

瓦斯燃烧器火焰回流区的数值分析

张 奕 陈丹丹 石 嵩 李 静 腾 跃

(南京师范大学 能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 对一种瓦斯燃烧器的火焰流场进行了数值计算, 根据计算结果对火焰回流区进行了分析. 针对瓦斯燃烧器的结构特点, 将燃烧区域的流动简化为二维轴对称流动. 对不同空气和瓦斯流速时的计算结果表明, 火焰中心及两排空气引射管间出现回流区, 火焰中心的回流区占主要地位. 空气流速越高, 回流区越大, 但回流区距燃烧器出口越近, 甚至进入燃烧器. 瓦斯流速对火焰回流区的作用规律与空气相反, 瓦斯流速较高时, 中心回流区将显著变小, 距燃烧器出口距离较远, 两排空气引射管间的回流区消失. 计算结果可为瓦斯燃烧器选用适当的空气和瓦斯流速提供依据.

[关键词] 瓦斯燃烧器, 火焰回流, 火焰稳定性, 数值计算

[中图分类号] TK11.4 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2011)04-0024-05

Numerical Simulation of Flame Circumfluence of a Gas Burner

Zhang Yi, Chen Dandan, Shi Song, Li Jing, Teng Yue

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: The flame flow field of a gas burner was investigated by numerical method. The flame circumfluence was analyzed with calculation results. The flow was simplified into two dimensional axisymmetric flow according to characters of gas burner structure. Numerical simulations were performed with different velocities of air and gas. Results showed that there were two circumfluences in flow area. One was at the centre of flow area, the other was between two jets of air. The higher the air speed was, the wider flame circumfluence was. And the circumfluence was nearer to outlet of the burner, even entered into the burner when air velocity got higher. The impact of gas velocity on the circumfluence was opposite to that of air velocity. When gas flowed at a relative high velocity, the circumfluence at the centre became obviously smaller and was farer away from the outlet. This study can provide guidance for choice of appropriate velocity of air and gas in gas burner.

Key words: gas burner, flame circumfluence, flame stability, numerical calculation

在石油化工部门的生产过程中,会产生副产品瓦斯气(主要成分为甲烷),这些瓦斯需要及时处理,以避免大量积累产生爆炸危险.在实际生产中大多采用高空燃烧的方法,瓦斯的燃烧在瓦斯燃烧器中进行.

稳定燃烧是燃烧器的基本要求之一.为实现稳定燃烧,燃烧器流场中应有适当的回流区.一般燃烧器中大多采用稳焰器产生回流区,但架设于高空的瓦斯燃烧器不设置稳焰器,这就要求由空气射流和瓦斯射流燃烧形成的火焰流场中能形成很好的回流区.

很多学者对不同燃烧器中的回流区进行了研究.段希利等^[1]使用多普勒激光测速技术对一种瓦斯燃烧器的流场进行了冷态测试,获得了回流区尺寸与稳焰器结构的关系.回流区长度随稳焰器直径增大而变长,与瓦斯射流角度基本无关.仇性启等^[2]对某燃气锅炉燃烧器的流场进行了数值计算分析,为便于计算,使用正方形燃气喷孔代替圆形燃气喷孔.计算表明,当空气切向速度小于某一数值时,回流区的尺寸与切向速度无关,只有当空气切向速度大于某一数值后,回流区尺寸才随切向速度的增加而增加. Shtork 等^[3]对一种旋涡燃烧器中旋转射流的冷态流动特征进行了实验测量研究.流场实验数据的时均结果表明,旋转射流发生破裂,并且射流中心存在回流.而相平均方法显示射流具有不对称的特点,旋涡核心偏离燃烧器喷嘴中心轴,在旋涡核心的激发下,回流区也偏离喷嘴中心轴.与时均化方法的结果相比,相平均法

收稿日期: 2011-05-15.

通讯联系人: 张 奕, 博士, 副教授, 研究方向: 能源高效利用. E-mail: zhangyi@njnu.edu.cn

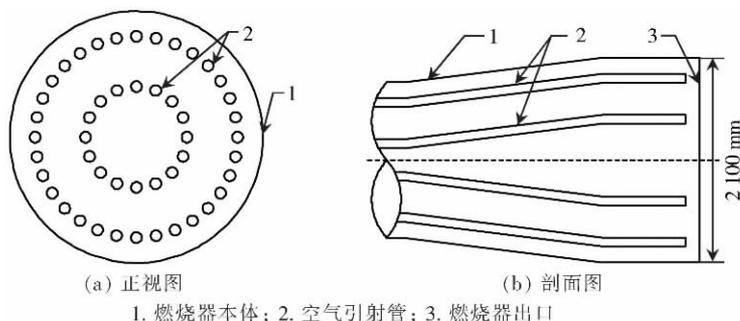
— 24 —

得到的回流区强度更大, 在更接近喷嘴出口的位置涡强度达到最大. 在火焰区中由于高速射流的回流, 形成了演化旋涡核心. 相对于稳定的轴对称流动, 该不稳定的旋涡核心使得火焰更加稳定. 椭圆函数可以近似描述旋涡核心的形状, 该函数中的常数可以定义旋涡核心的大小、涡能量和运动半径. 各种形式燃烧器中的流动和燃烧过程受到广泛的研究^[4-8].

瓦斯燃烧器置于高空燃烧, 对其流场进行热态实验测量存在困难. 用数值计算的方法对瓦斯燃烧器在不同工况下的流场进行模拟分析, 是了解瓦斯燃烧器流动特征的重要手段. 本文通过数值计算, 分析某种形式的瓦斯燃烧器在不同的空气流速和瓦斯流速条件下, 燃烧区域中的流场, 特别是回流流动特征, 以便在这种燃烧器中产生最佳的回流区时, 为空气和瓦斯流速的确定提供基础.

1 燃烧器及其简化结构模型

图 1 为本文计算的瓦斯燃烧器的结构示意图. 空气经引射管进入燃烧器, 瓦斯由引射管外的空间进入. 空气在引射管内的流动面积较小, 具有较高的速度, 瓦斯的流速则较低. 空气流出引射管后与瓦斯间形成强烈的动量和质量交换, 形成预混可燃气. 由于燃烧器内空气引射管的特殊排列方式, 空气与瓦斯间的速度差形成的剪切作用可在燃烧区域内形成回流.



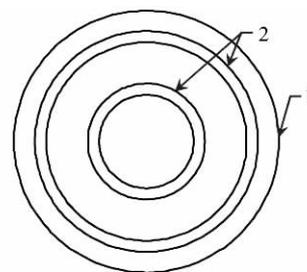
1. 燃烧器本体; 2. 空气引射管; 3. 燃烧器出口

图 1 瓦斯燃烧器结构示意图

Fig.1 Diagram of gas burner

由图 1 所示的瓦斯燃烧器结构可知, 在这种燃烧器中进行的流动是三维的. 但是, 本模拟计算所涉及的燃烧器直径为 2 100 mm, 在如此大直径燃烧器后形成的燃烧区域将非常大. 燃烧区域内速度、温度、浓度等物理量的梯度都非常大, 要求模拟计算中采用较细的网格. 另外, 燃烧问题需要求解包括动量、能量、质量、化学反应等一系列模型方程. 因此, 如果在三维空间内对本燃烧器进行数值模拟, 计算工作量巨大, 普通的微型计算机难以胜任该计算过程.

燃烧器内部共有 48 根空气引射管, 这些引射管在 2 个同心圆周上紧密排列, 如图 1 所示. 由于这些引射管具有轴对称紧密排列的特点, 因此, 可以认为燃烧器火焰区的流动近似具有轴对称流动的特点, 从而火焰区内的速度场、温度场、压力场、浓度场等都近似为轴对称分布. 由于这种特点, 燃烧器可简化为图 2 所示的结构模型. 在简化结构模型中, 用两个环形空气射流口代替图 1 中的两排空气引射管. 在燃烧器的这种简化结构模型中, 流动关于中心线是对称的, 所以数值模拟只要针对简化结构的一半进行就可以了. 这种处理方法不仅可以极大地降低计算量, 而且计算结果即近似为三维轴对称火焰区流场的剖面分布.



1. 燃烧器本体; 2. 环形空气射流口

图 2 燃烧器简化结构模型

Fig.2 Simplified structure of the burner

2 数值模拟方法

燃烧器的数值模拟方法包括计算方程、计算网格划分和边界条件选取.

2.1 计算方程

燃烧器数值模拟涉及流体流动、传热、燃烧等过程, 需要涉及较多的数学模型^[9], 数值计算针对稳定的燃烧过程进行.

描述流体流动的方程包括连续性方程和动量方程. 火焰区内存在很大的温度梯度, 因此必需考虑密度的变化, 使用可压缩流体的连续性方程:

$$\nabla(\rho u) = 0. \tag{1}$$

火焰区内, 燃烧产物的粘性系数等物性参数随温度而发生显著变化, 变物性流动的动量方程为:

$$(\mathbf{u} \nabla)(\rho \mathbf{u}) = \rho \mathbf{f} - \nabla p + \nabla(\mu \nabla \mathbf{u}). \tag{2}$$

火焰区内的温度分布受燃烧反应和热量传递控制. 能量方程需要反映热对流、导热、辐射和燃烧热等对控制体能量平衡的作用, 因此能量方程为:

$$\nabla(\rho u h) = \nabla\left(\frac{\lambda + \lambda_t}{c_p} \nabla h\right) + S_{rad} + \rho S_c H_{comb} Y_{fuel}, \tag{3}$$

式中 λ_t 为紊流热导率, 由紊流模型计算获得; S_{rad} 为火焰辐射传热量, 由火焰辐射模型计算; S_c 为反应速率 H_{comb} 和 Y_{fuel} 分别为燃料热值和质量分数.

火焰中反应物和产物浓度的变化受对流、扩散和化学反应作用, 由下面的组元输运方程计算:

$$\nabla(\rho u Y_i) = \nabla\left(\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_i}\right) \nabla Y_i\right) + R_i, \tag{4}$$

式中 Y_i 为组元 i 的质量分数; $D_{i,m}$ 为组元 i 的扩散系数; μ_t 为紊流粘性系数; Sc_i 为紊流施密特数; R_i 为组元 i 的生成速率.

火焰传播速度 c 由对流、扩散及反应导致的火焰传播决定, 由下面的方程计算:

$$\nabla(\rho u c) = \nabla\left(\frac{\mu_t}{Sc_i} \nabla c\right) + \rho U_i |\nabla c|, \tag{5}$$

式中 U_i 为紊流火焰速率, 由火焰锋面速率模型计算. 式(5)右边第二项即为反应速率, 即式(3)中的 ρS_c .

2.2 计算区域及网格

根据燃烧器的简化结构模型, 火焰区域的流动是轴对称的, 计算区域可取为如图 3 所示的 1 050 mm × 3 200 mm 的矩形. 由于燃烧器的出口直径为 2 100 mm, 矩形的宽度取为直径的一半, 即 1 050 mm. 计算区域的轴向长度通过试算法确定, 即开始时取较短的轴向长度, 然后增加轴向长度. 当增加轴向长度造成的计算结果变化很小时, 即可取前一次的轴向长度作为计算区域的轴向长度. 通过试算选取的计算区域轴向长度为 3 200 mm.

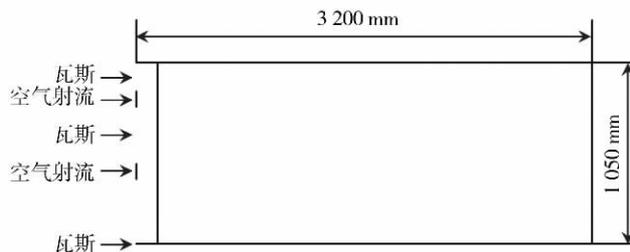


图 3 计算区域示意图
Fig.3 Diagram of calculation zone

计算网格全部采用 5 mm × 5 mm 的正交网格, 网格数为 134 400.

2.3 边界条件和起动解

在空气引射管的出口取空气的流量入口条件, 在燃烧器内壁与引射器外壁间取瓦斯的流量入口条件. 燃烧器内壁取无滑移边界条件, 火焰区外边界取压力出口边界条件, 燃烧器中心线为对称边界条件.

在蒸汽管道内, 蒸汽的起动速度取为管内平均流速, 温度为饱和温度. 混合室及输送管内的气体的起动速度为 0, 温度为大气温度. 点火温度为 1 500 K.

3 计算结果及分析

使用流体动力学计算软件 Fluent, 分别改变空气流速和瓦斯流速, 比较两种气体流速变化对火焰回流的影响. 流体力学中, 流函数的等值线即为流线, 因此通过分析流函数计算结果的分布情况, 即可找出回流区的位置、大小和形状.

3.1 空气流速对回流区的影响

图 4 为瓦斯流速为 0.5 m/s 时, 空气流速分别为 10 m/s、20 m/s 和 30 m/s 时燃烧区域内的流函数等值线图. 图 4 反映出, 在燃烧区域内出现两个回流区, 位于火焰中心较大的回流区和位于两股引射空气之间

较小的回流区. 火焰中心回流区在可燃气体混合物的点火以及火焰的稳定中起着最重要的作用.

从图 4 可以看出, 随着引射空气流速增大, 由于空气与瓦斯间的剪切作用增强, 火焰中心回流区的轴向长度变长, 分别约为 720 mm、970 mm 和 1 100 mm, 回流区的最大宽度变宽, 分别约为 250 mm、270 mm 和 300 mm. 较大的回流区域将卷吸进更多的燃烧产物, 这些燃烧产物不仅可以作为点火源, 而且燃烧产物中包含有大量燃烧反应活性粒子, 这些活性粒子可以促进燃烧反应更快、更完全地完成. 因此, 较高的引射空气流速有利于瓦斯燃烧器的燃烧更稳定, 燃烧更完全、速度更快.

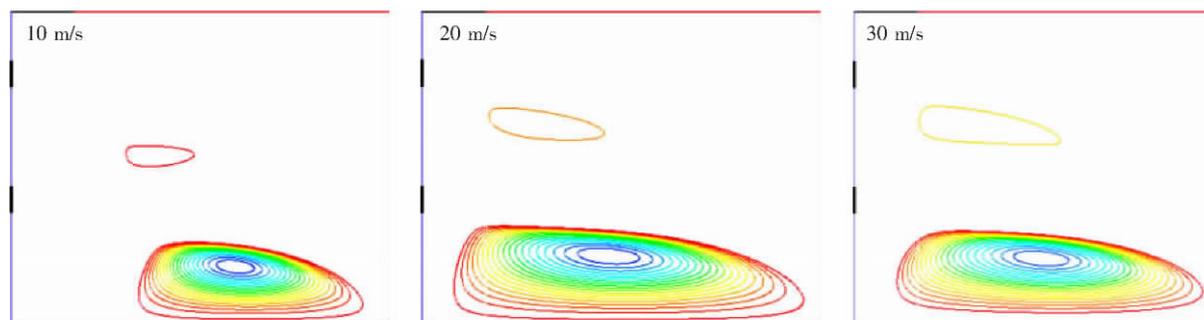


图 4 瓦斯流速 0.5 m/s, 不同空气流速时的火焰回流区

Fig.4 Flame circumfluence at different air speed when gas speed is 0.5 m/s

但是分析图 4 还可看出, 随着空气流速的增加, 回流区轴向位置向左移动, 即更靠近燃烧器出口. 当空气流速分别为 10 m/s、20 m/s 和 30 m/s 时, 回流区最左侧距燃烧器出口的距离分别为 200 mm、-70 mm 和 -100 mm, 负号表示回流区已进入燃烧器出口. 含有高温燃烧产物的回流区距燃烧器出口太近, 甚至进入燃烧器, 将使燃烧器受回流区的加热而处于高温状态. 在回流区内大量活性粒子的作用下, 高温状态的钢制燃烧器壁将受到包含氧化反应在内的化学腐蚀, 从而减少燃烧器的使用寿命. 因此, 较低的空气流速可以使回流区离燃烧器较远, 燃烧器使用寿命更长, 安全性更高.

3.2 瓦斯流速对回流区的影响

图 5 为空气流速为 20 m/s, 瓦斯流速分别为 0.15 m/s、0.5 m/s 和 1.5 m/s 时燃烧区域内的回流情况. 图 4 和图 5 对比可以看出, 提高瓦斯流速对中心回流区的影响, 与增加空气流速的影响恰好相反. 瓦斯流速增加时, 回流区的长度由 1 100 mm、970 mm 到 560 mm 逐渐缩短, 回流区的宽度按 330 mm、270 mm 和 160 mm 的顺序变窄. 回流区距燃烧器出口的距离按 -160 mm、-70 mm 和 520 mm 的顺序增加.

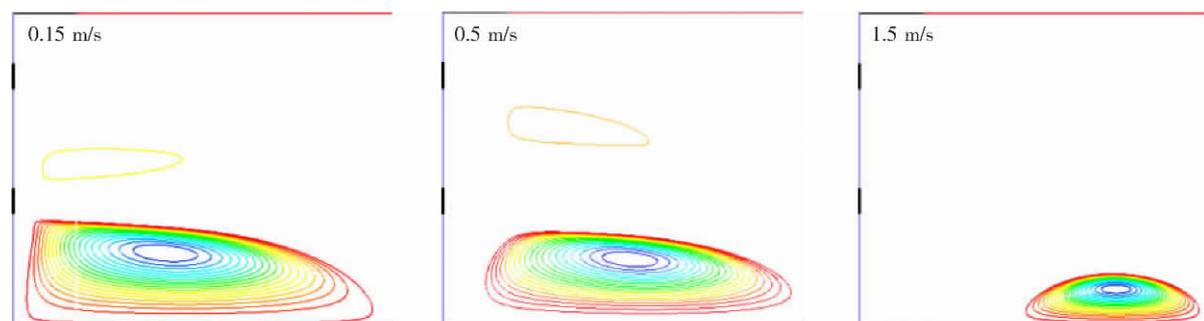


图 5 空气流速 20 m/s, 不同瓦斯流速时的火焰回流区

Fig.5 Flame circumfluence at different gas speed when air speed is 20 m/s

空气流速不变时, 增加瓦斯流速, 空气与瓦斯间的速度差减小, 两者之间的剪切作用减弱, 造成回流强度降低, 回流区域变小. 瓦斯流速增加, 回流区被较高速度的瓦斯气流吹至更远处. 图 5 中, 瓦斯流速为 1.5 m/s 时, 回流区左侧距燃烧器出口已达 520 mm, 而此时回流区域相对较小, 因此这种情况下的回流对燃烧的强化作用, 以及对火焰的稳定作用是最差的.

图 5 还表明, 瓦斯流速为 1.5 m/s 时, 两股空气射流间已不存在回流区域.

4 结论

数值模拟计算表明,采用适当的空气、瓦斯流速,在本文讨论的瓦斯燃烧器的燃烧区域的中心和两股空气射流间能产生火焰回流,该回流区可以起到稳定和强化燃烧的作用。

空气流速越大,火焰回流区域越大,回流区对稳定和强化燃烧的作用越好。但是回流区距燃烧器出口距离越近,这可能加速燃烧器的高温腐蚀和化学腐蚀。瓦斯流速对回流区的影响规律与空气的相反。燃烧时应避免出现空气流量过小,而瓦斯流量过大的燃烧状态,因为此时回流区较小,且距燃烧器出口较远,可能导致火焰熄灭。

[参考文献](References)

- [1] 段希利,仇性启,王宗明. 瓦斯燃烧器回流区测试[J]. 石油化工设备, 2002, 31(6): 10-12.
Duan Xili, Qiu Xingqi, Wang Zongming. Study of the backflow regions in a gas burner[J]. Petro-chemical Equipment, 2002, 31(6): 10-12. (in Chinese)
- [2] 仇性启,毛羽,时铭显,等. 燃气燃烧器空气旋流对回流区尺寸的影响[J]. 石油化工设备技术, 1999, 20(2): 35-38.
Qiu Xingqi, Mao Yu, Shi Mingxian, et al. The influence of air vortex on the reflow region dimension for gas burner[J]. Petro-chemical Equipment Technology, 1999, 20(2): 35-38. (in Chinese)
- [3] Shtork, Cala, Fernandes. Experimental characterization of rotating flow field in a model vortex burner[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, 31(7): 779-788.
- [4] Li L, Liu T, Peng X F. Flow characteristics in an annular burner with fully film cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(17-18): 3 013-3 024.
- [5] 段锋,邢国正. 高温空气燃烧器的数学模拟[J]. 安徽工业大学学报, 2005, 22(4): 334-337.
Duan Feng, Xing Guozheng. Numerical simulation of high temperature air combustor[J]. Journal of Anhui University of Technology, 2005, 22(4): 334-337. (in Chinese)
- [6] Schildmacher, Hoffmann, Selle, et al. Unsteady flame and flow field interaction of a premixed model gas turbine burner[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 3 197-3 205.
- [7] Hao Zhou, Kefa Cen, Jianren Fan. Experimental investigation on flow structures and mixing mechanisms of a gas-solid burner jet[J]. Fuel, 2005, 84(12/13): 1 622-1 634.
- [8] 仇性启,赵保忠,毛羽,等. 瓦斯燃烧器回流区数值模拟研究[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2001, 25(3): 74-76.
Qiu Xingqi, Zhao Baozhong, Mao Yu, et al. Numerical simulation on the dimension of the backflow region in a gas burner[J]. Journal of the University of Petroleum: Natural Science Edition, 2001, 25(3): 74-76. (in Chinese)
- [9] Ferziger J L, Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1996: 37-358.

[责任编辑:刘健]