

燃气流过有机玻璃圆管内的数值模拟^{*}

王茂英, 魏志军, 张 平

(北京理工大学 机电工程学院, 北京 100081)

摘 要: 为了掌握燃气流过有机玻璃圆管的降温情况, 以设计出可以实现所要求的燃气出口温度的控温装置, 通过建立管内壁热降解瞬态热传导数学模型, 得到移动气固交接边界计算网格的速率时间形。基于 STAR-CD 软件, 通过编写用户子程序模拟出管中流体平均体积温度与管内壁面温度之差沿轴向的时间形。在气流与固壁之间的热流量沿轴向一致的条件下, 通过加入降解退移速率的第三类热边界条件方程, 求解出不同时间管内壁面轮廓沿轴向变化情况, 模拟值与试验结果基本吻合。

关键词: 燃气流; 有机玻璃圆管⁺; 降解速率⁺; 移动网格⁺

中图分类号: V435 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2007) 04-0408-05

Numerical simulation of gas through PMMA tube

WANG Mao-ying WEI Zhi-jun ZHANG Ping

(School of Electron-Mechanical Engineering Beijing Inst. of Technology Beijing 100081, China)

Abstract To design the controlling temperature equipment with desired outlet gas temperature by learning the gas temperature decrease through PMMA tube, transient heat transfer mathematical model of PMMA thermal degradation was established and the velocity of degradation rate of moving boundary grid between solid and fluid was obtained. STAR-CD software was used to simulate the difference between average volume temperature and interior wall temperature vs time in axis direction aided by user subroutine programs. The third thermal boundary condition equation joined with the degradation rate of interior wall was used to get the contour of interior wall vs time under the condition of identical heat flux between fluid and solid in axis direction. The numerical simulation results agrees well with that of measurements.

Key words Gas flow; PMMA tube⁺; Thermal degradation rate⁺; Moving mesh

关键参数符号表

c	比热容	T_{dc}	平均热降解温度
h	对流换热系数	T_m	内孔气流平均温度
k	湍流动能	T_w	内孔壁面温度
p	压力	β	升温速率
r	径向坐标	ε	湍流耗散率
t	时间	Δh_v	PMMA 气化潜热
u	速度、径向速度	Δr	PMMA 降解层厚度
w	轴向速度		下角标
x	轴向坐标	s	PMMA 固体
E_a	活化能	in	有机玻璃管内壁面

1 引 言

固体推进剂燃气发生器产生的燃气温度通常比较高。在某些燃气工况下, 比如在某些空间飞行器上用该燃气挤压装有凝胶或液体推进剂的储装囊瓣膜、驱动舵机或者驱动涡轮旋转等等, 为防止由于燃气温度过高而使动力系统不能正常工作, 就需要对燃气降温。设计有机玻璃管降温装置, 使具有还原性的燃气流过有机玻璃管内孔。有机玻璃在贫氧燃气流的作用下内孔壁面发生热降解, 在降解过程中会吸收一定的热量, 从而使流过有机玻璃管的燃气温度降低。

有机玻璃 (PMMA) 热降解为单体甲基丙烯酸甲

^{*} 收稿日期: 2006-06-20 修订日期: 2006-12-05。

基金项目: 国家“八六三”计划资助项目 (7856908)。

作者简介: 王茂英 (1978—), 男, 博士生, 研究领域为固体火箭发动机设计及仿真研究。

Email wangny61@bit.edu.cn

酯 (MMA) 的化学方程式为



式中 E_a 为 1 mol PMMA 完全降解为 MMA 所吸收的热量, $E_a = 158.5 \sim 214.79 \text{ kJ/mol}^{[1]}$ 。

对于一定长度、一定初始内径的有机玻璃圆管, 当恒定质量流量燃气流过, 燃气平均温度高于有机玻璃初始降解温度 T_{di} 时, 管内壁就会沿径向向外热降解, 其降解程度在轴向各处随时间的变化情况不同。为了研究燃气流过有机玻璃管时, 管内轴向不同位置的径向降解程度随时间的变化情况, 通过编写程序计算出轴向各点的平均径向降解速率 u 随时间的变化, 基于 STAR-CD 软件结合自编子程序求解出轴向不同位置处流体平均温度 T_m 与内壁面温度 T_w 随时间的变化, 最后通过 T_m 和 T_w 的差值, 结合第三类热边界条件计算得到轴向不同位置处内孔的径向降解程度随时间的变化关系。

2 物理模型和计算方法

2.1 管内壁热降解瞬态热传导模型

有机玻璃管内壁径向热降解一维瞬态热传导微分方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_s}{\rho_s c_s} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \quad (2)$$

式 (2) 的初始条件

$$t = 0 \text{ 时, 管壁温度 } T = T_0 \quad (3)$$

边界条件

$$t > 0 \text{ 时, } r = r_{in} \text{ 则 } -\lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} = q_{net} - \rho_s u \Delta h_v \quad (4)$$

式中 $q_{net} = h(T_m - T_w)$;

$$u = \begin{cases} 0 & T_w < T_{di} \\ \frac{\partial r}{\partial t} & T_w \geq T_{di} \end{cases} \quad (5)$$

$$r = \infty \text{ 则 } \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (6)$$

式 (2) ~ (6) 中各符号含义参见文献 [2]。

通过研究得到有机玻璃壁面升温速率 β (K) 与降解温度 T_{dc} (K/m in) 之间的关系式为

$$T_{dc} = A(1 - \ln \beta - \ln t_1), t_2 < \beta \leq t_3 \quad (7)$$

式中 A , t_1 , t_2 和 t_3 为待定系数; 有机玻璃热降解平均温度 (T_{dc}) 为内壁面径向厚度 Δr 内有机玻璃壁完全降解时的平均温度。有机玻璃内壁面热降解平均升温速率 (β 简称升温速率) 为壁面径向厚度 Δr 内有机玻璃壁在完全降解之前的平均温度的变化量与

所需变化时间的比值。

湍流对流换热系数用 Dittus-Boelter 公式表示为

$$h_{con} = \frac{0.023(Re)^{0.8}(Pr)^{0.4}\lambda}{2r_{in}} \quad (8)$$

燃气对管内壁面辐射等效对流换热系数为

$$h_{rad} = K(h_{rCO_2} + h_{rH_2O}) \quad (9)$$

式中 h_{rCO_2} 和 h_{rH_2O} 为燃气中 CO_2 和 H_2O 分子对管内壁面的辐射等效对流换热系数, 根据 Schack 公式分别表示为^[3]

$$h_{rCO_2} = 1.163 \epsilon_w \sqrt[3]{p_{CO_2}} [0.0507(T_w + T_m) - 29.92] \quad (10)$$

$$h_{rH_2O} = 1.163 \epsilon_w p_{H_2O}^{0.8} S^{0.6} [0.104(T_w + T_m) - 45.3] \quad (11)$$

则总对流换热系数为

$$h = h_{con} + h_{rad} \quad (12)$$

2.2 流体与固体守恒方程

(1) 气流控制方程为 (张量形式, 圆柱坐标系下 $i, j = 1, 3$ 即轴对称):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = s_m \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h_i - F_{hi-j}) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j p) - p \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + s_h \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j k - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \mu_t (2S_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{G_i}{G_{ht}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} - \rho \epsilon - \frac{2}{3} (\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j \epsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] =$$

$$C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left| \mu_t \left[2S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{g_i}{\sigma_{ht}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} - \right. \right.$$

$$\left. \frac{2}{3} \left| \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right| \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \right.$$

$$\left. \left| C_{\epsilon 2} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 - \beta \eta^3} \right| \rho \frac{\epsilon^2}{k} + C_{\epsilon 4} \rho \epsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \quad (17)$$

式 (13) ~ (17) 分别为气流的质量守恒方程, 动量守恒方程, 能量守恒方程, 湍流动能守恒方程和湍流耗散率守恒方程。湍流模型采用 RNG k - ϵ 模型方程^[4]。该湍流模型方程较标准 k - ϵ 模型方程适用范

围更广,且离散后的计算精度更高。

(2) 固壁能量守恒方程为

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda \left[\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} \right] \quad (18)$$

这里将沿管壁径向及轴向的热传导系数作为具有相同数值处理,且将固壁密度 ρ_s 、比热容 c_s 及热传导系数 λ_s 看作常量。

2.3 降解物质量注入率

$$m_s = \rho_s \frac{\partial}{\partial t} (r_{in}^2) / [r_{in}^2 - (r_{in} - \Delta r)^2] \quad (19)$$

如图 1 所示,降解产物质量注入燃气流中的速率是通过单位时间降解产物的总质量除以在流体网格内紧贴燃气流与固壁交接边界处划分出径向厚度为 Δr 的一层网格的总体积求出。

2.4 沿轴向管内壁面降解退移量时间形

由式 (4), 假定气固交接边界处气流与固壁之间的热流量沿轴向保持一致, 即方程左边项只为时间 t 的函数, 用 $C1(t)$ 表示; 且总对流换热系数 h 沿轴向均匀分布, 用 $C2(t)$ 来表示。则式 (4) 变为

$$C1(t) = C2(t) \cdot (T_m - T_w) - C3 \cdot u \quad (20)$$

式中 $C3 = \rho_s \Delta h_v$ 。令 $(T_m - T_w) = f_{\Delta}(x, t)$; $u = f_u(x, t)$, 则在 t_n 时刻, 有

$$C1(t_n) = C2(t_n) \cdot f_{\Delta}(x, t_n) - C3 \cdot f_u(x, t_n) \quad (21)$$

式中, $C2(t_n)$ 可由 2.1 求出, $f_{\Delta}(x, t_n)$ 可由 2.1~2.3 求出, 在轴向的不同 x 位置处, 如 x_k 和 x_{k+1} 两处, 由 2.4 开始的假设并且根据式 (21) 有

$$\begin{aligned} C2(t_n) \cdot f_{\Delta}(x_k, t_n) - C3 \cdot f_u(x_k, t_n) = \\ C2(t_n) \cdot f_{\Delta}(x_{k+1}, t_n) - C3 \cdot f_u(x_{k+1}, t_n) \end{aligned} \quad (22)$$

可见, 只要给出 x_k 处的降解退移速率函数 $f_u(x_k, t_n)$, x_{k+1} 处的函数 $f_u(x_{k+1}, t_n)$ 就可由式 (22) 确定。由

$$r_{in}(x, t) = \int_0^t f_u(x, t) dt + r_{in0} \quad (23)$$

求出不同轴向位置 x 处内孔径向降解程度随时间的变化关系 $r_{in}(x, t)$ 。

2.5 管入口处燃气质量流量

燃气发生器中双基推进剂柱状药端面燃烧, 所产生的燃气流过有机玻璃管, 其质量流量为

$$m_p = \rho_p \pi r_p^2 r_{bum} / 1000 \quad (24)$$

式中 ρ_p 为药密度, r_p 为柱状药端面半径, r_{bum} 为燃面退移平均速率, $r_{bum} = a p_c^n$, 其中 a 为燃烧速率指前因子, p_c 为燃烧室中燃气的压力, n 为压力指数。

2.6 求解方法

首先, 将式 (2)~(12) 用显示差分方法离散, 将输入数据代入离散后的式 (2)~(12), 用自编程序求解出在沿管轴向具有径向均匀降解退移速率时, 径向降解退移速率 u , 管壁内径 r_{in} , 燃气流与内壁面的总对流换热系数 h 和有机玻璃壁面降解温度 T_{dc} 随时间 t 的变化关系。

用 STAR-CD 软件网格划分功能模块划分二维轴对称半剖面求解区域网格, 见图 1。

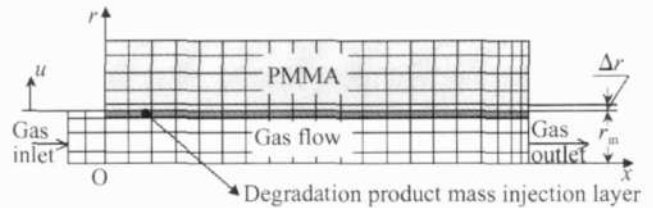


Fig 1 Mesh sketch of computational region

将求得的 u 随时间 t 的变化关系作为移动气固交接边界网格程序中管内壁面降解退移速率的输入数值, 用管壁内径 r_{in} 随时间 t 的变化关系作为降解壁面退移量随时间 t 变化的参考, 并且将 u 和 h 随时间 t 的变化关系作为气固交接热边界条件子程序的输入数值, 将 u 和 T_{dc} 随时间 t 的变化关系作为降解物质量注入子程序的输入数值。用 STAR-CD 软件求解模块求解出管中流场各参数的时间形。

由总对流换热系数 h 与时间 t 的函数关系 $C2(t)$ 、内孔截面平均温度 T_m 和内孔壁面温度 T_w 的差值与时间 t 的函数关系 $f_{\Delta}(x, t)$, 并且选定 $x = x_k$ ($0 \text{ mm} < x_k < 100 \text{ mm}$) 处退移速率、时间函数关系 $f_u(x_k, t)$ 与求解出的 $u-t$ 相一致, 再结合式 (22), 求出在 $x = 0 \sim 100 \text{ mm}$ 各处, $t = 0 \sim 1.0 \text{ s}$ 时的函数 $f_u(x, t)$ 。最后由式 (23) 求出在 $x = 0 \sim 100 \text{ mm}$ 各处, 管内半径 r_{in} 与时间 t 的关系 $r_{in}(x, t)$ 。

3 计算结果与讨论

3.1 计算输入参数

燃气参数: 出口压力 $p_c = 4.0 \text{ MPa}$, 入口温度 $T_m = 2.6 \times 10^3 \text{ K}$; 动力黏度系数 $\mu = f_{\mu}(T_m)$, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; 等压比热容 $c_p = f_c(T_m)$, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 导热系数 $\lambda = f_{\lambda}(T_m)$, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 气体厚度 $s = r_{in}$; CO_2 和 H_2O 的分压 $p_{\text{CO}_2} = 12.2 \text{ kg}/\text{cm}^2$, $p_{\text{H}_2\text{O}} = 12.2 \text{ kg}/\text{cm}^2$; CO_2 和 H_2O 同时存在时的有效辐射吸收带百分比 $k = 0.97$; 摩尔质量 $W_m = 24.6 \text{ g/mol}$ 。

推进剂参数: $r_{bum} = 6.3 p_c^{0.1} \text{ mm/s}$ ($p_c = 4 \sim 6 \text{ MPa}$); $\rho_p = 1.670 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$; $r_p = 30 \text{ mm}$ 。

PMMA 参数: 入口初始内径 $r_{in, 0} = 4.0 \text{ mm}$; 初始外径 $r_{out} = 10.5 \text{ mm}$; 径向步长 $\delta r = 1 \times 10^{-5} \text{ m}$; 时间步长 $\delta t = 1 \times 10^{-5} \text{ s}$; $T_0 = 293 \text{ K}$; $\rho_s = 1.188 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; $c_s = 1.6 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$; $\lambda_s = 0.185 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$; 辐射率 $\varepsilon_w = 0.9$; $\Delta h_v = 0.3 \text{ MJ/kg}$; $T_{di} = 473 \text{ K}$; 长度 $L = 100 \text{ mm}$; 对于摩尔质量为 $99.6 \times 10^5 \text{ g/mol}$ 的 PMMA^[5], 公式 (7) 中系数 A_1 , t_1 , t_2 和 t_3 之间的对应关系见表 1。

Table 1 Values of coefficient A_1 , t_1 , t_2 and t_3 ($\beta / (\text{K} \cdot \text{m} \cdot \text{in})$)

A_1	t_1	t_2	t_3
26.6	3.4×10^{-9}	7.7×10^2	3.5×10^4
33.6	2.0×10^{-6}	3.5×10^4	1.0×10^6
39.1	9.6×10^{-5}	1.0×10^6	1.1×10^7
45.4	3.4×10^{-3}	1.1×10^7	1.1×10^8
53.0	1.1×10^{-1}	1.1×10^8	7.8×10^8
68.4	2.3×10^1	7.8×10^8	1.7×10^{10}
97.1	1.3×10^4	1.7×10^{10}	5.1×10^{11}
141.5	4.0×10^6	5.1×10^{11}	1.1×10^{13}
207.8	5.4×10^8	1.1×10^{13}	1.4×10^{14}

MMA 参数: 动力黏度系数 $\mu_d = f_{\mu_d}(T_{dc})$, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; 定压比热容 $c_{pd} = f_{c_{pd}}(T_{dc})$, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 导热系数 $\lambda_d = f_{\lambda_d}(T_{dc})$, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 摩尔质量 $W_{md} = 100.1 \text{ g/mol}$; 降解物质量注入网格层厚度 $\Delta r = 0.25 \text{ mm}$ 。

推进剂及燃气参数来自厂家, 有机玻璃及 MMA 的数据来自于参考文献 [6~9]。

3.2 计算结果及分析

径向降解退移速率 u 和管壁内径 r_{in} 随时间 t 的变化关系见图 2(a); 降解温度 T_{dc} 和总对流换热系数 h 随时间 t 的变化关系见图 2(b)。

由图 2(a) 中 u - t 曲线可见, 壁面降解退移速率在 $t < 0.2 \text{ s}$ 时, 会迅速上升到 1 个峰值, 随后 u 随时间增长而逐渐下降。这是因为有机玻璃内壁面平均降解速率 u 主要受到总对流换热系数 h 的影响, 见图 2(b) 中 h - t 曲线。 $t < 0.2 \text{ s}$ 时, h 值较大, 因此 u 会从一个较大的值; $t > 0.2 \text{ s}$ 以后, 因为 h 值逐渐降低, 所以 u 会表现出逐渐下降的趋势。

沿轴向不同截面处管中流体的平均体积温度 T_m 随时间的变化见图 3。由图 3 可见, 随着 x 值的增加, T_m 值降低; 且在每个 x 位置处, T_m 值随 t 增加而升高。因为随时间的增长, 有机玻璃管内壁不断热降解, 管内径不断增大, PMMA 热降解吸热对燃气的降温效果与不断增大的对流换热面积对燃气的降温效果之和仍然弱于管中不断增长的燃气总热量对燃气的升温效果, 所以管中燃气平均温度会随着时间的增

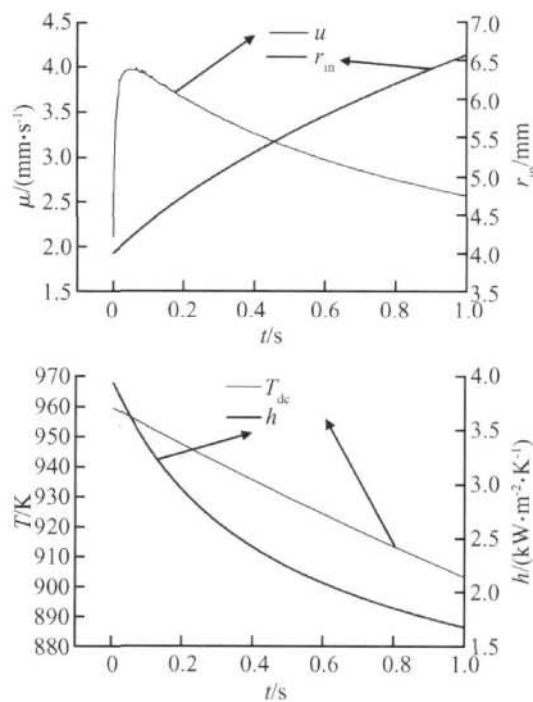


Fig 2 Curves of u , r_{in} , T_{dc} and h vs t

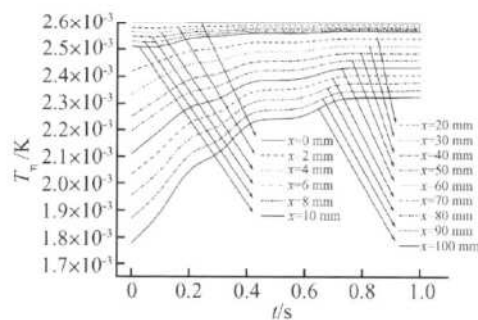


Fig 3 Curves of T_m vs t at different x

长而升高。

沿轴向不同截面处管中流体平均体积温度 T_m 与管内壁面的温度 T_w 之差值随时间的变化见图 4。 $x = 0 \sim 30 \text{ mm}$, $T_m - T_w$ 的数值基本随着 x 的增大而增加; $x = 30 \sim 100 \text{ mm}$, $T_m - T_w$ 的数值随 x 的增加而减小。 $x = 0 \sim 20 \text{ mm}$, $T_m - T_w$ 的数值随 t 增加而基本呈下降趋势; $x = 20 \sim 40 \text{ mm}$, $T_m - T_w$ 的数值随 t 增加先呈上升趋势, 然后呈下降的趋势; $x = 40 \sim 100 \text{ mm}$, $T_m - T_w$ 的数值随 t 增加基本呈上升的趋势。这可以从燃气与管内壁的对流传热使壁面升温与管内壁热降解使壁面温度降低两个方面来解释: 在 $x = 0 \sim 20 \text{ mm}$ 段, 对流传热升温效果要强于热降解降温效果, 因此管壁温度 T_w 随时间逐渐升高, 且 T_w 的提升幅度大于 T_m 的提升幅度, $T_m - T_w$ 的数值随时间降低; 同样, 在 $x = 20 \sim 40 \text{ mm}$ 与 $x = 40 \sim 100 \text{ mm}$ 这两段, $T_m - T_w$ 的数值随时间的变化趋势也可以用对流传热升温与热降解降温两者的强弱关系及 T_w 与 T_m 的提升幅度相比较来解释。

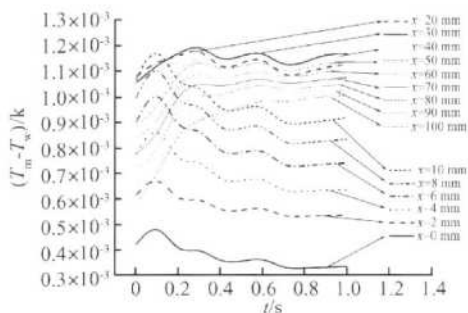


Fig 4 Curves of $(T_m - T_w)$ vs t at different x

不同时间 t 时, 沿轴向管内壁面边界的轮廓线见图 5。在 $x = 0$ mm, 即燃气入口处, 有机玻璃管内壁面径向降解程度随时间的变化较小, 因为限定了燃气入口面积。随着 x 的增大, 降解程度会逐渐增大, 在 $x = 30$ mm 处, 径向降解程度最大。随着 x 继续增长, 径向降解程度有所减小。在 $x = 100$ mm, 即燃气出口处, 径向降解程度较 $x = 30$ mm 处有所减小, 但较 $x = 0$ mm 处的降解程度大。在将图 3(a) 中的 $u-t$ 曲线数值付给 $x = 30$ mm 时的退移速率与时间的函数关系 f_u ($x = 30$ mm, t) 后, 求得在 1.0 s 时, 管内壁面半径最大值产生在 $x = 30$ mm 处, 为 6.58 mm; 半径最小值产生在 $x = 0$ mm 处, 为 4.78 mm; 出口处半径值达到 6.2 mm。

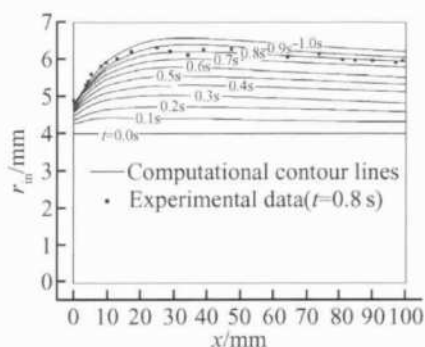


Fig 5 Boundary contours of interior wall in tube axis direction under different t

为验证有机玻璃管对燃气的降温工作情况, 设计了有机玻璃降温试验装置, 让一种改性双基推进剂燃烧的燃气完全流过该降温装置, 推进剂工作 0.8 s 后, 有机玻璃内孔壁的热降解情况如图 5 数据点所记载。可见, 所记录下来的试验数据点的分布与 0.8 s 时计算所得的管内壁面边界轮廓线基本吻合。

降解后的有机玻璃管实物图见图 6。

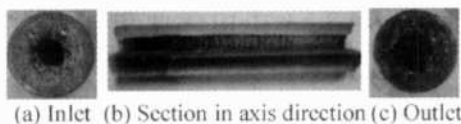


Fig 6 Photos of PMMA tube after thermal degradation

4 结 论

(1) 在入口燃气质量流量恒定的条件下, 有机玻璃管内壁平均热降解速率主要受到燃气与固壁之间的对流换热系数的控制。

(2) 一定管长的有机玻璃管, 限定燃气入口面积, 在气流与固壁之间的热流量轴向一致的条件下, 热降解程度最小处为入口, 热降解程度最大处是距燃气入口轴向一段距离的位置。

(3) 经燃气流过有机玻璃管, 管内壁径向降解试验验证, 计算所得的轴向管内壁面边界轮廓线随时间的变化与试验结果的吻合较好, 数值模拟是有效的。

致谢: 本文有机玻璃管燃气降温试验数据来自北京理工大学喷气推进实验室, 感谢张平老师对试验的支持, 同时感谢魏志军、方蜀州、刘向阳、刘玉群、韩振海、和平等老师们在本次试验中的通力配合。

参考文献:

- [1] 曾文茹, 李疏芬, 周允基. 聚甲基丙烯酸甲酯热氧化降解的化学动力学研究[J]. 化学物理学报, 2003, 16(1).
- [2] 王茂英, 魏志军, 张平. 燃气通过有机玻璃圆管时的降温特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(5).
- [3] 西川兼康, 藤田恭申, 著. 传热学[M]. 孙亚斌, 侯克复, 等, 译. 北京: 兵器工业出版社, 1990.
- [4] 岑可法, 樊建人. 燃烧流体力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [5] Ferriol M, Gentilhomme A, Cochez M, et al Thermal degradation of poly(methyl methacrylate) (PMMA): modelling of DTG and TG curves[J]. Polymer Degradation and Stability, 2003, 79: 271~281.
- [6] 利帕托夫, 普里瓦尔科, 编. 聚合物物理化学手册[M]. 闫家宾, 张玉昆, 译. 北京: 中国石化出版社, 1995.
- [7] Ndubizu C C, Ananth R, Tatem P A. Transient burning rate of a noncharring plate under a forced flow boundary layer flame[J]. Combustion and Flame, 2005, 141.
- [8] Staggs J E J. Modelling thermal degradation of polymers using single-step first-order kinetics[J]. Fire Safety Journal, 1999, 32: 17~34.
- [9] Smolders K, Baeyens J. Thermal degradation of PMMA in fluidised beds[J]. Waste Management, 2004, 24.

(编辑: 张雅凤)