

可见光隐身涂料设计

徐文兰¹⁾ 张栓勤²⁾ 徐 怡²⁾

¹⁾ 中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家实验室 上海 200083)

²⁾ 总装工程兵科研一所 无锡 214035)

(2003 年 10 月 13 日收到 2004 年 3 月 8 日收到修改稿)

根据颗粒粒径与波长相比的不同情形,分别用粗粒子理论、细粒子理论和桥理论求得颗粒的光散射系数和吸收系数,从而得到含颗粒涂料的漫反射率.讨论了涂料参数如黏结剂和颗粒的光学常数、颗粒粒径和体积比等对漫反射率的影响.并以含钛白粉颗粒的涂料为例,介绍了可见光隐身涂料的计算机设计方法.

关键词:非均匀涂料,涂料设计,可见光隐身

PACC:7865P,7840

1. 引言

上世纪 80 年代以来,由于雷达隐身技术和红外隐身技术取得了相当的进展,相关武器装备的生存能力有了显著提高.但是,仅采用雷达和红外隐身技术还不能使武器装备具备全天时和全频谱的隐身能力.如美国采用雷达隐身技术的 F-117 战斗轰炸机,夜战时能避开敌方雷达的探测,但在白天,这种以天空为背景的黑色飞行物却逃不过肉眼或光学设备的观察.随着可见光技术侦察手段的不断改进,可见光隐身技术必然要有新的发展,才能实现所谓的‘全面隐身’.

可见光隐身又称视频隐身技术,是针对人的目视、照相、摄像等观测手段而采取的隐身技术.其目的是要求目标的反射率尽可能与周围环境的反射率一致.隐身的主要技术途径有特殊照明系统、亮度和颜色可调的奇异蒙皮、电致变色薄膜和烟幕遮蔽等等.而在目标表面涂敷由颜料颗粒和黏结剂组成的涂料是改变其反射率特性的一种简单方法.可见光隐身涂料设计就是要研究不同配方与颜色的关系.在涂料研制的初级阶段,多采用所谓‘炒菜’式方法来摸索涂料的最佳配方,带有一定程度的盲目性,试验的工作量也大.为了尽可能降低研制成本,建立相关的反射率理论,编制程序,进行量化的计算机实验,是材料在微观尺度上的设计,符合当前材料科学发展的必然趋势.

由颜料颗粒和基料黏结剂两者组成的可见光隐

身涂料是一种非均匀材料.涂敷到目标上形成涂层.由 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].所以,寻求涂料组成与吸收系数、散射系数的关系就成为涂料设计的关键.

作者注意到 Mie 理论在计算颗粒散射和吸收系数方面的应用,但我们认为 Mie 理论的计算过于复杂,况且在隐身材料的应用中,其实无需知道电磁场的角度分布.文献[2]在研究含颗粒的非均匀材料时,根据颜料颗粒粒径与波长相比的不同情形,采用不同的理论计算颗粒的散射系数和吸收系数.他们的方法在探讨矿石的红外光谱以及月球、火星遥感光谱分析上都获得了成功.本文的作者之一曾发展了他们的理论,用以研究含颗粒的非均匀材料光学性质^[3-6].本文用这些理论来探究可见光隐身涂料的设计问题.

本文的理论能够定性乃至半定量地描述涂层反射率与涂层结构参数的关系,从而提供可见光隐身涂料的计算机量化设计手段.

2. 非均匀涂层的漫反射率

当外界光入射到涂敷在目标上的涂料,即涂层时,进入涂层的光会受到颗粒的散射.涂层的反射比均匀介质复杂得多.在 Kubelka-Munk 的二流理论中,忽略涂层的边缘效应,进行一维分析.把通过垂直于传播方向单位面积的漫辐射功率看作有两个相反方向的能流构成,这就是二流模型的基本思想.由

文献 [1], 当涂层表面没有镜反射, 且厚度为无穷大时(是通常情况的极好近似)可得涂层的漫反射率 ρ 为

$$\rho = 1 + \frac{A}{S} - \sqrt{\left(\frac{A}{S}\right)^2 + 2\left(\frac{A}{S}\right)}, \quad (1)$$

式中 A 为涂层中单位体积的吸收系数, S 为单位体积的散射系数. 两者的量纲都是长度的倒数. 可见, 体系的漫反射率与吸收系数与散射系数之比有关. 图 1 表示了它们之间的函数关系. 当体系的吸收趋于零时, 漫反射率趋于 1; 而当体系无散射时, 漫反射率趋于零.

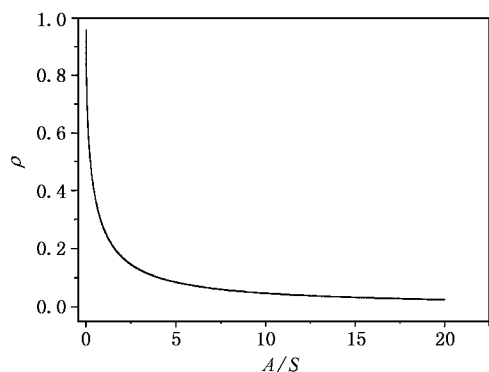


图 1 非均匀涂层的漫反射率

3. 散射系数和吸收系数

从上节中可以看到, 在一定的条件下, 涂层的漫反射率完全由散射系数和吸收系数决定. 而这两者都与涂层的结构参数, 如涂层内含颗粒的粒径、体积比、光学常数以及黏结剂的性质等有关. 所以, 寻求由涂层参数计算散射系数和吸收系数的公式是涂料设计所必须的. 文献 [2—6] 给出了相关的描述. 当粒径与可见光波长相比大得多时, 可用几何光学理论求出吸收系数和散射系数. 这里称之为粗粒子理论; 而当粒径与波长比小得多时, 就把颗粒当作为一系列有着不同退极化因子的椭球体, 采用所谓的细粒子理论; 当颗粒的尺寸介于上述两者之间时, 用嫁接上述两者的桥理论. 以上求得的颗粒散射和吸收截面都与涂层的参数, 如颗粒和黏结剂的种类、颗粒尺寸和体积比等因素有关. 要强调的是计算吸收系数和散射系数时, 我们用的是单粒子理论, 即认为颗粒之间没有相干作用. 为了弥补由于颗粒之间因距离过近给单粒子理论带来的误差, 我们在粗粒子理论中引入了光学搭接因子的概念加以修正. 细粒子理

论是用所谓的 Lorentz-Lorenz 介质折射率来解决这个问题的.

涂料的散射系数和吸收系数与单个颗粒散射截面和吸收截面有关, 单位体积内有 n 个颗粒的散射系数 S 为

$$S = \sqrt{3} n (\sigma_b + \sigma_t/2), \quad (2)$$

吸收系数 A 为

$$A = \sqrt{3} n \sigma_a + 8\pi (1 - f) k_1 / \lambda, \quad (3)$$

式中的 σ_b , σ_t 和 σ_a 分别为单个颗粒的后向、横向散射截面以及吸收截面. 这些截面的具体定义和相应公式, 见文献 [3]. (3) 式中的后一项考虑了黏结剂的吸收, f 是颗粒的体积比, k_1 是黏结剂的消光系数, λ 是光波波长. 下面就分别描写颗粒的散射截面和吸收截面的求法.

3.1. 粗粒子理论

粗粒子理论的基本思想是首先把颗粒近似为光滑的球体, 按几何光学方法考虑光入射到颗粒后在球表面的反射、进入球内的折射和多重反射. 在计算光进入球内的折射角时, 因为黏结剂也有吸收, 必须使用复数的 Snell 定律^[7], 用权重法得到以上各路光各自对散射和吸收截面的贡献. 最后得到单个颗粒的 σ_b , σ_t 和 σ_a . 其中还引入了因球体代替实际颗粒带来的修正. 如果涂层中颜料颗粒的浓度足够低, 那么就可以用 (2) (3) 式计算涂层的散射系数和吸收系数了. 这就是所谓的单粒子理论. 但如果颜料颗粒的浓度比较大, 由于颗粒之间的距离比较近, 会减少散射. 文献 [8] 认为当两个颗粒之间的距离小于波长的 $1/10$ 时, 就发生所谓的光学搭接 (optical bonding). 引入接触因子 C , 乘在 (2) 式的右端. 对球状颗粒, 有 $C = \exp(-6\beta\lambda T/20r)$, f 是颗粒的体积比, r 为颗粒半径, T 是进入颗粒的透射率. 考虑到实际颗粒的情形, 还要引入粗糙度 Y .

3.2 细粒子理论

当颗粒的粒径远小于可见光波长时, 上述几何光学的理论显然不能成立. Emslie 和 Aronson 假设涂层内的颗粒是有着不同退极化因子的小椭球^[2]. 考虑颗粒间的相干作用, 可以得到单个颗粒的散射截面 σ_s 和吸收截面 σ_a 分别为

$$\sigma_s = x \frac{256\pi^5 r^6}{27\lambda^4} |m^2 - 1|^2$$

$$\times \frac{\ln(\ln m^2) + \ln[\ln(m)(m^2 - 1)]}{\ln(m^2)}, \quad (4)$$

$$\sigma_a = \frac{16\pi^2 r^3}{3\lambda} \operatorname{Im}\left(-\frac{m^2 \ln m^2}{m^2 - 1}\right), \quad (5)$$

$$m^2 = \hat{n}_2 / \bar{m}^2, \quad \bar{\lambda} = \lambda / R(\bar{m}),$$

式中的 $\bar{m}$ 就是介质的 Lorentz-Lorenz 折射率,它与颗粒、黏结剂复光学常数的关系见文献[3]. $\hat{n}_2$ 为颗粒的复光学常数.考虑到散射的各向同性(2)和(3)式中的 σ_b, σ_t 为

$$\sigma_b = \frac{\sigma_s}{6}, \quad \sigma_t = \frac{4}{6} \sigma_s. \quad (6)$$

3.3. 桥理论

当颗粒的粒径介于粗粒子和细粒子之间时,采用桥理论,即认为单个颗粒的散射截面介于分别按照粗粒子理论和细粒子理论计算结果之间,它们的关系式为

$$1/\sigma_{br}^2 = 1/\sigma_c^2 + 1/\sigma_f^2, \quad (7)$$

式中的下标 br, c, f 分别代表用桥理论、粗粒子理论计算和细粒子理论计算的散射截面.

在以上三种理论中,把计算得到的散射截面和吸收截面代到(2)(3)式,在得到(1)式中所需的散射系数和吸收系数后就求得了涂层系统的漫反射率.从以上的讨论知,计算所需参数为颗粒和黏结剂的光学常数、颗粒的粒径和体积比.这些参数既是理论计算必不可少的输入量,也是涂层设计的可调参数.由于光学常数是波长的函数,得到的漫反射率也是波长的函数,因此可以获得涂层的漫反射率谱.

4. 计算实例和讨论

根据以上理论,可以做两件事,一是根据涂料各种参数,如黏结剂种类(光学常数)、颗粒种类(光学常数)、大小、体积比计算漫反射率.通过计算不同涂料参数的反射率,给出反射率随涂料参数的变化趋势,对涂料的设计有导向的作用.二是由实验反射率谱,结合隐身而言,就是目标所需的反射率谱,反推出涂料的组成,以便摸索涂料的最佳配方.前一个问题比较容易解决.只要按已知涂料组成情况,按上节介绍的公式进行计算就可以了.后一个问题是前一个问题的逆问题.因为反射率涉及多种因素,由反射率谱推断涂料组分时,一定要有一些辅助相关信息

才行.本节以 TiO_2 颜料(俗称钛白粉)颗粒为例,对这两个问题分别进行讨论.

4.1. 涂层参数对反射率的影响

黏结剂的光学常数对涂层反射率的影响是不言而喻的,从实用角度考虑,黏结剂应该是低吸收的材料.其光学常数(n_1, k_1)要尽可能地接近于空气(1, 0)的值.计算表明,涂层黏结剂的 k_1 越大,漫反射率就越小.这是意料之中的,因为 k_1 增大,意味着涂层吸收的增加.

图2是漫反射率随颗粒直径的变化.取波长为 $0.358\mu\text{m}$,黏结剂和 TiO_2 的光学常数分别为 $n_1 = 1.5, k_1 = 0.0001, n_2 = 3.38, k_2 = 0.117^{[6]}$.颗粒的体积比为0.3.图2的插图表示了涂层的吸收系数 A 和散射系数 S 随颗粒直径 $2r$ 的变化关系.两者的单位都是 μm^{-1} .计算中根据粒径大小与波长的关系分别采用上述的粗粒子理论、细粒子理论和桥理论.图2表明当颗粒的体积比保持不变时,随着颗粒粒径的增加,反射率先上升,后下降.当颗粒的粒径较小时,细粒子理论表明随粒径变大,颗粒的吸收基本不变,而散射增加,以至于反射率上升.但对于在粗粒子理论应用范围内的较大颗粒,其粒径的增大意味着涂层中颗粒数目的减少,虽然散射系数和吸收系数都减少,但前者的减少甚于后者,见图2插图.从而由(1)式可见,反射率会下降.因此反射率随粒径的变化不是单调的.

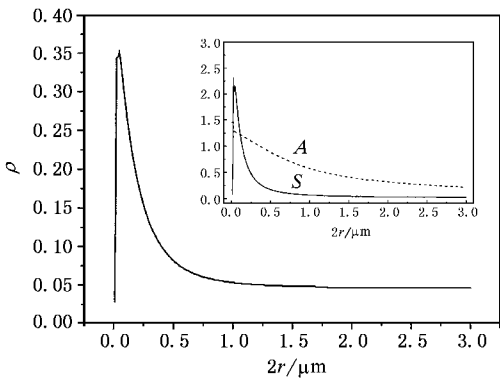


图2 涂层反射率 ρ 、吸收系数 A 和散射系数 S 随颗粒直径 $2r$ 的变化

如果保持颗粒的直径如 $2\mu\text{m}$ 不变,在0.1—0.4范围内改变体积比.那么随体积比的增大, TiO_2 的含量增大,吸收系数和散射系数的增大,几乎是同步的,反射率只有微弱的增加.

颗粒粗糙度 γ 越大,涂料的吸收大,漫反射率变小.可见为了提高漫反射率,要尽可能使颗粒表面光滑.

颗粒的光学常数对于反射率的影响是比较大的.一般而言,如果颗粒的折射率 n_2 较大,消光系数 k_2 较小,漫反射率就比较大.这一点很像均匀介质光滑表面正入射的菲涅耳镜反射率行为.由于颗粒的光学常数由颗粒的材料所决定,并随波长变化而变化,因此可以根据以上的趋势选用材料.而反射率随波长变化的原因就是光学常数是波长的函数.

4.2. 计算机配色

在染料等行业,早就有所谓的计算机配色问题.即用计算机调整色料的配方,使得到的混合色料尽可能地接近既定目标的颜色.计算机配色也是根据 Kubelka-Munk 的二流理论,但对配料的比例和最终的混合色料只考虑(1)式中 A/S 值的组合,并不涉及材料微观尺度上的设计.如前所说,可见光隐身的目的就是最大限度地使目标的反射率尽可能与周围环境的反射率一致.也就是说,希望可见光隐身涂料的反射谱尽可能地与目标反射谱一致,因此,从某种意义上说,不妨也把本文讨论的第二个问题称为配色问题.

在具体进行配色计算机实验时,除了应用上节介绍的相关公式外,还需要进行两个步骤处理.因为我们的计算其实是一个一个波长地进行,而查表或测量得到的光学常数值所对应的波长值往往与实验反射率谱对应的波长值并不一一对应,这就影响了计算和实验的比较.所以首先用拟合方法把可见光波段的光学常数表达为波长的函数.这样才能得到实验所需波长的光学常数,进行漫反射率计算,并与实验比较.可以用多项式进行拟合.拟合多项式的次数越高,得到的计算精度也越高,当然,拟合所需的时间也越长.

第二个问题是如何找到最佳配方.计算得到的反射谱肯定偏离目标或者标样的实验反射谱.所以要不断改变配方进行计算.搜索与标样反射谱最接近的理论谱所对应的配方.这就是配色的最终目标.用数学的语言就是要求 $\sum_i [\rho_s(i) - \rho_l(i)]^2$ 最小.求和 i 遍及所有的实验点. $\rho_s(i)$, $\rho_l(i)$ 分别为实验、理论在 i 点波长的反射率数值.因为颗粒的粒径和体积比都有一定的变化范围,所以这是一个有确定

边界的最小值问题.采用准牛顿和有限差分梯度法可以搜索到优化配方.

图3的实线是含 TiO_2 颗粒涂料的实验反射谱.虚线是理论拟合结果.

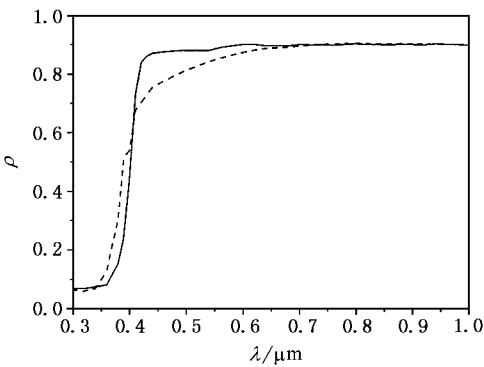


图3 涂层的实验(实线)和理论(虚线)反射谱

理论计算的最佳配方见表1.

表1 理论计算的最佳配方					
颗粒直径/ μm	0.0010	0.0103	0.1000	0.1616	2.0493
体积比	0.0100	0.0100	0.0100	0.1776	0.2924

实验曲线所对应的涂料确实是在黏结剂中加入了 $2\mu\text{m}$ 直径的 TiO_2 .考虑到实验的粒径实际上必定存在一定的分布,上述理论计算的结果与实验符合得还是相当好的.

计算与实验之所以有误差的原因是复杂的.首先,实际的涂层不是仅由颗粒和黏结剂两者简单组成.为了保证颗粒的分散、涂层的稳定、涂层的附着等,还要添加其他材料,这样就增加了问题的复杂性.再者,由于颗粒光学常数对涂层反射率的影响较大,提醒我们颗粒材料光学常数的准确度是十分重要的.文献[9]中的光学常数并没有涵盖所有的测量波长范围,为了进行计算,我们用数学方法添补了部分未知的光学常数.最后,本文虽然用接触因子的方法考虑了颗粒间相互作用,即所有颗粒的总散射系数是单个颗粒散射系数乘以颗粒数,再用接触因子予以修正.但就其本质而言,还是单粒子理论.至于所有公式是在涂层足够厚,并忽略镜反射的情况下推导的,漫反射率仅与 A/S 有关,与实际情况肯定会有偏离.如果涂层偏离这个条件,可以由更一般的公式代替(1)式,见文献[3].尽管如此,本文提供的公式以及计算方法仍提供了可见光隐身涂料计算机设计的良好途径.

5. 结 论

本文提供了一种可用于可见光隐身涂料设计的简单方法以及计算实例. 其实该方法也可用于其他

非均匀涂料,如红外隐身、雷达隐身涂料等的设计. 由于涂层中颗粒的散射系数和吸收系数都是可以根据本文提供的理论进行计算的,只要根据其他涂料的不同需要,如红外隐身涂料考察的是涂层的发射率,再进一步进行公式推导就可以了.

[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] Aronson J R and Emslie A G 1975 *Infrared and Raman Spectroscopy of Lunar and Terrestrial minerals* , edited by C Karr , Jr ed (New York Academic)

[3] Xu W L and Shen S C 1992 *Appl . Opt .* **31** 4488

[4] Xu W L and Chu J H 1994 *J . Infrared Millim . Waves* **13** 391(in Chinese] 徐文兰、褚君浩 1994 红外毫米波学报 **13** 391]

[5] Xu W L and Shen X C 1996 *J . Infrared Millim . Waves* **15** 515(in Chinese] 徐文兰、沈学础 1996 红外毫米波学报 **15** 151]

[6] Xu W L and Shen S C 1997 *Appl . Opt .* **36** 1644

[7] Thakur A and Raman R 1983 *Appl . Energy* **15** 1

[8] Xu W L 1998 *Acta Phys . Sin .* **47** 1555(in Chinese] 徐文兰 1998 物理学报 **47** 1555]

[9] Palik E D 1985 *Handbook of Optical Constants of Solids* (London : Academic)

The design of visible light stealth material

Xu Wen-Lan¹⁾ Zhang Shuan-Qin²⁾ Xu Yi²⁾

¹⁾(National Laboratory for Infrared Physics , Shanghai Institute of Technical Physics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 200083 ,China)
²⁾(First Research Institute of the Engineering Department , Headquarters of the General Armaments , Wuxi 214035 ,China)
(Received 13 October 2003 ; revised manuscript received 8 March 2004)

Abstract

The coarse particles theory , the fine particles theory and the bridge theory were used to calculate the absorption and scattering coefficients of the particles separately according to their size compared with the light wavelength. The diffuse reflectivity of the coating with the particles was obtained. The influences of the various parameters of the coating , such as the optical constants of the particles and the binder , the size and the volume fraction of the particles , on the diffuse reflectivity were discussed. Taking TiO₂ as the example , the computer design method of visible light stealth coating is introduced.

Keywords : inhomogeneous coating , design of coating , visible light stealth
PACC : 7865P , 7840