

文章编号: 2095—0411 (2012) 01—0033—04

平焰燃烧三维热态速度场的数值模拟^{*}

陶进峰, 徐学慧

(常州大学 石油工程学院, 江苏 常州 213016)

摘要: 对试验炉型的平焰燃烧器速度场进行了冷态实验、冷态数值模拟, 分析并验证了实验和数值模拟结果中速度场变化趋势的一致性和数值模拟结果的实用性。采用相同的模型, 对加热炉内平焰燃烧的热态三维速度场进行了计算, 分析了主燃烧区域轴向速度、径向速度和切向速度的变化规律, 得出了热态速度分量的最大值沿射流方向衰减的无因次分布曲线。

关键词: 平焰燃烧; 冷态试验; 数值模拟; 速度场; 无因次曲线

中图分类号: TG 307

文献标识码: A

Numerical Simulation on 3D Thermal Speed Field in Flat—Flame Burning

TAO Jin—feng, XU Xue—hui

(School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

Abstract: Cold test and cold simulation were done about speed field of flat—flame burning in test furnace. The results were analysed and validated. Variation trend of speed field about test and numerical simulation is consistent, numerical simulation result has practical. Thermal 3 dimensional speed field in flat—flame burning furnace was computed by the same model, The changing rule of axial velocity, radial velocity and tangential velocity in the leading combustion field was analysed, the nondimensional curve of thermal speed individual maximum decrease along jet flow was obtained for the first time.

key words: flat—flame burning; cold model test; numerical simulation; speed field; nondimensional curve

平焰燃烧器喷出的火焰是紧贴炉墙或炉顶向四周均匀伸展的圆盘形薄层火焰, 具有工件受热均匀、防止局部过热、炉子升温快、烟气中 NO_x 含量少等特点, 广泛应用于轧钢、机械工业的加热炉上^[1]。一般认为, 这种独特的火焰是由于射流在离开喷嘴前先强迫流体作旋转运动, 流体从喷嘴出口后, 除了具有一般射流的径向与轴向速度分量外, 还具有较大的圆周向 (切向) 速度分量^[1]; 在沿炉墙或炉顶形成贴附射流的同时, 在火焰中心处也形成回流区而致使大量高温烟气回流, 起到稳定火焰

和搅拌作用。可见炉内气体的流动状况直接影响其燃烧特性。研究平焰燃烧器热态速度场的分布规律, 对进一步研究其温度场, 进而指导平焰燃烧器的优化设计具有重要意义。

由于热态实验受高温环境等诸多因素的影响而无法开展, 数值模拟通常作为研究炉内烟气流动的有效方法之一^[2,3]。本文对平焰燃烧三维热态速度场进行数值模拟, 讨论了烧嘴下方主要燃烧区的三维热态速度场分布规律。

^{*} 收稿日期: 2011—06—18

作者简介: 陶进峰 (1987—), 男, 江西九江人, 硕士生。

1 冷态速度场的实验研究

为了揭示平焰燃烧速度场的特性，课题组曾搭建了一个额定热负荷为 465.2kW、几何尺寸即长：宽：高=1 800mm：1 044mm：800mm 的冷态平焰燃烧加热炉实验台^[4]。该实验台由平焰燃烧器、炉体和烟道等组成，如图 1 所示。平焰燃烧器为自行研制的液化石油气平焰燃烧器，由多切向入口旋流器与喇叭型扩张口组合构成，布置于炉膛顶部中心。

助燃空气旋流器喷出口直径为 130mm，旋流强度为 1.76，位于旋流器中心的燃气直管直流射出口直径为 60mm，喇叭形扩张口的曲率半径为 150mm。

燃料丙烷消耗量为 17m³/h、助燃空气流量为 510m³/h；冷态实验采用冷空气模拟助燃空气和燃料丙烷，按动量相似的原则模拟 17m³/h 丙烷所需的空气流量为 26.3m³/h。

通过对图 2 所示讨论区域进行冷态测试，得出该模型的冷态速度场数据，见图 3、图 4。经过分析，该数据显示的速度分布符合平焰燃烧器流场运动的规律^[4]。

2 三维冷态速度场的数值模拟

为了验证数值模拟的的可靠性，对上述模型进行了三维冷态速度场的数值模拟计算。

湍流模型为雷诺应力（RSM）湍流模型，选用离散稳态求解器，采用 SIMPLE 算法，利用多块拼接网格技术生成计算网格进行计算，如图 1 所示。

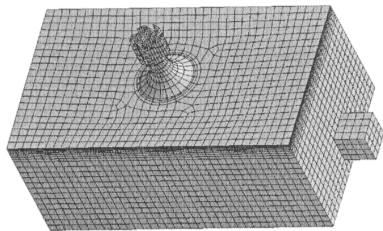


图 1 模型网格划分
Fig. 1 Mesh division of model

边界条件：空气和燃料进口采用速度进口条件，出口条件采用自由出口条件。壁面边界条件采用壁面函数法。

将模拟结果和实验结果进行对比分析，讨论区域为 350mm×250mm，如图 2 所示，其中 x 为轴向， r 为径向。图 3 为冷态数值模拟和冷态试验

的速度矢量对比图，从图 3 可以看出，冷态数值模拟和冷态试验的流场有回流区和主流区，且两者的回流区和主流区区域基本相同。从图 4 可以看出，冷态数值模拟和冷态试验的速度变化规律基本一致。冷态数值模拟计算结果和冷态试验数据的符合性比较好，模拟结果是可信的。

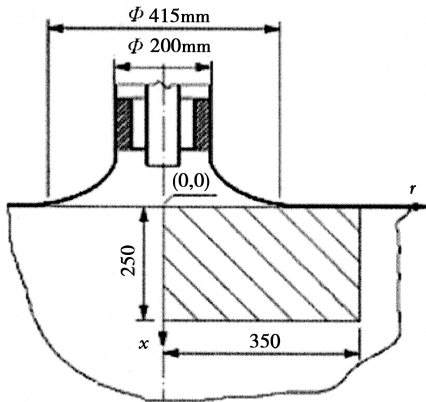
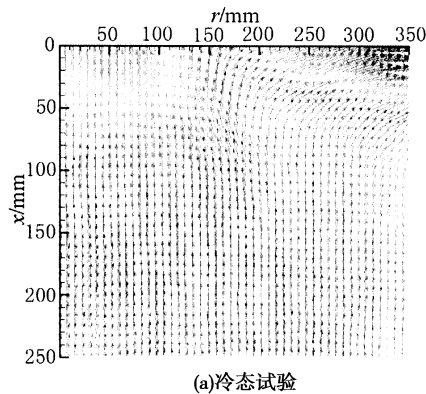
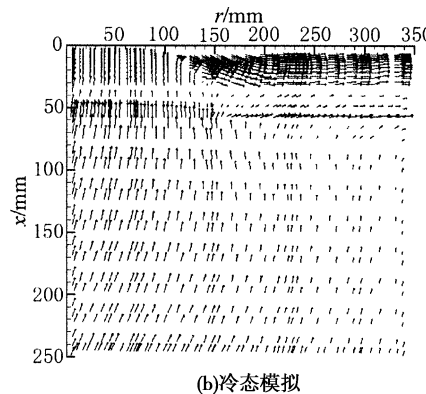


图 2 讨论区域
Fig. 2 Sketch of discuss region



(a)冷态试验



(b)冷态模拟

图 3 讨论区内速度矢量图对比

Fig. 3 Comparisons of cold simulation results and cold measure values for velocity vector of discuss region

3 三维热态速度场的数值模拟

在前述工作的基础上，对相同模型进行了三维热态速度场的数值模拟，其中辐射模型采用 P1 辐

射模型，燃烧反应采用涡耗散模型。

图 5 是图 2 所示讨论区三维热态模拟速度场速度矢量图。由图 5 可知，在烧嘴中心下方产生较大的回流区，炉顶回流区宽度为 110mm。同时在强旋流作用下，混合气体从扩张口喷入炉膛燃烧，形成射流区，旋转射流的离心力和回流的挤压力促使气流绕扩张口作均匀对称的贴附壁面流动，贴附射流厚度为 81mm，速度场变化趋势符合平焰燃烧流动的规律。

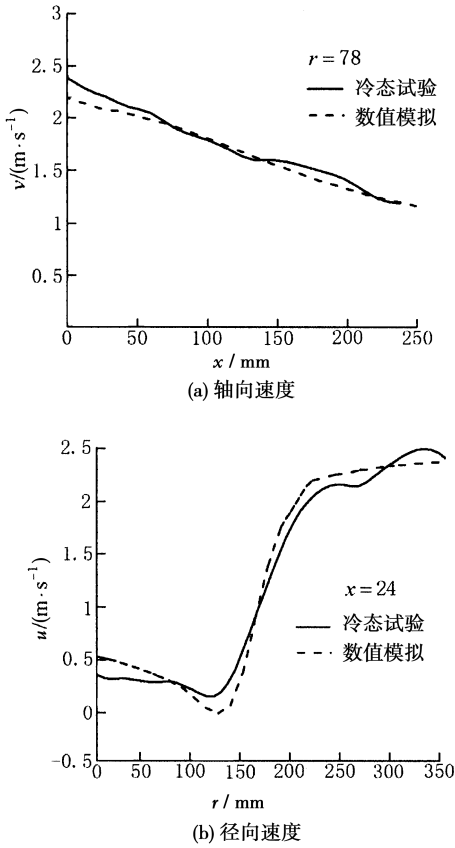


图 4 讨论区冷态试验和模拟速度变化对比

Fig. 4 Comparisons of cold simulation results and cold measure values for axial velocity and radial of discuss region velocity

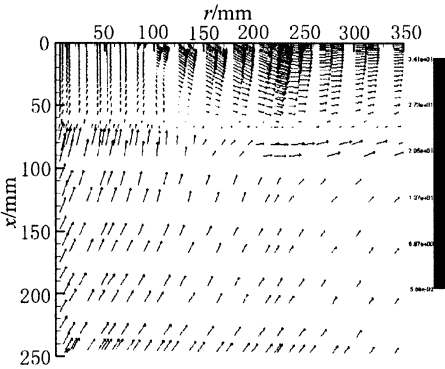


图 5 三维热态模拟速度场速度矢量图

Fig. 5 Sketch of velocity vector of 3d thermal simulation

在回流区内，轴向速度起主导作用，不同 r 处，轴向速度沿轴向 x 的分布规律见图 6。可见：回流区内，轴向速度沿轴向近似呈线性 ($v=A+Bx$) 分布，且离烧嘴中心线越近，其斜率越大，直至烧嘴中心线处斜率达到最大值， A 、 B 值见表 1。

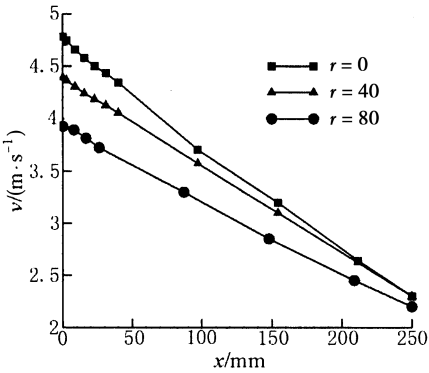


图 6 不同 r 截面处轴向速度变化规律

Fig. 6 Sketch of axial velocity changing rule along x at different r section

表 1 回流区内轴向速度斜率、截距

Table 1 Slope, intercept of axial velocity in back flow region

r /mm	A	B
0	4.78	-0.009 9
40	4.9	-0.008 8
80	3.92	-0.006 8

射流区气流绕扩张口作均匀对称的附壁流动，流场具有均匀对称性，在以轴向 x 为高度方向的圆柱坐标系中，不同的方位角 φ 时，速度变化规律基本不变，速度表达式 $f(r, \varphi, x)$ 可简化为 $f(r, x)$ 。

在射流区内，径向速度和切向速度起主导作用。其沿 r 的分布规律见图 7。由图 7 可见：在回流区内径向和切向速度接近 0。在射流区内，随着 r 的增加，径向和切向速度先增加后减小，最大值在 $r=207\text{mm}$ 处。

当 $r<207\text{mm}$ ，径向和切向速度拟合公式为 $f(r, \varphi, x) = f(x, r) = A + (B + Cx) r + (D + Ex) r^2$ ，式中常数见表 2，当 $r>207\text{mm}$ ，径向和切向速度拟合公式为 $f(r, \varphi, x) = f(x, r) = A + Bx + C/r$ ，式中常数见表 3。

图 8 是热态最大轴向、切向、径向速度沿射流 x 方向衰减的无因次变化，其中 u_0 、 v_0 、 w_0 是旋流器出口 ($x=0$) 截面上径向速度、轴向速度和切向速度的最大值， u_m 、 v_m 、 w_m 为截面上速度分量最大值， d 为旋流器喷出口直径。从图 8 可知， $x/d=0.62$ 时，径向速度的最大值沿射流方向的衰减趋于停止，流体开始脱落贴附射流，此时

对应的 $x=81\text{mm}$ 即为贴附射流厚度。

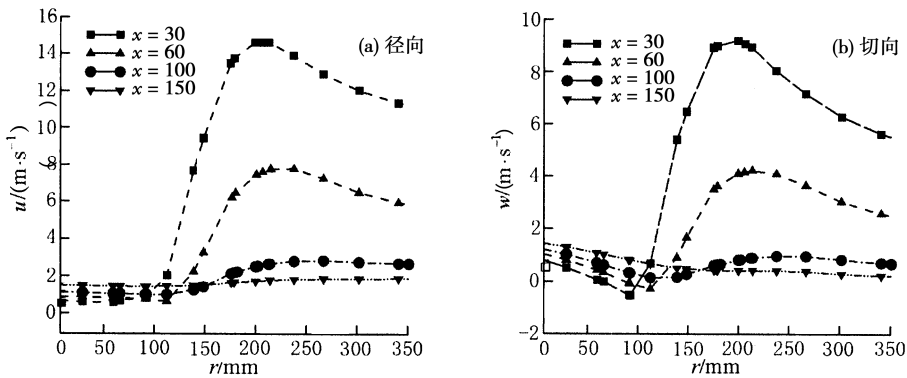


图 7 不同 x 截面处速度变化规律

Fig. 7 Sketch of radial and tangential velocity changing rule along r at different x section

表 2 $r<207\text{ mm}$ 径向和切向速度公式常数

	A	B	C	D	E
径向速度	-42.932 3	0.632 1	-2.413 2e-3	-1.580 0e-3	6.482 9e-6
切向速度	-31.412 0	0.490 3	-2.276 4e-3	-1.308 8e-3	7.076 4e-6

Table 2 Formula constant of radial and tangential velocity at $r<207\text{ mm}$

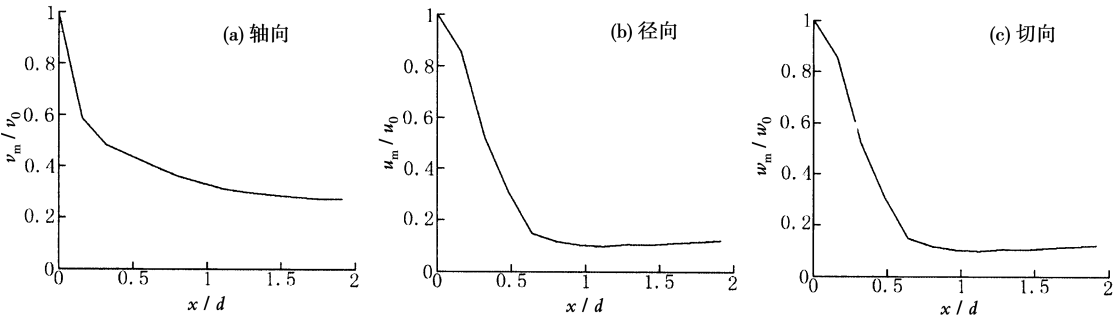


图 8 热态最大速度沿射流方向衰减的无因次变化图

Fig. 8 Nondimensional sketch of thermal largest velocity decreasing along jet flow

表 3 $r>207\text{ mm}$ 径向和切向速度拟合公式常数

	A	B	C
径向速度	12.268 9	-0.184 8	1 398.904 7
切向速度	5.240 8	-0.123 4	1 477.991 1

Table 3 Formula constant of radial and tangential velocity at $r>207\text{ mm}$

4 结 论

- (1) 对试验炉型的平焰燃烧器速度场进行了冷态实验、冷态数值模拟，分析并验证了实验和数值模拟结果中速度场变化趋势的一致性和数值模拟结果的实用性。
- (2) 首次得出热态速度分量的最大值沿射流方向衰减的无因次分布曲线，该曲线可用来确定贴附射流层的厚度，进而考察燃烧状况，为下一步研究燃烧及燃烧过程中 NO_x 的生成打下基础。
- (3) 热态回流区内的轴向速度沿轴向近似呈线性 ($v=A+Bx$) 分布；得出热态射流区内，在 r

$<207\text{mm}$ 区域，径向和切向速度公式为 $f(r, \varphi, x) = f(x, r) = A + (B + Cx)r + (D + Ex)r^2$ ；在 $r>207\text{mm}$ 区域，径向和切向速度公式为 $f(r, \varphi, x) = f(x, r) = A + Bx + C/r$ 。

参考文献：

[1] 同济大学. 燃气燃烧与应用 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，2000.

[2] Francisco Cadavid, Bernardo Herrera, Andres Amell. Numerical simulation of the flow streams behavior in a self-regenerative crucible furnace [J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30 (8): 826-832.

[3] Hu Guihua, Wang Honggang, Qian Feng. Numerical simulation on flow, combustion and heat transfer of ethylene cracking furnaces [J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66 (8): 1600-1611.

[4] 徐学慧, 郭强. 加热炉内流动特性的 PIV 研究 [J]. 江苏工业学院学报, 2008, 20 (1): 37-39.