

文章编号: 1007-8827(2013)02-0101-07

静电纺丝法实现 CNTs 在超长复合纳米丝中的定向排列

戴怡乐¹, 戴剑锋^{1,2}, 孙毅彬¹, 李星¹, 赵沛¹, 王青^{1,2}, 李维学^{1,2}

(1. 兰州理工大学 理学院, 甘肃 兰州 730050 ;

2. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 将流速梯度场与静电纺丝设备相结合, 利用原位本体聚合方法, 制备了超长的 PMMA/CNT 复合纳米丝, 并实现了纳米丝的有序收集和 CNTs 在其内部的定向排列。通过 SEM、FT-IR、TEM 检测表明所制备的超长复合纳米丝直径约为 100 nm, 长度可达数米, 且光滑连续、平行排列; CNTs 在复合纤维中均匀分散, 沿轴向平行排列, 且与 PMMA 分子间存在化学键; CNTs 质量分数为 8% 时, 复合纤维电导率比纯 PMMA 提升了 10 个数量级; 通过偏振拉曼光谱得到了 CNTs 的定向因子; 分析了石英毛细管内部纺丝液对 CNTs 取向一致的诱导作用。

关键词: 超长纳米纤维; 碳纳米管定向; Poiseuille 流; 静电纺丝; 偏振拉曼光谱分析

中图分类号: TQ127.1⁺1

文献标识码: A

收稿日期: 2012-12-07; 修回日期: 2013-04-02

通讯作者: 戴剑锋(1963-), 教授, 主要从事纳米材料的研究. E-mail: daijf@lut.cn

Alignment of carbon nanotubes in ultra-long carbon nanotube polymethylmethacrylate composite nanofibers by electrospinning

DAI Yi-le¹, DAI Jian-feng^{1,2}, SUN Yi-bin¹, LI Xing¹,

ZHAO Pei¹, WANG Qing^{1,2}, LI Wei-xue^{1,2}

(1. School of Science, Lanzhou Univ. of Tech, Lanzhou 730050, China ;

2. State Key Lab of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou Univ. of Tech, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Carboxylated carbon nanotube-filled polymethylmethacrylate (CNT/PMMA) ultra-long composite nanofibers were prepared by electrospinning of in-situ polymerized CNT/PMMA bulk composites under shear flow in a quartz capillary tube. They were characterized by SEM, TEM and FT-IR. The degree of orientation of the CNTs in the nanofibers was investigated by polarized Raman spectroscopy. The force imposed on CNTs by the poiseuille flow was analyzed. Results indicate that the nanofibers are smooth with a diameter of around 100 nm and a uninterrupted length of several meters. The CNTs in them are well dispersed and highly aligned parallel to the fiber axis. Chemical bonding between the carboxylated CNTs and PMMA is found. The electrical conductivity of the nanofibers is increased by 10 orders of magnitude by adding 8 mass% of CNTs. The alignment of CNTs in the nanofibers was induced by the shear force of PMMA on CNTs during the electrospinning.

Keywords: Ultra-long nano-fibers; Alignment of carbon nanotubes; Poiseuille flow; Electrospinning; Polarized Raman spectrum analyze

Corresponding author: DAI Jian-feng(1963-), professor, engaged in the of nano materials. E-mail: daijf@lut.cn

1 前言

碳纳米管(CNTs)具有密度低,长径比大,力、电、热性能优异等特点,聚合物基CNTs增强复合材料可在保持聚合物所具有的加工友好性的同时,明显地改善复合材料的力、电、热学特性,一直受到广泛关注。目前,CNTs在基体中的定向有序排列、均匀分散及其与基体的界面结合是亟待解决的关键问题^[1-3]。同时,CNTs作为一维纳米材料,在量子导线等领域具有重要的应用前景,但获取超长的定向CNTs难度很大,而制备取向有序的超长聚合物复

合纤维则相对简单,此外纳米纤维本身即具有缺陷少、配向性和机械强度高、纤维膜的孔隙度和比表面积大等优点,CNTs的加入又会使纳米纤维的力、电学特性得到进一步的提高,产物可以应用于纳米电子器件连接、传感器、过滤器、智慧型纺织品等领域。

静电纺丝技术通过使带电荷的高分子溶液或熔体在静电场中流动与变形,然后经溶剂蒸发或冷却固化而得到纤维状物质,可制备出纳米纤维。因为该技术所需设备简单,可调节工艺参量众多,有利于对最终产物参数进行控制,所以近年来受到众多关注,但通过此方法制备表面光滑,直径均匀,取向一

致的连续复合纳米纤维的技术仍不成熟。在对静电纺丝方法制备的聚合物基 CNTs 增强复合纤维的研究中发现,此过程可以在一定程度上实现 CNTs 沿纤维轴向排列^[4-7]。

已报道的研究^[4-7]中大多采用商业获得的聚合物基体与 CNTs 进行溶液混合,以便于控制聚合物分子量的分布,但这就限制了 CNTs 在基体中的分散和界面结合情况,不利于复合纤维性能的提升和 CNTs 在其内部的定向排列。笔者先采用原位本体聚合方法制备 PMMA/CNT 复合材料,再将其 DMF 溶液用于静电纺丝,从而克服了上述不足。同时,在静电纺丝设备前端添加了一段石英毛细管,纺丝溶液通过毛细管时所形成的 Poiseuille 流可以促使 CNTs 在静电纺丝前获得一定的预定向效果,以提高 CNTs 在最终产物中的取向优势。

2 实验

2.1 碳纳米管的提纯

采用本课题组专利技术制备了准直的碳纳米管^[8],然后将其与混酸溶液(3:1,体积比 96% H_2SO_4 /65% HNO_3)混合超声 1 h 后,在 60 °C 下氧化 3 h。经去离子水冲洗,并使用氨水调节溶液 pH 值等于 7,以使羧基离子化。获得纯化的 CNTs,直径在 5 nm 左右,长度大于 1 μm ,其 TEM 照片见图 1。

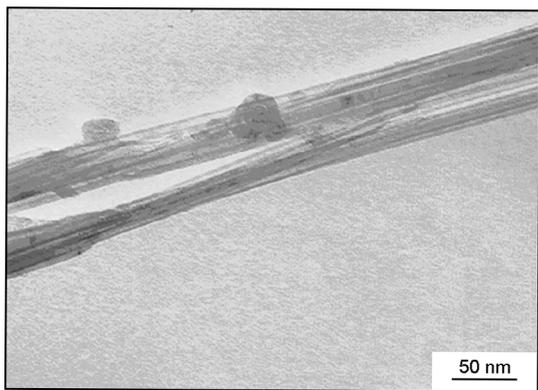


图 1 碳纳米管管束的透射电镜照片

Fig. 1 TEM micrograph of the purified CNT bundle prepared by arc discharge method.

2.2 PMMA/CNT 的原位本体聚合

将质量分数 0.08% 偶氮二异丁腈(AIBN)与甲基丙烯酸单体(MMA)混合,在 85 ~ 90 °C 下预聚合 30 min。然后将质量分数 8% 的 CNTs 加入聚合液中(实验所有样品中,CNTs 占复合材料质量分数均为 8%),超声分散 1 h 后,继续在 85 ~ 90 °C 下聚合

至溶液黏度稍大于甘油,聚合过程中不断搅拌。将所得预聚物倒入平板模具中,40 °C 下加热 20 h,然后升温至 105 °C 保持 3 h,冷却至室温,得到 PMMA/CNT 复合材料。

2.3 纳米复合纤维的静电纺丝制备

将上述方法得到的 PMMA/CNT 溶于一定质量的二甲基甲酰胺(DMF)溶液中,经过 24 h 的机械搅拌过程,得到一系列浓度的纺丝溶液用于静电纺丝过程。为了得到整齐排列的超长 PMMA/CNT 纳米丝和使 CNTs 定向排列,采用的静电纺丝设备结构见图 2。

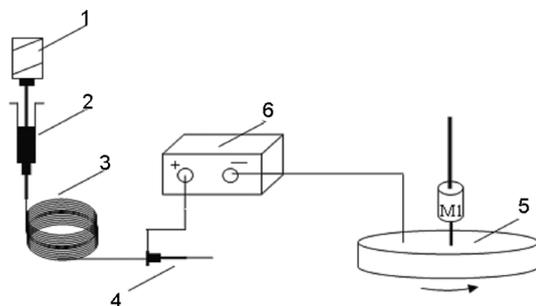


图 2 静电纺丝装置结构示意图,包括:(1)注射泵;(2)储液装置;(3)石英毛细管预定向部分;(4)嵌入有细铜丝的喷丝头;(5)覆有铝膜的筒状转动收集板;(6)高压直流电源

Fig. 2 Schematic illustration of the electrospinning setup:

- (1) syringe pump, (2) fluid reservoir, (3) quartz capillary, (4) needle with several fine wires, (5) rotating cylindrical collector and (6) power supply.

石英毛细管预定向部分内径 200 μm ,长度为 3 m,外部包裹 50 μm 厚度的聚酰胺以提高其柔韧度。为了实现纳米纤维的有序收集,实验中所选用的筒状转动收集板直径为 180 mm,边缘宽度为 5 mm,约束了纺丝区域内的电场分布,收集板由电动机 M1 (0 ~ 3 400 r/min) 带动旋转,并通过电刷接地。

静电纺丝在室温下进行,纺丝过程中喷丝头尖端到筒状转动收集板近端的距离可以在 5 ~ 15 cm 变化,纺丝电压可以在 5 ~ 30 kV 进行调节,筒状转动收集板转动速率控制 500 ~ 2000 r/min,注射泵给液流速设定为 2 mL/h。

2.4 测试与表征

红外分析采用傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR),AVA TR-360 型,由美国 Nicolet 公司生产;透射电镜(TEM)观察采用日本电子公司生产的

JEM2010型透射电子显微镜;扫描电镜分析(SEM)采用日本电子公司生产的场发射扫描电子显微镜JSM-6700F。偏振拉曼分析采用美国Spex公司SPEX1403型拉曼光谱测试仪。

3 结果与讨论

3.1 微观形貌分析

通过对不同工艺参数下所制备样品的SEM检测可以发现,PMMA/CNT复合纳米丝直径大约在100 nm,随工艺参数取值的不同而发生变化;当纺丝溶液质量浓度大于6%时,得到的纳米丝直径分布均匀,外表面光滑平整,无珠状物出现。由于实验采用了边缘宽度仅为5 mm的筒状转动收集板,可以实现复合纤维在铝膜表面的相对有序收集,当筒状收集板转速大于750 r/min时,纳米纤维具有较好的定向效果。

图3为质量浓度6%纺丝溶液,CNTs质量含量为8%,针尖到收集板最近短距离为10 cm,纺丝电压为15 kV,收集板转速等于1000 r/min时得到的取向有序的复合纳米纤维束。经测量,纳米丝直径约为100 nm,1000倍放大倍率下的SEM视场范围内基本找不到纤维的断点,结合筒状收集板0.57 m的周长,说明纤维的连续性良好,长度可超过数米,且有一定的延展率和抗拉强度,可以在收集板旋转表面的拖拽下保持其完整性。

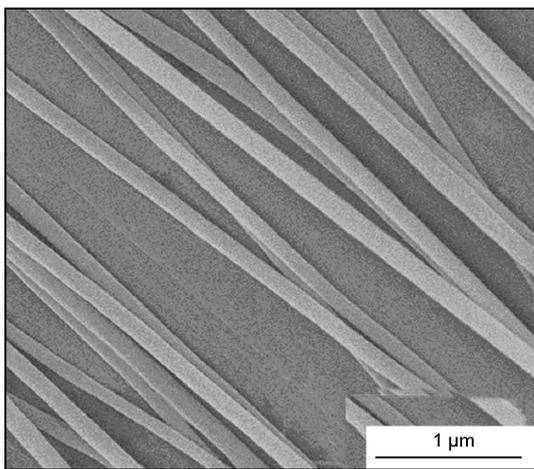


图3 PMMA/CNT复合纳米纤维的SEM照片
Fig. 3 SEM image of PMMA/CNT nano-fibers.

3.2 CNTs与PMMA的界面结合

CNTs表面通常不存在悬键,化学稳定性强,因此,它对绝大多数有机物来说是惰性的。这种惰性导致纳米复合材料的界面结合很差,所以聚合物基

CNTs复合材料的断裂机制主要是以CNTs与基体间的滑脱为主,界面结合是影响复合材料最终性能的重要因素。笔者采用混酸处理过的CNTs与MMA单体进行原位本体聚合,可以有效地改善CNTs在PMMA基体中的分散程度和界面结合情况。

图4a为经混酸处理后的CNTs红外光谱,3412 cm^{-1} 的宽峰对应于CNTs表面羟基伸缩模式振动特征峰。由于羧基基团被离子化,1720 cm^{-1} 附近并没有出现其特征峰,但1620 cm^{-1} 处的羧酸盐离子峰和1151 cm^{-1} 处的C—O伸缩模式振动特征峰表明了羧酸盐的形成^[9]。以上分析说明混酸处理在CNTs的表面引入了大量的官能团,这些官能团的存在对复合材料的界面结合可以产生积极影响。对比纯PMMA的红外光谱(图4c),可以在PMMA/CNT复合纳米丝的红外光谱(图4b)中可以发现一个位于1678 cm^{-1} 处的新峰,紧靠1731 cm^{-1} 处的PMMA(C=O)键特征峰,而图4a在该位置也没有对应的峰出现,这可能是由于PMMA分子与CNTs间的C—C相互作用引起的。另外,Jia等^[10]在研究中发现,引发剂AIBN引发的PMMA的本体聚合反应中,CNTs能够进入原位聚合过程中,参与了PMMA的聚合,自由基引发剂AIBN可以打开CNTs的双键结构,并与PMMA聚合反应自由基连接在一起形成共聚物,导致CNTs与PMMA之间形成了强的C—C相互作用,从而提高了CNTs和聚合物的相互作用。所以原位本体聚合可以使复合纳米丝的力学性能明显优于PMMA和CNTs溶液共混后进行静电纺丝而得到的复合纤维。

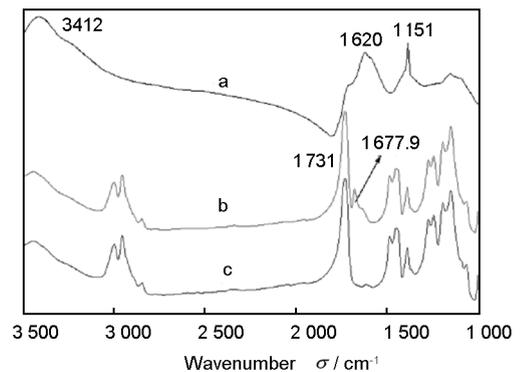


图4 红外光谱分析:(a)提纯后的CNTs,
(b)PMMA/CNT纳米纤维,(c)纯PMMA
Fig. 4 FT-IR spectra of (a) purified CNTs,
(b)PMMA/CNT and (c) pure PMMA.

3.3 PMMA/CNT 纳米纤维束的电学特性

为了分析 CNTs 质量含量为 8% 的复合纳米纤维的电学特性,从滚筒状收集器表面剥离长度 $L_0 = 100 \text{ mm}$ 的纳米纤维束,经电子天平称量,质量为 $m_0 = 85 \text{ mg}$ 。将拉直后的纤维束中部用导电胶固定在相距 $L_d = 20 \text{ mm}$ 的电极上。通过直流数字电源在两电极间施加电压,以测得纤维束的伏安特性曲线。

由图 5 可以发现 PMMA/CNT 纳米纤维束在 $-10 \sim 10 \text{ V}$ 电压范围内的伏安特性曲线基本呈现线性关系,根据电导率公式:

$$\sigma = \frac{I \cdot L_d}{U \cdot S} = \frac{I \cdot \rho_c \cdot L_d \cdot L_0}{m_0 \cdot U}$$

$$= 2.8 \times 10^4 \cdot \frac{I}{U} (\text{S/m}) \quad (1)$$

计算得到 PMMA/CNT 静电纺丝纤维束的电导率 $\sigma = 7 \times 10^{-2} \text{ S/m}$,比纯 PMMA 材料(约 10^{-12} S/m)的电导率提高了 10 个数量级,表明 CNTs 对 PMMA 电导率的提升效果明显,但仍小于定向 PMMA/CNT 块体材料在相同 CNTs 含量条件下沿碳管排列方向的电导率^[2],这可能归因于纳米级的纤维直径对 CNTs 相互搭接和导电网络形成存在抑制作用,以及纤维束间和纤维束与测试电极间接触不如块体材料紧密造成的。

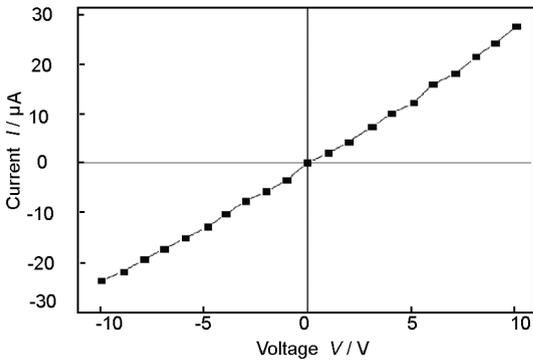


图 5 静电纺丝 PMMA/CNT 纤维束 $V-I$ 特性曲线
Fig. 5 $I-V$ characteristic of PMMA/CNT nano-fibers bundle.

3.4 CNTs 在纤维中的分散和定向排列

CNTs 在基体中的分散程度,不仅与纤维的最终性能相联系,而且对 CNTs 在其中的定向因子产生重要影响^[5]。从对样品的 TEM 分析(图 6)可以发现,CNTs 在纳米丝中具有较好的分散性。这可能是因为 MMA 单体的体积较小,聚合前部分单体进入团聚的 CNTs 束内部,由于混酸处理过的 CNTs 表面官能团化程度很高,随着反应的进行,生成的聚

合物包裹于 CNTs 的表面,对 CNTs 有一定的剥离作用,促进并维持了 CNTs 的分散性。

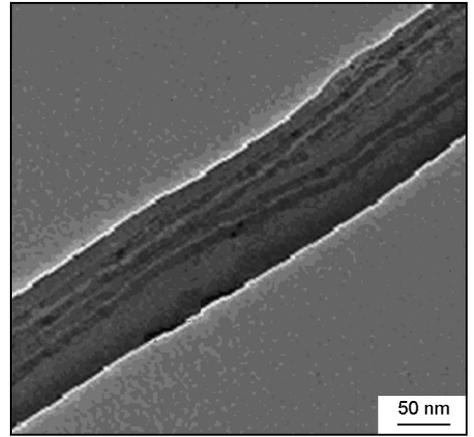


图 6 PMMA/CNT 复合纳米纤维的 TEM 照片
Fig. 6 TEM image of PMMA/CNT nano-fibers.

同时,从图 6 中还可以发现,通过本实验工艺可以使 CNTs 获得沿纳米丝轴线方向上的取向优势。为了得到 CNTs 沿纤维轴向的取向因子,对 CNTs 含量为 8% 的 PMMA/CNT 复合纳米丝进行了偏振拉曼光谱分析,结果见图 7a, 192 cm^{-1} 和 1593 cm^{-1} 附近的两组峰分别对应了 CNTs 的 RBM 峰和 G 峰。根据偏振拉曼光谱仪的工作原理,激光偏振方向同 CNTs 轴向夹角决定了样品的拉曼谱峰强^[11,12],在不同激光入射方向上的峰强可以表示为:

$$I = \int_{\psi - \frac{\pi}{2}}^{\psi + \frac{\pi}{2}} C \cdot F(\theta - \psi, \Delta) \cos^4 \theta \cdot d\theta \quad (2)$$

式中, θ 为激光偏振方向同 CNTs 轴向夹角, ψ 为纳米丝样品轴向与激光偏振方向夹角, $F(\theta - \psi, \Delta)$ 为 CNTs 与纳米丝轴向夹角的分布函数,一般认为服从柯西-洛伦兹分布:

$$F(\theta - \psi, \Delta) = \frac{\Delta/2\pi}{(\theta - \psi)^2 + (\Delta/2)^2} \quad (3)$$

式中, Δ 为柯西分布的半峰宽。通过最小二乘法对本实验数据进行拟合,得到 $\Delta = 23^\circ$ 。

以上分析中假设测试时 PMMA/CNT 复合纳米纤维完全沿同一方向排列,但 PMMA 本身是绝缘材料,添加 CNTs 后导电性虽有所提高,但与收集板接触时,仍不能在短时间内迅速将所携带电荷完全转移,导致先后到达收集板的纳米丝间存在一定库伦力作用,使得位于表层的纤维有序性明显降低,这种现象的存在已经在实验中被证实。考虑到纳米丝的

这种部分无序性,假定其分布同样服从柯西-洛伦兹分布,则 CNTs 的偏振拉曼光谱峰强公式则应修正为:

$$I = \int_{\theta_1 - \frac{\pi}{2}\psi - \frac{\pi}{2}}^{\theta_1 + \frac{\pi}{2}\psi + \frac{\pi}{2}} \int C \frac{\frac{\Delta_1}{2\pi}}{(\theta_1 - \psi)^2 + (\Delta_1/2)^2} \cdot \frac{\frac{\Delta_2}{2\pi}}{(\theta_2 - \theta_1)^2 + (\Delta_2/2)^2} \cos^4 \theta_2 \cdot d\theta \quad (4)$$

式中, Δ_1 、 Δ_2 分别为纳米丝和 CNTs 的柯西-洛伦兹分布半峰宽, θ_1 为纳米丝轴向与激光偏振方向夹角, θ_2 为 CNTs 与纳米丝轴线夹角, ψ 为样品台与激光偏振方向夹角。同样利用最小二乘法对本实验数据进行拟合得到 $\Delta_2 = 12^\circ$, 如图 6b 所示, 并由此得到 CNTs 在纤维中的定向因子 $S = \frac{3}{2} \langle \cos^2 \theta_2 \rangle - \frac{1}{2} = 0.89$, 由此可以说明 CNTs 具有强烈的沿纤维轴向的取向优势。

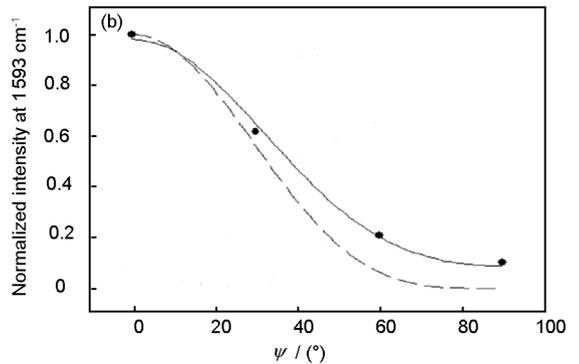
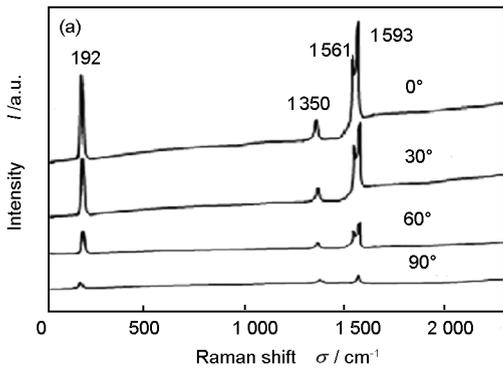


图7 (a) PMMA/CNT 纳米丝的偏振拉曼光谱, 样品台与激光偏振方向夹角分别为 0° 、 30° 、 60° 和 90° ; (b) 1593 cm^{-1} 处偏振拉曼光谱归一化峰强与样品台偏转角度间的关系, 下侧的虚线为 CNTs 和纳米丝均完全定向排列时的变化
Fig. 7 (a) Raman spectra of an quasi-aligned PMMA/CNT nano-fiber bundle with the specimen stage at 0° , 30° , 60° and 90° with respect to the excitation polarization direction; (b) Effect of fiber angle, ψ on the normalized Raman intensity at 1593 cm^{-1} (G-band) for PMMA/CNT nano-fibers. The lower dashed line represents the relationship between relative intensity and fiber angle for perfect or unidirectional alignment of both CNTs and nano-fibers.

3.5 毛细石英管对 CNTs 的预定向作用

据报道,静电纺丝过程本身就会使 CNTs 产生定向排列的效果^[4-6], Dror 等还分析了在静电纺丝过程中 CNTs 的定向机制^[7]。但单一采用静电纺丝技术得到 CNTs 高度定向的复合纳米纤维比较困难,所以笔者在静电纺丝设备前端引入毛细石英管以起到对 CNTs 的预定向效果。

石英毛细管内表面光滑,能保证内部流体为稳定的纯剪切流,纺丝溶液遵从 poiseuille 定律。根据工艺参数和环境变量,毛细石英管内纺丝溶液的平均流速约为 $1.8 \times 10^{-2} \text{ m/s}$,管流的雷诺数约为 5×10^{-4} ,速率分布为 $v = 3.6 \times 10^{-2} \times (1 - r^2/R^2) \text{ m/s}$,剪切速率从毛细管中心处的零变化到靠近管壁处的最大值(约 700 s^{-1})。

纤维悬浮流中,棒状颗粒主要受到六种力作用:黏性曳力、虚拟质量力、basset 力、压力梯度力、saffman 力和 magnus 力。相比较而言,后三种作用的影响较小^[13],同时由于主要分析棒状粒子在完全发展

的管流中的转动,可以不考虑颗粒在流场中加速运动,并且只针对作用力在一定时间范围内的积分效果,因而黏性曳力的影响远比虚拟质量力和 basset 力更为重要^[14]。

为了了解实验条件下 CNTs 在毛细石英管内流场中的定向过程,对低雷诺数 poiseuille 流中 CNTs 所受 Stokes 力的情况进行了分析,结果见图 8。借助 Oseen 方程^[15],可以得到二维低雷诺数情况下 Stokes 力的转动力矩:

$$M = \int_{r_0}^{r_0 + L \sin \varphi} \frac{4\pi\mu}{\ln(4/R_b) - \gamma + 1/2} [2v_{\text{avg}}(1 - \frac{r^2}{R^2}) - u_b] \frac{r_b - r}{\sin \varphi} dr = \frac{4\pi\mu \cdot v_{\text{avg}}}{3[\ln(4/R_b) - \gamma + 1/2] \cdot R^2} r_0 L^3 \sin^2 \theta \quad (5)$$

其中, L 、 b 、 r_0 、 θ 为分别 CNTs 长度、半径、中心位置及其轴向与流线间夹角, R 为毛细石英管半径, $\gamma = 0.5772$ (Euler 常数), $R_b = U \cdot b \cdot \rho/\mu$, b 为碳纳米管

半径, U 、 ρ 和 μ 分别为纺丝溶液速率、密度和黏度, u_b 、 r_b 分别为 CNTs 的瞬时平动速率和瞬时转心。

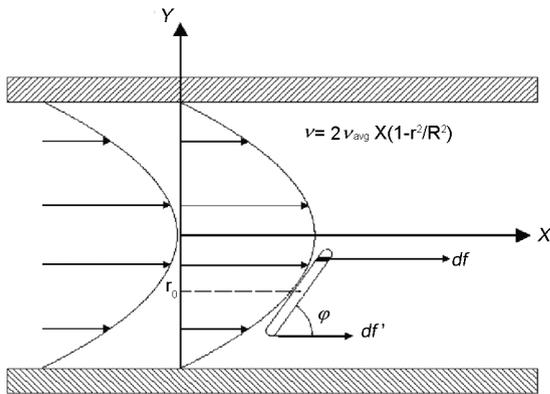


图 8 Poiseuille 流内 CNTs 的受力示意图

Fig. 8 Illustration of the Stokes drag exerted on CNTs in Poiseuille flow.

结果说明, CNTs 所受转动力矩与其所处位置和取向角有关。仅当 $\theta=0$ 或 $r_0=0$ 时(即 CNTs 轴向与流线方向平行或其中心恰处于毛细管中心线上时), CNTs 所受转动力矩才为零, 且后者为不稳定平衡状态, 由此可知, CNTs 具有沿流线方向排列的趋势, 流程越长, 定向排列趋势越明显。

由于 CNTs 的分子质量明显大于溶剂分子质量, 且 DMF 分子对 CNTs 的撞击频率很高: $p = NkT \cdot (2\pi mkT)^{-\frac{1}{2}} \cdot (\pi DL) \sim 10^{31} s^{-1}$; 同时考虑到在实验参数条件下, 偏离毛细管轴线附近位置处, CNTs 所具有的转动势能明显大于其在室温下的热运动能

量: $\int_0^{\frac{\pi}{2}} M(\theta) d\theta \sim 10^{-16} J >> K_B T = 4 \times 10^{-21} J$, 所以可以忽略布朗运动对转动过程造成的扰动, 即 CNTs 在毛细管中的所获得的取向优势是稳定的, 可以保持到静电纺丝过程中, 且也大于一般用于 CNTs 定向的电场和磁场所产生效果^[16,17]。

4 结论

通过原位本体聚合制备了 PMMA/CNT 复合材料用于静电纺丝过程, 制备出了取向有序的超长纳米复合纳米丝, 并辅助以毛细石英管预定向部分, 实现了 CNTs 在纤维中的高度定向排列; 实验发现由于采用了原位聚合方法, CNTs 在纳米丝中均匀分散, 且与 PMMA 间具有很好界面结合, 当 CNTs 为 8% 时, 复合纤维的电导率比纯 PMMA 提升了 10 个数量级。

分析了石英毛细管内部 Poiseuille 流对 CNTs 取向有序的诱导作用, 以及这种取向优势的稳定性; 通过 TEM 和偏振拉曼光谱检验了 CNTs 在产物中的取向有序性; 考虑到所收集的纳米丝本身并非完全平行排列, 改进了 CNTs 的偏振拉曼光谱峰强公式, 并得到了 CNTs 在复合纤维中的取向因子 $S=0.89$, 证明了实验所采用工艺可以有效地实现 CNTs 的定向排列。

参考文献

- [1] AHIR S V, HUANG Y Y, TERENTJEV E M. Polymers with aligned carbon nanotubes: Active composite materials[J]. Polymer, 2008, 49: 3841-3854.
- [2] DAI J F, WANG Q, LI W X, et al. Properties of well aligned SWNT modified poly (methyl methacrylate) nanocomposites [J]. Materials Letters, 2007, 61: 27-29.
- [3] 戴剑锋, 张超, 王青, 等. 反复拉伸法制备单壁碳纳米管定向排列的 SWCNT/PMMA 复合材料[J]. 新型炭材料, 2008, 23(3): 201-204.
(DAI J F, ZHANG C, WANG Q, et al. Preparation and characterization of polymethylmethacrylate/aligned SWCNT composites with by repeated stretching [J]. New Carbon Materials, 2008, 23(3): 201-204.)
- [4] SUNDARAY B, SUBRAMANIAN V, NATARAJAN T S, et al. Electrical conductivity of a single electrospun fiber of poly (methyl methacrylate) and multiwalled carbonnanotube nanocomposite[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88: 143114.
- [5] MCCULLEN S D, STEVENS D R, ROBERTS W A, et al. Morphological, electrical, and mechanical characterization of electrospun nanofiber mats containing multiwalled carbon nanotubes[J]. Macromolecules, 2007, 0: 997-1003.
- [6] HOU H, GE J J, ZENG J, et al. Electrospun polyacrylonitrile nanofibers containing a high concentration of well-aligned multi-wall carbon nanotubes [J]. Chemistry of Material, 2005, 17(5): 967-973.
- [7] DROR Y, SALALHA W, KHALFIN R L, et al. Carbon nanotubes embedded in oriented polymer nanofibers by electrospinning [J]. Langmuir. 2003, 19: 7012-7020.
- [8] 王青, 戴剑锋, 李维学, 等. 纳米碳管管束的制备方法及制备装置, ZL200510022728.5, 2008.
- [9] FOGDEN S, VERDEJO R, COTTAM B, et al Purification of single walled carbon nanotubes: The problem with oxidation debris[J]. Chemical Physics Letters 2008, 460: 162-167.
- [10] JIA Z, WANG Z, XU C, et al. Study on poly(methyl methacrylate); carbon nanotube composites[J]. Materials Science and Engineering, 1999, A271: 395-400.
- [11] ANGLARET E, RIGHI A, SAUVAJOL J L, et al. Raman resonance and orientational order in fibers of single-wall carbon nanotubes[J]. Physical Review B, 2002, 65: 165426.
- [12] GOMMANS H H, ALLDREDGE J W, TASHIRO H, et al.

- Fibers of aligned single-walled carbon nanotubes: Polarized Raman spectroscopy [J]. Journal of Applied Physics, 2000, 88 (5): 2509-2514.
- [13] H Shehua, L Wei, C Liangjun. On equation of discrete solid particles' motion in arbitrary flow field and its properties [J]. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), 2000, 21(3): 297-310.
- [14] 由长福, 祁海鹰, 徐旭常. Basset 力研究进展与应用分析 [J]. 应用力学学报, 2002, 19(2): 31-33.
(YOU C F, QI H Y, XU X C. Progresses and applications of basset force [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2002, 19(2): 31-33.)
- [15] CHWANG A T, WU T Y. Hydromechanics of low-Reynolds-number flow. Part 4. Translation of spheroids [J]. J Fluid Mech, 1976, 75(4): 677-689.
- [16] BROWN M S, SHAN J W, LIN C, et al. Electrical polarizability of carbon nanotubes in liquid suspension [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90: 203108.
- [17] KORDÁS K, MUSTONEN T, G TÓTH, et al. Magnetic-field induced efficient alignment of carbon nanotubes in aqueous solutions [J]. Chem Mater, 2007, 19: 787-791.

第十一届全国新型炭材料学术研讨会征文通知(第二轮)

“第十一届全国新型炭材料学术研讨会”定于2013年8月16~20日在太原召开。为开好本届研讨会,现向国内外科研机构、大专院校、企事业单位的著名专家学者和广大科技工作者广泛征集文稿。现将有关事项通知如下:

一. 征文内容(文章类别)

1. 碳纤维及其复合材料
2. 多孔炭
3. 插层与化学改性炭
4. 储能炭
5. 炭基复合材料
6. 纳米炭
7. 健康和环保炭

二. 进度安排

会议论文全文收稿截止日期延至2013年6月30日。

2013年7月15日前发出会议活动安排。

三. 信息交流

会议安排信息交流、单位介绍、新产品、新技术、新工艺推介等多种广告业务,有意者请与会议筹备处联系。

四. 注意事项

1. 论文书写格式请严格按照《新型炭材料》征稿简则,必须有摘要。

稿件一律以 Word 格式发至 E-mail: xxtelhy@sxcc.ac.cn, 来稿请注明“第十一届全国新型炭材料学术研讨会征文”字样,并标明文章类别(上述征文内容 1~7)。

2. 会议筹备组设在《新型炭材料》编辑部,真诚欢迎炭材料科技工作者踊跃投稿。对开好本次会议有何宝贵意见和建议,诚盼电告或电子邮件联系。

电话/传真: 0351-2025254

邮 编: 030001

地 址: 太原市桃园南路 11 号 中国科学院山西煤炭化学研究所《新型炭材料》编辑部

第十一届全国新型炭材料学术研讨会筹委会

2013 年 4 月