沥青回收料在道路工程中的应用与发展路径研究

冯启军[1]　杜亚娜[1]　刘　枚[2]　赵东景[3]　何红生[2]
1. 菏泽市公路事业发展中心　山东　菏泽　274000
2. 菏泽市公路事业发展中心工程二处　山东　菏泽　274000
3. 菏泽市单县公路事业发展中心　山东　菏泽　274000

摘　要：目前就我国公路基础设施所处的“建养并重”阶段而言，路面改扩建或大中修时得到的大量沥青铣刨料（Reclaimed Asphalt Pavement，即 RAP）正成为“城市矿产”类资源。以全寿命周期为思路，对 RAP 所涉物性及老化作较完整分析，将热、冷、温式再生同道路工程实际相结合，考察其技术上、经济上的可行性；按精细分离思路试验高比例 RAP 对路面的贡献，从控制困难、设备不足的角度出发，给出全流程治理、装备改进及产学研配合的发展建议。

关键词：沥青回收料（RAP）；道路工程；再生方法；性能分析；可持续发展

引言

沥青混凝土所构成的路面是目前我国高等级公路中最常用的形式。但所用的沥青材料若经年累月暴露于阳光、空气、温湿交替和车轮反复碾压之下，胶体状态逐渐劣化，最终造成车辙、裂缝或松散一类的路面病害。传统处理方式将这类废料一般当作建筑垃圾来堆放或填埋，既占用农田又不经济，而且废沥青所含的重金属及有机物可随水渗入地下，形成生态隐患。在“资源短缺”和“废料堆积”推动下下，沥青路面再生技术得到发展。符合交通运输部积极倡导的“四新”技术（即四新：新技术、新工艺、新材料、新设备）要求，成为“交通强国”框架内绿色交通的典型实例。

1 沥青回收料的来源与理化特性

1.1 主要来源渠道

周期性养护与维修作业：RAP 是基本而稳定的资源，较易获得。如要保证公路使用功能，管理部门应经常做路面修复工作。现在通行的就地热再生、厂拌热再生及铣刨加铺方法都会带来大量块体或碎屑类旧料。从这类来源取得的 RAP 由于原路面构造、成分基本确定，各项性能不发生剧烈变化，对高质再生来说是最合适的原料选择。

1.2 改扩建工程与旧路拆除

若按城市化发展和交通量激增的情况来考察，有关道路拓宽或改建的工作正迅速增多。此时所遇到的沥青面层乃至基层多要作整体性清拆，因而 RAP 以巨大而集中的形式出现；而各城镇“白改黑”或市政老城区改造本身又会带来大批废旧沥青混合物，是城市 RAP 最基本的来源项。

1.3 理化特性与老化机理

组分构成的复杂性，RAP 不属于普通固废，主要由老化沥青、集料、矿粉及少量杂质构成。沥青长期服役产生理化演化，轻质组分缩聚消耗，重质组分增多，胶体由溶胶转为凝胶，致使针入度、延性降低，软化点与脆性上升[1]。

集料的变异性与破碎效应，RAP 所用集料从理论上看是不发生变化的，但被铣刨机械处理或作破碎筛分之后，部分粗集料会经历二次破碎而变细，针片状物的数量亦随之上升。此时原定的级配状态已有所偏移，而且破碎断面可能有未老化的表面，对新沥青来说未必黏附良好。各处的 RAP 所含沥青量、所采集料类型并不相同，这种突出的变异性正好是 RAP 再生利用中要解决的首要问题。

性能的不确定性，由于缺乏源头分类，运抵再生厂的 RAP 往往是不同路段、不同深度（上面层与下面层）材料的混合物。这种“大杂烩”导致了 RAP 性能的离散性极大。如上面层 SMA 混合料中含有木质素纤维，若混入普通 AC（沥青混凝土）混合料中进行再生，会对再生混合料的配合比设计带来干扰。因此，对 RAP 进行细致的物理力学性质检测是再生利用的前提。

2 沥青回收料应用的可行性分析

2.1 技术可行性：工艺成熟及性能验证

多样化技术体系的建立：RAP 再生分为热、冷、温

三类：热再生利用热能处理旧沥青，厂拌热再生旧料掺量 20%-50%，适用多等级路面；就地热再生无需远运，表层修复效率高。冷再生以乳化/泡沫沥青为黏结剂，常温施工，低耗低污染，多用于柔性基层。温再生添加有机降黏剂，拌和压实降温 20-40℃，兼顾路用性能，节能减烟，应用前景广阔。

再生混合料的性能达标，现有大量室内研究及实际工程所证实：按科学方法确定再生工艺参数后，再生混合料可达到新料水平的性能。以特制活化剂对老化沥青作处理，是恢复其分子黏弹性质的有效办法。所用再生料经适当改性之后，在防止永久形变、低温开裂或水害诸项指标上都基本符合当前公路施工的有关标准。

2.2 经济可行性：降本增效显著

对直接成本的削减，用 RAP 来代替高价新集料或改性沥青对材料本身是直接节约。若按 30%的配比把 RAP 加入材料中，所购原料费用可减少 15%-25%左右。而再生处理又可在沿线设立场站，物流和库存的消耗因而变小。将垃圾清运、生态影响诸项成本一并考虑，采用完整再生法所花的总费用一般较传统方式少 20%或更多。

隐性价值的挖掘，RAP 产业所促成的资源再利用有利于矿山长期稳定运行，把石料生态修复、水土保持的巨量消耗转为隐形节约，是自然防护的潜在助力。另外，该产业带动了再生机械、绿色建材及物流链的发展，对地方经济、环保产业都有新激励意义。

2.3 环境可行性：绿色低碳属性

固废消纳与土地节约，每消化 1 万吨 RAP，可释放近 3 亩的填埋土地资源，极大缓解城郊用地压力。该过程同步抑制了开山取石对植被与土壤的破坏，守住了道路建设与生态保护的平衡底线。

节能减排与碳减排，对旧料加以再生不须付出高温烘烤新集料的高能耗。就全寿命周期来说，每用一吨 RAP 做原料，所节省的二氧化碳量大致是 40 ~ 50 千克，即标准煤约 10 千克，由此避免的石油采掘、提炼所涉污染亦有相应程度的减轻。

3 沥青回收料应用的核心优势

3.1 延长道路结构服役寿命

按自然风化及轮载压密规律分析，RAP 所用集料表面较粗、棱角明显，这样的特征对沥青裹覆而言是形成强骨架嵌挤的良好基础。若老化沥青经再生剂处理而重获柔韧性，高比例 RAP 路面就有望抵抗深层形变的侵袭。

全面改善路面性能，行驶面的平顺化，RAP 所对应的热膨胀系数及模量正好适合原路面的自然状态，因而采用就地热再生或薄层罩面后，新旧层结合处不易发生黏结不良现象，反射裂缝少有出现。

水损害的防范手段，对级配做适当设计（例如把 SMA 作为骨架）并按量使用抗剥落材料后，所用再生混合料的连通空隙基本被填满，水分不易渗入其中。同时优良再生剂能明显改善沥青对酸性硬石类材料的浸润状态，即便有动水压力也难使沥青膜破裂，水剥落现象因而得到根本性抑制。

3.2 推动行业可持续发展

资源循环的典范，RAP 的转化利用成功闭环了“路面产出—回收加工—再生铺筑”的绿色链条，打破传统“开采—消耗—废弃”的单向线性模式，赋予了基础设施领域资源利用效率最大化的循环经济内涵。

绿色建造的驱动力，市场对高质量 RAP 的迫切需求，正倒逼筑路机械的环保化改造。为消弭加热过程的烟尘，负压除尘、活性炭吸附等高端装备已被广泛植入生产线。这场由废料应用引发的技术革新，正全面驱动道路施工向零碳化演进。

4 沥青回收料应用面临的现实挑战

4.1 质量控制体系的脆弱性

原材料变异性难以驯服，RAP 来源驳杂是沥青含量及橡皮状老化体比例极不稳定的原因。就目前技术而言，实时测控尚不能完全实现，现场多属“事后化验”，拌和参数调节有较大时滞。油石比即使只偏移 0.5%，如不加以修正，马上就会造成路面泛油、松散等病态现象，质量失稳的概率很高[2]。

4.2 再生剂配伍性问题

恰是唤醒老化沥青的“核心密钥”，目前所售再生剂种类混杂、尚无统一定标。由于旧沥青实际成分变化极大，若未按需要配置再生剂，一般易出现“过再生”（路面发软泛油）或“欠再生”（路面脆硬开裂）的病理情形，结构寿命因而大打折扣。

4.3 装备工艺所遇的瓶颈

专用再生设备的短板，虽然国内拌和站数量较多，但精细操作仍有很大空白。加热方面，传统干燥筒用明火直接烘烤时往往“二次烤焦”废旧沥青；流量控制上，冷再生所用乳化沥青计量器受温度、气泡影响大，精确性不够；环保设计中部分小规模设备排风不完善，现场异味仍较难根除。

4.4 施工工艺本身有其局限

热再生虽能达标但碳排放多；冷再生虽节能却要应付早期强度不足、养护时间过长（封路 2～7 天）的困难，在高流量路段推广不易。而今所用方法对温湿度高度依赖，遇到低温多雨交替期，工程质量的确定性便明显降低。

5 提升沥青回收料应用水平的对策建议

5.1 构建全流程质量管控体系

源头分拣与数字化管理，有关源头管控的制度要以刚性方式落实边铣刨、边分类、边归集的各项要求，不得让建筑垃圾或水泥块侵入 RAP 堆场。利用物联网对所涉每批 RAP 的来源、年代、含油状况作编码登记；又在进站口普遍采用近红外光谱（NIR）速测仪器，把“逢车必检、偏差即调”纳入数字保障体系，以技术锁定变异隐患。

对再生剂的定制化开发，宜建立“产学研用”闭环，就各类旧沥青（按路龄划分）分子特性做分析，分别研制适用再生剂。有关定向评估的指标应由短期的“三大指标恢复”发展为抗热氧老化的“长效耐用度”类标准。主动采用强渗透、抗衰并存的复合添加剂以助于根本性再生。

5.2 推动装备更新及工艺创新

有关智能再生装置的研发应利用国家所拥有的科研资源，集中开发微波、红外类低耗无焰加热。以数字形式统一处理含水、用药及余热诸项指标（即智造），对设备作整体安排，把“凭经验”式管理改为“遵数据”。

把产学研用统一为“企业抛出工程痛点、高校供给理论算法、市场验证最终应用”类协同体。采用联合攻关方法构思“旧料—新料—药剂”类数字自演算方式，对合规设计作较大程度的简化；借高阶中试来验证方案可行性，使已有成果较容易地推广到各领域。

6 沥青回收料的试验及应用

要清楚地判断精细化分选对 RAP 品秩所具有的实际效用，本课题即按此思路对多类路龄、多级废料作降维分选和严格考察。

6.1 试验方案设计

本试验矩阵所采用的试验矩阵是现行《国家公路工程沥青与沥青混合料试验规程》的严谨对应物，核心部分划为两个模块：其一是对精细分选 RAP 各组分（集料、新矿、改性沥青及再生剂）做本体特征归纳；其二是高比例再生料的配合比推演及其性能校验，借此确定最佳掺度的边界条件。

6.2 原材料测试及配合比

设计试验以 SBS 类改性沥青及石灰岩集料为原料，把经精细分离的 RAP 按 0-6mm、6-16mm、16-26mm 分成三级级配单元。经过抽提、分级及还原的分析后，按马歇尔方法为三类级配分别设计油石比梯度，予以击实试探。对表观密度、空隙状态和力学行为做整体权衡，由此找到最优解：以 30%RAP 制作 AC-13、AC-16 试件，以 50% RAP 构造 AC-20、AC-25、AC-25+ 抗车辙剂及 LSPM-25 试件，抗车辙剂占混合料总质量的 0.7%[3]。

6.3 性能验证

精细分离 RAP 的性能验证以 RAP 料的级配特征、旧沥青含量、旧沥青性能、含水率等关键指标为依据，通过优化再生沥青混合料的级配设计，提升再生混合料的综合性能。6 类沥青混合料（① AC-13、② AC-16、③ AC-20、④ AC-25、⑤ AC-25+ 抗车辙剂、⑥ LSPM-25）的最佳油石比分别为 4.6%、4.5%、4.3%、4.0%、4.0%、3.2%；再生剂掺量为旧沥青含量的 6%，抗车辙剂掺量为混合料总质量的 0.7%。在此参数下，所有类型再生沥青混合料的马歇尔试验指标及高低温性能、水稳定性等路用性能验证指标均满足规范要求。

6.4 试验结论与应用展望

试验表明，RAP 经精细分离、合理掺配后可满足公路各结构层技术要求，50%高掺量 RAP 具备可行性，已得到 AC-20、AC-25、LSPM-25 混合料验证。将其应用于新建、改建及养护工程，能够节约资源、降低造价，推动公路行业低碳循环可持续高质量发展。

7 结语

沥青回收料即使是对废料的积极处置，也是公路业迈入绿色高效时代的必然选择，所涉资源、经济及生态效益都是可计算的。必须以全链条控制、以数智装备和先进工艺为手段，打破异质性障碍与装备限制，充分释放 RAP 的潜力，将“双碳”构想变为现实，推动中国交通强国目标高速前进。

参考文献

[1] 黄颂昌，徐剑，秦永春．我国沥青路面再生技术现状及发展 [J]．公路交通科技，2020，37(10)：1-10．

[2] 季节，索智，王春红．沥青路面回收料（RAP）老化特性及再生机理研究进展 [J]．中国公路学报，2022，35(4)：1-15．

[3] 郭猛，任鑫，焦峪波，等．沥青及沥青混合料老化与抗老化研究综述 [J]. 中国公路学报.2022,35(4).DOI:10.3969/j.issn.1001-7372.2022.04.002 .