

文章编号: 1006-9941(2016)01-0096-05

## 含氟聚合物/多壁碳纳米管复合材料的导热性能

林聪妹, 曾贵玉, 刘佳辉, 黄忠, 巩飞艳, 张建虎, 刘世俊

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 为提高含氟聚合物 F2314 的导热性能, 采用多壁碳纳米管(MWCNTs)对 F2314 进行改性。用密炼混合法制备了 F2314/MWCNTs 复合材料。研究了 MWCNTs 含量、温度对 F2314/MWCNTs 复合材料的导热系数的影响。建立了 F2314/MWCNTs 复合材料的导热模型。结果表明, F2314/MWCNTs 复合材料的导热系数随 MWCNTs 含量增加而增大。当 MWCNTs 质量分数为 30% 时, 30 °C 下 F2314/MWCNTs 复合材料的导热系数高达  $0.647 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 比纯 F2314 的导热系数提高 3.43 倍。F2314/MWCNTs 复合材料的导热性能对温度的依赖性与 F2314 的相态转变密切相关。随着温度增加, F2314/MWCNTs 复合材料的导热系数先增加, 然后在玻璃化转变温度附近达到最大值, 接着逐渐降低。有效介质方法修正公式的计算结果与实验吻合较好, 表明该公式可以较好地模拟 F2314/MWCNTs 复合材料的导热性能。

**关键词:** 含氟聚合物; 多壁碳纳米管(MWCNTs); 导热性能; 界面热阻

**中图分类号:** TJ55; O64

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.01.016

### 1 引言

作为一种新型的准一维功能材料, 碳纳米管具有高模量、高强度、良好的导电性和导热性, 在复合材料、电化学器材、储氢材料、场发射装置、传感器、催化剂载体等方面获得广泛应用<sup>[1-2]</sup>。碳纳米管是迄今为止人们所知最好的导热材料。根据理论预测, 多壁碳纳米管的导热系数可达  $3000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ <sup>[3]</sup>, 而单壁碳纳米管的导热系数更高, 可达  $6000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ <sup>[4]</sup>。试验结果显示, 添加少量的碳纳米管可以显著改善有机流体或者高聚物的导热性<sup>[5-6]</sup>。Biercuk 等人<sup>[5]</sup>制备了单壁碳纳米管/环氧树脂复合材料, 40 K 和室温下导热性能比环氧树脂分别提高 70% 和 125%。Hong 等人<sup>[7]</sup>通过添加 1.0% 单壁碳纳米管和 4.0% 多壁碳纳米管将聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的导热系数从  $0.24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  分别提高至  $2.43 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  和  $3.44 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

复合材料的导热系数不仅取决于材料本身导热性质, 还与界面热阻有重要关系。由于碳纳米管与高聚物基体间的界面热阻大<sup>[8]</sup>, 即使添加导热系数很高的

碳纳米管, 复合材料的导热系数增幅也较小。Cahill 团队<sup>[9]</sup>首次测试了碳纳米管悬浮液中碳纳米管与基体界面处的界面热阻, 指出较大的界面热阻限制了复合材料的热传导。据报道, 碳纳米管与基体界面处的界面热阻为  $8.3 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ <sup>[10]</sup>。可见, 界面热阻对碳纳米管复合材料的导热系数具有显著的影响。因此, 降低碳纳米管与高聚物间界面热阻成为复合材料领域的研究热点。赵瑾朝等<sup>[11]</sup>采用二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )包覆层作为过渡层, 降低聚氨酯(PU)与 MWCNTs 间的模量失配, 减少声子的界面散射, 提高 PU/ $\text{SiO}_2$ -MWCNT 复合材料的导热性能。当  $\text{SiO}_2$ -MWCNTs 的质量分数为 0.5% 和 1.0% 时, PU/ $\text{SiO}_2$ -MWCNT 复合材料的热导率比纯 PU 分别提高了 53.7% 和 63.8%。

近年来, 随着纳米科学技术的发展, 碳纳米管在含能材料领域的研究和应用引起了国内外学者的广泛关注<sup>[12]</sup>。但是关于碳纳米管对粘结剂体系导热性能影响的研究报道较少。本研究采用密炼混合方式制备了含氟聚合物 F2314/多壁碳纳米管(MWCNTs)复合材料, 利用激光脉冲法测试了复合材料的导热行为, 考察了碳纳米管含量和温度对复合材料导热行为的影响, 分析了 F2314/MWCNTs 复合材料的导热机理, 应用有效介质方法修正模型从理论上计算了复合材料的有效导热系数, 并模拟了复合材料的导热行为, 以期对碳纳米管导热复合材料在 PBX 中的应用提供理论和试验依据。

收稿日期: 2014-09-04; 修回日期: 2015-05-22

作者简介: 林聪妹(1985-), 女, 助理研究员, 主要从事高聚物粘结炸药配方设计和性能研究。e-mail: lincmei2009@163.com

通信联系人: 刘世俊(1975-), 男, 副研究员, 主要从事含能材料设计及性能研究。e-mail: lsj99@sohu.com

## 2 试验部分

### 2.1 原料

氟聚合物 F2314 (氯含量为 26.3%, 重均分子量为  $2.74 \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 多分散系数为 3.37) 由中昊晨光化工研究院生产; 多壁碳纳米管 (MWCNTs), 外径约为 20 nm, 长度约为 5  $\mu\text{m}$ , 深圳纳米港公司提供。

### 2.2 F2314/MWCNTs 复合材料的制备

将质量比为 2 : 98、5 : 95、10 : 90、20 : 80 和 30 : 70 的 MWCNTs 与 F2314 进行密炼混合, 然后微注塑制成  $\Phi 12.7 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  试样, 用于热物理性能测试, 分别记作 FC-1、FC-2、FC-3、FC-4 和 FC-5, 其成型密度分别为 2.023、2.028、2.031、2.038  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  和 2.049  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

### 2.3 微观形貌结构分析

利用 CamScan Apollo 300 型扫描电子显微镜

(SEM) 观察 F2314/MWCNTs 复合材料的形貌结构, 试验电压为 10 kV, 高真空模式。

### 2.4 热物理性能测试

参照 GJB772A-1997 (406.2) 《比热容、导热率和热扩散率激光脉冲法》, 采用耐驰公司 LFA 447Nanoflash™ 型闪光导热仪, 在温度范围为 30 ~ 70  $^{\circ}\text{C}$  的条件下, 对微注塑成型、尺寸为  $\Phi 12.7 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的 F2314/MWCNTs 复合材料进行导热系数测试。

## 3 结果与讨论

### 3.1 微观形貌结构分析

图 1 是不同 MWCNTs 含量的 F2314/MWCNTs 复合材料的 SEM 图。从图 1 可以看出, MWCNTs 加入量为 2% 时, MWCNTs 在基体中分散较为均匀, 只存在少量的团聚体。当 MWCNTs 含量达到 5% 以上, F2314 基体中存在明显的 MWCNTs 团聚现象。

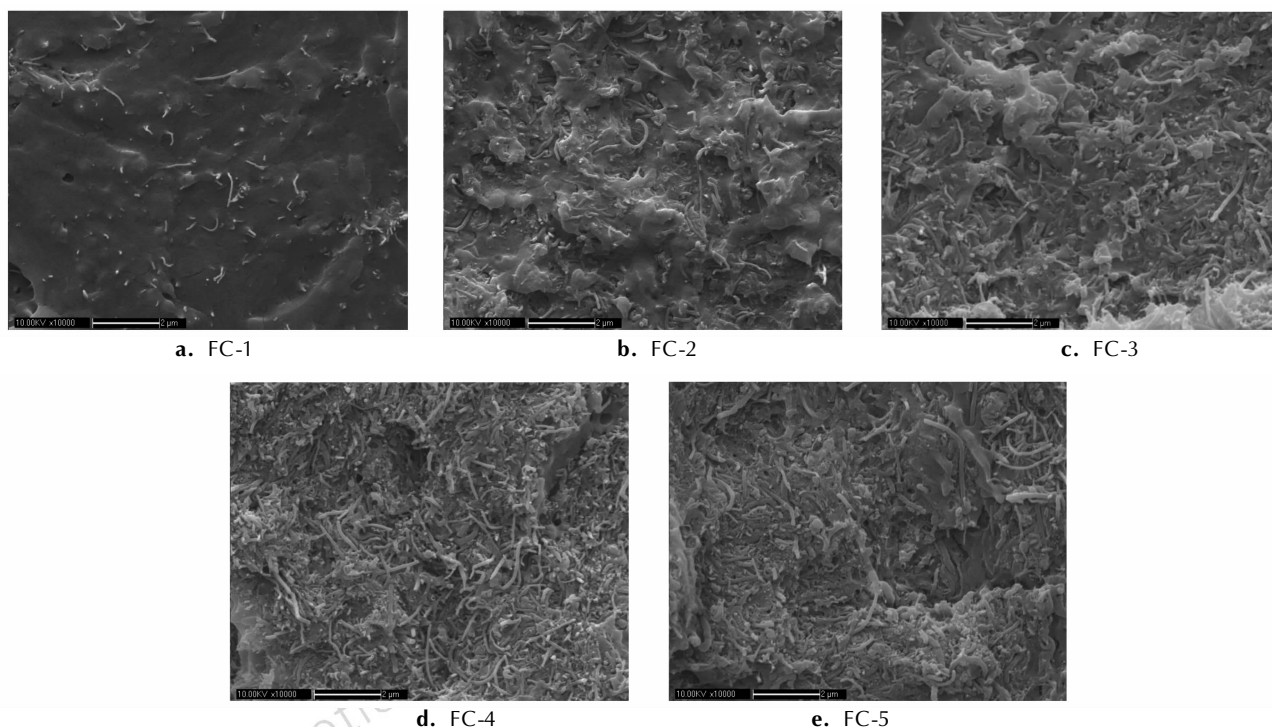


图 1 F2314/MWCNTs 复合材料的微观形貌结构

Fig.1 The micro morphology structure of F2314/MWCNTs composites

### 3.2 碳纳米管含量对 F2314/MWCNTs 复合材料导热性能的影响

图 2 是 30  $^{\circ}\text{C}$  下不同 MWCNTs 含量 F2314/MWCNTs 复合材料的导热系数。从图 2 可以看出, 随着碳纳米管含量增加, F2314/MWCNTs 复合材料的导热系数明显提高。30  $^{\circ}\text{C}$  时, 纯 F2314 的导热系数为

0.146  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。在 F2314 中加入质量分数为 2% 的 MWCNTs, 复合材料 FC-1 的导热系数提高至 0.183  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。当碳纳米管质量分数提高至 30% 时, FC-5 的导热系数为 0.647  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 比纯 F2314 导热系数提高 3.43 倍。MWCNTs 在 F2314 基体中随机分布且相互搭接, 由于 MWCNTs 具有较

大的长径比,可以形成骨架结构,并在热流方向上形成导热链。随着 MWCNTs 含量增加,搭接点数目增加, MWCNTs 在基体中形成互穿网络结构,从而提高了复合材料的导热性能。但是,与纯 F2314 相比, F2314/MWCNTs 复合材料的导热系数增幅不大。这与文献报道的其它聚合物/碳纳米管体系的情况一致<sup>[7]</sup>。这主要是因为碳纳米管与 F2314 基体间的界面热阻大,热量在传递过程中急剧下降,因此添加高导热的 MWCNTs 后, F2314/MWCNTs 复合材料的导热系数不是很高,远小于 F2314 和 MWCNTs 导热系数的线性加和(FC-1、FC-2、FC-3、FC-4 和 FC-5 复合材料的线性加和值分别为 54.14, 135.44, 272.23, 550.02, 833.81 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)。

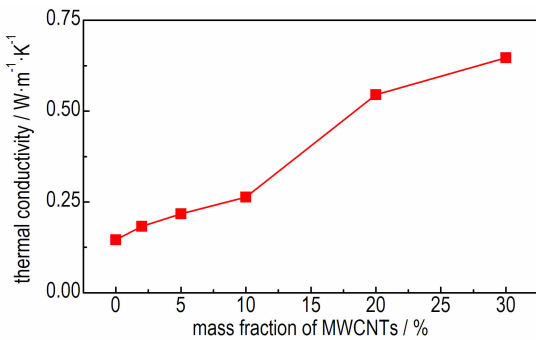


图2 30 °C 下 F2314/MWCNTs 复合材料的导热系数与 MWCNTs 含量的关系

Fig. 2 A plot of thermal conductivity of F2314/MWCNTs composites at 30 °C vs. MWCNTs content

### 3.3 温度对 F2314/MWCNTs 复合材料导热性能的影响

图3是 F2314/MWCNTs 复合材料的导热系数随温度的变化曲线。从图3可以看出, F2314/MWCNTs 复合材料的导热系数随温度的变化呈现相同的规律,即导热系数先随着温度升高而增大,然后达到最大值,接着逐渐下降。F2314/MWCNTs 复合材料的导热性能对温度的依赖性主要与 F2314 的相态转变密切相关。导热系数的最大值出现在 50 °C 附近,对应于 F2314/MWCNTs 复合材料的玻璃化转变温度( ~48 °C)<sup>[13]</sup>。在其它导热粒子填充复合材料的导热系数与温度关系研究中也发现了类似的现象。例如, Agarwal 等<sup>[14]</sup>制备了纤维/苯酚甲醛复合材料,发现复合材料的导热系数在玻璃化转变温度时达到最大值或者峰值。当温度低于玻璃化转变温度时(<50 °C),随着温度升高,聚合物分子链逐渐伸展,导致声子平均自由程增加,因此材料的热阻降低,热导率提高。当温度高于 F2314/MWC-

NTs 复合材料的玻璃化转变温度时(>50 °C),随着温度升高,分子链段运动产生的微孔数量和尺寸增大,导致复合材料导热系数随温度升高而降低<sup>[14]</sup>。

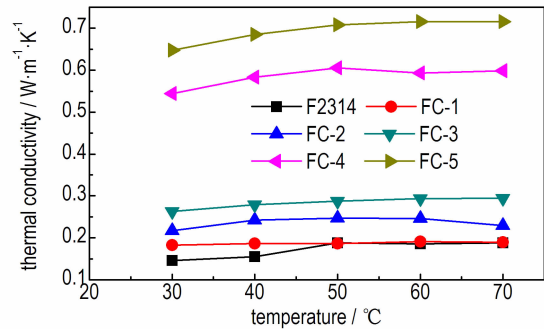


图3 F2314/MWCNTs 复合材料的导热系数与温度的关系图  
Fig. 3 A plot of thermal conductivity of F2314/MWCNTs composites vs temperature

### 3.4 F2314/多壁碳纳米管复合材料的导热模型

当碳纳米管含量很低( $f < 0.02$ )时, Maxwell-Garnett 型有效介质方法(EMA)<sup>[15]</sup>可以用于计算碳纳米管复合材料的有效导热系数。在碳纳米管复合材料中,碳纳米管的导热系数远高于高聚物基体的导热系数,且碳纳米管的长径比很大。根据有效介质方法,当碳纳米管随机分散在基体中时,碳纳米管复合材料的有效导热系数为<sup>[10]</sup>:

$$\frac{K_e}{K_m} = \frac{3 + f(\beta_x + \beta_z)}{3 - \beta_x} \quad (1)$$

式中,  $K_e$  为碳纳米管复合材料的有效导热系数,  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $K_m$  为高聚物基体的导热系数,  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $f$  为碳纳米管的体积分数,参数  $\beta_x$  和  $\beta_z$  可以用下式计算<sup>[10]</sup>:

$$\beta_x = \frac{2(K_{11}^c - K_m)}{K_{11}^c + K_m}, \beta_z = \frac{K_{33}^c}{K_m} - 1 \quad (2)$$

式中,  $K_{11}^c$  和  $K_{33}^c$  分别为一个复合材料晶胞沿着横轴和纵轴的等效导热系数,  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ 。将包覆一层非常薄的界面热阻层的碳纳米管视为一个复合材料晶胞,其结构如图4所示。  $K_{11}^c$  和  $K_{33}^c$  可以分别用下式计算<sup>[10]</sup>:

$$K_{11}^c = \frac{K_c}{1 + \frac{2a_k K_c}{d K_m}}, K_{33}^c = \frac{K_c}{1 + \frac{2a_k K_c}{L K_m}} \quad (3)$$

式中,  $K_c$  为碳纳米管的导热系数,  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $d$  和  $L$  分别为碳纳米管的直径和长度,  $m$ ;  $a_k$  为 Kapitza 半径,  $m$ 。通过高聚物基体的导热系数和界面热阻可以计算得到  $a_k$ <sup>[10]</sup>:

$$a_k = R_k K_m \quad (4)$$

式中,  $R_k$  为界面热阻, 又称为 Kapitza 热阻,  $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ; 与界面处的热流和温度梯度有关<sup>[10]</sup>:

$$Q \approx \Delta T / R_k \quad (5)$$

式中,  $Q$  为界面处热流,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $\Delta T$  为界面处温度梯度,  $\text{K}$ 。

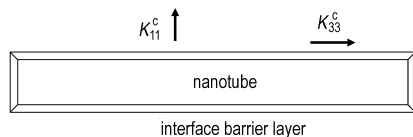


图4 复合材料晶胞的示意图<sup>[10]</sup>

Fig. 4 Schematic illustration of a composite unit cell

对于 F2314/MWCNTs 复合材料,  $30^\circ\text{C}$  下高聚物基体 F2314 的导热系数  $K_m$  为  $0.146 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , Kapitza 热阻  $R_k$  约为  $8 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ <sup>[10]</sup>, 则 Kapitza 半径  $a_k$  为  $11.68 \text{ nm}$ 。多壁碳纳米管的导热系数  $K_c$  为  $3000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ <sup>[3]</sup>, 通过公式(3)计算得到的  $K_{11}^c$  和  $K_{33}^c$  分别为  $0.125 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  和  $30.928 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。将  $K_{11}^c$  和  $K_{33}^c$  计算值代入公式(2)可知,  $\beta_x$  和  $\beta_z$  分别为  $-0.1551$  和  $210.835$ 。

式(1)为碳纳米管复合材料导热系数的 EMA 计算公式。该公式考虑了碳纳米管直径、长径比和体积分数、界面热阻、导热系数比  $K_c/K_m$  对碳纳米管复合材料有效导热系数的影响。采用 EMA 公式可以计算得到不同碳纳米管含量的 F2314/MWCNTs 复合材料有效导热系数  $K_e$ , 结果见表 1。从表 1 可以看出, EMA 公式计算得到的有效导热系数  $K_e$  的理论值比试验值略大。这一方面是因为 EMA 公式主要适用于碳纳米管含量为非常少 ( $f < 0.02$ ) 的复合材料。另一方面, 碳纳米管之间存在较强的范德华引力, 并且碳纳米管具有巨大的比表面积和很高的长径比, 在加工过程中碳

表 1  $30^\circ\text{C}$  下不同含量碳纳米管的 F2314/MWCNTs 复合材料的导热系数

Table 1 The thermal conductivity of F2314/MWCNTs composites with different MWCNTs content at  $30^\circ\text{C}$

sample	content of MWCNTs / %	$K$ / $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$K_e$ / $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
FC-1	2	0.183	0.322
FC-2	5	0.217	0.587
FC-3	10	0.263	1.031
FC-4	20	0.545	1.927
FC-5	30	0.647	2.833

Note:  $K$  is thermal conductivity by test,  $K_e$  is effective thermal conductivity with interface thermal resistance.

纳米管容易团聚、难以分散。

图 5 揭示了 F2314/MWCNTs 复合材料有效导热系数  $K_e$  的理论计算值与试验值的关系。从图 5 可以看出, 有效导热系数  $K_e$  的理论计算值与试验值之间呈线性关系。

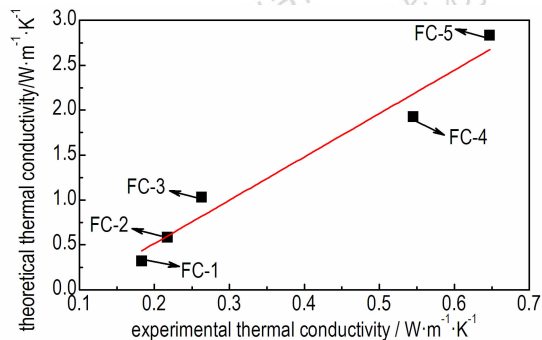


图 5  $30^\circ\text{C}$  下 F2314/MWCNTs 复合材料的导热系数的计算值与试验值的关系

Fig. 5 Relationship between the calculated values and experimental ones of thermal conductivity for F2314/MWCNTs composites at  $30^\circ\text{C}$

因此, 为了更加准确地描述高碳纳米管含量的 F2314/MWCNTs 复合材料有效导热系数  $K_e$ , 引入两个常数  $C_1$  和  $C_2$  修正 EMA 公式:

$$\frac{K_e}{K_m} = \left( \frac{3 + f(\beta_x + \beta_z)}{3 - \beta_x} \right) / C_1 + C_2 \quad (6)$$

通过图 5 有效导热系数  $K_e$  的理论计算值与试验值的线性拟合可以得到  $C_1$  和  $C_2$  分别为  $4.8241$  和  $0.6383$ 。EMA 修正公式的计算结果与试验值基本吻合, 如图 6 所示。可见, 采用 EMA 修正模型可以较好地模拟 F2314/MWCNTs 复合材料的导热系数测试结果, 理论模型与试验结果的相对误差为  $0.95\% \sim 16.7\%$ 。

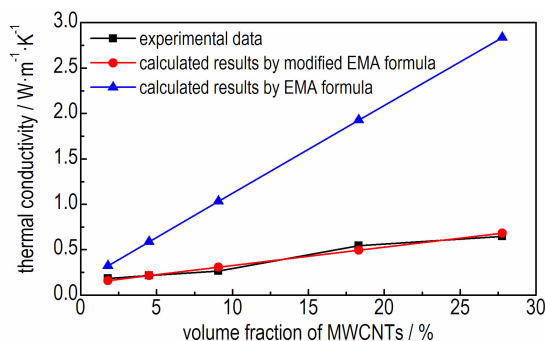


图 6  $30^\circ\text{C}$  下 F2314/MWCNTs 复合材料导热系数的 EMA 公式及其修正公式的计算值与实验值的对比

Fig. 6 Comparison of the calculated values by EMA formula and its modified formula and the experimental ones of thermal conductivity for F2314/MWCNTs composites at  $30^\circ\text{C}$

## 4 结 论

(1) F2314/MWCNTs 复合材料的导热系数随 MWCNTs 含量的增加而增大, 当 MWCNTs 质量含量从 2% 提高至 30% 时, 复合材料的导热系数从  $0.183 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  增加到  $0.647 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

(2) F2314/MWCNTs 复合材料的导热系数对温度的依赖性与 F2314 的相态转变有关。当温度低于玻璃化转变温度时, 复合材料导热系数随温度升高而增大。当温度高于玻璃化转变温度时, 复合材料导热系数随温度升高而降低。

(3) 有效介质方法 (EMA) 修正模型可以较好地模拟 F2314/MWCNTs 复合材料的导热性能, 理论模型与试验结果的相对误差为 0.95% ~ 16.7%。

### 参考文献:

- [1] Iijima A. Helical microtubes of graphitic carbon [J]. *Nature*, 1991, 354(6348): 56-58.
- [2] 陈利魁, 盛涤伦, 杨斌, 等. 碳纳米管及碳黑对 BNCP 感度性能的影响 [J]. 含能材料, 2013, 21(1): 35-38.  
CHEN Li-kui, SHENG Di-lun, YANG Bin, et al. Effects of carbon nanotubes and carbon black on sensitivity performances of BNCP [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(1): 35-38.
- [3] Kim P, Shi L, Majumdar A, et al. Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(21): 215502.
- [4] Berber S, Kwon Y, Tomanek D. Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(20): 4613-4616.
- [5] Biercuk M J, Llaguno M C, Radosavljevic M, et al. Carbon nanotube composites for thermal management [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(15): 2767-2770.
- [6] Choi S U S, Zhang Z G, Yu W, et al. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 79(14): 2252-2254.
- [7] Hong W T, Tai N H. Investigations on the thermal conductivity of composites reinforced with carbon nanotubes [J]. *Diamond & Related Materials*, 2008, 17(7-10): 1577-1581.
- [8] Nan C W, Birringer R. Determining the Kapitza resistance and the thermal conductivity of polycrystals: A simple model [J]. *Physical Review B (Condensed Matter and Materials Physics)*, 1998, 57(14): 8264-8268.
- [9] Huxtable S, Cahill D G, Shenogin S, et al. Interfacial heat flow in carbon nanotube suspensions [J]. *Nature Materials*, 2003, 2(11): 731-734.
- [10] Nan C W, Liu G, Lin Y H, et al. Interface effect on thermal conductivity of carbon nanotube composites [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(16): 3549-3551.
- [11] 赵瑾朝, 杜飞鹏, 崔伟, 等. 聚氨酯/二氧化硅包覆多壁碳纳米管复合材料的导热与电绝缘性能 [J]. 高分子材料科学与工程, 2012, 28(3): 104-106.  
ZHAO Jin-chao, DU Fei-peng, CUI Wei, et al. Thermal conductivity and electrical insulation of polyurethane/silica-coated multi-walled carbon nanotube composites [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2012, 28(3): 104-106.
- [12] 曾贵玉, 林聪妹, 周建华, 等. 碳纳米管对 HMX 热分解行为的影响 [J]. 火炸药学报, 2012, 35(6): 55-57.  
ZENG Gui-yu, LIN Cong-mei, ZHOU Jian-hua, et al. Influences of carbon nanotubes on the thermal decomposition behavior of HMX [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, 35(6): 55-57.
- [13] 林聪妹, 刘佳辉, 刘世俊, 等. DMA 方法研究多壁碳纳米管/F2314 复合材料的粘弹性能 [J]. 含能材料, 2015, 23(2): 140-145.  
LIN Cong-mei, LIU Jia-hui, LIU Shi-jun, et al. Characterization viscoelastic properties of multi-walled carbon nanotubes/F2314 composites using DMA method [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(2): 140-145.
- [14] Agarwal R, Saxena N S, Sharma K B, et al. Temperature dependence of effective thermal conductivity and thermal diffusivity of treated and untreated polymer composites [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2003, 89(6): 1708-1714.
- [15] Nan C W, Shi Z, Lin Y. A simple model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites [J]. *Chemical Physics Letters*, 2003, 375(5-6): 666-669.

## Thermal Conduction Property of Fluoropolymer/multi-walled Carbon Nanotubes Composites

LIN Cong-mei, ZENG Gui-yu, LIU Jia-hui, HUANG Zhong, GONG Fei-yan, ZHANG Jian-hu, LIU Shi-jun

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** To improve the thermal conduction properties of fluoropolymer (F2314), the F2314 was modified by multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs). The F2314/MWCNTs composites were prepared by a internal melt mixing method. The effects of MWCNTs content and temperature on the thermal conductivity of F2314/MWCNTs composites were studied. A thermal conduction model for F2314/MWCNTs composites was established. The results show that the thermal conductivity of F2314/MWCNTs composite increases with increasing the MWCNTs content. When the mass fraction of MWCNTs is 0.30, the thermal conductivity of F2314/MWCNTs composite at 30 °C is  $0.647 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , which is 3.43 times higher than that of pure F2314. The dependence of thermal conduction property of F2314/MWCNTs composite on the temperature is closely related to the phase transition of F2314. With the increase of temperature, the thermal conductivity of F2314/MWCNTs composite increases firstly, then reaches a maximum near the glass transition temperature, and then decreases gradually. The theoretical calculated results according to the modified model of effective medium approach and experimental ones have a good consistency, indicating that the formula can effectively simulate the thermal conduction property of F2314/MWCNTs composite.

**Key words:** fluoropolymer; multi-walled carbon nanotube (MWCNTs); thermal conduction property; interface thermal resistance

**CLC number:** TJ55; O64

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.01.016