

文章编号:1001-9014(2007)06-0469-04

喷焰内氧化铝粒子光辐射特性研究

李佳玉, 董士奎, 贺志宏, 谈和平

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:分析了 Al_2O_3 粒子在喷焰内流动冷却过程中不同相态对其光学性质的影响, 重点研究凝固过程中三种相态(液态、 γ 相、 α) Al_2O_3 粒子的吸收指数随相态的变化关系, 考虑了紫外到近红外光谱范围内, Al_2O_3 粒子的不同辐射机制. 基于 Drude 模型所得到的氧化铝粒子不同相态吸收指数的计算模型建立了描述 Al_2O_3 粒子相变过程紫外与可见光辐射特性数学计算模型. 通过与实验数据的对比分析表明, 本模型是可行的. 在此基础上, 分析了不同相态 Al_2O_3 粒子辐射特性随温度和波长的变化关系.

关键词:喷焰; 氧化铝粒子; 相变过程; 辐射特性; 吸收指数

中图分类号:TK124 **文献标识码:**A

RADIATIVE PROPERTIES OF ALUMINA PARTICLES IN EXHAUST PLUME

LI Jia-Yu, DONG Shi-Kui, HE Zhi-Hong, TAN He-Ping

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

Abstract: The effect of different phase states of Al_2O_3 particles on their optical properties was analyzed when the particles flowed and were cooled in exhaust plume. The influence of three phase states (liquid, γ phase, α phase) on the image part of complex refractive index was particularly investigated in the solidification process. Different mechanisms which were responsible for the Al_2O_3 particles radiation were considered in the spectral range from ultraviolet to near infrared region. Based on the model for calculating absorption coefficient of Al_2O_3 particles in different phases deduced from Drude model, the model for calculating ultraviolet and visible radiative properties of particles with phase transition was built up. Calculation results show satisfactory agreement with experimental data. Based on the model, the influence of temperature and wavelength on radiative properties during the phase transition of Al_2O_3 particles was analyzed too.

Key words: exhaust plume; alumina particle; phase transition; radiation characteristic; absorption index

引言

Al_2O_3 粒子是固体燃料发动机喷焰的重要辐射源. 由于 Al_2O_3 在喷焰内流动过程中热力学环境变化较大, 有可能经历不同相态的转变, 因此有必要考虑不同相态的转变引起的 Al_2O_3 粒子辐射特性的变化. 液态 Al_2O_3 粒子凝固过程中最有可能先发展成 γ 相, 在较高的温度, γ 相自发地迅速转化为 α 相, 该转化过程中还会经历一个或更多的相态: 如 θ, σ, κ 相, 而在普通温度下该转变是非常慢的. α - Al_2O_3 中的阴离子(氧离子)呈六角形密排结构, 如刚玉, 见图 1. γ - Al_2O_3 中氧离子呈面心立方体结构^[1], 如尖晶石, 见图 2.

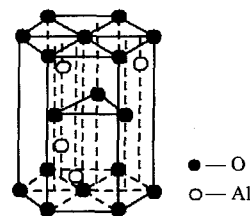


图1 Alpha 相
Fig. 1 Alpha Phase

正是由于两相态的晶格结构的不同导致了两相的光学性质不同, 从而粒子辐射特性会随相态发生变化. 国内有很多考虑粒子辐射特性的研究^[2,3], 但较少考虑粒子相变辐射特性. 国外 Oliver^[1] 的研究结果表明亚稳态 γ 相具有更高的发射率, 而通常的

收稿日期:2005-10-23, 修回日期:2007-01-23

Received date: 2005-10-23, revised date: 2007-01-23

基金项目: 国家杰出青年科学基金(50425619)和国家自然科学基金(50506009)资助项目

作者简介: 李佳玉(1981-), 女, 江苏高邮人, 哈尔滨工业大学博士生, 主要从事相变热辐射研究.

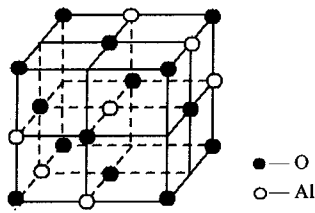


图2 Gamma相
Fig.2 Gamma Phase

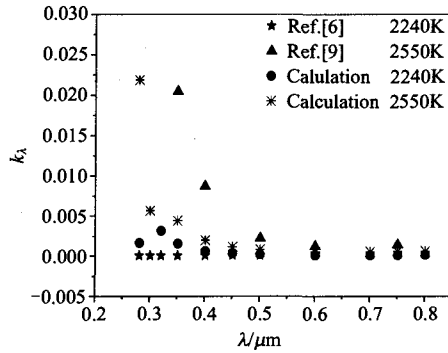


图3 液态 Al₂O₃ 粒子吸收指数的计算结果与实验值比较
Fig.3 Spectral absorption index of liquid Al₂O₃ particles compared with experiments

辐射模型都认为 Al₂O₃ 粒子处于 α 相,故这也可能是测量值高于理论值的原因之一. Plastinin^[4] 考虑了 Al₂O₃ 粒子平衡与非平衡结晶过程的影响,结果表明 Al₂O₃ 粒子非平衡结晶过程对辐射率起主要作用. Rodionov A. V^[5] 指出如果有充分的 γ 相和 α 相 Al₂O₃ 粒子光学常数的话,很值得对其辐射传输进行研究.

基于以上研究背景,本文研究了喷焰内氧化铝粒子凝固过程中三种相态(液态、γ 相、α 相)光学常数随相态的变化关系,得到了氧化铝粒子不同相态吸收指数的计算模型.在此基础上,建立粒子光谱辐射强度计算模型,求解氧化铝粒子不同相态的光谱辐射强度,并与同样状况下的实验值进行了比较.

1 氧化铝粒子不同相态的吸收指数计算

紫外到近红外(即 0.26 μm ~ 1.6 μm)光谱范围内, Al₂O₃ 粒子存在不同的辐射机制:1. 本征吸收区,其波长在 λ < 0.4 μm 范围内;2. 自由载流子吸收引起的辐射胜过其它机制时,粒子辐射波长在 0.4 μm < λ < 1 μm 范围内;3. 粒子辐射波长 λ > 1 μm 时,晶格吸收引起的辐射光谱占辐射的主要部分^[6]. 对喷焰中 Al₂O₃ 粒子最常出现的液态、亚稳态(γ)及稳态(α)三相,考虑 Al₂O₃ 粒子的以上各种辐

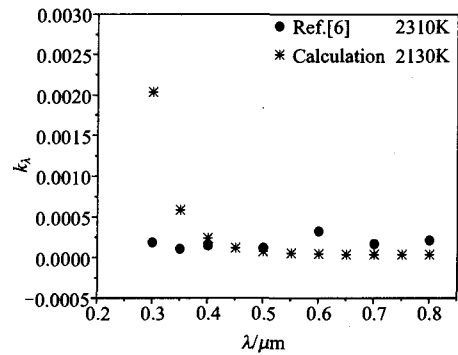


图4 γ相 Al₂O₃ 粒子吸收指数的计算结果与实验值的比较
Fig.4 Spectral absorption index of γ-Al₂O₃ particles compared with experiments

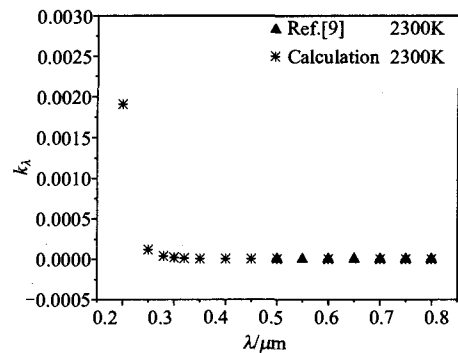


图5 α-Al₂O₃ 粒子吸收指数的计算结果与实验值的比较
Fig.5 Spectral absorption index of α-Al₂O₃ particles compared with experiments

射机理,吸收指数(即复折射率虚部)包括四部分^[7]:

$$k = k_{bb} + k_{ub} + k_{ff} + k_{ia} \quad (1)$$

其中 k_{bb} 对应于本征吸收,是价带电子吸收光子跃迁至导带的过程; k_{ub} 对应于 Urbach 边本征吸收; k_{ff} 对应于自由载流子的吸收; k_{ia} 对应于晶格吸收.由自由电子气体的电介质常数的 Drude 模型可以得到自由传递发射过程中吸收指数^[8]

$$k_{\lambda} = a^* \cdot \lambda / \left[1 + \left(\frac{0.95}{\lambda} \right)^2 \right] \cdot \exp\left(-\frac{E_{gap}}{2k_0 T} \right) \quad (2)$$

其中, a^* 是经验常数,可由不同相态的 Al₂O₃ 粒子在各波长下的辐射特性的实验数据推出的, E_{gap} 是带隙能量,它是确定 Al₂O₃ 粒子紫外、可见波段的光学常数的重要参数.文献[7]基于式(2)和实验数据给出了不同相态 Al₂O₃ 粒子吸收指数中 k_{bb} 、 k_{ub} 、 k_{ff} 、 k_{ia} 等各部分的经验公式和有关参数.由以上模型计算了液态、亚稳态(γ)及稳态(α)三相的 Al₂O₃ 粒子在波长 0.2 μm ~ 0.8 μm 内的吸收指数.图3、图4和

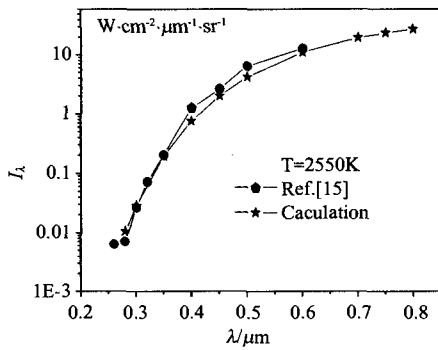


图6 液态(L)氧化铝粒子光谱辐射强度与实验值的比较, 粒径 $D = 1.2\text{mm}$

Fig.6 Spectral radiance of liquid Al_2O_3 particles compared with experiments, diameter $D = 1.2\text{mm}$

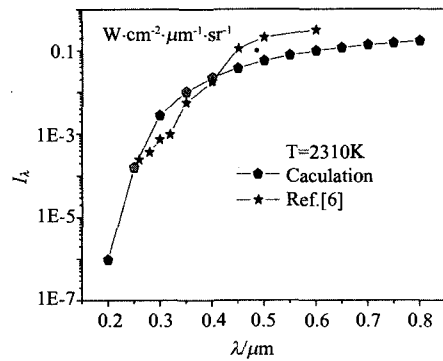


图8 α 相(Alpha)氧化铝粒子光谱辐射强度与实验值的比较, 粒径 $D = 1.2\text{mm}$

Fig.8 Spectral radiance of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ particles compared with experiments, diameter $D = 1.2\text{mm}$

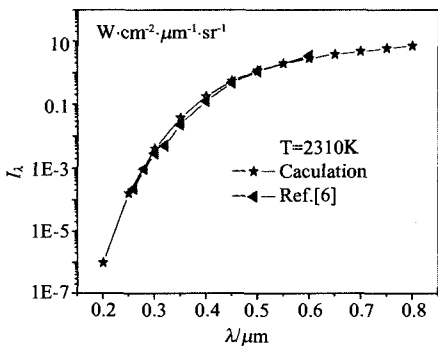


图7 γ 相(Gamma)氧化铝粒子光谱辐射强度与实验值的比较, 粒径 $D = 1.2\text{mm}$

Fig.7 Spectral radiance of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ particles compared with experiments, diameter $D = 1.2\text{mm}$

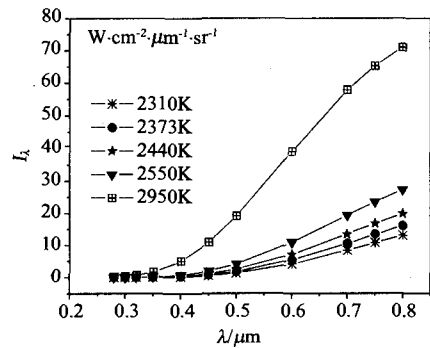


图9 各温度下液态 Al_2O_3 粒子光谱辐射强度随波长的变化, 粒径 $D = 1.5\text{mm}$

Fig.9 Spectral radiance of liquid Al_2O_3 particles at different temperatures, diameter $D = 1.5\text{mm}$

图5是计算结果和文献中[6,9]相应状态的 Al_2O_3 粒子吸收指数的数据。

由图可知, 采用上述计算模型计算出的不同相态 Al_2O_3 粒子在不同温度下的吸收指数在波长 $\lambda \geq 0.4\mu\text{m}$ 范围与相同温度和相态下的实验所得的结果比较接近, 但当波长 $\lambda < 0.4\mu\text{m}$ 时与实验值仍存在一些偏差。

2 氧化铝粒子相变过程辐射特性计算

假定 Al_2O_3 粒子为漫辐射体, 辐射强度与方向无关, 可得粒子光谱辐射强度的表达式

$$I_\lambda = \frac{\varepsilon_\lambda E_{b\lambda}}{\pi} = \varepsilon_\lambda \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp[c_2/(\lambda T)] - 1} \cdot \frac{1}{\pi} \quad (3)$$

理论上可知, 热平衡时, 球形大粒子表面发射率等于由 Mie 氏理论计算的吸收因子 $Q_{abs,\lambda}$, 即

$$\varepsilon_\lambda = Q_{abs,\lambda} \quad (4)$$

$Q_{abs,\lambda}$ 可用 Mie 氏理论计算得到, 复折射率作为参数输入, 其虚部是前文吸收指数模型的计算结果, 实部(折射指数)由文献[1,10]给出. 将计算出的吸收因子代入式(3)和式(4), 计算 Al_2O_3 粒子各相态的光谱辐射强度, 与相同粒径和相态的 Al_2O_3 粒子实验值之间进行比较. 图6、图7和图8是直径为 1.2mm 的 Al_2O_3 粒子各相态辐射强度的计算值与文献[6]中的实验值的比较。

由图可知, 计算结果与相同状况下的 Al_2O_3 粒子光谱辐射强度的实验值接近. 并且液态 Al_2O_3 粒子的光谱辐射强度比较大, α 相 Al_2O_3 粒子光谱辐射强度比较小, 这与实验现象吻合. 可见, 以不同相态 Al_2O_3 粒子吸收指数计算模型为基础, 用上述粒子光谱辐射强度的计算模型计算不同相态粒子的光谱辐射强度的方法是可行的。

3 氧化铝粒子光谱辐射强度随温度和波长

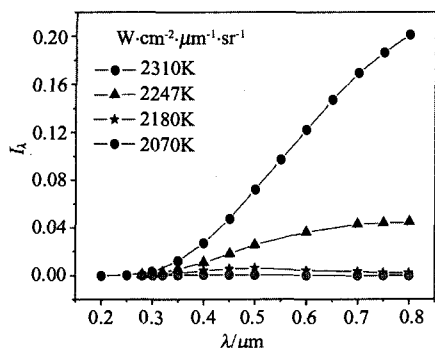


图10 各温度下 α 相 Al_2O_3 粒子光谱辐射强度随波长的变化,粒径 $D=1.5\text{mm}$

Fig. 10 Spectral radiance of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ particles at different temperatures, diameter $D=1.5\text{mm}$

的变化关系

以粒径为 1.5mm 的 Al_2O_3 粒子为例,用上述计算模型计算不同温度、波长和相态下 Al_2O_3 粒子光谱辐射强度,考察温度和波长对光谱辐射强度的影响.先用吸收指数计算模型分别计算液态 Al_2O_3 粒子和 α 相 Al_2O_3 粒子在不同温度和波长下吸收指数,再结合Mie氏理论和粒子光谱辐射强度的计算模型计算液态和 α 相 Al_2O_3 粒子在不同温度和波长下的光谱辐射强度.图9是液态 Al_2O_3 粒子在温度为 2310K 、 2373K 、 2440K 、 2550K 和 2950K 下的光谱辐射强度.图10是 α 相 Al_2O_3 粒子在温度为 2310K 、 2247K 、 2180K 和 2070K 下的光谱辐射强度.

由图知在同等温度(2310K)下, α 相 Al_2O_3 粒子的光谱辐射强度比液态的要小.温度和波长对两种相态的 Al_2O_3 粒子光谱辐射强度的影响是相似的,即所有波长下的光谱辐射强度都随温度升高而增大,随着波长的增加,温度对辐射强度的影响逐渐增大.由图10可发现,随着温度的降低, α 相 Al_2O_3 粒子的光谱辐射强度的峰值逐渐向短波处移动.

4 结语

本文以尾喷焰中氧化铝粒子凝固过程中最易出现的三种相态(液态、 γ 相、 α 相)为研究对象,分析了其光学常数随相态的变化关系;以氧化铝粒子不

同相态吸收指数模型的计算结果为基础,建立漫反射粒子热平衡时光谱辐射强度计算模型.发现 Al_2O_3 粒子吸收指数的计算模型和不同相态氧化铝粒子光谱辐射强度的计算结果与实验值接近,可用于与此相关的喷焰及发动机辐射特性的预估.最后用所建立的模型,分析了 Al_2O_3 粒子处于液态和 α 相时光谱辐射强度随温度和波长的变化

REFERENCES

- [1] Oliver S M, Moylan B E. An analytical approach for the prediction of gamma-to-alpha phase transformation of aluminum oxide (Al_2O_3) particles in the space shuttle ASRM and RSRM exhausts[J]. *AIAA*, 1992—2915, 1992.
- [2] SUN Xiao-Gang, DAI Jing-Min, WANG Xue-Feng, et al. Research on the data processing method of solid propellant rocket engine plume temperature[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孙晓刚,戴景民,王雪峰,等.一种测量固体火箭发动机羽焰温度的数据处理方法研究. *红外与毫米波学报*), 2003, 22(2): 141—144.
- [3] HUANG Yong, LIANG Xin-Gang. Near-field radiative heat transfer between spherical micro particles[J]. *Journal of Engineering Thermophysics* (黄勇,梁新刚.球形微粒子近场辐射换热研究. *工程热物理学报*), 2004, 25(2): 290—292.
- [4] Plastinin Yu A, Anfimov N A, Baula G G, et al. Modeling of aluminum oxide particle radiation in a solid propellant motor exhaust[R]. *AIAA*, 1996—1879, 1996.
- [5] Rodionov A V, Plastinin Yu A, Drakes J A. Modeling of multiphase alumina-loaded jet flow fields[J]. *AIAA*, 1998—3462, 1998.
- [6] Plastinin Yu, Afanasjev A, Sipatchev H. Experimental investigation of alumina particles' phase transitions[R]. Final Report Contract SPC-95-4023, 1996.
- [7] Plastinin Yu A, Karabadzhak G F, Khmelinin B A, et al. Ultraviolet, visible and infrared spectra modeling for solid and liquid-fuel rocket exhausts[R]. *AIAA*, 2001—0660, 2001.
- [8] Plastinin Yu A, Sipatchev H Ph, Karabadzhak G F, et al. Influence of alumina particles' phase transition on its radiation in the middle infrared and ultraviolet regions of spectrum[R]. *AIAA*, 2000—0735, 2000.
- [9] Anfimov N A, Karabadzhak G F, Khmelinin B A, et al. Analysis of mechanisms and nature of radiation from aluminum oxide in different phase states in solid rocket exhaust plumes[R]. *AIAA*—1993—2818, 1993.
- [10] Shankar Krishnan, Richard Weber J K, Schiffman Robert A. Refractive index of liquid aluminum oxide at $0.6328\mu\text{m}$ [J]. *Journal of American Ceramic Society*, 1991, 74(4): 881—883.