

雷达吸波结构材料及新型吸收剂的研究进展

徐洪敏 郑 威 王小兵 齐燕燕

(山东非金属材料研究所, 济南 250000)

文 摘 综述了夹层型吸波材料及层板型吸波材料的吸波机理、设计原则、构成要素及应用效果。详细介绍了铁磁性吸收剂、碳基吸收剂及新型吸收剂等吸波材料常用吸收剂的研究现状、应用前景及每种吸收剂的优点和不足之处,探讨了未来吸收剂的发展前景、发展趋势。

关键词 隐身技术,吸收剂,复合材料,纤维

中图分类号:TN974

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.06.001

Research Status of Radar Absorbing Material Structure and New Absorbent

XU Hongmin ZHENG Wei WANG Xiaobing QI Yanyan

(Shandong Institute of Nonmetal Materials, Jinan 250000)

Abstract With the development of modern information technology, the weapons and equipment environment increasingly complex. Stealth technology is becoming more popular in the weapons areas for the aims of hitting the enemy targets and improving the operational capability. The radar stealth technology is an important research direction and researchers put more attention for radar stealth technology. This article introduces the research status and absorbing technology of absorbing structure composite materials.

Key words Stealth technology, Absorbent, Composite material, Fibers

0 引言

随着信息技术的高速发展,各种隐身技术已广泛应用于隐身飞机,隐身导弹,隐身装甲车等各种隐身武器^[1]。目前,雷达隐身技术仍然是武器装备的一种重要的隐身技术,武器装备外形设计和其他隐身技术成本昂贵且技术复杂,所以隐身材料成为雷达隐身的主要技术受到广泛重视^[2]。雷达隐身材料是指能吸收雷达波、使目标回波强度显著衰减的一类材料,其主要目的是降低雷达散射截面积。雷达结构吸波材料具有承载和隐身的双重功能,成为雷达波隐身材料的重要研究领域,作为雷达隐身材料的重要组成部分,各种吸收剂也成为人们研究的重点。

1 雷达隐身材料

根据吸波机理的不同,雷达隐身材料可分为介电损耗型和磁损耗型;根据成型制备机制不同,可分为涂覆型和结构型。涂覆型吸波材料应用比较早,将吸波剂与黏结剂混合后涂覆于目标表面形成吸波层,成

本低,但是耐性差^[3]。结构隐身复合材料兼有承载和隐身的双重功能,成为目前隐身材料的主要技术手段。按吸波复合材料结构形式不同,结构吸波材料又可分为两类:层板型吸波材料、夹层型吸波材料。

夹层吸波复合材料的面板,不仅要求强度高,而且透波性能要好;夹芯多以填充损耗介质的蜂窝、波纹结构材料组成。对于夹层结构的匹配设计,通常由损耗介质的浓度不同来匹配,或者通过设计蜂窝孔格的尺寸、蜂窝的高度变换实现宽频吸收的效果。高正平等^[4]研究了蜂窝材料本身的尺寸对吸波性能的影响,并提出了一个数值计算的方法,计算出在8~18 GHz内,蜂窝的高度、孔径、吸收剂用量等不同情况下的吸波性能。泡沫夹心材料近似于实体材料,理论上吸收剂的含量会比蜂窝夹层结构高,而且泡沫夹层材料可以形成多层吸波结构,有助于拓宽吸收频带,如图1、图2所示。另外,层板型的吸波复合材料多用于装甲、飞机的主体承载结构(图3)。层板型吸

收稿日期:2014-09-23

作者简介:徐洪敏,1989年出生,硕士,主要从事雷达结构隐身材料的研究工作。E-mail:xhm6762@126.com

波复合材料通常由透波层、损耗层、反射层组成,有时为了更好的阻抗匹配,根据梯度吸波原理设计层板吸波复合材料,通常设计有十几层甚至几十层的材料组成,以便获得更宽的吸波频带和更好的吸波效果。

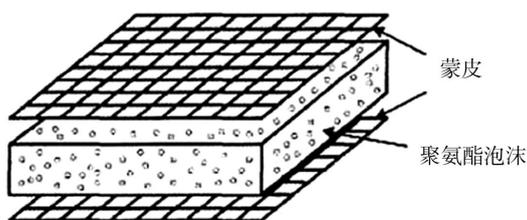


图1 泡沫夹心结构复合材料

Fig.1 Foam sandwich composite materials

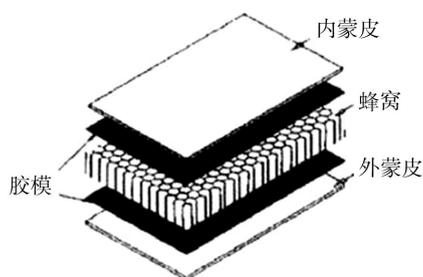


图2 蜂窝状结构复合材料^[5]

Fig.2 Honeycomb composite materials

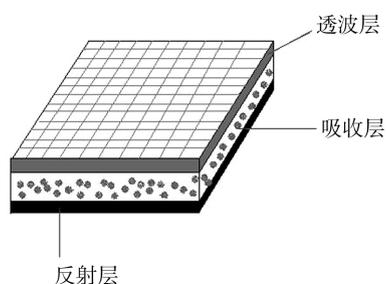


图3 层板型结构复合材料

Fig.3 Layer plate structure composite materials

2 常用吸收剂的研究现状

吸波材料的吸波性能主要取决于吸收剂的损耗吸收电磁波能力,吸收剂既有传统的吸收剂,比如铁磁性吸收剂、炭黑、石墨、碳纤维类吸收剂,还有一些新型的吸收剂,比如碳纳米管、导电高聚物、手性聚合物吸收剂、新型等离子体吸收剂等等,还有一些特殊的结构也会具有吸波功能,比如电路模拟结构等等^[6-7]。

2.1 铁氧体/金属微粉

铁氧体吸收剂是一种应用很广泛的铁磁性吸收剂,它的电阻率比较高,可避免金属导体在高频下存在的屈服效应,电磁波可有效的进入,磁性金属微粉

兼有介电损耗和磁损耗,对微波的吸收比铁氧体要好。Liu等^[8]制备的(Fe, Ni)/C纳米胶囊复合材料,在12.4~18 GHz具有低于-10 dB的电磁波吸收性能,碳外壳一方面增强材料的耐腐蚀性能,另一方面将金属粒子隔离,有效降低了涡流损耗。目前应用的金属微粉吸收剂有两个发展方向:一是纳米级别的微粉粒子,利用纳米粒子的特殊效应来提高吸波效果;二是铁磁性纤维,利用粒子的各向异性来提高吸波性能。

2.2 碳系吸收剂

2.2.1 碳纤维吸收剂

碳纤维作为一种复合材料中常用的增强体材料,电阻率约为 $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$,是雷达波的强反射体,因此不利于作为隐身结构材料的吸收剂^[9]。只有经过特殊处理:(1)对碳纤维进行一定的预处理,在碳纤维表面覆盖一层金属或者高分子聚合物涂层,可以改善碳纤维的吸波性能^[10];(2)改变碳纤维的截面形状与尺寸,或者采用螺旋碳纤维也能明显改善碳纤维的吸波性能;(3)采用短切碳纤维,改变碳纤维在复合材料中排布方式。处理后的碳纤维才能作为性能优良的吸收剂用于吸波材料。

日本研制出一种吸波型特殊碳纤维,并与环氧树脂复合制备了层状吸波复合材料,在X(8~12 GHz)波段具有很好的吸波性能。谢伟等^[11]以中空多孔聚丙烯腈原丝为原料,通过预氧化处理和碳化处理工艺制备了中空多孔碳纤维。研究显示,随着中空多孔碳纤维的体积分数的增大,复合材料的介电常数随之增大,在2~18 GHz内,体积分数为33.3%,厚度为2 mm,最低反射率为-21.5 dB,其中<-10 dB的反射率带宽为2.88 GHz。

2.2.2 碳纳米管吸波材料

碳纳米管以其独特的纳米结构、手征和螺旋特性表现出较宽的频带吸收,对碳纳米管进行表面修饰是目前国内外研究较热的一种制备雷达吸波材料的技术。张楠等^[12]制备了镀镍碳纳米管,经过综合表征之后,镀镍碳纳米管的电磁参数均有所提高,并制备了镀镍碳纳米管吸波涂料,在4~18 GHz吸波效果均有所提高。北京化工大学的赵东林等^[13]制备的1.4 mm 5wt%的碳纳米管涂层在12 GHz的吸波效果达到了-23 dB。

2.2.3 石墨、炭黑吸收剂

国内目前关于石墨的研究主要集中在与磁性金属微粉和铁氧体掺杂方面,和铁氧体颗粒吸收剂相比,石墨具有相对宽的吸波带宽。刘世杰等^[14]为了提高石墨的表面阻抗匹配能力,改善其吸波性能,采用化学镀镍的方法对石墨进行了表面改性,结果表明,改性后的石墨介电常数有所降低,磁导率有所升高,介电常数和磁导率更加接近,阻抗匹配能力得到

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014年 第6期

提高。吸波频带得到提高,最大吸收峰向高频移动。候近等^[15]采用层状无机物和石墨涂层的复合,制备了双层复合吸波涂层。当层状无机物和表层石墨的质量分数分别为11%和16.6%时,小于-5 dB和-10 dB的有效频带宽度分别为5.36 GHz和3.12 GHz。石墨烯自身具有良好的导电性能,特别是用化学方法制备出的石墨烯由于有大量缺陷和官能团的存在,能够产生费米级别的局域化态,这些均有利于对电磁波的衰减,是石墨烯成为性能优异的吸收剂开辟了道路^[16]。哈尔滨工业大学的王超等^[17]将吸波性能良好的镍钴粉体分散在氧化石墨溶液中,利用 Hummer 氧化制备石墨烯与磁性金属的复合物,分别在不同石墨烯磁性金属含量和不同复合物厚度的情况下测定其吸波性能。



图4 石墨烯与磁性金属复合物的SEM图^[17]

Fig.4 SEM of graphene and magnetic metal compounds

炭黑的损耗主要是介电损耗,如乙炔炭黑填充到橡胶中,在橡胶内部形成导电链和局部导电状态,达到对电磁波的吸收。刘海韬等^[18]利用浆料刷涂的方法将高温吸收剂乙炔炭黑固定到SiC纤维上,然后制备成具有吸波性能的2D-SiC_f/SiC复合材料,炭黑填料含量的提高,吸收率曲线向低频方向移动,但是复合材料的介电常数频散特性比较差,小于-10 dB的带宽比较窄,适合在频段要求不高的情况下使用。胡雅琴等^[19]用钛酸酯偶联剂对炭黑表面进行处理,并以丙烯腈-苯乙烯-丁二烯聚合物(ABS)为基体,制备了层板复合材料。制备成型的炭黑吸波复合材料最高吸收峰达到-21.76 dB,具有较好的吸波效果。偶联剂一方面可以降低炭黑粒子之间的结合力,增加炭黑粒子的分散性,另一方面可以使炭黑粒子和ABS基体更紧密的结合在一起。炭黑作为吸波剂,和石墨一样具有抗氧化性差、单一使用下频带窄等问题,近年来对炭黑和石墨的研究变少,但是作为传统经典的吸收剂材料,在隐身材料领域还是有不可替代的作用。此外将炭黑、石墨与其他新型吸收剂复合使用,还是有很大的应用前景。

2.3 新型吸收剂

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014年 第6期

2.3.1 电路模拟吸波结构

将电路模拟结构引入到吸波材料中,可以在质量增加很小的情况下实现较好的电磁吸收^[20]。相比于传统的吸波材料,电路模拟吸波材料能很好减少材料质量、提高吸波性能,此外电路模拟吸波材料可以很好设计波阻抗匹配,实现宽频吸收。研究者提出了很多的改进方法,比如引入多种群进化、将神经网络算法与遗传算法相结合及提出了混合区间遗传算法、排序遗传算法等技术^[21-24]。但是电路模拟吸波材料通常有一定的频率选择特性,只能在某一频段内吸收电磁波^[25]。邹田春等^[26]研究了含同轴线活性碳毡电路屏复合材料的微波吸收特性。电路屏的阵列单元间距存在最佳值,在同轴线内半径 a 、外半径 b 、间距 c 分别为3、15、7 mm的条件下,此材料具有最佳的吸波效果,在7~18 GHz内有-10 dB的吸收。

2.3.2 导电高聚物吸收剂

导电高聚物由共主链的绝缘高分子通过化学与电化学方法与掺杂剂进行电荷转移复合而成的,由于其独特的物理化学特性而受到科研工作者的高度重视。导电高聚物的电磁参数、吸波性能等与高聚物的结构、室温导电率、掺杂剂性质、微观形貌、涂层结构等因素有关。另外,将介电损耗的导电高聚物与磁损耗为主的无机介质复合在一起可望发展成一种兼有两种损耗机理的新型吸波材料^[27]。

在导电高分子中,导电聚苯胺(PANI)有许多优异的性能,导电率高、质轻、掺杂态和未掺杂态的环境稳定性好、易于制备、单体的成本低等优点,美国已研制出一种导电聚苯胺雷达波吸波材料,具有很好的吸波性能。W. L. XUE等^[28]将纤维状的聚苯胺(PANI)和颗粒状的 Fe_3O_4 用机械搅拌的方法混合制备了PANI- Fe_3O_4 纳米复合材料,随着 Fe_3O_4 的含量的增加,复合材料的导电率下降,饱和磁化强度增大,吸波性能增加。Dong等^[29]制备了核壳结构的Ni/PANI纳米复合物,研究发现随着复合材料中聚苯胺与纳米级镍粉比例的不同,电磁参数、介电损耗、磁损耗随之呈现规律性变化,有望获得性能优良的微波吸收剂。

2.3.3 手性材料

手性吸波材料的根本特点是电磁场的交叉极化,利用它的这个性质实现材料的吸波性。对于普通的电磁材料,人们可以通过改变其介电常数 ϵ 、磁导率 μ 及材料厚度来提高其吸波性能。与普通的吸波材料相比,手性吸波材料多了一个可调的手性参量 ξ ,而且调整手性参数比调节电参数和磁导率相对容易,可以实现在较宽的频带上满足降低反射率的要求^[30]。但是必须说明的是调节手性参数只能在一定的范围内提高吸波性能,过大或过小都不行。目前,关于手性吸波材料的研究主要集中在螺旋碳纤维、手性导电聚合物这两方面。赵东林等^[31]通过气相沉淀法制备

了螺旋形碳纤维手性吸收剂,并以此纤维为吸收剂制备了 NOMEX 蜂窝夹心结构吸波材料,研究表明厚度在 9.5 mm,在 3.76 ~ 18 GHz 的频率范围,反射率小于-10 dB。

3 结语

目前国内关于雷达吸波材料的研究还存在很多的不足,与国外还存在很大的差距,比如吸波材料吸波性能不稳定、对环境的耐性较差、无法实现多频段的宽频吸收等等。随着雷达隐身技术日新月异的发展,各种材料更多的向多功能材料方向发展,结构型吸波材料因其结构的可设计性,可以兼顾吸波和承载双重功能,并有利于拓宽吸收频带,受到人们的日益重视,已成为吸波材料和复合材料研究领域一个十分重要的研究方向。雷达结构吸波材料因兼有承载和吸波多重功能,将成为吸波材料的重要研究方向。伴随着吸波材料的发展,各种新型的吸收剂逐渐大量应用隐身武器领域,此外,各种吸收剂的复合使用,更加有效的提高材料的吸波效果

参考文献

[1] 赵培聪. 2010 年隐身与反隐身技术发展情况[J]. 现代雷达, 2011, 33(4) : 9-12

[2] 张月芳, 郝万军. 吸波材料研究进展及其对军事隐身技术的影响[J]. 化工新型材料, 2012, 40(1) : 13-15

[3] 多层结构吸波复合材料的设计与制备[D]. 北京: 北京交通大学, 2007 : 1

[4] Gao Zhengping, Luo Qing. Reflection characteristics of impregnated absorbent honeycomb under normal incidence of plane wave[J]. Journal of UEST of China, 2003, 32(4) : 389-394

[5] Feng Y B, Qiu T, Shen C Y. Absorbing properties and structural design of microwave Absorbers based on carbonyl iron and barium ferrite[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2007, 318: 8-13

[6] 杨国栋, 康永, 孟前进. 微波吸波材料的研究进展[J]. 应用化工, 2010, 39(4) : 354-59

[7] Che R C, Zhi C Y, Liang C Y, et al. Fabrication and microwave absorption of carbon nanotubes/CoFe₂O₄ spinel nanocomposite[J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 88: 033105

[8] Liu X G, Li B, Geng D Y, et al. (Fe, Ni)/C nanocapsules for electromagnetic-wave-absorber in the whole ku-band[J]. Carbon, 2009, 47: 470-474

[9] 李斌鹏, 王成国, 王雯. 碳基材料研究的进展[J]. 材料导报 A: 综述篇, 2012, 26(4) : 9-12

[10] 石敏先, 黄志雄. 新型吸波材料研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(3) : 36-39

[11] 谢炜, 程海峰. 短切中空多孔碳纤维复合材料的吸波性能[J]. 无机材料学报, 2008, 23(3) : 482-485

[12] 张楠, 陈海路, 胡书春. 化学镀镍碳纳米管的制备及其电磁学和吸波性能研究[J]. 新型炭材料, 2012, 40(5) : 81-83

[13] 赵东林, 沈曾民. 含碳纳米管微波吸收材料的制备及其微波吸收性能研究[J]. 无机材料学报, 2005, 20(3) : 608

[14] 刘世杰, 丘泰, 黄东. 石墨表面化学镀 Ni-P 非晶的制备与电磁性能[J]. 电子元件与材料, 2010, 29(3) : 28-30

[15] 候进, 陈国华. 层状无机物和石墨复合涂层的吸波特性研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(3) : 202-204

[16] Saini P, Choudhary V, Singh B P, et al. Polyaniline-MWCNT nanocomposites for microwave absorption and EMI shielding[J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 113(2) : 919-926

[17] Wang Chao, Han Xijiang, et al. The electromagnetic property of chemically reduced graphene oxide and its application as microwave absorbing material[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(7) : 072906

[18] 刘海韬, 程海峰. 不同炭黑填料含量对 2D-SiC_f/SiC 复合材料介电及雷达吸波性能研究[J]. 航空材料学报, 2009, 29(5) : 56-60

[19] 胡雅琴, 王贵芹. 偶联剂对炭黑/ABS 复合平板材料吸波效能的影响[J]. 塑料工业, 2005, 33(10) : 47-49

[20] Xie W, Cheng H F, Chu Z Y, et al. Effect of FSS on microwave absorbing properties of hollow porous carbon fiber composites[J]. Mater Design, 2009, 30(4) : 120

[21] Jiang Fengguo. The hybrid genetic algorithm based on the niche technology [C]//IEEE: Control conference (CCC), 2010

[22] Peng Feiguo, Xue Zhiwang, Ying Shihan. The enhanced genetic algorithm for the optimization design [J]. International Conference on Biomedical Engineering and Informatics, 2010(7) : 2990-2994

[23] Yan Taishan. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 2002, 6(2) : 182-196

[24] Li Yanfei, Lu Guizhen, Piao Dazhi, et al. Research on low reflection material of double layer medium structure [J]. IEEE Electromagnetic Compatibility, 2007. EMC 2007

[25] 姚承照, 赵晨. 电路模拟吸波材料带宽拓展方法探索[J]. 宇航材料工艺, 2008, 38(5) : 33-36

[26] 邹田春, 赵乃勤. 含同轴线活性碳毡电路屏复合材料的吸波性能研究[J]. 材料导报: 研究篇, 2010, 24(9) : 24-27

[27] 徐生求, 段永发. 新型吸波材料的研究现状与展望[J]. 空军雷达学院学报, 2001, 15(1) : 45-48

[28] Xue W Y, et al. Electrical and magnetic properties of the Fe₃O₄-polyaniline nanocomposite pellet containing DBSA-doped polyaniline and HCl-doped polyaniline with Fe₃O₄ nanoparticles [J]. Synthetic Metals, 2006, 156(7/8) : 506

[29] Dong X L, Zhang X F, Huang H, et al. Enhanced microwave absorption in Ni/polyaniline nanocomposites by dual dielectric relaxations[J]. Appl. Phys. Lett., 2008, 92(1) : 013127

[30] 李玉莹, 刘祖黎. 不同复合基底旋波介质的吸波特性研究[J]. 宇航材料工艺, 2000, 30(6) : 39-42

[31] 赵东林, 高云雷. 螺旋形碳纤维结构吸波材料的制备及性能研究[J]. 材料应用, 2009(6) : 60-63

(编辑 李洪泉)