

各向异性磁性吸波材料的研究进展

张宝芹 于名讯 张伟 黄成亮 李永波

(中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031)

文 摘 介绍了各向异性吸波材料高频磁性能,对近年来研究较多的薄膜、纤维、片状磁性吸波材料及其研究进展进行了总结,并分析了在工程化应用中存在的问题,最后,对其发展趋势和方向进行了展望。

关键词 各向异性,电磁性能,吸波材料

Research Progress of Anisotropic Magnetic Absorbing Materials

Zhang Baoqin Yu Mingxun Zhang Wei Huang Chengliang Li Yongbo

(Norinco Group Institute 53, Jinan 250031)

Abstract The high-frequency magnetic properties of the anisotropic magnetic absorbing materials are introduced. The progress and status of studies on magnetic film, magnetic fibers and flaky magnetic absorbing materials are summarized. And then the problems existing in engineering applications are analyzed, the future development trends are given finally.

Key words Anisotropy, Electromagnetic properties, Absorbing materials

0 引言

随着电子对抗技术的不断发展,未来战争中各种武器将面临巨大的威胁,作为提高武器系统生存能力和突防能力的有效手段,吸波材料已成为当今世界各国重点研究的高新技术之一^[1-3]。

材料的吸波性能决定于其电磁性能,而除了材料组成成分外,其形状、粒度、聚集状态同样是影响其电磁性能的重要因素。理论和实验均证实材料各向异性化后其电磁性能改善^[4-5],吸波性能提高;同时,通过改变形貌尺寸还可对其电磁参数进行调节,更有利于实现阻抗匹配;此外,材料的片状化、纤维化将更有利于吸波材料的轻型化,因此,具有各向异性的吸波材料研究对新一代薄、轻、宽、强隐身材料的研发具有重要意义。

本文主要介绍了各向异性吸波材料,并对近年来研究较多的薄膜、纤维、片状磁性吸波材料及其研究进展进行了总结,分析了在工程化应用中存在的问题,最后,对其发展趋势和方向进行了展望。

1 各向异性吸波材料高频磁特性

高频下磁性吸波材料的磁性能主要受制于自然共振,高的磁导率、饱和磁化强度和自然共振频率是

对磁性吸波材料的基本要求。对于传统的球形磁性吸波材料,其高频磁性能可以由 Snoek 关系式描述,即 Snoek 极限^[6]。

$$(\mu_i - 1)f_r = \frac{1}{3\pi}\gamma M_s \quad (1)$$

式中, γM_s 为 Snoek 常数, γ 为旋磁比, M_s 为饱和磁化强度, f_r 为自然共振频率, μ_i 为起始磁导率,由 Snoek 极限知,对于饱和磁化强度确定的磁性材料来说,提高起始磁导率时,自然共振频率下降,反之,自然共振频率上升,起始磁导率下降,很难同时提高材料磁导率和共振频率。想要进一步提高磁性材料在高频的磁性能,必须要突破 Snoek 极限的限制,而各向异性化是较为有效的途径^[7-8]。

对于各向异性的磁性材料,在材料内部,磁化强度随外磁场的变化因方向不同而有所差别,易磁化和难磁化方向所对应的轴分别为易磁化轴和难磁化轴。对于片状或薄膜类软磁材料,由于退磁场的作用,磁化强度将趋向于分布在薄片平面内。如图 1 所示^[9],设面内易磁化轴沿 x 轴方向,磁化矢量 \mathbf{M} 由平衡位置沿 Φ 方向偏转时的各向异性等效场为 H_Φ ; \mathbf{M} 由平衡位置转出基面时的各向异性等效场为 H_θ ^[10],

收稿日期:2013-03-05;修回日期:2013-04-17

作者简介:张宝芹,1982 年出生,硕士,工程师,主要从事隐身技术的研究。E-mail:zhangbq1982@163.com

当 M 从平衡位置在薄片内转动时, H_ϕ 比较小, 而从平衡位置转出基面的 H_θ 较大。

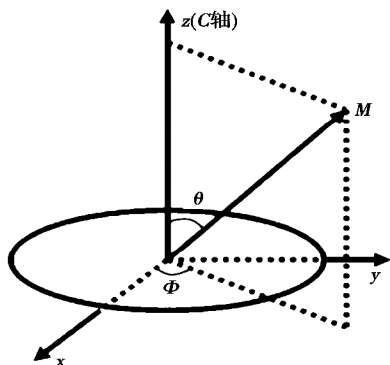


图1 H_θ 和 H_ϕ 的定义

Fig. 1 Definition of H_θ and H_ϕ

对于这种磁性材料, 它的 μ_i 和 f_r 的乘积表达式如下^[11]。

$$(\mu_i - 1)f_r = \frac{1}{3\pi} \gamma M_s \sqrt{\frac{H_\theta}{H_\phi}} \quad (2)$$

与(1)式比较可知, 由于 $H_\phi \ll H_\theta$, 同种材料在同样的 M_s 下, 片状化或薄膜化后 $(\mu_i - 1)$ 与 f_r 乘积要大很多。对于磁性纤维, 其易磁化方向为纤维的轴向方向, 难磁化方向为纤维的径向方向^[12-13], 材料纤维化后其磁导率与共振频率的乘积同样可以突破 Snoek 极限的限制。

综上所述, 具有各向异性的薄膜、纤维、片状磁性材料可以突破 Snoek 极限的限制, 较各向异性化前其磁导率和共振频率可实现同时提高, 具有优异的高频磁性能, 应用在吸波材料领域将具有更强更宽频的雷达损耗效果。

2 形状各向异性磁性吸波材料的研究

2.1 磁性纤维吸波材料

磁性纤维吸波材料属于一维材料, 强形状各向异性使其在微波频段具有较大的磁导率和磁损耗, 有研究发现长径比为 50 的铁氧体纤维与相同含量的非纤维磁性材料相比, 其磁导率增加 50 倍^[14]。同时, 磁性纤维吸收剂在高频下还具有较大的涡流损耗、欧姆损耗以及辐射损耗等, 是一种强电磁波吸收材料^[15-16]。此外, 该类吸收剂还具有质量轻、面密度小、频带宽的优点, 并且可以通过调节纤维的长度、直径、排列方式等调节材料的电磁参数, 层状取向排列所形成的吸波涂层可在很宽频段内实现高吸收, 质量比传统金属微粉吸波材料减轻 40% ~ 60%, 在轻质、高效隐身材料的研制领域有较好的应用前景。

常见的磁性纤维吸波材料包括铁纤维、镍纤维、钴纤维及其合金纤维。目前报道较多的是多晶铁纤维, 其中美国 3M 公司和欧洲 GAMMA 公司的研究处于领先地位并已商品化^[17-18]。美国 3M 公司研制出

微米级多晶铁纤维吸波涂层, 长径比约为 25, 吸波涂层厚度为 10 mm。涂层中多晶铁纤维的体积占空比为 35% 时, 涂层在 4 ~ 6 GHz 反射率 < -5 dB, 在 6 ~ 20 GHz 反射率 < -10 dB, 在 10.5 ~ 13.5 GHz 反射率小于 -20 dB; 涂层中多晶铁纤维的体积占空比为 25% 时, 涂层在 4 ~ 5 GHz 反射率 < -5 dB, 在 5 ~ 16 GHz 反射率 < -10 dB, 在 9 ~ 12.5 GHz 反射率可 < -30 dB。欧洲 GAMMA 公司利用多晶铁纤维吸波材料成功研制出雷达隐身涂层, 实现了宽频的吸收, 其最大吸收可达 34 dB。

李享成等^[19-20]采用羰基化合物热分解法制备羰基铁及羰基铁镍纤维, 通过气氛、磁场、温度及成分等因素调节羰基铁/铁及羰基铁镍纤维的直径和长径比, 从而实现对其电磁性能的调节, 并得到了高磁导率和高磁损耗的羰基金属纤维吸收剂, 2 GHz 处, 磁导率实部和虚部分别达到 5.2 和 2; 8 GHz 处磁导率实部和虚部分别达到 3 和 1.2, 当制得吸波材料厚度为 1 mm 时, 在 8 ~ 12 GHz 反射损耗 < -5 dB。

将磁性材料包覆在碳纤维类材料表面制备磁性纤维类复合材料是研究的热点之一, Ki-Yeon Park 等人^[21]利用电镀法在碳纤维表面包覆了一层 Ni-Fe 合金以提高材料的磁性能, Ni-Fe 包覆层的厚度为 200 ~ 300 nm。该吸波材料与环氧树脂混合, 吸波材料质量分数为 40%, 涂层厚度为 2.4 mm 时, 在 X 波段雷达波吸收率 > 10 dB 的带宽为 3.7 GHz (8.3 ~ 12.0 GHz)。

Wang Lei 等人^[22]制备了一种 Fe-Co 合金包覆碳纤维的磁性材料, 该材料的饱和磁化强度为 31.5 emu/g, 矫顽力为 87.1 Oe, 与石蜡以质量比 7:3 的比例混合, 当混合物厚度为 1.7 mm 时, 2 ~ 18 GHz 频段最小反射损耗为 -48.2 dB。

2.2 磁性薄膜吸波材料

随着物理气相沉积及化学气相沉积技术的发展, 磁性薄膜吸收剂的成分及结构日益多元化, 电磁性能也不断提高。以 Fe、Co 基为主体的磁性合金薄膜及多层膜由于在微波频率下具有很高的磁导率和磁损耗, 可实现微波的宽频带吸收, 日益受到人们的重视。邓联文等人^[23]采用射频磁控溅射工艺制备了在微波波段具有高磁导率和大磁损耗的 CoFeZrRe 薄膜, 探讨了工艺参数和薄膜厚度对 CoFeZrRe 薄膜结构和电磁性能的影响, 研究了掺杂稀土元素的含量和种类对薄膜磁各向异性、饱和磁化强度等基本磁参量以及微波磁导率和磁损耗的影响。结果表明, 稀土元素能显著提高微波磁损耗, 该类薄膜 2 GHz 处, 磁导率的实部和虚部均 > 200。

金属薄膜磁性材料的厚度受趋肤深度的限制, 采

用磁性薄膜-电介质薄膜的交替叠层结构可以有效抑制涡流效应并消除闭合磁畴。江建军等人^[24-25]采用直流/射频磁控溅射方法和不连续多层交替溅射工艺,制备了 CoFeB-SiO₂ 系列和 CoFeB-MgO 系列纳米不连续多层磁性颗粒膜,并对制备的薄膜样品进行了不同温度下的退火处理。通过调节合金相和介质相的相对含量有效调控薄膜微结构和电磁特性。制备的薄膜样品在 GHz 微波频段同时具有高磁导率和高磁损耗,制备的 CoFeB-SiO₂ 系列 1.5 GHz 处薄膜复相对磁导率实部和虚部均 > 260; 制备的 [Co₆₄Fe₂₄B₁₂(0.7 mm)-MgO(0.4 mm)]₄₀ 薄膜饱和磁化强度为 1.3 T,共振频率高达 2.1 GHz,磁导率实部和虚部在 1.59 GHz 均 > 240,在 0.9-2.0 GHz 同时 > 100。Ren Nie 等人^[26]利用磁控溅射方法制备了 Fe₄₀Co₄₀B₂₀-SiO₂ 薄膜,当厚度为 0.67 mm 时,2~18 GHz 吸收峰值达 -9.84 dB,低于 -5 dB 带宽为 5.36 GHz。当厚度为 3.1 mm 时,其质量仍很轻,吸收峰值为 -38.41 dB,低于 -20 dB 带宽为 1.85 GHz。

Zeng Jun 等人^[27]利用热氧化方法合成了 CuO/Co/碳纤维多层膜复合材料,并研究了该薄膜在 1~18 GHz 的复介电常数、复磁导率和微波吸收性能,当膜厚为 2 mm 时,最强反射损耗可以提高到 -42.7 dB,峰值位置在 10.8 GHz,结果显示同时具有强介电损耗和磁损耗使该材料具有优异的微波吸收性能,是一种理想的轻质、强吸收、宽频段微波吸收材料。

2.3 片状磁性吸波材料

早在 1997 年,R. M Walser 等人^[28]根据颗粒形状对 Snoek 系数的影响,得出片状结构的铁磁性材料在理论上具有最优电磁参数的结论,并分别采用高能球磨法和磁控溅射法制备了片状的高磁性材料,对薄片状铁磁材料的研究表明,扁平率为 10~10 000 时,其微波磁导率可以提高 10~100 倍。这是由于合金粉末的扁平率增大和粒径减小引起颗粒的表面积增加,一方面粉末的空间电荷的极化以及相邻粒子间的磁矩交换耦合作用增强,另一方面粉末的涡流损耗减小,从而增大了复合组分的复介电常数和复磁导率。

孙国亮等人^[29-30]通过电镀法制备了片状磁性吸波材料,并结合晶粒尺寸因素研究了不同工艺条件对吸收剂电磁参数的影响,测试了吸波材料在 2~18 GHz 电磁性能。并通过表面处理,提高了片状吸收剂的磁导率。Lee, Kyung-Sub 等人^[31]利用片状 Fe₈₅Si_{9.5}Al_{5.5} 制备的高磁导率磁性复合薄片,当厚度在 0.5 mm 时,2 GHz 处反射损耗可以减少到 -11 dB。

郭欣等人^[32]采用气雾化和机械球磨结合的方法制备片状 FeCoZr 合金磁粉吸收剂,并利用正交实验综合研究了球磨时间、吸收剂粒径和含量对吸波材料

在 2~18 GHz 吸波性能的影响,当粒径 < 48 μm、质量分数为 75% 时有最大的损耗 -6.29 dB。周熠^[33]等人制备的片状 FeSi 吸波材料,1 GHz 处其磁导率实部由片状化前的 1.24 提高到 1.94,磁导率虚部由 1.0 增大到 1.3,4.3 GHz 附近的最小反射率由 -4.5 dB 减小到 -10.8 dB,扁平化处理明显改善了 FeSi 吸波材料的低频吸波性。

Ding Jun 等人^[34]利用球磨和喷射研磨方法制备了平均粒径在 500 nm 的亚微米级片状 Fe₉₀Al₁₀ 粉体,并考察了不同粒径粉体的微波性能。将片状粉体与环氧树脂以体积比 1:10 的比例混合后测试了复介电常数和复磁导率,并对材料的反射损耗进行了理论模拟,结果显示片状粉体的微波性能明显优于类球形粉体;粒径为 50 μm 的片状粉体有最强的反射损耗峰,当厚度为 3.1 mm 时,在 7.6 GHz 反射损耗峰值达 -34 dB。随着涂层厚度的减小峰值向高频移动,当厚度为 1.9 mm 时,吸收峰值在 14.2 GHz,12.2~16.8 GHz 频段反射损耗值均 > -10 dB,结果显示该材料在轻质、宽频微波吸收材料中有很高的应用前景。

Cui B.Z 等人^[35]利用高能球磨法制备了 Nd₂Fe₁₄B 片状颗粒,在高能球磨的初始阶段,颗粒尺寸由微米级破碎到亚微米级,研磨 5~6 h 后最终形成各向异性的多晶 Nd₂Fe₁₄B 片状纳米颗粒,所有片状样品均具有各向异性磁性能。加入一些低熔点的 Nd₇₀Cu₃₀ 合金或进行后续退火处理均可提高片状 Nd₂Fe₁₄B 的矫顽力,由原来的 3.7 kOe 提高到 6.8 kOe。

陈旭明等人^[36]采用退火热处理和机械球磨相结合的方法制备了片状 FeSiAl 磁微粉,并研究了退火热处理对其电磁性能的影响。结果表明退火热处理可有效调节粉末磁导率,对原材料进行预退火热处理更有利于获得高磁导率的 FeSiAl 磁微粉,制备的磁微粉的磁导率实部最大可达 5.09,虚部最大可达 3.65。

片状磁性吸波材料的抗氧化、耐腐蚀性能较差,在其表面包覆一层电介质绝缘体材料,可以很好的解决这一问题,同时可以降低材料的介电常数,提高阻抗匹配,改善微波吸收性能^[37-38]。

3 形状各向异性磁性吸波材料工程化应用局限性

形状各向异性磁性吸波材料具有优异的电磁性能,但制备和生产工艺性、使用性能、施工性能差等问题限制了其在吸波材料领域的工程化应用。

(1) 材料形状结构的精确控制及生产制备能力有待提高。

目前,直径 4 μm 以上磁性纤维的制备技术已比较成熟,但对于直径更细的纤维,虽已初步实现对结

构如长径比等的控制,但纤维材料的显微结构及形貌尺寸、均一性仍难以做到精确控制。同时,纤维产量较低,怎样实现高效率、高质量地制备磁性纤维材料是其大量工程化应用的前提和必须要解决的难题。

磁控溅射法是目前制备磁性薄膜吸波材料较为常用的方法,虽然可实现对薄膜成分、结构的控制,产品性能较好,但生产成本过高是其最大的缺点。而且目前制备的薄膜的面积仍较小,降低磁性薄膜材料的生产成本及大面积磁性薄膜的开发生产将更有利于其在隐身材料领域的工程化应用。

目前制备片状磁性吸波材料的方法主要有气雾化制粉和高能球磨结合法、真空沉积法、化学气相沉积等。球磨法可以进行大规模连续生产,但制备出的片状材料厚度较大,并且形状与尺寸难于精确控制;真空沉积制备方法成本较高;化学气相沉积法成本相对较低,但制备温度较高,对基材有特殊的要求,同时对吸收剂的磁性能产生较大的影响。制备工艺及技术条件的完善、材料结构形貌的精确控制及产品产率的提高将促进各向异性磁性吸波材料的工程化应用。

(2) 耐腐蚀等使用性能差。

涂覆吸波材料的武器装备大多工作在环境复杂、温湿度多变的野外,对吸波材料的耐环境、耐腐蚀性能有特别高的要求。而大多各向异性吸波材料的力学性能较差,抗撞击能力较弱;此外,吸波材料的耐化学腐蚀、耐环境性能差,难以满足武器装备在不同战地环境下对防护性能要求的同时,也影响了整体隐身性能。因此,提高各向异性磁性吸波材料的使用性能是其工程化应用的前提,势在必行。

(3) 施工工艺性能差。

形状各向异性化提高了材料的电磁性能,与此同时也提高了材料的施工难度,材料的分散、取向及分布状态对其吸波性能具有较大的影响,现阶段大部分磁性纤维和片状吸波材料在基体中的分散性较差,团聚现象严重,且分布状态往往是杂乱无章的,难以充分发挥独有的形状各向异性所带来的优异的吸波性能。因此,其特殊的形状结构不仅对施工工艺的要求较为苛刻,同时其工艺的难控制性也造成材料的性能稳定性差。如何提高材料的分散性和取向度等工艺性能成为各向异性吸波材料工程化应用中亟待解决的问题。

4 结语

吸波频段宽、损耗能力强、质量轻、厚度薄一直是吸波材料追求的目标,具有形状各向异性的磁性吸波材料具有优异的电磁性能,在隐身材料领域的工程化应用已成为必然趋势。但其力学性能、耐环境性能、使用工艺性有待进一步提高,批量制备技术尚需改

进。因此,材料性能的多功能化、成分的复合化、产品的产业化将是磁性吸波材料发展的主要方向。

参考文献

- [1] Abbas S M, Dixit A K, Chatterjee R, et al. Complex permittivity, complex permeability and microwave absorption properties of ferrite-polymer composites [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, 309: 20-24
- [2] Chandrika Sudhendra, Vibhor Mahule, ACR Pillai. A novel space cloth using resistor grid network for radar absorbers in stealth applications [J]. *IEEE*, 2011: 83-86
- [3] Alireza Kazemzadeh. Thin wideband absorber with optimal thickness [J]. *IEEE*, 2010: 676-679
- [4] 葛副鼎, 朱静, 陈利民. 吸收剂颗粒形状对吸波材料性能的影响 [J]. *宇航材料工艺*, 1996(5): 42-49
- [5] 张德勇, 程海峰, 唐耿平, 等. 吸收剂形状对雷达吸波材料性能的影响研究 [J]. *功能材料*, 2007, 38: 2963-2965
- [6] Snoek J L. *Physica*, 1948, 14: 207-217
- [7] Legarda F, Idoeta R. Monte carlo transport of electrons and positrons through thin foils [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2001, 61: 549-551
- [8] Arsavan Oskooi, Steven G. Johnson. Distinguishing correct from incorrect PML proposals and a corrected unsplit PML for anisotropic dispersive media [J]. *Journal of Computational Physics*, 2011, 230: 2369-2377
- [9] 韩瑞, 位建强, 韩相华, 等. 片状羰基铁/石蜡复合材料的高频磁性 [J]. *科学通报*, 2010, 55(6): 2570-2575
- [10] Wen F S, Qiao L, Yi H B, et al. Calculation of high frequency complex permeability of carbonyl iron flakes in a nonmagnetic matrix [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, 25: 751-754
- [11] Xue D S, Li F S, Fan X L, et al. Bianisotropy picture of higher permeability at higher frequencies [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, 25: 4120-4123
- [12] Ounadjela K, Ferre R, Louail L, et al. Magnetization reversal in cobalt and nickel electrodeposited nanowires [J]. *Appl. Phys.*, 1997, 81: 5455-5457
- [13] 陈云, 刘恒兴, 孟献丰, 等. 纳米晶 $Fe_{0.13}(Co_xNi_{1-x})_{0.87}$ 微细纤维的制备及磁各向异性 [J]. *金属学报*, 2009, 45: 754-758
- [14] Goldberg H. A high magnetic permeability composites containing fibers with ferrite fill [P]. US patent, 4725490, 1988
- [15] Matitsine S M, Hock K M, Liu L, et al. Shift of resonance frequency of long conducting fibers embedded in a composite [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 94: 1146-1154
- [16] 王磊, 朱保华. 磁性吸波材料的研究进展及展望 [J]. *电工材料*, 2011(2): 37-40
- [17] 张建, 张文彦, 奚正平. 隐身吸波材料的研究进展 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37: 504-507
- [18] 李享成, 龚荣洲, 等. 铁镍纤维的磁场诱导制备及电磁性能研究 [J]. *功能材料*, 2006, 37(1): 27
- [19] Li Xiangcheng, Gong Rongzhou, Nie Yan, et al. Elec-

tromagnetic properties of Fe₅₅Ni₄₅ fiber fabricated by magnetic-field-induced thermal decomposition [J]. Mater. Chem. Phys., 2005, 94:408-411

[20] Yu Mingxun, Li Xiangcheng, Gong Rongzhou, et al. Magnetic properties of carbonyl iron fibers and their microwave absorbing characterization as the filler in polymer foams [J]. J. Alloy Comp., 2008, 456:452-455

[21] Park Ki Y, Han J H, Lee S B, et al. Microwave absorbing hybrid composites containing Ni-Fe coated carbon nanofibers prepared by electroless plating [J]. Composites: Part A, 2011, 42:573-578

[22] Wang Lei, He Fang, Wan Yizao. Facile synthesis and electromagnetic wave absorption properties of magnetic carbon fiber coated with Fe-Co alloy by electroplating [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509:4726-4730

[23] 邓联文, 何华辉, 冯则坤. CoFeZrRE 磁性薄膜微波电磁特性研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35:986-989

[24] 江建军, 马强, 别少伟, 等. CoFeB-SiO₂ 磁性不连续多层颗粒膜微波电磁特性 [J]. 无机材料学报, 2008, 23:277-280

[25] 马强, 江建军, 别少伟, 等. CoFeB/MgO 不连续多层纳米软磁薄膜微波电磁特性 [J]. 物理学报, 2008, 57:6577-6581

[26] Ren Wenyi, Nie Yan, Xiong Xuan, et al. Enhancing and broadening absorption properties of frequency selective surfaces absorbers using FeCoB-based thin film [J]. Journal of Applied Physical, 2012, 111:07E703-07E703-3

[27] Zeng Jun, Fan Huiqing, Wang Yangli, et al. Ferromagnetic and microwave absorption properties of copper oxide/cobalt/carbon fiber multilayer film composites [J]. Thin Solid Films, 2012, 520:5053-5059

[28] Walser R M, Win W, Valanju P M. Shape-optimized ferromagnetic particles with maximum theoretical microwave sus-

ceptibility [J]. IEEE Trans. Magn., 1998, 34(4):1390-1392

[29] 孙国亮, 郑文伟, 程海峰. 表面处理工艺对片状磁性吸收剂吸波性能的影响 [J]. 材料导报, 2008, 22:333-335

[30] 孙国亮, 郑文伟, 程海峰. 电镀工艺条件变化对片状铁吸收剂吸波性能的影响 [J]. 功能材料, 2007, 38:2972-2974

[31] Lee K S, Yun Y C, Kim, S W. Microwave absorption of $\lambda/4$ wave absorbers using high permeability magnetic composites in quasimicrowave frequency band [J]. Journal of Applied Physical, 2008, 103:07E504-07E504-3

[32] 郭欣, 王鲜, 廖章奇. 片状 FeCoZr 合金吸收剂吸波性能的正交实验 [J]. 电子元件与材料, 2009, 28(7):27-28

[33] 周熠, 邱泰, 冯永宝. 扁平化对 FeSi 吸波材料微波电磁性能的影响 [J]. 电子元件与材料, 2010, 29(4):31-33

[34] Yang Yang, Ding Jun. Microwave property of micron and sub-micron Fe₉₀Al₁₀ flakes fabricated via ball milling and jet milling routes [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012(528):58-62

[35] Cui B Z, Zheng L Y, Li W F, et al. Single-crystal and textured polycrystalline Nd₂Fe₁₄B flakes with a submicron or nanosize thickness [J]. Acta Materialia, 2012, 60:1721-1730

[36] 陈旭明, 江建军, 别少伟, 等. 热处理对片状 Fe-Si-Al 磁微粉微波电磁性能的影响 [J]. 电子元件与材料, 2011, 30:35-37

[37] Liu T, Zhou P H, Deng L J, et al. Extrinsic permeability of Fe-based flake composites from intrinsic parameters: A comparison between the aligned and random cases [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012, 324:519-523

[38] Yan Xu, Gao Daqiang, Xue Desheng, et al. Adjustable microwave absorption properties of flake shaped (Ni_{0.5}Zn_{0.5})Fe₂O₄/Co nanocomposites with stress induced orientation [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012, 324:1902-1906

(编辑 吴坚)