隐身材料专题

雷达隐身常用电磁波吸收材料研究进展

高海波[1]，鲜勤[2]，王健伦[3]，周丽娜[2]

（1. 驻重庆地区军代室，重庆 400039；2. 重庆嘉陵华光光电科技有限公司，重庆 400700；
3. 重庆铁马工业集团有限公司，重庆 400050）

摘　要：分析了电磁波与吸波材料的相互作用机理，较详细地介绍了铁氧体类、羰基金属粉类、多晶金属纤维类、导电高聚物类和纳米类吸波材料的研究和应用现状，指出了不同种类电磁波吸收材料综合优化应用技术对实现多波段兼容隐身的重要意义。

关键词：电磁波吸收材料；吸收原理；铁氧体；羰基金属粉

中图分类号：TB34　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1001-3660(2013)06-0088-04

Research Progress of Frequently-used Electromagnetic Wave Absorbing Material for Radar Stealth

GAO Hai-bo[1], *XIAN Qin*[2], *WANG Jian-lun*[3], *ZHOU Li-na*[2]

(1. Military Representative Office in Chongqing, Chongqing 400039, China; 2. Chongqing Jialing Huaguang Photoelectricity Tech. Co., Ltd, Chongqing 400700, China; 3. Chongqing Tiema Industry Group Co., Ltd, Chongqing 400050, China)

ABSTRACT: This paper analyzes the interaction mechanism of the electromagnetic wave and the absorbing material, introduces the study and application status of ferrite, metal carbonyl powder, polycrystalline metal fiber, conductive polymers and nano-absorbing materials in detail, and points out the significance of achieving multiple-band stealth by comprehensive optimization and application of different kinds of electromagnetic wave absorbing materials.

KEY WORDS: electromagnetic wave absorbing material; absorbing principle; ferrite; metal carbonyl powder

现代战争以高、精、尖技术的广泛应用为显著特点。随着现代各种光电磁探测技术的迅猛发展，先进侦察系统和精确打击系统在实际作战中对军事装备及设施的威胁越来越大。隐身技术的应用能够显著提高武器装备的生存、突防和纵深打击能力，已经成为陆、海、空一体化现代战争中最重要、最有效的突防技术手段，是世界各军事强国研究的热点之一。隐身技术通过各种高技术手段的综合应用，降低目标的各种特征信号，使其不被发现，或缩短敌方的有效发现距离。雷达是探测目标的最可靠技术手段，其主要技术方法有：外形设计、电磁波吸收材料、有源与无源对消技术，其中，电磁波吸收材料技术是最常用且行之有效的隐身手段之一。

文中从电磁波与吸收材料相互作用的基本原理出发，着重介绍了电磁波吸收材料的主要种类和发展现状，对隐身材料技术的发展具有一定的指导意义。

1　电磁波与吸波材料相互作用机制

电磁波吸收材料要具备与自由空间的阻抗匹配特

收稿日期：2013-08-05；**修订日期**：2013-08-25

Received：2013-08-05；**Revised**：2013-08-25

作者简介：高海波(1985—)，男，硕士，工程师，主要从事军品质量管理与监督工作。

Biography: GAO Hai-bo(1985—), Male, Master, Engineer, Mainly engaged in quality management and supervision of military.

性和对电磁波的衰减特性等 2 个特性,通过各种损耗机制将电磁波能量转化为热能或其他形式的能量而损耗掉,从而实现对入射电磁波的有效吸收[1—2]。

1.1 自由空间阻抗匹配特性

吸波结构体都可以等效为 1 个由多个阻抗组成的电路,为了让尽可能多的电磁波从表面进入介质内部而损耗掉,就必须设计特定的边界约束条件减少电磁波在材料表面的反射,即材料介质表面的反射因数 R 最小。吸波材料的功率反射因数 R 为:

$$R=20\lg\left|\Gamma\right|=20\lg\left|\frac{Z_{in}(N)-Z_0}{Z_{in}(N)+Z_0}\right| \quad (1)$$

式中:$Z_{in}(N)$ 为吸收材料界面输入阻抗;Z_0 为自由空间阻抗;Γ 为吸波材料电压反射因数。当吸波体的等效输入阻抗与自由空间阻抗相匹配时,吸波体对入射到材料表面的电磁波无反射,电磁波全部进入吸波体内部。

1.2 电磁波衰减特性

电磁波进入吸波体内部后通过各种损耗机制而迅速衰减掉,达到降低目标雷达散射特性的目标。电磁波损耗大小可用磁损耗因子和电损耗因子来表征[3]:

$$\tan\delta=\tan\delta_e+\tan\delta_m=\varepsilon''/\varepsilon'+\mu''/\mu' \quad (2)$$

式中:δ_e 为电损耗角;δ_m 为磁损耗角;ε'为复介电常数实部值;ε''为复介电常数虚部值;μ'为复磁导率实部值;μ''为复磁导率虚部值。对于满足阻抗匹配特性的雷达波吸收材料而言,其 ε'',μ''值越大,对入射电磁波的损耗越大。

2 吸波材料的研究现状

2.1 铁氧体类吸波材料

铁氧体类吸收剂应用最为广泛的是尖晶石型铁氧体,其吸收机理主要是自然频率共振和畴壁共振。铁氧体材料具有良好的频率特性,其介电常数较小,磁导率较大,适合作为吸波体匹配层吸收材料,在拓宽频带方面具有良好的应用前景[4—6]。刘渊等[7]以镍铁氧体为基体,采用溶胶-凝胶法制备了二元镍基复合铁氧体 $Ni_{0.5}A_{0.5}Fe_2O_4$(A 为 Zn,Co,Mn,Cu),对粉末的结构及电磁性能进行表征并对其吸波性能进行优化设计。结果表明:4 种离子取代后均能形成在室温条件下具有超顺磁性的纯净镍基铁氧体粉末,在最佳匹配厚度为 5.63 mm 时,其最小反射率峰值为 -36.26 dB,小于 -10 dB 的频宽可达 4.7 GHz。邓智平等[8]研究了铁氧体/石蜡同轴样品的介电常数与磁导率频谱特性,以环氧树脂-聚酰胺固化剂体系为基体材料制备了厚1.3 mm 的单层平板吸波材料,在 8 ~ 18 GHz 频段最小反射值达到 -19.7 dB,小于 -10 dB 的带宽达到 8 GHz。

据报道,日本 NEC 公司研制了一种雷达波反射率为 -10 dB 时,频带宽度达 7 GHz 的铁氧体吸波涂料。印度 Roorkee 大学的教授以橡胶作为粘结剂,六角型钡基铁氧体为吸收剂制备出单层吸波涂料,在多个频带范围内的雷达波反射衰减大于 10 dB[9]。

2.2 羰基金属粉类吸波材料

羰基金属粉类吸收材料是一种传统吸波剂,在吸波材料领域应用广泛,其磁导率实部、虚部频散效应弱,温度稳定性好,对雷达波具有强烈的吸收,是应用较早的一类磁性金属粉吸收剂[10]。穆武第等[11]研究了添加导电纤维对羰基铁粉吸波涂层电磁参数和反射率的影响规律:导电纤维的添加使磁性金属微粉吸波涂层的介电常数增大,吸收峰向低频移动,有利于改善低频段的吸收效果。利用分块设计的方法可以拓宽吸波材料在频率范围内的吸收频带,同时导电纤维的加入还降低了吸波涂层的面密度。周永江等[12]以石蜡为粘合剂,制备了不同羰基铁粉含量的吸波材料,测试了其电磁参数,利用完全枚举法对羰基铁粉吸波涂层进行了优化设计,设计中引入了面密度指标。满足 X 波段反射率小于 -10 dB 的带宽大于 3.9 GHz 的涂层最小面密度为 5.49 kg/m^2。Y. J. Tan 等[13]以羰基铁粉为主体吸收剂制备了不同厚度的聚氨酯基吸波材料。研究发现:制备的吸波材料厚度从 0.5 mm 增加到 1.5 mm 时,吸收峰向低频移动,吸收峰值不断增大,雷达波反射率在 13.24 GHz 时达到最小值 -33.19 dB。

2.3 金属纤维类吸波材料

金属纤维吸波材料按照元素组成主要包括铁纤维、钴纤维、镍纤维及其合金纤维等,金属纤维的特殊形状决定了其具有较高的磁导率和较小的电阻率,在交变电场作用下,纤维内自由电子因振荡运动产生振荡电流,将电磁波能量转变为热能的同时还具有较强的介电损耗。童国秀等[14]采用轻质、高介电常数的纳米铁纤维与羰基铁粉共混,制备了轻质宽带吸波涂层,研究了纳米铁纤维含量对复合吸波剂微波电磁与吸收特性的影响。结果表明:复合吸波剂中纳米铁纤维的质量分数为 2.2% ~4.4% 时,涂层有更低的面密度和更宽的有效带宽。欧洲 GAMMA 公司研制了一种丝径为 1 ~ 5 μm,长度为 50 ~ 500 μm 的羰基铁纤维吸收剂,其纤维密度非常低,结构呈现各向同性或各向异性 2 种形式。采用该种材料制备的吸波体在 4 ~ 8 GHz 范围内反射率小于 -5 dB,8 ~ 18 GHz 范围内反射率小于 -8 dB。美国 3 M 公司设计开发了一种纤维体积比只有 25% 的多晶铁纤维吸波涂层,在 2 ~ 18 GHz 频率范围内雷达波反射率小于 -10 dB 的带宽达到 11 GHz,

雷达波反射率小于-30 dB 的带宽达到了 3 GHz。

2.4　导电高聚物类吸波材料

20 世纪 70 年代后期,MacDiarmid Heeger 研发团队首次成功制备出了具有金属电导率掺杂聚乙炔的高分子材料。由于导电高分子材料都具有较好的微波吸收性能,各国科学家加大了在该领域的研发力度,各种导电聚合物如聚苯胺(Polyaniline, PANI)[15—16]、聚吡咯(Polypyrrole, PPy)[17]、聚乙炔(Polyacetylene, PA)、聚噻吩(Polythiophene, PTh)[18]、视黄基席夫碱盐类聚合物相继问世。陈骁等[19]采用不同聚合方法合成了导电聚苯胺粉体材料,并对材料的电磁参数和吸波性能进行了研究。结果表明:通过反相微乳液法和乳液法制备的聚苯胺吸收率大于 10 dB 的频宽大于 7.5 GHz,最大吸收率达到 30 dB,是一种非常优异的导电高分子吸波材料。Truong 等[20]以硫代硫酸盐为掺杂剂、三氯化铁为氧化剂与聚吡咯复合制备出了厚度为 2.5 mm 的导电高分子吸波材料。研究表明:该高分子材料在 1 ~20 GHz 频率范围内吸收率大于 10 dB 的带宽为 6 GHz,有利于拓宽吸波体的损耗频率范围。另据报道,美国 Carnegie-Mel-Ion 大学研发团队制备出了以某种特定结构视黄基席夫碱盐为电磁波吸收剂的涂覆型吸波材料,该材料涂装于目标表面可使其 RCS 减缩 80%,而密度只有铁氧体类吸波材料的 10%,对减轻吸波材料的质量具有重要的意义。

2.5　纳米类吸波材料

纳米材料具有非常大的比表面积,量子尺寸效应、界面效应明显,电磁波与其发生相互作用产生界面极化、多重散射作用、磁滞损耗和分子分裂能级激发等物理现象,进而有效损耗电磁波能量,达到吸波效果。目前,纳米吸波材料主要包括:纳米铁氧体、纳米碳化硅、纳米氮化铁、纳米金属和合金、纳米金属膜等。于仁光等[21]采用化学法成功制备了 FeB 超细非晶合金颗粒,研究了颗粒粒径与电磁波损耗性能的影响关系。试验结果表明:粒径在 10 ~25 nm 范围内的磁性纳米粉比常规材料的矫顽力大 1000 倍,此时具有良好的吸波性能。

据报道,美国科学家成功研制出了一种对雷达波吸收率高达 99% 的纳米吸波材料,目前正在研发厘米波/毫米波/红外/可见光兼容纳米复合吸波材料。法国科学家成功研制了一种宽频吸波纳米薄膜涂层,具有特殊的调制周期结构,该涂层在 50 MHz ~50 GHz 频率范围内具有良好的吸波性能。

3　结语

随着信息化战场的不断发展,隐身技术指标成为新型武器装备的关键技术指标之一。由于隐身材料具有隐身效果显著、使用方便、成本低等特点,因此其势必成为隐身技术研究的重点之一。其主要发展方向有以下几个方面:智能材料、仿生材料及左手材料等新作用机理材料的研发;为实现宽频带作用效果,不同损耗机制材料综合优化应用的技术;隐身材料低成本化;隐身材料新型施工工艺研究。

参考文献

[1] 康青. 新型微波吸收材料[M]. 北京:科学出版社,2006.
KANG Qin. A New Microwave Absorbing Material [M]. Beijing: Science Press, 2006.

[2] 周克省,黄可龙,孔德明,等. 纳米无机物/聚合物复合吸波功能材料[J]. 高分子材料科学与工程,2002,18(3):15—19.
ZHOU Ke-sheng, HUANG Ke-long, KONG De-ming, et al. Nano-inorganic Matter/Polymer Composite Materials With Electromagnetic Wave Absorption Function[J]. Polymeric Materials Science & Cngineering,2002,18(3):15—19.

[3] GHASEMI A, LIU X X, MORISAKO A. Magnetic and Microwave Absorption Properties of $BaFe_{12-x}(Mn_{0.5}Cu_{0.5}Zr)_{x/2}O_{19}$ Synthesized by Sol-gel Processing[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2007,316(2):105—108.

[4] SINGH P, BABBAR V K, RAZDAN A, et al. Complex Permittivity, Permeability, and X-band Microwave Absorption of CaCoTi Ferrite Composites[J]. Journal of Applied Physics, 2000,87(9):4362—4366.

[5] DISHOVSKI N, PETKOV A, NEDKOV I, et al. Hexaferrite Contribution to Microwave Absorbers Characteristics [J]. IEEE Transactions on Magnetics,1994,30(2):969—971.

[6] ZHANG H J, LIU Z C, YAO X, et al. Complex Permittivity and Permeability Dependence of $Ba_4Zn_{2-Z}Co_ZFe_{36}O_{60}$ U-type Hexaferrites Prepared by Citrate Sol-gel on Composition, Annealing Temperature and Frequency [J]. Materials Science and Engineering B,2003,97:160—166.

[7] 刘渊,刘祥萱,王煊军,等. 离子取代镍基铁氧体的性能及吸波涂层优化设计[J]. 中国有色金属学报,2013,23(1):168—174.
LIU Yuan, LIU Xiang-xuan, WANG Xuan-jun, et al. Performance of Nickel Ferrite Replaced by Different ions and Optimization Design of Absorbing Coating [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2013,23(1):168—174.

[8] 邓智平,刘朝辉,周国柱,等. 平面各向异性羰基铁/铁氧体复合吸波材料的设计[J]. 表面技术,2012,41(6):104—107.
DENG Zhi-ping, LIU Zhao-hui, ZHOU Guo-zhu, et al. Design of Absorber of the Planar Anisotropic Carbonyl-iron/Ferrite Composites [J]. Surface Technology, 2012, 41(6): 104—

107.

[9] 张卫东,冯小云,孟秀兰,等. 国外隐身材料研究进展[J]. 宇航材料工艺,2000(3):1—5.
ZHANG Wei-dong, FENG Xiao-yun, MENG Xiu-lan, et al. Status and Development of Foreign Study on New Stealthy Materials [J]. Aerospace Materials & Technology, 2000(3): 1—5.

[10] 邵蔚,赵乃勤,师春生,等. 吸波材料用吸收剂的研究及应用现状[J]. 兵器材料科学与工程,2003,26(4):65—68.
SHAO Wei, ZHAO Nai-qin, SHI Chun-sheng, et al. Current Status of Development and Applications of Absorbers Used in Microwave-absorbing Materials [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2003, 26(4): 65—68.

[11] 穆武第,程海峰,唐耿平,等. 添加导电纤维对羰基铁粉吸波性能的影响[J]. 材料科学与工程学报,2005,23(4):557—560.
MU Wu-di, CHENG Hai-feng, TANG Geng-ping, et al. Effect of Addition of Electrical Conductive Fiber on Radar Absorbing Property of Carbonyl Iron Powder [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2005, 23(4): 557—560.

[12] 周永江,程海峰,陈朝辉,等. 羰基铁粉吸波涂层的优化设计[J]. 材料工程,2006(增刊 1):236—242.
ZHOU Yong-jiang, CHENG Hai-feng, CHEN Zhao-hui, et al. Optimum Design of Microwave Absorbing Coating Containing Carbonyl Iron Powder[J]. Journal of Materials Engineering, 2006(Supplement 1): 236—242.

[13] TAN Y J, TANG J H, DENG A M, et al. Magnetic Properties and Microwave Absorption Properties of Chlorosulfonated Polyethylene Matrices Containing Graphite and Carbonyl-iron Powder[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2013, 326: 41—44.

[14] 童国秀,官建国,张五一,等. 纳米铁纤维与羰基铁粉共混制备轻质宽带吸波涂层材料[J]. 金属学报,2008,44(8):1001—1005.
TONG Guo-xiu, GUAN Jian-guo, ZHANG Wu-yi, et al. Preparation of Light Radar Absorbing Materials With Broad Bandwidth by Mixing Iron Nanofibers With Carbonyl Iron Particles [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(8): 1001—1005.

[15] MAKELA T, PIENIMAA S, TAKA T, et al. Thin Polyaniline Films in EMI Shielding [J]. Synthetic Metals, 1997, 85: 1335—1336.

[16] ZHANG Z M, WEI Z X, WAN M X. Nanostructures of Polyaniline Doped with Inorganic Acids [J]. Macromolecules, 2002, 35: 5937—5942.

[17] WONG P T C, CHAMBERS B, ANDERSON A P, et al. Large Area Conducting Polymer Composites and Their Use in Microwave Absorbing Material[J]. Electronics Letters, 1992, 28(17): 1651—1653.

[18] WOCHNOWSKI C, METEV S. UV-laser-assisted Synthesis of Iodine-doped Electrical Conductive Polythiophene [J]. Applied Surface Science, 2002, 186: 34—39.

[19] 陈骁,熊忠,陶雪钰,等. 导电聚苯胺的合成及电磁学性能、吸波性能研究[J]. 塑料工业,2005,33(5):5—11.
CHEN Xiao, XIONG Zhong, TAO Xue-yu, et al. Studies of Synthesis, Electromagnetic Propertiy and Microwave Absorptivity of Polyaniline (PANI) by Different Methods[J]. China Plastics Industry, 2005, 33(5): 5—11.

[20] TRUONG V T, RIDDELL S Z, MUSCAT R F. Polypyrrole Based Microwave Absorbers [J]. Journal of Materials Science, 1998, 33: 4971—4976.

[21] 于仁光,乔小晶,张同来,等. 新型雷达波吸收材料研究进展[J]. 兵器材料科学与工程,2004,27(2):63—67.
YU Ren-guang, QIAO Xiao-jing, ZHANG Tong-lai, et al. Research Progress of Novel Radar Wave Absorbing Materials [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2004, 27(2): 63—67.

(上接第 87 页)

[36] 夏丹. 襟翼作动筒活塞的电刷镀修复工艺[J]. 材料保护,2006,39(5):71—72.
XIA Dan. Restoring Process of the Flap Cylinder Piston by Brush Plating [J]. Material Protection, 2006, 39(5): 71—72.

[37] 冯春晓,涂明武,张学民,等. 飞机钢表面修复新工艺研究[J]. 新技术新工艺,2009(7):120—122.
FENG Chun-xiao, TU Ming-wu, ZHANG Xue-min, et al. Research on the New Technology of Aircraft Steel Surface Repair[J]. The New Technology and New Process, 2009(7): 120—122.

[38] 夏成宝,杨后川,葛文军. 飞机起落架作动筒内壁 n-Al_2O_3/Ni-Cr 复合电刷镀修复[J]. 材料保护,2009,42(7):57—58.
XIA Cheng-bao, YANG Hou-chuan, GE Wen-jun. Repair of Worn Zone on the Internal Surface of Cylinder of Landing Gear by Brush Plating n-Al_2O_3/Ni-Cr Composite Coating [J]. Material Protection, 2009, 42(7): 57—58.

[39] 丁丽丽,胡进,陈名华,等. 直升机齿轮喷丸-电刷镀复合修复工艺研究[J]. 表面技术,2005,34(6):49—50.
DING Li-li, HU Jin, CHEN Ming-hua, et al. Composite Techniques of Shot-peening and Brush-plating for Renovating Gears on Helicopter[J]. Surface Technology, 2005, 34(6): 49—50.