复 合 材 料 学 报　　第24 卷　第6 期　12 月　2007 年
Acta Materiae Compositae Sinica　　Vol. 24　No. 6　December　2007

文章编号: 1000-3851(2007)06-0036-08

EPDM/PS 交替多层复合材料的力学性能分析

王　明, 沈佳斌, 杜　芹, 许双喜, 李　姜, 陈光顺, 郭少云*

(高分子材料与工程国家重点实验室, 四川大学 高分子材料研究所, 成都 610065)

摘　要: 用自行设计的微纳多层共挤出体系制备了三元乙丙橡胶/聚苯乙烯(EPDM/PS)交替多层复合材料。偏光显微镜和扫描电镜分析表明, 所制备的复合材料具有规则层状交替结构。与同组分的一般共混样品相比, 64 层EPDM/PS 交替复合材料表现出不同的拉伸断裂行为: 初期的PS 断裂行为和后期的EPDM 拉伸行为。EPDM 和PS 层保持了较好的连续性, 且EPDM 层阻止了PS 层裂纹向相邻PS 层的发展, 使64 层样品与同组分的一般共混样品相比具有较高的拉伸强度和杨氏模量。讨论了在PS 相中加入相容剂苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯嵌段共聚物(SEBS)对64 层EPDM/PS 交替复合材料力学性能的影响, 发现SEBS 的加入提高了PS 相的韧性, 并且改善了EPDM 层与PS 层界面的相互作用。

关键词: 复合材料; 聚苯乙烯; 三元乙丙橡胶; 相容剂; 微纳多层; 共挤出; 力学性能

中图分类号: TB332　　**文献标志码:** A

Mechanical properties of EPDM/PS alternative multilayer composites

WANG Ming, SHEN Jiabin, DU Qin, XU Shuangxi, LI Jiang, CHEN Guangshun, GUO Shaoyun*

(The State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering, Polymer Research Institute of Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: EPDM/PS alternative multilayer composites were prepared by micro- or nano-layer coextrusion system designed in this lab. The results of polar light microscope (PLM) and scanning electrical microscope (SEM) analysis indicate that the composites have the alternative multilayer structure. Compared to conventional blends, the fracture behavior of EPDM/PS alternative 64-layer composites is much different, which includes two stages: the PS layers break first, followed by only the EPDM layers elongated. Because both PS and EPDM layers are continuous and EPDM layers prevent the cracks or crazes developing between the nearby PS layers, the tensile strength and the Young's modulus of the 64-layer composites are higher than those of the corresponding conventional blends. The effects of SEBS as a compatibilizer added into PS phase on the mechanical properties of EPDM/PS alternative multilayer composites were investigated. The results indicate that the interfacial adhesion strength between EPDM layers and PS layers and the toughness of the PS layers are improved in the presence of SEBS.

Keywords: composites; PS; EPDM; compatibilizer; micro- or nano-layer; co-extrusion; mechanical properties

不同于一般共混材料, 多层交替复合材料具有双连续相结构, 很好地保持了不同材料的本征特性, 使其在阻尼隔音[1-2]、力学性能[3-11]等方面具有独特的性能。Schrenk 等人[3-4]在研究多层聚碳酸酯(PC)和苯乙烯-丙烯腈共聚物(SAN)交替复合材料力学性能时, 发现具有较高伸长率的PC 层能有效地阻止SAN 脆性层裂纹横向的发展, 使脆性层出现韧性屈服现象, 整个复合材料呈现韧性断裂行为。Hiltner 等人[5-10]对此类材料进一步的研究结果表明, 产生这种协同效应的原因是银纹和剪切带相互作用的结果。韧性层阻止脆性层裂纹的引发以及发展, 而脆性层促进韧性层剪切带的形成, 使复合材料的性能得到大幅度提高。Mueller[11]等人研究了用碳酸钙和硅烷偶联剂填充的聚丙烯((CaCO$_3$ + SG)/PP)和聚乙烯((CaCO$_3$ + SG)/PE)与聚氧化乙烯(PEO)交替多层复合材料的力学性能, 发现

收稿日期: 2007-03-02; 收修改稿日期: 2007-07-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2005CB623800); 国家自然科学基金(50603016); 高等学校博士学科点专项科研基金(20050610028)

通讯作者: 郭少云, 教授, 研究方向为聚合物加工过程中的形态控制及聚合物复合材料　E-mail: nic7702@scu.edu.cn

((CaCO$_3$ + SG)/PE)/PEO 多层样品的拉伸模量、屈服强度，随PEO 含量的变化基本上满足加合原理，但拉伸断裂强度高于加合值；而((CaCO$_3$ + SG)/PP)/PEO 多层样品的屈服强度，随PEO 含量的变化基本上满足加合原理，但拉伸模量低于加合值、拉伸断裂强度高于加合值。多层样品表现出来的这种力学行为特性与2 种材料的力学性能及其组分比有很大关系。

但是，目前对交替多层复合材料力学性能的研究大多限制于相容性好、脆韧度相差小的体系，而对2 种相容性较差或脆韧度相差较大材料的多层复合体系研究报道较少。本研究中对相容性较差和脆韧度相差较大的三元乙丙橡胶(EPDM) 和聚苯乙烯(PS) 进行多层复合，分析表征了64 层EPDM/PS 交替复合材料的力学性能的特点，并对其拉伸机制进行了探讨，为制备高性能层状复合材料奠定基础。另外还研究了在PS 相中加入相容剂对EPDM/PS 交替多层复合材料力学性能的影响，为分析表征相容剂的作用原理以及确定相容剂用量等方面提供重要依据。

1　实验部分

1.1　原　料

聚苯乙烯：PG33，镇江奇美化工有限公司；三元乙丙橡胶粒料：3745R，Dupont Dow Elastomer，美国；苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯嵌段共聚物(SEBS)：YH-503，巴陵石化有限公司。

1.2　微纳共挤出体系

本实验室自主开发了微纳多层共挤出设备体系，如图1 所示[12-14]，主要有2 台挤出机(Extruder Ⅰ & Extruder Ⅱ)、汇合器(Feed block)、分层叠加单元(Multiplying element)、水冷却装置(Water cooling block)、牵引装置(Drawing roller) 等部分组成。2 种不同的高分子熔体分别从2 台挤出机中挤出，经过不同的流道在汇合器出口处合并成一股2 层的熔体，然后进入分层叠加单元，分层叠加单元可以成倍增加熔体的层数，最后在牵引装置的作用下，多层复合材料经过水冷却装置被牵引出分层叠加单元。分层叠加单元工作原理如图1 右下角所示。高分子流体进入分层叠加单元时，经过分割、合并过程，层数得到成倍增加。n 个分层单元将得到$2^{(n+1)}$ 层复合材料。本文中采用5 个分层叠加单元，制得约为1 mm 厚的64 层复合片材，其平均层厚可达到微米级。

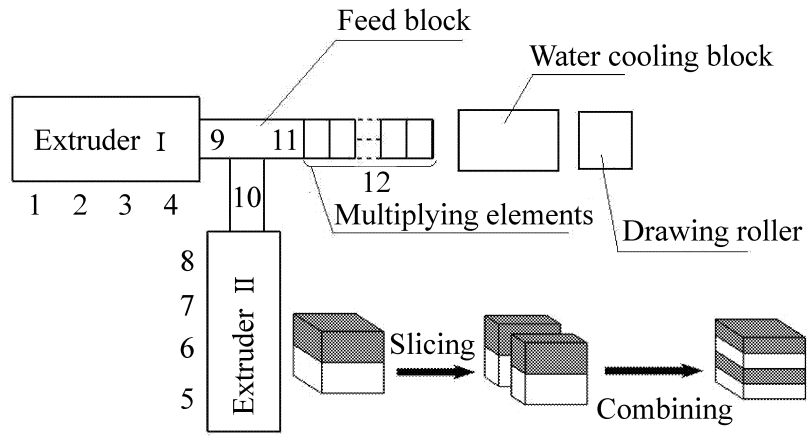


图1　微纳挤出体系和分层单元分层原理示意图

Fig.1　Schematic diagram of the micro- or nano-layer coextrusion system and mechanism of the multiplying element

1.3　样品制备

在共混复合前，PS 在80 ℃下真空干燥2 h；EPDM 在50 ℃下真空干燥24 h，一般共混和多层复合的温度设置见表1。

64 层EPDM 与PS 交替复合材料样品的制备：

表1　样品制备过程中的温度设置

Table 1　Processing temperature of the specimens

	Temperature of extruder Ⅰ/ ℃				Temperature of extruder Ⅱ/ ℃				Temperature of die/ ℃			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EPDM/PS 64-layer composites	165	185	195	200	180	190	200	200	200	200	200	200
EPDM/PS conventional blends	180	190	200	200	-	-	-	-	200	-	200	-
PS	-	-	-	-	180	190	200	200	-	200	-	200
EPDM	165	185	195	200	-	-	-	-	200	-	200	-
EPDM/(PS+SEBS) 64-layer composites	165	185	195	200	180	190	200	200	200	200	200	200
PS/SEBS conventional blends	180	190	200	200	-	-	-	-	200	-	200	-
EPDM/SEBS/PS conventional blends	180	190	200	200	-	-	-	-	200	-	200	-

把干燥好的EPDM 加入挤出机Ⅰ中, PS 加入挤出机Ⅱ, 通过微纳多层共挤出体系进行挤出。EPDM 和PS 通过一系列分层叠加单元(5 个), 达到64 层交替结构, 通过调节2 台挤出机的转速来制备组分比不同的多层复合材料。

EPDM/ PS 共混样品的制备: 用高混机按一定的配比配置EPDM/ PS 的混合料, 在双螺杆挤出机中共混造粒后, 加入挤出机Ⅰ中, 在不添加分层叠加单元的情况下挤出制备EPDM/ PS 一般共混样品, 其挤出温度设定见表1。

单组分样品的制备: 将EPDM 和PS 分别加入挤出机Ⅰ和挤出机Ⅱ中, 在不添加分层叠加单元情况下分别制备相应的单组分样品。

64 层EPDM 与PS + SEBS 交替复合材料样品的制备: 把PS 与SEBS 在高混机中初混后, 在双螺杆挤出机中挤出造粒, 得到PS/ SEBS 共混物; 再将此共混物加入到挤出机Ⅱ中与挤出机Ⅰ中的EPDM 进行共挤出。添加的分层叠加单元数为5 个, 保持2 台挤出机的螺杆转速比不变, 制备EPDM 质量分数为40 .0 % 的具有不同SEBS 含量的64 层EPDM/ (PS + SEBS) 交替复合材料样品。

PS/ SEBS 共混样品的制备: 用高混机按一定的配比配置PS/ SEBS 的混合料, 在双螺杆挤出机中共混造粒后, 加入挤出机Ⅰ中, 在不添加分层叠加单元的情况下挤出制备PS/ SEBS 一般共混样品, 其挤出温度设定见表1。

EPDM/ SEBS/ PS 共混样品的制备: 用高混机按一定配比配置EPDM/ SEBS/ PS 混合料, 在双螺杆挤出机中共混造粒后, 加入挤出机Ⅰ中, 在不添加分层叠加单元的情况下挤出制备EPDM 质量含量为40 .0 % 的具有不同SEBS 质量含量的EPDM/ SEBS/ PS 一般共混样品, 其挤出温度设定见表1。

1 .4　测试与表征

取64 层EPDM/ PS 交替复合材料薄片, 称其质量为 M_0, 在丁酮溶剂中进行48 h 的索氏抽滤, 以除去PS 相; 收集不溶物, 真空干燥直至恒重, 称其质量为 M, 以此来确定多层材料中EPDM 的质量分数。

用标准样刀从挤出片材的中间部位截取哑铃型样条, 按GB/ T 16421 - 1996 标准在SANS CMT4104 微机控制电子万能试验机上进行拉伸测试。拉伸速度为5 mm/ min, 实验温度为23 ℃±2 ℃, 湿度为55 %。

垂直于样品挤出流动方向, 如图2(a) 所示, 用超薄切片机截取10 μm 的薄片, 在偏光显微镜(PLM) 下从方向1 观察交替多层结构。

标准拉伸样条未拉伸或经拉伸到PS 断裂后, 截取虚线框内的部分, 如图2(b) 所示, 喷金处理后, 用JSM- 5900LV 型(日本) 扫描电镜(SEM) 分析拉伸前后试样形貌的变化, 观察方向为图2(a) 中的方向2。

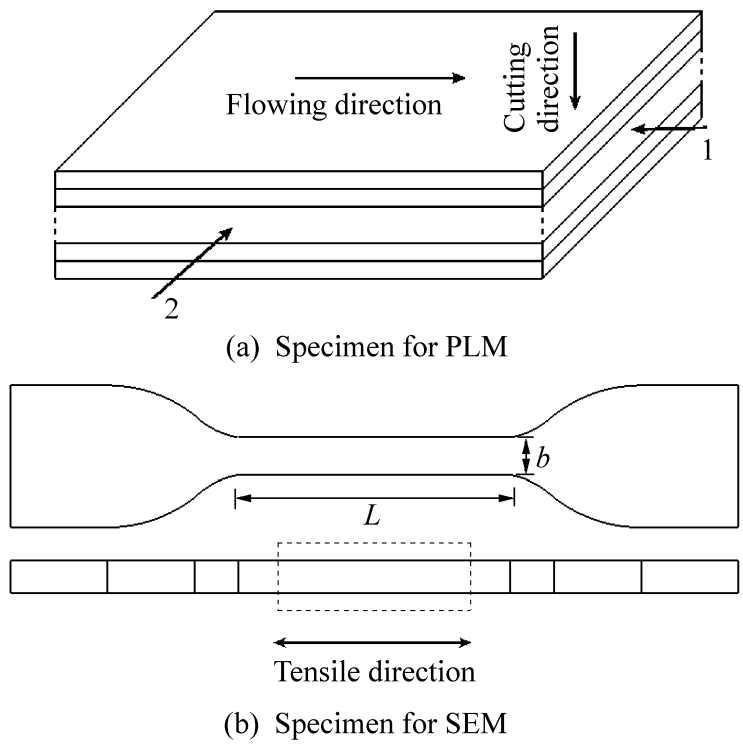


图2　64 层样品PLM 和SEM 测试方向示意图

Fig .2　Schematic diagram of a 64-layer specimen for PLM and SEM observation

2　结果与讨论

2 .1　多层复合材料组分含量的测定

用索氏抽滤法测定64 层EPDM/ PS 复合材料中EPDM 的质量分数, 其抽滤结果如表2 所示。

表2　样品编号及其对应的EPDM 质量分数

Table 2　Mass fraction of EPDM of the different 64-layer specimens

Specimens	Mass fraction of EPDM/ %
M64- 1	15 .0
M64- 2	28 .0
M64- 3	40 .0

2 .2　微观形貌分析

在图3 中能很明显看出64 层EPDM/ PS(EPDM 的质量分数为15 .0 %) 复合材料规则的交替多层结构, 图中EPDM 和PS 层间界面明显, 表明其相容性较差。

假定EPDM 和PS 层非常规则，并且EPDM 与PS 之间没有相互扩散，忽略层间界面的影响，通过测量各层厚度即可计算出交替层状复合材料中EPDM 的含量：

$$M_{EPDM} = \frac{\rho_{II}\sum_{n=1}^{32} h_{IIn}}{\rho_{I}\sum_{n=1}^{32} h_{In} + \rho_{II}\sum_{n=1}^{32} h_{IIn}} \times 100\% \qquad (1)$$

$$M_{EPDM} = \frac{\rho_{II}\bar{h}_{II}}{\rho_{I}\bar{h}_{I} + \rho_{II}\bar{h}_{II}} \times 100\% \qquad (2)$$

其中：ρ_I 为PS 的密度，1.012 g/cm^3；ρ_{II} 为EPDM 的密度，0.858 g/cm^3；h_{In} 为PS 第n 层的厚度；h_{IIn} 为EPDM 第n 层的厚度。为了简化计算，用各相平均厚度来取代各相厚度和，如式(2) 所示，其中：$\bar{h}_I$ 为PS 层的平均厚度；$\bar{h}_{II}$ 为EPDM 层的平均厚度。从图3 中测出PS 相的平均厚度约26 μm，EPDM 相的平均厚度约6 μm，通过式(2) 计算得到EPDM 质量含量为16.3%，与抽滤结果基本一致。因此可以在64 层样品的总厚度和组分比已知的情况下，估算出两相的平均层厚比；或者在各层厚度已知情况下，估算出组分比。

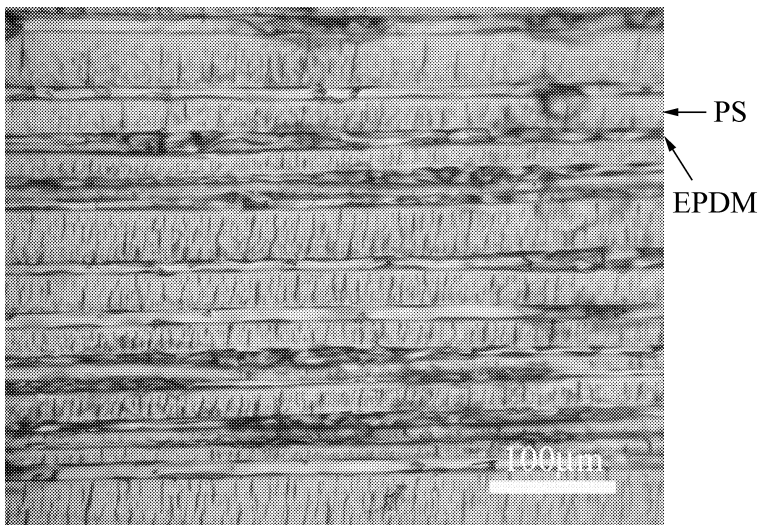


图3　M64-1 的偏光显微图

Fig.3　Polar light micrograph of sample M64-1

2.3　64 层EPDM/PS 交替复合材料力学性能分析

2.3.1　64 层EPDM/PS 交替复合材料拉伸断裂行为

由图4 可以看出，PS 的拉伸断裂呈脆性断裂行为，具有较高的拉伸强度和模量；EPDM 拉伸过程表现出弹性体行为，其应力随应变增加而增加，具有较低的拉伸强度和模量。相对于含量相同的EPDM/PS 一般共混材料(40.0 wt% EPDM)，64 层交替复合材料表现出完全不同的应力应变行为。拉伸初期具有PS 的拉伸特性，待PS 断裂后又表现出后期的EPDM 拉伸特性(由于本文重点关注脆性

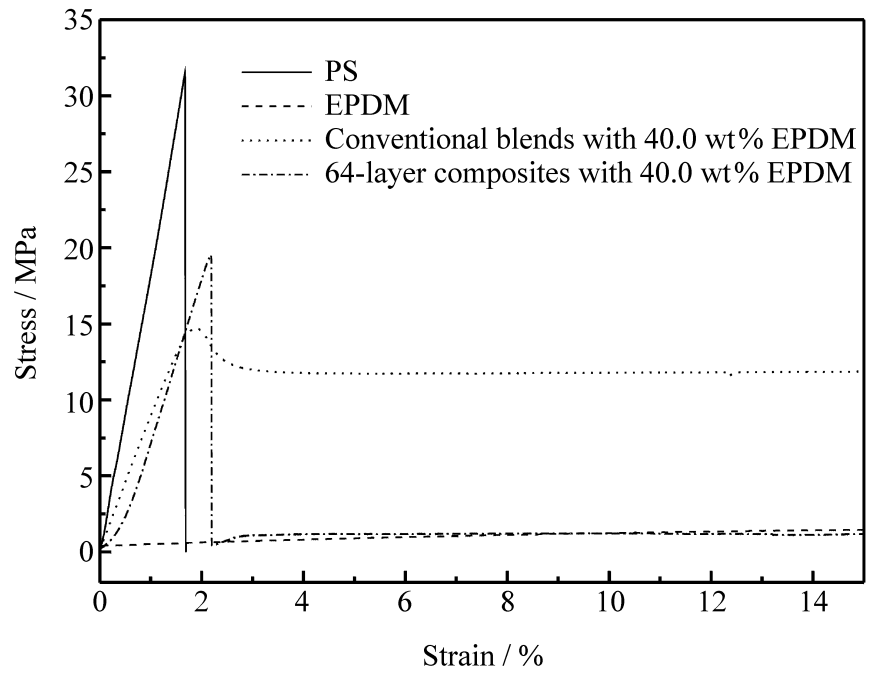
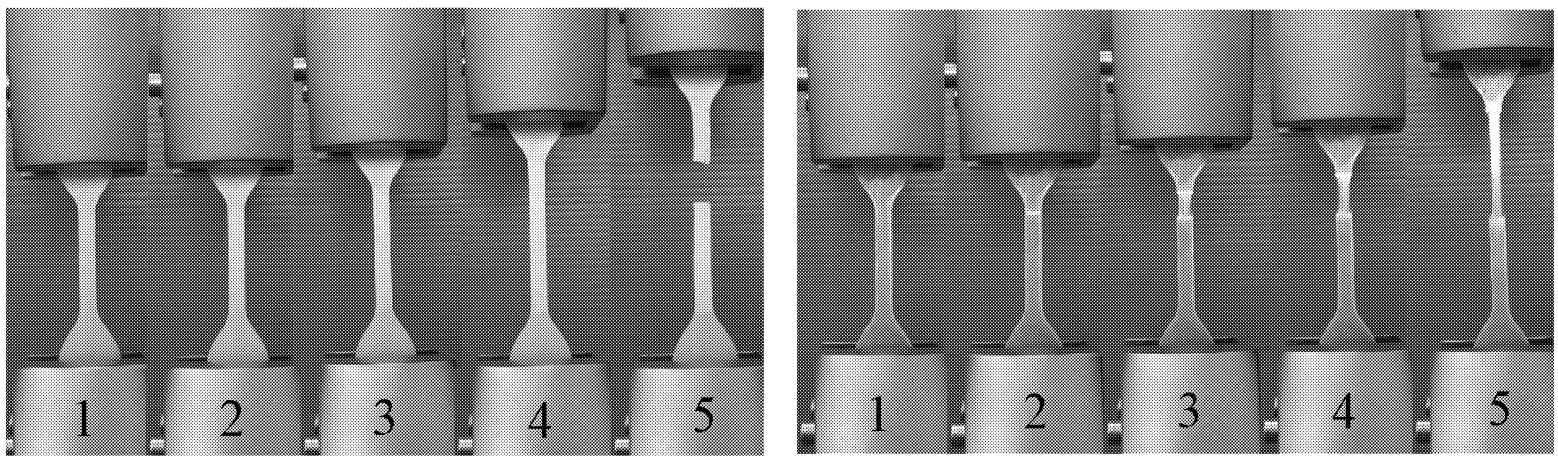


图4　EPDM，PS，M64-3 样品和EPDM/PS 一般共混样品的应力-应变曲线

Fig.4　Stress-strain curves of EPDM, PS, samples M64-3 and EPDM/PS conventional blends

层断裂情况，在图4 中仅给出了15% 应变以下的应力应变曲线)。拉伸过程中相同应变下的在线观察也证实了共混样品与多层样品拉伸行为的区别。对共混样品，由图5(a) 可看出，随着应力的增加，首先出现应力发白2，然后被拉长到一定的伸长率后断裂5。而多层样品，如图5(b) 所示，随着应力的增加，首先PS 层发生断裂但未出现应力发白2；然后未断裂的EPDM 层继续受拉，表现出弹性体的拉伸行为5。用SEM 观察PS 层断裂前后多层拉伸样条的中间区域，进一步证实了多层样品的拉伸断裂特性。图6(a) 中可以看出，在未施加应力之前，试样为双连续的交替多层结构(由于直接用拉伸样刀切样，EPDM 层存在变形，部分掩盖了PS 层，出现明显的刀痕)；经一定的拉伸后PS 层断裂而EPDM 层未发生断裂，如图6(b) 所示。将图6(b) 中所标的黑框区域放大为图6(c) 和6(d)，从图中可以清楚地看到PS 的断层缺口和PS 层中的裂纹(图6(d) 中箭头所指)，以及未发生断裂的EPDM 层由于弹性恢复而发生褶皱或折叠的形貌。EPDM 韧性层虽然没有像PC/SAN 体系中PC 韧性层那样，形成剪切带来阻止PS 裂纹在层中的发展，但还是阻止了PS 层裂纹向相邻PS 层间的发展。

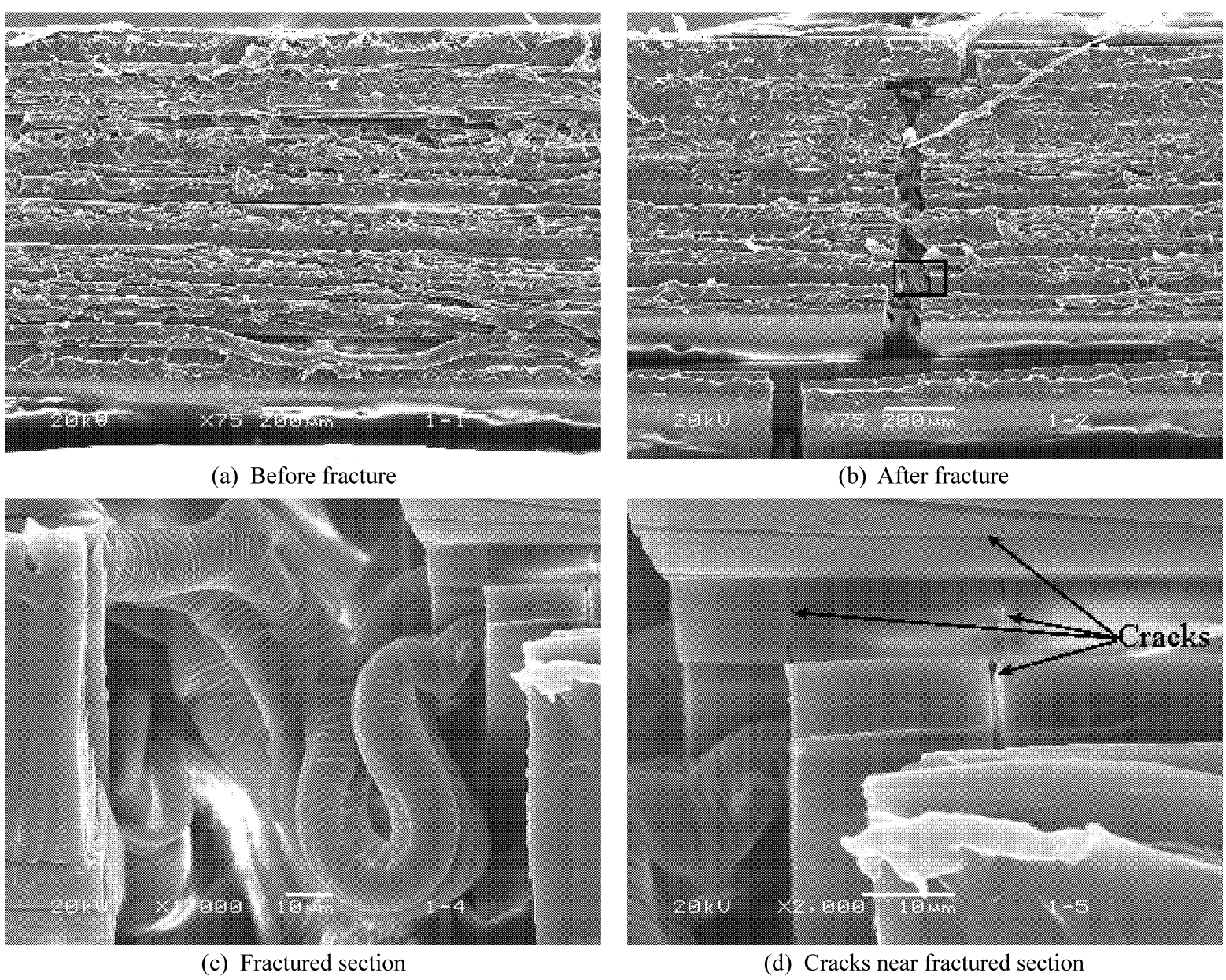
分析其原因主要有：(1) 对64 层样品来说，EPDM 和PS 两者的物性相差太大，EPDM 层拉伸强度低、模量小、变形大，而PS 层拉伸强度高、模量大、变形小，在拉伸初期EPDM 层难以阻止PS 层的断裂，在拉伸后期PS 层也难以阻止EPDM 层



(a) EPDM/PS conventional blend　　(b) M64-3 specimen

图5　EPDM/PS 一般共混样品和 M64-3 样品的拉伸断裂过程照片

Fig .5　The fracture behavior photographs of the EPDM/PS conventional blends and samples M64-3



(a) Before fracture　　(b) After fracture

(c) Fractured section　　(d) Cracks near fractured section

图6　M64-3 样品的SEM 图

Fig .6　SEM micrograghs of sample M64-3

的变形; (2) EPDM 和PS 两者相容性较差, 界面粘结力较弱, 在拉伸过程中界面的相互作用难以影响两相材料的拉伸断裂行为。

2.3.2　不同组分比的EPDM/PS 64 层交替复合材料的拉伸性能比较

通过改变2 台挤出机的转速比, 制备了不同组分比的64 层交替复合材料, 其组分配比见表2。拉伸测试结果如图7(a) 所示, 64 层PS 样品与单层PS 样品的拉伸断裂强度变化不大; 随着EPDM 含量的增加, 2 类材料的拉伸强度都逐渐下降, 主要原因是PS 含量的减少。但是与相同组分比的一般共混样品相比, 64 层样品的下降幅度较小。这是由于多层样品具有交替双连续结构, 其EPDM 和PS 的本征特性得到充分保持, 而对于共混样品,

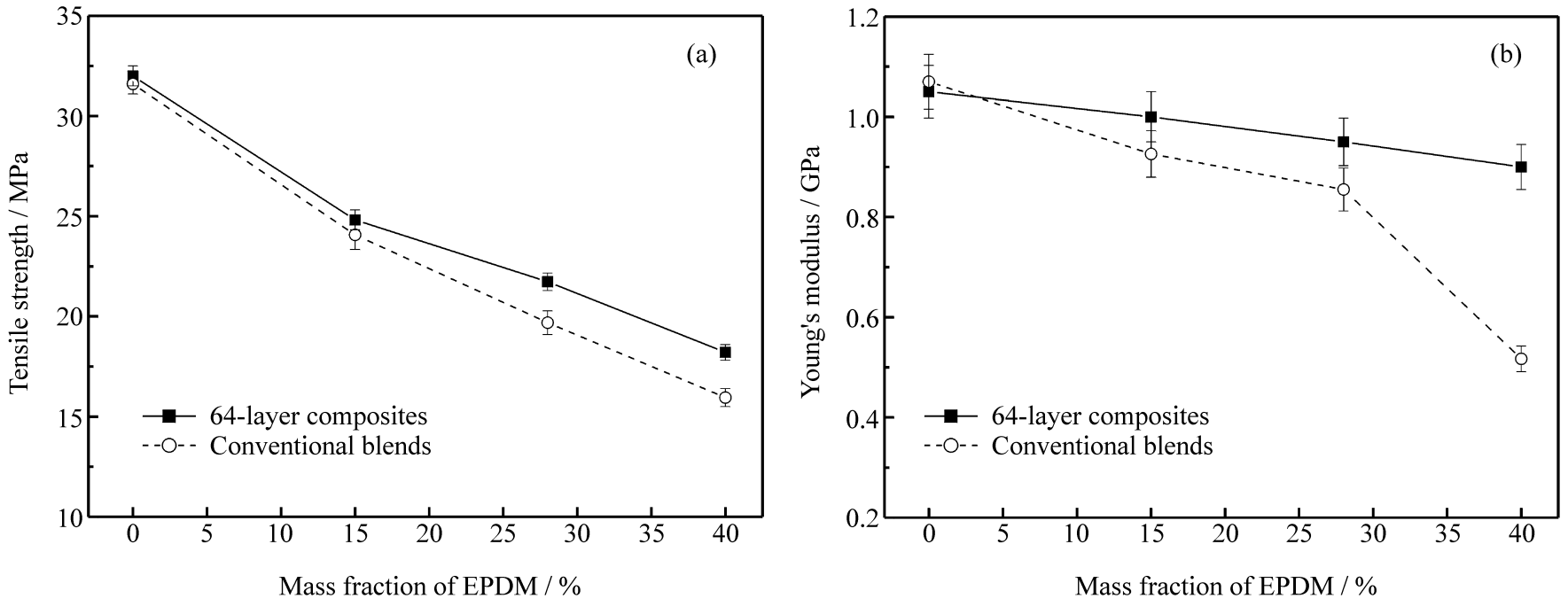


图7　64 层样品和一般共混样品的拉伸强度和杨氏模量与 EPDM 含量的关系

Fig.7　Curves of tensile strength and Young s modulus versus EPDM content for 64-layer composites and conventional blends

EPDM 的加入势必会影响PS 的本征特性(例如图5 中可以看出, 共混样品为白色不透明的样品, 而多层样品为透明样品) ; 另外64 层样品中 EPDM 韧性层隔断了PS 层裂纹向相邻PS 层的发展, 使拉伸应变能量由PS 层裂纹传递到两相界面并在界面处得到耗散, 在一定程度上提高了PS 脆性层的拉伸强度。杨氏模量也具有类似的结果, 如图7(b) 所示, 共混样品的模量随 EPDM 含量增加下降幅度较大, 而多层样品的下降幅度较小, 表现出较好的刚性。

2.3.3　相容剂SEBS 对 EPDM/ PS 64 层复合材料拉伸性能的影响

为了提高复合材料或共混物相界面的粘结强度, 较为常规的方法是加入相容剂。很多学者[15-16]在研究聚烯烃与聚苯乙烯共混时, 用SEBS 作为相容剂来改善两相材料的相容性, 提高界面粘结强度。而EPDM 具有类似于聚烯烃的分子结构, 为此本研究中在PS 相中加入相容剂SEBS, 改善EPDM 和PS 的界面相互作用, 以提高多层体系的整体力学性能, 实验结果如图8 所示。相容剂的加入, 多层体系拉伸断裂过程虽然仍是脆性层和韧性层分步断裂, 但是脆性层的断裂过程明显变长, 韧性得到了提高(由于本文重点关注脆性层断裂情况, 在图8 中仅给出了30 % 应变以下的应力- 应变曲线) 。进一步分析脆性层的断裂强度以及脆性层的断裂伸长率(即脆性层完全断裂而韧性层未断裂时的应变) 发现: 随着SEBS 用量的增加脆性层的断裂强度先增加后减少, 其断裂伸长率增加; 而脆性层断裂后的应力变化不大, 如表3 数据所示。说明SEBS 的加入对脆性 PS 层的影响较大而对韧性EPDM 层的影响较小, 并且在一定程度上提高了两相界面的相互作用。

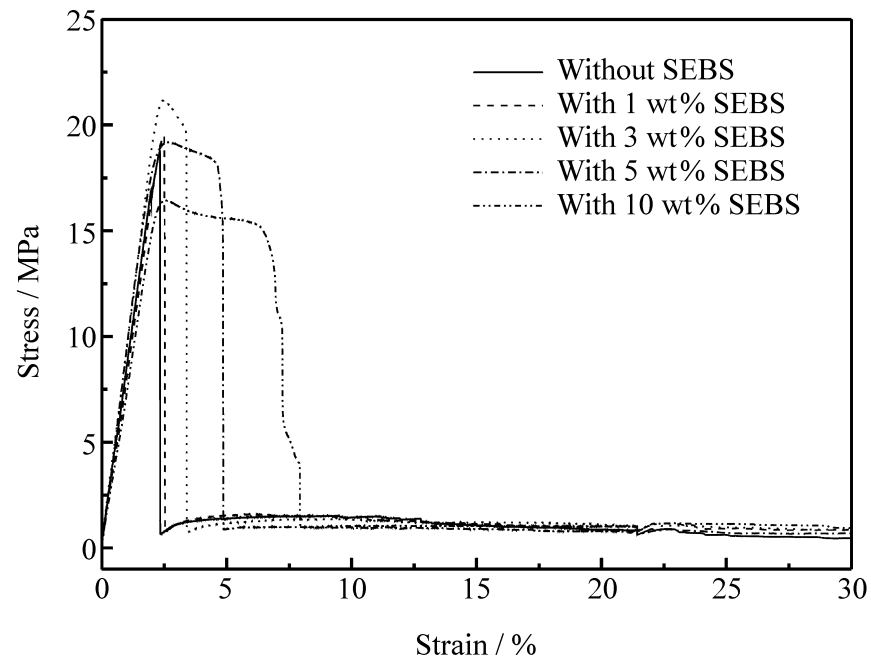


图8　不同SEBS 含量的 M64-3 样品的应力-应变曲线图

Fig.8　Stress -strain curves for M64-3 with different SEBS contents

为了更好地说明SEBS 对EPDM 和PS 两相界面的作用, 测试了 PS 与SEBS 一般共混样品的拉伸性能, 结果如图9 所示。随着 SEBS 含量的增加, PS 的拉伸强度和杨氏模量减少, 而断裂伸长率提高。说明SEBS 对PS 具有很好的增韧作用, 且SEBS 含量越高增韧效果越明显。相比而言, 64 层交替复合材料的拉伸强度却先增加后减少, 说明此时EPDM 层和PS 层间界面粘结强度的变化对体系有较大影响。SEBS 的加入一方面提高了脆性层PS 的韧性, 降低其拉伸强度, 如图9 所示; 另一方面

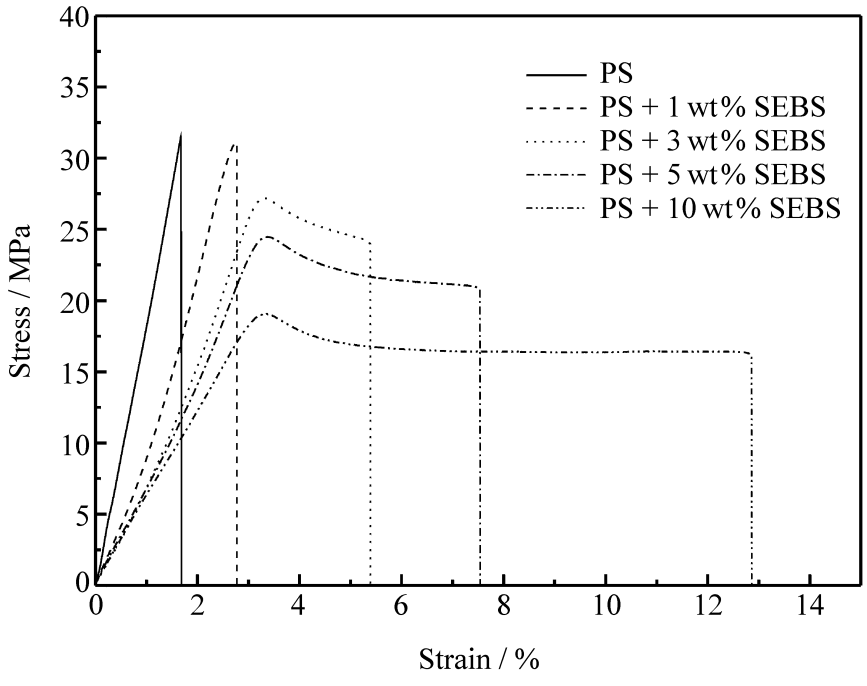


图9　不同SEBS 含量的PS/ SEBS 一般共混物的应力-应变曲线

Fig .9　Stress -strain curves for PS/ SEBS conventional blend with different SEBS content

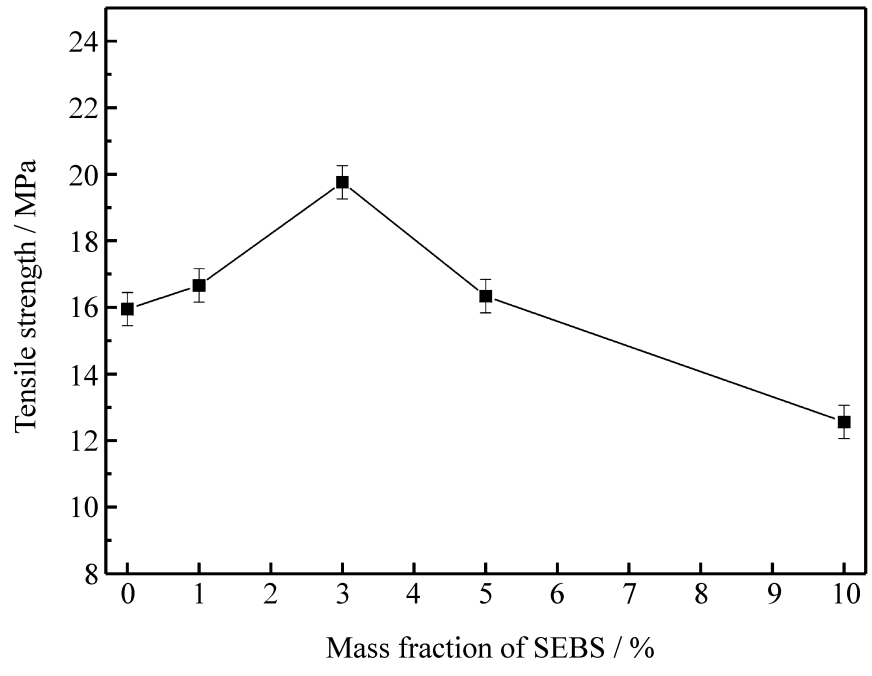


图10　EPDM 含量为40 .0 wt % 的EPDM/ PS 一般共混样品的拉伸强度与SEBS 含量的关系

Fig .10　Curves of tensile strength versus SEBS content for the conventional blends with 40 .0 wt % EPDM

改善了EPDM 与PS 两相的相容性提高界面粘结性能，增加其拉伸强度。当SEBS 量较少时，界面粘结强度的提高作用强于SEBS 的增韧作用，所以64 层样品拉伸强度有所提高；当SEBS 量较大时，增韧作用明显强于界面粘结强度的提高，所以64 层样品拉伸强度有所下降。从表3 中可以看出，PS 相中加入3 wt % 的SEBS，64 层样品具有最高的拉伸强度，说明此时2 种作用程度达到较好的配比，这种情况下界面粘结强度的提高较好地补偿了SEBS 增韧PS 导致其拉伸强度的下降。

对EPDM/ PS 一般共混材料，如图10 所示，相容剂SEBS 含量变化的影响类似于多层材料，拉伸强度也是先增加后减少，SEBS 添加量为3 wt % 时，拉伸强度最大。说明对EPDM/ PS 一般共混材料，相容剂SEBS 的作用很可能也呈现2 个方面：对PS 相的增韧以及对EPDM 相和PS 相界面作用的改善。

3　结　论

64 层EPDM/ PS 交替复合材料的拉伸断裂过程基本上是EPDM 层和PS 层断裂过程的加合，表现为初期的PS 脆性断裂行为和后期的EPDM 韧性拉伸行为。主要原因是由于EPDM 和PS 的物性相差太大以及两者之间的相容性较差。与同组分比的一般共混材料相比，多层材料具有较高的拉伸强度和杨氏模量，这与多层材料是双连续结构以及EPDM 韧性层阻止PS 层裂纹向相邻PS 层间发展有很大关系。相容剂SEBS 的加入提高了EPDM 和PS 两相界面的相互作用，改善了PS 层的韧性。添加相容剂的多层复合材料拉伸强度的变化与这2 种作用密切相关。

表3　不同SEBS 含量的M64-3 样品的拉伸结果

Table 3　Tensile results of M64-3 with different SEBS contents

Specimen	Mass fraction of SEBS/ %	Tensile stress of PS layers/ MPa	Strain at PS layers broken/ %	Stress after PS layers broken/ MPa
M64-30	0	18 .2 ±0 .5	2 .1 ±0 .3	1 .0 ±0 .3
M64-31	1	19 .3 ±0 .2	2 .4 ±0 .2	0 .9 ±0 .1
M64-33	3	20 .0 ±0 .2	3 .1 ±0 .3	1 .0 ±0 .2
M64-35	5	19 .3 ±0 .2	4 .8 ±0 .2	0 .9 ±0 .1
M64-310	10	16 .6 ±0 .1	6 .0 ±0 .8	1 .1 ±0 .1

参考文献:

[1] 杨　雪, 王源升, 余红伟. 多层高分子复合结构斜入射声波吸声性能[J]. 复合材料学报, 2006, 23(6): 21-28.
Yang Xue, Wang Yuansheng, Yu Hongwei. Sound absorption properties of multilayered polymer composites for oblique incidence [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(6): 21-28.

[2] 杨　雪, 王源升, 朱金华, 余红伟. 多层阻尼复合结构阻尼性能[J]. 复合材料学报, 2005, 22(3): 175-181.
Yang Xue, Wang Yuansheng, Zhu Jinhua, Yu Hongwei. Damping properties of the composite structures with multilayered damping materials [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(3): 175-181.

[3] Schrenk W J, Alfrey T Jr. Polymer blends [M]. Paul D R, Newman S, ed. New York: Academic Press Inc, 1978: 129-164.

[4] Alfrey T Jr, Schrenk W J. Multilayer systems [J]. Science, 1980, 208: 813-818.

[5] Baer E, Hiltner A, Keith H D. Hierarchical structure in polymeric materials [J]. Science, 1987, 235: 1015-1022.

[6] Shin E, Hiltner A, Baer E. Damage zone in microlayer composites of polycarbonate and styrene-acrylonitrile [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1993, 47(2): 245-267.

[7] Ma M, Vijayan K, Hiltner A, Baer E, Im J. Thickness effects in microlayer composites of polycarbonate and poly(styrene-acrylonitrile) [J]. Journal of Materials Science, 1990, 25(4): 2039-2046.

[8] Haderski D, Sung K, Hiltner A, Baer E. Crazing phenomena in PC/SAN microlayer composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1994, 52(2): 121-133.

[9] Sung K, Hiltner A, Baer E. Three-dimensional interaction of crazes and micro-shearbands in PC-SAN microlayer composites [J]. Journal of Materials Science, 1994, 29(21): 5559-5568.

[10] erns J, Hsieh A, Hiltner A, Baer E. Comparison of irreversible deformation and yielding in microlayers of polycarbonate with poly(methyl methacrylate) and poly(styrene-co-acrylonitrile) [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2000, 77(7): 1545-1557.

[11] ueller C, Topolkaraev V, Soerens D, Hiltner A, Baer E. Breathable polymer films produced by the microlayer coextrusion process [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2000, 78: 816-828.

[12] 郭少云, 王　明, 李　姜, 沈佳斌, 许双喜, 杜　芹. 制备交替多层高分子复合材料的挤出口模: 中国, 200610022348.6, 1962235 [P]. 2007-05-16.

[13] 郭少云, 王　明, 李　姜, 沈佳斌, 许双喜, 杜　芹. 制备交替多层高分子复合材料的叠合装置: 中国, ZL200620036431.4 [P]. 2007-07-27.

[14] 沈佳斌, 王　明, 李　姜, 杜　芹, 许双喜, 陈光顺, 郭少云. 丙烯-乙烯共聚物/乙烯-1-辛烯共聚物层状复合材料的力学性能研究[J]. 高分子学报, 2007(9): 827-832.
Shen Jiabin, Wang Ming, Li jiang, Du Qin, Xu Shuangxi, Chen Guangshun, Guo Shaoyun. Study on the mechanical properties of propylene-ethylene copolymer/ethylene-1-octene copolymer stratified composites [J]. Acta Polymerica Sinica, 2007(9): 827-832.

[15] am G J, Kim K Y, Lee J W. The effect of SEBS on interfacial tension and rheological properties of LDPE/PS blend [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 96(3): 905-911.

[16] jong S C, Xu S A. Impact and tensile properties of SEBS copolymer compatibilized PS/HDPE blends [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1998, 68(7): 1099-1108.