

农村公路建设中废旧轮胎橡胶改性沥青的低碳应用与性能研究

郭秀珍 陈慧颖

内蒙古自治区通辽市科左中旗地方道路养护中心 内蒙古 通辽 029300

摘要：随着我国“双碳”战略目标的深入推进和乡村振兴战略的全面实施，农村公路作为连接城乡、服务“三农”的重要基础设施，其绿色、低碳、可持续发展已成为行业关注焦点。将废旧轮胎加工成胶粉用于制备橡胶改性沥青（RMA），不仅可实现固废资源化利用，还能显著提升沥青路面的路用性能，契合农村公路建设对经济性、耐久性与环保性的多重需求。本文系统综述了橡胶改性沥青的技术原理、制备工艺及其在国内外的应用现状；重点分析了其在农村公路环境下的适用性，包括高温稳定性、低温抗裂性、抗老化性、抗疲劳性及降噪性能；结合我国农村公路特点，提出了RMA材料设计、施工控制及质量验收的关键技术要点；最后，探讨了当前推广中存在的政策、标准与成本障碍，并提出针对性建议。研究表明，废旧轮胎橡胶改性沥青在农村公路中具有广阔的应用前景，是实现交通领域减污降碳协同增效的有效路径。

关键词：农村公路；废旧轮胎；橡胶改性沥青；低碳；路用性能；资源循环利用

引言

截至2024年底，我国农村公路总里程突破500万公里，实现具备条件的乡镇和建制村100%通硬化路，但大规模建设与养护中传统沥青混合料存在与国家“双碳”目标矛盾的问题，且我国每年约产生4亿条废旧轮胎，填埋或焚烧处理会造成二次污染，探索其高值化、规模化利用是破解“黑色污染”的关键。将废旧轮胎制成胶粉掺入基质沥青制备橡胶改性沥青是兼具环境与工程价值的技术方案，该技术起源于美国，在北美、欧洲广泛应用，我国部分省份有试点，但针对农村公路的研究与实践不足。农村公路有自身特点，对路面材料性能要求与高等级公路不同，传统SBS改性沥青成本高、依赖进口原料，难以在农村大规模推广，而橡胶改性沥青原料来源广、成本低、工艺相近且特性适合农村公路需求。本研究旨在梳理其技术特性，结合农村公路工况评估路用性能与低碳效益，为标准化、规模化应用提供支撑与指导，助力交通强国与美丽乡村建设。

1 橡胶改性沥青的技术原理与制备工艺

1.1 技术原理

橡胶改性沥青的核心在于废旧轮胎胶粉与基质沥青之间的物理-化学相互作用。胶粉主要由天然橡胶、合成橡胶（如丁苯橡胶）、炭黑及少量硫化剂组成。当胶粉在高温（通常180–220℃）下与沥青共混时，发生以下过程：①溶胀：沥青中的轻质油分渗透进入胶粉颗粒内部，使其体积膨胀，软化胶粉结构。②脱硫/解聚：在

高温和剪切作用下，胶粉中的硫键部分断裂，大分子链解聚，形成具有一定流动性的聚合物网络。③相容与稳定：改性后的胶粉与沥青形成稳定的两相或多相体系，显著提升沥青的黏弹性、延展性和内聚力。根据胶粉粒径、掺量及反应程度，RMA可分为“干法”和“湿法”。干法直接将胶粉作为细集料加入混合料拌和，工艺简单但改性效果有限；湿法则先将胶粉与沥青预混制成成品改性沥青，再用于拌和，改性更充分，性能更优，是当前主流技术路线。

1.2 制备工艺

湿法制备RMA的关键参数包括：①胶粉来源与粒径：推荐使用常温粉碎法制备的40–80目胶粉，粒径均匀，活性高。②掺量：通常为基质沥青质量的15%–25%，农村公路可取18%–22%以平衡性能与成本。③反应温度与时间：190–210℃下反应45–90分钟，辅以高速剪切（3000–5000rpm）促进溶胀与分散。④添加剂：可添加少量多硫化物或芳香油促进脱硫，提高储存稳定性。制备完成后需进行离析试验、黏度测试等，确保产品均匀稳定。

2 橡胶改性沥青在农村公路中的适用性分析

2.1 高温稳定性

橡胶改性沥青由于胶粉在沥青中形成的弹性网络结构，显著提高了材料的高温黏度和抗变形能力。实验研究表明，当胶粉掺量达到20%时，改性沥青的软化点可较基质沥青提高8至12℃，60℃动力黏度提升2至3倍，动态

剪切流变仪 (DSR) 测试显示其复数模量显著增大, 相位角减小, 表明材料在高温下更接近弹性体行为^[1]。这些性能的提升直接转化为混合料动稳定性度的大幅提高, 有效抑制了重载农用车辆反复碾压下产生的永久变形, 从而延长了路面使用寿命, 特别适用于穿村过镇、集市周边等局部交通密集路段。

2.2 低温抗裂性

在我国北方及高海拔农村地区, 冬季气温常低于-20℃, 传统沥青因脆性增加而容易产生低温收缩裂缝。橡胶改性沥青中的胶粉组分具有良好的弹性与应力吸收能力, 能够在低温环境下有效缓解温度应力集中, 延缓裂缝的萌生与扩展。通过弯曲梁流变试验 (BBR) 对比发现, RMA在-20℃下的劲度模量明显低于基质沥青, 同时m值 (表征应力松弛速率) 更高, 说明其在低温荷载作用下能更快地释放内部应力。此外, 断裂能测试结果表明, RMA的低温断裂韧性可提升30%以上。这种优异的低温性能对于减少农村公路春季翻浆、冻融循环导致的网状开裂具有重要意义, 尤其适合在东北、西北等寒冷地区推广应用。

2.3 抗老化与耐久性

农村公路普遍面临养护资金不足、周期较长的现实困境, 通常5至8年才进行一次中修或大修, 因此对路面材料的长期耐久性提出了更高要求。橡胶改性沥青在这方面展现出独特优势。一方面, 胶粉本身含有大量炭黑, 这是一种高效的紫外线吸收剂, 能够有效屏蔽阳光中的紫外辐射, 减缓沥青组分的光氧化进程; 另一方面, 胶粉网络结构对沥青分子起到一定的“包裹”和“固定”作用, 降低了轻质组分的挥发速率。旋转薄膜烘箱试验 (RTFOT) 模拟短期老化后, RMA的针入度保留率通常比基质沥青高出10%至15%, 延度损失也更小, 说明其在施工和早期使用阶段的老化程度更低。长期性能预测模型也表明, RMA路面的使用寿命可延长20%以上, 这对于降低全寿命周期养护成本具有显著价值。

2.4 抗疲劳性能

尽管农村公路整体交通量较小, 但农用运输车辆往往轴载集中、行驶速度慢, 对路面产生高频次、低幅值的重复荷载作用, 易引发疲劳开裂。橡胶改性沥青凭借其高弹性恢复率 (通常大于70%) 和较低的相位角, 在循环荷载下表现出优异的能量耗散控制能力。这意味着材料在每次加载-卸载过程中积累的不可逆损伤较少, 从而延缓疲劳裂缝的形成^[2]。实验室四点弯曲疲劳试验结果显示, 在相同应力水平下, RMA混合料的疲劳寿命可达基质沥青混合料的1.5至2倍。这一特性使得RMA特别适用

于连接农田、果园、养殖场等频繁通行农用车辆的支线道路, 有助于提升路面结构的整体耐久性。

2.5 降噪与舒适性

随着美丽乡村建设的推进, 农村居民对生活环境质量的要求不断提高。传统密级配沥青路面在车辆行驶时会产生明显的轮胎-路面噪声, 尤其在穿村路段易造成扰民问题。橡胶改性沥青因胶粉颗粒的存在, 使混合料内部形成微孔隙结构, 增加了路面的吸声与缓冲能力。实测数据表明, RMA路面可降低交通噪声3至5分贝 (A), 相当于噪声能量减少约50%。同时, 胶粉的弹性特性也提升了路面的柔韧性, 使行车更加平稳舒适。这一附加效益不仅改善了村民的生活环境, 也符合农村公路“安全、绿色、宜居”的发展理念。

2.6 经济性分析

经济性是决定新技术能否在农村地区落地的关键因素。以某中部省份典型农村公路项目为例, SBS改性沥青的市场单价约为5500元/吨, 而采用本地回收废旧轮胎制备的橡胶改性沥青 (含胶粉采购、加工及改性成本) 单价约为4200元/吨, 每公里双车道可节约材料成本8至12万元。更重要的是, 废旧轮胎的本地化回收利用避免了长途运输和填埋处置费用, 部分地区甚至可获得政府补贴。虽然RMA的拌和与摊铺温度略高, 能耗略有增加, 但其延长的使用寿命和减少的养护频次可在全寿命周期内实现显著的成本优势。因此, 从长期投资回报角度看, RMA在农村公路中具有突出的经济可行性。

3 农村公路应用关键技术要点

3.1 材料设计

在农村公路应用中, 橡胶改性沥青的材料设计需兼顾性能、成本与施工便利性。基质沥青宜选用70号或90号道路石油沥青, 其针入度适中, 既能保证与胶粉的良好相容性, 又避免因过软导致高温稳定性不足。胶粉质量是决定改性效果的关键, 应严格控制金属含量低于0.1%、纤维杂质少于0.5%, 水分含量不超过0.5%, 且无刺激性气味, 以确保反应活性与储存稳定性。混合料类型推荐采用AC-13或AC-16密级配结构, 设计空隙率控制在4%至6%之间, 既保证密水性, 又保留一定弹性空间以发挥胶粉的缓冲作用^[3]。此外, 应通过马歇尔试验或Superpave设计方法优化油石比, 确保混合料具有足够的稳定度和耐久性。

3.2 施工控制

施工过程是保障RMA路面质量的核心环节。拌和温度应控制在185℃至195℃之间, 过高会导致沥青老化, 过低则胶粉溶胀不充分。对于湿法工艺, 可按常规改性

沥青流程操作；干法则需适当延长拌和时间10至15秒，确保胶粉均匀分散。摊铺时应保持连续作业，初压温度不得低于150℃，并采用紧跟慢压原则，避免胶粉冷却过快影响压实效果。由于RMA黏度较高，压路机宜选用大吨位双钢轮配合胶轮组合碾压，以提高密实度。开放交通前，必须待路面表面温度降至50℃以下，防止早期车辙或轮迹形成。整个施工过程应加强温度监控与过程记录，确保工艺参数受控。

3.3 质量验收

除执行《公路工程质量检验评定标准》中的常规检测项目外，针对橡胶改性沥青路面，还应增加专项验收指标。对于湿法RMA，135℃布氏黏度不应超过3.0帕·秒，以保证泵送与拌和性能；弹性恢复率应大于60%。对于干法混合料，马歇尔稳定度需 ≥ 8 千牛，冻融劈裂强度比不低于80%，以验证其水稳定性。现场钻芯取样后，应重点检测空隙率、压实度及层厚是否符合设计要求。此外，建议在通车后1年内开展回访监测，重点关注裂缝、车辙等早期病害情况，为后续优化设计积累经验。

4 推广应用面临的挑战与对策

4.1 主要障碍

尽管橡胶改性沥青技术优势明显，但在农村公路中的规模化推广仍面临多重障碍。首先，现行国家及行业标准体系尚未将其纳入主流技术范畴，《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40)仅对SBS等聚合物改性沥青作出规定，缺乏针对RMA的统一技术指标和验收方法，导致设计单位和施工单位无所适从。其次，基层交通管理部门和施工企业对该技术的认知度普遍不足，部分人员仍存有“废旧材料性能差”“易老化”等误解，影响决策信心^[4]。再次，国内胶粉产业链尚不成熟，生产企业规模小、工艺落后，产品质量波动大，难以满足工程对稳定性的要求。最后，农村公路项目普遍实行低价中标机制，而RMA虽长期经济性好，但初期材料单价仍高于普通沥青，导致业主倾向选择传统方案。

4.2 对策建议

为突破上述瓶颈，亟需采取系统性措施。一是加快标准体系建设，建议由交通运输部牵头，联合科研机构与企业，尽快出台《农村公路橡胶改性沥青应用技术指南》，明确材料性能、配合比设计、施工工艺及验收标

准，为工程应用提供权威依据。二是开展区域性示范工程，在东、中、西部选取气候、交通、经济条件各异的县市，建设10至20个RMA农村公路样板路段，通过长期性能监测与成本效益分析，形成可复制、可推广的经验。三是完善废旧轮胎回收利用产业链，推动落实生产者责任延伸制度，鼓励建立“回收—破碎—胶粉—改性沥青”一体化基地，提升原料供应的稳定性与质量。四是强化政策激励，对采用RMA的农村公路项目给予每吨沥青100至200元的财政补贴，或将其纳入绿色金融支持目录，降低初期投入压力。五是加强技术培训与宣传，组织面向县级公路局、乡镇政府及施工队伍的专题培训班，普及RMA技术知识，消除认知误区，提升基层应用能力。

5 结语

本研究系统论证了废旧轮胎橡胶改性沥青在农村公路建设中的技术可行性、经济合理性与环境优越性。研究表明，RMA通过胶粉与沥青的物理化学作用，显著提升了高温稳定性、低温抗裂性、抗老化性及抗疲劳性能，完全满足农村公路的使用需求；结合农村公路特点，通过优化材料设计、严格施工控制、完善验收标准，可确保RMA路面工程质量；当前推广需突破标准缺失、产业链不健全等瓶颈，建议通过政策引导、示范引领与技术创新，推动RMA在农村公路中规模化应用。未来，随着“无废城市”建设和固废资源化技术的进步，橡胶改性沥青有望成为农村公路绿色建造的主流材料，为实现“双碳”目标与乡村振兴战略提供双重支撑。

参考文献

- [1] 朱贺贤.废旧轮胎胶粉改性沥青研究进展[J].山西交通科技,2025,(01):51-54+58.
- [2] 赵丹,舒艳,于滋涛.废旧轮胎橡胶粉改性沥青道路应用的环境影响综合评价[J].中国轮胎资源综合利用,2025,(10):37-39.
- [3] 朱宏睿.改性石油沥青在废旧轮胎再生胶中的增强机理与性能研究[J].中国轮胎资源综合利用,2025,(05):68-70.
- [4] 王国清,王瑞颖,秦禄生,等.废旧轮胎胶粉级配对橡胶沥青性能的影响[J].合成橡胶工业,2024,47(01):72-76.