

低品位燃料燃烧特性 及在水泥窑内应用

张保生 刘建忠 袁隆基 著



科学出版社

内 容 简 介

针对水泥回转窑中燃用低品位燃料存在的问题,本书主要从以下几个方面进行了研究:第一,以热重法对不同品位燃料的静态燃烧特性进行了机理研究;第二,通过沉降炉模拟燃料在回转窑内的燃烧环境,重点对低品位燃料的动态燃烧特性进行考察;第三,构建了冷态模化试验台,主要从喷燃器出口结构的角对包括喷燃器在内的回转窑燃料燃烧段的流场和混合强度场进行模拟,从而考察喷燃器结构对低品位燃料着火、稳燃和燃尽过程的影响;第四,在对低品位燃料的燃烧特性和喷燃器空气动力过程研究的基础上,采用计算机辅助试验(CAT),从喷燃器操作参数的角对低品位燃料在整个回转窑内的燃烧过程进行了系统研究;第五,在上述研究的基础上,对 2000t/d、2500t/d、4000t/d、5000t/d 新型干法水泥回转窑中应用不同品位燃料的情况进行考察,重点对燃用低品位燃料时回转窑烧成系统的性能指标进行分析。

本书可供广大水泥回转窑燃烧研究人员及运行人员参考,也可供有关专业的本科生及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

低品位燃料燃烧特性及在水泥窑内应用 / 张保生,刘建忠,袁隆基著.
—北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-034884-5

I. 低… II. ①张… ②刘… ③袁… III. 混合燃料燃烧-应用-水泥-干法-回转窑 IV. ①TQ172.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 128411 号

责任编辑:沈 建 / 责任校对:刘亚琦

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 8 月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2012 年 8 月第一次印刷 印张:11 3/4

字数:224 000

定价:50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

目前低品位燃料在回转窑内的燃烧特性还需进一步研究,回转窑内温度场分布情况(尤其是高温烧成带)还不清楚,现有的多通道喷燃器存在风道过多、风速过高的问题。

为此,本书从燃料的燃烧特性、喷燃器的空气动力过程和回转窑内燃料燃烧过程等方面,对新型干法水泥回转窑中应用低品位燃料时存在的若干关键问题进行了系统研究。

本书对低品位燃料的定义进行了探讨,指出燃料的品位是一个相对的概念,与燃料本身的特性及其工作环境密切相关,因此,以燃料的使用效果作为判断的标准应该是合适的。

本书提出一种新的基于多重扫描速率的动力学求解方法,以逐级筛选的方式对动力学参数进行推断。首先分析反应发生的过程,对机理函数作初步筛选;其次采用等温度法通过函数拟合的线性对机理函数作进一步的推断;最后采用单个扫描速率的微分法和等转化率法相结合的方法,以活化能为判据确定最概然机理函数。此方法可以从根本上消除动力学补偿效应的影响,而且计算过程中几乎没有作任何假设和近似处理,多重扫描速率法也可以减小微分计算所带来的误差。以活化能作为反应机理最终的判据,可以对机理函数进行明显区分,避免仅依赖函数拟合线性的微小差别进行判断的问题。采用该方法对煤样的动力学参数进行求解,结果可以很好地反映各煤种的燃烧特性并能作出明显区分,从而证明该方法是可行的和可信的。

本书从燃烧特性参数和反应动力学的角度对石煤的类属进行了探讨,指出:根据《中国煤炭分类标准》(GB 5751—86),以干燥无灰基挥发分 V_{daf} 为标准,对石煤的类属特性进行判断是不合适的。从燃烧特性参数和反应动力学参数来判断,石煤应该是一种高变质的无烟煤,这一结论是比较合理的。

本书提出一种判断沉降炉试验中低品位燃料着火点的新方法——微分差热法。首先以差热曲线描述煤粉气流的吸热放热过程,其次通过差热曲线的微分区分着火阶段,最后根据着火的定义确定着火点。此方法可以减小试验设备的影响,降低工作量;而且采用定量方法判断着火状态,弥补了尝试法的不足;同时通过微分计算避免了等温度法中燃料发热量被掩盖所导致的误差。由试验结果可知,采用微分差热法确定各工况的着火点,可以很好地对试验条件的影响进行

区分,其结果表现出较好的规律性。因此,采用微分差热法对沉降炉试验中低品位燃料的着火点进行判断是可行的,结果是可靠的。

按照 1 : 2 的几何相似比(其中回转窑和窑头罩为 1 : 5)构建了冷态模化试验台,并首次采用热平衡法从喷燃器出口结构的角度对回转窑燃料燃烧区域一、二次风的混合情况进行了系统研究。通过对混合率和混合强度的概念进行辨析,选用混合强度来表征一、二次风的混合情况。试验结果表明:叶片角度的增加和外风道的齿结构可以提高混合强度,而扩口结构不利于一、二次风的混合。

根据伴随射流的起始湍流强度会对射流沿射程的发展造成很大影响的理论,本书提出一种新型的齿结构喷燃器。在保持出口面积不变的前提下,通过在外风道构建牙齿或同时增加旋流叶片来改变喷燃器的空气动力过程。试验结果表明,外风道的齿结构对于增大内、外回流区和提高整体的混合强度的作用是十分明显的。外内风量比的降低对外回流区的形成是不利的,但是对混合强度的提高很有好处。

本书从喷燃器操作参数的角度对低品位燃料在整个回转窑内的燃烧过程进行了全尺度的系统模拟。对神华烟煤、东罗贫煤和鸿基无烟煤等不同品位煤的燃烧过程进行研究,证明在良好的操作工况下采用三通道喷燃器实现低品位燃料的燃烧是可行的。

本书中所涉及的研究工作得到了科技部、发改委和江苏省自然科学基金(BK2010188)的资助,在此深表谢意。

本书的出版获得了中国矿业大学重点学科建设经费和中央高校基本科研业务费(2011XK08)的资助,在此深表谢意。

虽然作者对本书尽了很大努力,但由于作者水平有限,难免存在疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 水泥工业发展概述	1
1.1 我国水泥工业发展概况	1
1.1.1 我国水泥工业发展迅猛且耗能巨大	1
1.1.2 我国能源形势严峻且煤炭资源分布不均衡	4
1.1.3 水泥工业应用低品位燃料的重要意义	7
1.2 水泥工业技术发展概述	8
1.2.1 新型干法水泥技术的发展	8
1.2.2 水泥窑中燃料利用技术的研究	20
1.2.3 回转窑中喷燃技术的研究	27
1.3 本书主要内容	41
第 2 章 低品位燃料燃烧特性的热重研究	44
2.1 试验方案的构建	44
2.1.1 低品位燃料的定义探析	44
2.1.2 试验样品分析	46
2.1.3 试验装置和方法	47
2.2 非等温热重试验中燃料燃烧特性指数	49
2.2.1 TG-DTG 曲线的转换	49
2.2.2 TG-DTG 曲线特征点	50
2.2.3 综合燃烧特性指数	51
2.2.4 傅氏通用着火指数	52
2.2.5 热重试验中燃料燃烧指数的确定	52
2.3 低品位燃料燃烧特性研究	56
2.3.1 升温速率对燃烧特性的影响	56
2.3.2 烟煤燃烧特性研究	58
2.3.3 褐煤燃烧特性研究	59
2.3.4 贫煤燃烧特性研究	59
2.3.5 无烟煤燃烧特性研究	60
2.3.6 石煤燃烧特性研究	60
2.3.7 不同品位煤燃烧特性综合比较	61

第3章 基于多重扫描速率的动力学求解新方法研究	63
3.1 热分析动力学方法概述	63
3.1.1 动力学方程的衍化	63
3.1.2 传统求解方法存在的问题	64
3.2 基于多重扫描速率的动力学求解新方法	66
3.2.1 理论基础	66
3.2.2 求解过程	66
3.2.3 几点讨论	71
3.3 不同品位煤燃烧反应动力学三因子的求解	72
3.4 基于燃烧特性和动力学分析对石煤的类属研究	73
3.4.1 石煤概述	73
3.4.2 石煤理化特性	74
3.4.3 基于燃烧特性和动力学的类属研究方法	74
3.4.4 石煤类属的判定	74
第4章 低品位燃料窑内燃烧特性的沉降炉模拟	77
4.1 回转窑内燃料燃烧特点	77
4.2 试验方案的构建	78
4.2.1 试验样品	78
4.2.2 试验台架	78
4.2.3 试验方案的确定	79
4.3 沉降炉中低品位燃料动态燃烧特性指数的确定	81
4.3.1 沉降炉试验中低品位燃料着火点确定新方法——微分差热法	81
4.3.2 沉降炉中低品位燃料燃烧特性指数的确定	83
4.4 燃料品位对沉降炉模拟结果的影响	86
4.4.1 挥发分的影响	86
4.4.2 发热量的影响	86
4.4.3 粒度的影响	88
4.5 沉降炉操作参数对燃料燃烧特性的影响	89
4.5.1 过量空气系数的影响	89
4.5.2 着火段壁温的影响	90
4.5.3 二次风温度的影响	91
第5章 新型三通道喷燃器空气动力过程物理模拟	96
5.1 喷燃器物理模拟方法	96
5.2 物理模拟原理	96
5.2.1 冷态模化原理	96

5.2.2 研究射流混合过程热平衡法原理	97
5.3 试验方案的构建	98
5.3.1 试验系统及测试技术	98
5.3.2 三通道喷燃器的设计	100
5.3.3 模拟方案的制定	103
5.4 喷燃器动力场总体分布特征	104
5.4.1 混合强度与混合率的辨析	104
5.4.2 射流速度场总体分布特征	105
5.4.3 射流横向混合强度分布特征	106
5.5 喷燃器结构参数对空气动力过程的影响	123
5.5.1 旋流叶片角度的影响	123
5.5.2 风道扩口的影响	123
5.5.3 外风道牙齿的影响	125
第6章 回转窑中低品位燃料喷燃过程数值模拟研究	129
6.1 CAT 技术在回转窑中应用的可行性	129
6.2 模拟方案的构建	129
6.2.1 研究对象	129
6.2.2 物理模型	130
6.2.3 模拟工况的确定	132
6.3 喷燃器操作特征对低品位燃料燃烧过程的影响	132
6.3.1 旋流叶片角度的影响	132
6.3.2 外内风量比的影响	137
6.3.3 过量空气系数的影响	144
6.4 燃料品位对燃料喷燃过程的影响	150
第7章 低品位燃料在新型干法回转窑中的应用研究	153
7.1 不同品位燃料在 4000、5000t/d 回转窑中的应用研究	153
7.1.1 低品位燃料在 5000t/d 回转窑中的应用研究	153
7.1.2 高品位燃料在 4000t/d 回转窑中的应用研究	156
7.1.3 不同品位燃料在 4000、5000t/d 回转窑中的应用分析	160
7.2 不同品位燃料在 2000、2500t/d 回转窑中的应用研究	162
7.2.1 高品位燃料在 2500t/d 回转窑中的应用研究	162
7.2.2 不同品位燃料在 2000、2500t/d 回转窑中的应用分析	166
7.2.3 2000、2500t/d 级回转窑数值模拟结果的热工标定检验	168
参考文献	170

第 1 章 水泥工业发展概述

1.1 我国水泥工业发展概况

水泥通常指硅酸盐水泥,是以硅酸钙为主要成分的熟料所制得水泥的总称^[1]。

水泥具有“遇水速凝,抗压不屈”的性质,可以“团结沙石,握裹钢筋”,是现代土建工程的三大基本材料之一,素有“建筑工业的食粮”之称。

水泥生产是一个“熔土生晶,炼石成金”的过程,以石灰石和黏土为主要原料,以石油、天然气、煤等为热源,在窑中煅烧而成。

因此,水泥行业不但在建筑、房地产、基础建设等下游产业中起着举足轻重的作用,而且与能源、运输、采矿、设备制造等上游产业息息相关。

1.1.1 我国水泥工业发展迅猛且耗能巨大

新中国成立以来,随着经济的高速增长,我国水泥工业得到了快速发展,但是同时也在大量消耗着能源。

1. 发展情况

我国水泥工业的发展主要可分为四个阶段,如图 1-1 所示。

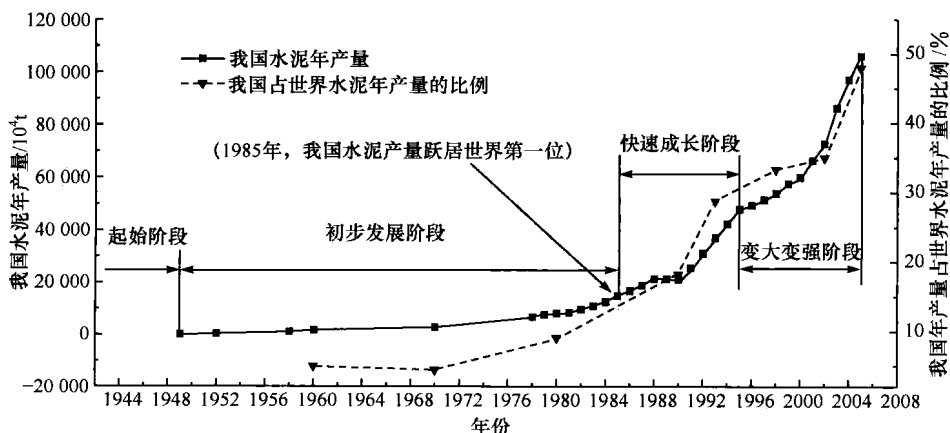


图 1-1 我国水泥年产量

本图根据文献[1]~文献[7]中原始数据绘制而成

1) 1949 年以前,为起始阶段

1889 年,我国第一座水泥厂启新洋灰公司正式生产水泥^[2],以后又相继建立了大连、上海、广州等水泥厂。但是由于国家处于战争时期,水泥工业的发展非常缓慢。

1908 年,全国水泥总年产量为 1.0 万 t;到 1949 年仅为 66 万 t^[3]。

2) 1950~1984 年,为初步发展阶段

1950~1952 年,对遭受战争破坏的水泥厂进行了恢复,1952 年水泥年产量达到 286 万 t^[1]。

从 1953 年开始,国家开始大规模从德国、丹麦、捷克斯洛伐克、罗马尼亚等引进成套设备建设新厂,1960 年水泥生产能力达到 0.11 亿 t^[3]。

1982 年,全国水泥年产量达到 0.94 亿 t,比 1952 年增长了 33 倍之多。

1984 年,水泥年产量达到 1.21 亿 t,比 1983 年增长 11.8%^[1]。

3) 1985~1994 年,为快速成长阶段

随着国民经济的迅速发展和水泥工业技术的积累,这一时期全国水泥年产量直线上升^[8]。

1985 年,我国水泥年产量达到 1.46 亿 t,跃居世界第一位^[5]。

1990 年,我国水泥年产量达 2.09 亿 t,约占世界总年产量的 18%^[5]。

1994 年,我国水泥年产量达 4.21 亿 t,比 1990 年增长了 1 倍多^[4]。

4) 1995 年至今,为变大变强阶段

1995 年,建材工业提出了“由大变强”的跨世纪发展战略,开始了水泥产业结构调整,一大批新型干法水泥生产线投产。

1998 年,我国水泥年产量达 4.76 亿 t,占世界水泥年产量的 33.3%^[5]。

文献[5]在 2000 年预测,2010 年我国水泥年产量将达到 7 亿 t,占到世界总产量的 43.7%;2030 年水泥年产量将突破 8 亿 t,占世界总产量的 43.2%。但是,令人吃惊的是,2002 年全国水泥年产量就达到了 7.25 亿 t^[6];2005 年我国水泥年产量已经突破 10 亿 t,占到世界水泥产量的 48%^[7]。新中国成立以来,尤其是改革开放以来,水泥产量迅速增长。20 世纪 80 年代,我国水泥年产量平均增长率为 11.15%;进入 90 年代,平均增长速度为 10.18%;21 世纪的前 5 年,增长势头依然强劲,平均增长 10.88%。截至 2005 年,我国水泥产量已经连续 21 年居世界第一位^[4]。

文献[9]表明,2010 年全国水泥产量达到 18.8 亿 t,是 2005 年的 1.7 倍,年均增长 11.9%。

2. 耗能情况^[10]

水泥工业与乙烯、合成氨、炼钢等并称为高能耗行业^[11],占每年能源消耗量

的很大一部分。

以 2002 年为例,建材行业的总产值仅占全部工业产值的 3.6%,但是能源消耗量的比例高达 12.0%,其中水泥制造业又消耗了建材行业中 78.3%的能源^[6],如图 1-2 所示。也就是说,这一年水泥行业约消耗了整个工业中 9.4%的能源,因此,水泥工业的能耗强度远远大于一般工业行业。

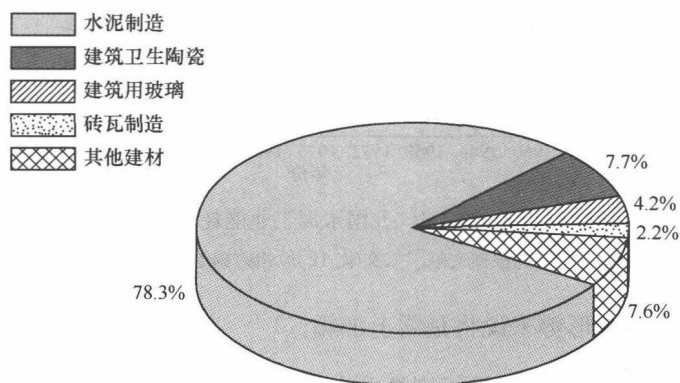


图 1-2 建材工业中各行业能耗比例(2002 年)

我国能源结构以煤炭为主,如图 1-3 所示。因此,我国的能源结构决定了我国水泥工业以煤炭作为主要燃料。

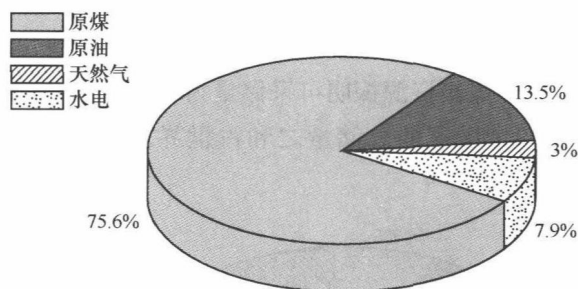


图 1-3 中国能源生产构成(2004 年)

本图根据文献^[7]原始数据绘制而成

由图 1-4 可知,随着我国水泥产量的迅速增长,水泥熟料烧成年耗煤量快速增加。20 世纪 80 年代,平均年增长 10.2%;进入 90 年代,增长势头不减,平均年增长率仍然可以达到 8.8%。

水泥工业熟料烧成年耗煤量占全部工业年耗煤量的比例逐年跃升,到了 1999 年已经突破 10%,到 2001 年达到 11.5%,是 1985 年的两倍还多。

虽然随着技术的进步我国水泥单位熟料能耗在逐步降低,但是由于水泥产量增加迅猛,可以预计在未来几年内水泥工业的年耗煤量仍将继续增加,这对我

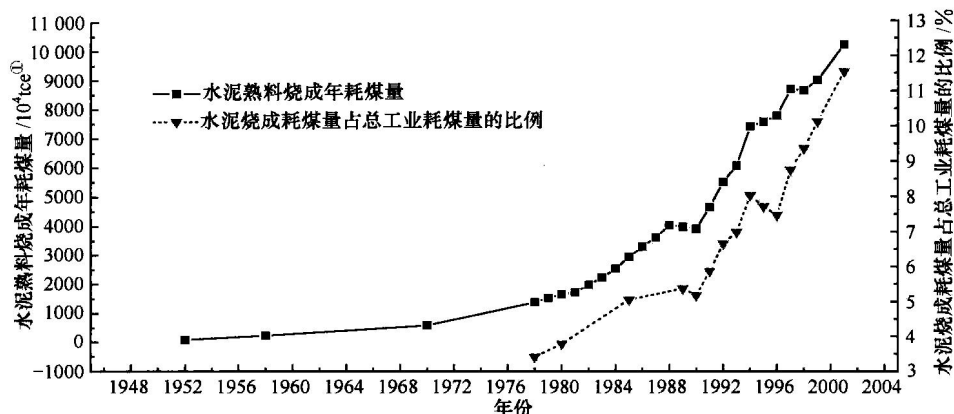


图 1-4 我国水泥工业能耗

本图根据文献[7]、文献[12]原始数据绘制而成

国日益严峻的能源形势来说将是雪上加霜。

1.1.2 我国能源形势严峻且煤炭资源分布不均衡

1. 能源消耗结构

我国的能源构成以煤炭为主，因此主要针对煤炭对中国的能源形势进行考察。

从能源总量来看，我国煤炭资源相当丰富。

2004年年底，世界煤炭资源探明可采储量为 9091 亿 t，主要集中在美国、俄罗斯、中国和印度，四个国家的总储量之和占世界总储量的 67%，其中中国占 12.6%，如图 1-5 所示。

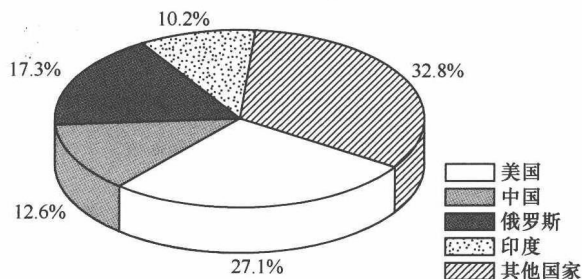


图 1-5 世界煤炭资源探明可采储量分布（2004 年）

本图根据文献[13]原始数据绘制而成

① tce 为吨标准煤。

但是,我国是一个迅速发展中的国家,经济增长方式虽然正在从“粗放型”向“集约型”转变,但是在较长的时期内,仍将不可避免地以大量消耗能源为代价来拉动经济增长。

如图 1-6 所示,改革开放以来,我国煤炭年消费量虽然稍有曲折,但基本上呈快速增加的趋势,1978~2004 年煤炭年消耗量增加了两倍多。

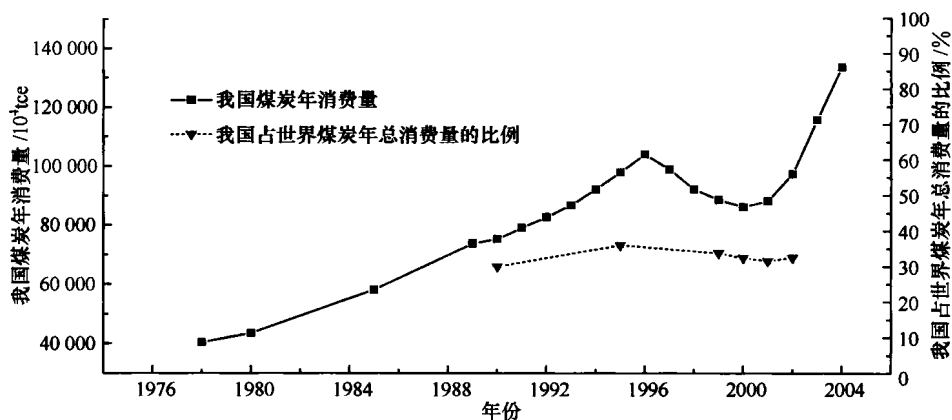


图 1-6 我国煤炭消费量

本图根据文献[7]、文献[11]原始数据绘制而成

虽然我国煤炭资源探明可采储量占世界总储量的 12.6%,但是从 20 世纪 90 年代到 21 世纪初,我国平均年煤炭消费量却占到世界总消费量的 32.7%,而且这一趋势还将继续。

因此,相对于煤炭资源的消费速度来说,我国煤炭资源的储量已经“捉襟见肘”,能源形势日趋严峻。

2. 煤炭分布情况

我国的煤炭分布呈以下特点。

1) 煤炭储量呈“北多南少,西多东少”的格局

如图 1-7 所示,昆仑山—秦岭—大别山以北地区,已发现煤炭资源约占全国的 90.29%;以南地区煤炭资源储量只占全国的 9.65%左右,而且其中的 90.6%又集中在四川、贵州、云南三省。

在大兴安岭—太行山—雪峰山以西地区,煤炭资源占全国的 89%左右;而以东地区已发现煤炭资源仅占全国的 11%。

从经济发展水平看,2003 年东部地区人均 GDP 为 16 206.7 元,中部和西部地区分别为 7757.2 元和 6187.0 元^[15]。

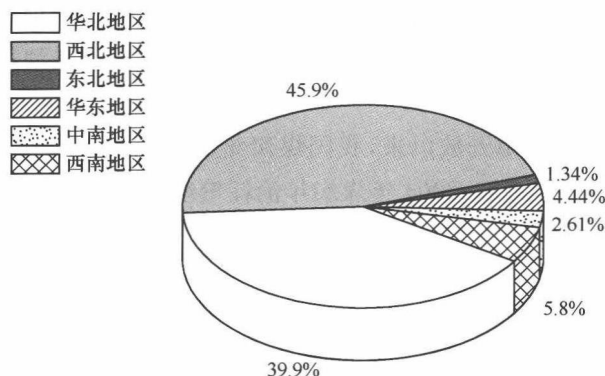


图 1-7 我国各地区煤炭资源探明储量(2001 年)

本图根据文献[14]原始数据绘制而成

因此,我国经济最发达的东部和南部地区,也就是能源的主要消耗地区,却恰恰是煤炭资源贫乏的地区。因此,“北煤南运,西煤东运”是我国过去也是将来很长时期内存在的客观情况。

2) 煤炭种类分布不均衡

如图 1-8 所示,我国煤炭种类齐全,从低变质程度的褐煤到高变质程度的无烟煤都有分布。其中,低变质烟煤(长焰煤、不黏煤、弱黏煤)和中变质烟煤(气煤、肥煤、焦煤、瘦煤)赋存最多。

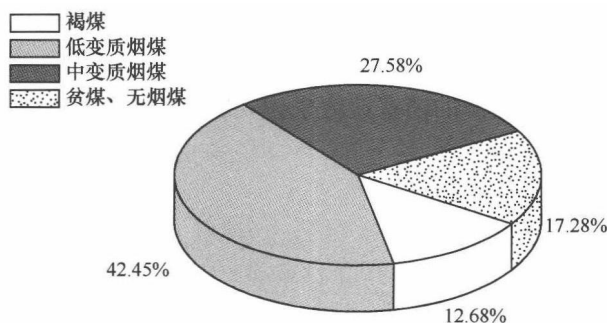


图 1-8 我国煤炭种类

本图根据文献[17]原始数据绘制而成

但是,一些低品位煤,如高水分煤(褐煤)、高变质烟煤(贫煤)、无烟煤等低挥发分煤和石煤、煤矸石等高灰分煤,在我国的煤炭资源中也占有较大的比例,主要分布在浙江、福建、广东等经济较发达的东南各省。广东的无烟煤和褐煤各占 45%,福建 98% 以上是无烟煤,浙江低品位烟煤的产量占总产量的 80%^[16]。

1.1.3 水泥工业应用低品位燃料的重要意义

由水泥工业的发展可知,我国是一个水泥生产大国,截至2005年水泥产量已经连续21年居世界首位,并且还将进一步增加。同时,水泥生产是一个高能耗行业,2002年全国水泥行业能源消费约占整个工业耗电量的9.4%。

从能源形势来看,我国虽然是一个能源储量大国,但是同时也是一个能源消费大国,20世纪90年代至今,平均每年煤炭消费量占到世界总煤炭消费量的32.7%,能源形势日益严峻。而且,作为我国主导能源的煤炭分布很不均衡,在储量上“北多南少”,在品质上又呈“北优南劣”的格局。

因此,如何减少水泥行业的耗能和怎样合理地利用能源,是一个迫在眉睫的问题。其中,低品位燃料的使用是当前解决这一难题的途径之一。

低品位燃料目前还没有严格统一的定义,是一个相对的概念。例如,相对于最初欧、美等在水泥窑炉中采用石油作燃料来说,现在以煤为燃料就是使用低品位燃料。

通常情况下,低品位燃料是指具有低挥发分、低发热量、高水分、高灰分或高硫分等特点的褐煤、贫煤、无烟煤、石煤、煤矸石、煤泥、油页岩、石油焦和一些可燃的生活及工业废弃物等。

这些燃料在着火、稳燃、燃尽方面存在一系列技术上的难题,通常被认为是不宜采用的。

因此,在水泥工业中应用低品位燃料有着以下重要的意义。

1) 有利于节约资源^[18~20]

一方面,基于低品位燃料在燃烧方面所存在的问题,必须选用新型多风道喷燃器。为了适应燃烧低品位燃料的需要,新型多风道喷燃器的射流速度越来越高,一次风率越来越小,这就相当于增加了高温二次风的比例,从而有利于热量的回收,起到节约能源的效果。例如,燃用低品位燃料的PYROJET喷燃器可比传统的燃用烟煤的三通道喷燃器节约6%~8%的热量^[21],Rotaflam喷燃器可比传统的喷燃器降低3.3%的热耗^[2]。

另一方面,低品位燃料一般灰分较高,而煤灰中的主要成分是 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等,与水泥的主要原料黏土的化学成分极为相似。因此,煤灰中的矿物质可以代替部分黏土,因此又可以达到节约水泥原料的目的。

2) 有利于燃料的合理利用

传统水泥窑炉中以烟煤为主要燃料,而烟煤作为一种优质的化工原料,可以用来炼焦、气化、液化等,可以产生比用做燃料更高的价值。

从能源合理利用的角度来说,应该尽可能地减少烟煤用做燃料的比例,而采用贫煤、无烟煤等低品位燃料来替代,做到物尽其用,从而促进我国有限能源的

高效利用,优化国家整体的能源战略。

3) 有利于降低水泥生产成本

在水泥生产中,燃料成本要占到总成本的 35%~40%^[22],因此燃料的价格直接决定了水泥生产成本的高低,也就决定了市场竞争力的强弱。

首先,无烟煤价格比烟煤低。据中国水泥网 2006 年 10 月 11 日的数据,无烟煤的市场价格平均为 300 元/t,比烟煤低 100~150 元/t。

其次,近年来东南沿海地区相继改造或新建了许多大中型水泥厂,2005 年浙江省水泥产量达到 8829.4 万 t,同比增长 10.56%;江苏省水泥产量达到 9579.2 万 t,同比增长 12.81%^[23]。而我国优质烟煤主要产在北方,从而形成“北煤南运”的状况,增加了运费,使得燃料成本进一步上升。

最后,由于烟煤需要长途运输,为了保证生产的连续性,就需要建大的贮煤厂,增加了占地面积和基建投资,相应提高了水泥成本。

我国贫煤、无烟煤、石煤等低品位燃料大量分布在南方地区,因此在水泥窑炉中采用低品位燃料,既可以减少运费,又可以降低基建投资。

4) 有利于环境保护

一方面,燃用低品位燃料的新型喷燃器具有更加均衡的温度场,氧气和燃料的分布也更加合理,因此可以减少污染物的排放。例如,Duoflex 喷燃器可比传统的燃用烟煤的 Swirlex 喷燃器降低约 30%的 NO_x 排放^[2]。

另一方面,由于回转窑中温度很高,气流在 1100℃以上高温区的停留时间达 4s 以上,物料在 1100℃以上高温区的停留时间达 30min 左右^[21]。因此,可以掺烧一些工业废弃物,有利于环境保护。

5) 有利于缓解紧张的交通运输状况

使用本地的贫煤、无烟煤、石油焦等低品位燃料可以缓解由于“北煤南运”而增加的铁路、船运压力,改善我国本来就很繁重的交通运输状况。

1.2 水泥工业技术发展概述

作为主导的建筑材料之一,水泥的历史十分悠久。随着人们对自然界认知的提高和科学技术的进步,水泥工业得到了迅速发展。本节将从水泥烧成技术、燃料燃烧过程的研究、煤粉喷燃技术的开发这三个方面对水泥工业的发展脉络进行梳理。

1.2.1 新型干法水泥技术的发展

1. 水泥的诞生

远在距今 4000~10 000 年的新石器时代,人们就开始使用黏土来砌筑简单

的建筑物,用天然姜石作为建筑的基础,而黏土或姜石中含有大量 SiO_2 ,是水泥的基本原料之一^[1]。

在公元前 3000~前 2000 年,随着火的使用,中国、埃及、希腊和罗马等开始在建筑中使用经过煅烧得到的石膏或石灰^[24],如埃及的金字塔、中国的万里长城等。中国有关石灰的文字记载最早可追溯到公元前 700 年的周朝,最迟在公元 200 年的汉朝,人工烧制石灰已经达到相当高的水平。石灰或石膏的主要成分是 CaO ,是水泥的另一种基本原料。

公元初,古希腊和罗马人发现,在石灰中掺加火山灰可以提高强度,抵御水蚀,因此这种材料被称为“pozzolana”,并沿用至今^[25]。火山灰的主要成分是 SiO_2 ,因此这种材料已经基本具备了现代水泥的成分。罗马的“庞贝”城和圣庙等著名的建筑物都是用 pozzolana 砌筑而成的,中国古代大量使用的“三合土”,即石灰、黄土、细砂的混合物,实际上也是一种 pozzolana 材料。

1729 年,德国军事工程师 Bernard 提出,在石灰中加入火山灰、黏土等含硅物质可以产生很好的“水凝性(hydraulicity)”,这是第一次有记载的对水泥成分进行的理论上的探讨^[24]。

1758 年,在主持建造 Eddystone 灯塔时,Smeaton 继续了 Bernard 的研究。他对许多地方的石灰石样本进行了收集、测试和化学分析。1791 年,他在论文中指出:水凝这种特性总是存在于用含有一定比例的黏土成分的石灰石制成的石灰中,这一发现奠定了现代水泥的基础^[25]。

1796 年,James Parker 获得了“罗马水泥(Roman cement)”的专利,这种水泥是通过对含有小结核或龟背石(septaria)的黏土浆进行煅烧后磨碎得到的^[26]。

在 18 世纪,研究者们一直在探索“什么样的材料和配比才能生产出最好的水泥”,在当时煅烧技术和分析手段十分有限的情况下,这是一个交织着“尝试、错误和大量的天赋、智慧”的过程^[24]。

在前人研究的基础上,英格兰人 Joseph Aspdin 于 1824 年 10 月 24 日获得了“波特兰水泥(Portland cement)”的专利,他相信用这种水泥制造的人造石可以成为像“波特兰石”那样的优质建筑材料^[27]。这个名字一直沿用至今,成为硅酸盐水泥的代名词,同时这一年也被认为是水泥的诞辰,Aspdin 被认为是现代水泥的发明者。他的主要成就在于成功地解决了生料粉磨的问题,并指出将混合的白垩和黏土进行“高温烧结”的重要性。

1828 年,在修建泰晤士河隧道时就使用波特兰水泥来防止渗漏。波特兰水泥第一次真正大规模的使用是在 1858~1875 年的伦敦主排水系统工程中,共用了约 70 000t 水泥^[25]。

2. 水泥煅烧技术的发展

根据水泥煅烧技术发展过程中几次关键性的革新,可以将其分为六个阶段。

1) 干法回转窑的诞生阶段

20 世纪 30 年代以前,为干法回转窑的诞生阶段。1824 年,开始使用间歇操作的土立窑煅烧水泥,称为瓶窑(bottle kiln),如图 1-9 所示。这种窑产量很低,每周可烧成 1.7~3.4t 熟料。主要以木柴或焦炭为燃料,热量损失非常大,燃料量时常超过熟料重量的 30%^[28]。

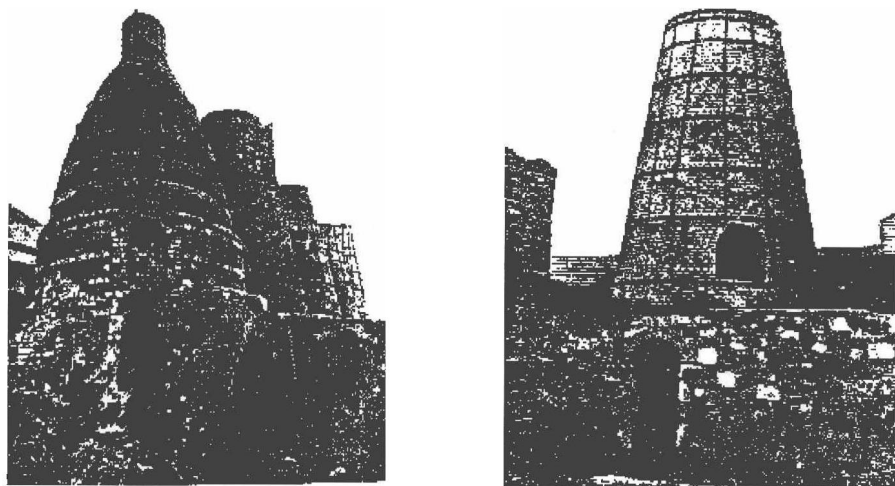


图 1-9 Aspdin 使用的间歇操作的立窑

1840 年左右,英格兰人 Johnson 获得了轮窑(chamber kiln)的专利,使间歇操作变为连续操作^[24]。所用燃料为小块焦炭和煤的混合物,燃料用量降低到熟料质量的 21%。产量也大为提高,一座大型轮窑的每周产量可达 385~480t。但是这种窑出料时需要在高温条件下完成繁重的体力劳动,因此该技术未获得大规模推广。

1883 年,Dietzsch 发明了第一台连续操作的立窑——多层窑。该窑每周产量可达 140~245t,燃料消耗量相当于熟料重量的 15%~18%。但是这种窑通风困难,而且操作条件十分危险^[28]。

在此基础上,人们对连续操作的立窑进行了一系列的改进,取得了较好的效果。但是,为了使燃烧空气能顺利通过物料并保证良好通风,上述窑型用于烧结的物料都必须压制成胚。

早在 1877 年,Crompton 就提出了关于回转窑(rotary kiln)的天才设计,这是水泥工艺发展史上一个关键性的革新^[24]。