

气体示踪法研究燃烧器横向湍流混合扩散特性

刘建忠 曹欣玉 姚强 赵翔 黄镇宇
周俊虎 吴晓蓉 岑可法

(浙江大学热能工程研究所, 杭州310027)

摘要 用气体示踪法对侧边风燃烧器弱旋流一次风和侧边直流二次风横向湍流混合扩散特性进行了详细研究, 讨论了各截面混合物浓度分布规律及混合强度分布规律, 分析对燃料着火的影响, 同时利用湍流运动方程反算气体湍流扩散系数

关键词 燃烧器, 横向混合, 湍流扩散, 气体示踪法

引 言

燃烧器各股风混合扩散对组成良好的空气动力特性, 达到燃料稳定着火燃烧很有意义。通常用温度热平衡法研究混合扩散特性^[1]。该方法简单方便, 特别是当气流结构复杂、流速较低情况下测量温度较正确, 被广泛使用^[2,3]。但对于大型模化试验台, 因流量大, 必须采用大功率加热设备才能达到要求, 这给加工及试验均带来困难。而气体示踪扩散法, 是通过把特殊气体加入主气流中, 根据浓度分布变化来分析各股射流的混合情况。只要选择合理示踪介质, 可以避免这一缺点。

1 气体示踪研究方法及计算模型

气体示踪扩散法的原理, 是依据质量守恒方程和浓度平衡方程求得各次风浓度分布。假设参加混合的有一次风、二次风(侧边风)及环境气体(实炉中炉烟)。这三股射流引入的示踪气体浓度分别为 C_1, C_2, C_3 。在炉内某点A 相互混合后, 达到浓度平衡状况, 假设平衡浓度为 C_p 。

质量守恒方程为

$$\Delta G_1 = \Delta m_{A21}/\Delta m, \quad \Delta G_2 = \Delta m_{A2}/\Delta m, \quad \Delta G_3 = \Delta m_{A3}/\Delta m \quad (1)$$

式中, $\Delta m = \Delta m_{A1} + \Delta m_{A2} + \Delta m_{A3}$; $\Delta m_{A1}, \Delta m_{A2}, \Delta m_{A3}$ 为一、二次风及环境气体流经该点时质量流量; $\Delta G_1, \Delta G_2, \Delta G_3$ 分别为一、二次风及环境气体在该点的浓度

浓度平衡方程为

$$C_1 \Delta m_{A1} + C_2 \Delta m_{A2} + C_3 \Delta m_{A3} = C_p \Delta m \quad (2)$$

改变示踪气体浓度, 因量极小, 假设主气流质量流量不变, 则

$$C_1 \Delta m_{A1} + C_2 \Delta m_{A2} + C_3 \Delta m_{A3} = C_p \Delta m \quad (3)$$

¹⁾ 1995-03-19收到第一稿, 1995-09-26收到修改稿

联解式(1)~(3),可得一、二次风及环境气体在A点的流量分配(混合量)

$$G_1 = \frac{(C_1 - C_3)(C_p - C_3) - (C_1 - C_3)(C_2 - C_3)}{(C_1 - C_3)(C_2 - C_3) - (C_1 - C_3)(C_2 - C_3)} \quad (4)$$

$$G_2 = \frac{(C_2 - C_3)(C_p - C_3) - (C_2 - C_3)(C_1 - C_3)}{(C_2 - C_3)(C_1 - C_3) - (C_2 - C_3)(C_1 - C_3)} \quad (5)$$

$$G_3 = 1 - G_1 - G_2$$

在燃烧器出口任一截面上,各股风总浓度,即总的混合量可由下式确定

$$D = \int_{x_1}^{x_2} G(x) dx \quad (6)$$

式中, $G(x)$ 为一、二次风或环境气体在某一截面上径向质量浓度分布; x_1, x_2 为射流在某一截面上的径向边界位置

2 试验及计算结果与分析

2.1 一、二次风及环境气体在燃烧器出口截面上浓度分布

图1为二次风(侧边风)在燃烧器出口不同截面的中心水平线上沿径向浓度分布。该图在一定程度上表明了二次风在燃烧器出口的横向扩散情况,图上浓度未考虑环境气体混入量。由图可见,不同截面二次风混入量及混入程度有较大区别,在燃烧器出口附近,如140 mm 截面,二次风只扩散到一次风射流边界附近,但随着截面推移,二次风逐渐向一次风内部扩散。约在 $x = 500 \sim 600$ mm 截面处,二次风将扩散到一次风中心轴线位置处。同时,一次风也逐渐向二次风内部扩散。

图2为一次风射流中各截面上三股风的混合量(或浓度分布),由图可见,侧边风大约在离燃烧器140~150 mm 远处开始扩散到一次风射流里(此处 L/D 约为0.93~1.0),并随射流延伸而增加,但到一定位置后,相对浓度基本不变。在三股气流浓度分布中,环境气体扩散到一次风射流的速度最快,这可能是一次风旋转射流卷吸能力强的原因,可见环境气体即高温烟气,对燃料着火影响很大。只注意侧边风的扩散情况,而忽略环境高温气体对一次风的混合扩散是不适合的。

图1 燃烧器出口径向侧边风浓度分布

Fig. 1 Concentration distribution of secondary air at various cross-sections along axis

图2 一次风射流中一、二次风及环境气体浓度分布
Fig. 2 Concentration distribution of primary, secondary air and atom sphere in primary air

2.2 二次风横向混合强度

把单位距离上二次风浓度变化程度, 即二次风浓度曲线的斜率, 定义为混合强度 I , $I = dc/dx$.

图3为混合强度分布, 曲线的最高点均位于一、二次风中间偏向二次风位置, 并随着轴向距离延伸, 混合最强点逐渐向二次风方向移动 此外, 混合强度曲线均呈“山峰”型有规律分布, 中间大两边小, 表明一、二次风射流边界之间混合交换强烈, 向两边逐渐减弱 图4为二次风质量浓度等值线 线条稠密的地方, 混合强度大, 一、二次风气流交换强烈, 反之亦然 由图4可见, 二次风浓度等值线呈“花”形均匀分布, 说明混合比较均匀并逐步扩散 靠近二次风附近混合强烈

图3 二次风射流横向混合强度

Fig 3 Lateral mixing intensity of secondary air

图4 二次风射流浓度分布等值线

Fig 4 Concentration isopleth of secondary air

2.3 湍流交换系数的计算

在计算湍流交换系数过程中, 流函数可利用下式确定^[4]

$$\Psi = 2\pi \int_0^r \rho u r dr / m_1 \quad (7)$$

式中, m_1 为一次风质量流量 (kg/s), r 为径向距离 (m), u 为轴向速度 (m/s).

图5为一、二次风射流之间混合区域流场分布 图上零流线 ($\Psi = 0$) 即为一次风回流区边界, 在该线上部, Ψ 为负值; 下部为正值 在回流区及其附近, 流线相对较稀疏; 而在一、二次风之间, 流线相对较密 (Ψ 值分布可说明这点), 说明该区域气体流量较大, 而在回流区附近, 气流速度低、流量小, 这与实测结果相符

在一、二次风交接近, 轴向位置 $X = 200 \sim 700$ mm 之间的区域里, 流线有较好的平行性 这正是我们计算基础

对气相冷模试验, 燃烧湍流输运方程作以下假设: (1) 流场近似为定常稳态; (2) 无化学反应产生的源项; (3) 空气流为不可压缩连续性 则在直角坐标系可简化为

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (V_j m_a) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_a \frac{\partial n_a}{\partial x_j} \right) \quad (8)$$

设一次风的质量份额为 m_1 , 在以 P 为中心的微元控制体内 (实际上是个微型涡管) 的守恒方程可简化为 (在方程式两侧再乘上常数 A)

$$A V_j \Delta m_1 = \left[A \Gamma \frac{\partial n_1}{\partial s} \right]_e - \left[A \Gamma \frac{\partial n_1}{\partial s} \right]_w + \left[A \Gamma \frac{\partial n_1}{\partial n} \right]_n - \left[A \Gamma \frac{\partial n_1}{\partial n} \right]_s \quad (9)$$

AV_j 实际上是通过两流线间的质量流量, 假设: $G = AV_j = (\Psi_n - \Psi_s)_{m_p}$, 可得计算方程

$$G\Delta m_1 = \left[A \Gamma \frac{\partial n_1}{\partial s} \right]_e - \left[A \Gamma \frac{\partial n_1}{\partial s} \right]_w + \left[A \Gamma \frac{\partial n_1}{\partial n} \right]_n - \left[A \Gamma \frac{\partial n_1}{\partial n} \right]_s \quad (10)$$

式中, A 为微元控制体相应计算表面的面积, Δm_1 为在点 P 处 S 方向的一次风浓度增量, G 为构成控制体的两流线间的质量流量, Γ 为湍流交换系数

$$\text{令: } b_p = G\Delta m_1, a_{pe} = \left. \frac{\partial n_1}{\partial s} \right|_e, a_{pw} = - \left. A_w \frac{\partial n_1}{\partial s} \right|_w, a_{pn} = A_n \left. \frac{\partial n_1}{\partial n} \right|_n, a_{ps} = - \left. A_s \frac{\partial n_1}{\partial n} \right|_s$$

则可得到关于 Γ 的代数方程

$$a_{pe}\Gamma_e + a_{pw}\Gamma_w + a_{pn}\Gamma_n + a_{ps}\Gamma_s = b_p \quad (11)$$

式(10)至(11)组成气体湍流交换系数计算方程及初步离散化方程 以图5的流线分布为基础, 用解析几何的方法划分出 $S-N$ 正交网格, 采用“重叠微元”法^[5], 并利用图4所示的燃烧器出口径向截面上各点一、二次风的质量份额, 采用差分格式对上式的梯度项进行离散, 则方程(11)中的系数和常数项即可算出

图6为燃烧器出口流场中一次风湍流交换系数沿横向分布情况, 由图可见: Γ 数值沿横向方向的变化曲线有一个峰值, 即两边小, 中间大, 最大区域在一次风和二次风射流之间, 并偏向二次风射流侧, 这表明侧边风燃烧器出口气流在一、二次风射流交界附近湍流交换强烈, 往两侧延伸, 相对减弱 比较不同截面湍流交换系数的分布, 发现在列入计算的区域内, 沿射流方向, 湍流交换系数 Γ 是逐渐减少的 这与气体示踪法得出的流场中混合扩散情况相符合 整个计算区域内的湍流交换系数值比一般圆管自由射流数值^[6]要高, 说明这种侧边风燃烧器出口流场内有较高的湍流交换能力

图5 流函数分布及网格划分范围

Fig 5 Stream line distribution and net range

图6 湍流交换系数分布计算结果

Fig 6 Calculation results of Γ

3 结 论

1) 随着燃烧器径向(横向)距离增加, 二次风逐渐向一次风内部扩散 在距燃烧器喷口140~150 mm (L/D 为0.93~1.0)处, 二次风开始扩散到一次风射流边界, 约在距燃烧器出口500~600 mm 处(L/D 约为3.3~3.9), 二次风扩散到一次风中心轴位置

2) 在一次风射流中, 环境气体占很大比例, 说明环境气体(实炉烟气)对一次风热质交换影

响很大, 如何提高回卷烟气量及温度, 有效利用这部分热量, 对燃料的着火是很有意义的

3) 两股气流混合交换最强烈的区域分布在一、二次风射流之间偏向二次风位置上, 混合最强点随轴向距离增加向二次风偏移

4) 湍流系数沿横向变化呈两边小, 中间大现象, 说明一、二次风射流之间区域湍流交换强烈, 沿射流方向, 湍流系数是逐渐减少的

参 考 文 献

- 1 岑可法 锅炉燃烧调整试验方法及测量技术 北京: 水利电力出版社, 1988
- 2 庞丽君等 管式旋流煤粉燃烧器的试验研究 动力工程, 1994, 14(6): 29~ 36
- 3 Truelove JS. Wall TF. Dixon TF. Flow, Mixing and combustion within the quarl of a swirled pulverised-coal burner. In: Nineteenth Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, August 5~ 13, 1982, Haifa Israel 1181~ 1187
- 4 Bradshaw P. An Introduction to Turbulence and Its Measurement. New York: Pergamon Press, 1971
- 5 帕坦卡 传热与流体流动的数值计算 张 政译 北京: 科学出版社, 1984
- 6 岑可法等 工程气固多相流动的理论及计算 杭州: 浙江大学出版社, 1990

STUDIES OF BURNER LATERAL TURBULENT MIXING AND DIFFUSION USING GAS TRACER ANALYSIS

Liu Jianzhong Cao Xinyu Yao Qiang Zhao Xiang Huang Zhenyu
Zhou Junhu Wu Xiaorong Cen Kefa

(Inst. for Thermal Power Eng., Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract The characteristics of lateral turbulent mixing and diffusion between primary air (low-swirl) and secondary air (no-swirl) of the burner with side-located secondary air were studied carefully by gas tracer analysis. The profiles of mixture concentration and mixing intensity at various cross-sections along the axis were discussed. The effects of them on fuel ignition were also analyzed. The turbulent exchange coefficient is calculated from time-mean equation. The results are of practical significance for design of the burner.

Key words burner, lateral mixing, turbulent diffusion, gas tracer analysis