

## 十二烷基硫酸钠对多壁碳纳米管/聚对苯二甲酸乙二醇酯 复合材料性能的影响\*

辛 菲<sup>1\*\*</sup> 崔海龙<sup>2</sup> 许国志<sup>1</sup> 徐文国<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>北京工商大学材料与机械工程学院材料科学与工程系 北京 100048)

(<sup>2</sup>北京理工大学理学院化学系 北京 100081)

**摘 要** 用十二烷基硫酸钠(SDS)作为一种改性剂处理多壁碳纳米管(MWCNT), SDS 处理后的 MWCNT 命名为 SCNT, 并采用微型挤出机和微型注塑机分别制备了 MWCNT/PET 和 SCNT/PET 复合材料. 从材料的微观结构, 导电性能, 结晶性能和机械性能等角度, 研究了 SDS 对 MWCNT/PET 复合材料性能的影响. 结果表明, SDS 处理能有效改善 MWCNT 在 PET 基体中的分散状态, 促进导电网络的生成, 可将复合材料电导率的逾渗值从 2.35 wt% 显著降低到 0.18 wt%; 在添加量为 1 wt% 的条件下, MWCNT 对 PET 的导电性能没有影响, 而 SDS 处理 MWCNT 可使 PET 的电导率从  $1 \times 10^{-17}$  S/cm 提高到  $6.5 \times 10^{-8}$  S/cm; SDS 对 MWCNT 的处理, 不仅对提高 PET 的导电性能, 而且较 MWCNT 对提高 PET 的机械性能有着更显著的作用效果. 在添加量为 1 wt% 时, SDS 处理的 MWCNT 可使 PET 基体的拉伸强度提高 31%, 拉伸模量提高 58%.

**关键词** 多壁碳纳米管, 十二烷基硫酸钠, 聚对苯二甲酸乙二醇酯, 电导率

聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)是一种半结晶的热塑性树脂, 具有十分优良的特性并被广泛应用于如纤维, 薄膜, 包装材料和电子产品等众多方面. 因此对于 PET 在电学, 结晶行为, 抗静电, 力学以及其它性能的增强都会产生潜在的工业应用价值. 而且, PET 耐化学腐蚀, 因此一种具有高导电性和优良机械性能的 PET 复合材料制品可以被用来制作燃料电池的双极板.

为了使不导电的聚合物获得导电性, 通常是往聚合物基体中加入导电填料. 常用的导电填料包括金属粉末, 金属纤维, 碳纳米管(CNT), 碳纤维, 炭黑, 石墨等<sup>[1-8]</sup>. 这些导电填料-聚合物复合材料由于存在好的工业应用前景而引起了人们的广泛关注.

在上述的导电填料中, CNT 因为独特的分子结构显示出了优秀的电学和力学性能. CNT 的基础研究和应用研究最近发展很快<sup>[6,9-14]</sup>. 然而, 在 CNT 能够被大量应用于聚合物之前仍然有众多的难题需要克服. 例如, CNT 通常会纠缠在一起并且在聚合物中容易团聚. CNT 和聚合物之间的弱的界面结合力会影响 CNT 各项优良性能的充分利用.

表面活性剂已经被用于对 CNT 进行表面处

理<sup>[15-28]</sup>. 表面活性剂改性 CNT 有以下几点好处. 首先, 这种方法不会破坏 CNT 的结构从而保持了 CNT 的电学和力学性能<sup>[18]</sup>. 其次, 能够通过增强填料和聚合物之间的界面结合力来提高复合材料的加工性能和耐久性<sup>[19-21]</sup>, 提高机械性能<sup>[22]</sup>, 降低复合材料的黏度和提高 CNT 在聚合物或溶液中的分散程度<sup>[23-25]</sup>. 现有文章大部分都集中在对分散程度和热性能的影响, 但是对于含表面活性剂处理的 MWCNT 复合材料的电学性能, 特别是 MWCNT/PET 导电复合材料方面鲜见文献报道.

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料和仪器

聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET), 美国 Aldrich 公司, 数均分子量  $2.5 \times 10^4$ ; 十二烷基硫酸钠(SDS), 美国 Aldrich 公司; 多壁碳纳米管(MWCNT), 直径和长度分别为 10 ~ 15 nm 和 10 ~ 20  $\mu\text{m}$ , 韩国 Iljin Nano Tech 公司.

Cole-Parmer 8900 超声振荡器, 美国 Cole-Parmer 公司; HAAKE 微型双螺杆挤出机和 HAAKE 微型注塑机, 美国 Thermo 公司; JEOL JSM6360LA 扫描电镜, 日本 JEOL 公司; Instron 3360 型拉伸机, 美国英斯特朗公司; Q-100 差示扫

\* 2011-06-15 收稿, 2011-07-13 修稿; \*\* 通讯联系人, E-mail: xin00fei@gmail.com

doi: 10.3724/SP.J.1105.2011.11202

描量热仪,美国 TA 公司.

## 1.2 用 SDS 对 MWCNT 的处理

将 500 mg 的 MWCNT 和 500 mg 的 SDS 一起加入烧杯中,并注入 200 mL 去离子水混合后,使用美国 Cole-Parmer 8900 超声振荡器超声分散 1 h. 而后将物料放入真空烘箱中在 80℃ 下干燥 4 h 以去除水分. 干燥后的产物为表面附着有 SDS 的 MWCNT,在此略称为 SCNT.

## 1.3 样品的制备

将 PET 和未改性 MWCNT,SDS 或 SCNT 按不同配比混合后,用微型双螺杆挤出机(HAAKE)在温度为 280℃、转速为 70 r/min 的条件下混炼,并将得到的 PET 复合材料用微型注塑机(HAAKE)注塑成不同形状的样条,用于各种性能测试. 样品被命名为  $x$ MWCNT/PET 或  $x$ SCNT/PET,这里  $x$  代表 MWCNT 或 SCNT 在 PET 复合材料中的添加量(wt%). 例如,1MWCNT/PET 代表复合材料中含有 1 wt% 的 MWCNT,1SCNT/PET 代表复合材料中含有 1 wt% 的 SCNT.

## 1.4 电导率测试

复合材料的体积电导率根据 ASTM D4496 标准进行. 测试时需要在马弗炉中在 280℃ 下回火处理 30 min,而后将已知面积和厚度的样品置于两个铜电极之间,使用美国福禄克公司的 Fluke 110 数字万用表测定直流电阻. 为了降低由于样品表面不平导致的测试误差,在样品表面与接触电极之间垫上一张碳纸. 电导率测试的下限是  $1 \times 10^{-10}$  S/cm.

体积电导率根据公式(1)计算.

$$\sigma = \frac{H}{RWL} \quad (1)$$

式中  $\sigma$  是体积电导率,单位是 S/cm, $L$  是样品的长度,单位是 cm, $W$  是样品的宽度,单位是 cm, $H$  是样品的厚度,单位是 cm, $R$  是测得的电阻,单位是  $\Omega$ .

一般填充型导电复合材料的电导率能够用逾渗值理论相关比例定律来描述. 如公式(2)所示:

$$\sigma = \sigma_0(m - m_c)^t \text{ for } m > m_c \quad (2)$$

在公式(2)中, $\sigma$  是材料的电导率, $m$  是 SCNT 或 CNT 的添加量, $m_c$  是其相应的逾渗值,指数  $t$  与维数相关<sup>[29~34]</sup>.

## 1.5 性能表征

PET 中碳纳米管的分散状况用日本 JEOL 公司的 JEOL JSM6360LA 扫描电镜来观察. 材料机

械性能根据 ASTM D638 标准在室温下用美国英斯特朗公司的 Instron 3360 型拉伸机在 50 mm/min 的速率下测定. 材料的结晶性能用美国 TA 公司的 Q-100 差示扫描量热仪在  $N_2$  保护下测定, DSC 测定时,首先将样品加热到 300℃,然后以 10 K/min 的速率降温到 40℃,再以 10 K/min 的速率升温至 300℃.

# 2 结果与讨论

## 2.1 复合材料的微观结构

将样品事先在液氮中淬断,并采用 SEM 观察了复合材料中碳纳米管的分布形态. 图 1 中 1(a) 和 1(c) 的显微照片是取自 MWCNT/PET 复合材料,图 1(b) 和 1(d) 取自 SCNT/PET 复合材料断面. 照片中白色像管状的部分为 MWCNT 或 SCNT. 从显微照片中可以看出,两体系的 PET 基体中的碳纳米管在微米尺度上均有相对良好的分散,但在更精细的分散尺度上两体系有着明显的差异. 如在 SCNT/PET 复合材料中,无论 SCNT 的添加量是 5 wt% 还是 10 wt%,在其样品断面上 SCNT 的分布都较为均匀,几乎看不出有 SCNT 团聚的区域. 但在 MWCNT/PET 复合材料中 MWCNT 团聚的现象非常明显,在其断面上可以看到有较多的 MWCNT 团聚区域,这些 MWCNT 团聚区域尺度大于 1  $\mu$ m 以上,且随 MWCNT 添加量增加团聚区域变得更加密集.

以上结果说明,SDS 对 MWCNT 的处理确实能显著地减弱 MWCNT 的团聚倾向,提高其在 PET 基体中的分散程度. 这种作用被认为和 SDS 能够降低 MWCNT 之间的范德华力,且附着在 MWCNT 表面的 SDS 可以提高 MWCNT 之间的空间位阻有关,显然这种作用有助于改善 SCNT 和 PET 基体间的界面性能,也有助于促进 SCNT 在 PET 基体中分散并形成有效的导电网络.

## 2.2 复合材料的电导率

图 2 给出 SCNT/PET 和 MWCNT/PET 复合材料的电导率和碳纳米管添加量之间的关系. 从图中可以看出,纯的 PET 是一种十分优良的绝缘材料,我们测定其体积电导率仅为  $10^{-17}$  S/cm 和文献报道<sup>[35]</sup> 基本一致. 而加入 MWCNT 或 SCNT 后,材料的电导率虽然随碳纳米管添加量增大得到较大的提高,但两体系表现出不同的导电行为. 其中,SCNT/PET 复合体系因其 MWCNT 经 SDS 表面处理,则相对 MWCNT 而言,表现极其优异的提

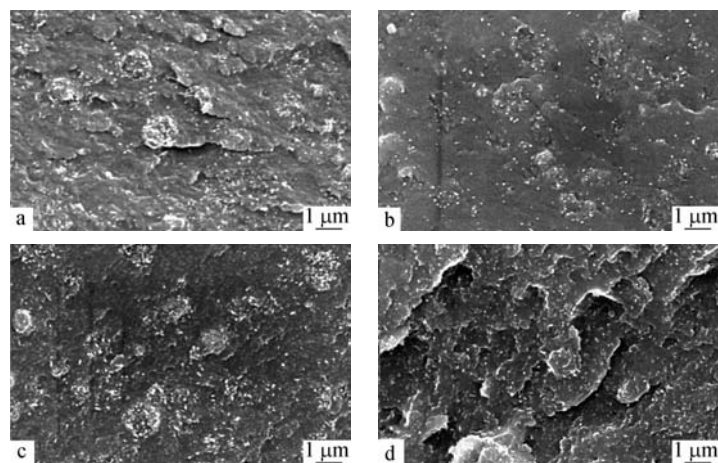


Fig. 1 The SEM micrographs of MWCNT/PET and SCNT/PET composites: (a) 5MWCNT/PET, (b) 5SCNT/PET, (c) 10 MWCNT/PET and (d) 10SCNT/PET

高材料导电性能的效率. 例如, 在 MWCNT 和 SCNT 都为 1 wt% 的添加量条件下, MWCNT/PET 复合体系的导电性并未得到明显的改善, 而 SCNT/PET 复合体系的导电率可达  $6.5 \times 10^{-8}$  S/cm, 比 MWCNT/PET 复合体系高 10 个数量级.

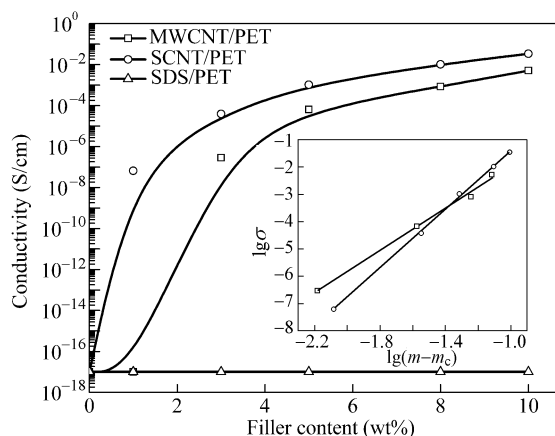


Fig. 2 The electrical conductivity of MWCNT/PET, SCNT/PET and SDS/PET composites

由于导电填料在其添加量超过逾渗值后才能形成有效的导电网络, 所以材料的电导率在超过逾渗值后一般会有几个数量级的明显增高. 在本文中, 因为 MWCNT 的密度只能被粗略估计为 ( $1.4 \sim 1.9 \text{ g/cm}^3$ ), 因此用其质量百分数替代体积百分数显得更为合适. 如图 2 所示, SCNT/PET 和 CNT/PET 导电复合体系均能与公式 (2) 给出的逾渗行为有很好的拟合. 且根据公式 (2) 得到的拟合曲线, SCNT/PET 和 MWCNT/PET 复合材料电导率的逾渗值分别是  $m_c = 0.18 \text{ wt\%}$  和  $m_c = 2.35 \text{ wt\%}$ , 该结果也表明 SCNT/PET 复合体系

确实比 MWCNT/PET 体系有着更好的导电性能.

一般碳纳米管/高分子复合材料的导电性能和碳纳米管在基体中的分散及分布状态有着密切的关系, 而本研究的 SCNT/PET 复合材料中 SCNT 的分散状态较好, 无疑意味着 SCNT 能够比 MWCNT 构建更多的导电通道, 使体系具有更高的电导率. 但因 SCNT 处理时采用了 1:1 的 MWCNT 和 SDS 比例, 且在干燥处理后 SDS 几乎都留在 MWCNT 的表面上. 为了确定 SDS 自身是否也对导电性能产生了一定影响, 本研究制备了 SDS/PET 样品并测定了其电导率和添加量的关系. 通过图 2 中的 SDS/PET 体系电学性能曲线可以看出, SDS 本身对材料的导电性能几乎没有贡献, 即使添加量达到 10 wt%, 仍然看不出材料电导率的提高. 该结果表明, SCNT/PET 复合材料之所以比 MWCNT/PET 体系有着更好的导电性能, 主要在于 SCNT 在 PET 基体中具有更好的分布状态, 更有利于形成有效的导电网络所致, 而和 SDS 的存在无关.

### 2.3 复合材料的结晶性能

已经有文献报道碳纳米管能够作为成核剂, 对多种聚合物有着较强的结晶促进作用<sup>[36-41]</sup>. 在此, 本研究采用 DSC 研究了复合材料的结晶性能. 因 MWCNT 和 SCNT 在整个 DSC 测试的 40 ~ 300℃ 温度区间均不可能显示出任何的热转变行为, 则体系中 PET 的结晶度  $X_c$  可以用公式 (3) 计算得出.

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{(1 - W_f) \cdot \Delta H_m^0} \quad (3)$$

式 (3) 中  $W_f$  是填料的质量分数,  $H_m$  是体系的熔

熔融,  $H_m^0$  是 100% 纯 PET 的熔融焓. 根据文献的数据<sup>[42]</sup>, PET 的  $H_m^0$  值为 140 J/g.

图 3 显示 SCNT/PET 和 MWCNT/PET 复合体系从 300℃ 以 10 K/min 速率降温下得到的非等温结晶曲线. 表 1 给出 SCNT/PET 和 MWCNT/PET 复合体系的各种热力学参数, 其中各体系的结晶度由式(3)计算得出.

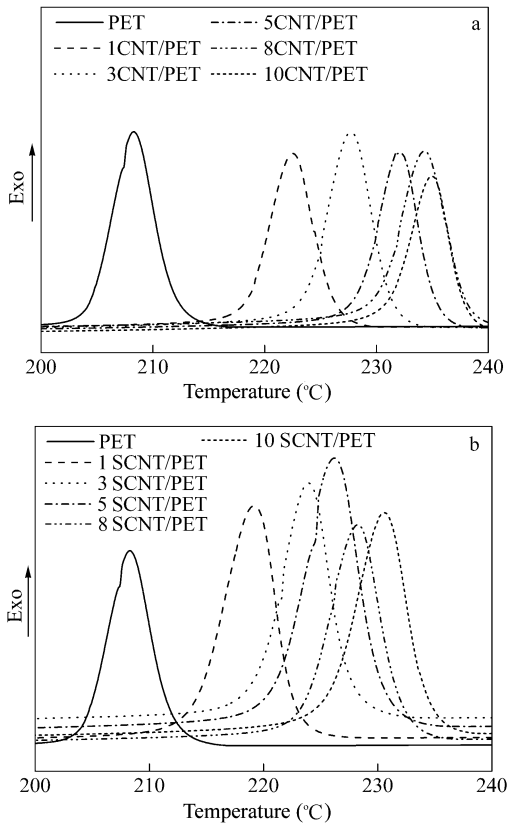


Fig. 3 The Nonisothermal crystallization curves of (a) MWCNT/PET and (b) SCNT/PET composites

从图 3 可以看出, 对于每一种复合体系而言, 曲线上只出现 1 个放热峰, 显然这个放热峰是 PET 基体的结晶峰, 其峰值温度被定义为结晶温度  $T_c$ . 由图 3 可知, 纯 PET 的结晶温度是 208.3℃, 而 SCNT 或 MWCNT 的添加均使 PET 基体的结晶温度向高温方向偏移. 特别是在 1 wt% 的添加量条件下, 体系的结晶温度  $T_c$  向高温移动的程度非常明显, 而后虽然随着 SCNT 或 MWCNT 添加量的增加更加向高温方向移动, 但移动程度逐渐趋缓. 表 1 的  $T_c$  数据也表明, SCNT 或 MWCNT 对各体系中 PET 基体熔融温度(标记为  $T_m$ )影响较小, 但对  $T_c$  较大, 且 MWCNT 对  $T_c$  的影响要比 SCNT 大得多. 例如含 1wt% MWCNT 的 PET 复合材料的结晶温度移动到 223.4℃, 较纯 PET 提高 15.3℃, 而相应 SCNT/PET 复合材料的结晶温度为 219.6℃, 只提高 11.3℃.

尽管 SCNT 和 MWCNT 对 PET 有很好的结晶成核促进作用, 但图 4 结果表明, SCNT 和 MWCNT 的添加将导致 PET 基体的结晶度有较大幅度的降低, 其中 SCNT 引起的 PET 结晶度的降低程度尤为明显. 这种现象被认为是, SCNT 和 MWCNT 的加入虽然可以提供促进 PET 的结晶成核的位点, 但同时也将对 PET 分子链的运动造成较大阻碍, 最终影响了 PET 球晶的成长所导致的结果<sup>[43]</sup>. 而 SCNT/PET 和 MWCNT/PET 复合体系中 PET 基体结晶行为的差异, 也说明 MWCNT 确实对 PET 树脂产生较好结晶成核促进作用的同时也抑制着其球晶的成长, 而 SDS 的存在则不仅对 MWCNT 的结晶成核促进作用, 也对 PET 球晶的成长有一定程度的妨害.

Table 1 Crystallization temperature  $T_c$ , melting temperature  $T_m$ , and crystallinity  $X_c$  for MWCNT/PET and SCNT/PET composites

| Code        | $T_c$ (°C) | $T_m$ (°C) | $X_c$ (%) | Code       | $T_c$ (°C) | $T_m$ (°C) | $X_c$ (%) |
|-------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|-----------|
| PET         | 208.3      | 258.7      | 30.3      | —          | —          | —          | —         |
| 1MWCNT/PET  | 223.4      | 257.6      | 29.4      | 1SCNT/PET  | 219.6      | 257.5      | 28.5      |
| 3MWCNT/PET  | 228.0      | 257.4      | 27.8      | 3SCNT/PET  | 223.8      | 258.1      | 25.6      |
| 5MWCNT/PET  | 232.4      | 257.4      | 26.8      | 5SCNT/PET  | 225.9      | 257.8      | 23.2      |
| 8MWCNT/PET  | 234.6      | 258.5      | 26.0      | 8SCNT/PET  | 228.5      | 258.2      | 22.5      |
| 10MWCNT/PET | 235.1      | 258.6      | 25.9      | 10SCNT/PET | 230.4      | 258.1      | 22.3      |

2.4 复合材料的机械性能

SCNT/PET、MWCNT/PET 导电复合体系的拉伸性能和 MWCNT 或 SCNT 添加量的关系分别如图 5 和图 6 所示. 从图可知, 当 MWCNT 或 SCNT 添加量在 1 wt% 以内时, 两体系的拉伸模量和拉伸强度急剧增大, 而后 MWCNT/PET 复合体系则

基本不再变化, 但 SCNT/PET 复合体系仍显示出随着 SCNT 添加量增加而增加的倾向.

例如, 对于拉伸模量而言, 当 MWCNT 或 SCNT 添加量为 1 wt% 时, 两体系的拉伸模量均较 PET 基体提高了 58% 左右且相差不大, 但当 MWCNT 或 SCNT 添加量达到 10 wt% 时, SCNT/

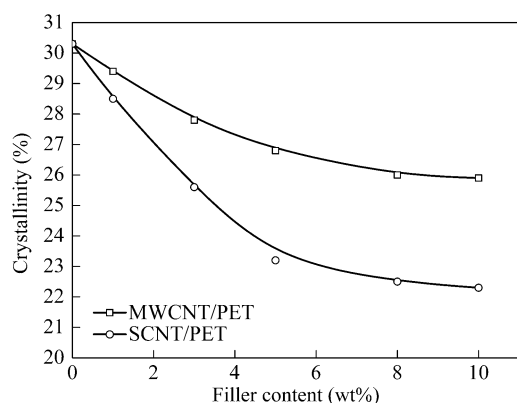


Fig. 4 The crystallinity curves of MWCNT/PET and SCNT/PET composites

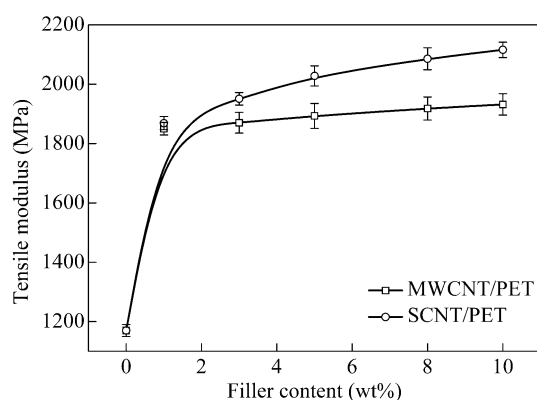


Fig. 5 The tensile modulus of MWCNT/PET and SCNT/PET composites

PET 复合体系的拉伸模量较 PET 基体提高了 81%, 而 MWCNT/PET 复合体系只提高了 65%。对于拉伸强度而言, 当 MWCNT 或 SCNT 添加量为 1 wt% 时, SCNT/PET 和 MWCNT/PET 导电复合体系的拉伸强度分别较 PET 基体提高 31% 和 23%, 但随 MWCNT 或 SCNT 添加量的增加, MWCNT/PET 复合体系的拉伸强度不再增大, 而 SCNT/PET 复合体系的拉伸强度仍保持增大的倾向。

以上事实表明, SDS 对 MWCNT 的处理, 不仅

对提高 PET 的导电性能, 而且对提高 PET 的机械性能有着显著的作用效果。SCNT/PET 复合体系的结晶度低, 但其拉伸强度和拉伸模量高于 MWCNT/PET 复合体系, 说明碳纳米管在 PET 基体中的分散状态及其和基体间的界面性能所导致的贡献, 大于其诱导 PET 基体结晶所导致的贡献。这也说明前述两复合材料体系微观形态差异, 即 SCNT 在 PET 中有更好的分散状况且与 PET 有较好界面性能的性质, 即导致复合材料有更好的导电性能, 也能够对材料的拉伸模量提供更好的增强作用。

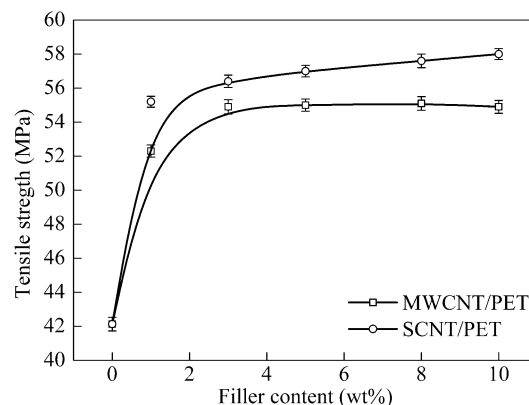


Fig. 6 The tensile stress of MWCNT/PET and SCNT/PET composites

### 3 结论

以上研究结果表明, SDS 对 MWCNT 的表面处理, 有助于改善 SCNT 和 PET 基体间的界面性能, 也有助于促进 SCNT 在 PET 基体中分散并形成有效的导电网络。可将碳纳米管/PET 复合材料电导率的逾渗值从 2.35 wt% 降到 0.18 wt%, 且在添加量为 1 wt% 的条件下, 可使 PET 的电导率提高 10 个数量级。此外, SDS 对 MWCNT 的处理, 不仅对提高 PET 的导电性能, 而且对提高 PET 的机械性能有着显著的作用效果。

## REFERENCES

- 1 Lee H H, Chou K S, Shih Z W. *Int J Adhes Adhes*, 2005, 25(5): 437 ~ 441
- 2 Sancaktar E, Dilsiz N J. *J Adhes Sci Technol*, 1999, 13(6): 679 ~ 693
- 3 Pötschke P, Pegel S, Claes M, Bonduel D. *Macromol Rapid Commun*, 2008, 29(3): 244 ~ 251
- 4 Sandler J, Shaffer M. S. P, Prasse T, Bauhofer W, Schulte K, Windle A H. *Polymer*, 1999, 40(21): 5967 ~ 5971
- 5 Ajayan P M, Schadler L S, Giannaris C, Rubio A. *Adv Mater*, 2000, 12(10): 750 ~ 753
- 6 Moniruzzaman M, Winey K I. *Macromolecules*, 2006, 39(16): 5194 ~ 5205
- 7 Lozano K, Bonilla-Rios J, Barrera E V. *J Appl Polym Sci*, 2001, 80(8): 1162 ~ 1172
- 8 Yin Hebin(尹贺滨), Bao Hada(鲍哈达), Li Jie(李杰), Guo Zhaoxia(郭朝霞), Yu Jian(于建). *Acta Polymerica Sinica(高分子学报)*, 2010, 9: 1152 ~ 1156
- 9 Thostenson E T, Ren Z F, Chou T W. *Compos Sci Technol*, 2001, 61(13): 1899 ~ 1912
- 10 Hu Y, Shenderova O A, Hu Z, Padgett C W, Brenner D W. *Rep Prog Phys*, 2006, 69(6): 1847 ~ 1895
- 11 Lin Y, Taylor S, Li H, Fernando K A S, Qu L, Wang W, Gu L, Zhou B, Sun Y P. *J Mater Chem*, 2004, 14(4): 527 ~ 531
- 12 Sun Yao(孙尧), Bao Hada(鲍哈达), Jia Mingyin(贾明印), Guo Zhaoxia(郭朝霞), Yu Jian(于建). *Acta Polymerica Sinica(高分子学报)*, 2009, (7): 684 ~ 688
- 13 Wang Z K, Hu Q L, Cai L. *Chinese J Polym Sci*, 2010, 28(5): 801 ~ 806
- 14 Sun Minqiang(孙敏强), Zhu Zhongze(朱忠泽), Li Xingwei(李星玮), Wang Gengchao(王庚超). *Acta Polymerica Sinica(高分子学报)*, 2011, (6): 639 ~ 644
- 15 Islam M F, Rojas E. *Nano lett*, 2003, 3(2): 269 ~ 273
- 16 Cordero N A, Alonso J A. *J Phys Chem C*, 2010, 114(41): 17249 ~ 17256
- 17 Xu H, Abe H, Naito M, Fukumori Y, Ichikawa H, Endoh S, Hata K. *Adv Powder Technol*, 2010, 21(5): 551 ~ 555
- 18 Vaisman L, Wagner H D, Marom G. *Adv Colloid Interface Sci*, 2006, 128-130: 37 ~ 46
- 19 Rausch J, Zhuang R C, Mäder E. *J Appl Polym Sci*, 2010, 117(5): 2583 ~ 2590
- 20 Bai Y, Lin D, Wu F, Wang Z, Xing B. *Chemosphere*, 2010, 79(4): 362 ~ 367
- 21 Carvalho E J F, Dos Santos M C. *ACS Nano*, 2010, 4(2): 765 ~ 770
- 22 Li Y, Cousins B G, Ulijn R V, Kinloch I A. *Langmuir*, 2009, 25(19): 11760 ~ 11767
- 23 Angelikopoulos P, Bock H. *J Phys Chem B*, 2008, 112(44): 13793 ~ 13801
- 24 Tummala N R, Striolo A. *ACS Nano*, 2009, 3(3): 595 ~ 602
- 25 Cousins B G, Das A K, Sharma R, Li Y, McNamara J P, Hillier I H, Kinloch I A, Ulijn R V. *Small*, 2009, 5(5): 587 ~ 590
- 26 Rastogi R, Kaushal R, Tripathi S K, Sharma A L, Kaur I, Bharadwaj L M. *J Colloid Interface Sci*, 2008, 328(2): 421 ~ 428
- 27 Haggemueller R, Rahatekar S S, Fagan J A, Chun J, Becker M L, Naik R R, Krauss T, Gilman J W. *Langmuir*, 2008, 24(9): 5070 ~ 5078
- 28 Moore V C, Strano M S, Haroz E H, Hauge R H, Smalley R E, Schmidt J, Talmon Y. *Nano Lett*, 2003, 3(10): 1379 ~ 1382
- 29 Ahmad K, Pan W, Shi S L. *Appl Phys Lett*, 2006, 89(13): 133122-1 ~ 3
- 30 Jeevanandam P, Vasudevan S. *J Chem Phys*, 1998, 109(18): 8102 ~ 8108
- 31 Barrau S, Demont P, Peigney A, Laurent C, Lacabanne C. *Macromolecules*, 2003, 36(14): 5187 ~ 5194
- 32 Coleman J N, Curran S, Dalton A B, Davey A P, McCarthy B, Blau W, Barklie R C. *Phys Rev B*, 1998, 58(12): R7492 ~ R7495
- 33 Dutta P, Biswas S, Ghosh M, De S K, Chatterjee S. *Synth Met*, 2001, 122(2): 455 ~ 461
- 34 Kilbride B E, Coleman J N, Fraysse J, Fournet P, Cadek M, Drury A, Hutzler S, Roth S, Blau W J. *J Appl Phys*, 2002, 92(7): 4024 ~ 4030
- 35 Masanoto J, Iwamoto T. *Polymer data handbook*. London: Oxford University, 1999
- 36 Duan Q, Wang B, Hong B, Wang H. *J Macromol Sci B*, 2010, 49(6): 1094 ~ 1104
- 37 Bhattacharyya A R, Sreekumar T V, Liu T, Kumar S, Ericson L M, Hauge R H, Smalley R E. *Polymer*, 2003, 44(8): 2373 ~ 2377
- 38 Probst O, Moore E M, Resasco D E, Grady B P. *Polymer*, 2004, 45(13): 4437 ~ 4443
- 39 Yang S, Castilleja J R, Barrera E V, Lozano K. *Polym Degrad Stab*, 2004, 83(3): 383 ~ 388
- 40 Ryan K P, Lisbon S M, Drury A, Cadek M, Ruether M, O'Flaherty S M, Barron V, McCarthy B, Byrne H J, Blau W J, Coleman J N. *Chem Phys Lett*, 2004, 391(4-6): 329 ~ 333
- 41 Anoop A K, Agarwal U S, Joseph R. *Polymer*, 2006, 47(11): 3976 ~ 3980
- 42 Brandrup J, Immergut E H, Grulke E A, Abe A, Bloch D R. *Polymer Handbook*. 4<sup>th</sup> ed. New York: Wiley, 1999
- 43 Tsuji H, Kawashima Y, Takikawa H, Tanaka S. *Polymer*, 2007, 48(14): 4213 ~ 4225

## THE EFFECT OF SODIUM DODECYL SULFATE ON MULTI-WALLED CARBON NANOTUBE/POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) COMPOSITES

XIN Fei<sup>1</sup>, CUI Hailong<sup>2</sup>, XU Guozhi<sup>1</sup>, XU Wenguo<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Material Science and Engineering, School of Material and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048)

(<sup>2</sup> Department of Chemistry, School of Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

**Abstract** The multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) were modified using sodium dodecyl sulfate (SDS) as the aid and the SDS treated MWCNT was named as SCNT. We successfully prepared the multi-walled carbon nanotubes/poly(ethylene terephthalate) (MWCNT/PET) composites and SCNT/PET composites with the desired filler content. The effects of the SDS on the MWCNT/PET composites were investigated from several aspects such as microstructure, electrical conductivity, crystallization behavior and mechanical properties. The results showed that SDS treatment can effectively improve the dispersion of MWCNT in the PET matrix, accelerate the construction of the electrical conducting networks. The percolation threshold of the composites can be dramatically decreased from 2.35 wt% to 0.18 wt%. At the 1 wt% filler content, MWCNT cannot increase the electrical conductivity of the PET composites, but SCNT induced a dramatic increase of about 10 orders of magnitude in the electrical conductivity of the PET composites. SCNT not only increased the electrical conductivity of the PET composites, but also more effectively improved the mechanical properties of the PET composites compared with MWCNT. At the 1 wt% SDS treated MWCNT content, SDS treated MWCNTs increase the tensile strength of PET matrix by about 31% and the tensile modulus of PET matrix by about 58%. Not like MWCNT/PET composites, SCNT/PET composites increase the tensile strength with increasing filler content after 1 wt% loading. Being similar to MWCNT, SCNT could act as a nucleating agent to shift the crystallization temperature of PET matrix to higher temperatures but decrease crystallinity of PET matrix with increasing filler content. The role of SDS in these MWCNT/PET composites has been explored in detail.

**Keywords** Multi-walled carbon nanotube, Sodium dodecyl sulfate, Poly(ethylene terephthalate), Electrical conductivity