

非预混燃烧中喷嘴结构布局影响火焰长度的变化

徐琼辉, 詹杰民

(中山大学 应用力学与工程系, 广东 广州 510275)

摘 要: 验证了用数值方法研究湍流燃烧的可靠性, 在燃气流量和喷口总面积不变的情况下, 调整喷口的数量和间距, 确定了多种燃烧器喷口布局方案; 讨论了非预混燃烧中喷口数量和间距对火焰长度的影响, 认为喷口数量和间距的改变不但会引起空气和燃气的混合程度发生变化, 也使得各股燃气之间的扰动程度不一样。所以应合理调整喷口布局, 改变燃烧器的火焰结构和温度分布, 使燃烧的高温区域更加集中, 提高燃气炉的热效率。

关 键 词: 非预混燃烧; 喷口数量; 喷口间距; 火焰长度

中图分类号: TK224.1 文献标识码: A

引 言

如何提高燃气炉的热效率是燃气炉技术改革的重点研究课题。燃气炉的热效率和燃气的燃烧效率、热量利用率等有很大的关系, 而这些指标参数的优化都受燃烧器结构的影响。因为燃烧器结构的改变可以调整非预混燃烧中燃气和空气的混合程度和燃烧速度^[1~2], 影响燃气的完全燃烧程度; 另外通过改变燃烧器的结构改变火焰的整体结构^[3], 如火焰的长度、火焰的密集程度等, 进而改进燃气炉热量的利用率。

高效的燃烧器具有能量大、燃烧完全、火焰瘦短和火焰温度高等特点^[4]。如何提高燃烧器的效率, 可以从改变燃烧器结构着手, 如改变燃烧器的喷嘴的数量、尺寸、分布密度等^[5]。本文利用数值计算方法, 研究喷嘴分布密度与燃烧器火焰长度、温度之间的相互关系, 探寻燃烧器喷口合理布局的途径。

1 数学模型、数值方法及其可靠性验证

甲烷燃烧是一个湍流含化学反应的过程, 甲烷和空气中的氧气发生反应的基本化学方程式为:



利用涡耗散模型来模拟该化学反应, 湍流 $k-\epsilon$ 双方程模型模拟流体的流动, 整个计算采用 QUICK 格式, 非结构化网格。

130 t 四角切圆煤粉锅炉炉膛尺寸为 6.624 m×6.624 m, 总体高度 13.280 m; 锅炉的燃烧器四角切圆布置, 假想切圆直径为 0.545 m, 如图 1 和图 2 所示。燃烧器共有 4 组 7 层(28 个)煤粉及空气喷口,

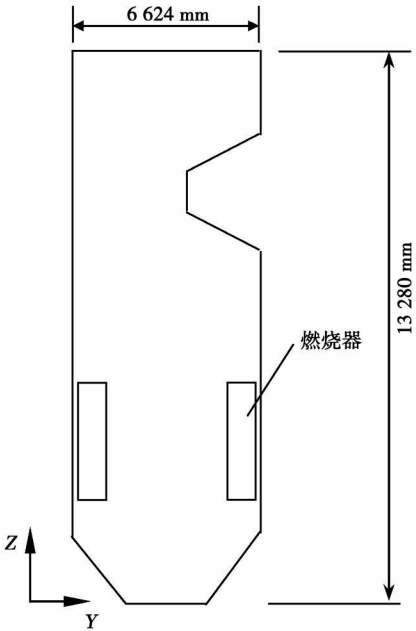


图 1 锅炉炉膛立面示意图

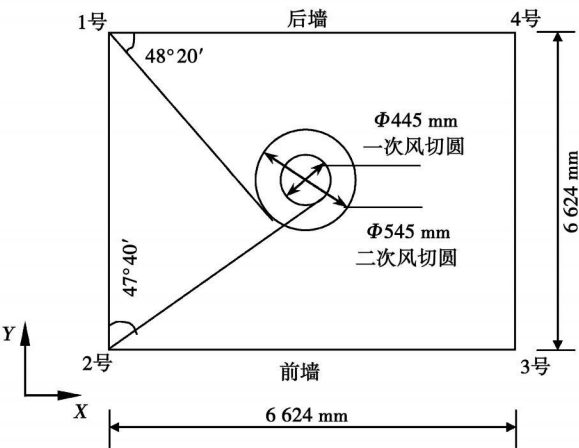


图 2 一、二次风切圆示意图

分别是 2 层一次风煤粉喷口、3 层二次风喷口(其中一层为贴壁风喷口)、1 层三次风喷口以及 1 层燃尽风喷口。在锅炉热工综合测试中, 用非接触式光学高温计和红外高温计测量的炉膛内部温度数据以及数值计算结果如表 1 所示^[6]。本文利用 Fluent 中的 $k-\epsilon$ 双方程模型、涡耗散模型和离散相模型对炉膛里面的热工过程进行多场耦合数值计算, 其结果同列于表 1 中。

表 1 炉膛内温度的测试值与计算值的比较 (°C)

	上一次风 喷口横截面	燃尽风上 1.5 m 横截面	折焰角上 部横截面
计算值 (文献 [6])	1 402	1 283	1 130
测试值	1 320	1 120	1 020
计算值 (本文)	1 255	1 097	963

由于非接触式的温度计无法固定于某个具体位置, 可近似认为温度计测得的温度值反映的是相应截面上沿测试方向的最高温度; 而表中的计算值取相应截面上温度的最大值。因此不能对两者进行误差分析, 只能从分布态势上判断二者的数据是否一致。从表中的数据可以看到, 数值结果的温度分布与测量结果的温度变化态势基本一致; 而且所计算结果更加接近于测试值, 说明与文献 [6] 中气相燃烧模型的求解相比, 本文用有限元方法求解涡耗散模型, 其计算结果的精度更高, 更接近于实际。

左高右低, 与测试结果基本相似。因此认为用 Fluent 中的 $k-\epsilon$ 双方程模型、涡耗散模型、离散相模型的模型组合模拟湍流燃烧过程, 其结果真实可靠。由此可以推断用 $k-\epsilon$ 双方程模型和涡耗散模型的模型组合模拟甲烷湍流燃烧的过程, 其结果也是可信的。

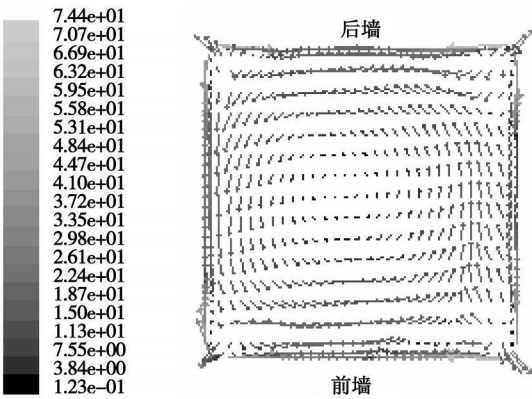


图 4 贴壁风喷口处的速度分布

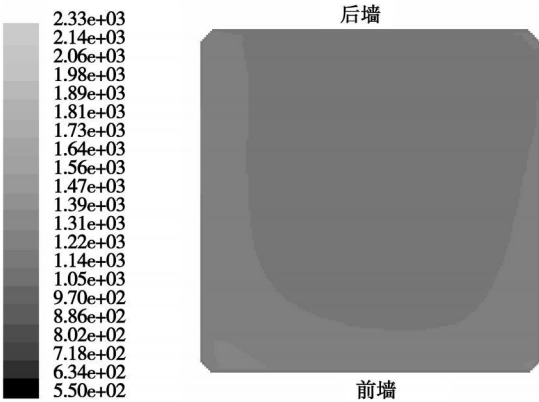


图 5 燃尽风喷口上部横截面温度分布

2 燃烧器喷口布局方案

燃烧器的结构与燃烧器的形状、大小、喷口分布的密度等都有关系。图 2 所示的多孔板燃烧器中, 要改变燃烧器喷口的分布状况, 在喷口总面积保持不变的情况下, 主要考虑两个方面的因素: 一是喷口的大小和数量, 二是喷口间的距离。

2.1 改变喷口的大小和数量

当喷口总面积保持不变时, 喷口的数量选取了 4 孔、19 孔、37 孔、74 孔和 148 孔 5 种情况; 孔的位置确定, 以图 6(c) 所示的圆盘为基准, 水平方向和竖直方向上均匀分布的直线互相交织, 交点即为喷口的圆心。图 6 给出了不同数量喷口的分布情况。

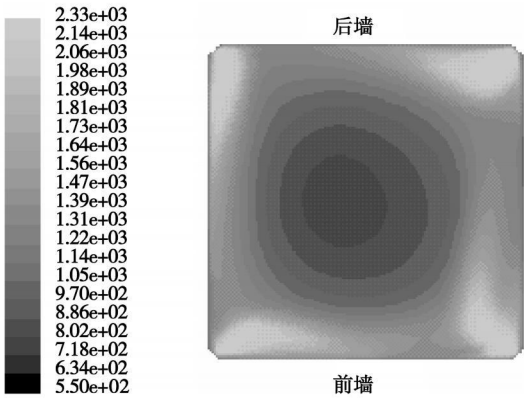


图 3 贴壁风喷口处横截面温度分布

图 3~图 5 分别给出了锅炉不同位置横截面的温度和速度分布计算结果。从贴壁风喷口的速度和温度分布可以看出炉膛的切圆往 1 号角和后墙方向偏, 贴壁风对水冷壁起到了一定的保护作用, 且火焰比较短, 这些都与锅炉的实际情况相吻合。图 5 显示了燃尽风喷口上部横截面的温度分布, 其趋势是

2.2 改变喷口间的距离

以图 6 所示的各种喷口布局方式为基准, 设此时各喷口的间距为 d_s , 分别将各喷口间的横向和纵

向间距同时减少一半($\frac{1}{2}d_s$)、扩大一倍($2d_s$)和扩大两倍($3d_s$), 得到不同的喷口布局方式, 并根据实际情况, 适当调整计算区域的大小。

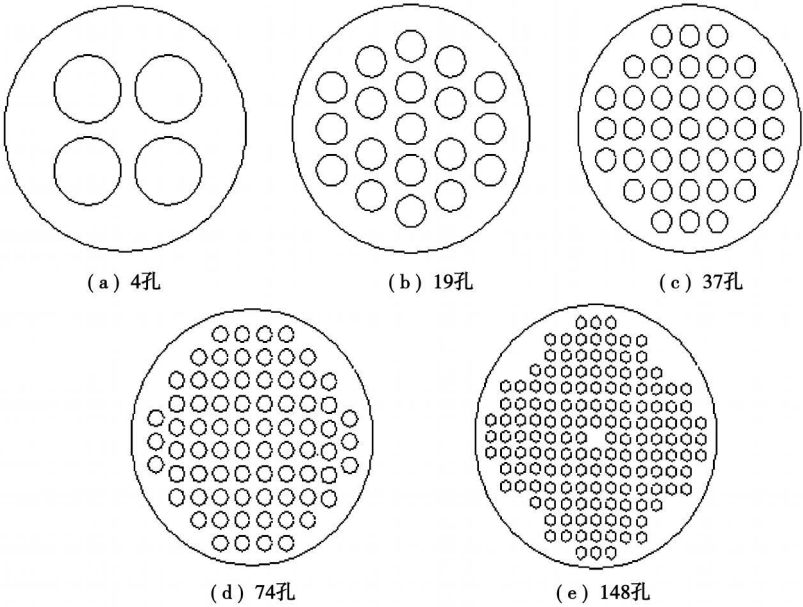


图 6 喷口位置分布

3 边界条件的确定

燃烧器喷嘴的数量和分布情况改变以后, 喷口的总面积没有变化, 因此当单位时间内流入燃烧区域的燃气总量保持不变时, 各喷口燃气的入口边界条件也不会改变, 均取 0.01 m/s。

本研究的燃烧方式均为非预混燃烧, 因此入口边界上的 k_{in} 和 ϵ_{in} 分别按以下方法进行计算^[7]:

$Re = ud / \nu$ (2)

$I = 0.16 \times Re^{-1/8}$ (3)

$k_{in} = \frac{3}{2} (uI)^2$ (4)

$\epsilon_{in} = 0.09^{3/4} \times \frac{k_{in}^{1.5}}{0.07d}$ (5)

式中: u —入口速度, m/s; d —入口直径, m; ν —甲烷燃气的运动粘度系数, $14.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

燃烧过程中所需要的氧气均来自周围环境, 计算中通过压力出口边界进入燃烧区域。

4 计算结果及其分析

根据喷口布局方案的不同, 将结果以不同的方式分组, 比较分析各工况下的温度、火焰长度分布情况。

表 2 给出了各工况下火焰的平均长度, 图 7 ~ 图 11 分别给出了各工况纵截面的温度和火焰分布情况。

表 2 各工况火焰的平均长度 (m)

喷口数量	喷口间距			
	$0.5d_s$	d_s	$2d_s$	$3d_s$
4 孔	1.33×10^{-2}	1.76×10^{-2}	1.82×10^{-2}	1.69×10^{-2}
19 孔	1.27×10^{-2}	1.39×10^{-2}	1.46×10^{-2}	1.55×10^{-2}
37 孔	1.15×10^{-2}	1.28×10^{-2}	1.37×10^{-2}	1.25×10^{-2}
74 孔	1.42×10^{-2}	1.75×10^{-2}	1.89×10^{-2}	1.18×10^{-2}
148 孔	1.26×10^{-2}	1.43×10^{-2}	1.63×10^{-2}	1.40×10^{-2}

4.1 喷口数量相同, 喷口间距改变

不论喷口数量如何变化, 火焰长度和温度分布情况与喷口间距的关系基本一致。当喷口间距为 $2d_s$ 的时候, 火焰长度达到最大值, 燃烧区域中温度高于 1 500 K 的高温区域的分布范围最广; 当喷口间距小于 $2d_s$ 的时候, 火焰的长度会随着喷口间距的增加而变长, 高温区域的分布范围也会随着喷口间距的增加而扩大; 当喷口间距大于 $2d_s$ 的时候, 火焰的长度会随着喷口间距的增加而变短, 高温区域分布范围也会相应缩小。

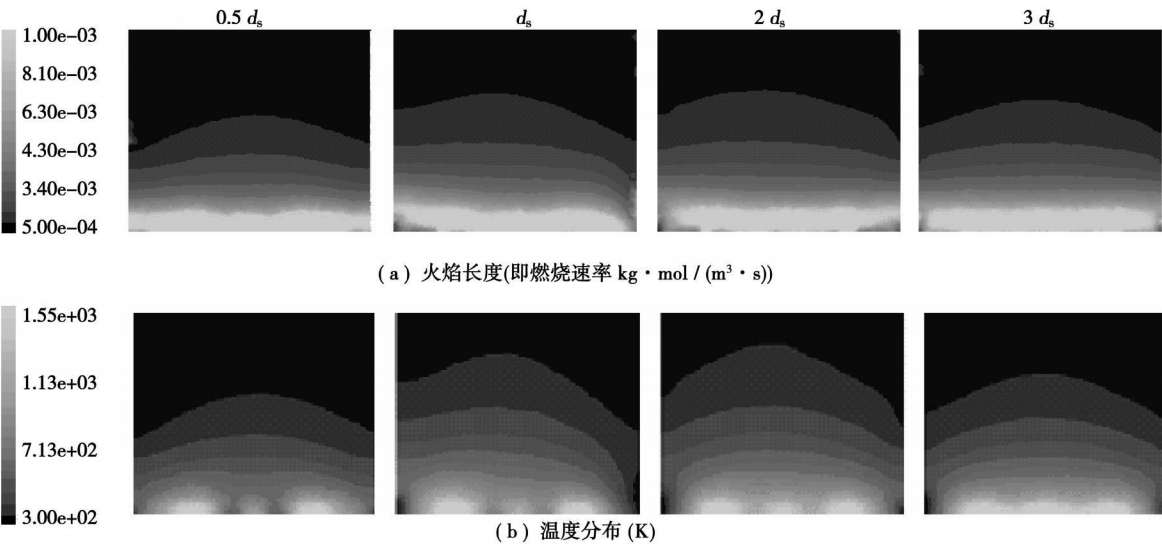


图 7 喷嘴数量为 4 时的火焰长度和温度分布

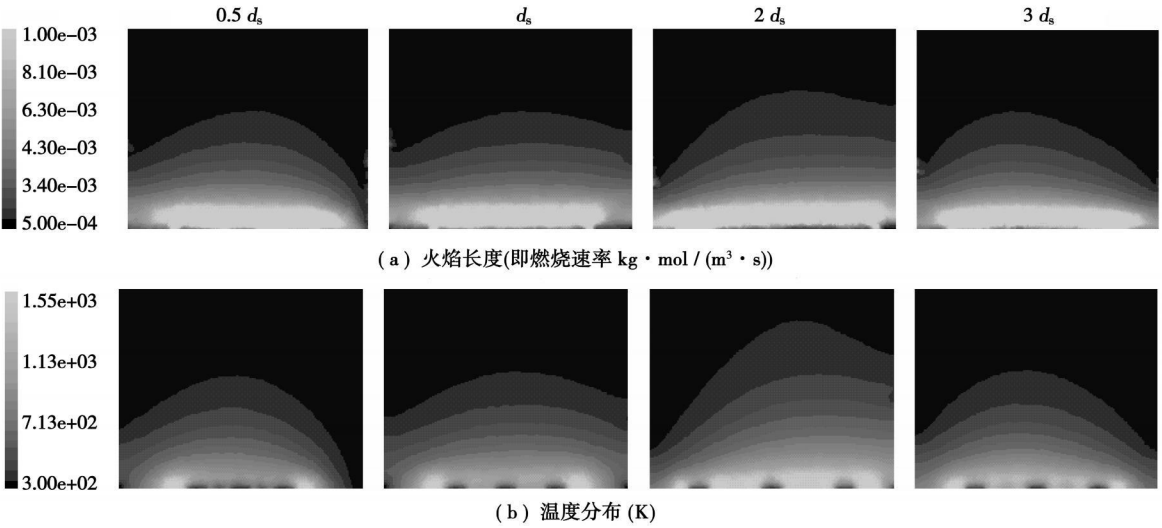


图 8 喷嘴数量为 19 时的火焰长度和温度分布

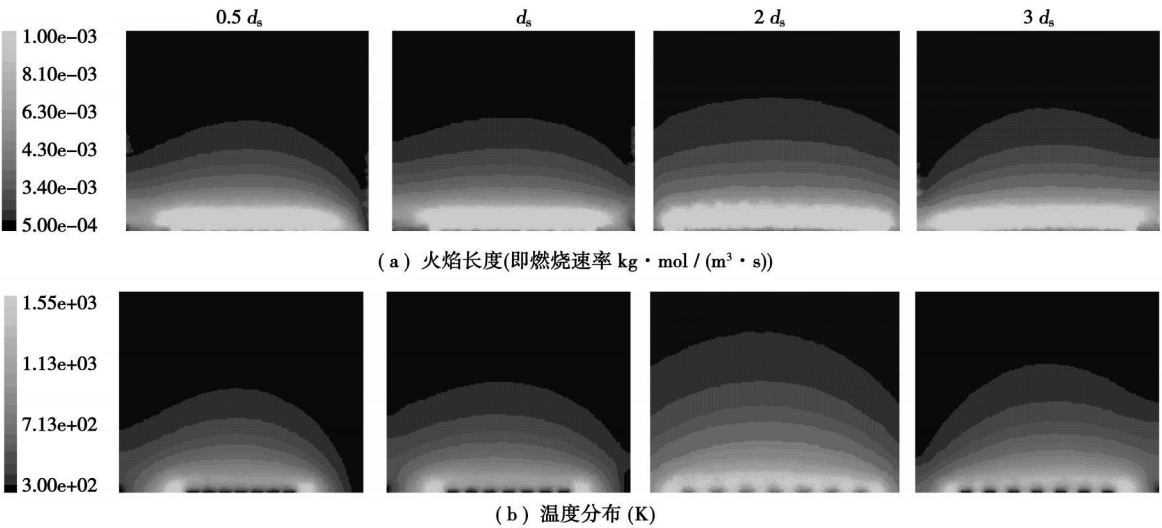


图 9 喷嘴数量为 37 时的火焰长度和温度分布

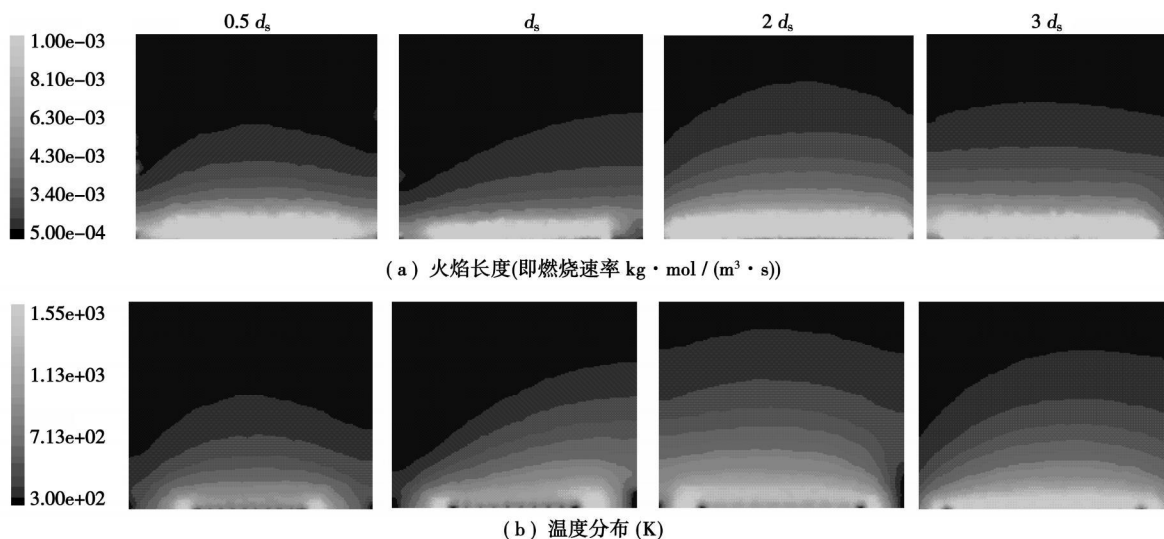


图 10 喷嘴数量为 74 时的火焰长度和温度分布

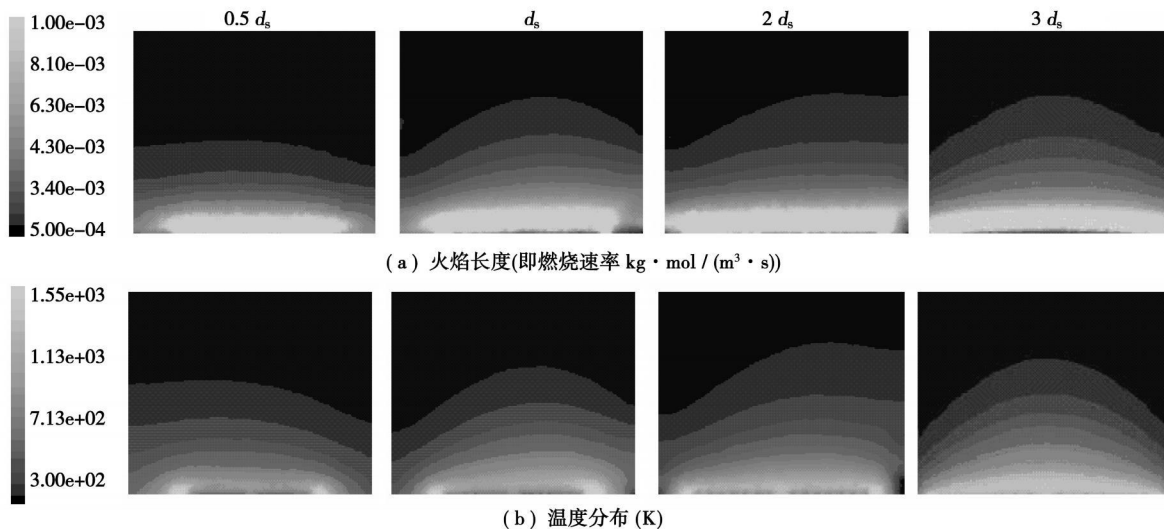


图 11 喷嘴数量为 148 时的火焰长度和温度分布

非预混燃烧中空气和燃气以不同的路径进入燃烧区域, 边混合边燃烧, 燃烧速率和火焰长度均取决于燃气和空气的混合速度。喷嘴间距的变化会直接影响到它们的混合速率, 且因为喷嘴间距的不同, 影响燃气和空气混合速率的主导因素也不一样。当燃气喷嘴的间距小于 $2d_s$ 的时候, 各股燃气经喷嘴进入燃烧区域后, 相近气流之间会相互扰动, 各喷嘴间距越小, 这种扰动越剧烈, 使得燃气和空气的混合速率越快, 燃烧速度越大, 则火焰越短, 高温区域越集中。随着喷嘴间距的增大, 各股燃气间的扰动不断减小, 火焰增长; 当燃气喷嘴的间距大于 $2d_s$ 后, 各股燃气间的扰动几乎可以忽略, 此时影响燃气和空气混合速率的主要因素是各股气流间的空间, 空间

越大, 燃气和空气接触混合的几率就越大, 燃烧得越快, 火焰越短, 高温区域越小。

4.2 喷嘴数量不同, 喷嘴间距比例相同

火焰的长度不仅受喷嘴间距的影响, 喷嘴数量对其的作用也不可忽略。前面的分析已经知道, 当喷嘴间距小于等于 $2d_s$ 时, 影响火焰长度的主要因素是各股气流之间的扰动, 从表 3 的计算结果可以看出, 各股气流之间扰动最强烈的情形表现在喷嘴数量为 37 个时, 此时相对于其它数量的喷嘴布局而言火焰长度最短, 高温区域最集中。

当喷嘴间距大于 $2d_s$ 以后, 影响燃气和空气之间混合速率的主要因素是喷嘴间距, 喷嘴间距越大火焰就越短。表 3 的数据显示, 相对于不同的喷嘴

半径而言, 当喷口数量为 74 个时喷口间距与喷口半径的比值最大, 说明该工况下的喷口分布最为稀疏, 所以与其它情况相比, 此时的火焰长度最短, 高温区域分布范围最小。

表 3 不同喷口数量下喷口半径和喷口间距

	喷口半径 r/m	基准喷口 间距 d_s/m	$\frac{1}{2}d_s/r$	d_s/r	$2d_s/r$	$3d_s/r$
4 孔	0.003 041	0.001 25	0.205 499	0.410 998	0.821 995	1.232 993
19 孔	0.001 395	0.000 877	0.314 695	0.628 674	1.257 348	1.886 022
37 孔	0.001	0.000 75	0.375	0.75	1.5	2.25
74 孔	0.000 707	0.000 586	0.414 427	0.828 854	1.657 709	2.486 563
148 孔	0.000 5	0.000 375	0.375	0.75	1.5	2.25

5 结 论

从以上的分析讨论看出, 燃烧器喷口的数量和喷口间距是影响燃烧器效率的两个很重要的因素, 合理调节燃烧器中喷口的数量和布局, 会对整个燃气炉热效率的变化起到重要作用。不论喷口数量多少, 燃烧器喷口间距为 $2d_s$ 时, 火焰最长, 高温区域范围最广; 当各股气流之间的扰动成为影响火焰长度的主要因素时, 37 个喷口的布局方案使得火焰长度最短, 高温区域分布最集中; 当喷口之间的间距成为影响燃气和空气混合速率的主导因素后, 74 个喷口的布局方案使得火焰最短, 高温区域最集中。

因此, 要提高燃气炉的热效率, 可以从改变燃烧器的结构入手, 在燃气量一定的情况下, 改变火焰长度, 调整高温区域的分布范围。

参考文献:

[1] DRISCOLL JAMES F. Turbulent premixed combustion; flamelet structure and its effect on turbulent burning velocities[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, 34(1): 91—134.

[2] 李方运. 天然气燃烧及应用技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.

[3] 比切埃 J M, 切给尔 N A. 燃烧空气动力学[M]. 陈 熙, 译. 北京: 科学出版社, 1979.

[4] 赵仲慧. 高效燃烧器在炼厂管式加热炉上的应用[J]. 石油炼制, 1984(8): 1—12.

[5] NOIRAY N, DUROX D, SCHULLER T, et al. Passive control of combustion instabilities involving premixed flames anchored on perforated plates[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007 31(1): 1283—1290.

[6] 徐琼辉. 煤粉锅炉热工过程多场耦合数值计算与温度场二重仿真方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004.

[7] 范维澄, 陈义良. 计算燃烧学[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1987.

(编辑 滨)

新技术、新工艺

燃气涡轮叶片材料的循环耐热性

据《Теплоэнергетика》2008 年 2 月号报道, 高温下镍合金循环氧化的特点是 3 个连续的阶段: 稳定的氧化并形成保护膜, 过渡到氧化膜开始破坏, 质量损失和损失的速度不断增加的阶段。

循环氧化(循环耐热性)是合金特殊的性能。通常被认为无侵蚀性的空气介质, 在循环氧化条件下却作为侵蚀性介质作用于镍基合金。

叶片镍合金的循环寿命可以用两种方法评定: 根据前两个阶段的持续时间(假设金属没有实质的腐蚀破坏)和根据所有 3 个阶段的持续时间(基于腐蚀破坏深度为 0.25 mm 的假设)。

合金循环氧化的机理在第一阶段和第三阶段是不同的。在 第一阶段和在等温条件下一样, 由于形成保护的氧化膜, 这一过程的速度不断放慢。

在研究各种金属材料循环耐热性和评定它们的循环寿命时, 建议广泛使用提议的试验方法。

(吉桂明 供稿)

and fuel, promoted, thus enhancing the combustion efficiency of the CFB boiler burning low-volatile coals. **Key words:** CFB (circulating fluidized bed) boiler, secondary air distribution, mixing of gas and fuel in a furnace, boiler combustion condition

电厂送粉系统煤粉浓度和速度的在线测量技术研究= **Study of the Technology of On-line Pulverized-coal Concentration and Velocity Measurement for Power Plant Pulverized-coal Conveyance Systems**[刊, 汉] / SUN Meng, LEI Jing (Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080), LIU Shi, LI Zhi-hong (Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 211 ~ 215

The accurate measurement of pulverized coal concentration in each air pipe and its guidance role for regulation during a combustion process are very important to the safe and cost-effective operation of a boiler. By using capacitance tomography, tested and studied were the concentration and velocity of solids conveyed by a dilute-phase pneumatic force at a normal temperature. To overcome the impact of the nonuniformity of the sensitive field of a capacitance sensor on image formation, a cyclone separator was set up in the test system. The role of the cyclone separator is to concentrate the solid particles mainly in the wall-surface zone with the electrodes of the sensor being located on the straight pipe of the separator. The concentration distribution was obtained by using a single-layer 8-pole capacitance sensor and adopting a pre-iterative image reconstruction algorithm. An analysis of the probability and frequency spectrum characteristics of flows at the upstream and downstream of the cyclone separator has verified that the flows can meet relevant requirements for capacitance measurement. In this connection, the axial velocity was obtained by measuring relevant capacitance signals from the poles in the upper and lower layers, and the tangential velocity was ascertained by measuring the relevant capacitance signals from a pair of adjacent poles in the same layer of the sensor. The measurement and contrast analysis of the volume fraction, axial and tangential velocity in the pipe section have proven that the method under discussion can ensure reliable measurement results. **Key words:** capacitance tomography, pulverized coal concentration, volume fraction, velocity measurement, gas-solid two-phase flow

非预混燃烧中喷嘴结构布局影响火焰长度的变化= **Influence of Nozzle Structure Layout on the Change of Flame Length in a Non-premixed Combustion Process**[刊, 汉] / XU Qiong-hui, ZHAN Jie-min (Department of Applied Mechanics and Engineering, Zhongshan University, Guangzhou, China, Post Code: 510275) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 216 ~ 221

Verified was the reliability of numerical methods on the study of turbulent combustion. Under the condition of the gas flow rate and the total area of spouts being kept unchanged, by adjusting the number and spacing of spouts, several burner spout layout versions were determined. The influence of the number and spacing of spouts on the flame length in a non-premixed combustion process was discussed. It is believed that the change in the number and spacing of the spouts will cause not only a change of the air and gas mixing degree but also make the disturbance degrees between various gas streams different. Hence, the spout layout should be properly adjusted to change the burner flame configuration and temperature distribution and make the high-temperature combustion zone more centralized, thus enhancing the thermal efficiency of a gas-fired boiler. **Key words:** non-premixed combustion, number of spouts, spout spacing, flame length

空冷机组协调控制系统鲁棒性分析= **Robustness Analysis of a Coordinated Control System for Air-cooled Units**[刊, 汉] / TIAN Liang, LIU Xin-ping, LIU Ji-zhen (Automation Department, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 222 ~