

激光、红外隐身兼容涂料的前景分析

吴伶芝 谢国华 吴瑞彬 张卫东

(航天材料及工艺研究所 北京 100076)

文 摘 红外探测技术、激光探测技术、电子战等因素使得红外波段中的隐身技术变得更为重要。在同一波段范围同时达到红外与激光的隐身兼容是热平衡理论所面临的难题。要做到红外和激光的隐身兼容,就必须克服两者对材料的一对矛盾要求。在分别介绍了红外、激光隐身的原理后,提出了红外激光复合隐身的设想,并分析了两种隐身技术的互相制约及兼容的可能性。

关键词 隐身材料,涂层,红外,激光

Prospect Analysis for Compatible Stealth Coatings in Laser and Infrared

Wu Lingzhi Xie Guohua Wu Ruibin Zhang Weidong

(Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology Beijing 100076)

Abstract Many factors such as infrared detecting technology ,laser detecting technology ,electron war and so on , make the stealth technology important in the infrared region. It is a difficult problem for heat balance theory to gain the stealth compatibility of infrared and laser in the same wave band. To achieve the compatibility ,the conflict demands for infrared and laser stealth materials has to be overcome. Two stealth mechanisms are first introduced separately and a method of compatibility stealth is proposed. On the basis of the mechanism of stealth in infrared and laser , restriction and possibility of the compatibility of the two methods of stealth is analyzed in this paper.

Key words Stealth material ,Coating ,Infrared ,Laser

1 前言

现代无线电技术和光电探测系统的迅猛发展,极大地推动了战争防御系统的搜索、跟踪目标的能力,侦察和制导已从单一的工作模式迅速发展到了复合工作模式的阶段,传统的作战武器所受到的威胁越来越严重,目标将不得不同时面对红外成像的观瞄与制导和激光测距与制导的威胁,单一功能的红外或激光隐身材料已不能起到对抗的作用,特别

是军用激光今后将逐步由 $1.06 \mu\text{m}$ 取代。但是,建立在高反射低吸收基础上的红外隐身材料和低反射高吸收基础上的激光隐身材料在工作原理上发生了矛盾^[1],因此,红外和激光复合隐身一体化材料和技术则是今后几十年内必定要解决的问题。本文首先介绍了国内外红外、激光隐身材料的研制情况和机理,分析了不同波段隐身之间的相互牵制,矛盾的因素,并探讨同时兼容的可行性。

收稿日期:2000-01-02

吴伶芝,1973 出生,硕士,主要从事红外隐身材料的研究工作

2 红外隐身技术

不同波段的电磁波有不同的特点,探测目标的机理不同,因而针对各个波段所使用的隐身技术也不相同。红外线是波长比人的视觉敏感波长(0.4 μm ~ 0.78 μm)更长的一段辐射(0.78 μm ~ 1 000 μm),分为近红外(0.78 μm ~ 1.5 μm)与热红外(1.5 μm ~ 14 μm)。红外探测系统是靠接收目标和背景之间存在温差和不同的红外反射、辐射特征而工作的。近红外的反射特性与中远红外的辐射特性是红外隐身必须兼备的性能,仅具其一,很难在高新技术条件下实现反红外探测的目的^[2]。采用红外反射材料模拟环境的红外特征实现近红外隐身,特别是静止、常温目标的防护常采用此法,最典型的是模拟绿色植物背景与砂土背景的红外隐身技术。如在近红外波段,模拟天然叶绿素红外反射曲线的颜料有:ZnO₂加到Cr - Co - TiO₂体系中的青绿色颜料,煅烧1 h的Cr₂O₃ - CoO - Sb₂O₃ 复合体,锌酸钴绿,Cr₂O₃ (1 mol) CoO(2 mol) TiO₂ (5 mol) ZnO(0.7 mol)在105 加热1 h制成的粘软深绿色颜料等^[2]。根据热辐射和红外探测的特点,热红外隐身是综合使用各种技术手段,消除目标和背景之间的温差,使目标的辐射特性尽量与背景相同。为了达到这一目的,涂敷低比辐射率的涂料是一种简便而有效的办法。如采用ZnO在常温至800 之间其 $\epsilon = 0.11$ 。

3 激光隐身技术

激光具有高的方向性、单色性和相干性。因此军事上常用向目标发射一定波长的激光,通过接受其反射回波来探知目标的距离。激光隐身所对抗的主要对象是激光测距机,激光制导系统和激光指示器。无论脉冲激光测距机或连续波激光测距机,都需要接受到一定强度的从目标反射的激光回波,才能正常工作,因此尽量降低反射率是激光隐身涂料的最主要指标。

研究表明^[3],采用激光隐身涂料涂敷在目标表面,若能使其反射率降低一个数量级以上,则其最大测程将减小到原来的1/2 ~ 1/3。因此,降低反射率应作为激光隐身涂料的主要指标。

4 红外、激光不同波段隐身的相互制约

实现红外隐身,目标物的红外反射特性应与环

境一致,可通过控制目标的红外辐射、降低目标与环境的对比度予以实现。为此,要求目标物表面材料具有高反射率低吸收率。目前军用激光器的波长主要是0.93 μm (GaAs)、1.06 μm (Nd⁺³:YAG激光发射器)、10.6 μm (CO₂)等,即在近红外到中红外区。实现激光的隐身,要求目标物表面材料具有低反射率高吸收率。因此,对于同一目标要同时达到红外与激光的隐身,就必须同时降低材料的发射率和反射率,这是一对矛盾。因为根据经典的热辐射理论——基尔霍夫定律,物体在热平衡状态时有: $\epsilon(\lambda, T) = \rho(\lambda, T)$ 即物体的发射率等于吸收率。对于不透明的涂料,根据能量守恒定律:

$$\epsilon(\lambda, T) + \rho(\lambda, T) = 1$$

$$\text{即: } \epsilon(\lambda, T) + \rho(\lambda, T) = 1$$

所以,在同一波段范围同时降低材料的 ϵ 和 ρ 达到红外与激光的隐身兼容是热平衡理论所面临的难题。增加材料反射率、降低发射率以求红外隐身时往往提高了材料对这一波长的激光的反射率,使得目标对激光“显形”。要做到红外和激光的隐身兼容,就必须克服两者对材料的一对矛盾要求^[1]。

5 红外、激光隐身兼容可能性分析

红外隐身要求表面反射率要高,而1.06 μm 激光隐身要求尽可能低的反射率,两者所处的波段范围相同,因此两者严重对立。由于红外探测和激光测距等对坦克的威胁都很大,故两者协调很重要。从国内外的一些资料上可以看出一些迹象,通常是在涂敷红外隐身涂料或多波段兼容隐身涂料的基础上对激光反射采取一些补救措施。一是采用对抗激光的方法,如发射烟幕弹等;二是牺牲局部范围的红外隐身。我们期望用同一种涂料能够达到红外、激光隐身的目的,具体说是使涂料在1.06 μm 附近出现较窄的低反射率带,而其他波段均为低辐射,以此来达到对激光的隐身,同时又要对红外隐身的影响不大。这一方法要求低发射带尽可能窄,因而也成了该方法的难点。

5.1 掺杂的半导体颜料

由于金属颜料的缺点,近年来出现的关于掺杂半导体颜料系统的研究特别值得注意。这种掺杂半导体可作为涂料体系中的非着色颜料,经过适当选

宇航材料工艺 2001年 第2期

配半导体载流子参数,可使涂料的红外和激光隐身性能都达到令人满意的结果,同时也不会妨碍涂层满足可见光伪装的要求。根据半导体连续光谱理论,可见和红外波段的光波在半导体中的传播特性与所谓等离子频率 ω_p 密切相关^[4]。等离子频率及相应的等离子波长由下式表示:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{N^2 e^2}{\epsilon_0 m}} \quad \text{或} \quad \lambda_p = \frac{2\pi c}{\omega_p} = \frac{2\pi c}{e} \sqrt{\frac{m_0}{N}}$$

其中的 m 为电子的有效质量, ϵ_0 为真空介电常数, N 为载流子浓度, e 为电子电荷, c 为真空光速。当入射光的频率 $\omega > \omega_p$ 时,半导体具有电介质的特性,有很高的透过率,很低的反射率和吸收率。当入射光的频率 $\omega < \omega_p$ 时,半导体具有金属的特性,有很高的反射率。而半导体的 ω_p 主要取决于它的载流子浓度 N 。载流子浓度可以通过掺杂进行控制,当 $N = 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 时, $\lambda_p \approx 1 \mu\text{m}$,掺杂半导体对可见光将有很高的透过率,对中远红外具有高的反射率。因此这种材料不仅可以满足中远红外的隐身的要求,而且还满足了可见光隐身的要求即低的反射率和低的太阳能吸收系数。

半导体材料对电磁光波的反射特性,根据 Hagen-Rubens 理论由下式决定:

$$R = 1 - \sqrt{\frac{\sigma_0}{\omega}}$$

其中 ω 为入射电磁波的频率, σ_0 为半导体的直流电导率,它由下式决定: $\sigma_0 = \frac{Ne^2}{m}$,其中 τ 为载流子的平均自由时间。保持 $N = 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 不变, $\tau = 2 \times 10^{-19} \text{ s}$ 时,对 $\lambda = 8 \text{ mm}$ 的毫米波反射率均为 0.45,进一步降低 τ 值还可以降低对雷达波的反射,因此掺杂半导体还具有对雷达波和毫米波隐身的相容性。

掺杂半导体一般选用 In_2O_3 或者 In_2O_3 和 SnO_2 。通过掺杂使得等离子波长处于合适的范围,使材料在 $1.06 \mu\text{m}$ 处具有强吸收低反射,在热红外波段具有低吸收高反射,达到两者隐身兼容。

5.2 光学干涉隐身机理^[3]

利用光学干涉原理来设计和研究光谱吸收涂料也是一种重要手段。若在折射率为 n_0 的入射介质

(若为空气, $n_0 = 1$) 和折射率为 n_1 的基底介质之间涂上一层厚度为 d 、折射率为 n 的薄层材料,当光垂直入射且薄层的光学厚度为 $nd = \lambda/4$ 时,此薄层的反射率:

$$R = \left(\frac{n_0 n_1 - n^2}{n_0 n_1 + n^2} \right)^2$$

对空气, $n_0 = 1$, 则

$$R = \left(\frac{n_1 - n^2}{n_1 + n^2} \right)^2$$

由于各种物质的折射率是可以查阅有关手册得到的,因此,只要适当选择具有合适折射率的红外隐身涂料并严格控制薄涂层的厚度,就可以制备出在某一特定波长反射率很小的涂料,达到红外与激光同时隐身的目的。但在实际涂敷时,由于涂层的厚度不易精确掌握,而且吸收波段窄,因此,该方法的实际应用具有一定的技术难度。

5.3 表面结构

为了兼顾可见光伪装,应当避免较强烈的镜面反射,为此,材料表面应具有一定的粗糙度,使反射呈漫反射形式。当物体不透红外时,其红外辐射和反射特性仅与表面的物质及形态有关^[5]。从红外隐身的需求出发,希望表面自身的热辐射和对周围辐射的反射所产生的信号都很低,而从激光隐身的角度出发,要求表面具有较小的反射回波。但如果材料是有低红外发射率和高大角度激光反射率,就有可能在降低目标红外可视性的同时,降低目标的激光可视性,实现对双重探测方式的隐身^[1]。因此,我们寻找一种具有一定粗糙度的漫反射面,同时具有低的比辐射率和低的镜反射率以及较高的漫反射率。

研究表明^[6],当表面具有一定的粗糙度时,表面无序引起的散射关系发生了变化,入射电磁波和表面电磁模式的耦合成为可能。而且,入射电磁波转换成表面电磁模式以后,在沿表面传播的过程中,由于表面粗糙的无序性形成的随机散射势,使表面电磁模式形成所谓 Andersson 局域而被表面吸收,比辐射率、镜反射率和漫反射率都很低,且漫反射比可以有较高的值,这种表面不遵从经典的 Kirchhoff 定律。因此,入射红外光与微观粗糙表面相互作用的结果, (下转第 9 页)

Inter. Conf. ER Fluids, MR Suspensions and Their Applications, Yanezawa Japan, July 1997, Sigarpore, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1998: 27

18 Wu C W, Conrad H. Electrorheology of suspensions of Si particles with an oxide film in silicone oil. In: Nakana M, Koyama K eds. Proc. 6th Inter. Conf. ER Fluids, MR Suspensions and Their Applications, Yanezawa Japan, July 1997, Sigarpore, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1998: 43

19 Gong R Z, Guan J G, Yuan R Z. Preparation and electrorheological properties of polyaniline-barium titanate nanocomposites. In: Tao R, Shaw S eds., Proc. 7th Inter. Conf. ER Fluids, MR Suspensions, Honolulu Hawaii, July 1999, (in press)

20 Kim J W, Choi H J. Synthesis and electrorheological characterization of polyaniline and Na^+ -montmorillonite clay nanocomposite. In: Tao R, Shaw S eds., Proc. 7th Inter. Conf. ER Fluids, MR Suspensions, Honolulu Hawaii, July 1999, (in press)

21 Li X C, Zhang L C, Jin R G. A study of the electrorheo-

logical effect of $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ /poly acrylate composite particle. Polymers for Advanced Technologies, 1999; 10(1~2): 90

22 Honda T, Sasada T, Kurosawa K. The electroviscous effect in the MBBA liquid crystal. Jpn. J. Appl. Phys., 1978; 17(9): 1525

23 Chiang Y C, Jamieson A M, Dawasumi M, Percec V. Electrorheological behavior of main-chain liquid crystal polymers dissolved in nematic solvents. Macromolecules, 1997; 30: 1992

24 Yang I K, Shine A D. Electro-rheology of a nematic poly(π -hexylisocyanate) solution. J. Rheol., 1992; 36(6): 1079

25 Tse K L, Shine A D. Electrorheology of poly(π -hexyl-L-glutamate) Polym. Prepr., 1994; 35(2): 383

26 Inoue A, Mannewa S. Electrorheological effect of liquid crystalline polymers. J. Appl. Polym. Sci., 1995; 55: 113

27 Yamada H, Tangiguchi Y, Inoue A. ER properties of liquid crystalline polymers. In: Tao R, Shaw S eds., Proc. 7th Inter. Conf. ER Fluids, MR Suspensions, Honolulu Hawaii, July 1999, (in press)

(上接第3页)

不只是形成经典上的反射和吸收,同时还激发了沿表面传播的表面电磁模式,也就是说,入射光与粗糙表面作用的结果可能导致 $n < 1$ (透射率 $S = 0$ 时),这就从理论上提供了一条同时降低、镜反射率(r_m)和漫反射率(r_D)的可能途径。

6 结束语

随着多波段探测技术的发展,隐身技术对涂料的要求除了红外与激光性能外,还应包括涂料的可见光特性、雷达波性能以及对太阳辐射的吸收性能等,仅具其一,很难在高技术条件下实现反光电探测的目的。这一模型代表了隐身涂料的发展趋势,有许多工作有待我们去解决。

参考文献

- 1 周建勋. 红外与激光复合隐身涂料的性能研究. 红外与激光技术, 1992; 2: 30
- 2 康青. 红外隐身机理与应用. 红外技术, 1992; 18(1): 25
- 3 李洪. 激光隐身涂料的初步研制. 隐身技术, 1993; 2: 59
- 4 Bach W et. al. Materialien Eur Multispectralen Tarnung Invisuellen. IR - and Micro/Millimeterwellen Bereich, 1987; De3606691
- 5 徐则川等. 热红外低比辐射、高漫反射比表面. 华中理工大学学报, 1994; 25(4): 83
- 6 Aspnes DE. Optical response of microscopically rough surface. Phys. Rev. B, 1990; 41(10): 10334 ~ 10343