

# 电场诱导对不饱和聚酯树脂/碳纤维/ 纳米炭黑复合材料性能的影响

Effect of Electric Field Induced on Property of Unsaturated Polyester Resin/Carbon Fibre/Nanosize Carbon Black Composite

赵 博<sup>1</sup>, 李晓刚<sup>1,2</sup>, 高 瑾<sup>1,2</sup>, 杜翠薇<sup>1,2</sup>

(1 北京科技大学 腐蚀与防护中心, 北京 100083;

2 北京科技大学 腐蚀与防护教育部重点实验室, 北京 100083)

ZHAO Bo<sup>1</sup>, LI Xiao-gang<sup>1,2</sup>, GAO Jin<sup>1,2</sup>, DU Cui-wei<sup>1,2</sup>

(1 Corrosion and Protection Centre, University of Science and Technology

Beijing, Beijing 100083, China; 2 Key Laboratory of Corrosion and

Protection (Ministry of Education), University of Science

and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**摘要:** 采用不饱和聚酯树脂(UPR)、导电碳纤维(CF)和纳米炭黑(CB)制备了一种复合材料, 对比分析电场诱导对材料的电学性能和基本力学性能的影响。结果表明: 在导电填料添加适量的情况下, 采用  $0.3\text{V}/\mu\text{m}$  的直流电场诱导可以提高复合材料的导电能力, 并表现出一定程度的各向异性。其中 CB 的添加量为  $0.5\text{phr}$  时, 复合材料的电场诱导效果最佳; CF 添加量为  $3, 6, 9\text{phr}$  的复合材料在电场线轴向的体积电阻率分别降低了  $46.8\%$ ,  $29.0\%$ ,  $12.5\%$ , 在电场线法向的体积电阻率分别降低了  $28.6\%$ ,  $18.8\%$ ,  $8.3\%$ 。同时, 电场诱导基本没有改变复合材料力学特征, 复合材料的基本力学性能与常规成型基本保持一致。

**关键词:** 不饱和聚酯树脂; 电场诱导; 电学性能; 力学性能

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.04.016

**中图分类号:** TQ327.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2013)04-0085-07

**Abstract:** A type of composite was made of unsaturated polyester resin(UPR), carbon fibre(CF), and nanosize carbon black(CB). The electrical and basic mechanical properties of the composite with electric field induced and conventional molding was compared and analyzed. The results showed that the conductivity of composite was anisotropic and could be enhanced when the filling amount was appropriate with  $0.3\text{V}/\mu\text{m}$  direct current (DC) electric field induced. The best CB filling amount was  $0.5\text{phr}$ . At that time, the volume resistivity of composite with CF filling amount was  $3, 6, 9\text{phr}$  reduced  $46.8\%$ ,  $29.0\%$ ,  $12.5\%$  at axial direction, and  $28.6\%$ ,  $18.8\%$ ,  $8.3\%$  at normal direction of electric field line. Meanwhile, the basic mechanical properties of composite was not changed by electric field induced, and maintained substantially constant.

**Key words:** unsaturated polyester resin; electric field induced; electrical property; mechanical property

传统高分子材料多为优良绝缘体, 体积电阻率高达  $10^{14} \sim 10^{20} \Omega \cdot \text{cm}$ , 容易积累静电, 限制其在矿山、化工等行业中的应用<sup>[1,2]</sup>。通过与其他导电材料共混、复合改性的方法制备出的复合型高分子抗静电材料, 因加工成型工艺简单, 经济以及适合大批量工业化生产等特点, 具有较大的市场潜力<sup>[3-9]</sup>。通常共混的导电填料有金属系填料、金属氧化物系填料和碳系填料等。其中碳系填料因较好的稳定性和经济性, 得到较广泛的应用。一般情况下, 材料的电阻率小于

$10^6 \Omega \cdot \text{cm}$  基本可以有效消除静电荷积累, 但部分苛刻的应用场合往往对材料的导电能力提出更高的要求。因此, 提高导电能力是目前复合材料研究的重要方向之一。理论上增加导电填料的添加量与缩小导电填料的粒径是最佳提高导电能力的方法, 但是填料的添加量和比表面积过大会导致填料团聚或材料内部缺陷, 致使复合材料的导电能力与力学性能降低<sup>[10-14]</sup>, 同时提高生产成本。因此, 通过电场诱导实现填料粒子在聚合物基体中的取向排列, 进一步增强复合材料包括

导电能力在内的各项性能,越来越多地受到国内外学者的关注<sup>[15-17]</sup>。T. Prasse 等<sup>[18]</sup>研究了炭黑粒子在外加电场作用下的运动情况,并指出在不同类型电场作用下,炭黑粒子的运动情况是不同的。W. Tie 等<sup>[19]</sup>通过电场诱导,促使纳米碳管的定向排列,从而有效抑制了纳米碳管的团聚现象。Wang H. Q. 等<sup>[20,21]</sup>通过扫描电镜原位观察发现,在电场作用下纳米石墨微片在树脂基体中沿电场方向以平面平行于电场方向取向。通过交流电场诱导,复合材料的渗流阈值可下降 0.25%。R. Natthakarn 等<sup>[22]</sup>通过同时外加 2T 的匀强磁场和不同强度的匀强电场,证实磁场诱导可以提高电场诱导效果。目前,相关应用中存在的主要问题是电场诱导致使复合材料的电学和力学性能产生一定各向异性,特别是沿电场线法向与轴向的力学性能存在明显差距,沿电场线法向的力学性能甚至低于常规成型材料<sup>[23,24]</sup>。因此在应力环境较复杂的现实生产中通常难以满足使用要求。此外,各国学者在研究电场诱导作用时多以单一导电填料为研究对象,对于具有差异性的导电填料在电场下的协同作用较少涉及。

本工作采用碳纤维和纳米炭黑作为导电填料,以不饱和聚酯树脂作为基体制备一种抗静电复合材料,通过测量其电学性能和基本力学性能的变化,研究两种导电填料在电场诱导中对复合材料性能影响的协同作用,旨在通过电场诱导的方法进一步增强材料的导电能力,同时保持其力学性能。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

不饱和聚酯树脂(UPJ108),固化剂:过氧化甲乙酮,促进剂:异辛酸钴。导电填料:短切导电碳纤维(ECP-CF,长度 3mm,直径 11~15 $\mu\text{m}$ );导电纳米炭黑(ECP-CB,球形,粒径小于 30nm),使用前经 5% 硅烷偶联剂(WD-20)酒精溶液浸泡进行表面改性。

### 1.2 制备工艺

不饱和聚酯树脂 100 份,碳纤维、炭黑为变量。先将碳纤维放入胶液用电动搅拌至均匀,加入炭黑超声波分散 10min,随后加入 2mL 固化剂和 1mL 催化剂,抽真空 3min 后倒入模具。在室温下固化成型后放入 60 $^{\circ}\text{C}$  烘箱中 3h 固化得到板片状试样,再冷却至室温后静置 12h 以上消除其滞后效应。材料采用常规成型与电场诱导两种成型方法,电场诱导成型装置如图 1 所示,采用 Keithley2400 数字源表作为直流稳压电源,电场强度控制在 0.3V/ $\mu\text{m}$ 。

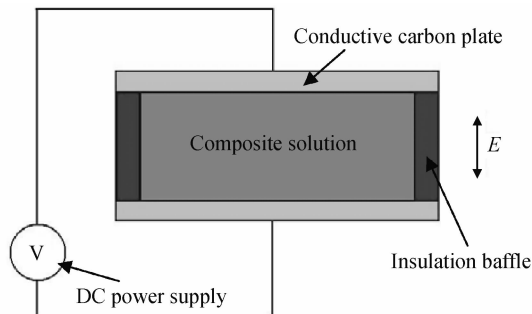


图 1 电场诱导成型装置图

Fig. 1 The electric field induced device

### 1.3 电学性能

以复合材料的体积电阻率  $\rho_v$  ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) 表述电学性能,按照 GB/T 15738—2008 执行。测量点选取 CF 添加量为 3,6,9phr,CB 添加量为 0,0.5,1.0,1.5phr。测量设备采用 Keithley6517A 皮安电阻仪。

### 1.4 力学性能

力学性能实验采用电场诱导成型与常规成型的体积电阻率差异最大点,以复合材料的抗拉强度、抗弯强度、冲击强度和邵氏硬度 4 个指标表述。其中抗拉强度按照 GB/T 1040—2006 执行,抗弯强度按照 GB/T 9341—2008 执行,冲击强度按照 GB/T 2567—2008 执行,邵氏硬度按照 GB/T 2411—2008 执行。

## 2 结果与分析

### 2.1 电场诱导对复合材料电学性能的影响

图 2 为电场诱导与 UPR/CF/CB 复合材料体积电阻率的关系。可以看出,材料的体积电阻率并非随导电填料的添加量提高单调减小,复合材料的体积电阻率最低值分别出现在导电填料添加量 CF=3phr,CB=1.0phr;CF=6phr,CB=1.0phr;CF=9phr,CB=0.5phr 处,添加量过大可导致材料的体积电阻率增大,导电能力降低。

出现这种情况可能是因为在 UPR/CF/CB 复合材料中,导电填料在基体中形成“海—岛—海”式分布,通过相互接触以及近接触产生电子跃迁形成电流传导。其中,碳纤维直径为 11~15 $\mu\text{m}$ 、长度 3mm 大长径比的良导体,提供长程导电媒介,为复合材料中的主要导电成分。纳米炭黑直径为小于 30nm 的细小球形颗粒,具有较好的几何填充性,弥散分布于基体中,成为辅助导电相,为电子跃迁提供更多“台阶”,能进一步提高复合材料整体的导电能力。常规成型时,填料随机占据空间格某一点位,导电能力取决于导电填料在基体中的几何填充密度。当导电填料添加量过高时,

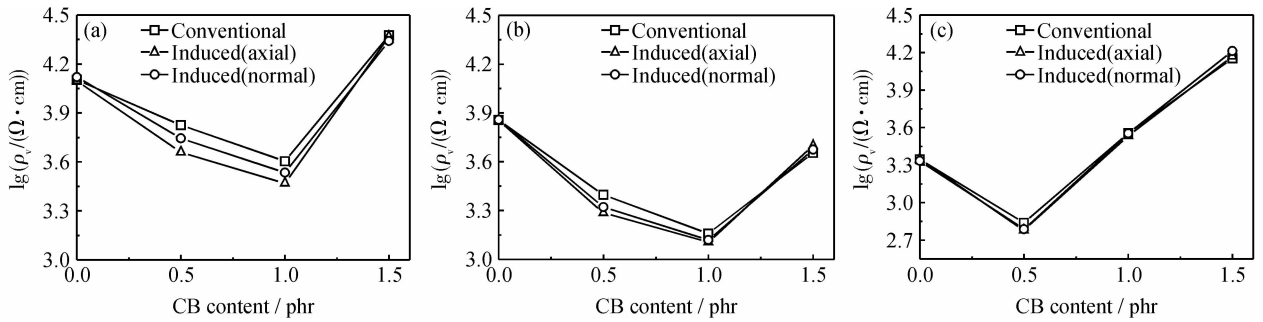


图2 电场诱导对 UPR/CF/CB 复合材料体积电阻率的影响

(a)CF=3phr; (b)CF=6phr; (c)CF=9phr

Fig. 2 The effect of electric field induced on volume resistivity of UPR/CF/CB composite

(a)CF=3phr; (b)CF=6phr; (c)CF=9phr

导致胶液黏度过高,增加导电填料分散难度,材料内部气孔等缺陷增多,导致复合材料的体积电阻率上升。

从图2中还可以看出,电场诱导可以同时降低复合材料在电场线轴向和法向的体积电阻率,其中轴向的体积电阻率小于法向,表现出一定程度的各向异性特征。此外,在碳纤维含量相同时,电场诱导作用随炭黑添加量的增高呈现“两端低中间高”的状态,即在导电炭黑添加量为0phr和1.5phr时,电场诱导对复合材料的导电能力基本没有提高。效果最佳的点出现在炭黑添加量为0.5phr处,碳纤维含量为3,6phr和9phr的复合材料在电场线轴向的体积电阻率分别降低了46.8%,29.0%,12.5%,在电场线法向的体积电阻率分别降低了28.6%,18.8%,8.3%。

## 2.2 电场诱导对导电性能的影响机制

在抗静电复合材料中,存在多种导电方式。K. Pechovskaya等<sup>[25]</sup>研究碳系导电复合材料时发现,电压-电流( $U-I$ )之间存在以下函数关系

$$I = \frac{1}{A} U^B \quad (1)$$

式中: $I$ 为材料内部通过电流; $A, B$ 为只与材料本身有关而与外加电压无关的无量纲常数; $U$ 为外加电压, V。

将  $R = \frac{U}{I}$  和  $R = \rho_v \frac{l}{S}$  带入式(1),并将公式两端

取对数,得

$$\lg \frac{l}{AS} + \lg \rho_v = (1 - B) \lg U \quad (2)$$

式中: $A$ 为材料的导电能力, $A$ 越大材料的导电能力越强; $B$ 可以用来评估材料的导电方式,由于 $l, A, S$ 均为常数,对 $\lg \rho_v - \lg U$ 进行线性拟合即可根据斜率求得 $B$ 值,以评估材料的导电方式。当 $B > 1$ 时,说明材料中存在介电层,导电机制不符合欧姆定律,材料的 $U-I$ 曲线呈非线性关系, $B$ 越大说明导电网络的形成越不稳定。当 $B$ 逐渐接近1,说明材料的介电效应减弱,材料内部的欧姆导电比率越高,材料的导电网络趋于稳定。而当 $B=1$ 时,材料导电方式完全符合欧姆定律,导电网络全部形成,材料的 $U-I$ 曲线呈线性关系。考虑到导电复合材料样品施加电压超过约1V时,热效应影响比较剧烈<sup>[26]</sup>,为减少其对测试结果的影响,测试电压设定为0.1~1V,每隔0.1V取数据点。

图3为电场诱导对UPR/CF/CB复合材料 $B$ 值的影响。参考图2可知,碳纤维添加量为3,6phr和9phr的3种复合材料的 $B$ 值均随纳米炭黑的增加,呈明显的下降趋势,且逐渐趋近于1。随碳纤维添加量增高, $B$ 值下降趋势变缓,最后都在接近1处达到稳定。

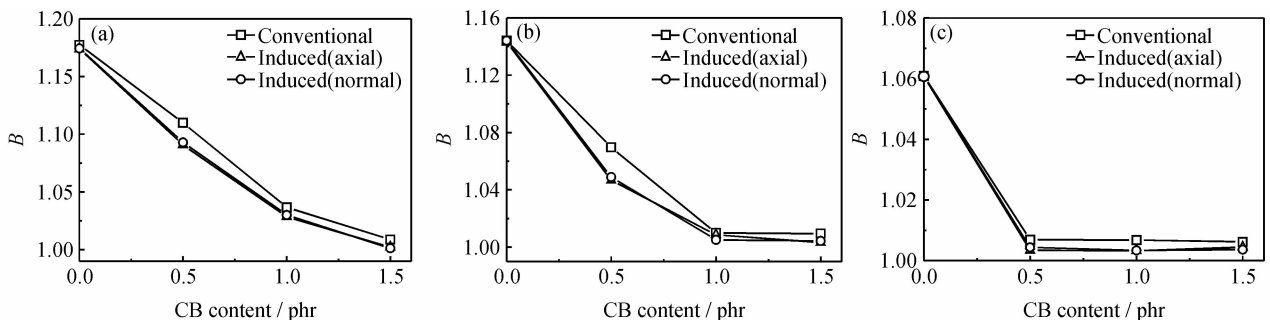

 图3 电场诱导对 UPR/CF/CB 复合材料  $B$  值的影响 (a)CF=3phr; (b)CF=6phr; (c)CF=9phr

 Fig. 3 The effect of electric field induced on  $B$  value of UPR/CF/CB composite (a)CF=3phr; (b)CF=6phr; (c)CF=9phr

电场诱导成型时,导电填料在电场作用下受到多种力的作用,如电场的极化作用、热运动、流体拉伸作用、重力、胶体的引力和斥力等。球形粒子在电场作用下极化产生电偶极子,形成电偶极矩。粒子的电偶极矩  $P^{[27]}$  为

$$P = \alpha E \tag{3}$$

其中:

$$\alpha = 4\pi a^2 \text{Re}\left[\epsilon_1 \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{(\epsilon_2 + \epsilon_1)}\right] \tag{4}$$

式中: $\alpha$  为极化率; $E$  为外加电场强度; $a$  为粒子的半径; $\epsilon_2$  为粒子的介电常数; $\epsilon_1$  为胶液的介电常数。同时,电场作用下介质中两个极化的球形颗粒间的相互作用能<sup>[28]</sup>为

$$U(r,\theta) = -(\mu^2/\epsilon_1 r^3)(3\cos^2\theta - 1), r \geq 2a \tag{5}$$

式中: $r$  为颗粒间的间距矢量; $\theta$  为矢量  $r$  与电场  $E$  的锐角夹角; $\mu$  为颗粒的诱导偶极矩。当  $\theta < 54.7^\circ$  时,颗粒之间存在相互的引力;当  $\theta > 54.7^\circ$  时,颗粒存在相互斥力。

在外加电场下,材料中的导电填料可以受到极化,从而迁移、聚集、取向排列,在一定程度上优化了导电填料的空占位,提高了材料的导电能力。图 2 中电场诱导成型的复合材料体积电阻率明显小于常规成型的,可以认为是由于炭黑粒子沿电场线轴向的取向排列改善了材料的导电能力。这是因为炭黑因粒径小,受到基体胶液阻滞力较小,极化后通过电荷间的引力与斥力再使材料沿电场线轴向方向链状排列,促进导电路径的形成。同时,由于电场作用,纳米炭黑优先沿电场线轴向形成导电网络,使得电子在电场线轴向的

行进距离较短,而沿电场线法向电子的跃迁需要部分通过轴向的导电网络曲折行进,距离较长,使得复合材料的电学性能具有一定程度的各向异性特征。从图 2 中还可知,CB=0phr 时与 CB=1.5phr 时电场诱导的效果不明显,与常规成型时体积电阻率差别不大。可以认为在 CB=0phr 时,材料中的导通能力均来自于碳纤维,匀强电场强度为  $0.3\text{V}/\mu\text{m}$ ,强度较小,不足以驱动大长径比的碳纤维克服胶液的黏滞阻力发生聚集、取向并且重排,因此使得电场诱导效果不明显。而在 CB=1.5phr 时,一方面,基体胶液的黏度增大,炭黑粒子受电场极化迁移更加困难,导致电场诱导形成导电通路的难度增大;另一方面,材料内部缺陷增多,成为导致材料体积电阻率上升的主要因素,电场诱导的效果被体积电阻率上升的负面效应所掩盖,很难从测量的体积电阻率结果上体现。从图 3 可以看出,CB=1.5phr 时,电场诱导成型的材料  $B$  值比常规成型的材料更加趋近 1,证明内部导电行为更趋近欧姆关系。对比图 2 中的导电能力测量结果,可以认为电场诱导的效果依然存在,且导电能力下降的原因是材料中缺陷增多,并非电场诱导行为导致。同时,从图 3 还可以看出电场诱导成型时,复合材料在电场线轴向与法向  $B$  值基本相同,说明材料在两向导电行为基本一致,可以证明电场诱导出现的电学性能各向异性是由于纳米炭黑定向排列导致的电子行进路径不同所致。

图 4 为电场诱导的导电填料排列示意图。可知,在常规成型的情况下,碳纤维和纳米炭黑均呈无取向排列,当成型过程中施加外加电场诱导时,碳纤维取向不发生改变,纳米炭黑沿电场线轴向定向排列。

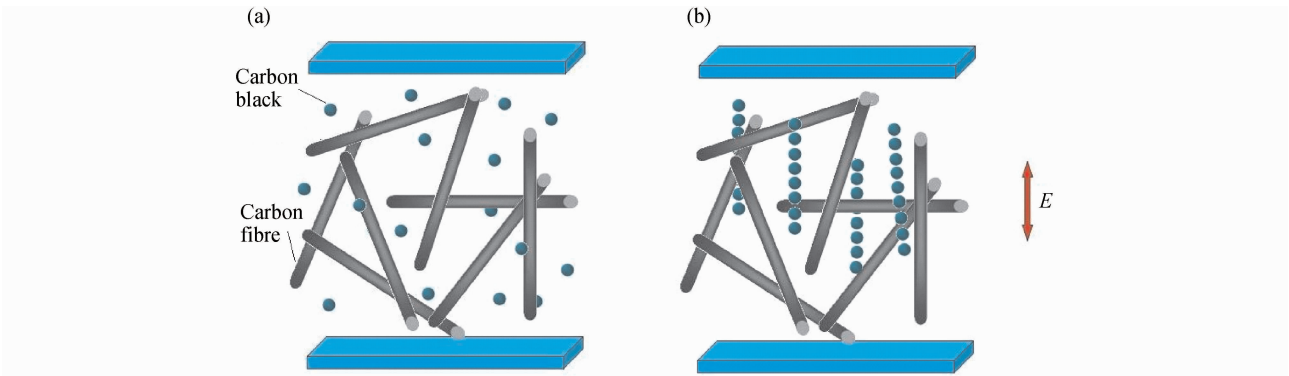


图 4 电场诱导的导电填料排列示意图

(a)常规成型;(b)电场诱导

Fig. 4 Schematic diagram of conductive filler arrangement with electric field induced

(a)conventional molding;(b)electric field induced

2.3 电场诱导对复合材料基本力学性能的影响

结合复合材料的电学性能实验结果,选取电场诱

导成型与常规成型电阻率结果差异最大点,即导电填料添加量分别为 CF=3phr,CB=0.5phr(样品编号

a);CF=6phr,CB=0.5phr(样品编号 b);CF=9phr,CB=0.5phr(样品编号 c),分别对其进行抗拉强度、抗弯强度、冲击强度和邵氏硬度 4 种指标测试(图 5)。

可以看出,在导电填料成分相同的情况下,电场诱

导成型复合材料的力学性能在轴向与法向基本保持一致,与常规成型的也基本一致,差异极值小于 4%,远小于电场诱导对材料导电能力的提高程度,可以认为电场诱导基本没有改变复合材料基本力学性能的各向

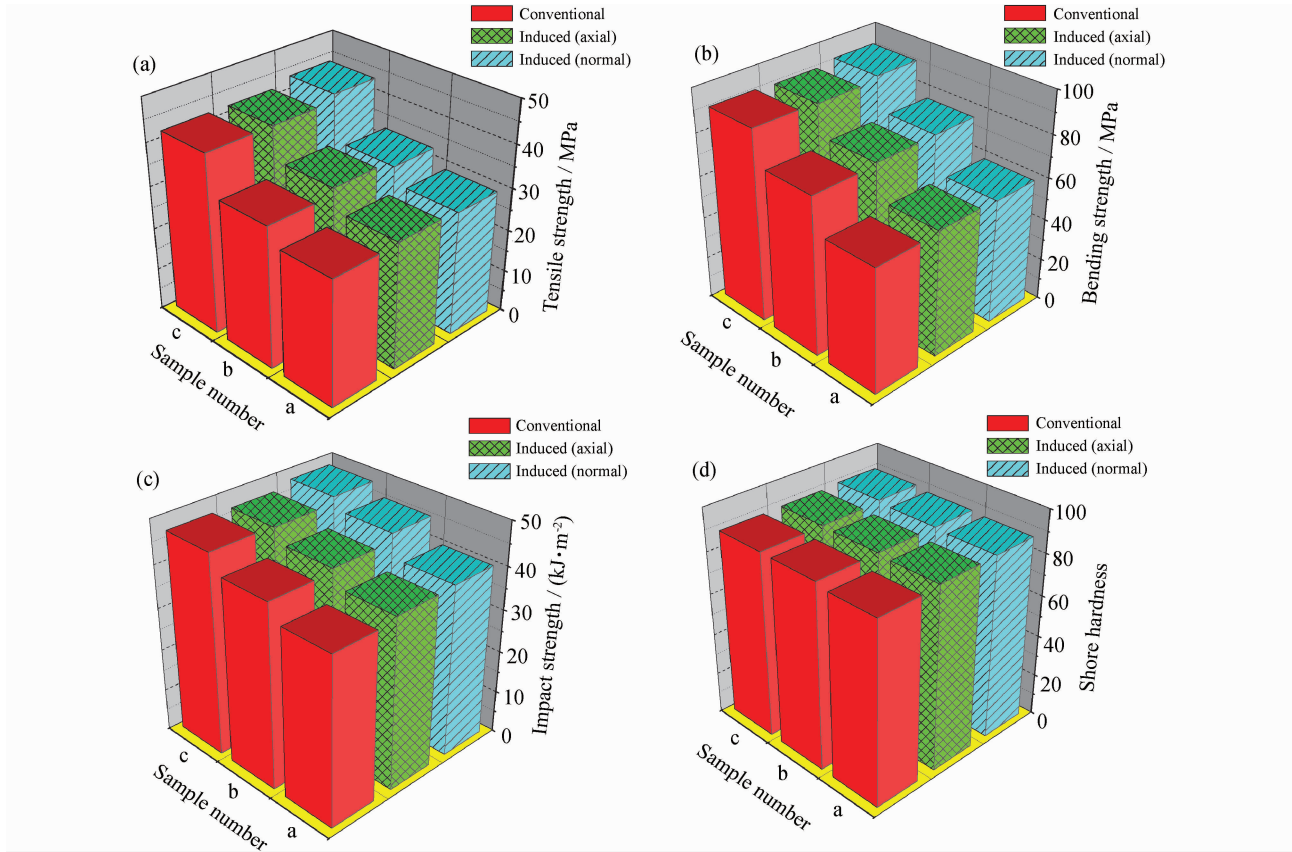


图 5 电场诱导对 UPR/CF/CB 复合材料的力学性能影响  
(a)抗拉强度;(b)抗弯强度;(c)冲击强度;(d)邵氏硬度

Fig. 5 The effect of electric field induced on the mechanical properties of UPR/CF/CB composite  
(a)tensile strength;(b)bending strength;(c)impact strength;(d)shore hardness

同性特征。

图 6 为导电填料添加量 CF=9phr,CB=0.5phr 的复合材料电场诱导成型与常规成型的拉伸断口扫描电镜(SEM)图。可知,电场诱导成型的复合材料在电场线轴向、法向与常规成型的断口形貌特征基本相同。碳纤维呈无取向性分布,基体可见河流状裂纹,且多数起止点在碳纤维根部。这说明碳纤维对裂纹延伸起到了很好的钉扎作用,为材料力学性能的主要强化相。而纳米炭黑由于粒径较小,与碳纤维体积差异较大,促进基体裂纹前端钝化效果相对较弱,因此对复合材料的力学性能的影响不大。电场诱导成型中材料内部只有纳米炭黑发生聚集重排,碳纤维的分布与取向基本未受到电场诱导的影响,与常规成型相同,材料的基本力学性能受电场诱导影响不大,基本保持各向同性。

### 3 结论

(1)UPR/CF/CB 抗静电复合材料中导电填料添加量不宜过高。在 CF=3,6,9phr 时,CB 添加量超过 1.0,1.0,0.5phr,会因内部缺陷增多导致材料的体积电阻率上升。

(2)电场诱导可以通过改善 CB 的空间占位促进导电通路形成,提高 UPR/CF/CB 复合材料的导电能力,并表现出一定程度的各向异性。在 0.3V/ $\mu$ m 直流电场下,CB 添加量为 0.5phr 时电场诱导效果最佳。当 CF 添加量分别为 3,6,9phr 时,电场诱导可以使复合材料在电场线轴向的体积电阻率分别降低 46.8%,29.0%,12.5%,在电场线法向的体积电阻率分别降低 28.6%,18.8%,8.3%。

(3)在 CF 和 CB 两种导电填料体积差异较大的情



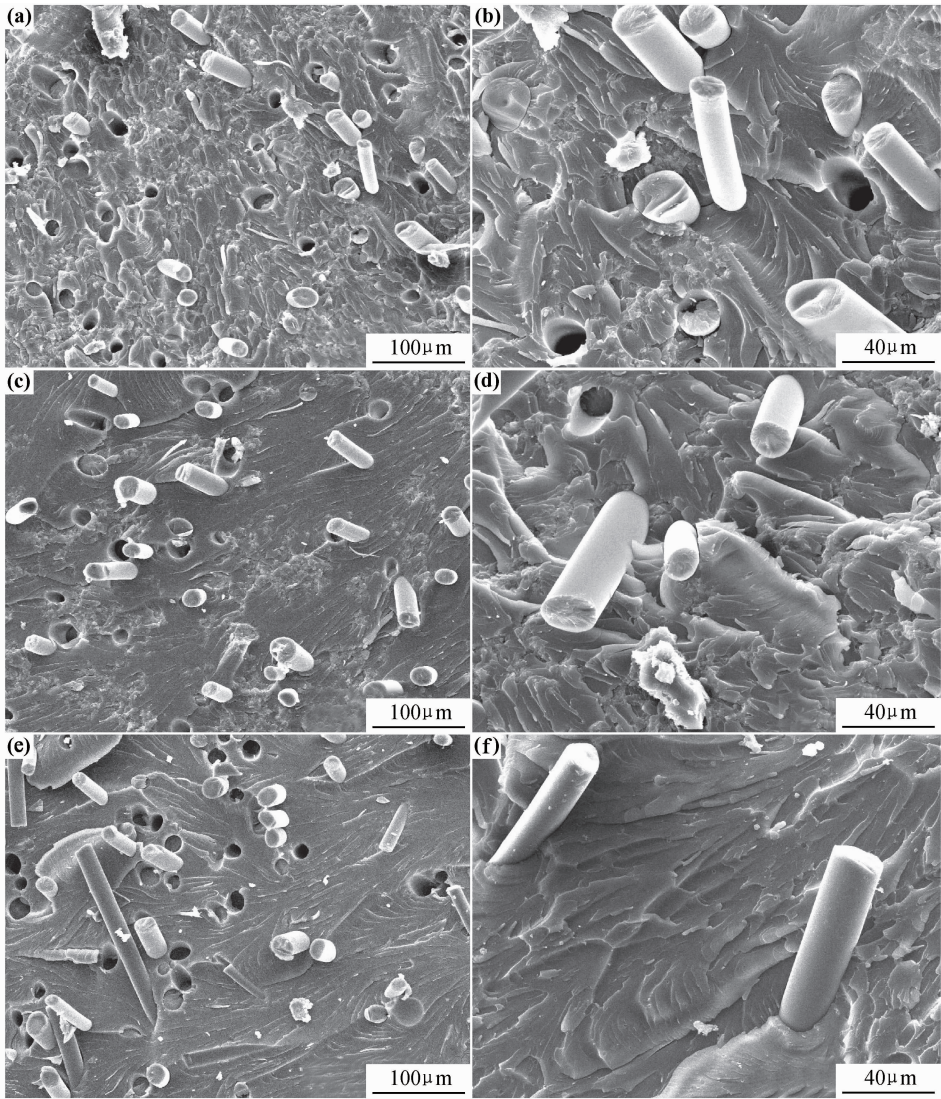


图 6 不同成型方式的 UPR/CF/CB 复合材料的拉伸断口形貌(SEM)

(a),(b)常规成型;(c),(d)电场诱导(轴向);(e),(f)电场诱导(法向)

Fig. 6 The tensile fracture-surface SEM morphology of UPR/CF/CB composite with different molding  
(a),(b)conventional molding;(c),(d) electric field induced (axial);(e),(f) electric field induced (normal)

况下,CF 成为复合材料力学性能的主要增强相。由于 CF 未受电场诱导影响,同组分导电填料的电场诱导成型复合材料在电场线轴向和法向基本力学性能基本保持一致,与常规成型的复合材料差别不大,其基本力学性能保持各向同性。

参考文献

[1] 游佩林. 铁路罐车静电起电方程及静电放电的危害[J]. 铁道学报,1990,12(3):8—15.  
YOU Pei-lin. Equation of static electrification and hazards of electrostatic discharge with rail tanker[J]. Journal of the China Railway Society,1990,12(3):8—15.

[2] LIU Hui, LI Yan-qiang. Simulation research on control technology of micro-particle adhesion to surface[J]. Advanced Materials Research,2011,181—182:366—371.

[3] MARTIN C A, SANDLER J K W, WINDLE A H, et al. Electric field-induced aligned multi-wall carbon nanotube networks in epoxy composites[J]. Polymer,2005,46(3):877—886.

[4] 陈珂,熊传溪,舒本勤,等. PET 抗静电复合材料的性能研究[J]. 工程塑料应用,2008,36(6):5—8.  
CHEN Ke, XIONG Chuan-xi, SHU Ben-qin, et al. Study on properties of pet antistatic composites[J]. Engineering Plastics Application,2008,36(6):5—8.

[5] 王俊,王平华,唐龙祥,等. PP/ 碳纳米管复合材料的制备及电性能[J]. 高分子材料科学与工程,2011,27(1):138—141.  
WANG Jun, WANG Ping-hua, TANG Long-xiang, et al. Electrical property of PP/carbon nanotubes nanocomposites[J]. Polymer Materials Science & Engineering,2011,27(1):138—141.

[6] LIU Xiang-xuan, ZHANG Ze-yang, WU You-peng. Absorption properties of carbon black/silicon carbide microwave absorbers [J]. Composites Part B:Engineering,2011,42(2):326—329.

- [7] VAIDYA S. Experimental evaluation of electrical conductivity of carbon fiber reinforced fly-ash based geopolymer[J]. Smart Structures and Systems, 2011, 7(1): 27—40.
- [8] 杜彦, 季铁正, 唐婷. 聚乙烯基导电复合材料的研究[J]. 中国塑料, 2012, 26(4): 22—26.  
DU Yan, JI Tie-zheng, TANG Ting. Research on polyethylene-based electrical conductive composites[J]. China Plastics, 2012, 26(4): 22—26.
- [9] 曹清华, 孟庆荣, 贾伟灿, 等. 高比表面积炭黑/聚丙烯导电复合材料[J]. 复合材料学报, 2012, 29(2): 59—64.  
CAO Qing-hua, MENG Qing-rong, JIA Wei-can, et al. Conductive composites of high surface area carbon black/polypropylene[J]. Acta Materiea Composita Sinica, 2012, 29(2): 59—64.
- [10] 戚亚光. 世界导电塑料工业化进展[J]. 工程塑料应用, 2008, 36(3): 73—77.  
QI Ya-guang. Progress in industrialization of worldwide conductive plastics[J]. China Plastics Industry, 2008, 36(3): 73—77.
- [11] TANG L S, MARIATTI M. Comparison on the properties of nickel-coated graphite(NCG) and graphite particles as conductive fillers in polypropylene (PP) composites[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2009, 48(6): 614—620.
- [12] 周生泰, 王伟, 冯绍华. 低密度聚乙烯基碳黑导电复合材料性能研究[J]. 现代塑料加工应用, 2012, 24(3): 24—26.  
ZHOU Sheng-tai, WANG Wei, FENG Shao-hua. Study on properties of carbon-filled-LDPE conductive composites[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2012, 24(3): 24—26.
- [13] 金政, 闫善涛, 李瑞琦, 等. 石墨/ABS树脂导电复合材料的研究[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2012, 29(1): 95—98.  
JING Zheng, YAN Shan-tao, LI Rui-qi, et al. Study on graphite /ABS resin conductive composites[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2012, 29(1): 95—98.
- [14] LEE Y B, LEE C H, KIM K M, et al. Preparation and properties on the graphite/polypropylene composite bipolar plates with a 304 stainless steel by compression molding for PEM fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(13): 7621—7627.
- [15] CHUNG S, HWANG J, LEE J. Conductivity of single walled carbon nanotubes deposited by composite electric field guided assembly (CEGA) method[J]. Current Applied Physics, 2006, 6(S1): 161—165.
- [16] 王海泉, 陈国华. 电场诱导粒子取向排列的研究进展[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2008, 29(4): 490—494.  
WANG Hai-quan, CHEN Guo-hua. Review on the orientation and alignment of particles induced by electric field[J]. Journal of Huaqiao University(Natural Science), 2008, 29(4): 490—494.
- [17] YAN Ding-xiang, DAI Kun, XIANG Zhi-dong, et al. Electrical conductivity and major mechanical and thermal properties of carbon nanotube-filled polyurethane foams[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 120(5): 3014—3019.
- [18] PRASSE T, CAVAILLE J Y, BAUHOFFER W. Electric anisotropy of carbon nanofibre/epoxy resin composites due to electric field induced alignment[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63: 1835—1841.
- [19] TIE W, YANG G H, BHATTACHARYYA, et al. Electric-field-induced dispersion of multiwalled carbon nanotubes in nematic liquid crystal[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2011, 115(44): 21652—21658.
- [20] WANG H Q, ZHANG H Y, ZHAO W F, et al. Preparation of polymer/oriented graphite nanosheet composite by electric field inducement[J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(1): 238—243.
- [21] WANG H Q, WANG L T, ZHANG H Y. Alignment of graphite nanosheet induced by electric field[J]. Advanced Materials Research, 2011, 279: 157—160.
- [22] NATTHAKARN R, SUPAKANOK T, PIYASAN P. Alignment of carbon nanotubes in polyimide under electric and magnetic fields[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 123(6): 3470—3475.
- [23] NORMAN D A, ROBERTSON R E. The effect of fiber orientation on the toughening of short fiber reinforced polymers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 90(10): 2740—2751.
- [24] KIM G. Thermo-physical responses of polymeric composites tailored by electric field[J]. Composites Science and Technology, 2005, 65(11—12): 1728—1735.
- [25] PECHOVSKAYA K, MIL'MAN T, DOGADKIN B. Structure and properties of loaded rubber mixtures. IX. modification of carbon structures by repeated deformations[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1953, 26(4): 810—820.
- [26] 苏洪钎, 祝晓虹, 蒋渭渭, 等. 聚乙烯/导电炭黑复合材料的电流-电压特性[J]. 化学物理学报, 1989, 2(2): 151—159.  
SU Hong-qian, ZHU Xiao-hong, JIANG Huai-wei, et al. On the current-voltage characteristics of polyethylene-carbon black conductive composites[J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 1989, 2(2): 151—159.
- [27] JONES T B. Dielectrophoretic force calculation[J]. Journal of Electrostatics, 1979, 6(1): 69—82.
- [28] BÖTTCHER C J F. Theory of Electric Polarization[M]. New York: Elsevier, 1973.

**基金项目:**国家自然科学基金重点资助项目(51131001); 国家科技基础条件平台建设项目资助(2005DKA10400)

**收稿日期:**2012-01-12; **修订日期:**2012-11-24

**作者简介:**赵博(1984—), 男, 博士研究生, 研究方向为纤维增强型高分子材料的性能研究和金属腐蚀与防护, 联系地址: 北京科技大学新材料技术研究院(100083), E-mail: zhaobo19840626@gmail.com