

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.10.002

弱磁场对 EP/MWCNTs-Fe₃O₄ 复合材料结构与性能的影响^{*}

周还潮¹, 马传国^{1,2}, 张晶晶¹

(1. 桂林电子科技大学材料科学与工程学院, 广西桂林 541004; 2. 广西信息材料重点实验室, 广西桂林 541004)

摘要: 采用均匀沉淀法制备了多壁碳纳米管-四氧化三铁(MWCNTs-Fe₃O₄)复合粒子,并将复合粒子与环氧树脂(EP)复合,在弱磁场(0.2~0.3 T)下固化制备了EP/MWCNTs-Fe₃O₄复合材料。采用X射线衍射仪、扫描电子显微镜和震动样品磁强计对复合粒子的结构和磁性能进行了表征,重点考察了弱磁场对该复合材料结构、电性能与压缩性能的影响。结果表明,复合粒子表现出顺磁性,其中Fe₃O₄和MWCNTs彼此相对独立,能够较均匀地分散在EP中;在外磁场作用下,复合粒子在EP中的分布表现为磁流体的特征,沿磁场方向定向排列形成链状结构;随复合粒子含量增加,复合材料的介电常数、导电性和压缩强度总体上呈上升趋势,压缩弹性模量先升高后降低;磁场诱导对复合材料性能的影响与粒子含量密切相关,当复合粒子质量分数不高于2%时,磁场诱导下的复合材料介电常数和导电性高于未施加磁场的复合材料,当复合粒子质量分数不高于5%时,前者的压缩强度高于后者,在考察的含量范围内,前者的压缩弹性模量始终高于后者。

关键词: 环氧树脂;多壁碳纳米管;四氧化三铁;磁场诱导

中图分类号: TQ323.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)10-0007-06

Effects of Low Magnetic Field on Structure and Properties of Epoxy/MWCNTs-Fe₃O₄ Composites

Zhou Huanchao¹, Ma Chuanguo^{1,2}, Zhang Jingjing¹

(1. School of Material Science and Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Information Materials, Guilin 541004, China)

Abstract: Multi-walled carbon nanotubes-ferroferri oxide (MWCNTs-Fe₃O₄) compound particles were prepared by homogeneous precipitation method, then epoxy resin (EP) / MWCNTs-Fe₃O₄ composites were prepared by curing under low magnetic field (0.2~0.3 T). The structure and magnetic properties of MWCNTs-Fe₃O₄ were characterized by XRD, SEM and vibrating sample magnetometer. The influences of the low magnetic field on structure, electrical and compression properties of the composites were focused on. The results show that the compound particles presents paramagnetism, Fe₃O₄ and MWCNTs in the compound particles are relatively independent and easily dispersed evenly in EP. Under external magnetic field, distribution of MWCNTs-Fe₃O₄ in EP shows a typical characteristics of magnetic fluid with a chain-like structure aligned along the magnetic field direction. With increasing the compound particles content, the dielectric constant, conductivity and compression strength of the composite are generally improved, but compression modulus of the composite is first increased and then decreased. The influences of the magnetic field induction on the properties of composites are closely related with the compound particles content. When the compound particles content is not higher than 2%, the dielectric constant and conductivity of the composites with magnetic field induction are higher than those of the composites without magnetic field induction. When the compound particles content is not higher than 5%, the compression strength of the former is higher than that of the latter. In the investigated range of the compound particles content, the compressive modulus of the former is always higher than that of the latter.

Keywords: epoxy resin; multi-walled carbon nanotube; ferroferri oxide; magnetic field induction

多壁碳纳米管(MWCNTs)具有非常优异的力学性能和导电、导热性能,是复合材料极为理想的增强增韧填料,如利用MWCNTs改性环氧树脂(EP),能够使EP获得更加优异的综合性能^[1]。MWCNTs具有长径比较大、容易团聚、在基体中难分散等特性,一般需对MWCNTs进行改性^[2]。利

用MWCNTs负载磁性粒子^[3]或是与磁性粒子复合

^{*} 国家自然科学基金项目(51363003),广西高校研究生联合培养基地项目

联系人: 马传国,教授,博士,主要从事环氧树脂基纳米复合材料的研究

收稿日期: 2015-07-21

^[4] 是一类特殊的改性方法,在复合材料领域,其优点之一在于能够利用弱磁场诱导负载或是复合磁性粒子发生定向排列,能够更高效地改善材料性能,从而引起了较多关注^[5-6]。

目前,对弱磁场诱导负载磁性粒子的 MWCNTs 在 高分子复合材料中的应用研究已有报道,如陈伟等^[3] 利用化学共沉淀方法制备了表面负载磁性 Fe_3O_4 粒子的 MWCNTs。研究表明 Fe_3O_4 粒子粘附在 MWCNTs 表面上,在弱磁场 (0.6 T) 作用下,受磁场力作用的 Fe_3O_4 粒子使 MWCNTs 发生定向排列,进而对 EP 复合材料平行于定向排列方向的阻尼性能产生了积极影响。与此不同的是,笔者基于 Fe_3O_4 粒子优异的磁性能及其与 EP 具有良好界面相互作用的特点,利用均匀沉淀法制备了以 Fe_3O_4 粒子为主的 MWCNTs- Fe_3O_4 复合粒子,其为 Fe_3O_4 粒子与 MWCNTs 彼此独立的均匀混合物。预期在弱磁场作用下只能产生 Fe_3O_4 粒子的定向排列, MWCNTs 在 Fe_3O_4 粒子帮助下获得良好分散,并对 Fe_3O_4 粒子有序结构产生一定的增强作用,从而能够协同改善复合材料的性能。此外,这类以 Fe_3O_4 为主的复合粒子还可以对更弱的磁场 (< 0.3 T) 产生响应,从而降低对磁场装置的要求。在此基础上,重点研究了磁场诱导前后复合粒子在 EP 中的形貌结构变化及 EP/MWCNTs- Fe_3O_4 复合材料电性能和压缩性能的变化情况,为弱磁场下此类复合粒子在 高分子复合材料中的定向行为及其对复合材料性能的影响研究提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

MWCNTs : 纯度 $>95\%$, 直径 60 nm, 中国科学院成都有机化学有限公司;

EP : CYD-128, 岳阳巴陵石化有限公司;

还原铁粉、四水合氯化亚铁 (分析纯)、尿素 (分析纯)、30% 过氧化氢: 西陇化工股份有限公司;

改性脂肪胺 593 固化剂: 天津市富宇精细化工有限公司。

1.2 主要设备及仪器

磁力搅拌器: 85-1 型, 上海梅颖浦仪器仪表制造有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱: 101 型, 上海路达实验仪器有限公司;

大功率搅拌器: JB-200 型, 上海锦屏仪器仪表有限公司;

超声波清洗仪: 1006 型, 广州市华南超声设备有限公司;

X 射线衍射 (XRD) 仪: D8-2-Advance 型, 德国 Bruker 公司;

震动样品磁强计 (VSM): HH-20 型, 南京南大仪器厂;

扫描电子显微镜 (SEM): JSM2840 型, 日本 JEOL 公司;

精密阻抗分析仪: 4294A 型, 美国安捷伦公司;

数字高阻计: PC 68 型, 上海精益电器厂有限公司;

万能试验机: MMW-1 型, 济南试金集团有限公司。

1.3 试样制备

(1) MWCNTs- Fe_3O_4 复合粒子的制备。

首先采用文献 [7] 中所述的工艺得到 Fenton 试剂处理的羟基化 MWCNTs 混合液, 然后加入过量还原铁粉使溶液中的 Fe^{3+} 全部转变为 Fe^{2+} , 再加入与 Fe^{2+} 等当量的尿素并在 95°C 反应 4 h, 最后经过过滤、洗涤、干燥等步骤得到 MWCNTs- Fe_3O_4 复合粒子。

(2) EP/MWCNTs- Fe_3O_4 复合材料的制备。

取 40 g EP 于 100 mL 烧杯中, 在 120°C 鼓风干燥箱中预热 15 min, 分别加入质量分数为 0%, 1%, 2%, 5%, 10% 和 15% 的 MWCNTs- Fe_3O_4 复合粒子, 采用高速均质机搅拌 5 min, 100°C 真空除泡 15 min, 待冷却至 40°C 左右, 加入 10 g 固化剂, 慢慢搅拌均匀后, 倒入圆柱形模具中并分为两组, 其中一组置于磁场强度为 0.2~0.3 T 的弱磁场中固化 (如图 1 所示), 另一组在无磁场条件下固化。两组固化工艺均相同: 首先在室温下固化 2 h, 然后于 80°C 鼓风干燥箱中继续固化 4 h。

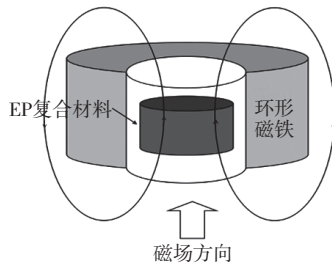


图 1 磁场下复合材料固化方式示意图

1.4 性能测试与结构表征

采用 XRD 仪对复合粒子结构进行分析;

采用 VSM 测试复合粒子的磁性能;

利用 SEM 对复合粒子和复合材料断面的微观形貌进行分析并拍照;

在室温下采用精密阻抗分析仪测量复合材料在 1 kHz 频率时的介电性能;

体积电阻率按 GB/T 1410-2006 测试;

压缩性能按 GB/T 1041-2008 测试。

2 结果与讨论

2.1 MWCNTs-Fe₃O₄ 复合粒子结构表征

图 2 为 MWCNTs-Fe₃O₄ 复合粒子的 XRD 谱图。图 2 中在 30.2°, 35.5°, 43.2°, 53.6°, 57.0° 和 62.7° 位置的衍射峰分别对应为立方晶系尖晶石结构 Fe₃O₄ 的 (220), (311), (400), (422), (511) 和 (440) 晶面, 在 26.1° 对应为 MWCNTs 的 (002) 晶面^[8], 其衍射峰强度较低, 应该归结为 MWCNTs 被 Fe₃O₄ 粒子所包围遮掩。以上结果表明复合粒子由立方晶系尖晶石结构的 Fe₃O₄ 粒子和 MWCNTs 组成, 即成功制备了以 Fe₃O₄ 为主的 MWCNTs-Fe₃O₄ 复合粒子。

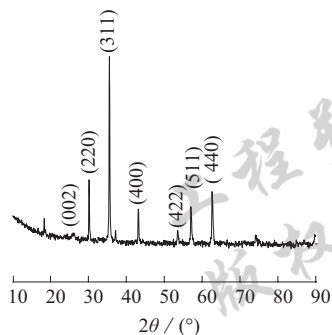


图 2 MWCNTs-Fe₃O₄ 复合粒子的 XRD 谱图

图 3 为复合粒子的磁滞回线。从图 3 可以得出, MWCNTs-Fe₃O₄ 的饱和磁化强度为 25.3 emu/g, 剩余磁化强度为 9.8 emu/g, 矫顽力为 45.9 Oe, 显示出顺磁性^[9], 对弱磁场 (< 0.1 T) 有较好的响应能力。

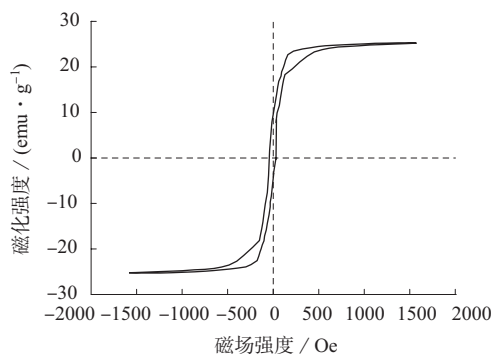
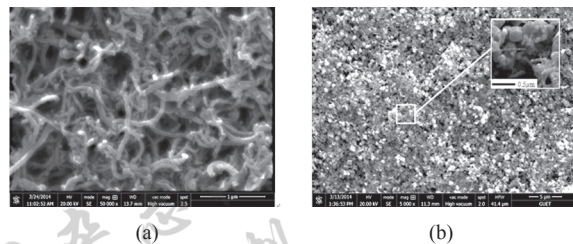


图 3 MWCNTs-Fe₃O₄ 复合粒子的磁滞回线

图 4 为纯 MWCNTs 和 MWCNTs-Fe₃O₄ 复合粒子的 SEM 照片。从图 4 可以看出, MWCNTs 表

面光滑, 呈现不规则的弯曲, 彼此缠绕、严重团聚。MWCNTs-Fe₃O₄ 复合粒子结构松散, 以 Fe₃O₄ 粒子为主, 根据 MWCNTs 的投料质量及最终产物的质量估算, Fe₃O₄ 在复合粒子中占 88% 左右。Fe₃O₄ 粒子分散均匀, 且从图 4b 中的局部放大图看, 其呈立方状, 边长约为 0.2 μm, MWCNTs 均匀地贯穿其中。该结构的复合粒子分散于高分子基体中时, Fe₃O₄ 粒子可以起到隔离 CNTs 而阻止其发生团聚的作用^[10]。该复合粒子与文献 [3] 报道的不同, 后者为 MWCNTs 表面包覆磁性 Fe₃O₄ 粒子构成的粒子。



a—纯 MWCNTs ; b—MWCNTs-Fe₃O₄ 复合粒子

图 4 纯 MWCNTs 和 MWCNTs-Fe₃O₄ 复合粒子的 SEM 照片

2.2 EP/MWCNTs-Fe₃O₄ 复合材料的 SEM 表征

图 5 为纯 EP 断面的 SEM 照片。从图 5 可以看出, 纯 EP 断裂面平整光滑, 裂纹平直, 是典型的脆性断裂。

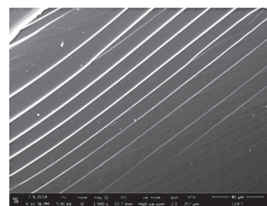
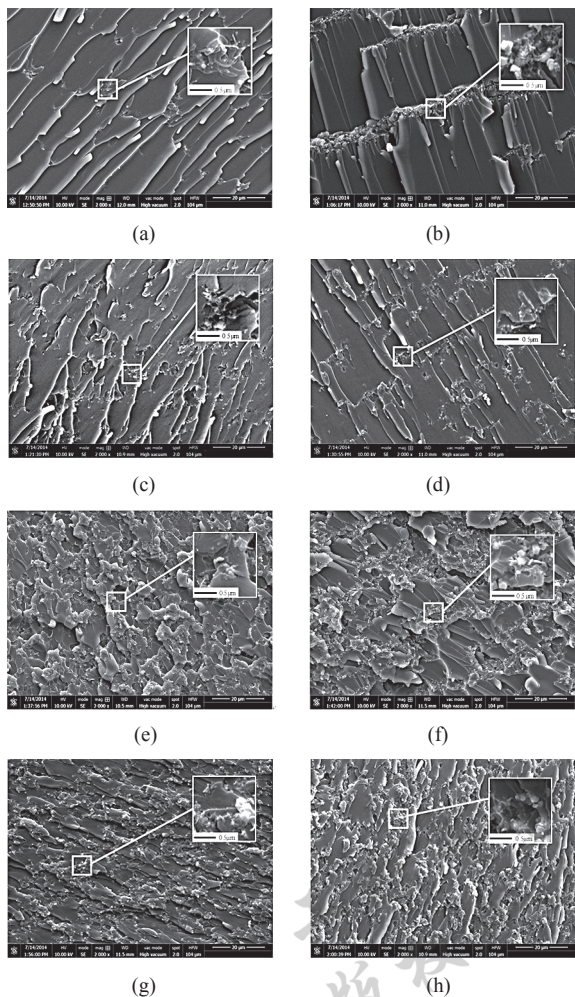


图 5 纯 EP 断面的 SEM 照片

图 6 为有无磁场两种情况下不同 MWCNTs-Fe₃O₄ 复合粒子含量的复合材料脆断面的 SEM 照片。

从图 6 可以看出, 随复合粒子的含量提高, 所有复合材料断面粗糙度都显著提高, 说明复合粒子可以有效阻止断裂裂纹的快速生长和改变裂纹的扩展方向, 诱出现新的断裂面, 从而能够吸收更多的断裂能量, 对提高复合材料断裂韧性有利^[11]。无磁场条件下, 复合粒子在低含量时 (1% 和 5%), 能够在复合材料中良好分散, Fe₃O₄ 粒子与 MWCNTs 彼此相对独立又紧密联系。在较高含量 (10% 和 15%) 时, 复合粒子出现明显的区域聚集, 但聚集区域分布较均匀, 没有出现严重团聚现象。在复合粒子质量分数为 5% 的复合材料 (图 6c) 中, MWCNTs 的质量分



无磁场条件: a—1%; c—5%; e—10%; g—15%
有磁场条件: b—1%; d—5%; f—10%; h—15%

图6 不同MWCNTs-Fe₃O₄含量的复合材料断面的SEM照片

数约为0.6%,与本课题组前期研究工作中单独使用的相近含量(0.5%)的MWCNTs相比^[12],其分散性有较大改善且分散工艺不涉及复杂的超声处理,这是由于复合粒子中Fe₃O₄粒径相对较大、表面极性特点与EP相近,能够在EP中分散良好,从而起到隔离CNTs团聚和促进CNTs分散的作用。在磁场条件下,复合粒子中的Fe₃O₄粒子和CNTs发生二次团聚,归结为顺磁性粒子Fe₃O₄在磁场作用下发生定向排列^[3]。在低含量时,复合粒子的排列呈链状,在高含量时,链状尺寸变宽而呈现带状,不过仅表现为Fe₃O₄粒子的定向排列,由于磁场强度很弱,远没能够使CNTs在该结构发生定向排列。随着复合粒子含量增多,沿磁场方向形成链状结构增多,链状结构逐渐变长,链状结构之间也会相互聚集,并且链宽也变大,以上复合粒子在磁场中的演变规律与文献[13]中报道的磁场下磁性流体结构的模拟

结果较为一致,表明该复合粒子在EP中表现为一种类磁性流体的特性。

2.3 EP/MWCNTs-Fe₃O₄复合材料的电性能

图7为磁场诱导前后不同MWCNTs-Fe₃O₄含量的复合材料在1 kHz频率下的相对介电常数 ϵ_r 。从图7可以看出,在无磁场条件时,随着MWCNTs-Fe₃O₄复合粒子含量的增加,复合材料的 ϵ_r 先缓慢增加,当复合粒子质量分数超过10%以后增速大幅提高,这一现象符合典型导电复合材料的逾渗规律。这主要归因于复合粒子中导电的MWCNTs在EP中形成了大量微电容器^[2],此外MWCNTs, Fe₃O₄与EP之间的界面极化作用对提高 ϵ_r 也有一定贡献。在磁场条件下,复合材料的 ϵ_r 也呈上升的趋势,但在考察的含量范围内,没有出现 ϵ_r 迅速增加的现象,表明磁场诱导使逾渗阈值大幅增加。当复合粒子含量较低($\leq 2\%$)时,磁场诱导的复合材料的 ϵ_r 高于未施加磁场的复合材料,但当复合粒子含量较高($\geq 5\%$)时,其 ϵ_r 明显低于后者。以上现象表明,磁场诱导使复合粒子形成链状或带状的聚集定向排列结构对微电容的形成产生了较大影响,在复合粒子含量较低时,链状结构有利于微电容形成并联结构,使 ϵ_r 升高,但是在粒子含量较大时,链状结构变长有利于微电容形成串联结构,使 ϵ_r 上升的幅度较缓,且低于未经磁场诱导的复合材料的 ϵ_r 。

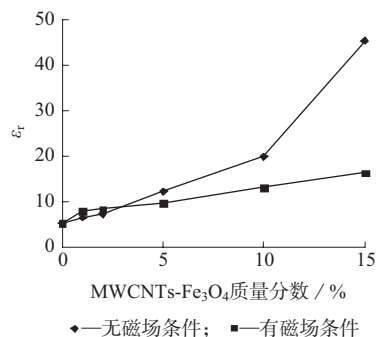


图7 磁场诱导前后不同MWCNTs-Fe₃O₄含量的复合材料的 ϵ_r

图8为磁场诱导前后不同MWCNTs-Fe₃O₄含量的复合材料的体积电阻率。从图8可以看出,随着复合粒子含量增加,未经磁场诱导的复合材料的体积电阻率显著下降,即导电性显著地提高;而对于经过磁场诱导的复合材料,在复合粒子含量较低($\leq 2\%$)时,体积电阻率也显著下降,且比未经磁场诱导的复合材料低1个数量级,但当复合粒子含量较高($\geq 5\%$)时,其体积电阻率呈现很小的波动,基本处于稳定状态。这是因为,当复合粒子含量较低时,磁场诱导可使大部分粒子集中于所形成的链状

结构中,从而促进了粒子之间的接触,生成了定向且有序的导电网络,因此其导电性较未经磁场诱导的复合材料有所提高;但当复合粒子含量较高时,这种定向且有序的导电网络在垂直于链状结构或带状结构方向上存在不连续性,无法进一步形成更完善的导电网络,因此相对于未经磁场诱导的复合材料,其导电性不再显著提高,但仍高于纯 EP。

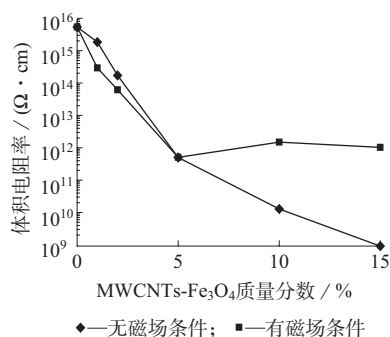


图8 磁场诱导前后不同 MWCNTs-Fe₃O₄ 含量的复合材料的体积电阻率

2.4 EP/MWCNTs-Fe₃O₄ 复合材料的力学性能

图9为磁场诱导前后不同 MWCNTs-Fe₃O₄ 含量的复合材料的压缩性能。

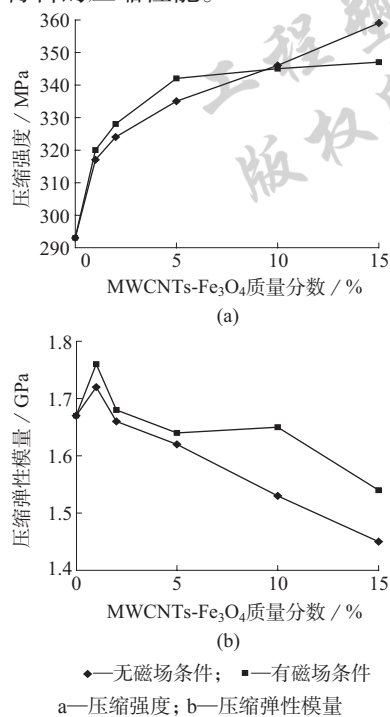


图9 不同 MWCNTs-Fe₃O₄ 含量的复合材料的压缩性能

从图9a可以看出,无论是否经过磁场诱导,随着 MWCNTs-Fe₃O₄ 复合粒子含量的增加,复合材料的压缩强度都呈增大趋势。当复合粒子质量分数为 15% 时,磁场诱导前后复合材料的压缩强度较纯 EP 分别提高了 22.5% 和 18.4%,这可以归因于 Fe₃O₄

和 MWCNTs 对基体的增强效应,两者分别属于典型的无机刚性粒子增强机理^[14] 和高性能一维纳米材料增强机理^[15]。在复合粒子含量较低 ($\leq 5\%$) 时,磁场诱导的复合材料的压缩强度高于未施加磁场的复合材料,但当复合粒子含量较高 ($> 5\%$) 时,其压缩强度增加幅度变缓,从而低于后者,这表明磁场诱导下复合粒子形成链状或带状的定向排列结构,在低含量时比高含量时更容易发挥增强的效果。这可能是由于在低含量下,复合粒子在磁场诱导下形成链状或带状结构更加有利于应力的传递,从而提高了增强效果;但高含量下复合粒子更加集中于链状或带状的结构,造成粒子团聚现象相对严重,从而削弱了增强效果。从图9b可以看出,无论是否经过磁场诱导,复合材料的压缩弹性模量均随着复合粒子的含量增加先升高后降低,在考察的含量范围内,磁场诱导的复合材料压缩弹性模量始终高于未施加磁场的复合材料。

3 结论

(1) 制备的 MWCNTs-Fe₃O₄ 复合粒子在 EP 中分散良好,其中 MWCNTs 可以仅经过简单的高速搅拌即能够更好地分散在 EP 中。在外磁场作用下,复合粒子在 EP 中呈现二次团聚,沿磁场方向定向排列形成链状或带状结构,表现了一种磁流体的特征行为。

(2) 无论是否经过磁场诱导,随 MWCNTs-Fe₃O₄ 复合粒子含量增加,复合材料的介电常数、导电性和压缩强度总体上均呈升高趋势,而压缩弹性模量呈现先升高后降低的趋势。

(3) 当复合粒子质量分数不高于 2% 时,磁场诱导下的复合材料介电常数和导电性高于未施加磁场的复合材料,当复合粒子质量分数不高于 5% 时,前者的压缩强度高于后者,在考察的含量范围内,前者的压缩弹性模量始终高于后者。

参考文献

- [1] 张昊,蔡佩芝,赵东林,等.碳纳米管增强环氧树脂基复合材料的制备及其力学性能[J].北京化工大学学报:自然科学版,2011,38(1):62-67.
Zhang Hao, Cai Peizhi, Zhao Donglin, et al. Fabrication and mechanical properties of carbon nanotubes reinforced epoxy resin matrix composites[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science Edition, 2011, 38(1):62-67.
- [2] 马传国,于英俊.碳纳米管的偶联剂修饰及其在环氧树脂复合材料中的应用[J].复合材料学报,2010,27(3):22-28.
Ma Chuanguo, Yu Yingjun. Coupling agent modification of carbon

- nanotubes and their applications for epoxy resin composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(3):22-28.
- [3] 陈伟,郑亚萍. Fe_3O_4 -MWCNTs 在环氧树脂中的定向排列[J]. 复合材料学报, 2013, 30(6):54-59.
Chen Wei, Zheng Yaping. Alignment of Fe_3O_4 -MWCNTs in epoxy resin[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(6):54-59.
- [4] Gao Yunyan, Li Haixia, Ou Zhize. Enhancing the catalytic activity of peroxidase by adsorption onto Fe_3O_4 magnetic nanoparticle / multiwalled carbon nanotube composite surfaces[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2011, 27(10):2 469-2 477.
- [5] Chiolerio A, Musso S, Sangermano M. Preparation of polymer-based composite with magnetic anisotropy by oriented carbon nanotube dispersion[J]. Diamond and Related Materials, 2008, 17(7):1 590-1 595.
- [6] 周俊,金花,廖永贵,等. 磁场作用下的高分子 / 碳纳米管复合材料[J]. 高分子通报, 2013(9):140-147.
Zhou Jun, Jin Hua, Liao Yonggui, et al. Polymer / carbon nanotube composites prepared under magnetic field [J]. Chinese Polymer Bulletin, 2013(9):140-147.
- [7] 李勇波,马传国,李欣欣,等. 连续法制备羟基化碳纳米管 / 氧化铁复合粒子研究[J]. 无机盐工业, 2013, 45(8):8-11.
Li Yongbo, Ma Chuanguo, Li Xinxin, et al. Preparation of hydroxylated carbon nanotubes / ferric oxide compound particles by continuous process[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2013, 45(8):8-11.
- [8] 侯翠岭,李铁虎,赵廷凯,等. 碳纳米管 / 四氧化三铁复合材料的磁性能和电催化性能[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(9):2 594-2 599.
Hou Cuiling, Li Tiehu, Zhao Tingkai, et al. Magnetic and electrocatalytic properties of multi-walled carbon nanotube / Fe_3O_4 composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(9):2 594-2 599.
- [9] 蒋峰景,浦鸿汀,杨正龙,等. Fe_3O_4 包覆碳纳米管软磁性纳米复合微粒的制备及性能[J]. 新型炭材料, 2007, 24(4):371-374.
Jiang Fengjing, Pu Hongting, Yang Zhenglong, et al. Preparation and properties of soft magnetic composites based on Fe_3O_4 coated carbon nanotubes[J]. New Carbon Materials, 2007, 24(4):371-374.
- [10] 郭泉辉,刘雪,石家华. Fe_3O_4 / CNTs 催化苯羟基化制苯酚反应性能[J]. 化学反应工程与工艺, 2015, 31(1):15-20.
Guo Quanhui, Liu Xue, Shi Jiahua. Performance of benzene hydroxylation with hydrogen peroxide to phenol over Fe_3O_4 / CNTs[J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2015, 31(1):15-20.
- [11] Tang Longcheng, Wang Xu, Wan Yanjun, et al. Mechanical properties and fracture behaviors of epoxy composites with multi-scale rubber particles[J]. Materials Chemistry and Physics, 2013, 141(1):333-342.
- [12] 于英俊. 有机分子链修饰碳纳米管及其在环氧树脂中应用研究[D]. 桂林:桂林电子科技大学, 2010.
Yu Yingjun. Organic molecular chain modified carbon nanotubes in epoxy resin and its application research[D]. Guilin University of Electronic Technology, 2010.
- [13] 宣益民,叶萌,李强. 磁流体结构的 Lattice-Boltzmann 方法模拟[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(2):301-303.
Xuan Yimin, Ye Meng, Li Qiang. Lattice-Boltzmann simulation of ferrofluid structure[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(2):301-303.
- [14] 于建,郭朝霞. 高性能高分子 / 无机粉体复合材料制备技术[J]. 塑料, 2014, 43(4):87-90.
Yu Jian, Guo Zhaoxia. Preparation techniques for high performance polymer / inorganic composite[J]. Plastics, 2014, 43(4):87-90.
- [15] 赵婷婷. 一维纳米材料的制备 / 表征及应用[J]. 广州化工, 2014, 42(20):24-26.
Zhao Tingting. The synthesis, characterization and application of one-dimensional nanomaterials[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2014, 42(20):24-26.

优惠销售中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》及论文集光盘

中国合成树脂供销协会加工与应用分会为了配合 2000 ~ 2015 年先后召开的中国工程塑料复合材料技术研讨会, 共编辑、出版了 16 本《论文集》。其内容涉及工程塑料及通用塑料的合成与改性、加工、应用、测试、模具、设备新技术, 以及文献综述、评论等, 突出了我国工程塑料行业发展规划、热点分析。现尚有部分《论文集》, 以及应广大读者要求加工制作的论文集光盘, 现以优惠价格 (含邮费) 销售, 欢迎订阅。

1. 2004 ~ 2015 年中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》, 优惠价 350 元 / 套。

2. 2000 ~ 2015 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集光盘, 优惠价 300 元 / 盘。本光盘除收录 2000 ~ 2015 年 16 本《论文集》的全部内容外, 还包括约 3 100 人次的会议代表通讯录。

邮局汇款

收款地址: 山东济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位: 《工程塑料应用》杂志社

邮 编: 250031

电 话: (0531)85878223 85878057 85878278

传 真: (0531)85947355

银行汇款

户 名: 山东非金属材料研究所

开户银行: 济南市工商银行经十一路支行

帐 号: 1602001229014425546

网上订购: <http://www.epa1973.com>