

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.08.024

GMA 和 PE-g-MAH 协同增容 GTR/PE-HD 热塑性弹性体

于新颖¹,王泽宇²,李迎春¹,王文生¹,舒落生¹

(1. 中北大学材料科学与工程学院,太原 030051; 2. 太原技术转移促进中心,太原 030051)

摘要:以过氧化二异丙苯为引发剂,甲基丙烯酸缩水甘油酯(GMA)和马来酸酐接枝聚乙烯(PE-g-MAH)组成协同增容体系,通过动态硫化法制备了废旧轮胎胶粉(GTR)/高密度聚乙烯(PE-HD)热塑性弹性体。研究了 PE-g-MAH 添加量一定时, GMA 用量对 GTR/PE-HD 热塑性弹性体力学性能、结晶性能和微观形貌等方面的影响。结果显示,添加 0.5 份 GMA, 10 份 PE-g-MAH 时,制备的 GTR/PE-HD 热塑性弹性体综合力学性能最佳,其中拉伸强度为 12.82 MPa,断裂伸长率为 341.61%,撕裂强度为 78.08 kN/m。傅立叶变换红外光谱测试结果表明, GMA 上的环氧基团与 GTR 表面的羧基能发生反应生成酯基。扫描电子显微镜微观形貌表征结果表明,改性后试样断面更加不平整,发生了明显的塑性变形,在两相界面处出现“拉丝”现象。差示扫描量热分析结果表明,随 GMA 用量增加,熔融温度和结晶温度基本不变,熔融焓和结晶度逐渐降低。

关键词:废旧轮胎胶粉;高密度聚乙烯;热塑性弹性体;马来酸酐接枝聚乙烯;甲基丙烯酸缩水甘油酯

中图分类号: TQ334 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)08-0130-05

Synergistic Compatibilizing Modification of GTR/PE-HD Thermoplastic Elastomer by GMA and PE-g-MAH

Yu Xinying¹, Wang Zeyu², Li Yingchun¹, Wang Wensheng¹, Shu Luosheng¹

(1. School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Taiyuan Technology Transfer Promotion Center, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Ground tire rubber (GTR)/high density polyethylene (PE-HD) thermoplastic elastomer was prepared by dynamic vulcanization with DCP as initiator, glycidyl methacrylate (GMA) and PE-g-MAH as synergistic compatibilizing system. The effect of the content of GMA on the mechanical properties, crystallinity and micro morphology of GTR/PE-HD thermoplastic elastomer with a certain amount of PE-g-MAH was studied. The results showed that when 0.5 phr GMA and 10 phr PE-g-MAH were added, the comprehensive mechanical properties of GTR/PE-HD thermoplastic elastomer were the best, including tensile strength of 12.82 MPa, elongation at break of 341.61%, tear strength of 78.08 kN/m. FTIR test showed that the epoxy group on GMA could react with the carboxyl group on GTR surface to form ester group. The microscopic morphology of GTR/PE-HD thermoplastic elastomer was characterized by scanning electron microscopy. The cross-section of the modified sample was more irregular, and there was obvious plastic deformation and “drawing” phenomenon appeared at the interface of two phases. The crystallinity of GTR/PE-HD thermoplastic elastomer was studied by DSC. With the increase of GMA content, the melting temperature and crystallization temperature were remained unchanged, and the melting enthalpy and crystallinity decreased gradually.

Keywords: ground tire rubber; high density polyethylene; thermoplastic elastomer; PE-g-MAH; glycidyl methacrylate

近 20 年来,汽车工业高速发展造成了大量废旧轮胎的产生,同时也带动了废旧轮胎胶粉工业的发展。我国每年消耗的橡胶达到 420 多万 t,而同时橡胶资源在国内仍处于紧缺状态,需要大量进口^[1-5]。生产实践表明,部分原料橡胶可以被废旧轮胎胶粉

所替代,特别是在 S. Al-Malalaika 等^[6]经实验后发现可以利用再生轮胎橡胶(RTR)代替热塑性弹性体(TPE)中的橡胶部分,将 RTR 代替一半的天然橡胶后并不会改变或影响混合体系的性能。这一研究促使越来越多的专家学者着手进行以废旧轮胎胶粉

通讯作者:李迎春,博士,教授,主要研究方向为塑料的功能化和高性能化 E-mail: liyingchun@nuc.edu.cn

收稿日期: 2020-05-22

引用格式: 于新颖,王泽宇,李迎春,等. GMA 和 PE-g-MAH 协同增容 GTR/PE-HD 热塑性弹性体[J]. 工程塑料应用,2020,48(8):130-134, 143.

Yu Xinying, Wang Zeyu, Li Yingchun, et al. Synergistic compatibilizing modification of GTR/PE-HD thermoplastic elastomer by GMA and PE-g-MAH[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(8):130-134, 143.

(GTR) 为基体的热塑性弹性体的研究^[7-9]。

Jiang C 等^[10]利用双螺杆挤出机制备出胶粉/高密度聚乙烯(PE-HD)热塑性弹性体,首先将胶粉与四乙烯五胺通过双螺杆挤出机,对胶粉进行脱硫处理并在胶粉表面接枝氨基,然后以过氧化二异丙苯(DCP)作为引发剂,利用单体苯乙烯、甲基丙烯酸缩水甘油酯(GMA)对 PE-HD 分子链进行接枝改性,GMA 上的环氧基团能够与胶粉表面的氨基进行开环反应,从而提高胶粉/PE-HD 热塑性弹性体相界面的相容性。

笔者通过动态硫化法制备了 GTR/PE-HD 热塑性弹性体,主要利用 GTR 表面的羧基、羟基等活性基团^[11],以 DCP 为引发剂,通过马来酸酐接枝聚乙烯(PE-g-MAH)和 GMA 的协同增容作用,提高 GTR 和 PE-HD 两相的相容性,旨在制备综合力学性能优良的热塑性弹性体。研究中,PE-g-MAH 与 PE-HD 相无需考虑相容性问题,MAH 能与 GTR 表面的羟基进行开环成酯反应^[12],PE-g-MAH 对 GTR/PE-HD 热塑性弹性体改性效果稳定;除了羟基基团,GTR 表面还存在一定含量的羧基基团,能与 GMA 上的环氧基团反应生成酯基^[13],且 GMA 上的碳碳双键能借助 DCP 的引发作用与 PE-HD 分子链相联结,在 GTR 和 PE-HD 相界面形成强的相互作用。选取 GMA 与 PE-g-MAH 同时添加到同一共混体系中,进行不同的界面增容反应,充分利用 GTR 表面的活化基团,在热塑性弹性体体系中形成更加稳定的界面层。GMA 对热塑性弹性体体系的增容过程如图 1 所示。对比其他学者的研究,无需对 GTR 进行活化改性,充分利用其表面已经存在的活性基团,采用的制备方式过程简便,成本更低,操作易行,更适用于工业化的发展。

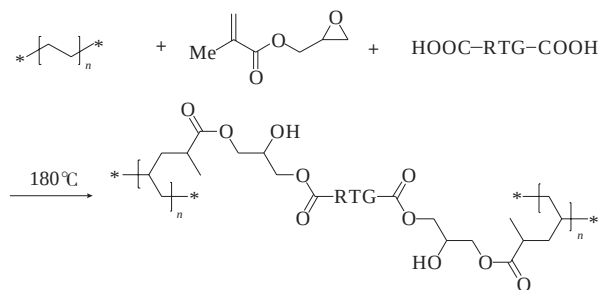


图 1 GMA 对 GTR/PE-HD 热塑性弹性体的界面增容机理

1 实验部分

1.1 原材料

PE-HD: 5000S, 中国石油兰州石化公司;

GTR: 0.25 mm (60 目), 焦作市宏瑞橡胶有限责任公司;

DCP: 化学纯, 上海白鸽农药化工厂;

PE-g-MAH: 接枝率 1.2%, 诚丰塑料原料助剂有限公司;

GMA: 分析纯, 美国陶氏化学公司。

1.2 仪器及设备

开炼机: SK160B 型, 上海第一橡胶机械厂;

密炼机: S(X)M-0.5L 型, 常州苏研科技有限公司;

平板硫化机: XQLB 型, 上海第一橡胶机械厂;

傅立叶变换红外光谱(FTIR)分析仪: TENSOR-27 型, 布鲁克光谱仪器公司;

微机控制电子万能试验机: SANS CMT6104 型, 深圳新三思材料检测有限公司;

电热真空干燥箱: DZF-6000 型, 巩义市宇翔仪器有限公司;

扫描电子显微镜(SEM): S-530 型, 日本日立公司;

差示扫描量热(DSC)仪: DSC1 型, 德国 Mettler Toledo 公司。

1.3 GTR/PE-HD 热塑性弹性体的制备

GTR/PE-HD 热塑性弹性体的配方如表 1 所示, 制备过程如下: ①将 GTR 在真空烘箱中于 80℃ 条件下干燥 12 h, 待用。②将密炼机预热至 180℃, 加入 PE-HD 以及 GTR 共混 10 min, 再加入 PE-g-MAH 共混 5 min, 然后加入 GMA 继续共混 5 min, 最后加入 DCP, 混合 10 min 后出料。③将密炼机加工过的混合物在开炼机上继续混炼 5 min。④将开炼机混炼好的物料称量后在平板硫化机上压制成型; 温度为 180℃, 硫化压力为 10 MPa, 时间为 8 min, 然后在室温下冷压 5 min, 最后制备样条进行相关测试或表征。

表 1 GTR/PE-HD 热塑性弹性体配方 份

试样编号	GTR	PE-HD	PE-g-MAH	GMA	DCP
1 [#]	60	30	10	0.00	0.40
2 [#]	60	30	10	0.25	0.40
3 [#]	60	30	10	0.50	0.40
4 [#]	60	30	10	0.75	0.40
5 [#]	60	30	10	1.00	0.40
6 [#]	60	30	10	1.25	0.40

1.4 测试与表征

(1) 力学性能测试。

拉伸性能依据 GB/T 1040.1-2018 采用微机控

制电子万能试验机测试,哑铃状 I 型试样,拉伸速率 500 mm/min;撕裂测试依据 GB/T 529-2008 进行,直角型试样,拉伸速率为 500 mm/min。

(2) SEM 分析测试。

将拉伸试样的拉断面进行喷金处理后,采用 SEM 对微观形貌进行观察研究。

(3) FTIR 分析测试。

采用 FTIR 仪对试样光洁面进行衰减全反射红外表征测试,分析峰范围 $400 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ 。

(4) DSC 分析测试。

测试前将样品加工成碎颗粒状,并在真空干燥箱内烘干 12 h;测试温度区间为 $25 \sim 210^\circ\text{C}$,升温速率 $10^\circ\text{C}/\text{min}$;降温速率为 $5^\circ\text{C}/\text{min}$; 210°C 保持 10 min 以消除热历史。

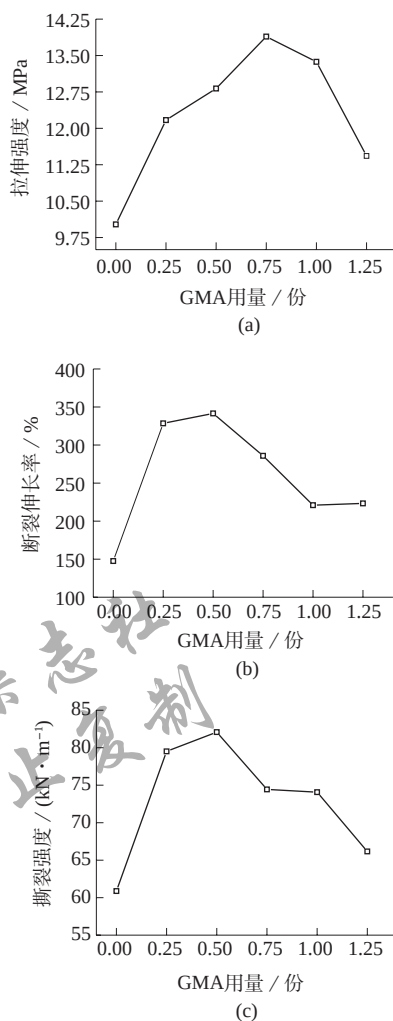
2 结果与讨论

2.1 GMA 用量对热塑性弹性体力学性能的影响

不同 GMA 用量 GTR/PE-HD 热塑性弹性体的力学性能测试结果见图 2。由图 2a 可看出,添加 GMA 后体系拉伸强度有了明显提高;当 GMA 用量增加到 0.75 份时拉伸强度到达峰值,为 13.89 MPa,比未添加 GMA 时增长了 35.75%。由图 2b 可看出,断裂伸长率呈现出先上升后下降的趋势,当添加 0.5 份 GMA 时,断裂伸长率能达到峰值 341.62%,比未添加 GMA 时的断裂伸长率增长了 131.47%。由图 2c 可看出,添加 0.5 份 GMA 时热塑性弹性体的撕裂强度最佳,为 82.08 kN/m ,对比未添加 GMA 时增加了 34.82%。综合来看,添加 GMA 后,拉伸强度、撕裂强度以及断裂伸长率都呈现出先上升后下降的趋势, GMA 用量为 0.5 份时,力学性能达到最佳。GMA 用量偏低时,不足以充分利用 GTR 表面的羧基基团,反应效率受限,形成的界面层不够稳定,影响 GTR/PE-HD 热塑性弹性体的力学性能; GMA 用量偏高时,易引发 PE-HD 相内自由基聚合反应,使相界面处界面张力扩大,相容性受损,外力作用时热塑性弹性体受力不均,同样不利于改善体系的相容性^[14]。

2.2 GMA 用量对热塑性弹性体微观形貌的影响

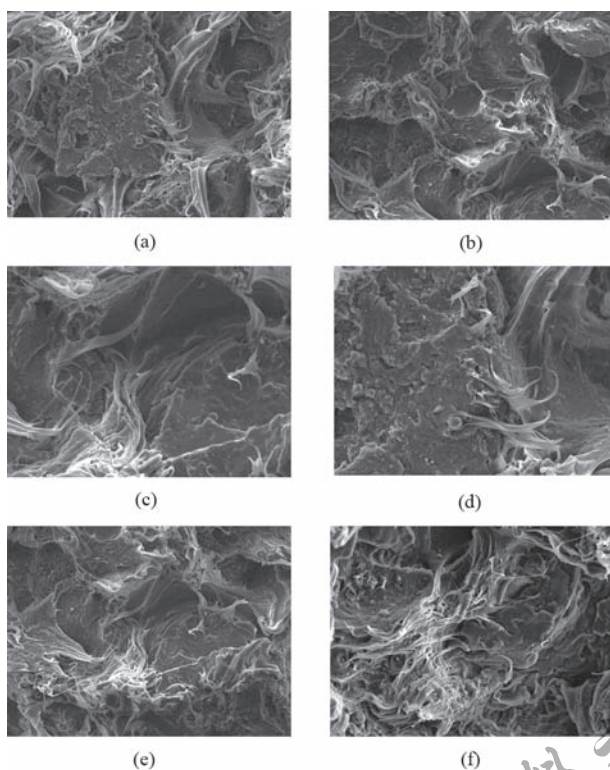
热塑性弹性体为两相体系, GTR 橡胶相与 PE-HD 热塑性树脂相具有不同的弹性模量。当受到外力作用时,共混体系易在界面处形成裂缝,经加入的相容剂作用之后, GTR 相与 PE-HD 相形成更加牢固的界面层,相容性得到改善。图 3 为 GTR/PE-HD 热塑性弹性体的 SEM 表征结果。图 3a 中



a—拉伸强度; b—断裂伸长率; c—撕裂强度

图 2 不同 GMA 用量 GTR/PE-HD 热塑性弹性体的力学性能

未加 GMA 时, GTR 和 PE-HD 两相分布明显,相界面清晰;图 3b 中 GMA 用量为 0.25 份,相比图 3a,两相分布更加均匀,包覆在胶粉粒子表面的纤维状物质增多,这可能是因为 GMA 的加入提高了界面反应效率,在两相界面形成了更加稳定的界面层;图 3c 中 GMA 用量为 0.50 份,试样的 GTR 相和 PE-HD 相发生了明显的塑性变形,白色纤维状物质增多, GTR 与 PE-HD 相界面不清晰,该组试样综合力学性能最佳,可推测在该试样界面处发生的界面反应效率很高,使两相相容性得到极大改善;图 3d 中 GMA 用量为 0.7 份,对比图 3b 和图 3c,该试样拉断面两相分布不均匀,这反映出 GTR 与 PE-HD 相界面增容反应效率受到影响,这可能与过量的 GMA 提高了 PE-HD 相内自由基聚合反应进行程度相关,导致界面层稳定性被破坏;图 3e 和图 3f 中, GMA 的用量分别为 1.00 份和 1.25 份,相比于其它



GMA 用量: a—0; b—0.25 份; c—0.50 份;
d—0.75 份; e—1.00 份; f—1.25 份

图3 不同 GMA 用量 GTR/PE-HD 热塑性弹性体的微观形貌

拉断面试样,这两组试样中纤维状拉丝更密集,可能是因为 GMA 用量过多,部分 PE-HD 在 DCP 引发剂作用下发生自由基聚合反应程度增大,使体系受力不均,具有交联网状结构的 PE-HD 相在拉力作用下不断被拉长并在垂直于拉力方向形成剪切力,致使孔洞形成,微观形貌表现为产生大量断面纤维,宏观表现为力学性能下降^[15-16]。

2.3 热塑性弹性体的红外光谱分析

轮胎在使用过程中会受到光、热作用而老化,制备 GTR 过程中还会受到强烈的机械剪切力作用,因而 GTR 表面会因橡胶分子链发生的氧化降解产生羧基、羟基等活性基团。GMA 表面的环氧基团能与 GTR 表面的羧基进行开环成酯的反应,同时会产生同参与反应羧基等量的羟基。衰减全反射红外光谱技术能定性分析化学反应前后结构的变化,根据特征峰强度和峰面积变化,定量分析官能团指数和相对结晶度的变化规律,探索官能团指数、相对结晶度变化与力学性能变化的相关性^[17-18]。

图4为 GTR/PE-HD 热塑性弹性体的红外光谱图。波数 807 cm^{-1} 处代表 GMA 上环氧基团的

振动吸收峰,因 GMA 含量不断增加,该处峰强度也逐渐增强; 1670 cm^{-1} 处代表羧基中羰基的振动吸收峰,随着 GMA 含量的增加峰强度先减弱而后微增,推断该现象与体系中进行的开环成酯反应程度相关;在 1022 cm^{-1} 处发现代表着羟基弯曲振动吸收峰的峰强度变化,在添加 0.5 份 GMA 时最强,随着 GMA 的持续增加而有所减弱;在 1734 cm^{-1} 处代表着酯基中羰基的振动吸收峰,峰强度随 GMA 的添加呈现先增后放缓的趋势;由此可推断加入 0.5 份 GMA 时开环成酯反应效率最高。这与热塑性弹性体力学性能表现出的整体趋势一致。

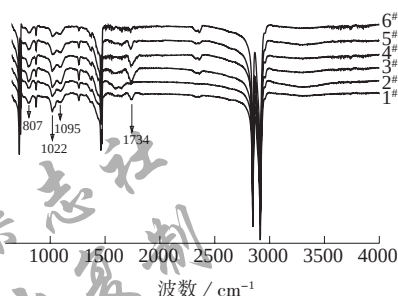


图4 GTR/PE-HD 热塑性弹性体的红外光谱图

2.4 热塑性弹性体的结晶性能分析

GMA 作为体系的相容剂,其用量之所以会对热塑性弹性体的力学性能产生影响,一部分原因在于易引发 PE-HD 相内自由基聚合反应,影响共混体系的结晶度。通过分析 GMA 用量在影响共混体系结晶度上的规律,进而解释 GMA 的用量变化如何影响 GTR/PE-HD 热塑性弹性体的力学性能^[19]。根据 DSC 测试结果,得出不同用量 GMA 的 GTR/PE-HD 热塑性弹性体样品的熔融温度、熔融焓、结晶度以及结晶温度,结果见表2。随着 GMA 用量增加, GTR/PE-HD 热塑性弹性体的结晶温度和熔融温度几乎不变,但熔融焓及结晶度却呈现明显下降的趋势。根据 GMA 的用量将改性过程分为三个阶段:当不添加 GMA 时,热塑性弹性体的结晶度会低于添加 0.25 份和 0.50 份时的样品,在此阶段

表2 GTR/PE-HD 热塑性弹性体的 DSC 分析数据¹⁾

试样编号	$\Delta H_m / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	$T_m / ^\circ\text{C}$	$X_c / \%$	$T_c / ^\circ\text{C}$
1 [#]	45.70	130.22	15.87	119.25
2 [#]	49.79	130.45	17.24	119.98
3 [#]	47.31	130.11	16.38	119.07
4 [#]	38.15	130.65	13.21	119.48
5 [#]	36.17	130.74	12.56	119.27
6 [#]	34.77	130.02	12.04	119.73

注: 1) ΔH_m 为熔融焓, T_m 为熔融温度, X_c 为结晶度, T_c 为结晶温度。

中,由于 DCP 的存在会引发部分 PE-HD 进行自由基聚合反应,聚合物结晶度下降,拉伸弹性模量以及强度等方面都会一定程度下降,且不添加 GMA 的体系中 GTR 相与 PE-HD 相界面结合力较差,致使断裂伸长率也会偏低;添加 0.25,0.50 份 GMA 的热塑性弹性体结晶度同比偏高,且综合力学性能优异,这可能是由于体系中的 GMA 以及 DCP 主要用作改善两相界面相容性,PE-HD 相的自由基聚合反应程度很低,分子链活性偏大,结晶度提升,拉伸、撕裂强度甚至硬度等都会相应提高,虽然影响试样的断裂伸长率,但是由于该阶段中界面增容反应占主导,两相界面相容性得到大幅度提升,宏观上仍表现出良好的断裂伸长率;随着 GMA 用量持续增加,体系中的 GMA 与 DCP 更易于诱导 PE-HD 相发生自由基聚合反应,样品结晶度下降,橡塑两相结合力变差,整体力学性能下降。

3 结论

(1) 添加 0.50 份 GMA,10 份 PE-g-MAH 时,体系综合力学性能最佳,拉伸强度达到 12.82 MPa,撕裂强度达到 82.08 kN/m,断裂伸长率达到 341.61%。

(2) FTIR 检测结果表明 GTR 表面的羧基能与 GMA 上的环氧基团反应生成酯基。

(3) SEM 结果表明,适量 GMA 与 PE-g-MAH 协同作用后,能够使 GTR 和 PE-HD 两相分布更加不规整,拉断面更加粗糙,形成的相界面相容性和稳定性更高。

(4) DSC 检测结果表明,GMA 用量会影响 PE-HD 的结晶度,过量的 GMA 会降低 PE-HD 的结晶度,不利于两相界面化学反应的进行,降低相界面的稳定性,影响 GTR / PE-HD 热塑性弹性体的力学性能。

参考文献

- [1] 肖艳. 车用聚烯烃类热塑性弹性体的应用及其未来 [J]. 聚氨酯, 2014(11):70-75.
Xiao Yan. Application and future of thermoplastic elastomer of vehicle polyolefin[J]. Polyurethane, 2014(11):70-75.
- [2] 蒋灿, 罗子娟, 何慧, 等. 废旧聚烯烃热塑性弹性体 / 胶粉复合材料的制备及性能 [J]. 合成橡胶工业, 2018, 41(4):256-260.
Jiang Can, Luo Zijuan, He Hui, et al. Preparation and properties of waste polyolefin thermoplastic elastomer / rubber powder composite [J]. China Synthetic Rubber Industry, 2018, 41(4):256-260.
- [3] 钱伯章. 国内外热塑性弹性体市场与产品开发进展 [J]. 化工新型材料, 2011, 39(S2):61-75, 81.
Qian Bozhang. The thermoplastic elastomer markets and product progress at home and abroad[J]. New Chemical Materials, 2011, 39(S2):61-75, 81.
- [4] 余庆彦, 田洪池, 韩吉彬, 等. 热塑性弹性体的研究与产业化进展 [J]. 中国材料进展, 2012, 31(2):24-32, 15.
She Qingyan, Tian Hongchi, Han Jibin, et al. Study of thermoplastic elastomer and its industrialization[J]. Materials China, 2012, 31(2):24-32, 15.
- [5] 钟铎均, 黄自华, 王文志. 热塑性硫化胶的制备与应用进展 [J]. 特种橡胶制品, 2011, 32(6):55-61.
Zhong Huajun, Huang Zihua, Wang Wenzhi. Development in preparation and application of TPV[J]. Special Purpose Rubber Products, 2011, 32(6):55-61.
- [6] Al-Malaika S, Amir E J. Thermoplastic elastomers: Part III—Ageing and mechanical properties of natural rubber-reclaimed rubber / polypropylene systems and their role as solid phase dispersants in polypropylene / polyethylene blends[J]. Polymer Degradation & Stability, 1989, 26(1):31-41.
- [7] 郑庆余, 张新星, 卢灿辉, 等. 动态硫化制备高密度聚乙烯 / 脱硫轮胎胶粉热塑性弹性体 [J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(7):147-149, 153.
Zheng Qingyu, Zhang Xinxing, Lu Canhui, et al. Preparation of high density polyethylene / desulfurized tire rubber powder thermoplastic elastomer by dynamic vulcanization[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2010, 26(7):147-149, 153.
- [8] 赵艳芳, 刘丹, 林升博, 等. 改性剂对废胶粉 / 高密度聚乙烯热塑性弹性体性能的影响 [J]. 橡胶科技, 2013, 11(10):17-20.
Zhao Yanfang, Liu Dan, Lin Shengbo, et al. Influence of modifier on the properties of WRP / HDPE thermoplastic elastomer[J]. Rubber Science and Technology, 2013, 11(10):17-20.
- [9] 臧亚南, 范昊展, 王艳秋, 等. PVC / 胶粉热塑性弹性体的制备与性能研究 [J]. 工程塑料应用, 2016, 44(6):41-45.
Zang Yanan, Fan Haozhan, Wang Yanqiu, et al. Preparation and properties of PVC / waste rubber powder thermoplastic elastomer[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(6):41-45.
- [10] Jiang C, Zhang Y S, Ma L, et al. Tailoring the properties of ground tire rubber / high-density polyethylene blends by combining surface devulcanization and in-situ grafting technology[J]. Materials Chemistry and Physics, 2018, 220:55-67.
- [11] 贺茂勇. 原位界面化学增容高密度聚乙烯 / 废旧轮胎胶粉热塑性硫化胶的研究 [D]. 太原: 中北大学, 2017.
He Maoyong. Study on in-situ interface chemical compatibilization of high density polyethylene / ground tire rubber thermoplastic vulcanizates[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.
- [12] Jeon H J, Kim M N. Isolation of a thermophilic bacterium capable of low-molecular-weight polyethylene degradation[J]. Biodegradation, 2013, 24(1):89-98.

- crystallization of isotactic polypropylene nucleated with nucleating agent sodium bicyclic [2,2,1] heptane dicarboxylate[J]. Polymer Bulletin, 2018, 75 (8):3 693–3 703.
- [8] 张健,许多琦,汪乃东,等. 添加剂改性聚丙烯的研究[J]. 上海塑料, 2019(2):5–11.
- Zhang Jian, Xu Duoqi, Wang Naidong, et al. The study on polypropylene modified by additives[J]. Shanghai Plastics, 2019 (2):5–11.
- [9] Fu J X, Li X P, Zhou M, et al. The α -, β -, and γ -polymorphs of polypropylene-polyethylene random copolymer modified by two kinds of β -nucleating agent[J]. Polymer Bulletin, 2019, 76 (2):865–881.
- [10] 董莉,李丽,段宏义,等. α 成核剂对聚丙烯力学性能与结晶性能的影响[J]. 合成树脂及塑料, 2019, 36(2):53–56.
- Dong Li, Li Li, Duan Hongyi, et al. Effect of α nucleating agent on mechanical and crystallization properties of PP[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2019, 36(2):53–56.
- [11] 任娜,李效军,朱孔营. 有机磷酸酯盐与羧酸盐复配成核剂对等规聚丙烯性能的影响[J]. 复合材料学报, 2016, 33 (9):2 006–2 012.
- Ren Na, Li Xiaojun, Zhu Kongying. Effect of organic phosphate salt and carboxylic acid salt combined nucleating agent on properties of isotactic polypropylene[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(9):2 006–2 012.
- [12] Wilsens C, Hawke L, Troisi E, et al. Effect of self-assembly of oxalamide based organic compounds on melt behavior, nucleation, and crystallization of isotactic polypropylene[J]. Macromolecule, 2018, 51(13):4 882–4 895.
- [13] Jürgen E, Felix B, Ingo A. Non-isothermal crystallization of polypropylene with sorbitol-type nucleating agents at cooling rates used in processing[J]. Polymer International, 2019, 68(2):240–247.
- [14] Meng X, Tong C C, Xin Z, et al. Promotion of zeolite as dispersion support for properties improvement of α nucleating agent in polypropylene[J]. Journal of Polymer Research, 2019, 26 (5):1–9.
- [15] Zhang Y F, Sun T T, Jiang W, et al. Crystalline modification of a rare earth nucleating agent for isotactic polypropylene based on its self-assembly[J]. Royal Society Open Science, 2018, 5(5):180 247.
- [16] 曹阳. 国内聚丙烯工艺技术现状及展望[J]. 现代塑料加工应用, 2019, 31 (5):61–63.
- Cao Yang. Current status and prospects of domestic polypropylene process technology[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2019, 31(5):61–63.
-
- (上接第 134 页)
- [13] Tolstov A, Grigoryeva O, Fainleib A, et al. Reactive compatibilization of polyethylene / ground tire rubber inhomogeneous blends via interactions of pre-functionalized polymers in interface[J]. Macromolecular Symposia, 2007, 254(1):79–94.
- [14] Colom X, Marín-Genescà M, Mujal R, et al. Structural and physico-mechanical properties of natural rubber / GTR composites devulcanized by microwaves: Influence of GTR source and irradiation time[J]. Journal of Composite Materials, 2018, 52(22):3 099–3 108.
- [15] 时玉娇,王兆波. SBS 增容 HDPE / WGTR TPE 的微观结构与界面研究[J]. 青岛科技大学学报: 自然科学版, 2018, 39(S1):64–67.
- Shi Yujiao, Wang Zhaobo. Interface and microstructure research on SBS compatibilized HDPE / WGRT thermoplastic elastomer[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2018, 39(S1):64–67.
- [16] Isayev A I, Huang K. Decrosslinking of crosslinked high-density polyethylene via ultrasonically aided single-screw extrusion[J]. Polymer Engineering & Science, 2014, 54(12):2 715–2 730.
- [17] 郭骏骏,晏华,包河彬,等. 衰减全反射红外光谱法的高密度聚乙烯自然老化特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(6):1 520–1 524.
- Guo Junjun, Yan Hua, Bao Hebin, et al. Attenuated total reflection infrared spectroscopy for degradation profile of high density polyethylene[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(06):1 520–1 524.
- [18] 王少波. 废轮胎胶粉的改性及应用[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2017.
- Wang Shaobo. Preparation and application of modified ground tire rubber[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017.
- [19] 汤琦,曹兰,宗成中. 丁基橡胶 / 聚丙烯热塑性硫化胶的结晶和动态力学性能研究[J]. 橡胶科技, 2019, 17(12):670–674.
- Tang Qi, Cao Lan, Zong Chengzhong. Crystallization and dynamic mechanical properties of butyl rubber / polypropylene thermoplastic vulcanizate[J]. Rubber Science and Technology, 2019, 17(12):670–674.