

971022

水煤浆制浆技术

张荣曾 著

科学出版社

1996

内 容 简 介

本书是水煤浆制备技术方面的专著，系统而全面地介绍了水煤浆燃料的特性、制浆理论和方法、化学添加剂，以及制浆工艺设备，反映了我国10余年来水煤浆制备的研究成果和实践经验。

本书可供水煤浆制备、输送、燃烧和煤炭加工方面的科技人员，以及大专院校相关专业的师生参考。

水煤浆制浆技术

张荣曾 著

责任编辑 杨家福

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

双青印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1996年10月第一版 开本：850×1168 1/32

1996年10月第一次印刷 印张：9 插页：1

印数：1—1500 字数：231 000

ISBN 7-03-005724-4/TB·141

定价：18.00元



江泽民主席在京现场视察煤炭工业部水煤浆新技术

(引自 1996 年 1 月 20 日 CHINA DAILY)

序

水煤浆是国际上 70 年代末发展起来的一种以煤代油的新型煤基洁净燃料。它具有油一样的流动性和良好的稳定性，约两吨水煤浆可取代一吨重油供工业锅炉及窑炉燃用。我国的实践已经表明，燃用水煤浆与燃煤相比，可提高燃烧效率，减少对环境的污染；与燃油相比，可取得显著的经济效益。

我国煤炭资源丰富，以煤代油技术有广泛的应用前景，也是实施我国可持续发展能源战略的必然要求。因此水煤浆技术已受到党和国家领导人的高度重视。

水煤浆技术包括原煤洗选技术、煤炭制浆技术、贮装运技术及洁净燃烧技术等。我国经过 10 余年的研究，技术上已逐步趋于成熟化、配套化和工程化。

张荣曾教授多年来从事水煤浆制浆理论与技术的研究，积累了丰富的经验，为我国水煤浆技术的发展做出了巨大的贡献。这本书是我国第一本系统阐述制浆理论和技术的专著，内容包括煤的结构与性质、制浆用煤及添加剂的选择、粒度分布的优化、磨矿工艺与设备、制浆工艺、水煤浆的流变性及质量检测方法等。我希望这本书的出版将进一步推动水煤浆技术的发展，对从事水煤浆技术的开发和应用的广大科技工作者有所裨益。

范维澄

前 言

水煤浆燃料是 70 年代末出现的煤炭高新技术产品。它具有石油一样的流动性，热值相当于石油的一半，可以代替石油供电站、工业锅炉与工业炉窑燃用。它还是一种煤基洁净燃料，燃用水煤浆比直接燃煤效率高，对环境的污染小，是当今洁净煤技术中的重要组成部分。

化石能源是目前和今后相当长时期内全人类使用的主要能源。石油的使用价值优于煤炭，但石油资源远没有煤炭丰富，所以从合理、有效利用资源的角度出发，应尽量以煤代油，水煤浆正是由此应运而生。最早成功地研制出水煤浆的是瑞典和美国。我国研究水煤浆始于 1982 年，该项目已列为国家重点科技攻关项目，得到国家科委、计委、经委与煤炭工业部的关怀与大力扶植。

我国是一个煤多油少的国家，发展水煤浆具有重要的意义。1996 年 1 月 19 日，中共中央总书记、国家主席江泽民同志亲自考察了水煤浆技术，对我国水煤浆技术取得的进展表示赞扬，指示要从战略高度来认识它的重要性。由此可见，该项技术在我国必将得到长足的发展。

水煤浆的制造技术涉及学科面广，包括煤炭结构和性质、矿物加工、胶体与表面化学、有机高分子化学、粉体工程、流变学等许多方面。目前还缺乏一本系统阐明其技术的专著。为了适应我国水煤浆工业发展的需要，满足广大读者的需求，作者在 10 余年研究工作的基础上，对水煤浆的制备技术进行了初步总结，并编写成此书。制浆技术在不断发展，书中涉及的许多理论问题尚处于探讨阶段，故错误或欠妥之处在所难免，希望广大读者批评指正。

本书的问世得到原煤炭工业部副部长范维唐院士以及王淀佐

院士、宋振琪院士、陈清如院士、岑可法院士的鼓励和帮助。中国矿业大学各级领导，特别是副校长、北京研究生部主任谢和平教授，国家水煤浆工程技术研究中心主任詹隆高级工程师（教授级），给予了热忱的关怀与指导。编写过程中王祖讷教授以及作者所在教研室的同事们给予了多方支持，并对稿件提出了许多宝贵意见。我的历届学生所进行的研究工作是本书形成的基础，在此次编写过程中他们又协助作者做了大量的工作。原煤炭工业部副总工程师郝凤印高级工程师（教授级）在领导水煤浆攻关期间，对我们的工作也给予了很大的帮助。对领导和同志们的大力支持与帮助在此一并致谢。

我的妻子程子颖高级工程师，参与国家攻关项目——水煤浆制备与燃烧技术多年，并且10多年如一日地对我的科研工作给予了充分的理解和支持，使我全身心地投入水煤浆的研究开发和本书的编写工作，谨以此书对她表示回报。

张荣曾

1996年8月于北京

目 录

第一章 绪言	1
1.1 煤浆代油燃料的演变	1
1.2 中国发展水煤浆燃料的重要性.....	3
1.3 中国发展水煤浆燃料的历程	4
1.4 水煤浆的质量要求与制浆技术概要	6
参考文献	9
第二章 制浆用煤的选择	11
2.1 燃烧用户对煤质的要求	11
2.2 煤炭成浆性模型及判别指标	12
参考文献	29
第三章 水煤浆的粒度分布	30
3.1 标准筛孔径的标定	30
3.2 粗粒筛分与细粒分析资料的合并	32
3.3 现有堆积理论	34
3.3.1 等径颗粒的堆积	35
3.3.2 多种离散粒径颗粒的堆积	37
3.3.3 连续分布颗粒的堆积	39
3.4 隔层堆积理论	40
3.4.1 Gaudin-Schubmann 及 Alfred 粒度分布	41
3.4.2 Rosin-Rammler 粒度分布	43
3.5 隔层堆积计算机模型的应用	45
3.5.1 分析改进制浆效果的途径	45
3.5.2 为制备高浓度水煤浆选定给料	47
3.5.3 双峰与多峰级配技术	48
3.5.4 指导生产调试	49
3.6 评价粒度分布的其他方法	51

参考文献	53
第四章 磨矿工艺与设备	56
4.1 球磨机中磨介运动的散体理论	56
4.1.1 磨介运动的三个阶段	59
4.1.2 第一阶段磨介层的偏转角 γ	60
4.1.3 第二阶段磨介的滑行与滑行的偏转角 τ	61
4.1.4 泻落与抛落运动	63
4.1.5 实验现象的散体理论解释	64
4.2 球磨机有用功率的分层算法	65
4.2.1 纯泻落运动部分的功耗	67
4.2.2 纯抛落运动部分的功耗	68
4.2.3 三相混合运动部分的功耗	70
4.2.4 功耗理论计算与实验数据	73
4.3 球磨机能力计算方法	77
4.3.1 由磨机功耗计算能力的方法	77
4.3.2 工业磨机功耗及能力计算与实测	78
4.4 制浆球磨机工况的选择	80
4.4.1 磨机给料的破碎	80
4.4.2 球磨机装球率	82
4.4.3 球磨机的转速率	84
4.4.4 磨矿浓度	87
4.4.5 磨介的选择与合理配球	92
4.5 制浆用振动磨机	96
4.5.1 振动磨机磨矿作用分析与振动强度的选择	97
4.5.2 振动磨机结构的选型	103
4.5.3 激振系统的设计	105
4.5.4 共振的预防	108
4.5.5 振动磨机与球磨机制浆性能的比较	109
4.6 磨矿过程的数学模型	111
4.6.1 改进的矩阵磨矿模型	111

4.6.2 磨矿数学模型的应用	114
参考文献	119
第五章 水煤浆制浆工艺	121
5.1 制浆工艺的主要环节及功能	121
5.2 干法制浆工艺	122
5.3 干、湿法联合制浆工艺	124
5.4 高浓度磨矿制浆工艺	124
5.5 中浓度磨矿制浆工艺	125
5.6 高、中浓度磨矿级配制浆工艺之一	127
5.7 高、中浓度磨矿级配制浆工艺之二	128
5.8 高、中浓度磨矿级配制浆工艺之三	132
5.9 结合选煤的制浆工艺	133
5.10 制浆工艺的优化	135
参考文献	139
第六章 水煤浆添加剂	141
6.1 分散剂的作用机理	142
6.1.1 润湿分散作用	143
6.1.2 静电斥力分散作用	150
6.1.3 空间位阻与熵斥力分散作用	154
6.2 水煤浆分散剂	156
6.3 水煤浆稳定剂	157
6.4 其他辅助添加剂	158
参考文献	159
第七章 水煤浆的流变性	160
7.1 流体的流变性	160
7.2 水煤浆流变特性的测试方法	164
7.2.1 同轴圆筒旋转流变仪	164
7.2.2 圆筒旋转流变仪测试非牛顿流体的解法	171
7.2.3 Krieger-Marom 修正剪切速率的方法	174
7.2.4 修正剪切速率的方法	176
7.2.5 HAAKE 的代表半径算法	181
7.2.6 作者对代表半径算法的研究	183

7.2.7	水煤浆屈服应力的测试方法	185
7.3	水煤浆的流变性对稳定性的影响	187
7.4	剪切对水煤浆流变性的影响	193
	参考文献	199
第八章	水煤浆搅拌混合与剪切	201
8.1	搅拌过程	201
8.2	搅拌桶中的涡旋运动	203
8.2.1	自由涡、强制涡与复合涡	204
8.2.2	涡旋内的压力分布	206
8.2.3	涡旋等压面形状	208
8.2.4	自由涡与强制涡的分界半径	210
8.3	搅拌桶内结构与流体的流态	212
8.3.1	叶轮直径与安装位置	213
8.3.2	搅拌桶内设挡板	214
8.3.3	搅拌中的平均剪切速率与表观粘度	215
8.3.4	非牛顿流体的临界搅拌条件	216
8.4	搅拌过程动力学与混匀时间的确定	217
8.5	搅拌过程的相似放大与功率计算	221
8.5.1	搅拌过程的相似与相似准数	221
8.5.2	搅拌牛顿流体时的功率计算	223
8.5.3	搅拌水煤浆时的功率计算	224
8.5.4	搅拌的相似放大	227
	参考文献	234
第九章	水煤浆在管道中的流动特性	235
9.1	牛顿流体在管道中的流动	236
9.2	宾汉流体在管道中的流动	240
9.3	幂定律流体在管道中的流动	245
9.4	屈服幂定律流体在管道中的流动	246
9.5	不依赖流变模型的 M-R 普遍解法	248
9.6	高浓度水煤浆管道流阻的解法	251
	参考文献	261

第十章 水煤浆质量检测方法	263
10.1 水煤浆浓度的检测方法	263
10.2 水煤浆视密度的检测方法	264
10.3 水煤浆的粒度分布的检测方法	265
10.4 水煤浆流变性的检测方法	269
10.5 水煤浆静稳定性的检测方法	273
参考文献	276

第一章 绪 论

1.1 煤浆代油燃料的演变

由于 70 年代的石油危机给以石油为主要能源的西方各国以很大冲击,人们纷纷研究以煤代油的策略^[4,10]。煤炭本来就是一种重要的能源,可以直接燃用,然而由于这种固体燃料在燃烧、贮存、输送和对环境的污染等方面都不如石油和天然气,所以急需寻找一种流体煤基燃料。煤炭的气化与液化虽然已有成熟的技术,但投资大,成本高,难以普遍推广,因而人们把注意力转向物理加工的煤浆燃料技术。

最初研制的是一种煤油混合物 COM——油煤浆燃料^[4,10],COM 是英文名称 Coal Oil Mixtuer 的缩写。它由大约 49% 的固体煤(<200 目的占 85%)与油混合而成,其中包含有 2~4% 的煤中内在水分与 0.15~0.20% 的化学添加剂。在 70℃ 温度时,其粘度为 1700~2200 厘泊(1 泊=0.1 帕秒),热值取决于煤炭与油的质量,但其 65% 左右的热值仍然来自油。最早研制 COM 的是美国(1973~1974),日本(1976)、中国(1979)、韩国(1984)等国也先后进行了该项研制。真正实现了商业化生产的是日本。日本于 1980~1982 年先后在东京电力公司(TEPCO)横须贺火电厂 1、2 号机组(各 265 兆瓦)及 Sumitomo 公司高炉上试烧成功^[5,14]。1981 年 4 月组建了日本 COM 公司,它是东京电力 TEPCO 的子公司,TEPCO 拥有 51% 的股权。1984 年建成两条能力各 70 吨/时 COM 生产线,一直正常生产至今。每年提供 60~70 万吨 COM 供横须贺电厂燃用。韩国只是在 1984 年建立了一个 120 吨/时 COM 试生产线,生产了 5000 吨 COM,在一台 20 蒸吨/时工业锅炉上进行了试烧。我国最早研制 COM 的单位是中国科学院所属研究所。

1980年完成实验室试验,并在浙江大学100kg/H燃烧试验台架上试烧成功。1981年在鞍钢100蒸吨/时电站燃油锅炉上进行油煤浆制备与燃烧中试。所制的COM含煤45%,除煤中所含内在水分外未加水,也未使用添加剂。在80℃温度下油煤浆的表观粘度为2900毫帕秒。1983年试烧成功后通过了国家鉴定。

由于油煤浆中的煤含量最高只能达50%,使用油煤浆代油只能用煤取代油耗的35%。随着科技进步,1979~1981年^[4,10]瑞典的胶体碳(Carbogel)公司、美国的大西洋公司(ARC)、煤浆技术集团及西方石油公司(ORC)率先研制成功一种完全不依赖油的新型代油煤浆燃料水煤浆CWM,又称CWF。水煤浆含煤约70%,添加剂约1%,其余为水,在常温下粘度为1000~1500毫帕秒,可以像油一样泵送、雾化、贮存和稳定着火燃烧,其热值相当燃料油的一半。水煤浆制备工艺并不复杂,但技术含量高,当时只有美国和瑞典两国掌握。它给问世不久尚未推广的油煤浆以沉重打击,世界各国从而纷纷转向研究水煤浆的制备与燃烧技术。

1985年底,国际石油价格猛跌,给煤浆代油活动以沉重打击。美国、瑞典等西方国家放慢甚至停顿了水煤浆商业化步伐。但是从资源来看,石油资源有限,而煤炭资源丰富得多。据统计,至1990年世界石油已探明储量为1431亿吨,仅够世界消费34年。有识之士都认为石油价格肯定会再度上扬,以煤代油的趋向是不会改变的,许多国家把它作为一项储备技术继续开发、完善。日本、意大利、中国与前苏联都正是在国际油价格低谷的1986年以后,加速了水煤浆代油的工业化步伐。意大利已建成50万吨/年制浆厂;前苏联1989年建成了世界上最大的400万吨/年制浆厂,经260公里管道运输,供六台20万千瓦电站燃用^[17]。日本1981年组建COM公司的同时,就开始了水煤浆的研究工作。最初日本是从美国和瑞典引进技术,后来发展为五大集团即:F-Coal、COM、日挥、电源开发及宇部兴产并行分别进行开发。在1984年COM公司的油煤浆生产线投产半年后,COM公司就着手在东京电力勿来电站建设两条能力各15吨/时水煤浆生产线,从1985年8月至

1986年3月,在勿来电站4号机组(7.5万千瓦,260蒸吨/时)上进行了连续燃烧水煤浆试验,并取得圆满成功,燃烧效率高达99%,负荷从3万千瓦至7.5万千瓦均能稳定着火燃烧。接着又在8号机组(60万千瓦,1940蒸吨/时)上进行水煤浆与油混烧的长期工业应用。其中水煤浆燃烧器为11吨/时。一直燃用至今,截止1991年底,烧浆约30万吨。1993年6月,新建的50万吨/年水煤浆厂投产。

除COM与CWF外,还出现过甲醇煤浆CCS与油水煤浆COW。CCS可视为水煤浆的一种改进,它是用甲醇的水溶液(水与甲醇的比例为1.5:1)取代水,与煤制成的浆体燃料。优点是热值比常规水煤浆高,而且易着火燃烧。虽然这可以不用油,但甲醇比重油更贵。对于不得不用低挥发分煤(如无烟煤,贫煤)制代油用煤浆时,它才方可显示其优越性。COW可视为油煤浆的一个变种。与油煤浆相比,其中含煤量并没有提高,也在40~50%之间,只是分散介质由油变成了油在水中的超声乳化液。它比油煤浆的热值低,粘度也可相应降低。由于其中煤含量与油煤浆相近,又多含有10~30%的水,其代油效率比油煤浆还低。然而,这两种煤浆燃料并未受到普遍重视和推广。

1.2 中国发展水煤浆燃料的重要性

水煤浆不但是—种代油燃料,而且用于代煤还有节能和保护环境的效益,在我国有重要的现实意义^[3,6]。这是因为:

(1) 我国煤炭资源十分丰富,已探明贮量就有1 000亿吨,而石油则相对短缺。1995年我国煤产量超过12亿吨,石油是1.46亿吨。石油有许多宝贵的用途,把它当燃料烧掉太可惜,但是目前全国每年的烧油量仍为3 000多万吨,占石油产量的1/5。由此可见,发展水煤浆代油对我国能源资源的合理利用有重要意义。

(2) 煤炭利用给环境带来的污染已成为全球关注的热点。我国既是产煤大国,也是煤炭消费大国,在一次能源生产与消费结构

中,煤炭的比重分别为 73%与 76%。洁净煤技术是我国科技攻关中的一个重大项目,水煤浆是洁净煤技术的重要分支^[7,8,9],它的生产、贮运过程都是封闭式的,既可减少损失又不污染环境,与煤相比具有燃烧效率高、节能和环境效益好等优点。桂林钢厂以水煤浆代煤粉燃烧,烟尘排放由 732 毫克/米³降至 240 毫克/米³,致癌的 NO_x 含量也有大幅度的下降。此外,由于烧水煤浆比烧煤的工艺性好,还节煤 33%,钢材烧损率由 1.8%降至 1.5%。所以水煤浆技术不仅可用于代油,用于代煤也有节能和环境效益的优点。

3. 我国煤炭资源分布集中在“三西”,即山西、陕西及内蒙西部。目前有 63%的煤炭要从“三西”调出,长期存在北煤南运、西煤东调的格局。铁路运力不足已成为制约煤炭生产与国民经济发展的的重要因素。煤炭的管道运输投资少,建设周期短,营运费低,为全密闭输送,不污染环境,是解决我国煤炭运力不足的重要运输方式,必将大力发展。早期的管道输煤用水和煤的比例是 1:1,运到终端后还要脱水,留下大量的煤泥水要处理。如果制成高浓度水煤浆用管道输送,比常规的管道输煤就有很多优越性,到达终端无需脱水即可燃用,而且可长期密闭贮存。所以,发展高浓度水煤浆技术,为管道输煤提供了有利条件。

1988 年底我国制定的能源工业中期发展计划纲要中明确指出^[3]:要“继续抓好电站锅炉和工业窑炉中的煤代油工作,研究水煤浆制作,输送和燃烧技术,逐步实现水煤浆代替石油燃烧”,并指出要“发展管道输煤,输送水煤浆”。

此外,利用矿区煤泥制浆就地燃用,既可提高煤炭资源利用率,增加煤炭企业的经济效益,又可改善环境,减少污染。我国现有约 1000 万吨这种煤泥,在矿区发展该项技术也有较好的市场前景。

1.3 中国发展水煤浆燃料的历程

中国研制水煤浆始于 1982 年。1983 年 1 月,国家科委将“水

煤浆制备与燃烧技术”正式列为国家“六五”攻关项目^[6,11,12,13,15]。水煤浆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。在国家科委、计委和煤炭部的关怀和指导下,“六五”攻关进展很快。1983年5月,中国矿业大学北京研究生部制备的“大同水煤浆”首次在我国浙江大学200公斤/时试验台架上试烧成功。1984年2月,第二次制备的4吨“抚顺及恩口水煤浆”运往浙大再次试烧成功,质量达到当时的国际标准,提前完成了“六五”规定的实验室技术开发任务,进而要求尽快进行工业规模试烧。1984年8月,中国矿业大学北京研究生部在实验室制备的70吨水煤浆在北京造纸一厂的20蒸吨/时工业锅炉上代油燃烧成功。与此同时,由中国矿业大学北京研究生部提供技术并负责调试与人员培训,先后在抚顺矿、八一矿建成了能力各为3万吨/年与2万吨/年的简易制浆厂。

进入“七五”后,该项目得到了国家进一步的支持^[6]。在国家攻关组的基础上,组建了“华煤水煤浆技术联合中心”,扩大了攻关队伍,吸收了煤炭部所属两个工程设计院、煤炭科学总院唐山分院管道所、两个制浆厂、两个添加剂生产厂及有关燃烧试验厂参加。中国科学院有关单位也参加联合攻关,主要是承担燃烧方面的任务。“七五”攻关的重点是扩大水煤浆工业应用试烧的规模和应用范围,从而为进一步发展水煤浆取得了经验和依据。在制浆方面,改、扩建了抚顺、八一两个制浆厂,使能力分别提高到年产7万吨与5万吨,建成了能力分别为1000吨/年与500吨/年的北京、淮南两个添加剂生产厂,从而为扩大水煤浆工业试烧提供了批量的合格水煤浆。为了借鉴国际同行的经验,在此期间还建设了中、日合资25万吨/年的究日制浆厂,还引进瑞典Fluidcarbon技术和Sala设备建设了25万吨/年北京制浆厂。在燃烧方面,改造了北京造纸厂60蒸吨/时及北京印染厂15蒸吨/时燃油工业锅炉,并在轧钢加热炉、锻造加热炉、陶瓷炉窑上以水煤浆代煤、代油取得良好的节能与环境效益。中国水煤浆的进展引起了国际社会的重视,得到联

合国工发署及意大利世界实验室项目的资助。

“八五”期间,水煤浆攻关由新成立的“国家水煤浆工程技术研究中心”领导^[6],在中国矿业大学北京研究生部组建了“制浆技术研究所”。“八五”的任务是进行大规模制浆与电站燃用水煤浆工业示范。制浆技术研究所的任务是:与设计院合作,将八一制浆厂扩建到能力 25 万吨/年,并开发相应的工艺、大型专用设备及添加剂生产技术。

中共中央总书记、国家主席江泽民于 1996 年 1 月 19 日来中国矿业大学考察了水煤浆科技开发工作^[1,2],指示要把水煤浆技术作为一个战略问题来考虑。并指出煤炭是我国的主要能源,希望煤炭部继续加强对水煤浆和煤炭液化等技术开发工作的领导,同时希望国务院和有关部委给予更大的关心和支持。由此可见,党和国家对发展以煤代油的技术非常重视。“九五”期间,水煤浆仍将作为国家重点项目开发与推广。

除替代燃料油的常规水煤浆外,“八五”期间中国矿业大学还开发了一种精细水煤浆,它的灰分低($<1\%$),粒度细(<10 微米),能用于柴油机与燃气轮机上替代柴油。

1.4 水煤浆的质量要求与制浆技术概要

水煤浆和一般的煤水混合物(如煤泥水)不同,是一种燃料,所以对它的质量有如下一些特殊要求:

(1) 水煤浆中煤炭的细度。

从有利于燃烧的角度出发,要求其中煤炭的粒度上限(通过率 $\geq 98\%$ 的粒度)不大于 300 微米,小于 200 网目(74 微米)含量不低于 75%。这种细度要求与煤粉电站锅炉燃用的煤粉细度相当。

(2) 水煤浆中的煤含量——浓度。

作为燃料,应尽可能减少其中的水含量。通常要求其中含煤的重量百分数(即水煤浆的浓度)大于 60%。水煤浆产品的实际浓度与煤炭的质量、制浆技术及用户的需求有关,最一般的标准是