

# 考虑气体扩散渗透的隔热材料瞬态隔热性能数值模拟

周优均 李东辉 夏新林

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

**文 摘** 高超声速飞行器机动飞行时环境压力变化导致隔热材料沿厚度方向存在压力梯度, 进而引起隔热材料内气体的扩散渗透, 影响隔热材料隔热性能。为研究气体扩散渗透对隔热材料隔热性能的影响, 建立了隔热材料内气体扩散渗透模型, 采用罗斯兰德近似、有限体积法建立了隔热材料内扩散渗透及辐射导热传热计算模型, 对气体扩散渗透条件下的瞬态隔热性能进行了数值模拟。算例模拟结果表明: 对 2 cm 厚纳米隔热材料, 在外界气压为 0.1 MPa, 绝热面为真空的状况下, 当渗透率大于  $10^{-14}$  m<sup>2</sup> 时, 气体扩散渗透开始影响隔热材料内传热, 导致隔热性能降低, 气体黏性系数对气体扩散渗透有显著影响, 随着黏性系数降低, 气体扩散渗透现象显著; 衰减系数对绝热面温度响应有显著影响, 随着衰减系数增大, 绝热面温度响应显著降低。

**关键词** 隔热材料, 传热, 辐射, 扩散渗透

中图分类号: TK124

DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2014.01.004

## Numerical Simulation on Transient Insulating Properties of Thermal Insulation Materials With Gas Permeation

ZHOU Youjun LI Donghui XIA Xinlin

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** Pressure gradient in the insulation materials along the thickness direction, which results from the changes in pressure around the maneuvering hypersonic vehicles, will lead to gas diffusion and permeation in thermal insulation materials and affect the insulating property. In order to study the influences of gas diffusion and permeation on materials insulating properties, a heat transfer model combined conduction radiation with gas diffusion and permeation was established under Rosseland approximation for radiation heat transfer. The established control equations were solved by finite volume method and the transient insulating properties under the condition of gas diffusion and permeation were numerically studied. Results show that gas permeation begins to influence the heat transfer process and worsen transient insulating property for a 2 cm nanometer insulation material when its permeability is greater than  $10^{-14}$  m<sup>2</sup> under the condition where the heated surface is at environment pressure of 0.1 MPa and the unheated surface is in vacuum. Gas viscosity has a significant influence on gas diffusion and permeation process and the diffusion process enhances with the decrease in viscosity. Extinction coefficient has more significant influence on the thermal response at the insulated surface than gas diffusion parameters and the temperature response decreases with the increase of extinction coefficient.

**Key words** Thermal insulation material, Heat transfer, Radiation heat transfer, Diffuse and permeation

### 0 引言

隔热材料广泛应用于高超声速飞行器热防护领

收稿日期: 2013-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(51176038), 高等学校博士学科点专项科技基金(20112302110017)

作者简介: 周优均, 1989 年出生, 硕士, 主要从事隔热材料耦合传热研究。E-mail: youjun\_zhou@126.com

通讯作者: 夏新林, Tel: 0451-86412148, E-mail: xiaxl@hit.edu.cn

域<sup>[1]</sup>。高超声速飞行器在大气层中飞行时,由于气动加热作用,飞行器表面及附近气体达到很高温度。在机动飞行过程中,飞行器外部环境气压不断变化。当飞行器外部环境气压降低时,在隔热材料内部压力梯度作用下,隔热材料内部将存在气体向外界环境的扩散渗透,此时气体扩散渗透将有利于隔热。反之,当飞行器外部环境气压升高时,在压力梯度作用下外部高温气体将向多孔的隔热材料内部扩散渗透,将导致隔热材料的隔热性能降低。

近年来,许多学者对多孔隔热材料传热特性进行了大量理论研究<sup>[2-3]</sup>,对多孔介质的渗流特性也进行了许多实验分析<sup>[4-7]</sup>。然而大多数理论研究只考虑了隔热材料内导热和辐射传热<sup>[8]</sup>,对包括气体扩散渗透传热的理论研究还少有报道。本文在考虑隔热材料内气体扩散渗透条件下,建立了隔热材料内气体扩散渗透模型,采用罗斯兰德近似、有限体积法建立了辐射导热及气体扩散渗透一维传热计算模型,对气体扩散渗透条件下的瞬态隔热性能进行了数值模拟。

## 1 数学物理模型及计算方法

考虑隔热材料内气体扩散渗透的一维传热物理模型如图1所示,隔热材料厚度为 $H$ ,热面温度为 $T_1$ ,热面气体压力为 $p_1$ ,冷面绝热,冷面气体压力为 $p_2$ 。

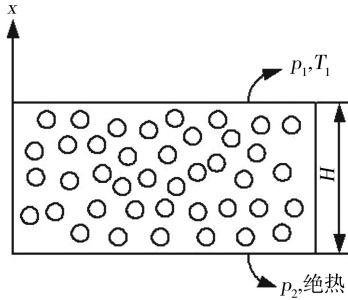


图1 隔热材料一维传热示意图

Fig. 1 Schematic diagram for one dimensional heat transfer with gas permeation in insulation materials

在考虑气体扩散渗透条件下,隔热材料内的传热包括导热、辐射传热、气体扩散渗透传热。假设气体固体处于局部热平衡状态,则一维传热控制方程为

$$\frac{\partial \varphi \rho_a}{\partial \tau} = - \frac{\partial \rho_a u}{\partial x} \quad (1)$$

$$u = - \frac{K}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (2)$$

$$p = \rho_a R_g T \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho c T)}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\partial (\rho_a c_a u T)}{\partial x} - \frac{\partial q_r}{\partial x} \quad (4)$$

式中, $\varphi$ 为孔隙率, $\rho_a$ 为气体密度, $u$ 为气体扩散渗透速度, $\mu$ 为动力黏性系数, $K$ 为渗透率, $p$ 为气压, $c_a$ 为气体比热容, $R_g$ 为气体常数, $\rho$ 为隔热材料密度, $c$ 为隔热材料比热容, $q_r$ 为辐射热流密度。

本文重点分析气体扩散渗透对隔热性能的影响,为方便起见,采用 Rosseland 扩散近似计算辐射传热

$$q_r = - \lambda_r \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

$$\lambda_r = \frac{16 \sigma n^2 T^3}{3 k_e} \quad (6)$$

式中, $\lambda_r$ 为辐射热导率, $k_e$ 为隔热材料的衰减系数, $n$ 为隔热材料的等效折射率,考虑到隔热材料具有很高的孔隙率( $>85\%$ ),本文取 $n=1$ , $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数。

考虑到流动过程达到稳态所需的时间远小于传热达到稳态所需的时间,因此,假设气体扩散渗透过程是稳态过程,由式(1)~(3)可得气体扩散渗透过程中满足的压力方程为

$$\frac{d^2 p^2}{dx^2} - \frac{1}{T} \cdot \frac{dT}{dx} \cdot \frac{dp^2}{dx} = 0 \quad (7)$$

初始条件及边界条件为

$$T|_{\tau=0} = T_0 \quad (8)$$

$$T|_{x=H} = T_1, \frac{\partial T}{\partial x}|_{x=0} = 0 \quad (9)$$

$$p|_{x=H} = p_1, p|_{x=0} = p_2 \quad (10)$$

采用有限体积法对能量方程(4)与压力方程(7)进行离散,采用时间步进算法求解能量方程,获得温度场,通过求解压力方程获得压力场,根据式(2)、(3)得到气体渗流速度和气体密度分布,将气体扩散渗透所引起的热量传递作为能量方程源项。边界条件处理采用补充边界节点离散代数方程的方法,离散代数方程组采用 TDMA 算法直接求解。

## 2 气体扩散渗透条件下隔热性能数值模拟

在考虑隔热材料内气体扩散渗透条件下,以纳米隔热材料为例,对隔热材料内气体扩散渗透耦合传热及其瞬态隔热性能进行了数值模拟。隔热材料厚度为2 cm,孔隙率为0.9,隔热材料密度为376 kg/m<sup>3</sup>,隔热材料比热容为1 kJ/(kg·K),热导率为40 mW/(m·K),衰减系数为1×10<sup>4</sup> m<sup>-1</sup>,热面温度 $T_1=1273$  K,冷面绝热,初始温度 $T_0=303$  K,气体比热容为1.2 kJ/(kg·K),黏性系数为33.5×10<sup>-6</sup> kg/(m·s),热面气体压力 $p_1=0.1$  MPa,冷面气体压力 $p_2=0$ 。隔热材料中固体颗粒粒径取15 nm<sup>[9-10]</sup>,渗透系数采用 Carman-Kozeny 模型进行估算

$$K = \frac{d_p^3 \varphi^3}{180(1-\varphi)^2} \quad (11)$$

式中, $d_p$ 为隔热材料中的颗粒直径。

图2给出了隔热材料冷面的瞬态温度响应。可以看到,在所考虑的计算条件下气体扩散渗透对纳米隔热材料冷面温度响应的影响很小。这是因为纳米

隔热材料中的颗粒直径很小,气体的渗透率非常低,根据式(11)经过估算大约为 $10^{-17}$ 数量级,此时气体扩散渗透对传热的影响可以忽略。同时可以看到,由于纳米隔热材料热导率很小,仅为 $40 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,辐射传热的贡献相对较大。

图3给出了隔热材料的瞬态温度分布。

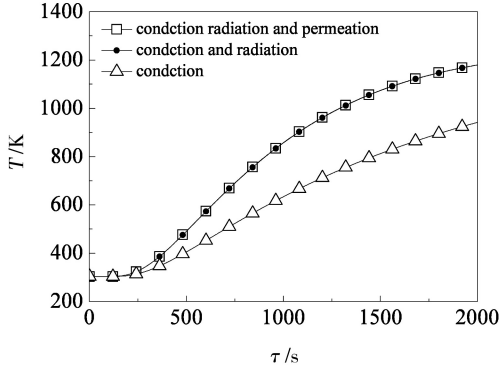


图2 隔热材料冷面温度响应

Fig. 2 Adiabatic surface temperature response

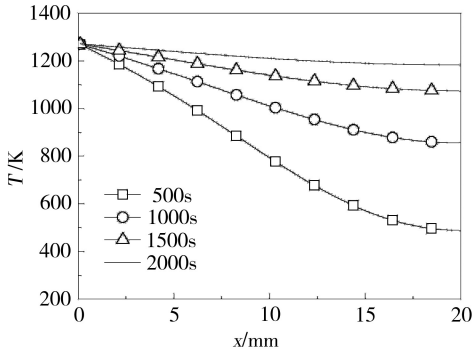


图3 隔热材料瞬态温度分布

Fig. 3 Transient temperature profiles in the insulation

图4给出了在2000s时隔热材料内气体压力的分布。可以看到,气体扩散压力沿着隔热材料厚度方向的分布具有明显的非线性特征。

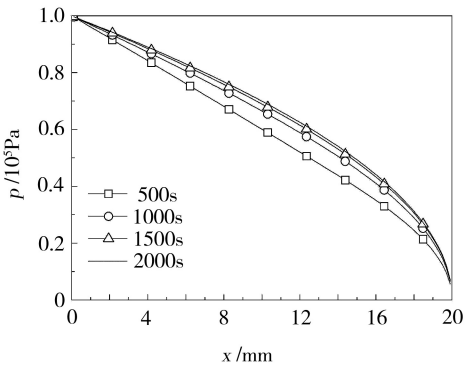


图4 隔热材料气体压力分布

Fig. 4 Gas pressure profile in the insulation

表1给出了不同时刻气体扩散渗透的质量流量。可以看到,隔热材料内气体的扩散渗透质量流量非常小。随着传热过程接近稳态,扩散渗透质量流量随之宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014年 第1期

降低,并随温度场趋于稳定。

表1 不同时刻气体扩散质量流量

Tab. 1 Mass flux of diffusion gas at specific time

时间 /s	质量流速 / $10^{-7} \text{ kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	时间 /s	质量流速 / $10^{-7} \text{ kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$
500	3.2	1500	2.3
1000	2.5	2000	2.1

## 2.1 渗透率对瞬态隔热性能的影响

考虑到隔热材料中存在较大尺寸的孔,这些孔对隔热材料的渗透率将产生较大的影响,导致隔热材料渗透率增大。本文研究了渗透率对隔热材料瞬态温度响应的影响,结果见图5,图中 $K=0$ 代表的曲线为忽略气体扩散渗透时的结果。

从图5可以看到,对所研究的2cm厚纳米材料,当渗透率小于 $10^{-14} \text{ m}^2$ 时,气体扩散对传热的影响很小;当渗透率为 $10^{-13} \text{ m}^2$ 时,气体扩散渗流对冷面温度响应具有显著影响。可见,当渗透率大于 $10^{-14} \text{ m}^2$ 时,气体扩散渗流开始对冷面温度响应产生影响,并且随着渗透率的增大,渗透率对冷面温度响应的影响显著增大。在本文算例中,隔热材料热面边界气压高于冷面气压,导致热面处的高温气体向冷面处扩散渗透,引起冷面温度响应增大,导致材料瞬态隔热性能降低。

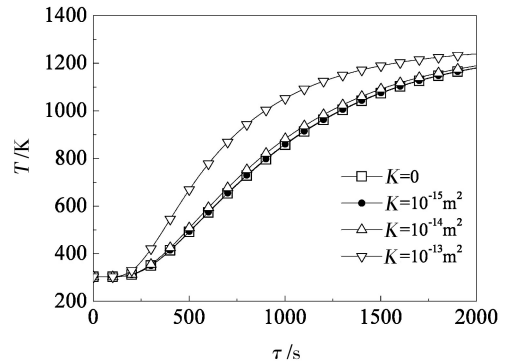


图5 渗透率对冷面温度响应的影响

Fig. 5 Influence of permeability on the temperature response of the adiabatic surface

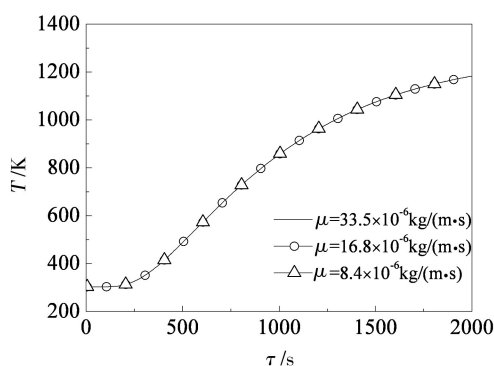
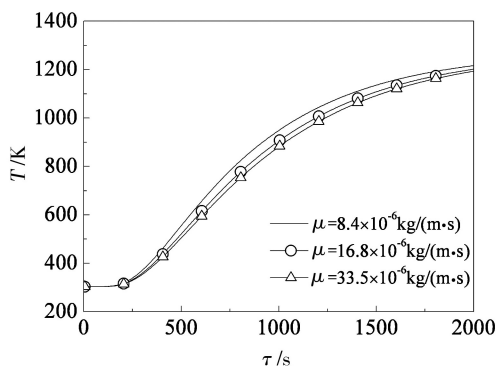
## 2.2 黏性系数对瞬态隔热性能的影响

以2cm厚纳米材料为例,在渗透率分别为 $10^{-14}$ 、 $10^{-17} \text{ m}^2$ 、黏性系数为 $(8.43 \sim 33.53) \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 、考虑导热辐射渗流耦合作用下,模拟研究了黏性系数对瞬态隔热性能的影响。

图6给出 $K=10^{-17} \text{ m}^2$ 、 $10^{-14} \text{ m}^2$ 时,气体黏性系数对绝热面温度响应的影响。从图6(a)中可以看出,此时气体黏性系数对绝热面温度响应有明显影响。随着气体黏性系数降低,气体扩散渗透作用增强。在给定加热面压力高于绝热面压力的情况下,随着气体黏性系数降低,绝热面温度响应升高。从图6(b)中

可以看出,此时由于气体扩散渗透作用很弱,在所考虑的黏性系数范围内;气体黏性系数对绝热面温度响

应基本没有影响。



(a)  $K = 10^{-14} \text{ m}^2$

(b)  $K = 10^{-17} \text{ m}^2$

图6 黏性系数对冷面温度响应的影响

Fig. 6 Influence of gas viscosity on the temperature response of adiabatic surface

### 2.3 衰减系数对瞬态隔热性能的影响

以2 cm厚纳米材料为例,在黏性系数为 $3.35 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 、渗透率为 $10^{-14} \text{ m}^2$ 、衰减系数为 $(0.55 \sim 2) \times 10^4/\text{m}$ 的情况下,模拟研究了衰减系数对瞬态隔热性能的影响。

图7给出衰减系数对绝热面温度响应的影响,可以看出,衰减系数对绝热面温度响应有显著影响。随着衰减系数增大,隔热材料对热辐射传热的削弱作用显著增强,绝热面温度响应显著降低。

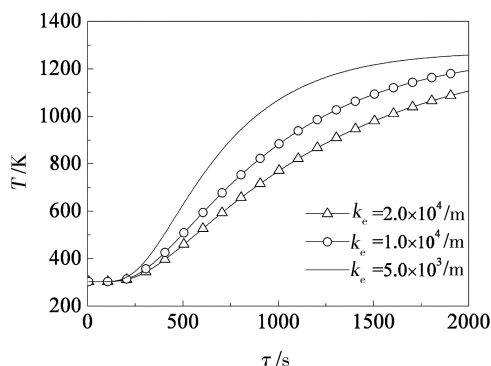


图7 衰减系数对绝热面温度响应的影响

Fig. 7 Influence of extinction coefficient on the temperature response of the adiabatic surface

### 3 结论

(1)对2 cm厚的纳米隔热材料,在外界气压为0.1 MPa,绝热面为真空的条件下,当渗透率大于 $10^{-14} \text{ m}^2$ 时,气体扩散渗透开始影响隔热材料内传热,导致隔热性能降低;随着渗透率增大,渗透率对冷面温度响应的影响增大;当渗透率大于 $10^{-13} \text{ m}^2$ 时,气体扩散渗透对隔热材料传热影响显著,此时隔热性能显著降低。

(2)气体黏性系数对气体扩散渗透有显著影响,随着黏性系数降低,气体扩散渗透传热现象显著。

(3)衰减系数对绝热面温度响应有显著影响,随

着衰减系数增大,绝热面温度响应显著降低。在所考虑的衰减系数 $[(0.55 \sim 2) \times 10^4/\text{m}]$ 、渗透率(低于 $10^{-13} \text{ m}^2$ )、黏性系数 $[(8.43 \sim 33.53) \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})]$ 范围内,衰减系数对瞬态隔热性能的影响更加显著。

### 参考文献

- [1] Hank J M, Murphy J C, Mutzman R C. The X-51A scramjet engine flight demonstration program[C]//AIAA, 2008-2540
- [2] 李东辉,夏新林. 碳遮光剂石英气凝胶传热机制与热性能数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(10): 1735-1737
- [3] 胡国新,许伟,程慧尔. 多孔介质内高温气体非稳态渗流传热数值计算[J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8(1): 9-12
- [4] Gascoïn N. High temperature and pressure reactive flows through porous media [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37(1): 24-35
- [5] Mitra Abhijit, Satya Harpalani, Liu Shimin. Laboratory measurement and modeling of coal permeability with continued methane production; Part 1: laboratory results [J]. Fuel, 2012, 94: 110-116
- [6] Yazdchi K, Srivastava S, Luding S. Microstructural effects on the permeability of periodic fibrous porous media [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37(8): 956-966
- [7] Chan Byon, Sung Jin Kim. The effect of the particle size distribution and packing structure on the permeability of sintered porous wicks [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 61: 499-504
- [8] 魏高升,张欣欣,于帆. 超级绝热材料气凝胶的纳米孔结构与有效导热系数[J]. 热科学与技术, 2005, 4(2): 107-111
- [9] 封金鹏,陈德平,杨淑勤,等. SiC作为纳米SiO<sub>2</sub>多孔绝热材料红外遮光剂的试验研究[J]. 宇航材料工艺, 2009, 39(1): 38-41
- [10] 封金鹏,陈德平,等. 锆英石对纳米SiO<sub>2</sub>多孔绝热材料绝热性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2010, 40(2): 20-23

(编辑 李洪泉)