

红外隐身材料的研究现状及发展趋势

崔锦峰¹, 马永强¹, 杨保平¹, 马宏², 郭军红¹, 郑愉¹

(1. 兰州理工大学, 兰州 730050; 2. 北方涂料工业研究设计院, 兰州 730050)

[摘 要] 为提高武器装备生存能力和突防能力,最简单而有效的隐身手段是在武器装备的表面涂覆红外隐身材料。介绍了红外隐身材料的隐身原理,综述了掺杂氧化物半导体、掺杂光子晶体、相变微胶囊和粘合剂等红外隐身材料的研究现状及最新进展,指出了多频段兼容隐身、新型隐身材料的使用和智能隐身会是未来红外隐身材料的发展趋势。

[关键词] 红外隐身材料; 吸收剂; 粘和剂

[中图分类号] TB34

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2010)06-0071-04

Research Situation and Development Trend of Infrared Stealth Materials

CUI Jin-feng¹, MA Yong-qiang¹, YANG Bao-ping¹, MA Hong², GUO Jun-hong¹, ZHENG Yu¹

(1. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. North Paint & Coatings Industry Research and Design Institute, Lanzhou 730020, China)

[Abstract] For improving the viability and penetrative ability of the weapon, the most effective and common way is applying the infrared stealthy materials on the surface of the weapon. It briefly introduced the principle of infrared stealth materials, discussed the current status of the stealthy materials, such as doped semi-conductor oxide, doped photonic crystals, phase change microcapsule and binder etc. Then introduced the newest progress and also prospected that multi spectral composite stealthy materials, using of the new pattern of the stealth materials and smart stealthy materials will be the development trend of the stealthy materials.

[Key words] infrared stealthy materials; absorbent; binder

随着科学技术的发展,用于发现目标的侦查、探测手段日益先进,为了避免军事目标和武器装备被敌方发现、摧毁,使用隐身材料提高其生存能力和突防能力成为最简单而有效的手段,隐身材料的研究成为军事技术发展的重要方向。

文中对红外隐身材料的隐身原理和当前研究应用较多的红外隐身材料的研究现状及最新进展作以介绍,并对红外隐身材料未来发展趋势作出了预测。

1 红外隐身材料的隐身原理

大气的红外窗口有 3 个波段:1~2.5 μm , 3~5 μm 和 8~14 μm 。红外辐射在这 3 个波段外基本上是不透明的,其中 3~5 μm 和 8~14 μm 这部分红外线辐射来自目标和背景本身温度所引起的热辐射,故又称为热红外线辐射。红外探测系统就是依靠目标和背景本身温度所引起的热辐射差别来发现和识别目标。

根据斯蒂芬-波耳茨曼定律 $M = \epsilon\sigma T^4$ 可知,降低目标表面发射率和控制目标表面温度可实现红外隐身。红外隐身材料本身具有低发射率或较强温控能力,可使目标和背景本身温度所引起的热辐射差减小到红外探测器探测不到或识别不出的程度,达到隐身目的。

在斯蒂芬-波耳茨曼定律中, M 为物质的辐射出射度; ϵ 为物质的表面发射率; σ 为波耳茨曼常数; T 为物质表面的热力学温度^[1]。

2 红外隐身材料的研究现状

目前研究较多并应用于军事用途的红外隐身材料主要由吸收剂和粘结剂组成。吸收剂也称吸收材料或吸波材料,其作用主要是吸收,透过红外探测设备的电磁波,使探测设备得到的反射信号强度大大降低;粘结剂的主要作用是吸收剂混合、成膜,以便涂覆在军事

目标和武器装备表面上,起到隐身作用。

2.1 用于红外隐身材料的吸收剂的研究

目前研究较多并部分用于军事用途的吸收剂主要有掺杂氧化物半导体、掺杂光子晶体和相变微胶囊(PCM)等。

2.1.1 掺杂氧化物半导体

掺杂氧化物半导体,如氧化铟锡(ITO)、掺铟氧化锡(ATO)等,其电磁辐射吸收机理为介电损耗,包括电极化和传导损耗,主要由复介电常数的虚部(ϵ_2)决定,在微波、毫米波作用下,发生电子极化、离子极化、固有偶极子的取向极化和界面极化等,实现在可见光波段的高透明、红外波段的高反射低发射以及雷达波段的高吸收^[2-5],掺杂氧化物半导体主要用于可见光隐身、红外隐身以及红外雷达兼容隐身。

王自荣^[6]等对 ITO 涂料在 8~14 μm 波段进行了系统研究。通过掺杂工艺对载流子浓度进行调制,使掺杂半导体填料的涂层在热红外线波段具有较低的发射率,从而达到了隐身的效果。武晓威等^[7]采用液相共沉淀法制备了锌铝氧化物(ZAO)掺杂半导体粉末材料,系统研究了制备工艺对 ZAO 粉末红外发射率的影响,研究表明:当反应物终点 pH 值为 8.5、反应时间为 2.5 h、煅烧温度为 800 $^{\circ}\text{C}$ 、煅烧时间为 2 h、 Al_2O_3 的掺杂量为 3% (质量分数,后同)时所得的 ZAO 粉末的红外发射率最低;ZAO 掺杂半导体粉末的晶体结构为 ZnO 的铅锌矿结构;粒子形状近似为椭圆形,平均粒径为 5~10 μm ;在中红外(3~5 μm)和远红外(8~14 μm)波段均具有较低的红外发射率。Shan 等^[8]通过胶原接枝 PMMA 共聚物颗粒与氧化铟纳米粒子复合,8~14 μm 的红外发射率由原本单组分的 0.851 以上降到最低的 0.576。

2.1.2 掺杂光子晶体

光子晶体是指介电常数(或折射率)空间周期性分布而具有光子带隙的特殊材料。光子晶体最显著的特性是光子禁带的存在,频率处于禁带中的电磁波不能在光子晶体中传播,意味着处于禁带中的入射电磁波将被全反射。如果在光子晶体中引入缺陷,光子禁带中将产生相应的缺陷能级,称为光子局域,相应频率的入射电磁波可以透过光子晶体。利用光子晶体的禁带和局域特性,通过合理的设计,掺杂光子晶体可以实现“光谱挖孔”结构,在常见的激光波长(如 10.6 μm)附近的窄波段内具有低反射率,而在红外的大部分波段(如 8~14 μm)具有高反射率(低发射率),从而实现红外与激光隐身的兼容。

Wang Z J^[9]等人利用高低折射率的多孔硅交替排列而制成一维光子晶体,并从实验和理论上研究了其

在红外区域的光学特性,得到了中心波长在 3 μm 、带宽为 113 μm 的光学带隙,从而为其在红外热阻隔方面的应用提供了有益的探索。张民^[10]等利用传递矩阵方法,研究作为红外隐身材料的 $\text{PbTe}/\text{Na}_3\text{AlF}_6$ 一维光子晶体结构在中远红外波段的反射特性。结果表明: $\text{PbTe}/\text{Na}_3\text{AlF}_6$ 复合光子晶体结构在 3~5 μm 和 8~14 μm 波段具有很高的反射率。这为装备在中远红外的隐身应用提供了有益的探索。

2.1.3 相变微胶囊

相变材料是指以潜热形式储存和释放能量的材料。其在物相变化过程中吸收和放出的热量称为相变潜热,同时其自身温度保持不变。由于其特有的控温能力,可通过调控目标的温度进而控制目标的热红外辐射强度,同时克服了低发射率涂料的不足^[11]。因此相变材料已广泛应用于军事伪装领域。

将相变微胶囊以涂料或遮障形式用在目标上,通过改变、调节相变材料的组成,使其尽可能吸收目标排出的热量从而对热源产生的热载荷获得最佳的热伪装效果^[12]。邓春涛^[13]等将内装相变材料的微胶囊分散在红外吸收涂料中,并用该涂料对织物进行涂层整理。通过实验证明,将经过涂层整理的织物覆盖在一根加热的棒上,用前视红外雷达(FLIR)观察,雷达未能探测到该棒。Mckinney^[14]等将不同熔点的微胶囊相变材料加入到可见光迷彩涂料中并涂覆于坦克等武器装备上,在坦克的不同发热部位涂覆含有不同熔点微胶囊相变材料的迷彩涂料,这样在红外热像图上就会显示杂乱的红外颜色特征,与坦克真实的红外热像图产生很大的差异,从而实现了可见光和红外的双重一体化伪装效果。

2.2 用于红外隐身材料的粘合剂的研究

用于红外隐身材料的粘合剂有无机和有机两种类型,其作用是保护吸收剂和填料,并在整个使用期能保持它们的吸波特性和不变。粘合剂必须在所选电磁波辐射范围透明,发射率低、与填料有较好的相容性、与底材有较好的粘合性、在工作条件下结构稳定^[15]。目前,关于隐身材料的研究,主要集中在吸收剂方面,粘合剂研究地较少。

用于隐身材料的无机粘合剂主要是无机硅酸盐和无机磷酸盐,根据国外相关报道,有学者在比较了醇酸树脂、丙烯酸树脂、环氧树脂、氯化橡胶、松脂、无机硅酸盐、无机磷酸盐等多种粘合剂的热红外性能后,认为其中最理想的是无机磷酸盐基料。他们还研制了一种无机磷酸盐粘合剂,其组成为:磷酸 24.2%、氧化镁 4.3%、铬酸 4.7%、乙醇 1.7%、水 65.1%。与有机粘合剂相比,无机粘合剂性能简单但物理机械性能和工

艺性能较差,比如某些无机粘合剂用于隐身涂料需要高温固化成膜,会影响到吸收剂的吸波特性。因此,用于隐身材料的粘合剂的研究多围绕有机粘合剂展开^[16]。

根据美国涂料技术协会的研究结果,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 $3.3\ \mu\text{m}$ (碳氢伸缩振动吸收峰),位于 $5.7\ \mu\text{m}$ (羰基伸缩振动吸收峰)等,使其具有强烈的吸收,选用不含这些官能团的树脂可以减少热红外频段的强烈吸收^[17]。不适宜作低辐射率涂料粘合剂的有硅醇酸树脂、硅橡胶、聚苯乙烯等^[18]。

李永明^[19]等测定了 5 种涂料用基料的光学常数,并计算了其不同光谱范围内的积分发射率,它们在热红外波段的发射率大小顺序如下:有机硅涂料>丙烯酸涂料>环氧涂料>聚酰胺涂料>聚烯烃涂料。

董延庭^[20]等通过改性方法,用丙烯酸树脂单体对聚丁二烯和三元乙丙橡胶线型聚合物进行接枝聚合,研制出在红外波段透明性高、发射率低(最低可达 0.19),且成膜性能优良的高透明红外隐身涂料粘合剂。

邵春明^[21]等制备了高密度聚乙烯接枝马来酸酐(HDPE-g-MAH)。测试了改性聚合物的红外透明性、红外发射率($8\sim 14\ \mu\text{m}$)、相变潜热及其涂膜的力学性能。结果表明:HDPE-g-MAH 有较高的红外透明性;随着接枝率的增加,其发射率先减小后增大,涂膜力学性能先变好后变差,当接枝率为 1.05%时,发射率最低为 0.250,附着力为 2 级、铅笔硬度为 5 H;HDPE 改性后相变潜热由 $141.5\ \text{J/g}$ 增大到 $202.8\ \text{J/g}$ 。根据极差分析得到了最优方案,制得的粘合剂可作为低红外发射率兼有控温功能的红外隐身材料。

吴广文^[22]等采用稳定的丙烯酸单体,适量的引发剂,适宜的反应温度,研制出高固体分、低黏度且在红外波段透明性高、发射率低、成膜性能优良的高透明红外隐身涂料用树脂。

3 红外隐身材料的发展趋势

3.1 多频段兼容隐身

由于战场侦察手段多样化的发展,目前任何单频段的隐身材料已不能有效降低军事目标和武器装备被发现的几率,未来隐身材料将向多频段兼容隐身方向发展,如可见光/红外兼容隐身、可见光/雷达兼容隐身、红外/雷达兼容隐身等。

目前,可见光/雷达兼容隐身材料研究方面已有技

术突破,如 Tului 等^[23]发明的复合材料在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的中远红外窗口的发射率已经达到 0.4 以下,且在 $0.3\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 的可见光和 $0.7\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 的近红外都有低的反射率,隐身波段范围宽且隐身性能好。但是红外/雷达兼容隐身研究较难,因为雷达吸波材料与红外隐身材料的隐身机理不同,使得它们的性能要求相互制约。雷达吸波材料要求高吸收率、低反射率,而红外隐身材料要求低吸收率、高反射率。要使同一种材料同时满足以上两种要求,实现起来有相当的困难。近年来,国内外科研人员一直在致力于解决这个难题。

3.2 新型隐身材料的使用

目前,大量的军用车使用了红外隐身材料,但在使用过程中存在一些问题,如:车辆在机动过程中会有尘土附着在车辆表面,严重影响了车辆红外隐身效果;随着软杀伤性的化学战剂,如金属致脆剂和超级腐蚀剂等在场上的使用,军用车面临结构被破坏、失去作战性能的危险;红外隐身材料中的大多数着色颜料一般难以调低涂料的发射率,有些隐身料中一旦加入这些着色颜料,其发射率会急剧升高等。因此,为解决这些问题,新型隐身材料的研发是红外隐身材料的一个发展方向。

3.3 智能隐身

智能隐身材料是伴随着智能材料的发展而发展起来的一种功能材料。智能材料具有很强的环境自适应能力,对环境具有自动感知功能、信息处理功能、自动调节自身结构或光学或电磁特性的功能、自我指令并对信号做出最佳响应的功能,使材料吸收峰处于入射电磁波的频段,可达到隐身目的。智能隐身材料是智能材料与隐身材料的有机结合,这种结合大大提高了隐身材料的功能,使其具有了智能材料的感知、回馈、控制、执行能力,将极大地推动隐身材料的发展^[24-25]。

张升康^[26]等人设计了一种红外智能隐身材料系统,这种系统由红外传感器、电致变温材料和微处理器组成,该系统实现了目标热像随背景自适应变化的功能。这种红外智能隐身材料系统采用双红外传感器分别采集目标和环境的红外辐射特征信号,感知自身和环境的差异;采用微处理器对感知信号进行分析处理;再用电致变温材料作为驱动系统与光学伪装材料相互依着,从而控制伪装材料温度使其与环境温度相适应。

随着红外探测技术的不断进步以及背景环境的快速变化,传统意义的红外隐身材料——被动抑制目标红外辐射、改变辐射特性已经越来越不能适应现代战场的要求^[27],智能隐身材料将是红外隐身材料的发展方向之一。

4 结语

随着红外隐身材料研究的快速发展,许多成熟的红外隐身材料技术已广泛应用于军事目的,并对战争格局产生了重要影响。新一代红外隐身材料的研制已在进行之中,未来红外隐身材料将具备强吸收、轻质、自清洁、耐化学战剂和结构简单的特点,并向可见、红外、激光、雷达等多频段兼容隐身方向发展。

[参 考 文 献]

- [1] 邱贞慧,彭著良,孙元宝. 现代伪装涂料的研究进展[J]. 表面技术,2005,34(1):5-7.
- [2] 赵印中,许雯,李林,等. 掺杂氧化物半导体在复合隐身方面的研究进展[J]. 真空与低温,2009,15(3):178-183.
- [3] 马格林,曹全喜,黄云霞. 红外和雷达复合隐身材料——掺杂氧化物半导体[J]. 红外技术,2003,25(4):77-80.
- [4] 哈恩华,黄大庆,王智勇,等. 雷达与红外兼容隐身材料的研究与进展[J]. 材料导报,2006,20(4):325-327.
- [5] 宋兴华,於定华,马新胜,等. 红外低发射率ATO粉末的制备及其特性研究[J]. 红外技术,2003,25(6):49-53.
- [6] 王自荣,余大斌,於定华,等. ITO涂料在8~14 μm 波段红外发射率的研究[J]. 红外技术,1999,21(1):41-44.
- [7] 武晓威,冯玉杰,刘延坤,等. 制备工艺对锌铝氧化物(ZAO)粉末红外发射率的影响[J]. 材料科学与工艺,2010,18(2):279-283.
- [8] Shan Y, Zhou Y M, Cao Y, et al. Preparation and Infra-red Emissivity Study of Collagen-g-PMMA/ In_2O_3 Nanocomposite[J]. Materials Letters, 2004(58):1655-1660.
- [9] Wang Z J, Zhang J, Xu S H, et al. 1D Partially Oxidized Porous Silicon Photonic Crystal Reflector for Mid 2 Infra-red Application[J]. J PhysD: ApplPhys, 2007, 40:4482-4484.
- [10] 张民,杨小静,刘名扬. 红外隐身一维光子晶体结构反射特性的理论分析[J]. 装甲兵工程学院学报,2009,23(5):89-91.
- [11] 费逸伟,李广平,李争鸣,等. 相变材料及其在热红外伪装领域的应用研究[J]. 红外技术,2007,29(6):328-332.
- [12] 胡传忻. 隐身涂层技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [13] 邓春涛. 热红外伪装技术的现状与发展[J]. 现代兵器,1990(2):29-32.
- [14] McKinney R A, Bryant Y G, Colvin D P. Method of reducing infrared viewability of objects: US, 6373058[P]. 2002-04-16.
- [15] 李春华,齐暑华,张剑,等. 高分子材料在红外隐身中的应用[J]. 国外塑料,2005,23(1):26-30.
- [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):72-73.
- [17] Calvert R L, Gagliardi J A, McLachlan A D. Surface Coatings for Low Emittance in Thermal Surveillance Band: AR 20032929[P]. 1984.
- [18] 丽江涛,姜卫陵,赵云峰. 红外隐身涂料的研究进展[J]. 宇航材料工艺,2000,30(5):15-18.
- [19] 李永明,肇研. 涂料用粘结剂的热辐射性能评定[J]. 红外技术,1994,16(3):32-34.
- [20] 董延庭,张捷,翁小龙,等. 高透明红外隐身涂料粘合剂的研制[J]. 中国涂料,2005,20(3):14-17.
- [21] 邵春明,徐国跃,郭腾超,等. 改性聚乙烯作为低红外辐射材料的研究[J]. 红外技术,2008,30(7):412-415.
- [22] 吴广文,陈宏书,胡志毅,等. 低发射率羟基丙烯酸树脂的合成[J]. 化工新型材料,2007,35(4):78-79.
- [23] Tului M, Valle R, Mortoni, et al. Composite with a Low Emissivity in the Medium and Far Infrared, and with a Low Reflectivity in the Visible and Near Infrared: US Pat, 7070857[P]. 2006.
- [24] 黄亮,姜涛. 智能隐身材料的研究现状及发展趋势[J]. 国防科技,2008,29(3):7-11.
- [25] Andrew Crowson. Smart Materials and Structures: An Armyperspective. Proceedings of Conference on Recent Advance in Adaptive and Sensory Materials and Their applications(R). 1992. (余不详)
- [26] 张升康,陈重,冯来,等. 表面控温红外智能隐身材料系统的研制[J]. 表面技术,2004,33(1):63-64.
- [27] 于海涛. 导电高分子材料在智能隐身技术中的应用[J]. 中国涂料,2010,48(2):26-29.

(上接第65页)

- [3] 逢剑锋. 空心微珠及其表面化学镀镍[J]. 科技信息,2009,3:54.
- [4] 于美,刘建华,李松梅,等. 空心玻璃微球镍镀层的制备及其电磁性能[J]. 材料工程,2009,6:1-4.
- [5] 张振华,孟锦宏,曹晓晖. 空心玻璃微珠表面金属化及电磁性能[J]. 表面技术,2006,35(5):10-11.
- [6] Liu Z W, Phua L X, Liu Y, et al. Microwave Characteristics of Low Density Hollow Glass Microspheres Plated with Ni Thin-film[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(9):45-51.
- [7] 葛凯勇,王群,毛倩瑾,等. 空心微珠表面改性及其吸波特性的研究[J]. 功能材料与器件学报,2003,9(1):67-70.
- [8] 杨文彬,张冰杰,沈丹,等. 空心玻璃微珠表面化学镀Ni-P合金磁性涂层的研究[J]. 功能材料,2007,11(38):1856-1858.
- [9] 胡传忻. 隐身涂层技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004.