

废旧路面材料在高速公路养护工程中的再生利用技术创新与实践

张 力

(陕西交通控股集团有限公司宜富分公司, 陕西 延安 727500)

摘 要 随着我国高速公路路网逐步进入大规模养护周期, 废旧路面材料的处置与资源循环利用成为行业发展的核心课题。传统填埋与堆放方式易造成资源浪费、土壤污染及土地占用, 与绿色低碳、可持续发展理念相悖。本文系统分析废旧路面材料的核心特性, 阐述其在高速公路养护工程中再生利用的多元价值, 重点梳理厂拌热再生、就地热再生、冷再生等技术的创新方向与工程实践成果, 以为高速公路绿色养护技术的推广应用提供参考。

关键词 废旧路面材料; 高速公路养护; 再生利用技术; 厂拌热再生技术; 就地热再生技术

中图分类号: U418

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.027

0 引言

我国高速公路总里程已稳居世界首位, 超过八成的已建成路网进入养护周期, 每年铣刨产生的废旧路面材料体量持续增长。传统填埋处置方式不仅造成大量不可再生资源的浪费, 还带来一系列生态环境风险, 与我国绿色交通发展与双碳战略目标相悖。废旧路面材料的再生利用, 是破解高速公路养护工程资源与环境双重约束的核心路径。本文围绕废旧路面材料的特性、应用价值、技术创新与实践展开系统分析, 为行业高质量发展提供参考。

1 废旧路面材料的特性

1.1 废旧路面材料的物理力学特性

高速公路废旧路面材料主要来自路面铣刨作业, 核心由长期服役后的矿质集料与老化沥青组成。经过多年重载交通与自然环境的耦合作用, 铣刨后的材料呈现出特定的粒径分布特征, 集料存在不同程度的破碎与磨损, 但其主体骨架强度与硬度仍能满足高等级路面材料的使用要求^[1]。附着在集料表面的老化沥青, 随着服役年限的增长出现组分迁移与性能劣化, 沥青的延度与黏结性下降, 高温稳定性相对提升, 不同路段的材料老化程度存在明显差异, 需通过针对性的性能调控实现再生利用。

1.2 废旧路面材料的材料组分稳定性

废旧路面材料的核心组分具有极强的化学与物理稳定性, 矿质集料的主要成分为玄武岩、石灰岩等硬质岩石, 经过长期服役不会出现有害化学组分的溶出,

也不会发生结构性的化学分解, 仅存在物理形态的破碎与磨损。老化沥青的组分变化以轻质组分挥发与沥青质聚合为主, 整体化学结构保持稳定, 不会产生有毒有害的次生污染物, 仅需通过再生剂的组分调节即可恢复部分核心性能^[2]。高速公路路面施工过程中执行严格的材料准入标准, 不同路段的原材料品质与级配设计差异较小, 使得废旧路面材料的组分波动范围可控, 具备规模化、标准化再生利用的基础条件。

1.3 废旧路面材料的环境影响特性

废旧路面材料的传统处置方式以露天堆存与填埋为主, 不仅占用大量土地资源, 还可能因雨水冲刷导致沥青组分渗入土壤与地下水, 造成周边生态环境的污染, 铣刨与运输过程中产生的粉尘与尾气也会加剧大气环境负担。再生利用可从源头规避这些环境风险, 通过对废旧材料的循环使用, 大幅减少石料开采活动对山体植被与水土保持的破坏, 降低新沥青生产与运输带来的能源消耗与碳排放。相较于传统新料铺筑工艺, 废旧路面材料的再生利用可显著降低公路养护工程的全周期环境影响, 契合绿色公路建设的核心要求。

2 废旧路面材料在高速公路养护工程中的再生利用技术应用的价值

2.1 全生命周期的经济成本优化价值

废旧路面材料的再生利用可从多个维度实现高速公路养护工程全生命周期的经济成本优化。再生技术可实现废旧材料的就地或就近循环利用, 大幅减少新集料与新沥青的采购量, 同时规避废旧材料的运输与

作者简介: 张力(1985-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 高速公路养护。

填埋处置费用，直接压缩工程的直接建设成本。针对高速公路半幅封闭施工的特点，再生技术尤其是就地再生工艺可实现一体化连续作业，大幅缩短施工工期，减少交通管制带来的通行效率损失与社会经济成本。通过精准的配合比设计与工艺控制，再生路面的服役性能可达到甚至超过传统新料路面，有效延长路面的大修周期，降低全生命周期内的养护频次与后续处置成本，实现长期的经济效益^[3]。

2.2 生态环境保护与双碳目标落地价值

废旧路面材料的再生利用是公路交通领域落实双碳战略目标的核心抓手之一。规模化应用再生技术，可大幅降低不可再生矿产资源的消耗，减少开山采石对区域生态系统的破坏，从源头保护山体植被与水土保持体系，规避废旧材料填埋带来的土壤与地下水污染风险。再生技术可显著降低公路养护工程的能源消耗与碳排放，相较于传统新料铺筑工艺，冷再生技术可减少九成以上的燃油消耗，热再生技术可减少半数以上的沥青生产碳排放，高比例再生混合料的应用可进一步放大减排效应。高速公路养护工程的体量大、标准化程度高，再生技术的规模化推广可形成显著的碳减排规模效应，助力绿色低碳交通体系的构建。

2.3 高速公路养护工程的质量提升价值

再生利用技术可针对性解决传统高速公路养护工程的质量难点，全面提升养护工程的建设质量与长期服役性能。传统铣刨重铺工艺中，新铺层与旧路面的结合面易出现粘结不良、应力集中等问题，是路面反射裂缝、层间滑移等病害的主要诱因，而再生技术尤其是就地再生工艺可实现旧路面材料的原位活化与连续铺筑，消除新旧路面的界面薄弱点，大幅提升路面结构的整体性与连续性。针对高速公路重载、高流量的服役特点，再生技术可通过精准的配合比设计与材料改性，定制再生混合料的抗车辙、抗疲劳、抗水损害等核心性能，适配不同路段的养护需求，有效延长路面的服役寿命，保障高速公路的通行安全与通行效率。

2.4 公路建设行业可持续发展的推动价值

废旧路面材料再生利用技术的创新与推广，可推动公路建设行业实现从线性发展模式向循环可持续发展模式的转型^[4]。随着我国高速公路路网全面进入养护周期，每年产生的废旧路面材料超过亿吨，传统处置方式已无法适配行业高质量发展的要求，再生利用技术的成熟应用，可构建公路建设领域生产—使用—再生—再使用的闭环资源循环体系，破解行业发展的资源与环境双重约束。再生技术的创新发展还可带动再生剂研发、专用施工设备制造、再生材料检测等相

关产业链的升级，提升我国公路养护技术的整体水平与国际竞争力，为全球同类型工程的绿色低碳发展提供可复制的中国方案与实践经验。

3 废旧路面材料在高速公路养护工程中的再生利用技术创新实践

3.1 厂拌热再生技术的配方优化与工艺创新

厂拌热再生是当前高速公路养护工程中应用最广泛的再生技术，近年来的创新重点集中在高掺量再生混合料的性能优化与施工工艺的标准化升级。传统厂拌热再生工艺受旧沥青活化效果与混合料性能限制，废旧路面材料的掺量通常控制在较低水平，行业通过基于旧沥青老化程度的精准分级再生技术，对不同来源、不同老化程度的废旧路面材料进行筛分与性能检测，建立老化程度与再生剂掺量的对应模型，实现旧沥青黏结性能的精准恢复，同时通过优化矿料级配设计，引入高性能改性剂与抗老化助剂，构建骨架密实结构的再生混合料，大幅提升材料的高温稳定性、低温抗裂性与抗疲劳性能，成功突破高掺量再生混合料的应用层级限制。目前该技术已在国内多条高速公路的上面层、中面层大修养护工程中实现规模化应用，废旧路面材料掺量最高可达到五成以上，再生路面的各项性能指标均满足高等级公路的规范要求，经过多年重载交通考验，未出现明显病害，充分验证了技术的可靠性与适用性。

3.2 就地热再生技术的智能化升级与场景拓展

就地热再生技术可实现废旧路面材料的100%就地利用，是高速公路预防性养护与中修工程的核心技术之一，近年来的创新重点集中在施工过程的智能化控制与应用场景的精准拓展。传统就地热再生工艺存在路面加热不均匀、旧沥青活化不充分、施工参数可控性差等问题，易导致再生混合料性能波动，行业通过研发红外与微波复合加热系统，实现路面深度方向的梯度均匀加热，避免表层沥青过热二次老化，同时搭载智能化施工控制系统，实时采集路面温度、铣刨深度、再生剂掺量、摊铺速度等核心参数，通过算法优化实现施工过程的闭环自动控制，保障再生混合料的性能均匀性与稳定性^[5]。针对高速公路不同类型的路面病害，行业还拓展了表层再生、复拌再生、重铺再生等多种工艺模式，可精准处置车辙、裂缝、松散、推移等常见病害，在国内多条高速公路的预防性养护工程中，智能化就地热再生技术实现了当日施工当日开放交通，大幅缩短了交通管制时间，再生路面的平整度、抗滑性能与抗车辙性能均满足高速公路的服役要求，取得了良好的应用效果。

3.3 厂拌冷再生技术的高性能改性与规模化应用

厂拌冷再生技术具有能源消耗低、碳排放少、施工环境友好等优势,近年来通过材料改性与工艺创新,突破了传统应用场景的限制,在高速公路养护工程中实现规模化推广。传统厂拌冷再生混合料存在早期强度低、成型速度慢、耐久损害性能不足等问题,通常仅能用于路面下面层或基层,行业通过研发高性能交联改性乳化沥青,优化乳化沥青的破乳特性与粘结强度,同时搭配活性填料复合体系,精准调控水泥、矿粉等填料的掺配比例,构建乳化沥青—水泥复合凝胶体系,大幅提升冷再生混合料的早期强度、水稳定性与抗变形能力,成功突破了冷再生材料的应用层级限制。目前改性厂拌冷再生技术已在国内多条高速公路的下面层、中面层大修工程中实现规模化应用,再生混合料的 7 天无侧限抗压强度、动稳定度、冻融劈裂强度比等核心指标均满足高等级路面的设计要求,相较于传统热再生技术,可大幅降低施工过程中的能源消耗与碳排放,同时可在较低温度环境下正常施工,有效拓展了高速公路养护工程的施工窗口期。

3.4 就地冷再生技术的结构适配性创新与工程实践

就地冷再生技术可实现旧路面材料的全量就地利用,是高速公路路面基层与下面层结构性病害处置的核心技术,近年来的创新重点集中在结构适配性设计与施工质量的精准控制。传统就地冷再生工艺存在结构设计病害诊断脱节、施工均匀性不足、质量可控性差等问题,行业通过构建基于路面结构全深度诊断的再生设计方法,采用路面雷达检测、钻芯取样、承载能力测试等手段,精准识别路面结构的破损深度、病害类型与承载能力短板,针对性设计再生层厚度、材料配合比与结构组合形式,实现再生结构与病害处置需求的精准适配。同时行业研发了智能化铣刨拌合一体化设备,实现铣刨、破碎、拌合、摊铺、压实的全流程连续作业,通过实时控制铣刨深度、拌合均匀性与添加剂掺量,保障再生结构的均匀性与密实度,针对高速公路重载交通的特点,优化再生混合料的骨架密实结构,提升再生基层的承载能力与抗永久变形能力。目前该技术已在国内多条高速公路的基层翻修工程中实现规模化应用,废旧路面材料的利用率达到 100%,无需长距离运输废旧材料与新集料,大幅降低了工程成本与施工周期,再生后的路面结构承载能力满足高速公路的设计要求,经过多年重载交通考验,未出现结构性病害,应用效果显著。

3.5 全再生路面结构体系的创新探索与工程验证

全再生路面结构体系是近年来废旧路面材料再生利用技术的前沿创新方向,核心是实现高速公路路面

从面层到基层的全结构层再生利用,最大化发挥废旧材料的资源价值。传统再生技术大多局限于单一结构层的再生应用,不同结构层之间的性能适配性不足,废旧材料的整体利用率受限,行业通过构建全再生路面结构的设计理论与方法,针对高速公路路面不同结构层的功能需求,分层设计对应的再生材料与再生工艺,上面层采用高掺量改性厂拌热再生混合料,满足抗滑、抗车辙、抗疲劳的表面功能要求,中下面层采用高性能改性厂拌冷再生混合料,满足结构承载与抗变形的核心要求,基层与底基层采用就地冷再生混合料,满足路基承载过渡的功能要求,实现整个路面结构废旧材料的最大化利用。同时行业研发了适配全再生结构的层间粘结处理技术,优化不同再生层之间的粘结材料与施工工艺,提升全再生结构的整体性与连续性,规避不同再生层之间的界面病害。目前国内已在多条高速公路的大修工程中开展了全再生路面结构的试验段铺筑,经过长期跟踪监测,全再生路面的各项性能指标均满足高速公路的设计与服役要求,废旧路面材料的整体利用率达到 95% 以上,全周期碳排放较传统养护方案降低 60% 以上,充分验证了全再生路面结构体系的可行性、先进性与经济性,为废旧路面材料的高值化、全量化利用提供了全新的技术路径。

4 结束语

废旧路面材料的再生利用,是我国高速公路养护行业实现绿色低碳、循环可持续发展的必然选择。本文系统分析了废旧路面材料的核心特性,阐述了其再生利用的多元价值,梳理了各类再生技术的创新方向与工程实践成果。当前我国废旧路面材料再生利用技术已逐步成熟,形成了多场景、多层级的技术体系,未来需进一步推动再生技术的智能化升级、材料性能的持续优化与全结构再生体系的规模化推广,全面提升废旧路面材料的利用效率与价值,助力我国交通强国建设与双碳战略目标的落地。

参考文献:

- [1] 王晓东,张洪韬,李瑞杰,等.公路废旧材料再生循环利用的宁夏探索[J].中国公路,2024(23):46-49.
- [2] 王志新,李作钰,田霞,等.废旧路面材料综合利用研究综述[J].山东交通科技,2024(04):31-34.
- [3] 王哲.沥青路面废旧材料循环利用技术及应用研究[J].上海建材,2024(02):61-64.
- [4] 刘欢,林杰.废旧沥青路面材料的再生利用研究[J].科技创新与应用,2022,12(26):89-92.
- [5] 李东辰.废旧路面材料在湿陷性黄土地区公路改建工程中的应用[J].黑龙江交通科技,2022,45(04):19-20,24.