

新能源轮胎低滚阻性能协同设计研究

唐俊萍, 柳云点, 尚庆仁, 陈绍孟, 刘吉镇, 陈国胜, 王洪娟

(山东万达宝通轮胎有限公司, 山东 东营 257500)

摘要: 针对新能源汽车续航里程提升需求, 本研究构建低滚阻轮胎三维协同设计体系。采用端基改性溶聚丁苯橡胶结合分散白炭黑填充技术, 以及优化胎面花纹设计、轻量化设计和优化轮廓参数, 同时采用串联式混炼及高温氮气硫化工艺, 通过材料—结构—工艺的协同设计, 在保障轮胎安全性能的同时, 实现较低滚动阻力, 为新能源汽车提供低滚阻解决方案。

关键词: 新能源汽车; 三维协同设计体系; 低滚阻轮胎

中图分类号: TQ336.1

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2025)11-0063-04

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2025.11.014

在全球能源转型与环保政策驱动下, 新能源汽车产业持续高速增长。2024 年全球销量达 1 823.6 万辆, 同比增长 24.4%, 中国市场以 1 288.8 万辆占比 70.7% 领跑全球。尽管新能源汽车发展迅速, 但续航能力不足仍是制约消费者的痛点。轮胎作为汽车唯一接地部件, 其滚动阻力造成的能量损耗占整车能耗 20%~30%, 开发低滚阻轮胎对能效提升具有特殊意义。

降低轮胎滚阻现有技术面临两大核心挑战: 其一, 当前研究多聚焦单一维度优化, 对材料—结构—工艺协同设计研究不足; 其二, 滚阻降低常伴随抓地力、耐磨性、静音性等性能衰减。如何在降低滚阻的同时, 实现轮胎各项性能的平衡和优化, 是当前新能源轮胎研发面临的关键难题。

本文重点论述, 通过材料—结构—工艺三方协同设计, 在保障轮胎安全性能的同时, 实现较低滚动阻力。

1 新能源轮胎滚阻形成机理

1.1 形成机理

轮胎滚动过程中的能量消耗本质上是多种材料耦合作用的结果。材料的滞后损失是构成主要能耗来源, 其产生机制与橡胶分子链的动态响应特性密切相关。在周期性压缩—回弹过程中, 分子链段的不可逆位移导致机械能向热能的持续转化, 这种转化效率与橡胶的玻璃化转变特性存在直接关联。胎面与路面的接触摩擦包含宏观滑动与微观粘着双重机制, 其强度受表

面花纹设计与材料硬度匹配度的共同影响。轮胎在高速旋转时引发的空气湍流形成附加阻力, 这种阻力与轮胎轮廓的形状密切相关。因此在轮胎设计中, 减少材料的滞后损失和优化轮胎的外形, 对于减少轮胎滚动阻力具有重要意义。

1.2 影响因素

轮胎滚动阻力的大小受到多种因素的影响, 其中材料特性、结构参数和使用条件是最为关键的影响因素。

材料方面, 橡胶填料分散状态与界面结合强度决定其损耗特性; 通过大量试验数据体现, 弹性模量与滞后损失呈负相关, 弹性模量越低, 相同外力下变形越大, 滞后损失越显著; 当工作温度接近或低于玻璃化温度时, 橡胶刚度增加, 弹性下降, 滞后损失激增。

结构参数方面, 接地面积与滚动阻力正相关, 接触面积扩大会加剧机械摩擦与滞后损耗; 胎体刚度不足导致过度变形增加损耗, 刚度过高则会牺牲轮胎的舒适性与抓地力。

使用条件中, 胎压、载荷与温度是构成主要外部变量。低胎压、高载荷及高温环境均会加剧轮胎变形, 导致滚阻上升; 低温环境下橡胶弹性降低, 滞后损失增大, 降低轮胎的滚阻性能。

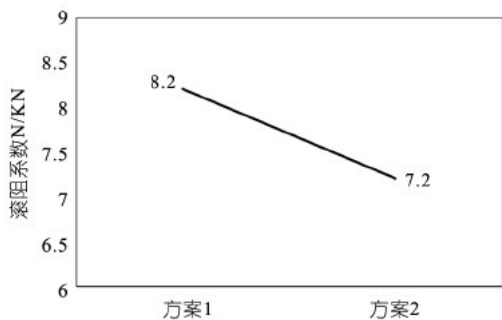
作者简介: 唐俊萍 (1974—), 女, 学士, 高级工程师, 主要从事轮胎研究和管理工作的。

2 低滚阻轮胎配方设计

2.1 溶聚丁苯橡胶 (SSBR) 与白炭黑协同效应

轮胎配方中, 溶聚丁苯橡胶 (SSBR) 与白炭黑的协同作用是降低滚动阻力的核心机制^{[1],[3]}。SSBR (牌号 F2150) 凭借低分子链内摩擦与低温性能, 通过聚合工艺精确调控乙烯基与苯乙烯含量, 为性能优化提供了一定的空间; 白炭黑 (如 UL7000GR) 作为高比表面积补强剂, 其分散性与活性位点可显著提升橡胶强度与耐磨性能。二者复合时产生特殊相互作用, 形成物理交联与化学吸附网络, 有效改善轮胎综合性能。

研究表明, 选用 245/45R19 规格进行试验验证, SSBR (牌号 F2150) 与高分散白炭黑 (UL7000GR) 的复合配方中, 以及当高分散白炭黑 (UL7000GR) 用量从 40 份增至 80 份时, 轮胎的滚动阻力系数由 8.2 N/kN 降至 7.2 N/kN (见图 1), 这一结果表明, 复合配方中白炭黑高的活性位点与 SSBR 分子链形成强状的网络结构, 限制分子链运动, 减少动态变形中的能量损耗, 而且随着白炭黑用量的增加, 其与 SSBR 的协同效应更加显著, 能够进一步降低轮胎的滚动阻力。



注：方案1：SSBR+40份白炭黑；方案2：SSBR+80份白炭黑

图1 不同白炭黑份数对应轮胎滚阻系数

2.2 环保芳烃油与硅烷偶联剂优化

环保芳烃油 (TDAE) 与硅烷偶联剂 (TESPT) 在轮胎配方中的协同作用也可有效优化轮胎的综合性能。TDAE 作为软化剂, 通过降低胶料粘度, 同时促进白炭黑在橡胶基体中的分散性, 进而降低滚动阻力并提升耐磨性。硅烷偶联剂 (TESPT) 则通过化学反应在白炭黑与橡胶间形成共价键, 增强界面结合力, 显著提升材料力学性能。

实验表明, 添加 8 份 TESPT 与 8 份 TDAE 可显著改善白炭黑的分散性和材料的力学性能。其作用机理为: TESPT 分子一端与白炭黑表面羟基反应生成硅氧烷键, 另一端与橡胶分子链交联, 形成稳固的界面

结合 (见图 2); TESPT 通过降低胶料粘度促进白炭黑均匀分散, 使硫化胶在 50~60 °C 的损耗因子 ($\tan\delta$) 降低 15% (见图 3), 有效减少动态变形中的能量损耗, 降低轮胎的滚动阻力^[2]。

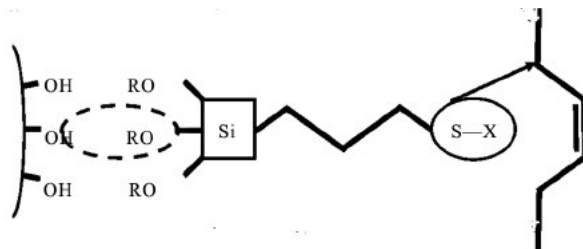


图2 白炭黑反应后界面结构

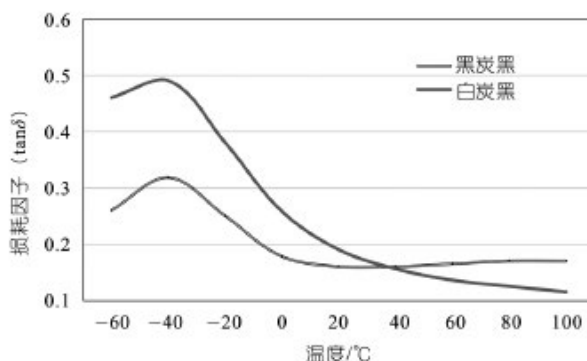


图3 添加硅烷偶联剂 (TESPT) 降低硫化胶的损耗因子

3 轮胎结构优化设计

3.1 胎面花纹设计

胎面花纹作为轮胎与地面直接接触的关键部件, 其设计对滚动阻力、抓地力及静音性能起决定性作用。创新花纹设计是新能源汽车轮胎实现低滚阻与高性能平衡的核心技术路径。

非对称不等节距花纹排列技术通过对主沟槽节距差异的优化排列, 来调整接地压力分布, 有效破坏共振频率, 实现滚动噪音的降低与操控性能的提升。实测数据显示, 采用 5 个不等距花纹块及沟槽节距差异设计 (如图 4), 轮胎的滑行距离较传统设计提升 3.8%, 在相同工况下可延长车辆的续航里程。

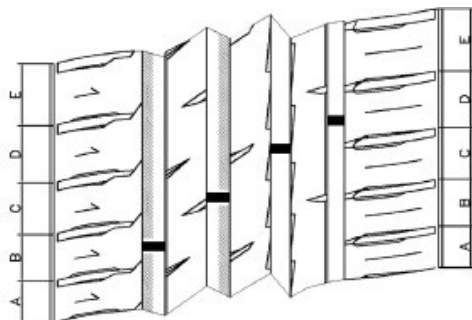


图4 不等节距花纹块及沟槽节距设计

采用封闭式胎肩沟槽设计（见图 5）来优化胎肩的花纹结构，有效抑制泵气效应产生的噪音。当轮胎滚动时，封闭式沟槽减少了空气在沟槽内的压缩与释放过程，使泵气噪音降低 2~3 dB，显著改善车内噪音，实现了滚动阻力与静音性能的协同优化。

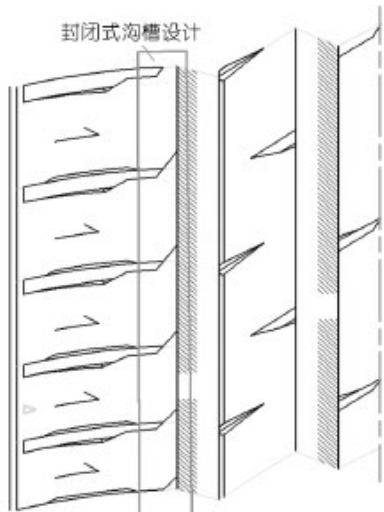


图 5 封闭式胎肩沟槽设计

3.2 轻量化设计

在新能源汽车对续航里程与能效要求提升的背景下，轻量化设计成为降低滚动阻力的又一关键路径。

胎体作为轮胎骨架，采用芳纶 / 尼龙复合帘线这种新型材料应用与结构优化，在保证强度与安全性的前提下实现胎体减重，可有效减少滚动能耗。芳纶纤维具有高强度、高模量、低滞后损失及低密度特性与尼龙帘线优异的柔韧性及耐疲劳性能结合，赋予了轮胎较轻质量下具有较低的滚阻系数。

实现轻量化另一个措施是减浅胎面花纹深度，来减少轮胎重量，可降低滚动过程中因花纹变形产生的滞后损耗。同时采用非均匀厚度胎侧结构设计，优化肩部、胎圈等高应力区的胎侧厚度，减薄中部低应力区的胎侧厚度，这种差异化设计在保证结构强度的前提下，有效降低轮胎重量，从而减少滚动阻力。

实验数据显示，多种轻量化技术协同作用，轮胎滚动阻力系数降低 8%~10%，轮胎重量减少 6%~8%，显著提升车辆的续航里程与能效表现（见图 6）。

3.3 轮廓参数优化

轮胎轮廓参数的设计对滚动阻力与接地性能也具有显著影响。本设计采用增大轮胎与路面的接地宽度，以及冠部采用多段弧设计来增大胎面弧度半径（见图 7），使得轮胎冠部接地压力分布均匀而且更趋分散，

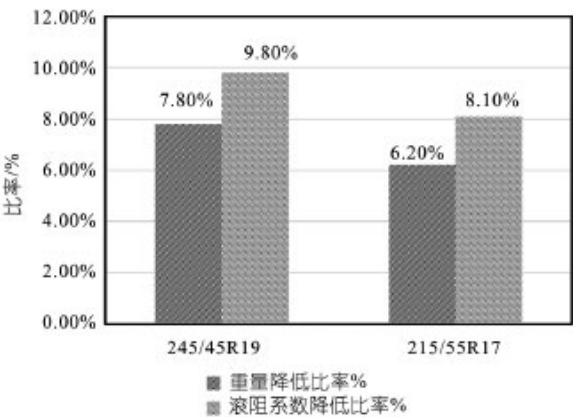


图 6 多种轻量化方案实施滚阻系数及重量降低情况

有效缓解局部应力集中现象，在保持结构强度的前提下降低轮胎滚动阻力。

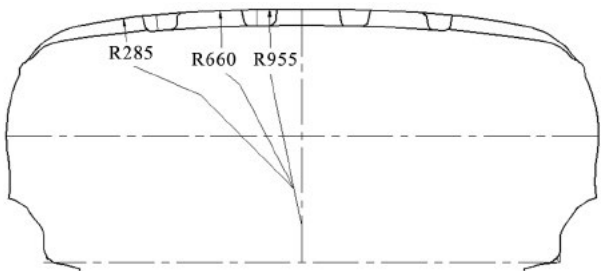


图 7 多段弧轮廓设计

4 工艺优化技术

4.1 混炼工艺

在低滚阻轮胎制造过程中，胶料混炼质量起决定性作用。串联式密炼机作为一种先进的混炼设备，通过两段式混炼工艺，使高份数白炭黑等填料在橡胶中的分散度得到较大的提升，有效地抑制填料团聚，增强界面相互作用，显著提升填料分散性与混炼效率，成为优化胶料性能的关键设备。

实验数据表明，采用该工艺可实现高份数白炭黑均匀分散，胶料的 Payne 效应也得到很大幅度的降低（见表 1），降低胶料的滞后损失，从而降低轮胎的滚动阻力。

表 1 不同密炼机混炼效果及滚阻系数变化情况		
性能指标	串联式密炼机	传统剪切型密炼机
白炭黑分散度	团聚体尺寸减小	团聚体尺寸较大，分散不均
Payne 效应降低幅度 / %	25%~30%	15%~20%
滚动阻力系数降低 / %	8%~10%（对比传统工艺）	5%~8%（依赖配方优化）

4.2 硫化工艺

硫化工艺也是轮胎制造的核心工序之一，高温氮

气硫化作为先进工艺, 凭借氮气的热稳定性与化学惰性, 优化热量传递方式, 稳定的硫化温度改善了胶料交联密度, 形成三维网状结构, 使得胶料分布更趋合理, 赋予轮胎较好的物理机械性能。实验表明, 该硫化工艺可以使轮胎滚动阻力降低 3%~5% (见图 8), 同时提升轮胎的耐磨性与抗撕裂性能。

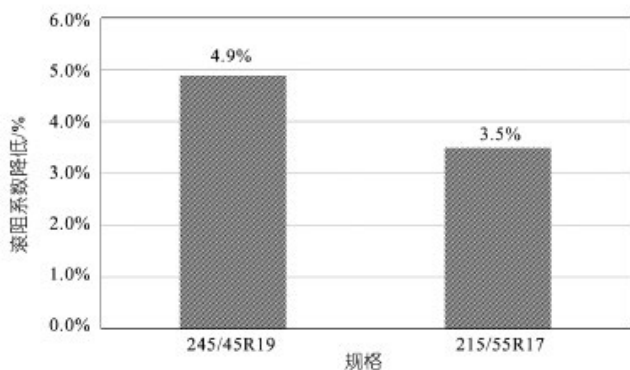


图 8 氮气硫化工艺滚阻系数降低情况

5 性能验证与测试

为验证改进方案对滚动阻力的优化效果, 在标准测试条件下开展性能评估。结果显示: 改进后的新能源轮胎 245/45R19 滚阻系数从 8.2 N/KN 降至 6.8 N/KN, 降幅达 17.07%, 湿地性能指数由 1.42 提升至 1.56, 提升 9.86%, 提升了车辆的续航里程, 增强湿滑路面的抓地力, 降低打滑风险, 保障行车安全。

6 结论

本研究针对新能源汽车轮胎开展系统性降阻优

化, 通过配方、结构与工艺的协同创新, 成功开发出高性能专用轮胎, 滚动阻力系数降至 6.8 N/KN, 较传统产品降低 17.07%, 显著提升续航能力。

(1) 配方设计构建了高性能橡胶体系: 采用端基改性溶聚丁苯橡胶 (SSBR) 结合高分散白炭黑 (UL7000GR) 填充、硅烷偶联剂 (TESPT) 界面改性工艺, 形成相互作用网络。实验显示, 该体系使硫化胶损耗因子 ($\tan\delta$) 降低 15%, 有效抑制了填料团聚并降低滞后损失。

(2) 结构优化采用三大创新技术: 胎面花纹不等距结构设计、轮胎轻量化设计以及轮廓参数的优化和创新, 在保障轮胎安全性能的同时, 实现较低滚动阻力。

(3) 工艺技术方面: 采用串联式密炼机可以提高白炭黑的分散能力, 高温氮气硫化减少交联密度梯度。二者协同作用提升了轮胎动态力学性能, 最终实现滚阻与综合性能的平衡。

该成果通过材料—结构—工艺的深度融合, 为新能源汽车提供低滚阻轮胎解决方案, 具有显著的产业应用价值。

参考文献:

- [1] 沈梅, 赵树高. 白炭黑品种及用量对 SSBR/BR 并用胶性能的影响 [J]. 特种橡胶制品, 2013, 2(34):13-18.
- [2] 赵又群, 何鲲鹏, 时西芳. 汽车轮胎滚动阻力研究综述 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2024-1.
- [3] 顾高照, 等. 低滚动阻力轿车轮胎胎面胶配方研究 [J]. 轮胎工业, 2013.

Research on collaborative design of low rolling resistance performance for new energy tires

Tang Junping, Liu Yundian, Shang Qingren, Chen Shaomeng, Liu Jizhen, Chen Guosheng, Wang Hongjuan
(Shandong Wanda Baotong Tire Co. LTD., Dongying 257500, Shandong, China)

Abstract: In response to the demand for enhancing the cruising range of new energy vehicles, this study constructs a three-dimensional collaborative design system for low rolling resistance tires. By utilizing end-group modified solution-polymerized styrene-butadiene rubber combined with high dispersion silica filling technology, optimizing tread pattern design, lightweight design, and optimizing Contour parameters, as well as adopting tandem mixing and high-temperature nitrogen vulcanization processes, the collaborative design of material-structure-process ensures tire safety performance while achieving lower rolling resistance, providing a low rolling resistance solution for new energy vehicles.

Key words: new energy vehicles; three-dimensional collaborative design system; low rolling resistance tires

(R-03)