

多相聚合物体系相界面研究进展

陈绪煌^{1,2}, 盛京¹, 彭少贤², 李纯清²

(1. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300072;

2. 湖北工业大学化学与环境工程学院, 武汉 430068)

摘要:综述了多相聚合物体系相界面的形成、界面层状态的表征、界面层性质及其对体系性能的影响。重点论述了不同类型增容剂对界面行为的影响, 其中对嵌段型增容剂的分子量、浓度等因素对界面行为的影响建立了定量关系; 而对接枝型和无规增容剂对界面行为的影响研究较少, 有待发展。指出了在界面张力、界面层厚度与多相聚合物体系性能, 尤其是力学性能之间建立量化关系是高分子物理领域一个可以期待的发展方向。

关键词:界面; 多相聚合物; 增容; 进展

多相聚合物体系中除各相外, 还有相与相间的界面层。外场作用, 特别是力场在共混改性材料中间的传递, 界面层对其有决定性的影响^[1,2]。界面层对多相聚合物体系性能的影响, 尤其是对力学性能的影响, 从一定程度上讲, 比各相本身的结构还重要^[3~5]。因此, 多相聚合物体系相界面层研究成为近几年的一个热点问题。本文讨论了界面层的形成、状态的表征、性质及其对体系性能的影响, 重点讨论了增容剂对界面的影响。

1 界面层的形成

多相聚合物体系相间界面层的形成可分为两步: 第一步是相间相互接触, 第二步是聚合物大分子链段之间相互扩散。增加相间的接触面积有利于链段的相互扩散, 提高相间的作用力。在混炼过程中为了增加相间的接触面积, 提高分散程度, 可以采用有效的混炼机械、IPN 技术或添加增容剂等方法^[6]。

相间相互接触时即发生链段之间的相互扩散。当聚合物大分子具有相近的活性时, 大分子的链段就以相近的速度相互扩散; 若大分子的活性相差悬殊, 则发生单向扩散。扩散的推动力是混合熵即链段的热运动。若混合过程吸热, 熵增加最终为混合热所抵消。扩散使聚合物的相界面两边产生明显的浓度梯度。相界面以及相界面两边具有浓度梯度的区域构成了相间的界面层^[7]。

2 界面层状态的表征

界面层状态主要包括界面层厚度、组分间相互作用等方面。使用适当手段对其进行表征, 是研究多相聚合物体系相界面的关键。

2.1 界面层厚度

界面层的厚度取决于聚合物分子相互扩散的程度。而大分子相互扩散程度与两种聚合物的相容性、分子链段的大小、分子量及相分离的条件等因素有关。所以, 界面层的厚度也与这些因素有关。界面层厚度可以根据不同理论进行估算。Ronca^[8]提出, 界面层厚度 d 可以表示为:

$$\bar{d}^2 = k_1 M T_c Q (T_c - T)$$

式中, k_1 为比例系数; M 为聚合物的分子量; T_c 为临界混溶温度; Q 为与 L、M 有关的常数; T 为任意温度。

根据 Helfand 理论^[9], 对非极性聚合物, 当分子量很大时界面层厚度为:

基金项目:国家自然科学基金重大资助项目(02490220);

作者简介:陈绪煌(1971-), 男, 在职博士生, 主要从事高聚物的结构与性能、功能高分子等方面的研究, 发表科技论文二十几篇。Tel: 027-61348600, E-mail: cxh213@126.com.

$$d = 2(k/\chi_{12})^{1/2}$$

式中, k 为常数; χ_{12} 为 Flory-Huggins 相互作用参数。

从热力学观点看, 界面层厚度取决于熵和能等因素。能量因素是指相间的相互作用能, 它与两聚合物溶度参数 δ_1 和 δ_2 差的平方成正比, 而差的平方与 χ_{12} 成比例。当然, 以上讨论适合非极性聚合物的情况。当聚合物极性较大或组分间存在特殊的相互作用时, 上述结论就不再适用。

理论研究结果非常重要, 具有指导作用。但理论结果只有被实验证实, 才显示其重要性。用于界面层厚度表征的手段有: 小角中子散射(SANS)^[10, 11]、小角 X 射线(SAXS)^[12~14]、小角激光散射(SALA)^[15~18]、中子反射技术^[19, 20]和时间分辨(time-resolved)椭圆串测定仪^[21, 22]等。

韩蕴萍等^[18]用小角激光散射(SALS)研究了多相聚合物体系的分散, 测定了体系的界面层厚度。推导出界面层厚度 d 计算公式:

$$d = \left[-2 \left(-\varphi_2 + \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} - \frac{2QK}{I_0} \right] \frac{a_{c2}}{\varphi_2}$$

式中, φ_2 为分散相体积分数, a_{c2} 为分散相的尺度, Q 为积分不变量, K 为常数, I_0 为零度处的散射光强。

2.2 界面层中组分间的相互作用力

界面层中组分间的相互作用力有两种基本类型: 一类是两组分间化学键连接, 如接枝共聚物和嵌段共聚物; 另一类是两组分仅靠次价力(范德华力、氢键等)结合。由于范德华力是普遍存在的, 所以接枝共聚物、嵌段共聚物界面层中组分间除了化学键连接外, 还有范德华力的作用。对于一般的共混多相聚合物体系, 相间仅有次价力的作用。若加入增容剂, 在共混过程中组分间可能有化学反应发生, 这样, 界面层中组分间除了次价力外, 也会有化学键作用。关于组分间次价力, 普遍认同的是润湿—接触理论和扩散理论。根据润湿—接触理论, 各组分间的结合强度主要取决于界面张力, 界面张力越小, 结合强度越大。

聚合物界面物质由一相向界面迁移时需要静能量, 这一建立在单位面积所作的可逆功即为热力学上的界面张力, 定义为:

$$\Gamma = (\partial A / \partial S)_{T, P, n}$$

目前, 测定聚合物界面张力的方法有: 悬滴法^[23]、断丝法^[24]、传统液滴回缩法及三维悬滴法^[25]等方法。最经典手段是自动悬滴法^[23], 先将增容剂与分散相组分预混合, 通过玻璃毛细管在另一个组分的熔体内形成混合物的液滴。采用摄像装置跟踪混合物液滴形状的变化, 经过换算, 得到界面张力。

3 界面层性质及其对体系性能的影响

界面层是存在于相间的“第三相”, 其性能有别于本体相。Bares^[26]证实, 界面层的玻璃化温度介于两种聚合物组分玻璃化温度之间。当分散相的比表面积小于 $25\mu\text{m}^{-1}$ 时, 共混物有两个明显的力学损耗峰; 比表面积大于 $25\mu\text{m}^{-1}$ 时, 只有一个明显的力学损耗峰。当分散相颗粒大于 $0.1\mu\text{m}$ 时, 共混物出现两个明显的玻璃化温度, 分别对应于两种聚合物组分的玻璃化温度; 粒径在 $0.02\sim 0.1\mu\text{m}$ 时, 共混物的两个玻璃化温度相互靠拢; 粒径小于 $0.015\mu\text{m}$ 时, 共混物则表现一个宽广的玻璃化转变区域。这是因为随着分散相颗粒的减小, 界面层体积分数增大。上述事实表明, 界面层力学松弛性能与本体相是不同的; 界面层及其所占的体积分数对共混物的性能有显著的影响。

总之, 无论从聚合物的组成还是从其结构和性能而言, 聚合物界面层都可看作是介于两种聚合物组分单独相之间的第三相。界面层性质对体系性能影响很大。相容性好的聚合物共混体系, 界面层厚, 界面层中组分间的相互作用力大。相容性差的聚合物共混体系, 界面层薄, 界面层中组分间的相互作用力小, 使得共混体系性能差, 尤其是力学性能, 会比纯基体树脂还低^[2, 6]。

4 增容剂对界面行为的影响

界面性能与相容性十分相关, 相间结合决定于相容性。因此, 提高相间的相容性是改善界面性能的

主要途径。而添加增容剂是提高相容性的有效途径之一。

采用增容剂提高不相容共混物的相容性是近二十年来聚合物研究领域的热点。增容剂的种类很多,有非反应型增容剂与反应增容剂。其中非反应型增容剂种类较多,适用性较广,因此非反应型增容剂对界面性能的影响研究较多。

4.1 嵌段共聚物对界面行为的影响

根据嵌段共聚物组成与共混组分的关系,可分为 A/A-b-B/B、A/A-b-C/B、A/C-b-D/B 三种类型。Noolandi 和 Hong 等^[27,28]建立了增容二元共混物的界面张力与增容剂结构参数的定量关系。根据他们的理论,对 A/A-b-B/B 体系,界面张力的降低值 $\Delta\gamma$ 可以用下式表达:

$$\Delta\gamma = d\Phi_c \left\{ \left(0.5\chi\Phi_p + \frac{1}{Z_c} \right) \right\} - \frac{1}{Z_c} \exp(Z_c\chi\Phi_p/2)$$

式中, d 为界面层厚度; χ 为 A 和 B 之间 Flory-Huggins 相互作用参数; Z_c 为嵌段共聚物的聚合度; Φ_c 、 Φ_p 分别为均聚物和共聚物的体积分数。

当 $Z_c\chi\Phi_p \ll 1$ 时,上式化简为:

$$\Delta\gamma = - \frac{d}{8} Z_c\Phi_c\chi^2 \Phi_p^2$$

显然, Z_c 、 χ 、 Φ_c 、 Φ_p 越大, $\Delta\gamma$ 越大,则共混物的界面张力越小,嵌段共聚物的增容作用也更明显。从上式可以看出,界面张力的改变与增容剂分子量、浓度及组分的相互作用参数有关。

4.1.1 嵌段共聚物分子量对界面行为的影响 从热力学理论出发,Balazs 等^[29]推导出 A/B 不相容体系界面张力与 A-b-B 类嵌段共聚物分子量等参数的定量关系:

$$\gamma = \gamma_0 - \left[\frac{2}{\pi} \right] \left[\frac{2}{3} \right]^{3/2} Z_c^{-1/2} (\ln \Phi_+ + xZcf)^{3/2}$$

Φ_+ 为嵌段共聚物在 B 相的体积分数, f 为共聚物的组成, Z_c 为嵌段共聚物总的聚合度, γ_0 为 A、B 之间未加增容剂时的界面张力, x 为 A、B 的 Flory-Huggins 的参数。

一般而言,嵌段共聚物的增容效果优于相同成分的接枝共聚物,因而对嵌段型增容剂研究较多^[30~32]。Galloway 等^[32]研究了分子量从 6000~200000 的嵌段 PS-PE 对 HDPE/PS 的增容作用。结果显示:PS-PE 嵌段共聚物的分子量为 40000 时具有优异的增容作用,能减小分散相尺寸和稳定聚合物的相态结构,即在体系中增容剂有一最佳的分子量,使 HDPE/PS 体系的界面张力达到最小。

4.1.2 嵌段共聚物浓度对界面行为的影响 界面张力降低不仅与增容剂的分子结构有关,与增容剂的浓度也密切相关。Anatasiadis 等^[33]深入研究了苯乙烯-1,2-丁二烯两嵌段共聚物对聚苯乙烯/聚(1,2-丁二烯)共混体界面的影响。加入少量共聚物就可以导致界面张力迅速降低;当增容剂浓度低于 CMC 时,界面张力降低与增容剂浓度基本呈线性关系;当增容剂浓度超过其表观临界浓度(CMC)时,界面张力几乎不再变化。他认为与 Noolandi 和 Hong 的理论预测相符。

详细研究发现,即使增容剂浓度低于临界浓度(CMC)时,Noolandi 和 Hong 的理论也不能完全说明 Anastasiadis 等的实验结果。唐涛等^[34,35]进一步研究增容剂的界面行为时发现界面张力随增容剂浓度(C)变化的规律符合下列关系:

$$- d\gamma/dC = K(\gamma - \gamma_s)$$

式中, K 为界面张力随增容剂浓度变化的系数; γ 和 γ_s 分别是增容剂浓度为 C 和饱和时的界面张力。当增容剂浓度 $C=0$ 时,将上式积分,并代入边界条件,得下列方程:

$$\gamma = (\gamma - \gamma_s) e^{-Kc} + \gamma_s$$

从上式可知,加入增容剂可导致共混物界面张力降低,并可以达到的最小值为 γ_s ,而不是零。因此,增容共混物只能是多相体系,不可能成为均相体系。上述结果表明,方程可以描述界面张力随增容剂浓度的变化规律。共混物界面张力随增容剂浓度变化符合“三阶段”模型^[34]:(1)与 C 为线性关系(C : $0-C_1$),所有的增容剂分子均处于共混物分散相与连续相的界面区域中,没有胶束形成;(2)与 C 为非线性关系(C : C_1-C_2),在前一阶段基础上,继续加入增容剂,只有一部分继续进入界面区域,其余部分在某一组分内形成胶束;(3)不随 C 变化($C>C_2$),当增容剂浓度大于 C_2 时,所加入增容剂将全部在某一相区

形成胶束,这部分增容剂对共混物增容作用没有贡献。

4.2 接枝共聚物对界面行为的影响

除了嵌段共聚物增容剂外,另一类就是接枝共聚物。与前者相比,后者容易合成,因而实际应用中接枝型共聚物作为增容剂更方便。在不相容共混物中加入接枝共聚物型增容剂能导致共混物中分散相粒径下降,共混物力学性能提高。Balazs 等^[29]采用“自洽场”理论计算出了 A_nB 类梳型接枝共聚(1)及 A_2B_2 类四臂星型共聚物(2)对 A/B 共混体界面张力的影响。

$$(1) \gamma = \gamma_0 - \left\{ \frac{2}{\pi} \right\} \left\{ \frac{2}{3} \right\}^{3/2} Z_c^{-1/2} (\ln \Phi_+ + \chi Z_c f)^{3/2} (4 - 3f)^{-1/2}$$

$$(2) \gamma = \gamma_0 - \left\{ \frac{1}{\pi} \right\} \left\{ \frac{2}{3} \right\}^{3/2} Z_c^{-1/2} (\ln \Phi_+ + \chi Z_c f)^{3/2}$$

式中, χ 为 A、B 的 Flory-Huggins 参数, Φ_+ 为共聚物在 B 相的体积分数, $f = Z_A/Z_C$ 为共聚物中 A 嵌段的组成, Z_c 为共聚物总的聚合度。

接枝型共聚物由于合成容易,可根据需要自主合成,选择自由度高。因而,对该类增容剂研究更活跃^[36~42]。Kwak 等^[42]研究了甲基丙烯酸甲酯接枝 PE 的合成及其对 HDPE/PVDF (50/50, 质量比)共混体系的增容作用。结果表明:接枝共聚物的结构对增容效果影响很大,当甲基丙烯酸甲酯的接枝率为 10%,接枝部分 PMMA 的分子量达到 4350 时,接枝共聚物的增容效果较好。

4.3 无规共聚物对界面行为的影响

应用高分子量嵌段共聚物作为界面增容剂有下列两方面缺点:(1)嵌段共聚物的合成常采用阴离子聚合方法,与自由基聚合相比成本较高;(2)嵌段共聚物在某一种均聚物内有很强的形成胶束的趋势,向界面扩散的动力学速率很小。接枝型增容剂有时效果不太好。因此,近来有关无规共聚物作为增容剂的研究逐渐引起了人们的兴趣^[43,44],如用马来酸酐与苯乙烯共聚物来增容极性聚合物与非极性聚合物共混体系^[45],也有不少研究了无规共聚物结构对增容效果的影响^[46]。

改善 PP/PE 共混物的相容性一直是许多学者努力的目标,其常用的增容剂是乙烯丙烯无规共聚物(EPR)或三元乙丙橡胶(EPDM)。Cavaliere 等^[47]用 EPR 增容 PP/PE,讨论了 EPR 的分子量对不同 PP/PE 体系的增容效果。结果表明:不同组成的 PP/PE 体系都存在某一合适最佳分子量的 EPR 使得增容效果达到最好。

同时,无规共聚物的组成对增容效果也有影响。Dai 等^[48]在研究苯乙烯-2-乙烯基吡啶无规共聚物组成对聚苯乙烯/聚(2-乙烯基吡啶)界面的增容作用影响时,发现无规共聚物对界面的增容作用随共聚物组成而改变。当 $f=0.5$ 时,界面断裂能达到最大值;组成偏离 0.5 时,断裂能开始下降,当组成越偏离 0.5,断裂能下降越明显。

4.4 反应型高分子增容剂对界面行为的影响

有些高分子带有可以与其它物质反应的活性官能团,利用这些活性官能团与其它物质的官能团反应,在相间产生化学键,增强相间的相互作用,达到增容的目的,这种高分子增容剂称为反应性高分子增容剂。反应性高分子增容剂可以反应的官能团通常为:酞酐、羧酸、氨基、羟基、环氧基等。在增容时发生的反应归纳为:酞酐化、亚酞酐化、酯化、胺解、酯交换等作用。

用马来酸酐接枝共聚物增容含尼龙体系研究较多^[49~52]。在这类体系中接枝物中的 MAH 与尼龙的端氨基发生化学反应,在两相间产生了化学键,两相相容性明显增加。Chow 等^[47]研究了二元乙丙橡胶接枝马来酸酐(EPR-g-MAH)增容 PP/PA6,用 SEM、XRD、TEM、DMA 等手段发现,ERR-g-MAH 的酞酐基团与尼龙的端氨基缩水生成 PP-g-PA6 化学键,共混物两相界面产生了较强的相互作用。甲基丙烯酸缩水甘油酯的接枝物可与许多基团发生酯交换反应,因而成为反应性增容剂的新宠儿^[52,53]。Harrats 等^[53]研究了 PP 接枝甲基丙烯酸缩水甘油酯(PP-g-GMA)增容 PP/PET 共混体系,发现 GMA 可与 PET 的端羟基及端羧基反应,在 PP/PE 共混物界面“就地”形成共聚物,具有很好的增容作用。

5 其它增容方式对界面行为的影响

增容剂的选择与合成有时会受条件限制,因而近年来随着科学技术的发展,出现了一些新的增容方

式。

5.1 原位反应增容

原位反应增容是一种特殊的反应性增容技术,是近年来发展起来的一种新的增容手段。该方法是在共混物制备过程中加入引发剂,有时也加入反应单体,生成嵌段或接枝型增容剂或使相间产生化学作用,降低界面张力而达到增容的目的。由于反应增容的相界面作用强,增容效果好,在这方面研究较多^[54~58]。

Diaz 等^[57]在 PP/PS 体系中加入苯乙烯单体与引发剂 AlCl_3 ,在挤出过程中,原位反应生成了 PP-*g*-PS 共聚物,起到了增容作用,效果良好。何慧等^[59]研究了 EVA 增容 HDPE/PET 共混物,在挤出增容过程中加入有机金属化合物催化剂,增容剂 EVA 侧基上的官能团与 PET 分链上的酯基在有机金属化合物的催化下发生了酯交换反应,使相间产生了化学作用,增加了 PP/PET 界面的相互作用。

5.2 辐射增容

辐射增容是多相聚合物体系在高能射线的作用下生成共聚物而达到增容的目的。Adem 等^[60]用高能电子束的作用,使马来酸酐与 PP 相作用生成 PP-*g*-MAH 增容了 PP/PA6。Elmaghor 等^[61,62]用 γ -射线辐照 PVC/HDPE,发现 PVC 与 HDPE 间产生了交联作用,增容效果明显。Quintana 等^[63]用 β -射线改性 POE/PA6,发现 POE 与 PA6 间产生了交联作用,体系相容性提高。

5.3 高界面应力增容

李忠明等^[64,65]就高界面应力对 PET/PE、PC/PE 共混体系的影响做了研究,发现不添加任何增容剂,可通过控制加工条件来改变界面应力,改善共混物的界面相互作用,实现增容的目的。

5.4 碾磨增容

四川大学等单位一直致力于力化学反应,聚合物在外力作用下可能发生化学反应,能实现增容。邹华维等^[66]研究了石磨碾磨产生的力化学反应使 PVC/SBS 共混体系增容。研究发现:在碾磨过程中,PVC 与 SBS 间生成了化学键,产生 PVC-SBS 共聚物,两者相容性提高了。

特殊的增容方式有许多,不胜枚举。这些方法可能只适用于特定的多相体系,而不具备普适性。对不同的多相聚合物体系,也许能找到特殊的增容方法,这些方法可能比传统增容方式效果更好。因而特殊的增容方式也是一个值得关注的领域。

6 结束语

多相聚合物的界面对其性能影响是显著的。现阶段对多相聚合物界面的研究,考察各种增容手段对材料性能的影响,然而绝大部分工作只是定性的,还达不到定量分析的深度。研究深入些的科研工作者把界面张力的改变进行了量化,特别是对以嵌段共聚物作增容剂时,界面张力改变与增容剂的结构参数已建立了定量关系,但是其它种类增容剂研究还不够深入。国外已开始重视在界面特性与多相聚合物体系性能的量化关系方面的研究,经过努力会有所突破,而国内在这方面才刚起步。在界面张力、界面层厚度与多相聚合物体系性能,尤其是力学性能之间建立量化关系将会有广阔的发展空间,将对高分子学科的发展有极其重要的推动作用。同时开发新型高效的增容手段,也会是该领域的发展方向之一。

参考文献:

- [1] Monica F, Silvia E, Numa J, et al. *Polymer*, 2005, 46, 6096.
- [2] Pukonszky B. *Eur Polym J*, 2005, 41, 645.
- [3] Bai S L, Sell S G, Hiver J M, et al. *Polymer*, 2005, 46, 6437.
- [4] Litmanovich A D, Plate N A, Kudryavtsev Y V. *Prog Polym Sci*, 2002, 27, 915.
- [5] Sell S G, Bai S L, Hiver J M. *Polymer*, 2004, 45, 5785.
- [6] Puyvelde P V, Velankar S, Moldenaers P. *Curr Opin Colloid In*, 2001, 6, 457.
- [7] Bai S L, Sell S G, Hiver J M, et al. *Polymer*, 2004, 45, 3063.
- [8] Ronca G. *Macromolecules*, 1985, 18, 665.

- [9] Halfand M·J Chem Phys, 1977, 56, 3592.
- [10] Qsamu U, Okimichi Y, Qui T·Macromolecules, 1998, 31, 2962.
- [11] Yun S I, Melnichenko Y B, Wignall G D·Polymer, 2004, 45, 7969.
- [12] Wu J·Polymer, 2003, 44, 8033.
- [13] Everaert V, Groeninckx G, Koch M H J, et al·Polymer, 2003, 44, 3491.
- [14] Wang Z, Wang H, Shimizu K, et al·Polymer, 2005, 46, 2675.
- [15] Zou M, Peng M, Zheng Q·Polymer, 2005, 46, 11085.
- [16] Bartczak Z, Chiono V, Pracella M·Polymer, 2004, 45, 7549.
- [17] Yang K, Yang Q, Li G X, et al·Mater Lett, 2005, 59, 2680.
- [18] 韩蕴萍, 盛京·光散射学报, 2000, 12(4), 203.
- [19] Genzer J, Composto R J·Polymer, 1999, 40, 4223.
- [20] Mark D, Dadmun R, Han C C·Macromolecules, 1994, 27, 7522.
- [21] Boyard N, Vayer M, Sinturel C, et al·Eur Polym J, 2005, 41, 1333.
- [22] Yukioka S, Inoue T·Polymer, 1994, 35, 1182.
- [23] Zhang Y·Polym-Plats Technol, 1997, 4, 547.
- [24] Guido S, Villone M·J Coll & Interface Sci, 1999, 209, 247.
- [25] Mo H Y, Zhou C X, Yu W·J Non-Newtonian Fluid Mech, 2000, 91, 221.
- [26] Bares J·Macromolecules, 1975, 2, 244.
- [27] Hong K M, Noolandi J·Macromolecules, 1981, 14, 727.
- [28] Hong K M, Noolandi J·Macromolecules, 1981, 14, 736.
- [29] Israels R, Foster D P, Balazs A C·Macromolecules, 1995, 28, 2218.
- [30] He A H, Han C C, Yang F S·Polymer, 2004, 45, 8231.
- [31] Anderson H S, Hillmyer M A·Polymer, 2004, 45, 8809.
- [32] Galloway J A, Jeon H K, Bell J R, et al·Polymer, 2005, 46, 183.
- [33] Anatsiadis S H, Gancarz I, Koberstein J T·Macromolecules, 1999, 22, 1449.
- [34] Tang T, Lei Z, Zhang X, et al·Polymer, 1995, 36, 5061.
- [35] Tang T, Huang B T·Polymer, 1994, 35, 4281.
- [36] Ray S S, Douliot S, Bousmina M, et al·Polymer, 2004, 45, 8403.
- [37] Minkova T, Filippi S F, Grizzuti·Polymer, 2003, 44, 7925.
- [38] Pang Y X, Jia D M, Hu H J, et al·Polymer, 2000, 41, 357.
- [39] Moussaif N, Pagnoulle C, Jerome R·Polymer, 2000, 41, 5551.
- [40] Lu C, Guo S Y, Wen L, et al·Eur Polym J, 2004, 40, 2565.
- [41] Macosko C W, Jeon H K, Hoyer T R·Prog Polym Sci, 2005, 30, 939.
- [42] Kwak J, Desmazes P L, Robin J J, et al·Polymer, 2003, 44, 5119.
- [43] Wu J·Polymer, 2003, 44, 7925.
- [44] Kim J K, Park S H, Jeon H K, et al·Polymer, 2001, 42, 2209.
- [45] Aravind I, Albert P, Ranganathaiah C, et al·Polymer, 2004, 45, 492.
- [46] Smit I, Radonjic G, Hlavata D·Eur Polym J, 2004, 40, 1433.
- [47] Cavalieri F, Padella P·Waste Manage, 2002, 22, 913.
- [48] Dai C A, Osuji C O, Jandt K D, et al·Macromolecules, 1997, 30, 6727.
- [49] Chow W S, Bakar A A, Ishak Z A M, et al·Eur Polym J, 2005, 41, 687.
- [50] Hu G S, Wang B B, Zhou X M·Mater Lett, 2004, 58, 3457.
- [51] Jiang C H, Filippi S, Magagnini P·Polymer, 2003, 44, 2411.
- [52] Scaffaro R, Francesco P, Mantia L, et al·Polymer, 2003, 44, 6951.
- [53] Harrats C, Omonov T, Groeninckx G, et al·Polymer, 2004, 45, 8115.
- [54] Jeon H K, Feist B J, Koh S B, et al·Polymer, 2004, 45, 197.
- [55] Wu D Z, Wang X D, Jin R G·Eur Polym J, 2004, 40, 1223.
- [56] Brien C P, Rice J K, Dadmun M D·Eur Polym J, 2004, 40, 1515.
- [57] Diaz M F, Barbosa S E, Capiati N J·Polymer, 2005, 46, 6096.
- [58] Ji Y L, Ma J H, Liang B R·Mater Lett, 2005, 59, 1997.
- [59] 何慧, 沈家瑞, 黄庙由·合成橡胶工业, 2000, 23(3), 117.

- [38] Khonakdar H A, Moshedian J, Wagenknecht U, et al. *Polymer*, 2003, 44, 4301~4309.
[39] Liu L, Qi Z, Zhu X. *J Appl Polym Sci*, 1999, 71(7), 1133~1138.

Tribology of Plastic and its Composite Materials

DONG Guang-neng¹ LI Jian² XIE You-Bai¹

(¹ Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

² Wuhan Research Institute of Materials Protection, Wuhan 430030, China)

Abstract: In this paper the progress of plastic and its composite tribo-materials is reviewed. Polymer alloys of PTFE, PEEK and UHMWPE and their composites are considered the key research areas in future. Considering plastic characteristics, plastic element design will be helpful to heat dispersion and the thermal resistance of plastics and ambient media resistance are also improved for tribological applications. Interfaces between plastic matrices and additives are still momentous. The future directions are tribo-polymer design based on modern material design, the creep and long-term stabilization, gradient function polymers and green tribo-polymers.

Key words: Tribo-materials; Plastics; Material design; Gradient function; Creep

(上接第 52 页)

- [60] Adem E, Burillo G, Borja M V, et al. *Nucl Phys B*, 2005, 236, 295.
[61] Elmaghor F, 张丽叶, 励杭泉. 合成橡胶工业, 2002, 25(1), 43.
[62] Elmaghor F, 张丽叶, 励杭泉. 合成橡胶工业, 2002, 25(3), 175.
[63] Quintana S L, Rosales C, Mitre I J. *Polymer*, 2004, 45, 8041.
[64] 李忠明, 谢邦互, 黄锐, 等. 材料研究学报, 2005, 19(1), 8.
[65] 李忠明, 谢邦互, 黄锐, 等. 材料研究学报, 2005, 19(1), 15.
[66] 邹华维, 徐闻. 高分子材料科学与工程, 2005, 21(1), 214.

Advances in Research of the Interphase in Multi-Phase Polymers

CHEN Xu-huang^{1,2}, SHENG Jing¹, PENG Shao-xian², LI Chun-qing²

(¹. School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

². School of Chemical and Environmental Engineering, Hubei Polytechnic University, Wuhan 430068, China)

Abstract: The formation and characterization of the interphase in multi-phase polymers were summarized in this paper. The interphase characteristics and their influences on properties of multi-phase polymers were reviewed as well. Emphasis was placed on discussing the effects of different compatibilizers on the interphase behavior. The influences of molecular weight and concentration of block copolymer based compatibilizers on the interphase behavior have been extensively investigated and quantitative relationships have been made. However, few investigations have been made on the effects of compatibilizers based on graft and random copolymers on the interphase behavior. It is anticipated that a quantitative correlation among interfacial tension, interphase thickness, and properties, particularly mechanical ones, of multi-phase polymers is a promising aspect in the field of polymer physics.

Key words: Interphase; Multi-Phase polymers; Compatibilization; Advances