

文章编号:1000-8055(2011)01-0060-05

孔隙分布对陶瓷材料热辐射特性的影响

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)

摘 要: 通过引入吸收性介质内粒子散射 Mie 理论, 结合多弥散粒子系独立散射理论, 针对孔隙具有修正 Gamma 分布规律的多孔陶瓷提出一种计算热辐射特性的方法, 以氧化锆陶瓷为例分析了孔隙分布对热辐射特性的影响. 结果表明孔隙分布规律和平均孔径对热辐射特性有显著影响. 孔径趋于单弥散分布, 将使衰减系数、散射反照率、非对称因子等参数减小, 而孔径趋于指数分布, 这些参数显著提高. 当波长较小时, 衰减系数随平均孔径先增大后减小, 当波长较大时, 衰减系数随平均孔径增大而减小; 散射反照率和非对称因子均随平均孔径增大而增大.

关 键 词: 热辐射特性; 陶瓷材料; 电磁散射; 多弥散; Mie 理论; 吸收介质

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Influences of pores distribution on thermal radiation properties of ceramic materials

LI Dong-hui, XIA Xin-lin

(School of Energy Science and Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A rigid Mie solution on scattering by a spherical particle immersed in an absorbing medium was introduced. By combining with independent scattering discipline for polydisperse particles, a theoretical method was presented for calculating thermal radiation properties of ceramics with pores in modified Gamma distribution. Influences of pores distribution and mean diameter on thermal radiation properties of a specific Yt stabilized zirconium (YSZ) were analyzed. Results show that pores distribution and mean diameter have significant influences on thermal radiation properties of the ceramic. Extinction coefficient, scattering albedo and asymmetry factor decreases with pores distribution approaching mono dispersion and increases with pores distribution approaching poly dispersion. An optimal mean diameter of pores exists for extinction coefficient in short wavelength while the coefficient decreases with pores mean diameter in long wavelength. Both scattering albedo and asymmetry factor increase with pores mean diameter.

Key words: thermal radiation property; ceramic material; electromagnetic scattering; polydisperse; Mie solution; absorbing medium

陶瓷热障涂层 (thermal barrier coatings, TBCs) 能够在防止高温金属部件不超温情况下, 提高工质温度, 进而进一步提高循环热效率, 因此

在航空航天、能源动力等工程领域中有重要应用. 在高温条件下, 陶瓷材料内热辐射作用非常显著^[1], 将导致 TBCs 隔热性能下降, 而其热辐射特

收稿日期: 2009-12-04; 修订日期: 2010-03-02

基金项目: 国家自然科学基金 (50776026, 90816022)

作者简介: 李东辉 (1971—), 男, 黑龙江双鸭山人, 博士生, 研究方向为高温热防护材料辐射特性、辐射传输、辐射导热耦合换热等.

性对热辐射传输有极其重要影响,因此研究 TBCs 热辐射特性具有重要意义。

陶瓷材料本身对热辐射具有一定吸收性^[2],而且工程上应用的陶瓷材料都具有一定孔隙^[3],这些孔隙来源一方面制备过程不可避免产生的,另一方面可能是为了减小热应力^[4]或削弱热辐射传递而人为制造的^[5]。研究表明直径为 $2\mu\text{m}$ 左右的圆孔散射非常强烈^[6],这使得陶瓷材料在高温下呈现强烈的吸收、发射、各向异性散射特征。

对陶瓷材料热辐射特性研究长期以来主要采用传统 Mie 散射理论及其各种近似解^[7],如几何光学、瑞利散射理论等。众所周知,传统 Mie 理论基于透明介质内粒子散射,并不适合陶瓷这类基体具有吸收性的材料^[8]。近年来,逐渐开始将吸收性介质内粒子散射理论引入陶瓷材料热辐射特性计算^[9],但研究并不深入,而且没有专门对孔隙分布规律及其影响进行深入研究。本文采用吸收性介质内粒子 Mie 散射理论,结合多弥散粒子系独立散射理论,提出一种计算陶瓷材料热辐射特性的方法,以氧化锆陶瓷材料为例,分析了孔隙分布规律和平均孔径对热辐射特性的影响。

1 陶瓷材料的热辐射特性

假设陶瓷材料内孔为球形,对吸收介质内的球体,表观光谱散射截面为^[10]

$$\bar{\sigma}_{\text{sa}} = \frac{2\pi}{|m_0|^2 k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (1)$$

其中 $k = \omega/c$, ω , c 分别为圆频率、光速, λ 为波长, m_0 为陶瓷材料的复折折射率。光谱散射相函数为

$$P_\lambda(\Theta, r) = \frac{|S_1(\Theta)|^2 + |S_2(\Theta)|^2}{\sum_{i=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2)} \quad (2)$$

其中 $S_1(\Theta)$, $S_2(\Theta)$ 在形式上与传统 Mie 理论的不同, Mie 散射系数为

$$a_n = \frac{\left[\frac{D_n(x)}{m} + \frac{n}{x} \right] \psi_n(x) - \psi_{n-1}(x)}{\left[\frac{D_n(x)}{m} + \frac{n}{x} \right] \xi_n(x) - \xi_{n-1}(x)} \quad (3)$$

$$b_n = \frac{\left[mD_n(mx) + \frac{n}{x} \right] \psi_n(x) - \psi_{n-1}(x)}{\left[mD_n(mx) + \frac{n}{x} \right] \xi_n(x) - \xi_{n-1}(x)} \quad (4)$$

式中 $x = m_0 x_0$, m_0 为基体的复折折射率, x_0 为孔的尺寸参数, m 为粒子或孔的相对复折折射率, D_n 为 Riccati-Bessel 函数的对数微分。

采用孔径分布函数 $F(r)$ 描述孔隙半径在某个尺寸范围内的孔个数占总数的百分比。孔径分布函数通常采用修正 Gamma 分布规律^[11]

$$F(r) = Cr^\gamma \exp(-Br^\delta), \quad r \geq 0 \quad (5)$$

其中 B, C 为与孔径分布有关的参数,当 $\delta = 1$, $\gamma = 0$ 时修正 Gamma 分布成为指数分布;对单弥散分布,所有孔径都为 r_0

$$F(r) = \delta(r - r_0) \quad (6)$$

根据 $F(r)$ 的归一化条件以及孔隙率 f_v 与总数密度 n_t 间的关系,可以得到

$$B = \frac{1}{r_a^\delta} \left[\Gamma\left(\frac{\gamma+4}{\delta}\right) \right]^{\frac{\delta}{3}} \left[\Gamma\left(\frac{\gamma+1}{\delta}\right) \right]^{-\frac{\delta}{3}} \quad (7)$$

$$C = \frac{\delta}{r_a^{\gamma+1}} \left[\Gamma\left(\frac{\gamma+4}{\delta}\right) \right]^{\frac{\gamma+1}{3}} \left[\Gamma\left(\frac{\gamma+1}{\delta}\right) \right]^{-\frac{\gamma+1}{3}} \quad (8)$$

其中 $\Gamma(x)$ 为 Gamma 函数,平均半径为

$$r_a = \left(\frac{3f_v}{4\pi n_t} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

可见,在选定了 δ 和 γ 后,平均半径 r_a 直接决定了参数 B 和 C ,参数 B 和 C 间接反映了平均半径 r_a 大小,而参数 δ, γ 则直接反映了孔尺寸的分布。

根据独立散射理论,陶瓷内部多弥散孔隙的光谱散射系数为

$$\beta_{\text{sa}} = n_t \int_0^\infty \bar{\sigma}_{\text{sa}}(r) F(r) dr = n_t \bar{\sigma}_{\text{sa}} \quad (10)$$

其中 n_t 为所有粒子的粒子数密度, $\bar{\sigma}_{\text{sa}}$ 为平均散射截面,考虑到平均半径 r_a 、孔隙率 f_v 与总数密度 n_t 间的关系,可得单位孔隙率的散射系数为

$$S_\lambda = \frac{\beta_{\text{sa}}}{f_v} = \frac{3\bar{\sigma}_{\text{sa}}}{4\pi r_a^3} \quad (11)$$

平均散射相函数为

$$\bar{P}_\lambda(\Theta) = \frac{\int_0^\infty P_\lambda(\Theta, r) \bar{\sigma}_{\text{sa}}(r) F(r) dr}{\int_0^\infty \bar{\sigma}_{\text{sa}}(r) F(r) dr} \quad (12)$$

相函数非对称因子定义为

$$g_\lambda = \frac{1}{2} \int_0^\pi \bar{P}_\lambda(\Theta) \cos \Theta \sin \Theta d\Theta \quad (13)$$

陶瓷的光谱吸收系数为^[12]

$$\alpha_\lambda = \alpha_{0\lambda}(1 - f_v) \quad (14)$$

$\alpha_{0\lambda}$ 为材料的吸收系数, $\alpha_{0\lambda} = 4\pi\kappa/\lambda$, κ 为材料的吸收指数。陶瓷的衰减系数、散射反照率分别为

$$\beta_{\text{ea}} = \beta_{\text{sa}} + \alpha_\lambda, \quad \omega_\lambda = \frac{\beta_{\text{sa}}}{\beta_{\text{ea}}} \quad (15)$$

2 孔隙分布规律对辐射特性的影响

以孔隙率为 14.6% 的 7YSZ 氧化锆陶瓷为例,研究了孔隙分布规律对其热辐射特性的影响。

光谱复折射率如图1所示^[13],平均半径 $r_a = 0.18 \mu\text{m}$,图2给出了5种多弥散孔隙分布和单弥散孔隙分布的孔径分布函数。

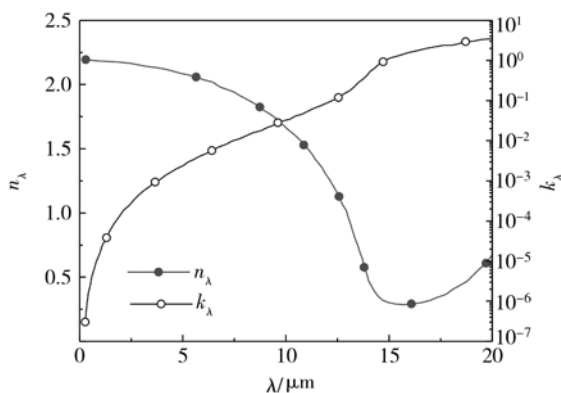


图1 YSZ 光谱复折射率^[13]

Fig. 1 Spectral complex refractive index of YSZ^[13]

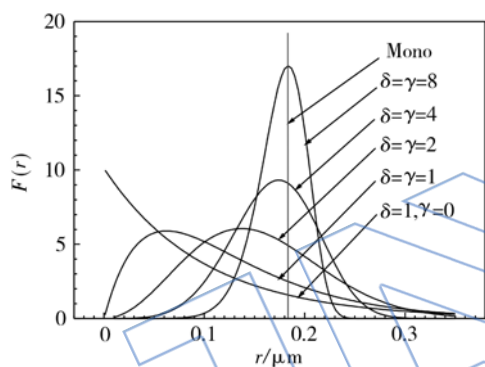


图2 孔径分布函数

Fig. 2 Pores radius distribution function

图3给出了不同孔隙分布规律下氧化锆陶瓷的单位孔隙率光谱散射系数 S_λ , 可见,波长在 $2.5 \sim 9 \mu\text{m}$ 范围内随着波长增大 S_λ 减小,孔隙分布规律对 S_λ 有明显影响,孔径趋于单弥散分布,会使 S_λ 减小,孔径采用指数分布规律的计算结果显著高于按照单弥散时的结果,在波长为 $2.5 \mu\text{m}$ 时结果相差1.3倍,而在波长为 $9 \mu\text{m}$ 时差别达11倍;随着孔径分布参数 δ, γ 减小,孔径分布趋向于小直径,因此,在平均孔隙直径和孔隙率不变的情况下,指数分布的孔隙结构更加有利于增大散射系数,而单弥散分布的孔隙结构具有最小散射系数。

图4给出了入射辐射波长为 $2.52 \mu\text{m}$ 时的散射相函数,可见,在 $2.52 \mu\text{m}$ 波长下孔系散射具有较强的前向散射特征;孔隙分布规律对散射相函数有明显影响,孔径趋于单弥散分布将导致前向散射特征减弱,孔隙趋于指数分布则导致前向散

射显著增强。

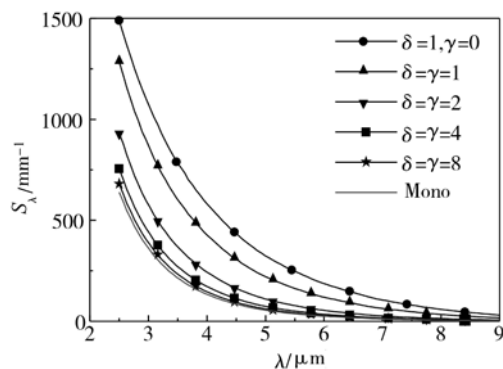


图3 单位孔隙率的散射系数

Fig. 3 Scattering coefficient per porosity under different pores distribution

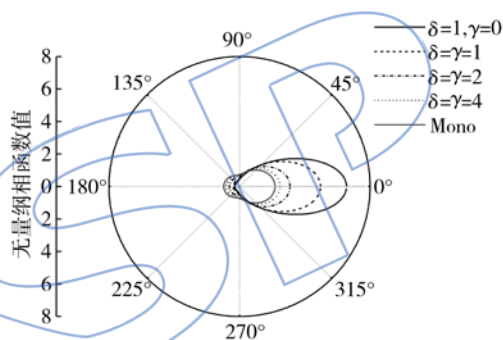


图4 不同孔隙分布下的散射相函数

Fig. 4 Scattering phase function under different pores distribution

($r_a = 0.18 \mu\text{m}$, $\lambda = 2.52 \mu\text{m}$, $x_0 = 0.452$)

图5给出了孔隙分布规律对相函数非对称因子的影响,可见,随着入射辐射波长增大,非对称因子减小,这是因为波长增大导致尺寸参数减小,前向散射特征减弱,因而非对称因子减小。孔隙的分布规律对非对称因子有明显影响,孔隙分布趋于单弥散分布,将使非对称因子减小,而孔隙分布趋于指数分布规律,则使非对称因子显著增大。

图6给出了孔隙分布规律对衰减系数的影响,与对散射系数影响类似。

图7给出了孔隙分布规律对散射反照率的影响,在 $4 \mu\text{m}$ 以下波长范围内氧化锆陶瓷材料具有很高的散射反照率,大于0.9;而当波长大于 $9 \mu\text{m}$ 时散射反照率较小,小于0.2。波长在 $4 \sim 9 \mu\text{m}$ 内,孔隙分布规律对散射反照率有明显影响,孔隙分布趋于单弥散分布,将使得散射反照率减小,而孔隙分布规律趋于指数分布时,则导致散射反照率显著增大。

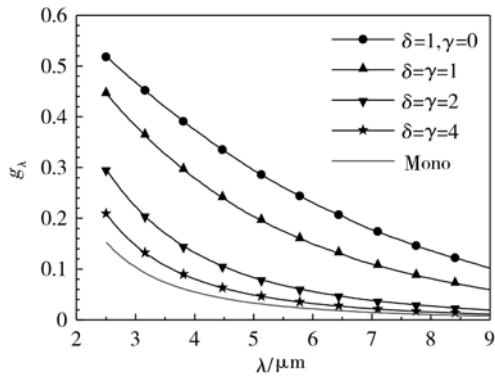


图 5 不同孔隙分布下的非对称因子
Fig. 5 Asymmetry factor under different pores distribution

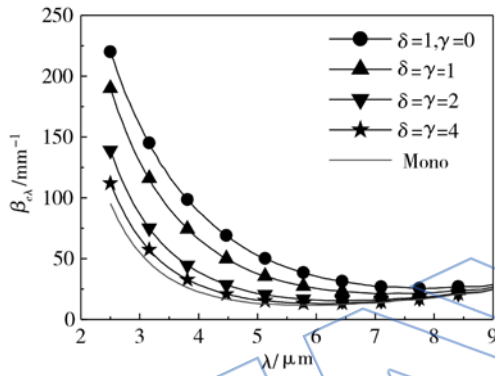


图 6 不同孔隙分布下的衰减系数
Fig. 6 Extinction coefficient under different pores distribution

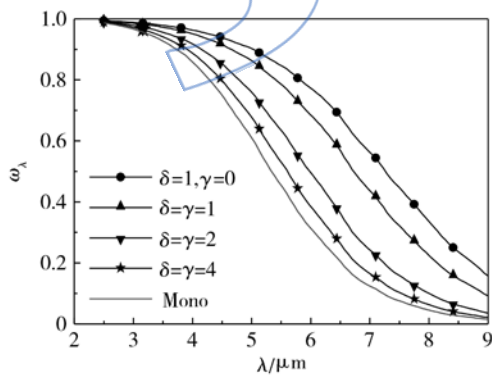


图 7 不同孔隙分布下的散射反照率
Fig. 7 Scattering albedo under different pores distribution

3 平均孔径对辐射特性的影响

孔隙分布规律采用 $\delta = \gamma = 2$ 的修正 Gamma 分布, 孔隙率为 14.6%, 平均半径分别取 $r_a = 0.09, 0.18, 0.36, 0.72, 1.44 \mu\text{m}$, 图 9~图 11 给

出了平均半径对衰减系数、散射反照率、相函数非对称因子的影响。

图 8 给出了平均半径对光谱衰减系数的影响, 可见, 在所研究的波长和孔径范围内, 当波长较小时, 随着平均孔径的增大, 光谱衰减系数先增大后减小; 而当波长较大时, 随着平均孔径的增大, 光谱衰减系数增大。

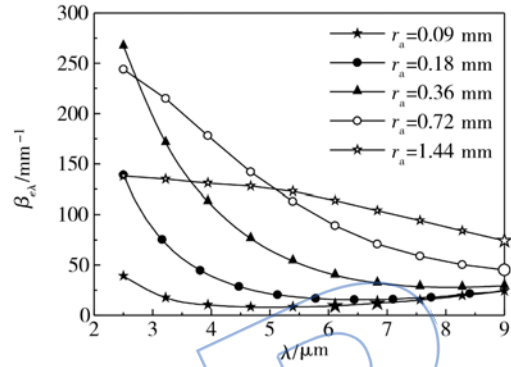


图 8 不同平均半径下的衰减系数
Fig. 8 Extinction coefficient under different mean diameters

图 9 给出了平均半径对光谱散射反照的影响, 可见, 随着平均孔径增大, 光谱散射反照率减小; 当波长小于 $3.5 \mu\text{m}$ 时, 散射反照率较大, 大于 0.8 , 在散射反照率大于 $3.5 \mu\text{m}$ 时, 散射反照率随着平均半径增大明显减小。

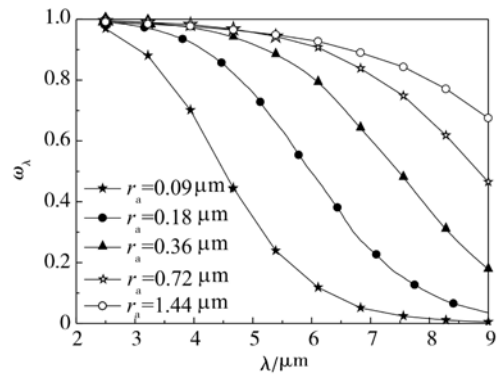


图 9 不同平均半径下的散射反照率
Fig. 9 Scattering albedo under different mean diameters

图 10 给出了平均半径对非对称因子的影响, 随着平均孔径增大, 相函数非对称因子增大, 当平均半径小于等于 $0.18 \mu\text{m}$, 非对称因子小于 0.3 , 当平均半径大于等于 $1.44 \mu\text{m}$ 时, 在所研究的波长范围内非对称因子较大, 高于 0.6 。

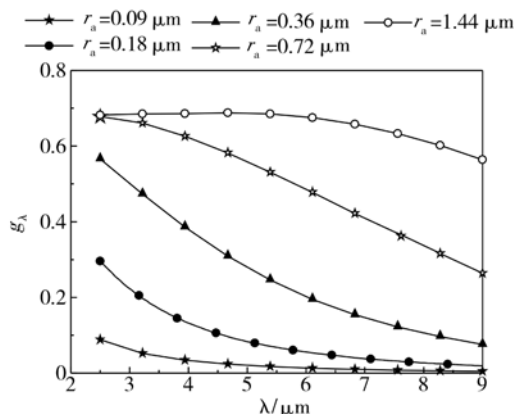


图10 不同平均半径下的非对称因子

Fig. 10 Asymmetry under different mean diameters

4 结论

通过引入吸收性介质内粒子散射 Mie 理论,结合多弥散粒子系独立散射理论,提出一种计算陶瓷材料热辐射特性的方法.以氧化锆陶瓷为例,分析了孔隙分布规律和平均孔径对热辐射特性的影响,得到以下主要结论:

1) 在所研究的波长和平均孔径范围内,当波长小于 $4\mu\text{m}$ 时,散射反照率较高,陶瓷材料表现为较强的散射特征;在平均半径较大时,材料具有较大的非对称因子;因此,在高温、平均孔隙半径较大情况下,陶瓷材料将表现为强烈前向散射特征.

2) 孔径分布规律与平均孔径对衰减系数、散射反照率、相函数、非对称因子等热辐射散射特性参数有很大影响.

3) 孔径趋向于单弥散分布,将使衰减系数、散射反照率、非对称因子等参数减小;孔径分布趋向于指数分布时,辐射特性参数显著高于均匀分布的情况.

4) 在所研究的波长和平均孔径范围内,当波长较小时,平均孔径增大,衰减系数先增大后减小,当波长较大时,衰减系数随平均孔径增大而减小;散射反照率和非对称因子均随平均孔径增大而增大.

参考文献:

- [1] Manara J, Schuster M A, Scheibe H J, et al. Infrared-optical properties and heat transfer coefficients of semitransparent thermal barrier coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203(8): 1059-1068.
- [2] Siegel R. Green's function to determine temperature distribution in a semitransparent thermal barrier coating [J]. Journal of Thermophysics, 1997, 11(2): 315-317.
- [3] Jang B K, Matsubara H. Influence of porosity on thermophysical properties of nano-porous zirconia coatings grown by electron beam-physical vapor deposition [J]. Scripta Materialia, 2006, 54(9): 1655-1659.
- [4] Portinha A, Teixeira V, Carneiro J, et al. Residual stresses and elastic modulus of thermal barrier coatings graded in porosity [J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 188-189: 120-128.
- [5] Gu S, Lu T J, Hass D D, et al. Thermal conductivity of zirconia coatings with zig-zag pore microstructures [J]. Acta Mater., 2001, 49(13): 2539-2547.
- [6] Dombrovsky L A, Tagne H K, Baillis D, et al. Near-infrared radiative properties of porous zirconia ceramics [J]. Infrared Physics & Technology, 2007, 51(1): 44-53.
- [7] Dombrovsky L, Randrianalisoa J, Baillis D, et al. Use of mie theory to analyze experimental data to identify infrared properties of fused quartz containing bubbles [J]. Applied Optics, 2005, 44(33): 7021-7031.
- [8] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and scattering of light by small particles [M]. New York: Wiley, 1983.
- [9] Randrianalisoa J, Baillis D, Pilon L. Modeling radiation characteristics of semitransparent media containing bubbles or particles [J]. Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision, 2006, 23(7): 1645-1656.
- [10] 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.
- [11] Modest M F. Radiative heat transfer [M]. New York: McGraw-Hill Inc., 1993.
- [12] Kuga Y, Ulaby F T, Haddock T F, et al. Millimeter-wave radar scattering from snow 1. Radiative transfer model [J]. Radio Sci., 1991, 26(2): 329-341.
- [13] Makino T, Kunitomo T, Sakai I, et al. Thermal radiation properties of ceramic materials [J]. Heat Transfer-Japanese Research, 1984, 13(4): 33-50.