

· 光电工程系统技术 ·

## 红外雷达复合隐身技术探讨

保石<sup>1</sup>, 顾文慧<sup>1</sup>, 张晓光<sup>2</sup>

(1. 东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000; 2. 北京科技大学, 北京 100083)

**摘要:** 简要介绍了目前红外、雷达隐身技术的现状和存在的问题, 并对国外目前研究的掺杂氧化物半导体材料、导电聚合物、视黄基席夫碱盐、涂覆金属空心导电微珠和纳米吸波材料等新型红外雷达兼容隐身材料进行了详细探讨, 最后论述了红外雷达复合隐身涂层技术的隐身机理和发展现状。

**关键词:** 红外雷达; 复合隐身设计; 导电聚合物; 纳米吸波材料

**中图分类号:** TN972<sup>+</sup>.43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2009)04-0029-03

## Infrared and Radar Composite Stealth Technology

BAO Shi<sup>1</sup>, GU Wen-hui<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-guang<sup>2</sup>

(1. Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China;

2. Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The status and problems of infrared and radar stealth technology in present are reviewed briefly. New infrared radar compatible stealthy materials being developed in foreign countries, such as doped semiconductor oxide, electric conduction polymer, retinyl schiff base salt, hollow electric particulate coated with metal and nanometer absorbing materials are discussed in detail. Finally, stealth mechanisms and development status of new infrared radar composite stealth coating technology are described.

**Key words:** infrared radar; composite stealth techniques; conductive polymer; nanometer wave-absorbing materials

目前红外隐身技术主要是采用高、中、低 3 个不同发射率的红外迷彩涂料, 对目标外形进行红外图像分割, 尽可能地缩小被探测目标与背景之间的表观温度的差异, 达到目标与背景相融合的目的。红外迷彩涂料多采用高透明粘合剂和低发射率填料, 而低发射率填料主要是金属铝粉, 其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, 不利于雷达和可见光的抑制作用。此外, 目前的红外隐身涂层物理机械性能和附着力偏低, 应用还存在很多问题。

导电炭黑、铁氧体和羰基铁粉是目前已得到广泛应用的传统雷达波吸收剂。与金属类和有机类吸波材料相比, 导电炭黑是电损耗吸波剂, 具有质轻、

抗氧化、耐腐蚀、化学稳定性好和易于和树脂类粘合剂混合等特点。羰基铁粉具有温度稳定性好、吸收频带宽、可设计强等特点, 但其密度较大。铁氧体价格低廉、吸收性能好, 其具有较好的电磁参数, 可与其他介质混合进行电磁参数匹配设计, 展宽吸收频带, 因此, 在隐身技术中得到大量应用, 其缺点是密度大、高温特性差。雷达吸波涂料应用较多的是含铁氧体体系涂料。例如, 美国研制的系列层状含铁氧体涂料用于飞机表面隐身涂装, 日本研制出一种宽频高效吸波涂料, 它是由阻抗变换层和低阻抗谐振层组成的双层结构。变换层是铁氧体和树脂的混合物, 谐振层则是铁氧体、导电短纤维与树脂的混合物。

近十几年来, 许多国家都在寻找使用频带宽、密

收稿日期: 2009-06-29

作者简介: 保石(1973-), 男, 辽宁锦州人, 工程师, 主要研究方向为光电工程。

度低、厚度薄、吸收能力强的吸波涂料. 针对这一发展趋势, 主要探讨国外红外、雷达兼容隐身材料和复合涂层的技术发展和方向.

## 1 红外雷达兼容隐身材料技术探讨

### 1.1 掺杂氧化物半导体材料

目前采用的金属片状粒子在热红外波段吸收很少, 但由于载流子浓度较高, 在整个波段散射和反射很大. 因此, 首先可从载流子浓度设计的思路来考虑这一问题.

掺杂氧化物材料可以成为具有较高自由电子气模式的半导体材料, 其薄膜本身也可以是透明的, 一般其禁带宽度的 3.0 eV 左右, 在红外波段, 由于红外光波长较长, 光子能量低于半导体禁带宽度, 半导体对其没有本征吸收, 对光子的吸收和反射起主要作用的是自由载流子. 材料的反射率随着入射电磁波频率的变化而变化, 当入射电磁波角频率接近某一数值(材料等离子频率  $\omega_p$ ) 时, 反射率将发生突变(反射率趋于零). 半导体在重掺杂的情况下等离子波长都在红外区域, 随着载流子浓度的增加, 等离子波长也向短波方向移动. 当入射光波长小于  $\lambda_p$  时, 掺杂氧化物呈现高透射现象. 当入射光波长大于  $\lambda_p$  时掺杂氧化物呈现高反射现象.

目前 ITO(掺锡氧化铟)和 ZAO(掺铝氧化锌)载流子浓度可达  $10^{18} \sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , 具有较高的可见光透过率和红外反射率, 通过控制材料载流子密度等参数, 实现在微波和毫米波段具有较高的吸收率, 在红外/雷达复合隐身材料方面有着很好的应用前景<sup>[1,2]</sup>.

### 1.2 导电聚合物

导电聚合物具有大的共轭  $\pi$  电子的线性或平面形构型, 其电导率可在绝缘体、半导体和金属态范围内变化, 这为其导电性在相当宽的范围内调节提供了条件, 使在不同波段呈现不同的吸波性能.

导电高聚物具有类金属的特性, 对其进行掺杂以后, 对红外光有着较高的反射性能. 国外通过选择合适的聚合物、掺杂剂、合成方法等, 合成了一系列导电聚合物, 可以控制其光学特性如色对比度、反射率、透射性等, 有的导电聚合物在 2.5~20  $\mu\text{m}$  的反射率在 90% 以上, 因此, 有望在红外隐身材料中得

到应用. 国外研究一种导电聚合物红外吸收剂, 将聚噻吩与聚苯乙烯磺酸盐在水中混合成胶体悬浮液, 将其与黏结剂混合应用喷涂或溶液浇铸等技术涂敷在热电感应器上, 据称这样的红外吸收剂能将 2~14  $\mu\text{m}$  范围内的红外辐射吸收 90% 以上.

国外研究表明, 导电聚合物对微波也有较好的吸收性能, 其吸收率依赖于材料电导率的变化和材料的介电损耗. 当材料的电导率  $\sigma$  小于  $10^{-4} \text{ s/cm}$  时, 无明显的微波吸收特性; 当  $\sigma$  处于  $10^{-3} \text{ s/cm}$  和  $10^{-1} \text{ s/cm}$  时, 材料呈半导体特性, 有较好的微波吸收特性; 当  $\sigma$  大于  $1 \text{ s/cm}$  时, 材料呈金属特性, 具有电磁屏蔽效应. 目前导电聚合物尚处于实验室研究阶段, 提高材料的吸收率和展宽频带是导电聚合物吸波材料的研究和发展重点.

目前研究较多导电聚合物吸收材料主要有聚乙炔、聚吡咯、聚苯胺、聚噻吩等材料.

### 1.3 视黄基席夫碱盐

视黄基席夫碱盐是一种聚合物, 这种聚合物分子结构为多共轭烯烃结构并含有一群高氯酸抗衡离子. 这些抗衡离子由 3 个氧原子和 1 个氯原子组成, 并在两处松散地高挂在碳原子骨架上. 这种电连接非常弱, 一个光子都有可能把抗衡离子从一个位置位移到邻近一个位置. 通过这种位移, 使它能很快(几分之一秒)将电磁能转换成热能. 芳香族席夫碱的吸波性能优于脂肪族的吸波性能, 原因是由于芳香族大  $\pi$  键参与共轭, 电子离域更大, 使电损耗增大.

视黄基席夫碱式盐是一类非铁氧体系吸波材料. 它的吸波性能相当或优于铁氧体系材料而质量仅为它的 1/10. 这类盐能吸收射频 80% 的能量.

此外, 通过对视黄基席夫碱盐在热红外波段的隐身性能的研究, 表明其在红外/雷达复合隐身材料方面也有很大的应用潜力.

### 1.4 涂覆金属空心微球吸波材料

涂覆金属空心微球吸波材料是首先由美国波谱动力学系统公司(SDS)下属的 Hickory 公司研制的, 将一定量的导电微球加入介电聚合物中, 制成吸波涂料, 可提高介电常数和透磁率, 涂覆在战场上的各类目标, 可以吸收雷达波和红外辐射. 并且有金属膜的微球可以既反射、又吸收红外辐射, 像红外镜一样映射周围的环境, 如同变色龙一样与背景保持一致. 如用这种材料制成的伪装网盖在坦克上, 观察者只

能看到融合进冷态天空背景下的冷点,而看不到热的坦克发动机.此外红外吸收涂层还可以干扰激光(长波段)的反射和散射,或涂在发动机喷口周围降低红外信号.

当这种空心微球填充量体积比为50%时,涂层密度为 $0.40\sim 0.46\text{ g/cm}^3$ ,当层厚在2 mm下,8~18 GHz内电磁波吸收率可达10 dB.目前,美海军研究实验室已将这种空心微球发展为直径为 $1.5\ \mu\text{m}$ 、长 $40\ \mu\text{m}$ 的空心微管,并对其进行了金属化处理,与乙烯基混合后制成复合介电板,在8~18 GHz内也具有较好的吸波效果.

### 1.5 纳米吸波材料

纳米材料具有隐身功能,一方面是由于纳米微粒尺寸远小于红外及雷达波长,因此纳米材料的透过率比常规材料要强得多,大大减少了波的反射率;另一方面纳米材料的表面积比常规材料大3~4个数量级,使得对电磁波的吸收率大大优于常规材料.尤其在涂层厚度、面密度等方面,纳米材料有无可比拟的优势.美国研制出的“超黑粉”纳米材料,对雷达波吸收率达99%.法国研制出一种宽频隐身涂层,这种涂层由黏结剂和纳米级微填充材料组成.这种由多层薄膜叠合而成的结构具有很好的磁导率和红外辐射率,在较宽的频带内有效.目前世界军事发达国家正在研究覆盖可见光、红外、厘米波和毫米波等波段隐身的纳米复合材料<sup>[3]</sup>.

#### (1) 纳米磁性金属粉吸收剂

目前研究和使用的纳米磁性金属吸收剂包括两类,一类是包括羰基铁、羰基镍、羰基钴等在内的羰基金属粉吸收剂,其中羰基铁粉是最为常用的一种;另一类磁性金属粉包括Co、Ni、CoNi、FeNi等.纳米金属微粉具有极大的活性,在微波能量照射下,会使分子、电子运动加剧,促进磁化、极化和传导运动,从而使电磁能转化为热能,所以其主要是通过磁滞损耗、涡流损耗等吸收损耗电磁波.金属微粉具有温度稳定性好,磁导率、介电常数大,电磁损耗大, $\mu''$ , $\mu'$ 随频率上升而降低,而且可以通过调节微粉细度来调节电磁参数,有利于达到阻抗匹配和展宽吸收频带等优点,使其成为吸波材料的主要发展方向.

#### (2) 纳米磁性纤维

纳米铁纤维吸收剂是一维、磁性、多晶、丝状吸收剂,其粒径尺寸为10 nm量级,直径为100 nm量级,长度则为微米量级.纳米磁性铁纤维以其形状各

向异性、多元损耗机制等优势成为满足“薄、轻、宽、强”吸波材料的理想吸收剂之一.

据报道,吸收剂体积占空比为25%、厚度为1 mm的多晶铁纤维吸波涂层在3~18 GHz宽频带内反射系数低于-5 dB.在5~20 GHz宽频带内反射系数低于-10 dB.

#### (3) 碳纳米管吸收剂

纳米碳管由于其结构和尺寸的特殊性使其具有导电性.导电碳管中空结构为碳管的管壁改性及管内掺杂提供了可能.据报道,目前国外研制的1 mm厚纳米碳管吸收涂层的反射率小于10 dB的频宽达3 GHz.碳管本身没有铁磁性,但若经过碳管内部铁磁性材料的掺杂和管外铁磁性金属包覆后形成的碳管-磁性链复合物,既具有铁磁性,又具有良好的导电性能.

上述多种吸收机理使这种复合纳米碳管将在较宽的频段实现强衰减.碳纳米管还将提高树脂的拉伸及抗冲击强度,同时具有质量轻、高温抗氧化、介电参数可调节、稳定性好等特点,是一种理想的微波和红外吸收剂.

## 2 红外雷达隐身复合涂层技术探讨

在新型宽频谱隐身材料研究的同时,国外还应将涂层设计和材料复合技术作为多频谱兼容性研究的重点,研究表层材料的频率选择特性,探求多频谱隐身涂层的优化组合设计方法和材料复合的结构与工艺.

雷达隐身涂层材料要吸收电磁波必须满足2个基本条件:

(1) 电磁波入射到材料上时,电磁波能量最大限度地进入材料内部(匹配特性);

(2) 入材料内部的电磁波能尽可能全部衰减掉(衰减特性).

实现第一个条件的方法是通过采用特殊的边界条件来达到;而第二个条件则要求材料的电磁参数满足一定的要求.研制的涂料型或结构型吸波材料就是利用上述2种原理,在有限材料厚度内吸收电磁波,同时用干涉的方法抵消雷达波在前界面上的反射.为了增加吸收频带宽度,应尽量增加吸收的分量,抑制反射分量.为了达到最佳的吸收效果,对材料的各项物理参数提出如下要求:

(下转第50页)

- [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence, 1984, 6: 661 - 684.
- [5] 孙霞, 吴自勤. 分形原理及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.
- [6] 宣益民, 韩玉阁, 蔡兰波. 地面目标与背景的红外特征[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [7] N Sarkar, B B Chaudhuri. An efficient approach to estimate fractal dimension of textural Images [J]. Pattern Recognition, 1992, 23(9): 1035 - 1041.
- [8] B B Chaudhuri, S Nirupam. Texture segmentation using fractal dimension [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence, 1995, 17(1): 72 - 77.

(上接第 31 页)

(1) 涂层厚度应为雷达波中心频率的介质波长的  $1/4$ , 该频率称为谐振点, 具有最大吸收率.

(2) 涂层应有较高的电、磁损耗及适当的介电常数和磁导率. 涂层的磁导率和磁损耗越大, 吸收曲线的频宽也越大.

(3) 电磁波在涂层界面上的反射波强度应满足干涉后完全抵消的条件, 否则谐振点的吸收率将会下降, 吸收曲线变得平坦.

要增加介质的吸波性能, 必须提高  $\mu r''$  和  $\epsilon r''$ . 增加极化损耗和磁化损耗, 同时要满足阻抗匹配条件. 对单一组元吸收介质, 阻抗匹配和强吸收很难同时满足, 满足  $\mu r = \epsilon r$  的材料很难找到. 只有将多元材料复合, 使电磁参数可调, 才能在尽可能满足匹配条件下提高材料吸收损耗性能. 尽管提高介质电导率是增大损耗的重要手段, 但当电导率达到金属所具有的电导率时, 反射系数接近 1, 将远离匹配. 金属作为吸收剂一般以细粉状态复合到聚合物基体中, 整体不呈现金属特性. 据分析, 存在一个合适的电导率, 可使材料的回波率最低. 而对于吸收剂和聚合物复合体系而言, 通过调整吸波材料的成份、组成、结构及非均匀性等, 可最大限度地进行电磁谱频率响应特性调控, 实现阻抗匹配, 从而设计宽频带隐身材料.

红外隐身涂层的存在无疑增加了涂层的厚度, 使吸波材料的谐振点向低频方向移动. 同时改变雷达波在红外隐身涂料表面的反射与原涂层的前界面的反射, 破坏原吸波材料电磁干涉的能量条件, 使部分反射有可能无法抵消. 这些影响都与红外涂层的介电常数有关. 此外, 若红外低辐射涂层为非铁磁性, 红外涂层过厚会造成雷达吸收频宽变窄.

以往试验表明, 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 2 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. 一般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, 而使法向总发射率值趋于一个稳定值, 而涂层厚度在  $20 \sim 100 \mu\text{m}$  时, 法向总发射率基本没有什么变化.

兼顾红外雷达复合隐身涂层现均为多层结构. 一般可从 3 层涂层结构设计考虑: 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, 同时它也是红外隐身涂层. 国外曾提出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 7 层复合材料. 研制这类多频段兼容隐身材料的关键运用传输线理论进行涂层复合设计是使表层材料具有良好的频率选择特性.

### 3 结 论

从吸收频带宽、质量轻、厚度薄、物理机械性能好等方面, 对国外的新型红外雷达兼容隐身材料和复合涂层技术和发展方向进行了初步的探讨. 实际上, 隐身材料种类繁多, 不同的应用目标和应用环境可选用不同的材料, 如导电炭黑、铁氧体和羰基铁粉等. 作为对于各种类型的目标隐身防护, 传统的及各种新型吸收剂材料的应用仍在不断发展, 而且其应用技术的不断创新为未来多功能、多频谱隐身材料的进一步研究奠定了基础.

### 参考文献

- [1] 马格林. 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.
- [2] 邢丽英. 隐身材料[M]. 化学工业出版社, 2004: 94 - 95, 99, 109.
- [3] 张晓光. 纳米复合材料及其在隐身技术中的应用[J]. 光电技术应用, 2004, 19(2): 4 - 8.