

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.06.002

氧化石墨烯包覆羟基氧化铁协同增强环氧树脂的断裂韧性

陈官¹, 马传国^{1,2}, 王静¹, 付泽浩¹, 戴培邦^{1,2}

(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: 采用静电自组装法制备了氧化石墨烯包覆针状羟基氧化铁的复合纳米粒子 (GO@FeOOH), 借助磁场使其在环氧树脂 (EP) 中发生取向, 进而显著增强 EP 的断裂韧性。分别用 X 射线衍射、扫描电子显微镜、透射电镜及振动磁强计等对纳米粒子进行了表征, 通过三点弯曲试验评估了 EP/GO@FeOOH 复合材料的临界应力强度因子 (K_{IC}), 采用 SEM 分析了 GO@FeOOH 的增韧机理。实验结果表明: 通过静电自组装, GO 成功包覆在 FeOOH 表面, 而非 FeOOH 负载在 GO 上。GO@FeOOH 直径和长度分别为 100 nm、1 μ m 左右, 饱和磁化强度 7.18 emu/g, 在 0.09 T 的磁场下能够被取向。在磁场诱导下, EP/GO@FeOOH (0.5% 含量) 的 K_{IC} 提高最显著, 达到了 3.2 MPa·m^{1/2}, 分别比 EP 和无磁场诱导的 EP/GO@FeOOH 提高了 140% 和 70.6%, 同时 GO 和 FeOOH 表现出明显的协同效应。该复合材料的增韧机理主要包括粒子的拔出、脱粘以及裂纹偏转和基体的局部塑性形变等形式。

关键词: 环氧树脂; 断裂韧性; 氧化石墨烯; 羟基氧化铁; 纳米粒子

中图分类号: TQ323.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)06-0008-06

Synergistic Strengthening of Fracture Toughness of Epoxy Resin With Graphene Oxide Coated With Hydroxyl Iron Oxide

Chen Guan¹, Ma Chuanguo^{1,2}, Wang Jing¹, Fu Zehao¹, Dai Peibang^{1,2}

(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: Graphene oxide coated needle-like hydroxyl iron oxide composite nanoparticles (GO@FeOOH) were prepared by electrostatic self-assembly method, which were oriented in epoxy resin (EP) with the help of magnetic field, thus achieving remarkable toughening of EP. The nanoparticles were characterized by x-ray diffraction (XRD), scanning electron micrograph (SEM), transmission electron micrograph (TEM) and vibration magnetometer. The critical stress intensity factor (K_{IC}) of GO@FeOOH/EP composite was evaluated by three-point bending test, and the toughening mechanism of GO@FeOOH was identified by SEM. The results show that GO is successfully coated on FeOOH surface by electrostatic self-assembly to obtain GO@FeOOH rather than FeOOH loaded on GO. The diameter and length of GO@FeOOH are about 100 nm and 1 μ m, respectively, and the saturation magnetization is 7.18 emu/g. The orientation of the nanoparticle can take place under the magnetic field of 0.09 T. Under the magnetic field, the K_{IC} of EP/0.5% GO@FeOOH is increased the most significantly up to 3.2 MPa·m^{1/2}, which is 140% and 70.6% higher than that of EP and GO@FeOOH/EP without magnetic field induction, respectively. Meanwhile, GO and FeOOH show significant synergistic effect on the toughening of EP. The toughening mechanism of the composite mainly includes the pull-out and debonding of the nanoparticle, crack deflection and local plastic deformation of the matrix.

Keywords: epoxy resin; fracture toughness; graphene oxide; hydroxyl iron oxide; nanoparticle

增强环氧树脂 (EP) 的断裂韧性研究一直备受关注, 尤其是 EP 被用作高性能纤维增强复合材料的基体树脂时, 解决因其脆性而导致的层间失效问

题尤为重要^[1-3]。经过大量研究, 在基体中引入弹性体、热塑性树脂以及刚性纳米粒子已成为几种代表性的增韧方法。刚性纳米粒子在实现增韧的同时

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51763006), 广西自然科学基金项目 (2016JJA160040)

通讯作者: 马传国, 教授, 博士, 主要从事聚合物基复合材料的研究 E-mail: 2017210176@mail.buct.edu.cn

收稿日期: 2020-04-07

引用格式: 陈官, 马传国, 王静, 等. 氧化石墨烯包覆羟基氧化铁协同增强环氧树脂的断裂韧性研究 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(6):8-13.

Chen Guan, Ma Chuanguo, Wang Jing, et al. Synergistic strengthening of the fracture toughness of epoxy resin with graphene oxide coated with hydroxyl iron oxide[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(6):8-13.

可以降低甚至提高复合材料的综合力学性能,一般在较低用量时即可达到显著的增韧效果,因而对基体黏度的影响较小,这些特性对增韧纤维增强复合材料十分有利。黏土、 SiO_2 、 TiO_2 、炭黑、碳纳米管(CNTs)等都是常见的增韧纳米粒子^[4]。近几年,氧化石墨烯(GO)、石墨烯、石墨烯纳米片等新型碳纳米材料逐渐成为热门的增韧纳米粒子^[4-5]。

纳米粒子的种类、尺寸、表面性质、分散状态都是影响增韧效果的关键因素,而粒子的形状和分布状态对增韧效果也起着至关重要的作用,如具有一定长径比的CNTs一般比其他形状的碳纳米材料具有更高的增韧效率^[6],经磁场、电场等外场作用定向排列的纳米粒子的增韧效果更佳^[7-8]。目前,探讨两种纳米粒子协同增韧已成为该领域的研究热点。例如,CNTs与蒙脱土之间存在相互穿插的结构可有效发挥协同作用,从而显著提高了复合材料的断裂韧性^[9]。GO和CNTs可构建三维网络增强结构,增韧效果明显高于单独使用的GO或CNTs^[10]。

笔者采用两种纳米粒子协同增韧和磁场取向增强两种策略达成对EP的有效增韧,首先制备具有一维结构的针状羟基氧化铁($\gamma\text{-FeOOH}$)纳米粒子,其自身不仅具有良好的力学性能并能实现对EP的增韧^[2,11],而且对弱磁场具有良好的响应。然后利用静电自组装技术^[12]将GO包覆在 $\gamma\text{-FeOOH}$ 表面,制得一种核壳结构的复合粒子(GO@FeOOH),进而研究了该粒子在磁场作用下对EP的增韧行为,同时通过场发射扫描电子显微镜(FESEM)分析探讨相关的增韧机理,期望能通过 GO@FeOOH 实现对EP的显著增韧,为EP的增韧提供一种新思路。

1 实验部分

1.1 主要原材料

四水合氯化亚铁、氢氧化钠、无水乙醇、硝酸钠、浓硫酸、高锰酸钾、双氧水:分析纯,西陇化工股份有限公司;

鳞片石墨:粒度 $4.5\ \mu\text{m}$ (3500目),南京先丰纳米材料科技有限公司;

聚二乙烯二甲基丙基氯化铵(PDDA):上海摩贝生物科技有限公司;

双酚A型环氧树脂(RIMR-135)和改性胺固化剂(RIMR-134):昆山久力美电子材料有限公司;

钕铁硼磁铁($100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$):市售。

1.2 主要设备及仪器

X射线衍射(XRD)仪:D8-2-Advance型,德国BRUKER公司;

振动样品磁强计(VSM):7400-S型,美国Lakeshore公司;

FESEM:Quanta FEG 450型,美国FEI公司;

场发射透射电镜(TEM):F200X型,美国Thermo Fisher Talos公司;

万能试验机:SPL-10 KN型,日本岛津公司。

1.3 GO@FeOOH 纳米粒子的制备

采用液相沉积-空气氧化法合成得到 $\gamma\text{-FeOOH}$ 纳米粒子^[11,13],采用改进的hummer法^[14]获得GO,利用静电自组装技术制备 GO@FeOOH 纳米粒子^[12],制备流程及原理如图1所示,典型步骤:取2 g $\gamma\text{-FeOOH}$ 投入100 mL去离子水中,超声分散15 min,然后将分散液转移到三口瓶中,边超声边搅拌,同时向三口瓶中滴加100 mL的PDDA水溶液($2\ \text{mg/mL}$),30 min后停止超声并继续搅拌3 h,随后用去离子水清洗三次,去掉多余的PDDA后,得到PDDA处理过的 FeOOH 纳米粒子浆液。将该浆液再次分散于100 mL去离子水中,边超声边搅拌,滴加200 mL的GO水分散液($2\ \text{mg/mL}$),30 min后停止超声,继续搅拌12 h,离心清洗3次,得到纯净的 GO@FeOOH 纳米粒子浆液。

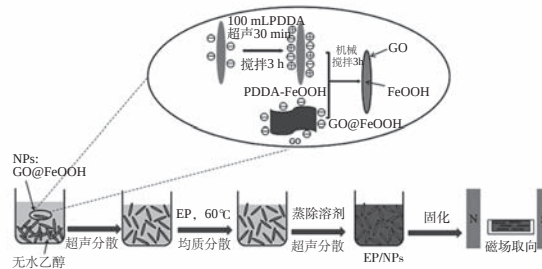


图1 实验制备流程图

1.4 复合材料的制备

采用液相转移法制备得到EP/ GO@FeOOH 纳米粒子(5%浓度)母液^[8],取一定量的母液,按比例用纯EP进行稀释得到不同浓度的EP/ GO@FeOOH 分散液,按EP与固化剂=100:30比例,计量加入固化剂并混合均匀,抽真空除气泡后注入硅胶模具中,放置于磁场或无磁场中,在室温下预固化1 h,进一步在35℃固化3 h,最后在80℃固化15 h后得到相应的复合材料,制备流程如图1

所示。采用相同工艺制备对照样品纯 EP 及 EP/FeOOH(0.5% 含量)、EP/GO(0.5% 含量)复合材料,分别标记为 1[#],2[#],3[#]。EP/GO@FeOOH 复合材料标记为 4[#]。

1.5 性能测试

采用 XRD 仪、振动样品磁强计、FESEM, TEM 等仪器对纳米粒子的物相组成、磁性能以及表面形貌进行分析。

按照 ASTM D5045-2014 评估复合材料的断裂韧性^[7-8],在万能试验机上进行三点弯曲试验,样品尺寸 60 mm×12 mm×6 mm,试验跨距 48 mm,采用刀片预制初始裂纹,测试速率为 1 mm/min,记录最大载荷,计算临界应力强度因子(K_{IC})。

2 结果与讨论

2.1 纳米粒子的表征

图 2 为 FeOOH 及 GO@FeOOH 复合粒子的 XRD 谱图。如图 2 所示,在制得的 FeOOH 对应的谱图上,2 θ 角为 14.14°,27.08°,36.34°,46.86°,52.81°,60.72° 处的衍射峰与标准卡(PDF#08-0098)中 γ -FeOOH 的 (020), (120), (031), (200), (151), (231) 晶面相一致,没有发现其他物质的特征衍射峰,表明通过化学沉淀-空气氧化法成功制得了相对纯净的 γ -FeOOH 纳米粒子。然而在 GO@FeOOH 谱图上只出现 γ -FeOOH 的特征峰,并没有在 2 θ =11.3° 处出现 GO 的 (001) 晶面的特征衍射峰^[15],可能是由于复合粒子中 GO 的含量较少造成的,这种现象在 GO 与其他无机粒子杂化后较为常见。

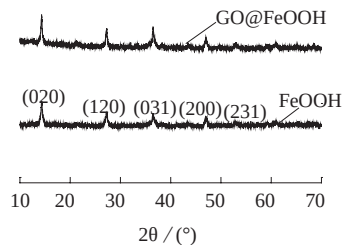


图 2 纳米粒子的 XRD 谱图

图 3 为 FeOOH 及 GO@FeOOH 的磁滞回线图。从图中可以看到, γ -FeOOH 和 GO@FeOOH 的饱和磁化强度分别为 9.13 emu/g, 7.18 emu/g, 矫顽力几乎为零,这表明这两种粒子在室温下都呈现超顺磁行为,能够对较弱磁场产生响应。由于 GO 的饱和磁化强度较低,二者饱和磁化强度的差别暗示了复合粒子中 GO 的存在。

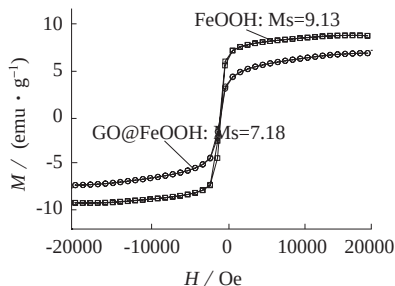
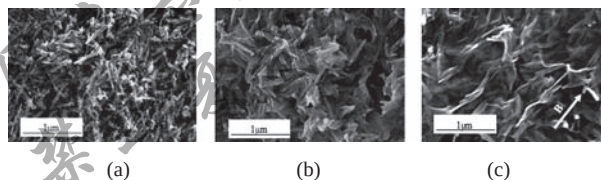


图 3 纳米粒子的磁滞回线

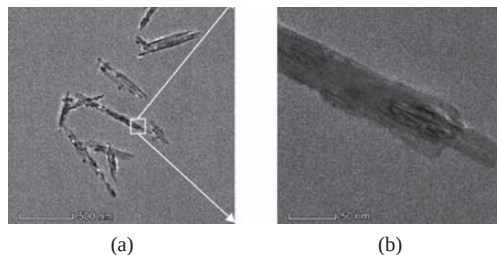
图 4 为 FeOOH 以及 GO@FeOOH 的 SEM 图,从图 4a 可以看出, FeOOH 为明显的针状结构,直径在 100 nm 左右、长度在 1 μ m 左右,表面轮廓清晰且较粗糙,有较多颗粒状物质附着在表面,这可能是结晶过程中形成的杂晶^[13]。图 4b 所示的 GO@FeOOH 较 FeOOH 发生了明显变化,此时针状粒子的表面变得光滑,且有明显的物质包裹在粒子表面,局部还能发现 GO 常见的褶皱状形貌特征。



a—FeOOH ; b—GO@FeOOH ; c—磁场取向的 GO@FeOOH

图 4 纳米粒子的 SEM 图

图 5 是 GO@FeOOH 纳米粒子的 TEM 图,图 5b 是图 5a 的局部放大图,可以清楚的观察到 GO 紧密地包覆在 FeOOH 的表面,而不是纳米粒子负载在 GO 表面,另外也可以看到 FeOOH 的部分表面是裸露的,这意味着粒子没有被 GO 完全包覆。以上 SEM 和 TEM 的综合分析可以说明 GO 已成功实现了对 FeOOH 的包覆,这是一种典型的核壳结构。这种结构使 FeOOH 具有 GO 的表面性质,而 GO 则因 FeOOH 获得了对弱磁场的响应能力,如图 4c 所示, GO@FeOOH 在磁场作用下发生了明显取向,不仅表现为大部分针状粒子沿着磁场方向取向,也表现为包裹其表面的 GO 跟随 FeOOH 一起发生了取向。



放大倍数: a— $\times 2.8$ 万; b— $\times 24.4$ 万

图 5 GO@FeOOH 的 TEM 图

2.2 复合材料的断裂韧性

图6示出了 K_{IC} 随纳米粒子含量的变化趋势图。

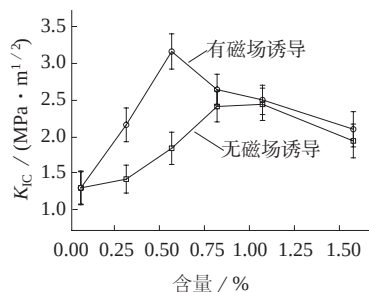


图6 不同GO@FeOOH含量时复合材料断裂韧性

由图6可知,在无磁场诱导下,随着纳米粒子含量的增加, K_{IC} 呈现先上升后下降的趋势,最高峰值出现在1%含量时,达到 $2.47 MPa \cdot m^{1/2}$,与纯EP相比提高了85.7%,而随着纳米粒子含量进一步提高, K_{IC} 值有一定的下降,可主要归因于GO@FeOOH的团聚而导致的应力集中,这是纳米粒子改性高分子材料时常见的现象。在磁场诱导下,随着纳米粒子含量增加, K_{IC} 也呈现先上升后下降的趋势,但在0.5%含量下达到了峰值 $3.19 MPa \cdot m^{1/2}$,此时复合材料的增韧现象最为显著,与纯EP相比提高了140%,在常见的无极刚性纳米粒子增韧环氧树脂的研究中,这是十分显著的增韧效果。另外,与无磁场诱导的复合材料相比也提高了70.6%,表明磁场诱导对提升断裂韧性具有显著的积极作用。同样地,随着纳米粒子含量继续升高, K_{IC} 的逐渐下降也归因于纳米粒子的团聚,而且可以推测,磁场诱导有加剧粒子团聚的作用,因此在纳米粒子含量较高时磁场诱导的积极效果也相应的降低,不过仍然优于无磁场诱导的。

为进一步探究GO@FeOOH纳米粒子的协同增韧机理,图7给出了0.5%含量的FeOOH, GO@FeOOH及GO三种纳米粒子对EP复合材料 K_{IC} 的影响对比图。

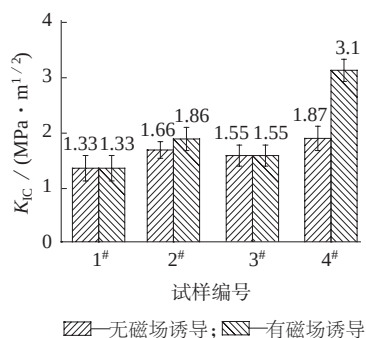
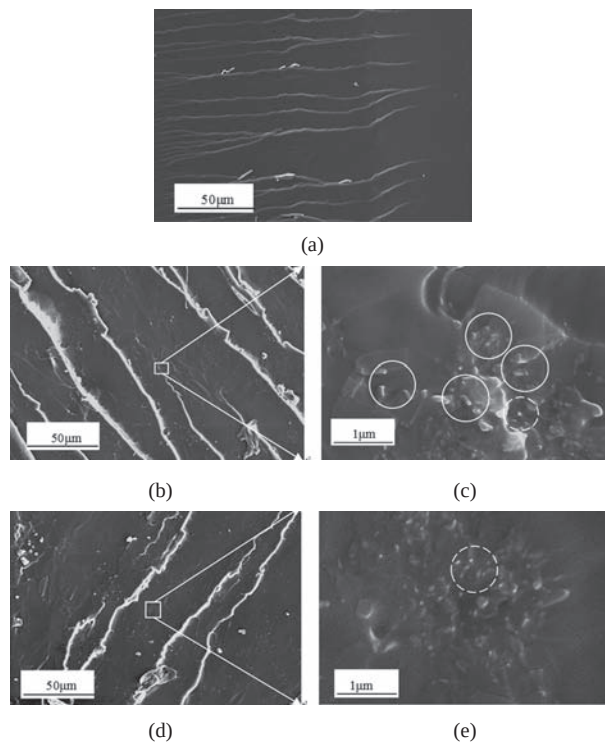


图7 不同纳米粒子填充时EP复合材料断裂韧性

由图7可以看出,无论是否经过磁场诱导,GO@FeOOH的增韧效果都明显优于单独的FeOOH和GO,这显然说明GO@FeOOH发挥了两种纳米粒子的协同作用。其中单独的FeOOH使 K_{IC} 提高了24.8%,经磁场诱导后可提高39.8%;另一方面,单独的GO仅提高了16.5%,尽管GO与EP有良好亲和性和界面相互作用,但单独的GO在EP中分散更难、团聚更容易,导致其增韧效能得不到充分发挥。究其原因,GO@FeOOH优异的增韧能力主要是由于发挥了两种纳米粒子协同增韧和磁场诱导强化增韧这两种策略的显著优势。其中,GO和FeOOH的协同增韧作用主要通过两方面实现,一方面,通过静电自组装将GO包覆在FeOOH表面,由于GO与EP的亲合性更佳,因而可以促进FeOOH在基体中的分散,并增强FeOOH与EP间的界面相互作用,进而提高复合材料断裂过程中的裂纹生长阻力;另一方面,GO自身更易团聚,将GO包覆在FeOOH上,等效于降低了GO的团聚,因此更有利于发挥增韧能力。

2.3 复合材料的增韧机理

采用SEM对样品断面进行观察,进一步分析了复合材料的增韧机理。图8示出了EP及EP/GO@FeOOH复合材料断裂表面的SEM图。



a—EP; b, c—EP/GO@FeOOH($\times 1000$, $\times 40000$);

d, e—EP/磁场诱导GO@FeOOH($\times 1000$, $\times 40000$)

图8 EP及0.5%GO@FeOOH填充EP复合材料断裂面SEM图

由图 8a 可见,尽管得益于改性胺固化体系,纯 EP 具有较高的 K_{IC} 值,但其断面光滑,裂纹走向整齐,局部呈无特征的类玻璃状,这仍然是典型的脆性断裂特征。当加入 0.5% 含量的 GO@FeOOH 后,断面形貌发生明显变化,如图 8b 所示,其表面粗糙度显著提高,主裂纹加深且边缘呈严重的不规则状,而且在相对平坦的区域并不是呈现为类玻璃状表面,而是出现了大量震荡态水波纹状裂纹,且无明显走向,这是裂纹偏转和基体局部塑性形变两种增韧机理的表现,无疑是纳米粒子阻碍裂纹的扩展造成的,从而显著提高了复合材料的断裂韧性。从图 8b 的局部放大对应的图 8c 中可以看到,白色点状以及白色杂乱状物质代表了纳米粒子无规分散在基体中,且纳米粒子被基体充分浸润,这表明其与 EP 具有良好的亲和性,支持了前面的分析推断;如实线圆圈指出了粒子与基体发生脱粘的增韧机理,虚线圆圈指出了粒子的拔断增韧机理,粒子的周围还伴随着明显的裂纹偏转和基体局部塑性形变,值得注意的是,并没有发现粒子拔出现象,这暗示了粒子与基体之间具有较高的界面剪切强度,因而不利于粒子的拔出。如图 8d 所示,施加磁场诱导后,低放大倍数的断面形貌与无磁场诱导的对比并没有明显变化,但也表现出显著的增韧断面特征。不过从图 8d 的局部放大对应的图 8e 中可以看到,纳米粒子主要表现为白色点状分布,这表明此时的纳米粒子在磁场诱导下发生了取向,且取向方向指向面外,与裂纹生长方向垂直,因此此时的增韧机理由粒子的脱粘和拔出共存,转变为以粒子拔断为主。显然可知,粒子拔断比粒子脱粘能够耗散更多断裂能,这是磁场诱导纳米粒子具有更加显著的增韧效果的根本原因,从而导致了磁场诱导复合材料的 K_{IC} 比无磁场诱导复合材料提高了 70.6%。

3 结论

通过静电自组装技术制备了 GO 包覆 FeOOH 复合粒子 GO@FeOOH,考察了粒子含量和磁场诱导对 EP 的断裂韧性的影响,同时也验证了 GO 和 FeOOH 的协同增韧作用,并通过对断面形貌进行 SEM 分析,探讨了复合材料的增韧机理,得出以下主要结论:

(1) 利用静电自组装技术可成功制备 GO@FeOOH 复合粒子,粒子为典型针状结构 γ -FeOOH,长径比 10 左右、直径 100 nm 左右,GO 包覆在 FeOOH 粒子表面而非 GO 负载 FeOOH 粒子。

(2) GO@FeOOH 复合粒子实现了对 EP 的显著增韧,随着粒子含量的增加, K_{IC} 呈现先增加后减小的趋势,在含量为 0.5% 时,磁场诱导复合材料的 K_{IC} 获得了显著提高,较纯 EP 和无磁场诱导复合材料分别提高了 140% 和 70.6%,与常见的刚性粒子相比,该粒子表现出卓越的增韧能力。另外,磁场诱导也表现出显著的积极作用。

(3) GO@FeOOH 复合粒子有效发挥了 GO 和 FeOOH 的协同增韧,主要通过两方面实现,一是 GO 包覆在 FeOOH 表面可以促进 FeOOH 在基体中的分散,并增强 FeOOH 与 EP 间的界面相互作用,二是 GO 包覆在 FeOOH 上等效于降低了 GO 的团聚,更有利于发挥 GO 的增韧能力。

(4) 复合材料的增韧机理主要包括粒子脱粘和拔断,以及裂纹偏转和基体局部塑性形变等,其中,磁场诱导复合材料中的 GO@FeOOH 发生取向,粒子拔断成为主导的增韧机理,这是粒子获得优异增韧效果的主要原因。本工作为改善环氧树脂的断裂性能提供了一种新的思路,GO@FeOOH 是一种有发展潜力的改性复合粒子,在催化化学、新能源、磁流体以及先进复合材料等领域,均具有广泛的应用价值。

参考文献

- [1] 徐丰, Du Xusheng, Liu Hongyuan, 等. 碳纤维无纺布对 CFRP 层板层间的增韧作用及机制[J]. 复合材料学报, 2015(6):1784-1790.
Xu Feng, Du Xusheng, Liu Hongyuan, et al. Interlaminar toughening effects and mechanisms of non-woven carbon fiber tissue on CFRP laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(6):1784-1790.
- [2] 李玉婷, 马传国, 欧气局, 等. 棒状纳米铁氧化物增强碳纤维-环氧树脂复合材料的层间性能[J]. 桂林电子科技大学学报. 2017(6):508-512.
Li Yuting, Ma Chuanguo, Ou Qiju, et al. Enhanced interlaminar properties of epoxy composites with iron oxide nanorods[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2017(6):508-512.
- [3] Liu Kunwei, Macosko C W. Can nanoparticle toughen fiber-reinforced thermosetting polymers[J]. Journal of Materials Science, 2019, 4(6):4471-4483.
- [4] Domun N, Hadavinia H, Zhang T, et al. Improving the fracture toughness and the strength of epoxy using nanomaterials—a review of the current status[J]. Nanoscale. 2015, 7(23):10294-10329.
- [5] 吴俊青, 俞科静, 钱坤. 碳纳米管/石墨烯杂化材料改性环氧树脂研究[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(3):25-29.

- Wu Junqing, Yu Kejing, Qian Kun. Study on epoxy resin composites modified with carbon nanotubes / graphene hybrid materials[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(3):25-29.
- [6] Nadiv R, Shachar G, Peretz-Damari S, et al. Performance of nano-carbon loaded polymer composites: Dimensionality matters[J]. Carbon, 2018, 126:410-418.
- [7] Khan S U, Pothnis J R, Kim J K. Effects of carbon nanotube alignment on electrical and mechanical properties of epoxy nanocomposites[J]. Compos Pt A-Appl Sci Manuf, 2013, 49:26-34.
- [8] Ma Chuanguo, Liu Hongyuan, Du Xusheng, et al. Fracture resistance, thermal and electrical properties of epoxy composites containing aligned carbon nanotubes by low magnetic field[J]. Compos Sci Technol, 2015, 114:126-135.
- [9] 梅启林, 王继辉, 黄志雄. 多壁碳纳米管-有机蒙脱土协同增韧环氧树脂[J]. 复合材料学报, 2008, 25(6):146-151.
- Mei Qilin, Wang Jihui, Huang Zhixiong. Synergistic effect of multi-wall carbon nanotube and organophilic montmorillonite on toughening epoxy resin[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(6):146-151.
- [10] Qi Zehao, Tan Yefa, Zhang Zhongwei, et al. Synergistic effect of functionalized graphene oxide and carbon nanotube hybrids on mechanical properties of epoxy composites[J]. RSC Adv, 2018, 67(8):38 689-38 700.
- [11] Cao Xiaohui, Dong Hongfei, Tan Yuzhuo, et al. Investigation of synthesis and magnetic properties of rod-shaped CoFe_2O_4 via precipitation-topotactic reaction employing α -FeOOH and γ -FeOOH as templates[J]. J Electron Mater, 2018, 47(5):2 920-2 928.
- [12] Yin Jinwei, Shi Huimin, Wu Ping, et al. Graphene-wrapped single-crystalline Fe_3O_4 nanorods with superior lithium-storage capabilities[J]. New J Chem, 2014, 38(9):4 036-4 040.
- [13] Sudakar C, Subbanna G N, Kutty T R N. Effect of anions on the phase stability of γ -FeOOH nanoparticles and the magnetic properties of gamma-ferric oxide derived from lepidocrocite[J]. J Phys Chem Solids, 2003, 64(12):2 337-2 349.
- [14] 周宏, 朴明昕, 李芹, 等. 氧化石墨烯纳米片 / 环氧树脂复合材料的制备与性能[J]. 复合材料学报, 2015(5):1 309-1 315.
- Zhou Hong, Pu Mingxi, Li Qin, et al. Preparation and properties of graphene oxide nanosheets / epoxy composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(5):1 309-1 315.
- [15] Yang Xiaofei, Lu Chunyu, Qin Jieliang, et al. A facile one-step hydrothermal method to produce graphene-MoO₃ nanorod bundle composites[J]. Mater Lett, 2011, 65(15-16):2 341-2 344.

欢迎订阅 2020 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

也可直接通过邮局或银行汇款向《工程塑料应用》杂志

社订阅《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘, 请注明订阅期刊 / 光盘的名称、收件人、邮编及地址。

《工程塑料应用》国内外公开发行的全国性塑料专业技术类刊物, 月刊, 大 16 开本, 每月 10 日出版。本刊为中文核心期刊, 是中国合成树脂供销协会会刊, 荣获首届、第二届、第三届全国期刊奖等多项国家、省部级优秀期刊奖, 入选美国化学文摘 (CA) 千种表。2020 年定价 20 元 / 期, 全年 240 元。目前杂志社尚有部分 2000 年以来的单册和合订本库存, 如需订阅, 请联系杂志社。

《化学分析计量》国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物, 双月刊, 大 16 开本, 单月 20 日出版。本刊为中国科技核心期刊, 荣获多项省部级优秀期刊奖, 入选美国化学文摘 (CA) 千种表。2020 年定价 20 元 / 期, 全年 120 元。目前杂志社尚有部分 2000 年以来的单册和合订本库存, 如需订阅, 请联系杂志社。

《工程塑料应用》、《化学分析计量》合订本光盘 杂志社已将《工程塑料应用》自创刊号 (1973 年) 至 2019 年底共 47 卷 362 期的期刊电子化, 并制成合订本光盘, 现公开发售; 同时也将《化学分析计量》自创刊号 (1992 年) 至 2019 年底

共 28 卷 133 期的期刊电子化, 并制成合订本光盘, 现公开发售。合订本光盘既可按作者、文题、关键词、年、期等分类查阅各期刊已发表的所有科技文章和科技信息的全文, 又可根据读者自定义的关键词进行全文检索, 非常方便、实用。《工程塑料应用》合订本光盘优惠售价 550 元; 《化学分析计量》合订本光盘优惠售价 250 元。

邮局汇款:

收款地址: 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

账 号: 1602001229014425546

网上订阅: <http://www.epa1973.net>