

• 研究论文 •

液体聚丁二烯微观结构对丁苯橡胶性能的影响

孙庆刚¹ 马德龙¹ 李云峰¹ 王 茜² 王洪奎³ 杨振林¹ 张保宁¹ 孙 宇^{2*}

(¹山东阳谷华泰化工股份有限公司 阳谷 252300)

(²青岛科技大学高分子科学与工程学院 青岛 266042)

(³山东华泰新材料技术研发有限公司 阳谷 252300)

摘要: 系统考察了液体聚丁二烯 (LPB) 分子量及微观结构对丁苯橡胶性能的影响。采用核磁共振 (NMR) 与凝胶渗透色谱 (GPC) 对 LPB 的微观结构和分子量进行表征, 并通过对比环保芳烃油 (TDAE), 研究 LPB 在丁苯橡胶中的应用效果。结果表明, LPB 作为加工助剂可有效降低混炼胶门尼黏度并改善填料分散, 表现出优异的增塑性能。LPB 的引入延长了混炼胶焦烧时间和硫化时间, 但因其部分双键参与交联, 导致橡胶交联密度下降, 使硫化胶拉伸强度和定伸应力略低于 TDAE 体系, 通过增加硫磺用量可提升其定伸应力与拉伸强度。与 TDAE 油相比, LPB 赋予硫化胶更优异的耐磨性能, 并降低材料在 60 °C 处的 $\tan\delta$ 值, 有利于改善其滚动阻力。LPB 同时会降低 0 °C 处的 $\tan\delta$ 值, 削弱材料抗湿滑性能, 但通过提高 LPB 中 1,2- 结构单元含量, 能够提升 0 °C 处的 $\tan\delta$ 值, 而不影响 60 °C 处 $\tan\delta$ 值。此外, 提高含 LPB 硫化胶的交联密度, 能够进一步降低 60 °C 处 $\tan\delta$ 值。最后, 本研究发现在液体橡胶 3000~7000 g/mol 分子量范围内, 在包含 LPB 的硫化胶中, 调整 LPB 的分子量和 1,2- 单元含量对材料加工性能、填料分散、硫化特性及耐磨性能影响并不显著。

关键词: 液体聚丁二烯; 丁苯橡胶; 微观结构; 加工助剂

The Effect of the Microstructure of Liquid Polybutadiene on the Properties of Styrene-butadiene Rubber

SUN Qing-gang¹, MA De-long¹, LI Yun-feng¹, WANG Qian², WANG Hong-kui³,
YANG Zhen-lin¹, ZHANG Bao-ning¹, SUN Yu^{2*}

(¹Shandong Yanggu Huatai Chemical Co., Ltd., Yanggu 252300)

(²Key Laboratory of Rubber-Plastics, Ministry of Education, School of Polymer Science and Engineering,
Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042)

(³Shandong Huatai New Material Technology Research and Development Co., Ltd., Yanggu 252300)

Abstract: Systematically investigated the influence of molecular weight and microstructure of liquid polybutadiene (LPB) on the properties of styrene-butadiene rubber (SBR). The microstructure and molecular weight of LPB were characterized by nuclear magnetic resonance (NMR) and gel permeation chromatography (GPC). The performance of LPB as a processing aid was compared with that of treated distillate aromatic extract (TDAE) oil. The results showed that LPB effectively reduced Mooney viscosity and improved filler dispersion in compound, demonstrating excellent plasticizing ability. The incorporation of LPB prolonged scorch time and cure time of compounds. However, due to the consumption of curatives by LPB, the crosslink density of the vulcanizates containing LPB decreased, resulting in slightly lower tensile strength and modulus compared with the TDAE-based compound. By increasing the sulfur loading, the modulus and tensile strength of compounds containing LPB could be significantly improved. Compared

2025-09-28 收稿, 2025-11-19 录用, 2026-01-08 网络出版

* 通信联系人: 孙宇, E-mail: yusun@qust.edu.cn

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2025.25.288

with TDAE oil, LPB imparted superior abrasion resistance to the vulcanizates and reduced the $\tan\delta$ at 60 °C, indicating improved rolling resistance. On the other hand, LPB reduced the $\tan\delta$ at 0 °C, suggesting a potential decrease in wet skid resistance. Increasing the proportion of 1, 2-units in LPB raised the $\tan\delta$ at 0 °C without affecting the $\tan\delta$ at 60 °C, while increasing the crosslink density of compound containing LPB further decreased the $\tan\delta$ at 60 °C. Finally, within the molecular weight range of 3000–7000 g/mol, the variations in molecular weight and 1, 2-unit content of LPB in vulcanizates containing LPB exhibited limited effects on processing performance, filler dispersion, curing characteristics, and abrasion resistance. These findings suggest that LPB is a reactive and environmentally friendly processing aid with significant potential to replace TDAE oil in green tire formulations.

Keywords: Liquid polybutadiene; Styrene-butadiene rubber; Microstructure; Processing aid

引用: 孙庆刚, 马德龙, 李云峰, 王茜, 王洪奎, 杨振林, 张保宁, 孙宇. 液体聚丁二烯微观结构对丁苯橡胶性能的影响. 高分子通报, 2026, 39(2), 280–286.

Citation: Sun, Q. G.; Ma, D. L.; Li, Y. F.; Wang, Q.; Wang, H. K.; Yang, Z. L.; Zhang, B. N.; Sun, Y. The effect of the microstructure of liquid polybutadiene on the properties of styrene-butadiene rubber. *Polym. Bull.* (in Chinese), 2026, 39(2), 280–286.

橡胶因独特的黏弹性, 广泛应用于国防军工、航空航天、交通运输等领域。近几年, 伴随着日趋严峻的环境问题和以电动汽车为代表的汽车工业快速发展, 轮胎行业迎来新的挑战与机遇^[1,2]。为满足产品性能要求, 轮胎制品除使用主要原材料橡胶之外, 还常配合其他助剂, 如加工助剂、硫化助剂、补强填充助剂及防老剂等。在这些助剂中, 加工助剂主要用于改善橡胶加工性能与降低能耗等^[3]。目前加工助剂常用的有石蜡基、环烷基和芳香基3大类, 其中芳香类加工油与橡胶相容性好。但芳香油含有高含量的多环芳烃(PAHs)^[4,5], 对人类以及环境有害, 其应用受到限制^[6,7]。此外, 传统加工油主要以物理作用方式存在于基体中, 可从产品中迁出, 影响材料性能^[8,9]。因此, 发展新型环保无迁出加工油显得尤为重要。

液体橡胶(LRs)作为一种新型加工助剂, 发展迅猛。LRs是一类低分子量合成橡胶, 室温流动性强^[9~14], 并与固体橡胶相容性好, 可以改善橡胶加工性能。与传统加工油相比, LRs具有更突出优势, 可以通过调控LRs微观结构及分子量等, 赋予材料独特性能。聚丁二烯有顺式-1,4-聚丁二烯、反式-1,4-聚丁二烯、全同-1,2-聚丁二烯、间同-1,2-聚丁二烯、无规-1,2-聚丁二烯, 合成路线和应用性能均不同, 如采用液体1,4-聚丁二烯可改善橡胶耐磨性能^[12,13]; 利用液体1,2-聚丁二烯作为交联助剂, 可提升过氧化物交联效率^[15]。分子结构的不同、分子量的差异数据均显著影响其应用性

能, 但液体聚丁二烯结构及不同分子量对于轮胎应用方面的影响鲜见文献报道。

基于此, 本研究重点考察液体聚丁二烯橡胶微观结构及分子量对丁苯橡胶性能的影响, 为液体橡胶开发与应用提供理论依据与实践指导。

1 实验过程

1.1 主要原材料

乳化聚合丁苯橡胶(ESBR 1502)购自朗盛化工有限公司, 环保芳烃油(TDAE油)由H&R集团提供, 炭黑N330为Cabot Corporation卡博特公司的产品, 所有其他化学品均是购买后直接使用。本研究采用的液体1,4-聚丁二烯为市售polyvest 110、polyvest 130及EPMV, 分别标记为110、130及EPMV。

1.2 试样配方

丁苯橡胶混炼胶配方: SBR 100份, 炭黑N330 60份, 硬脂酸2份, 氧化锌4份, 硫磺1.5份, *N*-环己基-2-苯并噻唑次磺酰胺(促进剂CBS)2份, 加工助剂变品种(见表1)。

表1 丁苯橡胶混炼胶配方

Table 1 Formulations of SBR compounds

样品编号	加工助剂种类	用量(phr)
C-Ref	TDAE	20
C-110	Polyvest 110	20
C-130	Polyvest 130	20
C-EPMV	Polyvest EPMV	20

1.3 主要设备和仪器

PL-GPC50 型凝胶渗透色谱(GPC)仪, 美国安捷伦科技有限公司; 核磁共振波谱仪, BRUKER ADVANCE NEO 400 MHz NMR; XSM-500 型密炼机, 科创橡塑机械设备有限公司; DL-b175-BL 型两辊开炼机, 博龙精密实验机有限公司; XLB 型平板硫化机, 青岛亚东橡机集团有限公司; MV2000 型门尼黏度测试仪和 RPA2000 橡胶加工分析仪, 美国阿尔法科技有限公司; Z005 型拉伸试验机, 德国科维仪器有限公司; GT-7012-D 型 DIN 磨耗测试机, 中国台湾高铁科技有限公司; Eplexor-500N 型动态力学分析仪, 德国耐驰仪器制造有限公司。

1.4 试样制备

首先, 预热容积为 500 mL 的密炼机至 50 °C, 转子速度设定为 40 r/min。随后, 根据表 1 配方, 将橡胶投放进密炼机内混炼 1 min, 随后添加炭黑、硬脂酸、氧化锌和液体聚丁二烯或环保芳烃油并继续混炼。14 min 之后, 从密炼机内取出混炼胶, 此时密炼机温度约为 120 °C。待密炼机冷却至 50 °C, 将混炼胶重新加到密炼机, 并添加硫磺和促进剂 CBS, 混炼 3 min, 取出混炼胶, 此时密炼机温度约为 80 °C。混炼胶在开炼机上过辊 8 次, 辊距为 1.25 mm。

胶料在平板硫化机上进行硫化, 硫化条件为 150 °C/10 MPa × ($t_{90} + 3$ min)。

1.5 测试分析

1.5.1 LPB 化学结构表征

核磁共振(NMR)实验在 Varian Mercury 400 MHz 仪器上进行, 化学位移以溶剂峰作为参考进行测定。聚合物的数均分子量(M_n)和分子量分布(M_w/M_n)由凝胶渗透色谱法(GPC)在 40 °C 下测定, GPC 配备有 Waters 515 HPLC 泵, HMW 6E THF×2, HMW 2THF) 和 Waters 2414 折射探测器, 四氢呋喃作为洗脱剂, 流速为 1.0 mL/min。

200 g 液体橡胶静置于 250 mL 烧杯中, 并保温至 20 °C, 其黏度依据标准 DIN EN ISO 3219 并通过黏度计(DV2T, Brookfield AMETEK)检测所得。

1.5.2 门尼黏度

混炼胶门尼黏度是由 Alpha 门尼 MV 2000 黏度计根据 ASTM D1646(ML 100 °C(1+4) min) 测量所得。

1.5.3 硫化曲线

Montech 2000 硫化仪(MDR)用来监测硫化过程。将 5 g 样品置于 2 个 150 °C 的模具之间, 随后关闭模具。测试频率为 1.66 Hz 及剪切角度为 0.5°, 记录扭矩与时间的关系。

1.5.4 混炼胶硫化

硫化在 VC-150T-3-FTMO-3-RT 压片机进行。将 25 g 橡胶样品放入模具(80 mm × 100 mm × 2 mm), 并在 150 °C 下固化, 硫化时间为 $T_{90} + 3$ min, 压力为 10 MPa。硫化完成后释放压力, 并将硫化胶从模具中取出, 在室温下保存过夜。

1.5.5 拉伸测试

拉伸实验在 GT-TCS-2000 试验机上进行。样品用 ASTM D638 V 型模具裁剪。样品在两个夹具之间以 500 mm/min 的速度拉伸, 直到断裂, 样品初始间隙为 50 mm。

1.5.6 DIN 磨耗测试

DIN 磨耗测试根据 GB/T 9867—2008《硫化橡胶或热塑性橡胶耐磨性能的测定》的要求, 并通过 GT-7012-D 仪器测试。试样为直径为 16 mm 与厚度为 12 mm 的圆柱形样品。样品在圆柱形研磨机表面上运动 40 m, 并记录质量损失。体积损失由质量损失除以样品密度确定。

1.5.7 动态力学性能

动态力学性能采用 DMA Q800 仪器测试。测试温度在 -30~90 °C 之间, 加热速率为 3 °C/min, 拉伸形变为 0.5% 和频率 10 Hz。

1.5.8 硫化胶交联密度测试

称取一定质量的硫化胶, 记录其准确质量为 m_0 , 置于 20 mL 样品瓶中。向瓶中加入 15 mL 甲苯, 静置 3 天后倒出瓶中液体, 重新加入 15 mL 新鲜甲苯, 再静置 3 天后更换溶剂。浸泡 7 天后, 取出溶胀试样, 用实验室薄纸吸干表面残留溶剂, 称取溶胀后质量为 m_s 。随后将试样放入 80 °C 真空烘箱中除去残余溶剂至恒重, 记录干燥试样质量为 m_d 。硫化胶交联密度 ρ_{cx} 通过 Flory-Rehner 公式计算而得^[16]。

$$\ln(1 - \varphi_r) + \varphi_r + \chi \varphi_r^2 = -2\rho_{cx} V_s (\varphi_r^{1/3} - \frac{\varphi_r}{2}) \quad (1)$$

其中, φ_r 是橡胶在溶胀体中所占体积分数; χ 是聚合物-溶剂相互作用参数, 这里取值 0.446; V_s 是甲苯的摩尔体积, 这里取值 106.3 cm³/mol。

2 结果与讨论

2.1 LPB 微观结构表征

液体聚丁二烯(LPB)微观结构及分子量分别由NMR和GPC表征。 ^1H -NMR谱(图1)中 $\delta=4.8\sim 5.0$ 间的特征峰对应1,2-乙烯基结构的亚甲基氢($-\text{CH}=\text{CH}_2$), $\delta=5.2\sim 5.5$ 间峰归属于1,4-结构的次甲基氢($-\text{CH}=\text{CH}-$)。分析结果表明,液体聚丁二烯110与液体聚丁二烯130微观结构以1,4-结构为主,仅含约1 mol%的1,2-结构;相比之下,EPMV中1,2-结构占比高达58 mol%。随1,2-结构含量增加,LPB的玻璃化转变温度(T_g)显著升高,从110与130的 $-100\text{ }^\circ\text{C}$ 升至EPMV的 $-65\text{ }^\circ\text{C}$ ^[17]。这一现象可归因于1,2-乙烯基结构的位阻效应,使分子链柔顺性降低,从而导致LPB的 T_g 升高方向移动。表2的GPC结果显示,液体橡胶130数均分子量高于110与EPMV,而后两者分子量差异不大。因此,选取这3种LPB可有效考察液体聚丁二烯微观结构与分子量对丁苯橡胶性能的影响。

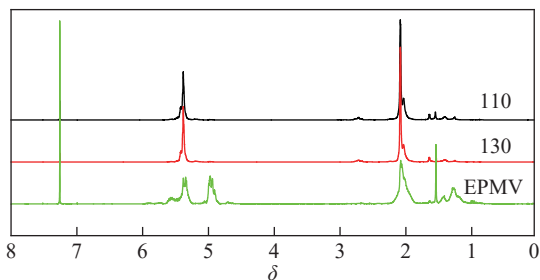


图1 液体聚丁二烯110、130与EPMV的核磁氢谱图

Figure 1 ^1H -NMR spectra of liquid rubbers 110, 130 and EPMV in CDCl_3

表2 液体聚丁二烯分子量与黏度

Table 2 Molecular weight and viscosities of liquid rubbers

试样编号	数均分子量 (g/mol)	聚合物分子量 分散性指数	黏度 @ $20\text{ }^\circ\text{C}$ (mPa·s)
C-110	2700	3.06	800
C-130	7500	2.95	3000
EPMV	3200	3.25	6000

2.2 加工性能与硫化特性

加工助剂主要用于改善混炼胶的加工性能,其中门尼黏度常被用作评价橡胶加工性能的关键指标。测试结果如图2所示,表明LPB能有效降低混炼胶黏度,其增塑效果与TDAE油接近,说明液体聚丁二烯橡胶具有优异的增塑特性。进一步

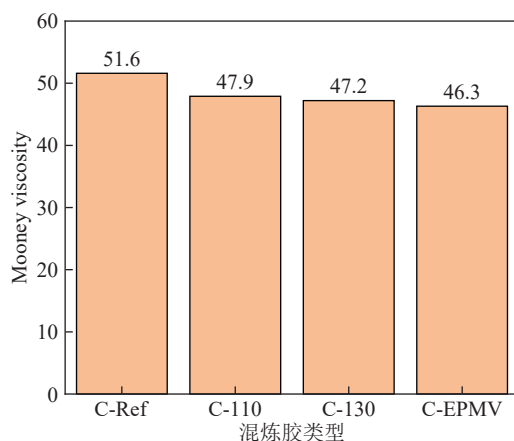


图2 混炼胶门尼黏度ML 1+4 ($100\text{ }^\circ\text{C}$)

Figure 2 Mooney viscosities of rubber compounds

比较发现,混炼胶C-110、C-130与C-EPMV三者在门尼黏度方面无明显区别。

填料分散性对材料性能具有决定性作用。本项目采用RPA流变仪对混炼胶的填料分散情况进行表征,结果如图3所示。储存模量 G' 在低应变区保持较高值,随后随着应变增大而显著下降,这一现象通常称为Payne效应,常用于表征填料的分散程度。与对照样品C-Ref相比,所有含LPB的混炼胶表现出较弱的Payne效应,即在0.3%~43.0%应变范围内 G' 的下降幅度($\delta G'$)更小,表明其填料网络较弱,填料分散更均匀。而混炼胶C-110、C-130与C-EPMV之间的 $\delta G'$ 差异不显著。以上结果表明,在本研究实验范围内,LPB分子量与微观结构对含LPB的混炼胶加工性能及填料分散性影响不显著。

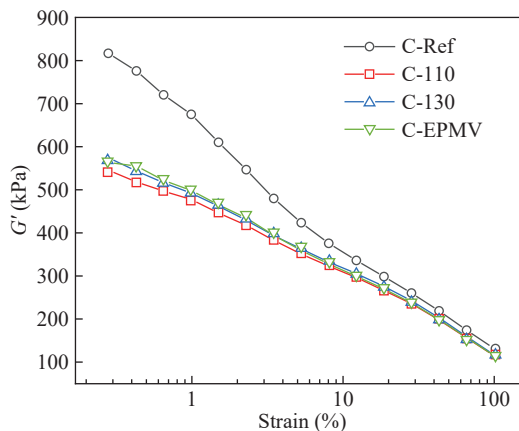


图3 胶料的 G' -应变曲线

Figure 3 Storage modulus G' -strain curves of uncured composites

混炼胶硫化曲线如图4所示。当LPB取代TDAE油并应用于橡胶中,3种含有LPB的混炼胶的焦烧时间(T_{10})和硫化时间(T_{90})均有所延长,最低与最高扭矩之差(δM)减少,这可能是由于LPB增塑橡胶以及LPB中双键消耗部分硫化助剂,从而导致材料交联密度降低^[18]。液体聚丁二烯110、130与EPMV对橡胶硫化特性没有明显影响。

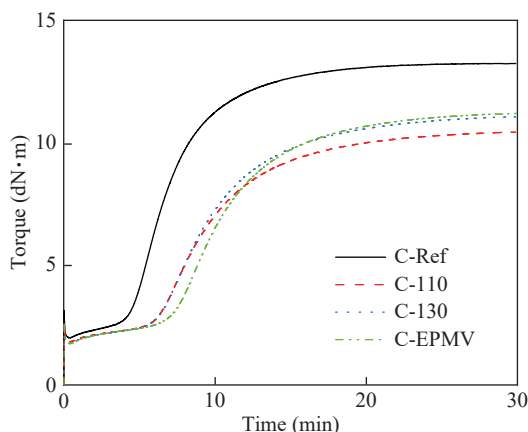


图4 混炼胶硫化曲线

Figure 4 Curing curves of compounds

2.3 硫化胶物理性能和耐磨性能

硫化胶应力-应变曲线见图5,其余物理性能见表3。对比参照C-Ref, C-110、C-130与C-EPMV的拉伸强度、100%与300%定伸应力均有所下降,这可能是LPB消耗部分硫化助剂,材料交联密度下降所致^[18,19]。以表3中C-EPMV为例,其交联密度比参照样C-Ref降低约18%,提高C-EPMV的硫磺用量,其硫化胶交联密度提高29%,100%与300%定伸应力也明显提高,拉伸强度接近C-Ref,断裂伸长率相应降低。

硫化胶的耐磨性能由DIN磨损试验评价。所有含LPB的硫化胶耐磨性能均优于C-Ref(图6),这与LPB分子链良好柔性密切相关^[20]。通过比较硫化胶C-110、C-130与C-EPMV,这三者间力

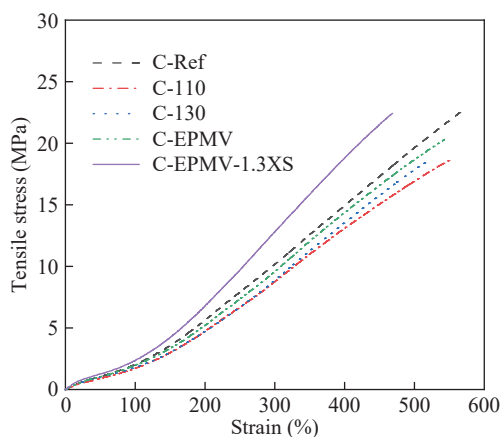


图5 硫化胶应力-应变曲线

Figure 5 Stress-strain curves of compounds

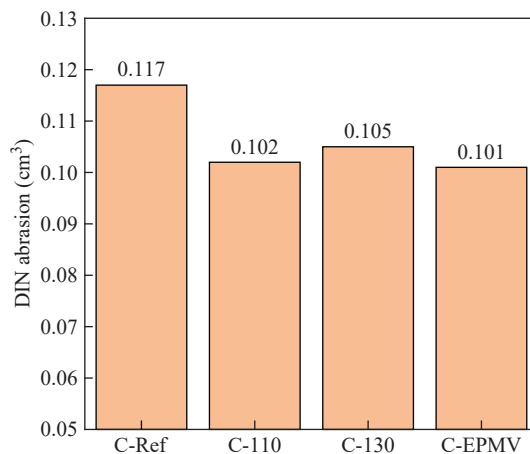


图6 硫化胶 DIN 磨损图

Figure 6 DIN abrasion of compounds

学性能与DIN磨损没有明显区别,这表明在本研究范围内,LPB分子量或1,2-结构含量对硫化胶力学性能和耐磨性能的影响有限。

2.4 硫化胶动态力学性能

动态力学性能是评价轮胎材料滚动阻力与抗湿滑性能的重要指标。如图7所示,与含TDAE的样品相比,所有含LPB的硫化胶在0与60℃处, $\tan\delta$ 值均降低,说明LPB有助于改善材料的滚动

表3 硫化胶物理性能

Table 3 Physical properties of vulcanizates

试样编号	拉伸强度 (MPa)	断裂伸 长率 (%)	100%定伸 应力 (MPa)	300%定伸 应力 (MPa)	Shore A 硬度	交联密度 (mol/m ³)	$\tan\delta$ @ 0 °C	$\tan\delta$ @ 60 °C
C-Ref	22.5(1.3)	561(33)	2.13(0.10)	10.45(0.51)	57	264	0.297	0.228
C-110	19(0.56)	547(8)	1.84(0.05)	8.98(0.36)	53	—	0.246	0.219
C-130	19.3(0.8)	518(21)	1.90(0.14)	9.85(1.04)	52	—	0.241	0.214
C-EPMV	20.7(1.0)	541(43)	2.08(0.16)	10.12(0.77)	55	217	0.263	0.219
C-EPMV-1.3XS	22.2(0.8)	460(27)	2.39(0.01)	12.98(0.37)	60	281	0.264	0.184

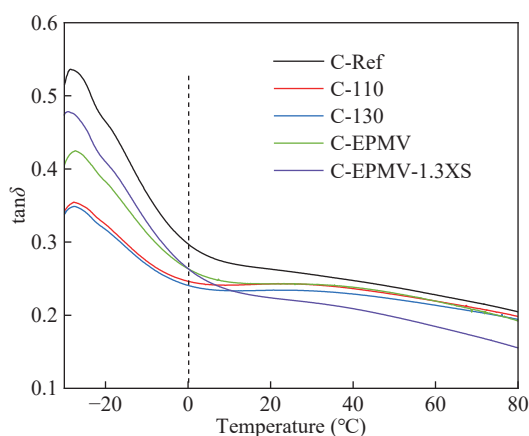


图7 硫化胶在0.5%应变下的 $\tan\delta$ -温度曲线

Figure 7 $\tan\delta$ -temperature curves of composites at 0.5% tensile strain

阻力,但同时可能削弱其抗湿滑性能。C-110与C-130在动态力学性能上差异不大,表明LPB分子量在本研究的分子量范围内不会对橡胶动态力学性能产生影响。C-EPMV与C-110在60℃的 $\tan\delta$ 值接近,但C-EPMV在0℃的 $\tan\delta$ 值较C-110高约7%,这归因于EPMV中较高的1,2-结构含量使其 T_g 升高。以C-EPMV为基础,进一步的考察胶料交联密度对材料动态力学性能影响,可以发现C-EPMV-1.3XS的0℃的 $\tan\delta$ 值基本与C-EPMV一致,但其60℃的 $\tan\delta$ 值下降约16%,这表明在含有LPB的硫化胶体系中补添硫化助剂,可提高交联密度,有效改善了材料滚动阻力性能。

3 结论

考察了LPB分子量及微观结构对丁苯橡胶性能的影响。结果表明:相比于TDAE油,LPB作为加工助剂能够有效降低混炼胶门尼黏度并改善填料分散,提升材料耐磨性能与降低滚动阻力。LPB的引入延长了胶料焦烧时间和硫化时间。此外,LPB会导致胶料交联密度下降,使硫化胶拉伸强度和定伸应力略低于TDAE体系。但通过提高硫磺用量,可显著提升材料定伸模量、拉伸强度以及进一步降低材料60℃的 $\tan\delta$ 值。含有LPB的硫化胶较含有TDAE油的硫化胶具有更低的0℃的 $\tan\delta$ 值,这表明可能会削弱材料抗湿滑性能。提高LPB中1,2-结构含量,可以提高材料0℃的 $\tan\delta$ 值,而60℃的 $\tan\delta$ 值不受影响。在本研究实验范围内,LPB的分子量(3000~7000 g/mol)与1,2-

结构含量对含LPB的材料加工性能、填料分散、硫化特性及耐磨性能的影响不显著。

参考文献

- 1 杨焕,孙京,丁玉占. 轮胎在汽车行业中的应用现状及发展趋势分析. *汽车维修与修理*, **2025**, (15), 119–120.
- 2 刘金山,李少斐,徐家. 新能源汽车驱动下轮胎产业的技术升级与市场转型. *质量与认证*, **2025**, (S1), 129–134.
- 3 Mark, E. E.; Erman, B.; Roland, M. The science and technology of rubber. Amsterdam, Boston: Elsevier Academic Press, **2013**. 457–470.
- 4 Öter, M.; Karaagac, B.; Deniz, V. Substitution of aromatic processing oils in rubber compounds. *KGK Rubberpoint*, **2011**, 64, 48–51.
- 5 Patel, A. B.; Shaikh, S.; Jain, K. R.; Desai, C.; Madamwar, D. Polycyclic aromatic hydrocarbons: Sources, toxicity, and remediation approaches. *Front. Microbiol.*, **2020**, 11, 562813.
- 6 Ezzoddin, S.; Abbasian, A.; Aman-Alikhani, M.; Ganjali, S. T. The influence of non-carcinogenic petroleum-based process oils on tire compounds' performance. *Iran. Polym. J.*, **2013**, 22(9), 697–707.
- 7 高红,马书杰,刘妍,刘英,杨俊杰. 橡胶油的种类和性能及应用. *橡胶工业*, **2003**, 50(12), 753–759.
- 8 Kataoka, T.; Zetterlund, P. B.; Yamada, B. Effects of storage and service on tire performance: oil component content and swelling behavior. *Rubber Chem. Technol.*, **2003**, 76(2), 507–516.
- 9 Nakazono, T.; Matsumoto, A. Mechanical properties and thermal aging behavior of styrene-butadiene rubbers vulcanized using liquid diene polymers as the plasticizer. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2010**, 118(4), 2314–2320.
- 10 Nakazono, T.; Ozaki, A.; Matsumoto, A. Phase separation and thermal aging behavior of styrene-butadiene rubber vulcanizates using liquid polymers as plasticizers studied by differential scanning calorimetry and dynamic mechanical spectroscopy. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2011**, 120(1), 434–440.
- 11 Ren, Y. Q.; Zhao, S. H.; Li, Q. Q.; Zhang, X. Y.; Zhang, L. Q. Influence of liquid isoprene on rheological behavior and mechanical properties of polyisoprene rubber. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2015**, 132(8), 41485.
- 12 Kim, D.; Ahn, B.; Kim, K.; Lee, J.; Kim, I. J.; Kim, W. Effects of molecular weight of functionalized liquid butadiene rubber as a processing aid on the properties of SSBR/silica compounds. *Polymers*, **2021**, 13(6), 850.
- 13 Kim, D.; Yeom, G.; Joo, H.; Ahn, B.; Paik, H. J.; Jeon, H.; Kim, W. Effect of the functional group position in functionalized liquid butadiene rubbers used as

- processing aids on the properties of silica-filled rubber compounds. *Polymers*, **2021**, 13(16), 2698.
- 14 Ryu, G.; Kim, D.; Song, S.; Hwang, K.; Kim, W. Effect of the epoxide contents of liquid isoprene rubber as a processing aid on the properties of silica-filled natural rubber compounds. *Polymers*, **2021**, 13(18), 3026.
- 15 Akiba, M.; Hashim, A. S. Vulcanization and crosslinking in elastomers. *Prog. Polym. Sci.*, **1997**, 22(3), 475–521.
- 16 Wang, Q.; Sun, T.; Wei, C. Y.; Sun, N.; Zhao, W. P.; Liu, L. J.; Wei, L. P.; Liu, H.; Zhang, C. Y.; Zhang, X. Q.; Sun, Y. Liquid 3, 4-polyisoprene: a novel processing aid to achieve tire tread SBR composites with high wet grip and low energy consumption. *Polym. Test.*, **2022**, 115, 107713.
- 17 坚毅化工. POLYVEST®EP MV 乙烯基改性非官能化的液体聚丁二烯橡胶[EB/OL]. [2025-12-03]. <https://www.gz-jychem.com/product/668.html>.
- 18 Liu, Z. Y.; Han, L.; Wang, R. J.; Feng, Q.; Liu, G. Y.; Yong, Z. F. Influence of liquid polybutadiene on crosslinking network and mechanical properties of SSBR/BR. *Polym. Eng. Sci.*, **2022**, 62(5), 1416–1426.
- 19 Choi, S. S.; Park, B. H.; Nah, C. Effect of low molecular weight polybutadiene as processing aid on properties of silica-filled styrene-butadiene rubber compounds. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2003**, 90(11), 3135–3140.
- 20 江皖兰. 顺丁橡胶系并用胶具有高耐磨性的原因. 世界橡胶工业, **2009**, 36(1), 11–17.