

工业固体废渣 在公路岩土工程中的应用研究

苏国全 谭书文 史瑞军 叶洪东 编著

Gongye Gutu Feizha Zai Gonglu Yantu Gongchengzhong De Yingyong Yanjiu

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

工业固体废物渣在公路 岩土工程中的应用研究

苏国全 谭书文 史瑞军 叶洪东 编著

常州大学图书馆
藏书章

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书对煤矸石、粉煤灰、废石膏及电石灰等工业固体废物的路用性能进行了较系统的研究,总结出煤矸石等新型筑路材料在公路工程建设中的应用经验,在借鉴和改进传统技术的基础上,形成新的施工工艺和技术方法,并以此指导公路工程施工。全书共分7章,第1章介绍了煤矸石、粉煤灰、废石膏及电石灰等四种工业废渣的综合利用现状;第2章介绍了煤矸石、粉煤灰、废石膏及电石灰等四种工业废渣的基本特性;第3章介绍了复合注浆煤矸石夯扩桩处理软土路基;第4章介绍了全废四渣在路面基层中的应用研究;第5章介绍了用于软土路基处理的纤维加筋二灰煤矸石夯扩桩复合地基技术;第6章介绍了水泥粉煤灰煤矸石夯扩桩颗粒流模拟分析;第7章介绍了煤矸石在填筑路基工程中的应用研究。

本书可供从事公路设计、施工、监理、技术人员及高等院校岩土工程专业的研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

工业固体废渣在公路岩土工程中的应用研究/苏国全等编著.

徐州:中国矿业大学出版社,2015.1

ISBN 978-7-5646-2613-6

I. ①工… II. ①苏… III. ①工业废物—固体废物—应用—岩土—公路工程 IV. ①U41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第015765号

书 名 工业固体废渣在公路岩土工程中的应用研究
编 著 苏国全 谭书文 史瑞军 叶洪东
责任编辑 杨 洋
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 13 字数 324 千字
版次印次 2015年1月第1版 2015年1月第1次印刷
定 价 42.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

随着工业化、城镇化进程的加快,我国工业领域的资源消耗量将进一步加大,由于资源开采和利用带来的环境问题与过度依赖资源进口引起的资源供应安全性问题日益突出,工业发展将面临更为严峻的资源、环境约束的挑战。为了落实国务院发展节能环保战略性新兴产业的具体要求,全面推进我国大宗工业固体废渣(废物)综合利用工作,提高综合利用技术水平,工业与信息化部制定了《大宗工业固体废物综合利用“十二五”规划》。

大宗工业固体废渣综合利用是节能环保战略性新兴产业的重要组成部分,是为工业又好又快发展提供资源保障的重要途径,也是解决大宗工业固体废渣不当处置与堆存所带来的环境污染和安全隐患的治本之策。大宗工业固体废渣综合利用是当前实现工业转型升级的重要举措,更是确保我国工业可持续发展的一项长远的战略方针。大宗工业固体废渣是指我国各工业领域在生产活动中年产生量在1 000万t以上、对环境和安全影响较大的固体废物,主要包括:煤矸石、粉煤灰、尾矿、冶炼渣、工业副产石膏(废石膏)、赤泥和电石渣(电石灰)。

“十二五”期间,随着我国工业的快速发展,大宗工业固体废渣产生量也将随之增加,预计总产生量将达150亿t,堆存量将净增80亿t,总堆存量将达到270亿t,大宗工业固体废物堆存将新增占用土地40万亩。堆存量增加将使得环境污染和安全隐患加大,大宗工业固体废物中含有的药剂及铜、铅、锌、铬、镉、砷、汞等多种金属元素,随水流入附近河流或渗入地下,将严重污染水源。干涸后的尾砂、粉煤灰等遇大风形成扬尘,煤矸石自燃产生的二氧化硫会形成酸雨,对环境造成危害。电石渣有微臭味、呈强碱性(渣液pH值达12以上),会对空气、地表水、地下水等造成严重污染;尾矿库、赤泥库等超期或超负荷使用,甚至违规操作,会带来极大安全隐患,对周边地区人民财产和生命安全造成严重威胁。

“十二五”规划纲要明确提出,以科学发展为主题,以转变经济发展方式为主线,坚持把建设资源节约型和环境友好型社会作为重要着力点,提出大力发展循环经济,全面推进资源综合利用,并就工业固体废物综合利用率提出明确指标,这为大宗工业固体废物综合利用产业发展提供了政策保障。我国基础设施建设规模的快速增长,将为大宗工业固体废物在高等级公路工程及水泥、混凝土、墙体材料等建材中的应用提供巨大的市场空间,将有力促进大宗工业固体废渣的综合利用。

煤矸石、粉煤灰、废石膏及电石灰是各种工业废渣中排放量大、占地面积多、污染环境较为严重的固体废物,已成为社会公害,严重影响着经济建设、生态环境和人们的身心健康。在这些工业废渣综合利用的途径中,将其用于公路岩土工程,作为路基或路面基层等筑路材料,除了能大宗消纳工业废渣、减少露天堆放占用耕地、污染环境,还能有效减少筑路征地费用,降低工程成本,具有显著的经济、社会和环境效益。但是目前相关路基和路面基层等技术规范或标准中并没有关于煤矸石、粉煤灰、废石膏及电石灰相应的技术指标和具体使用要

求,更没有复合注浆煤矸石夯扩桩处理软土路基、全废四渣(煤矸石、粉煤灰、废石膏及电石灰)路面基层及纤维加筋二灰煤矸石桩复合地基等技术方法。为此,作者从2008年开始,结合河北省交通厅审批的若干科技项目,对煤矸石、粉煤灰、废石膏及电石灰等工业固体废物的路用性能进行了较系统研究,取得了诸多研究成果。编著本书的宗旨在于及时总结煤矸石等新型筑路材料在公路工程建设中的实践经验,在借鉴和改进传统技术的基础上,形成新的理论、施工工艺和技术方法,并以此指导公路工程施工。

全书共分七章,第一章介绍了煤矸石、粉煤灰、废石膏及电石灰等四种工业废渣的综合利用现状;第二章介绍了煤矸石、粉煤灰、废石膏及电石灰等四种工业废渣的基本特性;第三章介绍了复合注浆煤矸石夯扩桩处理软土路基;第四章介绍了全废四渣在路面基层中的应用研究;第五章介绍了用于软土路基处理的纤维加筋二灰煤矸石夯扩桩复合地基技术;第六章介绍了水泥粉煤灰煤矸石夯扩桩颗粒流模拟分析;第七章介绍了煤矸石在填筑路基工程中的应用研究。

本书的编写提纲,内容安排,书稿的修改、统稿、定稿由邯郸市华威公路设计咨询有限公司苏国全高级工程师和河北工程大学叶洪东教授负责完成。第一章、第三章及第四章由苏国全撰写;第二章和第五章由邯郸市交通运输局地方道路管理处谭书文高级工程师撰写;第六章由叶洪东教授撰写;第七章由邯郸市华威公路设计咨询有限公司史瑞军高级工程师撰写。

为了使全书体系完整、内容系统、重点突出,满足读者的要求,本书部分章节内容参照或借鉴了已有的研究成果和国内外有关资料文献,在此对相关作者表示感谢。个别参考文献因疏忽可能有所遗漏,在此对该文献的作者深表歉意。

在本书所涉及科研课题的研究过程中,邯郸市交通运输局地方道路管理处魏朝林教授级工程师(处长)和李付民高级工程师等给予了大力帮助和指导。河北工程大学土工实验室李燕老师也为研究课题的室内实验提供了诸多帮助。在此一并表示谢意!

河北工程大学硕士研究生赵睿、张巍、邝利军等同学,结合撰写硕士研究生论文进行了大量的室内试验、原位测试及研究成果的整理工作,在此一并表示感谢!

限于本书作者的水平和实践经验,加之时间仓促,书中如有不妥、疏漏甚至错误之处,恳请读者提出宝贵意见。

作者

2013年3月

目 录

第 1 章 工业固体废渣综合利用现状	1
1.1 煤矸石综合利用现状	1
1.1.1 煤矸石的来源	1
1.1.2 煤矸石的危害	1
1.1.3 煤矸石的综合利用现状	2
1.2 粉煤灰综合利用现状	5
1.2.1 粉煤灰的来源	5
1.2.2 粉煤灰的危害	5
1.2.3 粉煤灰的综合利用现状	5
1.3 电石灰综合利用现状	9
1.3.1 电石灰的来源	9
1.3.2 电石灰的危害	9
1.3.3 电石灰的综合利用现状	9
1.4 废石膏综合利用现状	12
1.4.1 废石膏的来源	12
1.4.2 废石膏的危害	12
1.4.3 废石膏的综合利用现状	13
1.5 本章小结	15
参考文献	15
第 2 章 工业固体废渣的基本特性	19
2.1 煤矸石的分类	19
2.2 煤矸石基本特性	20
2.2.1 煤矸石的物理性质	21
2.2.2 煤矸石的化学性质	22
2.2.3 煤矸石的路用性能	22
2.3 粉煤灰基本特性	23
2.3.1 粉煤灰的物理性质	23
2.3.2 粉煤灰的化学性质	24
2.3.3 粉煤灰的路用性能	24
2.4 电石灰基本特性	24
2.4.1 电石灰的物理性质	24

2.4.2	电石灰的化学性质	25
2.4.3	电石灰的路用性能	25
2.5	废石膏的基本特性	26
2.5.1	废石膏的化学成分	26
2.5.2	废石膏的路用性能	26
2.6	本章小结	26
	参考文献	27
第3章	复合注浆煤矸石夯扩桩处理软土路基	29
3.1	复合注浆煤矸石夯扩桩的加固机理	29
3.1.1	桩体强度形成机理	29
3.1.2	桩间土加固机理	32
3.1.3	煤矸石褥垫层的作用	33
3.2	室内试验与材料配合比的选择	33
3.2.1	煤矸石的物理性质试验	33
3.2.2	煤矸石的化学性质试验	35
3.2.3	煤矸石的颗粒分析	36
3.2.4	煤矸石的力学性质	37
3.2.5	浆液配比与无侧限抗压强度试验	38
3.3	复合注浆煤矸石夯扩桩的施工工艺研究	44
3.3.1	试验路段工程概况	44
3.3.2	试验路段工程地质条件	44
3.3.3	软土路基处理的目的	45
3.3.4	试验路段桩的设计与施工方案	45
3.3.5	试验路段的施工	46
3.4	复合注浆煤矸石夯扩桩的野外原位测试	54
3.4.1	钻孔取芯检验	54
3.4.2	桩身开挖检验	55
3.4.3	静载荷试验	55
3.4.4	桩间土加固效果检测	59
3.5	复合注浆煤矸石夯扩桩试验路段路基检测	62
3.5.1	承载力检测	62
3.5.2	灌砂法密实度检测	65
3.5.3	弯沉值检测	66
3.5.4	平整度检测	69
3.6	综合效益分析	70
3.6.1	经济效益	70
3.6.2	社会效益	70
3.6.3	环境效益	70

3.7 结论与建议	71
参考文献	72
第4章 全废四渣路面基层的应用研究	73
4.1 全废四渣基层强度形成机理研究	73
4.1.1 全废四渣混合料各组分的作用	73
4.1.2 全废四渣混合料强度形成机理	74
4.1.3 本节小结	76
4.2 基层原材料路用性能试验研究	76
4.2.1 煤矸石的基本性能	77
4.2.2 粉煤灰的基本性能	89
4.2.3 电石灰的基本性能	90
4.2.4 废石膏的基本性能	92
4.2.5 本节小结	92
4.3 基层混合料路用性能试验研究	92
4.3.1 混合料配比设计方案	93
4.3.2 混合料配比试验内容及最佳配比的确定	93
4.3.3 最佳配比混合料的路用性能研究	102
4.3.4 混合料的其他路用性能	108
4.3.5 混合料的“污染问题”	108
4.3.6 本节小结	108
4.4 全废四渣基层施工工艺研究	109
4.4.1 试验路段施工的目的意义	109
4.4.2 试验路段路面结构	109
4.4.3 基层混合料技术指标	109
4.4.4 主要施工工艺步骤与要求	109
4.4.5 基层施工质量控制要点	112
4.5 试验路段基层检测试验研究	112
4.5.1 承压板试验	112
4.5.2 压实度检测	112
4.5.3 强度检测	116
4.5.4 弯沉值检测	116
4.5.5 平整度检测	119
4.5.6 外观检测	119
4.6 结论与建议	120
4.6.1 结论	120
4.6.2 建议	121
参考文献	121

第 5 章 纤维加筋二灰煤矸石夯扩桩复合地基	123
5.1 综述	123
5.1.1 问题的提出及研究的目的和意义	123
5.1.2 国内外聚丙烯纤维在工程中的应用现状	124
5.1.3 夯底扩端桩的研究现状	125
5.1.4 主要研究内容	126
5.2 纤维加筋二灰煤矸石夯扩桩复合地基加固机理	126
5.2.1 桩体强度形成机理	126
5.2.2 扩大头形成机理	128
5.2.3 夯扩桩复合地基加固机理	129
5.2.4 煤矸石褥垫层的作用	130
5.3 原材料室内试验研究	131
5.3.1 概述	131
5.3.2 室内试验原材料的性质分析	132
5.4 二灰煤矸石混合料配比设计及试验	137
5.4.1 二灰煤矸石配比设计	137
5.4.2 二灰煤矸石配比试验	138
5.5 纤维加筋二灰煤矸石混合料配比试验	138
5.5.1 纤维加筋二灰煤矸石配比设计	138
5.5.2 桩体混合料配比试验方法和要求	139
5.6 桩体混合料试验成果与分析	139
5.6.1 试验成果	139
5.6.2 试验成果分析	140
5.7 混合料强度的影响因素分析	142
5.7.1 水泥掺量和龄期对混合料抗压强度的影响	142
5.7.2 纤维对混合料强度的影响	143
5.8 扫描电镜试验分析	145
5.9 结论与建议	145
参考文献	147
第 6 章 二灰煤矸石夯扩桩颗粒流模拟分析	149
6.1 问题的提出	149
6.2 颗粒流理论和 PFC2D 计算程序	149
6.2.1 颗粒流方法产生的背景	149
6.2.2 颗粒流的基本理论及假定	150
6.2.3 颗粒流方法的特点	151
6.2.4 土本构行为的颗粒流模拟	152
6.2.5 颗粒流模型中颗粒“块”的理论背景	153
6.2.6 颗粒流方法解题途径	153

6.3 单桩及其复合地基的颗粒流模拟	154
6.3.1 模型构建	154
6.3.2 模型试验数据的获取	155
6.3.3 竖向荷载作用下的夯扩单桩模拟及其结果分析	157
6.3.4 竖向荷载作用下的夯扩桩复合地基模拟及其结果分析	161
6.4 本章小结	167
参考文献	168
第7章 煤矸石在填筑路基工程中的应用研究	169
7.1 煤矸石填筑路基的技术性能要求	169
7.1.1 煤矸石的选择	169
7.1.2 煤矸石的级配要求	169
7.1.3 煤矸石路基强度要求	170
7.1.4 煤矸石路基稳定性要求	170
7.2 煤矸石在邢汾高速填筑路基工程中的应用	172
7.2.1 邢汾高速概况	172
7.2.2 煤矸石路基填料的工程性质	172
7.2.3 煤矸石路基填筑的施工工艺	178
7.2.4 煤矸石填筑路基施工质量检验	183
7.3 煤矸石在青兰高速填筑路基工程中的应用	187
7.3.1 青兰高速邯涉段概况	187
7.3.2 煤矸石的技术性能要求	187
7.3.3 煤矸石路基填料的路用性能	188
7.3.4 煤矸石路基试验路段施工	189
7.3.5 煤矸石路基施工质量控制要点	193
7.4 结论与建议	195
参考文献	196

第1章 工业固体废渣综合利用现状

煤矸石、粉煤灰、电石灰和废石膏均为大宗工业固体废渣。随着工业化、城镇化进程的加快,我国工业领域的资源消耗量将进一步加大,由于资源开采和利用带来的环境问题与过度依赖资源进口引起的资源供应安全性问题日益突出,工业发展将面临更为严峻的资源和环境形势的挑战。大宗工业固体废渣综合利用是节能环保战略性新兴产业的重要组成部分,是为工业又好又快发展提供资源保障的重要途径,也是解决大宗工业固体废渣不当处置与堆存所带来的环境污染和安全隐患的治本之策。大宗工业固体废物综合利用是当前实现工业转型升级的重要举措,更是确保我国工业可持续发展的一项长远的战略方针。我国基础设施建设规模的快速增长和人们的环境保护意识日益加强,促使大宗工业固体废渣越来越多被应用于水泥、混凝土、墙体材料、路面基层、路基填料等诸多工程材料领域当中,从而达到节约成本、变废为宝、保护环境的目的。下面就四种工业废渣的综合利用情况分别加以阐述。

1.1 煤矸石的综合利用现状

1.1.1 煤矸石的来源

煤矸石是在成煤生产过程中与煤伴生的一种含碳量较低、相对较坚硬的岩石,通常在煤炭的开采和洗选过程中以废弃物的形式被分离出来。我国煤炭资源丰富,在全国的化石能源资源中煤炭占90%以上^[1];在能源的生产和消费构成中煤炭也占70%以上。我国煤炭资源的特点是:分布广、埋藏深、产量大,适合露天开采的煤炭资源仅占4%左右,绝大部分煤炭主要由井工开采,因此煤炭产出率极高。据统计^[2],目前我国煤矸石的排放量约占煤炭开采量的15%,即按煤炭年产量为1亿t计算,将排放约1500万t的煤矸石。除生产过程以外,煤炭在洗选过程中也会副产大量的煤矸石,且洗选1亿t炼焦煤或动力煤将分别排放2000万t或1500万t的煤矸石。目前全国已有矸石山2000多座,累计堆存量已超过40亿t,而且,随着煤炭产量的增大,煤矸石的排放量也呈现逐年上升的趋势,已成为我国累计堆存量和占用场地最多的工业废弃物。

1.1.2 煤矸石的危害性

国内外环境调查和环境监测研究表明,煤矸石对环境造成的危害随其堆存量的增加和堆存时间的增长而日趋突出。煤矸石对环境的危害可分为物理危害和化学危害两种^[3,4]。

(1) 物理危害

① 占压土地——我国人口众多、耕地紧缺,而土壤又是很难再生资源,因此煤矸石的大量堆放造成了土地资源的严重浪费。

② 污染大气——煤矸石在运输和堆放过程中易产生粉尘,其中不仅含有害金属元素,且粉尘中的较大颗粒进入眼、鼻易引起感染,较小颗粒吸入人体会对气管、肺部造成危害,严重的还会导致癌症。

③ 破坏矿区景观——不仅采煤活动对矿区的地表造成破坏,煤矸石的堆放、自燃和扬尘也对矿区的自然风光和环境质量造成了严重的影响。

④ 引发地质灾害——煤矸石自然堆放形成矸石山,通常坡度大而结构疏松。在山体内部炭分自燃等作用的影响下容易发生崩塌、滑坡、泥石流等灾害。特别是经过较长时间的风化、氧化、雨水浸泡后,承载能力降低,此类事件更易发生。

⑤ 造成水土流失——由于矸石山一般坡度较大,堆放初期渗透能力较强。但随着表面风化程度的增大,表层土壤发育,使得渗透能力降低,遇到强降水便会造成严重的水土流失。

(2) 化学危害

① 自燃危害——煤矸石自燃产生的有毒、有害气体会对动植物和人体造成很大的危害。矸石山由自燃状态向爆炸状态转变而产生的粉尘、高温和冲击波会对矿区人们的生产、生活造成更大的威胁。

② 重金属污染——煤矸石在露天堆放,经受风吹、日晒、雨淋,其中的诸如铅、镉、汞、砷、铬等有毒重金属元素会通过雨水渗入土壤和地下水,造成严重的重金属污染,并通过食物链最终危害人类的健康。

③ 酸性水污染——自燃后的矸石山会产生 SO_2 等酸性气体,遇水或淋溶形成 H_2SO_3 ,造成土壤酸化,严重影响植物的正常生长。酸性溶液还可通过各种水力联系发生污染转移,对工农业生产特别是水产养殖业危害严重。

④ 放射性污染——煤矸石在采出、运输、堆放等过程中,其中的放射性元素大量析出,从而造成辐射污染。

1.1.3 煤矸石的综合利用现状

随着我国煤炭年产量的逐渐增加,煤矸石的排放量也日益增大。但与英、美等西方国家相比,我国煤矸石的综合利用水平还较低,剩余煤矸石的堆放仍然影响着矿区人们的生活,因此煤矸石的综合利用问题已成为环境治理工作的当务之急。

1.1.3.1 煤矸石的综合利用途径

纵观世界各国的发展现状,在煤矸石的综合利用方面,目前技术简单易行、经济效益较好的途径主要有^[3,5]能源利用、建材利用和化工利用等。

(1) 煤矸石的能源利用

① 回收煤炭——要想对煤矸石进行能源利用或其他再生利用,首先要对混在煤矸石中的煤炭资源进行回收。目前主要通过水力旋流器分选或重力介质分选来进行煤炭回收。

② 发电和造气——若煤矸石的含碳量大于等于 20%,热值在 6 270~12 550 kJ/kg 之间,则可直接作为流化床锅炉的燃料用于发电;若煤矸石的灰分达 70%~80%、发热量为 4 186.80~5 024.16 J/kg,则可用于煤矸石造气,所得煤气的热值可达 2 930.76~4 605.48 J/m³。

(2) 煤矸石用做建筑材料

① 制砖——煤矸石可用于生产烧结砖或用做烧砖混合燃料,但在物理性质方面,要求采用含碳量较高的煤矸石,热值一般控制在 2 090~4 180 kJ/kg 范围内;在化学成分方面,

一般要求 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 的含量分别为 55%~70%, 15%~25%, 2%~8%, 塑性指数为 7~15。

② 制备水泥——由于化学成分与黏土相近,并含有一定量的碳和热值,因此可将煤矸石代替黏土作为原料用于水泥的生产或作为混合料直接掺入熟料以增加水泥产量。

③ 制备轻集料——轻集料作为一种新型建筑材料具有质轻的特点和良好的保温性能,因而拥有非常广阔的发展前景。烧制轻集料适宜采用选煤矸或含碳量小于 13% 的炭质页岩,方法有成球法和非成球法两种。

④ 配制混凝土——通过对“配制煤矸石水泥、配制煤矸石混凝土(以煤矸石水泥和煤矸石轻集料为原料)”的情况进行试验研究,结果表明煤矸石混凝土的物理、力学性能均能达到使用要求。

⑤ 制空心砌块——采用自燃或煅烧矸石为集料,配以磨细的生石灰和石膏作为胶结料,经过振动成型和蒸汽养护即可制得一种新型墙体材料——煤矸石空心砌块。

(3) 煤矸石的化工利用

① 制备铝盐、氢氧化铝——可用煤矸石制备的铝盐产品有聚合氧化铝、硫酸铝、氢氧化铝和氧化铝等。

② 改良土壤和生产肥料——查明土壤的性质后,在其中掺入一些有机肥料,并利用煤矸石的酸碱性及其含有的多种营养成分和微量元素,可用于调节土壤的疏松程度和酸碱度,增加土壤肥效,从而达到改良土壤的目的。煤矸石还可用于生产复合肥料,且已取得突破性进展。

③ 其他化工利用——除前两者之外,煤矸石还可用于生产 V_2O_5 、岩棉、含铁化工产品、烧结料、密封材料等化工产品。

(4) 煤矸石的其他利用

除以上用途外,煤矸石还可用于多种新型材料的生产,如烧制陶瓷、制分子筛、制造型砂和造型粉、生产墙体材料等。

1.1.3.2 煤矸石的工程应用现状

(1) 国外工程应用现状

早在第二次世界大战以前,国外就开始对煤矸石进行初步利用,于 20 世纪 60 年代后期真正引起各国重视^[3]。煤矸石在工程应用方面发展已比较成熟,除用做充填或填筑材料外,矸石的利用率一般在 40% 以上,更高者可达到 60%~80%。其主要途径是应用于公路、铁路、路堤、堤坝、挡土墙以及地基垫层等众多的土木工程领域。

目前煤矸石用量最大的一种应用途径是:美国利用燃烧过的煤矸石渣(即“红矸石”)作为筑路材料。燃过的煤矸石在宾夕法尼亚州被用做未整修的道路面层;宾州采矿公司通过试验研究证明了沥青混合物可作为坚固的混合料用于路面的修补、机动车道的铺筑等工程。英国约有 16 亿 t 已燃煤矸石,因其造价经济、性能优良多年来被广泛应用。英国已燃煤矸石的年消耗量为 600 万~700 万 t,其中大部分被用做堤坝、公路及土建工程的普通填充物。某些已燃煤矸石适宜制做混凝土骨料,若将其用于低等级混凝土时只需破碎和筛分。煤矸石还可以代替砾石用于制造混凝土,但由于煤矸石中含有硫酸盐(如炭质页岩,特别是已燃页岩),故要求其含硫量需符合标准要求。将已燃矸石与铝土矿物按质量比为 4:1 的比例混合可以制成性能良好的防滑路面。

在法国,煤矸石最普遍的利用途径是用做建筑材料。从 20 世纪 70 年代起的 20 年中,法国主要将煤矸石用于生产水泥、制砖、铺路等,共利用煤矸石 1 亿多吨。自燃煤矸石被破碎分级、获得准确的粒径后,可用做表面装饰材料,或用于铺筑道路及停车场,年消耗量达 40 万~50 万 t。法国道路桥梁实验中心和道路公路技术研究部在研究中发现,煤矸石在 30~40 cm 路基的铺筑工程中,容易分层摊铺,且易于压实,透水性小,是一种良好的建筑填充材料。

由于煤和硫在空气中会因氧化而燃烧,使得煤矸石经过自燃变成烧岩。苏联的顿巴斯矿区常将这种烧岩代替碎石作为双层垫层的底层铺筑在沥青混凝土路面下,其每平方米的造价约为使用高炉矿渣时的二分之一。利用烧岩的这一特性,该矿区建成了大、小街道及人行道约 500 km。烧岩还可制作成沥青混凝土石粉,其造价比惰性石粉低 35%~45%,但混凝土的质量不变,且路面的耐久性和稳定性得到提高。该矿区每年还有约 $4.05 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的烧岩被用做回填材料,或用于工业建筑区内场地的平整。将烧岩磨细后可用来生产泡沫混凝土或蒸压加气混凝土制品,且实践证明,用烧岩制成的混凝土可用于建筑基础及其他地下结构,在低层建筑和各类工业建筑中也可大量应用。

在国外,煤矸石在许多工程实例中都有过成功应用的实例。例如在公路工程中,英国 Gateshead 高速公路、Liverpool 干线公路,德国 Ruhr 地区公路网,法国北部公路网等将煤矸石作为公路路基填充材料;在铁路工程中,英国 Croydon、Gloucester 铁路编组站将煤矸石作为铁路路基或路堤的填充材料;在水工建筑中,英国的海岸护堤、水库大坝,荷兰的潜坝、拦河坝将煤矸石作为坝体填充材料或护层;在其他工程中,如英国的拉姆斯盖特飞机场、停车场等将煤矸石作为垫层用于软弱地基的处理等。

(2) 国内工程应用现状

目前,我国煤矸石在工程中的应用情况主要有以下两个方面。

① 水库坝体。

将煤矸石用于填筑水库坝体不但能解决砾石料的短缺问题,还能有效利用煤矿废弃物,降低工程成本。

在河南省平顶山市白龟山水库加固工程中,拦河坝下游采用煤矸石填筑。经过施工、监理和质监等单位的检测,证明其完全符合设计和规范要求;并且经过主体竣工后 4 年多的运行,用事实证明了其加固效果非常显著。通过随机钻芯取样检测表明:煤矸石的密实度符合设计要求;煤矸石中有机碳含量 13%~21%,易溶盐含量 0.4%,未发生浸水溶蚀破坏现象;煤矸石中的有毒物质含量符合生活饮用水标准,不会对水库和下游水质造成污染。拦河坝下游煤矸石的成功填筑将其应用范围扩展到顺河坝下游及坝顶路基的施工填筑当中。

② 公路工程。

由于煤矸石的组成较复杂,产地和产出方式等的不同对煤矸石的成分有较大的影响,且煤矸石中有害成分和未燃碳的存在都给其综合利用带来了极大的不便。然而筑路工程由于对煤矸石的品质无特殊要求,对其有害成分限制不严,无需进行特殊处理,且耗渣量大等原因而成为将煤矸石利用的重要途径。

从 20 世纪 70 年代开始,我国在煤矸石的工程应用方面进行了诸多尝试,主要实例有^[3]:1995 年 3 月完工的徐丰公路(S239)庞庄矿区段 1.2 km 塌陷区路基全部采用煤矸石填筑,至今使用性能良好;104 国道枣庄段用煤矸石修筑的试验路堤于 1995 年被论证,经过

多年使用目前状况良好;1996年12月竣工的汾西矿务局洗煤厂专用线DK0+090~DK0+718.64段路堤采用分层法填筑煤矸石,经过4年多的运营与观察,路堤质量稳定;1996~1997年湖北省荆南公路K19+500~K59+500段采用煤矸石铺筑垫层,使用状况良好;1997年205国道张博段用煤矸石作筑路底基层材料,至今运营状况良好;1998年京福高速公路曲张段在K135+060~K136+600做的煤矸石筑路试验取得了成功,并在后来的10多公里路段中推广应用;同年修建的鹤伊高速公路K0+000~K13+650路段采用煤矸石用做路基填料,投入运营后各项路用性能指标均满足要求;2000年徐州市“时代大道”采用煤矸石作为路基填筑材料,效果良好;2003~2005年河南平顶山至临汝高速公路K18+000~K28+200路段用煤矸石填筑路堤,至今使用状况良好;2007年河南平顶山平安大道的改造扩建工程采用煤矸石作为道路基层材料^[6],经过两年多的检验,所筑路面平整、坚实、稳定,使用状况良好;2008年承德市上滦公路滦平段K68+300~K108+300采用二灰煤矸石渣作为路面基层^[7],各项指标均满足规范要求,未发现任何缺陷。

实践证明,煤矸石应用于道路工程在技术上是可行的。随着我国交通建设事业的迅猛发展,煤矸石在土木工程领域的应用将越来越广泛,并产生巨大的经济效益、社会效益和环境效益。

1.2 粉煤灰的综合利用现状

1.2.1 粉煤灰的来源

粉煤灰是火力发电厂的废弃物,俗称飞灰(煤燃烧后的残留物有80%左右为飞灰,20%左右为底灰),是煤粉在1500~1700℃条件下燃烧后由烟道气带出并经除尘器收集起来的粉尘。

由于我国是一个以煤炭为主要能源的国家,且燃烧用煤所含灰分较高(据统计,每燃烧1t煤就能产生250~300kg的粉煤灰和20~30kg的炉渣^[8]),所以随着经济建设中煤炭使用量的增加,我国粉煤灰的产出量也迅速增加。近年来,我国粉煤灰排放量以大约3000万t/a的速度递增:2002年电厂排放粉煤灰渣1.8亿t,2005年全国粉煤灰排放量达到3亿t,2006年达到3.5亿t,累计堆存量达到14亿t以上,由此产生的年综合处理费高达30亿~60亿元,造成了极大的资源浪费。

1.2.2 粉煤灰的危害

随着粉煤灰的大量排放,其积存量越来越大,如果不加以处理,则会对周围环境和人体健康产生极大的危害。粉煤灰随地堆放时,不仅要占用大量的土地,遇风还会产生扬尘、污染大气。目前除了加以利用的以外,粉煤灰的处置方法主要是土地填埋和贮灰池存储^[9]。值得注意的是,粉煤灰中含有潜在的毒性物质,会对土壤、地下水造成污染,若排入河道水系会造成河流淤塞、污染水质;在改土方面,若粉煤灰中可溶盐、硼及其他潜在的毒性元素含量过高,可导致元素不均衡及土壤的板结和硬化。如此种种,均可能通过食物链最终对人类生命产生威胁。

1.2.3 粉煤灰的综合利用现状

目前,世界各国的粉煤灰排放量均呈现逐年增加的趋势,但粉煤灰的利用率却仍保持在

较低水平。我国粉煤灰年排放量约 1.8 亿 t, 利用率仅为 30%^[9]。因此, 如何合理利用粉煤灰, 将粉煤灰变害为利、变废为宝成为当今社会一个亟待解决的问题, 并有可能成为解决我国电力行业环境污染与我国资源缺乏之间矛盾的重要手段之一。

1.2.3.1 粉煤灰的综合利用途径

国外对于粉煤灰的研究可以追溯到 1920 年后的电厂大型锅炉改造时期, 从此有人开始研究粉煤灰的综合利用^[10-12]。但在第二次世界大战结束之后, 粉煤灰问题才真正引起人们的重视。尤其是冷战时期爆发石油危机后, 许多国家电厂的燃料结构发生改变, 纷纷转向以煤炭为主要燃料的进程, 随之而来的便是大量粉煤灰的排放。这一变化促使人们更加重视粉煤灰资源的合理利用, 于是粉煤灰的综合利用在一些工业发达国家逐渐成了一个新兴产业。

到目前为止, 粉煤灰已在许多领域得到成功应用。归纳起来, 国内外粉煤灰的综合利用途径主要有以下几个方面。

(1) 在建材制品中的应用

① 生产水泥——从 20 世纪 50 年代起, 国外就开始生产粉煤灰水泥, 技术已比较成熟^[13]。由于粉煤灰中含有大量的 SiO_2 和 Al_2O_3 , 可替代黏土组分用于水泥生产, 且粉煤灰用做水泥混合材料既可使水泥增产、降低成本, 又可改善水泥的性能、变废为宝。

② 制作混凝土——由于粉煤灰内部含有大量的空心玻璃微珠, 且表面光滑, 在混凝土的配制中能起到润滑作用和改善和易性^[14], 因而是理想的砂浆和混凝土掺和料。目前粉煤灰在这方面的应用主要有: 用于泵送混凝土、大体积混凝土、高低标号混凝土及灌浆材料等。

③ 制作烧结砖——粉煤灰烧结砖是以黏土为主要原料, 以 20%~70% 的粉煤灰代替部分黏土烧制而成的。目前已开发出的品种有双免粉煤灰砖、粉煤灰彩色地面砖等。

④ 制作硅酸盐砌块——粉煤灰硅酸盐砌块是以粉煤灰、石灰、石膏等为原料, 配以胶结料经加水搅拌、振动成型、蒸汽养护而制成, 有空心砌块和实心砌块两种类型。

⑤ 制作粉煤灰陶粒——粉煤灰陶粒是一种人造轻骨料, 它是以粉煤灰为原料, 配合一定量的胶结料和水, 经成球、烧结工艺而制成的^[20]。其特点是: 用灰量大(粉煤灰掺量约达 80%)、保温、隔热、质轻、抗冲击等。

⑥ 制作粉煤灰瓷砖——粉煤灰与其他原材料按一定的比例配合可以制成粉煤灰瓷砖, 且粉煤灰的掺入可降低瓷砖的可塑性、异质性, 而提高瓷砖的柔韧性、吸水性。

⑦ 制作粉煤灰玻璃——由于粉煤灰中氧化铁含量较高, 能使玻璃产生一定的颜色, 因而可以用粉煤灰生产建材玻璃制品、研制玻璃饰面材料、泡沫玻璃等。

(2) 在化工方面的应用

① 提取粉煤灰中的有用物质成分——粉煤灰中含有硅、铝、铁、镁等元素的氧化物。高温下将 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 等氧化物中的氧除去, 在一定条件下可以冶炼成 Si、Al、Fe、Mg 等多元合金。

② 在塑料中的应用——在生产塑料时, 通常需要在树脂中添加一些无机填料, 用于降低成本, 改善塑料的刚性、耐热性、耐磨性、尺寸稳定性等。由于粉煤灰微珠圆润而光滑, 颗粒间黏聚力小, 将其填充到树脂内容易分散、加工流变性好, 所以粉煤灰是塑料生产行业一种潜在的优良无机填料。

③ 在橡胶中的应用——由于粉煤灰中的玻璃微珠活性高、耐压强度高(可达 6.86×10^8

Pa), 所以若将粉煤灰作为一种廉价填料应用于橡胶生产中, 可以使橡胶的表观黏度增大、延性及耐磨性增强、制品收缩减小。因而粉煤灰在橡胶制品中具有广泛的应用。

④ 在涂料中的应用——由于粉煤灰微珠具有“球形、中空、耐热、化学性质稳定”等优点, 使其在涂料领域, 尤其是保温、隔热、耐火、防水等功能性涂料的生产加工中越来越受到重视。

(3) 在农业方面的应用

① 盖土造田——由于粉煤灰中含有多种有益于植物生长的矿物成分和微量元素, 因此, 在山谷等低洼地带粉煤灰可代替土壤用于土地回填; 而在土壤资源比较匮乏的山区, 粉煤灰可被覆盖于土壤之上再用于种植作物或植树造林。

② 制造肥料——将粉煤灰与粪便和生活垃圾混合可以生产肥料, 这样生产的肥料可以显著降低土壤中重金属的浓度和活性、减少土壤病原体数量, 更加有利于微生物生存。

③ 改良土壤——由于粉煤灰具有的多孔结构是土壤本身的硅酸盐矿物质所不具备的。所以将粉煤灰施入土壤能够增加土壤孔隙度、促进溶液在土壤内部的扩散, 使植物根部吸收营养物质和排出分泌物的速度加快, 从而有利于植物更好地生长。

(4) 在环保领域中的应用

① 治理废水——由于粉煤灰颗粒比表面积大、表面疏松多孔, 且含有 SiO_2 、 Al_2O_3 等活性基团, 因此吸附能力较强。根据这一原理, 可以将粉煤灰用于治理生活和生产废水。

② 治理废气——在干式脱硫装置中, 粉煤灰可以作为吸附剂来吸附废气中的 SO_2 ; 将粉煤灰中的未燃碳活化后可用于吸附废气中的 NO_x 和汞蒸汽; 另外, 废气中的甲苯等有机成分也可以用粉煤灰来吸附。

1.2.3.2 粉煤灰的工程应用现状

(1) 粉煤灰在工程中的应用途径

① 用于水电大坝建设。

粉煤灰在大坝建设中的利用方式主要是将其按某一比例掺入混凝土用于施工浇注。实践证明^[10], 将粉煤灰用于大坝建设能节约大量水泥、降低工程成本, 且工程质量满足设计要求。例如, 在我国长江三峡水利枢纽工程的混凝土浇灌作业中掺入了大量Ⅰ级粉煤灰; 在我国三门峡大坝建设中, 共浇注混凝土 $1.3 \times 10^6 \text{ m}^3$, 其中掺用粉煤灰 3.55 万 t, 共节约水泥 2.66 万 t, 且混凝土的各项性能指标均满足设计要求。

② 用于工程回填。

由于粉煤灰自身质量轻, 比一般填筑材料产生的压力低很多。若将其用于建筑物地基、挡土墙、桥台等的回填, 可以最大程度地提高建筑稳定性、抗震性, 减少沉降^[10], 且施工简便、用灰量大、对技术条件要求不高。同时, 粉煤灰的最佳压实含水量较高, 便于潮湿天气施工, 可缩短工期、降低造价, 且抗剪强度比一般天然材料高, 在许多工程中都有成功的应用。

③ 用于公路建设。

粉煤灰在公路工程中的应用主要有以下几个方面:

a. 处理软基——粉煤灰在软基处理中的应用主要是在诸如换填、袋装砂井、砂桩、抛石挤淤、塑料排水板、旋喷桩、粉喷桩等方法中替代或部分替代水泥等胶结材料^[16], 从而达到在加固地基、提高承载能力的基础上节约水泥、减少投资的目的。

b. 填筑路堤——用粉煤灰代替土填筑路堤有“全灰”和“间隔灰”(一层土一层灰)两种