

文章编号: 1672-8785(2012)06-0001-06

红外隐身涂层的研究进展

赵新龙¹ 赵 竞²

(1. 哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学复合材料研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 红外隐身技术在军事应用中显得十分重要, 而涂层材料则是隐身技术中的一个关键方面。首先从斯蒂芬-玻尔兹曼定律和基尔霍夫定律出发, 分析了红外隐身的基本原理, 介绍了红外隐身涂层的分类情况, 说明了其组成中不同因素的影响作用并得出了低红外发射率涂层的理想结构。然后分类别地介绍了红外隐身材料的研究进展, 并进一步预测了其发展趋势。未来的研究将主要包括两个方面: 一是研制新的隐身材料; 二是寻求各种隐身技术的兼容。

关键词: 红外隐身; 发射率; 隐身材料; 涂层; 研究进展

中图分类号: TN213 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.06.001

Progress of Infrared Stealth Coating

ZHAO Xin-long¹, ZHAO Jing²

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Center for Composite Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Infrared stealth technology is very important in military applications and the stealth coating material is a crucial part in the infrared stealth technology. Firstly, according to the Stefan-Boltzmann law and Kirchhoff law, the principle of infrared stealth is analyzed and the category of infrared stealth coating is presented. Through analysis of different influence factors of coating composition, the ideal coating structure with low infrared emissivity is derived. Then, the research progress of different infrared stealth materials is presented. Their development trend is predicted. The future research will include the fabrication of new stealth materials and the combination of various stealth technologies.

Key words: infrared stealth; emissivity; stealth material; coating; development

0 引言

红外辐射俗称红外线, 其波长范围为 $0.76 \sim 1000 \mu\text{m}$ 。人们一般将红外线分为近红外线 ($0.76 \sim 3.00 \mu\text{m}$)、中红外线 ($3 \sim 6 \mu\text{m}$)、远红外线 ($6 \sim 15 \mu\text{m}$) 和极远红外线 ($15 \sim 1000 \mu\text{m}$) 四个波段。大气对红外线衰减较弱的波段包括 $0.76 \sim 2.60 \mu\text{m}$ 波段、 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段和 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段

(即“大气红外窗口”)。红外辐射在大气窗口之外基本上是不透明的。此时, 红外探测是依靠因目标与背景的温度不同而引起的热辐射差异来探测目标的^[1]。

红外隐身技术是指通过降低目标的红外辐射强度使其低于红外探测器的灵敏度, 或者通过改变目标的红外辐射频率范围使其避开大气

收稿日期: 2012-03-25

作者简介: 赵新龙(1988-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要研究方向为飞行器的隐身性能设计。

E-mail: zhaoxinlong007@gmail.com

红外窗口, 从而使其难以被发现、识别、跟踪和攻击的技术手段^[2-3]。

在 1967 年到 1993 年之间因战争损失的直升机和飞机中, 有 89 % 是被红外制导导弹击落的^[4]。在目前人们采用的探测器中, 红外探测器占到 30 % 左右。而据统计可知, 有 60 % 的精确制导武器是采用红外制导技术的^[5], 因此红外隐身技术在战争中的作用日益突出。

常见的红外隐身方法包括降低红外辐射强度、改变红外辐射特性和采用光谱转换三种^[6], 而这三种方法均可通过红外隐身涂层来实现。因此, 红外隐身涂层在红外隐身技术研究中显得十分重要。

1 红外隐身的基本原理

根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律和物体全波长半球向发射率定义^[7], 一个物体在所有可能的方向和波长范围内的辐射功率为

$$E = \varepsilon E_b = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

式中, ε 为对所有可能的方向和波长求平均值的全波长半球向发射率(无量纲); E_b 为黑体发射的全波长功率(单位为 W/m^2); T 为目标的绝对温度(单位为 K); σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 其值为 $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

由此可知, 目标的红外发射率取决于其绝对温度和发射率。由于绝对零度不可能达到, 所有的物体都在不断地产生红外辐射。而用于降低物体的红外辐射的手段只有降低发射率 ε 和降低温度两种, 这也就是红外隐身的两种主要手段。在此, 本文仅讨论降低发射率 ε 的方法。

红外线入射到物体表面时会分别被吸收、反射和透射。根据能量守恒定律, 物体对红外线的吸收率 α 、反射率 ρ 和透射率 τ 满足以下关系式^[5]:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2)$$

对于不透明物体, 透射率 $\tau = 0$ 。由此可知, $\alpha + \rho = 1$ 。

根据基尔霍夫定律^[8], 在热平衡条件下, 物体的吸收率等于其发射率:

$$\alpha = \varepsilon \quad (3)$$

由此可知, 物体对红外辐射的反射率越大, 吸收率就越小, 因而红外发射率也会越小。于是, 红外隐身对材料提出的低发射率要求可以等价地被转变为对低吸收率的要求。

2 红外隐身涂层的分类和组成

隐身材料从成型工艺和承载能力上可以分为涂敷型材料和结构型材料两种。其中, 涂敷型是指在结构表面涂敷具有隐身功能的涂料, 而结构型是指赋予材料隐身和承载双重功能(常见的有层板型和夹心型)^[9]。红外隐身材料研究的重点是涂层型材料^[10]。根据使用性质的不同, 可以将涂层型材料划分为红外低辐射材料和红外伪装材料两种^[11]。在此, 本文讨论红外低辐射材料。

红外隐身涂层是通过控制目标表面的红外发射率来降低其红外辐射能量, 从而实现红外隐身的。红外隐身涂层主要由颜料、黏结剂以及一些功能性助剂组成。其中, 颜料和黏结剂是影响涂层红外隐身性能的主要因素^[5](颜料含量对复合涂层的红外发射率具有决定性的影响^[12])。

新型隐身材料需要满足“轻、薄、宽、强、多”等多项要求。其中, “轻”是指材料的质量轻; “薄”是指材料的厚度薄; “宽”是指隐身的频段宽; “强”是指隐身材料的吸波性强; “多”则是指隐身材料的功能多(可同时抑制红外辐射和吸收雷达波)^[13]。

2.1 颜料

目前, 红外隐身涂料配方中的颜料一般可以分为金属类颜料、着色颜料和半导体颜料等^[14]。

2.1.1 金属类颜料

前文已述, 不透明物体的反射率越高, 发射率越低。因此, 具有较高反射率的金属是热隐身涂料中最常用和最重要的颜料种类。其中, 最常用的是质轻、价廉、易得的铝。

然而金属材料具有高反射性, 这虽然有利于降低红外发射率, 但却增加了对雷达波、激光和可见光的反射, 因而不利于雷达隐身、激光隐身和可见光隐身。据相关资料报道, 热隐身涂料中金属颜料的质量含量通常在 20 % ~ 40 % 之间。

2.1.2 着色颜料

红外隐身选择着色颜料主要是为了与可见光隐身相兼容。已用于或者已被考虑用于红外隐身涂料的着色颜料按性质可分为金属氧化物与氢氧化物颜料、硫化物颜料、硒化物颜料、无机盐颜料和有机颜料五大类。

然而, 大多数着色颜料并不具备可降低发射率的特性^[16]。

2.1.3 半导体颜料

按照导电载流子产生机理的不同, 半导体可以分为本征半导体和杂质半导体。半导体颜料大多属于后者, 其红外性能及物理结构和形貌均会随着掺杂材料的种类和掺杂浓度而变化。半导体颜料可以通过掺杂控制其红外反射谱, 从而改变红外发射率, 并且易于适应多波段隐身兼容^[14]。

2.2 粘合剂

涂料在红外波段的吸收至少有 60 % 取决于粘合剂^[17]。粘合剂是红外隐身涂料的基本组成部分。红外隐身涂料所用的粘合剂必须具备两个基本性能: 一是保护颜料, 在使用过程中要使其红外特性保持不变; 二是在所选光谱范围内对红外透明。红外隐身涂料配方中的粘合剂大致可以分为有机粘合剂和无机粘合剂两种^[18]。

2.2.1 无机粘合剂

无机粘合剂的性能比较简单, 红外吸收率也较低, 但物理机械性能和施工性能较差。根据参考文献^[17]可知, 研究人员在比较了醇酸树脂、丙烯酸树脂、环氧树脂、氯化橡胶、松脂、无机硅酸盐以及无机磷酸盐等多种粘合剂的热红外性能之后, 认为其中最理想的是无机磷酸盐基料。

2.2.2 有机粘合剂

我们可以从有机化合物连接键和基团来大致判断其红外吸收能力。大多数树脂在近红外区并无强烈吸收, 但在热红外区由于官能团的分子振动 (如波段位于 3.3 μm (碳氢伸缩振动吸收峰) 和位于 5.7 μm (羰基伸缩振动吸收峰) 等), 其具有强烈的吸收。通过选用不含这些官能团的树脂, 可以减少热红外波段的强烈吸收。根据参考文献^[17]可知, 研究人员得出了各种有机粘合剂在红外波段的发射率大小排序: 有机硅涂料 > 丙烯酸涂料 > 环氧涂料 > 聚酰胺涂料 > 聚烯烃涂料。

2.3 功能性助剂

功能性助剂, 又称添加剂或功能填料, 是红外隐身涂料的另一个重要组成部分。作为一种特殊的功能性涂料, 为了满足不同的需求, 红外隐身涂料往往还要添加其他助剂, 以达到满足某种需求的目的。对助剂的要求是在满足性能需求的前提下应尽可能减少其含量^[19]。常见的功能性助剂有分散剂和增稠剂等。

分散剂是一种能够提高和改善涂料分散体系稳定性的界面活性物质, 它在涂料中可以改善和提高功能填料的分散性能, 使得涂料体系中的功能填料以合适的粒径形态分布。分散剂在涂料储存和施工等方面有着十分重要的作用^[20]。增稠剂是一种流变助剂, 它不仅可以使涂料增稠, 防止施工中出现流挂现象, 而且还可以赋予涂料优异的机械性能和贮存稳定性。对于黏度较低的水性涂料来说, 增稠剂是非常重要的一类助剂^[21]。

3 低红外发射率涂层 (LIREC) 的影响因素

根据参考文献^[5], 一般涂料由颜料和黏结剂组成。其中, 颜料主要起反射和降低发射率的作用; 黏结剂主要起成膜作用, 以保证其理化性能。在通常条件下, 目标表面涂覆低红外发射率涂层可以明显降低其热辐射能量, 从而取得很好的红外隐身效果, 所以低红外发射率涂层的研制工作是红外隐身涂料的关键技术。

综合考虑各方面的因素,低红外发射率涂层的理想结构为^[5]:颜料选用高电导率金属材料;粒子形状为薄片状;黏结剂的红外吸收系数要低;涂层表层的黏结剂较薄,薄片状颜料整齐紧凑地平铺,而且粒子间隙要小。

4 红外隐身涂层的研究现状及进展

刁训刚等人^[22]采用磁控溅射法制备了氧化铟锡薄膜、掺铝氧化锌薄膜和 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 多层膜等三种红外发射率可以调控的低红外发射率纳米氧化物半导体薄膜,其红外发射率分别为在 0.1 ~ 0.9 内连续可调、在 0.25 ~ 0.9 内连续可调和最低可达 0.05。张伟刚等人^[23]通过引入一维光子结构的相关理论,提出了一种可用于模拟低红外发射率复合涂层最佳颜料含量的方法。其实验验证结果(最低发射率为 0.2)与模拟计算结果一致,表明此方法切实可行。邢宏龙等人^[24]采用乳液聚合法合成了聚异戊二烯/丙烯腈黏合剂。该黏合剂在 8 ~ 14 μm 波段对红外基本透明,红外发射率为 0.82,可以应用于热红外隐身涂层,而且与三元乙丙橡胶及其改性产品相比,其粘接性能好,易于制备且环保。参考文献^[25]介绍了中国科学院上海光学精密机械研究所成功制备的 IRG-05 氟镓酸盐玻璃,其在 3 ~ 5 μm 波段具有更高的红外透过率。杜永等人^[26]用甲基丙烯酸甲酯、丙烯酸丁酯和二羟基酯类交联单体对三元乙丙橡胶进行了接枝聚合,所制得的热红外隐身涂料粘合剂在 8 ~ 14 μm 波段具有较好的红外透明性,而且二羟基酯类交联单体也提高了粘合剂的物理机械性能。

为了满足复合隐身的需求,杨爱弟等人^[27]提出了热红外相变-降温复合隐身涂层,并对涂层的作用原理及可行性进行了论述。刘江等人^[28-29]提出了以高吸水/保水材料为基底的红红外隐身复合材料的概念和模型设计,并通过实验初步验证了其可行性和有效性,进而设计出了两种基于高吸水/保水材料的红外隐身复合材料制作方法。崔方等人^[30]通过总结得到,在红外隐身涂料中掺杂半导体材料及低发射率颜料

时,恰当选择半导体载流参数,可以使涂料同时兼顾可见光、红外和激光复合隐身。

雷达吸波材料要求具有高吸收率和低反射率,而红外隐身材料则要求具有低发射率^[31]。由式(3)可知,在热平衡条件下,物体的发射率等于吸收率,因而二者要求相互矛盾。同时在现代战场上,雷达探测技术在各种探测器中仍然占据主导地位^[32],因此与雷达兼容隐身也是红外涂层研究的一个重要方向。李凤雷等人^[32]采用双层涂覆法制备了雷达-红外隐身兼容涂层。当 20 μm 厚的顶层红外涂层被填充 40% 的特殊形态片状微米级铝粉时,其红外发射率可以达到 0.15 左右,而且对雷达吸波性能影响较小。陈砚朋等人^[33]以经包覆改性后的铁基合金粉作为颜料制备了雷达-红外兼容隐身材料,其隐身效果良好。而刘凌云等人^[34]从理论上证明,通过双层涂层结构可以实现红外与雷达波兼容隐身。Yang C C 等人^[35-36]采用原地聚合方法制备了 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ /聚苯胺、 BaTiO_3 /聚苯胺和 $(\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}+\text{BaTiO}_3)$ /聚苯胺三种复合涂层,其在 2 ~ 18 GHz 和 18 ~ 40 GHz 范围内具有良好的吸波性能。同时,热红外成像结果表明,覆有聚苯胺的涂层的红外可探测性明显降低。

热老化等行为会导致涂层的发射率升高^[37]。针对红外隐身低发射率材料研究中对涂层的耐腐蚀性、力学性能和抗老化性等研究较少的现状^[5],Wu K H 等人^[38]采用溶胶凝胶法制备了炭黑含量(10 ~ 30 wt%)和 PANI/CB 含量(10 ~ 30%)不同的有机改性硅酸盐-聚苯胺/炭黑(Ormosil-PANI/CB)复合涂层。通过对其旋涂与铝合金表面进行热重分析(TGA),可以看出其防腐蚀保护作用和红外隐身效果均有大幅度的提高。邵春明等人^[5]通过对 EPDM 和 PU 类树脂进行改性,制备了低红外发射率涂层,并测试了其耐热老化性能及耐紫外光老化性能。陈慧敏等人^[39]研究了以铝粉为填料聚、以氨酯为粘合剂的涂层的力学性能。结果表明,在 80 $^{\circ}\text{C}$ 温度下用偶联剂处理基板时,厚度为 30 μm 的涂层具有最佳力学性能,同时可以保持低红外发射率。张弛等人^[40-41]采用电化学腐蚀的对比试验研究表明,对于经有机改性处理后的低红外发射

率涂层, 由于引入的 $-\text{COOH}$ 和 $-\text{OC}_2\text{H}_5$ 等亲水基团会促使水向涂层内渗透, 这也会影响其在模拟海水 (3.5 wt% NaCl 溶液) 中的长期防腐蚀效果。余慧娟等人^[42-43]认为微米级片状导电性漂浮态填料是获得低红外发射率涂层的关键因素, 也是低红外发射率涂层制备基础理论的一大进步。他们制备了在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段发射率低至 0.10 的聚亚安酯 / 铜涂层。通过采用界面改性技术及面漆涂覆方法, 可以大大提高涂层的力学性能和抗老化性, 初步实现了涂层工程化。闫小星等人^[44]的研究结果表明, 通过 Arrhenius 关系可以预测低发射率 EPU/Al 复合涂层的力学寿命。当冲击强度降至某一水平时, 不同马赫数下的计算结果与实验结果较好吻合。王雅君等人^[45]通过总结可改善涂层耐腐蚀性能的四方法, 提出了改性的微米级、片状、导电性、非浮型填料。这样既能保证涂层的低红外发射率, 又能使涂层的耐腐蚀性能得到改善。

针对目前人们注重低发射率红外隐身材料研究的现状, 陈皿等人^[46]认为在红外隐身设计中不能盲目使用低发射率材料, 而应充分考虑背景辐射的特征, 并根据目标与背景的辐射对比度进行合理设计, 以减小目标与背景的差异。谢民勇等人^[47]完善了红外辐射对比度计算模型, 并通过实验验证了这种方法的可行性。

黄勇等人^[48]开创性地提出了基于相干热辐射的红外隐身技术, 并研究了梯度折射率介质层、负折射率薄膜以及 SiC 基底 / 负折射率薄膜复合层的热辐射特性。结果表明, 这种复合层在一定条件下可以获得方向性或单色性良好的相干热辐射。

5 红外隐身涂层的发展趋势

由于探测手段的多元化, 红外隐身必然要与其他隐身方式相兼容, 因此人们未来将会更加注重全波段隐身技术^[49], 即兼顾红外隐身、雷达隐身、激光隐身和可见光隐身的隐身技术。这一点很早就引起研究人员的重视了。正如洛克希德公司 F-117 设计小组的负责人 Ben Rich

所说: “隐身飞行器必须在六个方面满足隐身的要求 (雷达隐身、红外隐身、视觉隐身、声学隐身、烟雾隐身和轨迹隐身)。若不满足, 必将失败^[50]。”其中, 有关兼容隐身的基础理论研究显得十分关键。

材料是隐身技术的核心问题, 本文前面叙述的诸多内容也是围绕材料展开的。因而, 在新形势下也必然要求研制新型多功能隐身材料。就目前的状况而言, 新型隐身材料包括手性材料、纳米隐身材料、导电高分子聚合物材料、陶瓷类吸收剂、盐类吸收剂、多晶铁纤维吸收剂和等离子体吸波材料^[51]。

单纯就红外隐身而言, 我们要探索红外发射率更低材料, 同时还要兼顾其抗腐蚀性、抗老化性和力学性能, 并加快涂料的工程应用进程。我国在 863 计划中设有专门的红外隐身课题。虽然有报道说涂料的红外发射率达到 0.5 以下, 但是这些涂料均未进入实用阶段^[8]。

6 结语

先进的红外探测技术和红外制导打击手段对红外隐身提出了新的更高的要求, 而材料是红外隐身技术中的关键。在考虑低红外发射率材料的隐身性能的同时, 必须解决材料的力学性能、抗腐蚀和抗老化等问题。在探测手段呈现多元化的今天, 红外隐身必须与其他隐身方式相兼容, 这样才能最终达到隐身效果。因此, 探索新材料和寻求兼容隐身已经成为未来隐身技术的两大发展趋势。

参考文献

- [1] 崔锦峰, 马永强, 杨保平, 等. 红外隐身材料的研究现状及发展趋势 [J]. 表面技术, 2010, 39(6): 71-74.
- [2] 陈慧华. 基于介孔氧化镧红外吸波材料的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2008.
- [3] 张长青. 碳团簇型吸波材料的计算机辅助设计与实验研究 [D]. 成都: 四川大学, 2007.
- [4] Shripad P M, Hemant R S, Arvind R. Infrared Signature Studies of Aerospace Vehicles [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2007, 43(7-8): 218-245.
- [5] 邵春明. 低红外发射率涂层 (LIREC) 的组成结构与性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [6] 高颂, 乐洪宇. 国外红外隐身技术的发展 [J]. 舰船电子工程, 2010, 30(10): 17-22.

- [7] 英克鲁佩勒著. 葛新石, 叶宏译. **传热和传质基本原理 (第六版)** [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [8] 杨世铭, 陶文铨. **传热学 (第四版)** [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [9] 冯彬. 层板结构吸波复合材料吸波性能研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [10] 张拦, 王璐, 刘琼. 红外隐身材料的研究进展 [J]. **洛阳理工学院学报 (自然科学版)**, 2011, **21**(1): 5-9.
- [11] 陈彪, 张春元. 红外隐身技术在军事上的应用 [J]. **光学技术**, 2006, **32**(Z1): 577-580.
- [12] 张伟钢, 徐国跃, 徐飞凤. 低红外发射率复合涂层最佳颜料含量模拟方法 [J]. **红外技术**, 2011, **33**(12): 704-706.
- [13] 张文毓. 多频段兼容雷达隐身材料的研究及应用进展 [J]. **船舶设计与建造**, 2009, **21**(2): 7-10.
- [14] 田乃林. 红外隐身方法与材料的发展 [J]. **化工进展**, 2002, **21**(4): 283-286.
- [15] 孙国亮. 低红外发射率半导体颜料的制备方法与应用现状 [J]. **电镀与涂饰**, 2010, **29**(9): 65-67.
- [16] 李靖宇, 杜仕国, 施冬梅, 等. 红外隐身涂料粘合剂的研究进展 [J]. **表面技术**, 2009, **38**(4): 72-74.
- [17] 乐洪宇. 红外隐身技术与隐身涂料的发展 [J]. **战术导弹技术**, 2011, **25**(5): 121-126.
- [18] 何亮. 红外隐身涂料的制备与应用研究 [D]. 合肥: 安徽理工大学, 2011.
- [19] 王云普, 杨超, 高敬民. 水性体系填料用高分子分散剂的研究 [J]. **环境友好型涂料与涂装特刊**, 2006, **11**(1): 35-38.
- [20] 谢筱薇, 傅和青, 黄洪, 等. 水性涂料用增稠剂的选择及研究进展 [C]. 宁波: 首届涂料用助剂论坛及应用技术交流会, 2005.
- [21] 刁训刚, 郝维昌, 王天民, 等. 低发射率薄膜的红外隐身特性研究 [J]. **宇航材料工艺**, 2007, **28**(5): 39-42.
- [22] 张伟钢, 徐国跃, 徐飞凤. 低红外发射率复合涂层最佳颜料含量模拟方法 [J]. **红外技术**, 2011, **33**(12): 704-706.
- [23] 邢宏龙, 马妍, 陶启宇, 等. 低红外发射率黏合剂聚异戊二烯 / 丙烯腈的制备研究 [J]. **激光与红外**, 2012, **42**(1): 51-54.
- [24] 范有余, 羊毅, 姜雄伟, 等. 一种新型中红外材料及其隐身功能研究 [J]. **红外与激光工程**, 2010, **39**(1): 12-16.
- [25] 杜永, 李梅, 邢宏龙. 热红外隐身涂料粘合剂的制备 [J]. **山西化工**, 2006, **26**(6): 1-3.
- [26] 杨爱弟, 王智慧, 张存, 等. 热红外降温 - 相变复合隐身涂层的研究 [J]. **现代防御技术**, 2009, **37**(5): 21-24.
- [27] 刘江, 沈卫东, 宋思洪, 等. 基于高吸水 / 保水材料的红外隐身技术研究 [J]. **光学与光电技术**, 2009, **7**(5): 90-92.
- [28] 刘江, 沈卫东, 宋思洪, 等. 基于高吸水 / 保水材料的红外隐身复合材料的可行性研究及效能评价 [J]. **应用光学**, 2011, **30**(1): 144-148.
- [29] 崔方, 沈卫东, 张振邦, 等. 光电复合隐身涂料的实现方法研究 [J]. **红外**, 2006, **27**(6): 21-24.
- [30] 阎霄霞. 雷达 / 红外兼容性隐身材料的研究进展及其发展方向 [J]. **技术物理教学**, 2010, **18**(3): 46-47.
- [31] 李风雷, 徐国跃, 余慧娟, 等. 红外隐身涂层的制备及其与雷达吸波涂料的兼容性研究 [J]. **红外技术**, 2009, **31**(7): 415-419.
- [32] 陈砚朋, 徐国跃, 陈慧敏, 等. 铁基合金粉包覆改性及在雷达 / 红外兼容隐身中的应用 [J]. **材料导报 B: 研究篇**, 2011, **25**(7): 50-52.
- [33] 刘凌云. 红外与雷达波兼容隐身复合涂层的机理研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [34] Yang C C, Gung Y J, Hung W C, et al. Infrared and Microwave Absorbing Properties of BaTiO₃/Polyaniline and BaFe₁₂O₁₉/Polyaniline Composites [J]. **Composites Science and Technology**, 2010, **70**(3): 466-471.
- [35] Yang C C, Gung Y J, Shih C C, et al. Synthesis, Infrared and Microwave Absorbing Properties of (BaFe₁₂O₁₉+BaTiO₃) / Polyaniline Composite [J]. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 2011, **323**(7): 933-938.
- [36] 郭腾超, 徐国跃, 陈砚朋, 等. 硅酸盐基耐高温涂层的制备及发射率研究 [J]. **红外技术**, 2010, **32**(12): 696-700.
- [37] Wu K H, Chang Y C, Yang C C, et al. Synthesis, Infrared Stealth and Corrosion Resistance of Organically Modified Silicate-polyaniline/Carbon Black Hybrid Coatings [J]. **European Polymer Journal**, 2009, **45**(10): 2821-2829.
- [38] 陈慧敏, 徐国跃, 王雅君, 等. 聚氨酯基低红外发射率涂层的力学性能研究 [J]. **材料导报 B: 研究篇**, 2011, **25**(1): 74-80.
- [39] 张驰, 李澄, 周康达, 等. 三种聚氨酯基低红外发射率涂层的防腐蚀效果研究 [J]. **红外技术**, 2010, **32**(4): 217-222.
- [40] 张驰. 隐身涂料的防腐蚀性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [41] 余慧娟. 低红外发射率涂层的制备及其耐腐蚀性能的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [42] Huijuan Yu, Guoyue Xu, Xingmei Shen, et al. Low Infrared Emissivity of Polyurethane/Cu Composite Coatings [J]. **Applied Surface Science**, 2009, **255**(12): 6077-6081.

(下转第 45 页)