

不同 SSBR 配方性能对比及最优配方筛选研究

刘加强¹, 王林杰², 姜杰¹, 王传磊¹, 徐岩¹, 张宁¹, 董梓亮²

(1. 山东丰源轮胎制造股份有限公司, 山东 枣庄 277300 ;

2. 青岛科技大学智能制造学院, 山东 青岛 266061 ;

3. 青岛科技大学轮胎先进装备与关键材料国家工程研究中心, 山东 青岛 266061)

摘要 : 为筛选适用于高性能轮胎的溶聚丁苯橡胶 (SSBR) 配方, 本研究制备 7 组 SSBR 小配合样品, 通过门尼焦烧、流变、DMA、RPA 及物理机械性能测试, 系统分析其耐磨、湿滑抓地、滚动阻力及抗老化破裂性能。结果表明, 2526 (干胶) 配方综合性能最优: DIN 磨耗仅 96 cm³, 耐磨性能突出; T_g 低至 -36.1 °C、0 °C $\tan\delta=0.268$, 湿滑抓地性优异; 且具备良好的抗老化破裂能力。虽然滚动阻力仍需优化, 但可通过调整工艺与助剂实现白炭黑-偶联剂协同改性, 不牺牲核心性能。该配方为唯一能突破轮胎“魔三角”性能的方案, 为高性能轮胎 SSBR 选型与应用提供科学依据。

关键词 : 橡胶; 硫化; 促进剂; 机械性能; 动态性能

引用论文 : 刘加强, 王林杰, 姜杰, 等. 不同 SSBR 配方性能对比及最优配方筛选研究 [J]. 橡塑技术与装备, 2026, 52(9):49-54.

中图分类号 : TQ333.1

文章编号 : 1009-797X(2026)09-0049-06

文献标识码 : B

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.09.010

随着汽车工业向节能化、安全化、长寿命化方向快速发展, 轮胎作为核心行驶部件, 其综合性能需求持续升级^[1~2]。溶聚丁苯橡胶 (SSBR) 凭借分子结构可设计性强、动态力学性能优异等特点, 成为高性能轮胎胎面胶的核心基材, 其配方性能直接决定轮胎的耐磨寿命、湿滑抓地安全性及滚动阻力经济性^[3~4]。然而, 轮胎“魔三角”性能 (耐磨、湿滑抓地、滚动阻力) 存在天然制约关系, 三者同步突破是行业技术瓶颈^[5~6]。白炭黑作为常用补强填料, 虽能改善抗湿滑性与低滚阻特性, 但易出现分散不均等问题, 导致轮胎老化破裂^[7~9]。现有 SSBR 配方多侧重单一性能优化, 难以满足全方位需求^[10]。基于此, 本研究设计 7 组 SSBR 配方, 系统探究其关键性能差异, 筛选最优配方, 为高性能轮胎研发提供支撑。

1 实验部分

1.1 实验材料

本实验所用基体橡胶为 7 种不同品种溶聚丁苯橡胶 (SSBR): SOL5251H、M2520、L256(S207)、HS256、HPR621、2526(充油)、2526(干胶), 均为

工业级; 填料为白炭黑 1165MP, 罗地亚白炭黑 (青岛) 有限公司产品; 加工助剂为 Si69mix, 南京曙光精细化工有限公司产品; 增塑剂为 TDAE 油, 工业级; 活化体系包括氧化锌 ZnO 等; 硫化剂硫磺 S; 所有材料均未经进一步处理直接使用。

1.2 实验配方

本研究设计 7 组轮胎胎面胶配方, 除 SSBR 品种及用量存在差异外, 其余配合剂用量统一 (质量份): 白炭黑 1165MP80, Si69mix12.8, ZnO5, 其他试剂均为市售级试剂, 总质量均为 243.8 份。具体变量参数如表 1 所示。

表 1 不同 SSBR 品种配方参数 (质量份)

配方编号	SSBR 品种	SSBR 用量	TDAE 油用量
1	SOL5251H	100	37.5
2	M2520	125	12.5
3	L256 (S207)	125	12.5
4	HS256	125	12.5
5	HPR621	125	12.5
6	2526(充油)	125	37.5
7	2526(干胶)	100	12.5

作者简介 : 刘加强 (1986-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事轮胎配方设计工作。

1.3 实验设备及材料制备

橡胶混炼采用 XK-160 型开放式炼胶机, 混炼工艺参数: 前辊温度 55~60 °C, 后辊温度 50~55 °C, 辊距 2~3 mm。混炼步骤: 天然橡胶投入炼胶机塑炼 5 min 至表面光滑; 依次加入 ZnO、SA、防老剂 4020、微晶蜡 C36, 混炼 3 min; 加入白炭黑 1 165MP 与 Si69mix, 混炼 4 min 至分散均匀; 加入 TDAE 油, 继续混炼 3 min; 最后加入促进剂与硫磺, 混炼 2 min 后薄通 3 次, 出片得到混炼胶, 室温放置 24 h 后备用。

在 XLD-400×400×2 型硫化机上硫化, 硫化条件为 150 °C, 硫化压力 10 MPa, 硫化完成后自然冷却至室温, 得到标准硫化胶试样, 用于后续性能测试。

1.4 实验测试设备与方法

1.4.1 硫化动力学测试

硫化特性使用 M-2000-AN 型无转子硫化仪, 于 160 °C 测试 40 min, 获取 t_{10} 、 t_{90} 、 M_H 、 M_L 等参数; 门尼黏度及焦烧时间使用门尼黏度计, 在 127 °C 或 130 °C 下测定, 记录 $M_L(1+4)_{100}$ °C 与 t_{50} 。

1.4.2 物理机械性能测试

各项性能测试均依据相应国家标准执行: 拉伸性能使用 CMT4104 试验机, 以 500 mm/min 速率测试哑铃型 1 样条, 获取拉伸强度、断裂伸长率、定伸应力及永久变形; 撕裂强度使用同款试验机; DIN 磨耗在 10 N 负荷与 4 000 转条件下测试并计算体积; 密度采用密度天平; 邵氏硬度使用 LX-A 型硬度计在 23 °C 测定。

1.4.3 动态性能测试

RPA 测试采用 RPA2000 型分析仪, 通过测定 1 751% 和 40 000% 应变下的储能模量 (G') 评价网络结构; DMA 测试采用 DS/GABO 型分析仪, 在 -40 ~70 °C 温区内测定储能模量 (E')、损耗模量 (E'') 及损耗因子 ($\tan\delta$), 记录 T_g 、0 °C $\tan\delta$ (湿滑) 和 60 °C $\tan\delta$ (滚动阻力); 回弹率采用配套装置测试; 压缩生热采用 MR-C 型试验机记录压缩温升。

2 结果与讨论

2.1 硫化特性分析

硫化性能是决定橡胶加工安全稳定性与生产效率的关键指标。由图 1~图 4 可见, 硫化特征参数 (正硫化时间 t_{90} 、最大扭矩 M_H 、最小转矩 M_L) 能够直观体现胶料的加工适配效果及硫化交联网络的构建水平。试验数据表明, 七组溶聚丁苯橡胶配方的硫化行为存

在明显区别。

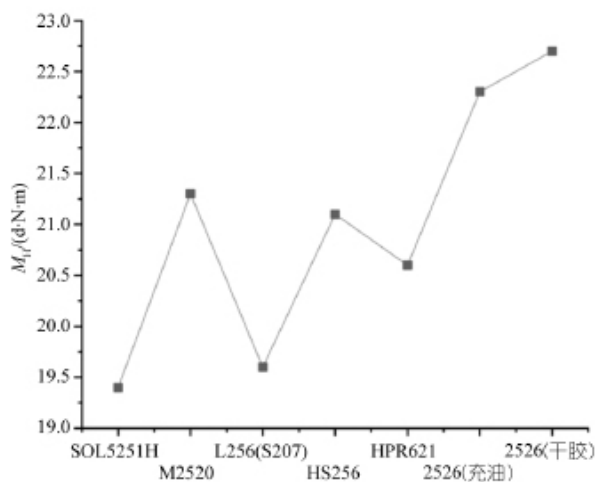


图 1 最大扭矩 M_H

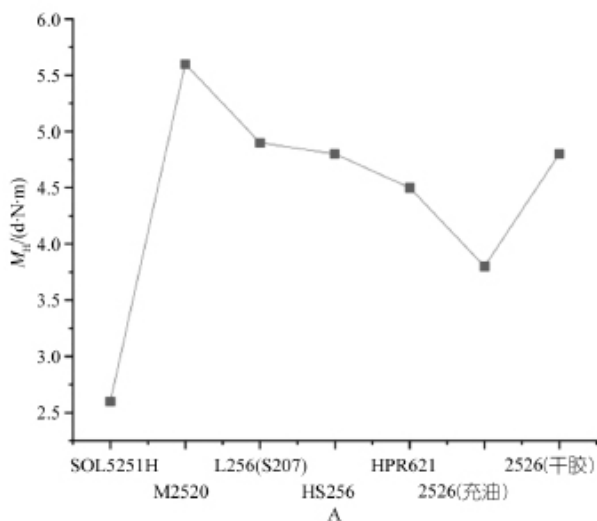


图 2 最小转矩 M_L

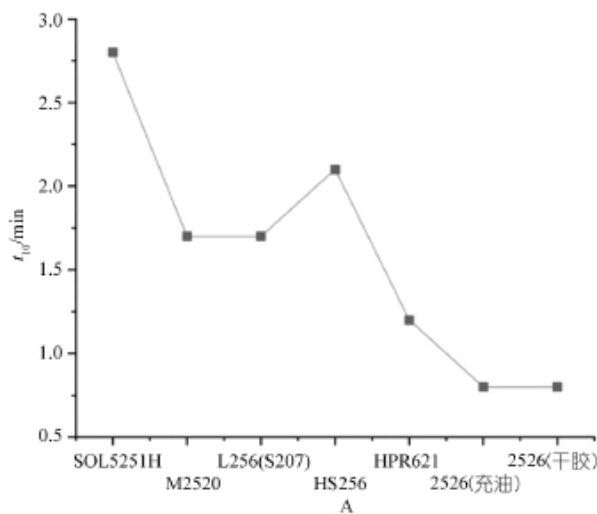


图 3 焦烧时间 t_{10}

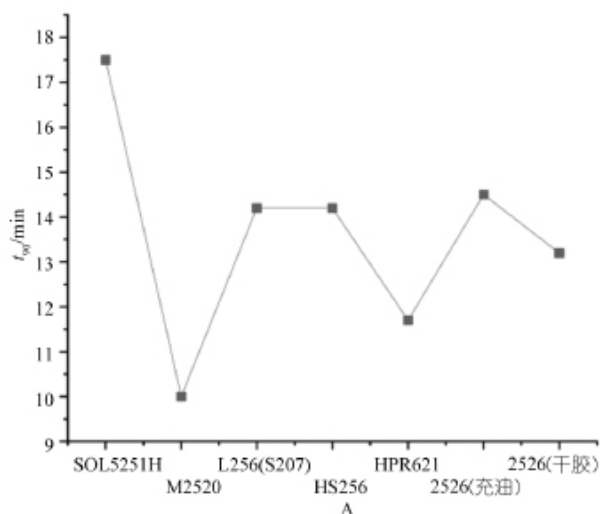


图4 正硫化时间 t_{90}

由门尼黏度测试结果可知, 2526 干胶与 M2520 胶料黏度数值分别为 107 和 105, 在全部试样中处于高位, 说明两种橡胶分子链缠绕紧密, 胶料刚性适中, 加工过程中不易发生形变, 成型稳定性更好。SOL5251H 黏度仅为 77, 流动性能更为优异, 但过弱的基体黏度容易造成硫化固化后力学强度偏低。在焦烧时间方面, HPR621 试样 t_5 最短, 仅为 22.5 min, 加工安全区间狭窄, 混炼、存放阶段更容易出现提前硫化缺陷。2526 干胶在 130 °C 高温条件下测得焦烧时间为 19.3 min, 高温本身会加快焦烧反应, 即便如此, 其数值仍明显低于同温度下 2526 充油胶的 28.7 min, 印证干胶类 SBR 具备更高的硫化反应活性。从正硫化时间来看, L256(S207)、2526 充油胶 t_{90} 分别为 13.2 min、10.0 min, 硫化反应速度更快, 工业化生产效率更高; 而 SOL5251H 硫化耗时最长 (17.5 min), 实际加工中需适当延长硫化时长, 保证内部交联网络充分成型。

转矩差值 MH-ML 可表征橡胶硫化体系的交联密实程度。其中 2526 干胶试样为 17.9 dN·m、2526 充油试样达 18.5 dN·m, 二者转矩差值位居各组前列, 说明其硫化交联网络排布更为致密, 可为胶料优良的力学与使用性能提供内在结构保障; 而 SOL5251H 仅为 16.8 dN·m, 交联密实度相对偏低, 这也与其拉伸强度、耐磨性能偏弱的测试结果相吻合。综合各项硫化参数来看, 2526 干胶具备硫化速率适中、交联密度偏高的特征, 既能满足实际加工的工艺适配要求, 又可构建稳定致密的交联结构, 为后续综合性能的提升提供了良好基础。

2.2 物理机械性能

物理机械性能主要包括材料静态力学强度、耐久特性及基础物理指标, 常通过拉伸、撕裂、磨耗、密度等测试进行系统表征, 直接决定轮胎的耐磨使用寿命、抗破坏能力以及耐老化开裂水平。

耐磨性能以 DIN 磨耗体积结合撕裂强度进行综合评判。如图 5 与图 6 所示, 2526 干胶试样 DIN 磨耗体积最低, 同时撕裂强度处于中上水平, 在耐磨特性与抗撕裂韧性之间达到最佳匹配, 整体耐磨表现最优。2526 充油胶 DIN 磨耗体积位列第三, 撕裂强度同样保持中上, 耐磨水平与干胶试样相近, 综合排名次之。M2520 虽拥有所有组别中最高的撕裂强度, 但 DIN 磨耗指标仅处于中等偏下位置, 整体耐磨性能排在第三位。

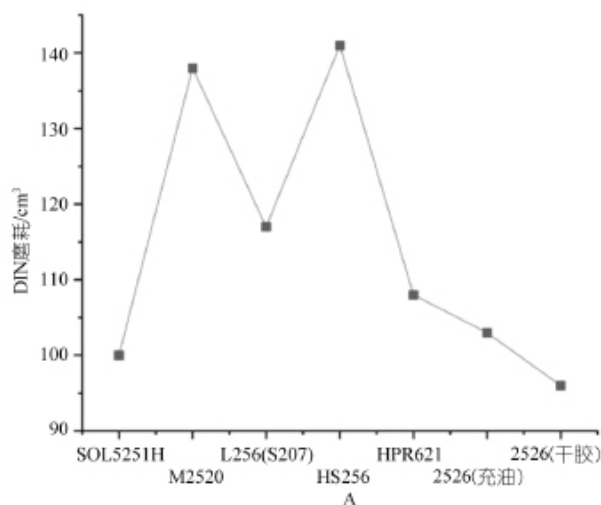


图5 DIN 磨耗

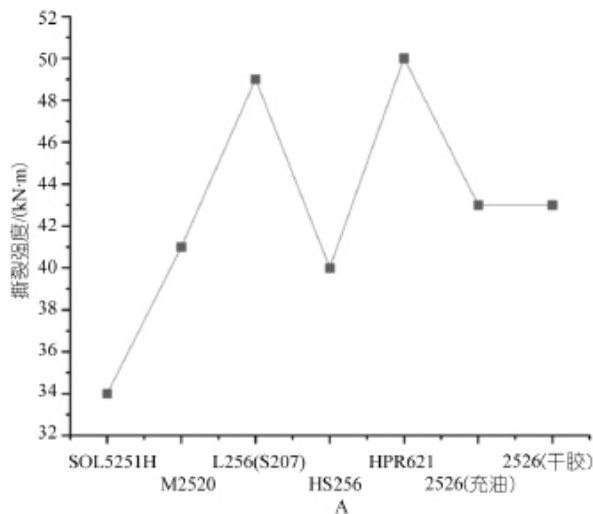


图6 撕裂强度

在耐老化开裂性能方面, 2526 干胶展现出优异的抗老化开裂能力。从拉伸强度角度分析, 如图 7 所示, 该试样老化前拉伸强度处于较高水平, 可赋予胶料强大的抗破坏能力, 在受到外力作用时有效抑制内部微裂纹的萌生与积累, 延缓老化开裂进程。

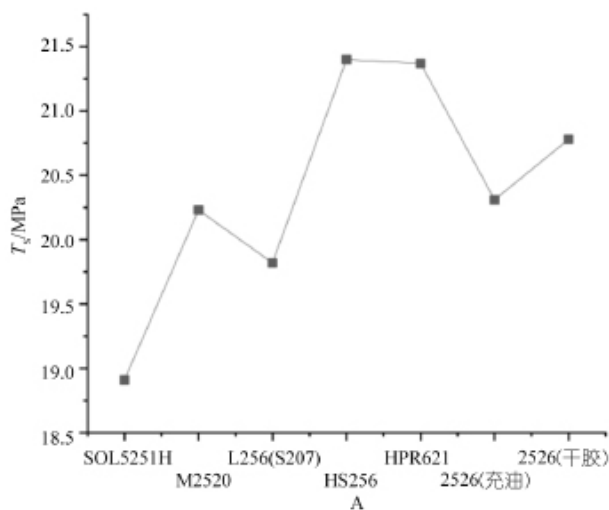


图 7 拉伸强度

在定伸应力层面, 如图 8 所示, 该胶料 100% 定伸应力为全部配方中最低, 表明其小变形下模量较低、柔顺性优异, 能够通过自身形变更有效地分散和松弛应力, 避免局部应力集中诱发微裂纹; 如图 9 所示, 300% 定伸应力又处于合理区间, 兼顾了材料在大变形下的强度与韧性, 可保证白炭黑填料与橡胶基体形成稳定的界面结合, 防止因界面结合强弱异常而引发应力集中、材料脆化等缺陷。

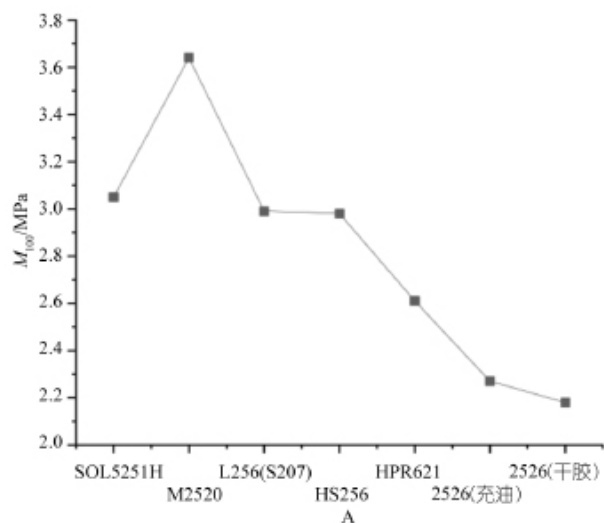


图 8 100% 定伸应力

耐切割性能方面, 如图 10 所示, 2526 干胶的耐切割指标位居前列, 表明胶料在受到尖锐物体冲击或切割作用时, 能够有效抵抗局部破损和缺口形成, 从源头上降低因表面损伤诱发老化开裂的风险。

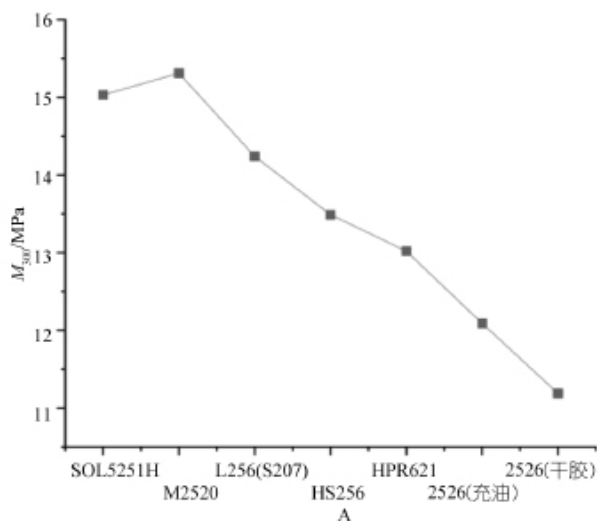


图 9 300% 定伸应力

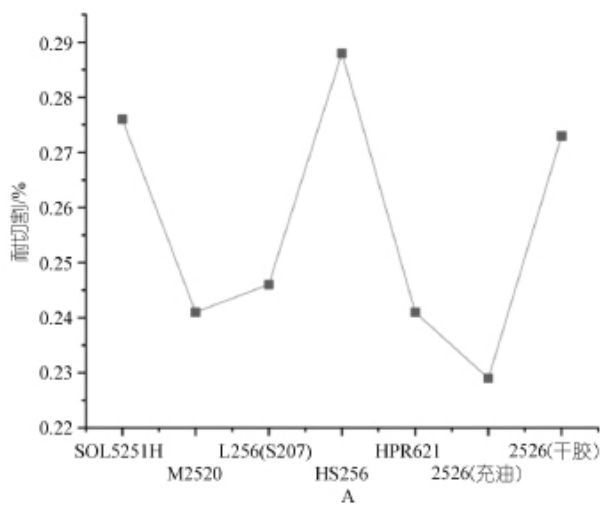


图 10 耐切割

2.3 动态性能

动态力学性能以 DMA 动态力学分析与 RPA 橡胶加工分析结果为依据, 用来评价胶料在交变工况下的能量损耗、模量变化及温度响应规律, 与轮胎湿地抓附性能、滚动阻力及动态支撑稳定性密切相关。

湿地抓地性能主要依据 DMA 测得的玻璃化转变温度 T_g 和 0°C 损耗因子 $\tan\delta$ 进行评判。如图 11 所示, 2526 干胶配方 T_g 在所有试样中最低, 0°C $\tan\delta$ 处于中等区间, 说明其低温柔顺性优异, 可在湿滑路况下保持良好路面贴合度, 湿地抓地效果最佳。2526 充油

配方 T_g 排在第三位, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\tan\delta$ 为各组第二高, 凭借突出的低温能量损耗特性赋予胶料更强路面黏附力, 湿地性能位居第二。M2520 的 T_g 处于中等水平, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\tan\delta$ 位列第三, 再配合自身优异的抗撕裂能力, 湿滑工况下结构稳定性更强, 综合湿地表现排第三位。

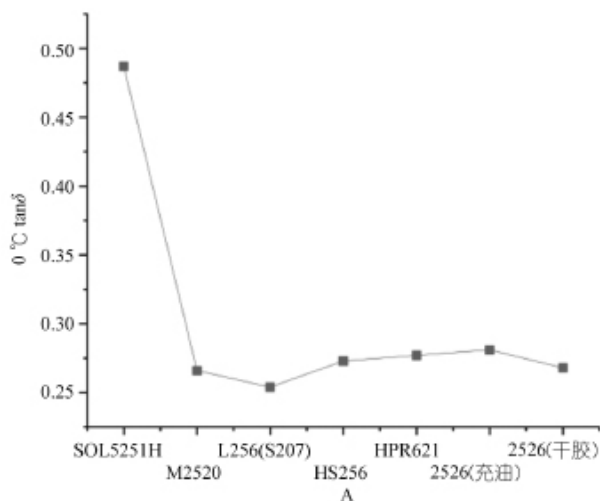


图 11 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 损耗因子 $\tan\delta$

滚动阻力采用 DMA $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 $\tan\delta$ 指标进行评价, 该参数直接反映轮胎行驶过程中的内部能量损耗。如图 12 所示 HS256 配方 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\tan\delta$ 数值最小, 动态滞后损耗最低, 滚动阻力表现最优; M2520 略高于 HS256, 位列第二; L256(S207) 与 HPR621 滚动阻力水平相近, 并列第三位。

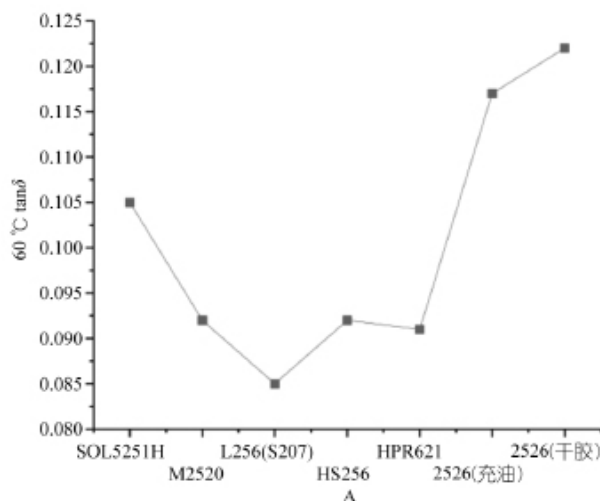


图 12 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 损耗因子 $\tan\delta$

从动态模量与交联网络结构来看, RPA 测试结果显示, 2526 干胶在 1 751% 及 40 000% 应变条件下储能模量 G' 均维持在合理区间。既可以满足轮胎行驶所

需结构支撑刚度, 又能避免模量过高引发的动态应力集中, 有效延缓老化过程中微裂纹的产生与扩展, 从动态力学层面进一步提升了胶料的抗开裂性能。

3 结论

综合各项测试结果可知, 2526 干胶试样为本组试验中综合表现最佳的配方。该胶料耐磨能力最为优异, DIN 磨耗体积仅为 96 cm^3 ; 同时湿地抓地性能位列所有试样第一, 玻璃化转变温度低至 $-36.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 损耗因子达到 0.268, 能够同时保障轮胎的使用耐久度与雨天行驶安全性。虽然该配方 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 损耗因子为 0.122, 滚动阻力仍存在优化空间, 但依托白炭黑与偶联剂之间的协同改性作用, 可通过调整混炼工艺参数与助剂添加比例进一步降低滚动损耗, 且不会损害其已具备的高耐磨、高湿抓等优异性能。在全部试验配方中, 2526 干胶是唯一能够改善轮胎性能“魔三角”制约关系的试样, 综合应用价值最高。

参考文献:

- [1] 董建云, 汪燕, 于海洋, 等. 双末端改性星形溶聚丁苯橡胶在电动汽车轮胎胎面胶中的应用 [J]. 轮胎工业, 2025, 45(10):597-600.
- [2] 王旭, 李实会, 张建国, 等. 通用型及官能化溶聚丁苯橡胶在高性能轮胎胎面胶中的应用 [J]. 轮胎工业, 2019, 39(7):5.
- [3] 郑涛, 邵红旗. 改性溶聚丁苯橡胶对轮胎胎面胶性能的影响 [J]. 合成橡胶工业, 2020, 43(5):5.
- [4] 马建华, 吴友平. 炭黑与白炭黑补强溶聚丁苯橡胶和乳聚丁苯橡胶胎面胶性能的对比研究 [J]. 橡胶工业, 2012, 59(2):7.
- [5] 唐源, 张春华, 田庆丰, 等. 高性能轮胎胎面胶“魔三角”性能平衡研究进展 [J]. 橡胶工业, 2019, 66(5):7.
- [6] 廖杨, 李爽娜. 轮胎“魔三角”性能相关专利技术综述 [J]. 轮胎工业, 2023, 43(3):131-137.
- [7] Zhang S, Zhao S, Zhang X, et al. Preparation, structure, and properties of end-functionalized miktoarms star-shaped polybutadiene-*sn*-poly(styrene-butadiene) rubber [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(6):596-602.
- [8] Oh M J, Kownacki I, Janowski B. NITROGEN-CONTAINING SILANE COUPLING AGENTS: SYNTHESIS AND STRUCTURE EFFECT ON TIRE PERFORMANCE OF SILICA/SSBR/BR COMPOSITES [J]. Rubber Chemistry and Technology, 2025, 98(1).
- [9] 郑蕊, 陈益艺, 赵素合. 不同结构充油溶聚丁苯橡胶/炭黑/白炭黑复合材料的结构与性能 [J]. 合成橡胶工业, 2015, 38(1):6.
- [10] Papp F. Incorporating and Optimizing Performance of Polydyne(TM) Micronized Rubber Powder and Ekodyne(TM) Functional Compound in SSBR/Silica-Silane Tire Treads [J]. 2026-01-22.

Comparison of performance of different SSBR formulations and research on screening the optimal formulation

Liu Jiaqiang¹, Wang Linjie², Jiang Jie¹, Wang Chuanlei¹, Xu Yan¹, Zhang Ning¹, Dong Ziliang²

(1. Shandong Fengyuan Tire Manufacturing Co.LTD., Zaozhuang 277300, Shandong, China;

2. Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266042, Shandong, China;

3. Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266042, Shandong, China)

Abstract: To screen the solution styrene-butadiene rubber (SSBR) formulation suitable for high-performance tires, seven groups of small-scale SSBR compound samples were prepared in this study. Through Mooney scorch, rheological, DMA, RPA, and physical and mechanical property tests, a systematic analysis was conducted on their wear resistance, wet grip, rolling resistance, and anti-aging cracking properties. The results showed that the 2526 (dry rubber) formulation exhibited the best comprehensive performance: DIN abrasion resistance was only 96 cm³, indicating outstanding wear resistance; T_g was as low as -36.1 °C, and $\tan\delta$ at 0 °C was 0.268, indicating excellent wet grip; and it also possessed good anti-aging cracking resistance. Although the rolling resistance still needs to be optimized, silica-coupling agent synergistic modification can be achieved through process and additive adjustments without sacrificing core performance. This formulation is the only solution that can break through the "magic triangle" performance of tires, providing a scientific basis for the selection and application of SSBR in high-performance tires.

Key words: rubber; vulcanization; accelerator; mechanical properties; dynamic properties

(R-03)

全球炭黑巨头卡博特，宣布换帅

Global carbon black giant Cabot announces change of leadership

2026年7月30日，全球炭黑龙头卡博特公司（纽交所代码：CBT）官宣重大人事调整，引发行业广泛关注。执掌企业长达10年的总裁兼首席执行官柯尚恩（Sean Keohane）正式宣布退休，公司选定内部高管 Erica McLaughlin 接任一把手。

根据官方披露信息，柯尚恩将于2026年9月30日卸任总裁、CEO职务，并退出董事会。为保障经营平稳过渡，他将以顾问身份服务至2026年底。自2016年出任CEO以来，柯尚恩掌舵卡博特整整10年。

加上此前任职履历，其在卡博特累计工作近25年，深度参与企业炭黑补强材料、特种化工业务布局，主导公司全球化战略与可持续转型。

接任者 Erica McLaughlin 现任执行副总裁、首席财务官兼企业战略负责人，将于10月1日正式履新总裁兼首席执行官，同时进入董事会。她早在2002年便加入卡博特，深耕企业20余年，先后任职财务、战略、补强材料板块，还曾负责轮胎相关业务运营，兼具业务实操与资本管理经验。

随着 Erica McLaughlin 晋升 CEO，卡博特现已启动新任首席财务官遴选工作。作为轮胎产业链上游核心原材料供应商，卡博特的管理层更迭备受海外橡胶行业重视。外媒分析指出，本次选择内部高管接班，意味着卡博特大概率延续现有经营主线。

摘编自“轮胎观察网”

(R-03)