

煤粉锅炉膜法富氧局部助燃技术开发及应用

张家元¹, 周子民¹, 阳绍伟², 陈乔平³

(1. 中南大学能源科学与工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 长沙有色冶金设计研究院, 湖南长沙 410011;

3. 中铝公司河南分公司热力厂, 河南郑州 450041)

摘要: 针对 150 t/h 煤粉动力锅炉存在的高温腐蚀、结焦、热效率低及无油助燃低负荷稳燃能力差等问题, 利用膜法富氧技术, 首次开发了局部富氧助燃技术, 设计了膜法富氧局部助燃系统, 进行了局部增氧助燃技术应用于煤粉锅炉的工业试验。实践证明, 大渣及飞灰可燃物含量降低, 锅炉热效率提高了 2.5% 以上; 降低了 NO_x 排放浓度, 在 120~150 t/h 负荷下为 627~768 mg/m^3 ; 提高了低负荷不投油稳燃能力, 可以在 50% 额定负荷下断油稳燃; 有效解决了炉膛结渣和高温腐蚀等问题, 为煤粉锅炉的安全、经济、环保运行开辟了一个新方向。

关键词: 煤粉锅炉; 膜法富氧; 局部助燃; 节能; 环保

中图分类号: TK224.1; TK229.6 文献标识码: A

引言

中铝公司河南分公司热力厂 6 号锅炉曾先后出现水冷壁严重的高温腐蚀、结焦、运行经济性差、无油助燃最低稳燃负荷相对过高等情况。2005 年 3 月对该锅炉进行了各种配风方式下冷态空气动力场试验和燃烧调整试验。

试验中发现, 在不同工况下, 该锅炉运行的锅炉效率在 87%~89% 之间, 燃烧效率在 92%~93% 之间, 最低不投油稳燃负荷为 65% BMCR, 均低于设计值。另一方面由于大风量运行导致炉内假想切圆较大, 出现燃烧器出口射流偏斜冲刷水冷壁, 水冷壁结渣和高温腐蚀严重。

针对中铝公司河南分公司热力厂 150 t/h 四角切圆中压煤粉动力锅炉存在的问题, 在浓淡燃烧的基础上, 借助计算机数值模拟技术, 开发了局部富氧助燃技术, 设计了膜法富氧局部助燃系统。

1 膜法富氧系统及辅助设备设计

1.1 膜法富氧系统设计

膜法富氧技术被发达国家称之为“资源的创造性技术”, 有关技术和系统等均已十分成熟。它和变压吸附及深冷法相比, 具有投资少、启动快、寿命长、操作简单、使用方便、安全等优点, 广泛适用于各种窑炉燃烧的需要^[1]。

本系统采用负压操作流程^[1-3], 其流程如图 1 所示。空气经过过滤器除去灰尘, 在氧氮分离器中通过膜件进行分离, 得到富氧和富氮气体, 富氮气体经过排废管道由鼓风机排出; 富氧气体经过真空泵进入氧气缓冲罐进行脱湿处理, 之后由增压风机提供动力经过预热器预热后送入富氧喷嘴助燃。该系统产生的

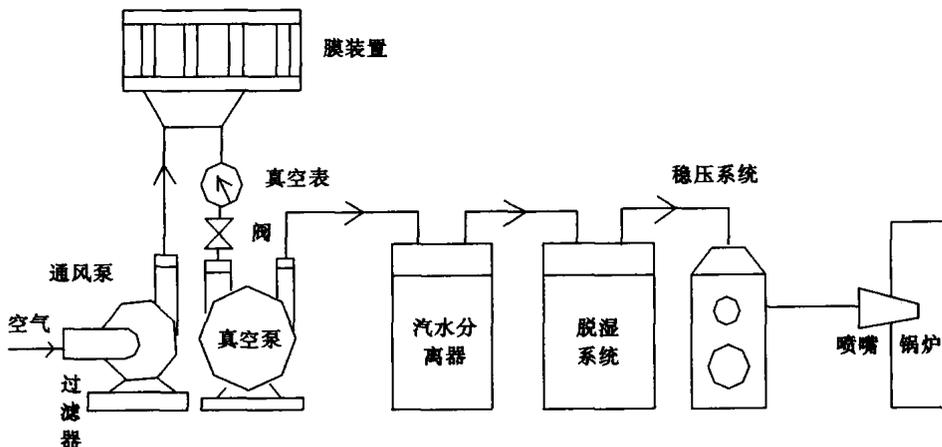


图 1 膜富氧系统负压操作系统流程图

收稿日期: 2006-09-29; 修订日期: 2007-01-23

基金项目: 中国博士后基金资助项目(291054)

作者简介: 张家元(1968-)男, 湖北浠水人, 中南大学副教授

富氧空气技术指标如表 1 所示。

表 1 膜富氧系统设计技术指标

	富氧风 O ₂ 浓度/%	富氧风流量 /m ³ ·h ⁻¹	富氧风出口 流速/m·s ⁻¹	出口富氧风 温度/°C
设计值	28~30	3 200	38	260

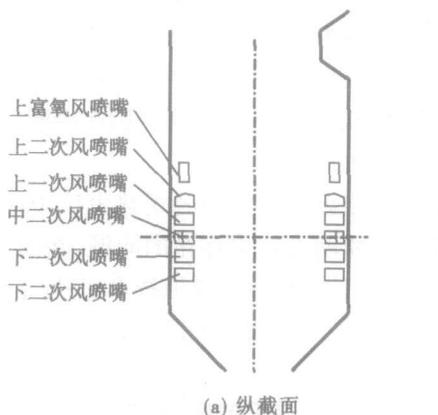
1.2 富氧风喷嘴设计

富氧风喷嘴的形状和安装位置的设计是技术的关键。通过对炉内速度场和温度场的数值仿真及多次冷态和热态工业试验,确定了富氧风喷嘴的形状和安装位置。富氧风喷嘴安装在炉膛四角,每角设

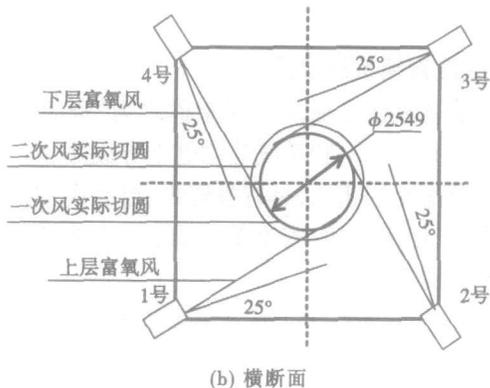
计安装两层,上层位于 10.5 m 处,下层位于 9.3 m 处(通过中二次风喷口)。下层富氧风喷嘴出口与炉墙成 25° 夹角,作为贴壁风,在水冷壁附近形成氧化性气氛,并实现炉膛向火侧欠氧燃烧,背火侧富氧燃烧;上层富氧风作为燃尽风,以降低飞灰碳含量。富氧风喷嘴安装位置及燃烧系统如图 2 所示。

1.3 富氧风预热器设计

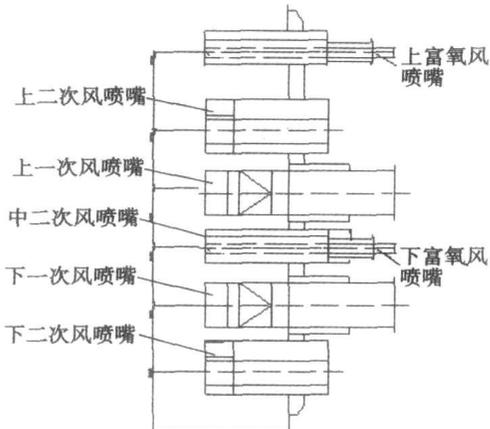
富氧流预热器是对膜法富氧后的空气流进行预热的热交换器。富氧风在进入炉内之前要预热,以免影响锅炉的安全生产,设计预热温度 260 °C。富氧流预热器设计安装在转向室。富氧风预热器设计如图 3 所示,安装位置如图 4 所示。



(a) 纵截面



(b) 横断面



(c) 燃烧器剖面

图 2 富氧风喷嘴安装位置及燃烧系统示意图

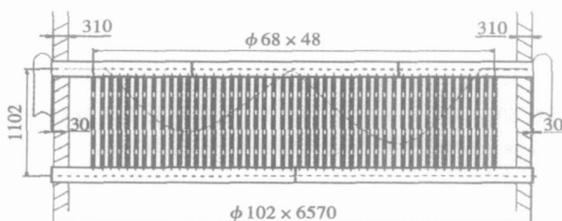


图 3 富氧风预热器简图

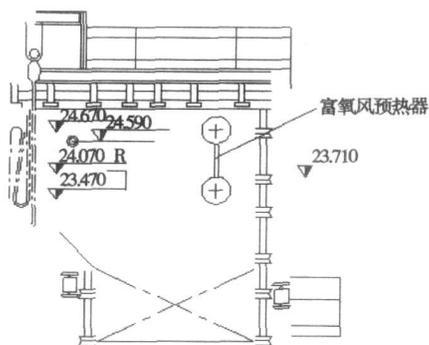


图 4 富氧风预热器安装位置示意图

2 炉内速度场测量

冷态试验主要关注旋转气流的实际切圆大小、切圆是否偏斜和贴壁等情况,特别是测量富氧投入之前和投入之后燃烧器区域炉膛断面上气流分布的情况,通过对比,了解富氧投入后对气流动力场的影响,以及整个炉内气流的运动情况。为热态运行调整、性能检测及锅炉正常运行提供必要的条件和依据。

在一、二次风门特性试验及各测速装置标定工作完成后,根据气流进入第二自模化区及冷、热态动量比相等的要求,在各一、二次风门特性曲线上找出

对应的风门开度值, 将各风门置于此开度, 维持风门特性试验时的一、二次总风压, 复测一、二次风速, 对于个别有偏差的风门予以适当地调整, 以满足等温模化试验原则及四角配风均匀的要求。

用速度测量法进行炉内空气动力场测量。在炉内燃烧器区拉“十”字坐标线, 坐标线上分若干坐标点, 用电子风速仪在坐标线上每点进行测量, 根据测量数据, 绘出相应的速度玫瑰图, 确定气流分布情况及切圆直径, 如图 5 ~ 图 8 所示。其中下层为下一次风喷嘴口处 (8.9 m 层) 炉内断面位置, 上层为中二次风喷嘴口处 (9.3 m 层) 炉内断面位置。

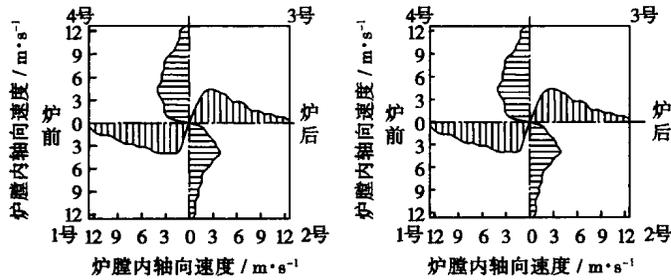


图 5 未开富氧时上、下层轴向速度玫瑰图

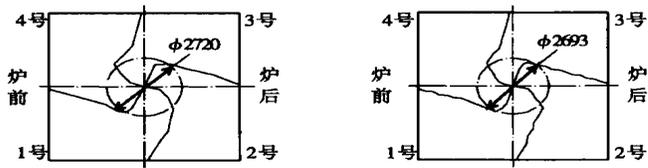


图 6 未开富氧时上、下层切圆情况

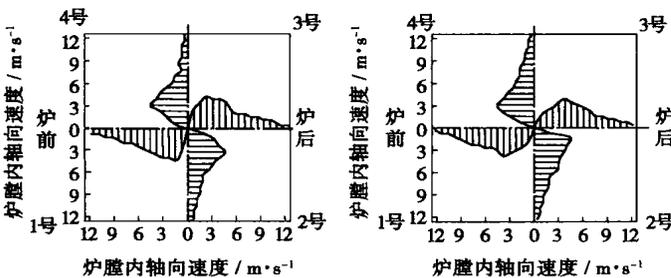


图 7 开富氧时上、下层轴向速度玫瑰图

从冷态切圆图 6 和图 8 可见切圆中心略偏北侧 (3 号和 4 号角侧墙) 炉墙, 但切圆还在炉膛中心, 切圆位置适中; 气流呈逆时针旋向, 与设计旋转方向相同, 没有气流和固体颗粒贴壁的情况发生; 二次风切圆直径略大于一次风切圆直径, 基本形成“风包粉”

的流动状态。

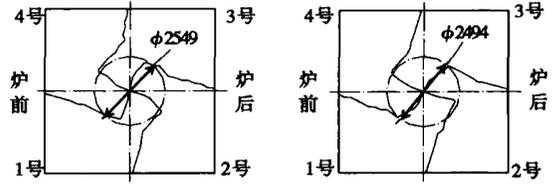


图 8 开富氧时上、下层切圆情况

富氧风通过喷嘴分二层送入炉膛, 上层富氧风相当于常规燃烧器的燃尽风, 而下层富氧风相当于侧边风。加入富氧风后, 对炉内动力场具有一定影响, 使炉内切圆有所增大, 但没有刷壁情况, 不会影响锅炉的正常运行。因为富氧空气流的喷入, 使燃烧器区附近水冷壁处于氧化性气氛中, 对减少炉膛的结渣和高温腐蚀有利。在浓煤粉着火之后, 再逐渐的与淡一次风、旋流二次风、富氧风混合, 其火焰的气氛逐渐由还原性气氛过渡到氧化性气氛, 有利于煤粉的燃尽, 提高煤粉的燃烧效率。

3 工业性应用分析

2005 年 3 月膜法富氧局部助燃系统安装调试完成, 2005 年 4 月在实炉上进行了冷态动力场和热态燃烧调整工业试验, 2005 年 5 月膜法富氧局部助燃系统投入运行, 在系统运行一年后于 2006 年 7 月 18 日进行了锅炉性能考核试验。一共进行了 8 种工况的试验, 各工况的试验目的为:

- (1) 工况 T01、T02、T03 常规性试验, 常规性操作, 未进行调整, 目的在于测量该锅炉在常规运行方式下的特性;
- (2) 工况 T04、T05 为富氧风局部助燃及二次风配风方式试验, 目的在于研究富氧风局部助燃效能及各种二次风配风方式对锅炉运行性能的影响;
- (3) 工况 T06、T07 目的在于考核锅炉效率、锅炉烟气排放特性、防高温腐蚀及结渣性能; 工况 T08 目的在于锅炉低负荷稳燃能力。

试验期间煤质分析结果如表 2 所示。热效率和热损失测试情况如图 9 所示。

从试验结果图 9 可以看到, 同常规运行方式相比, 排烟热损失减少 1.2% 左右; 固体未完全燃烧热

损失降低 1%左右, 锅炉实测热效率比常规运行方式下提高了 2.5%以上, 锅炉效率明显提高, 表明富氧风起到了很好的助燃效果。

烟气排放特性测试结果如表 3 所示。从测试结果可以看到, 测点处水冷壁壁面附近的 O₂ 含量远高于 2%, 呈现为明显的氧化性气氛, 表明富氧助燃技术有利于防范水冷壁高温腐蚀和严重结渣现象的发生^[4]。锅炉 NO_x 排放浓度较改造前有大幅度下降, 降幅 20%左右, 在 120~150 t/h 负荷下为 627~768 mg/m³, 为国内燃用贫煤同类锅炉的最好水平^[3]。可见, 富氧助燃技术的应用确能有效降低 NO_x 排放浓度, 具有较好的环保性能。

表 2 试验期间煤质工业分析

	试验工况		
	T01~T03	T04~T07	T08
原煤水份 W _m ^y /%	11	11	11.5
煤粉分析基水份 W _{mf} ^f /%	3.56	3.56	4.58
煤粉分析基挥发份 V _{mf} ^f /%	26.38	26.38	25.56
煤粉分析基灰份 A _{mf} ^f /%	26.74	26.74	29.59
煤粉分析基低位热值 Q _{dw} ^f /kJ·kg ⁻¹	18759	18759	17839
煤粉细度 R ₉₀ ^f /%	18.2	18.2	18.4
入炉煤应用基灰份 A _y ^y /%	24.71	24.71	27.44
入炉煤可燃基水份 W _y ^y /%	11	11	11.5
入炉煤应用基挥发份 V _y ^y /%	37.86	37.86	38.83
入炉煤应用基低位热值 Q _{dw} ^y /kJ·kg ⁻¹	17312	17312	16545

表 3 NO_x 排放情况和氧量

	工况 T01	工况 T06	工况 T07
A 侧氧量/ %	5.21	6.76	6.58
A 侧 NO 含量/ mL·m ⁻³	362	257	323
空预器出口处 实际测量值			
B 侧氧量/ %	5.07	6.51	6.12
B 侧 NO 含量/ mL·m ⁻³	386	262	320
空预器出口处 换算至 6%O ₂			
标准状态下 NO _x (以 NO ₂ 计)/ mL·m ⁻³	726	556	675
水冷壁附近平均含 O ₂ 量/ %	0.79	3.09	3.69

另外, 锅炉燃烧稳定性大幅度提高, 在燃用贫煤时 V_{ad} 为 25.6%, A_{ad} 为 27.44%, 可以在 50% 额定负荷下断油稳燃。

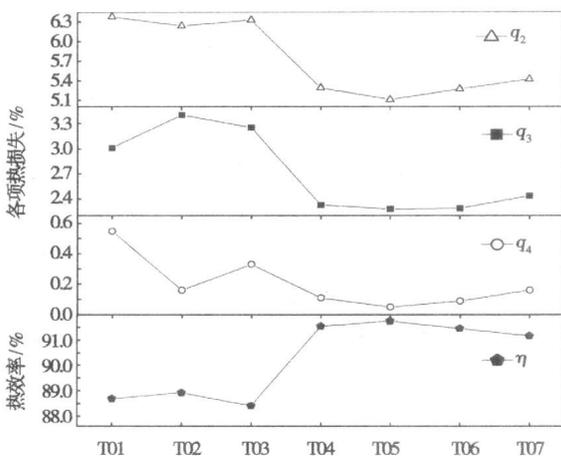


图 9 各试验工况热效率及热损失

4 结 论

(1) 根据中铝公司河南分公司热力厂 6 号锅炉实际情况, 设计了膜法富氧系统及其附属设备。系统具有投资少、启动快、寿命长、操作简单、使用方便、安全等优点。

(2) 从冷态动力场测试结果分析, 富氧空气局部助燃技术应用后, 使炉内切圆有所增大, 但没有刷壁现象, 不会影响锅炉的正常运行, 有利于燃料喷入炉膛后的着火和燃尽, 能大大减轻炉墙的结渣和高温腐蚀, 有效地保证锅炉安全、稳定、经济运行。

(3) 锅炉性能考核试验结果显示: 局部富氧助燃技术的应用, 有效地解决了炉膛结焦和高温腐蚀问题; 提高了低负荷不投油稳燃能力, 燃用贫煤时, 可以在 50% 额定负荷下断油稳燃; 大渣及飞灰可燃物含量降低, 固体未完全燃烧热损失降低 1.1%, 排烟热损失减少 1.2%, 锅炉实测热效率比常规运行方式下提高了 2.5% 以上; 锅炉 NO_x 排放量在 120~150 t/h 负荷下为 627~768 mg/m³, 为国内同类燃用贫煤锅炉的最好水平。

参考文献:

[1] 方寿奇. 膜法富氧技术在燃煤锅炉上的应用[J]. 膜科学与技术, 2001, 48(1): 46-47.
 [2] 王学松. 膜分离技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
 [3] 王子延. 热能与动力工程测试技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
 [4] 成庆刚, 李争起. 低 NO_x 排放燃烧技术及燃烧优化的试验研究[J]. 锅炉技术, 2005 36(5): 32-35.
 [5] 岑可法. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理和计算[M]. 北京: 科学出版社, 1994.

(编辑 辉)

tion Monte Carlo's method

煤粉锅炉膜法富氧局部助燃技术开发及应用 = **Development and Applied Research of Local Combustion-supporting Technology Involving a Membrane-method-based Oxygen Enrichment for Pulverized Coal-fired Boilers** [刊, 汉] / ZHANG Jia-yuan, ZHOU Jie-min (College of Energy Science and Engineering under the Central South University, Changsha, China, Post Code: 410083), YANG Shao-wei (Changsha Nonferrous Metallurgical Design Institute, Changsha, China, Post Code: 410011), CHEN Qiao-ping (Thermal Power Plant of Henan Subsidiary under China Aluminum Industry Company, Zhengzhou, China, Post Code: 450041) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 391 ~ 394

In the light of various problems existing in a 150 t/h pulverized coal-fired boiler, such as high-temperature corrosion, slagging, low thermal efficiency and inferior combustion stability at low loads when no oil is used for combustion support etc., the authors have by adopting membrane method-based oxygen enrichment techniques developed local combustion-supporting technology featuring oxygen enrichment and designed a combustion-supporting system based on the above technology. Industrial experiments applying the technology under discussion were conducted for a pulverized coal-fired boiler. Practice has shown that with a reduction in combustible content in large slags and in fly ash, the thermal efficiency of the boiler has been increased by over 2.5%, the NO_x emission concentration lowered ($627 \sim 768 \text{ mg/m}^3$ at a load of 120 ~ 150 t/h) and the combustion stability at low operating loads (50% of rated load) enhanced with no oil being provided for combustion support. As a result, various problems, such as slagging in furnace and high-temperature corrosion, have been effectively solved, blazing a new path for the safe, economical and environment-friendly operation of pulverized coal-fired boilers. **Key words:** pulverized coal-fired boiler, membrane method-based oxygen enrichment, local combustion support, energy saving, environmental protection

螺旋槽管换热过程的三维速度场与温度场耦合数值模拟 = **Numerical Simulation of a Three-dimensional Velocity Field Coupled With a Temperature Field for the Heat Exchange Process in a Spirally Grooved Tube** [刊, 汉] / PENG Jie, YU En-lin (College of Mechanical Engineering under Yanshan University, Qinhuangdao, China, Post Code: 066004), JIANG Wei (College of Mechanical Engineering under Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin, China, Post Code: 150027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 395 ~ 398

On the basis of structural features and heat transfer characteristics of a spiral-grooved tube heat exchanger, a three-dimensional geometric model was established for the flow and heat transfer in a heat exchanger with water serving as its working medium. By employing a finite-element analysis software ANSYS, simulated were the conditions of the velocity and temperature fields in the heat exchanger during its heat exchange process and obtained were the convective heat exchange coefficients for inner and outer walls of the spiral-grooved tubes respectively. The simulation results show that the deeper the groove, with an increase in Reynolds number, the better the heat-exchange performance. When the Reynolds number is relatively small, the greater the fin pitch, the poorer the heat exchange effectiveness. It has been found that the heat exchange coefficient of the spiral-grooved tubes is approximately 2.5 times that of the bare tubes when compared with the bare tube heat exchangers of the same kind, thus intensifying the heat transfer and providing a basis for the further theoretical research and widespread application of such products. **Key words:** spiral-grooved tube, intensification of heat exchange, numerical simulation, ANSYS, convective heat exchange coefficient

换热器特性参数与热力性能熵产分析 = **Entropy Production Analysis of Heat Exchanger Characteristic Parameters and Thermodynamic Performance** [刊, 汉] / YU Min, MA Jun-jie, YANG Mo, et al (Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 399 ~ 403

On the basis of the second law of thermodynamics, introduced was a non-dimensional entropy production number N_s to express the thermodynamic perfection degree of a heat exchanger. Through an analysis and evaluation of entropy production studied was the impact of heat exchanger characteristic parameters, such as inlet temperature ratio α , preheat temperature ratio β , water equivalent ratio W , effective energy ϵ , heat transfer units NTU and flow pattern, on heat exchange performance and mutual relations. The results of the study indicate that the entropy production number N_s will increase with the