

红外隐身涂料的研究进展

郦江涛 姜卫陵 赵云峰

(航天材料及工艺研究所 北京 100076)

摘 要 介绍了红外隐身材料国内外研究进展情况,包括构成红外隐身材料的填料、树脂及其红外性能的各种影响因素,最后还介绍了与雷达隐身材料的兼容性问题。

关键词 突防,红外辐射,隐身,涂层

Development on Infrared Stealth Coating

Li Jiangtao Jiang Weiling Zhao Yunfeng

(Aerospace Research Institute of Material & Processing Technology Beijing 100076)

Abstract To increase penetration probability and effectiveness of guided missiles, infrared stealth is a simple and effective method to protect the missiles from being found and attacked. Development on the infrared stealth coating is presented here, including on its fillings, resins and effects of various factors on infrared performance. Compatibility of the infrared stealth materials with radar stealth materials is then introduced.

Key words Penetrate, Infrared radiation, Stealth, Coating

1 引言

70年代以来,随着热红外探测器的广泛应用,红外隐身技术无论在飞行器、地面设备还是战略突防等方面都引起了世界各强国的高度重视。红外探测由于探测精度高,已经成为一种重要的探测和跟踪手段。随着红外探测技术的快速发展,红外隐身技术也取得了很大的进步。本文将概括地介绍应用于红外隐身涂层的填料,粘合剂及其红外特性的影响因素,讨论与雷达隐身材料的相容性问题。

2 低红外发射率材料^[1]

一般来说,用于热隐身的材料应具有以下基本特性:(1)具有符合要求的热红外发射率或较强的控温能力;(2)具有合理的表面结构;(3)具有较低的太阳能吸收率;(4)能与其它频段的隐身要求兼容。

发射率是物体本身的热物性之一,其数值变化仅与物体的种类、性质和表面状态有关。而物体的

吸收率则不同,它既与物体的性质和表面状态有关,也因外界射入的辐射能的波长和强度而异,所以严格来讲,吸收率不是物体的热物性。目前,以降低发射率为主要目标的涂料的主要性能指标是:目标表面的发射率 ϵ_{TIR} ,在可见光和近红外波段的太阳能吸收率 A_{SUN} 及与其它波段红外特性要求的兼容性。

2.1 填料的选择

填料是影响涂料红外性能的基本因素之一。大部分的无机填料在热红外波段(TIR)有明显的宽吸收频谱。例如,碳酸盐在 $7\mu\text{m}$ 吸收最强,硅酸盐在大约 $9\mu\text{m}$ 、氧化物在 $9\mu\text{m}\sim 30\mu\text{m}$ 之间有吸收峰。有机填料由于其复杂的C—N—O结构,如炭黑、酞菁蓝及酞菁绿等都在TIR频段有明显尖锐的吸收频谱,但主要在 $6\mu\text{m}\sim 11\mu\text{m}$ 区间。因此,涂层的红外特性受所用填料的影响,具有强烈的光谱选择性^[2],金属粒子,尤其是金属片状粒子是TIR频段的首选

收稿日期:2000-05-18;修回日期:2000-07-19

郦江涛,1975年出生,硕士研究生,主要从事功能复合材料的研究工作

填料。它们在 TIR 频段吸收很少,但在整个波段散射和反射很大。Hagen-Rubens 将金属的高反射性能归因于较高的载流子密度。显然,金属填料的高反射性有利于降低发射率和太阳吸收率,但却增加了对雷达波和可见光的反射,不利于对雷达波和可见光的抑制作用,因此,金属填料含量宜慎选。

半导体填料是一种新型的掺杂填料。从理论上说,通过适当选择载流子密度 N 、载流子迁移率 μ 和载流子碰撞频率 ν 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—雷达一体化材料。

王自荣^[3]等将 ITO(掺锡氧化铟)粉未经研磨后烧结,与不同粘合剂粘合制成涂料,研究其发射率。图 1、图 2 分别是 SnO_2 和 ITO 的含量对涂料发射率的影响。

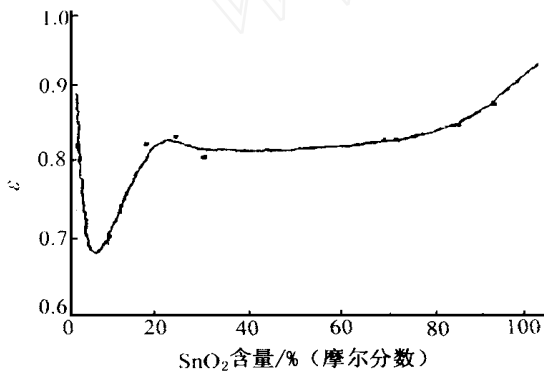


图 1 SnO_2 含量对 ITO 涂料发射率的影响

Fig. 1 Effect of SnO_2 content on emissivity of ITO coating

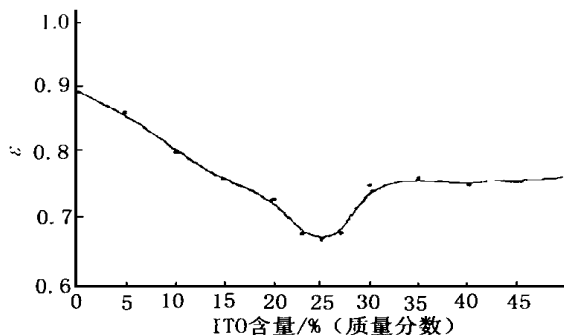


图 2 ITO 涂层发射率随 ITO 含量的变化关系曲线

Fig. 2 Emissivity of ITO coating vs ITO content

由图 1 可以看出, SnO_2 掺杂含量对涂层的发射率有明显的影响,随 SnO_2 掺杂含量的增加,其发射

率先减小,后增加,当其摩尔分数为 5% 左右时,涂层的发射率最低。这是掺杂浓度的变化导致半导体载流子浓度改变引起的。由图 2 可以看出,随着 ITO 质量分数的增加,涂层发射率逐渐降低,当 ITO 质量分数超过 25% 时,曲线趋向平缓,发射率不再降低。这说明不能通过无限制提高 ITO 的质量分数来降低涂层的发射率。事实上,当 ITO 质量分数超过 30% 以后,涂料物理性能已下降很多,当超过 40% 以后,涂层变得极为粗糙。

2.2 粘合剂的选择

红外涂层用树脂有两个基本要求,首先必须保护填料,并在涂层的整个使用期保持它们的红外特性不变;其次树脂必须在所选光谱范围红外透明。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,但在热红外区由于其官能团的分子振动,如波段位于 $3.3 \mu\text{m}$ (碳氢伸缩振动)、 $5.7 \mu\text{m}$ (羰基伸缩振动)、 $7.0 \mu\text{m}$ (碳氢变形振动)、 $8.0 \mu\text{m}$ (碳氧伸缩振动)有强烈的吸收。实际上并不适宜作低发射率涂料粘合剂的有醇酸树脂,硅醇酸树脂,聚氨酯,硅橡胶,聚苯乙烯。文献[4]列出了有机树脂的红外吸收光谱。选用不含有这些官能团的树脂可以减少 TIR 频段的强烈吸收。氟碳树脂在太阳辐射波段几乎透明,在 TIR 频段仅有微弱的吸收,并且具有优异的环境稳定性,非常适合于单纯特定波段的红外涂层。二甲硅酮树脂具有较低的红外发射率值,已应用于低发射率涂层。无机硅酸盐低聚物可形成只含有硅氧键的聚合物,除位于 $9 \mu\text{m}$ 处外发射率都很低。

树脂的吸收率还可通过加入填料而降低,这些填料通过控制散射率和粒子径可将树脂吸收波段的辐射光有效地散射掉,这项技术在 TIR 频段有很大的优越性。另外,片状粒子填料形成连续薄膜减少了薄膜下树脂对入射光的吸收。

3 低发射率涂层的影响因素

材料的发射率不但取决于材料本身的性质,而且取决于其表观的物理状态。实际上,作为涂料,其辐射特性不但与其吸收特性有关,而且也与其反射特性、颗粒度、环境温度、材料附着于其上的衬底等表观因素有关,在某些情况下,这些因素甚至会起决定性的影响。

3.1 涂层厚度的影响

涂层厚度对辐射带的强度和谱带的分辨率影响极大。Khan 发现在常温下涂料的红外辐射性能主要取决于约 $35\ \mu\text{m} \sim 40\ \mu\text{m}$ 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 $160\ \mu\text{m} \sim 170\ \mu\text{m}$ 时,涂层厚度对其辐射性能不再有影响。

G. Fabbri 和 P. Barala 通过对不同厚度的硫酸铜涂层的红外辐射光谱的观察发现,随着涂层厚度的增加,光谱质量明显降低。

在有些情况下,受涂层厚度的影响,强的基频带会变得很弱,而那些本来较弱的泛频带反倒变得很强。P. G. Giffiths 曾测量了以铝为衬底的润滑油涂层的辐射光谱,发现当涂层很薄时所得到的光谱结构均匀,与吸收光谱很类似,但当涂层较厚时,其辐射特性却变得类似于黑体了。

在涂料研究中,不能简单地认为强吸收带一定能产生强的辐射,不能把物质的吸收光谱当作选择辐射涂料的唯一依据。李永明^[5]的研究表明,某些涂层的发射率随涂层厚度的增加而增加。Lafemina 的研究指出:对于光谱选择性辐射体,在涂层足够厚时都将成为绝对黑体。

3.2 衬底的影响

通常,红外发射涂料不能单独使用,它总要被涂敷在某一衬底(或载体)上。为了准确研究各种红外辐射涂料的辐射特性,不能不考虑衬底辐射对涂料辐射特性的影响,以及这两者之间的相互联系。

通过对铜、铝、铁、白金、溴化钾和玻璃在 300 下的辐射光谱可以看出,大部分的金属都有较低的比辐射率,而溴化钾和玻璃在低波数区有较高的比辐射率。因此,对涂料来讲,金属是非常好的载体,尤其是白金,即使在很高的温度下,也有极低的反应活性。很多资料表明,抛光的金属具有更低的发射率和更高的反射率,但是抛光的金属表面粘附性不好,在进行涂敷时,除了应进行一般的除油处理外,还应进行表面磷酸化处理或阳极化处理,使之表面形成一层氧化层,从而增加其粘附性。同时,新形成的氧化膜对涂敷在其上面的涂料的红外辐射性能又形成新的影响,这方面的内容有待于进一步研究。

3.3 温度的影响

对于发射率随温度变化的关系,有关专著中曾
宇航材料工艺 2000 年 第 5 期

有一些定性的论述。一般认为:发射率与温度的关系对金属和非金属是不一样的。金属的发射率较低,并随温度上升而增加,若表面形成氧化层,则发射率可以成十倍或更大倍数的增加;非金属的发射率较高,在 $T < 350\ \text{K}$ 时一般多超过 0.8,并随温度的增大而减小。

邹南智等^[6]依据 Stefan-Boltzmann 定律,研讨了红外半球全发射率 ϵ_h 随温度 T 变化的函数关系,并导出了一个递推的解析关系式。认为任何物体的半球全发射率均将随温度的升高而下降。这与传统的观念也不一样,值得重视。

对于掺杂型材料,由于杂质离子的进入,破坏了部分正常晶格的平移对称性,将产生以杂质离子或缺陷为中心的局域振动模式,此外杂质能级处于禁带之内,容易发生跃迁,增加自由载流子的浓度。在受热条件下,这些自由载流子的带内跃迁或电子从杂质能级到导带之间的直接跃迁,最终都将产生强能量的辐射。这些因素使得掺杂型材料的红外辐射谱在很大程度上不同于单纯材料的辐射谱,一般表现为轻杂质成分的加入将会使材料的辐射波段向短波方向移动,重杂质的加入,则使材料的辐射波段向长波方向移动。当有选择地加入多种杂质离子时,材料的辐射波段可变宽,辐射强度会增大。

3.4 颗粒度的影响

多数研究者认为填料颗粒尺寸应小于热红外波长,大于近红外波长,这样,填料才会既有良好的热红外透明性,又有一定的可见光和近红外反射能力。对于具有散射力为 m 的填料,其具有最大散射能力的粒子径 d 与波长 λ 的关系为:

$$d = \frac{\lambda}{k} \quad (1)$$

其中, $k = \frac{0.90(m^2 + 2)}{n(m^2 + 1)}$

n 是树脂的散射率。这正是涂料配方设计中的一个重要依据。

3.5 其它影响因素

表面污染,包括灰尘和水分,能使涂层光学性能严重恶化,原来 0.24 的发射率可上升到 0.87。原材料中所含杂质和水分对涂层红外性能也有显著影

响,水的存在会在 $2.8 \mu\text{m}$ 的波段产生一强吸收峰。Aronson 为了去除硫化镉中的单质硫,将其在高温下烧结后退火处理,结果材料的反射率大大下降,其原因尚不清楚^[7]。

夏继余等^[8]认为,用刷涂的方式比在振动状态下用喷涂方式涂敷时铝的片面更容易平行于基体表面,其全发射率分别为 0.38 和 0.64,并认为涂层厚度对光谱发射率在短波段影响较大,而对长波影响相对甚微。

徐文兰等^[9]考虑了涂层自身辐射,以及涂层对衬底透射或对外来辐射的反射,建立了完善的热辐射传输方程,给出了涂层表观发射率与反射率的公式。结论列于表 1。

表 1 涂层和衬底参数的增加对表观反射率和表观发射率的影响

Tab.1 Apparent reflectance and apparent emissivity vs increasing of parameters of basis

项目	散射系数(S)	吸收系数(A)	涂层厚度(d)	衬底反射率(ρ)	涂层反射率(ρ_c)	衬底发射率(ϵ_b)
表观反射率						
表观发射率						

4 与雷达吸波材料的相容性

兼顾雷达隐身的材料现均为多层结构。Deisenroth 提出^[10]的一种由反热红外探测的面漆加反雷达探测的底漆构成的隐身材料就是一个简单而典型的例子。国外还有一种形式类似但结构更为复杂的七层复合材料^[11]。研制这类多频段兼容隐身材料的关键是使表层材料具有良好的频率选择特性。

大量试验表明,结构型和涂层型吸波材料分别与低发射率涂料复合后,涂层的厚度对谐振点吸收率及吸收频宽的影响是完全一致的。在雷达吸波材料的上面涂敷一层红外涂料,在一定的厚度范围内,可以同时兼顾两种性能,且雷达波吸收性能基本保持不变,只是随红外涂层厚度增加,谐振峰向低频平移,同时也能保证原涂层的红外辐射性能不变^[12]。当红外涂层与之复合后,只要红外低发射率涂层厚度达 $20 \mu\text{m}$,便能覆盖整个高辐射表面,而使法向总比辐射率值趋于一稳定值,而且红外隐身涂层厚度在 $20 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ 时,法向总比辐射率基本没有什么变化。当应用 CAD 设计后,雷达波吸收涂层可采

用三层结构。电磁损耗层为底层,中间层是阻抗匹配层 1,面层是阻抗匹配层 2,也是红外隐身涂层。总比发射率为 0.26 的涂料与发射率为 0.85 的雷达吸波材料复合以后,其红外法向总比发射率值降至 0.23。

5 结束语

(1) 加速热隐身涂料使用化的进程。首先需进一步加强控制涂层发射率的能力,为此需探索新型粘合剂(包括对热红外高透明或高反射的聚合物)和填料。此外,需以现有原材料为基础,掌握在较大范围内自由调控发射率的配方技术,以满足不同场合的使用需求。

(2) 探索低发射率薄膜以及隔热材料、相变材料、树脂基复合材料等用于热隐身的可能性。

(3) 降低材料光学性能对表面污染的敏感性。

(4) 研制多频段兼容性好,结构简单,轻便坚固的材料。

(5) 完善热隐身材料的性能测评系统。

参考文献

- 1 李新华等. 国外涂料型红外隐射材料研制现状和发展方向分析. 红外技术, 1994;16(1):5
- 2 Wake L V, Brady R F. Formulating infrared coatings for defence applications. AD -A267555
- 3 王自荣等. ITO 涂料在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段红外发射率的研究. 红外技术, 1999;21(1):41
- 4 The Chicago Society for Coatings Technology. An infrared spectroscopy atlas for the coatings industry. Federation of Societies for Coatings Technology, Blue Bell, PA, 1980:356 ~ 528
- 5 李永明等. 涂料用粘结剂的热辐射性能评定. 红外技术, 1994;(5):32
- 6 邹南智等. 关于半球全发射率与温度关系的讨论. 红外技术, 1997;19(3):1
- 7 Aronson James R. Modeling the infrared reflectance and emittance of paints and coatings:AD -A110824
- 8 夏继余. 红外辐射涂层及其应用. 红外技术, 1988;10(1):43
- 9 徐文兰等. 非均匀涂层的热辐射. 红外研究, 1990;9(5):384
- 10 Ulf Deisenroth et al. Mit einer beschichtung versehenes objekt, DE3507889
- 11 Lews C F. Materials keep a low profile. Materials Engineering, 1988:37
- 12 谢国华. 红外隐射涂料与雷达波吸收材料相容性研究. 材料工程, 1993;5:5