	24
3.1.1 高掺量粉煤灰建筑材料试验样品的制备	24

3.1.2	高掺量粉煤灰建筑材料力学性能的试验方法	24
3.2	高掺量粉煤灰建筑材料的力学特性	27
3.2.1	粉煤灰掺量与高掺量粉煤灰建筑材料密度的关系	27
3.2.2	高掺量粉煤灰建筑材料的单轴抗压强度	27
3.2.3	高掺量粉煤灰建筑材料的弹性模量 E	29
3.2.4	高掺量粉煤灰建筑材料的泊松比 μ	30
3.2.5	高掺量粉煤灰建筑材料的动弹性模量 E_d	31
3.2.6	粉煤灰建筑材料的单轴压缩应力-应变曲线及其特征	31
3.2.7	粉煤灰建筑材料的三轴抗压强度特性	33
3.2.8	高掺量粉煤灰建筑材料的抗剪强度特性	36
3.2.9	高掺量粉煤灰建筑材料的破坏特征	38
3.2.10	影响高掺量粉煤灰建筑材料强度的主要因素	41
3.2.11	粉煤灰建筑材料经过冻融后的强度变化规律	41
3.3	高掺量粉煤灰建筑材料在不同养护条件下的强度增长规律	45
3.3.1	标准养护条件对高掺量粉煤灰建筑材料强度的影响	46
3.3.2	三种养护条件对高掺量粉煤灰建筑材料强度的影响	47
3.3.3	不同掺量条件下养护方式对高掺量粉煤灰建筑材料强度的影响	48
3.3.4	粉煤灰级别对高掺量粉煤灰建筑材料强度的影响	48
3.3.5	固化剂掺量对高掺量粉煤灰建筑材料强度的影响	49
3.3.6	成型压力对高掺量粉煤灰建筑材料强度的影响	51
3.3.7	粉煤灰细灰掺量对高掺量粉煤灰建筑材料强度影响	54
3.3.8	影响高掺量粉煤灰建筑材料强度的其他因素	56
3.3.9	推荐的高掺量粉煤灰建筑材料生产工艺参数	57
3.4	本章小结	58
4	高掺量粉煤灰建筑材料的水化固结反应机理和微观结构	60
4.1	概 述	60
4.2	原材料的化学成分和矿物成分分析	61
4.2.1	试验原材料与方法	61
4.2.2	粉煤灰和固结剂的化学分析	62
4.2.3	粉煤灰建筑材料的矿物组成	64
4.3	高掺量粉煤灰建筑材料的微观结构分析	69
4.3.1	高掺量粉煤灰建筑材料微观结构的观测	69
4.3.2	高掺量粉煤灰建筑材料微观结构的分析	74

4.4	高掺量粉煤灰建筑材料的水化反应	75
4.4.1	粉煤灰-石灰-水体系水化反应形式	75
4.4.2	高掺量粉煤灰建筑材料的水化反应过程	77
4.5	高掺量粉煤灰建筑材料的热力学分析	77
4.5.1	粉煤灰固结材料反应系统的 ΔH 分析	78
4.5.2	粉煤灰建筑材料反应系统的 ΔG 分析	79
4.6	本章小结	80
5	高掺量粉煤灰建筑材料研究成果的应用	82
5.1	高掺量粉煤灰建筑材料的技术应用现状	82
5.2	高掺量粉煤灰建筑材料生产工艺及其产品的特点	83
5.2.1	高掺量粉煤灰建筑材料生产工艺	83
5.2.2	高掺量粉煤灰建筑材料的产品性能	86
5.2.3	高掺量粉煤灰建筑材料的生产工艺参数	87
5.3	高掺量粉煤灰建筑材料的技术经济分析	87
5.3.1	技术分析	87
5.3.2	经济效果分析	87
5.4	本章小结	89
6	高掺量粉煤灰注浆材料	90
6.1	引言	90
6.1.1	课题研究意义	91
6.1.2	注浆法治理采空区的特点	94
6.2	注浆技术的研究现状	94
6.2.1	注浆技术的发展概况	94
6.2.2	国内外地下注浆领域的研究现状	97
6.2.3	国内注浆技术研究成果	98
6.2.4	目前采空区注浆技术存在的问题	99
6.3	注浆材料概述	99
6.3.1	注浆液的基本性能	102
6.3.2	注浆固结体的性质	104
6.4	采空区注浆材料的技术要求和参数	105
6.4.1	注浆材料的分类	105
6.4.2	采空区注浆材料的技术要求	106

6.4.3	注浆材料的技术参数	107
6.5	高掺量粉煤灰新型注浆材料的试验研究	107
6.5.1	主要研究内容	107
6.5.2	试验目的和试验方案	108
6.5.3	试验研究内容	109
6.6	本章小结	116
7	高掺量粉煤灰砂浆材料	117
7.1	引 言	117
7.1.1	干粉砂浆发展现状	117
7.1.2	干粉砂浆的应用及发展状况	118
7.1.3	建筑砂浆工业化生产的意义	119
7.1.4	工业化生产的砂浆种类及其特点	119
7.1.5	国外干粉砂浆发展概述	121
7.1.6	国内干粉砂浆发展概况	124
7.1.7	未来我国建筑干粉砂浆市场需求预测	127
7.1.8	我国建筑干粉砂浆行业目前存在的问题	129
7.1.9	粉煤灰在建筑材料中的应用及发展状况	129
7.1.10	课题研究的意义和内容	130
7.2	原材料对干粉砂浆的影响	131
7.2.1	胶凝材料影响	133
7.2.2	水泥强度等级对干粉砂浆性能的影响	133
7.2.3	粉煤灰等量取代水泥对砂浆性能影响	134
7.2.4	粉煤灰效应及其品质对干粉砂浆的影响	134
7.2.5	粉煤灰品质对砂浆强度的影响	135
7.2.6	高钙灰与低钙灰混掺对砂浆性能的影响	138
7.2.7	不同品种商品粉煤灰对砂浆性能的影响	138
7.3	砂子在粉煤灰砂浆中的要求及其影响	139
7.4	试验结果分析	140
7.5	外加剂对粉煤灰干粉砂浆的影响	141
7.5.1	化学添加剂对干粉砂浆的影响	141
7.5.2	细分散有机聚合物添加剂对干粉砂浆的影响	142
7.5.3	矿物外加剂对干粉砂浆的影响	143
7.5.4	几种激发剂对粉煤灰干粉砂浆的影响	144

7.5.5	温度对强度的影响试验	147
7.5.6	分析与讨论	147
7.5.7	几种早强剂对粉煤灰干粉砂浆早期强度的影响	149
7.5.8	试验结果分析	151
7.6	本章小结	151
8	高掺量粉煤灰砌筑干粉砂浆的配比试验	153
8.1	粉煤灰砌筑干粉砂浆配合比的确定	153
8.1.1	粉煤灰干粉砂浆性能的试验	154
8.1.2	不同配合比的粉煤灰砂浆性能试验	155
8.2	高掺量粉煤灰干粉砂浆砌体力学性能试验	157
8.3	试验结果与分析	158
8.3.1	试验结果	158
8.3.2	试验结果分析	159
8.4	高掺量粉煤灰干粉砂浆与传统砂浆的性能比较	159
8.5	本章小结	161
9	系列粉煤灰干粉砂浆性能的研究	162
9.1	粉煤灰抹灰砂浆	162
9.2	内墙抹面粉煤灰干粉砂浆	163
9.3	外墙抹面粉煤灰干粉砂浆	164
9.4	地面耐磨粉煤灰干粉砂浆	165
9.5	自流平粉煤灰干粉砂浆材料	165
9.5.1	自流平粉煤灰砂浆材料	165
9.5.2	自流平高强无收缩灌浆料	166
9.6	粉煤灰瓷砖粘结剂	167
9.7	干粉膨胀砂浆	168
9.8	防水粉煤灰干粉砂浆	169
9.9	本章小结	171
10	粉煤灰干粉砂浆的生产应用	172
10.1	推荐粉煤灰砂浆的生产配合比	172
10.2	粉煤灰干粉砂浆生产技术要求	173
10.2.1	粉煤灰干粉砂浆的原材料要求	173

10.2.2 粉煤灰干粉砂浆生产工艺的技术要求	174
10.2.3 应用技术要求	175
10.3 粉煤灰系列干粉砂浆的操作工艺	176
10.3.1 粉煤灰粘结砂浆的操作工艺	176
10.3.2 粉煤灰抹灰砂浆的操作工艺	176
10.3.3 粉煤灰砌筑砂浆的操作工艺	177
10.3.4 粉煤灰地坪砂浆的操作工艺	177
10.4 经济技术分析	177
10.4.1 经济效益分析	177
10.4.2 社会效益分析	178
10.4.3 干粉砂浆在推广应用中存在问题和的发展方向	179
10.5 本章小结	180
缩写词注释	181
参考文献	182

1 绪 论

1.1 引 言

我国煤炭资源丰富,现阶段的能源生产结构仍以火力发电为主,到2000年底,全国发电装机容量达到31932万kW,其中水电7935万kW,占24.9%;火电23754万kW,占74.4%。我国能源生产在电源结构方面今后相当长的时间内将继续维持燃煤机组为主的基本格局。电力是洁净能源,但火力发电要排出大量的灰渣,每10MW的装机容量,需排放粉煤灰约1万t。2000年全国排放粉煤灰约1.6亿t,粉煤灰的处置大多以堆放为主,1995年全国电力系统灰场占地面积已达38万亩,预计2000年将占地50万亩以上。北京地区的京西发电有限责任公司的年排灰量50万t,仅门头沟区龙口灰场就储灰800多万 m^3 ,在多风季节,灰尘四起,污染大气环境,需要投入大量的资金和设备进行喷淋降尘。在我们这样一个地多人口少,土地资源宝贵的国家,建储灰场要占用大量的土地,而且处理粉煤灰输送和管理维护费用占有很大比例,粉煤灰的处置已成为制约我国电力工业发展的一个重要因素。粉煤灰占用大量土地,污染江河湖海,严重破坏生态环境,粉煤灰的综合利用已势在必行,是我国可持续发展战略的一项重要内容。

目前我国除上海等少数地区粉煤灰利用率较高外,绝大多数地区的粉煤灰利用率还不到30%,从发展新材料和环境保护的角度出发,急需研究开发新的粉煤灰应用领域。为了鼓励粉煤灰的综合利用,国家出台了一系列优惠政策,鼓励引导支持粉煤灰综合利用的开发研究和应用,高掺量粉煤灰建筑材料是国家粉煤灰综合利用重点研究课题之一。根据粉煤灰在建筑材料中的质量比划分为大掺量(质量比50%以上)、中掺量(质量比30%~50%)、小掺量(质量比30%以下)粉煤灰制品。由于粉煤灰含碳量以及呈细粉状等原因,现在的粉煤灰掺量一般都小于30%。本课题组通过几年的试验,研究了一套利用粉煤灰生产各类粉煤灰建筑材料的技术并成功应用于实际生产中,其粉煤灰



掺量在达到 80% ~ 85% 的条件下, 粉煤灰砖强度达到 10MPa (承重砖标准) 以上。用粉煤灰固化剂与湿排原状粉煤灰直接混合, 经过半干法挤压成型, 在常温常压条件下养护形成高掺量粉煤灰建筑材料, 并且可以采用不同的设备成型方式制成各种类别的建筑材料, 如粉煤灰砖、砌块和隔墙板。应用该技术可将大量的工业固体废料——粉煤灰制成有用的新型建筑材料。

本章内容是对高掺量粉煤灰建筑材料的力学特性和机理进行系统的研究, 是对该技术在理论上的深入研究和总结, 研究结果可用于指导生产设备的选择和生产工艺过程的技术控制。

1.2 国内外相关研究动态综述

1.2.1 国内研究状况

我国粉煤灰科研开发工作自 20 世纪 50 年代就已经开始, 自 1980 年以来, 粉煤灰在建设工程中已广泛应用于混凝土掺合料, 用于高等级公路路堤、土木工程结构的填筑。同时还利用粉煤灰作为水泥掺合料开发了烧结粉煤灰砖、粉煤灰陶粒、粉煤灰硅酸盐砌块等多种建材产品。粉煤灰除了在以上这些建筑材料、建设工程中得到大量利用外, 同时还在粉煤灰改良土壤、制造化肥、精细利用方面取得了一定的成果。

目前, 在国内建设领域中研究较多、应用较为广泛的几种技术是粉煤灰在混凝土中的利用。我国早在 20 世纪 50 年代就开始研究粉煤灰在混凝土中的利用技术, 当时主要在大坝混凝土和干硬性混凝土中应用。采用等量取代法进行粉煤灰混凝土设计, 但 28d 龄期的抗压强度达不到水泥混凝土的强度要求。20 世纪 80 年代以后, 通过电子扫描显微镜等先进设备, 总结出了粉煤灰在水泥和混凝土材料中的利用优势。上海粉煤灰综合利用中心运用菲莱特 (FERET) 混凝土强度理论、借鉴了阿伯拉姆斯 (ABRAMS) 水灰比定律和保罗莱 (BOLOMEY) 灰水比与强度线性关系公式, 开展了粉煤灰混凝土配合比的基础研究, 在“粉煤灰强度效率系数”和“有效水灰比”基本原则的基础上, 提出了“超量系数法”的粉煤灰配比设计方法。与此同时, 国家也相继颁布了 GBJ 146—90《粉煤灰混凝土应用技术规范》和 JGJ 28—86《粉煤灰在混凝土和砂浆中应用技术规程》, 对于粉煤灰的质量也有了统一的法律规定, GB 1596—91《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》将粉煤灰分为三级, 用于水泥和混凝土的粉煤灰有了严格的质量标准。北京、上海和杭州等市的火力发电厂开始应用和推广以磨细加工或经过除尘器收集的细灰制备技术, 粉煤灰的品质有了大幅度的提高, 加上预拌混凝土的推广应用, 这些因素促使粉煤灰在混凝土中的利用得到



迅速发展。适量的粉煤灰掺入后不仅可以降低成本,而且可以改善混凝土的流动性能,降低混凝土的水化热,提高混凝土的泵送性、耐久性,增加后期强度等,这些认识已经被广泛接受,使Ⅰ级、Ⅱ级等高品质粉煤灰在预拌混凝土中得到广泛应用。1995年以后,超细粉煤灰(Ⅰ级和Ⅱ级灰)用于混凝土工程得到飞速发展,用粉煤灰替代水泥的比例达到30%。因此,超细粉煤灰在大坝、地基、地下结构、预制构件和浇注混凝土工程中的应用量不断提高,粉煤灰的利用率达到40%。

从20世纪50年代开始,我国对用粉煤灰制作建筑材料产品进行了大量的研究。60年代开始研制粉煤灰密实砌块、墙板、粉煤灰烧结陶粒和粉煤灰黏土烧结砖。70年代国家为在建材工业中利用粉煤灰投资5.7亿元建立了176家粉煤灰建材示范厂,但粉煤灰的利用率仅为14%。到1985年,国务院批转国家经委《关于开展资源综合利用若干问题暂行规定》,提出了一系列优惠政策,鼓励粉煤灰应用技术的试验研究。到90年代,粉煤灰作为人工火山灰质活性材料生产水泥,一是替代黏土用于制作水泥生料,二是将粉煤灰与水泥熟料混合磨细成水泥,粉煤灰的掺量一般在20%~40%。到目前为止,用粉煤灰生产建材产品的种类和应用范围逐步增加和扩大,得到较广泛工程应用的掺粉煤灰建筑材料已达20余种,包括:粉煤灰水泥、烧结粉煤灰砖、粉煤灰饰面砖、粉煤灰陶粒、粉煤灰硅酸盐砌块、蒸压粉煤灰砖、硅钙板等。这些产品基本上都有国标或部颁标准,部分已经形成产业化,成为粉煤灰利用比较稳定的领域。同时,国家有关限制生产、使用实心黏土制品政策的出台,对发展以粉煤灰作原材料的新型建筑制品如粉煤灰混凝土砌块等起到了积极的推动作用。几种有代表性的粉煤灰应用技术有粉煤灰烧结砖、粉煤灰砌块、粉煤灰水泥混合材和砂浆技术、粉煤灰轻质建材。

①粉煤灰烧结砖。我国自20世纪60年代开始研制,生产上掺入最多的粉煤灰掺量达50%,相对于其他墙体材料,粉煤灰烧结砖具有节约土地、节约能源,减轻墙体重量和提高隔热性能的优点。大掺量粉煤灰烧结砖的设备和工艺比较复杂,目前我国通过消化吸收国外技术,已能制造此类设备,其中产品中粉煤灰掺量可达50%~60%以上,强度和外观质量与国外同类产品相当。

②粉煤灰砌块。不掺水泥的粉煤灰硅酸盐砌块是我国最早开始推广的粉煤灰产业化技术产品之一。近年来,随着小型空心砌块的发展,一种以大掺量粉煤灰、少水泥用量的粉煤灰混凝土小型空心砌块发展较快,这种工艺改变了以往粉煤灰制品掺加生石灰、石膏的方法,粉煤灰制品的各项性能有较大改进,可用于承重或非承重墙体中。我国的优惠政策也吸引了外国公司在中国投资建粉煤灰砌块生产厂,如江苏连云港,选用意大利生产设备生产粉煤灰渣掺量达



50% 的小砌块。

③粉煤灰用于水泥混合材和砂浆技术。目前全国只要有条件的大中小水泥厂都会在不同强度等级、不同品种水泥的生产过程中掺入不同比例的粉煤灰生产粉煤灰水泥。近年来,北京、上海、南京等商品混凝土应用较广泛的地区开始推广应用商品砂浆,各研究单位纷纷开展了粉煤灰用于商品砂浆的研究。从发表的资料来看,目前研究较多的是砌筑砂浆。试验表明,粉煤灰在砌筑水泥中的掺量可大大高于 40% 的比例。

④粉煤灰轻质建材。包括粉煤灰陶粒、粉煤灰加气混凝土等多种技术产品。粉煤灰陶粒具有低堆积密度、高强度、低导热性和高耐火性等特点,在我国一般代替石子作为混凝土中的轻集料,用在高层建筑和大跨度桥梁中。粉煤灰加气混凝土是用粉煤灰、石灰、水泥、石膏为主要原料,采用铝粉发气技术制成的一种多孔建筑材料。可以根据需要,制成不同密度、不同强度的砌块、面板和墙板,满足不同的需要,具有轻质、绝热、耐火等优良性能。

早在 20 世纪 70 年代末,浙江、云南、江苏、江西等省便开始研制和生产免烧免蒸黏土砖,以水泥、黏土及少量外加剂为原料,生产工艺多采用半干压成型方法,强度等级达到 10MPa,抗冻性较差,在寒冷地区不能应用。

国内高等院校在该领域的研究也取得了很大进展。

武汉工业大学采用自然养护法研制粉煤灰免烧免蒸养砖,已经进入试用阶段,但其抗冻性较差,且其废渣利用量仅为 50% 左右,仍然不能应用于严寒地区的建筑上。

哈尔滨建筑大学采用烧失量在 12% 以下的粉煤灰经过球磨机粉磨活化和由水泥、电石渣、石膏组成的复合固化剂,研制了耐寒型冷固化粉煤灰砌墙砖,粉煤灰掺量达到 42%。砖的质量满足 JC 239—91《粉煤灰砖》的标准,长期强度有一定的增长。

重庆建筑大学采用脱硫石膏和粉煤灰为主要原料,加入一定掺量的激发剂,制成脱硫石膏粉煤灰空心砌块,粉煤灰掺量为 30%,养护制度为 75℃8h,先湿热后干热养护,固结材料的强度偏低,冻融后强度损失达到 23% 以上。

武汉水利电力大学发明了一种土壤固化剂,以矿渣或矿渣组合物为主体原料,配以适量的碱性激发剂和表面活性剂粉磨至勃氏比表面积 400~900m²/kg。这种固化剂具有对粉煤灰等工业废渣、各种工业尾矿、含泥石屑、土壤、城市垃圾等在常温下固化的性能。

清华大学阎培渝等利用工业废渣氟石膏、粉煤灰和硅酸盐水泥按照 31:53:16 的质量比配制成氟石膏粉煤灰胶结材料,研究了胶结材料的水化产物、浆体结构、力学性能和养护条件。这种胶结材料凝结慢、早期强度较低,但后期强度



持续发展并达到较高强度。由于水化过程中形成致密浆体结构,氟石膏粉煤灰胶结材料具有较好的耐水性能。

目前,粉煤灰建筑材料制品主要采用水泥、石灰和石膏等胶凝材料。以水泥作为胶凝材料,当用量较大时,自然养护后直接使用。当以石灰作主要胶凝材料时,粉煤灰需经过陈化,并且必须经过 180℃ 以上高温高压养护后才能使用。

国内对提高粉煤灰水化活性技术进行了大量研究,其中主要采用物理方法、化学方法、水热合成反应、氯盐和硫酸盐早强剂来激发粉煤灰活性,提高粉煤灰在固结材料中的掺量,但粉煤灰掺量和固结材料的性能并没有显著的提高。北京市电力粉煤灰综合利用筹备组在对全国粉煤灰利用技术考察后提交的调研报告中指出:国产制砖设备真正用原状粉煤灰(炉底湿排粉煤灰)常压蒸养或自然养护生产粉煤灰建筑材料,而且达到高掺量以上的特别是掺灰量 80% 以上的没有工业化生产的应用实例。

由于粉煤灰混凝土广泛应用于结构工程,粉煤灰混凝土的力学性能研究已经比较成熟,构建了粉煤灰混凝土的各种力学模型。张亚梅系统研究了以大掺量优质粉煤灰与硅酸盐水泥复合为基材制备新型的 GFRCC(玻璃纤维增强水泥基复合材料的简称)在各种养护条件下的力学性能。

蒋林华研究了高掺量粉煤灰水泥浆体和混凝土的孔结构。首次把 X 射线小角度散射技术用于测定高掺量粉煤灰水泥浆体气孔—固体界面的分形维数,并就粉煤灰掺量、水胶比对气孔—固体界面的分形维数的影响进行了分析,发现过高的粉煤灰掺量和较大的水胶比均会使分形维数大幅度增加。他指出:过高的粉煤灰掺量和较大的水胶比均会使浆体中的孔隙率增加。浆体和混凝土中掺入粉煤灰后,孔分布得到改善,特别是混凝土中掺入粉煤灰后,小于 20nm 的无害孔大幅度增加。

1.2.2 国外研究状况

1914 年美国的 Anon 首先发现粉煤灰中的氧化物具有火山灰的特性,其后到 1933 年,美国伯克利加州理工学院的 R. E. Davis 系统地研究了粉煤灰在混凝土中的应用。1976 年美国国会公布了《资源保护和再利用法(RCRA)》。1977 年,将 C 级粉煤灰编入国家材料试验标准 ASTM C 618 中。到 1983 年,美国国家环保局颁布了《联邦政府对于水泥和混凝土中掺有粉煤灰的指导原则》。到 1994 年美国的粉煤灰利用率达到 28%。

自 1992 年以来,美国田纳西州一直把粉煤灰蒸压发泡混凝土作为燃煤副产品高掺量应用战略的一部分。粉煤灰蒸压发泡混凝土是由水、水泥、铝粉和



粉煤灰制成的一种高绝缘轻质建筑材料,粉煤灰掺量高达 60% ~ 75%。其特点是高热绝缘值、耐火性好、轻质,有的甚至可浮在水中。这种粉煤灰蒸压发泡混凝土对粉煤灰的质量要求较为宽松,含碳量高达 12%,达不到预拌混凝土标准的粉煤灰也能有较高的掺量。通过试验工厂进行了工业化生产各类建筑砌块的生产试验,证明把生产粉煤灰建材工厂建在粉煤灰场附近在没有政府补贴条件下是可以获得利润的。根据这些研究结论,美国的投资者在田纳西州克林顿建立生产粉煤灰建材工厂,作为一种硅质组分材料,每年可利用 10 万 t 粉煤灰。目前美国已有多家粉煤灰蒸压发泡混凝土工厂在运行。

1999 年美国国际粉煤灰利用会议上, L. M. Calarge 等发布了采用底灰和石灰混合制砖的研究结果,试验采用 90% 的底灰和 10% 的石灰混合,湿度为 20%, 研究结果表明底灰和石灰混合制砖有很大的潜力。

美国 O. C. Holmstrom 和 C. W. Swan 研究利用粉煤灰 (Fly Ash) 和高浓度聚乙烯 (High Density Polyethylene) 合成了一种新型的轻集料 (Synthetic Lightweight Aggregates)。他们将粉煤灰和高浓度聚乙烯混合搅拌均匀挤压成粒,制成粉煤灰与高浓度聚乙烯重量比为 70:30 和 80:20 新型集料,研究了这种轻集料的土工力学性能。粉煤灰被包裹在高浓度聚乙烯中,形成复合固体,并没有发生固结水化等反应。这种轻集料的比重较低,摩擦角较高,一般在 47.7° ~ 49.7° 之间。基于这些性能,这种轻集料可用于基础、坝体、排水设施和挡土墙的填充。

美国专利 5601643 介绍了碱金属或碱土金属硅酸盐、强碱化学激发粉煤灰胶凝材料。这种粉煤灰胶凝材料使用 F 级粉煤灰,粉煤灰的含碳量小于 6% 时,粉煤灰的掺加量范围为 60% ~ 80%, 碱金属或碱土金属硅酸盐掺量范围为 2% ~ 20%, 强碱掺量范围为 2% ~ 20%。掺 15% 的波特兰水泥,胶凝材料在至少 40°C 的温度条件下养护 1.5 ~ 60h,强度可达到 2000psi (磅/平方英寸)。该胶凝材料可用于生产砂浆和混凝土材料。美国专利 5534058 介绍了利用废物材料制造一种结构产品及其方法,粉煤灰的掺量在 70% ~ 85% 之间,纤维基材料的掺量在 15% ~ 30% 之间,乙烯醋酸酯作为胶粘剂,掺量少于 1%。这种结构产品的优点在于重量轻、可锯、可捶,可作为砖、板、屋顶板、墙板等材料。美国专利 5536310 介绍了一种含有粉煤灰的胶凝组分。在 100 份的胶凝组分中含有 10 ~ 30 份水泥, 50 ~ 80 份的粉煤灰, 5 ~ 8 份的羟基酸盐。

英国是粉煤灰利用率比较高的欧洲国家,1982 年颁布了粉煤灰混凝土的技术规定 BS 3892—PART1,到 1990 年的粉煤灰利用率达到 50%,累计浇筑粉煤灰混凝土超过 1 亿多 m^3 。英国由电力局 (Powergen)、国家电力公司 (NationalpowerPLC) 和苏格兰电力公司 (ScotlandpowerPLC) 三家负责粉煤