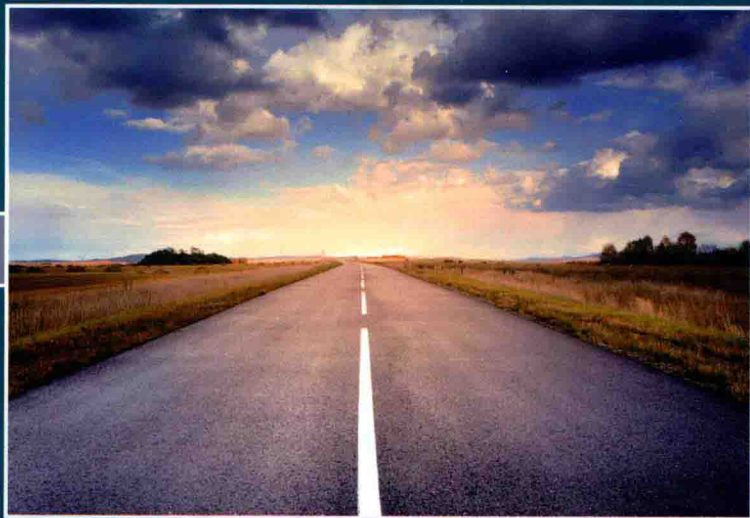


赤泥沥青 与沥青混合料路用性能 及黏弹特性

姚立阳 © 著



中国建材工业出版社

ISBN 7-109-1925-8

中国建材工业出版社

地址：北京·中国建材工业出版社

2013年7月第1版

赤泥沥青与沥青混合料 路用性能及黏弹特性

姚立阳 著

本书主要介绍了赤泥沥青与沥青混合料的路用性能及黏弹特性。全书共分5章。第1章介绍了赤泥沥青与沥青混合料的研究背景及意义；第2章介绍了赤泥沥青与沥青混合料的原材料及配合比设计；第3章介绍了赤泥沥青与沥青混合料的路用性能；第4章介绍了赤泥沥青与沥青混合料的黏弹特性；第5章介绍了赤泥沥青与沥青混合料的应用前景。

本书可作为道路工程、材料工程、土木工程等相关专业师生的教材，也可供从事道路工程、材料工程、土木工程等相关工作的工程技术人员参考。

本书可作为道路工程、材料工程、土木工程等相关专业师生的教材，也可供从事道路工程、材料工程、土木工程等相关工作的工程技术人员参考。

姚立阳 著

中国建材工业出版社

地址：北京·中国建材工业出版社

2013年7月第1版

ISBN 7-109-1925-8

中国建材工业出版社

本书可作为道路工程、材料工程、土木工程等相关专业师生的教材，也可供从事道路工程、材料工程、土木工程等相关工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

赤泥沥青与沥青混合料路用性能及黏弹特性/姚立

阳著. — 北京: 中国建材工业出版社, 2017. 9

ISBN 978-7-5160-1952-8

I. ①赤… II. ①姚… III. ①赤泥—沥青—粘弹性—
高等学校—教材 ②沥青拌和料—粘弹性—高等学校—教材
IV. ①U414. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 172595 号

内 容 提 要

本书针对赤泥在路用沥青及沥青混合料中的应用做了较为全面的试验研究和阐述, 内容包括赤泥沥青胶浆三大指标、黏度、黏弹性能, 以及赤泥沥青混合料的温度稳定性、水稳定性、黏弹特性等方面内容。

本书可供从事沥青道路设计、施工、科研人员学习参考, 亦可供大专院校相关专业师生及建筑材料领域有关专业人员参考。

赤泥沥青与沥青混合料路用性能及黏弹特性

姚立阳 著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市海淀区三里河路1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: 9

字 数: 300千字

版 次: 2017年9月第1版

印 次: 2017年9月第1次

定 价: 68.60元

本社网址: www.jccbs.com 微信公众号: zgjcgybs

本书如出现印装质量问题, 由我社市场营销部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前 言

随着我国经济的高速发展,交通量不断增加,交通组成不断变化,现代交通对沥青路面的质量提出越来越高的要求,特别是日益发展的高等级公路。由于沥青路面具有建设周期短、施工方便、行车舒适等特点,在高等级路面建设中得到广泛应用。截至2016年末,全国公路总里程已达到469.63万公里,公路密度48.92公里/百平方公里;公路养护里程459.00万公里,占公路总里程的97.7%;高速公路里程13.10万公里,高速公路车道里程57.95万公里,国家高速公路9.92万公里。但是,随着近几年交通量和轴载的迅速增加,沥青路面病害也急剧增加,致使沥青路面的使用寿命缩短,不仅产生了巨大的经济损失,给社会也造成了不良影响。

为了改善沥青路面的路用性能,采用新材料、新设备、新工艺,减少沥青路面的损坏,延长其使用寿命,是改造沥青路面工业技术落后现状的重要手段。赤泥作为一种排放量较大的工业废弃物,有限的利用途径和利用率仍然不能减缓其给社会和环境所带来的沉重负担。将工业废渣用于道路建设中,寻求工业废渣赤泥在道路建设中的可用之径,开拓了赤泥利用的新领域,既做到了废物利用,又保护了环境,使赤泥综合利用达到一个新的阶段。

本书围绕赤泥在沥青路面中的应用问题做了如下几个方面的研究,包括赤泥沥青胶浆的三大技术指标、赤泥沥青胶浆的黏滞性、赤泥沥青胶浆的黏弹性能、赤泥沥青混合料高温稳定性、赤泥沥青混合料的水稳定性、赤泥沥青混合料的低温抗裂性和赤泥沥青混合料的黏弹特性等。

本书由河南城建学院姚立阳老师独著完成,凝聚了作者多年的心血,内容真实可靠,相关结论均来自作者多年试验研究和工程实践经验。希望此书的出版能够满足道路工程领域人员的要求,对交通行业的发展有所帮助。

由于近几年沥青路面相关的理论和技术发展迅速，新材料、新技术和新观点不断涌现，加之时间仓促和编者水平有限，书中难免会存在疏漏、不当之处，恳请读者批评指正。谢谢！

作者
2017年6月

本书在编写过程中，参考了国内外许多文献，并得到了许多专家和同行的帮助，在此表示衷心的感谢。本书在编写过程中，参考了国内外许多文献，并得到了许多专家和同行的帮助，在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中，参考了国内外许多文献，并得到了许多专家和同行的帮助，在此表示衷心的感谢。本书在编写过程中，参考了国内外许多文献，并得到了许多专家和同行的帮助，在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中，参考了国内外许多文献，并得到了许多专家和同行的帮助，在此表示衷心的感谢。本书在编写过程中，参考了国内外许多文献，并得到了许多专家和同行的帮助，在此表示衷心的感谢。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 前言	1
1.2 赤泥的由来	2
1.2.1 烧结法	2
1.2.2 拜耳法	3
1.2.3 联合法	3
1.3 赤泥的组成	4
1.3.1 化学组成	4
1.3.2 矿物组成	5
1.4 国内外赤泥综合利用现状	5
1.4.1 赤泥在建材行业的应用	5
1.4.2 赤泥用作塑料填料	12
1.4.3 赤泥中有价金属的回收	12
1.4.4 赤泥在环境工程中的应用	15
本章参考文献	19
第2章 赤泥沥青胶浆的性能	23
2.1 概述	23
2.2 原材料	24
2.2.1 沥青	24
2.2.2 赤泥与矿粉	25
2.3 试验方法	28
2.3.1 沥青胶浆制备	28
2.3.2 针入度试验	30

2.3.3	延度试验	32
2.3.4	软化点试验	33
2.4	试验结果与分析	35
2.4.1	赤泥对延度的影响	35
2.4.2	赤泥对针入度的影响	40
2.4.3	赤泥对软化点的影响	45
2.5	综合应用与分析	50
2.6	本章小结	51
第3章	赤泥沥青胶浆的黏滞性与温度稳定性	53
3.1	概述	53
3.2	赤泥对沥青胶浆旋转黏度的影响	53
3.2.1	试验方法	53
3.2.2	试验结果	57
3.2.3	试验结果分析	58
3.3	赤泥沥青胶浆的温度稳定性	61
3.3.1	相关概念	61
3.3.2	试验结果	63
3.3.3	试验结果分析	64
3.4	本章小结	67
第4章	赤泥沥青胶浆的黏弹特性	69
4.1	概述	69
4.2	试验方法	69
4.3	试验结果与分析	70
4.3.1	替代量对沥青胶浆黏弹特性的影响	70
4.3.2	替代量对沥青胶浆变形性能的影响	91
4.3.3	粉胶比对沥青胶浆黏弹特性的影响	93
4.3.4	粉胶比对沥青胶浆变形性能的影响	108
4.4	本章小结	110

第5章 赤泥沥青混合料的路用性能及黏弹特性	112
5.1 沥青混合料配合比设计	112
5.1.1 原材料	112
5.1.2 DAC-13 沥青混合料组成设计	113
5.2 赤泥对沥青混合料高温稳定性的影响	116
5.2.1 马歇尔稳定度	116
5.2.2 流值	117
5.2.3 马歇尔模数	117
5.3 赤泥对沥青混合料低温稳定性的影响	118
5.4 赤泥对沥青混合料水稳定性的影响	120
5.4.1 稳定度分析	121
5.4.2 残留稳定度分析	122
5.5 赤泥沥青混合料蠕变回复性能	123
5.5.1 沥青混合料的黏弹性特征	123
5.5.2 沥青混合料黏弹特性研究现状	123
5.5.3 赤泥沥青混合料的黏弹特性	126
5.6 本章小结	134
本章参考文献	135

第1章 绪论

1.1 前言

赤泥是铝冶炼过程中产生的废渣,其颜色大多为褐红色或红棕色,故称之为赤泥。赤泥具有强碱性且组成成分复杂,是一种有环境污染及安全隐患的固体废弃物。据中商产业研究院数据库(AskCIData)最新数据显示,中国是目前世界上最大的氧化铝生产国,2014年我国氧化铝产量为4777.42万吨,2015年为5898.90万吨,2016年为6091万吨。在中国,每生产1吨氧化铝,就会附带排放0.8~1.5吨的赤泥。氧化铝产量逐渐增加的同时赤泥也在迅速增加,据统计,2015年赤泥在中国的堆存量已经超过4亿吨,其中主要集中在山东、河南、山西、贵州、广西、云南和重庆等氧化铝主产地。大量的赤泥不能充分有效地利用,只能依靠大面积的堆场堆放,占用了大量土地,也对环境造成了严重的污染,所以最大限度地减少赤泥的产量和危害,实现多渠道、大数量的资源化利用已迫在眉睫。

我国在《当前优先发展的高技术产业化重点领域指南》中明确指出:“利用工业固体废弃物生产复合材料、尾矿微晶玻璃、轻质建材、地膜、水泥替代物、工程结构制品等技术和设备,电厂粉煤灰及煤矿矸石、冶金废渣等废弃物的资源回收与综合利用技术。”这表明我国要逐步建立完善的循环经济增长模式,提高工业固体废弃物的综合利用水平,进而推动工业固体废弃物大规模综合利用的产业化发展。目前国内外氧化铝厂大都将赤泥输送到赤泥堆场堆存。赤泥堆场主要有四种类型:平地高台型、沟谷型、人工凹地型和排海型。前三种方式为陆地堆存,而美国、法国、澳大利亚、日本等国家靠海的氧化铝厂曾采取向海底排放赤泥的方式。陆地堆存一直是堆存赤泥的主要途径,陆地堆存分为两种方式:湿式堆存和干式堆存。赤泥在堆放过程中自身硬度不断增加,利用赤泥的这一特性,可将赤泥筑坝湿法堆存,赤泥冲灰水经

自然沉淀后,利用管道回收循环利用。另一种方法是将赤泥干燥脱水后堆存。大量的赤泥露天堆存,不仅占据大面积农田和山丘,而且堆场赤泥风化、尘土飞扬,造成环境和大气污染,赤泥中的碱液下渗对地下水水质构成威胁。

根据赤泥中的矿物成分和化学组成,它完全可以成为宝贵的工业资源。赤泥中含有大量有价金属元素,如:稀土金属元素、铁、钛,可以通过膜分离技术回收的碱等;还可以制备吸附材料,吸附含硫、铬、铅、砷、磷和氟等有害物质;制造黑色微晶玻璃、保温材料、充当塑料和橡胶的填料、矿山填充材料;制造硅肥改良土壤;做工业建筑材料,如:路基材料、生产水泥、砖瓦、建筑砌块、建筑陶粒等。消除赤泥的危害,将其资源化利用是重要途径。国内外对赤泥的资源化利用进行了大量的实验研究,并取得了一定成果。但赤泥的利用只是很小一部分,大量的赤泥有待开发利用,这就使得赤泥的大宗资源化利用途径显得尤为重要。在赤泥多种利用途径中,唯有制备建筑材料能够吞耗大量赤泥,快速减少赤泥的堆存,是赤泥的大宗资源化利用的有效途径。

综上所述,赤泥的大规模资源化综合利用符合国家的产业政策方向,不仅节约大量宝贵的土地资源,保护生态环境,同时也产生了巨大的经济效益,实现了经济与环境的双赢发展。

1.2 赤泥的由来

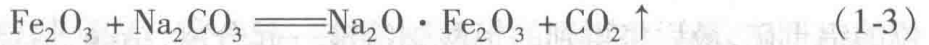
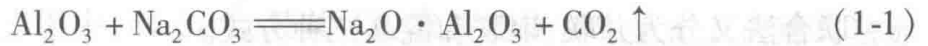
氧化铝的生产方式可分为酸法、碱法、酸碱联合法及热法,但酸法、酸碱联合法以及热法由于安全性和经济效益等问题并没有在工业中大量使用,真正运用于工业生产中的是碱法^[1]。碱法生成氧化铝,即在不同反应条件下利用碱性物质与铝土矿反应,使铝土矿中的铝以铝酸钠的形式溶于液体中,铝酸钠溶液经分离、结晶、焙烧等工艺后制成氧化铝,其余杂质以不溶物的形式作为赤泥排出^[2]。

碱法又可分为烧结法、拜耳法、联合法三种方法。相应产生的赤泥即为烧结法赤泥、拜耳法赤泥和联合法赤泥^[3],三种不同的方法产生的赤泥成分、性质、物相各异。

1.2.1 烧结法

烧结法又称为碱-石灰烧结法,是将碳酸钠、石灰、铝土矿在 1200 ~

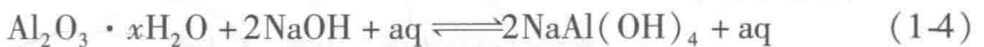
1300℃的高温炉中烧结,使铝土矿中的氧化铝转变为易溶的铝酸钠,氧化铁转变为可以水解的铁酸钠,氧化钙转变为不溶的硅酸二钙。各反应方程式如下:



其中,铝酸钠易溶于溶液,铁酸钠水解成为氧化铁水合物,并连同硅酸二钙及其他不溶杂质一起水洗后外排,形成烧结法赤泥。烧结法赤泥适用于处理铝硅比(A/S)较低的铝土矿,即 $A/S = 3 \sim 6$ 范围内的铝土矿^[4]。烧结法的流程比较复杂,能耗高,使得成本也高,并且产品质量也低于拜耳法。但烧结法产生的赤泥中含有一定量的硅酸二钙和无定型的铝硅酸盐,且烧结法赤泥中的钙含量也较高,具有一定的潜在活性,故烧结法赤泥适用于建材行业,可以制备水泥、烧结砖等建筑材料^[5-6]。

1.2.2 拜耳法

拜耳法生产氧化铝的方法是 1887 年由奥地利工程师 K. J. Bayer 发明的,后人用其姓名命名了该种生产氧化铝的方法^[7]。拜耳法的过程是铝土矿经破碎、湿磨后,在高温高压条件下以 NaOH 溶液溶出铝土矿中的氧化铝水合物,制成铝酸钠溶液^[8]。其反应过程如式(1-4):



铝土矿中的硅物质与碱反应生成不可溶的含水铝硅酸钠,即通常所说的钠硅渣。铝土矿中的铁矿物在苛性碱溶液中最终变为赤铁矿,赤铁矿较为稳定,300℃下不与碱反应,也不溶解,故与其他不溶物一起水洗排出,形成拜耳法赤泥。

拜耳法赤泥适用于处理 A/S 较高的铝土矿,A/S 一般大于 9。拜耳法流程简单,能耗低,产品质量较好,纯度高,所以全球约 95% 的氧化铝都使用拜耳法生产。拜耳法赤泥含有较多的赤铁矿及不溶的铝硅酸钠水合物,其钙硅含量较低,碱含量与烧结法相比也偏高,所以很难直接应用于建材行业,一般用于提取有价金属及进行废水废气处理^[9-10]。

1.2.3 联合法

上述提到的烧结法和拜耳法是目前工业生产氧化铝的主要方法,各自存

在不同的优点和缺点。而当氧化铝生产规模较大时,将拜耳法和烧结法联合使用,则可以兼有两者的优点,并抵消两者的缺点,达到更好的经济效益,并最大程度地利用铝土矿资源。

联合法又分为并联、串联和混联三种方式。

并联法,即使用拜耳法和烧结法两个平行的生产系统,分别处理不同品位的铝土矿,最后将得到的铝酸钠溶液一起分离、结晶、焙烧产生氧化铝,形成的赤泥基本为拜耳法赤泥和烧结法赤泥的混合体。

串联法是我国独创的生产氧化铝的方式,它是先使用拜耳法处理铝土矿,然后将拜耳法产生的赤泥再使用烧结法提取氧化铝,铝土矿经过拜耳法及烧结法的共同处理,氧化铝的产量提高,碱耗也有所降低,进而降低生产成本^[11]。

混联法是在拜耳法赤泥中添加一部分低品位的矿石进行烧结,使烧成温度范围变宽,改善烧结过程,同时对铝土矿的利用加大。但混联法的流程较长,设备也较复杂,造成能耗加大,成本偏高^[12]。

1.3 赤泥的组成

1.3.1 化学组成

赤泥的化学与矿物组成主要取决于铝土矿的成分、生产氧化铝的工艺方法和生产过程中添加剂的物质成分等。国内氧化铝厂赤泥化学成分见表 1.1^[13]。

表 1.1 国内氧化铝厂赤泥化学成分 %

		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	烧碱
烧结法	山东	22.00	6.40	9.02	41.90	1.70	2.80	0.30	3.20	11.70
	贵州	25.90	8.50	5.00	38.40	1.50	3.10	0.20	4.40	11.10
	山西	21.43	8.22	8.12	46.80	2.03	2.60	0.20	2.90	8.00
	中州	21.36	8.76	8.56	36.01	1.86	3.21	0.77	2.64	16.26
混联法	郑州	22.50	7.00	8.10	44.10	2.00	2.40	0.50	7.30	8.30
	山西	20.63	9.20	8.10	45.63	2.05	3.15	0.20	2.89	8.06
拜耳法	平果	9.18	19.10	32.20	14.02	—	4.38	0.039	9.39	—

一般说来,联合法和烧结法所产赤泥的成分大致相同,与拜耳法赤泥比较,烧结法赤泥钙含量高,其主要因为在铝土矿溶出过程中为增加一水硬铝石的浸出率,在原矿粉中加入石灰造成的;Na 主要是利用 NaCO_3 循环母液浸泡铝土矿残留在赤泥中,Al、Si、Ti 及其他元素则均来自铝土矿。而拜耳法赤泥氧化铁、氧化铝以及碱含量高,但氧化钙含量低,这就使得烧结法赤泥与拜耳法赤泥的理化性质存在一定差异,也就致使不同种类赤泥有着不同的利用方法。采用等离子光谱对河南某铝厂赤泥的元素分析结果见表 1.2。由表 1.3 可以看出,烧结法赤泥中 Ca 含量较高。

表 1.2 等离子光谱法分析结果

元素名称	Fe	Ca	Si	Al	Ti	Na	K
拜耳法成分含量(%)	12.21	26.2	12.61	21.8	5.9	3.75	0.7
烧结法成分含量(%)	12.63	41.3	18.55	9.0	4.52	1.3	1.3

1.3.2 矿物组成

由于赤泥颗粒细小、成分复杂,要准确鉴定其矿物成分须采用多种方法综合判断,河南某铝厂分别采用了偏光显微镜、扫描电镜、差热分析、红外吸收光谱和穆斯堡尔法等七种方法对赤泥矿物组成进行研究鉴定,结果见表 1.3。

表 1.3 赤泥矿物成分分析结果

矿物名称	硅酸二钙	水化石榴石	赤铁矿	方解石	钙钛	其他
含量(%)	46.40	20.50	10.20	1.60	8.00	13.30

1.4 国内外赤泥综合利用现状

1.4.1 赤泥在建材行业的应用

1. 利用赤泥生产水泥

国内外大量的研究表明,利用赤泥可以制备多种型号的水泥,而且赤泥中含有一定量的碱金属($\text{Na}^+ \setminus \text{K}^+$)和较多的硫,所以制备出的水泥还拥有普通水泥所不具备的一些特点。产出的水泥具有如下几个特点:(1)赤泥水泥

的早期强度增加较快,抗折强度比较高,远高于国家标准。(2)赤泥水泥早期抗压强度增加较快,3d 抗压强度一般超出其他种类水泥 10% 左右,但后期强度增进率明显变慢。(3)赤泥水泥具有很好的抗硫酸盐侵蚀能力。利用赤泥水泥的这些特点,可以很好地用于快速施工的工程和初期强度要求较高的工程构件,以及硫酸盐含量高的工作环境。以烧结法赤泥为主要原料生产普通硅酸盐水泥,生产工艺流程和技术与一般普通水泥厂的生产工艺基本相同,主要不同点是用赤泥代替了黏土。从生产氧化铝工艺中排出的赤泥,经过滤、脱水后,再与砂岩、石灰石和铁粉等原料共同磨制成生料浆,使之达到技术指标后,用流入法在蒸汽机中除去大部分水分,而后在回转窑中煅烧成熟料,加入适量的石膏和矿渣等活性物质,磨至一定细度,即制成水泥产品。

于健、贾平元、朱守河^[14]以山东铝厂含水量约为 60% 的赤泥浆为主要原料,湿法制备普通硅酸盐水泥。主要工艺流程为:先将含水赤泥浆与砂岩、石灰石及其他一些校正原料混合磨制成生料浆,再经适当调配后输送入回转窑煅烧成水泥熟料。制备出的标号为 42.5 的普通硅酸盐水泥初凝 2 小时 30 分钟,终凝 3 小时 30 分钟,3d 抗折强度达到 6.0MPa,抗压强度达到 28.7MPa 以上。

卜天梅、李文化、杨金妮等^[15]尝试将烧结法赤泥在常压条件下添加石灰脱除赤泥中的碱,降低赤泥中的碱含量,再加入一些活性物质改变赤泥胶结硬化的程度,再添加其他一些原料制备出各种硅酸盐水泥。实验结果指出,利用脱碱赤泥生产水泥,烧成温度较普通水泥熟料烧成温度低 100 ~ 150℃,有利于降低制备水泥的能耗,与同类型的窑相比,水泥产量可提高 30%,单位熟料热耗降低 25%。

岳云龙、芦令超、常均等^[16]尝试将烧结法赤泥引入到碱矿渣水泥系统中,构成赤泥-碱矿渣水泥这一新的体系,并研究了不同激发剂对碱矿渣水泥各项性能指标的影响。通过实验确定了利用硅酸钠和石膏作为激发剂,含量分别为 3% 和 5% 时碱矿渣水泥的抗压强度最高。实验结果指出,利用赤泥中一定量的碱作为碱矿渣水泥的激发剂,可以降低生产成本。

赵宏伟、李金洪、刘辉^[17]以山东铝厂烧结法赤泥为主要原料,与石灰石、矾土等掺配,在 1300℃ 条件下煅烧制备硫铝酸盐水泥熟料。试验发现,当赤泥配料在 34.02% 以上时烧制的硫铝酸盐水泥不会对硫铝酸盐水泥强度性能产生不良的影响,而且水泥早期强度发展良好并稳定增进。

P. E. Tsakiridis、S. Agatzini-Leonardou、P. Oustadakis 研究利用拜耳法赤泥作为生料生产普通硅酸盐水泥。他们采用对比实验。一组不掺赤泥,另一组掺加 3.5% 的赤泥,分别在 1350℃、1400℃、1450℃ 条件下烧制。通过化学成分和矿物成分分析,发现赤泥的加入并不影响普通硅酸盐水泥的矿物特征,而且利用赤泥制备出的水泥的耐磨性、成型时间、抗压强度和收缩率都满足标准要求。同时利用 X-衍射研究了赤泥水泥的 2d、7d、28d、90d 的水化作用。结果显示,赤泥的掺入不会对水泥的质量产生不良影响。

但同时因为赤泥本身所具有的一些特点,使得赤泥制备水泥还存在一些问题。如:由于受铝土矿和氧化铝生产工艺的影响,赤泥化学成分容易产生波动,从而影响水泥的生产,进而影响到水泥的质量;而且赤泥含碱量偏高,不适宜制备低碱水泥。这些都是利用赤泥制备水泥时应当注意的影响因素。

2. 利用赤泥生产混凝土

赤泥受生产工艺影响,尤其是烧结法赤泥含有较多的氧化钙,具有一定的胶凝特性,所以可以利用具有胶凝性的赤泥作为钙质材料取代部分水泥,以达到降低工业成本和固体废物重新利用的目的。

刘春、尹国勋^[18]用烧结法赤泥、砂、碎石、普通硅酸盐水泥等经适当掺配制备赤泥混凝土。研究显示,当赤泥代替水泥用量在 15% 左右时,水泥赤泥混凝土的强度,特别是抗折强度与普通水泥混凝土强度相当,而且抗压强度也能达到设计要求。当赤泥代替水泥的用量超过 20% 的时候,其强度有比较明显的下降。

颜祖兴^[19]利用赤泥制备混凝土。实验指出,当赤泥替代水泥用量低于 1/3 时,赤泥混凝土的强度与普通水泥混凝土强度接近。高于 1/3 时,混凝土强度明显降低,总结出赤泥代替水泥最佳量在 1/5 ~ 1/4 之间。实验发现,赤泥混凝土的耐磨性与普通水泥混凝土基本相同,但其抗冻性和渗透性要略低于普通水泥混凝土。

吴波、张德成、张昭忠等^[20]利用赤泥、水泥、石灰、硅砂等原料生产加气混凝土砌块。加气混凝土砌块一般利用含钙和硅较高的材料加水磨成生料浆,在高温高压的水热环境条件下发生一系列化学反应,生成胶结材料并与集料结合,再将生成物与发气剂反应,形成具有均匀气孔分布的轻质砌块。一般轻质砌块的孔隙率可以达到 70% ~ 80%,具有容重小、抗压强度高的特点。利用赤泥为主要原料制备出的加气混凝土砌块,其容重、抗压强度均符

合国家标准,最佳配比为:水泥 15%、石灰 15%~20%、赤泥 35%~40%、硅砂 35%~33%。并可以通过适当延长蒸压时间提高赤泥加气混凝土的抗压强度和抗冻性能。

郭晖、马小娥、邢宝林^[21]利用赤泥和粉煤灰生产加气混凝土砌块,其容重、抗压强度均符合《蒸压加气混凝土砌块标准》(GB 11968—2006)。其最佳配比为:赤泥 35%、粉煤灰 20%、水泥 12%、生石灰 18%、砂 15%。7d 抗压强度达到 2.94MPa,28d 抗压强度达到 3.08MPa。

3. 利用赤泥制备新型墙体材料

国家和行业已有文件明确规定:从 2000 年 6 月 1 日起,170 个大中城市率先在住宅建筑中禁止使用实心黏土砖瓦,限时日期为 2003 年 6 月 30 日。近年来,国内外学者对赤泥作为新型墙体材料做了大量研究。赤泥用作新型墙体材料既可以大量消耗赤泥、粉煤灰、煤矸石等工业固体废物,节约土地、改善环境,又可以为社会提供就业机会,成为新的经济增长点。

1) 赤泥烧结砖

赤泥由于其颗粒细小、质软,同时还有较高的可塑性,完全可以用于烧结砖的生产。赤泥中还含有一定量的碱性物质,能够降低赤泥烧结砖的烧结温度,在高温时赤泥颗粒表面形成部分熔融状态,互相粘连并促进各种矿物成分相互反应,使新的矿物与生成物快速结晶变大,在坯体内形成网络结构,从而使烧结砖具有较高的强度,所以赤泥非常适合用作制备烧结建筑材料。

黄平辉、何作为^[22]利用铝厂排放的赤泥、电厂排放的粉煤灰以及页岩等原料制备赤泥烧结砖。研究表明,当粉煤灰干基质量分数 $\leq 50\%$,赤泥干基质量分数 $\leq 15\%$,在此范围内与页岩掺配,能够制备出符合国家标准《烧结普通砖》(GB/T 5101—2003)的烧结普通砖。

Taner Kavas 研究将硼作为助溶剂,在赤泥中加入适量黏土废物和含硼废物烧制砖块。根据配料不同,将实验分为六组,分别在 700℃、800℃、900℃下烧制。结果显示,烧制出砖的收缩率、抗折强度、抗压强度、“泛霜”程度、吸水率都符合相关标准。实验指出,当黏土废物和含硼废物掺入量为 15% 的时候,制备的烧结砖块质量最好。

2) 赤泥免烧免蒸砖

赤泥免烧免蒸砖的基本工艺流程是将赤泥等制砖原材料按照适当比例混合,然后添加固化剂加水搅拌、碾压,再经制砖机压制成型,最后经过一定

时间的养护即成为成品砖。整个生产工艺过程较为简单,便于掌握。

许光辉、马小娥^[23]利用中州铝厂赤泥和粉煤灰,外加入其他一些混合材料和添加剂生产赤泥免烧砖。在使配比设计满足建材工业的各项性能指标的前提下,为达到降低生产成本和最大限度利用赤泥的双重目的进行了大量实验。确定各原料最佳配比为:赤泥 50%、粉煤灰 18%、骨料 22%、混合材料 9%、外加剂 1%。制备出的免烧砖符合非烧结砖标准《非烧结垃圾尾矿砖》(JC/T 422—2007)中 15 级的要求。

王伟广、张威、王清洲等^[24]利用中州铝厂的赤泥、粉煤灰等材料,采用模具压制成型,通过自然养护制备赤泥免烧免蒸砖。实验显示,当赤泥掺量为 20% 和 40% 时免烧砖抗压强度较高。从利用工业固废角度,在最大赤泥掺量条件下确定最佳配比。根据正交试验的直接分析和计算分析,对试块的 28d 抗压强度的分析,可得出最佳配比为、赤泥 40%、粉煤灰 20%、石灰 15%、砂子 20%、水泥 5%、石膏 2%、减水剂 0.01%。

3) 赤泥琉璃瓦

贺深阳、蒋述兴^[25]利用赤泥、石英砂和高岭土制备的坯体和自主开发的无铅釉,经过配料—球磨—过筛—干燥—压制成型—干燥—施釉—干燥—烧结—系列工艺,采用一次烧成技术,制备出的琉璃瓦,满足国家建筑琉璃制品标准的要求。实验发现,赤泥中含有较高的 K、Na、Ca 等碱性物质成分,有利于促进坯体快速烧结,同时还能够降低制品的烧成温度,降低能耗。实验确定制备琉璃瓦的最佳配比为:赤泥 40%、石英砂 30%、高岭土 30%,制备的坯体其抗弯强度达到 29.3 MPa。

汪文凌^[26]进行了利用赤泥制备玻璃瓦的研究。实验采用坯料的配方为赤泥:黏土 = 70:30,运用一次烧成工艺,制备的玻璃瓦产品的吸水率为 6.7%,弯曲破坏荷重为 1352 N/mm²,光泽度 57°,热稳定性以及抗冻性均符合国家相关标准。

4) 赤泥环保型墙砖

郭晖、管学茂、马小娥等^[27]利用赤泥、石英、长石等原料,生产赤泥环保型墙砖。生产工艺流程为:选料—破碎—粉磨—过筛—配料—混料(加水)—陈腐—压制成型—干燥—施釉—烧成。确定最佳配料为:赤泥 50%、白毛土 7%、石英 15%、长石 25%、滑石 3%。砖块吸水率为 14.21%,抗折强度达到 16.78 MPa。