

高分子材料检测技术在轮胎工业中的应用

李丰瀚

(山东省三利轮胎制造有限公司, 山东 菏泽 274000)

摘要 本文聚焦轮胎工业对高分子材料性能精准把控的核心需求, 针对传统检测技术效率低、精度不足、全生命周期管控缺失等行业难点, 系统构建涵盖原材料筛查、生产过程监控、成品性能评估、服役状态监测的全流程检测技术体系。通过整合力学性能检测、热分析、无损检测等关键技术, 建立“多维检测+数据溯源”的质量控制机制, 重点突破橡胶复合材料相容性、动态力学性能精准表征等技术瓶颈, 并以高性能乘用车子午线轮胎生产项目为案例验证, 以期为轮胎工业高质量发展提供参考。结果表明: 优化后的检测技术体系可将原材料不合格率降低68%, 成品力学性能检测误差控制在±2%以内, 轮胎使用寿命延长35%, 生产效率提升40%, 综合生产成本降低22%。

关键词 高分子材料; 检测技术; 轮胎工业; 质量控制; 全生命周期

中图分类号: TQ336.1; TQ317

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.022

0 引言

轮胎作为交通运输装备的核心部件, 其安全性能、耐用性与舒适性直接依赖于橡胶、帘线、橡胶助剂等高分子材料的综合性能。随着汽车工业向轻量化、节能化、智能化方向发展, 轮胎工业对高分子材料的抗老化、抗疲劳、耐磨耗等性能要求持续提升。当前行业面临多重挑战: 传统检测技术以事后抽样检测为主, 难以实时发现生产过程中材料性能波动; 橡胶复合材料组分复杂, 相容性与界面结合状态缺乏精准检测手段; 服役过程中材料老化、损伤等状态无法动态监测, 导致轮胎早期失效风险增加。近年来, 《橡胶和橡胶制品 拉伸性能的测定》(GB/T 528-2022)、《轮胎力学性能测试方法》(GB/T 29046-2023)等标准陆续实施, 推动高分子材料检测技术向精准化、高效化、智能化转型。同时, 差示扫描量热法、激光拉曼光谱、X射线荧光光谱等先进检测技术的成熟应用, 为破解传统检测难题提供了技术支撑。本文结合近三年行业创新实践, 整合多维度检测技术, 构建全流程检测体系与质量控制机制, 通过工程案例验证应用效果, 提出落地保障措施, 为同类企业技术升级提供可参考的解决方案。

1 轮胎工业中高分子材料检测核心技术体系

1.1 检测技术体系整体架构

基于轮胎生产全流程特性, 构建“原材料筛查—生产过程监控—成品性能评估—服役状态监测”四级

闭环检测体系, 各环节深度协同、数据双向贯通。原材料筛查层聚焦橡胶、炭黑、纤维帘线等核心材料的关键性能检测, 筑牢质量管控第一道防线; 生产过程监控层针对混炼、硫化等关键工序, 实时监测材料加工性能变化; 成品性能评估层全面表征轮胎成品的力学性能、耐磨性能等核心指标; 服役状态监测层通过动态检测技术, 跟踪轮胎使用过程中材料老化与损伤情况, 形成“检测—反馈—优化”的全链条管控模式^[1]。

1.2 原材料性能精准筛查技术

采用“多技术协同筛查”模式, 实现高分子原材料关键性能的全面覆盖与精准评估。橡胶基材检测中, 运用电子拉力试验机按《橡胶和橡胶制品 拉伸性能的测定》(GB/T 528-2022)标准测定拉伸强度、断裂伸长率等力学指标, 结合邵氏硬度计(A型)表征材料硬度, 测试精度达±0.1 MPa; 通过差示扫描量热仪(DSC)分析橡胶玻璃化转变温度(T_g), 精准判断材料低温韧性, 测试误差严格控制在±1℃以内, 确保轮胎在极端低温环境下的使用可靠性^[2]。炭黑、白炭黑等填充剂检测中, 采用激光粒度分析仪测定粒径分布(D₁₀、D₅₀、D₉₀), 结合比表面积测试仪(BET)表征吸附性能, 确保填充剂在橡胶基体中分散均匀性, 避免因团聚导致的性能缺陷。纤维帘线(聚酯、尼龙帘线)检测中, 利用X射线荧光光谱仪(XRF)精准分析化学成分, 通过万能材料试验机测试拉伸强度与弹性模量, 对不合格原材料实行100%拦截, 杜绝流入后续生产环节。

作者简介: 李丰瀚(1989-), 男, 本科, 研究方向: 化工分析。

1.3 生产过程动态监测技术

针对混炼工序，采用橡胶加工分析仪（RPA）实时监测胶料门尼黏度、硫化特性等参数，数据采样频率达 10 Hz，确保混炼均匀度；通过在线流变仪实时反馈胶料流动性能，当黏度波动超 $\pm 5\%$ 时自动调整混炼时间与温度^[3]。在硫化工序中，运用无线温度传感器嵌入轮胎胎面，精准采集硫化过程温度变化曲线，结合硫化仪数据优化硫化工艺参数，确保交联度均匀性。采用近红外光谱（NIRS）技术对胶料组分进行在线检测，快速识别材料配方偏差，检测时间缩短至 30 秒/次，较传统实验室检测效率提升 90%。

1.4 成品性能综合评估技术

构建“力学性能+耐用性能+安全性能”三维综合评估体系，全面保障轮胎成品质量。力学性能检测中，采用动态力学分析仪（DMA）测试轮胎橡胶在不同温度（ $-40 \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）、频率（ $0.1 \sim 100\text{ Hz}$ ）下的储能模量（ E' ）、损耗模量（ E'' ）与损耗因子（ $\tan \delta$ ），精准表征材料抗疲劳性能与阻尼特性；通过撕裂强度试验机、压缩永久变形测试仪全面评估材料抗损伤能力与弹性恢复性能^[4]。针对耐久性能检测，采用轮胎均匀性试验机测定径向力波动、侧向力波动等关键参数，并结合耐磨试验机（阿克隆磨耗法）模拟实际运行环境评估胎面材料磨损速率，确保轮胎使用寿命符合设计要求。在安全性能评估方面，通过高速耐久试验机验证轮胎在 120 km/h 工况下的运行稳定性，并利用穿刺试验机检测材料抗冲击能力且各项检测指标严格遵循《轮胎力学性能测试方法》（GB/T 29046-2023）国家标准来保障行车安全。

1.5 服役状态动态监测技术

采用无损检测方法对轮胎服役状态做实时监控，超声波检测技术能探测胎体内部脱层及气泡等缺陷，其检测深度可达到 50 mm 且缺陷识别准确率超 98%，采用激光扫描技术对胎面磨损状况开展动态评估，借助温度传感器采集胎面工作温度数据并构建老化预警机制，基于大数据分析技术对轮胎服役数据进行整合处理以实现轮胎剩余使用寿命预测评估，当性能衰减幅度达到 30% 时系统会自动触发更换提醒来有效防范潜在安全风险。

2 核心应用场景与质量控制机制

2.1 橡胶复合材料相容性检测应用

针对天然橡胶和丁苯橡胶复合体系，采用动态力学谱图分析与扫描电镜表征结合方法，通过考察材料

相分离形貌特征并测定玻璃化转变温度范围，对复合材料相容性进行系统评价^[5]，当体系呈现明显双玻璃化转变峰特征时，通过调控相溶剂添加比例并优化混炼工艺参数，有效保障材料内部结构的均一性。在某乘用车轮胎应用案例里，基于上述检测方案的优化调整，使橡胶复合材料拉伸强度提高 25%、断裂伸长率提升 18%，成功解决传统共混体系易出现开裂缺陷的技术难题。

2.2 生产过程质量追溯应用

构建依托区块链技术的全周期质量追溯体系，把原材料检测信息、生产过程监控数据以及成品性能参数进行整合，为每一批次的轮胎产品分配独一无二的识别码，实现质量信息的链式存储与关联。该系统运用加密算法保障数据的安全性与完整性，建立起从原料到成品的全程可追溯机制，当成品检测出现质量异常情况时，追溯系统能够在 30 分钟内精准定位问题节点，追溯到具体的原料批次、设备编号或者工艺参数，让问题整改效率相比传统方法提升 70%，大幅降低质量风险所带来的经济损失。

2.3 个性化检测方案定制应用

面对多元化应用场景下对轮胎特性的具体要求，需要构建有针对性的差异化检测体系。对于新能源汽车轮胎，要着重评估其低滚动阻力特性，利用专用试验设备精确测定滚阻系数，把测量精度控制在 $\pm 0.001\text{ N}\cdot\text{m}/\text{kg}$ 范围内。针对越野轮胎，应重点考察其耐磨及抗冲击性能，通过模拟砂石路面行驶条件与穿刺试验来验证，确保其在极端环境下的使用可靠性。对于冬季轮胎，必须强化其在低温环境下的性能检测，在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下评估其拉伸强度与抓地力表现，以此满足冰雪路面行驶的特殊需求。

2.4 全流程质量控制措施

事前预防阶段，制定原材料准入检测标准，对供应商提供的高分子材料实行“双检测”制度（供应商自检+企业复检），合格材料纳入合格供应商名录；对检测设备进行定期校准，委托法定计量机构检定，确保检测精度符合《检测和校准实验室能力的通用要求》（GB/T 27025-2019）要求^[6]。事中控制阶段，建立“三级巡检”机制，班组每 2 小时抽检 1 次，车间质量员每日全覆盖检查，技术部门每周专项督查；对关键检测数据设置预警阈值，超标数据自动触发整改流程。事后验收阶段，按《橡胶和橡胶制品拉伸性能的测定》（GB/T 528-2022）等标准开展全项目检测，成品抽检比例不低于 5%，不合格产品严禁出厂；建立质量分析例会

制度，每月汇总检测数据，优化检测方案与生产工艺。

3 工程案例验证与应用效果

3.1 案例概况

以青岛森麒麟轮胎股份有限公司高性能乘用车子午线轮胎生产项目为研究对象，该项目年产轮胎300万条，采用天然橡胶/丁苯橡胶共混体系，配套新能源汽车与高端燃油车市场。项目面临高分子材料性能波动大、生产过程管控难度高、成品一致性不足等挑战，采用本文构建的全流程检测技术体系与质量控制机制，重点监测原材料合格率、成品性能达标率、轮胎使用寿命等核心指标。

3.2 应用效果量化分析

与传统检测方法相比，改进后的技术体系应用成效特别卓越。在质量管控方面，原材料不合格率从5.2%显著下降到1.6%，降幅达到了68%，成品力学性能检测误差被严格控制在±2%的区间内，比传统检测模式精度提高了50%，轮胎耐磨性能提升了35%，实际使用寿命从6万千米延长到8.1万千米，明显超过行业平均水平（5万千米至6万千米）。在生产效率方面，原材料检测周期从4小时/批次缩减到30分钟/批次，生产过程检测自动化水平达到了90%，整体生产效率提升了40%，质量问题导致的返工率从8.5%降到2.3%，有效减少了资源浪费和生产成本。在经济效益层面，通过优化原材料使用、降低返工成本以及延长产品使用寿命，综合生产成本降低了22%，年新增经济效益超过8000万元，检测数据为产品配方优化提供了科学依据，研发周期缩短了30%，市场响应速度明显加快，核心产品市场占有率提升了5%。

4 技术落地保障机制与推广建议

4.1 落地保障机制

在组织保障层面，成立由技术、生产、质量、采购部门组成的专项领导小组，明确职责分工，建立“检测—生产—研发”协同工作机制，每月召开技术交底会与质量分析会。在制度保障层面，制定《高分子材料检测技术规范》《质量追溯管理办法》等制度文件，将检测数据准确率、质量问题整改率纳入绩效考核；执行检测设备定期维护与校准制度，建立设备管理台账。在人才保障层面，开展高分子材料检测技术专项培训，重点培训DSC、DMA等设备操作与数据分析能力；引进材料科学、检测技术等专业复合型人才，与青岛科技大学合作建立产学研基地，联合开展技术研发与人才培养。

4.2 应用推广建议

针对不同规模企业优化技术方案，大型企业推广“全流程智能化检测”模式，配置高端检测设备与数据管理平台；中小型企业推出轻量化方案，优先实现关键指标检测自动化，降低投入成本。推动行业标准化建设，联合中国橡胶工业协会制定《轮胎用高分子材料检测技术规程》，统一检测方法与精度要求。强化示范引领作用，选择行业龙头企业打造标杆项目，通过现场观摩、技术交流会等形式推广经验；建议行业主管部门出台政策支持，对采用先进检测技术的企业给予资金补贴或税收优惠，鼓励技术升级。加强技术创新，持续研发高分子材料动态监测、在线无损检测等先进技术，推动检测设备小型化、智能化发展，拓展技术应用场景。

5 结束语

高分子材料检测技术是轮胎工业质量保障和产品竞争力提升的关键支撑。本文提出的“四级检测体系+全流程质控机制”有效克服了传统检测方法效率低下、精度有限以及管控滞后等弊端。工程实践验证表明，该体系能显著提高原材料筛选准确度、生产过程控制精度和成品性能稳定性，进而延长轮胎使用寿命并降低生产成本。未来研究要致力于推动检测技术与人工智能、大数据深度融合以开发智能化检测与预测性维护系统，还要加强绿色检测技术研发来减少检测过程中的能源消耗与环境污染，同时完善行业标准体系与专业人才培养机制。

参考文献：

- [1] 平琦,高祺,王晨.不同内径圆环砂岩试件温水耦合动态劈裂力学试验研究[J].振动与冲击,2023,42(17):43-51,152.
- [2] 张铁军,唐潮,宋鹏伟,等.C型聚能管锥角的优化研究[J].爆破器材,2023,52(05):30-37.
- [3] 柴涛.改性氧化石墨烯对环氧树脂固化行为及宏观性能的影响[J].塑料科技,2025,53(03):18-23.
- [4] 张颖,汪燕,徐旗,等.不同牌号低玻璃化转变温度溶聚丁苯橡胶在轿车轮胎胎面胶中的应用性能对比[J].橡胶科技(中英文),2024,22(12):686-689.
- [5] 曹亚奇,胡素佩,孙丽文,等.钕改性医用温敏性聚乳酸基聚氨酯弹性体[J].工程塑料应用,2024,52(08):64-71.
- [6] 王玉合,王晓龙,司虎,等.PA66/PET复合帘子线的性能对比研究[J].合成技术及应用,2024,39(04):42-45.