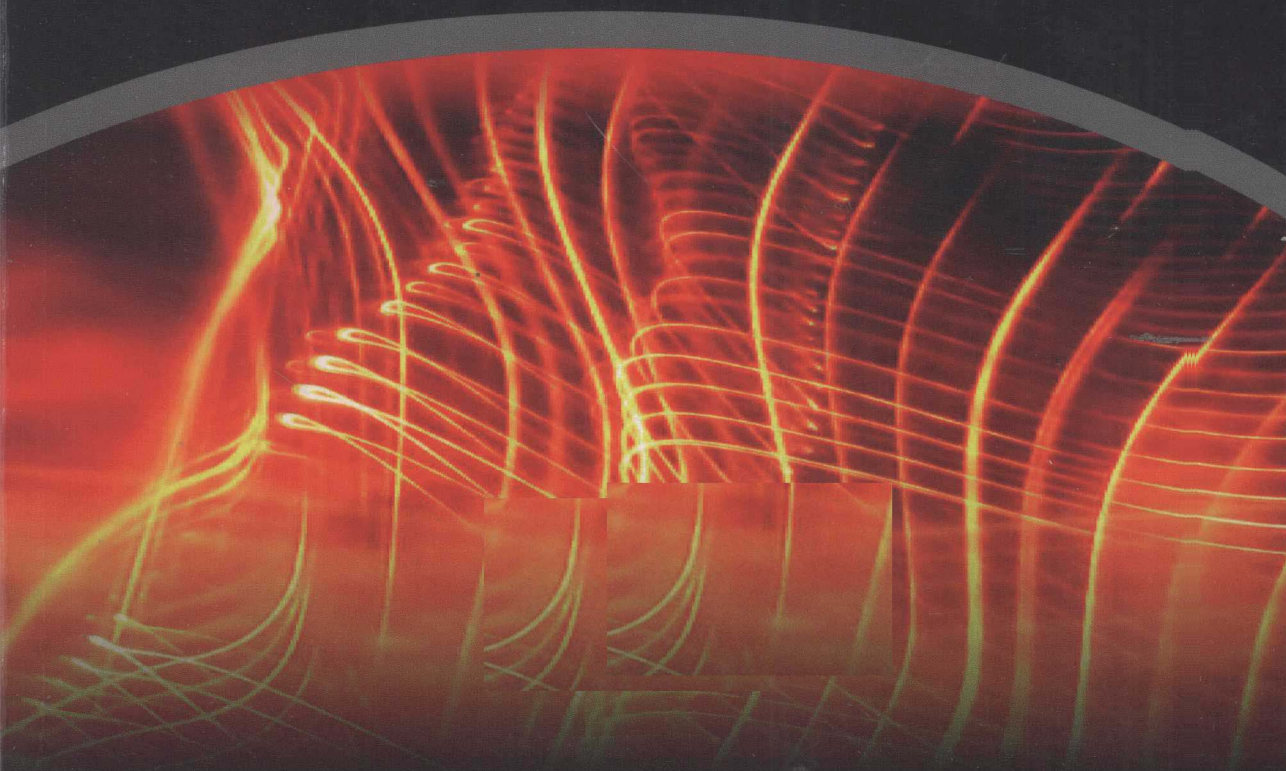


电厂锅炉运行监测 与优化模型及应用

刘福国 著



科学出版社

电厂锅炉运行监测与优化模型及应用

刘福国 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

数据库系统和计算机网络技术的发展给电厂锅炉运行监测、诊断和优化提供了广阔的平台,在这种背景下,锅炉运行监测和优化有了新的内容,其中性能监测、诊断和优化模型及方法的研究是重要的环节。本书介绍了电厂锅炉入炉煤质软测量在线监测技术的原理和应用,以及测量系统不确定度评估方法;通过煤焦颗粒群的燃烧模拟预测锅炉的未燃尽碳损失,在实际生产中得到应用和检验;建立了锅炉耗差分析模型以及炉膛出口氧量的经典优化方法;采用多元变量二次型统计回归模型、人工神经网络和遗传算法等数据挖掘技术对锅炉效率、NO_x 排放量以及磨煤机粉碎效率等进行优化,取得良好效果;开发了超临界压力直流锅炉炉膛受热面的监测模型以及自然循环蒸发回路稳态数学模型;研究了回转式空气预热器的传热、泄漏和变形问题,为该类预热器传热设计、密封改进和性能模拟提供了方法和手段。

本书可作为从事锅炉设计、运行和试验研究的工程技术人员、科研人员、本科生的工程训练参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电厂锅炉运行监测与优化模型及应用 / 刘福国著. —北京:科学出版社, 2014. 12

ISBN 978-7-03-042649-9

I. ①电… II. ①刘… III. ①火电厂-锅炉-监测-研究 IV. ①TM621. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 280727 号

责任编辑:耿建业 陈构洪 / 责任校对:蒋 萍
责任印制:徐晓晨 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

北京科印技术咨询服务公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 12 月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2014 年 12 月第一次印刷 印张:29 1/8

字数:570 000

定价:138.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电厂锅炉性能监测、诊断和优化对提高机组运行经济性和安全性有重要意义。计算机网络和软件技术的发展,使工程技术人员可方便地获得丰富的数据来研究实际生产设备的性能监测和优化问题,近年来,工程技术人员利用电厂建成的实时信息平台,采用先进的数据处理方法,对运行设备进行监测、诊断和优化,提高了设备的经济性和环保效益。本书在这种环境和背景下讨论了电厂锅炉性能监测和优化模型、方法及应用,它是对多年来锅炉启动调试、性能优化以及异常运行诊断等现场实际工作的总结,书中所提的模型和方法在生产中有相应的需求和背景。

第一章介绍了电厂常用介质的密度、比热、焓、熵、运动黏度、导热系数和普朗特数等物性参数的计算方法,以及水和水蒸气的计算原理、各个区域的状态方程及反推计算方法,简要介绍了物性参数软件化方法。

随着电厂信息化工作的开展,火电机组性能监测和优化系统正处于开发和推广的活跃期,因缺少煤质在线测量技术,很多系统只能手工录入煤质数据,有经验的运行人员能够根据发电机组运行数据判别入炉煤质的优劣。根据火电机组测量参数通常的配置状态,本书第二章建立了锅炉入炉煤质在线软测量模型,并介绍了在 300MW 锅炉上的应用实施例,在第五章第五节中,还给出一个应用于 1000MW 超超临界压力直流锅炉的、基于炉膛燃烧和传热反问题的煤质在线测量模型及现场实施例。煤质软测量技术依赖于机组性能监测计算结果,同时又为性能监测提供必需的煤质信息,通常是与机组性能监测相耦合的系统。

飞灰未燃尽碳含量与炉膛出口烟气含氧量的关系是锅炉运行优化时必须考虑的一种重要关系,它是协调锅炉燃烧效率和传热效率的依据,该关系通常采用现场试验方法确定,但试验工作量大,运行工况多变,试验条件难以稳定,参数调整受到运行条件限制。第三章建立了锅炉飞灰未燃尽碳含量预测模型,根据煤质、炉膛出口烟气含氧量和煤粉细度等参数,通过煤焦颗粒群燃烧模拟确定飞灰未燃尽碳含量。第四章中,在进行锅炉性能优化时,飞灰未燃尽碳含量与炉膛出口烟气含氧量的关系采用现场试验和理论预测相结合的方法确定。

第四章第二节建立了锅炉耗差分析方法,该方法在火电机组性能监测优化系统中用于机组煤耗分析和诊断;第三节分析了目前在役的不同容量机组的运行经济性;第四节以一台 300MW“W”火焰锅炉为例,介绍了新建锅炉在调试阶段进行的试验和调整工作(2004 年),第五节到第九节提出几种性能优化模型,这些模型已在实际运行锅炉上实施并得到检验,这些模型包括:①电厂锅炉变氧量运行分析

和优化模型(2001年);②采用多维变量二次型,建立基于统计分析的锅炉热力系统性能预测和优化模型(2004年);③采用人工神经网络和遗传算法,建立大容量切向燃烧锅炉燃烧器区域风量和粉量分配优化模型(2008年);④利用PI数据平台,采用数据挖掘技术进行双进双出钢球磨煤机运行特性建模和优化(2009年);⑤消除大容量切向燃烧低 NO_x 超临界压力直流锅炉炉膛出口烟温偏差的调整试验(2012年)。

近年来,国内投产了大量的超临界和超超临界压力发电机组,这类机组锅炉炉膛蒸发受热面的超温泄漏在实际生产中时常发生。第五章建立了超临界和超超临界压力直流锅炉炉膛受热面壁温监测和预报方法,内容包括炉膛蒸发受热面传热预测、炉膛高度方向热流量分布规律、锅炉变压运行全负荷范围内蒸发管强制沸腾对流换热计算方法、管壁温度监测模型以及基于炉膛燃烧和传热反问题的入炉煤质在线监测技术,超临界压力直流锅炉炉膛受热面壁温监测预报系统在一台1000MW超超临界锅炉上应用实施。

给水泵故障、燃烧波动以及汽轮机甩负荷等运行突发事件对自然循环汽包炉的水循环安全性带来较大考验,在实际生产中,炉膛燃烧波动引起汽包水位保护动作造成机组跳闸的事故时有发生,这说明自然循环回路有时比炉膛燃烧系统更为脆弱。第六章建立了自然循环汽包炉下降管—上升管—汽包回路的稳态数学模型,该模型针对实际运行锅炉的参数测量状态,可用于蒸发回路的循环特性分析。

回转式空气预热器是电厂锅炉常用的换热设备,该类预热器的泄漏和腐蚀是影响传热性能的主要原因,腐蚀主要与传热元件温度控制和分布有关。第七章建立了考虑轴向导热的三分仓回转式预热器的二维传热模型,给出回转式空气预热器漏风设计计算方法,采用漏风和传热耦合模型对预热器进行性能模拟,评估不同部位的泄漏对换热的影响,本章第五节建立了回转式预热器转子径向隔板热弹性变形模型,用于转子的膨胀变形分析,以确定预热器冷态安装时预留的密封间隙。

锅炉风粉管道和汽水管道的流量分配是影响机组安全经济运行的重要因素。为减少锅炉汽包的开孔数量,有一类配水管从汽包单侧封头进水,配水管跨越整个汽包长度,为保证汽包内合理的汽水状态,配水管沿汽包长度应均匀配水。第八章第一节建立了均匀分流、变节距多孔配水管设计的数学模型,并采用该模型对实际运行的汽包配水管进行改造,改善了汽包两侧差压式水位计的测量偏差。第二节研究了磨煤机出口并联送粉管道的阻力平衡问题,通过阻力设计计算,并联的各送粉管道根据布置和行程选用不同节流度的固定式缩孔来平衡管道阻力,保证风粉均匀分配;采用可调缩孔在现场确定节流度时,其普遍的工程误差要大于这种固定式缩孔。

因建模数据量大,第二章第二节中建模所用的煤元素分析数据、第四章第八节中所用的磨煤机运行数据未在书中列出,其他章节的建模数据均在书中列出,读者

可利用这些数据对书中的模型做进一步探讨。

本书在数据分析和处理时,采用的软件有 Excel VBA、MATLAB、Origin、Visual Basic 等,为方便查阅,这里对各章节中这些软件的使用情况进行简要说明。

第一章第三节:采用 Excel VBA 和 MATLAB 编制水和水蒸气等热力介质物性计算软件;

第二章第二节:使用 Excel VBA 编制人工神经网络训练程序;

第二章第四节:使用 MATLAB 求解复杂的多元非线性方程组;

第二章第五节:使用 MATLAB 对煤质软测量系统的测量特性进行蒙特卡罗模拟;

第三章第四节:使用 Excel VBA 编制煤焦颗粒群燃烧模拟程序;

第四章第五节:使用 Excel VBA 编制运行氧量优化程序;

第四章第六节:使用 Origin 进行锅炉净效率的统计二次型回归,使用 MATLAB 求解有约束的非线性多变量函数的最小值;

第四章第七节:使用 MATLAB 训练人工神经网络,采用 MATLAB 的解算器(GA)对训练好的人工神经网络模型进行遗传算法优化,使用 MATLAB 中的 fmincon 函数进行大型工程优化;

第四章第八节:使用 MATLAB 训练人工神经网络,使用加载宏实现 MATLAB 和 Excel 的数据传递;

第五章第五节:使用 MATLAB 编制超临界压力直流锅炉蒸发受热面壁温监测系统计算程序;

第六章第二节:使用 Excel VBA 编制自然循环汽包炉蒸发回路稳态模型求解程序;

第七章第一节:使用 MATLAB 的 fsolve 函数求解预热器传热模型;

第七章第三节:使用 MATLAB 的 fsolve 函数求解预热器漏风设计计算模型;

第七章第四节:使用 MATLAB 和 Excel VBA 求解预热器漏风和传热耦合模型;

第七章第五节:使用 Visual Basic 求解预热器转子径向隔板热弹性变形模型;

第八章第一节:使用 Visual Basic 求解均匀分流、变节距多孔配水管模型;

第八章第二节:使用 Excel VBA 进行并联送粉管道阻力平衡计算。

由于时间仓促和作者水平有限,本书不妥和错误之处在所难免,敬请专家和读者批评指正。

作 者

2013 年 10 月

目 录

前言

第一章 电厂锅炉热力介质物性参数	1
第一节 空气和烟气物性参数	1
一、密度	2
二、平均定压比热	3
三、导热系数、运动黏度和普朗特数	6
四、空气含湿量	8
五、空气和烟气的焓	10
第二节 水和水蒸气参数	11
一、热力学参数计算原理	11
二、热力学参数计算方法	12
第三节 介质参数计算软件化	20
一、空气、烟气和煤的物性	20
二、水和水蒸气的参数计算	21
参考文献	24
第二章 电厂锅炉入炉煤质软测量系统	25
第一节 煤的元素成分和发热量	26
一、煤的化学成分	26
二、煤的元素分析	28
三、煤的工业分析	29
四、煤的发热量	30
第二节 煤元素组成的统计规律	32
一、煤的化学结构及相似性	32
二、煤元素组成规律的数据挖掘	33
三、煤燃烧时,元素成分间表现出的关系——煤质因子	47
四、燃料特性系数	49
五、根据元素分析计算煤的发热量	50
第三节 煤燃烧化学计算	51
一、煤燃烧过程元素平衡	51
二、煤完全燃烧所需的空气及生成的烟气	57

三、煤燃烧生成的烟气成分和煤质成分之间的联系	62
第四节 锅炉入炉煤成分和发热量在线测量	67
一、基于烟气成分分析的煤质监测模型	67
二、其他设备和系统的煤质方程	77
三、几种不同的煤质测量模型及求解实例	83
四、配直吹式制粉系统的电厂锅炉入炉煤质监测的灰分校正方法	95
第五节 基于虚拟样本的锅炉煤质测量不确定度评定	100
一、采用虚拟测量样本评定锅炉效率不确定度	101
二、煤质测量系统的不确定度评定	107
第六节 测量数据校正及应用	115
一、冗余测量系统测量数据校正	116
二、发电厂锅炉给水流量、入炉煤量和发热量的数据校正	117
三、基于数据校正的锅炉减温水阀门泄漏诊断	121
参考文献	123
第三章 锅炉飞灰未燃尽碳含量预测计算	125
第一节 煤焦颗粒燃尽速率计算	126
一、单个球形颗粒燃烧简化模型	126
二、煤粉颗粒群的燃尽速率计算	129
三、不同煤种的煤焦颗粒群燃烧速率差异	131
第二节 炉膛传热计算	132
一、零维模型传热计算	132
二、炉膛分区段传热计算	137
第三节 颗粒在炉膛内的燃烧的简化处理	139
一、煤焦在炉膛和实验室条件下燃烧环境的差异	139
二、颗粒在炉膛内的燃烧模型	140
三、颗粒群的表示	141
四、氧浓度沿火焰的变化	143
五、颗粒的停留时间	144
六、颗粒燃烧温度	145
七、未燃尽碳含量及燃烧效率	145
第四节 实际运行锅炉飞灰未燃尽碳含量预测计算	146
一、飞灰含碳量-炉膛出口氧量变化特性	146
二、采用煤的工业分析预测不同煤种燃尽特性	152
三、炉膛分区段热力计算中引入煤焦颗粒燃烧模拟	157
参考文献	173

第四章 电厂锅炉运行优化方法及应用	174
第一节 锅炉热经济性表示方法	174
一、物质平衡	174
二、GB 10184—88 锅炉热效率计算	179
三、ASME PTC4.1 锅炉热效率计算	185
第二节 锅炉耗差分析	190
一、锅炉效率集中表达式	190
二、直接变量变化对锅炉效率的影响	193
三、直接变量的煤耗影响分析	196
四、锅炉效率误差分析	197
第三节 不同容量机组的运行经济性	201
一、降低机组供电煤耗潜力分析	201
二、机组供电煤耗率	202
第四节 新投产锅炉的启动调试	207
一、燃烧系统的设计特点	207
二、风量标定试验	209
三、磨煤机运行调整	210
四、燃烧器二次风和分级风配比	211
五、存在问题分析	215
第五节 锅炉经济运行氧量确定	216
一、机组变氧量运行优化模型	217
二、应用实例	218
第六节 基于统计分析的电厂锅炉性能建模与优化	226
一、系统性能建模及优化	226
二、应用实例	234
第七节 锅炉燃烧器区域风量和粉量分配优化	243
一、人工神经网络建模和遗传算法问题	243
二、双人工神经网络建模及有约束的遗传算法优化	245
三、实际应用	247
四、小结	263
第八节 钢球磨煤机运行特性建模和优化	264
一、物料粉碎研究应用	264
二、基于数据挖掘的磨煤机粉碎过程建模	265
三、模型检验	270
四、运行特性分析和粉碎效率优化	270

五、数据挖掘技术进一步推广应用	273
第九节 消除大容量低 NO_x 切向燃煤锅炉烟温偏差试验	273
一、切向燃烧的技术发展	273
二、超临界压力锅炉低 NO_x 燃烧系统	275
三、消除烟温偏差的现场试验	278
四、烟温偏差控制的进一步研究	282
参考文献	282
第五章 超临界压力直流锅炉炉膛蒸发受热面监测	286
第一节 炉膛蒸发受热面超温泄漏实例	286
一、炉膛蒸发受热面布置	286
二、水冷壁超温和泄漏实例	287
第二节 超临界压力直流锅炉蒸发受热面传热预测	291
一、炉膛蒸发受热面传热预测方法	291
二、系数 A 的确定方法	293
三、蒸发受热面传热预测及应用	296
第三节 蒸发受热面对流和辐射耦合传热计算	300
一、传热方程	301
二、根据受热面运行数据确定灰污特性参数	303
三、计算实例	305
第四节 炉膛热流量分布	309
一、概述	309
二、一台 300MW 锅炉变负荷运行热流量分布测试	309
三、采用低 NO_x 燃烧器时炉膛热流量分布	316
四、炉膛热流量分布数据拟合方法	317
第五节 炉膛蒸发受热面壁温监测方法	323
一、蒸发管工质参数分布	323
二、蒸发管工质参数分布解	328
三、蒸发管工质参数分布简化计算	333
四、蒸发管壁温监测和预报	337
五、超临界压力直流锅炉煤质在线测量	345
六、超临界压力锅炉蒸发受热面壁温监测预报系统	355
参考文献	361
第六章 自然循环汽包炉蒸发回路静态数学模型	364
第一节 自然循环原理	365
第二节 蒸发回路数学模型及求解	366

一、条件与假设	366
二、模型导出	367
三、模型的变量分析及求解	374
参考文献	380
第七章 回转式空气预热器的传热、泄漏和变形	382
第一节 考虑轴向导热的回转式预热器传热模型	385
一、数学模型	385
二、数值方法	389
三、传热计算及试验验证	390
四、小结	394
第二节 周向和轴向泄漏的耦合计算	395
一、泄漏流动网络	396
二、旁路泄漏流向	398
三、控制方程	399
四、实际应用	401
五、小结	402
第三节 三分仓回转再生式空气预热器漏风设计计算模型	403
一、三分仓回转空气预热器泄漏流动	404
二、回转空气预热器漏风设计模型	406
三、计算实例	411
四、小结	415
第四节 三分仓回转式空气预热器泄漏和传热耦合模型及应用	416
一、泄漏模型	417
二、阻力计算	418
三、传热模型	418
四、联合求解	419
五、实际应用	419
六、小结	425
第五节 回转式空气预热器转子径向隔板热弹性变形模型	426
一、径向隔板的热弹性变形模型	427
二、算例	430
三、小结	433
参考文献	434
第八章 流量均匀分配	436
第一节 均匀分流、变节距多孔配水管	436

一、概述	436
二、多孔分配管分配特性离散模型	437
三、均匀分流、变节距分配孔设计	438
四、一台锅炉汽包配水管改造设计	441
第二节 电厂锅炉并联送粉管道阻力平衡	444
一、概述	444
二、纯气流阻力计算	445
三、带粉气流阻力计算	446
四、送粉管道总阻力计算及节流孔板设计	448
五、纯气流状态并联管风速的不平衡调整法	451
参考文献	453

第一章 电厂锅炉热力介质物性参数

现代电厂锅炉是将煤的化学能转化为水蒸气热能的设备,它包括锅和炉两大部分,在结构上,锅和炉分别是指受热面和燃烧设备,煤在炉内燃烧,产生高温烟气,烟气将热量传递给锅内的汽水,以产生规定参数的蒸汽;烟气排入大气之前,在空气预热器内被进一步冷却,烟气的热量传给要参与燃烧的空气,以改善炉内的燃烧工况和降低烟气的热量损失。

锅炉配置的主要辅助设备有磨煤机、送风机、引风机、除尘器等,这些设备担当着煤粉制备、送风、排烟和烟气净化等任务,它们和锅炉一起组成了复杂的物质能量转化系统;该系统消耗燃料和电能,产生蒸汽;系统转化效率监测、能量损失方向和数量分析,对于电厂运行管理有十分重要的意义。

实时性能监测诊断系统以数据采集为基础,利用锅炉运行数据,通过监测和诊断模型,连续计算性能参数和偏差损失,及时、客观地对机组运行经济性和能量损失状态进行分析,指导运行人员改进运行操作。

计算机网络技术的发展,使性能监测诊断系统在数据采集和网络链接实施上变得更为方便,而在监测诊断模型开发以及准确可靠的测量元件研制方面,还有更多工作,监测诊断模型涉及炉内燃烧、流动和传热分析,需要计算多种介质的物性参数,本章主要介绍锅炉系统常用介质的物性参数计算方法,在随后章节中将详细讨论锅炉运行监测、诊断和优化模型。

锅炉及辅助设备范围内,参与能量转化或热传递的介质主要有空气、烟气、水和水蒸气、煤和煤粉等,这些介质物性参数是人们在长期实践中积累的宝贵数据,是电厂设计和性能分析的基本数据,物性参数的程序化和软件化是开展电厂性能监测和节能诊断工作的前提。

第一节 空气和烟气物性参数

空气和烟气的常用物性参数包括密度、比热、运动黏度、导热系数、普朗特数和焓等。空气分为干空气和湿空气,干空气主要由氧气和氮气组成,干空气性质主要由这两种气体决定;湿空气包含一定数量的水蒸气,含湿量影响其物理性质,对于燃煤电厂锅炉,烟气是由煤燃烧生成的,烟气中主要包含二氧化碳、水蒸气、氧气、氮气、飞灰和一些微量气体,二氧化硫就是这些微量气体中的一种,虽然在烟气中含量很少,但它是炉膛内重要的辐射热传递介质,且在大气中形成酸雨,污染环境,

因此,它是不可忽略的气体。

烟气和空气的某些物性可以用组成它们的各种气体物性的加权和表示,因此,氧气、氮气、二氧化碳、二氧化硫、水蒸气和飞灰等基本成分的物性是烟气和空气物性计算的基础。

一、密度

密度是单位体积物质的质量,单位是 kg/m^3 。煤燃烧化学计算时,生成的各种气体量是以标准状态下的体积给出的,在进行物质平衡分析时,密度是各种气体质量和体积转化的纽带。

1. 气体密度

煤燃烧计算时,假定各种反应气体和生成物气体都是理想气体,每摩尔气体在标准状态(0°C 和 101325Pa 的压力)下的容积是 22.4Nm^3 ,在此条件下,根据各种气体的摩尔质量可计算出它们的密度,见表 1-1,认为干空气由氧气和氮气组成,其容积组成为 21% 和 79%。

表 1-1 煤燃烧主要反应物和生成物标准状态下的密度

气体	CO_2	N_2	O_2	H_2O	SO_2	CO	空气	干空气
分子量	44.01	28.02	32.00	18.02	64.07	28.01	28.69	28.86
密度 $\rho_0/(\text{kg}/\text{Nm}^3)$	1.965	1.251	1.429	0.805	2.860	1.250	1.281	1.288

标准状态下气体的密度见表 1-1,实际气体不可能完全是理想气体,表 1-1 给出的密度和实际数值的偏差可忽略不计。

对于某种理想气体,标准状态下密度为 ρ_0 ,任意压力 $P(\text{Pa})$ 和温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 下的密度为 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$,则

$$\rho = \rho_0 \frac{P}{101325} \frac{273}{273+t} = 2.694 \times 10^{-3} \frac{P}{273+t} \rho_0 \quad (1-1)$$

对于不同的气体,式中的 ρ_0 按表 1-1 选取。

因此,在锅炉及辅助系统中,各种气体的密度是压力 $P(\text{Pa})$ 和温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 的函数,有时,烟风道中的气体相对于大气环境处于微正压或微负压状态,对密度造成的影响较小,在缺少压力测量数据时,气体压力可取为 1 标准大气压(即 101325Pa)进行密度的估算。

2. 烟气的密度

1) 干烟气密度

干烟气主要由二氧化碳、氧气、氮气、二氧化硫和一氧化碳组成,体积百分数之和满足 $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{SO}_2 + \text{CO} = 100$,标准状态下干烟气密度 $\rho_{\text{gy}}^0 (\text{kg}/\text{m}^3)$ 等于

各种气体密度的加权和,即按下式计算:

$$\rho_{gy}^0 = \frac{CO_2}{100} \rho_{CO_2} + \frac{N_2}{100} \rho_{N_2} + \frac{O_2}{100} \rho_{O_2} + \frac{SO_2}{100} \rho_{SO_2} + \frac{CO}{100} \rho_{CO} \quad (1-2)$$

式中,各种气体的密度是指标准状态下的密度,按表 1-1 选取。

2) 烟气密度

这里的烟气是指湿烟气,湿烟气主要由二氧化碳、氧气、氮气、二氧化硫、一氧化碳和水蒸气组成,体积百分数之和满足 $CO_2 + O_2 + N_2 + SO_2 + CO + H_2O = 100$, 烟气标准状态下烟气密度 ρ_y^0 (kg/m^3) 按下式计算:

$$\rho_y^0 = \frac{CO_2}{100} \rho_{CO_2} + \frac{N_2}{100} \rho_{N_2} + \frac{O_2}{100} \rho_{O_2} + \frac{SO_2}{100} \rho_{SO_2} + \frac{CO}{100} \rho_{CO} + \frac{H_2O}{100} \rho_{H_2O} \quad (1-3)$$

式中,各种气体的密度按表 1-1 选取。

根据密度定义,标准状态下烟气密度 ρ_y^0 (kg/Nm^3) 也可以按照下式计算:

$$\rho_y^0 = \frac{G_y}{V_y} \quad (1-4)$$

式中, G_y 为 1kg 煤燃烧生成的烟气质量, kg/kg , 按第二章的式(2-97)计算; V_y 为 1kg 煤燃烧生成的烟气在标准状态下的体积, kg/Nm^3 , 按第二章的式(2-90)计算。

任意压力 P (Pa) 和温度 t ($^{\circ}C$) 下的干烟气密度 ρ_{gy} 或烟气密度 ρ_y , 可用式(1-1)计算。

在煤燃烧化学计算时,各种气体都是以标准状态下的容积表示的,因此,将它们转换成质量时,都应该乘以标准状态下的密度。

二、平均定压比热

平均定压比热用于计算物质焓值,以此进行能量平衡分析。

标准状态下单位容积的某种气体,将其从 $0^{\circ}C$ 加热到 $t^{\circ}C$ 时,所吸收的热量折算到每升高 $1^{\circ}C$ 时的数据,称为该气体在 $0 \sim t^{\circ}C$ 的平均定压比热,简称平均定压比热,单位是 $kJ/(Nm^3 \cdot ^{\circ}C)$ 。对于煤、煤粉和飞灰等固体物质,平均定压比热是以单位质量的该物质为基准,单位是 $kJ/(kg \cdot ^{\circ}C)$ 。

1. 气体平均定压比热

气体的平均定压比热一般指容积平均定压比热,各种气体的平均定压比热 c [$kJ/(Nm^3 \cdot ^{\circ}C)$] 可按下式计算:

$$c = (a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0) \times 4.1868 \quad (1-5)$$

温度的适用范围为 $t = 0 \sim 2500^{\circ}C$ 。

对于二氧化碳、氮气、空气、水蒸气,式(1-5)中的系数按表 1-2 选取,对于氧气和干空气,式(1-5)中的系数按表 1-3 选取。

表 1-2 二氧化碳等气体比热计算系数

系数	二氧化碳	氮气	空气	水蒸气	飞灰
a_0	0.38231419	0.30929091	0.31519196	0.3567226	0.17661723
a_1	$0.25207184 \times 10^{-3}$	$-0.53739164 \times 10^{-5}$	$0.35619473 \times 10^{-5}$	$0.24795243 \times 10^{-4}$	$0.17788785 \times 10^{-3}$
a_2	$-0.16633384 \times 10^{-6}$	$0.62620324 \times 10^{-7}$	$0.60760977 \times 10^{-7}$	$0.572072221 \times 10^{-7}$	$-0.26438212 \times 10^{-6}$
a_3	$0.76427112 \times 10^{-10}$	$-0.47710105 \times 10^{-10}$	$-0.51300306 \times 10^{-10}$	$-0.35393369 \times 10^{-10}$	$0.17199313 \times 10^{-9}$
a_4	$-0.20555466 \times 10^{-13}$	$0.1543612 \times 10^{-13}$	$0.17716406 \times 10^{-13}$	$0.91538884 \times 10^{-14}$	$-0.20249676 \times 10^{-13}$
a_5	$0.23407239 \times 10^{-17}$	$-0.1881896 \times 10^{-17}$	$-0.22616689 \times 10^{-17}$	$-0.92691428 \times 10^{-18}$	$-0.71330819 \times 10^{-17}$

飞灰的比热也按式(1-5)计算,但比热的单位是 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$,多项式系数见表 1-2。

表 1-2 的系数来自文献[1],表中的空气是指 1kg 干空气中含有 10 g 水蒸气的湿空气。表 1-3 的系数是根据文献[2]数据拟合得到的。

根据上述系数计算比热时,计算值与实际数据之间有一定的误差,对于氮气,相对误差在 $-0.73\% \sim 0.45\%$,对于干空气,相对误差在 $-0.66\% \sim 0.42\%$,对于氧气,相对误差在 $-0.68\% \sim 0.47\%$ 。

表 1-3 氧气等气体比热计算系数

系数	氧气	干空气	一氧化碳
a_0	0.129642×10^1	0.128849×10^1	$0.129042261108 \times 10^1$
a_1	2.3667×10^{-4}	0.108928×10^{-3}	$0.10048273 \times 10^{-3}$
a_2	-0.662118×10^{-7}	0.187619×10^{-7}	0.2965×10^{-7}
a_3	0.813756×10^{-11}	$-0.971655 \times 10^{-11}$	0.126434×10^{-10}
a_4	0	0	0
a_5	0	0	0

2. 质量平均定压比热

平均定压比热是以单位质量而不是单位体积的气体量为基准,这种比热可称为质量平均定压比热,单位是 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$,记为 c^m ,前面以单位体积气体为基准的比热 c 可称为容积平均定压比热, c 与 c^m 的关系为

$$c^m = \frac{c}{\rho_0} \quad (1-6)$$

式中, ρ_0 为标准状态下的气体密度,按表 1-1 选取。

3. 煤的比热

煤的比热 c_r [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]按下式计算:

$$c_r = c_{r,d} \frac{100 - M_{\text{ar}}}{100} + 4.1868 \frac{M_{\text{ar}}}{100} \quad (1-7)$$

式中, $c_{r,d}$ 为煤的干燥基比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 按式(1-8)计算; M_{ar} 为煤的收到基水分, %。

$$c_{r,d} = \frac{c_h A_d + c^r (100 - A_d)}{100} \quad (1-8)$$

式中, c_h 为煤中灰的比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 按式(1-9)计算; A_d 为煤的干燥基灰分, %; c^r 为煤中可燃物质的比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 按式(1-10)计算。

$$c_h = 0.71 + 5.02 \times 10^{-4} t \quad (1-9)$$

$$c^r = 0.84 + 37.68 \times 10^{-6} (13 + V_{daf}) (130 + t) \quad (1-10)$$

式中, V_{daf} 为煤的干燥无灰基挥发分, %; t 为煤的温度, $^\circ\text{C}$ 。

可见, 煤的比热与 M_{ar} 、 A_d 、 V_{daf} 及温度 t 有关。

4. 烟气平均定压比热

1) 干烟气的平均定压比热

干烟气主要由二氧化碳、氧气、氮气、二氧化硫和一氧化碳组成, 这些气体的体积百分数之和满足 $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{SO}_2 + \text{CO} = 100$, 干烟气的容积平均定压比热 $c_{gy} [\text{kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C})]$ 等于组成它的各种气体比热的加权和, 即按下式计算:

$$c_{gy} = \frac{\text{CO}_2}{100} c_{\text{CO}_2} + \frac{\text{N}_2}{100} c_{\text{N}_2} + \frac{\text{O}_2}{100} c_{\text{O}_2} + \frac{\text{SO}_2}{100} c_{\text{SO}_2} + \frac{\text{CO}}{100} c_{\text{CO}} \quad (1-11)$$

式中, 各种气体的容积定压比热 c_{CO_2} 、 c_{N_2} 、 c_{O_2} 、 c_{CO} 根据式(1-5)计算, 二氧化硫含量不大, 比热与二氧化碳接近, 可取 $c_{\text{SO}_2} = c_{\text{CO}_2}$ 。

干烟气的质量平均定压比热 $c_{gy}^m [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$ 按下式计算:

$$c_{gy}^m = \frac{44.01 c_{\text{CO}_2}^m \text{CO}_2 + 28.02 c_{\text{N}_2}^m \text{N}_2 + 32.00 c_{\text{O}_2}^m \text{O}_2 + 64.07 c_{\text{SO}_2}^m \text{SO}_2 + 28.01 c_{\text{CO}}^m \text{CO}}{44.01 \text{CO}_2 + 28.02 \text{N}_2 + 32.00 \text{O}_2 + 64.07 \text{SO}_2 + 28.01 \text{CO}} \quad (1-12)$$

式中, 各种气体的质量平均定压比热 $c_{\text{CO}_2}^m$ 、 $c_{\text{N}_2}^m$ 、 $c_{\text{O}_2}^m$ 、 c_{CO}^m 根据式(1-6)计算, 二氧化硫含量不大, 可以忽略或取 $c_{\text{SO}_2}^m = c_{\text{CO}_2}^m$ 。

2) 烟气的平均定压比热

烟气由于干烟气和水蒸气组成, 主要包括二氧化碳、氧气、氮气、二氧化硫、一氧化碳和水蒸气, 体积百分数之和满足 $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{SO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{O} = 100$, 烟气的容积平均定压比热 $c_y [\text{kJ}/(\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C})]$ 按下式计算:

$$c_y = \frac{\text{CO}_2}{100} c_{\text{CO}_2} + \frac{\text{N}_2}{100} c_{\text{N}_2} + \frac{\text{O}_2}{100} c_{\text{O}_2} + \frac{\text{SO}_2}{100} c_{\text{SO}_2} + \frac{\text{CO}}{100} c_{\text{CO}} + \frac{\text{H}_2\text{O}}{100} c_{\text{H}_2\text{O}} \quad (1-13)$$

烟气的质量平均定压比热 $c_y^m [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$ 按下式计算:

$$c_y^m = \frac{44.01 c_{\text{CO}_2}^m \text{CO}_2 + 28.02 c_{\text{N}_2}^m \text{N}_2 + 32.00 c_{\text{O}_2}^m \text{O}_2 + 64.07 c_{\text{SO}_2}^m \text{SO}_2 + 28.01 c_{\text{CO}}^m \text{CO} + 18.02 c_{\text{H}_2\text{O}}^m \text{H}_2\text{O}}{44.01 \text{CO}_2 + 28.02 \text{N}_2 + 32.00 \text{O}_2 + 64.07 \text{SO}_2 + 28.01 \text{CO} + 18.02 \text{H}_2\text{O}} \quad (1-14)$$

式中, 各种气体的质量平均定压比热 $c_{\text{CO}_2}^m$ 、 $c_{\text{N}_2}^m$ 、 $c_{\text{O}_2}^m$ 、 c_{CO}^m 、 $c_{\text{SO}_2}^m$ 、 $c_{\text{H}_2\text{O}}^m$ 根据式(1-6)计算。