

# 某 200 MW 四角切圆锅炉燃烧器 改造降低 NO<sub>x</sub> 数值模拟

邢 菲<sup>1</sup>, 樊未军<sup>1</sup>, 崔金雷<sup>2</sup>, 邓元凯<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083;

2. 北京国电科环洁净燃烧工程技术有限公司, 北京 100039)

**摘 要:** 针对国内某电厂 200 MW 四角切圆锅炉 NO<sub>x</sub> 排放量较高, 结渣严重的问题, 利用 CFD 软件平台, 采用数值模拟方法对其改造前后炉内燃烧过程进行研究。计算结果表明: 由于附壁射流的作用, 使得高温区集中在炉膛中部, 有效地防止了锅炉结渣; 改造后炉内有比常规燃烧方式锅炉更大的还原气氛区域, 抑制了 NO<sub>x</sub> 的产生, 使其排放降低 34.6%。改造后的计算结果与试验相符的较好, 所以此次数值模拟为锅炉设计、改造和运行提供理论依据。

**关 键 词:** 锅炉燃烧; 温度分布; NO<sub>x</sub> 排放; 数值模拟

中图分类号: TK223. 23 文献标识码: A

## 引 言

控制环境保护总体指标, 首先必须控制燃煤造成的污染, 其出路在于大力发展以煤炭高效洁净利用为宗旨的洁净煤技术。煤在燃烧过程中产生大量的污染物以及粉尘等, 特别是氮氧化物, 造成严重的环境污染。2000 年燃煤发电厂 NO<sub>x</sub> 排放为 290 万 t, 预计 2010 年加上其它燃油产生的 NO<sub>x</sub>, 我国的 NO<sub>x</sub> 总排放量可能超过 1 000 万 t。研究煤燃烧过程中 NO<sub>x</sub> 的形成及其控制方法, 并积极开展试验研究, 对促进国民经济发展和改善生态环境具有重要的现实意义。

## 1 改造前、后锅炉设备简介及煤质分析

本文数值模拟的对象为单炉膛、II 型布置、炉膛四角切向布置的燃烧器、自然循环固态排渣煤粉锅炉, 炉宽 11 920 mm, 炉深 10 880 mm。

改造前燃烧器为均等配风方式; 在一次风的两侧布置二次风。1 号、3 号角燃烧器在炉膛中心形成一个  $\phi 736$  mm 的假想切圆, 2 号、4 号角燃烧器为对

冲布置。

改造后的燃烧器为直流煤粉燃烧器。每组燃烧器从上至下分为高位燃尽风、三级燃尽风、二级燃尽风、上组燃烧器、一级燃尽风和下组燃烧器。附壁射流分 4 层布置在二级燃尽风、一级燃尽风、上组中二次风、下组中二次风同一标高处。每个一次风喷口布置有侧边风。另外除了三级燃尽风是对冲布置外, 其余燃烧器采用四角切圆布置方式, 1 号、3 号角反向切圆, 切圆直径为  $\phi 736$ ; 2 号、4 号角正向切圆, 切圆直径为  $\phi 500$ 。

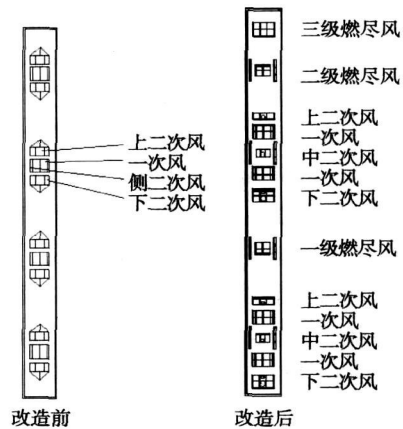


图 1 改造前后燃烧器示意图

表 1 电厂用煤分析结果

工业分析/ %				
V <sub>daf</sub>	A <sub>ar</sub>	M <sub>ad</sub>	M <sub>t, ar</sub>	Q <sub>net, ar</sub> / kJ·kg <sup>-1</sup>
34. 52	15. 18	4. 10	7. 40	25 080
元素分析/ %				
C <sub>ar</sub>	H <sub>ar</sub>	O <sub>ar</sub>	N <sub>ar</sub>	S <sub>ar</sub>
65. 20	4. 21	6. 43	0. 88	0. 70

收稿日期: 2006-11-20; 修订日期: 2006-12-13

作者简介: 邢 菲(1980-) 男, 辽宁锦州人, 北京航空航天大学博士研究生。

表 2 煤粉粒径分布 (μm)

≤20	≤40	≤60	≤80
22.8%	40.5%	55.5%	66.4%
≤100	≤120	120 以上	
75.8%	81.5%	18.5%	

## 2 数学模型及边界条件

本文应用商业数值计算软件 STAR-CD 对炉内燃烧进行模拟, 数值模拟采用三维稳态计算, Simple 算法。对燃烧的数值模拟涉及到气-固两相流动和化学反应, 湍流模型选 κ-ε 高雷诺数模型; 用拉格朗日方法描述煤粉颗粒的运动轨迹; 炉内三维气相流动、热平衡与燃烧的控制方程可写成如下统一形式:

$$\frac{\partial(\rho u \varphi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \varphi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \varphi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] + S_{\varphi} + S_{p\varphi}$$

式中: φ—速度 u、v、w 湍流动能 k、湍流耗散率 ε、时均混合分数 f、混合分数脉动均方值 g、焓值 h 和组分的质量分数 Y; Γ<sub>φ</sub>—扩散系数, 当 φ=1.0 时为连续方程; S<sub>φ</sub>—由气体相引起的源项, S<sub>pφ</sub>—由固体颗粒引起的源项。

在挥发分析出上采用的是单步反应模型, 该模型假设挥发份析出速率与颗粒中保持的挥发份含量呈一次幂关系, 如下式:

$$\frac{dm_p}{dt} = k [m_p - (1 - f_0)m_{p0}]$$

其中: k = A<sub>1</sub>e<sup>-(E/RT)</sup>; m<sub>p</sub>—煤粉颗粒质量, kg; f<sub>0</sub>—煤粉颗粒初始挥发份质量分数; m<sub>p0</sub>—颗粒初始质量, kg; k—反应速率常数; A<sub>1</sub>—指前因子; E—活化能, J/(kg·mol)。

表 3 数值计算的边界条件

改造前	数值	改造后	数值
一次风风率/%	27.8	一次风风率/%	28
一次风风温/℃	60	一次风风温/℃	75
一次风风速/m·s <sup>-1</sup>	30.8	一次风风速/m·s <sup>-1</sup>	31
二次风风率/%	67.9	二次风风率/%	69
二次风风温/℃	285	二次风风温/℃	275
二次风风速	49.2(侧二次风速为 54.5)	二次风风速	45(侧二次风速为 50)

挥发分燃烧选 mix-is-burnt 模型, 焦炭的燃烧选 1st order effect 模型。采用控制容积积分法将控制方

程离散, 其中扩散项采用中心差分, 非线性的对流项采用二阶迎风差分。网格采用六面体/三棱柱混合网格, 对燃烧器附近网格进行了加密, 网格数量在 45 万左右, 收敛标准 ε < 1.0 × 10<sup>-4</sup>。

## 3 计算结果

### 3.1 流场

炉内的气流混合流动状态是决定燃烧优劣的决定性因素。图 2 为改造前后某层一次风水平截面速度分布图。从图中可以看出, 炉内气流形成强烈旋转, 炉膛中心区域存在明显的低速区, 数值计算结果与试验动力场示踪结果是一致的。改造后的流场由于附壁射流的影响, 整个截面的气流充满度更好。尤其是靠近壁面处, 附壁射流使流动增强, 这样可以把高温气体和壁面阻隔开, 降低了火焰对壁面的冲刷, 有效地防止了锅炉结渣。

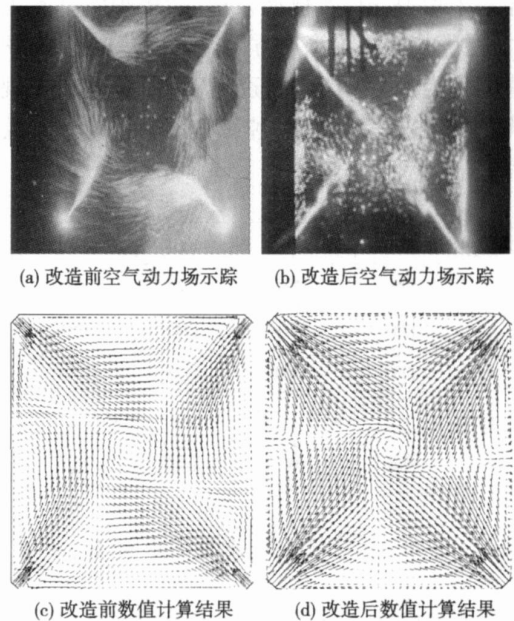


图 2 某一次风水平截面速度分布

### 3.2 颗粒场

图 3 是改造前后某一次风水平截面煤粉颗粒速度场。从图中可以清楚地看到: 改造前后颗粒轨迹分布与流场分布存在较好的对应关系, 图中显示煤粉颗粒基本沿主气流方向运动。相对于改造前的煤粉颗粒轨迹, 改造后的颗粒水平移动的趋势增强, 由于附壁射流及燃尽风的影响改造后煤粉颗粒的平均流动速度比改造前减小 20%~30%, 这样煤粉颗粒在炉内有更长的行程和更加充分的时间燃尽。

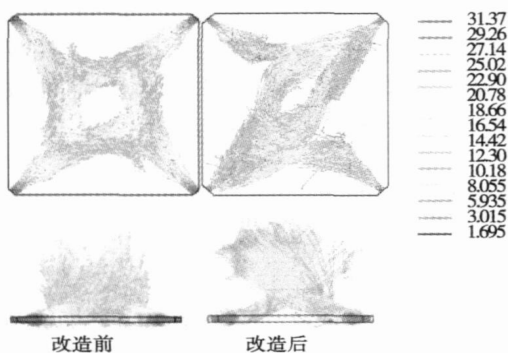


图 3 某一次风水平截面煤粉颗粒速度场

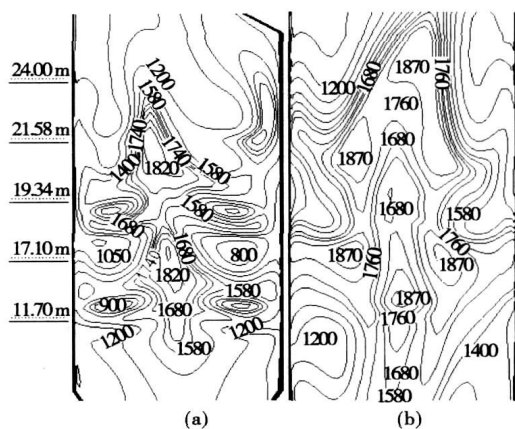


图 5 数值模拟炉膛内部温度分布(K)

### 3.3 温度场

图 4 显示的是试验测试炉膛内温度的分布情况。测试炉膛温度是利用高温辐射仪 (Reytek31—2M) 在甲、乙侧墙及前、后墙各看火孔处测量。试验中, 经过一次风喷嘴风速热态调平后, 炉膛断面温度分布趋于均匀, 甲、乙侧墙及前、后墙炉温基本无偏差, 且主燃烧区域沿高度方向温度偏差也很小, 炉膛最高温度为 1 800 K 左右, 这对于最大限度的实现分区优化燃烧过程、防止炉膛结焦、降低 NO<sub>x</sub> 排放十分有利。

24.00 m	1790	1757	1804	1782	
21.58 m	1776	1736	1769	1742	
19.34 m	1757	1741	1747	1759	
17.10 m	1737	1709	1736	1698	
11.70 m		1539	1577	1420	1525
	前墙	甲侧墙	后墙	乙侧墙	

图 4 试验测试炉膛温度分布(K)

图 5 为数值模拟得到的炉膛内部的温度分布, 所取的截面为平行于前后墙的中间截面以及平行于侧墙的中间截面。图 5(b) 的温度分布中清楚地体现了分级燃烧的特点。在下组燃烧器和上组燃烧器的中间区域都有明显的高温区, 这是由于布置在两级燃烧器之间的燃尽风的吹入, 延缓了下层燃烧器的燃烧过程, 同时气流流场的改变使下层燃烧器火焰有向灰斗延伸的趋势。

对比试验和模拟计算得到的数据不难发现, 数值模拟得到的温度场的值偏大。所以在实际的改造工作中应该采取试验与数值模拟相结合的方法, 相互补充相互指导。

图 6 为模拟计算得到改造前后同一次风炉膛截面温度分布。由图可见, 改造前截面的温度分布很不均匀, 水冷壁附近烟气温度的最大值处, 即结渣的可能区域位于旋转火焰的下游。改造后由于附壁射流的影响, 整个高温区域都集中在炉膛中间部分。可能结渣区域的温度也由改造前 1 900 K 降低到 1 400 K。由于改造后有部分二次风作为燃尽风从炉膛上部送入, 燃烧器区域的高温区面积很大, 火焰充满度好, 因此改后的燃烧是稳定的。另外, 由于燃烧器区域采取分级燃烧, 有利于控制氮氧化物的生成。

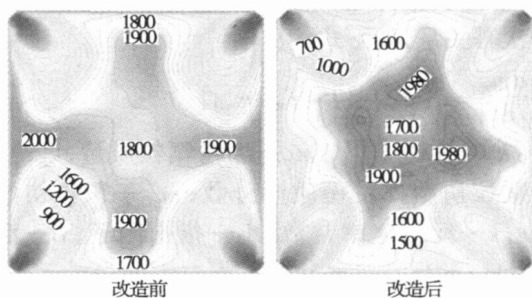


图 6 某一次风水平截面温度分布(K)

### 3.4 组分场

图 7 表示的是改造前后炉膛内 O<sub>2</sub> 的浓度分布 (质量百分比)。在下组燃烧区域改造后的 O<sub>2</sub> 分布比改造前较小, 这是因为一部分氧气随燃尽风在更高位置投入到炉膛中。在 21.26 和 28 m 的燃尽风处, 氧量有显著的增加, 反映出了分级燃烧的氧气分布特点。改造前燃烧器由于是均等配风方式, 氧量逐步的降低。在水平烟道处 (40 m) 改造后的氧量较大, 这是由于分级燃烧在一定程度上降低了煤粉的

燃烧效率, 使得氧量消耗减小。

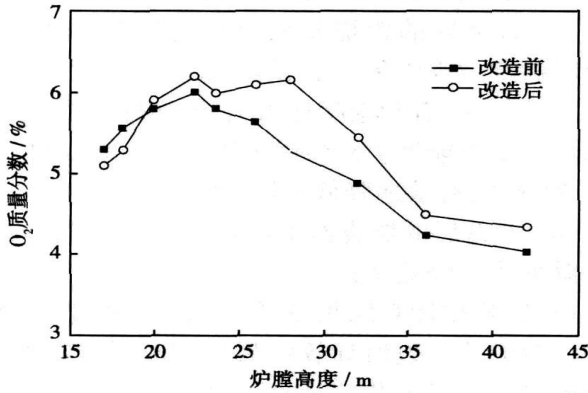


图 7 改造前后沿炉膛高度各截面平均  $\text{O}_2$  质量分数分布曲线

图 8 表示的是改造前后炉膛内  $\text{CO}$  的浓度分布 (质量百分比)。改造前  $\text{CO}$  分布曲线较为平缓, 改造后由于分级燃烧在下组燃烧器投入的氧量较小导致改造后  $\text{CO}$  量在到达二级燃尽风前所具有最高值。局部燃烧不充分, 燃烧不完全形成大量的  $\text{CO}$  聚集在中心回流区。同时, 炉膛中心区域含氧量低, 形成的  $\text{CO}$  不能完全被氧化为  $\text{CO}_2$ , 这样也造成了该低氧区域  $\text{CO}$  含量较高。在 26~28 m 处, 随着燃尽风的吹入使得  $\text{CO}$  的量逐步减小。组分场的变化也从侧面反映了改造前后燃烧器燃烧区域的不同。

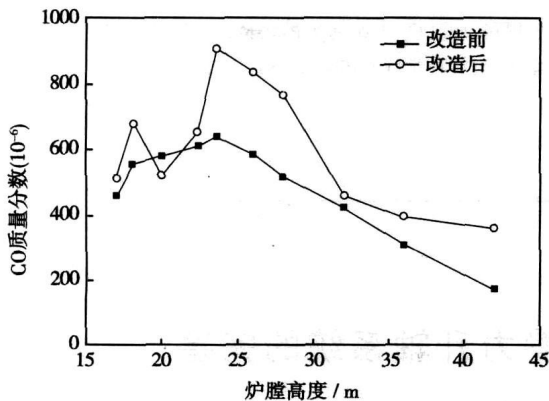


图 8 改造前后沿炉膛高度各截面平均  $\text{CO}$  质量分数分布曲线

### 3.5 $\text{NO}_x$ 浓度场

煤粉燃烧生成的氮氧化物主要有: 热力型  $\text{NO}_x$ 、燃料型  $\text{NO}_x$  和快速型  $\text{NO}_x$ 。其中, 以燃料型  $\text{NO}_x$  为主, 在燃料的挥发分析出阶段并且氧气充足的条件下才能形成燃料型  $\text{NO}_x$ 。如果此时氧气的

量不够, 则燃料中的氮将大量地转化为氮气,  $\text{NO}_x$  的生成量就会减少。空气分级燃烧根据这个原理, 通过改变送风配风方式控制炉内空气分布, 实现有计划的分级燃烧。

改造前煤粉燃烧器与二次风喷嘴是分开布置的, 燃料风、一次风和二次风是分批加入射流火焰, 煤粉火焰是一种边燃烧边同二次风混合的扩散火焰, 因此形成了一种较长的火焰结构如图 6 所示。由于燃烧本身的不稳定性和不均匀性, 在高温燃烧区局部会产生  $\text{NO}_x$  的富集地带, 如图 9 改造前 22 m 区域中  $\text{NO}_x$  值达到最大。但是因为并没有采取分级燃烧,  $\text{NO}_x$  的量在整个炉膛内的疏运过程中并没有显著降低, 这在水平烟道出口截面  $\text{NO}_x$  质量分布中 (对应炉膛高度 45 m) 有所表现。

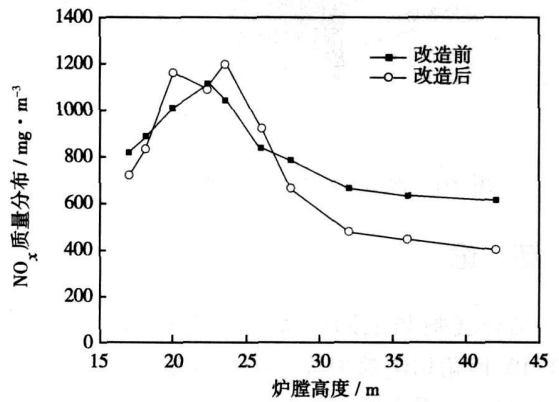


图 9 改造前后沿炉膛高度各截面平均  $\text{NO}_x$  质量分布曲线

采用新型燃烧器后在沿炉膛高度方向上, 两组燃烧器组织了双级还原氧化区域, 总体上会增加  $\text{NO}_x$  的还原量, 如图 10 所示。在两个还原燃烧区, 燃料中的氮将被分解生成大量的  $\text{HN}$ 、 $\text{HCN}$  和  $\text{CN}$  等, 它们相互复合生成  $\text{N}_2$  或将已生成的  $\text{NO}_x$  还原分解, 这样能够有效减少热力型  $\text{NO}_x$  的生成。同时, 在两个还原区上方的氧化主燃烧区, 煤粉较快地析出挥发分并开始着火, 迅速进入浓相区实现了部分  $\text{NO}_x$  的分解还原, 加大了火焰内还原  $\text{NO}_x$  的比例。在两个燃尽区, 气体温度较低也抑制了热力氮的生成。

新型燃烧器通过改变送风配风方式控制炉内空气分布, 实现有计划的分区燃烧。图 9 中, 在 20 和 25 m 的两组燃烧器截面出现了  $\text{NO}_x$  的峰值, 最大值达到近  $1200 \text{ mg/m}^3$ 。而在 22 和 25 m 后的区域,  $\text{NO}_x$  有明显的下降, 这就是生成的  $\text{NO}_x$  进入还原区

和燃尽区,一部分被还原生成其它产物。对比改造前后  $\text{NO}_x$  从峰值衰减的程度,可以看出采取双区燃烧后的变化更加剧烈。虽然改造后  $\text{NO}_x$  最大值比改造前略大,但是到了出口处已经变为了  $402 \text{ mg/m}^3$ ,比改造前的  $615 \text{ mg/m}^3$  降低了  $34.6\%$ 。

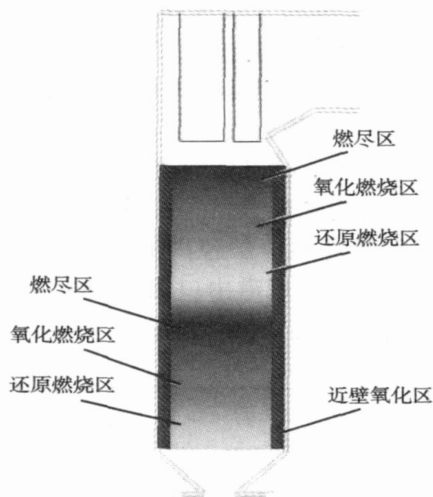


图 10 改造后炉膛内典型区域分布

## 4 结 论

结合试验测试同时采用数值模拟方法,对某 200 MW 四角切圆锅炉改造前后的炉内热态工况进行了计算,结果表明:

(1) 改造后炉内配风均匀,形成的切圆基本在炉膛中心,气流旋转强烈。由于附壁射流把高温燃气和火焰包围,避免了炉膛壁面气流的死区,使得结渣情况得到了改善;

(2) 改造后煤粉颗粒的平均流动速度降低,延长了在炉膛内停留的时间,使其燃烧得更加充分;

(3) 改造后的燃烧器采用空气分级燃烧,推迟了煤粉燃烧过程中氧气的供给,加强了炉内燃烧区的还原性气氛,有利于降低  $\text{NO}_x$  最终排放浓度和减小水冷壁上可能发生结渣的范围;平均  $\text{NO}_x$  排放降低了  $34.6\%$ ,有效地降低了锅炉排气污染;

(4) 改造后的燃烧器采用空气分级燃烧一定程度上降低了燃烧效率;

(5) 试验和计算结果证明对锅炉的改造工程进行的比较成功。数值计算结果和试验拟合较好,工程试验测量可以为数值计算提供有力的依据,数值计算可以探究炉膛内部温度场组分场的具体形式,两者相互结合指导实际设计改造。

## 参考文献:

[1] 潘 维,池作和,斯东波,等. 200 MW 四角切圆燃烧锅炉改造工况数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 110-115.

[2] 张 波,文 军,徐党旗,等. 某电站亚临界直流炉改造前、后炉内燃烧的数值模拟及分析[J]. 热能动力工程, 2005, 20(2): 197-200.

[3] 刘泰生,周 武,叶恩清. 燃尽风对炉内流动和燃烧过程影响的数值模拟[J]. 动力工程, 2006, 26(1): 117-120.

[4] 李芳芹,魏敦崧,马京程,等. 燃煤锅炉空气分级燃烧降低  $\text{NO}_x$  排放的数值模拟[J]. 燃烧化学学报, 2004, 32(5): 537-541.

[5] 潘 维,池作和,李 戈,等. 四角切圆燃烧锅炉燃烧和污染物排放数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(6): 761-764.

[6] 安恩科,周洪权. 电站锅炉燃烧特性的数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(8): 1042-1045.

(编辑 滨)

## 新技术

# 大功率汽轮机轴承内的液压静力升轴系统的完善

《Тяжелое Машиностроение》2006 年 7 月号报道了对汽轮机组轴承半液体和半干摩擦工况的研究,即研究轴承在启动、停机以及盘车装置工作时的工作情况。

就是说,在对滑动轴承最不利的运行工况下,也要检查其可靠性。运行经验表明,巴氏合金轴瓦经受了高度的磨损,结果轴承镗孔发生变形并且破坏了轴承工作表面和轴之间的同心度和间隙值。轴承巴氏合金强烈的磨损导致支承的振动并降低汽轮机组运行的可靠性。

ЛМЗ(列宁格勒金属工厂)和 ЦКТИ(中央锅炉涡轮机研究所)针对汽轮机高负荷、大尺寸轴承完成的试验研究,分析了几个参数并优化了液压静力升轴系统液压静力室的布置。

新研制的液压静力升轴系统已应用于大功率汽轮机的轴承,提高了其承载能力和工作的可靠性。

(吉桂明 供稿)

ducted. The steam output of the boiler has increased by nearly 40% when compared with a 0.5 t/h conventional boiler having the same volume, thus exhibiting a comparatively good thermodynamic performance. **Key words:** pulsation combustion, pulsation heat transfer, pulsation frequency, boiler, self-excited burner

燃煤电站锅炉 NO<sub>x</sub> 排放影响因素的数值模拟分析 = **Numerical Simulation and Analysis of the Influencing Factors of NO<sub>x</sub> Emissions of Coal-fired Utility Boilers** [刊, 汉] / LIN Peng-yun, LUO Yong-hao, HU Li-yuan (Research Institute of Thermal Energy Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 529 ~ 533

A coal-fired utility boiler is one of the main sources of NO<sub>x</sub> pollutants. By using a CFD (computational fluid dynamics) software platform and a numerical calculation method, a numerical simulation was performed of various combustion conditions of a utility boiler to study the different factors exercising an influence on NO<sub>x</sub> emissions of the boiler in question. The calculation results show that the excess air ratio is one of the major factors influencing the production of NO<sub>x</sub> and the concentration of NO<sub>x</sub> emissions will increase with an increase of the excess air ratio. A change of the secondary-air distribution mode can also influence the generation of NO<sub>x</sub>. Among the three combustion conditions being calculated, the concentration of NO<sub>x</sub> produced by equal air distribution is the lowest followed by that of a reverse-tower type air distribution. The girdled type air distribution has produced the highest concentration. To change the secondary-air deflection angle can influence the amount of NO<sub>x</sub> produced. The concentration of NO<sub>x</sub> emissions will decrease in case of an increase in the secondary-air deflection angle. **Key words:** coal-fired boiler, numerical simulation, NO<sub>x</sub> emission, influencing factor

某 200 MW 四角切圆锅炉燃烧器改造降低 NO<sub>x</sub> 数值模拟 = **Numerical Simulation of the Modification of Burners for a 200 MW Tangentially Fired Boiler to Reduce NO<sub>x</sub> Emissions** [刊, 汉] / XING Fei, FAN Wei-jun (College of Energy Source and Power Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China, Post Code: 100083), CUI Jin-lei, DENG Yuan-kai (Beijing Guodian Kehuan Clean Combustion Engineering Technology Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100039) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 534 ~ 538

To address such problems as comparatively high NO<sub>x</sub> emissions and serious slagging in the 200 MW tangentially fired boiler of a power plant in China, a study has been conducted of the in-furnace combustion process before and after burner modification by using a CFD (computational fluid dynamics) software platform and numerical simulation method. The calculation results show that due to the effect of attached wall jet flow, high-temperature zones are concentrated in the central part of the furnace, effectively preventing boiler slagging. After modification, the furnace had a reducing atmosphere zone even greater than that of a boiler adopting conventional combustion modes, thus suppressing the generation of NO<sub>x</sub> emissions and reducing them by 34.6%. The calculation results after the modification correspond quite well with those of test ones. The numerical simulation can well provide a theoretical basis for the design, modification and operation of the boiler in question. **Key words:** boiler combustion, temperature distribution, NO<sub>x</sub> emissions, numerical simulation

高压汽水两相流摩擦阻力特性的研究 = **A Study of Frictional Resistance Characteristics of High-pressure Steam-water Two-phase Flows** [刊, 汉] / ZHU Yu-qin, LI Ya-hong (Technology Research Center of Petroleum Refinery Engineering, Xi'an Shiyu University, Xi'an, China, Post Code: 710065), BI Qin-cheng, CHEN Ting-kuan (National Key Laboratory on Multi-phase Flows in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 539 ~ 541

A study was performed of the frictional resistance characteristics of the water-wall tubes in subcritical and close-to-critical pressure zones of a 600 MW once-through boiler made in China. The test section consists of 1Cr18Ni9Ti stainless steel tubes having a diameter of  $\phi 25 \times 3$  mm with the following experimental parameters: pressure  $p = 12 \sim 21$  MPa, mass flow