

碳纳米管/聚合物复合材料加工过程中原位取向方法与技术

邱 军, 袁 捷, 王国建

(同济大学材料科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 碳纳米管具有优异的力学、电学等性能, 但是在聚合物复合材料中的无规状态不能发挥出其自身的优异性能。本文从碳纳米管/聚合物复合材料的加工过程实现取向增强入手, 结合自己的研究成果, 综述了在外力、电场、磁场、液晶诱导等作用下制备取向碳纳米管/聚合物复合材料。可以看出, 经过精心设计的力场、电场、磁场和液晶作用可以使碳纳米管在聚合物复合材料加工过程中取向, 并进而提高了力学和电学性能, 但取向程度均有待提高。

关键词: 碳纳米管; 聚合物复合材料; 取向; 电场; 磁场

碳纳米管是由碳原子的六角点阵二维石墨片绕中心轴按一定的螺旋角卷曲而成的无缝管状结构。1991 年饭岛 (Iijima)^[1] 发现碳纳米管 (CNTs), 它所具有的独特结构、特殊的物理性能和化学性能, 引起了科学家们的极大关注。通过一定的方法将其与聚合物材料复合, 就能获得具有较高力学强度或导电性能的纳米复合材料^[2-3]。但在通常状态下只能制备出无规碳纳米管增强聚合物复合材料, 无法根据复合材料的性能要求对碳纳米管的取向和排布进行设计, 从而难以使碳纳米管的优异性能最大限度地发挥。因此探索碳纳米管在复合材料中的取向和排布, 制备各种有序阵列结构的碳纳米管复合材料, 是实现碳纳米管实际应用的重要难题^[4-5]。

当前, 国内外对定向排布碳纳米管复合材料的制备进行了广泛研究, 并取得了一定的进展。目前在加工过程中实现原位取向的方法有电场作用、磁场作用、液晶相诱导作用等。除此之外, 通过拉伸、剪切力、流体的作用力等方法也可以促进聚合物材料中碳纳米管的定向排列^[6]。本文就碳纳米管/聚合物复合材料在制备过程中实现取向的研究成果进行了系统的阐述。

1 外力场诱导碳纳米管取向

碳纳米管在粘性流体中会沿着流体流动方向产生部分取向, 再通过降温等方法使聚合物体系固化, 从而使其内部的碳纳米管保持其先前的取向状态, 这是制备碳纳米管取向复合材料的最常见方法之一。

Haggenmueller 等^[7] 研究了取向状态的碳纳米管对复合材料体系导电性能与力学性能的影响。首先将聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 溶于 *N,N*-二甲基甲酰胺 (DMF) 中形成聚合物溶液体系, 再通过 180 °C 下热搅拌的方法促进碳纳米管在体系中的分散。浇注成膜后, 通过对比平行于浇注方向与垂直于浇注方向样品的导电性时发现, 前者的导电性要明显优于后者。这主要也是由于流体流动促进了碳纳米管的取向排布, 而取向状态的碳纳米管有助于复合材料导电性的提高。Wood 等^[8] 通过类似方法在玻璃板上使碳纳米管在氨基甲酸酯丙烯酸酯聚合物中产生取向。作者在实验中在低聚物中混入碳纳米管, 加入固化剂后将其在玻璃板上展开, 并使用紫外光使其固化形成纳米复合材料膜。通过流动力及剪切力促使 CNTs 在流动方向中发生取向, 并使用拉曼光谱对聚合物内部的 CNTs 的取向程度进行表征, 结果表明平行取向方向与垂直取向方向的样品的波数存在明显差异, 从而认为聚合物内部的 CNTs 在流向力及剪切力作用下发生明显取向。Chen^[9] 也通过溶液浇注的方法制备出取向状态碳纳米管增强聚合物复合材料。他们将

作者简介: 邱军, 博士, 副教授, 主要从事纳米材料表面改性、纳米复合材料及特种复合材料方面的研究工作;

* 通讯作者, E-mail: qjun2000@163.com.

热塑性聚氨酯溶于四氢呋喃得到聚合物溶液, 再将单壁碳纳米管(SWNTs)分散于其中, 以浇注方法得到复合薄膜, 通过 SEM、拉曼光谱等方法对其取向状态进行表征。通过表征结果, 他们认为在复合薄膜固化阶段, 由于聚合物分子的软链段的重排效果促进了 SWNTs 产生取向效果。鲁江等^[10] 使用气压式单孔纺丝机在恒定压力下制备 Lyocell /多壁碳纳米管复合纤维时, 通过二维 X 衍射法来测量复合纤维中 CNTs 相对于纤维轴的取向角, 发现当复合纤维中多壁碳纳米管(MWNTs)质量分数为 5%时, MWNTs 与纤维轴之间的取向角为 $\pm 15.2^{\circ}$, 即 MWNTs 在外压力的作用下产生沿着纤维轴取向的效果。

此外, 在碳纳米管/聚合物复合材料体系可以在未固化时通过外力进行拉伸, 如外加的拉伸力、加工过程中的剪切力作用^[11~13] 等, 能够促进体系内碳纳米管产生取向效果。Coopera 等^[11] 使用碳纳米管增强 PMMA 时, 发现在聚合物挤出的过程中剪切力可以促使 CNTs 产生取向。前期通过超声波作用使 CNTs 在 PMMA 微球表面均匀分散, 再通过双螺杆挤出机的捏合剪切作用使 PMMA 微球塑化, 同时通过高速剪切力的作用促使 CNTs 在聚合物中分散。挤出后的熔体通过水冷使之迅速降温, 使增强体保持取向分散状态, 通过努式硬度的测试表征聚合物的各项异性, 选取挤出方向呈 $0 \sim 90^{\circ}$ 范围内选取若干个角度分别进行硬度测试如图 1(1)所示。结果发现在与挤出方向呈垂直方向, 硬度值最高, 而沿着挤出方向的硬度值最低。因此能明显表现出挤出作用下的 CNTs 延挤出方向产生取向排列如图 1(2)所示。

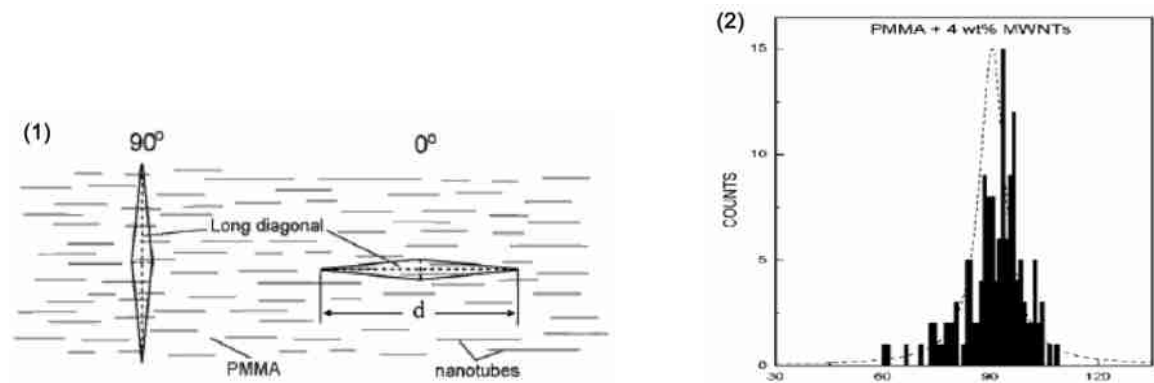


图 1 (1)相对增强方向努式硬度压痕示意图; (2)PMMA+4%(wt) MWNTs. 不同方向下的努式硬度柱状图^[11]
Figure 1 (1) Schematic diagram of the Knoop indentation direction with respect to the orientation of the reinforcement
(2) Orientation distribution histograms: PMMA+4%(wt) MWNTs^[11]

Wang 等^[12] 使用溶液浇注法制备 SWNTs/环氧树脂复合材料时, 发现当复合材料处于“半干”状态时, 通过外力将材料沿一个固定方向进行 50~100 次的拉伸, 拉伸后复合材料中的 SWNTs 能够达到良好的取向效果, 同时这种拉伸也有利于促进 SWNTs 的分散。通过对比 SWNTs/环氧树脂复合材料的机械性能和电学性能表现出明显的各向异性。Dai 等^[13] 在制备 PMMA /SWNTs 复合材料过程中发现, 在复合材料“半干”状态下进行 50~100 次的拉伸。通过 TEM 和 SEM 可以看出 SWNTs 沿拉伸方向发生取向, 并且沿拉伸方向的力学性能和电学性能要优于垂直方向。

Fan 等^[14] 设计了一种微孔塑料管观察到了类似现象。作者将表面酸化处理后的 CNTs 分散于乙烯基酯聚合物中, 再将此悬浮液注入塑料管中。在悬浮液流经玻璃纤维束空隙中时由于流体在空隙中流动所产生的剪切作用有助于诱导 CNTs 产生取向, 同时利用固化剂的作用将 CNTs 的取向状态固定, 结果如图 2 所示。

Sung 等^[15] 介绍了一种通过电泳和裂缝成型的方法在 ITO 玻璃基板上制备取向态 CNTs。他们首先将 CNTs 沉积于玻璃基板上, 再通过电场力的作用将一种阴离子表面活性剂十二烷基硫酸钠沉积于 CNTs 层上。通过加热, 取向状态的 CNTs 即形成于加热后所产生的裂缝内(见图 3)。这种制备方法较为简单, 对设备尺寸的要求也较小。

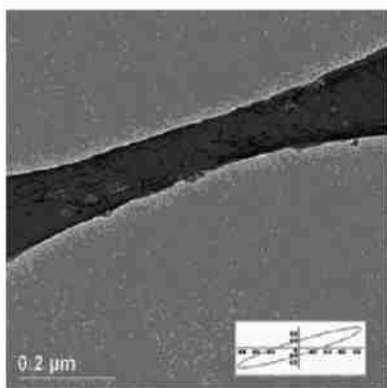


图 2 CNTs 在 100nm 管道中产生取向效果的 TEM 照片: 多数 MWNTs 沿流动方向产生取向^[14]

Figure 2 TEM image of MWNT orientation in 100nm channel: most MWNTs were aligned along the flow direction^[14]

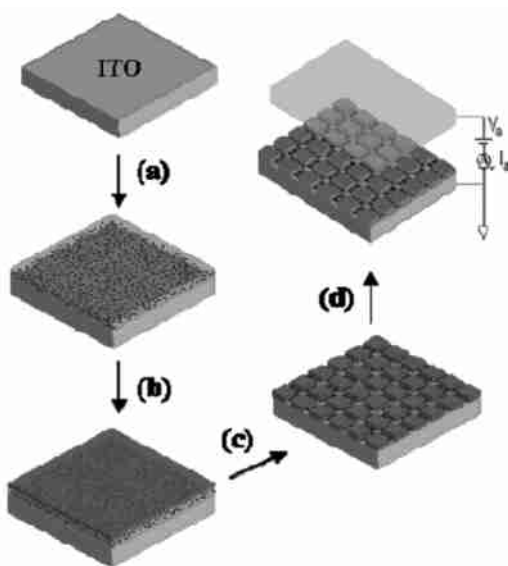


图 3 电泳和裂缝成型的方法在 ITO 玻璃基板上制备取向态 CNTs 的示意图^[15]

Figure 3 The schematics of fabrication of horizontally aligned CNT by electrophoresis and fissures on an ITO glass plate^[15]

2 电场、磁场诱导碳纳米管取向

碳纳米管是电的良导体, 其在电场力或磁场力作用下可以沿着电场方向或磁场方向取向, 因此可以在复合材料制备过程中通过外电场或磁场对碳纳米管施加一定的作用力, 促使其沿电场或磁场方向产生取向效果。

在电场力诱导取向方面, Martin 等^[16] 使用 MWNTs 作为导电填料分散于环氧树脂体系中以提高其导电性能。在聚合物复合材料固化过程中使用电场作为驱动力, 促使 MWNTs 排列为阵列网状结构, 使电流易于跨越电极子间的空隙从而提高材料导电率。实验中对交流电和直流两种电场, 发现交流电场中固化的 MWNTs/环氧树脂体系中 MWNTs 的分布均匀与取向效果较好。他们认为主要是由于直流电场的阳极对 MWNTs 有吸附作用, 导致其极易形成管端相接的树枝状结构, 从而形成 MWNTs 在电极处聚集, 形成不均一的状态, 影响了取向的效果。Yang 等^[17] 使用交流电的作用力促使 MWNTs 在相反的两极间定向排列。在交流电极间的距离缩短至不到 20 μ m 时, 将 MWNTs 的悬浮溶液从两极间流过, 施加交流电场促使 MWNTs 在两极间形成桥接(如图 4 所示)。断开这样的桥接后, 就可以得到取向状态的 MWNTs。此方法是基于交流电极间的电场力和 CNTs 的极化效果, 由于没有任何的化学破坏, 所以有利于保证碳纳米管的自身特性, 但获得的 CNTs 的取向度并不高。

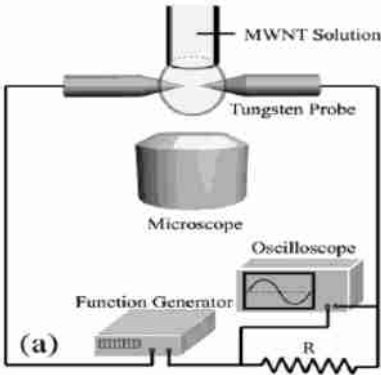


图 4 通过钨探针中交流电场促使碳纳米管产生取向装置示意图^[17]

Figure 4 The schematics of experiment setups: the setup of aligning CNTs with tungsten probes^[17]

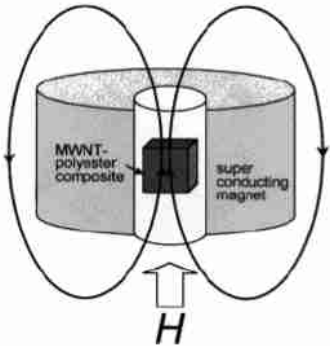


图 5 MWNTs- 聚合物复合材料在磁场中的反应装置^[18]

Figure 5 Setup for the preparation of a MWNT- polymer composite inside a magnet^[18]

在磁场力辅助取向方面, Kimura 等^[18]通过磁场使 MWNTs 发生取向, 制备出各向异性的 MWNTs/聚合物复合材料。实验中将聚合物单体溶液和 MWNTs 在超声波中混合, 之后将反应装置置于强度为 10T 的不变磁场中(如图 5 所示), 加入引发剂引发单体聚合。采用磁化率、导电率、动态弹性模量等对复合材料的各项异性程度进行表征。Fujiwara 等^[19]分析了磁场下分散于溶剂中的碳纳米管的取向排布状态。将 CNT 通过超声波振荡分散于四氯化碳中, 对分散后的悬浮液施加一个可调节强度的磁场。通过 SEM 和取向角统计分析, 可以看出磁场中的 CNTs 趋向于沿着磁力线排布, 如图 6(1), 从图 6(2)中可看出磁场强度增加, CNTs 取向程度增大(其中由曲线 a 至 i 磁场强度依次增大)。这主要是由于当磁场强度较小时, CNTs 沿不同方向的排列与磁场方向的磁化能的差值较小, 取向状态就容易被热运动能所扰乱。但是当磁场强度增强, 上述两者之间的差值增大, 使得沿磁场方向的取向排布变得更为稳定, 就表现为 CNTs 取向程度增大。

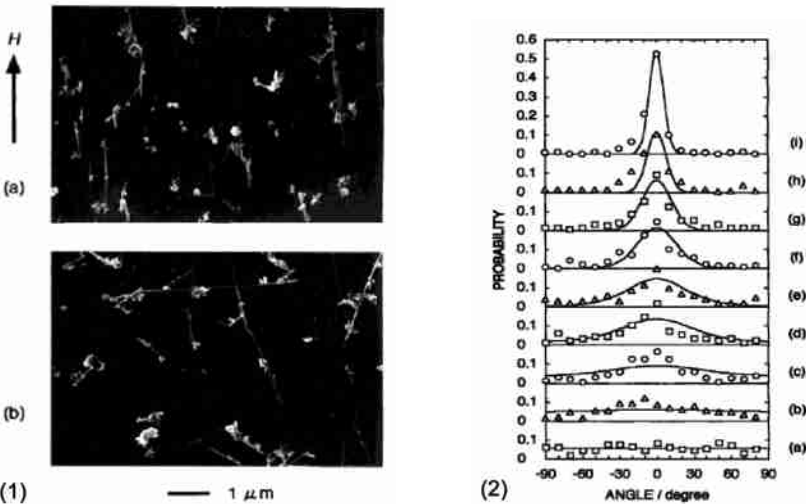


图 6 (1) CNTs 在四氯化碳悬浮液中的排布 SEM(a. 80kOe, b. 无磁场); (2) 不同强度磁场内 CNTs 的分布概率^[19]

Figure 6 (1) SEM images of carbon nanotubes suspended in carbon tetrachloride (a. 80 kOe, b. zero magnetic fields)
(2) Distribution charts for the directions of carbon nanotubes in different strength of magnetic fields^[19]

Camponeschi 等^[20]通过施加一个外加的磁场而促进环氧基复合材料中的碳纳米管产生取向, 同时研究了这种取向效果对复合材料体系多方面性能的影响, 如玻璃化转变温度、杨氏弹性模量、粘度等。他们在分析对比两种不同的环氧树脂为基体的复合体系中发现, 聚合物结构的差异也会影响磁场对体系中碳纳米管的取向效果。Steinert 等^[21]使用外加磁场制备取向状态聚苯对二甲酸乙二醇酯(PET) /SWNTs 纳米

复合材料,取向增强膜的制备装置如图 7 所示。他们通过拉曼光谱和 TEM 表征了聚合物体系中碳纳米管取向效果,认为外加磁场的强度和 SWNTs 的加入量是影响取向效果的最重要的因素,在较低的碳纳米管的加入量(0.5%)和较强的磁场强度(9.4T)下能取得较好的取向效果。

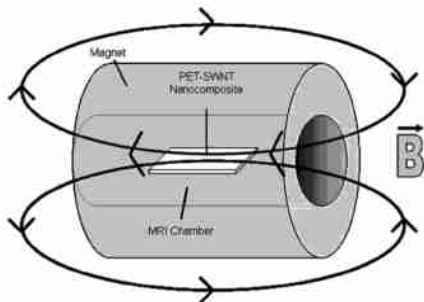


图 7 通过外加磁场制备样品装置示意图,其中 B 为外加磁场^[21]

Figure 7 The placement of the samples with respect to the instrument and subsequent magnetic field (B)^[21]

可见,碳纳米管在磁场中的取向明显受到磁场强度和溶液粘度的限制,只有在较低 CNTs 浓度和较高磁场强度下可以得到较好的取向 CNTs/聚合物复合材料。

3 静电纺丝法促使碳纳米管取向

静电纺丝技术近年来在制备纳米纤维领域得到了广泛的应用,被认为是最简单有效的方法之一,目前运用这种方法已成功用于制备了碳纳米管/聚合物复合纳米纤维^[21]。根据静电纺丝法制备纳米纤维的原理,所施外加电场以及纺丝设备喷口处挤出力的作用能够促进纳米纤维中的碳纳米管沿纤维方向产生一定程度的取向效果。

在制备过程中必须通过处理避免碳纳米管发生团聚现象,高峰等^[23]在通过静电纺丝制备聚苯胺(PAN)/MWNTs 复合纤维过程中发现,MWNTs 作为一种线性材料,在电场力的拉伸作用下能够沿纤维轴向排列,从而能够很好地利用其高轴向拉伸强度提高 PAN 的力学性能。但是当 MWNTs 发生卷曲团聚的现象时,就会导致其一部分垂直于 PAN 轴向排列,从而使纤维表面变得粗糙且不均匀。龚华俊等^[24]也发现加入 MWNTs 后的复合纳米纤维体系的直径要比纯聚合物纳米纤维的直径大,而且其表面也比后者要粗糙得多。这可能与 MWNTs 在纳米纤维中的团聚有关,由于 MWNTs 在纳米纤维中存在团聚现象,使其难以完全沿着纤维的一维方向取向排列。

Shin 等^[25]在 PANi/聚氧化乙烯(PEO)共混溶液中加入多壁碳纳米管,通过静电纺丝方法制备复合纳米纤维,其中混入的 MWNTs 的浓度为 1%。通过 TEM 可以看出,虽然 MWNTs 没有完全沿纤维轴向取向,但是明显有取向的趋势,增强体的取向有利于提高复合材料的导电性能。

Kang 等^[26]成功地使用静电纺丝方法制备出蚕丝蛋白和 MWNTs 复合纳米纤维,将蚕丝蛋白溶于蚁酸中,并将 MWNTs 与之混合制备所用纺丝液。通过图 8 可以看出纺丝所得纳米纤维的微观形貌,其中 MWNTs 已与纳米纤维良好结合并沿纤维轴向取向排列。通过对比纳米纤维的力学性能,在较小添加量的情况下其拉伸强度有明显增强。

Khalid 等^[27]通过原位聚合的方法将聚己内酯(PCL)接枝到 MWNTs 表面从而制备出功能化 MWNTs,在对比分散性和热稳定性的测试中发现,功能化 MWNTs 组分要明显优于未功能化的组分。在使用静电纺丝方法制备纳米复合材料的过程中发现,使用功能化 MWNTs 的纺丝形成的珠串缺陷要少于未功能化的组分。并且通过 TEM 发现在纳米纤维内部的 MWNTs 沿纤维轴向产生明显取向。

Yang 等^[28]介绍一种在磁场作用下的静电纺丝法,通过此方法(装置如图 9 所示)不仅能够具备静电纺丝法的优点,最主要还能够通过磁场的作用使制备的纤维根据需要进行定向排布。纺丝所选取的聚合物溶液为聚乙烯醇(PVA),由于溶液没有磁性故在其中混入了少量磁性 Fe_3O_4 纳米颗粒,通过磁性纳米颗粒在磁场中受到磁场的作用,驱使纺丝液在磁场中沿磁力线的方向定向排布,从而使纺丝液在接收装置

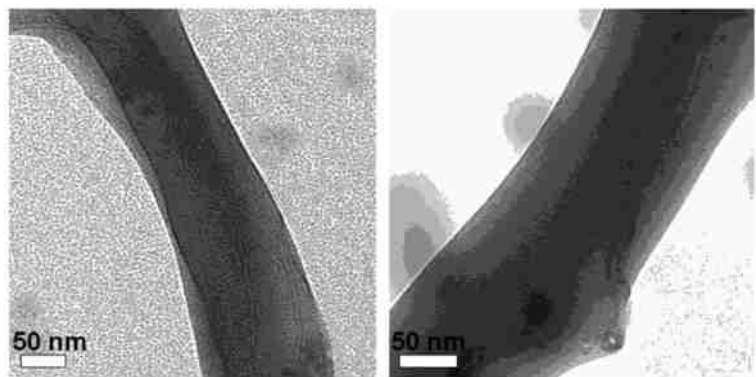


图 8 静电纺丝方法制备出蚕丝蛋白和 MWNTs 复合纳米纤维的 TEM 图^[26]
Figure 8 TEM images of the electrospun nanofibers of the silk fibroin/MWNT composites^[26]

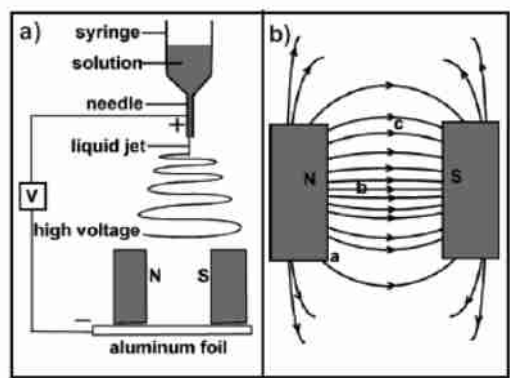


图 9 磁场作用下取向纤维的静电纺丝装置示意图^[28]
Figure 9 Illustration of the apparatus for magnetic electrospinning to generate aligned fibers^[28]

上定向排布。此外,他们通过改变接收装置的摆放位置(转动 90°),再进行第二次纺丝即能够制备出网状阵列结构如图 10 所示。静电纺丝法作为一种较为简单的纳米纤维制备方法,能够综合电场、磁场、喷口处挤出力等作用力,从而促使碳纳米管在纳米纤维内部定向排列。

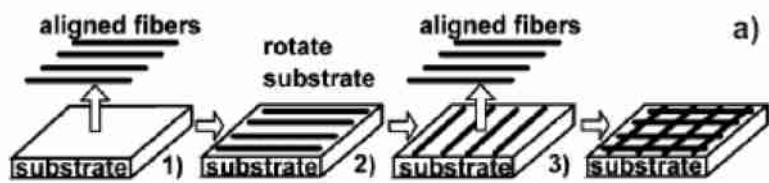


图 10 制备多层结构产物的制备方法^[28]
Figure 10 The strategy for the formation of multilayered structures^[28]

4 液晶相诱导碳纳米管取向

液晶分子独特的分子结构,其液晶相能够促使体系中的碳纳米管沿着作用力场的方向产生取向效果,通常施加的作用力场为外力场、电力场以及磁力场等^[29]。Lynch 等^[30]将 SWNTs 以及 MWNTs 分散于向列型液晶溶液中,通过电场作用促使液晶产生取向排列,从而使其中悬浮的 MWNTs 也随之产生取向排列。如图 11 中可以看到,在施加了足够强的电场(1.8V/μm)之后,MWNTs 产生了与原先排列方向垂直的取向状态。

Song 等^[31]在水中制备了含有向列型液晶相的 MWNTs。通过观察加入不同浓度的 MWNTs 在水相中的分散状态可以看出,在其浓度超过 4.3%这一临界点时,其中的液晶相即出现彩条状各向异性现象。

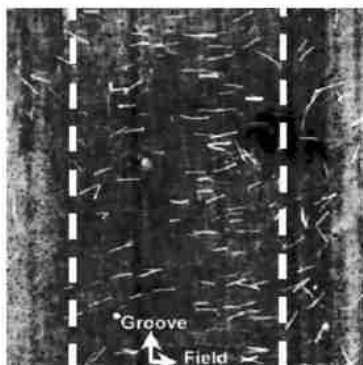


图 11 在 1.8 V/mm 电场下 LC/MWNTs 的 AFM 图^[30]

Figure 11 This AFM image of LC/MWNTs in 1.8 V/mm electric field^[30]

Jeon 等^[32] 通过向列型液晶分子结构特点以及与其中取向排布的 CNTs 之间的相互作用, 使用外加强电场力促使 CNTs 产生沿电场方向的动态响应效果, 如图 12 所示。通过调整外加电场的作用方向, 使其中的液晶分子沿不同方向产生取向, 从而形成 CNTs 对电场的动态响应效果。

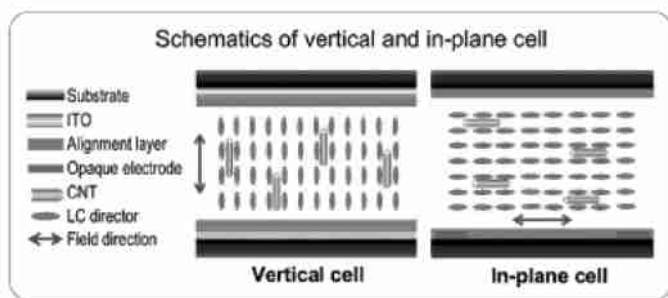


图 12 分散于液晶分子中的 CNTs 随电场的方向改变的动态响应示意图^[30]

Figure 12 The schematics of dynamic response of carbon nanotubes dispersed in nematic liquid crystal^[31]

5 结 论

综上所述, 使用取向碳纳米管增强聚合物复合材料, 有助于改善复合材料的力学、光学、电学、耐热性等许多方面性能。取向碳纳米管增强复合材料制备的关键在于通过简单有效的方法促进复合材料在加工过程中实现取向, 其中有效可行的方法有外力、电场、磁场、结晶诱导力作用等。这些方法在一定程度上改善了碳纳米管在聚合物复合材料中的取向状态, 提高了复合材料在取向方向的力学和电学性能。但同时应该看到这些方法均没有使碳纳米管完美取向, 可能的途径是工艺的创新和精细改进, 甚至是多种工艺的复合加工, 如电场与磁场的复合、电场与力场的复合等加工新方法, 促进碳纳米管/聚合物复合材料的高度取向。我们相信, 这些方法是大规模生产高性能碳纳米管/聚合物复合材料行之有效的技术手段, 这些方法的研究和发展将是今后相当长一段时间内取向碳纳米管复合材料研究的一个方向, 同时也将大大推动碳纳米管/聚合物复合材料的应用和发展。

参考文献:

- [1] Iijima S. Nature, 1991, 354(6348): 56~58.
- [2] Popov V N. Mater Sci Eng, 2004, 3(43): 61~102.
- [3] Andrews R, Weisenberger M C. Curr Opin Solid State Mater Sci, 2004, 1(8): 31~37.
- [4] Jin L, Bower C, Zhou O. Appl Phys Lett, 1998, 73(9): 1197~1199.
- [5] Shi X D, Yeoh W K, Shcherbakova O. Adv Mater, 2006, 18(6): 785~788.
- [6] 陈利, 瞿美臻, 王贵欣, 等. 高分子材料科学与工程, 2004, 20(5): 46~54.

- [7] Haggemueller R, Gommans H H, Rinzler A G, et al. *Chem Phys Let*, 2000, 330(3~4): 219~225.
- [8] Wood J R, Zhao Q, Wagner H D. *Composites*, 2001, 32(3~4): 391~399.
- [9] Chen W, Tao X M. *Appl Surf Sci*, 2006, 252(10): 3547~3552.
- [10] 鲁江, 简义辉, 张慧慧, 等. 新型炭材料, 2007, 22(2): 159~164.
- [11] Cooper C A, Ravich D, Lips D, et al. *Compos Sci Technol*, 2002, 62(8): 1105~1112.
- [12] Wang Q, Dai J F, Li W X, et al. *Compos Sci Technol*, 2008, 68(7~8): 1644~1648.
- [13] Dai J F, Wang Q, Li W X, et al. *Mater Let*, 2007, 61(1): 27~29.
- [14] Fan Z H, Advani S G. *Polymer*, 2005, 46(14): 5232~5240.
- [15] Sung M J, Hyun Y J, Jung S S. *Carbon*, 2008, 46(14): 1973~1977.
- [16] Martin C A, Sandlera J K W, Windle A H, et al. *Polymer*, 2005, 46(3): 877~886.
- [17] Yang W, Wei W, Liu L, et al. *Diam Rekt Mater*, 2008, 17(11): 1877~1880.
- [18] Kimura T, Ago H, Tobita M, et al. *Adv Mater*, 2002, 14(19): 1380~1383.
- [19] Fujiwara M, Oki E, Hamada M, et al. *J Phys Chem A*, 2001, 105(18): 4383~4386.
- [20] Camponeschi E, Vance R, Al-Haik M, et al. *Carbon*, 2007, 45(10): 2037~2046.
- [21] Steinert B W, Dean D R. *Polymer*, 2009, 50(3): 898~904.
- [22] 赵昕, 张清华. 合成纤维工业, 2008, 31(5): 35~39.
- [23] 高锋, 隋刚, 于运花, 等. 材料导报, 2007, 21(11): 156~176.
- [24] 龚华俊, 杨小平, 陈国强, 等. 高分子学报, 2005(2): 297~300.
- [25] Shin M K, Kim Y J, Kim S I, et al. *Sens Actuators*, 2008, 134(1): 122~126.
- [26] Kang M, Chen P, Jin H J. *Curr Appl Phys*, 2009, 9(1): S95~S97.
- [27] Saeed K, Park S Y, Lee H J. *Polymer*, 2006, 47(23): 8019~8025.
- [28] Yang D Y, Lu B, Zhao Y, et al. *Adv Mater*, 2007, 19(21): 3702~3706.
- [29] Xie X L, Mai Y W, Zhou X P. *Mater Sci Eng R*, 2005, 49(4): 89~112.
- [30] Lynch M D, Patrick D L. *Nano Let*, 2002, 2(11): 1197~1201.
- [31] Song W H, Kimbich I A, Windle A H. *Science*, 2003, 302(5649): 1363.
- [32] Jeon S Y, Park K A, Baik I, et al. *Nano: Brief Rep Rev*, 2007, 2(1): 41~49.

The Methods and Technique of Alignment of Carbon Nanotubes during the Processing of CNTs/Polymer Composite Materials

QIU Jun, YUAN Jie, WANG Guo-jian

(School of Material Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Carbon nanotubes (CNTs) possess excellent mechanical and electrical properties, but the random state of CNTs in their composite materials limits greatly to embody these performance. The approaches to align CNTs in composite materials processing were summarized in this paper. The main approaches including external force, electric field, magnetic field, liquid crystalline phase were introduced and the advantages and disadvantages of these approaches were evaluated. It can be concluded that the carefully designed force field, electric field, magnetic field and liquid crystalline phase enables CNTs to align in polymer composites processing, and thus improve the mechanical and electrical properties of polymer composites but the degree of alignment in all mentioned approaches has to be improved in the future.

Key words: Carbon nanotubes; Polymer composites; Alignment; Electric field; Magnetic field