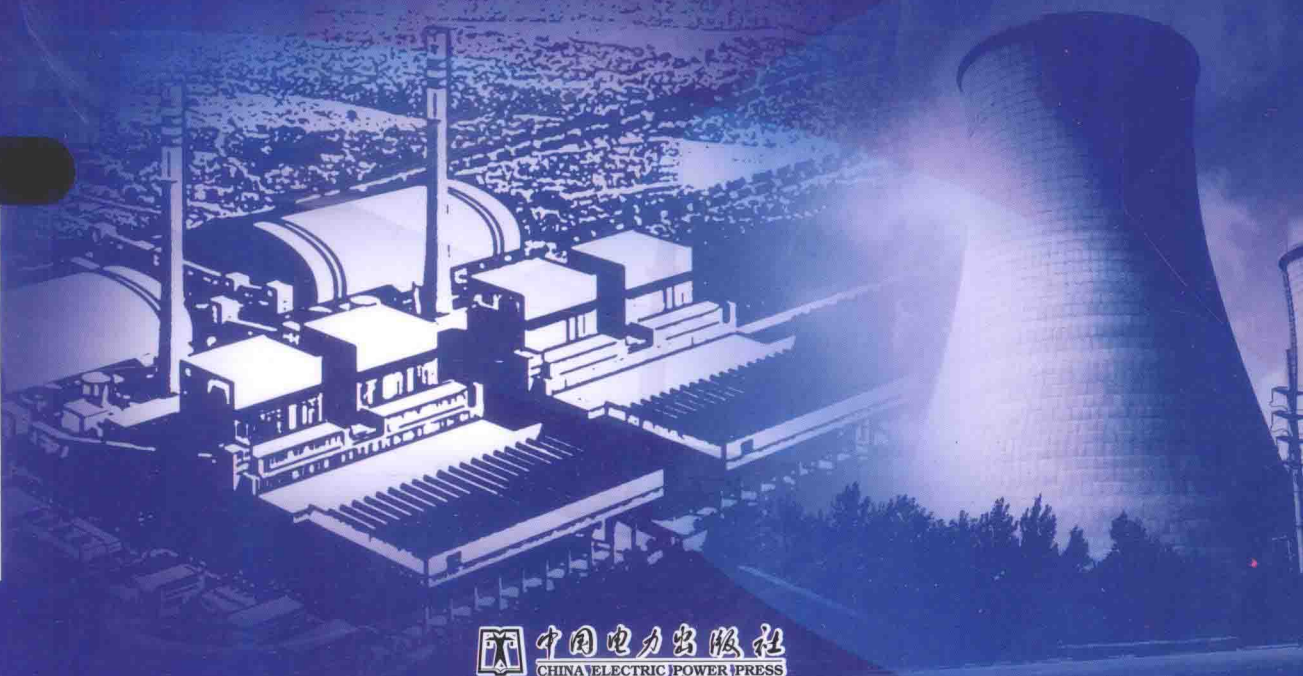


DAXING DIANZHAN GUOLU XITONG

SHUZHIMONI JISHU YU GONGCHENG YINGYONG

大型电站锅炉系统 数值模拟技术与工程应用

李德波 徐齐胜 著



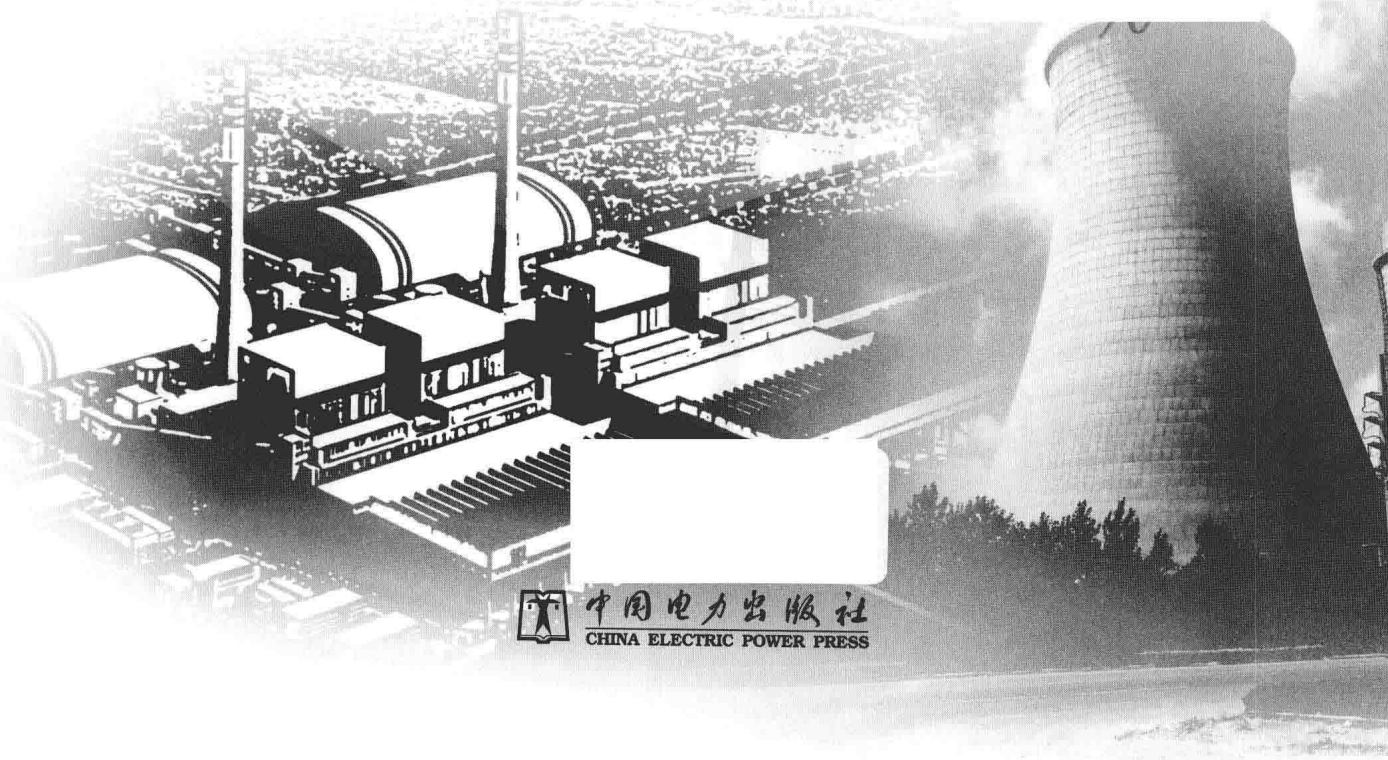
中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DAXING DIANZHAN GUOLU XITONG
SHUZHIMONI JISHU YU GONGCHENG YINGYONG

大型电站锅炉系统 数值模拟技术与工程应用

李德波 徐齐胜 著

常州大学图书馆
藏书章



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书介绍了数值模拟计算技术在大型电站锅炉及系统中的应用, 主要包括数值模拟技术发展现状、数值模拟理论技术、数值模拟技术在大型电站锅炉(四角切圆燃烧锅炉、前后对冲旋流燃烧锅炉、50MW 生物质循环流化床燃烧锅炉)中应用、数值模拟技术在选择性催化还原脱硝系统中应用、数值模拟技术在湿法脱硫系统中应用、超(超)临界压力燃煤锅炉现场优化运行技术等。本书包含了笔者多年来从事数值模拟技术在大型电站锅炉及系统应用研究的系统总结, 也是国内唯一一本专门介绍数值模拟技术在电站锅炉及系统工程应用的专著。

本书可作为高等院校和科研机构从事电站锅炉数值模拟技术研究人员的参考资料, 也可作为电站锅炉一线技术人员进行工程问题分析的辅助用书。

图书在版编目(CIP)数据

大型电站锅炉系统数值模拟技术与工程应用/李德波, 徐齐胜著. —北京: 中国电力出版社, 2015.10
ISBN 978-7-5123-7507-9

I. ①大… II. ①李…②徐… III. ①火电厂—锅炉—数值模拟 IV. ①TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 067289 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 10 月第一版 2015 年 10 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.25 印张 329 千字
印数 0001—2000 册 定价 45.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

序

历经数年时间，由广东电科院锅炉所李德波博士（高级工程师）和徐齐胜所长（教授级高级工程师）合作完成的《大型电站锅炉系统数值模拟技术与工程应用》出版了。这是国内一本不可多得的关于数值模拟技术在电站锅炉及其系统工程应用方面的著作，是作者多年从事数值模拟技术研究所取得成果的总结，也是作者长时间扎根工程应用一线经验和心得的凝练。

大型火力发电厂锅炉岛系统（包括锅炉本体、脱硝、除尘器、脱硫系统等）数值计算与仿真测试涉及众多学科的知识，包括计算流体力学、计算燃烧学、传热学、气固多相流、气液两相流、化学反应动力学等，近年来随着计算机技术的飞速发展，尤其是高性能计算机硬件技术和软件技术的飞速发展，利用数值模拟软件（ANSYS FLUENT、ANSYS CFX、CHEMKIN）来模拟大型电站锅炉炉内燃烧状况和污染物的生成过程的火力发电厂数值计算和仿真测试方法，已经成为一种可行有效的技术手段，在现场得到了广泛的应用。

李德波博士、徐齐胜所长两人在浙江大学攻读学位时，研究方向就是煤粉燃烧数值模拟，在此期间，他们对数值模拟技术进行了较为深入的研究，打下了坚实的数值模拟理论基础。李德波博士在浙江大学攻读博士学位期间，承担了国家自然科学基金重点项目，开发了煤粉燃烧直接数值模拟程序，克服了数值模拟技术中的一些复杂技术难题，这为他参加工作后理解数值模拟思想，应用数值模拟技术解决工程问题打下了很好的基础；李德波博士工作期间利用 ANSYS FLUENT 软件进行了电站锅炉系统数值模拟技术与工程应用研究，涵盖了锅炉炉内燃烧及其污染物控制过程数值模拟、SCR 脱硝过程数值模拟等工作，发表了多篇有较强工程应用价值的论文，取得了一批工程创新技术成果。徐齐胜所长毕业后工作至今，成功地负责过数台大型火电机组的调试，在锅炉调试、试验、数值计算、燃烧优化分析及污染物控制等方面，有着丰富的工程经验，为本书的数值模拟技术良好应用到工程实践中奠定了坚实基础。

《大型电站锅炉系统数值模拟技术与工程应用》一书，包括了数值模拟技术在电站锅炉燃烧、SCR 脱硝、湿法脱硫等技术中实践与应用，几乎涵盖了大型电站锅炉系统各个方面，较为系统全面。随着计算机硬件和软件技术的发展，数值模拟技术将在大型电站锅炉及系统安全、经济、环保运行方面，发挥重要作用，可以预期本书对其他从事数值模拟研究的技术人员有重要的参考和指导意义。

中国工程院院士
浙江大学岑可法
2015.8.24

前 言

本书是总结数值模拟技术在大型电站锅炉及系统应用方面的专著，结合作者长期在电力生产一线开展的调试、试验和技术监督的工作经验，花费三年时间，利用数值模拟技术进行了电站锅炉本体、脱硝系统、脱硫系统等数值模拟研究工作，并对数值模拟结果与现场试验结果进行了对比验证，解决了一些工程上传统试验测量手段无法解决的技术难题，取得了一批工程创新的技术成果。

数值模拟技术（numerical simulation method）指的是利用高性能计算机，结合电站锅炉相关的基础理论开展的基于计算流体力学（computational fluid dynamics, CFD）方法的研究工作，它是目前学术界和工程界一种新的技术手段。相比传统试验测量手段，CFD 技术具有独特的优势，能够克服工程上仪表测量困难、测量数据有限等缺陷，逐渐得到工程界的重视。

本书绝大部分内容是笔者多年来从事数值模拟技术在大型电站锅炉及系统应用研究的系统总结，也是国内唯一的专门介绍数值模拟技术在电站锅炉及系统工程应用的专著。本书可作为高校和科研机构从事电站锅炉数值模拟技术研究的一本重要参考资料，提升我国数值模拟理论技术在解决现场实际工程问题的研究实力，同时也可以作为电站锅炉一线技术人员进行工程问题分析的辅助技术手段。

本书由李德波、徐齐胜编著，共包含六章，其中第一章由徐齐胜编写，第二至六章由李德波编写。李德波负责全书的统稿工作。

由于作者水平、经验所限，书中难免有疏漏和不足之处，诚恳希望读者批评指正。

作 者

2015 年 8 月

目 录

序
前言

第一章 概述	1
第一节 数值模拟研究背景与意义	1
第二节 国内外数值模拟发展现状	1
第三节 电站锅炉数值模拟技术的国内外应用进展	2
第二章 数值模拟理论技术	8
第一节 计算流体力学的理论基础及相关的物理模型	8
第二节 控制方程的数值离散与计算方法	17
第三节 炉内全过程数值模拟方法概述	19
第四节 网格处理方法	35
第三章 数值模拟技术在大型电站锅炉中应用	42
第一节 四角切圆煤粉锅炉变风速下 LES 研究	42
第二节 四角切圆煤粉锅炉再燃改造过程数值模拟研究	48
第三节 旋流燃烧煤粉锅炉高温腐蚀数值模拟研究	55
第四节 旋流燃烧器大面积烧损关键原因及其改造措施研究	64
第五节 前后对冲旋流燃烧煤粉锅炉 CO 分布规律试验研究	78
第六节 超超临界压力旋流对冲燃烧煤粉锅炉 NO _x 分布数值模拟研究	85
第七节 旋流燃烧煤粉锅炉主要烟气组分及分布规律试验研究	95
第八节 50MW 生物质循环流化床锅炉二维冷态数值模拟研究	104
第九节 50MW 生物质循环流化床锅炉三维冷态流动和磨损规律数值 模拟研究	114
第十节 50MW 生物质循环流化床锅炉二维热态数值模拟研究	119
第四章 脱硝系统的流动传热的数值模拟研究	125
第一节 我国电站锅炉 SCR 脱硝系统服役过程中运行规律研究	125
第二节 我国 SCR 脱硝催化剂服役过程中运行规律研究	130
第三节 SCR 脱硝系统三维热态数值模拟若干关键问题研究	140
第四节 SCR 脱硝系统导流板优化数值模拟研究	147
第五节 中国燃煤电站 SCR 催化剂更换周期及策略优化数学模型的研究	153
第六节 燃煤电站 SCR 脱硝催化剂更换策略研究	158

第七节 我国 SCR 脱硝催化剂严重磨损原因分析及改造关键技术研究	164
第五章 数值模拟技术在湿法脱硫系统中应用	171
第六章 超（超）临界压力燃煤锅炉现场优化运行技术	181
第一节 贫煤锅炉燃用高挥发分烟煤的燃烧调整研究及工程实践	181
第二节 四角切圆锅炉低氮改造关键技术与工程实践	189
第三节 锅炉低负荷运行屏式过热器管壁超温的控制策略及实践	196
第四节 三合一联合引风机在 1045MW 火电机组中的应用实践研究	201
参考文献	209
致谢	218

第一节 数值模拟研究背景与意义

我国经济快速增长,各项建设取得巨大成就,但也付出了巨大的资源和环境代价,经济发展与资源环境的矛盾日趋尖锐,群众对环境污染问题反应强烈。这种状况与经济结构不合理、增长方式粗放直接相关。若不加快调整经济结构、转变增长方式,则资源将支撑不住,环境将容纳不下,社会将承受不起,经济发展将难以为继。只有坚持节约发展、清洁发展、安全发展,才能实现经济又好又快发展。

随着国民经济的快速发展,我国对电力的需求更加突出,这也促进了我国火力发电工业的蓬勃发展,超临界、超超临界、W形火焰、循环流化床等大容量、新炉型机组已逐渐发展成为主力机组,极大地提升了我国火力发电工业的规模和技术水平。然而,在新的国内外形势下,环保压力对火力发电厂降低能耗和减少污染物排放也提出了更高的要求。过去采用搭建小实验台的方法对于研究电站锅炉炉内燃烧状况和污染物生成不仅成本大,而且周期长,但近年来随着计算机技术的飞速发展,尤其是超级计算机硬件技术和软件技术的飞速发展,用计算机软件来模拟电站锅炉炉内燃烧状况和污染物生成过程的火力发电厂大规模并行数值计算和仿真测试方法已经成为可能,并得到了广泛的应用。

由于大型火力发电厂炉内换热过程是一个与流动、传热、传质和燃烧等有关的复杂的物理化学过程,理论分析求解几乎是不可能的。长期以来,锅炉的模化试验和现场热态试验一直是探索这一复杂过程的有效手段,但是进行试验研究需要大量的人力、物力与资金,试验周期长,而且受到许多客观因素的制约,难以获得全面的结果,对大型锅炉更是如此。随着电子计算机的不断发展,人们开始寻求用数值模拟的方法来研究炉膛内的燃烧及传热过程。

为了尽可能完整地了解炉膛内复杂的物理化学过程,当前普遍采取的是试验研究与数值模拟相结合的办法。试验研究可以直接为工程设计及运行提供一定的参考数据,同时也可以检验数值模拟结果的正确与否,为进一步改进和发展数值模拟理论提出一定的依据。数值模拟可以避免试验过程中一些无法回避的偶然因素,提供某些试验过程中无法获得的数据,这也是研究炉内燃烧与传热过程的发展方向。

第二节 国内外数值模拟发展现状

火力发电厂数值计算与仿真测试涉及众多学科的知识,包括计算流体力学、燃烧学、

传热学、气固两相流、气液两相流、化学反应动力学等,借助于这些学科和计算科学的快速发展,利用计算机来模拟火力发电厂相关物理化学过程成为一种可能,并逐渐发展成为一种有效的研究手段。

众所周知,开展对火力发电厂数值计算与仿真测试研究的基础是对电站锅炉炉内各物理化学过程的模拟,自 20 世纪 70 年代,炉内燃烧模型就开始发展,有代表性的如 Gibson 的化学模型的提出、Spalding 的湍流燃烧模型的提出和 Grow 的气固两相流模型的提出。20 世纪 70 年代末到 80 年代末 90 年代初,各种燃烧模型开始应用于炉内的模拟,相关模型和计算方法进一步完善,炉内燃烧的模拟也经历了从采用较粗糙网格计算的冷态模拟到计算气相燃烧的热态模拟和计算气固两相燃烧的热态综合模拟等阶段,这一阶段中选用的燃烧模型逐步复杂化,计算结果也开始与试验数据进行对比。20 世纪 90 年代至今是炉内燃烧过程数值模拟走向成熟的阶段,计算开始向实际应用靠拢,炉内全三维模拟和各种复杂模型应用于计算当中,计算的结果开始与现场实测数据进行比较,模拟也开始转向具有更有实际应用价值的炉内燃烧、污染物生成、结渣和飞灰的生成模拟,炉内燃烧过程的数值模拟趋于全面和实用阶段,推出了许多专业的商业软件,最具有代表性的有英国帝国理工大学教授 Spalding 等人开发的 PHOENICS 软件,以及其他的如 ANSYS FLUENT、Star-CD、CFX、CFX-TASCFLOW 等大型软件。

国内对于炉内燃烧过程的数值模拟研究也取得了很大的进展,尤其是最近几年,国内研究者对超临界和超超临界参数电站煤粉锅炉进行了燃烧过程数值模拟研究,为实际运行提供了重要的参考信息,显著提升了超临界和超超临界参数锅炉设计、运行的水平。这些计算中受计算资源的限制非常突出,较多关键模型都进行了简化,例如湍流模型的选择为简单的各向同性 $k-\varepsilon$ 模型,边界入射条件采用单一速度喷射,炉内辐射换热也只采用 P-1 等简化模型,虽然用于对电站锅炉内部各机理的研究还有较大的缺陷,但正如浙江大学的岑可法院士和樊建人教授所说,采用数值计算和仿真测试这种方法,以计算机辅助试验(CAT)的角色来替代部分成本高的现场测试还是具有非常积极意义的。

近年超级计算技术的出现进一步促进了数值模拟技术在大型火力发电厂的应用。通过采用高精度计算模型和更细化的网格结构,对炉内燃烧因素,诸如过量空气系数、附加风、煤种、负荷、燃烧器摆角和燃尽风率等进行更广泛的研究,以及为电厂主要污染物脱除部件湿法脱硫系统和选择性催化还原脱硝系统内部流动和反应过程进行深入研究提供了有效途径。将大规模数值模拟技术引入到传统火力发电厂电站锅炉数值计算等领域的尝试,进一步促进了该领域的发展和提升了我国火力发电厂在节能减排方面的潜力与技术服务水平。

第三节 电站锅炉数值模拟技术的国内外应用进展

1. 四角切圆锅炉应用

孟凡敬等对 350MW 四角切圆煤粉锅炉燃烧以及 NO_x 排放过程进行了详细的数值模拟研究。他主要分析了各工况下炉膛内的温度场分布、速度场分布、组分场分布以及 NO_x

生成的情况。通过数值模拟的结果与现场试验对比,发现数值模拟得到的结果符合四角切圆燃烧炉实际运行情况,模拟结果与试验较好吻合。孟凡敬等仅仅研究了额定工况下停用不同层一次风,以及燃尽风风速对 NO_x 排放的影响,分析了在改变这些因素对炉内燃烧的影响,他建议继续研究燃烧器喷口摆动角度对 NO_x 排放的影响,以及低负荷下燃尽风风速及喷口摆角对 NO_x 排放的影响。

刘丽萍等以大化集团新建热电厂蒸汽流量为 220t/h 的四角切圆煤粉锅炉为研究对象,对炉膛燃烧过程进行了数值计算。数值计算的结果符合四角切圆锅炉基本规律,与热力计算的结果吻合。数值模拟发现,在均等配风、正宝塔配风和倒宝塔配风三种配风方式中,正宝塔配风时火焰位于燃烧器的中心位置,切圆燃烧状况良好;过大的过量空气系数使燃料型 NO_x 生成较多,炉膛出口平均 NO_x 质量浓度增多,因此建议过量空气系数在 1.1~1.5。由于计算机硬件方面的原因,刘丽萍对实际锅炉作了很多简化,计算中所采用的网格数不够多,导致数值模拟的细节不够清晰。在屏区的数值模拟方面,刘丽萍未考虑这部分网格的影响,导致数值模拟的结果不能正确反映屏区温度场分布的规律。

刘霞等采用数值模拟技术,对蒸汽流量为 400t/h 的四角切圆煤粉锅炉分级燃烧技术降低 NO_x 排放进行了研究。得到了炉膛内温度场、速度场、组分浓度场、 NO_x 生成的规律。数值模拟得到 NO_x 降低率达到 31%,国外多年实际运行经验表明一般分级风技术降低 NO_x 在 20%~35%,这说明刘霞等的改造方式是较为成功的,进行数值模拟得到的结果是可行的。

谭灿等对 700MW 切圆锅炉混煤燃烧过程进行了数值模拟。他通过图像处理技术,进行了冷态模拟的伪扩散研究,提出了对计算网格体系进行评价的方法,该方法能选出有效减少伪扩散影响的网格体系。由于计算机硬件资源的限制,谭灿等计算中采用的网格不够多,在构造计算区域时,对相应的复杂结构进行了简化,对数值模拟结果精度造成了一定的影响。

贾艳艳等对四角切圆燃煤锅炉超细煤粉再燃过程进行了数值模拟研究。通过分析超细煤粉再燃条件下热解特性和揭示超细煤粉再燃过程 NO_x 生成/还原机理,评估了大型计算软件 ANSYS FLUENT 自带煤粉再燃还原 NO_x 模型的有效性及其适用范围,基于焦炭 N 转化为 NO 模型,提出了考虑还原性组分 H_2 对 NO 的还原和燃料再燃对 HCN 含量的影响的改进模型,使得 NO_x 浓度的计算结果最大偏差由 26%降低到 9%。贾艳艳等全面系统地分析了燃煤特性(粒度和煤种)和燃烧工艺参数(再燃区长度、再燃燃料投射位置、再燃区过量空气系数、再燃量)对 NO_x 排放以及脱除率、飞灰含碳量和锅炉热效率的影响规律,得到了锅炉燃烧综合效果较好时各参数的优化配置。针对大型四角切圆燃烧煤粉锅炉设计了改造方案,全方位定量分析比较了空气分级、天然气再燃、超细烟煤再燃与超细褐煤再燃 4 种改造方案。通过评价不同改造方案优劣的方法,从而确定了最优的改造方案和最佳的再燃燃料,为将数值试验数据推广到现场煤粉再燃技术应用研究开拓了新的方法和思路。贾艳艳等着重对再燃燃料特性对 NO_x 排放和飞灰含碳量的影响进行了研究,但是主燃料特性的影响没有考虑,这是需要进一步研究的方向。在数值模拟精度方法,贾艳艳等模拟方法虽然提高了模拟精确度,但是数值模拟的精度有待进一

步提到,贾艳艳等提出需要进一步研究的三个方向:

(1) 挥发分析出模型。双竞争反应热解模型的通用试验参数只对烟煤和褐煤有比较好的适用性,但是对其他煤种(贫煤、无烟煤等)热解的预测还需要进行试验研究,得到数值模拟的经验参数。

(2) 焦炭燃烧模型。基于 CBK8 的焦炭燃烧模型和渗透模型对飞灰含碳量的预测精度较高,因为这个模型考虑了焦炭的内部孔洞结构,今后可以采用这个模型对飞灰含碳量进行更加精确的预测。

(3) NO_x 生成/还原模型。需要进一步深入地研究 NO_x 生成/还原机理,考察 NO_x 生成/还原反应速率在氧化性和还原性氛围中的差别,挥发分 N 与焦炭 N 向 NO_x 的转化率。

蔡晓辉等利用 ANSYS FLUENT 数值计算软件对某电厂 600MW 超临界压力四角切圆燃煤锅炉进行了全炉膛三维数值模拟,数值模拟得到了炉膛内温度场、速度场、烟气组分场的分布。通过对数值模拟结果的分析,得到容易形成灰污层的壁面,将壁面温度与煤灰的软化温度 DT 进行比较,从而判断出炉膛内容易沾污的区域。蔡晓辉等在上述数值计算方法的基础上,对两种校核煤种的沾污情况进行对比,结果表明:这种判断炉内沾污情况的方法简单易行,能够较为准确地判断结渣区域,对防止锅炉结渣、提高锅炉效率和减少锅炉事故有一定的参考价值。由于缺少试验数据,蔡晓辉等数值模拟的结果不能与试验结果进行对比,数值模拟的结果还需要进一步验证;在浓淡燃烧器的建模方面,蔡晓辉等采用了简化方法,给计算结果的精度带来一定的影响。

为了对锅炉进行再燃改造,李德波等采用数值模拟的方法,对某电厂一台蒸汽流量为 220t/h 的四角切圆燃烧锅炉再燃改造前后炉内的气流场、温度场和污染物排放特性进行了研究,并对再燃区过量空气系数对再燃改造效果的影响进行了探讨。大涡模拟(LES)和结果与现场的试验数据进行了对比验证,包括温度场、组分场和 NO_x 。LES 模拟结果与试验结果吻合比较好。计算结果表明:使用再燃改造后炉膛温度分布更加均匀;再燃喷口附近形成了还原性气氛,降低了 NO_x 浓度;当再燃区过量空气系数为 0.90 时,再燃效果最佳,此时炉膛出口处 NO_x 浓度下降 33.87%;LES 模拟结果较 realizable $k-\varepsilon$ 模型准确。李德波等人采用数值模拟的方法,对某电厂一台蒸汽流量为 220t/h 的四角切圆燃烧锅炉风速改变前后炉内的气流场、温度场和污染物排放特性进行了研究,将 LES 模拟的结果与现场的试验数据进行了对比验证。数值模拟的结果为电厂运行提供了理论上的指导。其他研究者也针对四角切圆燃烧煤粉锅炉进行了工程问题的数值模拟研究。

2. 前后对冲旋流燃烧锅炉应用

方月兰等以某电厂 2 号锅炉旋流煤粉燃烧器为研究对象,对中心给粉旋流燃烧器进行了数值模拟研究。研究发现适当地增加内二次风旋流叶片角度可以增大燃烧器的回流区和扩展角。但是当内二次风旋流叶片角度过大时,一、二次风初期混合过于强烈,后期扰动减弱。适当的内二次风叶片角度使燃烧器具有大而且稳定的回流区和扩展角,有利于锅炉的稳燃。

王蕾等对 600MW 对冲燃煤锅炉降低 NO_x 排放进行了数值模拟研究。王蕾等通过改

变旋流数和不同的风量配比,对炉膛内 NO_x 的生成进行了数值模拟。研究发现,二次风的旋流数增大使得炉膛中心的温度升高, NO_x 生成增多;采用空气分级技术,减小二、三次风量,增加燃尽风量,炉膛中心温度降低,炉膛出口温度变化幅度很小,出口 NO_x 减少,煤粉燃烧效率下降,出口飞灰热损失增加。因此采用低 NO_x 燃烧技术(空气分级燃烧)可以使 NO_x 排放低于国家环保标准,但是采用空气分级燃烧降低 NO_x 的生成,需要采用低温燃烧和降低过量空气系数,这个对于燃料完全燃烧不利,需要在降低过量空气量的同时,保证燃烧稳定,防止发生高温腐蚀的可能。王蕾等在建立物理模型时,对锅炉结构进行了简化,省略了后烟道过热器和省煤器,这样降低了计算精度。王蕾等建议在 NO_x 生成机理方面需要进一步研究,需要单独对热力型 NO_x 、燃料型 NO_x 的生成、分布规律做详细的数值模拟,分析与燃烧区域组分浓度场、温度场等的关联性。

崔星源等依托“十五”国家高技术研究发展技术(863 计划)课题“超超临界燃煤发电技术”中子课题“超超临界机组电站设计与运行技术研究”进行了超临界压力煤粉锅炉低 NO_x 燃烧数值模拟研究。崔星源等选用了适当的数学模型和计算方法,对国产首台 600MW 超临界压力旋流燃烧煤粉锅炉炉内过程进行了数值模拟,得到了炉内流动、传热、燃烧和 NO_x 生成过程的规律。数值模拟的结果与热态试验数据进行了比较,两者吻合比较好。数值模拟结果显示,减小主燃区的过量空气系数、增大还原区的行程、降低主燃区温度,有利于降低 NO_x 的排放量,这个对于锅炉设计与运行具有指导意义。崔星源等在数值模拟方法取得了一些有价值的结论,对超临界压力旋流燃烧煤粉锅炉设计和运行具有重要的意义,但是存在几个问题:①在炉膛建模过程中,对锅炉炉膛进行了简化处理,降低了计算的精度;②在数值模拟的过程中,采用了 ANSYS FLUENT 自带的模型和便捷条件设置,但是与实际工程问题并不能完全吻合,需要在今后的研究中利用 ANSYS FLUENT 自带的 UDF 接口对模型做进一步的完善;③由于 NO_x 的生成机理目前还不完全清楚,在模拟 NO_x 的生成/还原方面,数学模型本身有一定的局限性,需要进一步完善 NO_x 生成/还原的数学模型。

陈娅丽等对 600MW 超临界压力前后对冲锅炉进行了流动、传热、燃烧的数值模拟。通过改变燃烧器区域外二次风旋流强度、改变过量空气系数、改变燃尽风与燃烧器区域二次风的比例以及改变煤粉细度等,分析对流场、氧量场、温度场、氮氧化物排放以及飞灰含碳量和燃尽率的影响。陈娅丽等总结了模拟超临界压力锅炉时所需要的数学模型,数值模拟的结果为同类型锅炉的安全运行提供了指导依据,但是陈娅丽等在数值模拟计算中没有考虑颗粒的辐射换热,同时对负荷变化对炉内流场、氧量场、温度场以及氮氧化物排放的影响没有进行研究。

刘建全等对 1000MW 超超临界压力旋流燃烧锅炉的稳燃特性进行了数值模拟研究,研究了燃烧器一、二次风口形状对燃烧器热态流场、温度场分布的影响,通过考虑 NO 的排放量,对燃烧器的结构进行了优化,采用数值模拟的手段提出了旋流燃烧器的改进方案。

方庆艳等对一台 1000MW 超超临界压力前后墙对冲燃烧煤粉锅炉进行了炉内流动、传热、燃烧和 NO_x 排放特性的数值模拟研究。他们的研究表明,数值模拟的结果与现场

试验结果吻合比较好;不同磨煤机组合运行方式对煤粉颗粒在炉膛内的停留时间、燃烧器区域空气分级效果、下炉膛出口烟气温度和水冷壁壁面热流分布有不同的影响。

刘泰生等通过数值模拟,对一台 600MW 对冲燃烧煤粉锅炉满负荷下燃尽风对炉内流动、燃烧和传热过程影响进行了研究。研究发现燃尽风的使用降低了 NO_x 排放浓度,同时燃尽风导致煤粉燃烧效率下降。

针对某电厂 660MW 超临界压力东方锅炉(集团)股份有限公司外浓内淡型低 NO_x (DBC-OPCC) 旋流燃烧器发生大面积烧损,给电厂带来严重经济损失的实际情况,李德波等详细分析了旋流燃烧器烧损的原因,包括燃烧器材料选择、结构设计上的缺陷、现场运行方面存在问题等方面。通过全炉膛的热态数值模拟,得到旋流燃烧器烧损的关键原因。通过分析提出了 DBC-OPCC 型旋流燃烧器结构设计、材料选择等方面的改造措施,以及在今后这种类型旋流燃烧器运行的改造方案,为今后同类型旋流煤粉燃烧器的安全、稳定运行提供了重要的理论根据。

王政允等针对某电厂燃烧器一次风管磨损严重,同时后墙水冷壁高温腐蚀的情况,通过数值模拟,提出了保持原燃烧器一次风管尺寸不变、减小中心风管直径、增大一次风流通面积来减小一次风速的改造方案。通过数值模拟得到了不同中心管直径对炉膛后墙安全性影响最小的改造方案,从而为电厂的实际改造提供了参考。

李永华等对 800MW 锅炉混煤燃烧过程进行了数值模拟。由于混煤燃烧特性很难用单一煤种特性简单叠加而成,因此采用数值模拟方法,李永华等得到了混煤燃烧温度分布,对现场混煤燃烧运行具有重要的指导意义,保障了混煤燃烧锅炉的安全、经济运行。其他研究者针对四角切圆锅炉开展了具体工程问题的数值模拟研究。

3. 双切圆燃烧锅炉应用

张树坡等利用 CFX-TASCLOW 软件对 1000MW 双切圆燃烧方式的超超临界压力锅炉炉内燃烧过程进行了数值模拟研究,通过改变过量空气系数、附加风率、煤种、负荷、燃烧器投运方式、燃尽风率和燃烧器摆角七种对燃烧影响的因素,得到了炉膛内的流场、温度场、组分场合炉膛出口参数。张树坡等在考虑影响炉内燃烧的因素时只是分别拿出单个因素进行讨论,并没有将两个或者多个因素共同影响炉内燃烧的情况考虑进去,而两个或者多个因素共同影响炉内燃烧的情况在电站锅炉实际运行中是常见的情况,因此需要进一步研究,将影响炉膛内燃烧的因素综合考虑,找出炉内燃烧最佳工况下各个影响因素的参数,从而为现场实际运行提供指导。

申春梅等采用计算流体力学软件 PHOENICS,对一台 1000MW 超超临界压力单炉膛双切圆煤粉锅炉内的燃烧过程进行了数值模拟,着重研究了单炉膛双切圆燃烧特性、炉内焦炭燃烧特性以及 NO 生成特性。数值模拟结果表明:燃烧器前后墙布置导致炉内气流呈椭圆形, NO 生成总体水平较低,焦炭燃尽效果较好,但是在炉膛高度方向 40m 以上的区域,烟气高温区及大量未燃尽焦炭偏向前墙附近,且未燃尽焦炭在辐射屏区逐渐燃尽。

高正阳等对一台 1000MW 超超临界压力机组双切圆锅炉的燃烧过程进行了数值模拟研究,分析了过量空气系数、燃尽风率、燃烧器投运方式及锅炉负荷等因素对 NO 排

放影响的规律。数值模拟计算表明：燃烧过程中，炉膛内形成两个旋向相反的椭圆形流场。在炉膛下部，温度场与流场表现出很好的协同性。随着高度的增加，温度场与流场的协同性不断减弱。 NO 浓度沿着高度方向变化规律，将炉膛沿炉高分为浓度迅速升高、浓度迅速下降和浓度缓慢上升 3 个区段。过量空气系数越小， NO 排放越少；燃尽风率越高，炉膛出口 NO 排放越少；燃烧器的投运方式是影响 NO 生成的一个关键因素，在各种负荷下，与投入上部燃烧器相比，投入下部燃烧器时 NO 排放量少。

沈跃云等采用数值模拟方法对 1000MW 超超临界压力锅炉 NO_x 生成特性进行了研究。数值模拟得到了炉膛温度场、 CO 浓度场、 O_2 浓度场和 NO_x 浓度场分布的规律。炉内速度场分布形成直流切向燃烧煤粉锅炉预想的双切圆，水冷壁近壁区域速度有较高的流速，炉膛左右两侧气流对称，没有出现明显的速度偏差，这为减少温度偏差、防止超温爆管具有非常重要的意义。炉内温度分布比较均匀，下部主燃区温度在 1300~1600K，上部主燃区温度在 1700K 左右，炉内温度分布无突出的超高温区，这对于抑制热力型 NO_x 的生成很有利。主燃区形成很大区域的低 O_2 浓度燃烧区域、高 CO 浓度区域以及低 NO_x 浓度区域，这充分说明多次燃料分级和多次分级送风和缺氧燃烧，附加风（燃尽风）送入后仍然在主燃区维持低氧燃烧的环境，对于抑制燃料型 NO_x 的形成具有很好的效果。其他研究者针对前后对冲锅炉开展了具体工程问题的数值模拟研究。



第二章

数值模拟理论技术

第一节 计算流体力学的理论基础及相关的物理模型

计算流体力学的任务是流体力学的数值模拟。数值模拟是“在计算机上实现的一个特定的计算,通过数值计算和图像显示履行一个虚拟的物理试验——数值试验”。计算流体力学的求解过程大致可分为以下步骤:

- (1) 建立基本守恒方程,包含质量、动量、能量等守恒方程。
- (2) 确定对复杂物理现象的求解模型,如湍流、燃烧等。
- (3) 确定计算区域和定值条件,包括初始条件及边界条件。
- (4) 建立几何模型并划分网格,这是数值模拟的几何载体。
- (5) 对方程进行离散及确定求解方法。
- (6) 编写和调试计算程序,这是针对自主开发代码。
- (7) 将计算结果输出并加以分析,做必要的对比和验证。

随着计算机硬件和软件技术的发展,基于 CFD 软件的 ANSYS FLUENT 数值模拟软件省去了编写和调试代码这一最繁琐的环节,也不需要花费额外精力去研究如何离散方程以及求解过程,所需要的仅是在 CFD 软件中做出合理的选择。但是为了能够更透彻地去分析相关的物理现象,了解流体力学中各个控制方程的物理含义,以及相关的计算流体力学理论知识是有必要的。由于计算流体力学所涉及的范围比较广,因此本章将通过 ANSYS FLUENT 软件所应用到的计算流体力学的原理,来展开介绍本次研究所涉及的控制方程、湍流数值处理方法、定值条件的确定以及简要说明控制方程离散化和求解方法的基本概念。至于计算区域几何模型的建立和网格的划分将在下一章做详细说明。

1. 流动的控制方程

自然界中一切流动都要受到物理守恒定律的支配,基本的守恒定律包括质量守恒定律、动量守恒定律以及能量守恒定律。如果流动包含有不同组分的混合或相互作用,系统还要遵守组分守恒定律,对于这一系列控制方程的详细描述和完整推导可以参考相关教材。本节所研究的水轮机内部流动可视为不可压流体,未涉及温度的变化以及相变,仅是单一组分流体,因此只需要满足前面两个守恒定律。而所谓的控制方程即是对这些守恒定律的数学描述。

(1) 质量守恒方程。质量守恒方程又称连续性方程,该定律可以表述为:单位时间内流通微元体中质量的增加,等于同一时间间隔内流入该微元体的净质量。按照这一描

述, 可以得到质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = S_m \quad (2-1)$$

其中 div 表示散度, $\operatorname{div}(\mathbf{a}) = \frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z}$ 。该方程是质量守恒方程的一般形式, 适用于可压流动和不可压流动。式中, ρ 是密度, t 是时间, $\mathbf{v}$ 是速度矢量, 源项 S_m 是加入到连续相的质量, 如液滴的蒸发或异相反应等, 另外也可以是其自定义的源项。对于水轮机内部流动而言, 水的密度为常数, 没有外在源项加入, 因此连续性方程可简化为

$$\operatorname{div}(\mathbf{v}) = 0 \quad (2-2)$$

(2) 动量守恒方程。动量守恒定律方程也是任何流动系统都必须满足的基本定律, 其本质是牛顿第二定律。该定律可表述为: 微元体中流体的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和。按照这一定律, 可得出在惯性 (非加速度) 坐标系中 x 、 y 和 z 三个方向的动量守恒方程

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho w \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \end{cases} \quad (2-3)$$

式中: p 是流体微元体上的压力; τ_{xx} 、 τ_{yx} 和 τ_{zx} 等是因分子黏性作用而产生的作用在微元体表面上的黏性应力 τ 的分量; f_x 、 f_y 和 f_z 分别是作用在单位质量微元体的体积力 (f) 在三个方向的分量, 若体积力只有重力, 且 z 轴竖直向上, 则 $f_x = 0$ 、 $f_y = 0$ 、 $f_z = -g$ 。

对于牛顿流体 (流体的切应力与速度梯度成正比), 则有黏性应力 τ 与流体的变形率成比例

$$\begin{cases} \tau_{xx} = \lambda \operatorname{div}(\mathbf{v}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \\ \tau_{yy} = \lambda \operatorname{div}(\mathbf{v}) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \\ \tau_{zz} = \lambda \operatorname{div}(\mathbf{v}) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \end{cases} \quad (2-4)$$

$$\begin{cases} \tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ \tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (2-5)$$

其中 μ 是动力黏度系数, λ 是第二黏度系数,一般可取 $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$ 。将式(2-4)、式(2-5)

代入式(2-3),且令:

$$\begin{cases} S_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \operatorname{div} \mathbf{v}) \\ S_y = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \operatorname{div} \mathbf{v}) \\ S_z = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \operatorname{div} \mathbf{v}) \end{cases}$$

得

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \operatorname{div}(\mu \mathbf{grad} u) + S_x + \rho f_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \operatorname{div}(\mu \mathbf{grad} v) + S_y + \rho f_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho w \mathbf{v}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \operatorname{div}(\mu \mathbf{grad} w) + S_z + \rho f_z \end{cases} \quad (2-6)$$

其中 $\mathbf{grad}$ 表示梯度, $\mathbf{grad}(a) = \frac{\partial a}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial a}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial a}{\partial z} \mathbf{k}$ 。式(2-6)就是著名的 Navier-Stokes (N-S) 方程。一般来说, S_x 、 S_y 和 S_z 是可以忽略的,对于黏性为常数的不可压流体, $S_x = S_y = S_z = 0$ 。为了便于对方程记忆和书写,令

$$\begin{cases} S_u = S_x + \rho f_x \\ S_v = S_y + \rho f_y \\ S_w = S_z + \rho f_z \end{cases} \quad (2-7)$$

分别表示三个方向动量方程的广义项。

对于其他变量 ϕ 也可以得到类似的控制方程

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \phi \mathbf{v}) = \operatorname{div}(\Gamma \mathbf{grad} \phi) + S_\phi \quad (2-8)$$

其中, Γ 为广义扩散系数, S_ϕ 为广义源项。

至此,式(2-2)和(2-6)两个控制方程足以描述本课题所研究的水轮机的部流动,无论是层流还是湍流都是适用的。但是对于工程实际中的湍流来说,在没有采用适当的假设和简化,以目前的计算机硬件水平是无法实现对以上两个控制方程的直接数值求解,因此除此之外,对于湍流的数值模拟还需要相应的湍流模型。

2. 湍流数值模拟方法

湍流是自然界和工程装置中非常普遍的流动类型,在我们的周围可以随时观察到湍流。当流动的雷诺数大于临界值时,流动会出现一系列复杂、随机、无序的混乱状态,湍流最基本的特征就是流体的速度场在空间上和时间上存在着显著、无序的变化。相比