

无增容少用量EPDM优化NR的力学性能和老化性能

崔海波¹, 王林艳^{1,2*}, 梁玉蓉¹, 林泽¹, 田文晟¹

(1. 太原工业学院, 山西 太原 030008; 2. 生物质绿色甲醇转化氢能利用厅市共建山西省重点实验室培育基地, 山西 太原 030008)

摘要: 采用无增容体系在常规硫化下制备天然橡胶(NR)/三元乙丙橡胶(EPDM)复合材料, 研究少量EPDM对NR力学性能和老化性能的影响, 并对复合材料界面相容性和分散状况进行表征。结果表明: m_{NR}/m_{EPDM} 为 90/10 时复合材料的力学性能最佳, 拉伸强度为 20.5 MPa, 撕裂强度为 22.58 N/mm。而老化性能在 m_{NR}/m_{EPDM} 为 85/15 时最佳, 拉伸强度保留率为 28%, 断裂伸长率保留率为 70%。随着 EPDM 添加量的增加, 复合材料的断面整体完整性和均匀性均有所改善, 在 m_{NR}/m_{EPDM} 为 80/20 时出现结构不连续的裂痕, 但复合材料经老化处理后相比纯 NR 还可保持完整的结构连续性。添加少量 EPDM 的复合材料玻璃化转变温度只有一个, 表明其界面相容性较好。动态机械性能研究表明, NR/EPDM 复合材料呈现 Payne 效应, m_{NR}/m_{EPDM} 为 90/10 时, 因两相界面结合紧密, 分子链协同承载最优。

关键词: 三元乙丙橡胶; 天然橡胶; 力学性能; 老化性能

中图分类号: TQ332.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0066-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.012

Optimization of Mechanical Properties and Aging Resistance of NR via Low-dosage EPDM without Compatibilizer

CUI Haibo¹, WANG Linyan^{1,2*}, LIANG Yurong¹, LIN Ze¹, TIAN Wensheng¹

(1. Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Biomass-based Green Methanol Conversion and Hydrogen Utilization, Taiyuan 030008, China)

Abstract: Natural rubber (NR)/ethylene propylene diene monomer rubber (EPDM) composites were prepared using a non-augmentation system under conventional vulcanization, and the effects of small amounts of EPDM on the mechanical and aging properties of NR were investigated. The interfacial compatibility and dispersion of the composites were also characterized. The results showed that the mechanical properties of the composites were optimal when the m_{NR}/m_{EPDM} was 90/10, with a tensile strength of 20.5 MPa and a tear strength of 22.58 N/mm. The aging properties were best when the m_{NR}/m_{EPDM} was 85/15, with a tensile strength retention rate of 28% and an elongation at break retention rate of 70%. As the amount of EPDM increased, the overall integrity and uniformity of the composite's fracture surface improved. Structural discontinuities appeared when the m_{NR}/m_{EPDM} was 80/20, but the composites maintained structural continuity after aging treatment compared to pure NR. The composites with a small amount of EPDM had only one glass transition temperature, indicating good interfacial compatibility. Dynamic mechanical properties showed that the NR/EPDM composites exhibited the Payne effect, and when the m_{NR}/m_{EPDM} was 90/10, the tight interfacial bonding and optimal synergistic load-bearing of the molecular chains were achieved.

Keywords: EPDM; NR; Mechanical properties; Aging resistance

收稿日期 Submitted date 2025-07-19; 修回日期 Revised date 2025-10-12; 录用日期 Accepted date 2025-11-28

基金项目: 太原工业学院第五届青年学科带头人资助项目(202307); 生物质绿色甲醇转化及氢能利用厅市共建山西省重点实验室培育基地开放课题资助项目(2025TITSKL05)

*联系人, wangly741@126.com

引用本文: 崔海波, 王林艳, 梁玉蓉, 等. 无增容少用量EPDM优化NR的力学性能和老化性能[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 66-70.

Citation: CUI H B, WANG L Y, LIANG Y R, et al. Optimization of mechanical properties and aging resistance of NR via low-dosage EPDM without compatibilizer[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 66-70.

天然橡胶(NR)分子链结构规整,分子量大且分布较宽,具有优异的物理机械性能和加工工艺性能。然而,由于其分子结构中含有大量双键以及双键上供电子基团的侧甲基,其化学活性较高,使其更易与自由基、氧、紫外线等发生反应,导致其耐热空气老化和耐臭氧性能较差^[1-5]。与NR相比,三元乙丙橡胶(EPDM)具有更高的饱和度,表现出优异的耐热空气老化性能、耐臭氧老化性能和耐屈挠性能^[6-10]。将NR与EPDM并用可在一定程度上提高NR复合材料的耐老化性能,但材料的力学性能会有所降低。近年来,已有研究人员从工艺和配方等方向研究改善两种橡胶并用后的性能^[11-17]。程安仁等^[18]采用传统热硫化与辐射硫化相结合的方法有效提高了并用胶的力学性能和老化性能,老化后力学性能保留率提高约30%。赵术英等^[19]研究发现,炭黑粒径较大时并用胶的耐热性较好,当NR和EPDM添加量比例为60:40时,耐老化性能最佳,但力学强度有所下降。石勇等^[20]采用 γ 射线辐射交联技术制备NR/EPDM并用胶,通过辐射交联在两相分子链间形成强化耦合结构,避免传统热硫化中促进剂迁移的问题,尤其在NR含量较高时,老化后性能下降程度可减少50%,显著提高并用胶的耐热老化性能。RAZAK等^[21]以马来酸酐接枝三元乙丙橡胶(EPDM-g-MAH)为增容剂,优化密炼工艺(温度、转速、时间),研究NR/EPDM并用胶的性能。结果表明,当增容剂添加量为10 phr,在140 °C下以60 r/min密炼10 min时,并用胶的拉伸强度提高30%,EPDM分散粒径从2.3 μm 细化至0.9 μm ,显著改善了界面相容性和力学性能。大多数研究表明,EPDM的加入虽能提升NR的耐老化性能,但会导致力学性能下降。目前,主要通过特定工艺或添加增容剂等方法来保留或提升NR的力学性能^[22-28]。

本文采用无增容体系,仅通过硫化体系的协同作用且亚乙基降冰片烯(ENB)含量略高于常规的EPDM改性NR,使复合材料达到良好的相容性,同时提升NR的力学性能和老化性能。本文重点考察不同配比的NR/EPDM复合材料的硫化性能、力学性能及老化性能,分析两相的相容性和分散状态,并研究其动态机械性能,旨在制备力学性能和老化性能优异的NR复合材料。

1 实验部分

1.1 主要原料

EPDM,吉化4045,ENB质量分数6.7%~8.7%,中国石油吉林石化分公司;NR,SVR CV60,越南VRC集团公司;氧化锌(质量分数99%)、硬脂酸(质量分数65%),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;促进剂DM,质量分数99.7%,河南荣欣鑫科技有限公司;升华硫黄,质量分数99.5%,天津市福晨化学试剂厂;防老剂4010NA(质量分数99%)、促进剂NS(质量分数98%),科迈化工股份有限公司。

1.2 仪器与设备

台式精密电子秤,YP10000,上海越平科学仪器有限

公司;双辊开炼机,BP-8175-AL \varnothing 150 \times L320,东莞宝品精密仪器有限公司;无转子硫化仪,M-3000A,高铁检测仪器有限公司;平板硫化机,BP-8170-A-50T,东莞市宝品精密仪器有限公司;拉力试验机,AI-7000M,高铁检测仪器有限公司(东莞)有限公司;差示扫描量热仪(DSC),HSC-2/3,北京恒久有限公司;邵氏硬度计,GT-601RSB,高铁检测仪器有限公司(东莞)有限公司;扫描电子显微镜(SEM),JSM-7200F,日本电子株式会社;橡胶加工分析仪(RPA),elite RPE2-0026,美国TA公司;老化试验箱,GT-7017-EMG,高铁检测仪器有限公司(东莞)有限公司。

1.3 样品制备

材料配方(以NR和EPDM总质量为100 phr计): $m_{\text{NR}}/m_{\text{EPDM}}$ 为100/0、95/5、90/10、85/15、80/20;促进剂NS 1.5 phr;促进剂DM 1.5 phr;防老剂4010NA 1.0 phr;氧化锌 5.0 phr;硬脂酸 2.0 phr;硫黄 1.5 phr。

采用双辊开炼机将NR和EPDM按比例进行塑炼混合,工作温度(23 \pm 5) °C,调节辊筒的间距,按顺序分段加入促进剂、防老剂、氧化锌、硬脂酸和硫黄,保证混合均匀。然后将胶料采用三角包薄通工艺处理5~6次,以确保其充分混合。混炼完成后,将胶料静置至少2 h,待性能稳定后测定正硫化时间,最后使用平板硫化机制得复合材料。

1.4 性能测试与表征

硫化特性测试:将复合材料裁取3~5 g左右,利用无转子硫化仪进行测试。硫化温度160 °C,硫化时间1 h,硫化压力15 MPa。

力学性能测试:利用标准哑铃形和直角形裁刀制备拉伸和撕裂样条,按照GB/T 528—2009和GB/T 529—2008进行拉伸测试。拉伸试样尺寸115 mm \times 6 mm \times 2 mm,标点距离为25 mm;撕裂试样尺寸175 mm \times 25 mm \times 2 mm。两种试样均采用500 mm/min的拉伸速率。

硬度测试:将试样叠加3层,厚度达到6 mm以上,按照GB/T 531.1—2008进行测试。

老化性能测试:将同一混炼胶制备的拉伸和撕裂试样在老化箱中110 °C、24 h的条件下处理后测试,比较老化前后的性能差别。

DSC测试:利用差示扫描量热仪测定样品的玻璃化转变温度(T_g)来表征相容性。将3~5 mg的试样从-70 °C以5 °C/min的速率升温至70 °C。

SEM测试:将拉伸断裂的试样裁取断面进行喷金处理后,利用SEM进行形貌观察。

动态机械性能测试:利用橡胶加工分析仪对试样进行动态振幅扫描,在60 °C下,扫描频率0.1 Hz,应变区域1%~1 000%。

2 结果与讨论

2.1 NR/EPDM复合材料的硫化性能分析

表1为NR/EPDM复合材料的硫化性能。其中:ML为最小扭矩,表示胶料未交联的黏度和加工流动性;MH为最

大扭矩,表示硫化胶交联密度的上限;而 ΔM 是两个扭矩的差值,可评估硫化胶的交联程度; t_{c90} 为正硫化时间,决定温度 and 时间的匹配程度,保证材料的性能达标。

表1 NR/EPDM复合材料的硫化性能

Tab.1 Vulcanization properties of NR/EPDM composites

m_{NR}/m_{EPDM}	ML/(dN·m)	MH/(dN·m)	ΔM /(dN·m)	t_{c90}/s
100/0	0.21	8.85	8.64	547
95/5	0.29	8.78	8.49	463
90/10	0.26	8.52	8.26	492
85/15	0.43	8.26	7.83	544
80/20	0.48	8.16	7.68	581

从表1可以看出,随着EPDM添加量的增加,材料的ML整体增大,MH和 ΔM 均依次减小,表示交联密度依次降低; t_{c90} 先因少量EPDM促使硫化体系在NR相富集而缩短,后随EPDM用量增加,逐步延长并略超纯NR,硫化速率变慢。原因是该硫化体系采用促进剂NS和促进剂DM按1:1比例的协同作用,既避免EPDM硫化效率低的问题,又防止NR的过早交联。此外,EPDM主体分子链呈饱和状态,其分子链刚性和门尼黏度均高于NR。当EPDM添加量较小时,以分散相形式存在于NR基体中,随着EPDM添加量增加,ML逐渐增大。同时,会稀释可参与交联的NR比例,导致MH减小。本文采用的是高ENB含

表2 NR/EPDM复合材料的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of NR/EPDM composites

m_{NR}/m_{EPDM}	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	100%定伸应力/MPa	300%定伸应力/MPa	撕裂强度/(N·mm ⁻¹)	邵A硬度
100/0	16.6	687	0.70	1.57	20.32	46
95/5	20.3	668	0.72	1.83	20.72	49
90/10	20.5	674	0.69	1.77	22.58	53
85/15	17.3	661	0.73	1.78	20.68	54
80/20	15.4	658	0.76	1.80	20.57	56

表3为NR/EPDM复合材料的老化性能。从表3可以看出,随着EPDM添加量的增加,各项性能指标总体呈现先升后降的趋势,且在EPDM添加量为15 phr时达到最佳值。与NR相比,拉伸强度保留率提高120%,断裂伸长率保留率提高79%,撕裂强度保留率提高100%。这表明EPDM的加入显著增强NR材料的耐老化性能。主要是因

表3 NR/EPDM复合材料的老化性能

Tab.3 Aging resistance of NR/EPDM composites

m_{NR}/m_{EPDM}	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	撕裂强度/(N·mm ⁻¹)	拉伸强度保留率/%	断裂伸长率保留率/%	撕裂强度保留率/%
100/0	2.1	268	1.52	13	39	7
95/5	3.5	398	1.92	17	60	9
90/10	4.0	380	2.35	19	56	10
85/15	4.9	463	2.94	28	70	14
80/20	4.3	345	2.23	28	52	11

3种性能的不同变化趋势源于其对裂纹和网络破坏的敏感性差异。撕裂强度对裂纹和网络破坏的连续性最为

量的EPDM,在添加量为5 phr时,其不仅作为分散相增大NR分子间距,使硫黄和促进剂快速均匀分散,其第三单体双键还可参与反应,增加界面交联点,加快硫化速度,使 t_{c90} 缩短,同时减小MH的降低幅度。然而,随着EPDM添加量的进一步增加,分散相占比增大,对硫黄和促进剂的分散产生屏蔽作用,且稀释效应增强,减少硫化体系与NR分子链的接触机会,硫化效率降低,从而延长硫化时间。

2.2 NR/EPDM复合材料的机械和老化性能分析

表2为NR/EPDM复合材料的力学性能。从表2可以看出,当EPDM添加量为10 phr时,复合材料的拉伸强度达到最高值20.5 MPa,较纯NR提高23%。同时,撕裂强度和硬度均有所提高,而断裂伸长率有所降低。这是因为在硫化过程中,两种橡胶的界面交联程度得到提升。尽管整体硫化交联密度有所降低,但降幅较小。此时,EPDM作为分散相,其应力分散效应成为主要影响因素,导致拉伸强度增大。然而,当EPDM添加量进一步增加时,容易发生团聚,导致应力集中,从而使拉伸强度下降。EPDM分子链的柔顺性略低于NR,且交联密度的降低使断裂伸长率逐渐下降,但降幅较小。对于硬度而言,EPDM本身的硬度高于NR,且在硫化过程中硫化较为均匀,因此硬度逐步提升。此外,EPDM作为分散相,可以阻止撕裂裂纹的扩展,提高撕裂强度,但由于其用量较少,提升幅度有限。

为老化前力学性能主要受EPDM的分散性、界面交联程度影响;老化后EPDM的饱和主链可屏蔽氧气与NR分子链的接触,减少NR双键被氧化破坏。在均匀分散的前提下,EPDM添加量越多,防护效果越好。EPDM还可作为颗粒支撑点,分布在已老化断裂的NR分子链间,维持网络结构的连续性,从而减少力学性能的下降。

敏感,保留率最低;拉伸强度依赖整个网络的应力传递,保留率较高;断裂伸长率则依赖分子链的滑移能力和空间结

构,在老化后,尽管部分分子链断裂,但EPDM支撑点的存在不会限制分子链的运动,因此保持率较高。

2.3 NR/EPDM复合材料的微观形貌和相容性分析

图1为NR/EPDM复合材料老化前后的SEM照片。从图1可以看出,随着EPDM添加量的增加,复合材料的整体连续性和均匀性均逐渐改善,表明复合材料的相容性较好。当 m_{NR}/m_{EPDM} 为80/20时,由于结构的不连续性,出现了细微裂痕(白色圈内)。老化后,纯NR材料中出现大量裂痕,性能显著下降;而加入EPDM后,尽管也出现了沟壑和断裂痕迹,但整体结构仍保持完整连续。在90/10样品表面还存在一些孔洞,这可能是85/15样品在老化后力学性能保留率高于90/10样品的原因。相比之下,80/20样品形貌类似片层,存在团聚和脱落现象,这也说明其性能相对较差。

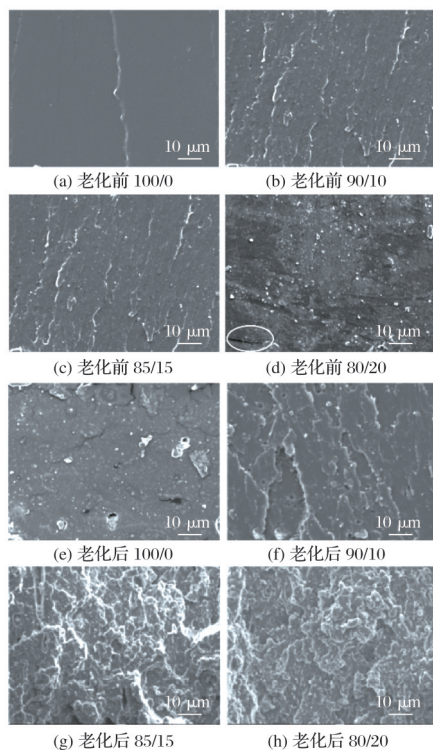


图1 NR/EPDM复合材料老化前后的SEM照片(500×)

Fig.1 SEM images of NR/EPDM composites before and after aging (500×)

图2为NR/EPDM复合材料的DSC曲线。从图2可以看出,当EPDM添加量为20 phr时,NR/EPDM复合材料的 t_g 从NR的-58.73 °C偏移至-58.01 °C,而且曲线中只出现一个相转变,说明复合材料在该配方体系下的相容性较好。进一步增加EPDM的添加量,复合材料的 t_g 提高,除EPDM本身的 t_g 高于NR外,还因NR分子链间的作用力增大,限制分子链的运动能力,从而使复合材料的 t_g 提高。在 m_{NR}/m_{EPDM} 为90/10时, t_g 数值适中,既保证分子链的一定刚性,又保留相对的运动能力,因此该比例下的并用胶拉伸强度和撕裂强度最高。而在 m_{NR}/m_{EPDM} 为85/15时, t_g 较高,分子链运动能力减弱,这在老化过程中增加NR分子链

被氧气攻击的难度,从而提高力学性能保留率。相比之下, m_{NR}/m_{EPDM} 为80/20时的EPDM容易发生团聚,导致整体性能下降。

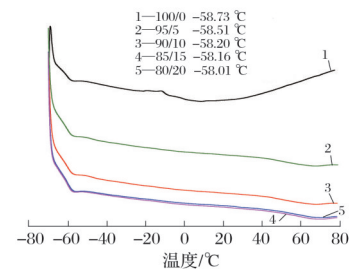
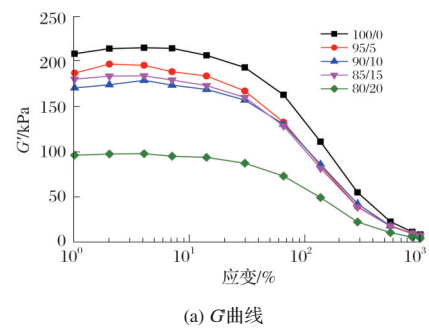


图2 NR/EPDM复合材料的DSC曲线

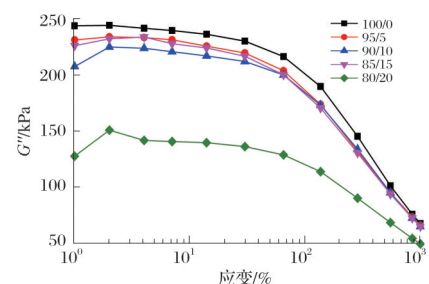
Fig.2 DSC curves of NR/EPDM composites

2.4 NR/EPDM复合材料的动态机械性能分析

储能模量(G')反映材料的弹性,即网络稳定性和抵抗变形的能力;损耗模量(G'')则反映材料内部的分散性及摩擦损耗能量。图3为NR/EPDM复合材料的 G' 和 G'' 曲线。从图3可以看出,不同配比的NR/EPDM复合材料 G' 和 G'' 变化趋势一致,均表现出Payne效应,低应变时模量较高且变化平缓稳定,而随着应变增大,模量显著下降。其中,纯NR的初始模量最高且下降幅度最大; m_{NR}/m_{EPDM} 为95/5、90/10和85/15的复合材料次之,三者变化趋势接近,但相比纯NR更为缓慢; m_{NR}/m_{EPDM} 为80/20的复合材料模量最低。



(a) G' 曲线



(b) G'' 曲线

图3 NR/EPDM复合材料的 G' 和 G'' 曲线

Fig.3 G' and G'' curves of NR/EPDM composites

从图3a可以看出,纯NR的交联程度较高,结构紧密,低应变下分子链形成规整的缠结网络,高应变下网络破坏较快,Payne效应显著。加入EPDM后,EPDM作为分散相起到稀释作用,使复合材料结构变松散,曲线整体下移;同

时EPDM又作为支撑点,减缓结构的破坏速度,因此曲线下降较慢。

从图3b可以看出,纯NR结构紧密,受力时分子链间接触面积大,摩擦损耗大且速率快;EPDM的加入稀释了NR的紧密结构,使分子链间接触面积适中,摩擦损耗变化更为稳定。综合两图, m_{NR}/m_{EPDM} 为90/10的复合材料曲线变化相对较小,表明该比例下NR与EPDM分子链协同承载外力的能力最优,力学性能表现最佳。 m_{NR}/m_{EPDM} 为85/15的复合材料模量变化略高于 m_{NR}/m_{EPDM} 为90/10的复合材料,但结合老化性能结果, m_{NR}/m_{EPDM} 为90/10时,体系结构稳定性和界面相容性达到均衡优化。而 m_{NR}/m_{EPDM} 为80/20的复合材料由于EPDM团聚,模量差值较大且变化较快,反映出其力学性能和老化性能的不足。

3 结论

本文采用无增容常规硫化体系,以促进剂NS和促进剂DM作协同,利用高ENB含量的EPDM实现NR/EPDM复合材料的共同硫化,使复合材料达到良好的相容性,同时提升NR的力学性能和老化性能。在 m_{NR}/m_{EPDM} 为90/10时,NR/EPDM复合材料力学性能最好;而 m_{NR}/m_{EPDM} 为85/15时,复合材料的老化性能最好,拉伸强度保留率为28%,断裂伸长率保留率为70%,撕裂强度保留率为7%。随着EPDM添加量的增加,EPDM的饱和分子链不仅限制NR分子链的运动,还作为分散相的支撑点,稳定了被稀释的内部结构。因此, t_g 逐渐提高,且变化幅度较小, G' 和 G'' 的下降相对纯NR更为缓慢,形貌结构也表现出更好的完整性和连续性。

参考文献

- [1] 马涛.天然橡胶纳米复合材料的研究进展[J].橡塑资源利用,2024(5):1-6.
- [2] 侯朝阳,续富琴,赵星辰.不同混炼工艺对天然橡胶/顺丁橡胶并用胶性能的影响[J].特种橡胶制品,2025,46(6):23-27.
- [3] 程帅帅,程华涛,段晓圆.氧化石墨烯负载硫化体系制备高性能天然橡胶复合材料[J].功能材料,2025,56(9):9229-9236.
- [4] 徐心茹,田雅娟,蒋鑫磊.PA66纤维的改性处理及其对天然橡胶/PA66纤维复合材料界面黏合性能的影响[J].塑料科技,2025(12):56-60.
- [5] 赵涛,邓大雨,王洪振,等.碱性蛋白酶凝固天然胶乳对天然橡胶结构和性能的影响[J].橡胶工业,2025,72(8):572-579.
- [6] 李志程,邓涛.EPDM并用量对CR/EPDM共混胶交联网络状态及力学性能的影响[J].化学研究,2025,36(6):619-625.
- [7] 王凡,刘卫东,宋芳,等.促进剂对三元乙丙橡胶胶料性能的影响[J].橡胶工业,2025,72(8):586-590.
- [8] SURYA I, MUNIYADI M, ISMAIL H. A review on clay-reinforced ethylene propylene diene terpolymer composites[J]. Polymer Composites, 2021, 42(4): 1698-1711.
- [9] 王欣欣,何成,赵普志,等.硫化体系对三元乙丙橡胶耐湿热老化性能的影响[J].塑料科技,2024,52(12):51-55.
- [10] 庄凌志,何成,杨柱石.耐低温三元乙丙橡胶的制备及其性能研究[J].塑料科技,2023,51(10):48-52.
- [11] YANG D J, FENG H, WANG J B, et al. Effect of ethylene content on

the electrical and mechanical properties of ethylene propylene diene monomer cable[J]. Journal of Materials Science, 2025, 60(45): 23109-23119.

- [12] 程安仁,陆永俊,矫阳,等.三元乙丙橡胶/天然橡胶共混胶的硫化剂用量与辐射吸收剂量优化[J].合成橡胶工业,2023,46(4):316-319.
- [13] 王恒,钱坤,柯玉超,等.天然橡胶/三元乙丙橡胶合金弹性体的共硫化及耐热老化性能[J].合成橡胶工业,2021,44(4):294-299.
- [14] 赵静存,金永日,王鑫,等.甲基烯基苯基硅橡胶/三元乙丙橡胶并用胶的制备及性能研究[J].高速铁路新材料,2023,2(5):23-25.
- [15] KUMAR S P, PRABHAKARAN G, VISHVANATHPERUMAL S, et al. Hybrid reinforcement of NR/EPDM blends using graphene oxide and halloysite nanotubes via mechanical blending[J]. Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, 2025, 35(8): 6893-6917.
- [16] 戴艺,孙菲,梁桐桐,等.混炼工艺对三元乙丙橡胶/天然橡胶并用的影响[J].弹性体,2025,35(2):50-54.
- [17] 马文斌,刘伟,肖建斌.天然橡胶/三元乙丙橡胶并用胶性能的研究[J].橡胶工业,2017,64(8):466-470.
- [18] 程安仁,杨洪军,李思源,等.不同硫化工艺对EPDM/NR并用胶性能的影响[J].特种橡胶制品,2023,44(2):42-45.
- [19] 赵术英,纪金权.NR/EPDM并用胶性能研究[J].中国橡胶,2020,36(11):55-58.
- [20] 石勇,程安仁,代培,等.天然橡胶/三元乙丙橡胶并用胶辐射交联制备及其耐热空气老化性能[J].辐射研究与辐射工艺学报,2024,42(3):55-62.
- [21] RAZAK J A, AHMAD S H, RATNAM C T, et al. Effects of EPDM-g-MAH compatibilizer and internal mixer processing parameters on the properties of NR/EPDM blends: An analysis using response surface methodology[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(27): 42199.
- [22] 江羿锋.天然橡胶/三元乙丙橡胶并用胶性能及改进研究[J].当代化工研究,2018(2):78-79.
- [23] 杨绪迎.超高相对分子质量三元乙丙橡胶与天然橡胶并用胶的疲劳和动态性能[J].世界橡胶工业,2016,43(6):30-35.
- [24] SUNDARAVADIVEL G, VENKATARAMAN S R, VISHVANATHPERUMAL S, et al. Influence of APTES modified HNTs on properties of NR/EPDM nanocomposites[J]. Silicon, 2023, 15(15): 6715-6727.
- [25] KUMAR S P, PRABHAKARAN G, VISHVANATHPERUMAL S. Influence of modified nanosilica on the performance of NR/EPDM blends: Cure characteristics, mechanical properties and swelling resistance[J]. Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, 2024, 34(8): 3420-3442.
- [26] WU F S, JIN Y Z, YAN L, et al. Performance enhancement of natural rubber and ethylene propylene diene monomer composites by incorporating HCNFs[J]. Materials Today Communications, 2025, 42: 111506.
- [27] PIANESE G, MILANI G, MILANI F. Prediction of the optimal vulcanization of a fiber-reinforced elastomeric isolator made of natural rubber-ethylene propylene diene monomer blend[J]. Polymer Engineering & Science, 2023, 63(8): 2421-2443.
- [28] BADR M M, ABDEL-RAOUF M E, ABDELAZIZ A I, et al. Preparation and properties of montmorillonite incorporated natural rubber/ethylene propylene diene monomer rubber blends[J]. Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology, 2024, 40(4): 430-444.