Study on the Effect of Compatilizer on Mechanical Properties, Rheology Behavior and Phase Structure of PP/UHMWPE Blends

Mao Ye, Xiu-ying Huan , Gang Peng , Yi-min Wang
College of Material Science and Engineering, DongHua University ,ShangHai 200051 China
Email: yemao75@126.com

Abstract: Polyprpylene(PP) and ultrahigh-molecular-weight polyethylene(UHMWPE) blends were prepared by adding different compatilizers (PP-g-MAH, ABS, LLDPE). The mechanical properties, rheology behavior, phase structure were investigated. To modify the performance of PP/UHMWPE blending, the compatibility of different compatilizer was discussed. Results shown that there was little difference on tensile strength for different compatilizer, but great on impact strength. The impact strength of blends were greatly enhanced by ABS, The strength and toughness of blends were improved in a certain extent with ABS as conpatilizer.

Keywords: PP; UHMWPE; MAH-g-PP; LLDPE;ABS; compatibility

相容剂作用下 PP/UHMWPE 共混体系的力学性能、流动性能及相结构的研究

叶茂，桓秀颖，彭刚，王依民
东华大学材料学院，上海，中国 200051
Email: yemao75@126.com

摘　要：选取不同性质的相容剂 PP-g-MAH（马来酸酐接枝聚丙烯）、相容剂 ABS、LLDPE（线性低密度聚乙烯）对 PP/ UHMWPE（聚丙烯/超高分子量聚乙烯）共混体系进行增容，研究了不同相容剂对 PP/UHMWPE 共混体系的力学性能，流动性能及相形态的影响。结果表明各种相容剂对共混体系的拉伸性能的影响差别不大，但对共混体系的抗冲击性能的影响较大，ABS 作为相容剂时共混体系的抗冲击性能远高于 LLDPE 和 PP-g-MAH 作为相容剂的共混体系。

关键词：超高分子量聚乙烯；聚丙烯；马来酸酐接枝聚丙烯；线性低密度聚乙烯；相容性

引言

聚丙烯（PP）作为热塑性聚合物在塑料领域内有十分广泛的应用，PP 有很多有优异性能，价廉易得，但也存在着韧性差的严重缺陷，尤其是低温脆性较大，结晶度高而导致对缺口敏感，从而大大地限制了 PP 作为工程材料和结构材料的应用。通过添加冲击改性剂，可以提高 PP 的抗冲击性能[1-4]。超高分子量聚乙烯（UHMWPE）是具有超长分子链结构的综合性能优异的热塑料性工程塑料，具有其它工程塑料所无法比拟的耐冲击性、耐磨损性、耐低温性能、耐应力开裂性及自润滑性等突出性能[5]。金日光等提出了采用具有高强度、高模量和超韧性的超高分子量聚乙烯（UHMWPE）增韧聚丙烯的研究思路，依据超长分子链聚合物与被增韧基体的原位亚微观复合的理论，提出了“原位复合”增韧机理。并通过实验证实了添加 EPDM 作为相容剂可以使 PP 与 UHMWPE 的无定形部分的界面粘合性增加，在其实验中采用四螺杆挤出机制备的 PP/UHMWPE/EPDM 三元共混物的冲击强度几乎是纯 PP 的四倍[6]。张炜等研究了相容剂 D、EPDM 对 UHMWPE/PP 共混体系的增容作用[7]。明艳采用自行配置的解缠剂 JC23 降低 UHMWPE 的熔体粘度，采用机械共混的方法进行加工，从而实现 PP 与 UHMWPE 之间的较均匀共混，改善了共混体系的力学性能[8]。

由于 UHMWPE 分子链长、流动性差、难以分散。很难均匀的分布在 PP 基体中，因此选用合适的相容剂，使 UHMWPE 尽可能在 PP 基体中达到亚微观水平的

资金来源：上海市重点学科资助项目，编号：603

均匀分散，是决定材料最终力学性能的关键因素。本研究选取了三种结构和作用方式不同的聚合物作为相容剂，研究了不同相容剂对共混体系性能的影响，用普通双螺杆挤出设备制备的 PP/UHMWPE/ABS 三元共混物的冲击强度达到了纯 PP 冲击强度的 4 倍以上，并在“原位复合”增韧机理的基础上提出采用分子链具有大分子刚性侧基团结构的相容剂，可以降低达到三相共混体系均匀分散所需的共混条件，使 PP/UHMWPE/相容剂共混体系形成更为广泛的空间立体结构，进而使共混材料的综合力学性能得到进一步的提升。

1 实验部分

1.1 主要原料

UHMWPE：德国 Ticona 公司

PP：中海壳牌石油化工有限公司 HP500N 熔融指数：12g/10min

LLDPE：中国石化 DFDA7042 熔融指数：2g/10min

PP-g-MAH： 市售

相容剂 ABS： 市售

1.2 实验设备

双螺杆挤出机：TSE-18A/600-2.2-36 南京端亚弗斯特高聚物装备有限公司

全自动注塑机：CJ80E 震德塑料机械厂有限公司

万能测试仪： WDW3020 长春科新实验仪器有限公司

冲击测试仪： DAS400 意大利西斯特公司

扫描电镜： S-3000N HITACHI

熔体指数流变仪：RL-5 上海思尔达仪器有限公司

1.3 实验

1.3.1 共混挤出

将 UHMWPE/PP 按不同比例混合，再按适当比例（6%）加入三种相容剂，采用双螺杆挤出机在设定的温度下进行挤出共混。

1.3.2 母料干燥

将共混后的母料置于烘箱内，50℃条件下干燥 24 小时以上

1.3.3 注塑成型

将干燥后的母料用注塑机注塑成型为各种实验样条

1.3.4 性能测试

熔体指数的测定按 GB/T 1634-89 进行，温度 230℃

拉伸强度按 GB/T 1040-92 进行，拉伸速度 50mm/min

缺口冲击强度按 GB/T1043-93 进行测试

2 结果讨论

2.1 共混物的熔体流动性

表 1 为不同相容剂作用下 PP/UHMWPE 共混物的熔体流动指数，从表 1 中可以看出，UHMWPE 的加入使 PP 的流动性出现较大幅度的降低，随着 UHMWPE 含量的增加，添加三种相容剂的共混体系的熔体指数均有不同程度的下降。

纯 PP 是非牛顿性很强的流体，而添加 UHMWPE 后，非牛顿性大大减弱。但随 UHMWPE 添加含量的增加，牛顿性逐渐回升[9]。

从图 1 中可以看出在 UHMWPE/PP 为 10%的配比下以 PP-g-MAH 为相容剂的共混体系的流动性要好于另外两种，但随 UHMWPE 含量的增加熔体指数下降的趋势快于另外两种。以 LLDPE 为相容剂的共混体系的流动性要好于相容剂 ABS 的共混体系。两者的熔体指数随 UHMWPE 含量的增加下降趋势较小。因为 PP-g-MAH 中的 PP 端很容易与基体的 PP 互熔，在 UHMWPE 添加比例

TABLE 1 Melt flow index of UHMWPE/PP blends with different compatilazer

表 1 不同相容剂作用下 UHMWPE/PP 共混物的熔体流动指数

UHMWPE/PP / Compatilizer	0/100 (g/10min)	10/90 (g/10min)	15/85 (g/10min)	20/80 (g/10min)
NO compatilizer	12	9.020	7.540	4.220
PP-g-MAH		7.479	5.981	3.875
Compatilizer S		1.494	1.436	0.971
LLDPE		3.544	3.421	3.110

978-1-935068-41-9 © 2010 SciRes.

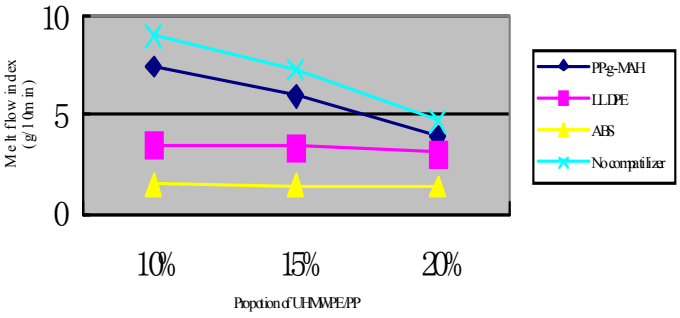

Figure 1　Melt flow index of blends
图 1　三种相容剂作用下共混体系的熔体指数

不大时，共混体系的熔体指数下降的不大，但随着 UHMWPE 添加量的不断增多，UHMWPE 的长链缠结作用迅速占据了主导地位，使共混体系的熔体指数出现较快的下降。LLDPE 本身的线性结构使其与 UHMWPE 的超长分子链较容易发生缠结，随着 UHMWPE 添加量的增多缠结现象也逐步增多，共混物的熔体指数慢慢下降。相容剂 ABS 的分子侧链上有大分子的苯环结构，极易和 UHMWPE 的超长分子链发生缠结，造成共混物熔体指数相对前两种情况更低。

2.2 共混物的力学性能

2.2.1 冲击性能

超高分子量聚乙烯有很好的力学性能与它本身的结构性能有关，超高分子量聚乙烯属于结晶性高聚物，高分子链排列有序，分子间作用力大。在材料受到冲击时，次裂纹与人字裂纹差不多垂直，抑制了主裂纹的发展，所以材料有较高的冲击强度和抗拉、抗压强度[10]。

表 2 为不同相容剂作用下 UHMWPE/PP 共混物缺口冲击强度。从表 2 中可以看到 UHMWPE 的加入使 PP 的冲击性能出现较大幅度的提升，其中以 ABS 为相容剂的共混体系的冲击性能的提升最显著。以共混比例为 20/80 的 UHMWPE/PP 共混体系为例，其缺口冲击强度超过纯 PP 的 4 倍。

从图 2 中可以看到添加相容剂的三元共混体系的冲击强度高于不添加相容剂的共混体系。以 LLDPE 为相容剂的共混体系在 UHMWPE/PP 比例为 15%时缺口冲击强度达到最大值，共混比例大于 15%的情况下随 UHMWPE 含量的增大缺口冲击强度出现下降。PP-g-MAH、相容剂 ABS 为相容剂的共混体系的冲击强度随着 UHMWPE 在共混体系中含量的增加而增加，ABS 为相容剂的共混体系的冲击强度要明显高于另外两种的原因是相容剂 ABS 的嵌段机构且侧链带有刚性侧基团的构象更容易与 UHMWPE 的长分子链发生缠结形成空间网状结构，这种空间网状结构可以在体系受到冲击时吸收大量的能量。

TABLE　2　Impact strength of UHMEPE/PP blend with different compatilizer
表　2　不同相容剂作用下 UHMWPE/PP 共混物缺口冲击强度

UHMWPE/PP / Compatilizer	0/100 (J/m)	10/90 (J/m)	15/85 (J/m)	20/80 (J/m)
NO compatilizer	27.23	27.40	28.60	30.50
PP-g-MAH		35.56	40.06	54.62
Compatilizer S		86.11	92.08	113.22
LLDPE		46.69	61.00	38.89

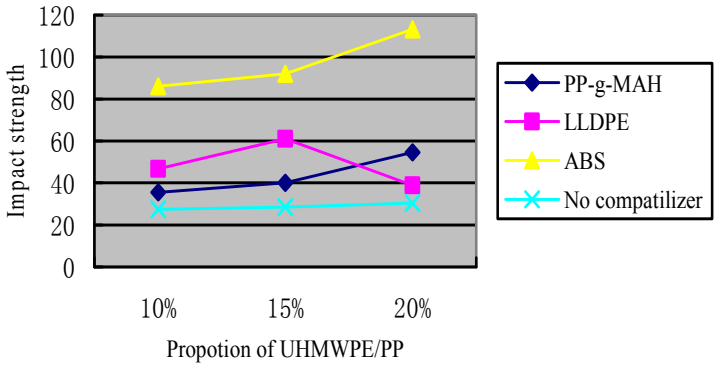

Figure2 Impact strength of blends
图 2 三种相容剂作用下共混体系的缺口冲击强度

2.2.2 其他力学性能

表 3 为不同相容剂作用下 UHMWPE/PP 拉伸力学性能。从表 3 中可以看出以 PP/UHMWPE/相容剂的共混体系的抗拉强度、断裂功、断裂负荷与纯 PP 比较均有小幅度的提高，而屈服强度和断裂伸长率均出现较大幅度的下降。这是因为 UHMWPE 的分子形态与 PP 有较大的差异，两者共混后对结晶形态和结晶性能有较大的影响，结晶度比纯 PP 有所降低降低。造成共混物的屈服强度和断裂伸长率大幅度下降。

TABLE 3 Tensile properties of UHMEPE/PP blend with different compatilizer

表 3 不同相容剂作用下 UHMWPE/PP 拉伸力学性能

UHMWPE content	Compatilizer	Tensile strength (Mpa)	Rupturework (J)	Fracture load (N)	Yield strength (Mpa)	Elongation at break (%)
10%	MAH-g-PP	26.75	8.86	1065	0.38	11.55
	ABS	23.35	19.12	672	0.11	33.56
	LLDPE	22.47	7.47	892	0.12	10.08
	No compatilizer	22.26	7.14	574	0.09	9.75
15%	MAH-g-PP	26.18	11.22	1022	0.23	13.68
	ABSS	23.42	19.4	832	0.26	22.45
	LLDPE	21.38	5.81	851	0.22	7.96
	No compatilizer	20.64	5.63	527	0.11	6.12
20%	MAH-g-PP	25.26	12.06	988	0.21	14.87
	ABS	23.21	19.54	841	0.31	21.01
	LLDPE	19.67	4.73	792	0.19	5.78
	No compatilizer	18.16	4.34	501	0.15	4.38
[1] Work when spicimen break [2] work when necking appear		21.92	353[1] 10.51[2]	791	20.22	518.8

978-1-935068-41-9 © 2010 SciRes.

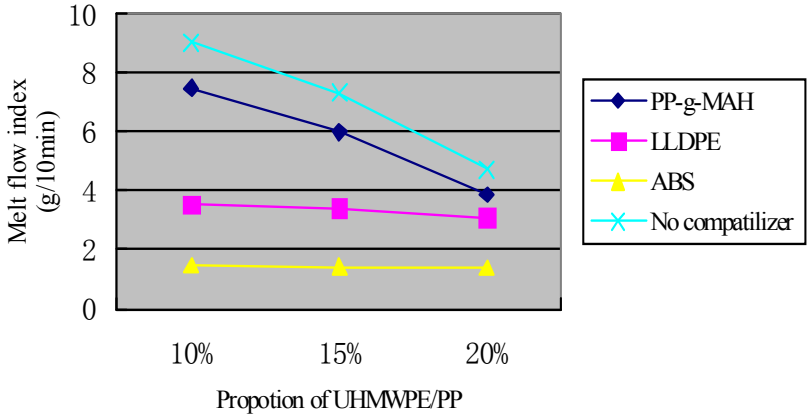

Figure3 Tensile strength of blends
图 3 三种相容剂作用下共混体系的拉伸强度

图 3 显示含有相容剂的共混物其拉伸强度略大于不含相容剂的共混物。随着 UHMWPE 含量的增加，添加三种相容剂的共混物的抗拉强度均有小幅度的下降，说明当 UHMWPE 含量增大时，UHMWPE 与 PP 分相的趋势也增大，造成拉伸强度的降低。三种相容剂作用下的共混体系的抗拉强度差异不明显。以 PP-g-MAH 和 LLDPE 为相容剂的共混物拉伸强度下降幅度大于以 ABS 为相容剂的共混物，说明随着 UHMWPE 含量的增大相容剂 ABS 促进两相相容的能力更强，即抵抗 UHMWPE 相与 PP 相分相的能力更强，故拉伸强度下降趋势较缓。

图 4 显示了以 ABS 为相容剂的共混体系的断裂功高于另两种相容剂的共混体系，以 ABS 和 PP-g-MAH 为相容剂的共混体系其断裂功随 UHMWPE 含量（10%-20%）的增加而上升，以 LLDPE 为相容剂的共混物随 UHMWPE 含量（10%-20%）的增加而下降。

图 5 显示以 PP-g-MAH 和 LLDPE 为相容剂的共混体系随着 UHMWPE 含量的增加其断裂负荷出现小幅下降，而以 ABS 为相容剂的共混体系随 UHMWPE 含量的增加其断裂负荷出现小幅度的上升。结合图 4 和图 5 我们发现在 UHMWPE 含量为 10%和 15%时，以 PP-g-MAH 和 LLDPE 为相容剂的共混体系的断裂负荷均大于以 ABS 为相容剂的共混体系，而前两者的

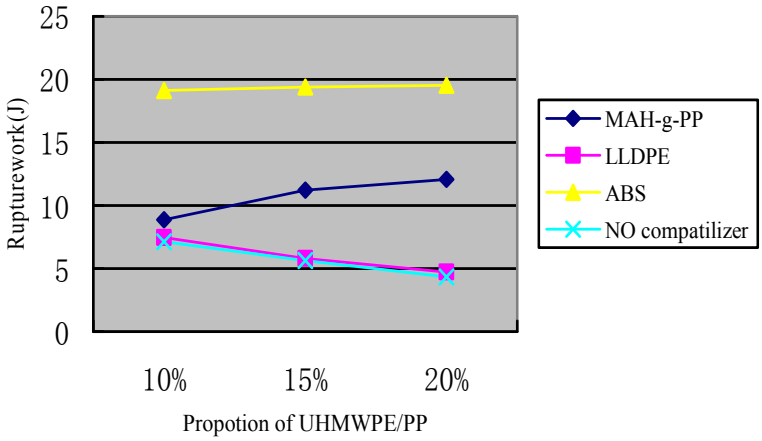

Figure 4 Rupturework of blends
图 4 三种相容剂作用下共混体系的断裂功

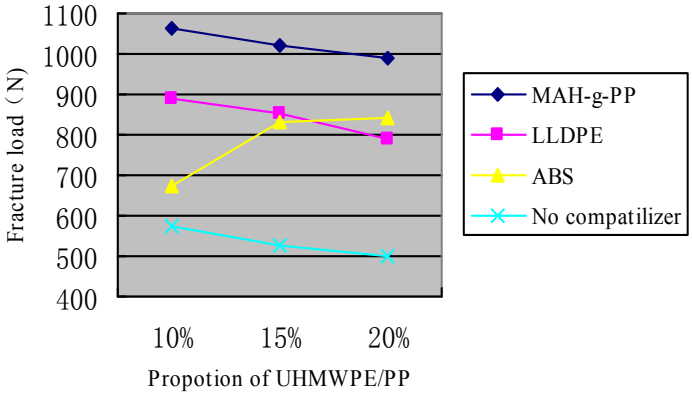

Figure 5　Fracture load of blends

图 5　三种相容剂作用下共混体系的断裂负荷

断裂功却小于后者。这说明在拉伸断裂前以 ABS 为相容剂的共混物产生了更大的形变。这一点从断裂伸长率上可以得到验证。而在 UHMWPE 含量为 20%时，以 ABS 为相容剂的共混物的断裂负荷已经超过了以 LLDPE（PP-g-MAH）为相容剂的断裂负荷，说明一方面以 ABS 为相容剂的共混物随着 UHMWPE 含量的增加，其形成的空间网络结构也更广泛，导致其断裂负荷增大，另一方面，以 LLDPE 为相容剂的共混物，由于 LLDPE（PP-g-MAH）的解缠结能力不强，随着 UHMWPE 含量的增加，与 PP 分相的趋势变大，不能形成更广泛的空间缠结，导致断裂负荷降低。

图 6 显示以 PP-g-MAH 为相容剂的共混体系随着 UHMWPE 含量的增加其屈服强度出现下降，说明在 PP-g-MAH 作用下的共混物，随着 UHMWPE 含量的增加，虽然也能继续形成部分空间网络结构，但 UHMWPE 与 PP 分相的趋势也逐渐增大并占主导趋势，由于 UHMWPE 相与 PP 相界面粘结作用不强，导致最终的屈服强度出现下降。以 LLDPE 和 ABS 为相容剂的共混体系随着 UHMWPE 含量（小于 20%）的增加其屈服强度有所提高，说明在 UHMWPE 含量小于 20%的情况下，仍以形成空间网络为主要趋势。

图 7 显示以 ABS 和 LLDPE 为相容剂的共混体系随着 UHMWPE 含量的增加其断裂伸长率出现下降，说明随着 UHMWPE 含量的增加，导致 PP 晶体结晶尺寸的减小且规整度降低，晶体界面出现滑移的几率减少，虽然共混物也形成了一定的空间网状结构，可

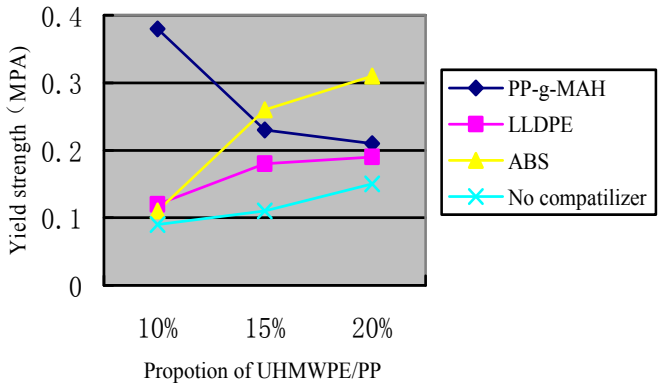

Figure 6　Yield strength of blends

图 6　三种相容剂作用下共混体系的屈服强度

978-1-935068-41-9 © 2010 SciRes.

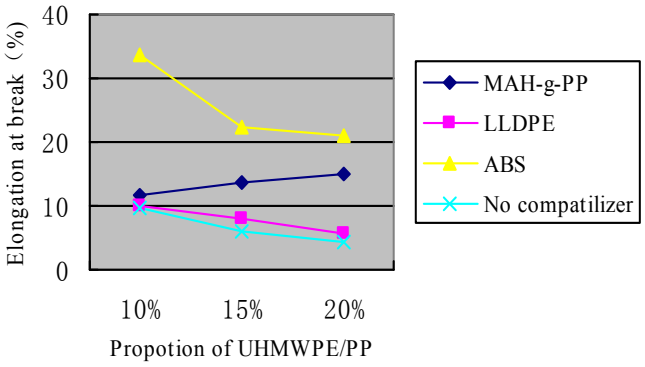

Figure 7　Elongation at break of blends
图 7　三种相容剂作用下共混体系的断裂伸长率

以延缓伸长率降低的趋势，但前者占据着主导地位，最终导致以 ABS 和 LLDPE 为相容剂的共混体系随着 UHMWPE 含量的增加其断裂伸长率出现下降。而 PP-g-MAH 为相容剂的共混体系随着 UHMWPE 含量的增加其断裂伸长率出现小幅度提高，说明 PP-g-MAH 作用下 UHMWPE 与 PP 的分相趋势相比 PP 的“晶体细化”趋势占主导地位，由于 UHMWPE 与 PP 晶界的界面粘合力不强，在拉伸的过程中有晶体滑移的情况出现，导致断裂伸长率有所上升。

2.3 共混物的 SEM 分析

由图 8 (1)可知纯 PP 的断裂生长是直线型的，基体形变很小，最终断裂面较平滑，存在较宽大的裂纹，因此纯 PP 的冲击性能很差，呈现出典型的脆性断裂。将 PP 与 UHMWPE 共混后，其冲击样条的断裂面的基本形变增加，同时在断面上出现很多孔洞和未与基体完全融合的颗粒。孔径及颗粒的大小均在 5-15μm 之间，这些孔洞很明显是在冲断过程中 UHMWPE 拔出时形成的。同时，断面上还会出现许多 UHMWPE 颗粒团聚的现象，说明 UHMWPE 与基体 PP 的相容性较差，在基体中分布较不均匀。

图 9 a)为添加 PP-g-MAH 的共混物 SEM 图像，从图中我们可以发现基体形变呈现鱼鳞状，在更高的放大倍率下，我们可以看到在鱼鳞状的边缘处分布着白色的细丝，并沿鱼鳞方向发生取向，这种结构的形成需要吸收一定的能量，从而提高共混物的冲击性能，结合冲击性能测试实验的数据，这种结构使得共混物的冲击能是纯 PP 的进两倍。但是与图 8 (2)中

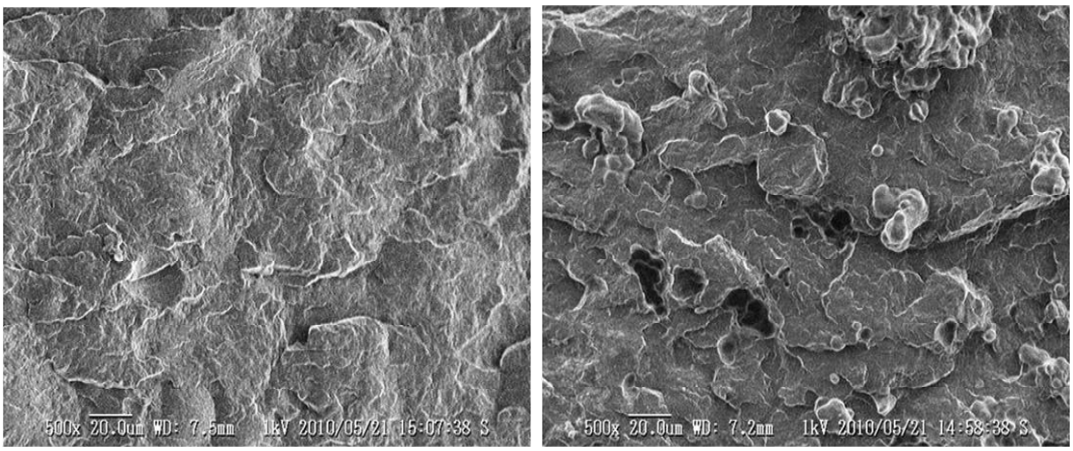

Figure 8　SEM micrograph of PP/UHMWPE blends at weight ration of : 1)100/0; 2)80/20
图 8 共混物的 SEM 照片，PP/UHMWPE 的重量比为：1) 100/0；2) 80/20

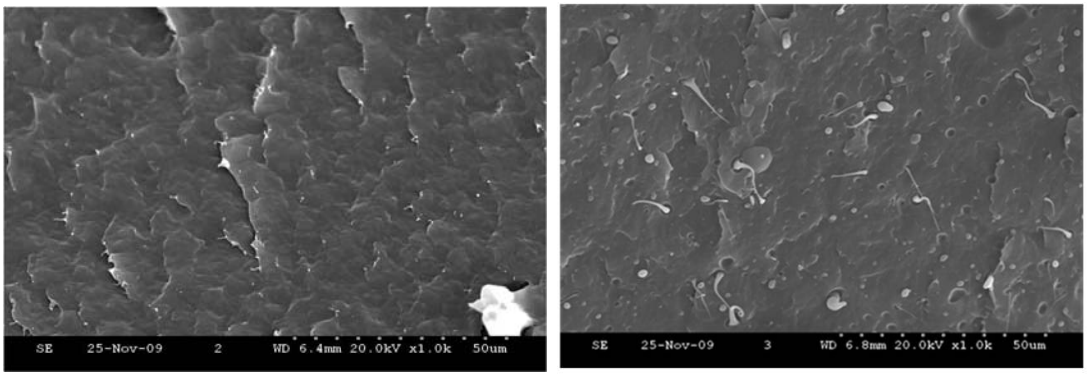

Figure 9 SEM micrograph of PP/UHMWPE blends with different compatilizer : a)PP-g-MAH; b)LLDPE

图 9 含有不同添加剂的共混物的 SEM 图像 a)PP-g-MAH; b)LLDPE

PP/UHMWPE 双组份的共混物的断面相比，基体的形变很少。图 9 b)为添加 LLDPE 的共混物的 SEM 图像，图中断裂面基体形变不明显，但是在断面上分布着白色凸起和细丝状物——UHMWPE，从图 9 b)中我们可以清楚地看到凸起和细丝状物的结构，其一端固定在基体上，直径在 1-3μm 之间。另外，图中可看到一些孔洞的存在，同时，我们可以发现白色的细丝发生明显的取向，这些行为都会消耗大量的冲击能，使共混物的冲击性能有所改善。

从图 10 A 中可以看出，白色物质和基体之间存在过渡区， 说明 LLDPE 可以改善 PP 和 UHMWPE 两组分间的相容性。图 10 B 为被拔出并发生一定取向的 UHMWPE，这里 UHMWPE 和 PP 两组份间的过渡区在受到外力作用时，容易引发应力集中，发生界面脱离现象。在外力作用下，UHMWPE 发生形变，出现收缩现象，因此在 UHMWPE 和基体之间会出现缝隙。由于 PP 和 UHMWPE 间的相容性得以改善，两者之间存在较强的作用力，所以在孔洞的边缘会发现周围基体发生取向形成微纤（如图中白色丝状物质），这一过程需要消耗大量的能量。

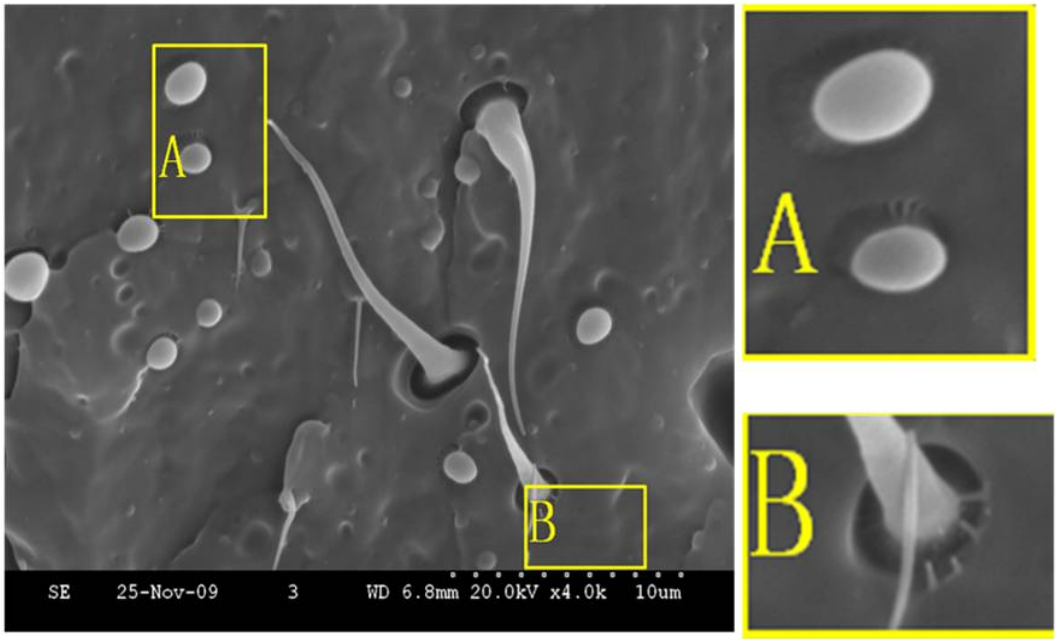

Figure 10 SEM micrograph of PP/UHMWPE /LLDPE

图 10 PP/UHMWPE/LLDPE 共混物的 SEM 图像

978-1-935068-41-9 © 2010 SciRes.

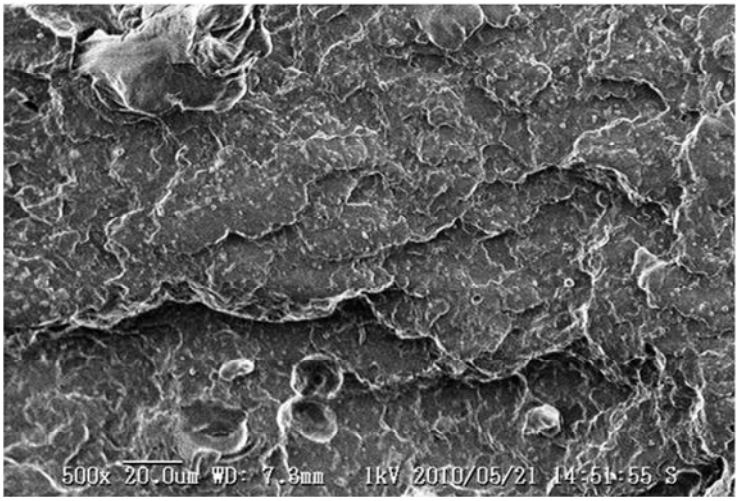

Figure 11 SEM micrograph of PP/UHMWPE /ABS
图 11 共混物 PP/UHMWPE/ABS 的 SEM 照片

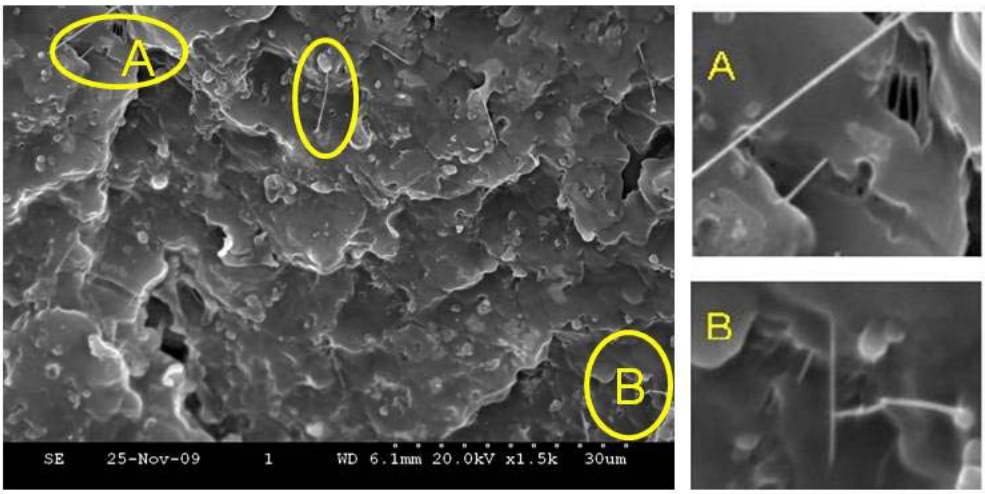

Figure 12 SEM micrograph of PP/UHMWPE /ABS
图 12 共混物 PP/UHMWPE/ABS 的 SEM 照片

图 11 为添加相容剂 ABS 的共混物的 SEM 照片，图中可以发现添加 ABS 后，共混物的断面较双组份变得更加粗糙，同时断面上均匀地分布尺寸在 0.5-1.5μm 之间的白点和相应大小的空洞，这说明 ABS 可以有效地改善 PP 和 UHMWPE 间的相容性，使 UHMWPE 进一步细化并均匀地分散在基体中。同时，在断面上还会出现长度在 3-15μm 之间的微纤（如图 12），可以证明，加入 ABS 后，PP 和 UHMWPE 间的粘结力增强，因此在断裂时会发生形变，消耗大量的冲击能。

3 结论

(1)UHMWPE 的加入会使 PP 得熔体指数出现较大幅度的降低，随着 UHMWPE 含量（0-20%）的增加共混体系的熔体流动性会相应降低。

（2）添加适当的比例的 UHMWPE 和相容剂可以在保证 PP 材料原有的拉伸强度的同时显著提高 PP 的抗冲击性能，但共混物的屈服强度和断裂伸长率有较大幅度的降低。

（3）选用 ABS 作为相容剂的 PP/UHMWPE 共混体系的抗冲击性能要明显好于以 PP-g-MAH 和 LLDPE 为相容剂的共混体系。

（4）选取分子链带有刚性大分子侧基结构的相容剂更易与 UHMWPE 分子长链及 PP 分子链形成广泛的空间网状结构，这是提高 PP/UHMWPE 共混体系冲击性能的关键。

4 致谢

本论文是在导师王依民老师和田冶老师的悉心指导下完成的。在本课题的研究过程中王依民老师和田冶老师一直以渊博的知识和不倦的敬业精神不断的激励着我，并言传身教，身体力行地培养我独立思考，深入研究，解决实际问题的能力。在此向两位老师表示我衷心的感谢和敬意。

感谢给我极大帮助和支持的王燕萍老师及实验室的各位老师。感谢桓秀颖、彭刚、文珍惜等同学在实验工作中给予我的热情帮助。

最后要感谢为我学习深造作出无私奉献的我的家人和朋友，他们的理解、支持和爱护我将铭记终生。

References（参考文献）

[1] C. P. Papadopoulou and N. K. Kalfoglou. Comparison of compatibilizer effectiveness for PET/PP blends: their mechanical, thermal and morphology characterization. Polymer,Volume 41, Issue 7, March 2000, Pages 2543-2555.

[2] Halimatudahliana A,Ismail H, Nasir M. Morphological studies of uncompatibilized and compatibilized polystyrene/polypropylene blend. Polymer Testing, Volume 21, Number 3, 2002 , pp. 263-267(5).

[3] Manli Zhang,Yiqun Liu ,Xiaohong Zhang.The effect of elastomeric nano-particles on the mechanical properties and crystallization behavior of polypropylene. Polymer,Volume 43, Issue 19, 1 September 2002, Pages 5133-5138.

[4] S. A. R. Hashmi, Somit Neogi, Anuradha Pandey, Navin Chand. Sliding wear of PP/UHMWPE blends: effect of blend composition. *Wear*, *Volume 247, Issue 1*, *January 2001*, *Pages 9-14.*

[5] Dong Xiang,Xiaoming Cui. Development of UHMWPE's Modification. Engineering of .Plastic,2005, 33(11).
向东，崔小明. 超高分子量聚乙烯改性研究进展. 工程塑料应用 2005 年, 第 33 卷, 第 11 期.

[6] Riguang Jin,Xiaodong Wang,Dezhen Wu,Hangquan Li. Mechanical Properties,Morphology,Rheology Research on Polyethylene and Ultrahigh molecular Weight Polyethylene blends. *Journal of Polymer*,2005,14(4).
金日光, 汪晓东, 武德珍, 励杭泉. 超高分子量聚乙烯增强聚丙烯共混体系的力学性能、亚微相态和增韧机理的研究进展. 高分子通报 2005 年, 第 14 卷, 第 4 期.

[7] Wei Zhang,Yongxin Mai,Gongchao Tang,Xiangyang Wu,Yumei Zhang,Wei Hong,Study on Modification of UHMWPE/PP.Plastic 2008 37(6).
张炜, 麦永懿, 唐颂超, 吴向阳, 张玉梅, 洪尉. UHMWPE / PP 共混改性体系研究. 塑料 2008 年 37 卷第 6 期.

[8] Yan Ming,Runli Jia,Modification of UHMWPE/PP.Plastic, 2003, 32(2).
明艳， 贾润礼. UHMWPE/PP 的共混改性. 塑料, 2003 年，第 32 卷, 第 02 期.

[9] Hangquan Li,Xiaodong Wang,Riguang Jin,Submicron Structure and rehology of PP/UHMWPE blend.Science and Engineering of Polymer.1994,1(1).
励杭泉，汪晓东，金日光. PP/UHMWPE 合金的亚微相态与流变性质. 高分子材料科学与工程. 1994 年 1 卷第 1 期.

[10] Fengfeng Xu,Ping Chao,Linhui Wan.Mechanical Research and Application of UHMWPE.Metallic mine,2007,11.
仵峰峰, 曹平, 万琳辉. 超高分子量聚乙烯的力学性能研究及其应用. 金属矿山 2007 年第 11 期.

978-1-935068-41-9 © 2010 SciRes.