

磁性吸波材料的研究进展

刘祥萱¹, 陈鑫¹, 王煊军¹, 刘渊^{1,2}

(1. 第二炮兵工程大学 603 教研室, 西安 710025; 2. 中国人民解放军 96617 部队, 泸州 646000)

[摘 要] 简单阐述了吸波材料的吸波原理及各类吸波材料的特点和应用, 重点介绍了铁氧体、磁性金属微粉及多晶铁纤维、纳米磁性吸波材料等的性质、吸波性能及改进其吸波性能的方法。指出目前研制的磁性吸波材料还存在频带窄、密度大、性能低等缺点, 并针对此提出了进一步研究的方向。

[关键词] 吸波材料; 铁氧体; 金属微粉

[中图分类号] TJ765.5

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2013)04-0104-06

Recent Progress in Magnetic Absorbing Materials

LIU Xiang-xuan¹, CHEN Xin¹, WANG Xuan-jun¹, LIU Yuan^{1,2}

(1. 603 Staff Room, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;

2. 96617 troops PLA, Luzhou 646000, China)

[Abstract] Absorbing principle, characteristics and application of absorbing materials were briefly introduced. Characteristics, absorbing properties and methods to improve absorbing properties of ferrite, metal powder, polycrystalline iron fibers, chiral absorbing materials, magnetic nanocomposite particles were mainly discussed. The shortcomings that narrow band, high density, low performance existing in current magnetic absorbing materials were noted. On this basis, further researches were suggested.

[Key words] absorbing materials; ferrite; metal powder

随着科学技术和电子工业的发展, 各种电子设备的应用日益增多, 电磁波辐射已成为一种新的社会公害, 它所造成的电磁干扰不仅会影响各种电子设备的正常运转, 而且对人的身心健康有很大伤害, 这促进了吸波材料的广泛应用^[1-2]。此外, 现代战争中, 信息的获取与反获取已成为战争的焦点, 先敌发现、先敌进攻是克敌制胜的关键因素, 为提高军事目标的生存能力和武器系统的突防能力, 各军事强国将吸波材料广泛应用于武器装备中^[3-4]。可见, 吸波材料已成为当前的研究热点, 它对于人们日常生活和国防建设都具有重要的意义。

吸波材料通过自身的损耗机制将入射电磁波的电磁能转换成热能而耗散掉, 或使入射电磁波因干涉而回波减小, 将电磁能量分散到其他方向上^[5]。磁性吸波材料是目前研究和应用得最多的一类。文中主要介

绍了几类磁性吸波材料, 并提出了目前研究中存在的问题及进一步研究的方向。

1 吸波材料的吸波原理

一般来说, 吸波材料需要具备两个基本特点: 阻抗匹配特性和衰减特性^[6]。阻抗匹配特性是指采用特殊的边界, 使入射波尽可能多地进入材料内部而不被反射; 衰减特性则是指尽量提高吸波材料对电磁波的衰减能力, 让电磁波迅速衰减损耗掉^[7]。对于吸波性能, 一般用反射率 R 以及 $R < -10$ dB 的带宽来评判。

根据电磁波传输线理论, 当频率为 f 的均匀平面电磁波垂直射入底层为金属板的单层吸波涂层时, 涂层对电磁波的功率反射率 R 为:

[收稿日期] 2013-02-26; [修回日期] 2013-03-16

[作者简介] 陈鑫(1989—), 男, 湖北人, 硕士生, 主攻铁氧体基复合材料。

[通信作者] 刘祥萱(1963—), 女, 山西人, 博士, 教授, 主要研究方向为雷达隐身材料。

$$R = 20 \lg \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|$$

式中: Z_0 为空气阻抗, $Z_0 = (\mu_0/\varepsilon_0)^{1/2} = 120\pi$; Z 为材料的输入阻抗。对于有限厚度的单层吸波介质, 有:

$$Z = Z_c \tan h(\gamma \cdot d) = Z_0 \sqrt{\mu_r/\varepsilon_r} \cdot \tan h(j \cdot 2\pi f \cdot \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0 \mu_r \varepsilon_r} \cdot d)$$

式中: μ_r 为相对磁导率, $\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$; ε_r 为相对介电常数, $\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$; γ 为电磁波在材料中的传播常数, $\gamma = j \cdot 2\pi f \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0 \mu_r \varepsilon_r}$; Z_c 为材料的特征阻抗, $Z_c = Z_0 \sqrt{\mu_r/\varepsilon_r}$; d 为材料厚度。

2 吸波材料的分类

吸波材料分类方法较多, 主要的有三种^[8-11]:

1) 按电磁波的损耗机理分, 可分为电阻损耗型、介电损耗型和磁损耗型。导电高聚物、碳纳米管、石墨等材料对电磁波能量的衰减主要是由材料电阻引起的, 属于电阻型吸波材料; 碳化硅、钛酸钡等介电性材料对电磁波的吸收主要是由介电极化导致的弛豫损耗引起的, 属于介电损耗型吸波材料; 铁氧体、羰基铁、多晶铁纤维、铁磁合金等材料的吸波机理主要为磁滞损耗和铁磁共振损耗, 属于磁损耗型吸波材料。在相同的吸波性能条件下, 磁损耗型吸波材料比介电损耗型吸波材料薄, 更易于与其他材料进行阻抗匹配。

2) 按吸波材料的成形工艺和承载能力分, 可分为涂覆型和结构型。涂覆型吸波材料是将吸收剂与粘合剂涂覆于目标表面形成吸波涂层, 其使用比较简单, 容易调节, 使用面广。结构型吸波材料同时具有吸波和承载的功能, 通常是将吸波剂添加到具有承载能力的高强度聚合物中, 如陶瓷、水泥、碳纤维等复合材料, 其结构形式有多层板状、蜂窝状、波纹体、栅格或角锥体等, 通常体积比较大。

3) 按吸收原理分, 可分为干涉型和吸收型。干涉型吸波材料是利用吸收层表面反射波和底部反射波的相位相反而干涉相消, 它的吸收频带一般较窄。吸收型吸波材料是通过材料本身的损耗将电磁波能量转换成热能, 从而达到衰减电磁波的目的。

3 磁性吸波材料的研究现状

3.1 铁氧体

铁氧体系列吸波材料具有吸收率高、涂层薄和频带宽等优点^[12], 是发展较早且比较成熟的吸收剂。铁氧体是一种双复介质材料, 即对电磁波的损耗同时包

括介电损耗和磁损耗^[13], 其中最主要的损耗机制为剩余损耗中的铁磁自然共振吸收^[14]。铁氧体按晶体结构的不同, 可分为立方晶系尖晶石型 (AFe_2O_4 , A 代表 Mn, Zn, Ni, Mg 等)、稀土石榴石型 ($\text{Ln}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, Ln 代表 Y, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu 等) 和六角晶系磁铅石型 ($\text{AFe}_{12}\text{O}_{19}$, A 代表 Ba, Sr, Ca 等) 三种^[15-16], 用作吸波材料的主要是尖晶石型和磁铅石型。六角晶系铁氧体具有较高磁晶各向异性场, 因而自然共振频率高, 其片状结构是吸波剂的最佳形状, 所以具有良好的电磁波吸收性能^[17]。目前, 国内外对于 Ba 系 M, W 和 Z 型六角晶系铁氧体的研究较多。

铁氧体具有相对较高的电阻, 可以避免金属导体在高频下的趋肤效应, 使电磁波能有效进入其内部; 同时, 铁氧体也具有较好的频率特性, 磁导率比较高, 介电常数比较小, 适合用作匹配层, 在拓宽低频段频带方面具有良好的应用前景。铁氧体作为吸收剂也存在着一些缺陷, 如温度稳定性较差、面密度大等, 这些都限制其在实际中的应用, 可以通过改变化学成分、控制颗粒形貌及粒子大小、改善制备工艺等措施来改善铁氧体的吸波性能。

为了提高或控制铁氧体粉体的性能, 离子取代的方法被广泛研究。Deng^[18]采用溶胶凝胶法在 W 型铁氧体中掺杂 La^{3+} , 掺杂后的铁氧体磁性和介电损耗显著增强, 涂层厚度为 2 mm 时, 最小反射率达到 -39.6 dB, 低于 -10 dB 带宽达到 8 GHz。Guo 等^[19]通过固相反应制备了 La^{3+} , Nd^{3+} 和 Sm^{3+} 三种稀土元素掺杂的 W 型六角铁氧体 $\text{Ba}_{0.9}\text{RE}_{0.1}\text{Co}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$, 研究结果表明, 三种掺杂都能提高铁氧体的饱和磁化强度、矫顽力和损耗角正切, La^{3+} 掺杂有最大的损耗角正切。在控制颗粒形貌及粒子大小方面, A. A. Eliseeva 等^[20]通过共沉淀法, 在介孔二氧化硅的表面合成了有序孔状磁性纳米线状锆铁氧体, 饱和磁化强度和矫顽力都随煅烧温度的升高而增大, 最大分别为 2.30 emu/g 和 270 Oe。Wang^[21]通过引爆配制的乳化炸药得到磁性的纳米 MnFe_2O_4 粉末, 合成的纳米铁氧体具有优异的磁学性能。在制备工艺方面, 张泽洋等^[22]研究了热处理对锆铁氧体微结构及吸波性能的影响。随着煅烧温度升高, 颗粒由米粒状逐步转化为完美的六角片状, 1000 °C 的样品吸波效果最好。

铁氧体与其他类型的材料进行复合, 复合材料能够兼具不同材料的物化性能, 原有材料的缺陷得以有效改善, 从而可获得良好的吸波效果。复合主要有以下四大类: 碳纳米管与铁氧体复合, 导电高分子与铁氧体复合, 金属微粉与铁氧体复合, 不同类型铁氧体复合等。

碳纳米管由于特有的空间结构,在热、电、力学等方面具有优异的性能,已引起物理、化学、生物等领域学者的强烈兴趣,目前有关碳纳米管及其复合材料制备及性能的研究报道已有很多,将铁氧化物与碳纳米管复合用于吸波材料方面的研究也越来越受到人们的重视^[23]。Ali Ghasemi^[24]采用溶胶-凝胶法制备了多壁碳纳米管/掺杂锆铁氧化物纳米复合材料,其吸波性能明显优于单一的多壁碳纳米管和锆铁氧化物,最小反射率随着多壁碳纳米管体积分数的增加而减小。

导电高分子是一种兼有聚合物和金属双重性能的新材料,不仅具有较高的电导率,还具有光电性、磁性等其他性能,所以导电聚合物在诸多领域都有广泛的应用价值。将导电聚合物与磁损耗型的铁氧化物进行复合,所得复合材料同时具有电损耗和磁损耗,还因其特有的界面特征诱发界面极化^[25]和磁电效应^[26],从而调整吸收频率和改善吸波性能。Xing Tang等^[25]利用原位聚合法在M型钡铁氧化物表面包覆聚苯胺,形成具有核壳结构的复合粉体,吸波性能有了明显的改善,研究表明,聚苯胺与钡铁氧化物界面处的极化作用是影响其吸波性能的关键因素。

金属微粉与铁氧化物相比,其磁性一般比铁氧化物强,饱和磁化强度是铁氧化物的四倍以上,因此具有较高的磁导率和磁损耗。但是,颗粒分散和氧化问题及趋肤效应的影响,使得金属微粉在吸波材料中的应用受到限制。而铁氧化物电阻率较高,可以有效避免趋肤效应的影响,在高频时仍能保持较高的磁导率,其介电常数也比较小,将铁氧化物与金属微粉进行复合能有效地调整原有材料的电磁参数。目前的研究主要集中在以下两个方面:

一是采用化学镀、球磨法、共沉淀法等方法,将金属微粉包覆在铁氧化物表面,形成具有核壳结构的复合粉体,有效地拓宽复合材料的吸波带宽,增强吸波性能^[27-30]。本课题组^[31]采用化学气相沉积法成功制备出了新型软磁羰基铁包覆硬磁掺杂锆铁氧化物($\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$)“核壳型”磁性复合吸波粉末,随着羰基铁包覆量的增大,复合粉体的吸波强度先增大,后减小,且反射损耗峰向低频方向移动。当羰基铁包覆量为30%时,有最佳的吸波效果,2 mm厚吸波涂层的最小反射率为-28 dB,低于-10 dB的带宽为4 GHz,最小反射率比包覆前下降了12.2 dB。潘喜峰等^[27]在室温下,采用无电解镀镍法在 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ 锆铁氧化物表面包覆金属镍,复合后的粉末具有优良的微波吸收性能,最小反射率达到-41.3 dB,低于-10 dB的带宽达到8 GHz。

二是通过在金属纳米粒子的表面包覆铁氧化物形成

核壳结构,改变纳米金属粉末表面的成分、结构和状态,较好地解决了金属微粉稳定性差、极易发生团聚、分散性差等问题。同时这种核壳结构使得两种磁性颗粒产生协同效应,能够克服两者的缺点,使得复合材料具有良好的微波吸收性能。刘姣等^[32-33]采用非均匀成核和化学沉淀相结合的方法制备了 MgFe_2O_4 铁氧化物原位包覆羰基铁超细复合粉体,吸波涂层厚度为1.5 mm时,吸收峰值为-17.8241 dB, < -10 dB的频宽为5.52 GHz,有效地改善了单一吸波剂的吸波性能。

铁氧化物在微波频段主要依靠自然共振吸收电磁波,不同类型的铁氧化物共振频段各不相同,不同类型的铁氧化物复合能够有效拓宽材料的吸收带宽。目前,不同铁氧化物复合主要集中在尖晶石型/六角晶系以及尖晶石/尖晶石。将尖晶石型铁氧化物和六角晶系铁氧化物复合能有效地改善二者的电磁性能,在较宽的频段内取得较好的吸波效果。陈映杉等^[34]通过两步柠檬酸盐溶胶-凝胶法,制备出核壳结构 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ - NiFe_2O_4 磁性纳米复合粉体,在频率为8~18 GHz范围内,微波吸收逐渐增强,当频率为12 GHz时, $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ - NiFe_2O_4 纳米复合粉体的微波吸收达到最大值9 dB,是一种性能优良的吸波材料。通过不同离子取代的尖晶石型铁氧化物复合,可有效改善粉体的电磁性能。Song等^[35]分别制备了 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{MnFe}_2\text{O}_4$ 和 $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}_2\text{O}_4$ 核壳结构复合粒子,电磁性能较原单一铁氧化物均有了明显的提高。

3.2 磁性金属微粉及多晶铁纤维

通常所指的金属微粉是粒度为0.5~20 μm 的单质金属或金属合金微粒,它们具有微波磁导率较高、温度稳定性好等特点,主要通过磁滞损耗、涡流损耗来吸收电磁波^[36]。金属微粉作为吸波材料已经广泛应用在隐身技术上,如美国F/A-18C/D“大黄蜂”上就使用了大量的羰基铁粉。金属微粉主要有两种:一种是羰基铁、羰基镍、羰基钴等羰基金属微粉;另一种是通过物理气相沉积法、化学还原法或热分解羰基化合物法制得的磁性金属微粉。金属微粉的电磁参数与组分、粒度和形貌密切相关,通过调节微粉的组分和粒度来调节电磁参数,可达到匹配和展宽频带的目的。羰基铁粉是金属微粉中最为常用的一种,将羰基铁微粉和FeSiAl颗粒进行共混,改变FeSiAl颗粒的含量,能获得具有较好的低频吸收性能(-4.5~-1.1 dB)和宽频带(<-4 dB频带为3.8~18 GHz)的吸波材料^[37]。Wu等^[38]研究了铁基软磁性颗粒复合材料颗粒大小对其微波性能的影响,结果表明,复合材料中磁性小球的粒径对其有效磁导率有很大的影响,进而影响其吸波性能。Wen等^[39]将不同形貌的羰基铁分散在体积分数

为 40% 环氧树脂基体中,对其吸波性能进行了研究,当羰基铁粉由球状结构变为片状结构时,涡流、磁运动取向、空间极化减小,会有较好的吸波效果。

金属微粉虽然已广泛应用于隐身技术,但是磁性金属微粉仍存在密度大、抗氧化及耐酸碱能力差、电阻率低、在涂层中容易产生趋肤效应、介电常数较高、频谱特性差、低频段吸收性能较差等缺点。磁性金属微粉纳米化和复合化将会是今后的重要研究方向。

人们对多晶铁纤维的研究始于 20 世纪 80 年代中期。多晶铁纤维吸波材料包括铁、钴、镍及其合金纤维,与金属微粉相比,多晶铁纤维可以有效地降低吸波涂层的密度(相同体积下质量减轻 40% ~ 60%),并能有效提高电磁波吸收能力和拓宽吸收带宽度,此外还具有吸收与入射角无关等优点。研究发现,多晶铁纤维的吸波机制主要是涡流损耗、磁滞损耗和介电损耗^[40]。轴向的磁导率和径向的介电常数是影响其电磁参数的主要原因,因此提高长径比是提高吸波性能的关键^[41]。童国秀等^[42]利用高纯氩气作载气,热分解 $\text{Fe}(\text{CO})_5$,通过控制热分解温度来控制所得多晶铁纤维的晶粒尺寸和组分,在 700 °C 时制备的多晶铁纤维晶粒尺寸为 61.1 nm,长径比为 10 ~ 40, C 含量为 3.88%,其软磁性能最好,同时介电损耗和磁损耗也最大。多晶铁纤维表面的电阻率非常低,使用时易在吸波涂层内部形成导电网络,从而降低其吸波效率,在实际应用中,可以通过表面改性等手段提高其表面电阻率。在雷达波吸收方面,多晶铁纤维具有广阔的应用前景。

3.3 纳米磁性吸波材料

当材料粒子尺寸在纳米量子级(1 ~ 100 nm)时,量子效应使电子能级发生分裂,分裂能级间隔正处于与微波对应的能量范围(10^{-2} ~ 10^{-5} eV)内,会产生新的吸波效应;纳米颗粒尺寸小,比表面积大,表面原子比例高,不饱和键和悬挂键增多,界面极化和多重散射成为重要的吸波机制;另外,磁性纳米粒子具有较高的矫顽力,可引起大的磁滞损耗^[43]。因此,纳米吸波材料除具有传统吸波材料的损耗特性外,还具有吸收频带宽、密度低、厚度薄、兼容性好等优点,是一类新发展的吸波材料,具有良好发展前途和应用价值^[43-45]。

纳米磁性吸波材料的主要形态包括纳米颗粒或超微颗粒、多层膜、纳米颗粒膜(相对多层膜来说,纳米颗粒膜中的铁磁性颗粒呈无规则的统计分布)和纳米组装体系^[46]。纳米磁性吸波材料由于具有纳米晶体间多重交换耦合作用、小尺寸效应、表面效应、存在大量晶格畸变等特点,因此磁滞损耗较大,表现出较好的微波吸收性能。

目前对于磁性纳米吸波材料的研究主要集中于纳米磁性薄膜吸波材料、纳米金属与合金吸波材料、纳米陶瓷吸波材料、纳米氧化物吸波材料、纳米复合吸波材料等。通过复合方式制得的合金粉体能避免单一纳米金属粉或氧化物普遍存在的频带窄、吸收效果差的缺点,这也是当前研究的热点。Cheng 等^[47]采用溶胶-凝胶法制备了粒径为 8.5 ~ 54.1 nm 的 $\text{SiO}_2/\text{CoFe}_2\text{O}_4$ 磁性纳米复合粉体,5.4 GHz 时的最小反射率为 -35 dB。A. X. Huang 等^[48]制备碳微管(CMT)/四氧化三铁纳米复合材料,结果表明,当涂层厚度为 2.0 mm,在 10.64 GHz 时的最小反射率为 -40 dB,小于 -10 dB 带宽约为 4 GHz。Li Guoxian 等^[49]利用溶胶-凝胶法合成有序介孔 SiC/FeNi 纳米复合材料,涂层厚度为 3.0 mm,在 11.1 GHz 时的最小反射率为 -45.6 dB。

4 结论

理想中的吸波材料应满足“厚度薄、密度小、频带宽、吸收强”的要求,目前国内外在磁性吸波材料的研究方面还存在频带窄、密度大、性能低等缺点,这在一定程度上使得其应用范围受到限制。为了克服这些缺点,以下会是今后的重点研究方向:

- 1) 进行多种材料的复合,制备复合型吸波材料,主要是将电损耗型材料与磁损耗型材料相复合,使其更趋于阻抗匹配,从而改善吸波效果。
- 2) 对磁性吸波材料的结构进行设计,将其制成纤维状、蜂窝状、团簇状或薄片状,可以降低吸波材料的密度,有效拓宽吸波频带,提高吸波性能。
- 3) 大力发展新型吸波剂,对其吸波机理进行深入研究,从而指导人们研制出性能更加优异的吸波剂。

[参 考 文 献]

- [1] LOU Hong-fei, WANG Jian-jiang, HUANG Hong-jun, et al. Effect of Additive on Microwave Absorption Properties of Hollow Ceramic Microspheres Prepared by Self-propagating High-temperature Synthesis (SHS) Flame Quenching Technology [J]. Materials Science Forum, 2011 (704/705): 603—607.
- [2] 潘喜峰. 钴基金属包覆铁氧体复合粉末的制备和吸波性能研究[D]. 上海:上海交通大学,2008.
- [3] 赵彦波,刘顺华,管洪涛,等. 水泥基多孔复合材料吸波性能[J]. 硅酸盐学报,2006,34(2):225—228.
- [4] 陈娜. 稀土替代铁氧体及其复合材料的制备和吸波性能研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.

- [5] 刘延坤. 稀土掺杂钛酸钡和铁氧体纳米材料的制备及吸波性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [6] WU Chao, ZENG Zhao-yang, LYU Xu-liang, et al. Analysis of Absorption Properties for Magnetism-absorbing Agents Mixed with Semiconductor Particulate [J]. *Materials Science Forum*, 2012, 512/513/514/515: 1128—1131.
- [7] 陈雪刚, 叶瑛, 程继鹏. 电磁波吸收材料的研究进展[J]. *无机材料学报*, 2011, 26(5): 449—457.
- [8] 王海滨, 刘树信, 霍冀川. 无机吸波材料研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2008, 27(4): 754—758.
- [9] FOLGUERAS L C, REZENDE M C. Multilayer Radar Absorbing Material Processing by Using Polymeric Nonwoven and Conducting Polymer [J]. *Materials Research*, 2008, 11(3): 245—249.
- [10] 李雪爱. Fe_3O_4 基磁性材料的制备及其复合薄膜电磁性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [11] 燕绍九. 介电层包覆铁磁金属微纳米颗粒的结构与电磁性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [12] IQBAL M A, TAHIR W, MURTAZA RAI G, et al. An Investigation of the Titanium Effect on the Structural and Magnetic Properties of BaNi_2 Based W-type Hexaferrites [J]. *Ceramics International*, 2012, 38(5): 3757—3762.
- [13] QIU Hai-zhen, XU Feng, LI Liang-chao, et al. Polyacrylamide/ $\text{Zn}_{0.4}\text{Ni}_{0.5}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Nanocomposites: Synthesis, Characterization and Electromagnetic Properties [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2010, 124(2/3): 1039—1045.
- [14] SUGIMOTO S, HAGA K, KAGOTANI T, et al. Microwave Absorption Properties of Ba M-type Ferrite Prepared by a Modified Coprecipitation Method [J]. *J Magn Magn Mater*, 2005, 290/291(2): 1188—1191.
- [15] SRIVASTAVA Richa, YADAV B C. Ferrite Materials: Introduction, Synthesis Techniques, and Applications as Sensors [J]. *Green Nanotechnology*, 2012, 4(2): 141—154.
- [16] PREETI Mathur, ATUL Thakur, MAHAVIR Singh, et al. Preparation and Characterization of $\text{Mn}_{0.4}\text{Ni}_x\text{Zn}_{0.6-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Soft Spinel Ferrites for Low and High Frequency Applications by Citrate Precursor Method [J]. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 2008, 222(4): 621—633.
- [17] XU Fang, BAI Yang, JIANG Kai, et al. Characterization of a Y-type Hexagonal Ferrite-based Frequency Tunable Microwave Absorber [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2012, 19(5): 453—456.
- [18] DENG Lian-wen, DING Li, ZHOU Ke-sheng, et al. Electromagnetic Properties and Microwave Absorption of W-type Hexagonal Ferrites Doped with La^{3+} [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2011, 323(14): 1895—1898.
- [19] GUO Feng-ying, JI Gui-juan, XU Ji-jing, et al. Effect of Different Rare-earth Elements Substitution on Microstructure and Microwave Absorbing Properties of $\text{Ba}_{0.9}\text{RE}_{0.1}\text{Co}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ (RE = La, Nd, Sm) Particles [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, 324: 1209—1213.
- [20] ELISEEVA A A, GOROZHANKINA D F, ZAITSEVA D D, et al. Preparation of Strontium Hexaferrite Nanowires in the Mesoporous Silica Matrix (MCM-41) [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2005(290/291): 106—109.
- [21] WANG Xiao-hong, LI Xiao-jie, YAN Hong-hao, et al. $\text{NiMnFe}_2\text{O}_4$ Powder Synthesis by Detonation of Emulsion Explosive [J]. 2008, 90: 417—422.
- [22] 张泽洋, 刘祥萱, 吴有朋, 等. 热处理对锶铁氧体微结构及吸波性能的影响 [J]. *表面技术*, 2012, 41(1): 109—112.
- [23] ROYA Dastjerdi, MAJID Montazer. A Review on the Application of Inorganic Nano-structured Materials in the Modification of Textiles: Focus on Anti-microbial Properties [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2010, 79(1): 5—18.
- [24] GHASEMI Ali, SHIRSATH Sagar E, LI Xiao-xi, et al. A Comparison between Magnetic and Reflection Loss Characteristics of Substituted Strontium Ferrite and Nanocomposites of Ferrite/Carbon Nanotubes [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(7): 07B543—07B545.
- [25] TANG Xin, YANG Yuan-guang. Surface Modification of M-Ba-ferrite Powders by Polyaniline: Towards Improving Microwave Electromagnetic Response [J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(23): 9381—9385.
- [26] DEVAN R S. Effect of Composition on Coupled Electric, Magnetic, and Dielectric Properties of Two Phase Particulate Magnetoelectric Composite [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(1): 14109—14114.
- [27] PAN Xi-feng, QIU Jian-xun, GU Ming-yuan. Preparation and Microwave Absorption Properties of Nanosized $\text{Ni}/\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ Magnetic Powder [J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42(6): 2086—2089.
- [28] CHENG Y L, DAI J M, WU D J. Electromagnetic and Microwave Absorption Properties of Carbonyl Iron/ $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ Composites [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, 322(1): 97—101.
- [29] YAN Xu, GAO Da-qiang. Adjustable Microwave Absorption Properties of Flake Shaped ($\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}$) $\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{Co}$ Nanocomposites with Stress Induced Orientation [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, 324(11): 1902—1906.
- [30] ZHANG Kai, AMPONSAH O K, ARSLAN M, et al. Co-ferrite Spinel and FeCo Alloy Core Shell Nanocomposites and Mesoporous Systems for Multifunctional Applications [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(7): 07B525.
- [31] ZHANG Ze-yang, LIU Xiang-xuan, Wang Xuan-jun, et al. Electromagnetic and Microwave Absorption Properties of $\text{Fe-Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{Fe}_{11.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_{19}$ Shell-core Composites [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, 324(13): 2177—2182.
- [32] 刘姣, 邱泰, 杨建. MgFe_2O_4 铁氧体原位包覆碳基铁超细

- 复合粉体的制备及其抗氧化性能[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2008, 25(5): 14—18.
- [33] 刘姣, 邱泰, 杨建, 等. MgFe_2O_4 铁氧体改性羰基铁粒子制备及吸波性能[J]. 有色金属(冶炼部分), 2009(1): 21—24.
- [34] 陈映杉, 冯旺军, 李翠环, 等. 核壳结构 $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ - NiFe_2O_4 复合纳米粉体的吸波性能[J]. 复合材料学报, 2012, 29(1): 111—115.
- [35] SONG Q, ZHANG Z J. Controlled Synthesis and Magnetic Properties of Bimagnetic Spinel Ferrite CoFe_2O_4 and MnFe_2O_4 Nanocrystals with Core-shell Architecture[J]. Journal of the American Chemical Society, 2012, 134(24): 10182—10190.
- [36] 张健, 张文彦, 奚正平, 等. 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.
- [37] 许勇刚, 袁黎明, 蔡军, 等. 羰基铁和 FeSiAl 共混制备宽频吸波材料[J]. 功能材料, 2011, 42(S3): 555—558.
- [38] WUA L Z, DING J, JIANG H B, et al. Particle Size Influence to the Microwave Properties of Iron Based Magnetic Particulate Composites[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2005, 285(1/2): 233—239.
- [39] WEN Fu-sheng, ZUO Wen-liang, YI Hai-bo, et al. Microwave-absorbing Properties of Shape-optimized Carbonyl Iron Particles with Maximum Microwave Permeability[J]. Physica B: Condensed Matter, 2009, 404(20): 3567—3570.
- [40] WANG Qiang, SUN Ling-na, HU Chang-wen, et al. Research of Novel Functional Stealthy Nanomaterials[J]. Advanced Materials Research, 2012, 534: 73—77.
- [41] DENG Lian-wen, LUO Heng, HUANG Sheng-xiang, et al. Electromagnetic Responses of Magnetic Conductive Hollow Fibers[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(8): 084506—084513.
- [42] TONG Guo-xiu, GUAN Jian-guo, FAN Xian, et al. Influences of Pyrolysis Temperature on Static Magnetic and Microwave Electromagnetic Properties of Polycrystalline Iron Fibers[J]. Acta Metall Sin, 2008, 44(7): 867—870.
- [43] 张克立, 从长杰, 郭光辉, 等. 纳米吸波材料的研究现状与展望[J]. 武汉大学学报(理学版), 2003, 49(6): 680—684.
- [44] LI Jian-gong, HUANG Juan-juan, QIN Yong, et al. Magnetic and Microwave Properties of Cobalt Nanoplatelets[J]. Materials Science and Engineering: B, 2007, 138(3): 199—204.
- [45] CHE Ru-xin, YU Bing, WANG Chun-xia et al. Preparation and Microwave Absorption Property of the Core-nanoshell Composite Materials Doped with Sm[J]. Advanced Materials Research, 2011(356/357/358/359/360): 514—518.
- [46] XU Ming-zhen, MENG Fan-bin, ZHAO Rui, et al. Iron Phthalocyanine Oligomer/ Fe_3O_4 Hybrid Microspheres and Their Microwave Absorption Property[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2011, 323(16): 2174—2178.
- [47] WANG Chengchien, LIN Jingmo, LIN Chunrong, et al. Preparation and Application of Hollow Silica/Magnetic Nanocomposite Particle[J]. International Journal of Modern Physics: Conference Series, 2012, 6: 601.
- [48] HUANG A X, LU A M, ZHANG A X, et al. Carbon Microtube/ Fe_3O_4 Nanocomposite with Improved Wave-absorbing Performance[J]. Scripta Materialia, 2012, 67(6): 613—616.
- [49] LI Guo-xian, GUO Yun-xia, SUN Xin, et al. Synthesis and Microwave Absorbing Properties of FeNi Alloy Incorporated Ordered Mesoporous Carbon-silica Nanocomposite[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2012, 73(11): 1268—1273.

(上接第 74 页)

- [3] 刘雪民, 易大伟, 刘炳. 热浸镀铝技术的研究应用与发展[J]. 材料保护, 2008, 41(4): 47—50.
- [4] 李晓刚. 材料腐蚀与防护[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2009: 114—116.
- [5] 高云松, 王志彬. 渗铝钢在高酸值原油中的耐腐蚀机理[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2008, 25(5): 19—22.
- [6] HWANG Sung-ha, SONG Jin-hwa, KIM Yong-suk. Effects of Carbon Content of Carbon Steel on Its Dissolution into a Molten Aluminum Alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2005, 390: 437—443.
- [7] 李岩, 凌国平, 刘柯钊, 等. 热处理对不同基体表面镀铝相结构的影响[J]. 材料工程, 2010, 54(2): 1—5.
- [8] 孙克宁, 王福平, 曹莹. 热浸镀铝层的性能研究[J]. 材料科学与工艺, 2002, 10(2): 192—195.
- [9] 蒋斌, 徐滨士, 董世运, 等. $n\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Ni}$ 复合镀层的组织与滑动磨损性能研究[J]. 材料工程, 2002, 46(9): 33—36.
- [10] 韩存仓, 刘爱萍, 张伟. 渗铝钢合金层/基体界面的生长模型研究[J]. 金属热处理, 2011, 36(4): 13—16.
- [11] 顾雪冬. 45 钢表面双层辉光等离子渗铝[J]. 金属热处理, 2008, 33(6): 60—64.
- [12] 刘世勇. 低碳钢渗铝加离子渗氮的表面硬化处理[J]. 金属热处理, 2004, 29(4): 40—43.
- [13] FATULLAYEV A. Determination of Unknown Coefficient in Nonlinear Diffusion Equation[J]. Nonlinear Analysis, 2001, 44(14): 336—337.
- [14] 夏原, 姚枚, 李铁藩. Q235 钢热浸铝初期镀层组织结构的变化[J]. 金属热处理学报, 1998, 19(2): 34—38.