

隐身涂层的光谱反射特性设计

张拴勤^{1)†} 石云龙¹⁾ 黄长庚²⁾ 连长春²⁾

1) 山西大同大学, 大同 037000)

2) 总装工程兵科研一所, 无锡 214035)

(2006 年 5 月 17 日收到, 2006 年 10 月 17 日收到修改稿)

从电磁波与颜料相互作用的机理出发, 建立了光学常数、颜料粒径等对光谱反射特性影响的理论模型, 系统分析了颜料粒径等关键参数对光谱反射特性的影响规律, 并且用实验验证了理论模型的正确性, 为隐身涂层光谱反射特性的理论设计提供了一种新方法.

关键词: 光谱反射特性, 光学常数, 隐身, 涂层

PACC: 7800, 7820D, 7865P

1. 引 言

随着各种光电侦察探测技术及电子传感器技术的飞速发展, 侦察和制导使用的电磁频谱范围与早期相比已大大扩充, 有光学(包括可见光 0.38—0.76 μm 和近红外 0.76—1.2 μm 两个波段)、热红外、雷达波等. 多波段综合使用是侦察手段较显著的技术特征, 从而对武器装备的隐身提出了更高的要求. 从侦察手段的优先次序看, 光学侦察排在第一位, 因此光学波段的隐身是对武器装备最基本的隐身要求.

光学隐身是针对目视观察、可见光与彩色照相、摄像、微光夜视及多光谱照相等手段采取的隐身技术, 要求隐身目标的光谱反射特性尽可能与周围环境的光谱反射特性一致. 隐身涂料属于“内装式”装备, 不影响武器装备的战场机动性能, 具有广阔的应用前景. 在隐身涂料的研制中, 以往多采用“炒菜”式方法来摸索最佳配方, 带有一定程度的盲目性, 研究时间周期长, 同时也浪费大量人力物力. 隐身涂层主要由颜料颗粒和成膜物质组成, 属于不均匀体系. Kubelka-Munk 的二流理论, 可以得到在无穷厚涂层的假设下, 涂层用吸收系数和散射系数表示的漫反射率^[1]. 但是由于涂层的吸收系数和散射系数都是实验上不可测试的量, 且这两个量也不是表征材料微观结构或物性的本征参量, 因而得到的涂层漫反射系数的表达式的物理意义不明确. 而对于颗粒对电磁波的散射和吸收特性研究, 文献报道有许多成熟的理论, 如 Mie 理论^[2], 该理论给出了在波长

和单个颗粒尺寸相近情况下, 颗粒的散射和吸收特性. 文献 [3] 给出了在颗粒尺寸与波长相比不同的情况下, 颗粒的散射系数和吸收系数的表示式, 在探讨矿石的红外光谱及月球、火星遥感光谱分析上获得了成功. 国内 Xu 等人^[4-6] 发展了他们的理论, 用以研究非均匀材料体系的光学性质. 本文在此基础上开展了隐身涂层的光谱反射特性设计, 系统分析了涂层材料的光学常数和粒径等对涂层光谱反射特性的影响规律, 初步建立了涂层材料的物性参数和涂层光谱反射特性之间关系的理论模型, 并用实验验证理论模型的正确性.

2. 理论模型

隐身涂层主要由光学颜料和粘结剂组成, 颜料对隐身涂层的光谱反射特性起着主要决定作用, 而粘结剂也会影响涂层的光谱反射特性, 同时对涂层的物理机械性能起着主要作用. 因此电磁波与涂层之间可以认为是电磁波与颜料颗粒集体相互作用的叠加. 图 1 示出了电磁波入射到颜料颗粒表面时的反射、折射情况.

电磁波入射到颜料颗粒表面时, 一部分发生反射, 另部分进入材料内部发生折射、吸收和透射. 图 1 中 θ_1 是入射光与面元法线的夹角. 依据几何光学光折射的 Snell 定律有

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{u \sin \theta_1}{\gamma \cos \delta} \right), \quad (1)$$

其中, 参数 u, γ, δ 由颜料和粘结剂的光学常数 ($n_1,$

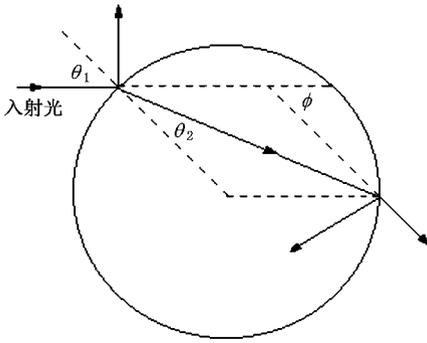


图 1 材料颗粒与电磁波相互作用示意图

k_1), (n_2, k_2) 所决定。

设入射光强 I_0 在 $d\theta$ 内落到球面的功率为

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

其中 r 是颜料颗粒的半径。

电磁波经过颜料表面反射和吸收后的出射能量为

$$T_0 = (1 - R), \quad (3)$$

其中 R 为球表面反射率, 由 Fresnel 公式得到。

同样电磁波在颜料颗粒内部传播时存在吸收, 对于这一传播过程可表示为

$$T = \exp\left(\frac{-8\pi r k_2 \cos\theta_2}{\lambda}\right). \quad (4)$$

根据能量守恒, 其吸收截面可表示为

$$\sigma_a = \pi r^2 \int_0^{\pi/2} \left(1 - R - \frac{T_0 T}{1 - RT}\right) \sin 2\theta_1 d\theta_1. \quad (5)$$

根据六流理论^[7], 总散射截面 σ_s 可表示为

$$\sigma_s = \sqrt{3} \left(\sigma_b + \frac{\sigma_t}{2} \right), \quad (6)$$

其中 σ_b 为后向散射截面, σ_t 为横向散射截面。

隐身涂层与电磁波的相互作用可以近似认为是颜料颗粒集体与电磁波共同作用的结果, 可以近似将涂层宏观的吸收系数 A 看作是单个颗粒吸收截面的叠加和黏结剂的吸收系数的和, 散射系数 S 看作是单个颜料颗粒散射截面的叠加, 则可以得到

$$A = \sqrt{3} n \sigma_a + \frac{8\pi(1-f)k_B}{\lambda}, \quad (7)$$

$$S = \sqrt{3} n \left(\sigma_b + \frac{\sigma_t}{2} \right),$$

其中 n 为单位体积组元的个数, 与体积比 f 的关系为 $f = \frac{4}{3} \pi r^3 n$ 。

当颜料浓度高时, 颜料之间相互接触, 引入接触

因子 $C = \exp\left(\frac{-6f\lambda T}{20r}\right)$, 此时散射系数 S 可表示为

$$S = \sqrt{3} n \left(\sigma_b + \frac{\sigma_t}{2} \right) C. \quad (8)$$

利用二光通模型^[1]可进一步求得涂层的光谱反射值 ρ 为

$$\rho = \frac{(-\alpha + S + A)e^{ad} + \frac{(\alpha + S + A)(S + A - \alpha - SR_g)}{-\alpha + SR_g - S - A} e^{-ad}}{S \left(e^{ad} + \frac{S + A - \alpha - SR_g}{-\alpha + SR_g - S - A} e^{-ad} \right)}, \quad (9)$$

其中, A 和 S 分别为涂层的吸收系数和散射系数; $\alpha = \sqrt{2SA + A^2}$; D 为涂层的厚度; R_g 为底板的反射率。

(9)式即为 Kubelka-Munk 方程的基本表达式。说明涂层的光谱反射系数是吸收系数 A 和散射系数 S , 层厚 D , 基底反射比 R_g 等参量的函数。

当不考虑涂层对电磁波的透过影响, 即涂层无限厚时 (9)式可以简化为

$$\rho = \frac{-\alpha + S + A}{S} = 1 + \frac{A}{S} - \sqrt{\frac{A^2}{S^2} + \frac{2A}{S}}. \quad (10)$$

综上所述, 只要知道了隐身涂层组成体系在任何波段光学常数的频散特性和粒径以及体积浓度, 理论上就可以求得隐身涂层在任何波段的光谱反射值。我们根据理论推导过程编制了相应的计算软件包。

3. 模型验证

图 2 是本文研究中实测的某种颜料的光学常数, 图 3 给出了利用该模型计算得到的该颜料的光谱反射曲线和实测的光谱反射曲线, 其中虚线是计算谱, 实线是测量谱。

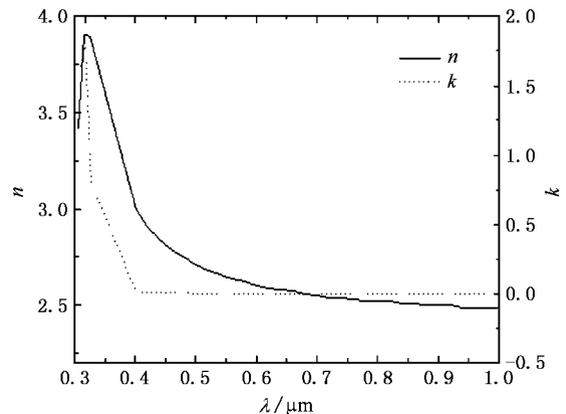


图 2 某种颜料的光学常数

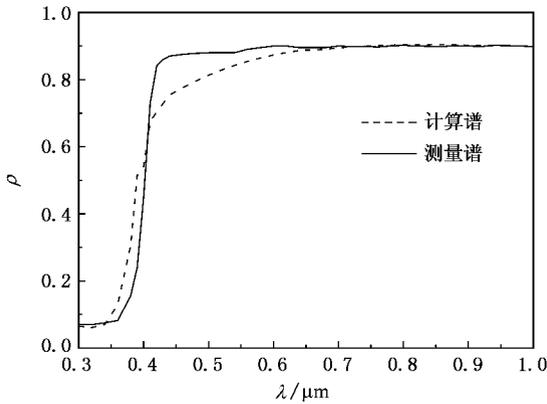


图3 实测和理论计算得到的光谱反射曲线

实验曲线是在黏结剂中加入平均粒径为 $2.5 \mu\text{m}$ 的颜料后形成的涂层采用分光光度计测试得到的。考虑到实际的颜料粒径存在一定的分布,可以认为上述的理论计算结果与实验结果符合得还是比较好的。因此在已知光学常数、粒径、颜料体积浓度等参数的情况下,该理论模型基本可以近似对隐身涂层的光谱反射特性进行预测。

4. 影响因素分析

4.1. 粒径对光谱反射特性的影响

4.1.1. 理论计算

图4为某光学颜料1在不同波长下的光学常数变化曲线。

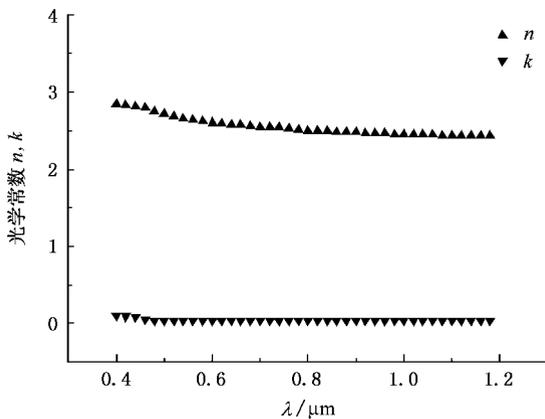


图4 某光学颜料1的光学常数曲线

根据图4取波长 λ 为 $0.9 \mu\text{m}$ 相应的光学常数为 $(2.55, 0.04)$ 利用编制的软件计算粒径对宏观吸收系数和散射系数及涂层反射系数的影响,计算结

果如表1。

表1 不同粒径下光谱反射特性对比

粒径 $l/\mu\text{m}$	单个颗粒吸收截面 $\sigma_a/\mu\text{m}^2$	单个颗粒散射截面 $\sigma_s/\mu\text{m}^2$	吸收系数 $A / 10^{-2} \mu\text{m}^{-1}$	散射系数 $S / 10^{-3} \mu\text{m}^{-1}$	涂层反射系数 ρ
50	22.267	125.992	1.959	0.8574	0.7977
20	3.563	20.159	4.564	2.144	0.7842
10	8.907	5.071	8.898	4.307	0.7379
5	0.2234	1.443	17.17	9.487	0.6831
2	0.03783	0.04048	35.92	37.17	0.6223

可以看出,随着粒径的减小,颜料颗粒的吸收和散射截面不断下降,而涂层宏观吸收系数和散射系数逐渐增大,相应涂层的光谱反射系数降低。即减小光学颜料粒径对降低涂层在某个波长下的光谱反射系数有效。

4.1.2. 实验研究

图5是该颜料和成膜物质在重量比为1:1时,不同研磨细度光谱反射特性的变化规律。表2给出相应可见光亮度 Y 、近红外亮度 β 以及红外与红光比值 M 。

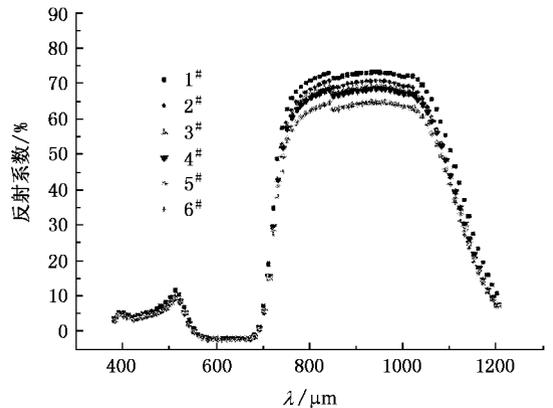


图5 不同研磨细度颜料的光谱反射特性曲线

表2 研磨细度对可见光亮度、近红外亮度及红外与红光比值的影响

编号	细度 $l/\mu\text{m}$	$0.9 \mu\text{m}$ 处光谱反射系数	可见光亮度 Y	近红外亮度 β	$M \left(= \frac{\overline{R_{\text{红外}}}}{R_{\text{红光}}} \right)$
1	50	0.75	7.87	73.16	15.19
2	35	0.70	8.00	70.01	14.89
3	21	0.68	8.09	68.27	13.70
4	10	0.66	8.14	66.81	12.92
5	5	0.63	8.12	61.29	11.76
6	2	0.62	8.15	60.78	11.56

由表2可以看出,随着颜料的细度逐渐变细, $0.9 \mu\text{m}$ 波长处的光谱反射系数逐渐下降,这一规律

和表 1 理论计算的结果相一致。单从光谱反射系数的值来看，实验值和表 1 的理论计算值存在些偏差，主要是因为实际实验中的颜料存在有一定的粒度分布，体积浓度一定时它们对光谱反射特性的贡献是不一样的，而本文的理论计算是针对单一粒径进行的，和实际情况有些不符，这也是本文理论计算需要进一步改进的地方。

另外由表 2 可以看出，可见光部分(380—720 nm)的光谱反射系数几乎没有变化，而近红外部分(720—1200 nm)的光谱反射系数逐渐变小，相应的该绿色颜料的可见光亮度 Y 变化不大，红外与红光的比值 M 有逐渐降低的趋势，近红外亮度因数 β 呈现明显下降。且随着研磨时间增加，涂料细度变细，对于涂层施工性能和使用性能有利，可见光亮度 Y 变化不大，近红外亮度 β 值逐渐减小，红外与红光比值也逐渐减小，这对于实现光学隐身不利。当涂料细度降低到一定程度时(平均粒径为 $10 \mu\text{m}$)，继续研磨近红外亮度 β 值以及红外与红光比值 M 变化很小。因此在实际实验中，颜料的最佳粒径应该在保证隐身性能的前提下，同时要兼顾实际施工和

使用性能。

4.2. n 和 k 对光谱反射特性的影响

为了说明光学常数 n 和 k 对颜料光谱反射特性的影响，又根据另一种颜料 2 的 n 和 k 计算了其光谱反射率。图 6 是该种颜料的光学常数 n 和 k 随频率的变化曲线，表 3 是在 $\lambda = 0.9 \mu\text{m}$ 粒径 $10 \mu\text{m}$ ，同一体积浓度条件下计算的光谱反射系数结果。

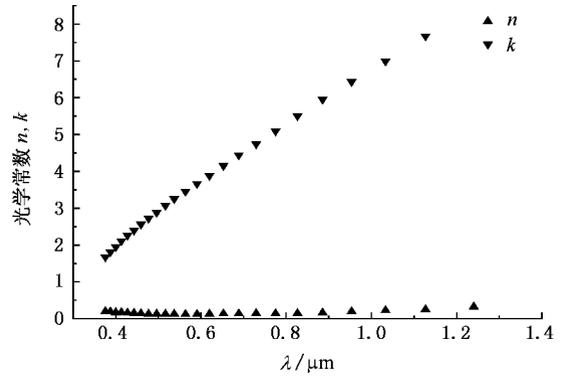


图 6 光学常数随波长的变化规律

表 3 两种不同颜料的光谱反射系数比较

颜料编号	n	k	单个颗粒	单个颗粒	吸收系数 A	散射系数 S	涂层反射系数 ρ
			吸收截面 $\sigma_a/\mu\text{m}^2$	散射截面 $\sigma_s/\mu\text{m}^2$			
1	2.55	0.04	0.8907	5.071	$8.898 / 10^{-2} \mu\text{m}^{-1}$	$4.307 / 10^{-3} \mu\text{m}^{-1}$	0.7379
2	0.145	6.01	12.594	50.355	0.5938	47.48	0.6325

由表 3 可以看出，颜料 2 的吸收系数比颜料 1 较大，导致颜料 2 单个颜料粒子的吸收和散射截面增大到 1 到 2 个数量级，吸收截面增大的相对高一些，因此导致颜料 2 的光谱反射率相对于颜料 1 反而降低。

4.3. 不同体积含量对光谱反射特性的影响

上述光学颜料在 $\lambda = 0.9 \mu\text{m}$ 下，光学常数 n 和 k 分别为 2.55 和 0.04。表 4 为该颜料在不同颜料体积含量下的光谱反射特性。

表 4 不同体积含量下的光谱反射特性

体积含量/%	吸收系数 A	散射系数 S	涂层反射系数 ρ
	$/10^{-2} \mu\text{m}^{-1}$	$/10^{-3} \mu\text{m}^{-1}$	
0.1	2.606	1.133	0.8756
0.25	5.977	2.833	0.8723
0.38	8.898	4.307	0.7379
0.45	10.47	5.142	0.7651
0.6	13.84	6.813	0.7692

由表 4 可以看出，当光学颜料体积含量较低时，涂层的反射系数反而高，主要因为光学颜料体积浓度低不能完全遮盖底材，因而底材的影响相对比较大，得到的光谱反射系数主要是底材的光谱反射系数在起作用。随着颜料体积含量的升高，颜料完全遮盖底材，得到的光谱反射系数主要由涂层的反射特性决定，可以看出随着颜料体积含量的升高光谱反射系数也相对升高的规律，但是当颜料体积含量高到一定程度，颜料颗粒相互交叠，光谱反射系数变化不大。因此在实际的实验中，得到的测试结果要保证反映的是实际材料的光谱反射特性，这就要求涂层要有一定的厚度。

5. 结 论

本文系统研究了影响隐身涂层光谱反射特性的主要因素，探讨了颜料颗粒的平均粒径、颜料体积含量、光学常数对涂层光谱反射特性的影响规律，建立

了相应的理论模型,采用实验和理论模型的计算结果进行了比较,指出模型需要进一步修正的地方.

该理论模型可用于指导隐身涂层的设计.

-
- [1] Chen H 1985 *Infrared Physics* (the publishing house of national defense industry)(in Chinese)[陈 衡 1985 红外物理学(国防工业出版社)]
- [2] Mie G 1908 *Ann . Phys .* **25** 377
- [3] Aronson J R , Emslie A G , Karr C (edited) 1975 *Infrared and Raman Spectroscopy of Lunar and Terrestrial minerals* (New York : Academic)
- [4] Xu W L , Shen X C 1992 *Appl . Opt .* **31** 4488
- [5] Xu W L , Shen X C 1997 *Appl . Opt .* **36** 1644
- [6] Xu W L , Zhang S Q , Xu Y 2004 *Acta Phys . Sin .* **53** 3215 (in Chinese)[徐文兰、张栓勤、徐 怡 2004 物理学报 **53** 3215]
- [7] Emslie A G , Aronson J R 1973 *Appl . Opt .* **12** 2563

Design of spectral reflective properties of the stealth coating

Zhang Shuan-Qin^{1,2)} Shi Yun-Long¹⁾ Huang Chang-Geng²⁾ Lian Chang-Chun²⁾

¹ *Shanxi Datong University , Datong 037000 , China*)

² *First Research Institute of the Engineering Department , Headquarters of the General Armaments , Wuxi 214035 , China*)

(Received 17 May 2006 ; revised manuscript received 17 October 2006)

Abstract

Based on the mutual interaction between the electromagnetic wave and pigment , the theoretical model is formulated . The influence of various factors , such as the size of the pigment , the volume ratio of pigment , and the optical constants , on the spectral reflective properties is systematically analyzed . Experiment has been performed to testify the theoretical model . The theoretical design for the spectral reflective properties of the stealth coating is further proposed .

Keywords : spectral reflective properties , optical constants , stealth , coating

PACC : 7800 , 7820D , 7865P