

绿色公路理念下废旧沥青混合料再生利用技术在养护工程中的应用研究

文 / 曾凡成 宣城市公路事业发展中心

摘要：在我国公路建设事业快速发展的背景下公路养护需求日益增长，同时产生的废旧沥青混合料数量也非常惊人，而传统废旧沥青混合料处理方式不仅容易造成资源浪费，此外还可能带来严重的环境问题。现阶段在绿色公路理念的指引下，人们逐渐看到了废旧沥青混合料再生利用技术的优势，通过合理使用该技术，不仅能够提升资源利用率，同时还可以推动公路养护工程的可持续发展，效果较为显著。为了能够充分发挥出废旧沥青混合料再生利用技术的优势，本文将基于绿色公路理念分析在公路养护工程中废旧沥青混合料再生利用技术的应用要点，同时提出推动该技术在养护工程中广泛应用的对策建议，以便为今后的公路养护工程质量提升提供合理的借鉴。

关键词：绿色公路；再生利用技术；废旧沥青混合料；公路养护工程

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.071

引言

随着公路使用年限的增加，大量早期建设的公路已经进入了养护维修高峰期，每年产生的废旧沥青混合料（RAP）数量惊人，如果采用传统的处理方式，只是将废旧沥青混合料运往指定地点堆放或填埋，这不仅会占用大量土地资源，同时沥青中的有害物质还有可能渗透到土壤和地下水中，对生态环境产生严重影响。绿色公路理念是在可持续发展理念基础上提出的新型公路建设与运营模式，该理念强调在公路全生命周期内实现资源节约、能源高效利用以及社会效益最大化。在绿色公路理念下，推行废旧沥青混合料再生利用技术非常必要，该项技术能够将废弃材料转化为可再次利用的公路建设资源，借此减少资源开采和废弃物排放。

一、绿色公路理念与废旧沥青混合料再生利用技术概述

（一）绿色公路理念的核心内涵

绿色公路理念是一种以可持续发展为核心的公路建设与运营模式，该理念强调在公路规划、设计、建设、养护、运营和废弃全生命周期内实现资源节约、能源高效利用，并达成环境友好目标^[1]。核心内涵解读：一是资源节约。

绿色公路理念要求在公路建设和养护过程中，最大限度地减少对不可再生资源的消耗，借此有效提高资源利用效率。拿沥青公路来说，废旧沥青混合料再生利用就是一种实现资源节约的重要途径，通过将废弃材料重新利用，可以减少新原材料的开采和使用，从而降低资源消耗强度。二是环境友好。通过深入解读绿色公路理念我们能够发现，该理念非常注重减少公路建设和运营对环境的负面影响，而废旧沥青混合料再生利用技术的渗透，能够降低废旧材料对土壤和地下水的污染，完全符合环境友好的要求。三是能源高效利用。能源高效利用是绿色公路理念的另一个核心内涵，在废旧沥青混合料再生利用过程中，热再生技术通过对废旧沥青混合料的加热温度控制和能源回收利用可以最大程度降低能源消耗，进而达成能源高效利用的目标。总之，通过上述分析可以看出，绿色公路理念要求对公路进行全生命周期管理，在规划设计阶段就考虑到了后期的养护、维修和资源循环利用，通过采用废旧沥青混合料再生利用技术，能够确保公路全生命周期的资源循环和环境友好，由此可见在绿色公路理念下废旧沥青混合料再生利用技术可以发挥出更多的功能。

（二）废旧沥青混合料再生利用技术分类

表 1 废旧沥青混合料再生利用技术分类

技术大类	具体类型	核心原理	关键技术参数	优点
冷再生技术	厂拌冷再生	常温下将 RAP 破碎筛分后，与水泥、石灰、乳化沥青等稳定剂在拌和厂混合，再运至现场摊铺碾压	稳定剂掺量：水泥 3%-6%、乳化沥青 2%-3%；含水率：最佳含水率 ±1% 压实度 ≥ 97%（基层）	1. 无需加热，能耗低（较热再生节能 60% 以上）；2. 施工周期短，对交通影响小；3. 原材料利用率高（RAP 掺量可达 80%-100%）
	就地冷再生	现场铣刨旧路面，直接掺入稳定剂拌和，同步完成摊铺碾压，无需材料运输	铣刨深度 10-20cm；摊铺速度 1-3m/min；碾压遍数 6-8 遍	1. 减少材料运输成本（节省运费 30%-50%）；2. 施工效率高，单日可完成 1-2km；3. 对周边环境干扰小

续表 1

技术大类	具体类型	核心原理	关键技术参数	优点
热再生技术	厂拌热再生	将 RAP 加热至 130-180℃ 软化, 破碎筛分后与新沥青、新骨料、再生剂在拌和厂混合, 再运至现场摊铺	RAP 掺量 30%-70%; 加热温度 150-170℃; 再生剂掺量 3%-8% (占 RAP 沥青质量); 马歇尔稳定度 $\geq 8\text{kN}$	1. 再生混合料性能接近新拌料(高温稳定性达 7000Pa 以上); 2. 路面使用寿命长(可达 8-10 年); 3. 适用于复杂气候区
	就地热再生	专用机组现场加热旧路面(130-160℃), 铣刨后掺入新沥青/再生剂, 同步拌和摊铺碾压	加热深度 3-5cm; 加热均匀性误差 $\leq \pm 5\text{℃}$; 摊铺温度 $\geq 130\text{℃}$; 碾压终压温度 $\geq 70\text{℃}$	1. 施工速度快(单日可完成 3-5km); 2. 无 RAP 运输环节, 减少扬尘污染; 3. 路面接缝少, 平整度优(标准差 $\leq 1.2\text{mm}$)
温再生技术	厂拌温再生	将 RAP 加热至 80-120℃, 添加温拌剂降低沥青黏度, 与新料混合后摊铺, 平衡能耗与性能	加热温度 80-100℃; 温拌剂掺量 0.3%-0.5%; RAP 掺量 40%-60%; 压实度 $\geq 96\%$ (面层)	1. 能耗较热再生降低 30%-50%; 2. 有害气体排放减少 40% 以上(如 CO ₂ 排放降至 50 kg/吨); 3. 施工温度窗口宽, 便于操作
	就地温再生	现场低温加热 RAP (90-110℃), 掺入温拌剂与再生剂, 同步完成铣刨、拌和、摊铺	加热深度 4-6cm; 温拌剂与再生剂复合掺量 0.5%-1.0%; 摊铺速度 2-4m/min	1. 兼顾热再生性能与冷再生环保性; 2. 对原路面沥青老化影响小; 3. 可在低温季节 (5-10℃) 施工

二、废旧沥青混合料再生利用技术的应用要点与流程

(一) 材料回收与预处理

1. 材料回收

路面铣刨设备主要用于废旧沥青混合料的回收工作, 实际操作时得看养护工程的具体要求和路面病害状况, 以此确定铣刨深度和范围, 才能保证材料回收效果, 铣刨过程中要管理好设备行进速度和铣刨深度, 用这种方法让铣刨下来的废旧沥青混合料颗粒大小均匀, 防止出现过度破碎或大块材料^[2]。

2. 破碎与筛分

破碎与筛分构成了废旧沥青混合料再生利用的关键步骤, 破碎处理能把回收的废旧沥青混合料变成符合再生利用要求的颗粒尺寸, 筛分则按照骨料级配需要, 把破碎后的混合料分成不同粒径的骨料。

3. 杂质去除

杂质去除同样是废旧沥青混合料处理流程里的重要环节, 废旧沥青混合料里可能混有泥土、石块、金属碎片、垃圾等杂质, 这些杂质的存在会干扰再生混合料的性能, 降低公路工程养护的实际效果, 因此要在破碎和筛分过程中把杂质去掉, 提高养护作业的有效性, 杂质去除环节中, 筛分能去掉泥土等细小杂质, 石块、金属碎片等较大杂质则需要人工挑选或借助磁选设备清理, 这样才能更好地保障杂质去除率。

(二) 再生混合料配合比设计

深入了解后可以发现, 再生混合料配合比设计是决定再生利用技术应用效果的关键环节, 其目标在于确定废旧沥青混合料 RAP、新骨料、新沥青、再生剂或稳定剂的最佳掺配比例, 借助配合比优化能让再生混合料的性能满足公路养护工程的要求。需要说明的是, 不同再生利用技术比如冷再生、热再生、温再生, 它们的配合比设计方法存在差异。拿热再生混合料配合比设计来

说, 目标配合比设计阶段首先要对回收的废旧沥青混合料 RAP 进行性能检测, 主要涉及 RAP 的级配、沥青含量、沥青老化程度等指标, 通过抽提试验和筛分试验可以确定 RAP 中骨料的级配曲线和沥青含量, 然后根据 RAP 的级配和沥青性能, 确定新骨料的级配和新沥青的类型, 参考 RAP 中沥青的老化程度, 确定再生剂的实际掺量, 按照技术要求, 再生剂的掺量一般为 RAP 中沥青质量的 3%-8%, 用来补充沥青中的轻质组分, 恢复老化沥青的黏弹性能。配合比生产环节要根据拌和设备的实际情况调整目标配合比参数, 确保再生 RAP 具备良好性能, 由于 RAP 在破碎和筛分过程中级配可能出现波动, 实际操作中要用到拌和设备的二次筛分系统, 让各热料仓的骨料级配达到设计要求, 同时在拌和设备上进行试拌, 检测再生混合料的马歇尔稳定度、流值、空隙率、饱和度等指标, 根据检测结果调整新沥青、再生剂的掺量, 使再生混合料的性能符合规范要求。配合比设计的验证需要在施工现场进行试验段铺筑, 通过试验段施工验证生产配合比的合理性和施工工艺的可行性。试验段铺筑过程中要科学检测再生混合料的摊铺温度、碾压温度、压实度等指标, 试验段成型后检测路面的平整度、厚度、抗滑性能等指标, 如果这些指标都满足要求, 就说明设计的配合比是合理的。

(三) 施工工艺

实际应用时, 施工工艺的水平直接关系到废旧沥青混合料再生技术在养护工程里的成效。不同再生技术对应的工艺操作差别不小, 这里还是拿热再生技术来讲施工要点, 就地热再生一般要借助专门的机组设备, 整个流程包括路面加热、铣刨、拌和、摊铺以及碾压几个环节。加热环节得靠加热机对旧路面做均匀加热, 借此来保证施工质量, 不过加热温度要把握好, 通常控制在 130-160℃ 比较合适, 至于加热深度, 那得看路面病害的具体情况 and 再生层厚度来定, 加热完成后紧接着是铣刨,

铣刨机要紧跟加热机作业，铣刨深度最好和加热深度保持一致。铣刨产生的RAP料会直接送进拌和机，跟新沥青、再生剂以及新骨料一起拌和。拌和环节对再生混合料质量非常关键，拌和机需要按照配合比要求，准确称量RAP、新沥青、再生剂和新骨料的用量，同时拌合时间也要合理掌控。拌和好的再生混合料由摊铺机进行摊铺，摊铺时要控制好厚度和平整度，摊铺机后面最好安排专人检查摊铺面，发现粗细集料离析或者缺料的情况能及时处理。碾压环节需要调整好碾压设备的参数，先用双钢轮压路机做初压，再用胶轮压路机复压，最后用双钢轮压路机终压，通过这三道碾压工序来提升路面的平整度^[3]。

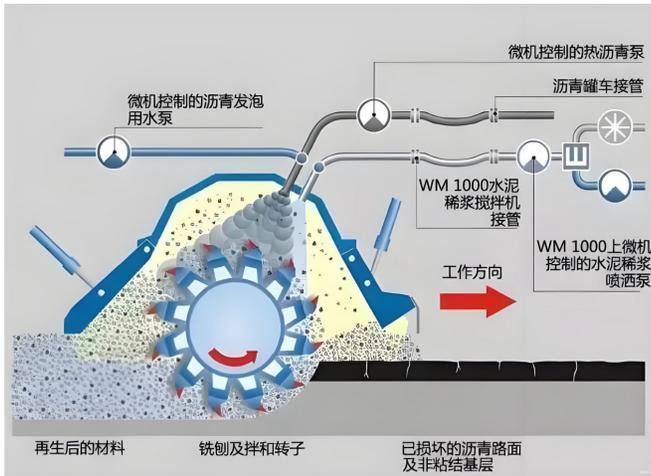


图1 沥青路面热再生技术施工

三、推动废旧沥青混合料再生利用技术在养护工程中应用的对策建议

(一) 加强再生材料性能优化与质量管控

1. 优化RAP分类回收与预处理流程

在沥青混合料再生利用工作实践中，为达成混合料回收再利用的理想效果，人们应该建立完善的RAP分类回收制度，通过制度内容约束分类铣刨与回收的作业流程，以确保最终的混合料再生利用质量^[4]。在公路养护工程设计阶段，为了高效利用混合料再生技术，技术团队应提前调查旧路面的结构参数以及材料类型，在上述措施基础上制定针对性的沥青混合料回收方案，为后续的混合料再生处理提供优质保障；同时，规范沥青混合料的预处理流程，要求施工单位配备专用的RAP破碎和筛分等设备，并且利用“两级破碎+三级筛分”的先进工艺，确保沥青混合料级配符合设计要求。除此之外，沥青混合料的存放也需要提高重视，在材料储存场地需要设置防雨、防潮等设施，同时配备含水率在线监测系统，通过以上手段的综合运用，实现沥青混合料使用性能的最优化。

2. 研发新型再生材料与性能改善技术

为提升沥青混合料的利用率，现实中需要加大对再生材料与性能改善技术的研发力度，通过重点开发低能耗、高性价比的纳米再生剂、生物基再生剂等，改善再

生沥青的低温抗裂性能^[5]。与此同时，持续优化再生混合料配合比设计方法，在配合比设计中可以引入离散元法、有限元法等数值模拟技术，精准预测再生混合料的路用性能，借此减少试验工作量。

(二) 完善技术标准体系与规范衔接

一是制定差异化与前瞻性的技术标准。为了有效推广这种再生利用技术，现实中可根据不同气候区、不同交通量的特点，修订《公路沥青路面再生技术规范》，在其中增加差异化技术指标要求，以完善技术标准体系。例如，在高温多雨地区的冷再生混合料标准中，要明确混合料的水稳定性（残留稳定度应 $\geq 85\%$ ）；与此同时，制定《公路沥青路面温再生技术规程》《公路再生材料检测规程》，将温再生技术、新型再生材料纳入标准体系。

二是加强地方标准与国家标准的衔接。各省份在制定地方规范时，必须以国家标准为基础，不得降低技术要求；同时对于地方特色技术（如针对山区公路的再生技术），应报国家相关部门备案，确保技术参数的合理性。除此之外，加快标准更新速度，建立标准动态修订机制，通过这样的方式，确保标准与技术发展同步。

结语

通过全文分析可以发现，绿色公路理念下废旧沥青混合料再生利用技术的应用已经成为趋势，其在养护工程中的应用价值较高，值得借鉴与推广。废旧沥青混合料再生利用技术主要包括冷再生、热再生、温再生三类，各类技术具有不同的性能特点与适用范围，在实际应用中需要灵活选择，并掌握技术应用要点，如材料回收与预处理、再生混合料配合比设计等，借此发挥出混合料再生利用技术的特殊优势。除此之外，废旧沥青混合料再生利用技术想要在养护工程中广泛应用，还需要从再生材料性能优化、技术标准完善等方面入手，凭借上述措施有效推动再生利用技术在养护工程中的高质量应用。

参考文献

[1] 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.
 [2] 谢胜加, 于晓晓, 倪文全. 废旧沥青混合料在路基路面中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2025, (05): 325-330+356.
 [3] 都伟, 张明欣, 王彦敏, 等. 废旧沥青混合料在路面基层中的应用研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(S1): 298-302.
 [4] 胡小弟, 李远豪, 李镛西, 等. 废旧油毡在沥青混合料中再利用的性能提升[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(04): 22-28.
 [5] 张志国. 废旧沥青混合料厂拌热改性再生关键技术开发与应用. 河北省, 河北涪城新型建材有限公司, 2021-07-15.

作者简介：曾凡成（1975.5—），男，汉族，安徽省宣城市宣州区人，专科，工程师，研究方向：公路与桥梁。