

可降解聚合物/层状硅酸盐纳米复合材料的研究进展

易菊珍, 张黎明

(中山大学化学与化学工程学院高分子研究所, 广州 510275)

摘要: 作为一类性能优良的环保功能材料, 生物降解性聚合物/层状硅酸盐(BPLS)纳米复合材料正日益引起人们的关注。本文综述了 BPLS 纳米复合材料的制备途径、结构表征方法及其性能特点, 同时对其应用前景作了展望。

关键词: 纳米复合材料; 生物降解性聚合物; 层状硅酸盐

近年来, 有关生物降解性聚合物/层状硅酸盐(BPLS) 纳米复合材料的制备、结构与性能关系的研究备受关注。究其原因, 主要是因为基于聚烯烃、聚苯乙烯、聚氯乙烯一类的传统聚合物/粘土纳米复合材料, 当其使用后绝大部分废弃物不能自然降解, 从而对环境造成直接或间接污染。相比之下, BPLS 纳米复合材料则可有效克服这一缺点, 是一类与生态和环境相适应的“绿色聚合物复合材料”; 不仅如此, 这类材料还改善了单一生物降解性聚合物材料的某些性能, 如力学、耐热、阻燃、气体阻隔性能等^[1-11], 从而拓展了材料的应用范围。本文拟就该类新型纳米复合材料的组成、制备途径、结构表征方法及其性能与应用特点作一综述。

1 BPLS 纳米复合材料的组成

目前已报道用来合成 BPLS 纳米复合材料的高聚物主要为化学合成类可生物降解聚合物, 如聚乳酸(PLA)、聚乙烯醇(PVA)、聚环氧乙烷(PEO)、聚 ϵ -己内酯(PCL)、聚丁二酸丁二酯(PBS)、不饱和聚酯、聚羟基丁酯(PHB)以及一些二羧酸(丁二酸或己二酸)与二醇(1,4-丁二醇或乙二醇)缩聚而成的脂肪族聚酯(APES)等, 少数涉及可生物降解高分子及其衍生物; 而用来制备 BPLS 纳米复合材料的层状硅酸盐通常属于 2/1 型层状硅酸盐结构家族, 如粘土、季铵盐交换的蒙脱土(OMMT)、十二烷基铵盐交换的氟锂土、云母、海泡石等。表 1 列出了近年国外文献报道的一些代表性的 BPLS 纳米复合材料的组成。

表 1 代表性的 BPLS 纳米复合材料的组成
Table 1 Composition of typical biodegradable polymers/layered silicate nanocomposites

序号	生物降解性聚合物	层状硅酸盐	参考文献
1	聚氨酯-脲(PUU)	蒙脱土(OMMT)	[5]
2	不饱和聚酯	蒙脱土(OMMT)	[6]
3	聚羟基丁酯(PHB)	蒙脱土(OMMT)	[7~9]
4	聚丁二酸丁二酯(PBS)	蒙脱土(OMMT)	[10]
5	聚 ϵ -己内酯(PCL)	粘土(clay)	[11~13]
6	聚乳酸(PLA)	蒙脱土(OMMT)	[14~17]
7	聚乳酸(PLA)	云母(mica)	[18]
8	聚乙烯醇	MMT	[19]
9	聚环氧乙烷	MMT	[20]
10	脂肪族聚酯(APES)	粘土(clay)	[21, 22]
11	尼龙 6 (PA-6)	粘土(clay)	[23~26]
12	多糖衍生物	MMT	[27]
13	热塑性淀粉(TPS)	粘土(clay)	[28]
14	纤维素(cellulose)	MMT	[29]

基金项目: 中山大学百人计划科研启动基金资助项目(31000-3253290), 广东省自然科学基金研究团队项目(039184), 国家自然科学基金资助项目(30470476);

作者简介: 易菊珍(1972—), 女, 湖北天门人, 博士, 讲师, 研究方向为高分子复合材料. E-mail: cesyiz@zsu.edu.cn.

2 BPLS 纳米复合材料的制备

2.1 原位插层聚合复合法

该法首先将聚合物单体插入经插层剂处理后的具有层状结构的硅酸盐片层之间,然后原位聚合,利用聚合放出的热量克服硅酸盐片层间的库仑力,使其剥离,从而使硅酸盐片层与聚合物基体实现纳米尺度复合,并均匀分散在聚合物基体中,形成 BPLS 纳米复合材料。Benedicte 等^[11]用此法合成了聚 ϵ -己内酯(PCL)/粘土纳米复合材料。他们首先将一定量三种不同的蒙脱土,包括未有机化处理的钠离子蒙脱土(Na-MMT),经烷基季铵盐(插层剂 1)处理的烷基蒙脱土(MMT-C₈H₁₇)和经末端为羟基的烷基季铵盐(插层剂 2)处理的羟基蒙脱土[MMT-(CH₂CH₂OH)₂]分别放在三个聚合试管中真空干燥 3 h,然后在氮气保护下加入单体 ϵ -己内酯反应 1 h,再加入引发剂二丁基二甲氧基锡[Bu₂Sn(MeO)₂],反应 24 h。图 1 显示了两种插层剂的结构。

实验中探讨了三种蒙脱土对聚合物(PCL)的分子量和多分散指数的影响,并研究了 PCL 与不同蒙脱土形成纳米复合材料的形态和性能。结果发现,Na-MMT 和 MMT-C₈H₁₇ 对 PCL 的分子量和多分散指数没有影响,PCL 链段插层进入 MMT 的片层间使 MMT 的层间距增大而形成插层形态的纳米材料,而 MMT-(CH₂CH₂OH)₂ 用量的增加会使 PCL 的分子量和多分散指数减小,原因是其末端羟基基团可作为聚合反应的共引发剂或者链转移剂;材料中 MMT-(CH₂CH₂OH)₂ 层状结构被破坏而分散在 PCL 中形成剥离形态的纳米复合材料。热重分析结果表明剥离形态纳米复合材料的热降解温度高于插层形态的材料,且两者都比纯 PCL 的高。以上结果说明插层剂的选择对所形成材料的形态和性能有很大影响。值得注意的是 PCL 是极少数与未经改性的蒙脱土形成纳米复合材料的聚合物之一。

2.2 溶液插层复合法

溶液插层复合法是聚合物大分子在溶液中借助溶剂而插层进入硅酸盐片层间,然后挥发除去溶剂形成 BPLS 纳米复合材料。美国的 Giannelis^[19]小组以水为溶剂合成了插层与剥离形态共存的 PVA/MMT 纳米复合材料,蒙脱土没有经过有机处理。图 2 是蒙脱土含量为 20% 的 PVA/MMT 纳米复合材料的透射电子显微镜(TEM)观察得到的图片,它清晰地显示了插层与剥离结构共存的形态。日本的 Ogata 小组以氯仿做溶剂制得聚 L 型乳酸(PLLA)/有机蒙脱土^[15]、聚己内酯(PCL)/有机粘土^[12]纳米复合材料,其中有机蒙脱土或有机粘土是钠离子蒙脱土与十六烷基铵盐交换而制得。实验结果发现粘土以几个单层堆积而成的触液取向胶(tactoid)形态分散在聚合物中,没有形成插层结构的复合材料。最近,韩国的 Lim^[21]等以氯仿做溶剂,用末端是羟基的季铵盐做插层剂改性钠离子蒙脱土,合成了一些插层型生物降解脂肪族聚酯(APES)/MMT 纳米复合材料。这种方法需要合适的溶剂来溶解聚合物和粘土,并且有大量的溶剂需要回收,对环境不利。

2.3 熔融插层复合法

熔融插层复合法是将聚合物与层状硅酸盐混合加热熔融,在剪切应力作用下直接进入硅酸盐片层

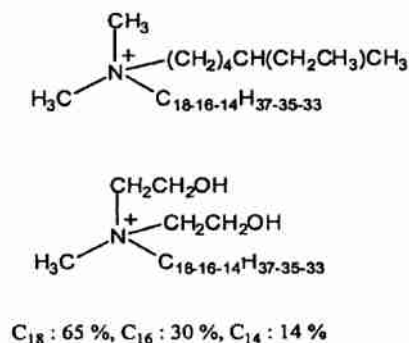


图 1 插层剂的结构

Figure 1 Structures of intercalative agents



图 2 蒙脱土含量为 20% 的 PVA/MMT 纳米复合材料的 TEM 图片

Figure 2 TEM image of 20%MMT/PVA nanocomposite revealing the coexistence of intercalated (A) and exfoliated (B) MMT layers

间,制得 BPLS 纳米复合材料。这是目前最常用的制备方法。APES/粘土^[22]、PLA/MMT^[16]、PLA/云母^[18]、PBS/硅酸盐^[10]等 BPLS 纳米复合材料都是用此法制得。其中熔融插层复合法制备的 PLA/层状硅酸盐纳米复合材料成为人们研究的重点。一方面,因为制备聚乳酸的乳酸来自于土豆、小麦、玉米等天然农作物,而聚乳酸在自然界和人体内可降解;另一方面,聚乳酸/层状硅酸盐纳米复合材料各方面的性能比单一的 PLA 性能更为优良。日本 Sinha ray 小组^[18]用末端是羟基的季铵盐做插层剂改性云母,并与 PLA 混合,在 210℃ 熔融状态下从双螺杆挤出机中挤出混合物而得到插层与剥离形态共存的纳米复合材料。研究发现,PLA/云母纳米复合材料在结晶速率、力学性能、热变形温度、氧气通透性、生物降解性能比单一的 PLA 均得到改善。此外,这个小组^[16]也研究了增容剂对 PLA/C_[18]-MMT 纳米复合材料形态和性能的影响。他们使用寡聚己内酯作增容剂,在 190℃ 下从双螺杆挤出机中挤出混合物而得到插层与剥离形态共存的纳米复合材料。结果证明增容剂使层状硅酸盐的堆积更有序,它提高了复合材料在固态和熔融状态的力学性能。熔融插层操作简单,通用性强,易于工业化生产,且对环境污染小,因而应用前景十分广阔,是目前研究重点。



图3 三种纳米复合材料

Figure 3 Three different types of BPLS nanocomposites

3 BPLS 纳米复合材料的结构表征

依据 BPLS 纳米复合材料特点和制备方法,可制得 3 种纳米复合材料(见图 3)。第一种是插层型(intercalated)纳米复合材料,即聚合物链插入到层状硅酸盐片层之间形成一种聚合物/层状硅酸盐交替有序的多层状态;第二种是剥离型(exfoliated)纳米复合材料,即层状硅酸盐片层完全均匀分散在连续的聚合物基体中;第三种是混合型纳米复合材料,即材料中同时存在插层型和剥离型结构。

通常使用 X 射线衍射(XRD)和透射电子显微镜(TEM)两种技术可以辨别插层型和剥离型两种结构的纳米复合材料。剥离型纳米复合材料的特征是无 XRD 衍射峰。这或者是由于层状硅酸盐片层间距太大,或者是层状硅酸盐片层完全无序。TEM 可以观察复合材料的形态,尤其是观察层状硅酸盐片层完全无序的结构。对于第三种结构,XRD 观察衍射峰变宽,必须结合 TEM 来判定。图 4 显示了三种有机层状硅酸盐/聚合物纳米复合材料的宽角 X 射线衍射(WAXD)图模式和 TEM 观察的图象模式。

除了 X 射线衍射和 TEM 外,核磁共振(NMR)也用来表征层状硅酸盐/聚合物纳米复合材料的形态和层状硅酸盐在剥离型纳米材料中的剥离动力学。Vanderhart 研究小组^[25]在 2001 年首次用固体核磁共振(¹H 和 ¹³C)技术表征了尼龙 6/粘土纳米复合材料的形态。通过测定质子的自旋-晶格弛豫时间(T_1 (H)),他们获得了粘土在聚合物中分散程度及均匀性的信息。Sahoo 等^[30]通过 ¹³C 固体核磁共振谱研究了聚合物链插入蒙脱土片层间的结构和动力学。最近, Nascimento 等^[31]首次用拉曼共振谱表征了苯胺在蒙脱土中聚合形成纳米复合材料的过程。有些作者^[26]使用傅立叶转换红外谱来帮助理解纳米复合材料的结构。

4 BPLS 纳米复合材料的降解性能

据 Tetto 等^[13]研究报道,PCL/OMLS 纳米复合材料比纯 PCL 能更快生物降解。他们认为,有可能是纳米复合材料中 OMLS 的催化作用加快了材料的降解速度,但是对于 OMLS 如何催化而加速降解并不清楚。

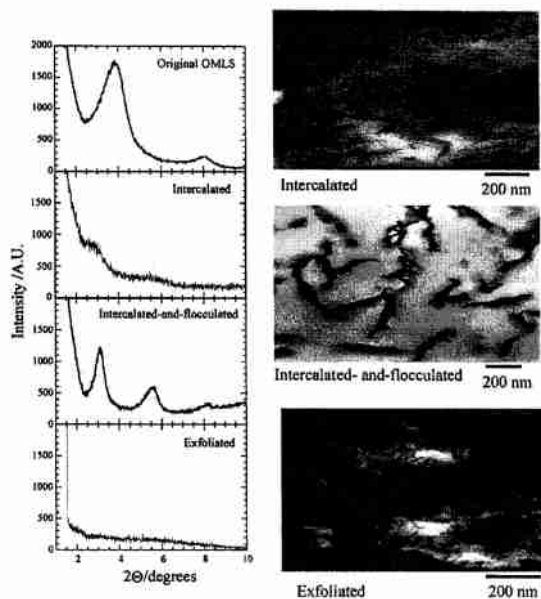


图 4 三种层状硅酸盐/聚合物纳米复合材料的 WAXD 和 TEM 图象模式
Figure 4 WAXD patterns and TEM images of three different types of nanocomposites

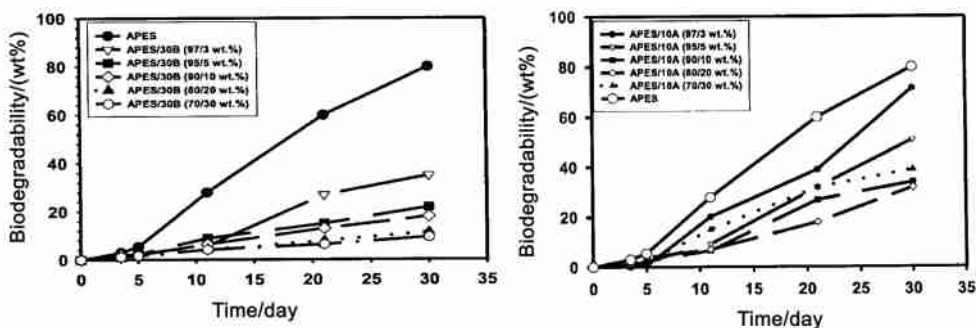


图 5 脂肪族聚酯与两种有机粘土制得的 BPLS 材料生物降解失重与粘土含量的关系
Figure 5 Biodegradability of APES/30B and APES/10A nanocomposites with various contents of clay

Lee 等^[22]报道了一些脂肪族聚酯(APES)/粘土纳米复合材料的生物降解性能,结果显示纳米复合材料的生物降解性能与粘土的功能团结构及粘土含量有关。图 5 显示了脂肪族聚酯与两种有机粘土(即烷基蒙脱土(10A)和羟基蒙脱土(30B))制得的 BPLS 材料生物降解失重与粘土含量的关系。它表明两类 BPLS 材料的降解速度都随粘土含量的增加而降低,且复合材料的降解速度比纯脂肪族聚酯低,APES/10A 材料降解速度比 APES/30B 低。作者认为由于这两类 BPLS 材料中粘土长厚比(L/D)较大,阻隔性能增加,微生物进入聚合物的路径更曲折,因而有效路径和时间更长,聚合物的降解时间因此增加,导致复合材料的降解速度比纯脂肪族聚酯低。粘土含量越高,微生物进入聚合物有效路径和时间越长,降解速度越低。与 APES/10A 材料相比,APES/30B 材料中羟基与脂肪族聚酯的氢键作用使 APES 能更好地插入粘土 30B 中,微生物更难进入 APES/30B 材料导致降解速度更低。文中作者没有提供渗透率数据。

最近,Sinha^[17]研究了纯 PLA 和 PLA/MMT 纳米复合材料的生物降解性能。实验在(58±2)℃下进行,结果发现当 MMT 含量为 4%时,一个月内 PLA 与 PLA/MMT 纳米复合材料的生物降解失重相同;但一个月后 PLA/MMT 纳米复合材料的生物降解失重比纯 PLA 大幅度增加,两个月后已完全降解。图 6 显示了纯 PLA 和 PLA/MMT 纳米复合材料 PLACN4(MMT 含量为 4%)的生物降解情况。

关于降解机理,Sinha^[17]认为粘土终端的羟基基团是使 PLA/MMT 纳米复合材料降解加速的主要原因。在 PLACN4 中,插层的硅酸盐片层很均匀地分散在 PLA 基质中(从 TEM 图片看),这些羟基基团使

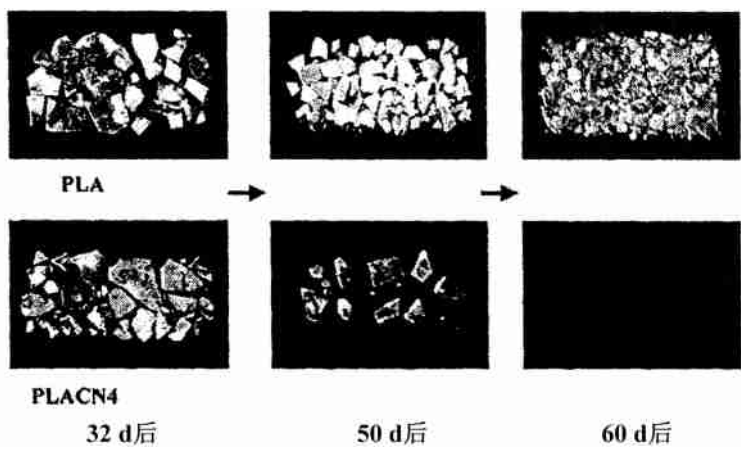


图 6 纯 PLA 和 PLA/MMT 纳米复合材料 PLACN⁴(MMT 含量为 4%)的生物降解情况
Figure 6 Real pictures of biodegradability of neat PLA and PLACN⁴ with time

PLA 吸水后开始各向异性水解,这个过程大约需要一个月时间。这就是 PLACN⁴ 在一个月后加速降解的原因。

5 BPLS 纳米复合材料的其它性能

5.1 力学性能

著名的 Nieleesen^[32] 理论认为,决定 BPLS 纳米复合材料力学性能的主要因素是分散的粘土微粒的长厚比(L/D)。通过系列 BPLS 纳米复合材料动态粘弹性(DMA)研究,他发现在相同的粘土含量的各种纳米复合材料中,插层和剥离共存的 PBS/粘土纳米复合材料的储存模量(G')比剥离结构的尼龙 6/粘土纳米复合材料、混合结构的聚乳酸/粘土纳米复合材料提高更多¹⁰。他认为,由于 PBS 中边缘基团间的相互作用,粘土微粒在聚合物基质中会发生絮凝,导致粘土微粒的长度增加,粘土微粒的长厚比(L/D)也随之增加,所以 PBS/粘土纳米复合材料有更高的模量增加。而在尼龙 6/MMT 纳米复合材料中,由于聚合物基质和硅酸盐间强烈的氢键作用,即使加入少量 MMT,复合材料的拉伸模量也大幅度提高。Lee^[22] 也报道了 APES/粘土纳米复合材料比单一 APES 的拉伸模量有增加。

5.2 热扭曲温度(HDT)和耐热性

热扭曲温度(HDT)是聚合物耐热性的表征指标。Kojima 等^[33] 通过研究发现尼龙 6/层状硅酸盐纳米复合材料的热扭曲温度随粘土含量的增加而增加,随粘土微粒的长厚比(L/D)的增加而增加。作者认为是尼龙 6 和层状硅酸盐的氢键作用导致材料 HDT 的提高。Sinha 等^[17,18] 也发现 PLA/MMT 纳米复合材料的热扭曲温度随着粘土含量的增加而增加。作者认为是由于分散在聚合物中的粘土使材料的力学稳定性增强,PLA 和 SiO₂ 之间的相互作用参数更高,还有插层作用共同促使了 PLA/MMT 纳米复合材料的热扭曲温度提高。

5.3 特殊的气体阻隔性能

人们相信粘土创造了一个“迷宫”或者“弯道”而使 BPLS 的气体阻隔性能增加。图 7 显示了常规复合材料与 BPLS 材料中的弯道。实验证明,气体的渗透率随粘土的长厚比(L/D)的增加而减少。Sinha 等^[18] 测试了各种剥离结构的 PLA/云母纳米复合材料的氧气渗透情况,发现相对渗透系数 P ,即纳米复合材料的氧气渗透系数和纯 PLA 的氧气渗透系数之比,随层状硅酸盐含量的增加而减少。虽然纳米复合材料的气体阻隔性能增加,但对其影响因素如粘土的相对取向和分散情况(插层、剥离和中间状态)却不甚了解。

6 应用前景

通过插层复合技术能够实现有机高分子和无机物在纳米尺度上的复合,得到的 BPLS 材料既体现了

无机材料的刚性、尺寸稳定性、耐热性,又显示了聚合物的韧性、可加工性、耐化学药品性等优异性能,更难得的是它减少了对环境的污染和破坏。可以预见,随着地球环境的不断恶化,开发性能优良而环保的材料必会成为下一个世纪化学工业的重要发展方向。预计 BPLS 材料主要有以下几个方面的应用前景:(1)包装材料,主要是 PCL、APES 的层状硅酸盐纳米复合材料;(2)全降解包装塑料,主要是 PLA、PHB、淀粉的层状硅酸盐纳米复合材料;(3)医药方面可用作药物缓释载体、人体手术缝合线等,具有代表性的产品是聚乳酸,聚羟基脂肪酸类层状硅酸盐纳米复合材料;(4)一次性用品,包括快餐盒、尿布等,主要是 PBS 和 APES 的层状硅酸盐纳米复合材料。目前,作为一个相对新的研究领域,人们对纳米材料的研究尚处于初级阶段,理论上还不成熟,制备技术还不完善,对材料的结构和性能之间的关系还有待进一步探索。

参考文献:

- [1] Giannelis E P. *Adv Mater.* 1996, 8;29
- [2] Giannelis E P, Krishnamooti R, Manias E. *Adv Polym Sci.* 1999, 138;107.
- [3] Vaia R A, Price G, Ruth P N, et al. *Appl Clay Sci.* 1999, 15;11.
- [4] Biswas M, Sinha Ray S. *Adv Polym Sci.* 2001, 155;167.
- [5] Xu R, Manias E, Snyder A J, et al. *Macromolecules.* 2001, 34;337.
- [6] Kornmann X, Berglund L A, Sterete J, et al. *Polym Engng Sci.* 1998, 38;1351.
- [7] Choi H J, Kim J H, Kim J. *Macromol Symp.* 1997, 119;149.
- [8] Park S H, Choi H J, Lim S T, et al. *Polymer.* 2001, 42;5737.
- [9] Maiti P, Batt C A, Giannelis E P. *Polym Mater Sci Engng.* 2003, 88;58.
- [10] Sinha R S, Okamoto K, Okamoto M. *Macromolecules.* 2003, 36;2355.
- [11] Benedicte L, Negege P, Myriam D. *Macromolecules.* 2002, 35;8385.
- [12] Jimenez G, Ogata N, Kawai H, et al. *J Appl Polym Sci.* 1997, 64;2211.
- [13] Tetto J A, Steeves D M, Welsh E A, et al. *ANTEC '99*, 1628.
- [14] Sinha Ray S, Yamada K, Okamoto M, et al. *Nano Lett.* 2002, 2;1093.
- [15] Ogata N, Jimenez G, Kawai H, et al. *J Polym Sci Part B: Polym Phys.* 1997, 35;389.
- [16] Sinha R S, Maiti P, Okamoto M, et al. *Macromolecules.* 2002, 35;3104.
- [17] Sinha R S, Yamada K, Okamoto M, et al. *Polymer.* 2003, 44;857.
- [18] Sinha R S, Yamada K, Okamoto M, et al. *Chem Mater.* 2003, 15;1456.
- [19] Strawhecker K E, Manias E. *Chem Mater.* 2000, 12;2943.
- [20] Bujdak J, Hackett E, Giannelis E P. *Chem Mater.* 2003, 12;2168.
- [21] Lim S T, Hyun Y H, Choi H J, et al. *Chem Mater.* 2002, 14;1839.
- [22] Lee S R, Park H M, Lim H, et al. *Polymer.* 2002, 43;2495.
- [23] Dabrowski F, Bras M Le, Bourbigot S, et al. *Proceedings of the Europ-fillers '99, Lyon-villeurbanne, France, 6-9 September 1999.*
- [24] Okada A, Kawasumi M, Usuki A, et al. *MRS symposium proceedings, Pittsburgh, vol. 171, 1990. p. 45.*
- [25] Vanderhart D L, Asano A, Gilman J W. *Macromolecules.* 2001, 34;3819.
- [26] Loos L, Gleason K K. *Macromolecules.* 2003, 36;2587.
- [27] Margarita D, Montserrat C, Eduardo R H. *Chem Mater.* 2003, 15;3774.
- [28] Park H M, Li X, Jin C Z, et al. *Macromol Mater Eng.* 2002, 287;553.
- [29] Lee D H, Lee H J, Vho M S, et al. *J Polym Sci Part B: Polym Phys.* 2005, 43;59.
- [30] Sahoo S K, Kim D W, Kumar J, et al. *Macromolecules.* 2003, 36;2777.
- [31] Nascimento G, Constantino VRL, Temperini MLA. *Macromolecules.* 2002, 35;7535.
- [32] Nielsen L E. *Mechanical properties of polymer and composites. Vol. 2. New York: Marcek Dekker.* 1981.
- [33] Kojima Y, Usuki A, Okada A, et al. *J Mater Res.* 1993, 8;1185.

(下转第 64 页)

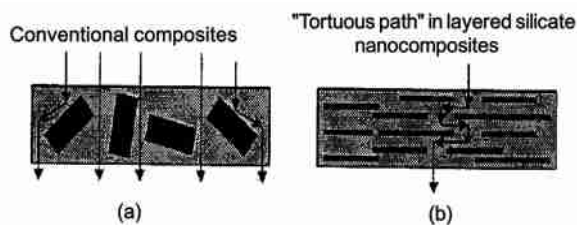


图 7 常规复合材料与 BPLS 材料中的弯道

Figure 7 Conventional material and tortuous path in BPLS nanocomposite

- [4] Bouropoulos K, Bouropoulos N, Melekos M, Koutsoukos P G, Chitanu G C, Anghelescu-Dogaru A G, Carpov A A. *Am Urol Assoc*, 1998, 159 (5); 1755~1761.
- [5] 欧阳健明, 陈德志, 李详平. *无机化学学报*, 2004, 20(5); 613~616.
- [6] Guo S W, Ward M D, Wesson J A. *Langmuir*, 2002, 18; 4284~4291.
- [7] Burdon J, Oner M, Calvert P. *Mater Sci Eng C*, 1996, 4; 133~137.
- [8] Kimberly G C, Laurie B G, Saeed R K, Hassan E S. *J Coll Interf Sci*, 2002, 256; 168~174.
- [9] Baumann J M, Affolter B, Caprez U, Henze U. *Eur Urol*, 2003, 43; 421~425.
- [10] Sheng X X, Ward M D, Wesson J A. *J Am Chem Soc*, 2003, 125; 2854~2855.
- [11] 欧阳健明. *科学通报*, 2004, 49(2); 107~114.
- [12] Millan A. *J Mater Sci*, 1997, 8; 247~250.
- [13] Jung T S, Sheng X X, Choi C K, Kim W S, Wesson J A, Ward M D. *Langmuir* 2004, 20; 8587~8596.
- [14] Zhang D B, Qi L M, Ma J M, Cheng H M. *Chem Mater*, 2002, 14(6); 2450~2457.
- [15] 齐利民, 张冬柏, 马季铭, 程虎民. *高等学校化学学报*, 2004, 25(1); 159~161.
- [16] Jones M, Monga M. *J Endourol*, 2003, 17(10); 855~858.
- [17] Smith C L. *Am Urol Assoc*, 2004, 171; 882~884.

Research Development of Influence of Polymers on Crystallization of Calcium Oxalate and its Significance on Prevention of Urinary Stones

DENG Lan-qing, OUYANG Jian-ming^{*}

(*Institute of Biomineralization and Lithiasis Research, Jinan University, Guangzhou 510632, China*)

Abstract: Polymer can inhibit or promote the formation of calcium oxalate (CaOxa) stones depending on its molecular structure and properties. The research progress of the effect of polymers on nucleation, growth, aggregation, and the adherence between CaOxa crystals and cell membrane was summarized. The mechanisms of polymers on the effect of crystal faces and morphology of CaOxa crystals were also discussed. The problems faced and the developing direction were also indicated.

Key words: Polymer; Calcium oxalate; Urinary calculi

(上接第 36 页)

Research Progress of Biodegradable Polymer/Layered Silicate Nanocomposites

YI Ju-zhen, ZHANG Li-ming

(*Institute of Polymer Science, School of Chemistry and Chemical Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China*)

Abstract: Biodegradable polymer/layered silicate (BPLS) nanocomposites are attracting great interest from researchers as a type of high-performance and environmental benign materials. A review deals with the preparation, characterization, materials properties and mechanism of BPLS nanocomposites. Some uncertain problems and potential applications of this kind of materials were prospected.

Key words: Biodegradable polymer; Layered silicate; Nanocomposites