



水煤浆

吉登高著

---

SHUIMEIJIANG  
RANSHAO  
TEXING YANJIU

煤炭工业出版社

# 水煤浆燃烧特性研究

吉登高 著

煤炭工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

水煤浆燃烧特性研究/吉登高著. —北京: 煤炭工业出版社, 2008. 11

ISBN 978 - 7 - 5020 - 3395 - 8

I. 水… II. 吉… III. 水煤浆 - 燃烧 - 特性 - 研究  
IV. TQ534. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 143734 号

煤炭工业出版社 出版  
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: [www.cciph.com.cn](http://www.cciph.com.cn)

北京房山宏伟印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行



开本 787mm × 1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 8<sup>1</sup>/<sub>4</sub>

字数 171 千字 印数 1—1,000

2008 年 11 月第 1 版 2008 年 11 月第 1 次印刷

社内编号 6200 定价 30.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

# 前 言

水煤浆是一种新型煤基流态化清洁燃料。常规水煤浆是由70%左右的煤，30%左右的水及少量的化学添加剂组成，近似于流体，可像油一样被泵送、雾化、储存和稳定燃烧，可代替重油和煤用于电站锅炉、工业与民用锅炉、工业窑炉等，具有燃烧效率高、负荷调整便利、减少环境污染和改善劳动条件等优点。精细水煤浆所用制浆用煤的灰分  $A_{ad} \leq 1\%$ ，粒度  $\leq 30\mu\text{m}$ ，水煤浆的质量浓度  $\geq 50\%$ ，黏度  $\leq 300\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，精细水煤浆是稳定性高，热值大的煤水混合物，主要用于代替柴油。

我国是一个煤炭资源丰富而石油资源相对短缺的国家，石油的进口依存度由1995年6.6%，2000年25%，2006年47%，上升到2007年的49%，预计2010年石油的进口依存度将超过50%。按照国际观点，如果一个国家的石油进口依存度达到或者超过50%，说明该国已进入了能源预警期。但是，我国虽然是能源消耗大国，同时也是能源生产大国。在众多能源中，只有石油资源较紧张，我国整体能源的对外依存度只有4%。煤炭成为我国动力、生产的首选燃料。在21世纪前50年，煤炭在中国一次能源构成中仍占主导地位。

发展水煤浆技术可实现以煤代油，减少油料的消耗，可缓解我国石油进口压力，对于确保我国能源安全供应，提高煤炭资源利用效率，减少常规燃煤带来的环境污染具有战略意义。

笔者在王祖訥教授的指导下，开始从事水煤浆制备及其燃烧特性的研究工作，研究了煤及水煤浆的热解行为和燃烧特性，系统总结和分析了液体燃料的雾化机理和悬浮燃烧的特点，解析了水煤浆的悬浮燃烧过程，揭示了水煤浆悬浮燃烧中有机质燃尽度、挥发分和燃料氮释放的变化规律。

本书的完成首先归功于王祖訥教授的悉心指导。课题研究过程中，朱书全教授从学科发展的高度给笔者提出了很多有益的建议，王新国老师、付小恒教授、王新文博士、崔龙连博士、王绍清博士、柴保明博士、高明峰博士、段旭琴博士、陈志刚硕士、田中坤硕士、王美丽硕士给予了很多帮助。在实验系统的加工和改造方面，得到了北京化工机械厂、北京钢铁研究总院、天津茂林烟机开发有限公司、北京瑞福祥通工程设备有限公司的帮助。在此一

并向他们表示衷心感谢!

由于笔者的能力和水平有限，偏颇与疏漏在所难免，恳求专家、学者和同行批评、指正。

**吉登高**

2008年7月

# 目 次

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 我国的能源特征与水煤浆技术 .....	1
1.2 水煤浆燃烧研究的现状与本书的研究内容 .....	5
1.3 研究方案与技术路线 .....	7
<b>2 液体燃料的燃烧</b> .....	9
2.1 液体燃料的雾化 .....	9
2.2 水煤浆的雾化燃烧 .....	9
2.3 本章小结 .....	11
<b>3 水煤浆的制备及其特性分析</b> .....	12
3.1 煤种的选择及其分析 .....	12
3.2 煤的表面结构及其特性分析 .....	13
3.3 水煤浆的制备及其分析 .....	15
3.4 本章小结 .....	16
<b>4 煤及水煤浆的热解特性</b> .....	17
4.1 煤的热解 .....	17
4.2 煤热解的主要实验方法及实验结果 .....	18
4.3 煤粒的热解模型 .....	19
4.4 煤及水煤浆的热解实验及其结果分析 .....	22
4.5 本章小结 .....	26
<b>5 煤及水煤浆的燃烧特性</b> .....	28
5.1 燃烧过程中的几个特征温度 .....	28
5.2 煤的燃烧 .....	28
5.3 水煤浆的燃烧 .....	31
5.4 煤的催化燃烧 .....	34

5.5	煤及水煤浆燃烧反应的动力学分析	38
5.6	本章小结	46
<b>6</b>	<b>水煤浆悬浮燃烧实验系统的研究与建造</b>	<b>48</b>
6.1	单滴水煤浆燃烧实验装置和实验方法	48
6.2	水煤浆悬浮燃烧实验系统的结构	49
6.3	水煤浆悬浮燃烧实验系统的燃烧计算	52
6.4	浆滴粒级特性的测试与分析	56
6.5	本章小结	59
<b>7</b>	<b>水煤浆悬浮燃烧特性的研究</b>	<b>60</b>
7.1	水煤浆的燃烧反应	60
7.2	炉内温度场的确定	61
7.3	炉内气相流场与浆滴停留时间的计算	62
7.4	水煤浆的悬浮燃烧实验及其分析	65
7.5	水煤浆悬浮燃烧反应的动力学分析	77
7.6	本章小结	79
<b>8</b>	<b>水煤浆悬浮燃烧过程的微观研究</b>	<b>82</b>
8.1	水煤浆燃烧过程中颗粒微观形貌与粒度特征的研究	82
8.2	水煤浆燃烧煤焦及残炭的 X 射线能谱分析	94
8.3	水煤浆燃烧过程颗粒表面结构的变化分析	98
8.4	水煤浆燃烧过程中炭的微晶结构的变化研究	104
8.5	水煤浆燃烧过程残渣结构的变化分析	107
8.6	本章小结	109
<b>9</b>	<b>结论与展望</b>	<b>111</b>
附录 A	实验样品的工业与元素分析	115
附录 B	水煤浆燃烧颗粒的 X 射线点能谱分析	116
参考文献		122

# 1 绪 论

## 1.1 我国的能源特征与水煤浆技术

能源是国民经济的基础,对国民经济的持续快速健康发展和人民生活的改善发挥着十分重要的促进与保障作用。

### 1.1.1 我国的能源特征与洁净煤技术

我国的能源特征是“富煤、少油”。2003年总能源消费量达1.678Gt标准煤,其中煤炭占67.1%,石油占22.7%,天然气占2.8%,水电和核能(主要是水电)占7.4%。我国拥有丰富的煤炭资源,2000年探明储量114.5Gt,储采比为116年。而石油探明储量为3.3Gt,储采比为20.2年,是全球平均值的12%。在较长一段时间内,我国的原油产量只能保持在160~170Mt/年的水平。国内石油年消费量约为250Mt,缺口约为100Mt。我国自1993年由石油出口国成为石油进口国之后,每年石油进口量不断增长。净进口石油已由1993年的9.8Mt增加到1995年的10.95Mt、1997年的36Mt、1999年的48.9Mt、2000年的69.6Mt,2001年进口64.92Mt,2004年我国的石油进口已超100Mt。石油的进口依存度由1995年的6.6%,2000年的25%,2006年的47%,上升到2007年的49%,预计2010年石油的进口依存度超过50%。煤炭因其储量大和价格相对稳定,成为我国动力、生产的首选燃料。在21世纪前50年,煤炭在中国一次能源构成中仍占主导地位。

我国每年烧掉的重油约为40Mt,石油资源的短缺也使“以煤代油”战略重新提上议事日程。有关资料显示,我国有80%的煤是直接燃烧的,2000年因燃煤产生的二氧化硫的排放量达18.6Mt,化学反应产生的大量烟雾、酸雨和温室气体造成严重的环境污染。发展洁净煤技术将成为缓解我国石油供需矛盾和减少常规燃煤污染的主要途径。推广洁净煤技术实现“以煤代油”战略已成为我国能源发展的一个重要趋势。

洁净煤技术是在煤炭的开采、加工转化、利用过程中能够提高效率,减少污染的一系列新技术的总称。主要包括煤加工、洁净燃煤与发电、煤转化、污染物治理及资源综合利用四个领域。水煤浆技术、煤炭液化技术及煤炭气化技术是目前洁净煤技术开发和应用的重点。

### 1.1.2 我国的能源供应安全与水煤浆技术

石油被喻为现代工业的血液,煤炭则称为现代工业的粮食。它们是当今世界上最为重要的能源。20世纪70年代的两次石油危机引起全球性的经济衰退,给国际社会造成了巨大的影响。1973年10月6日中东战争爆发,美国及其西方盟国都支持以色列。为此,阿



拉伯石油输出国决定报复西方国家,对参与支持以色列的国家实行石油禁运。从1973到1974年,国际市场的石油价格从每桶3美元涨到12美元,上涨了4倍。由于1979年伊朗伊斯兰革命的影响,伊朗石油产量每天下降了200~250万桶。1980年伊朗和伊拉克开战,伊朗石油产量又下降了60万桶,而伊拉克的石油的日产量也下降了270万桶,两伊的石油产量的锐减,使国际油价骤升,每桶石油的价格从1978年的14美元涨到了1981年的35美元。这两次石油危机给西方主要工业国的经济造成重创,引起经济衰退。而目前石油价格已攀升到每桶100美元以上。

我国的能源问题主要是石油能否安全供应的问题,随着我国国民经济的快速发展,石油进口依存度不断加大,石油供应的风险也就随之增大。当今的世界仍不太平,霸权主义、单边主义,再加上地区冲突与自然灾害,要保持正常、持久的石油供应有时是很困难的,甚至有时是不可能的。这不仅是能源供应的安全问题,而且有可能成为国家的安全问题。我们不应该忘记20世纪50年代末我国与某大国之间的冲突(如撤走专家、撕毁合同、停止油料及设备供应等)。前事不忘,后世之师。

我国是一个煤炭资源丰富而石油资源相对短缺的国家,但我国的燃油量却很大,目前全国每年燃油量在40Mt左右,占全国石油消费量的1/5。石油能否安全供应已成为我国面临的不可回避的现实问题,急需从我国经济发展的全局出发,结合我国资源优势、技术和经济条件,大力发展水煤浆技术和煤炭液化技术,以缓解我国石油进口压力。

水煤浆是一种新型煤基流态化清洁燃料。常规水煤浆是由70%左右的煤,30%左右的水及少量的化学添加剂组成,近似于流体,可像油一样被泵送、雾化、储存和稳定燃烧,可代替重油和煤用于电站锅炉、工业与民用锅炉、工业窑炉等,具有燃烧效率高、负荷调整便利、减少环境污染和改善劳动条件等优点。精细水煤浆所用制浆用煤的灰分 $A_{ad} \leq 1\%$ ,粒度 $\leq 30\mu\text{m}$ ,水煤浆的质量浓度为50%~55%,黏度 $\leq 300\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。精细水煤浆的稳定性高(一个月以上无硬沉淀),热值大于14MJ/kg的煤水混合物,主要用于代替柴油。因此,发展水煤浆技术可提高煤炭资源利用效率;减少常规燃煤带来的环境污染;实现以煤代油,减少油料的消耗,缓解我国石油进口压力;对于确保我国能源安全供应具有战略意义。

### 1.1.3 水煤浆技术的发展现状

#### 1. 国外水煤浆技术的发展现状

国外水煤浆技术的发展和主要受国际油价的影响,多数技术发达国家是作为技术储备来研究。①苏联1988年建成世界上规模最大的水煤浆制备—管道运输—水煤浆发电工程,水煤浆生产能力达5Mt/a,管道输送距离262km,管道直径530mm,供新西伯利亚电厂 $6 \times 670\text{t/h}$ ( $6 \times 200\text{MW}$ 机组)锅炉燃用,取得成功。②美国著名的麻省理工学院、宾州大学、埃德尔菲大学等单位及美国能源部都投入了大量的人力、财力,进行了广泛的水煤浆制备、输送和燃烧技术的开发研究。着重开展了广泛的基础研究,超低灰煤浆和内燃机燃用水煤浆的研究,对大型电站锅炉改造、大型燃烧器的设计、水煤浆制备与燃烧的

工程设计也进行了大量的研究。并在许多锅炉和 75MW、120MW 电站锅炉进行了水煤浆燃烧实验。③日本从 20 世纪 70 年代开始研究油煤浆,并在 1985 年实现工业应用。从 1981 年开始研究水煤浆,经过几年的努力,从 1984 年起发展工业制浆、输送和燃烧的研究。在小名滨建成 500kt/a 水煤浆厂,通过 9km 长的管道供给世界应用规模最大的东京勿来电站 4 号机组 (75MW) 269t/h 锅炉和 8 号机组 (600MW) 1940t/h 锅炉燃用水煤浆。该锅炉原设计为油和煤粉的混烧,加入水煤浆后,为三种燃料混烧,比例为 50% 的水煤浆、20% 的油、30% 的煤粉,燃烧效率达到 98% 以上。采用脱氮脱硫装置,污染物排放水平为  $\text{SO}_2$  不大于  $88 \times 10^{-6}$ ,  $\text{NO}_x$  不大于  $60 \times 10^{-6}$ , 粉尘不大于  $50\text{mg}/\text{m}^3$ 。日本对水煤浆的研究工作未曾中断,还准备计划一个 ACC 工程,把水力采煤、制浆、管道输送及应用组织在一起成为一个独立的系统,进一步提高水煤浆的利用率。

在内燃机中用煤作燃料的想法,可以追溯到 19 世纪。19 世纪末,柴油机的首创者鲁道夫狄塞尔就曾设想用煤作柴油机燃料。1930—1945 年德国的帕列克斯基 (Pawlikowski) 对煤和煤基燃料在柴油机上燃用的有关问题进行了长期深入的研究。20 世纪 50 年代,美国西南研究所和霍怀特大学、弗吉尼亚综合工程研究所,都相继研究了煤和煤基燃料在柴油机上燃用的可行性。20 世纪 70 年代南非采用了 Fishcher - Tropsch 法用煤制造出内燃机液体燃料。与此同时,瑞士的苏尔寿公司在大型低速柴油机上进行了燃用煤粉和油煤浆的试验研究。1978 年美国能源部下属的能源保护和再生部门组织力量对柴油机和燃气轮机以煤浆为燃料开展了专门的研究,进行了大量的试验。在燃气轮机和柴油机上,由于锈蚀和磨损等难以解决的问题,放弃了以煤为燃料的研究。进入 20 世纪 80 年代,澳大利亚墨尔本理工学院的卡斯迪克 (Karstic) 试验研究了利用褐煤粉加柴油组成的油煤浆在柴油机上的燃用,并取得了可喜的成果。20 世纪 80 年代至 90 年代,美国通用汽车公司、通用电气公司、Cooper 能源系统公司、底特律柴油机公司及西南研究所在柴油机上对煤基代用燃料的燃烧进行了大量的试验研究,其中包括固定式柴油机、中速柴油机以及卡车用高速柴油机。实验结果表明:在中速和低速柴油机上燃烧煤基代用燃料是可行的。

水煤浆气流床气化又称湿法进料气流床气化, Texaco 炉是一种率先实现工业化的气化技术,由于其进料方式简单,工程问题较少,近十几年来得到长足的发展,具有较大的气化能力,在 2000 年和 2001 年两年间在全世界建立了 13 套气化装置,包括我国淮南市 (煤 900t Pd, 合成氨)、美国 Motiva Delaware City (2300t 流化石油焦 Pd, 120MW + 蒸汽) 等,气化原料有煤、重油和石油焦等。之后我国相继引进四套 Texaco 水煤浆气化装置,用于生产甲醇和合成氨 (或尿素)。Texaco 气化炉使用的典型水煤浆浓度是 60% ~ 70%, 由于水煤浆具有液体的特性,加压进料容易,所以可以实现更高压力 (8 ~ 10MPa) 操作。其操作温度一般在 1350 ~ 1500℃ 之间,当灰熔点高于 1500℃ 时,需要添加助熔剂。离开气化炉的高温粗煤气和细粉,含有人炉煤化学能的 15% ~ 35%, 因此,冷煤气效率较低 (冷水工程 71% ~ 74%)。另一主要的问题是氧耗较高。为了降低过程氧耗,提高冷煤气效率,在 Texaco 气化技术基础上发展了两段进浆气化工艺。Destec 气化法,增加 2 段水煤

浆进料, 2 段水煤浆喷入量为总量的 10% ~ 20%, 气化炉出口温度降到 1038 ~ 1050℃。次烟煤气化冷煤气效率达到 77%。

## 2. 国内水煤浆技术的发展现状

我国研制水煤浆始于 1982 年, 由国家科学技术委员会攻关局组织进行, 1983 年 1 月国家科学技术委员会将“水煤浆制备与燃烧技术”正式列为国家“六五”攻关项目, 其制备技术的开发由中国矿业大学北京研究生部承担, 锅炉燃烧技术由浙江大学承担, 炉窑燃烧技术由北京科技大学承担。1983 年 5 月, 由中国矿业大学北京研究生部制备的“大同水煤浆”首次在浙江大学 200kg/h 试验台试烧成功。普通水煤浆制备和燃烧的主要技术为:

(1) 制浆用煤的选择与煤炭成浆性的判别。一般要求制浆用煤的挥发分大于 28%, 对于大多数采用固态排渣的炉子, 要求煤炭的灰熔点 ( $T_2$ ) 高于 1250℃。而煤炭的发热量、灰分、硫分等指标应根据用户要求确定。煤炭成浆性与煤炭的物理化学性质有着密切的关系。中国矿业大学(北京)对不同煤阶的煤进行成浆性研究, 提出了分析煤炭成浆性的模型及煤炭成浆性能的评价指标, 成功地用于预测煤炭制浆效果和优选制浆用煤。

(2) “级配”技术。制备高浓度的水煤浆时, 不仅需要把煤炭磨至一定的细度, 更重要的是它的粒度分布状况, 应能使大小颗粒相互充填, 以减少颗粒间的空隙; 空隙率越小, 颗粒的堆积效率越高, 用少量的水就能使浆体流动; 使颗粒堆积效率高的技术称“级配技术”。中国矿业大学(北京)提出了“隔层堆积”理论, 运用计算机可方便地计算出任意一种实际粒度分布的堆积效率, 并可预测在适当添加剂条件下的可制浆浓度。该成果优于国外同类技术, 成功地用于指导水煤浆的研究和工业实践。

(3) 磨矿技术。是指通过磨机使其产品既能达到一定的细度, 又具较高的堆积效率的磨矿技术。中国矿业大学(北京)研究了磨矿介质运动规律、磨矿介质对不同粒级煤的破碎作用、磨矿过程中粒度减少过程的连锁变化规律。提出了磨矿介质运动的散体理论、有用功耗分层算法、配球理论及磨矿矩阵模型。

(4) 化学添加剂技术。添加剂是保证水煤浆具有良好液态性能必不可少的成分, 其中最重要的是分散剂。中国矿业大学(北京)根据水煤浆中颗粒主要靠空间位阻与熵斥力作用进行分散的理论, 开发了多种添加剂。另外南京大学也开发了一些性能较好的添加剂。

(5) 水煤浆燃烧技术。雾化喷嘴是水煤浆燃烧的关键技术, 雾化性能的好坏直接影响水煤浆能否顺利着火和燃烧, 燃烧效率是否满足要求。国内雾化喷嘴主要有三种形式: 旋流内混型、Y 型、冲击式多级雾化型, 容量为 0.1 ~ 4t/h 级喷嘴, 已实现工业应用。目前正在开发的新型雾化喷嘴具有防堵、不怕磨损的特点, 并具有良好雾化与燃烧性能。

精细水煤浆制备与燃烧技术主要包括, 煤炭深度物理加工技术和精细水煤浆燃烧技术。其主要技术为:

(1) 低能耗超细搅拌磨机。该机主要特点是采用沉静原理实现浆介分离, 减少了筛

网分离装置,设备运行可靠、平稳;设备低速旋转,筒体不发热,减少了冷却夹套装置;当磨机生产出粒度为 $10\sim 15\mu\text{m}$ 时,能耗为 $30\sim 60\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ ,比国外同类型搅拌磨机(能耗为 $150\sim 300\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ )能耗也小得多。

(2) 絮团-浮选技术。絮凝剂的用量为 $1\sim 4\text{kg}/\text{t}$ ,当原煤灰分小于 $12\%$ 时,可选出灰分为 $1\%\sim 3\%$ 的精煤,甚至灰分小于 $1\%$ 的超净煤,产率可达 $40\%$ 以上。经加压过滤总精煤水分小于 $40\%$ 。

(3) 精细水煤浆和柴油两用喷嘴技术。有效地解决喷嘴堵塞与磨损问题。

(4) 润滑供浆(油)一体化燃料技术。该技术有效地解决泵体和喷嘴的润滑问题。

(5) 精细水煤浆在柴油机和小型燃油锅炉燃烧应用技术。

### 3. 我国水煤浆工业的应用情况

1998年以前,我国只有北京水煤浆示范厂、兖日水煤浆厂、枣庄矿务局八一水煤浆厂、株洲选煤厂水煤浆车间及抚顺胜利矿水煤浆厂5家普通水煤浆制备企业,总设计能力约为 $0.65\text{Mt}/\text{a}$ 。其中北京水煤浆示范厂和兖日水煤浆厂为引进国外水煤浆制备技术。1998年之后,我国普通水煤浆制备厂的发展较快,八一水煤浆厂经过多年的建设,建成了 $0.25\text{Mt}/\text{a}$ 的制浆生产线,且拥有我国自主知识产权的制备技术。白杨河发电厂自备浆厂、邢台东庞矿水煤浆厂、大同汇海水煤浆厂、胜利油田水煤浆厂、广东茂名热电厂自备浆厂、北京燕化新东方水煤浆厂、新汶良庄水煤浆厂、孙村水煤浆厂等陆续建起;同时建起的一些民营企业的水煤浆制备厂,它们分别为大同的新源水煤浆厂、河北霸州水煤浆厂、河北宏达水煤浆厂。截至2002年底,我国共有水煤浆厂15座,设计能力约为 $4.26\text{Mt}/\text{a}$ ,水煤浆厂的数量和总生产能力均居世界第一位。还有一批正在建设中的水煤浆厂,如沈阳石蜡水煤浆厂、大庆盛泰水煤浆厂、青岛新源水煤浆厂、广东茂名水煤浆厂扩建工程、吉林石化水煤浆厂、辽河油田水煤浆厂和广东南海水煤浆厂等。

精细水煤浆的制备与燃烧已通过小试和中试,中国矿业大学(北京)世界合作实验室经过多年坚持不懈的研究,已有大量自主产权的技术储备,需要进一步产业开发与工业示范,需经优化工艺与完善设备使之推广应用。

煤通过加氢和加氢裂解反应可以脱除绝大部分杂原子,转化成外观类似石油的煤液体。一般认为煤岩显微组分中镜质组和壳质组是液化的活性组分,即煤岩显微组分中镜质组和壳质组的含量越高越易液化。我们可探讨煤岩分离方法用活性成分去液化,用非活性的组分制作水煤浆液体燃料。这样既能提高资源利用率,又可优化产业结构,具有战略意义。

## 1.2 水煤浆燃烧研究的现状与本书的研究内容

### 1.2.1 水煤浆燃烧的研究现状

#### 1. 煤浆燃烧的研究现状

有关油煤浆的燃烧研究进行的比较早。20世纪60年代,人们开始对水煤浆的燃烧进

行单颗燃烧实验和火炬燃烧实验。从 70 年代末开始,煤浆的单滴和火炬燃烧特性及计算的研究已成为国际上燃烧科研工作者日益关注的课题。在单滴燃烧实验装置和实验室规模的火炬燃烧装置中,研究油煤浆燃烧特性的单位有:美国西北大学机械与原子能工程系燃烧实验室;美国能源部匹兹堡能源研究中心;日本群馬大学化学工程系;加拿大燃烧研究实验室;中国的清华大学、浙江大学、北京科技大学、中国科学院工程热能物理所、中国矿业大学等。研究水煤浆燃烧特性的单位有:美国燃烧工程公司;美国杨伯翰大学燃烧实验室;美国桑地亚国家实验室;美国麻省理工大学等;日本群馬大学化学工程系;日本东京大学机械工程系;苏联热力工程大学;英国利兹大学。与本课题相关的研究还有:单颗油水煤浆滴的燃烧特性的研究;甲、乙醇煤浆滴的燃烧特性;油和油煤浆滴燃烧特性的比较;水煤浆和干煤泥单颗燃烧特性的比较;单颗煤粒与水煤浆滴燃烧特性的比较等。研究表明:甲、乙醇煤浆的流动性较好,冰点低,便于低温运输,且具有良好的燃烧特性,可完全代油,但成本高,不能推广应用;油煤浆燃烧特性最佳,但节油量有限,成本较高而无吸引力;水煤浆虽然燃烧特性较差,但价格低廉,便于工业生产和应用,是一种有前途的燃料。

## 2. 煤的显微组分燃烧性能的研究概况

煤的显微组分为活性组分(镜质组和壳质组)和惰性组分(丝质组),源于炼焦工业。由于最初 Nandi 等人发现煤粉的燃尽程度与惰性组分有关,因此这个概念被引入到煤粉燃烧特性的研究中,并认为活性组分易于燃烧,惰性组分难于燃烧。热天平分析表明:与惰质组分相比,活性组分一般具有较低的着火温度和较好的着火稳定性;随着变质程度的增加,活性组分着火温度的增高,着火稳定性变差,而惰质组分没有明显的变化规律。

Rajan 和 Raghavan 在流化床中对同品位的高挥发分煤进行研究发现,富壳质组煤并不按通常认为的那样有高的火焰温度,而富镜质组煤和富壳质组煤的火焰温度分布形似。

Scaroni 对六种高挥发分烟煤进行了研究,在同样实验条件下,富镜质组煤和富壳质组煤的失重比富惰质组煤高;对显微组分相近的煤,低反射率的有较大的重量损失;颗粒的尺寸对富镜质组煤和富壳质组煤有影响,小尺寸颗粒在热解和燃烧时有较大的失重率,但对富镜质组煤没有影响;显微组分对热解焦的反应性影响较大,而对燃烧反应性却没有影响。

袁建军和张军利用滴管炉进行了显微组分的燃烧实验,并采用灰分示踪法对挥发分与显微组分和固定碳的燃烧关系进行研究,结果显示:惰性组分挥发分的析出受空气的影响较大,且其燃尽度较低,矿物质对挥发分的析出起阻碍作用;有机显微组分对固定碳的燃烧有不同的影响,惰质组分的燃尽度低于镜质组,无机矿物质对固定碳的燃烧起阻碍作用;通过对混煤的燃烧实验,进一步证实了显微组分之间存在着相互作用。

李小江通过对气煤至无烟煤的着火点进行测量的基础上,利用回归方法对着火点与煤化程度(以镜质组反射率表示)、有机显微组分(镜质组,惰质组,壳质组)、无机显微组分(黏土,硫化物,碳酸盐,氧化物)和水分的关系进行分析,结果显示:有机显微

组分大致使着火点升高,但壳质组在低变质阶段、惰质组在高变质阶段使着火点下降;无机显微组分中,后生矿物质使着火点降低,而同生矿物质使着火点升高。

综上所述,煤是一种多相的、不均一的物质,是由多种不同的显微组分组成。这些显微组分导致了煤在外观形态、光学性质及显微结构上的差异,从而造成了煤的物理性质、化学性质及工艺性质上的不同。在燃烧过程中各显微组分的煤浆可能有明显不同的燃烧特性。但由于煤岩显微组分分离的困难,煤的显微组分对水煤浆燃烧特性影响的研究尚未见报道。而水煤浆滴的燃烧研究中,是以易燃煤种的制浆为基础(一般选择低灰、可磨性好、挥发分大于28%的烟煤来制浆),采用浆滴悬挂燃烧方式,与液体燃料实际雾化悬浮燃烧方式相差较远。所得实验结果只能定性预测各种煤浆的燃烧特性,对燃烧器设计与运行缺乏定量、可靠的数据,这样就制约水煤浆燃烧器的优化设计与经济运行。因此使水煤浆燃料的优越性没有得到充分体现。如果能从水煤浆悬浮燃烧特性入手,可望找到水煤浆悬浮燃烧过程的变化规律,从而推动水煤浆产业化发展。

### 1.2.2 本书的研究内容

本书的总体目标是以不同煤种为对象研制水煤浆并考察水煤浆的燃烧特性。从燃烧的角度出发为水煤浆的研制和应用提供依据;并为水煤浆燃烧器的设计和开发提供基础数据。主要研究内容为:

- (1) 借鉴前人的制浆技术,制备不同煤种的水煤浆并进行特性分析。
- (2) 利用热重分析手段,探索不同煤种及其水煤浆燃烧性能。
- (3) 借鉴液体燃料的实际燃烧方式,设计并建造水煤浆悬浮燃烧实验系统。
- (4) 通过实验揭示水煤浆在燃烧过程中可能发生的凝聚结团、膨胀、爆裂及形成多孔蜂窝结构的现象及机理。
- (5) 在实验研究和理论分析的基础上,对水煤浆燃烧过程进行微观分析和动力学分析,揭示水煤浆的悬浮燃烧规律。

### 1.3 研究方案与技术路线

本研究是以煤化学理论为依据,充分借鉴前人相关研究成果,采用实验研究的方法探讨水煤浆的燃烧特性。为水煤浆制备和燃烧器的设计提供理论依据。

该研究的技术路线是以制水煤浆用煤为对象,通过细碎和高速搅拌制备水煤浆,再通过热天平和水煤浆悬浮燃烧实验系统进行燃烧实验与相关实验测试。

技术关键为:

实验系统中水煤浆燃烧过程的取样装置是水煤浆燃烧测试和分析的关键。

主要试验设施为:

- (1) 热天平。对不同煤种的煤及水煤浆进行差热分析(DTA)和热重分析(TG)。
- (2) 扫描电镜。对煤及水煤浆的结构形态的变化进行观察和分析。
- (3) 水煤浆悬浮燃烧实验系统。该系统由四部分组成,分别为浆滴发生器、沉降炉

---

本体、取样装置和温控装置。其特点是加热速度快，与电站锅炉升温速率相近；温度高，可达 1600℃；颗粒到达取样装置的入口时，可迅速冷却，准确地控制反应时间。这些特点可保证实验工况与电站锅炉燃烧相近，以便在该实验系统上得到的数据和结论能够可靠地应用到工程设计和生产实践中去。

## 2 液体燃料的燃烧

### 2.1 液体燃料的雾化

锅炉及工业炉中燃用的液体燃料主要有重油、焦油、柴油及新型代油液体燃料——水煤浆。液体燃料的燃烧方式为扩散燃烧，扩散燃烧又分为单相扩散燃烧和多相扩散燃烧两种；而液体燃料与氧化剂分属不同的形态，故为多相扩散燃烧。

液体燃料的燃烧，多采用喷嘴雾化方法。雾化就是通过雾化器将液体燃料分裂成许多微小而分散的液滴，以增加燃料单位质量的表面积，使其能和周围空间的氧化剂更好地进行混合，在有限空间得到迅速和完全的燃烧。雾化过程是液体燃料燃烧的最初的重要阶段，雾化后的雾滴喷入空气流中形成雾化炬，并呈悬浮状态着火燃烧。

液体燃料雾化的方法有机械式雾化和介质式雾化两种。机械式雾化主要靠液体燃料自身的压力，把液体燃料以高速喷入相对静止的空气中，或以旋转方式使液流加强扰动而使液体得到雾化。介质式雾化是靠附加的雾化介质的能量来雾化的。利用高速喷射的雾化介质的动能冲击液流，使液体被击碎、吹散而形成细小液滴。

### 2.2 水煤浆的雾化燃烧

#### 2.2.1 水煤浆雾化燃烧系统的特点

水煤浆的燃烧过程和原理与燃油类似，但是水煤浆燃料相对于原煤、油、天然气等燃料具有不同的物理化学特性，燃烧系统必须做特殊的设计，制备好的水煤浆在锅炉的燃烧系统中应经过下列重要过程：

- (1) 水煤浆炉前搅拌系统（如搅拌罐），以防止发生沉淀；
- (2) 水煤浆的炉前过滤系统（在线过滤器），以滤去杂质，过滤器应具有承压、密封和清洗等功能；
- (3) 供浆系统，如供浆泵、供浆管路等，应可以实现连续调节供浆量；
- (4) 水煤浆雾化喷嘴，以压缩空气或蒸气为介质进行雾化，雾化喷嘴设计的好坏将直接影响水煤浆的点火和燃烧的效率；
- (5) 水煤浆燃烧器，水煤浆含有 30% 左右的水分，燃烧器的设计应考虑水煤浆的这些特殊的物理化学特性，燃烧器的设计也将直接影响水煤浆的点火及燃烧效果；
- (6) 雾化后的水煤浆喷入炉内完成燃烧，炉内的布置应满足水煤浆燃烧特性；
- (7) 其他系统，燃烧后的灰渣要经过除灰系统、排渣系统等，这些系统都应按水煤



浆的特性作相应的设计。

### 2.2.2 水煤浆雾化燃烧

水煤浆的燃烧方式与油相似，由雾化器喷成雾滴进入炉内燃烧。由于煤浆的浓度高，黏度大，其中即含有水分，又含有固体煤粒，因此，它的燃烧情况与油有所不同。

水煤浆的燃烧过程大致分为四个阶段：升温、水分蒸发、挥发分析出与燃烧和残炭的燃烧。水煤浆的单滴燃烧在升温阶段由于加热速度很快，虽然有少量的水分蒸发，但失重不多，温度升高到 110℃ 左右时，便进入水分蒸发阶段，失重明显增加，但温度变化不大。水分蒸发结束，挥发分开始析出并燃烧，这时煤粒周围可看到火焰，颗粒温度迅速上升，但失重速度则小于水分蒸发阶段。残炭的燃烧与挥发分的燃烧两个阶段有重叠现象，这表明挥发分尚未完全析出时残炭的燃烧已经开始。残炭燃烧使颗粒的温度升到 1100℃ 以上，并在一段时间内保持不变，但失重继续增加，直到燃尽为止，而温度最后降至与炉温一致。

实验结果表明，水煤浆含有 30% 左右的水分，该水分蒸发所损耗的热量，仅占煤浆热值的 3% ~ 4%，水分蒸发所占用的时间（100 $\mu$ m 液滴）为 0.006 ~ 0.0074s，仅占全部燃烧过程时间的 1.2% ~ 1.4%。因此，水煤浆燃烧中所含的水分对燃烧过程并未造成太大的影响。但加入这部分水后，却使煤炭这种固体燃料变成液体燃料，可采用泵送、雾化而且便于燃烧过程调节。水分蒸发所产生的爆裂作用与燃烧过程中水蒸气的生成还能使燃烧过程得到改善。燃烧实验还发现，水煤浆的热力着火温度比煤粉低 100℃ 左右。燃烧温度比煤粉低 200℃ 左右，减少了燃烧过程中氮的氧化物 NO<sub>x</sub> 的生成，有利于环境保护。

水煤浆比燃料油难以雾化。现用于水煤浆的雾化器有内混式喷嘴、Y 型喷嘴和低压旋流型喷嘴。雾化介质与煤浆的进口压力为 0.3 ~ 0.5 MPa。为了使水煤浆在炉内稳定燃烧，燃烧用的空气需要预热至 200℃ 左右。

燃油锅炉若要改为烧水煤浆就受到煤浆燃烧强度的限制，锅炉需改造燃料供给系统、燃烧水煤浆的燃烧器和除灰装置。燃油锅炉改烧水煤浆，出现的主要技术经济问题是锅炉出力下降 30% ~ 40%。其原因为：①煤浆颗粒燃烧所需时间比油燃烧时间长，煤浆火炬的长度增加；②燃用煤浆后，炉膛火焰温度比燃油时低 100 ~ 200℃，炉膛的传热量减少；③炉膛的受热面因炉灰的污染而降低了传热效果；④燃油锅炉的炉膛容积一般比煤粉炉小 0.5 ~ 1 倍，由于锅炉容积和受热面积不足，使炉膛出口温度偏高，燃尽度下降，燃烧效率降低。为了不使炉膛出口受热而结焦，必须维持一定的炉膛出口温度，否则锅炉的出力将降低 20% ~ 50%，为了少降低负荷，或不降低负荷，应尽可能增加炉膛容积；强化偏火及燃烧，使有限的空间内燃烧更多的水煤浆；缩短煤浆火炬；提高炉膛的温度水平。

水煤浆实际燃烧应用的措施有：①装设前置复合燃烧室，采用反吹射流强化着火的措施；②采用射流栅强化炉内气流扰动并使未燃尽的颗粒在炉内循环燃烧的方法，提高燃烧效率和燃烧强度；③采用水煤浆预燃室旋流燃烧器，强化水煤浆雾炬着火。

通过对液体燃料及水煤浆燃烧过程、燃烧的影响因素的分析，使我们深刻地认识到要