

废旧沥青混合料再生利用技术及路用性能研究

任家明¹ 赵 栋²

1. 巴彦淖尔市公路养护中心 内蒙古 巴彦淖尔 015000

2. 巴彦淖尔市公路养护中心绕城所 内蒙古 巴彦淖尔 015000

摘 要：随着我国公路网进入大规模养护与改扩建周期，每年产生的废旧沥青混合料（RAP）数量巨大，其高效、环保的再生利用已成为道路工程领域的核心议题。本文系统阐述了废旧沥青混合料的四种主要再生技术——厂拌热再生、就地热再生、厂拌冷再生和就地冷再生，深入剖析了各类技术的工艺流程、适用条件及优缺点。在此基础上，重点探讨了制约再生混合料性能的关键因素，即老化沥青的劣化机理与再生剂的作用原理，并详细论述了再生沥青混合料的四大核心路用性能——高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性和疲劳性能的评价方法、影响规律及提升策略。研究表明，通过科学选择再生工艺、合理设计配合比、精准使用再生剂，可有效克服 RAP 材料带来的性能短板，使其路用性能满足甚至超越规范要求。文章最后展望了高掺量、智能化、绿色化的再生技术发展趋势，旨在为推动我国道路建设向资源节约型和环境友好型模式转型提供理论支撑与实践指导。

关键词：废旧沥青混合料；再生利用；再生剂；路用性能；高温稳定性

引言：改革开放以来，我国交通建设成就斐然，截至 2025 年，全国公路总里程突破数百万公里，高等级沥青路面占主导。但早期修建的沥青路面陆续进入大修重建阶段，“十四五”期间，我国每年因道路维修产生的废旧沥青混合料（RAP）将超数亿吨。传统填埋或废弃处理会占用土地、污染环境，还浪费优质资源。在此背景下，沥青路面再生技术兴起并快速发展，它回收旧路面，经破碎、筛分后与新集料、新沥青及再生剂按比例拌和，实现资源循环利用，符合“双碳”战略和循环经济要求，还有显著经济效益，能降低采购成本和工程造价。不过，废旧沥青混合料中老化沥青性能劣化，使再生混合料在低温抗裂性、水稳定性等方面面临挑战。所以，根据工程需求选合适再生技术，科学调控材料性能，确保再生沥青混合料路用性能优良可靠，是当下亟待解决的核心问题。

1 废旧沥青混合料再生利用技术

根据施工温度和作业地点的不同，废旧沥青混合料的再生利用技术主要可分为四大类：厂拌热再生、就地热再生、厂拌冷再生和就地冷再生。每种技术都有其独特的工艺特点和适用场景。

1.1 厂拌热再生技术

厂拌热再生是一种高度工业化、质量可控性最强的再生技术。其核心流程始于利用铣刨机将旧沥青路面按设计深度进行精确回收，回收后的 RAP 料被运送至固定的沥青拌和厂。在拌和厂内，RAP 料首先经过严格的破

碎和多级筛分（通常分为 0-5mm、5-10mm、10-15mm 等档），以确保其粒径分布满足后续配合比设计的要求。技术人员会对各档 RAP 料进行详细的性能检测，包括抽提试验以确定其沥青含量和老化程度，以及筛分试验以获取精确的矿料级配曲线。基于这些数据，结合目标路面层位（如上面层 AC-13 或下面层 AC-20）的性能要求，进行精细化的配合比设计。这一过程的关键在于确定 RAP 的最佳掺配比例，目前在技术攻关下，该比例已从传统的 30% 提升至 50% 甚至更高。在拌和环节，RAP 料需在专用的干燥滚筒中被加热至 140-160℃，以充分软化老化沥青，随后与加热后的新集料、新基质沥青或改性沥青以及精确计量的再生剂一同投入强制式拌缸，在 160-180℃ 的高温下进行不少于 45 秒的充分搅拌，确保新旧材料均匀融合。最终形成的热再生混合料被运往施工现场，按照新建沥青路面的标准工艺进行摊铺和碾压^[1]。厂拌热再生的优势在于其卓越的质量稳定性与可靠性，再生混合料可用于高速公路等高等级公路的面层，但其对物流组织和能耗的要求较高。

1.2 就地热再生技术

就地热再生则是一种高效、快速、对交通干扰极小的现场再生技术。它依赖于一套高度集成的专用机组，通常由加热机、铣刨机、复拌机和摊铺机组成。整个施工过程在不中断或仅短时封闭交通的情况下连续完成。首先，加热机利用红外线或热风对旧路面表层（深度通常为 3-6cm）进行均匀加热，使其温度升至 140-160℃，

软化旧沥青。紧接着,铣刨机对软化的路面进行翻松,并将其输送至复拌机的拌缸内。在拌缸中,系统会根据预设程序,同步喷入精确计量的再生剂和新沥青(有时还包括少量新集料),与翻松的旧料进行充分拌和。拌和均匀的再生混合料随即被送入后方的摊铺机进行摊铺,并由压路机紧随其后完成压实成型。该技术的最大优势在于实现了原位循环利用,几乎不产生废料,施工速度快,社会影响小,特别适用于表面功能层病害(如车辙、裂缝、麻面)的修复。然而,其再生深度有限,对原路面结构的整体强度和平整度有较高要求,且设备投资巨大,经济性在小规模工程中难以体现。

1.3 冷再生技术

冷再生技术是在常温下进行的再生工艺,同样可分为厂拌和就地两种形式。就地冷再生通常使用大型专用维特根(Wirtgen)设备,在原路面上直接对旧料进行铣刨、破碎,并同步喷入乳化沥青、泡沫沥青或水泥、石灰等无机结合料作为稳定剂,同时加入必要的水分和新集料,在常温下进行现场拌和,最后经整形、碾压成型。厂拌冷再生则是将回收的RAP料运回拌和厂,在常温下与上述稳定剂及其他新材料进行集中拌和。冷再生技术的最大优势在于其卓越的节能环保特性,施工过程中几乎不产生烟气排放,能耗极低,且对交通干扰小^[2]。但它形成的再生基层或底基层通常强度形成较慢(尤其是采用乳化沥青时,需要破乳和养生时间),且其路用性能,特别是长期耐久性和抗疲劳性能,一般不如热再生混合料。因此,冷再生层多用于道路的中、下面层或作为柔性基层,其上往往需要加铺一层新的沥青面层以保证整体路面的使用品质。

2 老化机理与再生剂作用原理

再生技术的核心科学问题在于如何有效应对老化沥青带来的性能劣化。理解老化机理与再生剂的作用原理,是优化再生混合料设计的基础。

2.1 沥青老化机理

沥青的老化是一个复杂的物理化学过程,主要受大气中的氧气、紫外线辐射、温度变化及交通荷载等因素的综合作用。在长达十余年的服役过程中,沥青中的轻质油分(饱和分和芳香分)会不断挥发和氧化,同时发生一系列不可逆的化学反应,如氧化、聚合和缩合。这些反应导致沥青的胶体结构失衡,沥青质和胶质的比例显著增加,宏观上表现为针入度减小、软化点升高、延度急剧下降,即沥青变得硬而脆。这种硬化脆化的老化沥青,其粘弹性、自愈合能力及与集料的粘附性均大幅

降低,直接导致由其组成的混合料在低温下极易开裂,在水的作用下容易剥落,疲劳寿命也显著缩短。这种性能劣化是再生混合料设计必须克服的根本障碍。

2.2 再生剂作用原理

再生剂的作用本质上是试图逆转或部分修复沥青的老化过程。其作用机理主要体现在两个层面:物理调和与化学再生。在物理层面,再生剂富含轻质油分和芳香分,能够有效补充老化沥青中流失的组分,稀释并溶解过度聚集的沥青质,从而降低混合体系的粘度,恢复其流动性和柔韧性。这一过程类似于“溶剂”的作用,使老化沥青的胶体结构得以重新分散和平衡。在化学层面,一些高性能再生剂含有活性官能团,能够与老化沥青分子链上的羰基、羧基等极性基团发生化学反应(如酯化、加成等),修复断裂的分子链,改善其化学结构,从而更深层次地恢复沥青的原始性能。再生剂的类型多样,包括以芳香油、环烷油为主的矿物油基再生剂,以植物油(如菜籽油、松节油)为基础的环保型生物基再生剂,以及利用废轮胎裂解油制成的再生油。一个理想的再生剂不仅能有效调节老化沥青的流变特性,还应具备良好的耐久性和抗老化能力,以确保再生路面拥有长久的使用寿命。其技术指标通常参照ASTM D4552标准,根据60℃运动粘度进行分级,并严格控制闪点以确保施工安全。

3 再生沥青混合料路用性能研究

再生沥青混合料的最终价值体现在其路用性能上。科学、全面地评价其性能,并掌握各因素的影响规律,是保障工程质量的关键。相关性能评价严格遵循《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011,即将被JTG 3410-2025替代)等国家及行业标准。

3.1 高温稳定性

高温稳定性是指沥青混合料在夏季高温和重载交通条件下抵抗永久变形(车辙)的能力,通常采用车辙试验进行评价,以动稳定度(DS)作为核心指标。由于RAP中的老化沥青粘度高、劲度大,厂拌热再生混合料通常表现出优异的高温稳定性,其动稳定度往往高于普通热拌沥青混合料。这是因为高劲度的老化沥青骨架提供了更强的抗剪切和抗变形能力。当RAP掺量在30%-50%范围内时,再生混合料的高温稳定性随掺量增加而提升^[3]。然而,在就地热再生中,如果新旧沥青融合不充分,可能会在界面处形成薄弱区,反而影响高温性能。因此,确保新旧沥青的良好融合,以及在必要时添加SBS等聚合物改性剂,是进一步提升高温稳定性的关键。

3.2 低温抗裂性

低温抗裂性是再生混合料面临的最大挑战,通常采用-10℃或-15℃下的低温弯曲试验进行评价,以破坏应变作为核心指标。老化沥青的脆性使得混合料在冬季低温环境下应力松弛能力差,容易在温度收缩应力或行车荷载作用下产生开裂。随着 RAP 掺量的增加,再生混合料的低温弯曲破坏应变通常呈显著下降趋势。为了改善这一性能,一方面可以通过掺加 SBS 等聚合物改性剂来增韧,另一方面必须依赖高效的再生剂来有效软化老化沥青,恢复其柔韧性。合理的配合比设计,避免形成过大的刚度梯度,也是提升低温性能的重要措施。对于高掺量 RAP 混合料,选择兼具再生与改性功能的复合型再生剂显得尤为重要。

3.3 水稳定性

水稳定性反映了混合料抵抗水损害(如剥落、松散)的能力,是评价其耐久性的关键指标。评价水稳定性的标准试验包括浸水马歇尔试验(以残留稳定度 MS0/MS 为指标)和冻融劈裂试验(以冻融劈裂强度比 TSR 为指标)。老化沥青与集料的粘附性下降是导致再生混合料水稳定性不足的主要原因。适量掺加再生剂能显著提高再生混合料的残留稳定度和 TSR 值,因为再生剂不仅能改善沥青自身的性能,还能增强其与集料的界面粘结力^[4]。此外,在混合料设计中加入 1%-2% 的消石灰或水泥等抗剥落剂,通过改善集料表面的化学性质,也是提升水稳定性的常用且有效的方法,能有效弥补再生剂在抗水损害方面的不足。

3.4 疲劳性能

疲劳性能决定了路面在反复荷载作用下的耐久性,通常采用四点弯曲梁或间接拉伸(IDT)疲劳试验进行评价,以达到特定破坏状态所需的荷载作用次数(Nf)为指标。老化沥青的脆性同样会加速疲劳裂缝的萌生与扩展。尽管高劲度的 RAP 有助于提高初始模量,但其较低

的断裂能会缩短疲劳寿命。因此,再生混合料的疲劳性能往往是各种性能相互制约的结果。通过优化再生剂类型与剂量,平衡混合料的刚度与韧性,是改善其疲劳性能的核心策略。室内疲劳试验表明,在合理使用再生剂的前提下,高掺量 RAP 再生混合料的疲劳寿命可以满足规范要求,甚至优于某些普通混合料。

4 结语

废旧沥青混合料的再生利用是实现道路工程可持续发展的必由之路。通过对厂拌热再生、就地热再生及冷再生等技术的系统应用,结合对老化机理的深刻理解和再生剂的科学运用,完全可以生产出路用性能优良、满足工程要求的再生沥青混合料。未来,该领域的发展将聚焦于三大方向:一是追求更高 RAP 掺量甚至全 RAP 再生,通过精细分离技术和新型再生剂,最大化资源利用效率;二是开发更智能、更精准的再生剂,例如基于生物基原料的环保型产品,能够针对不同老化程度的沥青进行定制化修复;三是推动再生技术与数字化、智能化建造深度融合,利用 BIM 和物联网技术,实现从 RAP 料性能检测、配合比智能设计、生产到施工全过程的质量精准控制与追溯。通过持续的技术创新与工程实践,废旧沥青混合料必将从“建筑垃圾”转变为宝贵的“城市矿产”,为构建绿色、低碳、高质量的交通基础设施贡献力量。

参考文献

- [1] 苏杰. 废旧沥青混合料再生利用关键技术研究 [J]. 中国高新科技,2026,(03):150-152.
- [2] 刘东华. 废旧沥青混合料再生利用技术优化及路用性能长期稳定性分析 [J]. 中国公路,2026,(01):96-97.
- [3] 刘文伟. 废旧沥青混合料再生利用技术探讨 [J]. 时代汽车,2025,(13):181-183.
- [4] 任海玉. 公路养护中废旧沥青混合料再生利用技术的应用研究 [J]. 运输经理世界,2025,(31):141-143.