



燃用劣质煤电站锅炉低负荷 稳燃、防结渣及减轻烟温偏差研究

The Low Load Flame Stability, Slagging Prevention
and Flue Gas Temperature Deviation Elimination of Utility
Boiler Firing Low Rank Pulverized Coal

池作和



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS



燃用劣质煤电站锅炉低负荷 稳燃、防结渣及减轻烟温偏差研究

The Low Load Flame Stability, Slagging Prevention
and Flue Gas Temperature Deviation Elimination of Utility
Boiler Firing Low Rank Pulverized Coal

池作和



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

燃用劣质煤电站锅炉低负荷稳燃、防结渣及减轻烟温
偏差研究/池作和. — 北京:高等教育出版社,
2002.5

本科教材

ISBN 7-04-010542-X

I. 燃... II. 池... III. 火电厂-燃煤锅炉-锅炉
燃烧-高等学校-教材 IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 007092 号

燃用劣质煤电站锅炉低负荷稳燃、防结渣及减轻烟温偏差研究
池作和

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市东城区沙滩后街 55 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100009	网 址	http://www.hep.edu.cn
传 真	010-64014048		http://www.hep.com.cn

经 销 新华书店北京发行所
排 版 高等教育出版社照排中心
印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本 850×1168 1/32

印 张 7.375

字 数 180 000

插 页 1

版 次 2002 年 5 月第 1 版

印 次 2002 年 5 月第 1 次印刷

定 价 12.20 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

作者简介



池作和 教授，专长为热能工程和工程热物理。1963年7月8日出生于浙江省衢州市。1984年本科毕业于西安交通大学动力机械一系。1987年硕士毕业于西安交通大学热能工程专业。1987年下半年在浙江大学热能所工作，历任助教、讲师、副教授、教授和煤粉燃烧研究室副主任、主任。1992年攻读工程热物理专业在职博士，1996年获博士学位。发表论文50余篇，专著2本。取得国家发明和实用新型专利2项。获国家科技进步三等奖1项，省部级科技进步奖一等奖2项，电力局科技进步一等奖1项、二等奖2项，三等奖1项。浙江省优秀论文一等奖1篇、二、三等奖多篇。1994年获浙江大学优秀青年教师称号。

导师简介



岑可法 院士，能源环境工程专家，专长为工程热物理及热能工程。1935年1月15日出生于广东省南海市。1956年毕业于华中理工大学动力系。1958年赴前苏联莫斯科包曼高等工业大学留学。1962年获副博士学位。现任浙江大学机械与能源学院院长，中国工程热物理学会副理事长，动力工程学会国际合作委员会主席，中国工程热物理学会节能学会主任。1995年当选为中国工程院院士。发表论文600余篇，专著12本。取得国家发明和实用新型专利16项。获国家发明二、三、四等奖各1项，国家科技进步三等奖1项，全国科技大会奖1项，省部委科技进步奖一等奖5项，二等奖5项，三等奖2项，国家经委、计委、财政部联合嘉奖1次，七五攻关重大科技成果奖1次。曾获得全国先进科技工作者，五一劳动奖章，浙江省劳动模范，中国电机工程优秀工作者，全国高等学校先进科技工作者，全国优秀教师奖章等称号。光华科技基金一等奖，香港柏宁顿（中国）教育基金会第二届孺子牛金球奖，何梁何利科学奖等。

前 言

火力发电是国家重要能源基础之一。自改革开放以来,我国火力发电装机容量迅猛增长,火力机组不断向大容量高参数发展,解决了能源制约经济增长的瓶颈问题。结合研究项目,本书作者选择了大容量电站锅炉的几个关键技术问题,如燃用劣质煤炉内稳定燃烧问题、锅炉结渣机理及其防结渣措施、四角切向锅炉炉内空气动力场和炉膛出口烟温偏差、W型炉炉内空气动力场等,进行了较为深入的研究。采用了文献分析、实验室模型试验、计算机辅助数值试验和工程应用等研究方法。开发成功的可调浓度煤粉浓淡燃烧技术已取得国家发明专利,并在 60 多台锅炉上使用,取得了良好的社会和经济效益。书中内容可供热能工程领域的科技工作者、电厂锅炉工程师参考,也可作为热能工程、电厂热动力、工程热物理专业本科和研究生的教学参考书。

《燃用劣质煤电站锅炉低负荷稳燃、防结渣及减轻烟温偏差研究》博士论文有幸被评为全国优秀博士论文。在得知国家资助出版该论文后,对论文进行了修改和补充,第 9 章进行了重写。本书是在岑可法院士的悉心指导下完成的,无论是博士论文还是本次修改都得到了岑先生的精心指点。本书也是煤粉燃烧研究室全体同事——蒋啸、周昊、孙保民、陈玲红、徐璋共同努力的结晶。

感谢在本课题组工作和学习的多位博士和硕士生——朱珍

锦、罗卫红、潘卫国、夏建军、金余其,书中多处引用了他们论文中的内容;感谢樊建人教授、沈珞婵教授在数值计算方面给予的指导;感谢热能工程研究所的老师给予作者的许多关心、支持和帮助;感谢广东省电力试验研究所在多个课题合作中给予的支持。

特别感谢国家给予的出版支持,高等教育出版社编辑的辛苦劳动;感谢国家自然科学基金会、浙江省自然科学基金会、电力部等给予的经费支持。

限于水平,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2001年10月于求是村

摘 要

本论文采用冷模试验、计算机辅助试验和现场试验相结合的研究方法,对劣质煤低负荷稳燃、锅炉防结渣、减轻炉膛出口烟温偏差的措施、四角切向燃烧炉和 W 型炉炉内空气动力特性等进行了研究。

在劣质煤低负荷稳燃方面:经反复试验,研制成功了一套完整的低负荷稳燃装置。该装置由可调浓度撞击分流器和特殊设计的带稳燃器喷口组成,利用撞击分流器实现煤粉浓缩,利用带稳燃器的喷口产生热回流,从而将煤粉浓缩法和热回流法有机结合。该装置具有结构简单、阻力低、浓缩效果可调节、低负荷稳燃效果好等特点,已在容量为 65~670 t/h,燃用无烟煤、贫煤、混煤和劣质烟煤的 60 多台锅炉上应用成功,取得 45%~50% 不投油低负荷稳燃效果。基于试验结果,提出了多方位煤粉着火带稳定劣质煤燃烧新理论,并试图通过改变或消除多方位煤粉着火带结构,解决劣质煤稳燃和结渣这对矛盾。

在锅炉防结渣方面:探讨了燃烧过程中灰份形态变化及不同尺寸灰粒的输运机理,概括并提出了影响炉内结渣的三个最基本要素;对同心反切系统的防结渣和稳燃特性、不同一二次风反切角度时炉内空气动力特性、反切角度优化选择等进行了较系统研究。研究结果已应用于解决韶关发电厂 8 号炉炉内严重结渣问题,技术改造方案实施后,取得了良好的防结渣效果。该技术获广东省科技进步一等奖和国家科技进步三等奖。

在炉膛出口烟温偏差方面:结合北仑港电厂 600 MW 锅炉末级再热器超温问题,对炉膛出口烟温偏差的形成机理及主要影响因素进行了探讨;对消除炉膛出口速度偏差的多种技术措施如三次风反切、一次风反切或二次风反切进行了多个工况的冷模试验

和数值模拟,得出了一些可供工程设计参考的重要数据。

在计算机辅助试验方面:本论文采用投影法结合 $K-\epsilon$ 双方程湍流模型编制了炉内流场计算程序,采用脉动频谱随机颗粒轨道模型对煤粉颗粒的运动轨迹进行了数值模拟;通过对同心反切系统的计算,并将数值模拟结果与冷模、冷炉试验结果对比,发现用投影法计算四角炉炉内流场具有边界处理简单、编程简洁、通用性好等优点。计算结果与冷炉试验结果对比较吻合,炉内流场和颗粒运动轨迹程序的编制,为进行工程设计提供了良好的分析工具。

本论文还对四角切向燃烧炉和 W 型炉炉内空气动力场进行了多工况试验。通过试验,确定了燃烧器高宽比、摆动角度、风速、布置方式等对四角炉炉内空气动力场的影响。对 W 型炉则进行了侧面风位置、配风方式、拱顶风与侧面风动量比、配双调风旋流燃烧器后炉内流场存在的问题,以及如何改进双调风旋流燃烧器进行了研究。通过研究得到的对双调风燃烧器的设计改进建议,已被设计部门采纳,用于 300 MW 锅炉的设计中。

ABSTRACT

The pulverized coal flame stability at low load, slagging in furnace, flue gas temperature deviation at the exit of furnace, aerodynamics of tangential and down-shot firing furnaces are investigated by means of cold-model test, Computer-Aided Test(CAT) and field test. The main content of the thesis is summarized as follows:

1. Flame stabilization of low rank coal at low load: A total set of flame stability technique firing low rank coal at low load is developed, which is composed of pulverized coal separator and specially designed nozzle. The pulverized coal separator has advantages of simple structure, low flow resistance and easy adjustment of coal concentration. Combining rich/lean firing with flue gas reflux of high temperature a good flame stability is reached when firing low rank coal at low load. The technique has been successfully used for retrofitting of more than 30 utility boilers with steady flame at 45% - 50% boiler load without supporting oil. Based on test results a new idea named many ignition zones of pulverized coal is proposed. Since coal ignition occurs at several place, the boiler can be operated with strong flame stabilization. Furthermore by reducing the numbers of ignition zones the igniting strength of pulverized coal can be controlled.

2. Slagging in furnace: Having reviewed many literatures about slagging mechanism three important factors influencing slagging are supposed. The slagging and firing properties in concentric firing system are discussed based on cold-model test results and CAT test results. When a part of secondary air is injected into furnace at an an-

gle greater or less than the fuel nozzle and the angle is properly selected, the system has been proved to have the advantages of slagging prevention in firing zone and pulverized coal ignition enforcement. One application is No.8 boiler at Shaoguan Power Plant. The boiler has a serious slagging in the waterwall. The concentric firing system is used by adding guide-plate at the exit of burners to reduced primary air deflection. Since the guide-plate was added, the performance of the boiler has been greatly improved.

3. Flue gas temperature bias at the exit of furnace: Temperature deviation is caused by residual airflow rotation. Several methods of counter-rotation of a part of airflow are studied to reduce residual airflow rotation.

4. Numerical simulation of tangential firing: Projection Numerical Simulation Method of $K-\epsilon$ Two Equation Model, Fluctuation-Spectrum-Random-Trajectory(FSRT) Model are applied to calculate the flow field and particle trajectory in tangential firing furnace, A good agreement is achieved between the simulation results and test results.

5. Aerodynamics of tangential firing and down-shot furnace: By changing burner aspect ratio (height to width), primary and secondary air velocity, location of burner, fuel/air injection angle, fuel/air nozzle tilt and etc the aerodynamics of tangential firing and down-shot furnace is investigated. The results from these experiments are helpful for the design of tangential firing and down-shot firing furnace.

目 录

上篇 试验研究篇

第1章 总论	3
1.1 四角切向煤粉炉稳定燃烧	3
1.2 四角燃烧煤粉炉炉膛出口烟温偏差	8
1.3 四角燃烧煤粉炉炉内结渣	9
1.4 W型炉炉内空气动力场	11
1.5 本论文研究方法	12
参考文献	13
第2章 撞击式可调浓度煤粉浓缩燃烧技术研究	16
2.1 煤粉浓缩燃烧原理及技术	16
2.2 大型多相流动试验台及多相雾化	28
2.3 不同弯曲角度弯头分离效果试验	31
2.4 高效低阻可调浓度撞击式浓缩器的研制	37
2.5 多方位煤粉着火带稳燃机理——热回流与浓缩 技术结合	44
2.6 控制着火点位置的设想——破坏多方位煤粉着火带	50
2.7 本章小结	50
参考文献	51

第3章 大型四角燃烧煤粉炉炉内空气动力场特性研究	53
3.1 表征炉内空气动力场的基本参数	53
3.2 模拟方法及试验设备	56
3.3 炉内实际切圆的变化规律及其影响因素	60
3.4 燃烧器摆动对炉内流动过程影响的试验研究	70
3.5 正、反切圆布置炉内空气动力特性	76
3.6 本章小结	79
参考文献	80
第4章 炉膛出口烟温偏差形成机理及防止措施	82
4.1 炉膛出口烟气温度的成因分析及影响因素	83
4.2 水平烟道中对流受热面热偏差的计算	87
4.3 减小炉膛出口速度偏差的技术措施	96
4.4 本章小结	102
参考文献	103
第5章 炉内结渣机理及防结渣技术研究	105
5.1 锅炉结渣机理	105
5.2 控制炉内结渣过程的主要因素	110
5.3 二次风同心反切系统防结渣研究	114
5.4 一次风同心反切系统防结渣研究	121
5.5 对防结渣技术措施的几点讨论	125
5.6 本章小结	129
参考文献	131
第6章 W型锅炉炉内流动特性试验研究	133
6.1 W型锅炉及燃烧器介绍	133
6.2 结构和配风方式对W型锅炉炉内空气动力结构影响	136
6.3 双调风旋流燃烧器试验	141
6.4 配双调风旋流燃烧器的W型锅炉冷模试验	150
6.5 本章小结	155
参考文献	157

中篇 数值计算篇

第7章 同心反切系统炉内速度场和颗粒运动轨迹数值模拟	161
7.1 控制流体流动状态的基本微分方程及湍流模型	161
7.2 投影法求解四角炉炉内速度场的原理	167
7.3 煤粉颗粒运动轨迹的数值模拟	174
7.4 计算结果及分析	181
7.5 本章小结	186
参考文献	187

下篇 工程实践篇

第8章 670 t/h 锅炉炉内防结渣技术改造	193
8.1 问题的提出	193
8.2 燃烧器改造方案及 CAT 数值试验	195
8.3 卫燃带改造方案	205
8.4 运行配风调整	207
8.5 实际改造结果	208
8.6 本章小结	209
参考文献	209
第9章 可调浓度煤粉浓缩燃烧技术应用	210
9.1 概述	210
9.2 燃烧器改造方案	213
9.3 燃烧器改造后试验	218
9.4 燃烧器改造后的运行效果	220
9.5 可调浓度稳燃技术在其他电厂中的应用	220
9.6 本章小结	221
参考文献	221

上 篇

试验研究篇

第1章 总 论

1.1 四角切向煤粉炉稳定燃烧

四角切向燃烧是最成熟和最常用的煤粉燃烧方式。在我国使用该燃烧方式的锅炉容量从 35 t/h 直到 2 000 t/h,所使用的煤包括从褐煤到无烟煤的几乎所有煤种。切向燃烧方式的最基本特征为直流燃烧器的几何轴线与位于炉膛中心的一个或几个假想圆相切,造成气流在炉内旋转。切向燃烧时从各个角喷出的煤粉气流在炉内撞击、混合,并形成一个总体旋转的燃烧火球。该火球加热、点燃每个角的煤粉气流,使煤粉稳定燃烧。煤的化学能不断地转化为热能,被水和蒸汽吸收,高压蒸汽在汽轮机中作功,带动发电机发电。电被源源不断地送至工厂、家庭,为人们工作、生活提供光和热。

但由于下列一些原因,煤粉炉的燃烧仍存在问题:(1) 我国地大物博,煤种多、品质多变。有些煤非常难烧,如福建加福无烟煤;有些煤不仅灰份高(45%~55%)而且热值低(13 500~14 600 kJ/kg),典型的如青山劣质烟煤。这些煤经常使锅炉燃烧不稳或