

纳米隔热材料热辐射特性的理论计算

李东辉 夏新林 张顺德

(哈尔滨工业大学航空航天热物理研究所, 哈尔滨 150001)

文 摘 高温下纳米隔热材料内热辐射的影响将显著增强,其热辐射特性对热辐射传热有很大影响。为了认识高温纳米隔热材料的热辐射特性,采用 Mie 理论建立了掺杂纤维增韧剂和遮光剂的纳米隔热材料热辐射特性理论计算方法,编写了纳米隔热材料热辐射特性计算程序,对某纳米隔热材料的热辐射特性进行了理论研究,得到了光谱衰减系数、光谱散射反照率以及全光谱平均辐射特性参数及散射相函数。理论模拟结果表明:在 3~9.5 μm 波长范围内,纳米隔热材料对热辐射具有强烈的衰减作用,对 3~7 μm 的热辐射呈现强烈的散射特征,对 7~9.5 μm 的热辐射,随波长增大散射特征逐渐减弱,对 9.5 μm 的热辐射呈现较强的吸收特征。在 300~1 300 K,该纳米隔热材料全光谱平均衰减系数 $>5\times 10^4 \text{ m}^{-1}$,平均散射反照率 >0.96 ,具有较强的前向散射特征,这些特征来源于遮光剂粒子,增韧剂影响很小。

关键词 纳米隔热材料,增韧剂,遮光剂,热辐射特性,Mie 理论

Theoretical Computation on Thermal Radiative Properties of Nanoinsulation Materials

Li Donghui Xia Xinlin Zhang Shunde

(Aeronautics and Aerospace Thermophysics Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract Thermal radiative properties have significant influences on the radiative heat transfer process which becomes obvious in nanoinsulation materials at high temperature. In order to better understand the materials radiative properties, a theoretical method based on Mie theories is presented for nanoinsulation materials containing both reinforcement fibers and opacifiers. Corresponding computer codes are developed and the thermal radiative properties are studied theoretically for a specific nanoinsulation material. The parameters describing the radiative properties are obtained which include the spectral extinction coefficient and scattering albedo, the Rosseland averaged extinction coefficient and scattering albedo, the Rosseland averaged scattering phase function etc. Results from theoretical simulation indicate that for the wavelength studied between 3 μm and 9.5 μm , the material has strength extinction to thermal radiation. The material exhibits highly scattering for thermal radiation with the wavelength between 3 μm and 7 μm . For thermal radiation with the wavelength between 7 μm and 9.5 μm , the scattering phenomenon becomes weak with the increase of wavelength. For thermal radiation with the wavelength of 9.5 μm , the material exhibits obviously absorbing. Under the temperature between 300 K and 1 300 K, the rosseland averaged extinction coefficient of the nanoinsulation material is greater than 50 000 m^{-1} , and its averaged scattering albedo is greater than 0.96. The highly forward scattering characteristic of the material results from the opacifier and the reinforcement fibers in the material have less influences.

Key words Nanoinsulation materials, Reinforcement, Opacifiers, Thermal radiative properties, Mie theory

0 引言

纳米隔热材料的纳米尺度固体颗粒形成开放性多孔和连续空间网络结构,孔隙通道直径 20~50 nm。在常温下纯气凝胶纳米隔热材料具有优良的隔热性能,但是随使用温度提高,热辐射传热迅速增强,隔热性能显著下降。此外,纯气凝胶纳米隔热材料脆

性大,需要强化。实际应用的纳米隔热材料通常加入遮光剂、纤维增韧剂以削弱热辐射传输并提高强度。

纳米隔热材料热辐射特性对辐射传热影响很大。常用的 SiO_2 纳米隔热材料中纳米颗粒对热辐射几乎表现为纯吸收^[1],遮光剂及增韧剂等颗粒通常具有微米尺度,对热辐射形成强烈的散射。在 20 世纪

收稿日期:2011-09-30

基金项目:国家自然科学基金(90816022,51176038)

作者简介:李东辉,1971 年出生,博士,研究方向为高温热防护材料辐射特性及耦合传热等。E-mail:ldh0086451@yahoo.com.cn

80、90 年代,一些研究者对纳米隔热材料热辐射特性开展了实验研究^[2-4],测量了反射率与透射率,并且对 SiO₂ 气凝胶纳米隔热材料的热辐射特性开展了理论研究^[1]。本文针对含有纤维增韧剂及遮光剂颗粒的纳米隔热材料采用瑞利散射理论、经典圆柱体 Mie 散射理论、吸收性介质内球体颗粒的 Mie 散射理论计算纳米隔热材料中纳米尺度固体颗粒、纤维增韧剂、遮光剂颗粒的热辐射特性,结合独立散射理论建立纳米隔热材料的热辐射特性计算方法,采用 Fortran 语言编写了相应的计算程序,针对某纳米隔热材料,对其热辐射特性开展了理论研究。

1 纳米隔热材料热辐射特性计算方法

纳米隔热材料辐射特性决定于纳米尺度固体颗粒的辐射特性和微米尺度遮光粒子和增韧粒子的辐射特性。

纳米尺度固体粒子对热辐射的衰减以吸收为主,根据独立散射理论,含有遮光剂和增韧剂的纳米隔热材料的光谱衰减系数为

$$k_{e\lambda} = k_{s\lambda,op} + k_{s\lambda,re} + k_{a\lambda,op} + k_{a\lambda,re} + k_{a\lambda,m} \quad (1)$$

式中, $k_{s\lambda,op}$ 、 $k_{s\lambda,re}$ 和 $k_{a\lambda,op}$ 、 $k_{a\lambda,re}$ 分别为遮光剂或增韧剂粒子的光谱散射系数和光谱吸收系数, $k_{a\lambda,m}$ 为纳米尺度固体颗粒的光谱吸收系数。

纳米隔热材料的光谱散射系数决定于遮光剂和增韧剂粒子,因此其光谱散射系数为

$$k_{s\lambda} = k_{s\lambda,op} + k_{s\lambda,re} \quad (2)$$

纳米隔热材料的光谱散射反照率定义为光谱散射系数与光谱衰减系数之比,即

$$\omega_{\lambda} = \frac{k_{s\lambda}}{k_{e\lambda}} \quad (3)$$

纳米隔热材料的光谱散射相函数决定于微米尺度的遮光剂和增韧剂,其光谱散射相函数根据遮光剂和增韧剂的散射相函数按下式计算

$$P_{\lambda} = \frac{k_{s\lambda,op}P_{\lambda,op} + k_{s\lambda,re}P_{\lambda,re}}{k_{s\lambda,op} + k_{s\lambda,re}} \quad (4)$$

式中, $P_{\lambda,op}$ 、 $P_{\lambda,re}$ 分别为遮光剂粒子和纤维增韧剂粒子的光谱散射相函数。

1.1 纳米尺度固体颗粒热辐射特性计算方法

纳米隔热材料中纳米尺度固体颗粒直径远远小于热辐射波长,可采用瑞利散射理论计算其光谱热辐

$$k_{e\lambda,re} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int_{r_1}^{r_2} d \cdot Q_{\lambda,ext}(\varphi) N[r(\zeta_f, \omega_f)] F(\zeta_f, \omega_f) d\zeta d\omega dr \quad (11)$$

$$k_{s\lambda,re} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int_{r_1}^{r_2} d \cdot Q_{\lambda,scat}(\varphi) N[r(\zeta_f, \omega_f)] F(\zeta_f, \omega_f) d\zeta d\omega dr \quad (12)$$

式中, $N(r)$ 为纤维粒径分布函数、 $F(\zeta_f, \omega_f)$ 为纤维方向分布函数, d 为纤维直径, ζ ($\zeta \leq 90^\circ$) 为入射方向与纤维轴向夹角。

根据衰减系数与散射系数,得出纤维增韧剂的光谱吸收系数为:

$$k_{a\lambda,re} = k_{e\lambda,re} - k_{s\lambda,re} \quad (13)$$

射特性。单个纳米球体颗粒的光谱吸收因子、光谱衰减因子、光谱散射因子分别为^[5]

$$Q_{a\lambda,m} = Q_{e\lambda,m} - Q_{s\lambda,m} \quad (5)$$

$$Q_{e\lambda,m} = x_m \frac{24n_{\lambda,m}k_{\lambda,m}}{(n_{\lambda,m}^2 - k_{\lambda,m}^2 + 2)^2 + 4n_{\lambda,m}^2k_{\lambda,m}^2} \quad (6)$$

$$Q_{s\lambda,m} = \frac{8}{3}x_m^4 [(n_{\lambda,m}^2 - k_{\lambda,m}^2 + 2)^2 + 4n_{\lambda,m}^2k_{\lambda,m}^2] \{ [(n_{\lambda,m}^2 - k_{\lambda,m}^2 - 1)(n_{\lambda,m}^2 - k_{\lambda,m}^2 + 2) + 4n_{\lambda,m}^2k_{\lambda,m}^2]^2 + 36n_{\lambda,m}^2k_{\lambda,m}^2 \} \quad (7)$$

式中, λ 是入射光波长, $n_{\lambda,m}$ 和 $k_{\lambda,m}$ 为纳米颗粒的光谱折射率和吸收指数, x_m 为纳米颗粒的尺寸参数, $x_m = \frac{\pi d_m}{\lambda}$, d_m 为纳米颗粒直径。

研究表明,纳米尺度颗粒对热辐射表现为纯吸收,散射可以不考虑。在瑞利散射理论下,光谱吸收系数与颗粒直径无关,根据独立散射理论,纳米粒子系的光谱吸收系数为

$$k_{a\lambda,m} = \frac{3Q_{a\lambda,m}f_{v,m}}{2d_m} \quad (8)$$

式中, $f_{v,m}$ 为纳米颗粒的体积分。

1.2 纤维增韧剂的热辐射特性计算方法

增韧剂纤维直径为几微米,长几毫米,长径比通常大于 100,可以将其看作无限长圆柱体。根据无限长圆柱体 Mie 电磁散射理论^[6],单根无限长圆柱体的光谱衰减因子 $Q_{e\lambda,re}$ 、光谱散射因子 $Q_{s\lambda,re}$ 分别为

$$Q_{e\lambda,re} = \frac{1}{x_{re}} \text{Re} \{ b_0^I + a_0^{\text{II}} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (b_n^I + a_n^{\text{II}}) \} \quad (9)$$

$$Q_{s\lambda,re} = \frac{1}{x_{re}} [|b_0^I|^2 + |a_0^{\text{II}}|^2 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (|b_n^I|^2 + |a_n^{\text{II}}|^2 + 2 |a_n^I|^2)] \quad (10)$$

式中, x_{re} 是纤维的尺寸参数, a_n^I 、 b_n^I 、 a_n^{II} 、 b_n^{II} 为 Mie 系数,可由 Bessel 函数、第一类 Hankel 函数构成的复杂函数加以表示^[7]。

纳米隔热材料中添加的纤维增韧剂的体积分较小,纤维间的平均距离比纤维直径和波长大很多,满足独立散射条件。根据独立散射理论,增韧剂纤维的光谱衰减系数、光谱散射系数分别为^[7]

由于增韧剂纤维体积分很低,对纳米隔热材料散射相函数影响较小,为方便起见,采用具有前向散射特征的 Legendre 多项式近似纤维增韧剂的散射相函数。

1.3 遮光剂粒子的热辐射特性计算方法

具有微米尺度的遮光剂粒子处于接近纯吸收的纳米尺度气凝胶基体中,遮光剂颗粒的辐射特性计算

采用吸收性介质内粒子散射 Mie 理论^[8]。由于遮光剂粒子分布的随机性,假设遮光剂粒子为球形粒子。

根据独立散射理论,多弥散遮光剂粒子系的光谱散射系数、光谱吸收系数分别为

$$k_{s\lambda,op} = n_T \int_0^\infty \tilde{\sigma}_{s\lambda}(r) F(r) dr \quad (14)$$

$$k_{a\lambda,op} = n_T \int_0^\infty \tilde{\sigma}_{a\lambda}(r) F(r) dr \quad (15)$$

式中, n_T 为遮光剂粒子数密度, $F(r)$ 为遮光剂粒子的粒径分布函数, $\tilde{\sigma}_{s\lambda}$ 、 $\tilde{\sigma}_{a\lambda}$ 分别为吸收性介质内球形粒子的表观光谱散射截面和光谱吸收截面。

遮光剂的平均散射相函数为

$$P_{\lambda,op}(\Theta) = \frac{\int_0^\infty P_\lambda(\Theta, r) \tilde{\sigma}_{s\lambda}(r) F(r) dr}{\int_0^\infty \tilde{\sigma}_{s\lambda}(r) F(r) dr} \quad (16)$$

式中, $P_\lambda(\Theta, r)$ 为半径为 r 的遮光剂粒子的散射相函数, Θ 为散射角。

限于篇幅所限,关于吸收性介质内球形粒子的表观光谱散射截面、吸收截面及散射相函数的详细计算方法请参考文献[9]。

2 计算结果与分析

根据前述纳米隔热材料热辐射特性计算方法,编写了相应的计算程序,以某纳米隔热材料为例对其热辐射特性进行了理论计算。

图1、图2分别给出了纤维增韧剂和纳米颗粒及遮光剂粒子的光学常数。

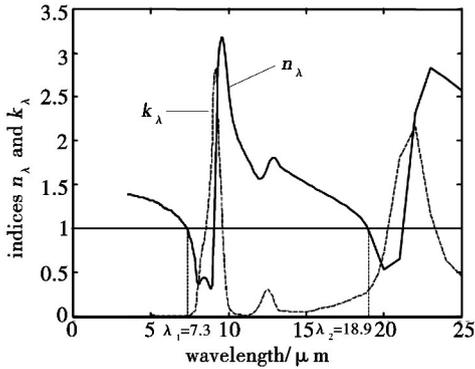


图1 纤维增韧剂和纳米颗粒的光学常数

Fig.1 Optical constants of reinforcement fibers and nano particles

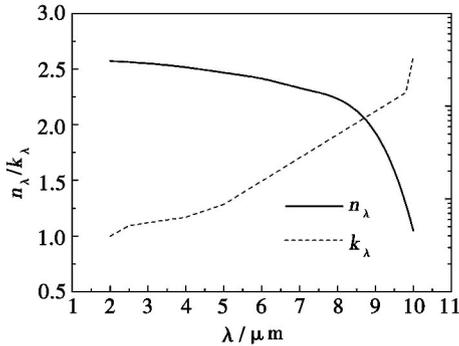


图2 遮光剂的光学常数

Fig.2 Optical constants of opacifier and nano particles

从图3可以看到,遮光剂颗粒的光谱吸收系数较为平坦,数值大约为 1000 m^{-1} ,纤维增韧剂的光谱吸收系数小于遮光剂颗粒的,特别是在波长较小情况下,大约有3个数量级的差别,纳米颗粒对波长较长的热辐射具有很大的吸收系数,在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的波长范围里,遮光剂粒子的吸收是主要的,在 $5 \sim 9.5 \mu\text{m}$ 的波长范围里,纳米颗粒的吸收是主要,增韧剂纤维粒子对热辐射的吸收很小,在大部分波长范围内可忽略。

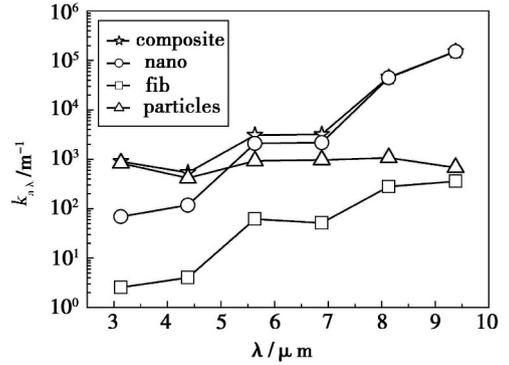


图3 纳米隔热材料的光谱吸收系数

Fig.3 Spectral absorbing coefficient of nanoinsulation material

从图4可以看到,隔热材料的光谱散射系数都很高,在 $3 \sim 8 \mu\text{m}$ 的波长范围内,光谱散射系数 $>40000 \text{ m}^{-1}$,对热辐射的散射主要源于遮光剂粒子,这是因为遮光剂粒子的体积分数较高,由于纤维的体积分数较小,纤维的散射作用很弱。

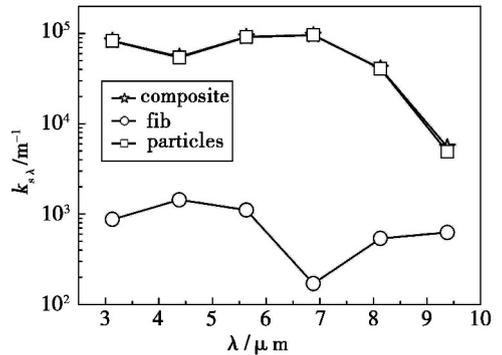


图4 纳米隔热材料的光谱散射系数

Fig.4 Spectral scattering coefficient of nanoinsulation material

从图5可以看到,隔热材料的光谱衰减系数在所研究的波长范围里均大于 $5 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ 。

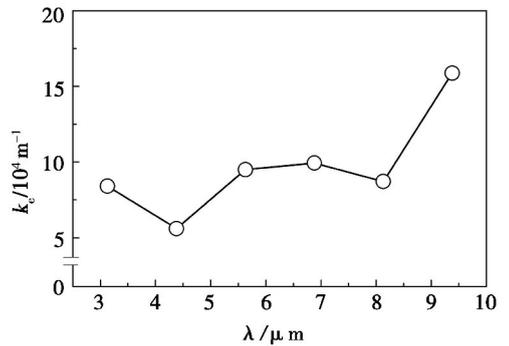


图5 纳米隔热材料的光谱衰减系数

Fig.5 Spectral extinction coefficient of nanoinsulation material

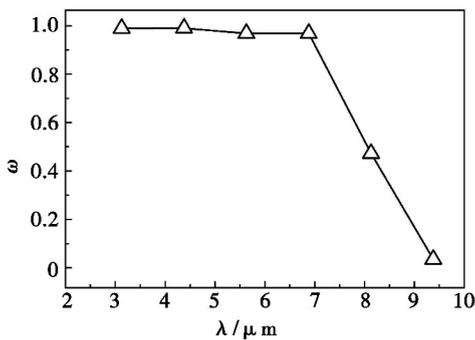


图6 纳米隔热材料的光谱散射反照率

Fig. 6 Spectral scattering albedo of nanoinsulation material

从图6可以看到,隔热材料在3~7 μm 波长范围,具有很高的散射反照率,接近1.0,即该材料对热辐射具有很强的散射,对热辐射的衰减以散射为主;在7~9.5 μm 波长范围,光谱散射反照率随波长增大而减小,纳米隔热材料散射作用减弱,而对热辐射的吸收作用逐渐增强。

图7给出了纳米隔热材料的全光谱平均的 Rosseland 平均衰减系数、平均散射系数、平均吸收系数,可以看到,在300~1300 K,纳米隔热材料的平均衰减系数非常大,对热辐射的衰减以散射为主。

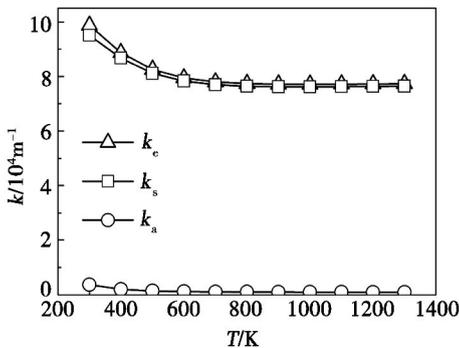


图7 纳米隔热材料的平均辐射系数

Fig. 7 Rosseland averaged coefficients of nanoinsulation material

从图8可以看到,隔热材料具有非常强的散射特征,随着温度升高,散射反照率增大,在300~1300 K,散射反照率均大于0.96。

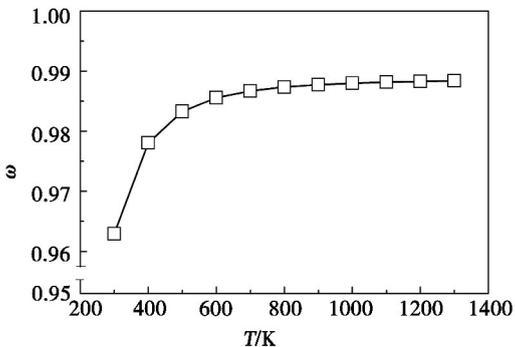


图8 纳米隔热材料的平均散射反照率

Fig. 8 Averaged scattering albedo of nanoinsulation material

图9给出了纳米隔热材料的平均散射相函数,可以看出材料具有很强的前向散射特征。

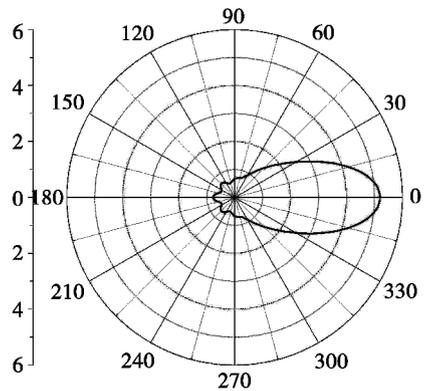


图9 纳米隔热材料的平均散射相函数

Fig. 9 Averaged scattering phase function of nanoinsulation material

3 结论

(1) 纳米隔热材料对热辐射具有强烈的衰减作用,对3~9.5 μm 的热辐射具有很大的衰减系数,大于 $4 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ 。

(2) 对3~7 μm 的热辐射,该纳米隔热材料呈现强烈的散射特征,对7~9.5 μm 的热辐射,随波长增大,散射特征逐渐减弱,吸收特征逐渐增强,对9.5 μm 的热辐射呈现较强的吸收特征。

(3) 在300~1300 K,该纳米隔热材料全光谱平均衰减系数 $> 5 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$,平均散射反照率 > 0.96 ,具有较强的前向散射特征,这些特征来源于遮光剂粒子,增韧剂影响很小。

参考文献

- [1] Chu H S, Stretton A J, Tien C L. Radiative heat transfer in ultra-fine powder insulations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1988, 31(8): 1627-1634
- [2] Caps R, Fricke J. Infrared radiative heat transfer in highly transparent silica aerogel[J]. Solar Energy, 1986, 36(4): 361-364
- [3] Hunt A J, Jantzen C A, Cao W Q. Aerogel. A High Performance Insulating Material at 0.1 bar[S]. ASTM Special Technical Publication, 1991, 1116: 455-463. Conference: Insulation Materials: Testing and Applications, 1991
- [4] Zeng S Q, Greif R, Stevens P, et al. Effective optical constants n and k and extinction coefficient of silica aerogel[J]. Journal of Materials Research, 1996, 11(3): 687-693
- [5] 谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006
- [6] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and scattering of light by small particles[M]. New York: Wiley, 1983
- [7] Cunnington G R, Lee S C, White S M. Radiative properties of fiber-reinforced aerogel; theory versus experiment[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1998, 12(1): 17-22
- [8] Yang P, Gao B C, Wiscombe W J, et al. Inherent and apparent scattering properties of coated or uncoated spheres embedded in an absorbing host medium[J]. Applied Optics. 2002, 41(15): 2740-2759
- [9] 李东辉. 高温隔热材料及多层结构的传热特性研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2010

(编辑 吴坚)