

Theory and Application of Combustion, Flow,
Heat Transfer, Gasification of Coal Slurry

煤浆燃烧、流动、传热和
气化的理论与应用技术

岑可法 姚 强 曹欣玉
赵 翔 黄镇宇 周俊虎 著
刘建忠 任建兴 方梦祥

浙江大学出版社

煤浆燃烧、流动、传热和气化的理论与应用技术

岑可法 姚 强 曹欣玉
赵 翔 黄镇宇 周俊虎 著
刘建忠 任建兴 方梦祥

江苏工业学院图书馆
藏书章

浙江大学出版社

103557

内容简介

本书系统地阐述了煤浆燃料在管内流动、传热及在锅炉内燃烧、气化的原理,计算方法及工程应用技术。

全书共十七章。第一、二章讨论煤浆的物理、化学特性及流变特性,第三、四章研究煤浆在管内的流动特性、计算方法及沉降特性,第五章讨论煤浆在炉前的贮存系统,第六章研究煤浆在管内流动时的传热理论,第七章研究单滴煤浆的燃烧机理,第八、九章研究煤浆喷嘴和燃烧器的设计及计算方法,第十、十一章探讨了煤浆火炬在炉内的燃烧过程及数学模型,第十二、十三和十四章分别讨论了改烧煤浆时的改炉技术及现有煤浆低污染燃烧新技术,第十五章讨论水煤浆气化技术,第十六章讨论煤浆燃烧的试验方法和测量技术,第十七章讨论煤浆在工业各领域的应用及发展前景。

书中汇集了作者多年来在该领域内的研究成果,特别是总结了煤浆技术国家“六五”、“七五”、“八五”重大科技攻关项目及国家自然科学基金项目研究结果。同时还介绍了在国内工业性生产中推广应用情况,及国外近年来最新试验研究资料,使本书在理论与工程应用相结合方面具有极高的实用价值。

本书可供在煤炭、电力、动力、化工、冶金、石油、建材、轻工、环保等领域内从事锅炉、煤燃烧、流体输送、传热等研究及设计的科技人员参考,也可作为高等院校热能工程、工程热物理、煤化学等专业的研究生和本科生的教学参考书。

116-28-36

煤浆燃烧、流动、传热和气化的理论与应用技术

岑可法 姚 强 曹欣玉
赵 翔 黄镇宇 周俊虎 著
刘建忠 任建兴 方梦祥
责任编辑 李桂云

* * *

浙江大学出版社出版
(杭州玉古路 20 号 邮政编码 310027)
浙江大学出版社电脑排版中心排版
杭州金融管理干部学院印刷厂印刷
浙江省新华书店经销

* * *

787×1092 16 开 68.25 印张 1748 千字
1997 年 10 月第 1 版 1997 年 10 月第 1 次印刷
印数 0001--1600

ISBN 7-308-01837-7/TK·006 定价:90.00 元

前 言

我国能源以烧煤炭为主,煤炭内含有较多的灰份、硫份,燃烧利用后会排放出不少的飘尘、二氧化硫、氮氧化物等,引起大气污染,形成严重的环境问题。因此,寻求一种新型的煤基洁净燃料,以供国民经济各行各业燃烧应用的需要,乃是当务之急的重大课题。煤浆作为一种低污染、高效率、流动性强的代油新型清洁燃料就在这样的背景下,近年来在国际上得到迅速的发展。所谓煤浆就是由煤、水(或油、甲醇等)和少量添加剂按一定比例组成,通过物理加工处理,制成类似油一样的新型洁净流体燃料。煤浆具备像燃料油那样易于装、贮、管道输送及雾化燃烧等特点。

煤浆技术的应用将使我国煤炭的品质、运输、工业应用、环境效益发生根本性的改革。首先煤炭的洗选与制浆相结合,使煤浆变成低灰、低硫、高品位的燃料。其次,在矿区制备好的煤浆可以不用传统的火车运输方式,而用封闭式、低损耗、洁净化的管道运输方式运向工业用户,使用户能得到稳定的、高质量的燃料供应,同时又能大幅度降低运输的投资与运行成本以及煤炭的运输损耗。再者,用户能得到的易贮存、能泵送、无需在厂房内布置煤粉制备系统的洁净燃料,大大改善了环境,降低了投资及使用成本。由此可见,煤浆技术的推广应用具有重大的技术经济效益和社会意义。更鉴于世界石油资源日趋减少,并主要用于化学工业和交通运输工业。因此,国际上如美国、日本、俄罗斯、意大利、瑞典等发达国家近 20 年来相继投入大量的人力、物力开展新型煤浆燃料的研究,并已达到大型工业化和商业化的应用阶段,而且每年均召开一次国际煤浆应用技术会议,至 1996 年已召开了 21 届。

浙江大学是我国最早研究煤浆燃烧技术的单位,在 1978 年开始在国家计委和中国科学院组织领导下,开展了油煤浆技术的研究,并在鞍钢电厂 100t/h 锅炉上加以实现,通过了国家鉴定。1981 年 3 月浙江大学向国家科委、科学院、煤炭部建议开展水煤浆代油燃料的研究,之后由国家科委和煤炭部分别列入国家“六五”、“七五”、“八五”科技攻关项目,并成立了国家水煤浆工程技术研究中心及华煤水煤浆技术联合中心,使我国的制浆技术、管道输送技术,煤浆燃烧技术以及工业应用技术联成一体,从而使得煤浆的研究和利用得到蓬勃的发展。由于这是一项新的技术,是物理化学、多相流体力学、燃烧学、传热学、机械学、材料科学等交叉学科相关的技术,目前,虽有大量刊登在杂志上的论文和每年召开的国际会议论文集,但国际上尚无一本全面、系统论述煤浆流动与燃烧方面的专著,因此作者在多年前就计划根据国内外有关资料及浙江大学 10 多年的研究心得编写一本这方面的专著,以作为国内煤浆技术推广时的参考,为此多年前已将部分章节写成讲义,多次在研究生课程上讲授和修改,并结合博士生及硕士研究生的学位论文加以深入研究,经多年努力,逐渐形成本专著。全书共分十七章,第一、二章讨论煤浆的物理、化学特性及流变特性;第三、四章专门研究煤浆在管内的流动特性及沉降特性,探讨其在管内流动的计算方法;第五章是专门讨论煤浆在炉前的贮存系统,为工业设计提供依据;第六章是专门研究煤浆在管内流动时的传热理论,为加热系统提供计算方法;第七章是研究单滴煤浆的燃烧机理,为煤浆应用打下理论基础;第八、九章分别研究了煤浆喷嘴

和燃烧器的设计方法,为工业应用提供保证;第十、十一章分别探讨了煤浆火炬在炉内的燃烧过程及其数学模型,是综合多年来的研究结果所得;第十二、十三、十四章分别讨论了改烧煤浆时的改炉技术以及现有的水煤浆低污染燃烧新技术;第十五章专门讨论水煤浆气化技术,供我国发展煤化工及燃烧联合循环之用;第十六章专门讨论煤浆燃烧的试验方法和测量技术,以供工程现场调试之用;第十七章讨论了煤浆在工业各领域的应用及发展前景。

本书由岑可法教授主著及统稿,由岑可法、姚强、曹欣玉、赵翔、黄镇宇、周俊虎、刘建忠、任建兴、方梦祥共同撰写。其中第一章、十二章由曹欣玉撰写,第二章、第三章、第四章、第六章、第十三章由岑可法、姚强共同撰写;第五章由岑可法、刘建忠共同撰写;第七章由赵翔撰写;第八章由黄镇宇和任建兴共同撰写;第九章、第十四章由姚强撰写,第十章、十一章由姚强、岑可法共同撰写;第十五章由方梦祥撰写;第十六章由周俊虎撰写;第十七章由曹欣玉、刘建忠共同撰写。我们在撰写过程中引用了浙江大学同事们及研究生们的大量研究资料,并得到他们的许多帮助,为此作者要感谢吴晓蓉、葛林甫、谢名湖、吕德寿、冯国华、凌柏林、池作和、沈珞婵、陆重庆、涂建华、倪明江、严建华、骆仲泱、池勇、洪积渝、陈建荣、徐幸、陈国顺、郑启权、施小华、范浩杰、冯元群、朱珍锦、潘卫国、蒋啸、陈玲红等。同时,我们还要感谢国家水煤浆工程技术研究中心及华煤水煤浆技术联合中心的郝凤印及詹隆、陈凤英、王秀月、薛继先、任秀芬、马大健、陆华良等;北京造纸一厂吴朝强、志雄、李秀民;煤炭部北京规划设计院汪景武、徐永田、张朴,国务院压油办林毓森、马学昆,国家科委石定圉、杨启文、张国城、陈硕翼;华能电力公司俞国绥、胡跃菊、周涛。抚顺矿务局张占栋;枣庄八一制浆厂李树梓;山东白杨河电厂傅勤、魏建国、孙德强、岳同灿、高岳军、黄立强;胜利油田唐翼石、吴柳燕、高明仁等。没有他们的合作和帮助作者是不可能完成现场试验及数据采集任务的。这里要特别感谢郝凤印教授,不但主审了本书,并且长期来一直领导,组织水煤浆的研究和推广工作,鼓励我们写成专著,并长期来领导我们在工业现场进行水煤浆试验。最后我们还要感谢国家科委安排了水煤浆“六五”、“七五”、“八五”科技攻关任务,所取得的部分研究成果已反映在本书中。对本书的成稿,浙江大学出版社李桂云做了大量细微的工作,没有她的鼓励和支持,没有她的精心策划和组织编写一套燃烧丛书,我们是很难完成本书的编著的。

我们深知,水煤浆是一种新开发的洁净新型燃料,国际上也是近年来才开展研究,尽管我们在撰写本书时尽可能理论结合实际,但由于很多问题尚处于发展及研究阶段,限于我们的水平,错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者 1994 年 10 月于浙江大学求是园

目 录

第一章 新型流态代油燃料煤浆的基本特性	1
1.1 研究煤浆应用技术的意义	1
1.1.1 我国能源发展的现状及其存在的主要问题	1
1.1.2 煤浆的种类	2
1.1.3 发展水煤浆技术的意义	2
1.1.4 发展水煤浆燃烧技术需要研究的关键问题	3
1.2 煤浆的制备原理	4
1.2.1 油煤浆的制备原理	4
1.2.2 水煤浆的制备流程	7
1.2.3 水煤浆添加剂	11
1.3 水煤浆的燃料特性	13
1.3.1 水煤浆的燃烧特性	13
1.3.2 煤浆的浓度	14
1.3.3 煤浆的密度	14
1.3.4 煤浆的粘度	14
1.3.5 煤浆的比热	15
1.3.6 煤浆的导热系数	15
1.4 新型液态燃料——煤浆在世界各国的发展	15
1.4.1 水煤浆技术发展简史	15
1.4.2 世界主要国家发展水煤浆的概况	16
1.4.3 我国开展水煤浆研究及应用情况	20
1.4.4 水煤浆的应用领域	21
第二章 煤浆的流变特性	24
2.1 非牛顿流体的类型	24
2.1.1 与时间无关的粘性流体	26
2.1.2 与时间有关的粘性流体	28
2.2 煤浆的流变特性	29
2.2.1 油煤浆的流变特性	30
2.2.2 水煤浆的流变特性	37
2.3 煤粉浓度和颗粒度分布对煤浆流变特性的影响	45
2.3.1 煤粉的堆积和级配理论	45
2.3.2 颗粒双峰分布制备水煤浆原理及其流变特性	50
2.3.3 颗粒多峰分布制备水煤浆原理及其流变特性	55
2.3.4 煤浆浓度对流变特性的影响	60

2.4 煤浆的粘度特性	67
2.4.1 粘度	67
2.4.2 表观粘度	68
2.4.3 影响煤浆粘度的各种因素	69
第三章 煤浆流动的理论及计算	80
3.1 描述煤浆流动的微分方程式及其流动工况的决定	80
3.1.1 煤浆流动的微分方程	80
3.1.2 煤浆流动工况的确定	83
3.2 煤浆在管内的层流稳定流动原理	89
3.2.1 用表观粘度计算的煤浆燃料在管内层流流动	89
3.2.2 非牛顿流体在圆管内稳态流动的通用方程	93
3.2.3 服从宾汉型流体的煤浆层流流动计算	96
3.2.4 服从拟塑性流体的煤浆层流流动计算	98
3.2.5 服从屈服—假塑性流体的煤浆层流流动计算	101
3.2.6 水煤浆在管壁的滑移现象	102
3.3 煤浆在圆管起始段内的流动过程	104
3.3.1 在起始段内流动的理论分析	104
3.3.2 起始段的长度及其流阻计算	109
3.3.3 煤浆燃料在起始段的流动	112
3.3.4 起始段中的颗粒迁移运动	116
3.4 阀门打开时,煤浆不稳定流动过程流动的计算	118
3.4.1 理论分析	118
3.4.2 阀门突然打开时,水煤浆在管内不稳定流动的计算	121
3.5 煤浆燃料在管内的脉动流动分析	122
3.5.1 理论分析	122
3.5.2 煤浆在管内脉动流动时的计算	125
3.6 煤浆在管内层流流动时的阻力计算	126
3.6.1 牛顿流体层流流动时的阻力系数	127
3.6.2 非牛顿型煤浆流体层流流动时的阻力系数	128
3.6.3 煤浆输送阻力与各有关参数的关系	132
3.6.4 煤浆在等温和不等温工况下输送阻力计算	134
3.7 煤浆在管内湍流流动过程及计算	135
3.7.1 牛顿型流体在管内湍流流动时的计算	136
3.7.2 煤浆在管内湍流流动过程	139
3.7.3 煤浆湍流流动时流动阻力的计算	142
3.8 测量煤浆粘度和流变特性的流体动力理论基础	144
3.8.1 利用流体力学原理对测量流变特性方法的分类	144
3.8.2 旋转式粘度计的流体动力理论基础	145
3.8.3 根据管道流阻测量煤浆流变特性的原理	151
3.8.4 两种方法测量煤浆流变特性的结果比较	155

3.9 煤浆在管内输送的若干问题讨论	157
3.9.1 煤浆输送用泵的形式	157
3.9.2 煤浆管道输送过程中若干问题	165
第四章 煤浆流动过程中煤粉的运动与沉降	169
4.1 煤粉运动及沉降的微分方程组	169
4.1.1 以应力分量表示的运动微分方程式(Navior-Stokes 方程)	169
4.1.2 以速度分量表示的运动方程式(球坐标)	170
4.1.3 以旋涡和流函数表达的运动微分方程式(Helmoltz 公式)	170
4.2 高粘度煤浆中的煤粉流动与沉降阻力系数	173
4.2.1 煤粒在低雷诺数下运动及沉降时的阻力系数	173
4.2.2 煤粒在非牛顿型煤浆内运动及沉降时阻力系数的计算	176
4.2.3 煤浆中存在有气泡或液滴时阻力系数的计算	182
4.2.4 煤粒形状系数对阻力系数的影响	184
4.3 煤浆不稳定运动时煤粉的运动与沉降	187
4.4 煤浆中煤粉浓度对运动及沉降的影响	190
4.4.1 煤粉浓度对运动及沉降影响的计算	190
4.4.2 煤粉浓度对煤浆沉降的影响	194
4.5 壁面效应对煤浆中煤粉运动及沉降的影响	198
4.5.1 考虑壁面影响的球形颗粒群运动规律	199
4.5.2 考虑壁面影响时任意形状煤粒群的沉降规律	200
4.5.3 壁面的存在对球形颗粒阻力系数的影响	201
4.6 煤浆容器内煤粉沉降的近似计算方法	203
4.6.1 计算公式及结果	203
4.6.2 COM 沉降的试验研究	206
4.7 煤浆在管内的流动工况及其不沉淀的临界速度	207
4.7.1 煤浆体流动的类型	207
4.7.2 临界流速的定义	208
4.7.3 系统中各种参数变化对浆体悬浮的影响	209
4.7.4 煤浆系统的淤积流速的确定	211
4.7.5 煤粉在管内流动的不沉淀临界速度的确定	216
第五章 煤浆炉前储存搅拌及过滤的原理	224
5.1 机械搅拌与混合	224
5.1.1 搅拌器的形式与流场特性	224
5.1.2 搅拌桶的结构及挡板作用	228
5.1.3 搅拌器在层流域的混合特性	229
5.1.4 煤浆燃料炉前搅拌实例分析	231
5.2 搅拌过程中煤浆浓度变化的问题	233
5.2.1 搅拌均匀性研究	233
5.2.2 输出煤浆浓度变化的研究与计算	239

5.3 搅拌器的功率计算	243
5.3.1 牛顿流体的搅拌功率	243
5.3.2 牛顿悬浮液的搅拌功率	246
5.3.3 非牛顿流体的搅拌功率	247
5.3.4 煤浆搅拌功率的计算和实验	250
5.4 煤浆搅拌制备时的加热和冷却	253
5.4.1 不稳态加热温度和加热时间的计算	253
5.4.2 搅拌桶内传热系数的确定	255
5.4.3 搅拌桶内盘管加热煤浆的传热试验	258
5.4.4 煤浆混合燃料搅拌实例计算	261
5.5 搅拌装置的放大设计	264
5.5.1 相似理论的放大原则	264
5.5.2 煤浆混合燃料搅拌装置的放大设计	265
5.5.3 放大时对传热问题的考虑	266
5.6 煤浆炉前在线过滤器的原理及设计	267
5.6.1 炉前在线过滤器的必要性	267
5.6.2 炉前过滤器的设计原则	269
5.6.3 炉前过滤器的试验	272
5.6.4 炉前在线过滤器的工业试验	275
第六章 煤浆管内流动加热时的传热理论基础	280
6.1 计算煤浆流动传热的微分方程组	280
6.1.1 描述牛顿型流体热交换时的微分方程组	280
6.1.2 描述非牛顿型流体热交换时的微分方程组	282
6.1.3 放热系数与平均温度的确定	283
6.1.4 不等温流动阻力的确定	284
6.2 用蒸汽夹套管加热煤浆时起始段的传热计算	286
6.3 考虑粘度变化加热煤浆管道稳定段传热的近似计算	295
6.4 煤浆管道输送时在空气中散热的近似理论解	298
6.5 考虑煤浆流变特性时的管内层流传热	304
6.5.1 不考虑物性参数随温度变化的近似计算方法	304
6.5.2 考虑粘度随温度变化时非牛顿型流体传热及流阻计算方法	307
6.5.3 非牛顿型特征流体的煤浆传热的试验研究结果	312
6.6 煤浆在管内层流流动传热时的数值计算	313
6.7 根据煤浆流动阻力近似计算管内湍流传热的原理	315
6.7.1 $Pr = 1$ 时的动量传递规律及传热计算	315
6.7.2 $Pr \neq 1$ 时的动量传递的类似规律	316
6.7.3 考虑边界层内存在过渡层时的传热计算	318
6.7.4 湍流传热时温度场的确定	321
6.7.5 湍流粘度和湍流导温系数的确定	322
6.8 考虑煤浆流变特性时的管内湍流传热	323

6.8.1 温差不大时的湍流传热计算	323
6.8.2 温差较大时非牛顿流体的湍流传热	325
6.8.3 拟塑性流体管内不等温湍流流动的温度场和速度场	327
第七章 单滴煤浆的燃烧特性及计算	330
7.1 引言	330
7.2 单滴煤浆燃烧试验装置和试验方法	331
7.3 油煤浆和油煤浆雾滴的结构	335
7.4 单滴油煤浆的燃烧过程	341
7.4.1 单滴油煤浆燃烧过程概述	341
7.4.2 预热着火特性	342
7.4.3 单滴油煤浆挥发物火焰扩散燃烧特性	346
7.4.4 单滴油煤浆的焦炭燃烧特性	350
7.4.5 单滴油煤浆燃烧过程各阶段的重迭特性	352
7.5 单滴油煤浆与重油、煤粉燃烧过程的比较	353
7.5.1 单滴油煤浆与单滴重油燃烧速度的比较	354
7.5.2 油煤浆与煤粉燃烧速度比较	355
7.6 水份对单滴油煤浆燃烧的影响	357
7.7 单滴水煤浆的燃烧过程	361
7.7.1 单滴水煤浆燃烧过程概述	361
7.7.2 单滴水煤浆在燃烧过程中的外观形态	363
7.7.3 水煤浆滴直径在燃烧过程中的变化	364
7.7.4 单滴水煤浆燃烧过程的影响因素	364
7.8 单滴水煤浆水份的蒸发过程及计算	371
7.8.1 单滴水煤浆水份蒸发过程机理	371
7.8.2 水煤浆滴结团和爆裂的机理	372
7.8.3 单滴水煤浆水份蒸发过程的计算	375
7.9 单滴水煤浆燃烧过程中挥发份析出及着火的机理和计算	378
7.9.1 单滴水煤浆挥发份析出过程特性及计算	378
7.9.2 单滴水煤浆的着火特性及影响因素	382
7.9.3 单滴水煤浆着火温度和着火时间的计算	389
7.10 单滴水煤浆燃烧过程中焦炭的燃烧特性和计算	394
7.10.1 单滴水煤浆中焦炭燃烧特性	394
7.10.2 单滴水煤浆中挥发份燃烧和焦炭燃烧的重迭性	397
7.10.3 单滴水煤浆焦炭燃烧的计算	397
7.11 单滴水煤浆和单颗煤粒燃烧特性的比较	400
第八章 煤浆雾化喷嘴	408
8.1 雾化颗粒分布的表达方法	408
8.1.1 颗粒直径的确定方法	408
8.1.2 颗粒分布的表示方法	409

8.1.3	通用雾炬颗粒分布公式	410
8.1.4	平均直径	411
8.1.5	拨山—栩津(Nakiyama-Tanasawa)颗粒分布公式	412
8.1.6	Rosin—Rammler 颗粒重量分布积累的公式	413
8.2	煤浆喷嘴雾化机理及对煤浆喷嘴要求	414
8.2.1	概述	414
8.2.2	煤浆的初次雾化	416
8.2.3	水煤浆的二次雾化	417
8.2.4	对煤浆喷嘴的要求	419
8.3	旋流型煤浆喷嘴	421
8.3.1	旋流型煤浆喷嘴的结构	421
8.3.2	旋流型煤浆喷嘴流量的计算	421
8.3.3	其它型式旋流型煤浆喷嘴简介	423
8.4	Y 型煤浆喷嘴	426
8.4.1	Y 型煤浆喷嘴的结构	426
8.4.2	Y 型煤浆喷嘴流量的计算	426
8.4.3	几种典型的 Y 型喷嘴的形式	428
8.5	撞击式多级雾化煤浆喷嘴	431
8.5.1	撞击式多级雾化煤浆喷嘴的结构	431
8.5.2	撞击式多级雾化煤浆喷嘴的特点	431
8.5.3	喷嘴结构参数对雾化质量的影响	432
8.5.4	撞击式多级雾化煤浆喷嘴的设计计算方法	434
8.6	其它形式喷嘴	437
8.6.1	T 型喷嘴	437
8.6.2	对冲型喷嘴	439
8.6.3	转杯型喷嘴	439
8.6.4	超声波喷嘴	440
8.7	影响煤浆喷嘴雾化质量的因素	441
8.7.1	气耗率与雾化质量的关系	441
8.7.2	煤浆浓度、粘度与雾化质量的关系	442
8.7.3	煤粉颗粒大小的影响	442
8.7.4	添加剂的影响	443
8.7.5	水煤浆温度的影响	444
8.8	水煤浆喷嘴的磨损及磨损的机理	446
8.8.1	水煤浆喷嘴的磨损及防磨结构	446
8.8.2	水煤浆喷嘴的磨损机理	449
8.8.3	喷嘴材料磨损分析	451
8.8.4	喷嘴耐磨材料的确定	452
第九章	煤浆燃烧器的原理及设计	458
9.1	燃用煤浆时燃烧器的要求	458

9.1.1	影响煤浆着火和燃烧特性的主要指标	458
9.1.2	煤浆雾炬的着火和着火热分析	461
9.1.3	煤浆燃烧器空气动力场的合理组织	466
9.1.4	煤浆燃烧器工作的基本要求	470
9.2	煤浆旋流燃烧器的原理及设计	470
9.2.1	旋流的特性	471
9.2.2	国内外水煤浆旋流燃烧器的发展	477
9.2.3	水煤浆旋流燃烧器的分类及典型燃烧器的介绍	481
9.2.4	水煤浆旋流燃烧器的设计	486
9.2.5	旋流燃烧器的布置	488
9.3	煤粉直流燃烧器的原理及设计	490
9.3.1	直流射流及其组合	491
9.3.2	四角切向燃烧器的炉内空气动力场组织	499
9.3.3	国内外水煤浆角置燃烧器的发展	503
9.3.4	切向角置式燃烧器的布置及分类	507
9.3.5	水煤浆角置式燃烧器设计示例	511
9.4	预燃室燃用煤浆的原理及设计	514
9.4.1	各种煤粉预燃室燃烧器的发展和应用	514
9.4.2	国内外水煤浆预燃室燃烧器的发展	517
9.4.3	预燃室燃烧器的稳燃原理	521
9.4.4	预燃室的设计和水煤浆预燃室的试验	526
第十章	煤浆火炬在炉内的燃烧过程	531
10.1	煤浆火炬在炉内的燃烧机理	531
10.1.1	水份蒸发特性	532
10.1.2	挥发份析出和着火机理	532
10.1.3	结团机理	532
10.1.4	火焰特性	533
10.1.5	燃烬特性	536
10.2	各种参数对煤浆燃烧的影响	537
10.2.1	煤的特性	537
10.2.2	雾化特性的影响	540
10.2.3	空气预热温度	543
10.2.4	过量空气系数	544
10.2.5	配风方式和旋流、散热条件影响	548
10.2.6	负荷变化的影响	551
10.3	煤浆火炬的黑度、热流密度、沾污及传热特性	552
10.3.1	黑度	552
10.3.2	火焰热流	553
10.3.3	壁面热流和水冷壁沾污特性	554
10.4	煤浆、煤粉、油火炬燃烧特性的比较	561

10.4.1	一般规律	561
10.4.2	火焰温度	562
10.4.3	燃烧效率和排放特性	564
10.4.4	水煤浆和煤粉燃烧特性的比较与分析	566
10.5	水分对煤浆火炬的影响	572
10.5.1	一般规律	572
10.5.2	水份对着火和挥发份析出的影响	574
10.5.3	水份对焦炭燃烧和燃烬性能的影响	575
10.6	典型工业和电站锅炉燃用煤浆的燃烧特性	577
10.6.1	浙江大学在 20t/h, 60t/h 工业锅炉上燃用水煤浆的燃烧特性	578
10.6.2	在 27t/h 燃油工业快装炉上的试验结果	581
10.6.3	在 7t/h 工业锅炉上燃用超净细水煤浆(SCCWS)的结果	583
10.6.4	浙江大学在某 230t/h 燃油电站锅炉上燃烧水煤浆	585
10.6.5	加拿大查塔姆电厂 2 号炉试验结果	587
第十一章 煤浆火炬在炉内燃烧的数值模型		591
11.1	引言	591
11.1.1	燃烧过程模化的一般研究	591
11.1.2	水煤浆燃烧的基本过程	593
11.1.3	水煤浆燃烧模型发展回顾	594
11.2	单颗煤浆滴燃烧经历的数学模型	598
11.2.1	水煤浆滴的加热	598
11.2.2	水煤浆滴水分的蒸发	599
11.2.3	挥发份析出模型	604
11.2.4	焦炭的非均相反应模型	607
11.2.5	煤浆及煤粒在燃烧室中的其他经历模型	608
11.3	一维、二维火炬的数学模型及计算	609
11.3.1	水煤浆喷雾着火燃烧的一维数学模型	609
11.3.2	水煤浆雾炬燃烧过程的一维数学模型	611
11.3.3	用 1-DICOG 及其发展的二维模型计算水煤浆燃烧的结果	613
11.3.4	水煤浆喷雾群体燃烧的模型	615
11.4	煤浆雾化的数学模型	621
11.4.1	雾化的基本理论	622
11.4.2	二元气动非稳态模型	624
11.4.3	水煤浆外混式气动雾化的 LFB 模型	626
11.4.4	半经验雾化特性方程	629
11.5	水煤浆燃烧时炉内传热的模型及计算	632
11.5.1	燃烧室的热辐射	632
11.5.2	辐射传热的模型	633
11.5.3	实际煤浆火焰辐射传热模拟结果及分析	635
11.6	三维煤浆火炬燃烧数学模型及计算	641

11.6.1	燃烧室中流动,气相反应过程及其模型	642
11.6.2	雾炬的扩散及模型	651
11.6.3	模型求解及结果分析	658
第十二章	水煤浆燃烧新技术	680
12.1	水煤浆燃烧新技术的要求	680
12.2	水煤浆前置燃烧室的研究	681
12.2.1	概述	681
12.2.2	试验装置的热态燃烧试验	683
12.2.3	前置燃烧室的应用	684
12.2.4	国外水煤浆预燃室的研究与应用	687
12.3	采用反喷射流稳定和强化水煤浆着火、燃烧的技术	690
12.3.1	反喷射流的稳燃原理	690
12.3.2	反喷射流的流动特性及燃烧特性	691
12.3.3	反喷射流的数值试验及计算公式	693
12.3.4	反吹贴墙风的应用	696
12.3.5	环形逆向分布射流流场特性及实验结果	699
12.4	水煤浆液态排渣燃烧新技术	700
12.4.1	水煤浆半气化液态排渣燃烧技术	700
12.4.2	国外水煤浆液态排渣燃烧技术	704
12.5	水煤浆偏置射流预燃室稳燃技术	707
12.5.1	偏置射流的稳燃原理	707
12.5.2	偏置射流燃烧器的空气动力特性	708
12.5.3	偏置射流预燃室燃烧器的工业应用	711
12.6	抽吸烟式燃烧器稳燃技术	714
12.6.1	可调非对称引射烟气式水煤浆燃烧器	714
12.6.2	加拿大焙烧机 NRC 燃烧装置	716
12.7	水煤浆流化床燃烧技术	716
12.7.1	水煤浆流化床的燃烧原理	717
12.7.2	炉前燃料系统的工艺流程	718
12.7.3	水煤浆流化床燃烧技术的应用	719
12.7.4	国外水煤浆流化床的应用	721
12.8	水煤浆直接点火技术	724
12.8.1	水煤浆直接点火原理	725
12.8.2	水煤浆直接点火的试验研究	725
第十三章	电站和工业油炉燃用水煤浆的设计特点及改炉技术	731
13.1	电站和工业锅炉的基本型式及参数	731
13.1.1	锅炉基本型式	732
13.1.2	锅炉参数	736
13.2	燃油锅炉改烧水煤浆时可能出现的技术问题	737

13.2.1	同容量的燃油炉与燃煤炉设计和结构上的对比	737
13.2.2	燃油炉与燃煤炉主要指标参数对比	745
13.2.3	燃油锅炉改烧水煤浆时可能出现的技术问题	748
13.3	油炉改烧水煤浆后锅炉受热面传热特性的变化	749
13.3.1	炉膛传热特性的变化	749
13.3.2	对流传热特性的变化	754
13.4	油炉改烧水煤浆后锅炉炉膛结渣特性变化	757
13.4.1	影响锅炉结渣的因素分析	757
13.4.2	煤灰结渣特性及其判别方法	758
13.4.3	锅炉结渣过程	764
13.4.4	防止锅炉结渣的措施	764
13.5	油炉改烧水煤浆后锅炉对流受热面的磨损和腐蚀	765
13.5.1	对流受热面的磨损及其防止	765
13.5.2	对流受热面的腐蚀及其防止	773
13.6	油炉改烧水煤浆后的炉内出灰、清渣及除尘问题	777
13.6.1	油炉改烧水煤浆后炉内积灰、结渣特性的变化	777
13.6.2	炉内出灰措施	779
13.6.3	改烧水煤浆后的排渣装置	780
13.6.4	炉内吹灰及除灰装置	780
13.6.5	改烧水煤浆后的除尘问题	781
13.7	油炉改烧水煤浆后的其它问题	782
13.7.1	应注意的一些其它问题	782
13.7.2	油炉改烧水煤浆和煤粉的经济比较	783
13.8	油炉改烧水煤浆后影响负荷降低的因素及减少降负荷的措施	784
13.9	油炉改烧水煤浆后的炉前系统	786
13.9.1	60t/h 燃油锅炉改烧水煤浆炉前系统	786
13.9.2	230t/h 锅炉改烧水煤浆炉前系统设计	787
13.9.3	670t/h 燃水煤浆锅炉炉前系统设计	788
13.9.4	美国电力研究所提出的炉前系统	790
13.10	燃用水煤浆锅炉的设计	791
13.10.1	水煤浆锅炉设计原则	791
13.10.2	35t/h 水煤浆锅炉设计	797
第十四章	煤浆低污染燃烧技术	804
14.1	煤浆燃烧对大气的污染	804
14.1.1	大气污染及其种类	804
14.1.2	水煤浆燃烧产生的污染物	804
14.2	煤浆飞灰特性、形态及对除尘影响	807
14.2.1	飞灰的性质	807
14.2.2	水煤浆飞灰对除尘性能的影响	811
14.3	煤浆燃烧过程中 SO ₂ 析出的动态特性及加石灰石脱硫的原理	818

14.3.1	煤浆燃烧过程中 SO_2 析出动态特性	818
14.3.2	煤浆燃烧过程中加石灰石脱硫的原理	821
14.4	煤浆燃烧过程中 NO_x 生成和排放的动态特性	824
14.4.1	煤浆燃烧过程中的 NO_x 的生成动态	824
14.4.2	各种参数对 NO_x 排放的影响	834
14.5	低 NO_x 分段送风水煤浆燃烧新技术	843
14.5.1	烟气再循环	843
14.5.2	分段燃烧	844
第十五章	水煤浆/煤的气化技术	850
15.1	煤气化分类简介	850
15.1.1	气化方法分类	850
15.1.2	水煤浆气化优点	856
15.2	煤炭气化过程原理	858
15.2.1	煤炭热分解过程	858
15.2.2	气化反应与气化过程	860
15.2.3	气化反应的化学平衡	862
15.2.4	气化反应动力学	866
15.3	煤浆气化工艺	869
15.3.1	德士古(Texaco)气化工艺	869
15.3.2	管道煤碳气化工艺	874
15.3.3	油煤浆裂解气化法	878
15.3.4	循环流化床煤浆/煤气化燃气—蒸汽联产工艺	881
15.4	水煤浆气化应用前景	883
15.4.1	用于城市制气和生产化工产品	883
15.4.2	用于联合循环发电技术	887
15.5	气化过程计算	892
15.5.1	实际数据计算法	892
15.5.2	平衡计算法	894
第十六章	煤浆燃烧试验方法及测量技术	898
16.1	煤浆特性的试验方法	898
16.1.1	煤浆中煤的特性测量	898
16.1.2	煤浆浓度的测量	902
16.1.3	煤浆密度的测量	904
16.1.4	煤浆的 PH 值测定	904
16.1.5	煤浆电泳度的测量	904
16.1.6	煤浆粘度的测量	905
16.1.7	煤浆沉降稳定性	906
16.2	燃用煤浆时锅炉热平衡试验	908
16.2.1	热平衡试验的基本原理	908

16.2.2	水煤浆中水份引起的能量损失	913
16.2.3	干燥基低位发热量计算锅炉热效率	914
16.3	煤浆喷嘴雾化的试验方法	915
16.3.1	煤浆喷嘴雾化的试验装置	915
16.3.2	雾化试验介质的确定	918
16.3.3	雾化性能测量取样方法	919
16.3.4	雾化特性参数的测量	920
16.3.5	雾化试验注意的问题	928
16.4	煤浆燃烧器的试验研究方法	929
16.4.1	风量测量技术	929
16.4.2	风速测量技术	933
16.4.3	燃烧器试验方法	939
16.5	煤浆在炉内燃烧过程的试验技术	944
16.5.1	煤浆火炬燃烧过程的取样技术	944
16.5.2	炉内高温测量技术	946
16.5.3	燃用水煤浆时炉内热流的测量技术	949
16.5.4	燃用水煤浆时炉内黑度的测量技术	951
16.5.5	燃用水煤浆时炉内沾污特性测量技术	954
16.6	煤浆滴燃烧过程的试验技术	955
16.6.1	管式沉降炉法	956
16.6.2	单滴燃烧试验方法	957
16.6.3	红外光谱法在煤浆燃烧过程中的研究	959
16.6.4	扫描电子显微镜和 X 射线能谱分析法	960
第十七章	水煤浆燃烧技术在工业中的应用	966
17.1	水煤浆在工业锅炉中的应用	966
17.1.1	水煤浆在工业快装锅炉中的应用	966
17.1.2	水煤浆在 30t/h 供热锅炉上的应用	969
17.1.3	水煤浆在火管锅炉中的应用	972
17.1.4	石油焦水浆的探索性应用试验	976
17.1.5	水煤浆在 20t/h 燃油工业锅炉中的应用	979
17.1.6	10t/h 链条炉混烧煤泥水煤浆在应用试验	984
17.1.7	30kW 工业锅炉改烧煤泥水煤浆	985
17.1.8	加拿大水煤浆的流化床燃烧	987
17.1.9	水煤浆在 12t/h 流化床锅炉中燃烧	990
17.2	水煤浆在电站锅炉中的应用	991
17.2.1	加拿大 20MW 锅炉燃用水煤浆的试验	991
17.2.2	意大利 300t/h 燃油锅炉应用水煤浆	993
17.2.3	俄罗斯 220MW 煤粉锅炉应用水煤浆工程	994
17.2.4	水煤浆在 35MW 燃油锅炉中燃烧	996
17.2.5	日本姫路电站 33MW 锅炉水煤浆的应用	999
• 12 •		