

煤粉低 NO_x 燃烧数值模拟

方庆艳 陈刚 张成 赵海波 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

煤粉低 NO_x 燃烧数值模拟

方庆艳 陈刚 张成 赵海波 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

大容量、高参数煤粉锅炉是我国火力发电的主要燃烧设备,煤粉低 NO_x 燃烧技术在这些锅炉上得到了广泛的应用。深入掌握不同容量和不同类型的煤粉锅炉燃烧和 NO_x 排放特性,对低 NO_x 燃烧系统的优化设计和运行具有重要意义。本书针对不同容量和不同类型的煤粉锅炉,建立合理的几何模型和网格系统,采用适当的数学模型和计算条件,开展了详尽的低 NO_x 燃烧数值模拟。主要内容分为三篇,第一篇为切圆和对冲锅炉低 NO_x 燃烧,研究了新的周界风控制方法、燃烧器竖直摆角上摆、乏气风送入位置、贴壁风运行方式等对锅炉低 NO_x 燃烧的影响。第二篇为切圆锅炉烟温偏差,研究了过、再热器受热面烟气速度和温度偏差机理,提出改善偏差的方法并评估了其效果,优化了锅炉结构和运行参数。第三篇为W火焰锅炉低 NO_x 燃烧,研究了不同技术流派新的低 NO_x 燃烧系统对锅炉燃烧和 NO_x 排放特性的影响,获得了优化的燃烧系统参数。通过这些研究,提高了锅炉燃烧效率,显著降低了 NO_x 排放和烟温偏差,改善了锅炉在安全、经济和环保方面的性能。

本书可作为大型电站煤粉锅炉低 NO_x 燃烧优化设计和运行的参考用书,也可供热能工程专业领域相关人员在学煤粉燃烧数值模拟时参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤粉低 NO_x 燃烧数值模拟/方庆艳等著. —北京:中国电力出版社,2017.10

ISBN 978-7-5198-1431-1

I. ①煤… II. ①方… III. ①煤粉锅炉—粉煤燃烧—数值模拟—研究 IV. ①TK229.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第288144号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:李 莉(010—63412538)

责任校对:王开云

装帧设计:郝晓燕 张 娟

责任印制:吴 迪

印 刷:北京教图印刷有限公司

版 次:2017年10月第一版

印 次:2017年10月北京第一次印刷

开 本:787毫米×1092毫米 16开本

印 张:19.5

字 数:475千字

定 价:68.00元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换



前言

能源短缺与环境污染是影响人类社会可持续发展的关键问题。我国以煤炭为主导的一次能源消费的能源结构在短期内不会改变。煤炭在燃烧过程中释放出污染物，包括硫氧化物(SO_x)、氮氧化物(NO_x)、二氧化碳(CO_2)、一氧化碳(CO)、重金属及颗粒物等，会污染环境。其中， NO_x 因其对生态环境的危害大，是重点控制排放的污染物之一。在2020年前，我国将对燃煤机组全面实施超低排放标准，要求在基准含氧量6%条件下，烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放浓度在标准状态下分别不高于10、35、50 mg/m^3 。这对燃煤电站锅炉运行提出了很高的要求。

在控制 NO_x 排放的众多技术中，结合低 NO_x 燃烧技术和选择性催化还原(SCR)烟气脱硝系统的方法，联合脱硝效率高，成本相对较低，得到了大量的应用。但低 NO_x 燃烧技术在有效控制 NO_x 生成的同时，也会产生一些不利影响。不少电站锅炉在低 NO_x 燃烧改造后，飞灰可燃物含量和一氧化碳排放均有不同程度的上升，锅炉效率降低，部分锅炉还有壁面腐蚀倾向严重的问题。对于现役的燃煤电站锅炉，发展低 NO_x 燃烧技术与优化运行是一种高效、低成本的提高燃烧效率和降低污染物排放的有效手段。

计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的方法，在能源高效低污染转化利用理论和技术的研发发展，以及能源动力设备的设计、优化和升级改造中得到了广泛的应用，是一种先进的研究、设计和优化方法。CFD方法应用最为广泛的就是煤粉高效低污染的低碳燃烧理论和技术研究，主要用于锅炉优化设计、低 NO_x 燃烧优化、锅炉受热面积灰结渣及四角切圆锅炉烟温偏差等方面。

近年来，作者在国家自然科学基金面上项目“富氧燃烧条件下多阶煤混燃过程中的热质反应耦合影响机制研究”(No. 51676076)和重大项目“气固湍流燃烧多尺度耦合模拟与设计方法”(No. 51390494)以及相关煤粉低 NO_x 燃烧优化设计和运行方面科研项目的支持下，开展了大量的煤粉高效低 NO_x 燃烧理论和技术数值模拟研究工作。本书总结了作者在煤粉高效低 NO_x 燃烧理论和技术数值模拟方面的工作和经验，对不同容量和不同类型的煤粉锅炉，建立合理的几何模型和网格系统，采用适当的数学模型和计算条件，开展了详尽的低 NO_x 燃烧数值模拟，以期能够为大型电站煤粉锅炉低 NO_x 燃烧优化设计和运行提供一些有益的参考。

本书由方庆艳、陈刚、张成和赵海波共同撰写，其中，第1、2、4、8、9、13~17章由

方庆艳撰写；第 5、7 和 12 章由陈刚和方庆艳共同撰写；第 3 和 10 章由张成和方庆艳共同撰写；第 6 和 11 章由赵海波和方庆艳共同撰写；全书由方庆艳统稿。已毕业研究生操瑶、李钰、田登峰、乐方愿、冉靖杰、谭鹏、赵斯楠和张昆以及在读博士生马仑和硕士生刘基昌的工作为本书的撰写打下了基础。衷心感谢西安热工院有限公司汪华剑高级工程师、湖南电科院吕当振高级工程师和于鹏峰高级工程师、珠海发电厂钟礼今高级工程师、江西电科院夏永俊高级工程师、贵州电科院陈玉忠高级工程师、国电科学技术研究院毛晓飞高级工程师对本书撰写的支持与帮助。

煤粉先进低 NO_x 燃烧理论与技术仍在不断的发展与完善之中，限于作者的知识和水平，书中难免存在疏漏和不当之处，诚望读者指正。

作 者

2017 年 8 月



目录

前言

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 煤粉锅炉低 NO_x 燃烧数值模拟的研究现状	2
参考文献	5
2 煤粉燃烧数值模拟方法	9
2.1 数学模型	9
2.2 几何建模与网格划分	14
2.3 边界条件设置	14
2.4 计算求解方法	14
2.5 煤粉燃烧数值模拟步骤	15
参考文献	16

第一篇 切圆和对冲锅炉低 NO_x 燃烧

3 1000MW 塔式锅炉中低负荷下低 NO_x 燃烧优化数值模拟	21
3.1 锅炉概况	21
3.2 数值模拟方法	23
3.3 结果与分析	25
3.4 新周界风控制策略的效果	33
3.5 结论	34
参考文献	35
4 1000MW 双切圆锅炉水冷壁热负荷特性数值模拟	36
4.1 锅炉概况	36
4.2 数值模拟方法	37
4.3 结果与分析	39
4.4 结论	54
参考文献	54

5	700MW 切圆锅炉燃烧器竖直摆角对燃烧特性影响的数值模拟	55
5.1	锅炉概况	55
5.2	数值模拟方法	57
5.3	结果与分析	59
5.4	结论	70
	参考文献	71
6	660MW 对冲锅炉低 NO_x 运行优化数值模拟	72
6.1	锅炉概况	72
6.2	炉膛燃烧优化数值模拟	74
6.3	SCR 系统脱硝运行优化数值模拟	76
6.4	结果与分析	78
6.5	结论	91
	参考文献	91
7	新型乏气热风复合送粉系统低 NO_x 燃烧技术数值模拟	93
7.1	锅炉概况	93
7.2	新型低 NO _x 燃烧技术	95
7.3	数值模拟方法	97
7.4	结果与分析	100
7.5	结论	112
	参考文献	112
8	300MW 仓储式制粉系统锅炉低 NO_x 燃烧改造数值模拟	114
8.1	锅炉概况	114
8.2	数值模拟方法	114
8.3	结果与分析	117
8.4	结论	123
	参考文献	123
9	330MW 切圆锅炉低 NO_x 燃烧对水冷壁腐蚀倾向影响的数值模拟	125
9.1	锅炉概况	125
9.2	数值模拟方法	125
9.3	结果与分析	128
9.4	结论	137
	参考文献	137

第二篇 切圆锅炉烟温偏差

10	1000MW 塔式锅炉烟温偏差机理与优化数值模拟	141
10.1	数值模拟方法	141
10.2	塔式锅炉烟温偏差机理分析	141
10.3	炉膛顶部烟道结构对烟温偏差的影响	146

10.4	结论	153
	参考文献	154
11	660MW 塔式锅炉烟温偏差优化数值模拟	155
11.1	锅炉概况	155
11.2	数值模拟方法	156
11.3	结果与分析	158
11.4	结论	165
	参考文献	166
12	700MW 切圆锅炉燃烧器竖直摆角对再热蒸汽温度偏差影响的数值模拟	167
12.1	数值模拟方法	167
12.2	再热蒸汽和烟气偏差形成机理	167
12.3	燃烧器竖直摆角对再热蒸汽温度偏差的影响分析	171
12.4	附加风摆角偏差设置对再热蒸汽温度偏差的影响分析	173
12.5	结论	175
	参考文献	176
13	600MW 墙式切圆锅炉烟温偏差优化数值模拟	177
13.1	锅炉概况	177
13.2	数值模拟方法	178
13.3	结果与分析	180
13.4	结论	187
	参考文献	187

第三篇 W 火焰锅炉低 NO_x 燃烧

14	FW 型 600MW W 火焰锅炉低 NO_x 燃烧数值模拟	191
14.1	锅炉概况	191
14.2	数值模拟方法	192
14.3	结果与分析	196
14.4	结论	207
	参考文献	207
15	FW 型 300MW W 火焰锅炉 F 风下倾数值模拟	209
15.1	锅炉概况	209
15.2	炉膛燃烧数值模拟方法	211
15.3	二次风风箱流动特性数值模拟	212
15.4	结果与分析	213
15.5	F 层二次风下倾后的运行效果	220
15.6	结论	222
	参考文献	222

16 MBEL 型 300MW W 火焰锅炉燃烧改造与优化数值模拟	223
16.1 锅炉概况	223
16.2 三次风流动特性优化试验与数值模拟	225
16.3 炉膛燃烧数值模拟	230
16.4 燃烧模拟结果与分析	233
16.5 结论	241
参考文献	241
17 B&W 型 300MW W 火焰锅炉低 NO_x 燃烧数值模拟	243
17.1 锅炉概况	243
17.2 低 NO _x 燃烧技术	244
17.3 数值模拟方法	246
17.4 结果与分析	248
17.5 结论	250
参考文献	250
附录	253

1

绪论

1.1 概述

我国的能源国情决定了以煤炭为主导的一次能源消费结构，其在我国能源消耗中占比长期高达60%以上。尽管各类新能源的使用不断增加，煤炭在能源消费总量中的份额有所减小，但煤炭具有的经济优势和储量优势使得我国以煤为主的基本能源结构在短期内不会改变^[1-3]。2015年我国的能源消费总量达43亿吨标准煤，占全球能源消费量的23%。燃煤发电是我国煤炭资源的最主要利用形式。2015年，我国发电装机容量达1525.3GW，其中燃煤火电机装机容量占65.93%，发电量则更是占到总发电量的75%以上。这表明，对以煤炭为主的传统化石能源资源开展燃烧新理论与新技术以及燃烧优化研究，实现其高效低污染的转化和利用，对我国的能源战略和节能减排仍然具有重要的意义。

煤炭在燃烧过程中会释放出大量的硫氧化物(SO_x)、氮氧化物(NO_x)、二氧化碳(CO₂)、一氧化碳(CO)、重金属及颗粒物等污染物^[4]。对大气污染而言，SO₂的87%、CO₂的71%、NO_x的67%都来源于燃煤电厂。在燃煤机组排放的大气污染物中，NO_x因其对生态环境的污染危害极大，成为重点控制排放的污染物之一。NO_x不仅会产生光化学烟雾等危害人类的健康，而且还会引起臭氧层空洞、形成酸雨、导致水系统酸化、破坏森林植被、降低大气能见度、形成大气颗粒物、造成呼吸道疾病等，影响和危害环境和生态系统^[5]。为控制NO_x排放，2011年国家环保部和国家质量监督总局联合对《火电厂大气污染物排放标准》进行了修订，要求燃煤电厂的NO_x排放控制在100mg/m³（以标准状态下NO₂计）以内。2015年12月，国务院常务会议决定，在2020年前，将对燃煤机组全面实施超低排放标准，要求氮氧化物排放浓度不高于50mg/m³。对发电厂而言，控制氮氧化物排放既是环境保护的问题，也是经济效益问题。

低NO_x燃烧技术脱硝效率高，成本相对较低，应用广泛。在实际工程应用中，低NO_x燃烧技术可有效控制NO_x的生成，但也产生了一些不利影响。部分燃煤电站锅炉在采用低NO_x燃烧技术后，飞灰可燃物含量、一氧化碳排放均有不同程度的上升，锅炉效率降低^[6]，部分锅炉还有壁面腐蚀倾向严重的问题；部分低挥发煤锅炉改造后，仍然存在NO_x排放浓度偏高、低负荷稳燃能力较差等问题。据现场调研，某700MW电站煤粉锅炉低NO_x燃烧改造后，在高负荷下CO排放平均达到1000~1200mg/m³，瞬时值更达到2000mg/m³以上；某660MW四角切圆燃烧锅炉低NO_x燃烧改造后飞灰可燃物含量明显上升，个别煤种下飞灰可燃物含量达到5%~6%，CO排放达到500mg/m³以上。上升的飞灰可燃物含量、CO排放给电站运行经济性带来了巨大的影响。发电效率的降低增加了对能源的消耗，导致生产单位电量的污染物排放上升，也降低了发电企业经济效益。在目前以燃煤发电为主的能源结构形势下，对于现役的燃煤电站锅炉，进一步发展低NO_x燃烧技术与优化运行可有效提高燃烧效率和降低污染物排放^[7]。

1.2 煤粉锅炉低 NO_x 燃烧数值模拟的研究现状

20 世纪 70 年代初, Spalding 等^[8,9]将燃烧学的基本概念、计算流体力学方法、燃烧流体力学理论和燃烧室的工程设计有机结合,提出了燃烧过程的数学模型以及数值计算方法,为研究电站锅炉炉内燃烧特性、燃烧优化等提供了有效的方法。电站煤粉锅炉炉内燃烧过程由多个子过程互相耦合而成,主要包含湍流过程、气相均相燃烧反应、颗粒相的输运、煤粉颗粒的热解和燃烧、辐射和对流传热过程、氮氧化物等生成和还原过程等。近年来,基于数值模拟的煤粉锅炉燃烧特性研究方法得到了快速发展,也取得了许多的燃烧优化应用成果。

1.2.1 煤粉锅炉低 NO_x 燃烧研究

CFD 方法在煤粉低 NO_x 燃烧方面应用得最为广泛。Yin 等最早采用 Fluent^[10]对一台 609MW 四角切圆燃烧锅炉的流动、燃烧和 NO_x 排放特性及烟温偏差形成机理进行了研究,通过对炉内烟气流动、温度分布、烟气组分进行详细分析,发现空气分级燃烧有利于燃料氮向氮气转换,炉膛下部生成的 NO_x 可被碳氢基团还原;炉膛出口烟温偏差是由炉内烟气旋转残余引起的,屏式过热器的存在对消除烟温偏差有一定效果,但仍不足以消除这个偏差。Liu 等^[11]采用数值计算方法对某 600MW 超超临界压力墙式切圆燃烧锅炉空气分级程度对氮氧化物排放的影响进行了研究,主要研究了不同燃尽风比例和燃尽风喷口位置的影响。研究发现,燃烧器区域温度和飞灰可燃物含量随着燃尽风率的增加而上升,燃尽风位置增高,氮氧化物排放水平降低,但飞灰可燃物含量会上升。Zhang 等^[12]以一台 200MW 四角切圆燃烧锅炉为研究对象,对该炉膛上所采用的低 NO_x 燃烧系统——水平偏置燃烧系统的燃烧性能进行了数值模拟研究。研究发现,采用水平偏置燃烧系统可显著降低主燃区的 NO_x 浓度;空气分级燃烧会增加主燃区的结渣倾向,但通过使用水平偏置燃烧系统可以降低主燃区的结渣倾向。Choi 和 Kim^[13]采用数值模拟方法对一台 500MW 的四角切圆燃烧锅炉炉膛内部的氮氧化物生成、还原和排放情况进行了细致的研究,从炉内流场、燃烧和组分分布与氮氧化物分布之间的影响入手,给出了不同空气分级方式下,沿高度和燃烧器喷口方向上氮氧化物的生成速率分布。他们的研究结果使得我们对于四角切圆炉膛内的流场、燃烧和氮氧化物生成还原之间的影响机理有了更为深入的认识。Zhang 等^[14]对某燃用烟煤 600MW 超临界压力四角切圆燃烧锅炉掺烧褐煤以及褐煤改性提质后的半焦的燃烧适应性进行了数值模拟和试验研究。研究发现,褐煤由中层燃烧器送入是最优的方式,这样可以保证烟煤在炉内有足够的停留时间,褐煤掺烧的质量份额 50% 是较优的,SOFA 风量为 30% 时有利于氮氧化物排放。Yan 等^[15]对燃煤锅炉燃烧器布置方式进行了探讨,分别对三种不同的燃烧器布置方式 [四角切圆方式,墙式切圆方式和 WOTFBs 方式 (wall-off-center tangentially fired boilers)] 对炉内燃烧的影响进行了研究。结果表明燃烧器布置方式对炉膛内温度场,壁面热流分布和烟气偏差都有明显的影响,墙式切圆燃烧方式有利于降低飞灰可燃物、减轻结渣和高温腐蚀倾向,同时也有利于减小炉膛出口的烟气旋转残余。Fang 等^[16]采用双混合分数方法对一台 200MW 四角切圆锅炉掺烧高炉煤气和焦炉煤气的炉内燃烧过程及其调节性能进行了数值模拟研究,研究发现增加焦炉煤气的质量流率可以提升煤粉颗粒的燃尽率,同时也可降低炉膛整体 NO_x 排放水平。Audai^[17]等基于计算流体力学软件包 AVL Fire CFD,针对一台燃用褐煤的 550MW 的八角切圆燃烧锅炉设计了一套数值模拟方法,对该对象在不同运行模式下的

炉内燃烧特性进行了研究。Luis^[18]等对一台 600MW 四角切圆锅炉进行了研究,对煤粉的燃烧、炉内的传热和 NO_x 的生成排放建立了完整的计算模型,结果表明在主燃区上方设置火上风能有效减少 NO_x 的排放浓度。Zhou^[19]等人对一台 1000MW 双切圆锅炉进行了数值模拟研究,结果显示两组 SOFA 风比一组 SOFA 风对 NO_x 的排放控制作用更加明显,此外增加两组 SOFA 风之间的距离也有助于降低 NO_x 的排放浓度。

赵举贵^[20]采用数值计算方法对某超临界对冲锅炉燃烧特性进行了研究,研究了旋流二次风的旋流强度、过量空气系数及燃尽风风率对炉内燃烧及污染物生成的影响,为锅炉安全经济运行提供了指导性意见。钟礼今等^[21]采用数值模拟的方法研究了运行氧量对一台 700MW 四角切圆锅炉 NO_x 排放特性的影响,结果表明炉膛出口 NO_x 浓度随着运行氧量降低而明显减少。高正阳等^[22]对一台 1000MW 双切圆锅炉炉内的燃烧过程进行了数值模拟,分析了过量空气系数、AA 风率、燃烧器投运方式及锅炉负荷等因素对 NO_x 排放特性的影响。潘维^[23]等利用数值模拟的方法研究了一台 200MW 四角切圆锅炉 NO_x 的排放特性,结果表明采用空气分级和再燃技术后, NO_x 排放浓度降低了 48.9%,但燃尽率也相应下降,不利于电厂的经济运行。杨姣^[24]模拟了一台 600MW 四角切圆锅炉炉内的燃烧、传热及污染物生成等过程,同时分析了燃尽风的风率及其喷口布置的高度对 NO_x 排放浓度的影响,结果表明增加燃尽风风率和喷口高度均可有效降低 NO_x 的排放浓度,但同时也会对煤粉的燃尽和炉膛上部的温度产生负面影响。当选取合适的燃尽风率、燃尽风喷口高度和燃尽风喷口间距时,能够较大程度地降低 NO_x 的排放浓度,同时又能最大限度地减小负面影响。

1.2.2 切圆燃烧锅炉烟温偏差研究

四角切圆燃烧锅炉在我国得到了大量的应用。四角切圆锅炉的燃烧器布置在炉膛四角上,四角的空气射流互相配合,在炉膛中心形成切向旋转的高温上升气流。这种燃烧组织方式使得煤粉颗粒的运动轨迹也是旋转上升的,从而增加了煤粉颗粒的炉内停留时间,保证了燃烧效率,具有良好的负荷适应性和煤质适应性,以及良好的火焰充满度和燃烧稳定性。

但是,这种燃烧组织方式的缺点也很明显,炉内烟气是旋转上升的,因此烟气进入屏区之前有一定的残余旋转,这会引引起四角切圆锅炉烟气速度和温度偏差^[10,28,29]。烟气温度和速度偏差是四角切圆锅炉的固有特征,且这种偏差随着锅炉容量增加而显著增加^[30]。陈刚和郑楚光^[31]对大量发电机组的实时运行数据进行分析和挖掘,发现炉膛上部容积热负荷 $q_{V,up}$ 与炉膛尾部烟气的温度和速度偏差呈正相关。锅炉容量增加,其炉膛上部容积热负荷 $q_{V,up}$ 也相应增加,因而锅炉尾部的烟气速度和温度偏差也增加。

国内外学者采用数值模拟的方法研究烟气流动对烟温偏差的影响以及如何改善烟温偏差。Yang^[32]等从非线性流动特性的角度对一台超超临界压力塔式锅炉形成流动及烟温偏差的机理进行了深入的研究。结果表明,在炉膛结构对称的情况下,随着燃烧器出口雷诺数的增加,炉内的速度由对称分布到开始不对称,最终完全不对称;不对称的流场必然会引起炉膛出口的残余旋转,最终出现烟温偏差。Yin^[33]等对一台 609MW 锅炉的烟温偏差问题进行了数值模拟研究,研究中对换热器区域建立了较为细致的模型,并将换热器处理为多孔介质,同时详细研究了炉膛出口的残余旋转、煤粉颗粒运动轨迹、燃烧状况等因素对烟温偏差的影响。结果表明,在前墙安装折焰角和重新布置过热器这两种方案能够有效降低烟温偏差。Park^[34]等采用数值模拟的方法研究了四角切圆锅炉末级过热器的热偏差,结果表明在末级再热器入口处左侧的烟温明显高于右侧。模拟结果与现场试验结果均表明,通过改变燃

尽风的摆角可有效改善烟温偏差。Liu 等^[35]采用数值计算方法对 600MW 切圆燃烧锅炉末级过热器平面上的烟气温度偏差进行了详细研究, 研究发现末级过热器平面上烟温呈马鞍形分布, 烟气温度偏差随着炉内空气分级程度的增加而增加。李彦鹏^[36]研究了二次风反切对四角切圆锅炉炉内流场和温度分布的影响。研究表明, 部分二次风反切能够减小炉内的实际切圆直径, 并降低炉膛出口的残余旋转动量, 从而改善烟气的速度偏差。但反切角度过大会引起炉内气流混乱, 甚至改变气流的旋向。

烟气的流动和温度偏差对四角切圆锅炉的运行安全性和经济性都有不利的影响^[37-39]。炉内烟气速度和温度偏差及其对蒸汽温度偏差的影响一直是四角切圆锅炉机组面临的一个重要问题, 许多学者和相关专业人员对此做了大量工作, 积累了很多经验和理论方法。目前控制和降低四角切圆锅炉烟气速度和温度偏差的主要方法可分为两类: 一类主要从蒸汽侧的传热和流动入手, 通过对换热器几何尺寸、几何结构和布置方式的优化设计, 降低蒸汽侧的传热和流动偏差, 从而一定程度上降低锅炉蒸汽温度的偏差^[33]; 另一类方法主要从降低炉内烟气的残余旋转强度着手, 通过改变燃尽风 (OFA) 或者分离燃尽风 (SOFA) 的水平入射偏角, 使得这部分气流形成旋转方向相反的切圆, 从而降低烟气的残余旋转强度^[40-42]。烟气旋转强度降低, 则烟道内烟气的流动和温度偏差都相应降低。此外, 对容量 1000MW 的大容量炉膛, 采用单炉膛双切圆设计, 两个切圆的旋转方向相反, 可以有效降低烟气的残余旋转强度^[43,44]。

塔式锅炉由于其炉膛结构上的特点, 理论上烟温偏差较小, 但有运行数据表明, 塔式锅炉在运行过程中仍然会出现一定程度的烟温偏差, 而目前对于塔式锅炉换热器区域烟气的流动、换热以及烟温偏差产生的原因等研究还未见报道。同时, 虽然燃尽风 (OFA) 或者分离燃尽风 (SOFA) 进行反切已经被证明是一种行之有效的降低四角切圆锅炉烟气偏差的方法, 但是对于燃烧器水平入射偏角不能调节, 各组燃烧器竖直摆角可以调节的炉膛而言并不适用。因此对这类对象需要发展新的烟气偏差调控方法。

1.2.3 W 火焰锅炉低 NO_x 燃烧研究

2014 年底, 我国探明煤炭资源储量 15 317 亿 t, 其中无烟煤约占总储量的 10%。无烟煤碳化程度高, 挥发分低, 发热量高。无烟煤反应性较差, 不易着火, 也不易燃尽^[45]。W 火焰锅炉炉膛由下部的拱式着火燃烧炉膛和上部的辐射炉膛组成, 煤粉喷嘴及二次风喷嘴布置在炉拱上, 煤粉气流向向下喷射; 在向下流动过程中, 煤粉气流与布置在下炉膛前后墙上的分级风混合, 180° 转弯后向上流动, 形成 W 形火焰。W 火焰锅炉着火特性优良, 稳燃和燃尽性能较好, 有利于燃用低挥发分煤, 尤其是无烟煤, 是我国目前燃用低挥发分煤的主力炉型^[45]。

W 火焰锅炉主要有四种, 分别是依托美国 Foster Wheeler (FW) 技术、美国 Babcock & Wilcox (B&W) 技术、法国 Alstom 公司的 Stein 技术以及英国 Mitsui Babcock Energy Limited (MBEL) 技术所生产的。这四种类型的 W 火焰锅炉的炉膛形状尺寸、燃烧器布置方式及设计参数等方面均有所不同; 其在燃用不同煤质的煤种时, 所表现的经济性、燃烧稳定性和安全性也有较大的差异。尽管 W 火焰锅炉能较好地燃用低挥发分煤, 但在实际运行中, 部分 W 火焰锅炉仍然出现了锅炉燃烧不稳定, 热效率偏低, NO_x 排放量高, 严重结渣等问题^[46-48]。引起这些问题的主要原因是锅炉燃烧系统的设计不当, 导致炉内流动特性偏离理想状态, 煤粉火焰行程短或出现严重偏烧状态, 对着火、燃烧和结渣特性造成了

不利的影晌。

W 火焰锅炉结构复杂,配风方式多样,喷口的形式和布置方式比较复杂,锅炉内部流场也较为复杂;要准确模拟炉内的燃烧特性,需要建立合理几何模型和划分适合于模拟对象的网格系统,采用合理的数值模拟方法和模型。樊建人等^[49-51]针对 300MW 级的 B&W 技术的 W 形火焰锅炉,开展了燃烧数值模拟,研究了该类型锅炉内煤粉的燃烧过程的特点和 NO_x 生成的特性。孙保民等^[52,53]以一台由加拿大 B&W 公司制造的 350MW W 火焰锅炉为对象,在深度方向断面对流场和燃烧过程等做二维处理,沿宽度方向的辐射做三维处理,开展了燃烧过程数值模拟研究。姚斌^[54]和方庆艳^[55]分别对 300MW FW 技术 W 火焰锅炉,以半个炉膛为对象进行了燃烧过程和炉内结渣数值模拟。Fueyo 等^[56]采用 Phoenics 软件,对一台 350MW 的 FW 技术的 W 火焰锅炉内的燃烧和 NO_x 排放进行了模拟,模拟中由于拱上燃烧系统复杂,燃烧器众多,而采用对炉内燃烧产生关键影响的燃烧器区域进行大幅简化,详细模拟一组燃烧器,对全炉膛采用“准二维”的模拟方法进行模拟。模拟结果表明,拱上周界风开度对火焰深度有一定影响,高空气过量系数会使 NO_x 排放升高。针对炉膛内的结渣问题,Fang 等^[51]采用结渣模型耦合气固两相流燃烧模型模拟研究了 300MW W 型火焰锅炉内的结渣特性,结合试验对比分析结渣位置、范围及原因。结果显示,结渣最严重的地方主要集中在下炉膛的侧墙处,由于炉膛中心烟气温度高,扩散速度快,使得炉膛两侧烟气向靠墙侧方向运动而冲击侧墙,从而导致结渣;并提出通过关闭靠墙侧燃烧器,减少炉膛负荷可以有效降低侧墙处的结渣。

文献^[54-56]中模拟得到的 W 火焰锅炉炉膛火焰充满度非常高且下炉膛靠近冷灰斗出口区域温度高达 1500~1700K;现场运行经验和试验结果^[58-61]都表明,该型锅炉冷灰斗区域温度水平较模拟得到的数值低 300K 以上,火焰中心的位置明显较模拟结果高。上述数值模拟都采用了正交网格系统,由于正交网格难以适应复杂结构炉膛及复杂结构燃烧器的流动特性的准确模拟^[62,63]和对锅炉燃烧系统过度的简化,对燃烧器出口区域流场模拟不够精确,从而导致难以准确模拟煤粉的着火过程和火焰下冲深度。因此,针对 W 火焰锅炉,要采用合适的贴体网格系统开展燃烧过程数值模拟,提高模拟精度,揭示炉内的流动和燃烧特性,为改进炉内的燃烧特性提供指导依据。

本书将对不同容量的切圆燃烧锅炉、前后墙旋流对冲燃烧锅炉和 W 火焰锅炉,建立合理的几何模型和网格系统,采用适当的模型和计算条件,开展详尽的低 NO_x 燃烧数值模拟。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 2016 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [2] BP 能源. BP 世界能源统计年鉴——2016. 2016.
- [3] Chen W, Xu R. Clean coal technology development in China. *Energy Policy*, 2010, 38 (5): 2123-2130.
- [4] Ackerman B, Hassler W T. Clean coal/dirty air; or how the clean air act became a multibillion-dollar bail-out for high-sulfur coal producers. Yale University Press, 1981.
- [5] Muzio L J, Quartucy G C. Implementing NO_x control: Research to application. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1997, 23 (3): 233-266.
- [6] 张晓宇. 600MW 低 NO_x 切圆炉膛燃烧优化分析. *中国电机工程学报*, 2016, 36 (1): 140-146.
- [7] 吴锋. 基于 GPU 并行计算的数值模拟与燃煤锅炉系统的优化研究. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [8] Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied*

- Mechanics and Engineering, 1974, 3 (2): 269 - 289.
- [9] Launder B E, Spalding D B. Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, 1972, 57 (4): 825 - 829.
- [10] Yin C, Caillat S, Harion J, et al. Investigation of the flow, combustion, heat - transfer and emissions from a 609MW utility tangentially fired pulverized - coal boiler. Fuel, 2002, 81 (8): 997 - 1006.
- [11] Liu H, Liu Y, Yi G, et al. Effects of air staging conditions on the combustion and NO_x emission characteristics in a 600MW wall fired utility boiler using lean coal. Energy & Fuels, 2013, 27 (10): 5831 - 5840.
- [12] Zhang X, Zhou J, Sun S, et al. Numerical investigation of low NO_x combustion strategies in tangentially - fired coal boilers. Fuel, 2015, 142: 215 - 221.
- [13] Choi C R, Kim C N. Numerical investigation on the flow, combustion and NO_x emission characteristics in a 500 MWe tangentially fired pulverized - coal boiler. Fuel, 2009, 88 (9): 1720 - 1731.
- [14] Zhang J, Wang Q, Wei Y, et al. Numerical modeling and experimental investigation on the use of brown coal and its beneficiated semicoke for coal blending combustion in a 600 MWe utility furnace. Energy & Fuels, 2015, 29 (2): 1196 - 1209.
- [15] Yan L, He B, Yao F, et al. Numerical simulation of a 600 MW utility boiler with different tangential arrangements of burners. Energy & Fuels, 2012, 26 (9): 5491 - 5502.
- [16] Fang Q, Musa A A, Wei Y, et al. Numerical simulation of multifuel combustion in a 200 MW tangentially fired utility boiler. Energy & Fuels, 2011, 26 (1): 313 - 323.
- [17] Al - Abbas A H, Naser J, Hussien E. K. Numerical simulation of brown coal combustion in a 550MW tangentially - fired furnace under different operating conditions. Fuel, 2013, 107 (9): 688 - 698.
- [18] Díez L I, Cortés C, Pallarés J. Numerical investigation of NO_x emissions from a tangentially - fired utility boiler under conventional and overfire air operation. Fuel, 2008, 87 (7): 1259 - 1269.
- [19] Zhou H, Mo G, Si D, et al. Numerical simulation of the NO_x emissions in a 1000MW tangentially fired pulverized - coal boiler: influence of the multi - group arrangement of the separated over fire air. Energy & Fuels, 2011, 25 (5): 2004 - 2012.
- [20] 赵举贵. 600MW 超临界燃煤锅炉燃烧优化的数值模拟. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [21] 钟礼今, 田登峰, 张殿平, 等. 运行氧量对 700MW 四角切圆锅炉低 NO_x 燃烧特性的影响. 广东电力, 2014, (11): 6 - 10.
- [22] 高正阳, 宋玮, 方立军, 等. 1000MW 超超临界机组双切圆锅炉 NO 排放特性的数值模拟. 中国电机工程学报, 2009, 29 (32): 12 - 18.
- [23] 潘维, 池作和, 斯东波, 等. 200MW 四角切圆燃烧锅炉改造工况数值模拟. 中国电机工程学报, 2005, 25 (8): 110 - 115.
- [24] 杨姣. 某 600MW 机组锅炉低 NO_x 改造数值模拟研究. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [25] 朱珍锦, 张长鲁, 方志成. 一种消除切圆锅炉残余旋转新技术的模型试验研究. 中国电机工程学报, 2002, 22 (2): 59 - 63.
- [26] 张泽, 徐旭常. 大型切向燃烧锅炉上炉膛屏区两相流场近流线数值模拟. 燃烧科学与技术, 2002, 8 (2): 97 - 102.
- [27] 刁永发, 何伯旭, 许晋源等. 大型电站锅炉屏区三维涡运动的研究. 中国电机工程学报, 2003, 23 (5): 170 - 175.
- [28] 李文彦, 康志忠, 宋之. 600MW 切圆燃烧锅炉的烟气偏差及控制技术的研究. 中国电机工程学报, 2003, 23 (2): 163 - 167.
- [29] 周俊虎, 宋国良, 陈寅彪等. 2008t/h 四角切圆燃烧锅炉炉膛出口烟温偏差试验研究. 热力发电,

- 2003, 32 (6) : 31 - 35.
- [30] Zhou Y G, Xu T M, Hui S. E. Experimental and numerical study on the flow fields in upper furnace for large scale tangentially fired boilers. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29 (4): 732 - 739.
- [31] 陈刚, 郑楚光. 锅炉炉膛上部容积热负荷与煤粉锅炉烟温偏差的关系. *中国电机工程学报*, 2002, 22 (11) : 146 - 148.
- [32] Yang M, Shen Y Y, Xu H T, et al. Numerical investigation of the nonlinear flow characteristics in an ultra - supercritical utility boiler furnace. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 88: 1 - 11.
- [33] Yin C G, Rosendahl L, Condra T J Further study of the gas temperature deviation in large - scale tangentially coal - fired boilers. *Fuel*, 2002, 82 (9): 1127 - 1137.
- [34] Liu Y, Fan W, Li Y. Numerical investigation of air - staged combustion emphasizing char gasification and gas temperature deviation in a large - scale, tangentially fired pulverized - coal boiler. *Applied Energy*, 2016, 177: 323 - 334.
- [35] Park H Y, Baek S H, Kim Y J, et al. Numerical and experimental investigations on the gas temperature deviation in a large scale, advanced low NO_x , tangentially fired pulverized coal boiler. *Fuel*, 2013, 104: 641 - 646.
- [36] 李彦鹏, 张强, 顾璠, 等. 二次风反切对大容量切向燃烧锅炉烟气偏差影响的数值研究. *中国电机工程学报*, 2001, 21 (9): 33 - 37.
- [37] Xu L J, Jamil A K, Chen Z H. Thermal load deviation model for superheater and re - heater of a utility boiler. *Applied Thermal Engineering*, 2000, 20 (6): 545 - 558.
- [38] Vuthaluru H B, Vuthaluru R. Control of ash related problems in a large scale tangentially fired boiler using CFD modelling. *Applied Energy*, 2010, 87 (4): 1418 - 1426.
- [39] Zhou H, Zhou K, Qi T, et al. Using a core - vector machine to correct the steam - separator temperature deviations of a 1000 MW boiler. *Fuel*, 2014, 130 (6): 142 - 148.
- [40] Xu M H, Yuan J W, Ding S F, et al. Simulation of gas temperature deviation in large - scale tangential coal fired utility boilers. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1999, 155 (3 - 4): 369 - 380.
- [41] Ho Y P, Se H B, Kim Y J. Numerical and experimental investigation on the gas temperature deviation in a large scale, advanced low NO_x , tangentially fired pulverised coal boiler. *Fuel*, 2013, 104 (2): 614 - 646.
- [42] He B S, Zhu L Y, Wang J M, et al. Computational fluid dynamics based retrofits to re - heater panel overheating of No. 3 boiler of Dagang Power Plant. *Computers & Fluids*, 2007, 36 (2): 435 - 444.
- [43] Long S, Liu H, Xu L F, et al. Research on the elliptic aerodynamic field in a 1000 MW dual circle tangential firing single furnace ultra supercritical boiler. *Energy*, 2012, 46 (1): 364 - 373.
- [44] 申春梅. 1000MW 单炉膛双切圆锅炉炉内燃烧过程的数值模拟. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [45] 袁颖, 相大光. 我国 W 火焰双拱锅炉燃烧性能调查研究. *中国电力*, 1999, 32 (11): 1 - 6.
- [46] 况敏. 斗巴 W 火焰锅炉及多次引射分级燃烧技术研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [47] 汪华剑. W 型火焰锅炉燃烧检测与优化研究. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [48] 任枫. FW 型 W 火焰锅炉高效低 NO_x 燃烧技术研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [49] Fan J R, Jin J, Liang X H, et al. Modeling of coal combustion and NO_x formation in a W - shaped boiler furnace. *Chemical Engineering Journal*. 1998, 71 (3): 233 - 242.
- [50] Fan J R, Liang X H, Xu Q S, et al. Numerical simulation of the flow and combustion processes in a three - dimensional, w - shaped boiler furnace. *Energy*. 1997, 22 (8): 847 - 857.
- [51] Fan J R, Zha X D, Cen K F. Study on coal combustion characteristics in a W - shaped boiler

furnace. *Fuel*. 2001, 80 (3): 373 - 381.

- [52] 孙保民, 陆肖马, 徐旭常. W形火焰煤粉锅炉炉内冷态流场的试验研究及数值模拟. *燃烧科学与技术*, 1995, 1 (1): 79 - 83.
- [53] 孙保民, 徐旭常. W型火焰煤粉锅炉炉内过程的综合数值模拟及流场的实验研究. *中国电机工程学报*, 1996, 16 (4): 230 - 235.
- [54] 姚斌. 大型低挥发分煤锅炉燃烧运行问题的研究, 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [55] 方庆艳, 周怀春, 汪华剑等. W火焰锅炉结渣特性数值模拟. *中国电机工程学报*, 2008, 28 (23): 1 - 7.
- [56] Fueyo N, Gambon V, Dopazo C, et al. Computational evaluation of low NO_x operating conditions in arch-fired furnace. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1999, 121 (3): 735 - 731.
- [57] Fang Q, Wang H, Wei Y, et al. Numerical simulations of the slagging characteristics in a down-fired, pulverized-coal boiler furnace. *Fuel Processing Technology*. 2010, 91 (1): 88 - 96.
- [58] 张杰, 余战英, 谭厚章, 等. W型火焰锅炉的热态试验研究. *动力工程*, 2003, 23 (5): 2632 - 2635.
- [59] Ren F, Li Z, Jing J, et al. Influence of the adjustable vane position on the flow and combustion characteristics of a down-fired pulverized-coal 300 MWe utility boiler. *Fuel Processing Technology*. 2008, 89 (12): 1297 - 1305.
- [60] Li Z, Ren F, Zhang J, et al. Influence of vent air valve opening on combustion characteristics of a down-fired pulverized-coal 300 MWe utility boiler. *Fuel*. 2007, 86 (15): 2457 - 2462.
- [61] 余战英, 谭厚章, 张杰, 等. W形火焰分级燃烧的热态试验研究. *燃烧科学与技术*, 2004, 10 (4): 314 - 317.
- [62] 郑昌浩, 徐旭常, 唐庆. 非正交贴体网格体系模拟炉内燃烧过程. *工程热物理学报*, 2003, 24 (2): 231 - 234.
- [63] 赵坚行. 燃烧的数值模拟. 北京: 科学出版社, 2002.