

红外隐身涂层发射率的仿真计算

刘姜伟^{1,2} 时家明^{1,2} 党可征^{1,2} 陈宗胜^{1,2} 冯玥玥²

(¹脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037
²解放军电子工程学院 安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要 建立了基于 Kubelka-Munk 理论的红外隐身涂层发射率仿真计算模型。以 Al 粉颗粒作为颜料粒子, 采用 Maxwell-Garnett 有效介质理论计算分析了涂层的等效折射率与波长的关系。从电磁波与颜料相互作用的机理出发, 采用几何光学理论计算得到了涂层的吸收系数和散射系数。定量分析了铝粉颗粒粒径以及体积分数对涂层发射率的影响。结果表明, 该模型对红外隐身涂层的制备具有一定的指导意义。

关键词 红外; 红外隐身涂层; 发射率; Kubelka-Munk 理论; 有效介质理论

中图分类号 TN219 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.012001

Simulation and Experiment Research on Emissivity of Infrared Stealth Coating

Liu Jiangwei^{1,2} Shi Jiaming^{1,2} Dang Kezheng^{1,2}

Chen Zongsheng^{1,2} Feng Yueyue²

(¹State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei, Anhui 230037, China
²Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Electronic Engineering Institute of the People's Liberation Army, Hefei, Anhui 230037, China)

Abstract A simulating model of emissivity of infrared stealth coating based on Kubelka-Munk theory is put forward. Taking aluminum particles as pigments, using Maxwell-Garnett effective medium theory, the relationship between equivalent refractive index of coating and wavelength is calculated and analyzed. Based on the mutual interaction of the electromagnetic wave and pigments, adopting geometrical optical theory, scattering and absorption coefficients of the coating are calculated. Effects of aluminum particles' parameters, such as size and volume, to the emissivity of coating are analyzed quantitatively. The result shows that the proposed model could be used to guide the preparation of infrared stealth coating.

Key words infrared; infrared stealth coating; emissivity; Kubelka-Munk theory; effective medium theory

OCIS codes 200.4560; 350.5610; 240.0310; 350.4990

1 引言

随着红外技术的飞速发展, 红外侦察和红外制导系统对军事设施和武器装备的威胁越来越大。红外隐身技术作为提高目标生存能力和战斗力的重要因素, 引起了世界各国的高度重视。其中, 红外隐身涂层技术以其可以控制转移目标的红外辐射特性、制造施工方便、成本低廉、应用不受几何形状限制、对武器主体结构与性能影响小等优点, 得到了国内外众多研究者的青睐^[1~4]。

当前针对红外隐身涂层的研究多数集中在经验式的实验制备与性能测试上, 而关于其理论机理研究的还比较少。本文基于二能流的 Kubelka-Munk 理论建立了红外隐身涂层发射率的仿真计算模型, 采用有效介质理论求得涂层的等效光学常数, 结合几何光学理论计算涂层的吸收和散射系数, 分析了颜料的粒径、体积分数等参数对涂层发射率的影响。

收稿日期: 2011-09-05; **收到修改稿日期**: 2011-09-19; **网络出版日期**: 2011-11-15

基金项目: 安徽省红外与低温等离子体重点实验室主任基金(2010A001003D)资助课题。

作者简介: 刘姜伟(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事红外技术方面的研究。E-mail: iamliujiangwei@126.com

导师简介: 时家明(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事光学技术应用方面的研究。E-mail: sjmeei@yahoo.cn

2 理论模型

设有一块涂有涂层的平板,涂层厚度为 d 。由于平板面积足够大,可以忽略边界效应,涂层内的热辐射可近似看作各向同性。在漫入射的情况下,Kubelka-Munk理论将涂层中的能流简化为正向的能流 I_+ 和负向的能流 I_- ,如图 1 所示^[5]。

两个能流在涂层中的传播满足微分方程:

$$\begin{cases} \frac{dI_+}{dz} = -(K+S)I_+ + SI_- \\ \frac{dI_-}{dz} = (K+S)I_- - SI_+ \end{cases}, \quad (1)$$

式中 K 和 S 分别为涂层的吸收系数和散射系数。(1)式满足边界条件:

$$\begin{cases} I_+(0) = (1-\rho_e)I_{+e} + \rho_i I_-(0) \\ I_-(d) = \rho_g I_+(d) \end{cases}, \quad (2)$$

式中 ρ_g 为涂层基底的漫反射率, ρ_i 为涂层前界面的内向漫反射率, ρ_e 为涂层前界面的外向漫反射率。假设涂层表面是光学光滑的,由菲涅耳公式可以计算得到

$$\rho_e = \frac{1}{2} + \frac{(n-1)(3n-1)}{6(n+1)^2} + \frac{n^2(n^2-1)^2}{(n^2+1)^3} \ln \frac{(n-1)}{(n+1)} - 2n^3 \frac{(n^2+2n-1)}{(n^2+1)(n^4-1)} + \frac{8n^4(n^4+1)}{(n^2+1)(n^4-1)^2} \ln n, \quad (3)$$

式中 n 为涂层的等效折射率。由于存在漫反射, ρ_i 的表达式为

$$\rho_i = 1 - \frac{1-\rho_e}{n^2}. \quad (4)$$

由(1)式和(2)式可以求得涂层前界面处的漫反射率

$$\rho = \rho_e + \frac{(1-\rho_e)(1-\rho_i)\beta(1-\beta\rho_g) - (1-\rho_e)(1-\rho_i)(\beta-\rho_g)\exp(-2\eta d)}{(1-\beta\rho_i)(1-\beta\rho_g) - (\beta-\rho_i)(\beta-\rho_g)\exp(-2\eta d)}, \quad (5)$$

式中

$$\eta = \sqrt{K^2 + 2KS}, \quad \beta = 1 + \frac{K}{S} - \sqrt{(K/S)^2 + 2(K/S)}.$$

根据基尔霍夫定律,可以得出涂层发射率的表达式为

$$\epsilon = 1 - \rho. \quad (6)$$

3 参量确定

3.1 涂层的等效折射率

为了考虑粒子对涂层反射率的平均效果,需要按涂层的等效折射率来计算反射系数。涂层的等效光学常数可以根据有效介质理论来解得。现在普遍使用的有两种典型的有效介质理论,一种是 Maxwell-Garnett 理论,主要应用在小颗粒嵌入基体材料中的情况;另一种是 Bruggeman 理论,适用于多种随机混合材料等效介电常数的求解。

Maxwell-Garnett 理论是不对称的,必须假定某种组分为内容物,某种组分为基体。假设基体介质介电常数为 ϵ_h ,颗粒的介电常数为 ϵ_i , f_i 为第 i 种颗粒体积分, ϵ_{eff} 为复合体系的等效介电常数,则满足^[6,7]

$$\frac{\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_h}{\epsilon_{\text{eff}} + Y\epsilon_h} = \sum_i^n f_i \frac{\epsilon_i - \epsilon_h}{\epsilon_i + Y\epsilon_h}, \quad (7)$$

式中 Y 为颗粒形状因子,对于球形粒子, $Y=2$ 。

Bruggeman 理论是一种对称理论,不同的组分在公式中的地位都是一样的。其表达式为

$$\sum_i^m f_i \frac{\epsilon_i - \epsilon_{\text{eff}}}{\epsilon_i + Y\epsilon_{\text{eff}}} = 0. \quad (8)$$

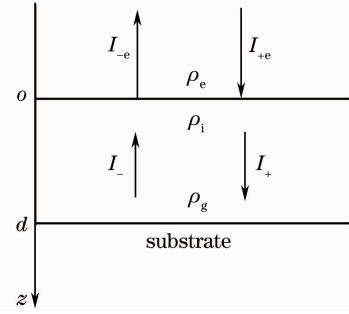


图 1 涂层中的 Kubelka-Munk 模型

Fig. 1 Kubelka-Munk model in the coating

而复折射率 N 与等效复介电常数 ϵ_{eff} 满足关系:

$$N = n + ik = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} = \sqrt{\epsilon' + i\epsilon''}, \quad (9)$$

式中 k 为复合体系的消光系数, ϵ' 和 ϵ'' 分别为复合体系复介电常数的实部和虚部。可以解出^[8]

$$\begin{cases} n = \left[\frac{1}{2} (\sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + \epsilon') \right]^{1/2} \\ k = \left[\frac{1}{2} (\sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} - \epsilon') \right]^{1/2} \end{cases}. \quad (10)$$

3.2 吸收系数和散射系数

当电磁波入射到颜料表面时,一部分发生反射,一部分透过表面入射到颜料内部,发生折射、吸收和透射。由于球形粒子具有各向同性,易于分析,本文就球形颗粒颜料计算其吸收和散射系数。假设基体粘结剂的光学常数为 (n_1, k_1) , 颜料的光学常数为 (n_2, k_2) 。电磁波与颜料的相互作用如图 2 所示^[7,9,10]。

图 2 中 θ_1 为入射角, θ_2 为折射角, φ 为出射光线相对于入射光线的偏转角,满足

$$\varphi = 2(\theta_1 - \theta_2). \quad (11)$$

由复数的斯涅耳定律可得

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{u \sin \theta_1}{\gamma \cos \delta}\right), \quad (12)$$

式中

$$u = \frac{n_1 n_2 + k_1 k_2}{n_2^2 + k_2^2}, \quad \gamma^4 = 1 - 2(u^2 - v^2) \times \sin^2 \theta_1 + (u^2 + v^2)^2 \times \sin^4 \theta_1, \\ \delta = \frac{1}{2} \arctan\left[\frac{2uv \sin^2 \theta_1}{1 - (u^2 - v^2) \sin^2 \theta_1}\right], \quad v = \frac{n_2 k_1 - n_1 k_2}{n_2^2 + k_2^2}.$$

设入射光强 I_0 在 $d\theta$ 内落到球表面的功率为

$$dP_0 = \pi r^2 I_0 \sin 2\theta_1 d\theta, \quad (13)$$

式中 r 为颜料粒子半径。

电磁波两次穿过球表面出射。设表面透射率为 T_0 , 对于光滑表面,有

$$T_0 = 1 - R, \quad (14)$$

式中 R 为球表面反射率,可由菲涅耳公式求出。光线在球内穿过 $2rcos \theta_2$ 的距离,发生衰减,因而透射率 T 为

$$T = \exp\left(-\frac{8\pi r k_2 \cos \theta_2}{\lambda}\right). \quad (15)$$

由于能量守恒,颜料的吸收截面为

$$\sigma_a = \pi r^2 \int_0^{\pi/2} \left(1 - R - \frac{T_0^2 T}{1 - RT}\right) \sin 2\theta_1 d\theta_1. \quad (16)$$

整个球的散射截面由折射、反射和多次反射构成。

折射引起的横向散射截面 $\sigma_{z,t}$ 和后向散射截面 $\sigma_{z,b}$ 分别为

$$\begin{cases} \sigma_{z,t} = \pi r^2 \int_0^{\pi/2} T_0^2 T \sin^2 \varphi \sin 2\theta_1 d\theta_1 \\ \sigma_{z,b} = \pi r^2 \int_0^{\pi/2} T_0^2 T \cos^2 \varphi \sin 2\theta_1 (1 - p) d\theta_1 \end{cases}. \quad (17)$$

当 $\varphi \geq \pi/2$ 时,取 $p = 0$,反之则取 $p = 1$,修正因子 $(1 - p)$ 可保证由折射引起的散射为后向散射。

反射引起的横向散射截面 $\sigma_{f,t}$ 和后向散射截面 $\sigma_{f,b}$ 分别为

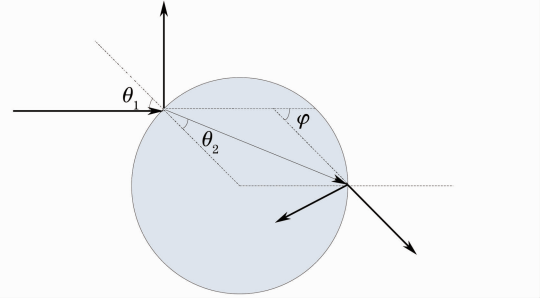


图 2 入射电磁波与颜料作用示意图

Fig. 2 Illustration of interaction between incident electromagnetic wave and pigment

$$\begin{cases} \sigma_{f,t} = \pi r^2 \int_0^{\pi/2} R \sin^2 2\theta_1 \sin 2\theta_1 d\theta_1 \\ \sigma_{f,b} = \pi r^2 \int_0^{\pi/2} R \cos^2 2\theta_1 \sin 2\theta_1 d\theta_1 \end{cases} \quad (18)$$

多重反射引起的散射需考虑成无穷级数的求和, 横向散射截面 $\sigma_{n,t}$ 和后向散射截面 $\sigma_{n,b}$ 分别为

$$\begin{cases} \sigma_{n,t} = \frac{2}{3} \pi r^2 \int_0^{\pi/2} \left(\frac{RT_0^2 T^2}{1-R'T} \right) \sin 2\theta_1 d\theta_1 \\ \sigma_{n,b} = \frac{1}{6} \pi r^2 \int_0^{\pi/2} \left(\frac{RT_0^2 T^2}{1-R'T} \right) \sin 2\theta_1 d\theta_1 \end{cases} \quad (19)$$

总的横向散射截面 σ_t 为

$$\sigma_t = \sigma_{z,t} + \sigma_{f,t} + \sigma_{n,t}, \quad (20)$$

总的后向散射截面 σ_b 为

$$\sigma_b = \sigma_{z,b} + \sigma_{f,b} + \sigma_{n,b}. \quad (21)$$

最后, 考虑基体粘结剂的吸收, 涂层的吸收系数和散射系数分别为

$$\begin{cases} K = \sqrt{3} m \sigma_a + \frac{8\pi(1-f)k_1}{\lambda} \\ S = \sqrt{3} m \left(\sigma_b + \frac{\sigma_t}{2} \right) \end{cases}, \quad (22)$$

式中 m 为单位体积组元的个数, 与颜料体积分数 f 的关系为

$$f = \frac{4}{3} \pi r^3 m. \quad (23)$$

这样, 通过粘合剂与颜料的光学常数、颜料的粒径和体积分数可求得涂层的吸收系数和散射系数, 再由(5)式和(6)式即可求得涂层的光谱发射率。

4 计算仿真

4.1 涂层等效折射率计算

假设基体粘结剂的吸收忽略不计, 其介电常数为 2.0。选取球形铝粉作为研究对象, 铝粉的光学常数引自参考文献[11]。波长取样范围为 8~14 μm 。采用 Maxwell-Garnett 理论进行计算, 根据(7)式、(9)式和(10)式计算涂层的等效折射率, 得到如图 3、图 4 所示结果。

由图可以看出: 1) 在铝粉颗粒的体积分数不变的情况下, 涂层的等效折射率 n 随着波长的增大而有所减小, 但其值变化很小; 2) 随着涂层中铝粉颗粒体积分数的增加, 由于铝粉粒子的散射作用增强, 涂层的等效折射率 n 随之增大。

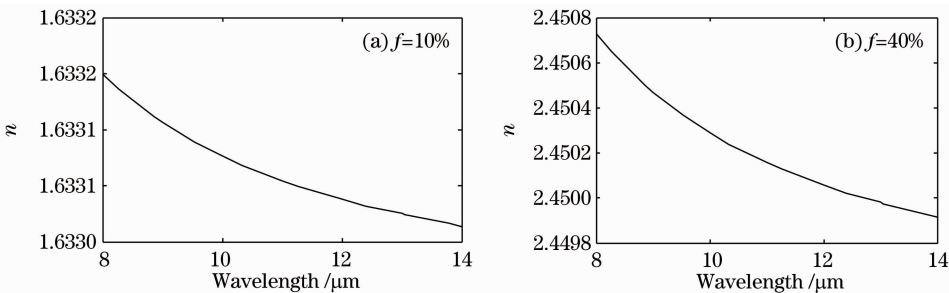


图 3 涂层等效折射率 n 与波长关系

Fig. 3 Relation between equivalent refractive index of coating and wavelength

4.2 铝粉粒径对涂层发射率的影响

取样波长选取在 $\lambda = 10 \mu\text{m}$ 处, 铝粉体积分数 $f = 40\%$, 涂层厚度 $d = 100 \mu\text{m}$, 基底反射率为 $\rho_g = 0.9$, 其

余参数同上节。计算得到铝粉颗粒粒径对涂层发射率的影响如图 5 所示。可以看出,涂层的发射率随着铝粉颗粒粒径的增大而减小,当铝粉颗粒粒径增大到 70~100 μm 时,曲线走势趋向平稳。

4.3 铝粉体积分数对涂层发射率的影响

取样波长仍选取在 $\lambda=10 \mu\text{m}$ 处,铝粉颗粒粒径为 $r=50 \mu\text{m}$,其余参数不变,通过计算得到铝粉体积分数对涂层发射率的影响如图 6 所示。随着铝粉体积分数的增加,涂层吸收和散射系数变大,发射率有明显下降。但当铝粉体积分数大于 40% 后,涂层的力学性能变得较差,因此一般选取铝粉体积分数不宜过大,以 20%~40% 为宜。当铝粉颗粒体积分数达到一定程度时,会发生搭接效应,文中计算未予考虑。

5 结 论

以 Kubelka-Munk 二能流模型为基本理论模型,结合有效介质理论和几何光学理论,以球形铝粉为颜料粒子进行了计算仿真,得出以下结论:

1) 随着铝粉体积分数的增多,铝粉的散射作用增强,涂层的等效折射率变大,发射率变小。

2) 涂层的发射率随铝粉粒径的增大而变小,当粒径达到 70~100 μm 时,曲线趋向平稳,发射率达到最小。

3) 随着铝粉体积分数的增大,涂层发射率明显下降。但当铝粉体积分数大于 40% 后,涂层的力学性能变得较差。因此铝粉体积分数以 20%~40% 为最佳。

这些结论对红外隐身涂层的制备具有一定指导意义。但针对其他形状,如片状颜料粒子,还需做进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 Yu Huijuan, Xu Guoyue, Shen Xuan *et al.*. Study on preparation and optimization of low infrared emission coating in 8~14 μm [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2008, **31**(6): 49~52
- 余慧娟, 徐国跃, 沈 轩 等. 8~14 μm 波段低发射率涂层的制备与优化研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2008, **31**(6): 49~52
- 2 Wang Bo, Sun Xiaoquan, Wang Zirong. Study on stealth effect evaluation of infrared coating [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2004, **21**(4): 538~541
- 王 博, 孙晓泉, 王自荣. 涂层光电隐身效果评估方法研究[J]. *量子电子学报*, 2004, **21**(4): 538~541
- 3 J. Zueco, F. Alhama. Inverse estimation of temperature dependent emissivity of solid metals [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2006, **101**(1): 73~86
- 4 Du Yongcheng, Yang Li. Study on optimal extinction radius of water fog particles based on phase function and extinction factor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2459~2463
- 杜永成, 杨 立. 基于相函数和消光因子的水雾粒子最佳消光半径研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2459~2463
- 5 Liu Lingyun. Study on the Mechanism of Composite Coating with Low Infrared Emittance and Low Radar Reflectance [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2006. 18~58

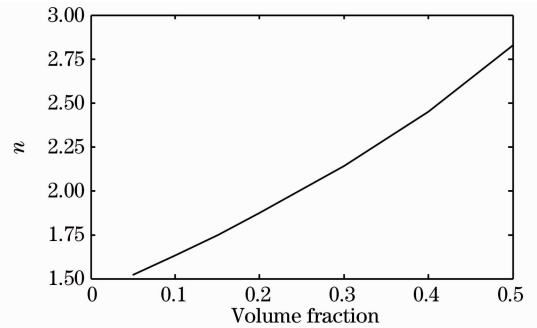


图 4 涂层等效折射率 n 与铝粉体积分数关系
Fig. 4 Relation between equivalent refractive index of coating and volume fraction of aluminum particles

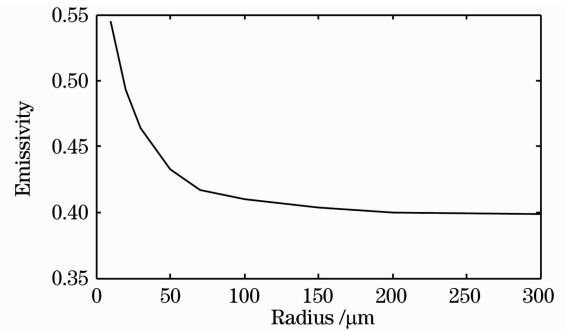


图 5 铝粉颗粒粒径对涂层发射率的影响
Fig. 5 Effect of radius of aluminum particles to emissivity of coating

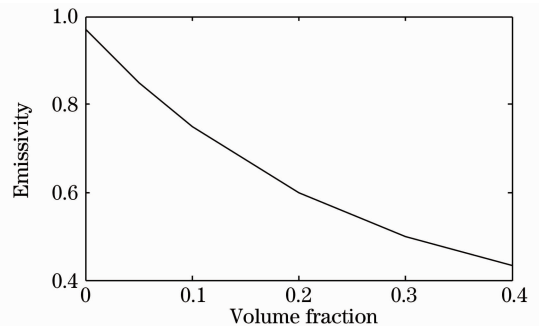


图 6 铝粉体积分数对涂层发射率的影响
Fig. 6 Effect of volume fraction of aluminum particles to emissivity of coating

- 刘凌云. 红外与雷达兼容隐身复合涂层的机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006. 18~58
- 6 Dou Zhengwei, Li Xiaoxia, Zhao Jijin. Complex refraction indices of expanded graphite deduced from its reflection spectra in infrared band[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, **32**(4): 498~502
- 豆正伟, 李晓霞, 赵纪金. 光谱法研究膨胀石墨红外波段复折射率[J]. *兵工学报*, 2011, **32**(4): 498~502
- 7 Wang Youjun, Lü Xuliang, Hu Jianghua *et al.*. Forecasting model of emissivity of infrared stealth coating[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(3): 489~494
- 王友军, 吕绪良, 胡江华 等. 红外隐身涂层发射率预测模型[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(3): 489~494
- 8 Jiang Xishun, Cao Chunbin, Cai Qi *et al.*. Effective medium theory and particle size effect modification for Au-MgF₂ nanoparticle composite films[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2006, **29**(8): 962~965
- 江锡顺, 曹春斌, 蔡琪 等. Au-MgF₂ 复合纳米颗粒薄膜有效介质理论的颗粒尺寸效应修正[J]. *合肥工业大学学报*, 2006, **29**(8): 962~965
- 9 Xu Wenlan, Chu Junhao. The optical constants of inhomogeneous medium[J]. *J. Infrared Millimeter Waves*, 1994, **13**(5): 391~395
- 徐文兰, 褚君浩. 非均匀介质的光学常数[J]. *红外与毫米波学报*, 1994, **13**(5): 391~395
- 10 Xu Wenlan. Effective optical constants of coatings with particles[J]. *Acta Physica Sinica*, 1998, **47**(9): 1555~1563
- 徐文兰. 含颗粒涂层的等效光学常数[J]. *物理学报*, 1998, **47**(9): 1555~1563
- 11 E. D. Palik. Handbook of Optical Constants of Solids[M]. New York: Academic, 1985. 369~408