

两层多孔介质燃烧器的数值模拟

史俊瑞¹, 徐有宁¹, 薛治家¹, 解茂昭²

(1. 沈阳工程学院 沈阳市循环流化床燃烧技术重点实验室, 辽宁 沈阳 110136

2. 大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 通过一维数值模拟研究了预混气体在两层多孔介质燃烧器内的燃烧特性, 着重研究两层多孔介质燃烧器中的超绝热燃烧和火焰的稳定区域。结果表明, 预混气体在两层多孔介质内可以发生一定程度的超绝热燃烧, 贫燃极限可以扩展到 $\phi = 0.45$ 。两层多孔介质能够在较宽的流速范围内将火焰稳定在它的交界面上。数值预测的最小和最大火焰传播速度与实验取得了相同的趋势, 其火焰传播速度至少是自由空间中的 3 倍。

关 键 词: 预混气体; 两层多孔介质燃烧器; 数值模拟

中图分类号: TK16 文献标识码: A

引 言

稀薄预混气体在均质多孔介质中燃烧, 火焰区的温度超过绝热温度, 称为超绝热燃烧。超绝热燃烧效应非常显著, 极大地拓展了贫可燃极限^[1]。但燃烧过程中会出现向上游或下游稳定传播的燃烧波, 对于实际有限大小的燃烧器, 火焰最终会移到燃烧器外。为在一定的流速范围内将火焰稳定在燃烧器内, Kotan 等人提出了两层多孔介质燃烧器^[2], 即在燃烧器的上游布置小孔径多孔介质, 用于预热新鲜预混气体和防止回火, 作为火焰扩散层; 下游则布置大孔径多孔介质, 作为火焰支持层。通过两种不同多孔介质交接面处空间结构的突变, 在一定的流速范围内, 将火焰的主体稳定在火焰支持层内。

Pereira 等人实验和理论研究了预混气体在两层多孔介质燃烧器中燃烧的能量集中^[3]。结果表明, 过剩温度是修正的 Lewis 数、多孔介质固体与气体导热系数的比值以及孔隙率的函数。Miao 等人组合了 4 组规格不同而燃烧器长度较小的火焰支持层^[4], 实验测得燃烧器的出口辐射热效率可以达到 30%。Barra 等人使用了一维双温非稳态模型, 重点研究了多孔材料属性对火焰稳定的影响^[5]。Barra

等人随后着重研究了两层多孔介质燃烧器内的热回流效率^[6]。

气体在多孔介质中的流动比自由流复杂。Fand 等人在实验中证实^[7], 当孔径雷诺数 $Re_p > 120$ 时, 流动已发展为湍流。目前, 对多孔介质湍流模型的研究很少, 文献 [3-5-6] 在数值计算中均没有考虑湍流的影响。

本研究建立两层多孔介质燃烧器的一维双温稳态模型, 使用简化的湍流双方程模型求解, 考虑气固相间的对流换热和多孔介质的导热和辐射, 引入热损失系数考虑系统的热损失。利用甲烷燃烧的详细机理, 着重研究预混气体在两层多孔介质中的超绝热燃烧和稳定的工作区域, 数值计算结果的有效性通过文献 [3] 中的实验结果进行验证。

1 数值模拟

1.1 物理模型

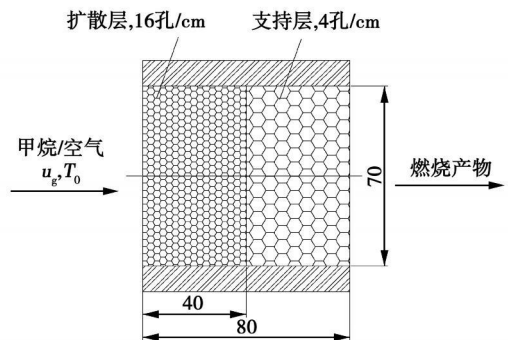


图 1 燃烧器及多孔介质布置示意图 (mm)

研究对象以文献 [3] 中两层多孔介质燃烧器为原型, 如图 1 所示。燃烧器是内径为 70 mm, 长度为 80 mm 的圆柱体, 在燃烧器的外壁包裹了绝热材料

收稿日期: 2009-06-30 修订日期: 2009-09-30

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究计划基金资助项目 (2008491); 辽宁省博士启动基金资助项目 (20081073); 国家自然科学基金资助项目 (50476073)

作者简介: 史俊瑞 (1973-), 男, 内蒙古包头人, 沈阳工程学院副教授, 博士。

以减少通过壁面的热损失。在燃烧器上游均匀填充了 16孔 / m² 的小孔径泡沫氧化铝-氧化锆多孔介质, 下游则均匀填充了大孔径 4孔 / m² 的多孔介质。两种孔径多孔介质的材料和孔隙率 (0.8) 相同, 只是孔径不同。燃气是甲烷/空气的均匀混合物。

1.2 数学模型

Peled 的研究表明^[8], 边界对湍动能 k 和耗散率 ϵ 的影响只是入口处的几个孔径的距离, 随后湍动能和耗散率趋于平衡。为便于求解, 假定在整个流场内为各向同性湍流, 采用文献 [8] 中的经验式求解 k 和 ϵ :

$$k = 3.7(1-\phi)\phi^{3/2} \langle \bar{u} \rangle \langle \bar{v} \rangle \quad (1)$$

$$\epsilon = 39\phi^2(1-\phi)^{5/2} \frac{1}{D} \left(\langle \bar{u} \rangle \langle \bar{v} \rangle \right)^{3/2} \quad (2)$$

式中: ϕ —孔隙率, 取 0.8; $\langle \bar{u} \rangle$ —流体平均速度, m/s; D —孔隙平均直径, mm

鉴于计算的多孔介质燃烧器结构简单且多孔材料孔径较小, 涡旋较小, 假定湍流作用使得火焰面变厚和传热增强, 但火焰是一维的。化学反应源项采用阿累尼乌斯计算。为简化计算, 作如下假设: 多孔介质为各向同性的、惰性的光学厚介质; 混合气为理想气体, 不考虑气体的辐射; 多孔介质的孔隙率较大, 忽略气体通过多孔介质填充床的压力降。基于上述假设, 控制方程为:

连续方程:

$$\frac{\partial(\phi \rho_g u_g)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

气体组分守恒方程:

$$\phi \rho_g u_g \frac{\partial Y_i}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi \rho_g D_m \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) - \phi \dot{\omega}_i W_i = 0 \quad (4)$$

混合气体能量守恒方程:

$$\phi \rho_g c_p u_g \frac{\partial T_g}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\phi \lambda_g + \phi \frac{\rho_g c_p \nu_t}{\delta} + \lambda_{dis} + \lambda_{rad} \right] \frac{\partial T_g}{\partial x} = h(T_s - T_g) + \sum_{i=1}^N \phi \rho_g c_{p,i} D_m \frac{\partial Y_i}{\partial x} \frac{\partial T_g}{\partial x} - \sum_{i=1}^N \phi \dot{\omega}_i h_i \quad (5)$$

多孔介质能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[(1-\phi) \lambda_s + \lambda_{rad} \right] \frac{\partial T_s}{\partial x} = h(T_g - T_s) - \beta(T_s - T_b) \quad (6)$$

理想气体状态方程:

$$P = \rho_g R T_g / \bar{W} \quad (7)$$

式中: ρ_g —气体混合物的密度, kg/m³; u_g —气体混合物的流速, m/s; Y_i —气体混合物中第 i 种组分的质量分数; $\dot{\omega}_i$ —气体混合物中第 i 种组分的生成或消耗速度, kg/(m³·s); c_p —混合气体比热容, kJ/

(kg·°C); $c_{p,i}$ —混合气体中第 i 种组分的比热容, kJ/(kg·°C); λ_s —多孔介质导热系数^[9], W/(m·K); λ_{rad} —氧化铝-氧化锆的辐射折合导热系数, 由 Rosseland 简化模型计算^[10], W/(m·K); λ_{dis} —热弥散系数, W/(m·K); h —气固相间的对流换热系数^[9], 由于缺乏泡沫氧化铝-氧化锆多孔介质的实验数据, 利用网状的氧化铝泡沫来代替, W/(m²·K); P —大气压力, 在计算中保持不变, Pa; R —通用气体常数, J/(mol·K)。

化学反应机理采用甲烷氧化机理 GRI 2.11^[11], 由 32种组分和 177个基元反应组成, 该机理在很多方面都得到了验证。多孔介质固体的热物性取为常数^[9]。

1.3 边界条件

进口: $T_g = T_b$, $Y_{CH_4} = Y_{CH_4, in}$, $Y_{O_2} = Y_{O_2, in}$, $u_g = u_{g, in}$

出口: $\frac{\partial Y_i}{\partial x} = \frac{\partial T_g}{\partial x} = 0$

在燃烧器出口, 有较大的辐射热损失, 给定固体温度的出口边界条件为:

$$\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = -\epsilon_r \sigma (T_s^4 - T_b^4)$$

式中: ϵ_r —多孔介质的表面辐射系数。

为模拟点火过程, 多孔固体温度在两种多孔介质交界面设置了长为 10 mm 的 2 000 K 高温区域。

1.4 计算方法

求解应用 CFD 软件包 Fluent 6.1。Fluent 6.1 中的多孔介质模型为单温模型, 即假设气固相处于当地热平衡, 通过 Fluent 提供的自定义函数 (UDF) 和标量方程 (UDS) 将单温模型改进为双温模型, 即分别求解气体和固体能量方程。鉴于燃烧器结构简单, 整个计算区域先划分为 1 mm 的正方形网格, 在计算收敛后, 加密火焰区域的网格, 重新计算直到收敛。压力和速度的耦合采用 SIMPLE 算法。

2 结果与分析

2.1 超绝热燃烧及火焰结构分析

甲烷/空气在自由空间燃烧的贫可燃极限大约为 0.5^[3]。预混气体在两层多孔介质中燃烧, 仍然可以发生一定程度的超绝热燃烧, 如图 2 所示, 燃烧区域的燃烧温度大于相应的自由空间中的绝热温度 (T_{ad})。文献 [3] 中的实验和本研究的计算结果都证实了这一点, 但是超绝热燃烧效应并不显著, 在燃烧区域气体温度只是稍高于绝热温度。为了验证数

值模型的有效性, 在图 2 中同时标出了文献 [3] 中实验测量的燃烧器内的温度, 实验在测量燃烧器内的温度时, 沿着轴线方向布置了 3 排平行的热电偶, 为了曲线清晰, 图中只标出了其中两排热电偶的测量值 (T_1 和 T_3)。数值预测的气体温度与实验值吻合的相当好。由于布置的 3 排热电偶与燃烧器壁面的距离不同, 其中实验测量值 T_1 靠近燃烧器壁面, 实验中虽然对燃烧器进行了保温, 但是仍然有较大的热损失。由图 2 可以看出, 在燃烧器的上游, 多孔介质固体温度高于气体温度, 新鲜预混气体得到了有效的预热。在燃烧区域下游, 固体温度高于气体温度, 反应热通过对流换热, 部分热量又蓄积在燃烧器的下游, 这也是预混气体多孔介质中燃烧区别于自由空间燃烧重要特征。

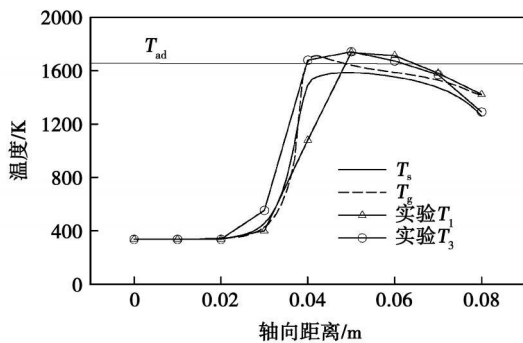


图 2 数值预测的气固相温度与实验值的比较 (当量比 0.6, $u_0=0.4 \text{ m/s}$, $\beta=800$)

为了研究两层多孔介质燃烧器对贫可燃极限的扩展, 经过反复试算, 其结果表明: 甲烷/空气在实验装置中的贫可燃极限可以扩展到 0.45 比自由空间中的贫可燃极限稍有扩展, 但是扩展的幅度并不大。文献 [3] 中的实验确定的贫可燃极限为 0.4 与本研究的数值预测结果差异不大。图 3 为数值计算得到的在贫可燃极限下燃烧器中气体和固体温度曲线。与图 2 比较可以看出, 在当量比较小时, 超绝热燃烧效应更为明显, 在界面下游处, 气体温度高于绝热温度, 而多孔介质固体温度在该处与绝热温度也相差不多。Zhdanok 等人的实验研究表明^[1], 当量比仅为 0.15 的甲烷/空气预混气体在单一均质的直径为 5.6 mm 小球填充床中可以稳定地燃烧。可见, 两层多孔介质燃烧器的优势并不在于扩展贫可燃极限。

图 4 为反应区域组分甲烷、一氧化碳和二氧化碳的分布。由于使用了详细机理, 可以预测中间产物 CO 的产生和消耗的过程。可以看出, 预混气体在多孔介质中燃烧的反应区域仍然很窄, 反应区域

的厚度为几个毫米的范畴。

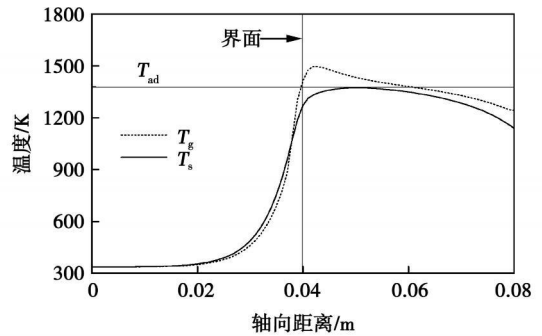


图 3 数值预测的气固相温度与实验值的比较 (当量比 0.45, $u_0=0.28 \text{ m/s}$, $\beta=800$)

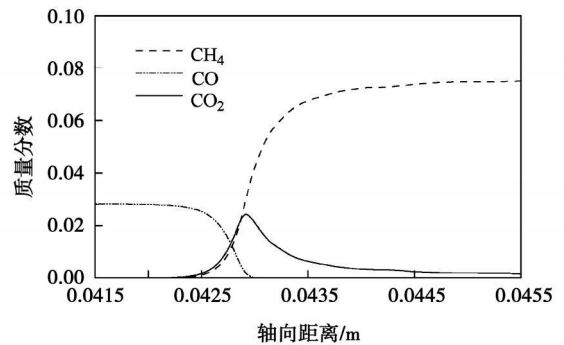


图 4 反应区域组分的质量分数分布 (当量比 0.5, $u_0=0.54 \text{ m/s}$, $\beta=800$)

2.2 稳定燃烧区域

图 5 为数值计算得出的火焰稳定区域, 为了验证模型, 并与自由空间中的燃烧相比较, 图中一并标出了文献 [3] 中实验测得的稳定区域和自由空间中的火焰传播速度。研究得出的火焰传播速度是指预混气体入口流速。实验和计算结果都证实: 预混气体在多孔介质中燃烧, 存在着稳定的工作区域, 即图中标识的最小和最大火焰传播速度之间的区域。当预混气体入口流速小于最小火焰传播速度时, 火焰将移向燃烧器入口, 产生回火; 若预混气体入口流速大于最大火焰传播速度, 则火焰移向燃烧器出口, 产生吹熄。在火焰稳定区域, 每一当量比都对应着一个可以使得火焰主体稳定在支持层内的流速范围。随着当量比的增大, 火焰的稳定区域增大, 也就是说, 燃烧器的功率和可调功率范围在扩大。与自由空间中的燃烧相比, 由于预混未燃气体得到了有效的预热, 火焰的传播速度较自由空间中有显著的提高, 实验确定的火焰传播速度是相应的自由空间的 3~6 倍。随着当量比的增大, 火焰稳定的区域变

宽。数值预测的最小火焰传播速度与实验值吻合的较好，而预测的最大火焰传播速度明显高于实验值^[3]。造成二者的差异，主要是多孔介质物性选取的不确定性带来误差。

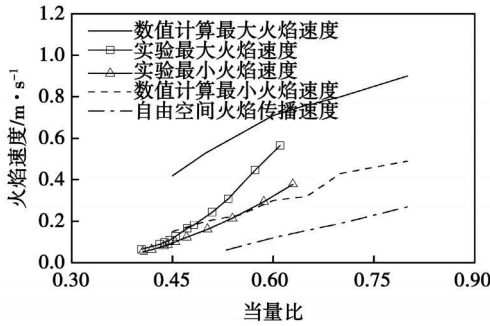


图 5 火焰稳定区域 ($\beta=800$)

图 6 为数值计算的最小和最大火焰传播速度下的气体和固体温度分布 (当量比 0.75 $\beta=800$)。在最小火焰传播速度下，气体和多孔介质固体的最高温度位于火焰扩散层与支持层的界面下游处，在火焰扩散层内，气固两相间热的非平衡度较小。而最大火焰传播速度下的气体和固体最高温度则全部位于火焰支持层内，在两种多孔介质的界面直到气固温度相等的区域内，气固相之间的热的非平衡度相对较大，这是相对于小孔径的多孔介质而言，大孔径泡沫陶瓷的结构导致了其与混合气体之间较差的对流换热。

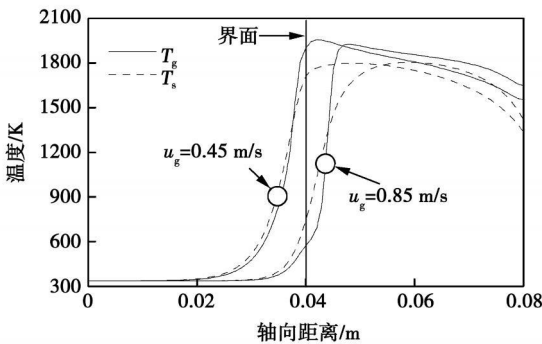


图 6 最小和最大火焰传播速度下气固相温度分布 (当量比 0.75 $\beta=800$)

3 结论

通过一维稳态数值模型，考虑详细的化学反应机理 GR1.2 研究了多层多孔介质燃烧器内的超绝

热燃烧和稳定燃烧区域，并与文献 [3] 中实验数据进行了比较，得到结论：

(1) 预混气体在两层多孔介质内发生了超绝热燃烧，但是超绝热燃烧效应并不明显，对于甲烷空气的预混气体，贫可燃极限可以扩展到 0.45。

(2) 与自由空间中的燃烧相比，其预混气体在两层多孔介质内的火焰传播速度明显增大，其火焰传播速度至少是自由空间中的 3 倍以上；随着当量比的增大，火焰的稳定燃烧区域增大，相应地燃烧器的功率和可调功率也增大。

参考文献：

- [1] ZHDANOK S A, KENNEDY L A, LAWRENCE G E. Superadiabatic combustion of methane air mixtures under fluctuation in packed bed. *J. Combustion and Flame* 1997, 100: 221-231.
- [2] KOTANI Y, TAKENO T. An experimental study of stability and combustion characteristics of an excess enthalpy flame // Nineteenth (International) Symposium on combustion [C]. Pittsburgh: The Combustion Institute 1982. 1503-1509.
- [3] PEREIRA F M, OLMEIRA A A. Analysis of the combustion with excess enthalpy in porous media // Proceeding of the European Combustion Meeting 2003 [C]. Orleans: The Combustion Institute 2003. 388-392.
- [4] MITAL R, GORE J R, VISWANATH R. A study of the structure of submerged reaction zones in porous ceramic radiant burners. *J. Combustion and Flame* 1997, 111: 175-184.
- [5] BARRA A J, DIEPVENSG, ELIZY J L, et al. Numerical study of the effects of material properties on flame stabilization in a porous burner. *J. Combustion and Flame* 2003, 134: 369-379.
- [6] BARRA A J, ELIZY J L. Heat recirculation and heat transfer in porous burner. *J. Combustion and Flame* 2004, 137: 230-241.
- [7] FAND R M, KIM B Y, KIM A C C, et al. Resistance to the flow of fluids through simple and complex porous media whose matrices are composed of randomly placed spheres. *J. ASME Journal of Fluids Engineering* 1987, 109: 268-274.
- [8] PEDRAS M H, J. DE LEMON M J S. On the mathematical description and simulation of turbulent flow in porous medium formed by an array of elliptic rod. *J. ASME Journal of Fluids Engineering* 2001, 123: 941-947.
- [9] YOUNIS L B, VISKANTA R. Experimental determination of the volumetric heat transfer coefficient between steam of air and ceramic foam. *J. International Journal of Heat and Mass Transfer* 1993, 36(6): 1425-1434.
- [10] HOWELL JR, HALL M J, ELIZY J L. Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media. *J. Progress in Energy Combustion Science* 1996, 22(2): 121-145.
- [11] FRENKIACH M, WANG H, YU C L, et al. http://www.mech.berkeley.edu/gr1_mech

An ignition and combustion stability test of a low-heating value coal gas was performed respectively on a direct flow type burner and a flare type direct flow one with different cone semi angles. It has been found that when the direct flow burner has an inner diameter of less than 8 mm, its quenching effect will seriously affect the stability of the flames. An enhancement of H_2 concentration can improve the combustion stability characteristics of the low-heating value coal gas. For the above coal gas, the combustion stability performance of the flare type direct flow burner is superior to that of a conventional one. When the cone semi angle of the flare type direct flow burner is greater than 10 degrees, it can produce a dual ignition ring and enhance the flame blow-off limits. Key words: combustion stability characteristics; burner; direct flow type; coaxial jet; low-heating value coal gas

两层多孔介质燃烧器的数值模拟 = Numerical Simulation of a Dual-layer Porous Medium Burner [刊, 汉] / SHI Jun-ru, XU Yao-ning, XUE Zhi-jia (Shenyang City Key Laboratory on Circulating Fluidized Bed Combustion Technology, Shenyang Engineering College, Shenyang, China, Post Code: 110136), XIE Mao-zhao (College of Energy Source and Power, Dalian University of Science and Technology, Dalian, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5). — 521 ~ 524

A one-dimensional numerical simulation was performed of the combustion characteristics of a premixed gas in a dual-layer porous medium burner. The superadiabatic combustion and stable flame zone in the burner under discussion were mainly studied. The research results show that the premixed gas can produce superadiabatic combustion to a certain extent inside the dual-layer porous medium and the lean combustion limits can be extended to 0.45. The dual-layer porous medium can stabilize the flame at the interface with in a relatively wide flow speed range. The minimum and maximum flame propagation speeds obtained from a numerical prediction assume a same tendency as the test ones, which are at least three times higher than those in a free space. Key words: premixed gas; dual-layer porous medium burner; numerical simulation

我国动力用煤煤质与着火特性试验研究 = Experimental Study of the Quality and Ignition Characteristics of Coals for Use in Power Plants of China [刊, 汉] / XIE Ji-dong, JIANG Ying (Beijing Coal Chemical Research Institute, Chinese Academy of Coal Sciences, Beijing, China, Post Code: 100013) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5). — 525 ~ 528

The coal quality characteristics constitute an important factor influencing its ignition ones. The authors have experimentally studied the ignition characteristics of coal for use in power plants in a one-dimensional combustion furnace and analyzed the coal quality characteristics influencing the ignition process of the pulverized coal. By utilizing the influence of the volatile, water, ash and fixed carbon content on the ignition characteristics of the coal, an ignition judgement index δ was established and a method was proposed for calculating the index under discussion δ by utilizing the coal quality analytic data of the coal, thereby judging the method of its ignition characteristics. In addition, a fitting was performed of the ignition temperatures calculated and those measured through the test, of which the correlation factor was assessed as 0.9571. This shows that the method under discussion is relatively precise and reliable. Key words: combustion; pulverized coal; coal quality characteristics; ignition characteristics; one-dimen-