

聚苯胺吸波材料的研究趋势及应用前景

史长明, 张教强, 季铁正, 易娜

(西北工业大学理学院应用化学系, 陕西西安 710129)

摘要: 随着隐身与反隐身技术的发展, 电磁波吸收材料是当前功能材料领域的研究热点之一。本文简要叙述了聚苯胺在雷达波智能隐身、红外智能隐身、可见光智能隐身方面的应用情况, 指出聚苯胺吸波材料在智能隐身领域的良好发展前景, 及其作为智能隐身材料实用化应注意的问题。综述了近几年来国内外有关功能质子酸掺杂聚苯胺、聚苯胺/无机、聚苯胺/聚合物复合吸波材料的研究现状, 并展望了其应用前景。

关键词: 聚苯胺; 吸波; 复合材料; 研究趋势; 应用前景

中图分类号: O 631.1⁺1 文献标识码: A

Research Trend and Application Prospect of Wave Absorbing Polyaniline

SHI Chang-ming, ZHANG Jiao-qiang, JI Tie-zheng, YI Na

(Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry of Ministry of Education, Department of Applied Chemistry, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: With the development of stealth and antistealth technology, electromagnetic wave absorbing material is a current hot research topic in the field of functional material. This paper briefly describes the applications of the polyaniline in radar wave smart stealth, infrared smart stealth and visible light intelligent stealth, and points out the good prospects of the polyaniline in intelligent stealth areas and the problems in use. The recent researches on the functional protonic acid doping polyaniline, polyaniline/inorganic, polyaniline/polymer composite materials are also involved.

Keywords: polyaniline; wave absorbing; composite; research trend; application

隐身技术是一种通过控制和降低武器系统的特征信号, 使其难以被发现、识别、跟踪和攻击的技术, 也称为目标特征信号控制技术, 是现代三大尖端技术之一。随着雷达探测技术的迅速发展, 未来战场上的各种武器系统和战略目标面临着严重威胁, 隐身技术作为提高武器系统生存能力和实践能力的有效手段, 受到世界各国的高度重视^[1]。在海湾战争和科索沃战争中, F-117A 隐身战斗攻击机的出色表现和令人吃惊的战果, 使得隐身技术更进一步受到世界军事强国的重视, 成为引人注目的高技术武器系统。F-117A 机体表面几乎全部涂覆了黑色的雷达吸波材料^[2-5]。吸波材料技术的发展和运用是隐身技

术发展的关键因素之一, 美国国防部关键技术计划将吸波材料的研制列为重点发展计划, 要求未来的吸波材料应具有厚度薄、质量轻、频带宽、多功能的特点。由于隐身技术能极大地提高武器的生存能力和作战效果, 成为集陆、海、空、天四位一体的立体化现代战争中最重要、最有效的突防战术技术手段, 成为现代军事研究的关键技术^[6-11]。目前, 世界发达国家正在积极开展新的隐身机理和新型吸波材料的探索和研究, 以适应未来战场对吸波材料的更高要求^[12]。

吸波材料是指能够吸收衰减入射的电磁波, 并通过吸收剂的介电振荡、涡流以及磁致伸缩效应, 将电磁能转化成热能而耗散掉或使电磁波因

收稿日期: 2012-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 20574056)

作者简介: 史长明, 1989年生, 女, 汉族, 研究生。E-mail: changming_0708@163.com。张教强, 男, 副教授, 硕士生导师。E-mail: zhangjq@nwpu.edu.cn。

干涉而消失的一类功能材料。早在二次世界大战期间,美、英、德等国出于军事目的,对吸波材料进行了大量的探索工作。美国于 60 年代开始把吸波材料应用于空军的 F214、F215 和 F218 等几种战斗机上,即“隐形”飞机上。到目前为至,吸波材料的应用已远远超出军事的隐形和反隐形、对抗和反对抗的范围,更广泛地应用在人体安全防护^[13]、微波暗室消音、通讯及导航系统的抗电磁干扰、安全信息保密、电磁兼容以及波导或同轴吸收元件等许多民用方面^[14]。

目前广泛应用的吸波材料主要有铁氧体、石墨、陶瓷型和碳黑等。美国已研制出一种称作“超黑粉”的纳米吸波材料,该材料对雷达波的吸收率高达 99%,目前正在研究覆盖厘米波、毫米波、红外、可见光等波段的纳米复合材料。法国研制成功一种宽频吸波调制周期纳米薄膜涂层,该纳米涂层磁导率的实部和虚部在 0.1 ~ 10 GHz 宽频带内均大于 6。与黏合剂复合制备的吸波涂层在 50 MHz ~ 50 GHz 频率范围内具有良好的吸波性能^[15]。除了以上几种外,文献中报道的吸波材料还有视黄基席夫碱、金属超细微粉、等离子体、手性、纳米、导电高分子、电介质陶瓷、多晶铁磁性金属纤维等吸波材料^[16-21]。

导电聚合物及其复合材料的电导率变化范围很宽,表现出动态微波吸收特性,就军事和宇航领域而言具有多方面的应用^[22],由于聚苯胺(Polyaniline,简称 PANI)电导率高、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,近年来在电磁波吸收、电磁干扰屏蔽(EMI)、软导体涂层或防护罩中的潜在应用引起广泛关注^[23-25]。PANI 作为电磁吸波材料所面临的问题是如何使 PANI 及其复合材料发挥最大的吸波能力。一方面,提高 PANI 及其复合材料的微波电损耗;另一方面,结合磁损耗来达到较好的微波吸收。国内外已相继开展了导电高聚物雷达吸波材料的研究,并已经取得了一定的进展。国外已有报道利用 PANI 的微波吸收特性,将其用作远距离加热材料,用于航天飞机中的塑料焊接技术^[26];另外,美国已研制出一种由 PANI 复合而成的雷达吸波材料,具有光学透明性,可以喷涂在飞机座舱盖,准确制导武器和巡航导弹的光学透明窗口上,以减弱目标的雷达回波^[27]。本文综述了国内外有关掺杂 PANI、PA-

NI/无机、PANI/聚合物复合吸波材料的研究现状,并对其应用前景进行展望。

1 功能质子酸掺杂 PANI 吸波材料

现已公认的 PANI 的结构式是 1987 年由 MacDiarmid 提出的,如图 1 所示,即结构式中含有“苯-苯”连续的还原形式和含有“苯-醌”交替的氧化形式,其中 y 值表征 PANI 的氧化还原程度,当 $y = 1$ 是完全还原的全苯式结构; $y = 0$ 是“苯-醌”交替结构,均为绝缘体。而 $y = 0.5$ 为苯醌比为 3:1 的半氧化和还原结构,为本征态^[28]。

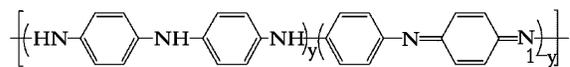


图 1 PANI 结构式

Fig. 1 Constitutional formula of PANI

PANI 的分子主链具有电子高度离域的共轭结构,通过化学或电化学掺杂后会使其光谱和磁性能的变化,呈现自旋铁磁相互作用和铁磁性^[29-31]。

PANI 是一类电损耗型吸波材料,其吸波性能与其介电常数、电导率等密切相关。具有共轭大 π 键体系,其电磁参量依赖于高聚物的主链结构、室温电导率、掺杂剂性质、掺杂度和合成方法等因素^[32]。

万梅香^[33-34]研究了导电高聚物的电磁参数与微波吸收特性及其与室温电导率的关系,当导电高聚物的电导率 σ 在 $10^{-1} \sim 10^0$ S/cm 之内无论是电损耗还是磁损耗均为最大值,在此范围内呈现较好的微波吸收,最大衰减随电导率的增加而增加,且电损耗远大于磁损耗,电磁能主要衰减在材料的电阻和介电电极化弛豫损耗上。孔德明等^[35]采用 3 cm 波导式测量线在 8 ~ 14 GHz 频率范围内,用多点拟合的实验和计算方法对掺杂 PANI 的微波吸收特性及参量进行了研究,发现浓 H_2SO_4 掺杂本征态 PANI 所合成材料的电损耗很小、磁损耗较大(相对于盐酸 PANI 而言),且不利于对微波的吸收; $FeCl_3$ 掺杂浓 H_2SO_4 -PANI 材料可合成磁损耗较高、基本上有利于吸收微波的材料;更另人注意的是,利用 HCl-PANI 具有较大的电损耗,浓 H_2SO_4 -PANI- $FeCl_3$ 材料具有较大的磁损耗这特点,将它们按一定的比例混合,可

以合成出平均衰减为 13.37 dB、最大衰减为 26.70 dB、密度为 0.7 g/cm^3 、频宽为 10.34 ~ 14 GHz 的很有利于吸收微波的材料。王国强等^[36]发现 FeCl_3 掺杂浓 H_2SO_4 -PANI 材料可合成磁损耗较高、有利于吸收微波的材料,而 HCl -PANI 具有较大的电损耗,但吸波性能较差。而将两种材料按一定比例混合,可以实现对吸波性能的调控。陈晓等^[37]分别采用溶液聚合、乳液聚合、正相和反相微乳液聚合法合成了不同掺杂、不同电导率(电导率范围 $10^{-5} \sim 10 \text{ S/cm}$)的 PANI,测试了 PANI 的电磁学参数和吸波性能。结果证明:制得的 PANI 在 2 ~ 12 GHz 范围内有较好的吸波性能,在 2 ~ 12 GHz 范围内,雷达波反射率绝对值大于 10 dB 的频宽范围大于 7.5 GHz,最大吸收率达到 30 dB。段好伟等^[38]探讨了盐酸掺杂导电 PANI 的最佳实验条件,导电 PANI 以体积分数为 5% 的量加入体积分数为 10% Ni 的导电涂料中,涂料的屏蔽效能显著提高。与单独的体积分数为 10% Ni 的导电涂料相比,在 30 ~ 1,500 MHz 的范围内,前者屏蔽效能可在 25 ~ 45 dB,后者屏蔽效能均在 59 dB 以上,且在较高频段(约 800 MHz 以后)更加趋于平稳。刘学东等^[39]将苯胺分别加入到 HCl 、 H_2SO_4 、十二烷基苯磺酸钠(LAS)/ HCl 共混物的溶液中,合成 3 种掺杂形式的 PANI,依次为 PANI- HCl 、PANI- H_2SO_4 和 PANI-(LAS- HCl)。对 3 种样品的电磁性能和吸波性能进行测试。结果表明:3 种掺杂 PANI 对微波的吸收性能受介电常数影响较大,而磁化度和在外磁场的作用下引起的磁损耗很小;在 8.20 ~ 12.50 GHz 频段范围内,PANI-(LAS- HCl) 的吸收值大于 13.44 dB,最大吸收值为 30.34 dB。

2 PANI/无机复合吸波材料

PANI 具有高的相对介电常数,无机磁性材料具有较高的相对磁导率。PANI 作为微波吸收剂主要是电损耗材料,要获得理想的吸波效果,具有适当的电磁参数适当匹配,因此将导电高聚物与无机磁损耗材料以一定形式复合,可以牺牲部分电损耗,提高磁导率,使电磁参数趋近最佳匹配。PANI 与磁性物质的复合有两种方式: PANI 原位包覆磁性材料和磁性材料再掺杂 PANI。

2.1 PANI 原位包覆磁性材料

PANI 原位聚合包覆磁性物质的原理是将无机磁性物质分散于苯胺聚合反应介质中,苯胺低聚物首先吸附在无机磁性物质表面,引发苯胺原位聚合并吸附于磁性物质表面,形成 PANI 包覆无机磁性物质的初级粒子,随后 PANI 分子链以此为中心生长^[40],形成外层导电高聚物包覆内层磁性物质的导电导磁复合材料,图 2 为结构示意图。此外 PANI 链中每两个苯胺结构单元上带有一个正离子,即包含有孤对电子,使 PANI 与被包覆的磁性物质之间存在电荷传输^[41]。

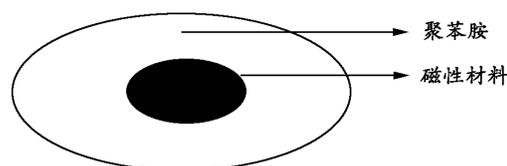


图 2 聚苯胺包覆磁性物质复合材料结构示意图

Fig. 2 Structure of the composite of magnetic materials encapsulated by polyaniline

Kazantseva 等^[42]在含有 Mn-Zn 铁氧体悬浮颗粒的水性介质中合成 PANI,结果表明粒径为 $60 \mu\text{m}$ 的铁氧体比粒径为 $30 \mu\text{m}$ 的铁氧体所得的 PANI 复合材料具有更高的磁导率和吸波性能,并且表层的 PANI 改变了 Mn-Zn 铁氧体磁导率的频散性,界面相互作用使共振频率从 MHz 移至接近 GHz。Kurlyandskaya 等^[43]通过铁磁共振(FMR)研究了 3 种含有 Fe_3O_4 纳米粒子的粉末,发现: Fe_3O_4 纳米粒子逐渐长大,然后被 PANI 包覆; PANI 在 Fe_3O_4 纳米粒子表面发生的是原位聚合;在每种情况下,只观察到一个 FMR 共振线,说明其没有低场微波吸收。而半功率宽度(half-power widths)有 1 kOe,大约归因于内部的分布。第一种粒子只有很低的 Fe_3O_4 密度(低于 40%),其共振域(resonance fields)接近那些具有微小磁晶各向异性的球体,其它情况下的共振域要比其低很多。颜海燕^[44]等用原位聚合法合成了 PANI/ Fe_3O_4 复合材料,产物以 Fe_3O_4 为核、PANI 为壳的球状微粒。以矩形波导法测定了 PANI/ Fe_3O_4 在 9.3GHz 微波环境中的性能,结果表明,改变 Fe_3O_4 含量可以调节复合材料的电磁参数,当 Fe_3O_4 质量分数为 10% 时,复合材料介电损耗 $\text{tg}\delta_e = 1.87$ 、磁损耗 $\text{tg}\delta_\mu = 0.035$,达到最

大微波损耗 7.641 dB,具有良好的吸波性能。喻冬秀^[45]采用磁性物质结合 PANI 层包覆短碳纤维(SCF)制备出导电导磁的短碳纤维,以改善 SCF 的电磁性能。利用 PNA-LN5230A 微波网络测试仪测定了其在频率 2 GHz 以下的复介电常数和复磁导率,结果表明:处理磁流体时,在 SD-BS 和油酸为 1.0 g, HCl 用量为 0.2 mol/L, Fe_3O_4 含量为 3.2 g 时,聚合温度为 10 °C,反应时间为 12 h,可制得包覆层均匀、致密的 PANI/磁性物质包覆改性的短碳纤维,改性后,其介电性能有所下降,磁损耗有所增大。

2.2 磁性材料再掺杂 PANI

利用溶液或干粉共混法使磁性物质再掺杂 PANI,一方面 PANI 上孤对电子与具有空轨道的磁性金属离子如 Fe^{3+} 配位,形成高分子络合物;另一方面磁性物质以物理共混方式掺在其中,这两方面都有利于掺杂 PANI 的导电性和磁性物质的磁性能的结合。

Xiao Qi 等^[46]在甲苯/水乳液中合成了 PANI/纳米 Fe_3O_4 粒子新型固体乳液,其具有球形形态,呈亚微米纤维状,粒子的形态不仅取决于甲苯和水的体积比,而且取决于反应系统的 Fe_3O_4 粒子的量,此外,发现在磁场下该纳米粒子表现出明显的滞回性能(hysteretic behavior)。贾瑛等^[47]以磺基水杨酸(SSA)为乳化剂和掺杂剂,过硫酸铵(APS)为氧化剂,采用乳液聚合的方法合成了 PANI 包覆磁性 Fe_3O_4 的纳米核-壳复合材料。研究了 Fe_3O_4 /PANI 纳米材料在 2 ~ 18 GHz 范围的微波电磁特性与吸波性能,结果表明:复合材料密度为 0.12 g/cm³ 时,其平均衰减为 -5 dB,最大衰减为 -12 dB,衰减为 -5 dB 时的频宽可达 6 GHz。曾宪伟等^[48]用水解沉淀法制备纳米 Fe_3O_4 ,然后在其溶液中原位合成 PANI,得到纳米 Fe_3O_4 /PANI 复合粒子。实验制备的纳米 Fe_3O_4 粒子粒径为 30 nm 左右,在其表面沉积 PANI 后,复合粒子的粒径达到了 50 nm 左右。与纳米 Fe_3O_4 粒子相比,纳米 Fe_3O_4 /PANI 复合粒子的 XRD 峰形变得更为尖锐。纳米复合粒子的磁性能表现出软磁性,与纳米 Fe_3O_4 粒子相比,矫顽力减小为 0,这可以大大减小材料的磁滞损耗和退磁难度,性能得到改善。

3 PANI/聚合物复合吸波材料

根据逾渗理论(Percolation Theory)^[49],当导电填料在绝缘基体中均匀分布且体积分数超过 16% 后,该复合物或共混物必定导电。但 PANI 性质独特,即使 PANI 在复合物或共混物中体积分数远低于 16%,体系也会逾渗(percolation),由此有望制备兼具 PANI 电、磁学性质和基体材料性能的共混或复合材料^[50]。其制备方法可分为原位聚合法和机械共混法两类,既可以由苯胺单体在母相聚合物或母相聚合物单体存在下引发聚合制得,也可以由 PANI 与母相聚合物机械共混制备。目前常用的有机基体主要有聚苯乙烯、环氧树脂、聚氨酯、乙丙橡胶、聚酰胺等。

张新宇^[51]等采用镀镍碳毡与 PANI 填充环氧树脂复合得到复合材料,并讨论了镍电镀层、碳毡、PANI 对吸波性能的作用。发现采用镀镍碳毡与环氧树脂热压复合制备了具有电磁波吸收功能的复合材料,该类复合材料工艺简单,成本低,有良好的使用前景。Faez R 等^[52,53]研究了 NBR/EPDM/PANI 共混复合物在 8 ~ 12 GHz 的吸波性能,表明导电聚合物含量和涂层厚度对吸波性能有很大影响。随着 PANI 含量增大吸波效果增强,含量为 30% 时在 11 ~ 12 GHz 的反射率达 -20 dB;且随着厚度的增大,吸收峰向低频移动。Cristiane R. M. 等^[54]将 PANI/DBSA 与磺化苯乙烯(PSS)聚合(PANI/DBSA/PSS),再用苯乙烯-丁二烯共聚物与之共混制备了复合膜,电导率和微波衰减都随 PANI/DBSA/PSS 比例增加而增大,另外其微波损耗还与膜厚度有关,当厚度为 2 mm 时,复合膜最大反射衰减在 11 ~ 12 GHz 之间(-2 dB),而当厚度为 4 mm 时,在 8.7 GHz 产生最大微波衰减(-20 dB),当厚度为 6 mm 时,平均微波衰减在 -4 dB。潘玮^[55]等采用现场吸附聚合法制取 PANI/涤纶导电纤维,研究了反应条件对纤维导电性能的影响。将导电纤维嵌织入普通涤纶织物中,讨论了该织物的抗静电及电磁屏蔽性能。采用此法制得的导电纤维具有较高的 PANI 含量和优良的电导率,其与普通纤维的嵌交织物具有较好的抗静电性和电磁屏蔽性能,在 10 GHz 的时候能达到 13.1 dB。熊

国宣^[56]等以苯胺、羰基铁粉(CIP)和甲基丙烯酸甲酯(MMA)等为原料,采用化学氧化法和原位复合技术制备了掺杂态 PANI、CIP/PMMA 和 CIP/PMMA/PANI 吸波剂,通过矢量网络分析仪测定吸波剂的电磁参数表明: CIP/PMMA/PANI 复合吸波剂既有电损耗又有磁损耗,在 2~18 GHz 频段内,材料厚度为 1.0 mm 时,计算出其最小反射率达 -11.26 dB,反射率小于 -10 dB 的带宽为 9.2 GHz、小于 -8 dB 的带宽达 14 GHz。

4 结语

高分子材料密度小、质量轻、机械性好、组成与结构容易控制,在吸波剂研究领域显示出很强的设计适应性,引起广泛关注,寻找兼具优异吸波性能、密度小的新型吸波材料,是这一研究领域的重大课题之一。

综合本文论述 PANI 为磁损耗材料,具有作为微波吸收和电磁屏蔽材料的优点。大多数的功能质子酸掺杂的 PANI 具有较小的电损耗,而其磁损耗较大,不利于电磁波的吸收; PANI/无机复合吸波材料及 PANI/聚合物复合吸波材料电磁波吸收性能较好,但其质量相对来说比较大,难以达到“质轻”的要求。

有关 PANI 作为微波吸收和电磁屏蔽材料方面的文献鲜有报道。研究的热点主要是抗静电剂、二次电池材料等。因此如何提高 PANI 及其复合材料的吸波性能,使其达到“薄、轻、宽、强”的要求是未来研究的重点领域。

参考文献:

- [1] 周长灵,魏美玲,于百达,等. 隐身技术及材料概述 [J]. 现代技术陶瓷, 2003, 4: 23—27.
Zhou C L, Wei M L, Yu B D, *et al.* Introduction of stealthy technology [J]. *Advanced Ceramics*, 2003, 4: 23—27.
- [2] 赵稼祥. 海湾战争与隐身材料 [J]. 兵器材料科学与工程, 1992, 15(10): 1—5.
Zhao J X. The Gulf war and stealth material [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 1992, 15(10): 1—5.
- [3] 张卫东,冯小云,孟秀兰. 国外隐身材料研究进展 [J]. 宇航材料工艺, 2000, 3: 1—4.
Zhang W D, Feng X Y, Meng X L. Status and development of foreign study on new stealthy material [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2000, 3: 1—4.
- [4] 李绪东. 国外隐身飞机及隐身材料 [J]. 飞机设计参考资料, 2001(1): 46—48.
Li X D. Foreign stealth aircraft and stealth material [J]. *Journal of Aircraft*, 2001(1): 46—48.
- [5] 彭艳萍. 飞机隐身技术及隐身材料 [J]. 航空学报, 1999, 20(3): 287—288.
Peng Y P. Stealthy fighter and stealthy material [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1999, 20(3): 287—288.
- [6] 方亮, 茆荣州, 官建国. 雷达吸波材料的现状与展望 [J]. 武汉工业大学学报, 1999, 21(6): 21—24.
Fang L, Long R Z, Guang J G. Present status and prospect of radar absorbing materials [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 1999, 21(6): 21—24.
- [7] 刘献明,付绍云,张以河,等. 雷达隐身复合材料的研究进展 [J]. 材料导报, 2004, 18(5): 8—11.
Liu X M, Fu S Y, Zhang Y H, *et al.* Research progress on radar stealth composites [J]. *Materials Review*, 2004, 18(5): 8—11.
- [8] 哈恩华,黄大庆,王智勇,等. 雷达与红外兼容隐身材料的研究及进展 [J]. 材料导报, 2006, 20(z1): 325—327.
Ha E H, Huang D Q, Wang Z Y, *et al.* Development in radar absorbing materials with infrared camouflage [J]. *Materials Review*, 2006, 20(z1): 325—327.
- [9] 许谦. 浅谈隐身技术 [J]. 空载雷达, 2003(4): 30.
Xu Q. Stealth technology [J]. *Airborne Radar*, 2003(4): 30.
- [10] 冯永宝,丘泰,张明雪. 涂覆型雷达吸波材料研究进展 [J]. 材料导报, 2003, 17(12): 56—58.
Feng Y B, Qiu T, Zhang M X. Study progress in radar absorbing coating materials [J]. *Materials Review*, 2003, 17(12): 56—58.
- [11] 黄涛,黄英,贺金瑞. 吸波材料研究进展 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2003(1): 37—40.
Huang T, Huang Y, He J R. Research progress in microwave absorbing materials [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2003(1): 37—40.
- [12] Magali S P, Maria L G, Regina C R N, *et al.* Aging effect on the reflectivity measurements of polychloroprene matrices containing carbon black and carbonyl-iron powder [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2001, 73: 1—5.
- [13] 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): 584—589.
Yang G D, Kang Y, Meng Q J. Progress in development of microwave absorbing materials [J]. Applied Chemical Industry, 2010, 39(4): 584—589.
- [14] Kim K M, Adachi K, Chujo Y. Polymer hybrids of functionalized silsesquioxanes and organic polymers utilizing the sol-gel reaction of tetramethoxysilane [J]. Polymer, 2002, 43: 1171—1175.
- [15] 张健, 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(suppl. 4): 504—508.
Zhang J, Zhang W Y, Xi Z P. Development of stealth radarwave absorbing materials [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(suppl. 4): 504—508.
- [16] Colirrics. Electromagnetic properties of blends polyderivatives [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2000, 11(6): 273—277.
- [17] 邱琴, 张宴清, 张雄. 电磁吸波材料研究进展 [J]. 电子元件与材料, 2009, 8(28): 78—81.
Qiu Q, Zhang Y Q, Zhang X. Research progress of microwave absorption materials [J]. Electronic Components and Materials, 2009, 8(28): 78—81.
- [18] 王伟力. 隐身技术发展动态 [J]. 飞航导弹, 2001(1): 26—29.
Wang W L. Development trends of stealth technology [J]. Winged Missiles Journal, 2001(1): 26—29.
- [19] Qiu J X, Lan LY, Zhang H, *et al.* Microwave absorption properties of nanocomposite films of BaFe₁₂O₁₉ and TiO₂ prepared by sol-gel method [J]. Materials Science and Engineering: B, 2006, 133(1/2/3): 191—194.
- [20] 李尚生, 姜永华. 隐身技术的发展及其对导引头技术的挑战 [J]. 飞航导弹, 2000(4): 16—19.
Li S S, Jiang Y H. The Development of stealth technology and the seeker technology challenge [J]. Winged Missiles Journal, 2000(4): 16—19.
- [21] 高虹霓, 曹泽阳. 21 世纪隐身新途径——等离子体隐身技术 [J]. 飞航导弹, 2002(1): 54—55.
Gao H N, Cao Z Y. The 21st century new way of stealth-plasma stealth technology [J]. Winged Missiles Journal, 2002(1): 54—55.
- [22] Chandrasekhar P, Naishadham K. Broadband microwave absorption and shielding properties of polyaniline [J]. Synthetic Metals, 1999, 105: 115—120.
- [23] Skotheim T A, Elsenbaumer R L, Reynolds J R. Handbook of conducting polymers [M]. Second Edition, Marcel Dekker, New York, 1997: 21.
- [24] Nalwa H S. Handbook of organic conductive molecules and polymers (four volumes) [M]. New York: John Wiley, 1997: 43.
- [25] Chandrasekhar P. Conducting polymers: fundamentals and applications a practical approach [M]. Kluwer Academic Publishers, 1999: 17.
- [26] Wu C Y, Benatar A. Microwave welding of high density polyethylene using intrinsically conductive polyaniline [J]. Polymer Engineering and Science, 1997, 37(4): 738—743.
- [27] 赵云峰. 国外结构隐身材料研究与应用的新进展 [J]. 材料工程, 1989(5): 41—43.
Zhao Y F. New progress of foreign structure stealth materials research and application [J]. Journal of Materials Engineering, 1989(5): 41—43.
- [28] 陈勇, 朱琼, 万国江, 等. 导电聚苯胺高分子复合材料的进展 [J]. 弹性体, 2006, 16(05): 68—74.
Chen Y, Zhu Q, Wan G J, *et al.* The research progress on conductive polymer of polyaniline composites [J]. China Elastomeric, 2006, 16(05): 68—74.
- [29] 万梅香, 周维侠. 聚苯胺膜的磁学性能 [J]. 物理学报, 1992, 41: 347—349.
Wan M X, Zhou W X. Studies on magnetic properties of film of polyaniline [J]. Chinese Journal of Physics, 1992, 41: 347—349.
- [30] Yoshizawa K, Tanaka K, Yamabe T *et al.* Ferromagnetic interaction in poly (m-aniline): electron spin resonance and magnetic susceptibility [J]. The Journal of Chemical Physics, 1992(9): 5516—5518.
- [31] Yoshizawa K, Ito A, Tanaka K *et al.* Magnetic property of soluble poly (m-aniline) [J]. Solid State Communication, 1993, 87: 935—937.
- [32] 邓雪萍, 周瑜芬, 熊国宣. 导电聚合物与磁性粒子复合材料的研究进展 [J]. 化工新型材料, 2007, 6(35): 5—7.
Deng X P, Zhou Y F, Xiong G X. Development in absorbing wave composite of conductive polymers and magnetic particles [J]. New Chemical Materials, 2007, 6(35): 5—7.
- [33] Wan M X. Studies on absorption mechanism of microwave absorbent of conducting polymer [J]. Acta Physica Sinica, 1992, 41(6): 917—923.
- [34] Wan M X, Li J C. Synthesis and electrical-magnetic properties of polyaniline composite [J]. Journal of

- Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 1998, 36 (15): 2799—2805.
- [35] 孔德明, 胡慧芳, 冯建辉, 等. 掺杂聚苯胺吸波材料的研究 [J]. 高分子材料科学与工程, 2000, 16(3): 169—171.
- Kong D M, Hu H F, Feng J H, *et al.* Studies on microwave absorption properties of doped polyaniline [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2000, 16(3): 169—171.
- [36] 王国强, 章平, 王绍明. 掺杂聚苯胺的电磁损耗与吸波性能的研究 [J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2003, 19(3): 31—33.
- Wang G Q, Zhaang P, Wang S M. Study on electromagnetic loss and absorbing properties of doped polyaniline [J]. Natural Science Journal of Harbin Normal University, 2003, 19(3): 31—33.
- [37] 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—7.
- Chen X, Xiong Z, Tao X Y, *et al.* Studies of Synthesis, electromagnetic property and microwave absorptivity of polyaniline (PANI) by diferent method [J]. China Plastics Industry, 2005, 33(5): 5—7.
- [38] 段好伟, 栾华丽, 晋传贵, 等. 导电聚苯胺的合成及对电磁屏蔽涂料屏蔽效能的影响 [J]. 安徽工业大学学报, 2009, 26(1): 39—40.
- Duan H W, Luan H L, Jin C G, *et al.* Synthesis of conducting polyaniline effectiveness of EMI and its effect on the shielding shielding coating [J]. Journal of Anhui University of Technology, 2009, 26(1): 39—40.
- [39] 刘学东, 卢佃清, 云月厚. 掺杂聚苯胺的合成及电磁性能和吸波性能研究 [J]. 塑料科技, 2010, 38(4): 52—55.
- Liu X D, Lu D Q, Yun Y H. Study on preparation, electromagnetic property and microwave absorption property of doped polyaniline [J]. Plastics Science and Technology, 2010, 38(4): 52—55.
- [40] Sapurina I, Osadchev A Y, Volchek B *Zet al.* In-situ polymerized polyaniline films: 5. brush-like chain ordering [J]. Synthetic Metals, 2002, 129(1): 29—37.
- [41] Kazantseva N E, Vilčákóváb J, Křesálek V *et al.* Magnetic behaviour of composites containing polyaniline-coated manganese-zinc ferrite [J]. Journal of Magnetism and Materials, 2004, 269: 30—37.
- [42] Kazantseva N E, B. espyatykh Y, Sapurina I, *et al.* Magnetic materials based on manganese-zinc ferrite with surface-organized polyaniline coating [J]. Journal of Magnetism and Materials, 2006, 301(1): 155—165.
- [43] Kurlyandskaya G V, Ctmanan J, Bhag S M, *et al.* Field-induced microwave absorption in Fe₃O₄ nanoparticles and Fe₃O₄/polyaniline composites synthesized by different methods [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2007, 68(8): 1527—1532.
- [44] 颜海燕, 寇开昌. 聚苯胺/Fe₃O₄复合吸波材料的制备及表征 [J]. 热固性树脂, 2008, 4(23): 16—18.
- Yan H Y, Kou K C. Preparation and microwave absorbing property of polyaniline/Fe₃O₄ composite [J]. Thermosetting Resin, 2008, 4(23): 16—18.
- [45] 喻冬秀. 导电导磁聚苯胺包覆短碳纤维的研究 [J]. 化工新材料, 2010, 8(38): 88—91.
- Yu D X. Research on magnetic conductive polyaniline coating short carbon fiber [J]. New Chemical Materials, 2010, 8(38): 88—91.
- [46] Xiao Q, Tan X K, Ji L L, *et al.* Preparation and characterization of of polyaniline/nano-Fe₃O₄ composites via a novel pickering emulsion route [J]. Synthetic Metals, 2007, 157(18/20): 784—791.
- [47] 贾瑛, 李志鹏, 张凌, 等. Fe₃O₄/聚苯胺纳米复合材料的吸波性能研究 [J]. 化学推进剂与高分子材料, 2009, 5(7): 33—37.
- Jia Y, Li Z P, Zhang L, *et al.* Study on absorption wave property of Fe₃O₄/polyaniline nano-composite material [J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2009, 5(7): 33—37.
- [48] 曾宪伟, 赵东林. 纳米 Fe₃O₄/聚苯胺复合粒子的制备及其磁性性能研究 [J]. 功能材料, 2004, 35(增刊): 605—608.
- Zeng X W, Zhao D L. The preparation of Fe₃O₄/polyaniline nanocomposites and its magnetic properties [J]. Journal of Functional Materials, 2004, 35(supplement): 605—608.
- [49] Broadbent S R, Hammersley J M. Percolation processes I: crystals and mazes [J]. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1957, 3(53): 629—642.
- [50] Moon G H, Seung S H. Electrical and structural of conductive polyaniline/polyimide blends [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1999, 71: 2169.
- [51] 张新宇, 曾祥云, 方洞浦, 等. 聚苯胺复合材料的电磁吸波性能研究 [J]. 化学工业与工程, 1998, 3(15): 50—53.

- Zhang X Y , Zeng X Y , Fang D F *et al.* The Electromagnetic wave absorption-ability of the composite filled with polyaniline [J]. Chemical Industry and Engineering , 1998 , 3(15) : 50—53.
- [52] Faez R , Martin I M , Paoli M A De *et al.* Influence of processing time and composition in the microwave absorption of EPDM/PAni blends [J]. Journal of Applied Polymer Science 2002 , 83 (7) : 1568—1575.
- [53] Faez R , Reis A D , Soto-Oviedo M A *et al.* Microwave absorbing coatings based on a blend of nit rile rubber , EPDM rubber and polyaniline [J]. Polymer Bulletin , 2005 , 55 (4) : 299—307.
- [54] Martins C R , Faez R , Rezende M C , *et al.* Microwave absorption properties of a conductive thermoplastic blend based on polyaniline [J] . Polymer Bulletin , 2004 , 51: 321—326.
- [55] 潘玮, 黄素萍, 龚静华. 聚苯胺/涤纶导电纤维的制备及其织物抗静电性能研究 [J]. 合成纤维, 2002 , 31(1) : 30—32.
- Pan W , Huang S P , Long J H. Synthesis of conducting PET/Pan fibers and the anti-static properties of their fabrics [J]. Synthetic Fiber in China , 2002 , 31(1) : 30—32.
- [56] 熊国宣, 邓雪萍, 曾东海, 等. 羰基铁粉/聚甲基丙烯酸甲酯/聚苯胺复合吸波材料的制备与性能 [J]. 复合材料学报, 2008 25(4) : 35—39.
- Xiong G X , Deng X P , Zeng D H , *et al.* Property and preparation of carbonyl iron powder/ polymethacrylate/polyaniline composite absorbents [J]. Acta Materiael Compositael Sinica , 2008 , 25(4) : 35—39.

(编辑: 段玉琴)