

EPDM/HDPE 热塑性动态硫化橡胶的性能调控：橡塑比与交联剂协同作用

王欣宇, 王树琳, 王选伦*

(重庆理工大学材料科学与工程学院, 重庆 400054)

摘要：采用动态硫化两步法挤出成型制备三元乙丙橡胶 (EPDM) / 高密度聚乙烯 (HDPE) 热塑性动态硫化橡胶 (TPV)，研究了不同橡塑比对 EPDM/HDPE 基 TPV 力学性能和微观形貌的影响，并分析了不同交联剂用量对 EPDM/HDPE 共混物加工性能的影响。结果表明：随着树脂含量的减少，TPV 的拉伸强度、断裂伸长率呈现明显降低趋势，在橡塑比为 60/40 时具有较优的力学性能，且在微观形貌上呈现明显的“海岛”结构，综合比较优于其他橡塑比。随着交联剂用量的增加，交联速率逐渐加快，过高的交联速率难以实现相反转和橡胶精细破碎的需求，在交联剂用量为 0.3 份时，交联速率适中，制得的 TPV 产物表面平整度良好，质地分布均匀。

关键词：动态硫化；热塑性动态硫化橡胶；橡塑比；交联剂；相反转

引用论文：王欣宇, 王树琳, 王选伦. EPDM/HDPE 热塑性动态硫化橡胶的性能调控：橡塑比与交联剂协同作用 [J]. 橡塑技术与装备, 2026, 52(6):38-42.

中图分类号：TQ330.46

文献标识码：B

文章编号：1009-797X(2026)06-0038-05

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.06.009

热塑性硫化橡胶 (TPV) 是一种具有橡胶特性和塑料加工特性的环保低碳复合材料。与传统硫化橡胶相比，其制备工艺简单、不需要专门的硫化、加工能耗低、污染小且边角料可以重复加工，与传统橡胶生产流程相比，其生产流程缩短 1/4，节约能耗 25%~70%，加工效率提高 10~20 倍，成本降低约 10%^[1]。

TPV 通常是以高含量橡胶为分散相，低含量树脂为连续相。想要成功制备出 TPV 的关键在于相反转，即高含量的橡胶从连续相转变为分散相^[2]。而为了完成共混过程中橡胶从连续相到分散相的转变，则需要一种特殊的技术——动态硫化技术^[3]。制备 TPV 的关键所在是动态硫化，主要是在树脂熔融共混的同时，也在进行橡胶相的交联，最终形成“海岛”结构。这种独特的微观结构让 TPV 同时拥有硫化橡胶的力学性能以及热塑性塑料的加工特性^[4]。

本文选用 EPDM 作为橡胶相，HDPE 作为树脂相，采用过氧化物硫化体系，硫化剂为双叔丁基过氧异丙基苯 (BIBP)，助硫化剂为三烯丙基异氰尿酸酯 (TAIC)。使用双螺杆挤出机动态硫化制备 EPDM/HDPE 基 TPV，探究了不同交联剂用量对加工扭矩的影响以及不同橡胶树脂比例对 TPV 拉伸性能和微观形

貌的影响。

1 实验部分

1.1 实验材料和实验配方

高密度聚乙烯，牌号 5 000 S，中国石化兰州石油化工有限公司；三元乙丙橡胶，牌号 3092PM，中石化三井有限公司；高密度聚乙烯接枝马来酸酐，牌号 W1H，厦门科艾斯塑料科技有限公司；BIBP、TAIC、抗氧剂均为市售。

表 1 EPDM/HDPE/HDPE-g-MAH 共混体系配方

样品编号	EPDM/份	HDPE/份	HDPE-g-MAH/份
1#	0	100	0
2#	50	50	3
3#	60	40	3
4#	70	30	3
5#	80	20	3
6#	100	0	0

注：以下试剂按 100 份 EPDM 计。BIBP:0.3 份、TAIC:0.5 份、抗氧剂:0.5 份。

1.2 实验设备及仪器

电热鼓风干燥箱，BPG-9070A，上海一恒

作者简介：王欣宇 (1999-)，男，在读硕士研究生，主要从事热塑性弹性体制备工艺与性能方面的研究。

* 为通讯作者

科学仪器有限公司；双螺杆挤出造粒机，TSE-30A/500-11-40，南京瑞亚弗斯特高聚物装备有限公司；可移动式平行双螺杆挤出平台，SJSP-20×25，哈尔滨哈普电气技术有限责任公司；高混机，SHR-10，江苏白熊有限公司；混炼式转矩流变仪，Mix-60，哈尔滨哈普电气技术有限责任公司；电子万能拉伸试验机，CMT-2503，珠海市三思泰捷电气设备有限公司；扫描电子显微镜（SEM），JCM-7000，日本电子株式会社。电子天平，LQ-6，瑞安市安特称重设备有限公司。

1.3 试样制备

先将 EPDM 与 HDPE 放入 60℃ 的电热恒温鼓风干燥箱中干燥 4 h，充分去除水分，再将干燥后的 EPDM 和 HDPE 按照实验配方比例加入到高混机中进行 1 min 的共混处理，使其充分混合均匀。把混合后的物料添加至双螺杆挤出机中进行挤出造粒操作。双螺杆挤出机的螺杆转速设为 150 r/min，各区温度设置从一区开始依次为：100℃，120℃，130℃，140℃，150℃，160℃，170℃，180℃，180℃，180℃。挤出造粒后所获的粒料再次放进温度为 60℃ 的电热恒温鼓风干燥箱内进行 4 h 的充分干燥。

按照配方，在干燥后的粒料中添加相容剂、交联剂、助交联剂等，再置于高混机内混合 1 min，使助剂在粒料里实现均匀分散。把混合后的物料添加至平行双螺杆挤出机中挤出片材，机头口模厚度为 2 mm。平行双螺杆挤出机的螺杆转速设为 120 r/min，各区温度设置从一区开始依次为：100℃，135℃，155℃，175℃，195℃，195℃，195℃。得到 EPDM/HDPE 基 TPV，将 TPV 置于皮带牵引机上进行冷却压制成型，在常温状态下冷却 24 h 以上。最后用裁刀把 TPV 裁剪成哑铃状样条，用来进行各项测试。

采用两步法制备 EPDM/HDPE 基 TPV：首先将 EPDM 与 HDPE 共混挤出造粒制得母料；随后向母料中加入硫化剂、硫化助剂及相容剂等，最终制备出 TPV。该制备工艺如图 1 所示。

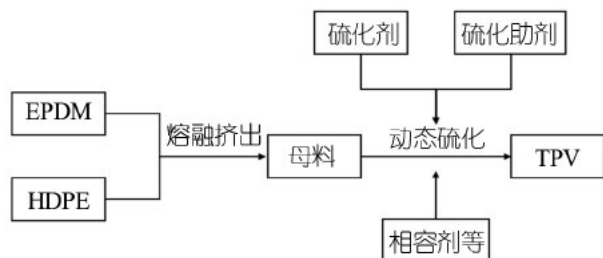


图 1 EPDM/HDPE 基 TPV 的制备工艺图

1.4 分析与测试

(1) 转矩流变扭矩的测定

称取 40 g 母料按配方混合均匀后加入到转矩流变仪中压实，加工温度维持在 195℃，转矩流变仪转速设为 120 r/min，加工时间 3 min，完成后得到转矩-时间曲线。

(2) 拉伸性能测试

利用万能拉伸试验机拉伸测试，其中拉伸区域宽度确定为 6 mm，原始标距长度定为 40 mm，试样厚度把控在 2 mm，拉伸速率设为 50 mm/min，在每组样品中裁剪 5 个样条进行拉伸测试，取平均值，得到拉伸强度、断裂伸长率。

(3) 扫描电子显微镜测试（SEM）

先将 TPV 样条放入液氮中进行低温浸泡，持续冷冻 10 min 后实施脆性断裂，随后对断裂表面进行喷金处理，最后将经喷金处理的样品置于扫描电子显微镜内进行微观形貌观察。

2 结果与讨论

2.1 加工扭矩

交联剂 BIBP 的分解动力学对动态硫化进程有着关键影响，它的用量直接决定了 EPDM 相的硫化程度以及分散相尺寸分布情况，助交联剂 TAIC 可促进自由基交联反应效率，改善交联网络的均匀性，此次实验运用转矩流变仪对共混体系的扭矩演变进行实时监测，借助最大扭矩来表征交联密度的发展以及相态结构的演变，利用最低扭矩反映熔体的流动性和熔体表观黏度，凭借扭矩差指示动态硫化反应的程度和强度。

交联剂 BIBP 的用量对 EPDM 的交联动力学行为具有显著调控作用，并由此影响 EPDM/HDPE 共混体系的加工流变特性。本研究首先固定橡塑比为 60/40，探究了 0.1 份、0.3 份、0.5 份、0.7 份及 1.0 份五个梯度 BIBP 用量条件下，EPDM/HDPE 共混物在交联过程中的扭矩变化，如图 2 和表 2 所示。

表 2 不同 BIBP 添加量下 EPDM/HDPE 共混物的加工扭矩

样品名称	$M_H/N \cdot m$	$M_L/N \cdot m$	$M_H - M_L/N \cdot m$
TPO	25	17	8
TPV-0.1	27	24	3
TPV-0.3	45	25	12
TPV-0.5	45	25	20
TPV-0.7	45	26	19
TPV-1.0	46	27	19

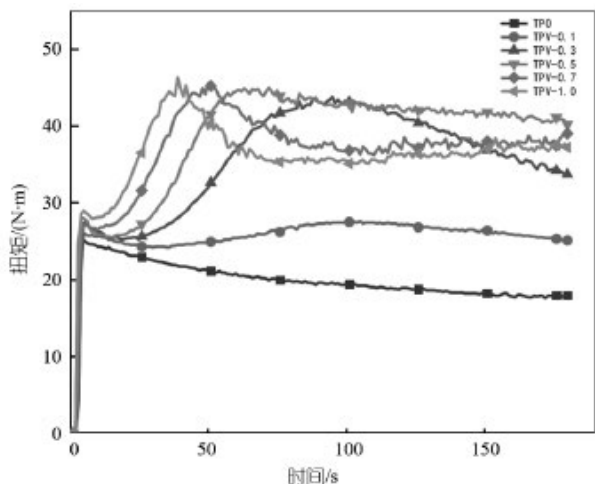


图2 不同 BIBP 用量对 EPDM/HDPE 共混物扭矩 - 时间曲线的影响

当 BIBP 添加量为 0.1 份时, EPDM/HDPE 共混体系的扭矩 - 时间曲线未有较大变化, 这说明在此条件下交联反应对材料加工扭矩的调控作用较为有限。通过动态硫化过程的深入分析发现, 在微量 BIBP 作用下, EPDM 颗粒发生交联反应并经受剪切作用, 导致其最小扭矩较 TPO 样品降低了 $7 \text{ N}\cdot\text{m}$ 左右; 同时观察到最大扭矩在 80 s 时达到 $27 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。当 BIBP 添加量增加到 0.3 份时, 在 85 s 时达到 M_H , 大小为 $45 \text{ N}\cdot\text{m}$, 且在此之前, 曲线上升平缓。这表明在 BIBP 0.3 份添加量下, 交联反应与剪切作用达到较好平衡, EPDM 颗粒能够在 HDPE 基体中得到较好的分散和包覆, 使共混物的加工性能和力学性能得到优化。当 BIBP 添加量提升到 0.5 份的时候, 体系的最大扭矩出现时间提前到 70 s, 其数值增加到 $45 \text{ N}\cdot\text{m}$, 这一现象证明 EPDM/HDPE 共混体系的交联行为对引发剂浓度有依赖性: 随着 BIBP 用量的增加, 其热分解产生的自由基浓度上升, 使得交联反应动力学提高, 具体表现为扭矩 - 时间曲线斜率增大以及体系黏度提升, 这直接致使加工过程中扭矩测量值升高。当 BIBP 添加量增加到 0.7 份和 1.0 份时, M_H 出现时间分别提前到 50 s 和 40 s, 并且稳定在 $46 \text{ N}\cdot\text{m}$ 水平, 过高的引发剂浓度引发交联反应速率过快, 导致 EPDM 相形成过大的交联网络结构, 这种结构在熔融共混过程中难以被 HDPE 基体充分浸润和包覆, 在强剪切场作用下发生破碎, 最终形成分散不均的相态结构。这种不理想的形态演变导致共混物加工性能变差, 还使得最终产物呈现粉末状形貌, 这与热塑性弹性体实际应用中所需的微观结构完整性和宏观性能要求存在明显偏差。当

BIBP 含量从 0.1 份增加到 1.0 份时, 共混体系的最高扭矩从 $27 \text{ N}\cdot\text{m}$ 提升至 $46 \text{ N}\cdot\text{m}$, 而达到 M_H 的时间从 80 s 缩短至 40 s, 说明交联速率有非线性增长特性。这一现象与 BIBP 热分解产生的自由基浓度直接相关, 即自由基浓度升高加速 EPDM 交联网络的形成, 但过量自由基会引发交联速率失控, 导致相态重构滞后于剪切破碎过程。

从图 3 中可观察到, 不同 BIBP 含量下 EPDM/HDPE 基 TPV 产物外观呈现差异。BIBP 添加量为 0.3 份时, 产物表面相对平滑, 质地较为均匀, 这表明此时交联速率与剪切速率匹配良好, 橡胶相在动态硫化过程中实现了适度交联与精细破碎, 相态反转顺利进行, 使得材料微观结构较为精细, 宏观上呈现出均匀规整的外观。当 BIBP 含量增加到 0.5 份时, 产物表面变得粗糙, 能观察到结构的不均匀性有所增加。这是由于 BIBP 添加量增多, 交联速率加快, 橡胶相交联速度超过了剪切破碎速度, 部分橡胶相来不及充分分散和共混就发生交联, 导致结构变得粗糙, 在一定程度上影响了材料相态分布的均匀性。BIBP 含量为 0.7 份时, 产物的粗糙程度进一步加剧, 可能存在局部过度交联的情况。过高的 BIBP 含量使得 EPDM 橡胶交联反应迅速, 体系内交联点过多, 不仅造成橡胶相破碎困难, 还可能引发 EPDM 过硫化, 影响材料的物理机械性能, 同时 BIBP 残留问题也会更加突出。合适的 BIBP 含量对 EPDM/HDPE 基 TPV 的微观结构和宏观性能起着关键作用, 综合来看 BIBP 含量在 0.3 份时更有利于获得结构均匀、性能良好的 TPV 材料。

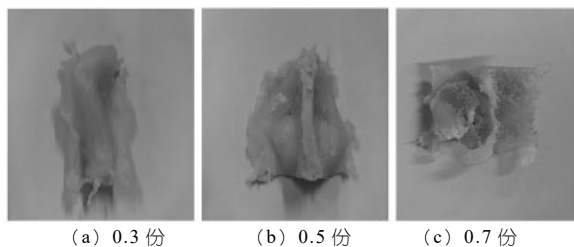


图3 不同 BIBP 含量下 EPDM/HDPE 基 TPV 的宏观形貌

2.2 拉伸性能

图 4 展示了纯 EPDM, 纯 HDPE 以及不同橡塑比 TPV 的力学性能。很明显能够发现随着树脂含量的减少, TPV 的拉伸强度、断裂伸长率均逐渐减小。出现这种情况的原因在于, HDPE 作为塑料相, 有较高的结晶度以及分子间作用力, 可为材料提供良好的力学支撑。而 EPDM 作为橡胶相, 其分子链有较好的柔性,

不过力学强度相对而言较低，在共混物当中，HDPE 作为连续相是整个 TPV 的主要受力部分，随着 EPDM 含量增加也就是 HDPE 含量减少，体系里 HDPE 的连续相逐渐被 EPDM 的分散相所替代，致使材料的整体力学强度出现下降。EPDM 的加入有可能在一定程度上削弱 HDPE 分子链之间的相互作用，让材料在拉伸过程中更易于发生变形以及断裂。在动态硫化过程中，更高的塑料相含量可能导致熔体黏度更高、流动性较差，以及导致 TPV 的硬度过大，表现得更像一种增韧塑料，而不是一种弹性体。同时相比于 EPDM/HDPE 比例为 50/50 时，橡塑比 60/40 和 70/30 更易实现相反转，形成明显的“海岛”结构，以达到更加优异的综合性能。在橡塑比为 60/40 时，EPDM/HDPE 的抗拉强度达到了 14.51 MPa，断裂伸长率为 678.42%，在力学性能上略优于橡塑比 70/30 的 TPV。当橡塑比达到 80/20 时，体系内橡胶含量过高，黏度较大，塑料相含量的减少导致交联网络支撑作用减弱，同时橡胶相分散性变差且相界面结合力下降，使 TPV 在拉伸时易断裂，断裂伸长率降低。

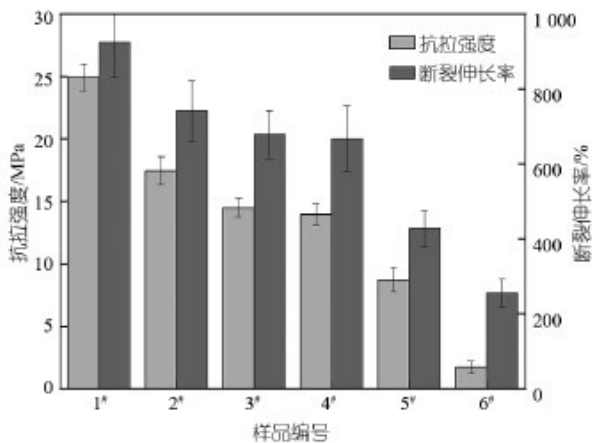


图 4 不同 EPDM/HDPE 比例的 TPV 抗拉强度和断裂伸长率

2.3 脆断微观形貌分析

在橡塑共混体系中，橡塑比对热塑性动态硫化橡胶的微观形貌演变具有关键调控作用。图 5 所示的四组 TPV 脆断断面形貌表明，不同橡塑比会显著改变两相结构、界面结合状态，最终在脆断断面形貌中呈现明显差异。图中白色部分为剪切破碎以及交联后的 EPDM 分散相，黑色为 HDPE 连续相。随着 TPV 中树脂相的含量提高，橡胶粒子的尺寸明显降低。当橡塑比为 80/20 和 70/30 时，橡胶粒子尺寸相对较大且

分布存在一定差异；橡塑比为 50/50 时，EPDM 和 HDPE 两相呈现出接近共连续相，难以形成“海岛”结构；而当橡塑比为 60/40 时，相较于其他橡塑比，橡胶粒子尺寸更为均匀，在 HDPE 基体中的分散状态也更均匀，无明显团聚或尺寸突变现象，“海岛”结构中“岛”的分布更为规整，体现出在该橡塑比下 EPDM 分散相在 HDPE 连续相中的分散效果更优。

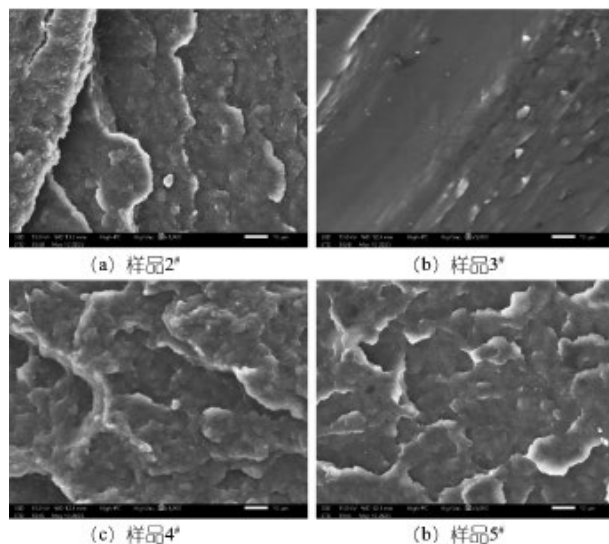


图 5 不同橡塑比的 EPDM/HDPE 基 TPV 脆断微观形貌

3 结论

采用双螺杆挤出机动态硫化制备 EPDM/HDPE 基 TPV，研究了 TPV 的加工扭矩、拉伸性能、脆断微观形貌。结果表明：

(1) 对不同交联剂 BIBP 用量下 EPDM/HDPE 共混物的扭矩变化曲线以及宏观形貌分析发现，当 BIBP 添加量为 0.3% (质量分数) 时，共混物扭矩曲线上升平缓，交联速率适中，得到的 TPV 产物表面平整度良好，质地分布均匀。

(2) 对不同 EPDM/HDPE 比例下 TPV 进行拉伸性能测试发现，随着树脂相含量的降低，TPV 的拉伸强度、断裂伸长率呈现明显降低趋势。在橡塑比为 60/40 时抗拉强度达 14.51 MPa、断裂伸长率达 678.42%，具有较好的力学性能。

(3) 对不同橡塑比下 EPDM/HDPE 基 TPV 进行脆断微观形貌分析发现，四组橡塑比呈现出不同的两相结构，橡塑比在 60/40 时形成典型的“海岛”结构，且橡胶微粒粒径尺寸较小，分散较为均匀，具有良好的微观形貌。

参考文献：

[1] 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(02):24-32+15.
[2] 高文通, 张奕磊, 陈韶, 等. 动态硫化技术在热塑性弹性体中的应用 [J]. 特种橡胶制品, 2022,43(06):79-84.

[3] 孙文源, 刘彦驹. 动态硫化技术及其发展 [J]. 弹性体, 1991(04): 56-61.
[4] 李尚清. 聚烯烃热塑性硫化橡胶的微相结构与性能调控及流变行为研究 [D]. 北京化工大学, 2021.

Performance tuning of EPDM/HDPE thermoplastic dynamic vulcanizate: synergistic effect of rubber-plastic ratio and crosslinking agent

Wang Xinyu, Wang Shulin, Wang Xuanlun*

(Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: This paper employs a dynamic vulcanization two-step extrusion process to prepare ethylene propylene diene monomer (EPDM)/high-density polyethylene (HDPE) thermoplastic vulcanizate (TPV). It investigates the influence of different rubber-plastic ratios on the mechanical properties and microstructure of EPDM/HDPE-based TPV, and analyzes the impact of varying amounts of crosslinking agents on the processing properties of EPDM/HDPE blends. The results indicate that as the resin content decreases, the tensile strength and elongation at break of the TPV show a significant decreasing trend. When the rubber-plastic ratio is 60/40, it exhibits superior mechanical properties and a distinct "sea-island" structure in its microstructure, which is superior to other rubber-plastic ratios upon comprehensive comparison. As the amount of crosslinking agent increases, the crosslinking rate gradually accelerates. However, an excessively high crosslinking rate makes it difficult to achieve the requirements of phase inversion and fine rubber crushing. When the amount of crosslinking agent is 0.3 parts, the crosslinking rate is moderate, resulting in a TPV product with good surface smoothness and uniform texture distribution.

Key words: dynamic vulcanization; thermoplastic dynamic vulcanized rubber; rubber-plastic ratio; crosslinking agent; phase inversion

(R-03)

再创佳绩！赛轮集团 MSCI ESG 评级提升至 AA 级

Achieving new heights! Sailun Group's MSCI ESG rating has been upgraded to AA level

近日，国际权威指数机构 MSCI（明晟）发布最新 ESG 评级结果，赛轮集团 ESG 评级从 A 级提升至 AA 级。这一重要进展使赛轮集团继续位居中国轮胎行业 MSCI ESG 评级榜首，成功跻身全球轮胎行业前列。

作为全球公认的可可持续发展评价体系，MSCI ESG 评级既是国际机构投资者投资决策的重要依据，更是衡量企业可持续发展水平与长期价值的权威标尺。赛轮集团自 2025 年评级跃升至 A 级后，此次再度跃升至 AA 级，标志着其在 ESG 治理、实践落地与价值转化等方面的综合实力获得了国际资本市场的高度认可。这一成绩的取得，源于赛轮集团始终坚守长期主义，将可持续发展理念深度融入全球化运营、研发创新、生产制造、劳工管理、供应链管理各个环节。

面向未来，赛轮集团将持续深入实施“eco+ 可持续发展战略”，发挥行业引领作用，助力全球轮胎行业迈向高质量、可持续发展的新阶段。

摘编自“赛轮集团”

(R-03)