

碳纳米管/聚合物纳米复合材料研究进展

王 彪¹, 王贤保², 胡平安², 刘云圻^{*2}, 王华平¹, 江建明¹, 朱道本²

(1. 东华大学材料科学与工程学院, 上海 200051;

2. 中国科学院化学所, 北京 100080)

摘要:碳纳米管/聚合物纳米复合材料是近几年发展起来的一个新的研究方向。本文从增强和功能性两个方面评述了碳纳米管/聚合物纳米复合材料的发展过程以及最新进展, 详细讨论了碳纳米管在聚合物中的分散、取向和界面相互作用对复合材料力学性能的影响, 介绍了碳纳米管的加入赋予聚合物的一些新的光电性能, 并对今后的研究方向进行了展望。

关键词:碳纳米管; 聚合物; 纳米复合材料

前言

碳纳米管的发现^[1~3]是继 C₆₀ 之后碳家族中出现的又一新成员, 其独特的结构、奇异的性能和潜在的应用价值, 引起了科学家们极大的兴趣, 10 年多来一直是世界科学研究的热点之一^[4]。碳纳米管是由类似石墨结构的六边形网格卷绕而成的、同轴中空“微管”, 两端的“碳帽”由五边形或七边形网格参与封闭, 根据石墨片层数的不同, 碳纳米管可分为单壁管(SWNT)和多壁管(MWNT)两种。由于碳纳米管的径向尺寸很小, 管的直径一般在几纳米到几十纳米, 而碳纳米管的长度一般在几微米到几毫米, 因此, 碳纳米管被认为是一种典型的一维纳米材料^[5]。针对碳纳米管的不同性能, 对其应用研究已经涉及到纳米电子器件^[6]、场发射器^[7]、储氢材料^[8,9]、电极材料^[10]、和复合材料^[11~13]等许多方面, 是 21 世纪最有前途的纳米材料之一。

碳纳米管在理论上是复合材料理想的功能和增强材料, 其超强的力学性能可以极大地改善聚合物复合材料的强度和韧性, 独特的光电性能可以赋予聚合物复合材料新的光电性能, 碳纳米管/聚合物纳米复合材料在航天、光电子、纺织、涂料、汽车等领域具有广泛的应用前景, 近年来, 碳纳米管/聚合物纳米复合材料的研究已成为碳纳米管研究中的一个新热点。根据现有的研究结果, 可将碳纳米管/聚合物纳米复合材料的研究分为两个部分, 即碳纳米管/聚合物增强复合材料的研究和碳纳米管/聚合物功能复合材料的研究。本文在结合碳纳米管性能的基础上, 将从这两方面评述碳纳米管/聚合物纳米复合材料的研究进展, 并对今后的研究方向进行了展望。

1 碳纳米管的制备

碳纳米管常规的制备方法主要有三种, 即电弧放电法、化学气相沉积法(又称热解法)和激光蒸发法。电弧放电法可以生产结构比较完整的单壁管和多壁管, 其缺点主要是生产的碳纳米管无序、

作者简介:王彪(1969—), 男, 东华大学材料科学与工程学院博士研究生, 主要从事纳米复合材料, 聚合物功能材料的研究;

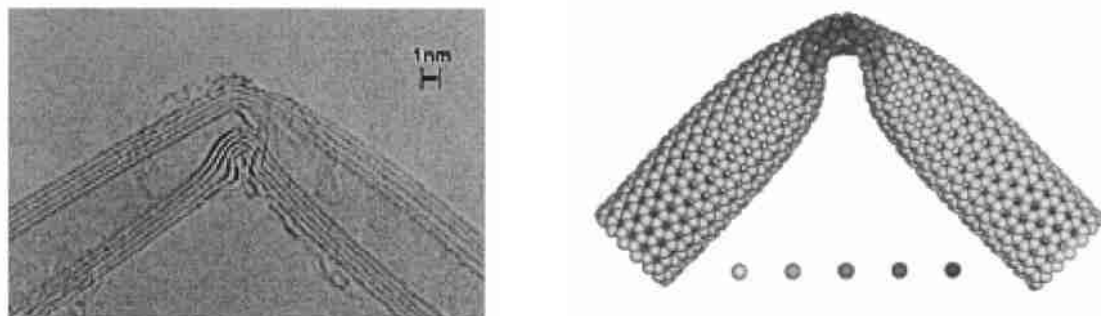
* 通讯联系人。

易缠结、纯度低,产率也仅有 30% 左右。激光蒸发法主要生产单壁管,产率达到 70%,但是其制备费用非常昂贵。化学气相沉积法通常只制备多壁管,具有生产设备简单、生长速度快、产率高、成本低等优点,适合于规模化生产。近年来,碳纳米管的制备技术取得了较大的进展和突破,主要表现为:(1)碳纳米管的批量生产;(2)全新的制备技术;(3)特殊结构和性能的碳纳米管的制备。

日本的昭和电工公司从 1998 年开始研究化学气相沉积法,2001 年该公司宣布其碳纳米管的生产能力为 200g/h。日本三井物产公司宣布从 2002 年 4 月开始建设年产 120t 的碳纳米管生产设备。我国科学家在碳纳米管的批量生产方面也取得了新的突破,清华大学魏飞教授领导的课题组利用纳米聚团床反应器制备碳纳米管技术,实现了 15kg/h 碳纳米管的批量生产,其技术特点是连续化、低能耗,适合于产业化推广。在研究碳纳米管批量生产的同时,新的制备技术也不断涌现,如水热法^[14]、火焰法^[16]、固相复分解反应制备法^[16]、超临界流体技术法^[17]和气相反应法^[18]等。这些新的方法主要解决的问题包括两个方面:(1)降低能耗、简化生产设备,从而降低成本;(2)实现碳纳米管的可控生长,包括直径、管壁厚度以及管的均匀性。为了满足制备纳米光电子元件和其他纳米器件的需求,各种具有特殊结构和性能碳纳米管的制备也成为科学家们关注的焦点,如 Y 形碳纳米管的制备^[19]、环形碳纳米管的制备^[20]以及碳纳米瓶的制备^[21]等。尽管碳纳米管的制备技术取得了很大的进展,生产成本有了大幅下降,然而要真正实现工业化应用仍有许多关键的技术问题需要解决,特别是批量生产具有直径、长度、螺旋度均一的单壁管、多壁管、提高碳纳米管的纯度以简化提纯工艺等。

2 碳纳米管/聚合物增强复合材料的研究

碳纳米管具有优异的力学性能,Treacy 等^[22]通过在透射电镜下观察碳纳米管的热振动行为得到碳纳米管的杨氏模量,结果表明碳纳米管的杨氏模量可达 1.0Tpa 以上,比一般的碳纤维高一个数量级,大约为钢的一百倍,而密度却只有钢的六分之一。Walters^[23]利用 LFM(lateral force microscopy)研究了在自由悬空条件下单壁管的拉伸弹性,拉伸强度达 45 ± 7 Gpa,是高强钢的 20 倍。Iijima^[24]等研究了碳纳米管的弯曲性能,他们的试验结果和理论预测表明碳纳米管具有很好的柔韧性,最大的弯曲角度超过 110° ,图 1 是实验和理论模拟结果。由于碳纳米管具有这些优良的力学性能,它被认为是理想的聚合物复合材料的增强填料。



(A)

(B)

图 1 碳纳米管受力弯曲的 TEM 和理论模拟图^[24]

(A)TEM 图(B)理论模拟图

碳纳米管/聚合物纳米复合材料的研究最初是从切片过程中碳纳米管的取向开始的。1994

年, Ajayan^[25]等首先用机械共混的方法制备了碳纳米管/环氧树脂纳米复合材料, 在对复合材料切片过程中, 碳纳米管从聚合物中被拔出并在聚合物表面沿切片方向发生取向。在随后的研究中, 焦点主要集中在以下几个方面: (1) 碳纳米管在各种聚合物中的取向性、分散性对复合材料力学性能的影响; (2) 研究碳纳米管和聚合物之间相互作用力和载荷的有效转移对复合材料的力学性能的影响及其表征手段; (3) 对碳纳米管/聚合物纳米复合材料的力学性能进行理论计算和模拟。

由于碳纳米管径向的纳米级尺寸和高的表面能导致其在聚合物中容易团聚, 分散性较差, 不仅降低了碳纳米管的有效长径比。而且容易造成管与管之间的滑移, 使得碳纳米管的增强效果变差。Salvetat 等^[26]首先研究了分散性对碳纳米管/聚合物纳米复合材料力学性能的影响, 他们认为碳纳米管之间的团聚和滑移不能使碳纳米管起到有效的增强作用。Gong 等^[27]研究了非离子性表面活性剂($C_{12}EO_8$)对碳纳米管在环氧树脂聚合物中分散性的影响, 加入表面活性剂后, 添加 1%(wt) 的碳纳米管可使聚合物的玻璃化温度由 63℃ 提高到 88℃, 弹性模量增加 30%, 研究表明表面活性剂起到分散和增塑的效果, 活性剂的憎水端靠近碳纳米管而亲水端与环氧树脂形成氢键作用。Qian 等^[28]通过高能超声用溶液蒸发法制备了分散性较好的 CNT/聚苯乙烯(PS)复合材料膜, 1%(wt) 的添加量, 使得弹性模量增大 36%~42%, 断裂应力增长 25%, 而用碳纤维增强达到同样效果需添加 10%(wt) 量。Shaffer 和 Windle^[29]将碳纳米管截断至 1.1 μm 长, 并分散在水中, 制备了碳纳米管/聚乙烯醇复合材料, 认为碳纳米管对聚乙烯醇玻璃化温度影响不大, 碳纳米管的加入使得管周围的聚合物分子的活动能力减弱, 造成高温段玻璃化转化区域变宽。Haggenmuller 等^[30]用熔融纺丝和溶液铸膜的方法制备了单壁碳纳米管/PMMA 复合材料纤维和膜, 研究表明模量随牵伸比的增加变化不大, 而拉伸强度增长却很大, 熔融纺丝工艺可以促进碳纳米管在 PMMA 中分散。

除了分散性外, 碳纳米管在聚合物中的取向对复合材料的微观力学性能也有较大的影响。Jin 等^[31]认为可以通过机械拉伸的方法获得线性取向的纳米复合材料, 并用 X 射线散射研究了碳纳米管的取向程度, 结果表明取向程度与拉伸比和碳纳米管含量有关。该研究小组进一步研究了线性取向的复合材料膜中碳纳米管的形变行为, 认为断裂应变为碳纤维的 10~100 倍, 并具有很好的载荷转移效率。Haggenmuller 及其合作者^[30]认为熔融纺丝工艺可以提高碳纳米管在聚合物中的取向。Andrews 等^[32]将 5%(wt) 的单壁碳纳米管分散到各向同性的沥青中, 制备碳纳米管线性取向的沥青基碳纤维, 与未添加碳纳米管的沥青碳纤维相比, 拉伸强度增加了 90%, 弹性模量增加了 150%, 电导率提高了 340%, 这为设计和制备硬度高又柔软的碳纤维提供一个新的方法。

以上这些开创性的研究工作为提高碳纳米管在聚合物中的分散和取向提供了有益的参考, 可见碳纳米管在聚合物中分散与取向对碳纳米管/聚合物纳米复合材料的力学性能有较大的影响, 提高碳纳米管在聚合物中分散性的方法主要是高能超声、表面活性剂、碳纳米管的化学修饰和改性以及复合材料的制备工艺, 其中高能超声和化学修饰不可避免的会破坏碳纳米管的结构, 导致碳管表面缺陷的增多。Ajay 等^[33]研究认为, 对碳纳米管进行表面化学官能化, 使得碳纳米管的力学性能降低 15% 左右。所以选用合适的分散剂或加工工艺是提高碳纳米管在聚合物中分散性能的最佳方法。而通过机械拉伸等成形工艺可以有效地提高碳纳米管在聚合物中取向。

影响碳纳米管/聚合物纳米复合材料力学性能的另一个重要因素是碳纳米管和聚合物之间的界面作用力。相互作用强, 载荷就可以有效转移给碳纳米管; 相互作用小, 碳纳米管就可能在剪切力作用下从聚合物中被拔出(载荷不能有效转移)。Ajayan 小组^[34]首先用 Raman 光谱研究了 5%(wt) 碳纳米管/环氧树脂纳米复合材料在拉伸和压缩载荷作用下的形变行为, 观察到管束中单壁碳纳米管的滑移行为。Cooper 及其合作者^[35]用 Raman 光谱谱线变化研究了环氧树脂和碳纳米管复

合材料之间的应力转移,研究表明 2619cm^{-1} 的 G' Raman 峰向低波长方向移动,对应石墨结构的应变行为,说明应力的有效转移,碳纳米管起到了增强效果。这些开创性的工作为研究碳纳米管和聚合物之间的相互作用提供了一个有效的表征手段。

Qian 等^[28]首先用原位(in situ)TEM 观察了碳纳米管/聚苯乙烯纳米复合材料形变机理和载荷转移,利用 TEM 高密度的电子束照射,使得样品由于局部热应力增大而产生开裂,观察发现开裂由碳纳米管密度较小的部位首先开始,碳纳米管的断裂发生在裂缝中,而不是在 PS 基体内,说明碳纳米管和 PS 之间的作用较强,载荷被有效的转移到碳纳米管上(见图 2)。这个方法对直接观察和研究碳纳米管/聚合物复合材料的断裂机理和载荷转移情况具有重要意义。最近, Jian 等^[36]用 AIBN(2,2-azobisisobutyronitrile)引发打开碳纳米管的 π 键,制备了碳纳米管/聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)纳米复合材料,他们认为碳纳米管参与了 PMMA 的聚合,形成了碳纳米管-PMMA 之间强的 C—C 相互作用从而提高碳纳米管和聚合物的相互作用。Gong 等^[27]用表面活性剂来增强碳纳米管和聚合物之间的相互作用,以实现载荷的有效转移,取得了良好的效果。

在实验研究的同时,理论研究也取得了一定进展。Lordi 等^[37]用分子力学研究了碳纳米管和聚合物之间的相互作用力,其中包括:(1)相与相之间的化学键合作用;(2)相与相之间的范德华作用;(3)界面的摩擦力。他们惊奇的发现碳纳米管/聚合物纳米复合材料的力学性能主要依赖于聚合物分子螺旋形的构型,而碳纳米管和聚合物之间的相互作用力和界面摩擦力对复合材料的力学性能贡献不大。因为通过化学键合或通过碳纳米管表面官能化增加摩擦力,都会破坏碳纳米管自身的结构,导致石墨层缺陷的增多,所以增加相与相之间范德华吸引力是提高复合材料力学性能的最有效方法,而范德华作用的大小取决于聚合物种类及其构型。另外,Shaffer^[29], Qian^[28]等还用短纤维增强复合材料的力学模型对碳纳米管/聚合物纳米复合材料的力学性能进行了模拟,并与实验结果进行了比较。Wise 和 Hinkley^[38]理论计算表明,与石墨/聚合物复合材料相比,碳纳米管和聚合物界面原子之间的相互作用对复合材料的力学性能具有更大的影响。

3 碳纳米管/聚合物功能复合材料的研究

利用碳纳米管独特的光电学性能,还可以制备新型的碳纳米管/聚合物光电材料。碳纳米管侧壁碳原子的 sp^2 杂化形成大量离域的 π 电子,这些电子可以被用来与含有 π 电子的共轭聚合物通过 $\pi-\pi$ 非共价键作用相结合,制备碳纳米管/聚合物功能复合材料。Curran 等^[39,40]利用 MWNT 与 Poly(m-phenylenevinylene-co-2,5-dioctoxy-p-phenylenevinylene)(PmPV)通过 $\pi-\pi$ 非共价键作用制备了 MWNT/PmPV 功能复合材料。研究表明,这种复合材料的导电性可比 PmPV 增大 8~10 个数量级,并能提高发光二极管在空气中的稳定性,这种 $\pi-\pi$ 非共价键作用不仅可以使碳纳米管均匀分散在聚合物基体中,而且使聚合物与碳纳米管界面作用力大大增强。该小组还研究了 PPV(Poly(phenylenevinylene)及其衍生物与碳纳米管复合材料的光致发光性质和非线性光学性能等。Stoddart 等^[41]对 SWNT/PmPV 复合材料的界面作用进行了较系统的研究,结果证实了聚合物与碳纳米管界面之

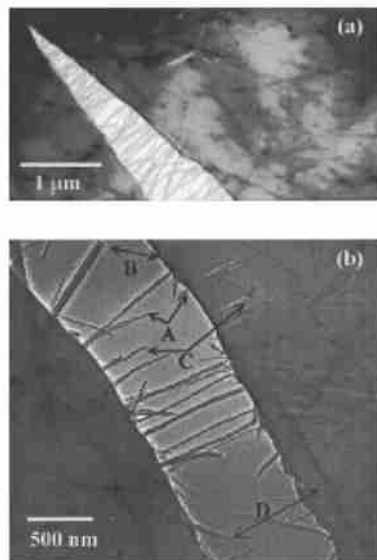


图 2 原位观测 CNT/PS 复合材料断裂行为的 TEM 图^[28]

间 $\pi-\pi$ 非共价键作用的存在,聚合物的分子链缠绕在碳纳米管周围(见图 3)。

Musa 等^[42]制备了 MWNT 和 Poly(3-octylthiophene)组成的复合材料,电导率提高了 5 个数量级。Ago 等^[43]用 SWNT/PPV 复合材料制备了聚合物光电器件,其量子效率比标准 ITO 提高了 2 倍。Kymakis 等^[44]研究了 SWNT/聚(3-辛基噻吩)功能复合材料,并用此材料制备了二极管,其短路电流增加 2 个数量级。Tang 等^[45]利用原位聚合反应得到了 MWNT/聚苯乙炔复合材料,具有较好的光限幅效应。中科院的万梅香等^[46,47]也通过在碳纳米管上进行原位聚合反应,制备了碳纳米管/聚吡咯(PPy)复合材料,并对其电、磁、热学性能进行了研究,这种复合材料可以作为电池和电容器的电极材料。另外,Dai Liming 研究小组^[48,49]合成了碳纳米管阵列/聚合物(如聚吡咯、聚苯胺等)功能复合材料,这种线状复合材料在光电纳米器件以及传感器等方面有广阔的应用前景。

对于非导电聚合物要获得抗静电效果,其电导率要达到 $\sigma=10^{-6}\text{Sm}^{-1}$ 以上。最近,Sandler 等^[50]制备了环氧树脂/碳纳米管复合材料,0.1%(vol)的碳纳米管添加量,复合材料电导率达到 $\sigma=10^{-2}\text{Sm}^{-1}$,而对聚合物的其他性能没有影响。Zhaoxia Jin 等^[51]研究了 Poly(ethyleneglycol)、Poly(2-vinylpyridine)、poly(4-vinylpyridine)等聚合物和 MWNT 复合材料的光电性能,结果表明这些复合材料具有非线性光学特性。

4 结论与展望

碳纳米管因其优异的物化性能和独特的光电性能成为纳米复合材料的理想填料。由碳纳米管和聚合物组成的两元纳米复合材料,可以将碳纳米管优良的力学和光电性能和聚合物的可加工等性能结合起来,是近几年发展起来的碳纳米管的一个重要应用研究方向,具有广泛的应用前景。从目前的研究现状来看,碳纳米管/聚合物纳米复合材料的研究尚处于起步阶段,尚有许多理论问题有待发展和完善。今后将首先在以下几个方面寻求突破:第一,碳纳米管和聚合物两相之间相容性的研究;第二,两相之间界面作用的表征和研究;第三,提高碳纳米管的分散和在聚合物中的取向的方法研究;第四,碳纳米管的加入对聚合物结构性能的影响。我们相信,通过碳纳米管聚合物纳米复合材料的基础和应用研究,可以获得各种性能优异的纳米复合材料,从而可以推动纳米电子学、功能材料、生物医药、航空航天等学科的发展。

致谢:本工作得到国家自然科学基金,国家重点基础研究发展规划和中国科学院的资助,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] Iijima S. Nature, 1991, 354, 56.
- [2] Iijima S, Ichihashi T. Nature, 1993, 363, 603.
- [3] Bethune D S, Kiang C H, de Vries M S, et al. Nature, 1993, 363, 605.
- [4] Cook J, Sloan J, Green M L H. Chemistry & Industry, 1996, 600.
- [5] Pan Z W, Xie S S, Chang B H, et al. Nature (London), 1998, 384, 631.
- [6] Saito S. Science, 1997, 278, 77.
- [7] De Heer W A, Bonard J M, Fauth K, et al. Adv. Mater., 1997, 9, 87.



图 3 PmPV/SWNT 复合材料结构示意图^[41]

- [8] Liu C, Cheng H M, Dresselhaus M S, et al. *Science*, 1999, 286, 1127.
- [9] Chen P, Wu X, Liu J, et al. *Science*, 1999, 285, 91.
- [10] Frackowiak E, Gautier H, et al. *Carbon*, 1999, 37, 61.
- [11] Files B S, Mayeaux B M. *Adv Mater. & Proc*, 1999, 156, 47.
- [12] Calvert P. *Nature*, 1999, 399, 210.
- [13] Savetat J P, Bonard J M, Thomson N H, et al. *Appl Phys A*, 1999, 69(3), 255.
- [14] Jiang Y, Wu Y, Qiang Y T, et al. *J Am Chem Soc*, 2000, 122(49), 12383.
- [15] Vander Wal R L, Tichih T M. *J Phys Chem. B*, 2001, 105, 10249.
- [16] Oloughlin J L, Kiang C H, Wallace C H, et al. *J Phys Chem B*, 2001, 105, 1921.
- [17] Motiei M, Hacohen Y R, Calderon Moreno J, et al. *J Am Chem Soc*, 2001, 123, 8624.
- [18] Ago H, Ohshima S, Uchida K, et al. *J Phys Chem B*, 2001, 105, 10453.
- [19] Li W Z, Wen J G, Ren Z F. *Appl Phys Lett*, 2001, 79(12), 1879.
- [20] Ahlskog M, Seynaeve E, Vullers R J M, et al. *Chem Phys Lett*, 1999, 300, 202.
- [21] Liu S, Boeshore S, Fernandez A, et al. *J Phys Chem B*, 2001, 105, 7606.
- [22] Treacy M M, Ebbesen T W, Gibson J M. *Nature*, 1996, 381, 678.
- [23] Walters D A, Ereson L M, Casavant M J, et al. *Appl Phys Lett*, 1999, 74, 3803.
- [24] Iijima S, Brabec C, Maiti A, Bernholc J. *J Chem Phys*, 1996, 104(5), 2089.
- [25] Ajayan P, Astephan O, Colliex C and Trauth D. *Science*, 264, 1212.
- [26] Salvétat J P, Briggs G A D, Bonard J M, et al. *Phys Rev Lett*, 1999, 82(5), 944.
- [27] Gong X, Liu J, Baskaran S, Voise R, Young J. *Chem Mater*, 2000, 12, 1049.
- [28] Qian D, Dickey E C, Andrews R, Rantell T. *Appl Phys Lett*, 2000, 76(20), 2868.
- [29] Shaffer M S P, Windle A H. *Adv Mater*, 1999, 11(11), 937.
- [30] Haggemueller R, Gommans H, Rinzler A, Fischer J, Winey K. *Chem Phys Lett*, 2000, 330, 219.
- [31] Jin L, Bower C, Zhou O. *Appl Phys Lett*, 1998, 73(9), 1197.
- [32] Andrews R, Jacques D, Rao A M, Rantell T, et al. *Appl Phys Lett*, 1999, 75(9), 1329.
- [33] Ajay G, Susan B Sinnott. *Chem Phys Lett*, 1998, 295, 273.
- [34] Ajayan P, Schadler L, Giannaris C, Rubio A. *Adv Mater*, 2000, 12(10), 750.
- [35] Cooper C A, Young R J, Halsall M. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2001, 32(3~4), 401.
- [36] Jia Z, Wang Z, Xu C, Liang J, et al. *Mater Sci Eng A*, 1999, 271(1~2), 395.
- [37] Lordi V, Yao N. *J Mater Res*, 2000, 15(12), 2770.
- [38] Wise K, Hinkley J. *American Physical Society Spring Meeting*, April 12~16, 2001, Seattle, WA, 2001
- [39] Curran S A, Ajayan P M, Blau W J, et al. *Adv Mater*, 1998, 10(14), 1091—1093.
- [40] Coleman J N, Dalton A B, Curran S A, et al. *Adv Mater*, 2000, 12(3), 213.
- [41] Star A, Stoddart J F, Steuerman D, et al. *Angew Chem Int Ed*, 2001, 40(9), 1721.
- [42] Musa I, Baxendale M, Amaratunga G A, et al. *Synthetic Metals*, 1999, 102, 1250.
- [43] Ago H, Petritsch K, Shaffer M S P, et al. *Adv Mater*, 1999, 11(15), 1281.
- [44] Kymakis E, Amaratunga G A J. *Appl Phys Lett*, 2002, 80, 112.
- [45] Tang B Z, Xu H Y. *Macromolecules*, 1999, 32, 2569.
- [46] Fan J H, Wan M X, Zhu Daoben, et al. *J Appl Polym Sci*, 1999, 74(11), 2605.
- [47] Fan J H, Wan M X, Zhu D B, et al. *Synthetic Metals*, 1999, 102, 1266.
- [48] Huang S M, Mau A W H, Dai L M, et al. *J Phys Chem B*, 2000, 104, 2193.
- [49] Huang S M, Mau A W H, Dai L M, et al. *J Phys Chem B*, 1999, 103, 4223.
- [50] Sandler J, Shaffer M S P, Prasse T, et al. *Polymer*, 1999, 40, 5967.
- [51] Jin Z X, Sun X, Xu G Q, et al. *Chem Phys Lett*, 2000, 318, 505.

Research Progress on Carbon Nanotube/Polymer Nanocomposites

WANG Biao¹, WANG Xian-Bao², HU Ping-an², LIU Yun-qi², WANG Hua-ping¹
JIANG Jian-ming¹, ZHU Dao-ben²

(1. College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 200051, China

2. Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Carbon nanotube (CNT)/polymer nanocomposites are recently one of the research interest in the field of nanomaterials. The recent progress on reinforced and functional CNT/polymer nanocomposites has been reviewed briefly in this paper. The effects of CNT's dispersion, orientation and interaction at the CNT/matrix interface on the mechanical properties of these nanocomposites have been discussed in detail. Some new optoelectronic properties of various CNT/polymer nanocomposites have been described. The research direction of CNT/polymer nanocomposites is also presented.

Key words: Carbon nanotubes; Polymer; Nanocomposites

(上接第 7 页)

- [26] Chen Y S, Stown W, Koch R, et al. USP, 5569709. 1996.
- [27] 岳传龙, 陈光银. 塑料工业, 1990, (5); 18.
- [28] Freeguard G F. Br Polym J. 1974, (6); 205.
- [29] Yenalyev. et al. Polymer Science and Technology [M], Daniel Klempe, 1977.
- [30] Baer M. J Appl Polym Sci. 1972, (16); 1109.
- [31] Freeguard G F J. Appl Polym Sci. 1972, 13(8); 366.
- [32] 陈媛, 李宝芳, 曹建, 等. 化工学报, 2000, 51(3); 362.
- [33] Bodolus C L, Woodhead D. USP, 4542189. 1983; USP, 4692498. 1985.
- [34] Makino Y, Nagai T, Nishimura J. JP, 1182315A2. 1989.
- [35] Khac B L, Sharik C. USP, 4522983. 1983.
- [36] Kitsynai T. JP, 57100104. 1982.
- [37] Li G S, Jorkasky R J. 日本 USP, 4082820. 1977; USP, 4137281. 1977.
- [38] Moore E R, Lehrer R G, Lyons C E, et al. USP, 3919354. 1974.
- [39] 夏燕敏, 龚燕芳, 尤强, 等. 石油化工, 2001, 30(10); 541.

Synthesis and Studying Progress of the Impact SMA

XIA Yan-min, CHEN De-quan

(Shanghai Research Institute of Petrochemical Technology, Shanghai 201208, China)

Abstract: The main factors affecting the toughening effect of the impact SMA were discussed from the toughening mechanisms of the brittle polymer. The different process include bulk, solution and imitate bulk polymerization were compared. The application trends of the impact SMA were prospected.

Key words: Styrene malaic-anhydride copolymer; Toughening; Impact SMA