

多孔介质催化燃烧特性的数值分析

邢丹, 刘明侯, 徐侃

(中国科学技术大学热科学和能源工程系, 安徽合肥 230027)

摘要:采用 Deutschman 甲烷/空气/铂氧化表面反应机理, 气相反应采用 GRI3.0 机理, 基于体积平均的双温度模型, 对 Pt 催化的甲烷/空气在多孔介质燃烧器内的预混燃烧进行一维数值模拟, 并与惰性多孔介质内预混燃烧结果进行比较. 数值研究结果表明, 有催化时, 多孔介质内火焰面前移, 且随着进口质量流率增大, 火焰面前移更明显. 催化使得多孔介质内温度分布更均匀, 反应区内的最高温度亦低于惰性多孔介质过滤燃烧的最高值. 催化剂的引入还可缩小燃烧器尺寸, 有效降低污染物的排放.

关键词: 多孔介质燃烧器; 催化燃烧; 燃烧特性; 数值模拟

中图分类号: TK223.23 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2012.01.007

引用格式: Xing Dan, Liu Minghou, Xu Kan. Numerical study on combustion in a porous medium with Pt catalyst [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2012, 42(1):41-46.

邢丹, 刘明侯, 徐侃. 多孔介质催化燃烧特性的数值分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2012, 42(1):41-46.

Numerical study on combustion in a porous medium with Pt catalyst

XING Dan, LIU Minghou, XU Kan

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Using the Deutschman CH₄/air/Pt surface reaction mechanism and GRI3.0 gas phase reaction mechanism, combustion of CH₄/air premixed gases in a porous medium burner with Pt catalyst was numerically studied based on the volume averaged two-temperature model. Compared with the results of the inert porous medium burner, it is found that the flame front moves forward with Pt catalyst, and becomes more evident with the increase of the mass flow rate. In the catalyzed porous media burner, both the solid and gas temperature distributions are more uniform and the maximum temperature is lower than that in the inert burner. The introduction of the catalyst can reduce the size of the burner and bring down pollutant emissions.

Key word: porous medium burner; catalytic combustion; combustion characteristic; numerical simulation

0 引言

低热值气体混合物和超贫燃(乏风瓦斯)稳定燃

烧技术一直吸引着研究者目光. 多孔介质比表面积大、储热能力强、对气流有弥散效应等特点有利于组织稳定的贫燃燃烧. 催化燃烧由于其较小的活化能, 在保证

收稿日期: 2011-10-31; 修回日期: 2011-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(11172296, 50936005)资助.

作者简介: 邢丹, 女, 1987年生, 硕士. 研究方向: 催化燃烧. E-mail: xdk1987@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 刘明侯, 博士/教授. E-mail: mhliu@ustc.edu.cn

燃料转化率的同时,可降低燃烧温度,减小 CO, NO_x 的排放. 因此,多孔介质催化燃烧是未来解决超贫燃燃烧和低热值混合气有效利用的技术途径之一.

目前,惰性多孔介质内(无催化)预混燃烧的数值模拟发展较为充分,但催化燃烧还停留在针对确定性简单几何表面的模拟. 美国 SANDIA 国家实验室建立了催化反应动力学计算理论^[1],并开发了被广泛应用的气相催化反应动力学模拟软件 CHEMKIN. Deutschmann 等^[2]自主开发了表面催化反应动力学计算软件 DETCHEM,并得到实验验证. 国内外以这两款软件为基础进行了一些确定几何表面的催化燃烧的数值模拟. Chao 等^[3]用 CHEMKIN 中的一维 SPIN 对 Pt 催化的单燃料及多燃料滞止流的点火温度和拉伸率对燃烧的影响进行了模拟,指出了各种燃料之间的相互作用. 本课题组^[4]在 FLUENT 中耦合 CHEMKIN 表面反应实现二维轴对称滞止点甲烷催化燃烧的数值模拟,并把结果跟一维计算程序 SPIN 进行比较,分析了不同拉伸率时滞止点附近的火焰稳定特性和中心轴线上组分浓度及温度的一维特性. 钟北京等^[5]耦合了 FLUENT 和 DETCHEM 对有逆流换热的微尺度燃烧器进行了数值模拟,实现了稍复杂的几何模型的反应流模拟. Chen 等^[6-8]耦合 CHEMKIN 和 CFD-ACE 对有表面催化的微圆管内的甲烷/空气及氢气/空气的燃烧进行了数值模拟,分析了表面反应和空间气相反应的相互作用,对管径、不同催化剂布置、内壁面有微腔等因素对燃烧特性的影响进行了详细的研究.

针对非定型表面催化,即多孔介质催化燃烧反应模型的研究还较少. Rumminger 等^[9]开发了一维多孔介质催化燃烧模型,研究了不同催化剂负载和位置布置对多孔介质表面辐射燃烧器性能的影响. Shahamiri 等^[10]耦合 FLUENT 和 CVODE 对堆积床催化燃烧器中预热混合气的转化率进行了模拟,重点分析反应机理、辐射模型、组分向表面的输运等因素的影响. 本文主要工作是在本课题组发展的一维惰性多孔介质双温度方程模型^[11]燃烧程序基础上,将表面催化反应通过体积源项形式加入相应的温度、组分输运方程,研究催化对多孔介质燃烧器内火焰结构及燃烧特性的影响.

1 数值模型和算法

1.1 控制方程

图 1 为甲烷/空气在长度为 L 的有催化的多孔

介质燃烧器内预混燃烧示意图. 采用一维体积平均模型,对燃烧过程作如下假定:①燃烧过程为定常;②火焰是一维层流结构,忽略壁面对环境的热量损失;③气体流速较低,渗透率大,忽略固体介质对气体的阻力,近似认为燃烧过程等压,略去动量方程;④气体为光学薄(optically thin)的理想气体,多孔介质固体视为灰体并各向同性,固体辐射采用双通量模型计算^[11],忽略气体辐射;⑤催化剂均匀分布在多孔介质表面,忽略烧结与中毒,基底(bulk)表面视为惰性;⑥假定多孔介质内部弯曲的通道有很强的混合作用,系统为非质量输运控制(mass-transfer limited),即不考虑组分向催化表面的扩散过程.

确定性几何表面的催化燃烧数值模拟时,一般处理为边界条件的改变或者临近壁面的一薄层网格内的源项. 非定型表面的催化数值模拟中这些方法不再适用,故我们采用体积平均的方法,将表面催化反应处理为体积源项,如下式所示

$$\frac{\int_{A_s} \dot{s} ds}{V} = \frac{\dot{s} \cdot A_s}{V} = \dot{s} \cdot a_{sv}$$

式中, \dot{s} 是能量或质量生成速率; A_s 是单元控制体内催化表面的面积; V 是单元控制体体积; a_{sv} 为比表面积. 其中假定在每个控制体内表面反应速率一定,可以看到此时比表面积 a_{sv} 的确定很关键.

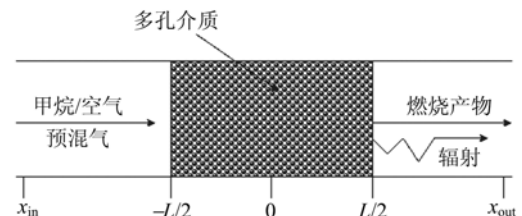


图 1 燃烧模型示意图

Fig. 1 Schematic of combustion model

简化后一维有催化的多孔介质内层流反应流稳态模型的控制方程可以写为

气体连续方程:

$$\frac{\partial(\rho_g \phi)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(\rho_g u_g \phi) = 0. \quad (1)$$

式中, ρ_g 是气体的平均密度; u_g 是气体的当地速度; ϕ 是孔隙率,在多孔介质区域 $-L < x < L$, $\phi < 1$,在其他区域, $\phi = 1$.

气相的组分守恒方程:

$$\rho_g \phi \frac{\partial Y_k}{\partial t} = -\rho_g u_g \phi \frac{\partial Y_k}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x}(\rho \phi Y_k V_k) + \phi \dot{\omega}_k W_k + a_{sv} \dot{s}_k W_k = 0, \quad k = 1, \dots, K_g. \quad (2)$$

式中, $\dot{\omega}_k$ 和 \dot{s}_k 分别为气相反应和表面反应源项; K_g 是气相组分分数; V_k 是扩散速度, 使用混合物平均公式加上弥散项修正来计算, 其中 X_k 是第 k 种组分的摩尔分数:

$$V_k = -(D_{km} + D_m^d) \frac{1}{X_k} \frac{\partial X_k}{\partial x},$$

$$D_{km} = \frac{1 - Y_k}{\sum_{j \neq k} X_j / D_{kj}}.$$

气体的能量方程:

$$\rho_g \phi c_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = -\rho_g u_g \phi c_g \frac{\partial T_g}{\partial x} - \phi \sum_{k=1}^{K_g} \rho_g Y_k V_k C_k \frac{\partial T_g}{\partial x} - \phi \sum_{k=1}^{K_g} \dot{\omega}_k h_k W_k - a_{sv} \sum_{k=1}^{K_g + K_s} \dot{s}_k h_k W_k + \frac{\partial}{\partial x} \left[\phi (k_g + \rho_g C_p D^d) \frac{\partial T_g}{\partial x} \right] - h_v (T_g - T_s) = 0. \quad (3)$$

式中, T_g 和 T_s 分别是气体和固体的温度; h_v 为气固相间体积换热系数; k_g 和 c_g 是气体的导热系数和比热容; K_s 是表面组分分数.

固体的能量方程:

$$(1 - \phi) \rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \phi) \frac{\partial}{\partial x} \left[k_s^e \frac{\partial T_s}{\partial x} \right] + h_v (T_g - T_s) - (1 - \phi) \frac{\partial q_s^r}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

式中, k_s^e 是固体的有效导热系数; q_s^r 是固体内的辐射通量.

气体的状态方程:

$$\rho_g = \frac{\bar{W} p}{RT_g}. \quad (5)$$

式中, p 和 \bar{W} 是混合气的压力和平均分子量; R 是通用气体常数.

表面组分守恒方程:

$$\frac{dZ_k}{dt} = \frac{\dot{s}_k}{\Gamma_n} = 0, k = 1, \dots, K_s. \quad (6)$$

式中, Z_k 是表面相组分的覆盖分数; Γ_n 为活性中心密度 (site density).

1.2 气相反应和表面催化反应模型和反应机理

甲烷气相燃烧动力学过程的计算采用详细反应机理 GRI3.0, 表面反应机理采用 Deutschman^[2] 发展的甲烷/空气/铂氧化机理. 此反应机理可以较好地描述气相反应和表面反应相互竞争的过程, 在文

献[2, 7-9]中已得到了应用和验证.

气相和表面相化学反应速率通过调用 CHEMKIN 气相和表面反应子程序计算详细化学反应获得^[1].

1.3 边界条件

原点取多孔介质中点, 计算区域延伸至距离多孔介质很远的上游和下游, 气相方程的边界条件使用无穷远处的边界条件:

$$\text{当 } x = -\infty \text{ 时, } Y_k = Y_{k,i}, T_g = T_i;$$

$$\text{当 } x = +\infty \text{ 时, } \frac{dY_k}{dx} = \frac{dT_g}{dx} = 0.$$

固相能量方程的求解区域是 $x = -L/2 \sim L/2$, 边界条件为

$$\text{当 } x = -L/2 \text{ 时, } -k_s \frac{dT_s}{dx} = 0;$$

$$\text{当 } x = L/2 \text{ 时, } k_s \frac{dT_s}{dx} = 0.$$

在多孔介质的两个端面上, 接收到的辐射通量采用黑体辐射假定, 即令

$$q^+ |_{x=-L/2} = \sigma T_0^4, q^- |_{x=L/2} = \sigma T_e^4.$$

式中, T_0 和 T_e 分别是上游和下游的环境温度.

1.4 数值模拟方法

本文对惰性多孔介质燃烧双温度模型程序加入表面组分守恒方程, 并对气相能量方程和气相组分守恒方程加入与表面反应相关的源项来实现多孔介质催化燃烧. 该方法的优点是可运用详细的气相和表面反应机理, 且同时考虑多孔介质内的辐射传递和气固之间的热量传递. 整个微分方程组使用隐式有限差分方法进行离散, 对流项使用一阶迎风格式, 扩散项使用二阶中心差分格式, 离散后的一组刚性非线性方程采用 Newton 迭代方法求解. 同时为了保证计算精度, 使用自适应网格方法对反应区进行加密.

2 计算结果与分析

2.1 模型验证

为验证本文数值方法的正确性, 首先对文献[10]相关研究进行数值模拟, 并与之计算和实验结果进行对比. 计算条件如下: 多孔介质厚度为 4 mm, 孔隙率 0.93, 衰减系数 1 000/m, 体积对流换热系数 $10^5 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$, 多孔介质导热系数 $0.059 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 单次散射反照率 0.7, 向后散射因子 0.5. Pt 催化剂均匀分布在多孔介质下游 2 mm 厚的区域. 进口燃料燃烧速率为 $317 \text{ kW}/\text{m}^2$, 当量比

为 0.87. 催化剂负载定义为与名义催化剂密度 ($2.72 \times 10^{-9} \text{ mol/cm}^2$) 的比值.

燃烧器表面辐射输出效率定义为

$$\text{辐射输出效率} = \frac{\text{辐射输出量}}{\text{气体燃烧放热量}} = \frac{q_{r,\text{out}} + (1 - \phi) \varepsilon \sigma (T_{s,\text{out}}^4 - T_0^4)}{\dot{Q}}$$

辐射输出量包括多孔介质内部通过出口的辐射输出量 $q_{r,\text{out}}$ 和出口界面上直接对外辐射输出量 $(1 - \phi) \varepsilon \sigma (T_{s,\text{out}}^4 - T_0^4)$ 两部分.

图 2 给出了不同催化剂负载时的辐射输出效率. 与 Rumminger 模拟结果相比, 本文模拟结果与实验符合更好. 从图 2 中可以发现, 随着催化剂浓度的增加, 辐射输出效率增大. 这是因为, 当没有催化剂存在时, 火焰稳定在多孔介质下游表面上, 此时热量主要通过热传导和质量扩散传递, 辐射效率较低. 有催化反应时, 导致火焰靠近多孔介质表面甚至稳定在多孔介质内部. 这时将有更多的热量从气体传递给固体多孔介质, 进而表现出优异的辐射输出性能. 本模型虽然比前人结果有较大改善, 但与实验结果相比, 模拟值稍稍高估了辐射输出效率. 考虑到数值模型是一维的, 且没有考虑实际过程中轴向散热影响和气相辐射等, 因而导致误差. 需要指出的是表面反应机理对催化剂的分布、负载浓度的依赖性非常大. 文献[10]和本文所用的机理都是针对负载浓度 $2.72 \times 10^{-9} \text{ mol/cm}^2$ 的结果, 而增大负载或减小负载后机理是否依然适用, 有待进一步实验验证.

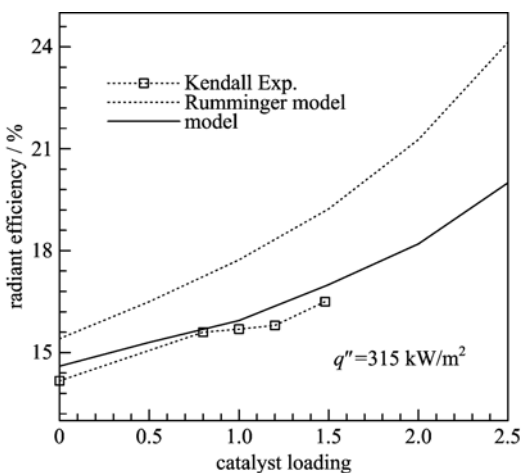


图 2 不同催化剂负载下的辐射输出效率
Fig. 2 Radiation output efficiencies for different catalyst loadings

2.2 不同燃料进口流率时催化反应对火焰结构的影响

本文中, 多孔介质选用泡沫陶瓷二氧化锆 (PSZ), 燃烧器长度为 $L=4 \text{ cm}$, 孔隙率为 0.87, 多孔介质固体有效热传导系数 $k_s^e=0.1 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 消光系数 $\kappa=2.566 \text{ cm}^{-1}$, 反照率 $\tau=0.8$, 气固体积对流换热系数为 $2.0 \times 10^5 \text{ W/(m}^3 \cdot \text{K)}$. 坐标原点设在多孔介质中点, 催化剂均匀分布在多孔介质表面.

图 3 和图 4 分别给出了质量流率 $Flrt=0.075 \text{ g/(cm}^2 \cdot \text{s)}$, 当量比 0.75 时, 有催化和惰性多孔介质内的温度和组分分布. 图中只给出了代表性的反

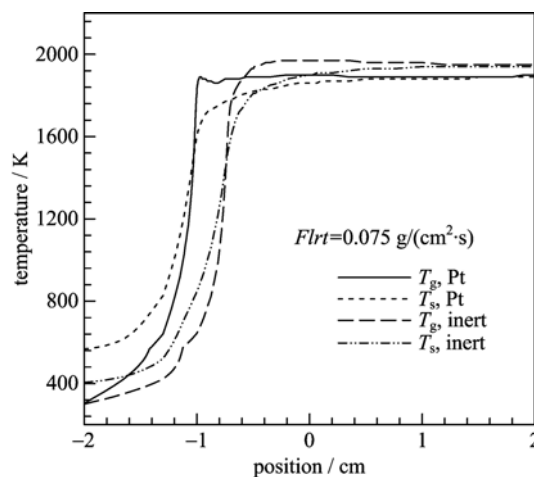


图 3 $Flrt = 0.075 \text{ g/(cm}^2 \cdot \text{s)}$ 时的温度分布比较
Fig. 3 Comparison of temperature distributions when $Flrt = 0.075 \text{ g/(cm}^2 \cdot \text{s)}$

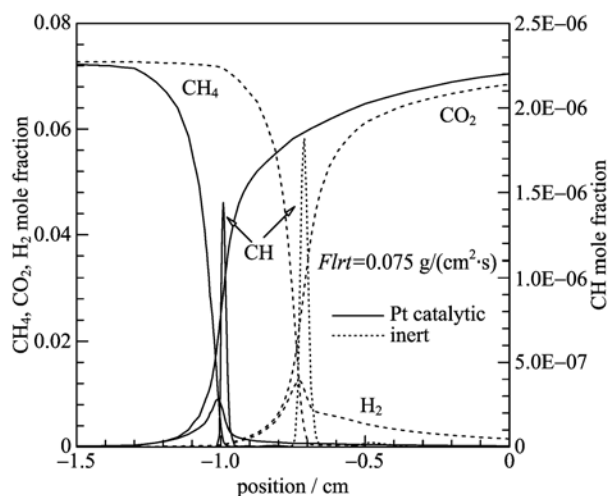


图 4 $Flrt = 0.075 \text{ g/(cm}^2 \cdot \text{s)}$ 时的组分分布比较
Fig. 4 Comparison of species distributions when $Flrt = 0.075 \text{ g/(cm}^2 \cdot \text{s)}$

应物、生成物和中间产物. 由于 CH 基团只在火焰面处生成^[12], 为了更好地反应火焰面位置特性, 给出了 CH 基团的浓度分布. 由图可见, 惰性和有催化多孔介质内燃烧都表现出典型的多孔介质过滤燃烧特性. 由于多孔介质固体构架很强的导热和辐射作用, 在火焰面之前, 固体构架的温度高于多孔介质内气体温度. 因此, 火焰面前多孔介质构架对气体有预热作用. 在火焰面之后, 气体温度又高于固体构架温度, 气体将大量热量以对流的形式传给固体, 完成固体构架的蓄热和向上游导热过程. 因此, 与自由流中层流预混燃烧相比, 多孔介质内燃烧温度分布更均匀. 其有益于火焰稳定, 并可以拓宽燃烧极限. 由于算例中气固间体积对流换热系数取得较大, 故而火焰面之后气固温度逐渐趋于一致.

反应区中 CH 基团浓度最大处视为火焰面. 对比惰性燃烧和有催化燃烧, 从图 3 可以看到, 加入催化后, 火焰面前移. 惰性多孔介质内反应区在 -0.75 cm 左右, 而加入催化后反应区前移至 -1.0 cm 处. 这是因为表面催化反应的活化能较低, 随着气相组分被催化表面吸附, 较低温度下一定的 CH₄ 被消耗掉, 生成的活性自由基有益于气相反应, 同时表面反应放出的热量加热预混气体, 气体温度沿着流向缓慢升高, 直至到达气相着火温度 (CH₄ 的点火温度在 850 K 左右), 气相着火出现. 当绝大部分 CH₄ 被消耗掉, 温度出现陡升. 而惰性多孔介质仅依靠固体多孔介质构架对气体的对流换热和气体自身热传导、扩散来预热气体, 故而反应区稍后. 有催化时, 多孔介质燃烧器内温度分布比起惰性多孔介质内的温度分布更为均匀平坦. 从图 3 可以看到, 有催化时入口处固体构架的温度比惰性多孔介质内高出 180 K 左右, 而在出口处要比惰性多孔介质低 50 K 左右. 有催化时, 火焰面附近气体的最高温度也比无催化时低 80 K 左右. 更均匀的温度分布将有利于火焰的稳定燃烧和组织贫燃燃烧. 由图 4 的组分分布还可以看到, H₂ 等中间产物具有先生成后消耗的过程, 在火焰面附近存在最大值. 在火焰面前 CH₄ 碳氢键断裂, 生成较稳定的中间产物 H₂ 和 CO 等, 火焰面下游 CH₄ 及其相应自由基基本消耗完全, 则中间产物 H₂ 和 CO 进一步和 O 结合生成最终产物 H₂O 和 CO₂. 故而火焰面下游燃烧产物有个缓慢增加的过程. 数值结果表明, 有催化时燃料的转化更为平缓, 更为完全.

图 5 和图 6 分别给出了较高进口流率时催化和

惰性多孔介质内燃烧的温度和组分分布. 其工况为进口质量流率 0.08 g/(cm² · s), 当量比 0.75. 与图 3, 4 比较发现, 流率增加后, 火焰面向下游移动, 同时催化对火焰面位置的影响更为明显. 惰性多孔介质中火焰面稳定在下游靠近出口处. 有催化时, 火焰面稳定在多孔介质内部, 前移约 0.75 cm. 0.075 g/(cm² · s) 流率时 (图 3) 的火焰面位置只前移了约 0.25 cm. 进口流率的增加导致火焰面后移, 而火焰面的后移, 又使火焰面前发挥作用的催化段的长度增加, 则催化生成的活性自由基与反应放热加热预混气体又会使火焰面向前移动. 在两者的竞争中, 催化的影响占优, 故而火焰面前移得更多. 因此催化剂的引入可以在保证燃料完全转化的基础上减小反应

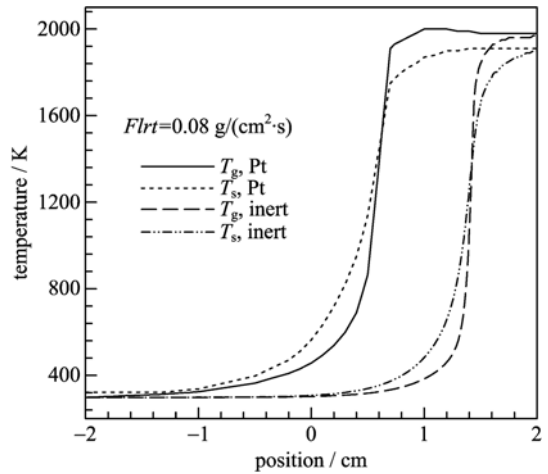


图 5 $Flrt = 0.08 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 时的温度分布比较
Fig. 5 Comparison of temperature distributions when $Flrt = 0.08 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$

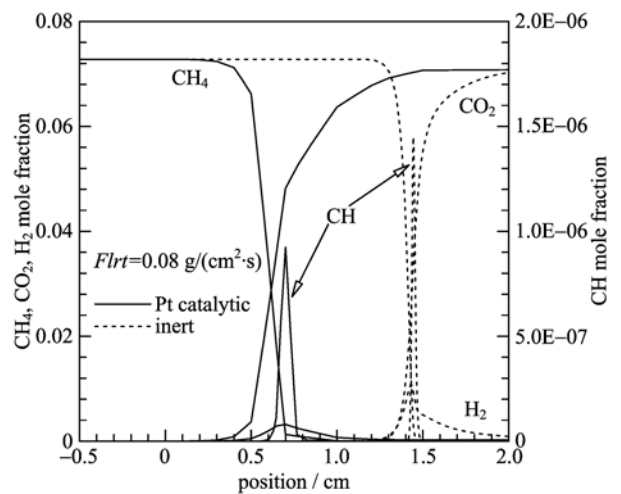


图 6 $Flrt = 0.08 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 时的组分分布比较
Fig. 6 Comparison of species distributions when $Flrt = 0.08 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$

器长度. 然而我们的模型中没有考虑组分向表面的输运过程, 随着进口流率的增加, 输运过程的影响会变大, 即本文计算中有可能高估了催化的影响, 火焰面前移的程度有待实验验证.

2.3 污染物排放

图 7 和图 8 给出了不同流量下催化和惰性多孔介质燃烧器内污染物的分布曲线. 比较图 7 中两者结果发现, 无论是否有催化, CO 在反应区生成速率都很快, 并迅速上升到最大值, 然后又随着完全燃烧消耗而降低. 而 NO 则是在反应区内快速生成, 在反应区之后继续缓慢生成. 细致比较发现, 虽然两种燃烧器出口 CO 排放水平基本相当, 但在火焰面位

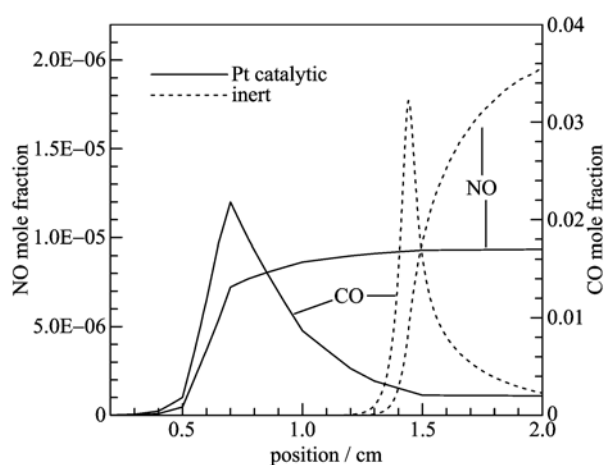


图 7 $Flrt = 0.08 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, $\Phi = 0.75$ 时
NO 和 CO 在反应区的分布

Fig. 7 NO, CO distributions in reaction zones
when $Flrt = 0.08 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, $\Phi = 0.75$

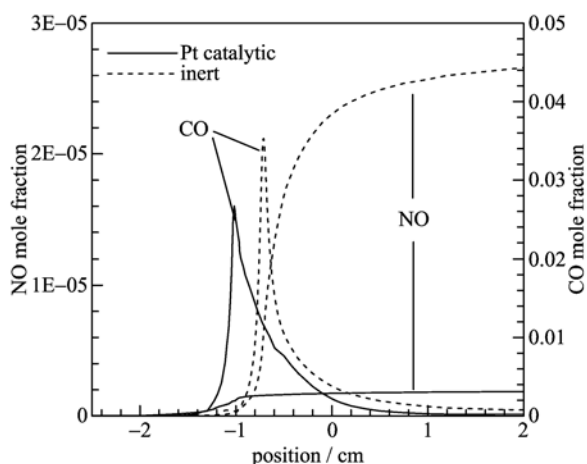


图 8 $Flrt = 0.075 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, $\Phi = 0.75$ 时
NO 和 CO 在反应区的分布

Fig. 8 NO, CO distributions in reaction zones
when $Flrt = 0.075 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, $\Phi = 0.75$

置有催化反应时 CO 生成量较惰性多孔介质火焰面处降低了 25% 左右. 由此推断, 如果燃烧器不够长, 则惰性多孔介质由于其火焰面较后, CO 排放将有可能很高. 有催化时, 燃烧器出口 NO 排放量较惰性多孔介质的排放值减小一半左右. 这得益于催化燃烧降低了火焰面最高温度. 当流量较小时, 图 8 中 CO 生成有相似的规律, NO 排放整体上明显减小. 因此, 催化在保障燃料转化率同时, 可缩小多孔介质反应区长度, 降低 CO, NO 等污染物的排放.

3 结论

本文运用详细的表面催化和气相化学反应机理对一维有催化的多孔介质内甲烷/空气预混燃烧特性进行了数值模拟, 研究结果表明:

(I) 采用体积平均的方法求解非定型表面的催化燃烧问题是可行的, 本文发展的一维程序可以较好地预计辐射输出效率随催化剂负载的变化趋势.

(II) 多孔介质催化燃烧的温度场依旧表现出和惰性多孔介质内燃烧类似的结构: 火焰面之前, 固体温度高于气体温度, 多孔介质构架预热气体; 火焰面之后, 气体温度高于固体, 完成固体构架的蓄热.

(III) 催化使得多孔介质内火焰面位置前移, 且质量流率越大, 前移越多; 催化降低火焰面最高温度, 反应区温度分布更均匀; 催化有效降低了火焰面处 CO 生成量, 且有效降低了燃烧器出口的 NO 排放.

(IV) 在保障燃料转化率和相同 CO 排放水平时, 催化可缩小小燃烧器长度.

参考文献 (References)

- [1] Coltrin M E, Kee R J, Rupley F M, et al. Surface Chemkin-III: A Fortran package for analyzing heterogeneous chemical kinetics at a solid-surface-gas-phase interface [R]. Sandia National Laboratories Report, 1996; SAND96-8217.
- [2] Deutschmann O, Maier L I, Riedel U, et al. Hydrogen assisted catalytic combustion of methane on platinum [J]. Catalysis Today, 2000, 59:141-150.
- [3] Chao Y C, Chen G B, Hsu H W, et al. Catalytic ignition of multi-fuels on platinum; Effect of strain rate [J]. Catalysis Today, 2003, 83:97-113.
- [4] Xu Kan, Liu Minghou, Xing Dan, et al. 1-D and 2-D numerical simulation of catalytic combustion at

(下转第 59 页)