

纳米隔热材料透-反射光谱测量及辐射物性反演

刘 华 李 健 王 江 陈忠灿 段彦军 张行周 蔡 霖

(北京机械设备研究所,北京,100854)

摘要: 基于辐射传递求解的改进二流近似和全局智能优化的遗传算法,结合材料的法向-半球反射率和透过率,构建了纳米隔热材料吸收系数和散射系数的辨识模型。采用文献中报道的两种玻璃的辐射物性参数数据数值验证了辨识方法的可靠性。实验测量了纳米隔热材料法向-半球透过率和反射率数据,辨识获得材料在 0.4~7.0 μm 波段的吸收系数和散射系数。研究表明:(1)构建的辨识方法能准确辨识材料的吸收和散射系数;(2)在 0.4~7.0 μm 内,材料的吸收系数介于 70~3 900 m^{-1} ,散射系数在 180~3 000 m^{-1} 之间,不同波长下数值差异大,呈现强烈的光谱选择性;(3)在 2.5 μm 以下材料内散射所占份额较大,在 2.5 μm 以上吸收明显占优,整体上呈现出强吸收、弱散射特征。

关键词: 纳米隔热材料;吸收系数;散射系数;辨识;遗传算法

中图分类号:V231.1;TK124 文献标志码:A 文章编号:1005-2615(2019)S-0038-06

Identification of Radiative Properties of Nanoporous Thermal Insulation Based on Transmittance and Reflectance Measurements

LIU Hua, LI Jian, WANG Jiang, CHEN Zhongcan, DUAN Yanjun, ZHANG Xingzhou, CAI Lin
(Beijing Institute of Mechanical Equipment, Beijing, 100854, China)

Abstract: An inverse method for retrieving absorption and scattering coefficients of nanoporous thermal insulation is proposed on the basis of a modified two flux method for solving radiative transfer, a genetic algorithm based global identification method, and normal-hemispherical reflectance and transmittance measurements. First, the inverse method is numerically validated by using radiative properties of two types of glass reported in the literature. Then, the normal-hemispherical reflectance and transmittance of nanoporous thermal insulation are measured, and the absorption and scattering coefficients of the material at wavelength between 0.4 μm and 7.0 μm are retrieved. The results show that (1) the proposed inverse method is able to retrieve accurately the absorption and scattering coefficients of nanoporous thermal insulation; (2) for wavelength of 0.4—7.0 μm , the retrieved absorption coefficient is ranging from 70 m^{-1} to 3 900 m^{-1} , while the scattering coefficient is between 180 m^{-1} and 3 000 m^{-1} , the values vary in a wide range for different wavelengths, and a strong spectral selectivity can be observed; and (3) for wavelength below 2.5 μm , the fraction of scattering is larger than those for absorption, while absorption dominates for wavelength larger than 2.5 μm , the material featuring strong absorption and weak scattering.

Key words: nanoporous thermal insulation; absorption coefficient; scattering coefficient; identification; genetic algorithm

收稿日期:2019-04-09;修订日期:2019-06-20

通信作者:刘华,男,工程师,博士,E-mail:Liuhua327_2@126.com。

引用格式:刘华,李健,王江,等. 纳米隔热材料透-反射光谱测量及辐射物性反演[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(增刊):38-43. LIU Hua, LI Jian, WANG Jiang, et al. Identification of Radiative Properties of Nanoporous Thermal Insulation Based on Transmittance and Reflectance Measurements[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(S):38-43.

二氧化硅气凝胶材料通常具备孔隙率高、密度低、比表面积大以及在常温下呈现超低的导热系数等特征^[1-3],是一种典型的纳米隔热材料,在飞行器隔热结构^[4]、能量存储^[5]、太阳能利用^[6]及建筑节能^[7]等领域有着重要应用。由于该类材料对红外辐射有一定的穿透性^[1-3],在高温应用中,材料内的辐射传热成为主要传热方式之一,准确知晓其辐射物性参数对进行基于该类材料热结构设计意义重大。

基于纳米隔热材料的微观结构和块材的光学性质可理论预测其辐射物性^[8]。由于材料微观结构的复杂性,需对其进行一定程度的简化以进行辐射物性参数预测,导致预测结果偏离真实情况。此外,预测结果的可靠性依赖于块材的光学性质,目前多数材料的光学性质数据较为缺乏。基于实验测量的反/透射光谱,构建并求解辐射反问题的方法可在规避上述问题的情况下获取真实材料的热辐射物性参数,已在多孔陶瓷^[9]、碳氢燃料^[10-11]等多种参与性介质热辐射物性参数的实验测量中得到应用。目前针对纳米隔热材料的相关实验研究,多数测量其透射光谱,经反演获得材料的衰减系数^[12-16];考虑了材料对辐射整体上的衰减效应,但无法对其中吸收和散射份额进行分离。

本研究实验测量了纳米隔热材料试件的法向-半球反射和透射光谱。基于辐射传输求解的改进二流近似和用于全局智能优化的遗传算法,构建了基于法向-半球反射率和透过率数据的参与性介质吸收系数和散射系数的辨识方法。采用文献[17]中报道的两种玻璃的辐射物性数据验证了辨识方法的可靠性。实验测量了纳米隔热材料法向-半球反射、透射光谱数据和辨识方法,结合辨识方法辨识获得材料的吸收系数和散射系数数据,分离材料辐射衰减的吸收和散射份额。

1 实验测量

采用积分球方法进行纳米隔热材料法向-半球透过率和反射率进行实验测量,实验测量装置和系统的详细介绍参见文献[18]。纳米隔热材料试件厚度为 2 mm,直径为 50 mm,孔隙率约为 85%。图 1 所示为测量所得 0.4~15 μm 波长范围内材料的法向-半球反射率和透过率以及计算所得吸收率数据。可见,该材料对 0.4~6 μm 范围内辐射有强烈的光谱选择性;而对 7 μm 以上的红外辐射具备较弱的穿透性。

2 辨识方法及可靠性验证

2.1 正问题求解

考虑如图 2 所示的纳米隔热材料平板,可视其为吸收、散射性介质,其一侧受平行光垂直入射。

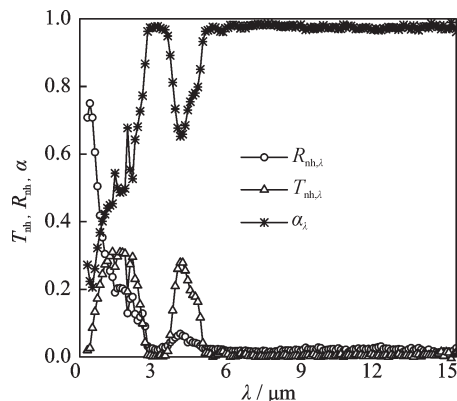


图 1 纳米隔热材料试件的法向-半球反射率、透过率及吸收率

Fig.1 Normal-hemispherical reflectance, transmittance, and calculated absorptivity of nanoporous thermal insulation

对于常温测量,可忽略材料自身发射,因而辐射能传递的控制方程为^[19]

$$\mu \frac{\partial I_\lambda(\mu, z)}{\partial z} = -(\kappa_\lambda + \sigma_{s,\lambda}) I_\lambda(\mu, z) + \frac{\sigma_{s,\lambda}}{2} \Phi_\lambda(\mu', \mu) I_\lambda(\mu', z) d\mu' \quad (1)$$

式中: μ 和 μ' 为方向余弦; $I_\lambda(\mu, z)$ 为 z 位置处沿 μ 方向的光谱辐射强度; κ_λ 和 $\sigma_{s,\lambda}$ 分别为光谱吸收/散射系数; $\Phi_\lambda(\mu', \mu)$ 为光谱散射相函数。

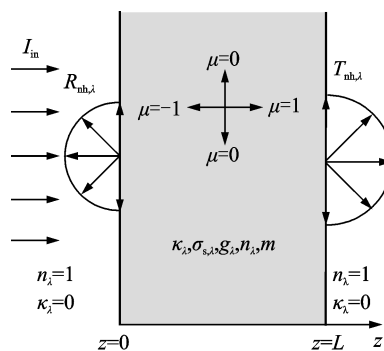


图 2 平板型纳米隔热材料辐射传示意图

Fig.2 Schematic of radiative transfer in nanoporous thermal insulation slab

材料辐射物性参数的辨识通常需要进行多次辐射传输的求解,采用高效的正问题求解方法可有效提升辨识效率。文献[9]报道了一种基于二流近似和 Dirac-delta 散射相函数求解辐射传递方程获得平行光入射下参与性平板法向-半球透过率和反射率的解析表达式

$$R_{nh,\lambda} = R_{nh,\lambda}^0 + \frac{D_\lambda}{2} \left[\left(1 + \frac{B_\lambda}{\beta_\lambda} + C_{tr,\lambda} \right) \right] \quad (2a)$$

$$T_{nh,\lambda} = T_{nh,\lambda}^0 + \frac{D_\lambda}{2} \left[(1 + \rho_{\lambda,1}) \exp(-\tau_{tr,\lambda,L}) + \frac{A_\lambda}{\beta_\lambda} \right]$$

(2b)

式中: $\tau_{tr,\lambda,L} = \beta_{tr,\lambda} L = [\kappa_\lambda + (1 - g_\lambda) \sigma_{s,\lambda}] L$ 为考虑了各向异性散射的光学厚度; g_λ 为光谱散射非对称因子, 对于纳米隔热材料 $g_\lambda \approx 0^{[20]}$, 接近各向同性散射, 可用式(2)进行其法向-半球透过、反射率求解。此外, $R_{nh,\lambda}^0$ 和 $T_{nh,\lambda}^0$ 可表达为^[9]

$$R_{nh,\lambda}^0 = \rho_{\lambda,1} + \frac{(1 - \rho_{\lambda,1})^2 C_{tr,\lambda}}{1 - \rho_{\lambda,1} C_{tr,\lambda}} \quad (3a)$$

$$T_{nh,\lambda}^0 = \rho_{\lambda,1} + \frac{(1 - \rho_{\lambda,1})^2 C_{tr,\lambda}}{1 - \rho_{\lambda,1} C_{tr,\lambda}} \exp(-\tau_{tr,\lambda,L}) \quad (3b)$$

式中, $\rho_{\lambda,1}$ 为考虑界面效应时材料的法向-法向反射率。参数 $A_\lambda, B_\lambda, C_{tr,\lambda}, D_\lambda$ 分别定义为^[9]

$$A_\lambda = \frac{(\gamma_{\lambda,1} - \gamma_{\lambda,2} \rho_{\lambda,1})(\varphi_\lambda s_\lambda + c_\lambda) e^{-\tau_{tr,\lambda,L}} + \gamma_{\lambda,2} - \gamma_{\lambda,1} C_{tr,\lambda}}{(1 + \varphi_\lambda^2) s_\lambda + 2\varphi_\lambda c_\lambda} \quad (4a)$$

$$B_\lambda = \frac{(\gamma_{\lambda,1} - \gamma_{\lambda,2} \rho_{\lambda,1}) e^{-\tau_{tr,\lambda,L}} + (\gamma_{\lambda,2} - \gamma_{\lambda,1} C_{tr,\lambda})(\varphi_\lambda s_\lambda + c_\lambda)}{(1 + \varphi_\lambda^2) s_\lambda + 2\varphi_\lambda c_\lambda} \quad (4b)$$

$$C_{tr,\lambda} = \rho_{\lambda,1} \exp(-2\tau_{tr,\lambda,L}) \quad (4c)$$

$$D_\lambda = \frac{\gamma_\lambda (1 - \mu_{c,\lambda}^2) \zeta_\lambda^2}{\zeta_\lambda^2 - 1} \quad (4d)$$

$$F = \sqrt{\left[\frac{(R_{nh,\lambda,exp} - R_{nh,\lambda,pred})}{R_{nh,\lambda,exp}} \right]^2 + \left[\frac{(T_{nh,\lambda,exp} - T_{nh,\lambda,pred})}{T_{nh,\lambda,exp}} \right]^2} \quad (5)$$

式中: $R_{nh,\lambda,exp}$ 和 $T_{nh,\lambda,exp}$ 分别为实验测量所得光谱法向-半球反射率和透过率; 而 $R_{nh,\lambda,pred}$ 和 $T_{nh,\lambda,pred}$ 为相应的预测值。当目标函数值满足 $F < 10^{-4}$ 或辨识过程中遗传代数达到上限 $G = 200$ 时, 辨识结束并输出结果。

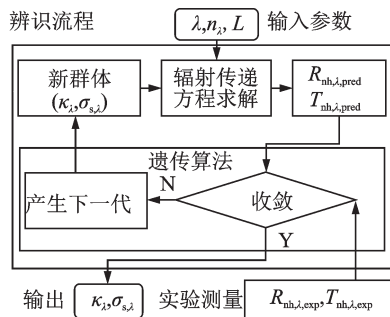


图3 辨识求解流程图

Fig.3 Block diagram of the inverse method

2.3 辨识方法可靠性验证

为验证辨识方法的可靠性, 采用文献[17]中报道的绿玻璃和高铁玻璃的光谱吸收系数作为“真实值”。首先采用蒙特卡洛法计算获得厚度均为

式中: 参数 $\gamma_\lambda, \mu_{c,\lambda}, \zeta_\lambda^2, \gamma_{\lambda,1}, \gamma_{\lambda,2}, \varphi_\lambda, s_\lambda$ 和 c_λ 分别为

$$\gamma_\lambda = \frac{1 - \rho_{\lambda,1}}{1 + \rho_{\lambda,1}}, \quad \mu_{c,\lambda} = \frac{(n_{\lambda,m}^2 - 1)^{1/2}}{n_{\lambda,m}^2}, \quad \zeta_\lambda^2 =$$

$$\frac{4(1 - \omega_{tr,\lambda})}{[(1 + \mu_{c,\lambda})^2(1 - \omega_{tr,\lambda}\mu_{c,\lambda})]}, \quad \gamma_{\lambda,1} = 1 - 2\bar{\gamma}_\lambda, \quad \gamma_{\lambda,2} = 1 + 2\bar{\gamma}_\lambda, \quad \varphi_\lambda = 2\bar{\gamma}_\lambda/\zeta_\lambda, \quad s_\lambda = \sinh(\zeta_\lambda \tau_{tr,\lambda,L}), \quad c_\lambda = \cosh(\zeta_\lambda \tau_{tr,\lambda,L});$$

其中, 变量 $\bar{\gamma}_\lambda$ 定义为 $\bar{\gamma}_\lambda = \frac{\gamma_\lambda}{1 + \mu_{c,\lambda}}$ 。

散射反照率定义为 $\omega_{tr,\lambda} = (1 - g_\lambda) \sigma_{s,\lambda} / [\kappa_\lambda + (1 - g_\lambda) \sigma_{s,\lambda}]$ 。为计算 $R_{nh,\lambda}$ 和 $T_{nh,\lambda}$, 需知晓材料的厚度 L 、折射率 n_λ 、非对称因子 g_λ 、散射系数 $\sigma_{s,\lambda}$ 和吸收系数 κ_λ 。

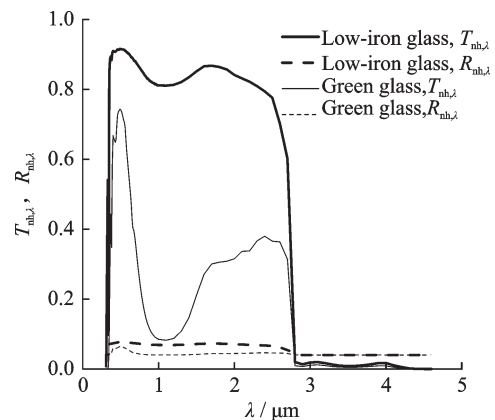
2.2 辨识求解流程

图3所示为辨识求解流程图。采用遗传算法进行辨识过程的智能优化求解, 其中最大遗传代数为 $G = 200$, 每一代的个体数量为 $P = 200$ 。本研究在辨识过程中材料厚度和折射率将作为输入参数; 对于各向同性散射性介质 $g_\lambda = 0$, 故对单一波长, 待辨识的参数为吸收系数和散射系数。

辨识求解过程等效于寻找最优的吸收系数和散射系数以最小化如下目标函数

1 mm 两种玻璃的法向-半球反射率和透过率数据作为“实验测量值”, 计算结果见图4, 其中, 取玻璃折射率为 $n_\lambda = 1.49^{[17]}$ 。

基于透/反射光谱数据, 用本文所述辨识方法开展两种玻璃的吸收系数和散射系数辨识。在辨

图4 计算所得绿玻璃和高铁玻璃的法向-半球透过率和反射率数据^[17]Fig.4 Normal-hemispherical reflectance, transmittance calculated from absorption coefficient reported in the literature^[17]

识过程中,为与辨识模型相适应,视玻璃为散射系数为 0 m^{-1} 的吸收、散射性介质,辨识所得结果如图 5 所示。

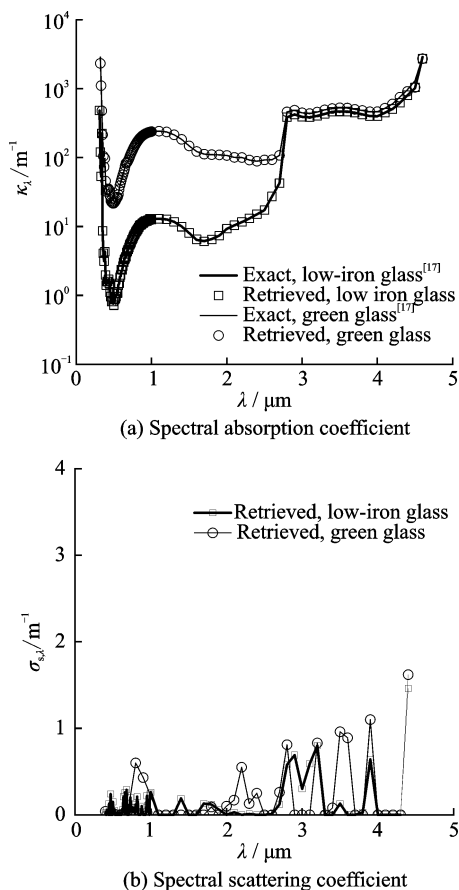


图 5 辨识所得绿玻璃和低铁玻璃的光谱吸收系数和光谱散射系数

Fig.5 Retrieved spectral absorption and scattering coefficients of green and low-iron glass

可见,两种玻璃的光谱吸收系数与其真实值均吻合良好;受辨识误差的影响,辨识所得的散射系数数据不等于但接近于 0。总体上,本文所述辨识方法可准确辨识两种玻璃的辐射物性参数数据,验证了该辨识方法在参与性材料吸收系数与散射系数辨识中的可靠性。

3 结果和讨论

图 1 所示测量所得的纳米隔热材料透过率和反射率在 $7 \mu\text{m}$ 之后均极低,长波段的数据不适宜开展辐射物性参数辨识研究。故本文在 $0.4 \sim 7 \mu\text{m}$ 范围内对纳米隔热材料辐射物性参数进行辨识。文献[21]报道纳米隔热材料折射率接近 1,本文在辨识过程中取 $n_\lambda = 1$ 。此外,本文视纳米隔热材料为各向同性散射性介质。

图 6 所示为纳米隔热材料在 $0.4 \sim 7 \mu\text{m}$ 波段内

的吸收系数、散射系数及散射反照率的辨识结果。辨识所得吸收系数介于 $70 \sim 3900 \text{ m}^{-1}$ 之间,散射系数在 $180 \sim 3000 \text{ m}^{-1}$ 范围内,散射反照率则在较大的范围内变化。此外,辨识所得辐射物性参数在不同波长下数值差距较大,呈现出强烈的光谱选择性。在 $2.5 \mu\text{m}$ 以下,纳米隔热材料内散射份额较大,而在 $2.5 \sim 7 \mu\text{m}$ 波长范围内,材料内吸收明显占优,总体上表现出对红外辐射的强吸收、弱散射的特征。

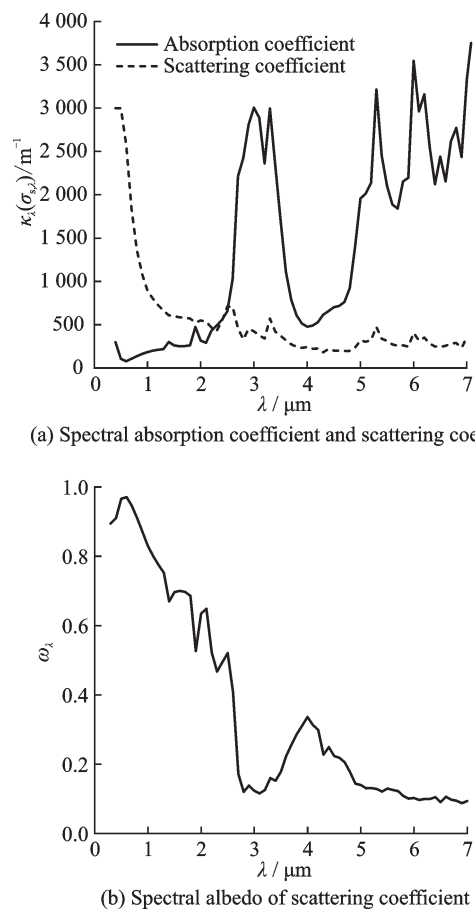


图 6 纳米隔热材料光谱吸收系数、散射系数和散射反照率辨识结果

Fig.6 Retrieved spectral absorption coefficient, scattering coefficient, and scattering albedo of nanoporous thermal insulation

将辨识所得纳米隔热材料比衰减系数 $e_{\lambda,ae}$ (定义为 $e_{\lambda,ae} = \beta_{\lambda,ae} / \rho$) 与文献[14-16]中报道的仅基于透过率测量所得数据进行对比,见图 7。本研究辨识所得比衰减系数数据与文献中报道数据在某些波长处在数值上存在一定差距,这可能是由于材料在生产工艺上存在差异所致;除此之外,辨识结果与文献报道数据在波峰、波谷位置呈现较好的一致性,整体上吻合良好,在一定程度上说明辨识结果的可靠性。

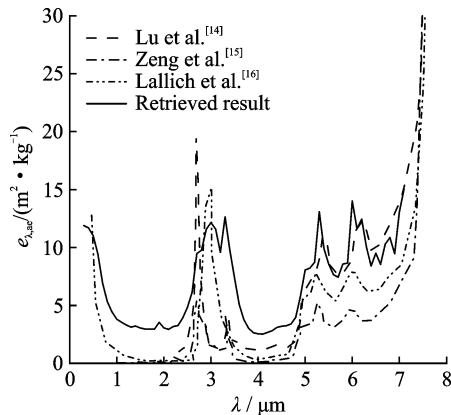


图7 纳米隔热材料衰减系数辨识结果与文献[14-16]报道数据对比情况

Fig.7 Comparison between the retrieved extinction coefficient of nanoporous thermal insulation and those reported in Refs. [14-16]

4 结 论

本文基于辐射传递方程求解的二流近似改进方法和用于全局智能优化的遗传算法,结合法向半球反射率和透过率测量数据,构建了参与性介质吸收系数和散射系数的辨识方法。以文献中报道两种玻璃的辐射物性参数验证了辨识方法的可靠性。采用积分球方法测量了纳米隔热材料法向半球反射率和透过率数据,结合辨识方法辨识获得纳米隔热材料吸收系数和散射系数。研究结果表明:

(1) 本文所述辨识方法可有效辨识参与性介质的吸收系数和散射系数。

(2) 在 $0.4\sim 7\ \mu\text{m}$ 波段内,辨识所得纳米隔热材料吸收系数介于 $70\sim 3\ 900\ \text{m}^{-1}$ 之间,散射系数在 $180\sim 3\ 000\ \text{m}^{-1}$ 范围内;辨识所得数据在不同波长下差异大,呈现强烈的光谱选择性。

(3) 在 $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 波长范围,纳米隔热材料内散射份额较大,而在 $2.5\sim 7\ \mu\text{m}$ 波段内吸收份额明显占优;纳米隔热材料总体上呈现强吸收、弱散射特征。

参考文献:

[1] DENG Zhongsheng, WANG Jue, WU Aimei, et al. High strength SiO_2 aerogel insulation[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1998, 225(1): 101-104.
[2] HE Yaling, XIE Tao. Advances of thermal conductivity models of nanoscale silica aerogel insulation material[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 81: 28-50.

[3] WANG Xiaodong, SUN Duo, DUAN Yuanyuan, et al. Radiative characteristics of opacifier-loaded silica aerogel composites[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2013, 375(3): 31-39.
[4] FESMIRE J E. Aerogel insulation systems for space launch applications[J]. Cryogenics, 2006, 46(2/3): 111-117.
[5] MALONEY R P. High surface area aerogels for energy storage and efficiency[D]. East Lansing: Michigan State University, 2012.
[6] REIM M, BECK A, KORNER W, et al. Highly insulating aerogel glazing for solar energy usage[J]. Solar Energy, 2002, 72(1): 21-29.
[7] BOUQUEREL M, DUFORESTEL T, BAILLIS D, et al. Heat transfer modeling in vacuum insulation panels containing nanoporous silicas—A review[J]. Energy and Buildings, 2012, 54(37): 320-336.
[8] ZHAO Y, TANG G H, DU M. Numerical study of radiative properties of nanoporous silica aerogel[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2015, 89: 110-120.
[9] DOMBROVSKY L A, TAGNE H K, BAILLIS D, et al. Near-infrared radiative properties of porous zirconia ceramics[J]. Infrared Physics & Technology, 2007, 51: 44-53.
[10] 李栋, 李茜, 齐哈兵, 等. RP-3航空煤油热辐射物性参数的透射法测量[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(10): 2245-2249.
LI Dong, LI Qian, QI Hanbing, et al. Transmittance method measurement of thermal radiative physical parameters of aviation kerosene RP-3[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(10): 2245-2249.
[11] 李栋, 齐哈兵, 吴国忠. 柴油的透射光谱测量和热辐射物性参数反演[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(3): 719-723.
LI Dong, QI Hanbing, WU Guozhong. Optical constants determination of zinc selenide by inverting transmittance spectrogram transmittance spectra measurement and thermal radiative physical parameters inversion of diesel fuel[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(3): 719-723.
[12] 魏高升, 刘海东, 刘育松, 等. 应用FTIR确定多孔绝热材料的热辐射参数[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(11): 1967-1970.
WEI Gaosheng, LIU Haidong, LIU Yusong, et al. Radiative thermophysical properties determination of porous insulation materials with FTIR[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(11): 1967-

- 1970.
- [13] WEI Gaosheng, LIU Yusong, ZHANG Xinxin, et al. Thermal conductivities study on silica aerogel and its composite insulation materials [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 53: 2355-2366.
- [14] LU X, ARDUINI-SCHUSTER M C, KUHN J, et al. Thermal conductivity of monolithic organic aerogels [J]. Science, 1992, 255: 971-972.
- [15] ZENG S Q, HUNT A, GREIF R. Theoretical modeling of carbon content to minimize heat transfer in silica aerogel [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1995, 186: 271-277.
- [16] LALLICH S, ENGUEHARD F, BAILLIS D. Experimental determination and modeling of the radiative properties of silica nanoporous matrices [J]. Journal of Heat Transfer, 2009, 131: 082701.
- [17] RUBIN R. Optical properties of soda lime silica glasses [J]. Solar Energy Materials, 1985, 12: 275-288.
- [18] 黄兴, 张筱娴, 帅永, 等. 铁基氧化物微颗粒的光谱辐射特性[J]. 化工学报, 2015, 66(S1): 308-313.
HUANG Xing, ZHANG Xiaoxian, SHUAI Yong, et al. Spectral radiation property investigation of iron based oxide micro-particles[J]. CIESC Journal, 2015, 66(S1): 308-313.
- [19] MODEST M F. Radiative heat transfer[M]. San Diego, CA: Academic Press, 2003.
- [20] YU Haitong, LIU Dong, DUAN Yuanyuan, et al. Theoretical model of radiative transfer in opacified aerogel based on realistic microstructures [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 70: 478-485.
- [21] ZENG S Q, GREIF R. Effective optical constants n and k and extinction coefficient of silica aerogel [J]. Journal of Materials Research, 1996, 11(3): 687-693.

(编辑: 胥橙庭)