复合材料学报 第22卷 第3期 6月 2005年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 22 No. 3 June 2005

文章编号: 1000-3851(2005)03-0001-08

凹凸棒土/聚丙烯/聚碳酸酯三元复合材料的力学性能及增韧机理

高 翔, 毛立新*, 张猛响, 金日光
(北京化工大学 材料科学与工程学院, 北京 100029)

摘 要: 通过两步法熔融共混工艺制备了具有核壳特征凹凸棒土(AT)/聚丙烯(PP)/聚碳酸酯(PC)三元复合材料。利用TEM观察复合体系的亚微相态。使用万能材料拉力机、冲击实验仪等手段测试了复合材料的力学性能, 并对三元复合体系的增韧机理进行了探讨。结果表明, PC连续相中形成了以AT为核、PP为壳的分散相。这种核-壳结构特征相包容粒子对PC具有良好的增韧效果, 且强度较PP/PC二元共混体系有所提高。结合冲击断面形貌的SEM分析, 认为AT/PP/PC三元复合体系中的增韧机制主要是界面脱粘、空化作用和AT对分散相的增强作用。

关键词: 聚碳酸酯; 聚丙烯; 凹凸棒土; 亚微相态; 力学性能; 增韧机理
中图分类号: TB332 **文献标识码**: A

MECHANICAL PROPERTIES AND TOUGHENING MECHANISM OF TERNARY AT/PP/PC COMPOSITES

GAO Xiang, MAO Lixin*, ZHANG Mengxiang, JIN Riguang
(College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Ternary Attapugite/Polypropylene/Polycarbonate (AT/PP/PC) composites containing particles with core-shell morphology were achieved *via* the two-step melt blending process. Under the function of shear stress, core-shell structure particles with AT as the core and PP as the shell were formed in the composites. The mechanical properties, morphology, and impact fracture surface of the ternary composites were studied by means of the tensile tester, impact tester, TEM, SEM, *etc.* The results show that high toughness could be obtained by particles in the three component systems with core-shell structure, and the tensile strength and yield stress for the three component composite are higher than those of the PP/PC composite as a result of the incorporation of AT. Based on the SEM analysis for impact morphology, it is considered that the interfacial voiding and the reinforcement effect of AT on the dispersed phase are the main toughening mechanisms in the ternary AT/PP/PC composites.

Keywords: polycarbonate; polypropylene; attapugite; mechanical property; toughening mechanism

聚碳酸酯(PC)是一种重要的工程塑料。但一般的PC制品存在着对缺口敏感、易发生应力开裂等缺陷, 使应用受到一定限制。Wu[1]等根据不同塑料基体在受外力作用时吸收能量的能力和方式不同, 将具有刚性链结构的PC归为"韧性基体", 即基体的裂纹引发能高于裂纹增长能, 缺口冲击强度较低。PC与聚丙烯(PP)等聚烯烃类树脂进行共混, 可以提高缺口抗冲击和耐环境开裂性能, 同时降低生产成本[2]。但是与聚烯烃共混存在两方面的问题: (1)在体系韧性提高的同时强度、模量下降; (2)由于形态和结构的差异使二者不相容, 增容成为这一途径的关键。

硅酸盐粘土矿物(Clay)具有天然的纳米结构, 资源丰富、价格低廉, 被认为是理想的聚合物纳米级填料。文献[3,4]报道了以蒙脱土(Montmorillonite)为代表的层状硅酸盐与聚合物进行插层复合, 制备了一系列纳米复合材料。凹凸棒土(Attapulgite, AT)是一种多孔性层链状含水富镁铝硅

收稿日期: 2004-05-12; 收修改稿日期: 2004-10-17
基金项目: "863"高技术研究计划项目(2002AA334050)
通讯作者: 毛立新, 博士, 副教授, 研究方向: 聚合物基复合材料、聚合物加工流变学 E-mail: maolx@mail.buct.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

酸盐，其基本结构单元为针状或短纤维状单晶体，直径一般在 0.01 μm 左右，长度为 0.1～1 μm[5]。这种新型的粘土短纤维克服了一般玻璃纤维增强树脂的流动性差、外观粗糙、对加工设备磨损严重等缺点。对 AT 粉体进行有机化改性，并采用简单的工艺技术使其尽可能均匀地以纳米单元分散在聚合物基体中，可提高材料性能、降低材料成本[6,7]。但由于粘土结构中一般都含水，直接使用粘土粉体对 PC 进行改性在技术上还面临种种困难，难于实现良好的增强增韧效果[8]。

本文作者力图使用 PP 和 AT 协同改性 PC。通过两步法熔融共混工艺，先将 PP 与 AT 制成母料，然后将其加到 PC 基体中。在剪切力场作用下，PC 连续相中形成以 AT 为核，PP 为壳的相包容结构(即包含 AT 单晶的 PP 分散相)。具有这种核壳结构特征的三元复合体系实现了增强和增韧的平衡。分析了三元复合体系的冲击断面形貌，探讨了增韧机理。相关内容尚未见到国内外公开报道。

1　实验部分

1.1　实验原料

AT 粉体：安徽明光希奇矿物有限公司产品，粒度 1250 目。水溶性硅烷偶联剂：AG-102，南京曙光化工厂产品。PC 树脂：Makrolon 1243，熔体流动速率(MFR)为 6.5 g/10 min(ISO1133)，德国 Bayer 公司产品。共聚型 PP 树脂：牌号 K8303，MFR 为 1.5 g/10 min(GB 3682-83)，北京燕山石化公司产品。共聚型 PP 接枝马来酸酐(PP-MAH)：牌号 9801，接枝率为 1%，上海日之升有限公司出品。乙烯-醋酸乙烯离聚物(EVA 蜡)：市售。

1.2　AT 的表面改性

称取一定量的凹凸棒土，加入适量去离子水，高速搅拌 10 min 呈悬浮状态，去除沉淀的粗矿物杂质；80 ℃下加热悬浮液，滴加表面改性剂硅烷 AG-102 的水溶液，保持高速搅拌 3 h；将处理物反复抽滤、洗涤数次，经干燥后粉碎过筛。

1.3　AT/PP 母料的制备

在与 PP 复合前首先将 AT 置于真空烘箱中在 105 ℃下干燥 5 h，将 PP 和 AT、分散剂 EVA 蜡按一定比例在高速搅拌机中进行初混，混合均匀后使用德国 WP 公司 ZSK-25WLE 型($L/D = 48$, $D = 35$ mm)双螺杆挤出机造粒，挤出机机筒各段温度：210 ℃、215 ℃、225 ℃、225 ℃、220 ℃(机头)，螺杆转速为 200 r/min。

1.4　AT/PP/PC 复合材料的制备

PC 树脂经 120 ℃真空烘箱干燥 6 h 后与 AT/PP 母料、PP 树脂及增容剂 PP-MAH 按一定比例混合，使用同样双螺杆挤出机造粒，温度：255 ℃、260 ℃、275 ℃、275 ℃、270 ℃(机头)，螺杆转速 200 r/min。所得粒料干燥后，使用广东震德 CJISONG-II型注塑机制成标准测试样条。

1.5　测试

试样的拉伸性能在英国产 Instron-1121 型万能试验机上测试，测试条件依照 GB/T 1040-79。缺口冲击性能使用国产 UJ-40 型悬臂梁冲击实验仪测试，测试条件依照 GB/T 1843-80。试样经冷冻超薄切片，用 RuO_4 染色，用 Hitachi H-800 型透射电子显微镜(TEM)观察试样相态结构并照相。样品冲击断面表面真空喷金，用 Cambridge 250 型扫描电镜(SEM)观查试样断面形貌。

2　结果与讨论

2.1　力学性能研究

表 1 中对 PC、PP/PC、AT/PP/PC 复合体系的力学性能进行了比较。PC 中直接混入 PP，由于二者相容性差，缺乏界面粘结，缺口冲击强度有所下降。加入 PP-MAH 进行增容后，缺口冲击强度大幅上升，较未增容共混体系和纯 PC 树脂分别提高了约 120 %和 75 %。PC 的屈服强度和断裂强度在加入 PP 后都有所降低，这是由于具有柔性链结构的 PP 为分散相，而连续相 PC 具有刚性链结构，当基体受拉伸应力作用时分散相更易发生形变而产生应力薄弱点，使强度降低。从表 1 的数据还可看

表 1　PC 复合材料与 PC 力学性能的比较

Table 1　Comparison of mechanical properties of PC composites with PC

Composition	AT/PP/PP-MAH/PC (mass fraction/%)			
	0/0/0/100	0/20/0/80	0/10/10/80	2/10/10/80
Izod impact strength/(kJ·m^{-2})	9.2 ±0.4	8.3 ±0.3	16.1 ±0.6	21.8 ±0.8
Tensile yield strength/MPa	66.4 ±0.3	52.8 ±0.3	48.3 ±0.2	47.9 ±0.2
Tensile fracture strength/MPa	50.6 ±0.3	42.9 ±0.2	41.4 ±0.2	48.8 ±0.2

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

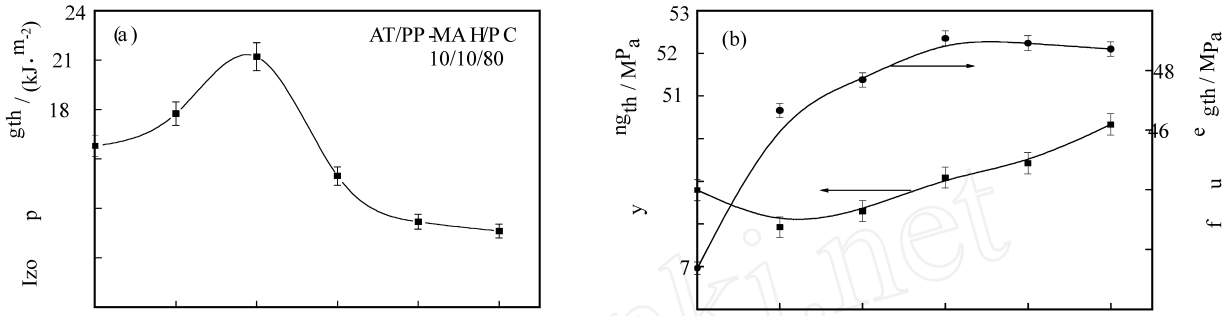

图 1　AT 含量对 AT/PP/PC 复合材料的缺口冲击强度、拉伸屈服和断裂强度的影响

Fig. 1　Effects of AT mass fraction on Izod impact strength, tensile yield strength and fracture strength of AT/PP/PC composites

出, 与 PC、AT/PP 母料、PP-MAH 共混相比, 形成 AT/PP/PC 三元共混体系后, 材料的性能得到进一步提高。在 AT 的添加量为 2 %(质量分数, 下同)时, 缺口冲击强度提高到 22 kJ·m^{-2}左右, 较增容后的 PP/PC 体系上升了约 35 %; 断裂强度提高, 从～41 MPa 上升到～48 MPa; 屈服强度略有下降。可以看出, AT 添加量在1 %～2 %时材料缺口冲击强度和断裂强度与 PP/PC 二元共混体系相比都明显上升, 实现了对 PC 基体增韧与增强的平衡。

通过调整母料、PP 树脂以及增容剂的添加量, 保持 PP/PP-MAH/PC 的比例恒定(10/10/80), AT 含量变化。得到 AT/PP/PC 三元共混体系中的缺口冲击强度和拉伸强度与 AT 含量的关系, 如图 1 所示。三元复合体系缺口冲击强度随 AT 含量的变化呈类抛物线的规律(见图 1(a))。当 AT 的含量为 1 %～2 %时, 体系的缺口冲击强度最高, 随 AT 含量继续增加, 冲击强度下降。AT 含量较低时, AT 颗粒应力集中引起基体产生剪切屈服, 在冲击断裂过程中消耗的能量增加, 因而断裂韧性相应增加。当 AT 含量增加到一定程度后, 由于应力场的叠加及大量第二相(AT)的加入, 使连续相变薄, 无机刚性粒子 AT 本身不能发生塑性形变, 这意味着连续相总体吸收能量减少, 断裂更容易发生, 从而出现了 AT 含量超过 2 %后整个三元体系的冲击性能明显下降的现象。戴兰宏等[9]对 AT/PP 复合材料冲击断面分维和断裂韧性关系的研究过程中也发现了在复合体系中 AT 含量超过某个值后, 材料断裂表面粗糙度下降, 断口变得“平整”, 冲击强度明显下降。从图 1(b)可以看出, 材料的拉伸断裂强度在 AT 含量低于 3 %时随含量的增加而上升, 超过该含量后下降。而对于拉伸屈服强度, 在 AT 含量小于 1 %时随含量增加有所下降, 而后随 AT 含量的增加而上升。

AT 对三元体系的增强, 主要是通过对分散相 PP 的增强作用实现的。文献[10]报道了 AT 的加入对 PP 起到了成核剂的作用。本文作者[11]曾在研究 AT/PP 复合体系的力学性能过程中也发现凹凸棒土有助于增加 PP 的结晶度, 同时提高其拉伸强度。这说明, 无机相 AT 的加入可能使 PP 结构中晶体规整结构增加, 从而强度上升, 并最终引起三元复合体系的拉伸强度提高。在 PP 中添加其他纳米级无机刚性粒子也有明显增强和增韧作用的报道[12]。聚合物材料在常温缓慢加载拉伸的条件下, 呈现韧性破坏; 而在高速冲击载荷的作用下, 却表现出脆性破坏特征。规整结构的增加使其在高速冲击载荷的作用下更易出现脆性破坏。这可能是导致 AT 含量高于 2 %后, 三元复合体系的拉伸强度仍有一定程度上升而冲击强度明显下降的原因。

2.2　亚微相态分析

图 2 为 AT/PP/PP-MAH/PC(2/10/10/80)复合体系超薄切片经 RuO_4 染色后的 TEM 照片。对于具有饱和链结构的 PC 和 PP 均可被 RuO_4 染色, 但 PC 染色速率快于 PP, 所以控制染色条件就可得到反差强烈的相态分布。在 TEM 照片中, 深色部分为 PC 相, 浅色部分为 PP 相。从图 2(a)中可以看到, PP 在深色 PC 连续相中呈液滴状或条状分布, 这是由于 PP-MAH 的加入使两相间界面张力降低, 而相容性和界面粘结力增加。在熔融剪切作用的过程中, 粘度较低的 PP 分散相易被高粘度 PC 连续相所取向而形成液滴状或条状形态。对其放大后的相态照片图 2(b)进行观察可以看出, 在 PP 相与 PC 相界面处存在一定厚度的过渡层, 表明

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

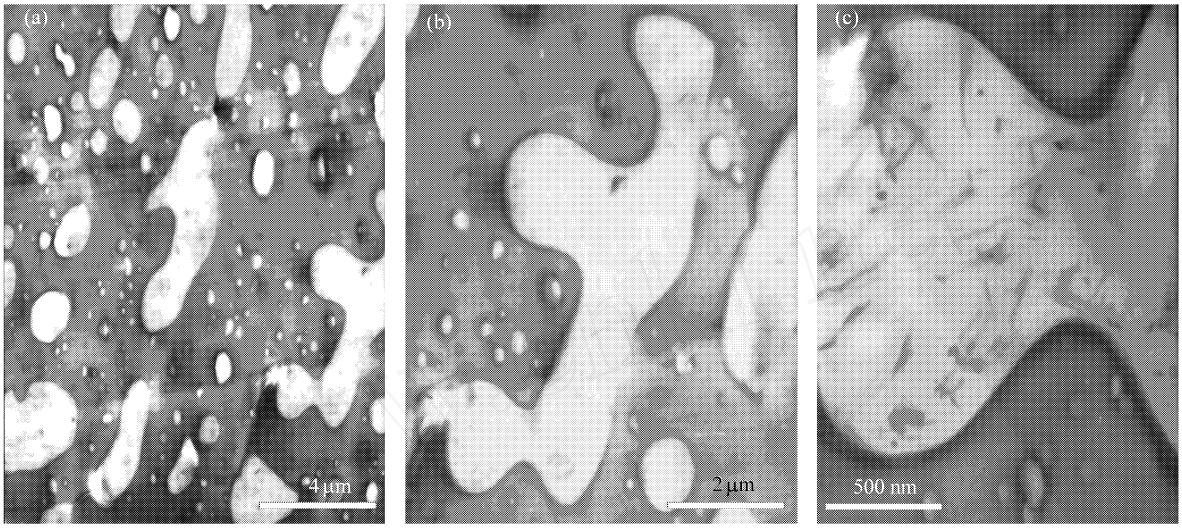

图 2　AT/ PP/ PC 三元复合体系 TEM 照片(AT/ PP/ PP-MAH/ PC = 2/ 10/ 10/ 80)

Fig. 2　TEM photographs of AT/ PP/ PC composite(AT/ PP/ PP-MAH/ PC = 2/ 10/ 10/ 80)

两相之间存在较好的界面粘结。进一步观察图 2(c) ,发现在 PP 相中存在大量的针状结构分布,且其直径在 50 nm 以下,显然它是 AT 的单晶结构。而观察 PP 相外的 PC 连续相,没有 AT 或其晶束的分布,这说明经过两步法共混,AT 主要以针状单晶形态分布在 PP 分散相中,这样就在 PC 连续相中形成了以 PP 为壳,AT 为核的分散相。AT 在二次混炼的过程中没有从 PP 相中游离出来,这可能是由于:(1) AT 通过偶联剂进行表面改性后,增加了与 PP 之间的界面粘结强度;(2) PP 的熔体粘度比 PC 低,在熔融加工过程中不利于 AT 晶体突破 PP 分散相界面向 PC 相扩散。

高分子合金的力学性能强烈依赖于它的形态结构。正是这种含核壳结构的分散相的形成,导致 AT/ PP/ PC 复合体系具有较好的综合力学性能。体系的冲击强度提高,一方面是其外壳部分的 PP 通过形变吸收冲击能;另一方面冲击过程中 PP 与 PC 之间界面的破坏将产生耗能。而材料在拉伸形变过程中,应力通过 PC 连续相传递至 PP 分散相中,由于 PP 相对强度低会在连续相中形成应力薄弱点,但分散相中包含的无机刚性体 AT 对 PP 起到增强作用,从而使复合体系的整体强度提高,这就克服了单纯 PP 对 PC 进行增韧改性的同时材料强度的损失。

2.3　增韧机理探讨

高分子合金的增韧可以从静态的形态结构和动态的冲击过程等方面解释,其中对冲击断裂过程的认识是分析增韧机理的重要依据。高分子材料断裂形态学(Fractography)理论一般认为,材料的断裂破坏是由微裂纹在材料塑性屈服区内扩展直至逐渐转变为宏观裂纹,最后导致断裂破坏。当裂纹沿着塑性形变区以不同方式扩展时,会在断面上留下不同形貌特征,分析断面上裂纹扩展时留下的残痕,有助于人们认识裂纹在高分子材料中的扩展方式和扩展途径,进而分析其增韧机理[13~15]。

2.3.1　断裂形貌分析

用扫描电镜(SEM)对 AT/ PP/ PC 三元复合体系和 PC 的冲击断面形貌进行了比较。通过扫描电镜照片图 3 可以看出,AT/ PP/ PC 共混体系的缺口试样冲击断面形貌与纯 PC 的缺口试样冲击断面有明显差别。图 3(a)～3(c)为 PC 的冲击断面形貌。由图 3(a)低放大倍数断面形貌图可以观察到在裂纹扩展前端的应力发白区断面凹凸不平,扭曲片层交错,片层呈犬牙状交错排列。对其局部放大后如图 3(b)所示,发现存在明显的剪切韧窝,这些韧窝是由锯齿状的裂纹端部引发成串的塑性形变引起的。在裂纹端部由于应力强度因子较高,剪切变形往往会深入基体内部,在剪切破坏的过程中造成基体卷边,卷边被撕裂呈现粘性流动的特性,从而断面形成图 3(c)所示的“河纹”形态。在裂纹扩展的后段,断面表面较光滑,未呈现明显的屈服形变及应力发白。从上面的分析可以看出,在纯 PC 基体中,裂纹主要以剪切方式形成塑性韧窝向前扩展。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

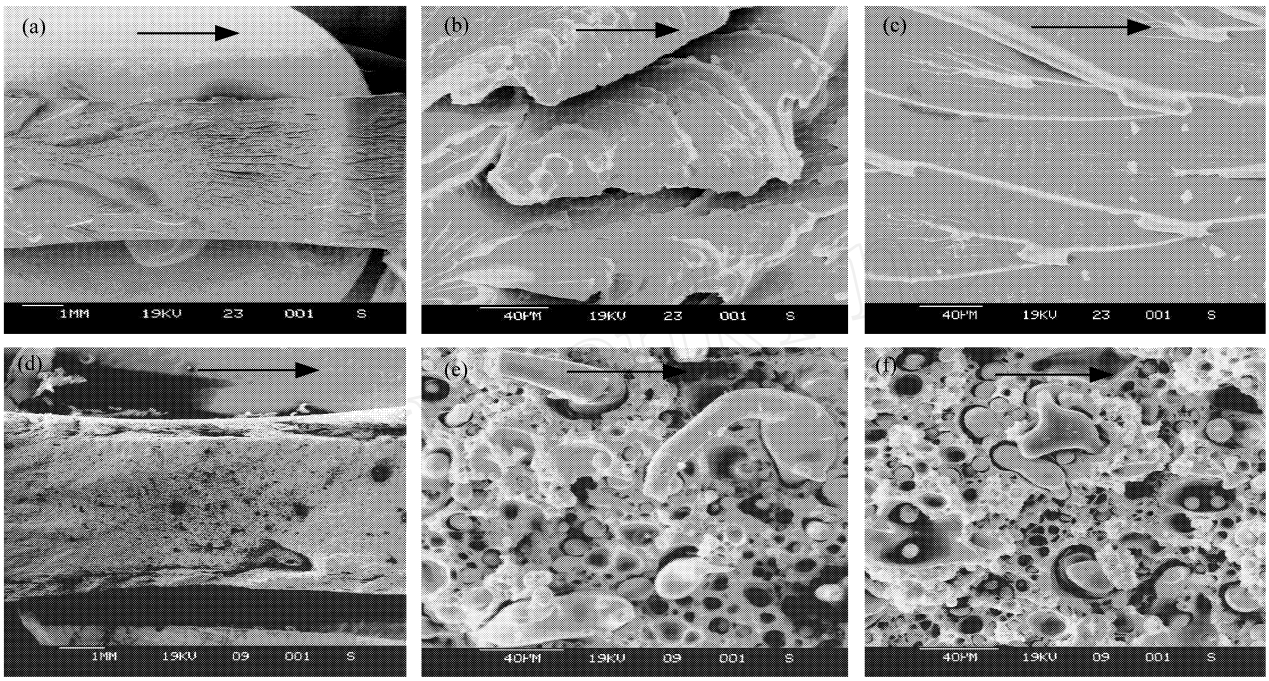

图 3　PC 与 AT/PP/PC 三元复合体系冲击断面 SEM 照片

Fig. 3　SEM photographs of notch impact fracture of PC and AT/PP/PC composite

((a) ～ (c) PC; (d) ～ (f) AT/PP/PP-MAH/PC = 2/10/10/80; ——— Direction of crack growing)

图 3(d)～3(f)为 AT/PP/PC 三元复合体系冲击断面。对图 3(d)低放大倍数形貌图进行分析，可以看出，与纯 PC 断面相比三元复合体系断面更粗糙，表面呈现更大范围塑性形变及应力发白区，收缩形成的大的凹坑。对应力发白区局部放大，如图 3(e)、3(f)所示。断面呈典型的两相结构，分散相呈不规整的球状以及被拉伸取向后的条状。断面存在大量的空洞为分散相在冲击过程中被拔出所留，部分被拔出的分散相发生变形、直至断裂。从断面形貌还可以看出，分散相的体积均发生了收缩，与基体之间产生明显的界面空穴。这表明该复合体系缺口试样在冲击断裂过程中，产生两相界面脱粘，进一步发展成界面微穴与空化，继而分散相形变、被取向，直至拔出、断裂。所以在 PC 与 PP 两相间加入增容剂 PP-MAH，二者之间形成较强的界面粘结，在断裂过程中 PP 分散相不易发生与基体的脱粘，使耗散的冲击能更高。

2.3.2　界面脱粘、空化作用

通过对 AT/PP/PC 复合体系冲击断面形貌的研究可以发现，断面上 PP 相周围有大量的微穴与空化，同时发生明显的取向与形变。部分分散相条在取向过程中被拔出、拉断。空穴的产生和取向形变过程均能吸收能量。

本文作者认为断裂过程中微穴的产生源自相关的两个方面：(1) PP 是弱极性聚合物，而 PC 是主链带刚性结构且有极性酯基的极性聚合物，二者相互作用力小，PC 与 PP 之间的作用力远小于 PP 之间或 PC 之间的作用力。在受外力冲击时优先发生二者界面脱粘。(2) 加入增容剂 PP-MAH，PP 与 PC 之间是部分相容，而由复合体系的相态可知 PP 以长条状分散在基体中，这样在 PP 与 PC 基体的界面处不可避免地存在缺陷，这些缺陷在受力过程中发展为微穴，即发生界面空化。微穴与空化的过程释放了缺口三轴张应力。带预制缺口的样条在受到冲击时，缺口的尖端处于三轴拉伸状态。三轴张力如果不能被有效释放，达到裂缝增长所需的临界值时就会导致脆性断裂。有研究证明，分散相微穴化过程是释放三轴张力的有效形式之一[13,14]。当 PP 通过与基体脱粘、空化解除了三维应力场时，分散相之间基体层的应力状态将从平面应变向平面应力转变并发生剪切形变。基体发生剪切屈服的结果也将耗散冲击能[14,15]。

大量微穴的存在为在断裂过程中分散相发生取向、拔出提供了必要的空间[15]。同时，界面空化的最终结果是诱发基体的剪切形变。在断裂过程中基体层相互剥离，基体层间的剪切作用力通过两相

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

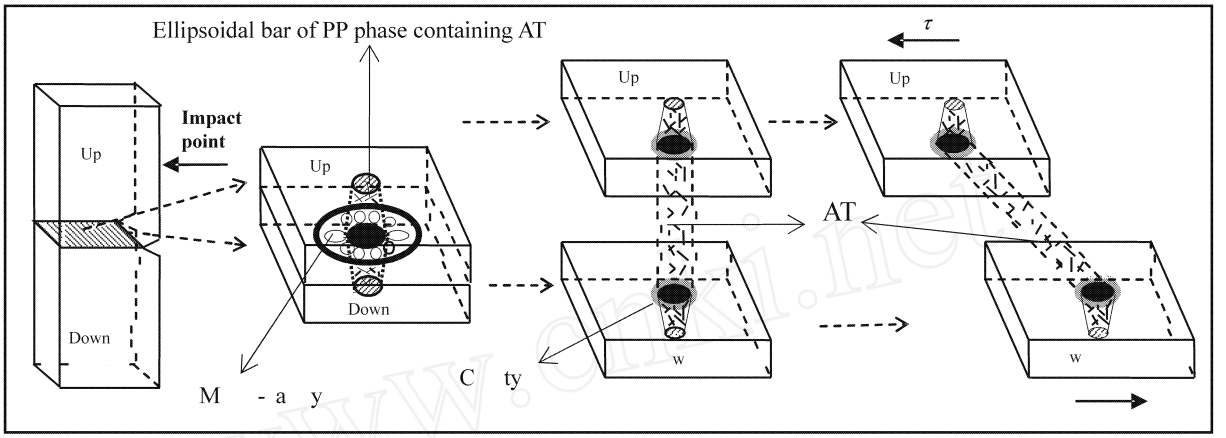

图 4　AT/ PP/ PC 三元复合体系冲击过程中分散相变形、取向示意图

Fig. 4　Scheme for the deformation and orientation of dispersed phase containing AT during impact in the ternary composites

界面转移到分散相，使分散相受外力作用发生形变、取向，直至被拔出、断裂。这一过程基体将进一步耗散能量[15,16]。图 4 对试样在受到冲击作用时条状 PP 分散相发生形变、被取向的过程进行了示意。所以，分散相界面脱粘、空化——三维应力场解除——应力状态转变——基体剪切屈服——分散相取向、拔出一系列过程是在该三元复合体系中耗散冲击能的重要形式，其中界面的脱粘、空化作用是这一机制的前提条件。

2.3.3　AT 对分散相的增强作用

根据三元复合体系的力学性能测试结果，AT 在一定含量下(1 %～2 %)对基体有明显的增韧作用，并且随着 AT 含量的增加，体系的拉伸强度随之进一步提高。相态分析结果(图 2(c))表明，AT 主要以短纤维单晶形态分散在 PP 相中，即直径在 50 nm 以下，长度为 100～1000 nm 的针状短纤维。由于 AT 短纤维单晶的特殊结构，具有高的长径比和形状因子、比表面积大，对 PP 基体可以产生明显的增强、增刚作用[10～12]。PC 基体中形成含核壳结构的分散相，AT 短纤维单晶包容于 PP 相中，可以增加 PP 分散相的刚性。这样，在断裂过程中由于 AT 的增强作用分散相发生取向、变形作用需耗散更多的能量，从而进一步提高了冲击强度。另一方面，由于分散相刚度的增加，也使分散相发生空化，在基体剪切屈服变形时取向、变形程度有所下降。故当 AT 含量上升到一定程度后，基体整体吸收的冲击能减少，冲击强度会降低。为此，将 AT 含量为 2 %(图 5(a)、5(b))和 5 %(图 5(c)、5(d))三元复合体系断面的 SEM 照片进行了比较，可以看出，当AT含量为5 %时，断面上发生界面空化作用，分散相被拔出、变形的程度较 AT 含量为 2 %时明显降低。从断面形貌还可以发现，AT 含量为 5 %时的断面 PP 分散相表面在冲击过程中产生明显破裂。正如前面所论述的，AT 包含在 PP 中达到较高含量时，PP 基体层变薄，反而更易在冲击作用下发生破坏，最终导致三元复合体系冲击强度下降。所以，AT 在一定含量下，通过对分散相 PP 的增强与增刚作用会使其在基体屈服过程中取向、变形时耗散更多的冲击能，以达到增韧目的。而包含在 PP 相中 AT 短纤维单晶的增强作用是这一耗能机制的前提。

综上所述，在 AT/ PP/ PC 三元共混体系中，冲击能量的耗散可以通过 PP 相周围基体产生空穴，基体发生剪切屈服形变，分散相被取向、拔出，以及 PP 相内 AT 对分散相的增强作用共同实现。

3　结　论

(1) 采用两步法熔融共混工艺，实现了在 PC 复合材料中具有核壳结构分散相包容粒子的设计。即将经过偶联剂表面改性的 AT 与 PP 制成母料，然后将母料添加到 PC 树脂中，可使其在剪切力场的作用下形成以 AT 为核，PP 为壳的相包容粒子。

(2) 这种核壳结构的分散相对 PC 树脂有良好的增韧作用，并且较 PP/ PC 合金体系强度有一定提高。

(3) 在 AT/ PP/ PC 三元共混体系中，可以通过 PP 相周围基体产生空穴，诱发基体发生屈服形变，分散相被取向、拔出，PP 相内 AT 对分散相的增强作用耗散冲击能。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

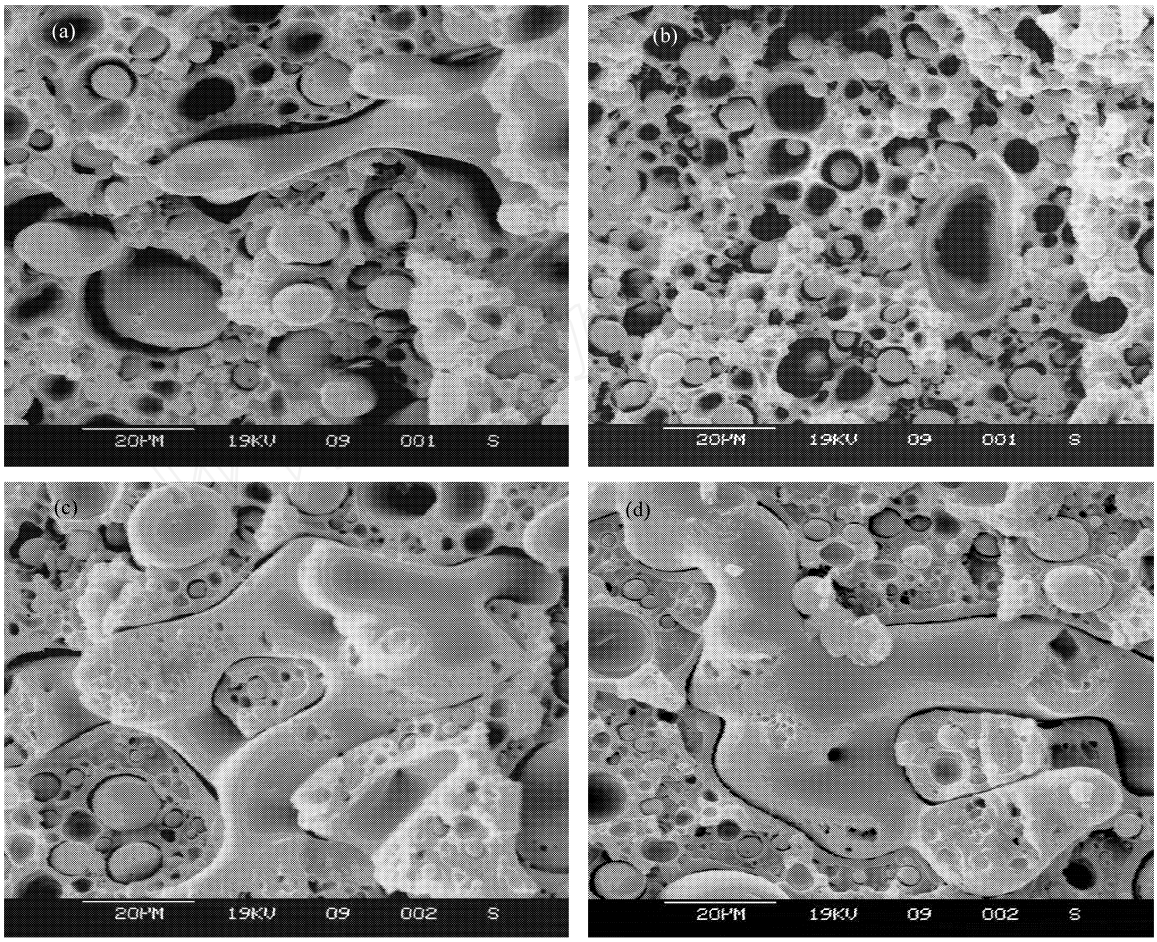

图 5　AT/PP/PC 三元复合体系冲击断面 SEM 照片

Fig. 5　SEM photographs of impact notch fracture of AT/PP/PC composites

((a)、(b) AT/PP/PP-MAH/PC = 2/10/10/80; (c)、(d) AT/PP/PP-MAH/PC = 5/10/10/80)

参考文献:

[1] Wu Souheng. Phase structure and adhesion in polymer blends: A criterion for rubber toughening [J]. *Polym*, 1985, 26 (11): 1855 - 1863.

[2] Favis B D, Therriem D. Factors influencing structure formation and phase size in an immiscible polymer blend of polycarbonate and polypropylene prepared by twin-screw extrusion [J]. *Polym*, 1991, 32(8): 1474.

[3] LeBaron Peter C, Wang Zhen, Pinnavaia Thomas J. Polymer-layered silicate nanocomposites: An overview [J]. *Applied Clay Science*, 1999, 15(1): 11 - 29.

[4] **吕建坤, 柯毓才, 漆宗能, 等. 环氧树脂/粘土纳米复合材料的制备与性能研究** [J]. **复合材料学报**, 2002, 19(1): 117 - 120.

Lu Jiankun, Ke Yucai, Qi Zongneng, *et al*. Synthesis and mechanical properties of epoxy/clay nanocomposites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2002, 19(1): 117 - 120.

[5] **周　杰, 刘　宁, 李　云, 等. 凹凸棒石粘土的显微结构特征** [J]. **硅酸盐通报**, 1999(6): 50.

Zhou Jie, Liu Ning, Li Yun, *et al*. Microscopic structure characteristics of attapugite [J]. *Silicate Bulletin*, 1999(6): 50.

[6] Tian Ming, Qu Chengdong, Zhang Liqun, *et al*. Structure and properties of fibrillar silicate/SBR composites by direct blend process [J]. *J Mater Sci*, 2003, 38: 4917 - 4924.

[7] Du Zhongjie, Rong Junfeng, Li Hangquan, *et al*. Polyethylene/palygorskite nanocomposites with macromolecular comb structure *via in situ* polymerization [J]. *J Mater Sci*, 2003, 38: 4863 - 4868.

[8] Yoon P J, Humter D L, Paul D R. Polycarbonate nanocomposites II: Degradation and color formation [J]. *Polymer*, 2003, 44: 5341 - 5354.

[9] **戴兰宏, 吴国璋. 凹凸棒土增强增韧聚丙烯复合材料断裂韧性和断面分维的相关性** [J]. **复合材料学报**, 1996, 13(4): 70 - 75.

Dai Lanhong, Wu Guozhang. Relation between fracture toughness and fractal dimension of fracture surface for PP/

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

AT composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 1996, 13(4): 70 - 75.

[10] 王丽华, 段丽斌, 盛　京. 聚丙烯/凹凸棒土纳米复合材料结晶形态和形貌研究[J]. 高分子学报, 2004, 3: 424 - 427.
Wang Lihua, Duan Libin, Sheng Jing. Study on crystallization and morphology of polypropylene/attaplugite nanocomposites [J]. *Acta Polymer Sinica*, 2004, 3: 424 - 427.

[11] 高　翔, 毛立新, 金日光, 等. 凹凸棒土表面改性及其对聚丙烯力学性能的影响[J]. 塑料, 2004, 33(3): 34 - 39.
Gao Xiang, Mao Lixin, Jin Riguang, *et al*. Surface organic modification of attapugite and its effect on mechanical properties of polypropylene [J]. *Plastics*, 2004, 33(3): 34 - 39.

[12] 容敏智, 章明秋, 郑永祥, 等. 纳米 SiO_2 增强增韧聚丙烯的界面效应与逾渗行为[J]. 复合材料学报, 2002, 19(1): 1 - 4.
Rong Minzhi, Zhang Mingqiu, Zheng Yongxiang, *et al*. Interfacial effects and percolation behavior in silica nanoparticles filled polypropylene composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2002, 19(1): 1 - 4.

[13] Kayano K, Keskkula H, Paul D R. Fracture behaviour of some rubber toughened nylon6 blends [J]. *Polymer*, 1998, 39(13): 2835 - 2845.

[14] Azimi H R, Pearson R A, Hertzberg R W. Fatigue of the hybrid epoxy composites: epoxies containing rubber and hollow glass spheres [J]. *Polym Eng Sci*, 1996, 36(18): 2352 - 2365.

[15] Li Zhong Ming, Yang Mingbo, Huang Rui, *et al*. Fibre formation based toughening in polycarbonate/polyethelene alloy compatibilized with diallyl bisphenol A ether grafted polyethylene [J]. *J Mater Sci*, 2001, 36: 2013 - 2018.

[16] 冯　威, 毛立新, 金日光, 等. PPO/SEBS-g-MAH 共混体系的"瞬间原位大取向"增韧模型[J]. 材料研究学报, 2000, 14(2): 127 - 132.
Feng Wei, Mao Lixin, Jin Riguang, *et al*. Impact fracture surface and microstructural deformation process of PPO/elastomeric styrene-based block copolymers blends [J]. *Chin J Mater Res*, 2000, 14(2): 127 - 132.

中国知识资源总库

中国科技期刊精品数据库

收录证书

通过对《中国期刊全文数据库》中近8000种期刊10年的引文分析与综合评价，经《中国知识资源总库》专家委员会审核，遴选500种科技类期刊编辑出版"中国科技期刊精品数据库"，《复合材料学报》被正式选入。特发此证。

编号：(J) 045
发证时间：2004 年 5 月

《中国知识资源总库》编辑委员会

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net