

双炉膛炉内空气动力场的数值模拟研究*

朱 彤 范卫东 信 伟 陈力哲 吴少华 秦裕琨

(哈尔滨工业大学)

〔摘要〕本文对 1000 t/h 直流炉单炉体双炉膛的炉内空气动力场进行了数值模拟研究。数值模拟预示结果与现场实际测量结果基本一致。分析认为切向燃烧方式中,直流燃烧器前后墙矩形布置是造成烟气冲刷水冷壁的主要原因,一次风喷口高而窄、二次风喷口扁而宽是一二次风分离的主要原因,进而产生水冷壁烟侧高温腐蚀。

关键词 炉内空气动力场 数值模拟 高温腐蚀 锅炉 双炉膛

分类号 TK229.54 TK224.1

0 引言

某发电厂# 7~# 10 锅炉系上海锅炉厂早期生产的 1000 t/h 亚临界单炉体双炉膛“IT”型布置中间再热固态排渣煤粉锅炉,四台锅炉运行至今都先后发生了程度不同的水冷壁烟侧高温腐蚀。1996 年 1~5 月份,就因高温腐蚀而发生水冷壁泄漏两次,严重影响了锅炉的安全、经济运行。

本文就这种单炉体双炉膛的炉内空气动力场进行了数值模拟,从燃烧器布置和喷口结构上对产生高温腐蚀的原因进行分析研究。

1 数值模拟方法

$k-\epsilon$ 双方程模型是当今模拟切向燃烧炉内单相气体三维湍流流动最为成熟的一种方法,其方程表达式在许多文献中均有介绍(这里从略)本文采用 SIMPLEC 方法,应用 TDMA 逐线逐面迭代求解离散后的有限差分方程组,壁面附近采用壁面函数方法处理^[1]。

2 现场试验结果

经对这四台锅炉多次检查发现,高温腐蚀区域

分布有一共同规律:各台锅炉高温腐蚀区域主要分布在炉膛标高 13~23 米范围内,即主要集中在燃烧器区域及稍偏上区域。

本文针对高温腐蚀最为严重的# 7 炉进行数值模拟试验研究,炉膛结构及燃烧器喷口布置见图 1。一次风喷口高宽比为 530:300(喷口中间有 70 mm 宽的垂直钝体),二次风喷口高宽比为 300:560。双炉膛共布置八组燃烧器,形成两个旋向相反的、假想切圆直径为 500 mm 的旋转气流。在实炉上进行冷态空气动力场试验时,实测气流切圆直径为 3500~5200 mm,并且观察到前墙有气流冲刷壁现象。在实际运行中发现有煤粉气流冲刷水冷壁现象。图中同时示出了炉膛横截面上水冷壁发生高温腐蚀严重的区域。另外,图中所示温度数值为与# 7 炉结构完全一致的# 8 炉热态运行中炉膛火焰温度测量值,前后墙上的炉温测孔标高为 18500 mm(E 层二次风喷口中心截面标高为 18295 mm),两侧墙上的炉温测孔为甲层一次风喷口标高 13570 mm 处由图可见,温度高的测孔附近高温腐蚀也严重。

3 数值模拟结果及讨论

图 2 是甲层一次风喷口截面的切向速度向量分布图,左右炉膛的速度分布基本对称,# 1 # 4 # 6 # 7

* 国家“九·五”重点科技攻关资助项目

收稿日期 1997-01-16

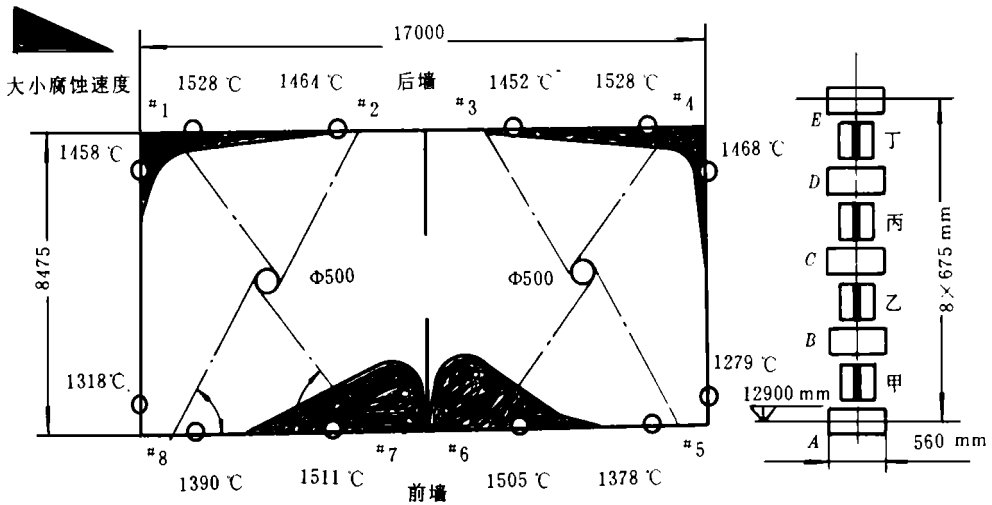


图 1 # 7 炉膛燃烧器布置及炉膛横截面腐蚀区域示意图

燃烧器出口射流呈扇形扩散,炉内气流结构呈“八”字形的两个旋向相反的斜长椭圆,“八”字头部在# 6 # 7角之间的区域;# 5 # 8燃烧器出口射流冲向两侧墙。计算出的乙层一次风喷口截面上的炉内气流结构与图 2基本接近,只是# 2 # 3 # 5 # 8燃烧器出口射流的偏转稍小,仍呈斜长椭圆形。

由于锅炉采用双炉膛结构,八组燃烧器布置在前后墙上,无法形成正四角布置,燃烧器喷口连线呈矩形布置,长宽比高达 1.513 (8475: 5600)。若同层平面的八支燃烧器出口射流速度一样,则由于各股射流在相互撞击前行程不一样,使得# 1 # 4 # 6 # 7燃烧器射流分别对# 2 # 3 # 5 # 8燃烧器射流的冲击作用较为强烈。而# 6 # 7燃烧器射流在燃烧器喷口附近速度较高,刚性较强,故# 6 # 7燃烧器射流偏转的不很大;尤其是为了保证在安装、更换燃烧器时,能够抽出# 2 # 3 # 6 # 7燃烧器,要求# 2和# 3 # 6和# 7燃烧器中心线之间的距离较大(距离为 $2 \times 1830\text{mm}$);并且# 6 # 7燃烧器射流方向分别偏向各自炉膛的中心。这样,热态运行中前墙# 6 # 7燃烧器之间成为无低温烟气流保护的空间。# 2 # 3燃烧器射流在# 1 # 4燃烧器射流的冲击下,大部分气流直接冲向# 6 # 7燃烧器之间的区域,对水冷壁形成强烈的冲刷。并且由于一次风喷口相对高而窄,抗偏转的刚性较弱;在炉内旋转气流的横向推动作用下,

很容易偏向壁面。热态运行中,# 2 # 3燃烧器的一次风煤粉气流在上游火焰的点燃作用下,至# 6 # 7燃烧器之间的区域时已是高温火焰;造成煤粉气流冲刷壁面,且壁面附近温高较高。而二次风喷口扁而宽,相对抗偏转的刚性较强,对# 1 # 4 # 6 # 7燃烧器附近区域的氧气供应不很充分,则大量的还原性气氛 CO 、 H_2 和腐蚀性气氛 H_2S 集中在此区域,且存在煤粉气流冲刷壁面现象。若没有防治措施,则必然导致高温腐蚀现象。

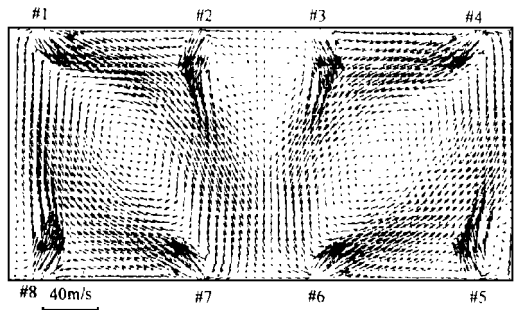


图 2 甲层一次风喷口截面速度向量分布图

同样,由于# 1 # 4燃烧器中心线与两侧墙存在 1070 mm距离,使得# 5 # 8燃烧器射流在# 6 # 7燃烧器射流的冲击作用下,部分气流分别冲向# 4 # 1燃烧器与侧墙之间的空隙处,且存在一二次风分离

现象, 进而形成易于产生高温腐蚀的条件。

上述设计运行工况的气相流场数值模拟结果所预示的高温腐蚀区和温度分布与图 1A 所示完全吻合。一般称 # 1 # 4 # 6 # 7 燃烧器所在角部为热角 (Hot Corner), 其它四角为冷角 (Cold Corner)。实际观察发现: 在热态运行中, 热角燃烧器出口处的煤粉气流着火较早, 火焰明亮, 而在冷角处可以观察到明显的“黑龙”。冷角燃烧器喷出的煤粉气流到达热角区域时还含有大量的未燃尽煤粉, 使得热角区域壁面附近的还原性气氛大大增加, 因而高温腐蚀最为严重。

由于燃烧器出口高速射流卷吸周围流体, 因而在图 2 中可以看到, # 2 # 3 # 5 # 8 燃烧器背火侧存在明显的回流区。其中, 由于 # 2 # 3 燃烧器与双面水冷壁之间的距离相对 # 1 # 4 燃烧器与侧墙之间的距离大, 因而, # 2 # 3 燃烧器之间的回流区相对也较大。

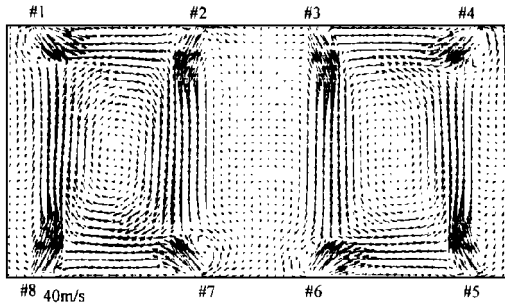


图 3 丙层一次风喷嘴截面速度向量分布图

图 3 为丙层一次风喷嘴截面切向速度矢量分布图, 左、右炉膛速度分布对称。与图 2 不同的是, 旋转气流不再呈“八”字形结构, 而是两个长轴平行于侧墙的椭圆。随着炉膛高度的增加, 炉内气流受到整列燃烧器出口射流的切向转动量的影响越大; 炉内气流的转动量不断增大, 使得热角射流的偏转不断加大; 并且随着冷角射流冲向热角区域, 使得热角区域的静压急剧增加, 并且燃烧器下部射流冲向热角区域后形成明显的轴向向上运动的气流, 迫使冷角燃烧器上部的射流不能完全冲到热角区域的壁面附近, 对热角燃烧器射流的冲击逐渐变强; 另外, 侧墙附近的气流轴向速度逐渐增加, 也使冷角燃

烧器射流的偏转减小; 因而燃烧器下部斜长椭圆的长轴逐渐偏转到与侧墙平行。从图中可以看出, 炉内气流的旋转直径减小了。

图 4 图 5 分别为甲层一次风和 C 层二次风喷嘴截面的静压分布。与燃烧器布置在炉膛四角的炉内空气动力场计算结果不同的是, 除燃烧器出口附近静压较大以外, 热角区域的静压也很大, 各单个炉膛中央和冷角射流背火侧的静压较小。表明有气流冲击到热角区域, 而冷角燃烧器射流的背火侧存在回流区; 燃烧器射流的向、背火侧的压差较大。

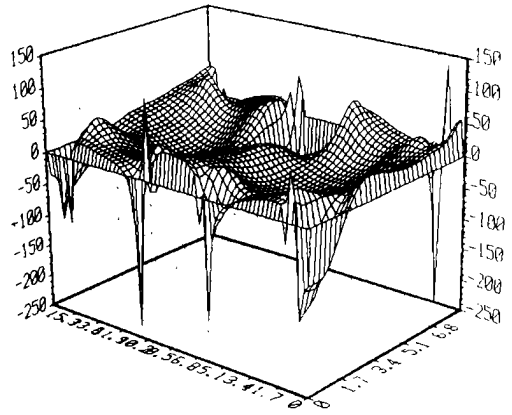


图 4 甲层一次风喷嘴截面的静压分布

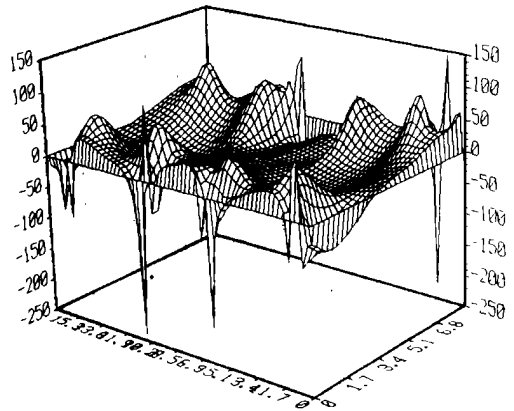


图 5 C 层二次风喷嘴截面的静压分布

图 6 图 7 分别为距前后墙壁面 0.128 m 纵剖面速度向量分布图 (视图方向为从后墙指向前墙)。

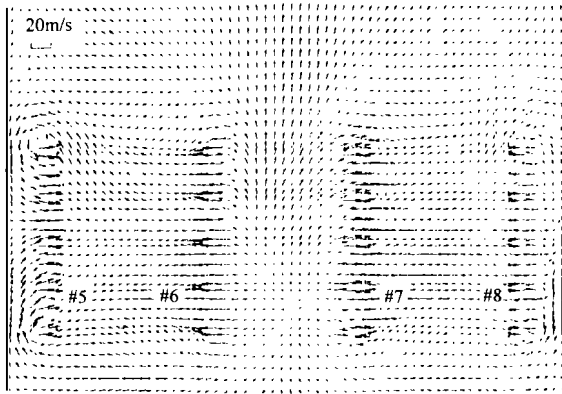


图 6 平行前墙的纵剖面速度向量分布图 ($\delta = 128\text{mm}$)

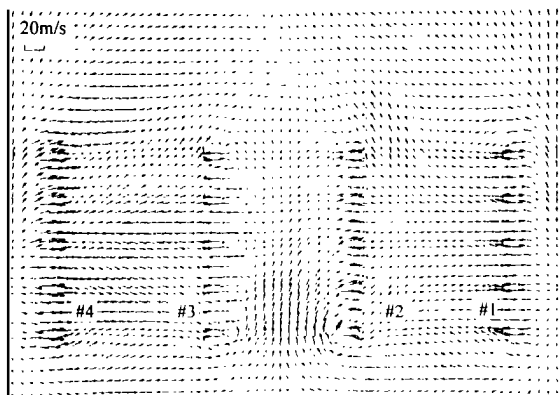


图 7 平行后墙的纵剖面速度向量分布图 ($\delta = 128\text{mm}$)

可以看出, 每个炉膛同面墙上两列燃烧器之间炉内气流的切向速度较大, 而轴向速度较小; 在燃烧器区域下部, #2 #3 燃烧器之间、#5 #8 燃烧器与侧墙之间, 即冷角燃烧器出口射流的背火侧都存在卷吸炉底气流的现象, 气流在背火侧沿轴向上升, 其速度较大。沿炉膛高度方向上, 燃烧器喷口之间距离较近, 射流喷出后很快混合, 形成一整片气屏; 由于燃烧器出口高速射流卷吸周围气体, 使得气流屏与背火侧壁面之间形成负压回流区, 炉膛中心的烟气无法穿过气流到达背火侧, 因而炉膛下部的气体和燃烧器出口射流的一部分气体回流至背火侧 (图 2 图 3); 为补充燃烧器背火侧中部被卷吸走的气体, 这里的

轴向速度相对较大。另外, 有一小部分气流从燃烧器上部流到背火侧, #1 #4 燃烧器与侧墙之间、#6 和 #7 燃烧器之间中、下部区域气流轴向速度较小, 而上部区域气流轴向向上速度较大。

综上所述, 1000 t/h 直流炉单炉体双炉膛下部燃烧器区域, 炉内旋转气流结构呈“八”字形两个斜长椭圆; 中上部呈长轴平行于侧墙的两个椭圆。在整个燃烧器区域, #1 #4 #6 #7 燃烧器壁面处均存在明显的气流冲刷水冷壁现象。并且存在一二次风分离现象, 进而导致上述热角区域的高温腐蚀现象严重。数值模拟预示结果与实际测量结果一致。从炉内空气动力场角度分析认为: 切向燃烧方式中, 燃烧器前后墙矩形布置, 且存在燃烧器喷口与壁面之间较大的空隙是出现气流结构呈椭圆形的主要原因; 而一次风喷口高而窄, 射流速度低, 二次风喷口宽而扁且射流速度高是造成一次风容易贴壁、一二次风分离的主要原因。热态运行中, 易导致高温腐蚀现象的发生。

但是, 如果冲刷炉壁的气流中含有较高的氧浓度, 则可以有效地阻止高温腐蚀现象的发生^[2]。因此, 应尽可能使一次风煤粉气流在炉膛中心区域燃烧, 减少高温火焰对水冷壁的冲刷; 而含氧浓度高的二次风在炉壁四周, 保护炉壁, 防止炉壁发生高温腐蚀。

参考文献

- 1 陶文铨. 数值传热学. 西安交通大学出版社, 1988
- 2 何佩璋, 赵仲瑜, 秦裕禄. 煤粉燃烧器设计及运行. 机械工业出版社, 1987

(渠源 编辑)

作者简介 朱彤, 男, 1969年生, 1997年7月毕业于哈尔滨工业大学热能工程专业, 获博士学位。现在同济大学热工教研室任教。曾在重要期刊及会议上发表论文十多篇。(200092 上海同济大学热工教研室)

双炉膛炉内空气动力场的数值模拟研究 = **A Numerical Simulation Study of Aerodynamic Field Characteristics in a Double-Furnace** [刊, 中] /Zhu Tong, Fan Weidong, et al (Harbin Institute of Technology) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(6): 401~ 404

A numerical simulation study is conducted of the aerodynamic field characteristics of a 1000 t/h once-through boiler double-furnace. The results of the simulation study basically agree with the measured results on site. Through analysis it is shown that the front and rear wall rectangular arrangement of impellerless burners in a tangentially fired furnace constitutes a major cause of the water walls being swept by flue gases. The separation of primary air and secondary air can be mainly attributed to a high and narrow primary air nozzle and a thin and wide secondary air nozzle, resulting in a high-temperature corrosion of the water walls on the gas side. **Key words** intra-furnace aerodynamic field, numerical simulation, high-temperature corrosion, boiler, double-furnace

切向燃烧煤粉炉后屏过热器对水平烟道入口烟速分布的影响 = **The Influence of the Rear-Panel Superheater of a Tangentially Fired Pulverized-Coal Boiler on the Gas Speed Distribution at the Inlet of a Horizontal Flue** [刊, 中] /Zhang Wenhong, He Baishu, et al (Xi'an Jiaotong University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(6): 405~ 407

A detailed measurement of the velocity fields in a panel and platen zone as well as at the inlet of the horizontal flue of a tangentially-fired boiler was conducted using a hot-wire anemometer. The influence of the rear-panel superheater on velocity distribution at the horizontal flue was studied, which provides useful reference data for the design and modification of utility boilers. **Key words** rear-panel superheater, speed excursions, tangentially fired pulverized-coal boiler

再热湿空气循环分析 = **Reheated Humid Air Cycle Analysis** [刊, 中] /Wang Yongqing, Chen Anbin (Harbin Institute of Technology) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(6): 408~ 411

The systematic analysis and optimization calculation of a humid air cycle have shown that reheating has a marked effect on enhancing the humid air cycle performance. Under the existing technical conditions (turbine inlet temperature 1300°C, pressure ratio 10~ 30) the cycle thermal efficiency can be as high as 59.2~ 60.2% with a specific power of 620~ 980 kJ/kg air. **Key words** humid air cycle, intermediary reheat, system analysis, optimization calculation

锅筒排污水炉内切向喷雾强化燃烧 = **Tangential Spray Intensified Combustion in a Boiler Furnace with Continuous Blowdown** [刊, 中] /Zhang Yongfu, Li Fangyue (Southeastern University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(6): 412~ 415

With the pressure reduction evaporation of boiler blowdown water serving as a steam spray working medium a tangential circle swirl flow can be formed in the combustion space of the boiler, resulting in an intensified combustion and the improvement of aerodynamic distribution in the furnace. The test and use verification on a UG-35/39 boiler have shown that the fly ash carbon content and boiler slag carbon content are lowered by 25.8% and 11.6% respectively. In addition, a considerable reduction of the fly ash quantity and gas emission concentration is also attained with a simultaneous effective control of SO_x content in the gas emissions. **Key words** blowdown water, evaporation, spray, intensified combustion

电站锅炉应用热管式空气预热器的利弊分析 = **Analysis of the Merits and Demerits of Using Heat Pipe Type**