

# 热红外复合隐身涂层的性能研究

白韶军<sup>1</sup>, 张存<sup>1</sup>, 杨爱弟<sup>2</sup>, 胡传忻<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124; 2. 北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124)

**摘要:** 基于红外隐身技术实现的基本原理, 提出了热红外复合隐身涂层的设计方案, 即控制涂层表面温度和  $8 \sim 14\mu\text{m}$  波段红外发射率。从这两点出发, 重点研究了低发射涂层铝粉、ITO 粉和降温涂料相变微胶囊的制备。实验证明, 进口 Al 粉和新型 ITO 粉在  $8 \sim 14\mu\text{m}$  波段平均红外发射率分别为 0.236 和 0.478, 相变微胶囊在相变区间内有一定的降温效果。实验结果对今后热红外复合隐身涂层的研究有很重要的指导意义。

**关键词:** 红外复合隐身涂层; 低发射率; 相变材料; 相变微胶囊

**中图分类号:** TQ63

**文献标识码:** A

## Research of the Thermal Infrared Composite Stealthy Coating Capability

BAI Shao-jun<sup>1</sup>, ZHANG Cun<sup>1</sup>, YANG Ai-di<sup>2</sup>, HU Chuan-xin<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The basic principle of infrared stealth technology was presented in this paper. The design of thermal infrared composite stealthy coating was that controlling the temperature of the surface coating and the  $8 \sim 14\mu\text{m}$  infrared emissivity. From two points, low emissivity coating of the aluminum and the ITO and phase change microcapsule as the decreased temperature were prepared. The average infrared emissivity of the imported aluminum and the new ITO were 0.236 and 0.478 during the  $8 \sim 14\mu\text{m}$ . Phase change microcapsule had the decreased temperature effect. They were all proved. With the results, there was a very important guiding significance to research of the thermal infrared composite stealthy coating in the future.

**Key words:** infrared composite stealthy coating; low emissivity; phase change material; phase change microcapsule

### 1 引言

红外隐身涂料主要消除背景与军事目标的红外反射或红外发射的差别, 最大限度地降低目标与背景之间的对比度, 尽可能减少被探测发现的几率<sup>[1]</sup>。本文旨在基于红外隐身技术实现的基本原理, 提出了热红外复合隐身涂层的设计方案, 即控制涂层表面温度相变微胶囊的研制和  $8 \sim 14\mu\text{m}$  各种不同红外发射率涂料的研制, 对于延缓目标物体被探测发现的时间, 提高其红外隐身能力具有重要意义, 为红外复合隐身涂层实用化研究提供了重要参考。

### 2 红外隐身技术原理

红外隐身技术就是降低或改变目标的红外辐射特征, 从而实现目标的低可探测性。红外隐身原理从红外物理学可知, 物体红外辐射能量由斯蒂芬-玻尔兹曼定律决定:

$$w = \delta \varepsilon T^4 \quad (1)$$

式中,  $w$  实际物体的辐射出射度;  $\delta$  为玻尔兹曼常数;  $\varepsilon$  为物体的发射率;  $T$  为物体的热力学温度。

**作者简介:** 白韶军 (1956 - ), 男, 副教授, 研究方向为材料加工工程。E-mail: baishaojun@bjut.edu.cn

**收稿日期:** 2008-10-06

不同温度的物体所发射的红外辐射的波长和强度是不同的。由维恩位移定理:

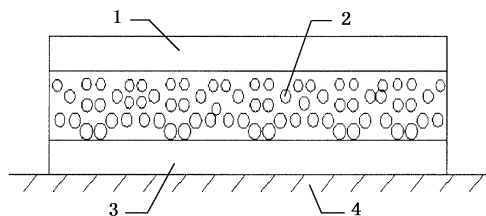
$$\lambda_m T = b \quad (2)$$

可知,温度越高,红外辐射功率越大,红外辐射光谱中最强的波长越向短波移动<sup>[2]</sup>。

从玻耳兹曼定律可看出,由于目标的辐射强度与温度的四次方成正比,所以实现红外隐身最有效的途径是控制目标的表面温度,尽量缩小目标与背景的温差。但是,目标与背景的温差很难减小到要求的限度,为此,可采用红外隐身材料来调目标表面的发射率,以求目标与背景之间的红外辐射反差为零或接近于零,使红外探测器不能发现目标或不易发现目标,以达到隐身的目的<sup>[3-4]</sup>。

### 3 热红外复合隐身涂层的设计方法

初步的涂层设计方案如图1所示。



1-不同发射率涂层;2-相变微胶囊;3-底层材料;4-基体

图1 热红外复合隐身涂层示意图

图中,1为不同发射率涂层,低发射率材料是热红外隐身涂层关键技术之一,但是在应用过程中也不一定是越小越好,关键是要使伪装目标的表观温度与背景相协调,因此,热红外符合隐身涂层应根据环境的不同而涂上不同发射率的涂料。2为相变微胶囊涂层,由于目标被探测到的可能性与其表面红外辐射强度及其散热直接相关,将含有相变物质的微胶囊以涂料或遮障形式用在目标上,通过改变、调节相变物质的组成,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。在工作时间内,保持目标朝向潜在红外探测器的面不升温,这样可以迷惑或使敌红外探测器探测不到目标<sup>[5-6]</sup>。这也是我们之所以研究相变微胶囊关键所在。

涂层厚度对辐射带强度和谱带分辨率有很大影响。在常温下涂料的红外辐射性能主要取决于约30~50 $\mu\text{m}$ 厚的表面层。当涂层厚度小于此值时,发射率与基体的性质和粗糙度有关;当涂层厚度大于160~170 $\mu\text{m}$ 时,涂层厚度对其辐射性能无影响<sup>[2]</sup>。这也就是最上层涂层厚度大于等于40 $\mu\text{m}$ 的原因所在。

## 4 各种不同发射率材料的制备

### 4.1 红外隐身涂层低发射率材料的制备

红外隐身涂料的构成:热红外隐身涂料一般由填料和黏结剂两部分组成。填料的组成、纯度、颗粒大小、形状、在涂料中的分散状态和含量等因素都能影响涂层的辐射效果。目前用于热红外隐身涂料配方中的填料大致分为如下几类:金属填料、着色填料、半导体填料等<sup>[7]</sup>。黏结剂分为有机和无机两大类,其中以有机黏结剂种类最多,目前可用于红外隐身涂层的黏结剂有氯化聚苯乙烯、丁基橡胶等。从发展趋势看,实用性能较大的是以聚乙烯为基本结构的改型聚合物。ITO最常见的掺杂半导体材料是 $\text{SnO}_2$ 和 $\text{In}_2\text{O}_3$ ,通过掺杂工艺对载流子浓度进行调制,可以使其在红外频段有较低的 $\epsilon$ ,而在微波和毫米波段具有较好的吸收率,从而能较好地兼顾雷达和红外隐身,可望解决宽频谱轻质伪装隐身材料难题。

选用的试板为铁板,其长度和宽度都为10cm,厚度为1.5mm,选用的黏结剂为聚苯乙烯清漆(PS),低发射率涂料为Al粉和ITO,Al粉的细度、形状有特殊要求,ITO粉为自制品。涂料的工艺为混粉-超声解聚-研磨-过筛-喷/刷涂。最后测得Al粉和ITO粉涂层的厚度分别为0.20mm和0.15mm。

### 4.2 红外隐身涂层发射率测试及简单分析

我们用国产IR-2型双波段发射率测试仪测得进口Al粉涂层在8~14 $\mu\text{m}$ 波段平均红外发射率为0.236,ITO粉涂层在8~14 $\mu\text{m}$ 波段平均红外发射率为0.478。图2和图3为我们测得进口Al粉和ITO粉涂层在8~12 $\mu\text{m}$ 波段的红外发射率曲线。

从图2和图3,我们可以很清楚的看到发射率随着波长在8~12 $\mu\text{m}$ 波段变化的情况。金属粉末的发射率相对来说比较稳定,比较低,最主要的原因是金属比较活泼,在热红外频段吸收很少,但在整个波段散射和反射很大,与可见光尤其是雷达波段的伪装难以兼容,对污染的耐受力差,灰尘和水分能使其发射率显著增高,因此,金属材料含量宜慎选。迄今为止,所报道的红外隐身涂料中金属颜料质量分数一般不超过40%<sup>[8]</sup>。

掺杂半导体材料作为一种新型的红外低发射率材料,从理论上说,通过适当选择载流子密度、载流子迁移率和载流子碰撞频率等参数,可以使掺杂半导体在红外波段有较低的发射率,而在微波和毫米波段具有较高的吸收率,从而形成红外和雷达兼容的隐身材料<sup>[9-10]</sup>。

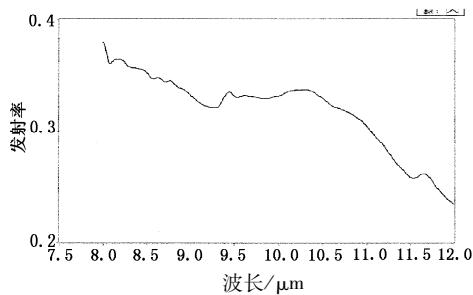


图2 Al 粉 8 ~ 12 $\mu\text{m}$  波段的红外发射率曲线

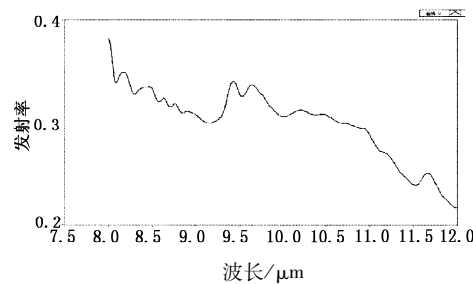


图3 ITO 粉 8 ~ 12 $\mu\text{m}$  波段的红外发射率曲线

#### 4.3 红外高发射率隐身涂层研究

所谓高发射率涂料,就是指与周围环境的红外发射率基本一致,越接近越好,我们研究的主要是适合林地、草地的三色涂料,即土黄、中绿、深绿。该涂料具备天然植物光谱反色特性,在波长 0.4 ~ 1.3 $\mu\text{m}$ 及 8 ~ 14 $\mu\text{m}$  范围,反射率及发射率均较高,有一定的降温功能,此点符合红外隐身的要求,也易于对抗双波段红外热像仪反隐身技术,涂层与相关背景发射率测量结果如表 1 所示。

表 1 涂层与背景发射率比较

序号	背景或涂层	发射率 $\varepsilon$ (室温 $T = 20^{\circ}\text{C}$ )	
		波长 $\lambda = 8 \sim 14\mu\text{m}$	波长 $\lambda = 1 \sim 20\mu\text{m}$
1	水泥地	0.95	0.92
2	土壤	0.93	0.92 ~ 0.95
3	草地及丛林	0.90	0.88 ~ 0.96
4	热反射隔热涂层 (J332)	土黄	0.93
		中绿	0.94
		深绿	0.94

### 5 相变微胶囊的制备及性能测试

#### 5.1 相变微胶囊的制备

相变微胶囊的粒径可以在 0.1 $\mu\text{m}$  ~ 1mm 之间,外壳的壁厚为 0.01 ~ 10 $\mu\text{m}$ ,外形各种各样,但多为球形<sup>[11]</sup>。具体制备的方法很多,我们以物理机械法制备相变微胶囊,选用的囊壁材料为明胶,囊芯材料为脂肪酸类化合物,主要为石蜡。制备过程如下:第一步为明胶水溶液的制备:一定量的明胶加入到一定量的水中,在温度为 45 $^{\circ}\text{C}$  条件下充分溶解;第二

步为芯材乳化液的制备:一定量的脂肪酸类化合物加热熔融后,滴入 45 $^{\circ}\text{C}$  明胶水溶液中,加一定量的乳化剂 OP-10,超声振荡同时搅拌 40min;第三步为滴加一定量的促凝剂,搅拌 60min 后迅速移入冷水 (<5 $^{\circ}\text{C}$ ),加固化剂固化 20min,不搅拌;第四步为过滤、干燥。

我们采用自己设计的喷雾干燥机进行干燥,整个过程实现了自动化,生产率比较高。喷雾干燥机的设计简图如图 4 所示。

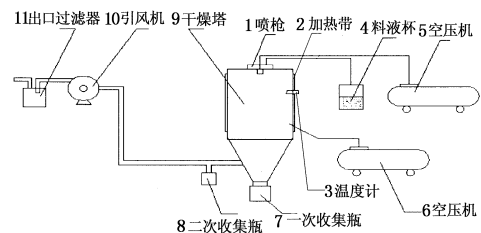


图4 微型喷雾干燥机工艺流程图

喷雾干燥机工作过程如下:过滤后的 PCM 溶液倒入到 4 料液杯后,由 1 喷枪把 PCM 溶液和 5 空压机出来的压缩空气同时喷入到高温 9 干燥塔内,与 6 空压机往上喷出来的压缩空气充分接触,充分干燥,干燥后的空气通过引风机排出,固体 PCM 通过 7 一次收集瓶、8 二次收集瓶和出口过滤器收集。使用说明:加热带设温 120 $^{\circ}\text{C}$ ,温度计显示 100 $^{\circ}\text{C}$  以上才能喷涂,空压机 5 气体压力调节为 (0.2 ~ 0.4) MPa,空压机 6 气体压力调节为 (0.4 ~ 0.6) MPa。

制备的微胶囊在光学电镜观察如图 5 所示。

从图 5 上能清楚地看到相变微胶囊的囊壁、囊芯及完全包覆的 PCM。从 PCM 的微观光学形貌图的比较分析可知,明胶与石蜡在光的照射下有不同的反射形式,石蜡表面比较发暗,而明胶表面比较发亮,反射程度不同所致,同它们彼此材质不同有关。

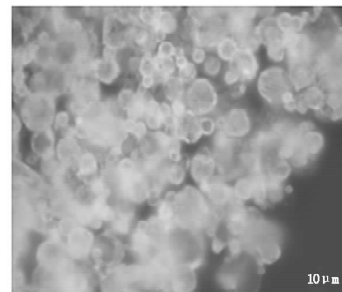


图5 微胶囊形态的光学电镜图

#### 5.2 相变微胶囊的性能测试

##### 5.2.1 相变微胶囊相变温度和潜热测试

相变温度和潜热是相变微胶囊最重要的两个指标,我们用的测试仪器是差热分析仪 (DTA-Differen-

tial Thermal Analysis)。图6是石蜡的DTA曲线图,图7是PCM的DTA曲线图,从图上可以清楚的看出,石蜡的相变温度为 $62.5^{\circ}\text{C}$ 左右,相变潜热大约为 $189\text{kJ/kg}$ ,而相变微胶囊的相变温度也为 $62.5^{\circ}\text{C}$ 左右,相变潜热大约为 $169\text{kJ/kg}$ ,比纯石蜡略有下降,这是由于囊壁并无相变造成的。

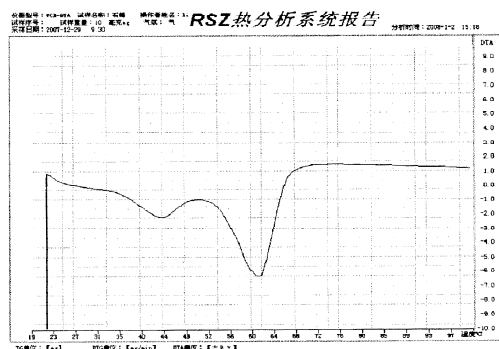


图6 石蜡的DTA曲线图

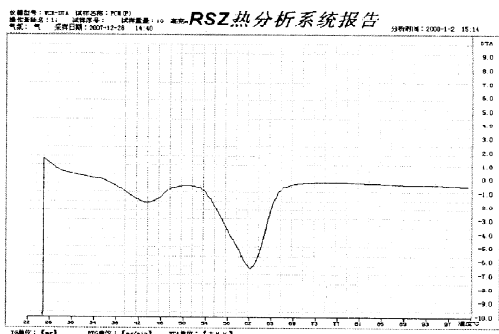


图7 PCM的DTA曲线图

实验结果表明,我们制备的相变微胶囊相变温度为 $58\sim 70^{\circ}\text{C}$ ,相变潜热为 $169\sim 170\text{J/g}$ 。目前我们也可以制备相变温度为 $28\sim 35^{\circ}\text{C}$ ,相变潜热为 $170\sim 190\text{J/g}$ 相变微胶囊。

### 5.2.2 相变微胶囊涂层红外光照实验

我们把制备的相变温度为 $28\sim 35^{\circ}\text{C}$ ,相变潜热为 $170\sim 190\text{J/g}$ 相变微胶囊取出 $2\text{g}$ ,加上一定量的聚苯乙烯清漆(PS),在烧杯内混合均匀,涂覆在标准铁板上,其长度和宽度都为 $10\text{cm}$ ,厚度为 $1.5\text{mm}$ ,干燥后测得涂层的厚度平均为 $0.25\text{mm}$ 。在室温 $25.8^{\circ}\text{C}$ 条件下,把1和2板放在用隔热材料做成的保温效果很好的密闭容器内,进行加热升温实验。1为标准铁板,2为相变微胶囊涂层。光照升温装置为红外灯,涂层距红外灯距离为 $30\text{cm}$ ,结果如图8所示。

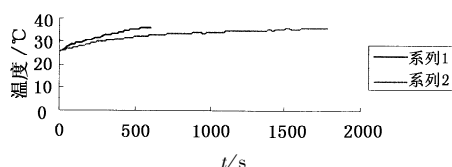


图8 PCM涂层钢板与裸钢板的温度-时间曲线

从图8上可以明显看出,从室温 $25.8^{\circ}\text{C}$ 开始,1板升温速度比较快,10min后就已经升温到 $36.1^{\circ}\text{C}$ ,2板升温速度相对缓慢的多,尤其在 $32\sim 35^{\circ}\text{C}$ 之间,半个小时才升到 $36^{\circ}\text{C}$ ,说明相变微胶囊在其相变区间内,有一定的吸热功能,起到降温的目的。

## 6 结论

(1)研究了低发射率涂料,进口Al粉在 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段平均红外发射率已达到 $0.236$ ,ITO粉在 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段平均红外发射率以达到 $0.478$ 。

(2)低发射率材料是热红外隐身涂层的关键技术,但是在应用过程中也不一定是越小越好,关键是要使伪装目标的表观温度与背景相协调,才能获得较理想的红外伪装效率。所以我们研究了主要适合林地、草地的三色涂料,即土黄、中绿、深绿,使其与天然植物有相同的光谱反射和发射特性。从而达到表观温度与背景相协调目的。

(3)相变微胶囊涂料的研制,这对于延缓目标物体被探测发现的时间,提高其红外隐身能力具有重要意义,但还存在相变范围比较小等问题。实验结果为红外复合隐身涂层实用化研究提供了重要参考。

## 参考文献:

- [1] 张凯,马艳,范敬辉,等.低发射率红外隐身涂料研究进展[J].化学推进剂与高分子材料,2008,6(1):21-25.
- [2] 胡传妍.隐身涂层技术[M].北京:化学工业出版社,2004:124-159.
- [3] 宋兴华,於定华.涂料型红外隐身材料研究进展[J].红外技术,2004,26(2):9-12.
- [4] 费逸伟,唐卫红.低发射率伪装涂料的研究现状与发展方向[J].红外技术,2002,24(3):5-10.
- [5] 李晓霞,张胜虎,凌永顺,等.新型热红外伪装体系[J].红外技术,2002,24(1):42-45.
- [6] Khudhair A M, Farid M M. A review on phase change energy storage: materials and applications[J]. Energy conversion and management, 2004, 45(2): 263.
- [7] Cox Philip R, Edwardsetal. Infrared camouflage covering [P]. US Pat, 6127007, 2000-10-03.
- [8] 沐磊,王丽熙,黄芸,等.红外隐身涂料的研究与发展趋势[J].材料导报,2007,21(1):122-125.
- [9] 杜永,邢宏龙,陈水林.热红外隐身涂料的研究进展[J].涂料工业,2007,37(2):51-55.
- [10] 酆江涛,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(5):15-18.
- [11] 于航,刘淑娟.相变材料微胶囊的国内外研究现状[J].能源技术,2007,28(1):5-9.