



再/生/资/源/科/学/与/工/程/技/术/丛/书

水煤浆制备及应用

刘明华 主编

SHUIMEIJIANG
ZHIBEI JI
YINGYONG



化学工业出版社

再生资源科学与工程丛书

水煤浆制备及应用

刘明华 主编



化学工业出版社

·北京·

本书对水煤浆制备及应用做了较全面的介绍,侧重于水煤浆制备及应用。全书共7章,第1章主要介绍我国能源特征、水煤浆技术、水煤浆技术发展现状;第2章主要介绍水煤浆的级配机理以及燃烧机理和水煤浆添加剂的作用机理;第3章主要介绍水煤浆制浆技术,包括制浆用煤的选择、级配技术、磨矿设备及工艺以及国内外典型的制浆工艺;第4章介绍水煤浆的装储、运输、燃烧技术;第5章、第6章主要介绍特殊水煤浆新技术以及水煤浆的深度应用技术;第7章介绍了水煤浆添加剂的种类,包括水煤浆分散剂、稳定性、辅助添加剂等。

本书内容丰富,实用性强,既可作为环境工程、能源工程、化学工程等领域的工程技术人员、科研人员和管理人员参考,也可供高等学校环境科学与工程、能源工程、化学工程专业及相关专业师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

水煤浆制备及应用/刘明华主编. —北京:化学工业出版社, 2015.6

(再生资源科学与工程丛书)

ISBN 978-7-122-23599-2

I. ①水… II. ①刘… III. ①水煤浆-制备 IV. ①TQ536.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第070320号

责任编辑:刘兴春

装帧设计:史利平

责任校对:吴静

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张15½ 字数326千字 2015年7月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究



前言

Foreword

能源是人类社会和经济发展的物质基础，从某种意义上讲，人类社会的发展离不开优质能源的出现和先进能源技术的使用。在当今世界，能源的发展，能源和环境，是全世界、全人类共同关心的问题，也是我国社会经济发展的重要问题。水煤浆作为一种新型煤基液体燃料，在我国已经进入全面推广应用时期。作为国家大力推广的新型清洁煤基燃料，水煤浆是一种固含量在65%左右，以煤为主料、水为辅料，再加入1%左右的分散剂，采用特定工艺，经过专用设备的研磨、细化，充分混合而形成均匀、稳定的液体燃料。水煤浆既像油一样易于装卸、储存和输送，又可直接雾化燃烧。作为燃料，水煤浆不但具有价格低廉、燃烧稳定、燃烧效率高的优势，而且污染物排放少、节能环保，可广泛应用于蒸汽锅炉、热水锅炉、导热油炉、工业窑炉。从成本、环保、节能角度来看，水煤浆代油、代煤无疑具有绝对的优势，因此具有广阔的市场应用前景，可以为许多企业拓宽生存空间，提高经济效益。

本书对水煤浆制备及应用做了较全面的介绍，侧重于水煤浆制备及应用，增加了大量应用实例。全书共7章，第1章主要介绍我国能源特征、水煤浆技术、水煤浆技术发展现状；第2章主要介绍水煤浆的级配机理以及燃烧机理和水煤浆添加剂的作用机理；第3章主要介绍水煤浆制浆技术，包括制浆用煤的选择、级配技术、磨矿设备及工艺以及国内外典型的制浆工艺；第4章介绍水煤浆的装储、运输、燃烧技术；第5章、第6章主要介绍特殊水煤浆新技术以及水煤浆的深度应用技术；第7章介绍了水煤浆添加剂的种类，包括水煤浆分散剂、稳定性、辅助添加剂等。本书主要是根据国内外大量文献、著作进行整理的成果，书中的内容丰富，实用性强，既可作为科技人员的参考书，又可作为应用和开发新产品、新技术的工具书，还可作为高等学校环境科学与工程、能源工程、化学工程专业及相关专业的教材或参考书。

本书由刘明华主编，刘以凡、刘剑锋、郑福尔、骆微、杨桂芳、叶晓霞、苗天博等参与了部分内容的编写工作；全书最后由刘明华统稿、定稿。

本书在编写过程中参考了大量资料和国内外专家学者的研究成果，在此对参考和引用资料的专家、学者表示诚挚的谢意。

由于笔者的专业水平和知识范围有限，虽已尽力，但疏漏与不妥之处在所难免，敬请各位专家、学者及广大读者提出批评和修改建议。

编者

2015年1月

目 录

Contents

第 1 章	绪论	1
1.1	我国的能源特征	1
1.1.1	我国的能源特征	1
1.1.2	我国的能源供应安全	3
1.2	水煤浆及其分类	4
1.2.1	水煤浆产品分类及工业应用	4
1.2.2	水煤浆的性质	5
1.2.3	水煤浆的制备	6
1.3	水煤浆的主要特征	7
1.3.1	水煤浆的成浆性	7
1.3.2	水煤浆的稳定性	10
1.3.3	水煤浆的流变性	13
1.3.4	水煤浆的燃烧性	15
1.4	难制浆煤种成浆性的提高途径	17
1.4.1	配煤制浆	18
1.4.2	表面改性	19
1.4.3	热处理	19
1.4.4	复配添加剂	20
1.4.5	严格级配和提高堆积效率	21
1.4.6	超声波技术	22
1.4.7	微波处理技术	23
1.4.8	电磁场磁化技术	23
1.5	水煤浆技术的发展现状	24
1.5.1	国内水煤浆技术的发展现状	24
1.5.2	国外水煤浆技术的发展现状	26
	参考文献	28
第 2 章	水煤浆机理研究	31
2.1	水煤浆添加剂作用机理	31

2.1.1	水煤浆分散剂作用机理	31
2.1.2	水煤浆稳定剂作用机理	33
2.1.3	其他辅助添加剂作用机理	34
2.2	水煤浆粒度级配作用机理	38
2.3	水煤浆燃烧机理	38
2.3.1	悬浮燃烧原理	38
2.3.2	流化床燃烧原理	39
	参考文献	40

第3章 水煤浆制浆技术 42

3.1	水煤浆的制备过程	42
3.2	水煤浆的制备系统	43
3.2.1	制浆系统	43
3.2.2	添加剂系统	43
3.2.3	给水系统	43
3.2.4	污水废浆系统	43
3.3	水煤浆制浆设备	43
3.3.1	破碎设备	44
3.3.2	磨矿设备	45
3.3.3	搅拌设备	75
3.3.4	泵送设备	80
3.3.5	滤浆设备	81
3.4	水煤浆制浆工艺	82
3.4.1	干法制浆工艺	82
3.4.2	干、湿法联合制浆工艺	84
3.4.3	高浓度磨矿制浆工艺	84
3.4.4	中浓度磨矿制浆工艺	85
3.4.5	高、中浓度磨矿级配制浆工艺	86
3.4.6	结合选煤的制浆工艺	88
3.4.7	超净煤精细高热值水煤浆	89
3.4.8	褐煤水煤浆	90
3.4.9	国内外水煤浆厂简介	90
3.5	制浆用煤的选择	95
	参考文献	96

第4章 水煤浆燃烧与储运技术 97

4.1	水煤浆的燃烧技术	97
-----	----------	----

4.1.1	水煤浆的燃烧过程	97
4.1.2	水煤浆的燃烧装置	102
4.2	水煤浆的储运技术	117
4.2.1	水煤浆的储存技术	117
4.2.2	水煤浆的运输技术	117
	参考文献	120

第5章 特殊水煤浆新技术 121

5.1	污泥水煤浆	122
5.1.1	污泥现状及其利用	122
5.1.2	污泥水煤浆制浆工艺	124
5.1.3	影响污泥水煤浆性质的主要因素	126
5.1.4	污泥水煤浆研究方向及发展趋势	129
5.2	煤泥水煤浆	131
5.2.1	煤泥水煤浆制备工艺和设备	131
5.2.2	燃烧系统及锅炉	135
5.2.3	煤泥水煤浆沸腾燃烧系统	139
5.3	生物质水煤浆	145
5.3.1	生物质利用技术现状	145
5.3.2	生物质水煤浆燃烧工艺	148
5.3.3	生物质煤浆成浆特性的影响因素	150
5.3.4	生物质煤浆应用及展望	153
	参考文献	153

第6章 水煤浆深度应用技术 155

6.1	水煤浆深度应用技术概述	155
6.1.1	水煤浆汽化过程	155
6.1.2	水煤浆喷嘴	156
6.1.3	汽化炉内的流动与反应特征	157
6.2	水煤浆汽化制备甲醛	163
6.2.1	甲醛的性质与用途	163
6.2.2	甲醛的毒性	164
6.3	水煤浆汽化制备合成氨	167
6.3.1	氨的性质	167
6.3.2	氨的用途	167
6.3.3	合成氨生产工艺流程简介	167
6.3.4	合成氨的典型工艺流程介绍	168

6.3.5	以煤为原料的合成氨工艺	169
6.3.6	煤气化生产合成氨基本流程	169
6.3.7	GE 煤气化技术用于合成氨生产的发展概况	169
6.3.8	水煤浆气化路线	171
6.4	水煤浆气化制取合成氨联甲醇工艺	172
6.4.1	气化	172
6.4.2	变换	173
6.4.3	低温甲醇洗	173
6.4.4	甲醇合成及精馏	174
6.4.5	空分装置	175
	参考文献	176

第 7 章

	水煤浆添加剂	177
7.1	水煤浆添加剂概况	177
7.1.1	水煤浆添加剂的作用	177
7.1.2	水煤浆添加剂的分类	177
7.1.3	水煤浆添加剂的研究概况	178
7.2	合成有机高分子分散剂	181
7.2.1	非离子型合成分散剂	181
7.2.2	阴离子型合成分散剂	181
7.2.3	分散剂在水煤浆制浆中的应用	183
7.3	木质素系分散剂	190
7.3.1	木质素磺酸盐	191
7.3.2	木质素分散剂在水煤浆制浆中的应用	194
7.4	腐殖酸系分散剂	197
7.4.1	腐殖酸盐的制备	198
7.4.2	腐殖酸盐的改性	199
7.4.3	分散剂对煤成浆性能的影响	203
7.5	水煤浆分散剂的复配	204
7.5.1	木质素系分散剂与合成高分子分散剂复配	205
7.5.2	腐殖酸系分散剂与合成分散剂复配	207
7.5.3	非离子型合成分散剂与阴离子型合成分散剂复配	210
7.5.4	阴离子型合成分散剂与阴离子型合成分散剂复配	211
7.6	水煤浆稳定性	214
7.6.1	稳定剂作用机理	214
7.6.2	稳定剂种类	215
7.6.3	稳定剂的性质与制备	215

7.7 辅助添加剂	229
7.7.1 消泡剂	229
7.7.2 pH 调节剂	231
7.7.3 杀菌剂	234
7.7.4 乳化剂	238
参考文献	238

第 1 章

绪 论

1.1 我国的能源特征

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

我国是一个国土面积辽阔、能源资源蕴藏总量较为丰富的大国。在我国已探明的化石能源资源储量中，煤炭占据化石能源资源的 90% 以上。煤炭资源总量超过 1×10^{12} t，探明可采储量超过 1100×10^8 t，占世界的 11.6%，煤炭资源总量稳居世界第一，而且如果全世界都只烧煤的话，我国煤的储量可供全世界人烧大约 100 年，但人均储量仅为世界平均水平的 79%。煤炭是我国最可靠的一次能源，其战略地位长期不变。

作为上游基础产业，煤炭行业受益于快速发展的宏观经济形势。我国石油资源量约为 1040×10^8 t，天然气地质资源量约 47×10^{12} m³，通过对不同类型盆地油气勘查，新增储量规律和各种方法的分析，测算出我国石油可采资源量为 $(150 \sim 160) \times 10^8$ t，天然气可采资源为 $(10 \sim 14) \times 10^{12}$ m³。按照国际上（油气富集程度）通常的分类标准，我国在世界 103 个产油国中属于油气资源“比较丰富”的国家，但是按人均水平计算的话，我国石油储量人均水平仅为世界的 10% 左右，而天然气储量人均水平也不到世界平均水平的 5%。另外，我国水能资源储量非常丰富，算得上是世界上水资源最丰富的国家之一，其理论蕴藏量接近 7×10^8 kW·h，只算可开发水能资源的话也接近 4×10^8 kW·h，相应的年发电量接近 2×10^{12} kW·h。总的来说，我国的能源特征主要有以下几点。

(1) 富煤

在我国化石能源资源中，煤炭是一种非常重要的资源。煤炭对于我国经济建设和社会发展都具有突出贡献，很多年以来我国煤炭资源在我国能源生产和能源消费结构中的比例都保持在 70% 以上的水平。我国煤炭资源丰富，品种齐全、分布广泛。目前，在我国所有的省、自治区和直辖市中，除了上海市还没有发现煤炭资源外，别的省、自治区和直辖市都有煤炭资源。但是各地方的煤炭资源分布不均匀，总体特征是西多东少、北富南贫。

从地理分布上看，我国煤炭分布于秦岭—大别山以北的储量约为 9100×10^8 t，占全国保

有储量 90% 左右；分布于太行山—雪峰山以西的储量约为 $8750 \times 10^8 \text{ t}$ ，占全国总储量的 87% 左右。现在，我国每年的产煤量超过亿吨的省区有山西、内蒙古、陕西、河南、山东、黑龙江、贵州和安徽。其中，山西、陕西和内蒙古三省区的煤炭储量为 $6459 \times 10^8 \text{ t}$ ，占全国总储量的 64%；新疆、甘肃、宁夏、青海四省区的煤炭储量为 $1405 \times 10^8 \text{ t}$ ，占全国总储量的 14%；云南、贵州、四川、重庆四省市的煤炭储量为 $903 \times 10^8 \text{ t}$ ，占全国总储量的 9%；其余各省市的煤炭储量为 $1266 \times 10^8 \text{ t}$ ，占全国总储量的 13%。而我国工业生产布局和经济重点则偏东偏南，特别是我国经济最发达的北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东和广东等省市的煤炭储量仅为 $568 \times 10^8 \text{ t}$ ，占全国总储量的比例还不到 6%，这是决定我国煤炭生产和消费格局呈逆向分布的直接原因。因此就需要将我国煤炭资源从北方向南方，从西部到东部进行大量的长距离运输。我国的煤炭资源不仅存在分布与需求不相适应的问题，还存在各地煤炭储量的品种与质量相差很大的问题。煤炭中很重要的四种炼焦煤种中，大约有 1/2 的瘦煤、焦煤、肥煤只存在于山西省，华东、中南和东北地区只存在少量的炼焦煤，而上述三个地区却存在煤炭需求旺盛的大量大型钢铁企业。

(2) 贫油

现阶段我国石油工业保持了较快的发展速度，石油的探明储量在逐渐增多，已经勘探发现的油田的数量也在增加，可以说从大庆油田的发现开始我国就摘掉了贫油的帽子。而且今后随着时间的推移，我国勘探开发工作技术的进步将导致采收率的提高，以及勘探工作的进一步加强，都有可能实现我国的石油最终可采储量的一定幅度的增长。尽管如此，仍改变不了我国石油资源储量分布不均，总量贫瘠的石油禀赋特点。

我国石油资源储量的分布广泛但非常不均，地区储量差异较大。石油资源主要分布在各盆地和沿海大陆架中。已探明的石油资源储藏地中，塔里木盆地、松辽盆地、东海和渤海湾等是我国石油资源的主要蕴藏地。东部含油气区、中部含油气区、西部含油气区、南部含油气区、西藏含油气区和海上含油气区是我国的主要含油气区，这是根据各个含油气区的地质特征和勘探程度决定的。就我国省区地理行政区划来看，东北和华北地区属于东部含油气区，陕、甘、宁和四川地区位于中部含油气区，苏、浙、皖、闽、粤等个省区隶属于南部含油气区，新疆、青海和甘肃等位于西部含油气区，昆仑山脉以南、横断山脉以西的地区隶属于西藏含油气区，东南沿海大陆架及南海海域称为海上含油气区。我国主要大中型油田由东到西分布为大庆油田、吉林油田、辽河油田、冀东油田、渤海油田、华北油田、胜利油田、中原油田、江苏油田、东海油田、汉江油田、长庆油田、四川油田、滇黔贵油田、南海油田、玉门油田、青海油田、吐哈油田、克拉玛依油田和塔里木油田。自新中国成立后，我国已先后勘探出大小油田 500 多个，且随着冀东油田的成功开发，我国石油储备又新增了 $10 \times 10^8 \text{ t}$ ，这无疑谱写了我国石油勘探行业新的篇章。

就表面上来看，我国石油分布较广，储量充足。但究其根本，我国采用的石油储量分类标准与国际上采用的通用石油储量分类标准存在一定偏差，这导致了我们对本国石油储量的预测不够客观。以资源量为例，国际上所指的资源储藏量实际应为在可预计的技术水平和石油价格范围内，未来短、中期可以勘探、开采出的且具有经济可采价值的资源蕴藏量。即我国实际的石油储藏量应为石油资源的经济可采数量。但我国在计算石油储量时容易忽略开采的边际成本与边际收益，而过多地关注于我国石油资源的地下汇聚量。因而在对石油储量进

行计量时,往往包含了短、中期不具有开采价值的石油,使计量结果产生偏差。由此可见,我国实际具有开采价值的石油储备量要远远小于预测量,我国石油供给形势已经日趋严峻。

(3) 少气

我国天然气资源主要分布在我国的中部、西部和海域区,天然气资源总储量规模约为 $(40\sim 60)\times 10^{12}\text{m}^3$ 。根据我国已探明天然气资源储量的分布情况,区域性是天然气储藏地区的明显特点,而且这些地区还呈现出相对集中的特点。因此要根据我国已探明天然气资源储藏的地区特点,确定下一步的勘探开发方向。我国已探明的天然气资源储藏地区集中分布在我国的中、西部地区,尤其是在最近发现的气田中,中西部地区的数量达到37个,比例超过60%,天然气储量比例更是接近70%。目前我国所发现的气田主要分布在四川盆地、松辽盆地、塔里木盆地、吐哈盆地等9个主要的含油气盆地。因此近期天然气勘探开发的重点还是要以中部陕甘宁地区和四川盆地为主,将部分海域和西部塔里木盆地、柴达木盆地及吐哈盆地也作为天然气资源勘探开发的重点地区。

在21世纪前50年,煤炭在中国一次能源构成中占主导地位。从结构上讲,我国属于“贫油富煤”的国家,煤炭是我国当前最可靠和最有保障的能源。专家预言,人类将面临一个能源时代的变革,未来的能源必将以太阳能、核能、生物质能等可再生能源为主,但进入下一个能源时代之前,能源消耗须经过一个过渡时期,由于煤的储存量超过石油甚多,这个过渡时期应是一个以煤为主的混合型能源结构阶段。但这个阶段不是直接燃烧煤炭的用煤方式的重复,而是一个在高效、洁净、优质化基础上的高层次利用煤炭的阶段。

1.1.2 我国的能源供应安全

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%,2009年石油的进口依存度突破50%后,2010年和2011年均维持在55%,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。

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。1973~1974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200万~250万桶。1980年伊朗和伊拉克开战,伊朗石油产量又下降了60万桶,而伊拉克石油的日产量也下降了270万桶,“两伊”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。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。此外，对我国能源资源的合理利用、节能以及环境效益上有着重大的现实意义。

1.2 水煤浆及其分类

1.2.1 水煤浆产品分类及工业应用

水煤浆 (CLM, coal-liquid mixture 或 CWF, coal water fuel) 是用一定级配粒度的煤粉与水混合而成的，具有一定稳定性 (半年以上不沉淀、不分层) 和流动性 (存放时黏度很大，而流动时黏度小于 1000 cP)，可以像重油一样长距离泵送、管输、船载、车送和雾化燃烧的浆状煤炭产品。就目前而言，水煤浆主要有以下几种产品，不一定是某种浆体最好，而某种浆体最差，每种产品都应因地制宜，发挥区域性的优势，努力做到和谐发展。

(1) 高浓度水煤浆

由平均粒径小于 0.06mm 且有一定级配细度的煤粉与水混合，浓度在 60% 以上，黏度在 1500mPa·s 以下，稳定性在一个月不产生硬沉淀 (产生软沉淀后经搅拌即可复原)，可长距离泵送、雾化直接燃烧的浆状煤炭产品。主要用于冶金、化工、发电行业的代油燃料。

在此需要说明的是，水煤浆的浓度是指浆中含绝对干煤的质量分数。水煤浆浓度中所指水量包括原煤的水分和制浆过程中加入的水量。通常制浆用煤已经含有 5%~8% 甚至更多的水分，制浆过程中加入的水量是浆的浓度水量与原煤水分的差值。

(2) 中浓度水煤浆

由平均粒径小于 0.3mm 且有一定级配细度的煤粉与水混合，煤水约各占 1/2，具有良好的流动性和一定的稳定性，可以远距离泵送的浆状煤炭产品。主要适用于远距离管道输送，可以终端脱水浓缩燃烧。

(3) 精细水煤浆

一般情况下，精细水煤浆是指制浆所用煤粉的灰分 $A_d < 1\%$ ，精煤经过超细磨碎，粒度上限在 $44\mu\text{m}$ 以下，平均粒度小于 $10\mu\text{m}$ ，浆的浓度为 50%~55%，表观黏度在剪切速率为 100s^{-1} 时，小于 $400\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，浆的稳定性高 (≥ 1 个月无硬性沉淀)，热值大于 14.63MJ 以上的煤水混合物。精细水煤浆是重柴油的一种代替燃料，可用于低速柴油机、燃气输送及公共建筑和住宅的取暖锅炉。美国在 20 世纪 80 年代为应付石油价格危机，着手开发精细水煤浆技术，并在内燃机上进行了试验，但由于其制备的精细水煤浆的成本接近于柴油，加上石油价格的下跌，该技术停止了商业化，作为储备技术保留。目前，我国的精细水煤浆技术已达到中试水平，由于开发了一种低成本、高效的超净煤分选技术，使等热值的精细水煤浆的价格约为柴油的 60%。

精细水煤浆具有如下特点。

① 制备精细水煤浆的原料煤是经过超细粉碎并经过深度分选的超净煤，在此过程中煤

中的无机矿物和有机可燃体被充分解离并得到分选,故对同一种制浆原料煤而言,精细水煤浆的灰分和硫分远低于普通水煤浆。

② 由于精细水煤浆粒度细,灰分很低,所以与普通水煤浆相比较,燃烧速度快,效率高,可以提高燃烧强度。

③ 精细水煤浆可作为柴油的替代燃料用于中小型燃油锅炉、中央空调等,并有望用于柴油机和燃气轮机,代油范围远大于普通水煤浆。

④ 燃烧精细水煤浆时可配用简单、小体积和低成本的静电除尘器,而普通水煤浆燃烧时需配置大体积、高投资的静电除尘器。

⑤ 精细水煤浆的灰分很低,而且燃烧温度也相对较低,因此在燃烧过程中所排放的 NO_x 和 SO_x 等污染物的排放量将会进一步降低,具有良好的环境效益。

(4) 煤泥浆

煤泥浆为利用洗煤厂生产过程中产生的煤泥,保持55%左右的浓度就地应用的浆状煤炭燃料。多用于工业锅炉掺烧使用。

此外除了以上几种主要的水煤浆产品以外,还有诸如超纯水煤浆、原煤水煤浆、脱硫型水煤浆、经济型水煤浆、汽化水煤浆、环保型水煤浆等。具体分类见表1-1。

表 1-1 水煤浆的种类和用途

水煤浆种类	水煤浆特性	使用方式	用途
高浓度水煤浆	煤水比一般大于2:1或浓度大于60%	泵送、雾化	直接作锅炉燃料(代油、汽化原料)
中浓度水煤浆	煤水比约1:1或浓度约50%,一般不加添加剂	管道输送	终端经脱水供燃煤锅炉,也可终端脱水再制浆
精细水煤浆	粒度上限 $<44\mu\text{m}$,平均粒度 $<10\mu\text{m}$,灰分 $<1\%$,浓度50%以上	替代油燃料	内燃机直接燃用
煤泥水煤浆	灰分25%~50%,浓度50%~65%	泵送锅炉内	工业锅炉和电站锅炉掺烧使用
超纯水煤浆	灰分0.1%~0.5%	直接作燃料	燃煤、燃气锅炉
原煤水煤浆	原煤不经洗选制浆	直接作煤燃料	燃煤锅炉、工业窑炉
脱硫型水煤浆	煤炭加入CaO或有机碱液固硫	泵送炉内	脱硫率可达50%~60%
经济型水煤浆	浓度65%~68%,稳定性 >15 天	直接作煤燃料	作链条锅炉燃料
	浓度50%~65%,稳定性 $>3\sim 5$ 天	直接作煤燃料	作沸腾炉或链条炉燃料
汽化水煤浆	浓度:58%~65%,黏度: $<1000\text{ mPa}\cdot\text{s}$,稳定性1~2天	直接作煤燃料	作德式古炉汽化造气用原料 工业窑炉燃料
环保型水煤浆	浓度 $>65\%$,黏度 $(1000\pm 200)\text{ mPa}\cdot\text{s}$	直接作煤燃料	可提高脱硫率10%~20%
	浓度50%~55%,黏度 $<1200\text{ mPa}\cdot\text{s}$,稳定性30天	直接作煤燃料	适合高硫煤地区锅炉燃烧用,脱硫效果好

1.2.2 水煤浆的性质

水煤浆是一种以煤代油的新型煤基清洁燃料。水煤浆技术是洁净技术的一个重要部分。水煤浆是将煤研磨(通常为湿法研磨)成一定粒度(平均粒度为 $50\mu\text{m}$ 左右),与水按一定的质量比例混合[煤:水=(65~70):(34~29)],再添加少量的添加剂(1%左右),

经过强力搅拌而形成的煤水两相浆体。

水煤浆不仅具有煤炭原有的物理特性，而且具有良好的流动性和稳定性，能够像燃料油那样易于装卸、储存、管道输送及雾化空间燃烧，可以广泛应用于工业炉窑、工业锅炉及电站锅炉中，其中超低灰水煤浆还可以直接代替油燃料而应用于柴油机和燃气轮机。水煤浆和一般的煤泥水不同，是一种均匀液体燃料，所以必须具备如下例如便于燃烧、使用等的性质。

① 为利于燃烧，水煤浆的含煤浓度要高，通常煤的质量分数为 62%~70%才能够符合燃烧热值的要求。

② 水煤浆在燃烧过程中要泵送、雾化，优良的水煤浆必须像油一样，黏度小，流动性好。通常要求流动时表观黏度要低，通常要求在 100s^{-1} 剪切率及常温下，表观黏度不高于 $1200\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，存放时黏度要高，即具有剪切变稀的流变特性。

③ 水煤浆一般要储存或长途运输，为防止在储运过程中产生沉淀，水煤浆应有良好的稳定性。一般要求能静置存放 1 个月不产生不可恢复的硬沉淀。

④ 水煤浆体系的粒度级配和燃烧效率，都对煤粒度有严格的要求。为提高煤炭的燃烧效率，一般要求粒度上限为 $300\mu\text{m}$ ，其中小于 200 目 ($74\mu\text{m}$) 的含量不少于 75%。

水煤浆的上述各项性能不是单项起作用，是相互制约的。例如，要使水煤浆中含煤浓度高，就不能多用水；含水量少了，那么其流动性就受到影响，黏度也会增大；要流动性好，黏度低，就要多加水，但浓度会降低，稳定性也变差。因此，水煤浆的制备较复杂，影响因素也较多，涉及煤化学、颗粒学、胶体学、有机化学及流变学等学科技术。

1.2.3 水煤浆的制备

要制出符合上述性能要求的高浓度水煤浆，单用细煤粉与水简单混合是无法实现的，还必须采取一些特殊的技术措施，主要有以下几项。

① 要使煤与水能混为一体，至少必须使煤粒能全部为水所浸润。通常煤颗粒间有较多空隙，水首先要将这些空隙充满才可浸没全部煤粒，所以耗水量大，难以做成高浓度水煤浆。为了提高制浆浓度，必须使煤颗粒间空隙要少。使空隙最少的技术称为“级配”，是制浆的关键技术之一。其中涉及两项技术：一是要能判定什么样的粒度分布颗粒间空隙少；二是如何根据给定的煤炭性质与粒度组成，制定合理的制浆工艺，选择磨碎设备的类型，设计磨机的结构与运行参数，使之能达到颗粒间空隙少的粒度分布。

② 煤炭的主体是有机质，它是结构十分复杂的大分子烃类化合物。这些有机质的表面具有强烈的疏水性，不易为水所润湿。细煤粉又具有极大的比表面积，在水中很容易自发地彼此聚结，这就使煤粒与水不能密切结合成为一种浆体，在较高浓度时只会形成一种湿的泥团。所以制浆中必须加入少量的化学添加剂，即分散剂，以改变煤粒的表面性质，使煤粒表面紧紧地被添加剂分子和水化膜包围，让煤粒均匀地分散在水中，防止煤粒聚结，并提高水煤浆的流动性。由于各地煤炭的性质千差万别，适用的添加剂会因煤而异，不是一成不变的。

③ 煤浆毕竟是一种固、液两相粗分散体系，煤粒又很容易自发地彼此聚结，在重力或其他外力作用下，很容易发生沉淀。为防止发生硬沉淀，必须加入少量的化学添加剂，即稳

定剂。稳定剂有两种作用：一方面使水煤浆具有剪切变稀的流变特性，即当静置存放时水煤浆有较高的黏度，开始流动后黏度又可迅速降下来；另一方面是使沉淀物具有松软的结构，防止产生不可恢复的硬沉淀。从以上可以看出，煤炭的制浆效果与煤炭本身的理化性质有着密切关系，制浆用原料的性质直接影响到水煤浆的质量与生产成本。所以，建设制浆厂时，要根据用户对煤浆质量的需求以及煤炭成浆性规律，合理选择制浆用煤是十分重要的。从燃烧角度考虑，制浆用煤的挥发分不能太低，锅炉用水煤浆通常要求挥发分大于28%，否则煤浆不易稳定燃烧。此外，为防止炉内结渣，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℃。至于煤炭的发热量、灰分与硫分指标，则应根据用户的需求而定。煤炭的成浆性需对有代表性的煤样进行专门的试验研究后才能判定。一般来说，煤炭的内在水分越低，可磨性越好，煤中氧含量越低，则成浆性越佳。

1.3 水煤浆的主要特征

1.3.1 水煤浆的成浆性

1.3.1.1 水煤浆成浆性的概念

煤的成浆性是指将煤制备成水煤浆的难易程度。包括水煤浆的流变性和稳定性。煤的成浆性一般可以用所制煤浆在常温下，剪切速率为 100s^{-1} 、表观黏度达 $1000\text{mPa}\cdot\text{s}$ 时的煤浆浓度来衡量。成浆性好，说明该煤种易制成水煤浆，反之，说明该煤种难制成水煤浆。水煤浆作为流体燃料，其流体特性直接影响到它的储存、运输及燃烧。

众所周知，煤种不同，制浆的难易程度有很大的差异。煤阶越低，内在水分越高，煤中O/C比越高，亲水官能团越多，孔隙越发达，可磨性指数HGI值越小，煤中所含可溶性高价金属离子越多，煤炭的制浆难度会越大。

1994年，国家水煤浆工程技术研究中心联合煤炭科学总院北京煤化所、中国科学院山西煤化所及中国矿业大学北京研究生部等部门，共同选择了不同煤阶中有代表性的17个煤样进行详细研究。一共得出工业分析、灰成分、煤岩显微组分、煤炭表面特性、红外光谱、煤中可溶性矿物分析、表面积和孔特性、润湿接触角、吸附特性、含氧官能团、表面电性等34项煤质分析数据。结合制浆实验结果，采用多元非线性逐步回归分析方法进行统计分析，从诸多的因子中筛选出日常易于获得的少数显著因子，首次总结出其中的规律，建立了煤炭成浆性模型，并在此基础上提出了评定煤炭成浆性难易的综合判别指标 D 。根据这个指标，可以初步估计这种煤炭的可制浆浓度 c ，该项成果已成功地用于预测煤炭制浆效果和优选制浆用煤。评定烟煤成浆性难度指标 D 的计算回归式为：

$$\text{无氧模型} \quad D = 7.5 + 0.5M_{\text{ad}} - 0.05\text{HGI} \quad (1-1)$$

$$\text{有氧模型} \quad D = 7.5 - 0.015\text{HGI} + 0.223M_{\text{ad}} + 0.0257 \times \text{O}^2 \quad (1-2)$$

无含氧量数据时使用式(1-1)；有含氧量数据时使用式(1-2)。

D 值越大，表明成浆性越差。在适量添加剂与合适级配条件下，可制浆浓度 c (%)与 D 间有下列经验关系：

$$c = 77 - 1.2D \quad (1-3)$$

式中, c (%) 为水煤浆表观黏度为 $1000\text{mPa}\cdot\text{s}$ (剪切速率为 100s^{-1}) 时的质量分数。

模型从众多的煤质因素中虽然只选入了 2~3 个因素, 但并不等于说其他因素就没有影响, 只是由于因素间的相关, 其他因素的影响可由这三个因素所囊括。值得注意的是, 式(1-3)模型的可制浆浓度预测值是在粒度分布与添加剂基本适用的条件下可制浆浓度的期望值。实际制浆时的粒度分布与添加剂配方仍会有差异, 因此模型的估计值有一定的误差。

按照煤炭成浆性指标 D , 可将煤炭成浆性难易分成四档, 如表 1-2 所列。

表 1-2 煤炭成浆性分类

成浆性指标 D	成浆性难易	可制浆浓度/%	成浆性指标 D	成浆性难易	可制浆浓度/%
<4	易	>72	7~10	难	68~65
4~7	中等	72~68	>10	很难	<65

根据实测数据计算表明: 两种模型的平均绝对误差分别为 1.403% 与 1.308%, 含氧模型比不含氧模型精度高, 标准误差从 2.116% 下降至 1.706%。因此, 当有煤炭中的含氧量数据时, 应用含氧模型; 缺乏含氧量数据时可用不含氧模型, 它们都可以对煤炭的成浆性作出有一定精度的评价。

这个模型除了可用于帮助选择制浆用煤外, 还可以用来分析判断一种制浆技术的好坏及其问题所在。如果实际制浆浓度低于上述模型标准差的 2 倍时, 就应考虑煤浆的粒度分布或添加剂配方是否有必要改进。如果粒度分布也没有问题, 就需要重新研究添加剂配方。

1.3.1.2 水煤浆成浆性的影响因素

(1) 煤质特性对成浆的影响

对成浆性影响最显著的煤质因素是内含水 M_{inh} 、氧碳比 (O/C 比)、哈氏可磨指数 HGI, 其他影响成浆性的煤质因素是多方面的, 并且它们之间有密切的联系。除此之外, 水煤浆的粒度分布、添加剂的类型和用量、水质、制备条件、温度等都有影响, 但主要是受煤质的影响。煤种不同, 制浆的难易程度有很大的差异。中外学者一致认为: 煤阶越低, 内在水分越高, 煤种 O 和 C 比值越高, 亲水官能团越多, 孔隙越发达, 可磨性指数 HGI 值越小, 煤中所含可溶性高价金属离子越多, 煤的制浆难度越大。

① 内含水 M_{inh} 水煤浆浓度中的水分含量是指水煤浆中的全水分, 包括原煤的外在水分和内在水分。内在水分分布在煤粒的表面上。其分子和煤表面的极性官能团有较强的结合力, 因此, 当煤炭的物质的量浓度相同时, 内在水分高, 则势必减少起流动介质作用的水量, 造成煤浆的表观黏度增高, 或者难于得到高浓度的合格煤浆。

内在水分也称内含水, 它直接影响水煤浆的浓度。通常变质程度低的煤种, 小于 10^{-7}m 的孔隙特别发达, 能吸附大量的游离水, 大大地减少了浆体中自由水的含量, 这样水煤浆的黏度随内含水的增加而明显增大, 难以高浓度化。大量研究表明通常适合高浓度化水煤浆的煤种的内含水应小于 4%。而内含水大于 8% 的煤种成浆浓度一般小于 64%。

起流动介质作用的水, 即自由水含量 W , 可用下列公式求出:

$$W = 100 - c \left(1 + \frac{M_{\max}}{100} \right) \quad (1-4)$$

式中, W 为自由水含量, %; c 为水煤浆 (在常温下剪切速率为 100s^{-1} , 表观黏度为