

新型碳系吸波涂层材料研究进展

陶睿, 刘朝辉, 班国东, 林锐, 丁逸栋, 杨洪波

(后勤工程学院化学与材料工程系, 重庆 401311)

摘要: 作为解决电磁污染问题与实现装备战场隐身的有效手段, 吸波涂层材料具有广泛的应用前景。碳系材料因其广泛的来源、简单的制备工艺、低密度、高导电率等优点, 在吸波涂层材料领域受到国内外研究人员的高度重视。对吸波涂层材料的损耗机制进行了叙述, 介绍了电阻型损耗、电介质型损耗以及磁损耗三种损耗机制中电磁波的损耗和吸收原理。综述了碳纤维、碳纳米管、石墨烯等新型碳系材料的特性及其在吸波涂层材料领域的研究现状。对碳纤维进行活化处理或使用多孔碳纤维、螺旋碳纤维等代替普通碳纤维能够有效提高其吸波性能。碳纳米管具有多种结构, 其中阵列状多壁碳纳米管吸波性能最佳, 采用一些具备磁损耗的材料与碳纳米管进行共混、包覆或填充处理是目前的主要研究方向。石墨烯几乎没有磁损耗, 单独使用时, 阻抗匹配较差, 影响其吸波性能的发挥, 通常将石墨烯与磁损耗型材料复合, 改善材料的阻抗匹配, 提高吸波效果。最后, 根据碳系吸波涂层材料的研究现状, 对其未来的发展方向进行了展望。

关键词: 吸波涂层材料; 损耗机制; 碳系材料; 碳纤维; 碳纳米管; 石墨烯

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)03-0165-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.03.025

Research Progress of Novel Carbon Series Absorbing Coating Materials

TAO Rui, LIU Zhao-hui, BAN Guo-dong, LIN Rui, DING Yi-dong, YANG Hong-bo

(Department of Chemistry and Material Engineering, Logistic Engineering University, Chongqing 401311, China)

ABSTRACT: As an effective method of dealing with electromagnetic pollution and realizing equipment battlefield stealth, absorbing coating materials have extensive application prospect. Carbon series materials are highly praised by the researchers home and abroad since they feature in extensive sources, simple preparation technology, low density and high conductivity. The loss mechanisms of absorbing materials were narrated, and resistance loss, dielectric loss and magnetic loss as well as loss and absorption principles of electromagnetic wave were introduced. In addition to research progress in absorbing materials, the characteristics of novel carbon series absorbing materials such as carbon fiber, carbon nanotubes and graphene were reviewed. The activation of carbon fiber, application of porous carbon fiber and spiral carbon fiber instead of common carbon fiber could effectively improve its absorbing properties. Array shaped multi-walled carbon nanotubes were the best absorbing materials of various carbon nano tubes. It was proposed that blending, coating or filling materials subject to magnetic loss and carbon nano tubes was the main research focus at present. Graphene had minor magnetic loss, its impedance match was poor when being used alone and the absorbing property was inhibited. Graphene

收稿日期: 2016-09-27; 修订日期: 2016-10-19

Received: 2016-09-27; Revised: 2016-10-19

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 the Logistical Scientific Research Projects of Army (BY115C007) and the National Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2014jcyjA50026)

作者简介: 陶睿 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为雷达吸波材料。

Biography: TAO Rui (1993—), Male, Master graduate student, Research focus: radar absorbing material.

通讯作者: 刘朝辉 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为隐身材料与保温隔热技术。

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

and magnetic loss type composite absorbing materials were usually compounded to improve the impedance match and absorbing effect. At last, future development focuses were prospected based on the research progress of novel carbon series absorbing coating materials.

KEY WORDS: absorbing coating materials; loss mechanism; carbon series materials; carbon fiber; carbon nano tubes; graphene

随着现代科学技术的日益发展,电磁辐射大幅增加,导致严重的电磁污染,对环境和人体健康都造成了一定的危害^[1,2]。雷达侦查技术的研究与应用使得现代战争中目标装备被敌方发现和打击的概率大大提高,装备的隐身性能严重影响其战场生存能力^[3,4]。目前,无论是解决电磁污染问题,还是实现装备战场隐身,使用吸波涂层材料都是极为有效的办法^[5-7]。吸波涂层材料是指涂覆在装备或建筑表面,能将电磁波转换为热能或其他形式的能量耗散掉或者使电磁波因干涉而消失,从而吸收、衰减入射电磁波的一类功能材料。吸波涂层材料的分类方式比较多,根据其使用的材料不同大致可分为碳系吸波涂层材料、导电聚合物吸波涂层材料、磁性金属微粉吸波涂层材料、铁氧体吸波涂层材料等几类^[8,9]。其中碳系吸波涂层材料因其广泛的来源、简单的制备工艺、低密度、高导电率等优点,受到国内外研究人员的高度重视^[10]。

1 吸波涂层材料损耗机制

吸波涂层材料对电磁波的损耗机制主要分为三种,分别是电阻型损耗、电介质型损耗以及磁损耗^[11,12]。

1.1 电阻型损耗

电阻型损耗是利用电磁波在材料内部引起耗散电流达到吸波目的,和材料电导率直接相关,一些电导率较高的材料,如石墨、导电高聚物、金属粉等,对电磁波的主要损耗机制就是电阻型损耗^[13]。当电磁波在此类材料中传播时,材料等效于处在随时间变化的电磁场中,由于材料内部载流子的存在,会引起宏观电流,并利用电流的热效应将电磁能转换为热能耗散掉。在进入材料内部的电磁波相同的情况下,电导率越高的材料,内部载流子形成的宏观电流也越大,从而对进入材料内部的电磁波的吸收能力相应地比较强^[14,15]。对于具有较高电导率的电阻型损耗吸波涂层材料,如果材料相互连接形成块状的导体,将对电磁波形成强反射作用,因此必须采用相互绝缘的粉末或纤维状材料。

1.2 电介质损耗

电介质损耗主要是通过介质在反复极化的过程

中产生的极化弛豫现象对电磁波进行损耗和吸收,和材料的极化密切相关。电介质在外电场作用下显示电性的现象被称作电介质的极化。在电介质没有受到电场作用的情况下,自由电荷均匀分布在材料表面和内部,宏观上并不显示电性。电磁波的存在起到了给电介质添加外电场的作用,电介质内部的电偶极子发生运动,正负电荷在材料表面和内部的分布不再均匀,宏观上显示出电性。在电磁波形成的交变电场中,正负电场轮流加到电介质上,偶极子的变化频率无法跟上电场高速变化的频率,发生极化弛豫^[16,17]。极化弛豫现象使得材料内部电位移 D 和场强 E 无法因同步而出现相位差,从而产生能量消耗,达到损耗和吸收电磁波的目的^[18,19]。

1.3 磁损耗

磁损耗主要出现在铁磁性介质的动态磁化过程中,包含有:磁滞效应产生的磁滞损耗,由电磁感应产生的涡流损耗,以及由磁后效现象、尺寸共振、铁磁共振、畴壁共振等现象所产生的能量损耗。由于多种损耗机理的叠加,在交变磁场中,磁损耗型材料能够产生较大的能量损耗^[20]。

2 新型碳系材料在吸波涂层中的应用

碳系吸波涂层材料主要有石墨、炭黑、碳纤维、碳纳米管、石墨烯等^[21]。传统碳系材料,如石墨、炭黑等在吸波涂层材料领域应用较早,但近年来对其研究较少,已不再是该领域研究的热点。与石墨、炭黑等传统碳系材料相比,碳纤维、碳纳米管、石墨烯新型碳系材料等具有更优异的性能。研究发现,要达到同样的吸波效果,新型碳系材料的填充质量分数大大低于传统碳系材料,并且具有电阻率更低、密度更小等特点,在制备吸波涂层方面具有更大的优势,成为吸波涂层材料领域新的研究热点^[22,23]。

2.1 碳纤维吸波涂层材料

碳纤维是良好的导体,对雷达波具有强反射作用。普通碳纤维难以直接用作吸波涂层材料,对碳纤维进行短切处理后分散到基体树脂当中制备复合吸波涂层,能够有效解决这一问题^[24]。吴红焕^[25]研究了短切碳纤维的长度与其电磁性能之间的关系,结果

表明: 长度过短的短切碳纤维, 电流沿纤维径向流动的距离太短, 难以产生较大的损耗; 长度过长的短切碳纤维, 容易形成电磁波的强反射体, 不能起到良好的吸波效果。何芳等^[26]分别研究了 2~4 mm 和 4~6 mm 短切碳纤维在加工过程中的分散性能, 发现 2~4 mm 的短切碳纤维分散性更好, 不易发生缠结、团聚而形成碳纤维集聚体, 更加适宜制备碳纤维复合吸波涂层。贺龙辉^[27]等研究了 T_1 、 T_2 两种不同长度的碳纤维填充聚氨酯泡沫吸波涂层的吸波性能, 结果表明两种长度的碳纤维复合填充时的强吸收带宽明显优于单独使用一种碳纤维, 当 T_1 、 T_2 填充比为 3:4, 总填充量为 7% (质量分数) 时, 复合试样强吸收带宽最宽, 达到 7.6 GHz。

对碳纤维进行活化处理以及利用其他材料对碳纤维进行包覆改性或作为匹配层, 都能够起到提升碳纤维吸波性能的作用。邹田春等^[28]测试分析了活性碳纤维的介电特性, 其介电常数实部和虚部同时随碳纤维含量的增加而增加, 当频率由低到高变化时, 其介电常数虚部有增大趋势, 实部有减小趋势, 具有频响效应。根据活性碳纤维的介电特性, 设计 4 层雷达吸波涂层, 当涂层厚度为 4 mm 时, 反射率最小, 达到 -39.3 dB, 强吸收带宽达到 8 GHz。Zou T 等^[29]对活性碳纤维 (ACFs) 复合吸波涂层进行了研究, 通过对比发现, 碳纤维的活化明显增强了复合材料的吸波能力, 随着吸波涂层中 ACFs 含量的增加, 涂层吸波能力呈现出先增强、后减弱的变化规律, 当 ACFs 质量分数为 0.76% 时, 涂层强吸收带宽达到了 12.2 GHz。王永辉等^[30]以改性 Fe 纳米粒子、碳纤维为填料, 环氧树脂为基体树脂, 制备了复合吸波涂层, 吸波性能得到了显著提高。Liu Y 等^[31]采用电镀方法在碳纤维表面成功制备了 Ni-Fe 合金镀层, 制得的 Ni/Fe/CF 复合材料在 1.5~5.4 GHz 频率范围内反射率小于 -5 dB, 在 2.0 GHz 处反射率最低, 达到 -14.7 dB。Zang Y 等^[32]以碳纤维为吸收层, 玻璃纤维为匹配层, 制备了复合雷达吸波涂层, 复合材料在 5.8 GHz 和 16.9 GHz 出现最大吸收峰, 分别为 -16.1 dB 和 -14.2 dB, 通过调整碳纤维和玻璃纤维的构成比例, 复合材料的有效吸收带宽最终达到了 12.1 GHz。贺龙辉等^[27]也研究了匹配层对碳纤维复合材料吸波性能的影响, 引入了多晶铁纤维作为匹配层, 碳纤维复合材料的吸波性能得到显著提升。

研究人员还发现, 多孔碳纤维、螺旋碳纤维等一些特殊的碳纤维拥有比普通碳纤维更加优异的吸波性能。李光^[33]按不同质量分数比制备了聚丙烯腈/聚甲基丙烯酸甲酯共混纤维, 通过高温碳化得到多孔碳纤维 (PCFs)。他以制得的 PCFs 为吸波剂, 并以环氧树脂为基体材料, 制备吸波涂层, 通过改变 PCFs

添加量, 涂层最低反射率可达 -31 dB (PCFs 质量分数为 6%), 是常规碳纤维的 6 倍, 其吸波性能小于 -10 dB 的频段覆盖了整个 X 波段。杨胜林等^[34]采用湿化学法, 用 Fe_3O_4 对 PCFs 进行包覆处理, 包覆后, 纳米 Fe_3O_4 均匀地覆盖在多孔碳纤维表面, 分散良好, 没有出现团聚现象, 处理后材料的整体吸波能力得到了提高, 最大吸收峰明显向低频移动。赵东林等^[35]制备了螺旋形碳纤维复合吸波涂层, 复合材料在厚度为 9.5 mm 时具有最佳吸波性能, 其反射率最低, 达到 -21.62 dB, 且反射率在 3.76~18 GHz 频率范围内均小于 -10 dB。

2.2 碳纳米管吸波涂层材料

碳纳米管于 1991 年被日本科学家 Iijima 首先制得, 通过不断地研究发现, 碳纳米管在许多方面具备特殊的性能^[36]。例如碳纳米管具有 5 倍于钢的弹性模量, 60 倍于钢的弹性应变, 且仅有 1/6 于钢的密度, 此外还具有优良的导热率, 在室温下其导热率接近 3000 W/(m·K)^[37-39]。同时, 碳纳米管独特的结构带来的金属或半导体特性以及高比表面积效应和小尺寸效应等, 能够对电磁波造成衰减和吸收, 在吸波涂层材料领域具有重大的发展潜力^[40,41]。

碳纳米管具有多种不同的结构, 其吸波性能也存在很大的差异。张增富等^[42]研究了单壁碳纳米管、多壁碳纳米管、纯化碳纳米管、聚团状碳纳米管、阵列状碳纳米管等多种结构对碳纳米管吸波性能的影响, 结果显示, 阵列状多壁碳纳米管吸波性能优于其他结构的碳纳米管。卿玉长等^[43]以环氧有机硅树脂为基体, 制备了碳纳米管吸波涂层, 并研究了多壁碳纳米管的直径和含量对其吸波性能的影响。测试表明, 保持碳纳米管含量不变, 多壁碳纳米管的直径越大, 吸波涂层的介电常数越大。当碳纳米管的含量增加时, 吸波涂层介电常数随之增加, 特别是在低频段。当涂层厚度为 2 mm 时, 碳纳米管的最佳质量分数为 10%, 可在 7~14 Hz 达到小于 -10 dB 的反射率, 且碳纳米管的直径越大, 出现吸收峰的频率越低。Qiu H 等^[44]采用原位化学聚合法制备了多壁碳纳米管/聚苯胺纳米复合材料, 碳纳米管和聚苯胺之间有 π 键连接, 作用力强, 热稳定性好。复合材料在 8.2~10.2 GHz 频率范围内均有小于 -10 dB 的反射率, 在 8.8 GHz 处出现吸收峰, 反射率为 -49.6 dB, 作为高性能吸波涂层材料具有一定的应用前景。Karadas 等^[45]采用电纺丝工艺制备了聚乙烯醇/十二烷基硫酸钠/多壁碳纳米管复合材料, 研究发现, 通过提高碳纳米管的添加量可以提高复合材料的吸波性能, 由于碳纳米管的高分散稳定性, 其添加量最高可达 10% (质量分数)。刘平安等^[46]在苯胺/盐酸溶液中加入碳纳米管并分散, 原位

聚合制备了碳纳米管/苯胺复合材料,并研究了盐酸浓度、聚合温度、聚合时间、涂层厚度等因素对材料吸波性能的影响规律。当盐酸浓度为 0.05 mol/L,聚合温度为 20 ℃,聚合时间为 6 h,涂层厚度为 1.5 mm 时,复合材料吸波性能最佳,在 14.7 GHz 频率处反射率最低(达到-27.35 dB),强吸收频宽最大(可达 5.3 GHz)。

为了进一步提高碳纳米管的吸波性能,目前通常采用一些具备磁损耗的材料与碳纳米管进行共混、包覆或填充处理。赵廷凯等^[47]采用化学气相沉积法制备了 Fe-Co-Ni 混合粉末掺杂的多壁碳纳米管,其中 Fe、Co、Ni 的质量比为 1:1:3,并以双马来酰胺树脂为基体,制备了复合吸波涂层。通过对复合材料的电磁性能进行测试和分析,发现与单独使用碳纳米管作为吸波剂相比,复合材料除了具有较大的介电损耗外,还具有较强的磁损耗,匹配特性良好。陈明东等^[48,49]采用溶胶-凝胶法分别制备了镍铁氧体和钴铁氧体,将碳纳米管与制备的镍铁氧体和钴铁氧体均匀混合制得复合吸波涂层材料。测试发现,无论钴铁氧体,还是镍铁氧体,在加入碳纳米管之后,对雷达波的吸收性能都有一定的提升,且随着碳纳米管含量的增加,复合材料阻抗匹配不断减弱,但损耗能力迅速增加,当碳纳米质量分数为 20%时,二者达平衡,吸波效果最佳,两种材料反射率小于-10 dB,带宽均超过 3 GHz。Kumar 等^[50]将纳米镍粒子沉积在碳纳米管表面,制备了纳米镍粒子包覆碳纳米管(Ni@MWCNTs)复合材料,再将 Ni@MWCNTs 加入到聚苯乙烯中制得雷达吸波涂层。当 Ni@MWCNTs 质量分数为 0.5%时,涂层在 2.7 GHz、6 mm 厚度处达到最大吸收峰,反射率为-33 dB;当 Ni@MWCNTs 质量分数为 1.5%时,涂层在 2.7 GHz、4 mm 厚度处达到最大吸收峰,反射率为-24 dB。Su Q 等^[51]采用浮动催化法制备了 Fe/Fe₃C 功能化碳纳米管,Fe 和 Fe₃C 纳米结构部分填充在碳纳米管内部,部分包覆在碳纳米管表面,通过 Fe/Fe₃C 对碳纳米管阻抗匹配进行改善,复合材料在 2~18 GHz 对电磁波均有较好的吸收性能。

2.3 石墨烯吸波涂层材料

石墨烯是一种新型二维碳系材料,具备独特的孔壁和单原子层结构,质量轻,比表面积大,有较高的介电常数和优良的导电性^[52,53];同时,其结构中大量的悬空键更易产生极化弛豫,从而造成对电磁波的衰减。特别是采用氧化还原法制备的石墨烯,由于其制备过程中产生的缺陷和残留的含氧官能团,进一步提高了石墨烯的吸波性能^[54,55]。石墨烯的问世,为研制“薄、轻、宽、强”的吸波涂层材料提供了新的方向。但是由于石墨烯几乎没有磁损耗,单独使用时,阻抗

匹配较差,影响其吸波性能的发挥。通常将石墨烯与磁损耗型吸波涂层材料复合,改善材料的阻抗匹配,提高吸波效果^[56,57]。

Zheng X 等^[58]采用一步水热法制备了 ZnFe₂O₄/RGO 复合材料,当石墨烯质量分数为 20.4%,涂层厚度为 1.6 mm 时,在较高频段表现出良好的吸波性能,其在 16.7 GHz 处反射率最低,达到-33.5 dB,并且在 15.4~18.0 GHz 范围内,均能有效吸收电磁波。Zhang S 等^[59]以乙二醇为溶剂,以聚乙烯吡咯烷酮为软模板,运用蒸汽扩散法合成了 CoFe₂O₄/GO 复合材料。当 CoFe₂O₄与 GO 质量分数比为 11.68:1,复合材料涂层厚度为 2.0 mm 时,在 10.9 GHz 处达到最小反射率-39.0 dB,反射率小于-10 dB 的频段为 9.6~14.3 GHz,强吸收频宽为 4.7 GHz。采取热还原法对 CoFe₂O₄/GO 进一步处理可得到 FeCo/GNs 复合材料,吸波性能进一步加强,测试发现,FeCo/GNs 与石蜡以 1:1 混合,当厚度为 2.5 mm 时,在 8.9 GHz 处有最小发射率-40.2 dB,且在 3.4~18 GHz 频率范围内,反射率均小于-10 dB^[60]。Zhu Z^[61]等以 Ni(Ac)₂为 Ni 的来源,制备了 RGO/Ni 复合材料,复合材料厚度为 2 mm 时有最强吸收峰,反射率可达-42 dB;复合材料厚度为 2.5 mm 时,在 11.3~17.4 GHz 频率范围内反射率小于-10 dB,强吸收频宽最大,达到 6.1 GHz。Durmus 等^[62]将石墨烯与 Fe(NO₃)₃、Ba(NO₃)₂混合,采用水热法制备了 BaFe₁₂O₁₉/GO 复合材料,当石墨烯质量分数为 20%,涂层厚度为 3 mm 时,在 11.42 GHz 处达到最小反射率-58 dB,复合材料强吸收频段覆盖了整个 X 波段。Zhang H 等^[63]通过溶剂热法制备了 RGO/NiO 复合材料,与纯 RGO 相比,复合材料获得了一定的磁损耗性能,同时介电常数实部和虚部均有一定的降低,具备更优的阻抗匹配。当材料厚度为 3.5 mm 时,在 10.6 GHz 处有最小反射率-55.5 dB,反射率小于-10 dB 的频段为 10.2~16.9 GHz。

3 结语

碳纤维、碳纳米管、石墨烯等新型碳系吸波涂层材料虽然研究时间较短,但已经取得了许多成果,有着十分良好的应用前景,同时还存在许多问题。为了满足吸波涂层材料“薄、轻、宽、强”的要求,未来新型碳系吸波涂层材料将朝着以下方向发展:

1) 加强新型碳系吸波涂层材料的改性处理研究。通过改性处理,不仅可以提高材料的吸波性能,还能同时改善材料在基体中的分散性,提高吸波涂层力学性能。

2) 研发新的复合技术。在目前二元复合材料合成的基础上,研发以新型碳系吸波涂层材料为主的三

元、多元高性能复合吸波涂层材料, 包括不同碳系材料之间的复合以及碳系材料与其他种类材料的复合。

3) 改善新型碳系吸波涂层的制备工艺。通过对基材材料的选择、涂层厚度、层数等多方面因素的研究, 提高新型碳系吸波涂层的使用性能, 拓宽其应用领域。

参考文献:

- [1] 庞建峰, 马喜君, 谢兴勇. 电磁吸波材料的研究进展[J]. 电子元件与材料, 2015, 34(2): 7—12.
PANG Jian-feng, MA Xi-jun, XIE Xing-yong. Research Progress of Microwave Absorption Materials[J]. Electronic Components & Materials, 2015, 34(2): 7—12.
- [2] LIU Y, FENG Y, WU X, et al. Microwave Absorption Properties of La Doped Barium Titanate in X-band[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2009, 472(1): 441—445.
- [3] MANDAL A, DAS C K. Effect of BaTiO₃ on the Microwave Absorbing Properties of Co-doped Ni-Zn Ferrite Nanocomposites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(4): 1001—1007.
- [4] 高海波, 鲜勤, 王健伦, 等. 雷达隐身常用电磁波吸收材料研究进展[J]. 表面技术, 2013, 42(6): 88—90.
GAO Hai-bo, XIAN Qin, WANG Jian-lun, et al. Research Progress of Frequently-used Electromagnetic Wave Absorbing Material for Radar Stealth[J]. Surface Technology, 2013, 42(6): 88—90.
- [5] 刘祥莹, 陈鑫, 王焯军, 等. 磁性吸波材料的研究进展[J]. 表面技术, 2013, 42(4): 104—109.
LIU Xiang-xuan, CHEN Xin, WANG Xuan-jun, et al. Recent Progress in Magnetic Absorbing Materials[J]. Surface Technology, 2013, 42(4): 104—109.
- [6] MOITRA D, HAZRA S, GHOSH B K, et al. A Facile Low Temperature Method for the Synthesis of CoFe₂O₄ Nanoparticles Possessing Excellent Microwave Absorption Properties[J]. Rsc Advances, 2015, 5(63): 51130—51134.
- [7] 刘宏伟, 彭海龙, 高培伟, 等. 水泥基吸波材料的性能研究及微观分析[J]. 功能材料, 2015, 46(12): 12150—12152.
LIU Hong-wei, PENG Hai-long, GAO Pei-wei, et al. Performance and Microscopic Analysis of Cement-based Absorbing Materials[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(12): 12150—12152.
- [8] 邓智平, 刘朝辉, 周国柱, 等. 平面各向异性羰基铁/铁氧化物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] 胡小赛, 沈勇, 王黎明, 等. 吸波材料结构、性能及应用研究进展[J]. 应用化工, 2015, 44(9): 1741—1746.
HU Xiao-sai, SHEN Yong, WANG Li-ming, et al. Study on the Structure, Properties and Application of Microwave Absorbing Materials[J]. Applied Chemical Industry, 2015, 44(9): 1741—1746.
- [10] 李庆, 陈志萍, 杨晓峰, 等. 基于石墨烯吸波材料的研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(19): 28—35.
LI Qing, CHEN Zhi-ping, YANG Xiao-feng, et al. Research Progress of Microwave Absorbing Materials Based on Graphene[J]. Materials Review, 2015, 29(19): 28—35.
- [11] GAMA A M, REZENDE M C, DANTAS C C. Dependence of Microwave Absorption Properties on Ferrite Volume Fraction in MnZn Ferrite/Rubber Radar Absorbing Materials[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2011, 323(22): 2782—2785.
- [12] 周克省, 黄可龙, 孔德明, 等. 吸波材料的物理机制及其设计[J]. 中南工业大学学报: 自然科学版, 2001, 32(6): 617—621.
ZHOU Ke-xing, HUANG Ke-long, KONG De-ming, et al. Physical Mechanism and Design of Materials with Electromagnetic Wave Absorption Function[J]. Journal of Central South University of Technology (Natural Science), 2001, 32(6): 617—621.
- [13] SHARBATI A, CHOOPANI S, AZAR A M, et al. Structure and Electromagnetic Behavior of Nanocrystalline in the 8-12 GHz Frequency Range[J]. Solid State Communications, 2010, 150(45): 2218—2222.
- [14] GHASEMI A. Enhanced Reflection Loss and Permittivity of Self Assembled Mg-Co-Zr Substituted Barium Ferrite Dot Array on Carbon Nanotube[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2012, 324(6): 1080—1083.
- [15] 付艳艳. 化学镀石墨复合吸波材料的制备与性能研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2012.
FU Yan-yan. Preparation and Properties of Electroless Plating Graphit Absorbing Composites [D]. Mianyang: Southwest Science and Technology University, 2012.
- [16] 肖冬萍, 田强. 电介质的极化机制与介电常量的分析[J]. 大学物理, 2001, 20(9): 44—46.
XIAO Dong-ping, TIAN Qiang. The Analysis of the Dielectric Constant and Dielectric Polarization Mechanism[J]. College Physics, 2001, 20(9): 44—46.
- [17] 安宏. 电介质的极化与电场的相互作用[J]. 物理与工程, 2007, 17(6): 13—18.
AN Hong. Interactions Between Polarized Dielectric Medium and Electric Field[J]. Physics & Engineering, 2007, 17(6): 13—18.
- [18] 任丽英, 于斌. 电介质极化的研究[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2008, 27(6): 95—97.
REN Li-ying, YU Bin. Research of the Dielectric Polarization[J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition, 2008, 27(6): 95—97.
- [19] 周艳丽, 熊畅. 电介质极化现象的微观机制讨论[J]. 大学物理, 2015, 34(6): 9—12.
ZHOU Yan-li, XIONG Chang. Microscopic Explanation of Dielectric Polarization[J]. College Physics, 2015, 34(6): 9—12.
- [20] TADJARODI A, RAHIMI R, IMANI M, et al. Synthesis, Characterization and Microwave Absorbing Properties of the Novel Ferrite Nanocomposites[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2012, 542(1): 43—50.
- [21] 李斌鹏, 王成国, 王雯. 碳基吸波材料的研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(7): 9—14.
LI Bin-peng, WANG Cheng-guo, WANG Wen. Progress of Electromagnetic Wave Absorbing Materials Based on Car-

- bon[J]. Materials Review, 2012, 26(7): 9—14.
- [22] GRUNLAN J C, MEHRABI A R, BANNON M V, et al. Water Based Single Walled Nanotube Filled Polymer Composite with an Exceptionally Low Percolation Threshold[J]. Advanced Materials, 2004, 16(2): 150—153.
- [23] GONZALEZ M, CRESPO M, BASELGA J, et al. Carbon Nanotube Scaffolds with Controlled Porosity as Electromagnetic Absorbing Materials in the Gigahertz Range[J]. Nanoscale, 2016, 8(20): 10724—10730.
- [24] 李永波, 黄成亮, 曲发增, 等. 碳纤维吸波材料研究现状及展望[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(11): 3228—3231.
LI Yong-bo, HUANG Cheng-liang, QU Fa-zeng, et al. Research Status and Prospect of Carbon Fiber Absorbing Material[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(11): 3228—3231.
- [25] 吴红焕. 短切碳纤维和炭黑的介电性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
WU Hong-huan. Study on the Dielectric Property of C_{sf} and Carbon Black[D]. Xian: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [26] 何芳, 万怡灶, 黄远, 等. ABS/镀镍碳纤维复合材料电磁屏蔽特性研究[J]. 工程塑料应用, 2007, 35(5): 21—24.
HE Fang, WAN Yi-zao, HUANG Yuan, et al. Research of ABS/Nickel Plating Carbon Fiber Composite Electromagnetic Shielding Characteristics [J]. Engineering Plastics Application, 2007, 35(5): 21—24.
- [27] 贺龙辉, 胡照文, 邓联文, 等. 宽频高性能短切碳纤维/聚氨酯泡沫吸波材料制备[J]. 功能材料, 2015, 46(23): 23120—23123.
HE Long-hui, HU Zhao-wen, DENG Lian-wen, et al. Study on Wide and Wave-absorbing Foam Material Prepared by Shortened Carbon Fiber and Polyurethane[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(23): 23120—23123.
- [28] 邹田春, 赵乃勤, 师春生. 活性碳纤维/树脂复合吸波材料的设计[J]. 功能材料与器件学报, 2007, 13(1): 54—58.
ZOU Tian-chun, ZHAO Nai-qin, SHI Chun-sheng. Design of Activated Carbon Fibers/Epoxy Resin Composites[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2007, 13(1): 54—58.
- [29] ZOU T, ZHAO N, SHI C, et al. Microwave Absorbing Properties of Activated Carbon Fibre Polymer Composites[J]. Bulletin of Materials Science, 2011, 34(1): 75—79.
- [30] 王永辉, 赛义德, 黄昊, 等. 铁纳米粒子/碳纤维/环氧树脂基复合材料的制备和吸波性能[J]. 材料研究学报, 2015, 29(2): 81—87.
WANG Yong-hui, SAI Yi-de, HUANG Hao, et al. Fabrication and Electromagnetic Microwave Absorbing Properties of Fe-nanoparticles/Carbon Fibers/Epoxy Resin Based Composites[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2015, 29(2): 81—87.
- [31] LIU Y, QIANG C. Magnetic Properties and Microwave Absorption Properties of Short Carbon Fibres Coated by Ni-Fe Alloy Coatings[J]. Bulletin of Materials Science, 2015, 38(7): 1673—1678.
- [32] ZANG Y, XIA S, LI L, et al. Microwave Absorption Enhancement of Rectangular Activated Carbon Fibers Screen Composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 77(1): 371—378.
- [33] 李光. 多孔碳纤维的低成本制备及其作为高效吸波剂的应用研究[J]. 高科技纤维与应用, 2013, 38(1): 34—39.
LI Guang. Study on Preparation of Porous and Nano Carbon Fibers at a Low Cost and Their Applications in Microwave Absorbing Composites[J]. Hi-tech Fiber & Application, 2013, 38(1): 34—39.
- [34] 杨胜林, 李一伟, 李光, 等. Fe_3O_4 多孔碳纤维复合物的制备及其吸波性能研究[J]. 安全与电磁兼容, 2015, 9(4): 52—61.
YANG Sheng-lin, LI Yi-wei, LI Guang, et al. Preparation and Microwave Absorbing Properties of Fe_3O_4 -PCFs Composite[J]. Safety & EMC, 2015(4): 52—61.
- [35] 赵东林, 高云雷, 沈曾民. 螺旋形碳纤维结构吸波材料的制备及其吸波性能研究[J]. 功能材料信息, 2011, 8(4): 17—21.
ZHAO Dong-lin, GAO Yun-lei, SHEN Zeng-min. The Preparation of Helical Carbon Fiber Structural Absorbing Materials and Its Absorbing Performance Study[J]. Functional Materials Information, 2011, 8(4): 17—21.
- [36] IIJIMA S. Helical Microtubules of Graphitic Carbon[J]. Nature, 1991, 354(6348): 56—58.
- [37] NASIBULIN A G, PIKHITSA P V, JIANG H, et al. A Novel Hybrid Carbon Material[J]. Nature Nanotechnology, 2007, 2(3): 156—161.
- [38] 沈小军, 孟令轩, 付绍云. 石墨烯-多壁碳纳米管协同增强环氧树脂复合材料的低温力学性能[J]. 复合材料学报, 2015, 32(1): 21—26.
SHEN Xiao-jun, MENG Ling-xuan, FU Shao-yun. Cryogenic Mechanical Properties of Epoxy Composites Synergistically Reinforced by Graphene-multi-walled Carbon Nanotubes[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(1): 21—26.
- [39] 段植元, 汪冰峰, 崔刊, 等. 碳纳米管增强聚晶金刚石复合片的抗冲击韧性及其机制[J]. 矿冶工程, 2015, 35(2): 150—153.
DUAN Zhi-yuan, WANG Bin-feng, CUI Kan, et al. Impact Toughness and Mechanism of Polycrystalline Diamond Compacts Reinforced by Carbon Nanotubes[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2015, 35(2): 150—153.
- [40] 陈明东, 揭晓华, 张海燕. 碳纳米管复合吸波涂层微波吸收性能的模拟计算[J]. 物理学报, 2014, 63(6): 188—193.
CHEN Ming-dong, JIE Xiao-hua, ZHANG Hai-yan. Simulation and Calculation of the Absorbing Microwave Properties of Carbon Nanotube Composite Coating[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(6): 188—193.
- [41] SPITALSKY Z, TESIS D, PAPAGELIS K, et al. Carbon Nanotube-Polymer Composites: Chemistry, Processing, Mechanical and Electrical Properties[J]. Progress in Polymer Science, 2010, 35(3): 357—401.
- [42] 张增富, 罗国华, 范壮军, 等. 不同结构碳纳米管的电磁波吸收性能研究[J]. 物理化学学报, 2006, 22(3): 296—300.
ZHANG Zeng-fu, LUO Guo-hua, FAN Zhuang-jun, et al. Complex Permittivity and Permeability Spectra of Different Kinds of Carbon Nanotubes[J]. Acta Physico-Chimica

- Sinica, 2006, 22(3): 296—300.
- [43] 卿玉长, 周万城, 罗发, 等. 多壁碳纳米管/环氧有机硅树脂吸波涂层的介电和吸波性能研究[J]. 无机材料学报, 2010, 25(2): 181—185.
QING Yu-chang, ZHOU Wan-cheng, LUO Fa, et al. Electromagnetic and Absorbing Properties of Multi-walled Carbon Nanotubes/Epoxy-silicone Coatings[J]. Journal of Inorganic Materials, 2010, 25(2): 181—185.
- [44] QIU H, WANG J, QI S, et al. Microwave Absorbing Properties of Multi-walled Carbon Nanotubes/Polyaniline Nanocomposites[J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2014, 26(1): 564—570.
- [45] KARADAS N, SANLI S, AKMESE B, et al. Fabrication of Polyvinyl Alcohol/Multi-walled Carbon Nanotubes Composite Electrospun Nanofibres and Their Application as Microwave Absorbing Material[J]. Micro & Nano Letters, 2013, 8(8): 455—459.
- [46] 刘平安, 王鹏, 叶升, 等. 碳纳米管/聚苯胺复合物的制备及其吸波性能的研究[J]. 功能材料, 2015, 46(18): 18088—18091.
LIU Ping-an, WANG Peng, YE Sheng, et al. Study on Preparation and Microwave Absorbing Properties of Carbon Nanotubes/PANI Composites[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(18): 18088—18091.
- [47] 赵廷凯, 郭争光, 张红燕, 等. 多壁碳纳米管/双马来酰亚胺树脂复合材料的制备及其电磁性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(12): 3183—3187.
ZHAO Ting-kai, GUO Zheng-guang, ZHANG Hong-yan, et al. Synthesis and Electromagnetic Properties of MWCNT/BMI Composites[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(12): 3183—3187.
- [48] 陈明东, 揭晓华, 於黄忠, 等. 碳纳米管/钴铁氧体复合材料的吸波性能及其优化[J]. 人工晶体学报, 2015, 44(2): 487—492.
CHEN Ming-dong, JIE Xiao-hua, YU Huang-zhong, et al. Absorbing Properties of Carbon Nanotubes / Cobalt Ferrites Composite Materials and Its Optimization[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2015, 44(2): 487—492.
- [49] 陈明东, 揭晓华, 熊旋, 等. 碳纳米管/镍铁氧体涂层的吸波性能及吸波机理[J]. 化工新型材料, 2016, 44(2): 117—119.
CHEN Ming-dong, JIE Xiao-hua, XIONG Xuan, et al. Microwave Absorbing Property and Mechanism of Carbon Nanotubes/Nickel Ferrite Composite Coating[J]. New Chemical Materials, 2016, 44(2): 117—119.
- [50] KUMARS R, NARAYANAN T N, REENA M A P, et al. Ni Filled Flexible Multi-walled Carbon Nanotube- Polystyrene Composite Films as Efficient Microwave Absorbers[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(11): 113—116.
- [51] SU Q, ZHONG G, LI J, et al. Fabrication of Fe/Fe₃C- functionalized Carbon Nanotubes and Their Electromagnetic and Microwave Absorbing Properties[J]. Applied Physics A, 2012, 106(1): 59—65.
- [52] 张力, 吴俊涛, 江雷. 石墨烯及其聚合物纳米复合材料[J]. 化学进展, 2014, 26(4): 560—571.
ZHANG Li, WU Jun-tao, JIANG Lei. Graphene and Its Polymer Nanocomposites[J]. Progress in Chemistry, 2014, 26(4): 560—571.
- [53] 蒲吉斌, 王立平, 薛群基. 石墨烯摩擦学及石墨烯基复合润滑材料的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(1): 93—112.
PU Ji-bin, WANG Li-ping, XUE Qun-ji. Progress of Tribology of Graphene and Graphene-based Composite Lubricating Materials[J]. Tribology, 2014, 34(1): 93—112.
- [54] 王洁莹. 石墨烯复合吸波剂的制备及电磁防护性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
WANG Jie-xuan. Research on Synthesis of Graphene Composites and Their Electromagnetic Shielding Performance[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [55] 张国英, 梁文阁. 氧化石墨烯对 SiO₂ 多孔陶瓷吸波性能的影响[J]. 化工学报, 2013, 64(7): 2696—2700.
ZHANG Guo-ying, LIANG Wen-ge. Effects of Graphene Oxide on Electromagnetic Wave Absorption Properties of Porous Silica Ceramic[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2013, 64(7): 2696—2700.
- [56] 罗俊. 金属氧化物/石墨烯复合吸波材料的制备与研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
LUO Jun. Preparation and Study of Metal Oxides/Graphene Composites [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [57] 张娜, 黄英, 宗蒙, 等. 石墨烯基复合吸波材料的研究进展[J]. 材料开发与应用, 2014, 29(5): 89—96.
ZHANG Na, HUANG Ying, ZONG Meng, et al. Research Progress of Graphene Based on Microwave Absorbing Composite Materials[J]. Development and Application of Materials, 2014, 29(5): 89—96.
- [58] ZHENG X, FENG J, ZONG Y, et al. Hydrophobic Graphene Nanosheets Decorated by Monodispersed Superparamagnetic Fe₃O₄ Nanocrystals as Synergistic Electromagnetic Wave Absorbers[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2015, 3(17): 4452—4463.
- [59] ZHANG S, JIAO Q, HU J, et al. Vapor Diffusion Synthesis of Rugby-shaped CoFe₂O₄/Graphene Composites as Absorbing Materials[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 630(1): 195—201.
- [60] LI X. One-pot Synthesis of CoFe₂O₄/Graphene Oxide Hybrids and Their Conversion into FeCo/Graphene Hybrids for Lightweight and Highly Efficient Microwave Absorber[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(10): 5535—5546.
- [61] ZHU Z, SUN X, LI G, et al. Microwave-assisted Synthesis of Graphene-Ni Composites with Enhanced Microwave Absorption Properties in Ku-band[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2015, 377(1): 95—103.
- [62] DURMUS Z, DURMUS A, KAVAS H. Synthesis and Characterization of Structural and Magnetic Properties of Graphene/Hard Ferrite Nanocomposites as Microwave-absorbing Material[J]. Journal of Materials Science, 2015, 50(3): 1201—1213.
- [63] ZHANG H, TIAN X, WANG C, et al. Facile Synthesis of RGO/NiO Composites and Their Excellent Electromagnetic Wave Absorption Properties[J]. Applied Surface Science, 2014, 314(30): 228—232.