

# 新型涂覆型雷达吸波材料的研究进展

班国东, 刘朝辉, 叶圣天, 王飞, 贾艺凡, 丁逸栋, 林锐

(中国人民解放军后勤工程学院 化学与材料工程系, 重庆 401311)

**摘 要:** 随着精确制导武器的改进和现代雷达探测技术的发展, 雷达隐身技术已成为提高军用目标生存力和战斗力的关键技术之一, 涂覆型雷达吸波材料作为一种雷达隐身技术, 因其吸波效果好、工艺简单、设计难度小、成本低, 在雷达隐身技术中占有重要地位。传统涂覆型雷达吸波材料主要以实现在某个较窄频段的强吸收为目标, 存在频带窄、面密度大等缺点。为了满足装备的战场隐身需求, 需要研究和开发具有厚度薄、面密度小、吸波频带宽和吸波能力强(薄、轻、宽、强)的新型涂覆型雷达吸波材料, 因此对新型涂覆型雷达吸波材料的研究成为当前国内外的一个热点, 了解和掌握它的研究进展对下一步的研究具有重要指导意义。根据雷达隐身技术的作用机理和雷达吸波材料隐身原理, 总结了雷达隐身的主要手段, 详细分析和阐述了纳米吸波材料、多晶铁纤维吸波材料、手征吸波材料、导电高聚物吸波材料四种新型涂覆型雷达吸波材料的国内外研究现状, 最后对新型涂覆型雷达吸波材料的发展进行了展望。

**关键词:** 涂覆型雷达吸波材料; 纳米吸波材料; 多晶铁纤维吸波材料; 手征吸波材料; 导电高聚物吸波材料

**中图分类号:** TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)06-0140-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.06.021

## Research Progress of New Radar Absorbing Coating

BAN Guo-dong, LIU Zhao-hui, YE Sheng-tian, WANG Fei, JIA Yi-fan, DING Yi-dong, LIN Rui

(Department of Chemistry & Material Engineering, LEU, Chongqing 401311, China)

**ABSTRACT:** With improvement of modern radar precision guidance weapon and the development of detection technology, radar stealth technology has become one of the key technologies for improving the survivability and the fighting capacity of military targets. As one of the radar stealth technologies, because of its good absorbing effect, simple process, good design ability and low cost, the radar absorbing coating has played an important role in the radar stealth technology. Traditional radar absorbing coatings mainly focus on achieving strong absorption in a narrow wave band with disadvantages such as narrow band and big surface density. To meet the demand of equipment stealth in the battlefield, new radar absorbing coatings need to be researched and developed with wide absorbing band, strong absorbing ability, thin thickness

收稿日期: 2016-01-22; 修订日期: 2016-05-11

Received: 2016-01-22; Revised: 2016-05-11

基金项目: 全军后勤科研计划项目(BY115C007); 重庆市自然科学基金(cstc2014jcyjA50026)

Fund: Supported by Logistical Scientific Research Projects of Army(BY115C007) and the Natural Science Foundation of Chongqing(cstc2014jcyjA50026)

作者简介: 班国东(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为雷达吸波材料。

Biography: BAN Guo-dong(1991—), Male, Master graduate student, Research focus: radar absorbing materials.

通讯作者: 刘朝辉(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为隐身材料。

Corresponding author: LIU Zhao-hui(1965—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: stealth materials.

and small density (thin, light, wide and strong). So new radar absorbing coating research has become a hot topic at home and abroad. Understanding and grasping the research progress of new radar absorbing coating is of important guiding significance for further research. According to radar stealth technology mechanism and the principle of the radar absorbing coating, the main measures of radar stealth were summarized in this paper. Research of new radar absorbing coating at home and abroad was briefly introduced and analyzed such as nano absorbing material, polycrystalline iron fiber absorbing material, chirality absorbing material, and conductive polymers absorbing material. Finally, the development of new radar absorbing coating was prospected.

**KEY WORDS:** radar absorbing coating; nano absorbing material; polycrystalline iron fiber absorbing material; chirality absorbing material; conductive polymers absorbing material

随着高精尖探测技术的发展,军事侦察的方式变得多种多样,高技术侦察和识别能力也有了很大提升。在现代信息化条件下,战争的胜负跟谁先敌发现有着重要的关系<sup>[1]</sup>。为使装备适应信息化条件下战场的需求,需要尽可能地降低装备被敌方发现的几率,因此装备的隐身技术显得尤为重要<sup>[2]</sup>。作为隐身技术的重要组成部分,雷达隐身技术的发展和应用使得武器装备的作战能力得到极大的提高<sup>[3]</sup>。

与其他雷达吸波材料相比,涂覆型雷达吸波材料具有吸波效果好、工艺简单、设计难度小、成本低等特点,是提升装备隐身性能的一项关键技术,在雷达隐身技术中占具重要的地位<sup>[4-5]</sup>。近年来,各种新型战机和舰艇大量使用涂覆型雷达吸波材料来提高自身的反侦察能力,世界各国对涂覆型雷达吸波材料的研究非常重视<sup>[6]</sup>。

## 1 涂覆型雷达吸波材料的隐身机理

### 1.1 雷达隐身技术作用机理

雷达隐身技术的目的是在某些特定区域内,降低目标的雷达散射截面积,使其不被敌方雷达探测到,采用的方法主要有减弱、抑制、吸收、偏转雷达波<sup>[7-8]</sup>。根据雷达系统的工作原理,雷达的最大探测距离  $R_{\max}$  表示为<sup>[9]</sup>:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \delta}{(4\pi)^3 P_{\min}}} \quad (1)$$

式中:  $P_t$ 、 $G_t$  分别为雷达的发射功率和天线增益;  $\lambda$  为雷达的工作波长;  $P_{\min}$  为雷达接收机的最小可检测信号功率;  $\delta$  为被探测目标的雷达散射截面积 (RCS)。

分析式 (1) 可知,降低目标的雷达散射截面积可以减小雷达的最大探测距离,因此目标 RCS

是决定目标对雷达波反射能力强弱的关键因素之一<sup>[10]</sup>。降低目标 RCS 的措施主要有两种:一是通过估计雷达的主要威胁方向,并在此探测方向上改变目标的外形以减少该方向的 RCS;二是将雷达吸波材料涂覆在目标表面,利用吸波材料的吸收、衰减、消除作用减弱雷达波的反射<sup>[11-13]</sup>。

### 1.2 涂覆型雷达吸波材料隐身原理

涂覆型雷达吸波材料 (又叫雷达吸波涂层),是一种涂覆在武器装备表面,能将吸收的雷达波的电磁能转换成热能而耗散掉,或者使电磁波通过干涉相消,减小电磁波反射的吸波材料<sup>[14-17]</sup>。涂覆型雷达吸波材料的隐身原理主要有两种<sup>[18-20]</sup>:

1) 通过内部的吸收剂将电磁能转化成热能耗散掉<sup>[21]</sup>,从而达到隐身的效果。雷达波入射到涂覆型雷达吸波材料上时,除了一小部分雷达波自然反射,大部分雷达波进入到涂层内部与吸收剂相互作用将电磁能转化成热能,最终以热能的形式耗散掉<sup>[22]</sup>。其基本原理如图 1 所示。

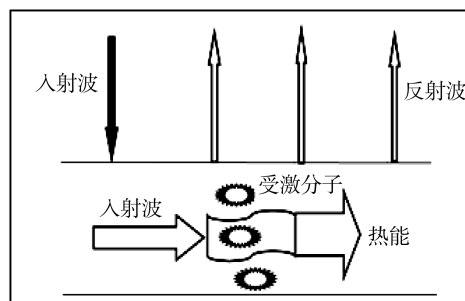


图 1 吸波材料将雷达波电磁能转化成热能的基本原理  
Fig.1 The basic principle of absorbing materials turning radar electromagnetic energy into heat energy

2) 在雷达吸波材料的上下表面的反射波因为相位相反而发生干涉相消,从而达到减少电磁波反

射的效果<sup>[23]</sup>。其基本原理如图2所示。

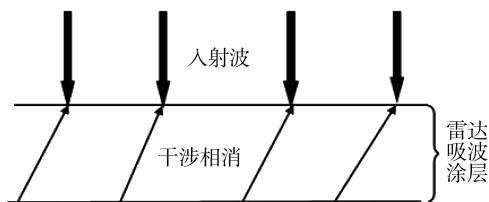


图2 雷达吸波涂层让雷达波实现干涉相消的基本原理  
Fig.2 The basic principle of radar absorbing coatings achieving interference cancellation of radar waves

## 2 新型涂覆型雷达吸波材料的典型代表

随着雷达吸波材料的迅速发展，羰基铁粉、超细铁粉等传统的雷达吸波材料已经不能满足未来雷达隐身的需求。为了能够使雷达吸波材料达到“薄、轻、宽、强”的要求，新型涂覆型雷达吸波材料应运而生，典型代表有纳米吸波材料、多晶铁纤维吸波材料、手征吸波材料和导电高聚物吸波材料<sup>[24—28]</sup>。

### 2.1 纳米吸波材料

纳米吸波材料是指材料组分的特征尺寸在纳米量级（1~100 nm）的吸波材料，其具有宽、轻、薄等特点，是一种具有发展潜力的新型涂覆型雷达吸波材料<sup>[29]</sup>。目前，国内外主要研究纳米复合膜吸波材料、纳米金属与合金吸波材料、陶瓷纳米吸波材料和纳米氧化物吸波材料几个方面。

纳米吸波材料因具有良好的吸波效果而成为国外吸波材料研究的方向和热点，许多国家都把它作为新一代隐身材料的重点研究对象，特别是美国 and 法国。美国<sup>[30]</sup>通过不断地探索和研究，研制出了“超黑粉”纳米吸波材料，其吸收率高，而且在低温下具有很高的韧性。法国<sup>[31]</sup>成功研制的钴镍纳米材料与绝缘层构成的复合结构，由粘结剂和纳米级微屑填充材料组成，这种由多层薄膜叠合而成的结构具有很好的磁导率，其在0.1~18 GHz范围内，电磁参数的实部和虚部均大于6。

目前，国内对纳米吸波材料的研究也很重视，何婷婷<sup>[32]</sup>通过静电纺丝技术改变磁性颗粒的质量分数得到PAN/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>纳米复合材料，通过对实心结构和中空结构的PAN/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>纳米复合材料研究发

现，中空结构的PAN/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>纳米复合材料对雷达波的吸收带宽分别从实心结构的9.25 GHz和5.3 GHz拓展到9.9 GHz和7.4 GHz，最大反射损耗从34.2 dB增大至37.1 dB，反射损耗最大差值已经达到7.7 dB。穆永民<sup>[28]</sup>通过理论探索和计算机辅助设计研究出纳米SiC粉体涂层、纳米Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>粉体涂层以及纳米SiC粉体和纳米Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>粉体混合三种吸波涂层，三种涂层样品在8~18 GHz具有较好的吸收效果，且对毫米波具有良好的吸波性能，特别是纳米Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>粉体制成的吸波涂层，吸波效果最好，反射损耗达到-7.988 dB。

近些年国内外对纳米吸波材料进行了深入的研究和探索，发现不同的纳米吸波材料在物理、化学方面各有优缺点<sup>[33]</sup>，如表1所示。

表1 几种纳米吸波材料的优缺点比较  
Tab.1 Comparison of the advantages and disadvantages of several kinds of nano absorbing materials

类型	优点	缺点
金属纳米吸波材料	比表面积大，颗粒表面原子较多	磁损耗不够大，化学稳定性、耐腐蚀性不够好
纳米陶瓷吸波材料	耐高温、质量轻、强度大	制备工艺需要进一步改善，材料的红外吸收对退火温度依赖较强
纳米氧化物吸波材料	韧性好且抑制红外辐射，成本较低	制备的涂层材料面密度大，吸收频带不够宽

尽管纳米吸波材料存在不同程度的缺点，但是由于纳米颗粒的尺寸优势以及独特的结构，纳米材料的吸波性能比常规材料优异。随着社会的发展以及纳米材料的不断开发应用，纳米吸波材料将朝着宽频、轻质、耐高温、韧性好的方向发展。

### 2.2 多晶铁纤维吸波材料

多晶铁纤维吸波材料<sup>[34]</sup>是一种优良的雷达吸波材料和精密度高的磁记录材料，广泛应用于医学、生物工程，因此各国学者对其研究热度较高<sup>[35]</sup>。

国外对于多晶铁纤维吸波材料研究时间早，且技术比较成熟，但由于技术封锁，相关文献较少。美国3M公司<sup>[36]</sup>运用平均直径为0.26 μm，平均长度为6.5 μm，长径比约为25的多晶铁纤维，制备出厚度为1.0 mm的雷达吸波涂层，测试得出的最小反射率低于-30 dB。欧洲GAMMA公司<sup>[37]</sup>研发了以多晶铁纤维为吸收剂的新型雷达吸波涂层，报道称该项技术已用于法国国家战略防御部队的导

弹和飞行器。

国内对多晶铁纤维吸波材料也进行了不少研究,取得了较好的成果。魏赛男等<sup>[38]</sup>提出了用多晶铁纤维作为原材料来开发柔性吸波织物,对直径 10 μm 的铁纤维与直径 18 μm 的不锈钢纤维的力学性能、摩擦性能进行对比实验研究,预测了铁纤维能够顺利实现纺纱的可行性。李小莉<sup>[39]</sup>利用磁引导的有机物气相分解法(MOCVD)制备了多晶铁纤维,通过对不同添加量的吸波材料性能的比较,得出多晶铁纤维涂层的面密度会随着填充比的减小而减小。另外,电磁参数的测试表明,多晶铁纤维的磁导率实部和虚部以及介电常数实部和虚部都很大,得出多晶铁纤维是一种双复介质吸收剂,这也是多晶铁纤维能够实现薄涂层的重要原因之一。赵振声等<sup>[40]</sup>研究了纤维取向样品的制备,测试结果表明,多晶铁纤维吸收剂的微波电磁参数具有明显的形状各向异性,其轴向磁导率大于径向磁导率,轴向介电常数大于径向介电常数。

由于国内学者研究深度不够以及实验条件的限制,多晶铁纤维吸波材料的制备和应用方面还是存在很多问题,其性能与国外材料的性能相比差距较大。因此对于多晶铁纤维吸波材料还需要做进一步的研究,比如从多晶铁纤维的直径均匀化程度等方面来增加数据的准确度等。

2.3 手征吸波材料

手征吸波材料,是一种用任何操作方式都不能让实物与镜像物体重合的材料。它不仅能够吸收电磁波,还能减少电磁波的反射,成为各国学者大力研究开发的一种新型涂覆型雷达吸波材料<sup>[41]</sup>。与普通吸波材料相比,手征吸波材料具有阻抗匹配易实现、频带宽等优点。

20 世纪 80 年代以来,国外学者就开始对手征介质中电磁波的传输特性、手征微波器件及手征特性的物理机制进行研究。A. Lakhtakia 等<sup>[42]</sup>利用表面电荷和电流分析了手征介质的散射特性,研究了任意截面手征吸波材料介质圆柱的散射特性。

目前国内学者对于手征吸波材料研究较少。肖中银等<sup>[43]</sup>的研究表明,掺加手征体后的基质,其介电常数和磁导率都会发生改变,反射系数会受到较大影响,具体实验表明,反射系数会随着介电常数实部的增大而减小。李文军等<sup>[44]</sup>通过调节镍硫合金的组分得到直径在 1~12 μm 之间各种尺寸的微碳

卷,研究表明该微碳卷是一种吸波性能优异的手征吸波材料。

相对于其他吸波材料,手征吸波材料虽然具有吸波频率高、吸收频带宽等优点,但是它的制备工艺比较复杂,限制了其应用。另外,手征参数的频率敏感性比介电常数和磁导率的小,所以手征吸波材料在提高吸波性能、扩展吸波带宽等方面具有很大潜能。

2.4 导电高聚物吸波材料

导电高聚物吸波材料是由含一价阴离子、具有非定域的π<sup>-</sup>电子共轭体系的高聚物组成的吸波材料<sup>[45]</sup>。可以通过化学或者电化学方法掺杂使其电导率在绝缘体、半导体和导体范围内变化。与普通高聚物相比,导电高聚物最显著的特点<sup>[46]</sup>如下:一是通过化学或者电化学的方法掺杂,它们的电导率可以在绝缘体、半导体和金属态宽广的范围内变化,而它的物理化学、电化学行为强烈依赖于掺杂剂的性质和掺杂的程度;二是在导电高聚物研究领域中所引用的“掺杂”术语完全不同于传统的无机半导体的“掺杂”概念。导电高聚物的合成方法主要有电化学方法和化学方法,表 2 主要介绍了两种方法的优缺点<sup>[47]</sup>。

表 2 导电高聚物合成方法的优缺点  
Tab.2 The advantages and disadvantages of preparation methods for conductive polymer

合成方法	优点	缺点
电化学方法	操作简单,对环境 污染少	产量低,不适合大 批量生产
化学方法	制备方法简单,大 批量生产方便	环境污染大,不环 保

自 20 世纪 90 年代以来,美国、法国和日本等国的学者就开始对导电高聚物吸波材料进行研究,准备将导电高聚物作为未来隐身战斗机及侦察机的“灵巧蒙皮”,以及巡航导弹头罩上的可逆智能隐身材料等<sup>[48]</sup>。法国 Laruent<sup>[49]</sup>研究了聚吡咯、聚苯胺在 0~20 GHz 范围内的吸收性能,结果表明聚吡咯平均衰减 7 dB,最大达到 37 dB,频宽为 3.0 GHz。Franchitto 等<sup>[50]</sup>利用十二烷基苯磺酸掺杂的聚苯胺与乙丙橡胶共混制成厚度 3 mm 的复合材料,在 X 波段反射率低于-6 dB,峰值达到-15 dB。

国内近几年对导电高聚物吸波材料研究比较

深入,毛卫民<sup>[51]</sup>等制备了导电聚苯胺/羰基铁粉复合吸波材料,研究表明,它在2~12 GHz频段范围内反射率小于-10 dB。李元勋<sup>[52]</sup>等采用原位掺杂聚合制备了聚苯胺/M型钡铁氧化体纳米复合吸波材料,研究表明,该复合材料的反射率小于-20 dB的频宽可达15.07 GHz。

目前,导电高聚物吸波材料的研发虽然取得了很大的进步,但要将其应用于实际还有两个方面的问题急需解决。

1) 加工性能的改善。导电高聚物链间较强的相互作用,导致其溶解与加工性较差,严重限制了它的广泛应用。

2) 稳定性的改善,拓宽其适用温度范围。导电高聚物放置在大气中,其室温电导率逐渐降低,而且掺杂剂本身不稳定,也影响了导电高聚物的适用温度范围。

### 3 展望

雷达隐身技术的深入发展对涂覆型雷达吸波材料提出了更高的要求,综合涂覆型雷达吸波材料的研究进展,新型涂覆型雷达吸波材料将朝着以下三个方向发展:

1) 雷达吸波材料复合化,即将多种吸波剂复合进行优化设计,如将电损耗材料与磁损耗材料复合,达到良好的阻抗匹配。

2) 雷达吸波材料的多波段化与低频化,探索可同时在厘米波、毫米波发挥效能的吸收剂,特别是在低频段也有良好吸收性能的吸收剂。

3) 提高雷达吸波材料的环境适应能力,研发耐腐蚀、耐高温和抗磨损的吸波材料,拓宽雷达吸波材料的工程应用领域。

### 参考文献

- PANWAR R, AGARWALA V, SINGH D. A Cost Effective Solution for Development of Broad Band Radar Absorbing Material Using Electronic Waste[J]. *Ceramics International*, 2015, 41(5): 2923—2930.
- ZHOU Pei-heng, HUANG Li-ru, XIE Jian-liang, et al. A Study on the Effective Permittivity of Carbon/PI Honeycomb Composites for Radar Absorbing Design[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(5): 3679—3683.
- 张泽洋, 刘祥萱, 张海丰. NiFe<sub>1.98</sub>Nd<sub>0.02</sub>O<sub>4</sub>-Fe 双层吸波涂层设计及制备[J]. *表面技术*, 2014, 43(4): 119—123.
- ZHANG Ze-yang, LIU Xiang-xuan, ZHANG Hai-feng. Design and Preparation of Double-layer Microwave Absorbers Based on Carbonyl Iron and NiFe<sub>1.98</sub>Nd<sub>0.02</sub>O<sub>4</sub>[J]. *Surface Technology*, 2014, 43(4): 119—123.
- BAE G S, KIM C Y. Broadband Multilayer Radar Absorbing Coating for RCS Reduction[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2014, 56(4): 1907—1910.
- 邓智平, 刘朝辉, 周国柱, 等. 平面各向异性羰基铁/树脂复合吸波材料的设计[J]. *功能材料*, 2012, 43(S1): 335—338.
- DENG Zhi-ping, LIU Zhao-hui, ZHOU Guo-zhu, et al. Design of Planar Anisotropy Carbonyl-iron/Epoxy Resin Composites[J]. *Functional Materials*, 2012, 43(S1): 335—338.
- HOLYBYK D G, FORD L F, CHANBER L. Geometric Transition Radar Absorbing Material Loaded with a Binary Frequency Selective Surface[J]. *IET Radar Sonar Nave*, 2011, 5(3): 483—488.
- LYU Hua-liang, JI Guang-bin, LI Xiao-guang, et al. Microwave Absorbing Properties and Enhanced Infrared Reflectance of FeAl Mixture Synthesized by Two-step Ball-milling Method[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, 374(2): 225—229.
- YI Zhao, CAO Xiang-yu, JUN Gao. Broadband Radar Absorbing Material Based on Orthogonal Arrangement of Csretched Artificial Magnetic Conductor[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2014, 56(4): 158—160.
- LIU Yi-shan, HUANG Xin, GUO Pei-pei, et al. Skin Collagen Fiber-based Radar Absorbing Materials[J]. *Chinese Sci Bull*, 2011, 56(2): 202—208.
- LAITH D, HMAD E M, ANTHONYBROW N. On the Integration of Lightning Protection with Stealthcoated Wind Turbine Blades[J]. *Wind Energy*, 2014, 7(6): 1577—1585.
- 徐剑盛, 周万城, 罗发, 等. 雷达波隐身技术及雷达吸波材料研究进展[J]. *材料导报*, 2014, 28(5): 46—49.
- XU Jian-sheng, ZHOU Wan-cheng, LUO Fa, et al. Research Progress on Radar Stealth Technique and Radar Absorbing Materials[J]. *Materials Review*, 2014, 28(5): 46—49.
- 赵欣, 郭一伟. 雷达吸波涂层的质量控制[J]. *电镀与精饰*, 2012, 34(7): 35—37.
- ZHAO Xin, GUO Yi-wei. Quality Control of Radar Absorbing Coating[J]. *Plating and Finishing*, 2012, 34(7): 35—37.
- 胡查雄. 涂覆型雷达吸波涂层厚度超声测量原理及装置[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- HU Zha-xiong. Ultrasonic Principle and Device for Thickness Measurement of Radar Absorbing Coatings[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- 陶宇, 陶志萍. 雷达隐身技术的研究现状及其展望[J]. *材料导报*, 2011, 25(6): 40—44.
- TAO Yu, TAO Zhi-ping. Present Status and Developing Prospect of Radar Stealth Technology[J]. *Materials Review*, 2011, 25(6): 40—44.
- 张衡. 宽频带微波隐身材料的吸波性能研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- ZHANG Heng. Broadband Microwave Absorbing Performance Study of Stealth Materials[D]. Xian: Xidian University, 2012.

- [16] 霍丽霞.舰用雷达吸波涂层的磁控检测系统研究[D].厦门:厦门大学,2013.  
HUO Li-xia. Ship to The Magnetic Control of Radar Absorbing Coatings for Testing System Research[D]. Xiamen: Xiamen University, 2013.
- [17] 陈宇方.电调谐雷达吸波材料研究[D].长沙:国防科技大学,2011.  
CHEN Yu-fang. Electric Tunable Radar Absorbers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [18] 陶东香,吴华,程嗣仪.现代飞机的雷达隐身技术[J].航天电子对抗,2003,34(5):35—39.  
TAO Dong-xiang, WU Hua, CHENG Si-yi. The Radar Stealth Technology of The Modern Airplane, 2003, 34(5): 35—39.
- [19] 王艳红.不同单元 FSS 对雷达吸波材料特性影响的对比研究[J].长春理工大学学报,2013(1):84—86.  
WANG Yan-hong. A Comparative Study on the Effects of FSS with Different Elements on the Characteristics of Radar Absorbing Materials[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2013(1): 84—86.
- [20] 黄李琳.电磁参数可控的舰用雷达吸波涂层研究[D].厦门:厦门大学,2011.  
HUANG Li-lin. Electromagnetic Parameters of the Controlled Ship to Use Radar Absorbing coatings[D]. Xiamen: Xiamen University, 2011.
- [21] 关亮,于海涛,宋烈浦.一种雷达吸波涂层的在线测量方法[J].材料开发与应用,2011,26(1):15—18.  
GUAN Liang, YU Hai-tao, SONG Lie-pu. An On-site Measurement Technique of Radar Absorbing Coatings[J]. Development and Application of Materials, 2011, 26(1): 15—18.
- [22] 李松,于海涛,郑添水.一种雷达吸波涂层厚度无损检测的方法[J].材料开发与应用,2012,27(1):42—45.  
LI Song, YU Hai-tao, ZHENG Tian-shui. An Technique for Thickness Nondestructive Measurement of Radar Absorbing Coatings[J]. Development and Application of Materials, 2012, 27(1): 42—45.
- [23] SAHU N, PANIGRAHI S. Rietveld Analysis of  $\text{La}^{3+}/\text{Al}^{3+}$  Modified  $\text{PbTiO}_3$  Ceramics[J]. Ceramics International, 2012, 38(2): 1085—1092.
- [24] 刘翠枝.宽频带多层吸波材料制备与性能研究[D].北京:北京交通大学,2009.  
LIU Cui-zhi. Broadband Multilayer Absorbing Material Preparation and Performance Study[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [25] 刘顺华,刘军民,董星华.电磁波屏蔽及吸波材料[M].北京:化学工业出版社,2006.  
LIU Shun-hua, LIU Jun-min, DONG Xing-hua. Electromagnetic Wave Shielding and Absorbing Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [26] 石亮.吸波材料的研究进展[J].包装学报,2013,5(3):25—29.  
SHI Liang. Research Progress on Wave Absorbing Materials[J]. Packaging Journal, 2013, 5(3): 25—29.
- [27] 马志梅,马富花,李继红,等.碳纳米管对金属网栅电磁屏蔽效能及可视性的影响[J].表面技术,2014,43(3):101—104.  
MA Zhi-mei, MA Fu-hua, LI Ji-hong, et al. Influence of Carbon Nanotubes on the Shielding Effectiveness and Visibility of Metal Shield[J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 119—123.
- [28] 穆永民.新型纳米雷达吸波涂层的制备及其吸波性能研究[D].南京:南京理工大学,2007.  
MU Yong-min. The preparation of New Nano Radar Absorbing Coatings and Its Absorbing Performance Study[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [29] 张健,张文彦.隐身吸波材料的研究进展[J].稀有金属材料与工程,2008,37(4):504—508.  
ZHANG Jian, ZHANG Wen-yan. Research Progress on Stealth Absorbing Materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(4): 504—508.
- [30] CHOI I, LEE D Y, LEE D G. Optimum Design Method of a Nano-composite Radar Absorbing Structure Considering Dielectric Properties in the X-band Frequency Range[J]. Composite Structures, 2014, 119(2015): 218—226.
- [31] CAO M S, YUAN J. Computation Design and Performance Prediction Towards a Multi-layer Microwave Absorber [J]. Material and Design, 2002, 23: 557—564.
- [32] 何婷婷. PAN/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米复合材料的制备及吸波性能研究[D].无锡:江南大学,2012.  
HE Ting-ting. Research of PAN/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  Nano Composites Preparation and Absorbing Performance[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.
- [33] 董延庭,翁小龙,张捷,等.纳米隐身涂料的应用研究进展[J].重庆工业高等专科学校学报,2004,19(4):1—2.  
DONG Yan-ting, WENG Xiao-long, ZHANG Jie, et al. Study and Application Progress of Nano-camouflage Coatings[J]. Journal of Chongqing Ploytechnic College, 2004, 19(4): 1—2.
- [34] 唐超,官建国,陶剑青.铁纤维的常用制备方法及应用[J].高科技纤维与应用,2005,30(3):36—39.  
TANG Chao, GUAN Jian-guo, TAO Jian-qing. Preparation and Applications of Iron Fibers[J]. Hi-Tech Fiber & Applications, 2005, 30(3): 36—39.
- [35] 孟辉.纤维型雷达隐身吸波材料的研究进展[J].现代涂料与涂装,2005,6(1):8—11.  
MENG Hui. Research of Fiber Type Radar Stealth Materials[J]. Modern Paint and Finishing, 2005, 6(1): 8—11.
- [36] 吴明忠,赵振声,何华辉.层状多晶铁纤维吸波材料的等效电磁参数[J].磁性材料及器件,1998(1):31—35.  
WU Ming-zhong, ZHAO Zhen-sheng, HE Hua-hui. Stratified Polycrystalline Iron Fiber Absorbing Materials Equivalent Electromagnetic Parameters[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 1998(1): 31—35.
- [37] CHARELES E B, ERIC J B, RICHARD J K, et al. Microwave Absorber Employing Acicular Magnetic Metallic Filaments: US, 5085931[P]. 2002-01-22.
- [38] 魏赛男,李瑞洲,陈利.吸波铁纤维的结构及性能[J].纺织学报,2013,34(1):16—19.  
WEI Sai-nan, LI Rui-zhou, CHEN Li. Microstructure and Properties of Radar Absorbing Iron Fibers[J]. Journal of Textile Research, 2013, 34(1): 16—19.
- [39] 李小莉.多晶铁纤维雷达波吸收性能的研究[D].太原:太原理工大学,2004.

- LI Xiao-li. Research of Polycrystalline Iron Fiber Radar Wave Absorbing Performance[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2004.
- [40] 赵振声, 张秀成. 多晶铁纤维吸波材料的微波磁性研究[J]. 磁性材料及器件, 2000, 31(1): 18—20.
- ZHAO Zhen-sheng, ZHANG Xiu-cheng. Research of Polycrystalline Iron Fiber Absorbing Materials Microwave Magnetic[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2000, 31(1): 18—20.
- [41] 廖复疆. 复合的手征介质材料[J]. 真空电子技术, 2005(1): 1—8.
- LIAO Fu-jiang. Composite the Chirality of Dielectric Materials[J]. Vacuum Electronics, 2005(1): 1—8.
- [42] LAKHTAKIA A, VARADAN V V. On the Influence of Chirality on the Scattering Response of a Chiral Scatterer[J]. IEEE on EMC, 1999, 29(1): 71—72.
- [43] 肖中银, 王子华, 徐得名. 微波手征材料等效电磁参数对吸波特性的影响[C]//2003 全国微波毫米波会议. 上海: [出版者不详], 2003.
- XIAO Zhong-yin, WANG Zi-hua, XU De-ming. Microwave Chirality Materials Equivalent Electromagnetic Parameters on the Impact of Porter[C]//2003 Session of the National Microwave Millimeter Wave. Shanghai: [s.n.], 2003.
- [44] 李文军, 郭燕川, 徐海涛, 等. 新型手征吸波材料——微碳卷的合成与表征[J]. 西安工业学院学报, 2004(4): 55—60.
- LI Wen-jun, GUO Yan-chuan, XU Hai-tao, et al. New Chirality Absorbing Material—Synthesis and Characterization of Micro Carbon Volume[J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 2004(4): 55—60.
- [45] 毛倩瑾, 周美玲, 陆山, 等. 导电高聚物吸波材料的研究进展[J]. 北京工业大学学报, 2004(4): 488—493.
- MAO Qian-jin, ZHOU Mei-ling, LU Shan, et al. Research Progress of Conductive Polymer Absorbing Materials[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2004(4): 488—493.
- [46] 哈恩华, 黄大庆, 丁鹤雁. 新型轻质雷达吸波材料的应用研究及进展[J]. 材料工程, 2006(3): 55—59.
- HA En-hua, HUANG Da-qing, DING He-yan. The New Light Weight Application Research and Progress of the Radar Absorbing Material[J]. Materials Science and Engineering, 2006(3): 55—59.
- [47] LYU H, JI G, LI X, et al. Microwave Absorbing Properties and Enhanced Infrared Reflectance of FeAl Mixture Synthesized by Two-step Ball-milling Method[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2015, 374: 225—229.
- [48] 张卫东. 国外隐身材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2000(3): 1—4.
- ZHANG Wei-dong. Research Progress of Stealth Material Abroad[J]. Aerospace Materials & Technology, 2000(3): 1—4.
- [49] WONG P, CHAMBERS B A. Large Area Conducting Polymer Composites and Their Use in Microwave Absorbing Material[J]. Electronics Letters, 1992, 28(17): 1651—1653.
- [50] FRANCHITTO M, FAEZ R, ORLANDO A J F, et al. Electromagnetic Behavior of Radar Absorbing Materials Based on Conducting Polymers[C]//Microwave and Optoelectronics Conference. Hong Kong: IEEE MTT-S International, 2001: 137—140.
- [51] 毛卫民, 方鲲, 吴其晔, 等. 导电聚苯胺/羰基铁粉复合吸波材料[J]. 复合材料学报, 2005, 22(1): 11—14.
- MAO Wei-min, FANG Kun, WU Qi-ye, et al. Conductive Polyaniline/Iron Carbonyl Powder Composite Absorbing Material[J]. Acta Material Composite Sinica, 2005, 22(1): 11—14.
- [52] 李元勋, 刘颖力, 张怀武, 等. 聚苯胺钡铁氧体纳米复合材料的制备、表征及性能[J]. 高等学校化学学报, 2008, 3(3): 640—644.
- LI Yuan-xun, LIU Ying-li, ZHANG Huai-wu, et al. Polyaniline Barium Ferrite Preparation, Characterization and Properties of Nanocomposite[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2008, 3(3): 640—644.