

沥青路面再生技术在公路养护中的成本效益分析

文 / 孙 勇 薛城区公路事业发展中心

摘要：随着公路交通事业的不断发展，沥青路面的养护需求越来越大。传统的养护方式存在不少问题，比如资源浪费严重、成本居高不下等，而沥青路面再生技术的出现，可为解决这些问题提供重要的途径。本文以某公路路面 AC-13 就地热再生维修项目为研究对象，详细介绍 RAP 沥青评价、再生方法、级配确定、施工温度控制及施工检验等技术，还会对比热再生沥青混合料与普通热拌沥青混合料的原材料成本，分析固定资产投资收益。从研究结果来看，RAP 掺量为 88% 的热再生沥青混合料材料成本节约率能达到 73.7%，而且就地热再生设备的投资回收期只有 7 年，明显比其他大型设备短。这种技术在资源利用、成本节约和环保方面优势明显，值得在公路养护中推广使用。

关键词：公路养护；沥青路面再生技术；成本效益

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.20.062

引言

公路是交通运输的重要基础设施，路面状况直接关系到通行效率和交通安全。随着沥青路面使用年限的增加，容易出现老化、裂缝、车辙等病害，需通过养护工程来恢复其功能。传统的养护大多是铣刨重铺，不仅要消耗大量新的集料、沥青等资源，而且产生的旧料堆在一起还会污染环境，同时，还面临着运输成本高、施工周期长的问题，与节能减排、资源循环利用的发展理念不符。沥青路面再生技术优势显著，通过回收利用旧沥青混合料，能减少新材料的消耗，降低施工时的能耗和碳排放，缩短养护周期，减少对交通的干扰^[1]。因此，对沥青路面再生技术在公路养护中应用方式与成本效益进行详细探究意义重大。

一、公路工程概况

假设某公路工程项目采用 AC-13 结构层，施工所用设备包括 1 台 RX4500 型号的路面再生机，2 台 HM4500 型高效红外加热设备，从表层加热、铣刨、添加再生材料，到混合、摊铺再到预压成型等施工全过程中，均可利用先进的技术设备，提高施工效率。

在施工初始阶段，采用 HM4500 型设备，利用红外技术把旧路面分为多个段落加热，使得原来的沥青层达到

规定的软化温度。接着，RX4500 型再生机启动旋转耙松机构，将软化后的表层材料按预定的铣刨深度进行翻动，再送入至车载双轴搅拌仓中，旧沥青材料与新沥青、新集料、专用再生剂等充分混合，形成再生热拌沥青混合料。混合好的物料，可通过螺旋布料系统均匀得送到已经加热的下承层上，然后借助自动找平系统和机载熨平板，按照道路设计标准完成摊铺和预成型。最后，用多轮压路机组合着进行压实，使得面层密度提升。整个再生层的结构和路用性能就能达到原来的设计要求，既可实现旧路的再利用，而且恢复道路结构。

二、公路养护沥青路面再生技术方案

（一）RAP 沥青评价

在沥青热再生时，RAP（回收沥青路面材料）中旧沥青性能的性能，可直接影响再生混合料的整体效果，所以必须对其性能做全面评估^[2]。在本工程施工中，采用离心提取结合阿布森法回收，先通过离心萃取技术对沥青成分进行分离，再用阿布森试验法恢复其物理状态。对于回收后的沥青样品，需检测一系列指标，如针入度、延度、软化点、135℃粘度，还需按照 SHRP 分级体系分析其高低温性能。RAP 沥青与建设期沥青性能检测结果见表 1。

表 1 RAP 沥青与建设期沥青性能检测结果

检测项目	RAP 沥青检测结果	建设期沥青检测结果	技术要求
针入度 (25℃, 100g, 5s) / (0.1mm)	26	75	≥ 50
延度 (5cm/min, 5℃) / cm	4	36	≥ 20
软化点 (环球法) TR & B/℃	67.5	72.0	≥ 70
旋转粘度 (135℃) / (Pa·s)	2.974	1.735	≤ 3
(G*/sin δ) / kPa	原样沥青 (76℃)	2.993	≥ 1.0
	RTFOT 后残留物 (76℃)	6.079	≥ 2.2
(G*·sin δ) / kPaPAV (100℃)	后残留物 (31℃)	4475	≤ 5000
	蠕变劲度 S/MPa	442	≤ 300
PAV 后残留物 (-12℃)	蠕变速率 m	0.233	≥ 0.3

注：G*/sin δ 为沥青车辙因子，G*·sin δ 为沥青疲劳因子。

旧沥青的低温性能退化明显，RAP 样本的蠕变劲度 S 升高， m 值却降低，达不到 PG76-22 等级标准，说明在低温环境下，旧沥青的抵抗裂缝扩展能力变弱。另外，软化点值下降，可能是由于 SBS 改性剂在长期使用过程中，出现相容体系失稳、结构断裂这些老化现象，使得原来的弹性组分和基质沥青分离，热稳定性变差，软化点降低。

通过对表 1 的数据进行分析，结论如下：一是 RAP 里的旧沥青高温性能比较好，适合用在要承受较大行车负荷的路面层；二是其低温延展性和整体韧性不够，如果在寒冷地区或者冬季施工，需特别考虑调整再生剂配方，或者适当减少 RAP 的掺量；三是因为软化点下降，老化也更严重，因此，在再生设计时，需搭配适量的新沥青和粘结剂，弥补旧料的性能缺陷，提高再生混合料的整体结构性能，延长其使用寿命。

(二) RAP 沥青再生方法

随着沥青材料使用时间的延长，其使用性能会下降。通过依据图 1 流程实施就地热再生处理，可显著提升再生沥青的整体性能。

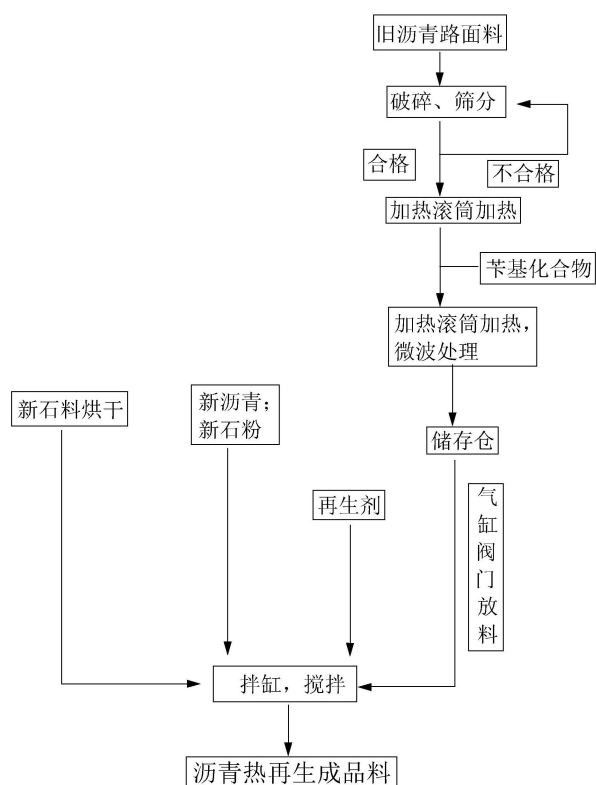


图 1 沥青就地热再生流程

为了使再生效果好，再生剂的性能要求比较高，首先，

需有适中的动态黏度，在施工温度下，能有好的流动和扩散能力；其次，要有较高的芳香族组分含量和较低的饱和分含量，有助于渗透到老化沥青里，恢复其粘结性能；同时，再生剂还得有良好的溶解能力，能充分分散沥青质的聚集结构，而且流变特性要优异，热稳定性和耐老化性也得强，适应高温混合和现场施工的环境。

但目前，大多数再生剂都是针对基质沥青研发的，可现在的公路，尤其是高等级公路的面层结构，很多都用 SBS 改性沥青。SBS 类高分子改性剂在沥青里形成网状交联结构，是其具备优良弹性和抗变形能力的关键。SBS 改性沥青老化时，不仅会发生常规沥青组分的化学变化，而且会伴随着高分子链段的降解和结构断裂，该过程不可逆，现有的再生剂无法修复或重建 SBS 交联网络。因此，在加入再生剂后，仅能在一定程度上降低老化材料的粘度，改善混合料的施工性能，在提高力学性能方面的作用比较小^[3]。

更重要的是，对于原来用 SBS 改性沥青的路面进行就地热再生时，加再生剂可能会使再生层混合料的高温稳定性下降，增加车辙出现的风险。由此可见，只靠再生剂对 SBS 改性沥青路面进行再生处理，很难满足恢复其结构和性能的需求。对此，可拓展再生剂的结构功能、添加纳米增强材料，或者开发特种功能添加剂，全面提高再生料的整体性能。

(三) 最佳级配确定

在设计再生混合料配合比时，RAP 原材料的粒径分布特性是关键因素。对该公路路面进行材料抽提试验后发现（表 2），该段路面的回收材料整体粒径分布和原来建设时的 AC-13 标准配合比相比，更偏向粗颗粒化，尤其是在中大粒径组上。

这种粗化趋势的形成原因是，在长期荷载作用下，密实级配 AC 类型混合料里的细集料，容易在交通剪切力的作用下被磨蚀或者从表层带走，最后导致混合料结构向粗级配发展。但是，在 SMA（间断级配沥青混合料）体系中不同，大粒径骨料占比高，在长期压实和摩擦过程中，其尖角结构会被磨钝或者破碎，粒径结构反而会变细。因此，在对不同类型的原路进行再生设计时，级配调整的策略得根据实际情况来定。

针对 AC 型沥青路面的再生设计，可以添加一定量粒径更细的新集料，补充因为细集料流失造成的配比缺口，使得整体骨架结构的级配更连续，密实度更好；而对于 SMA 型路面的再生处理，可添加部分粒径更大的粗集料，进而恢复原来的大粒径骨架结构特性。

表 2 沥青混合料级配组成

混合料类型	通过下列筛孔 (mm) 的质量百分率 /%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
建设期 AC-13 混合料	100	98.1	79.4	53.1	36.7	24.3	17.7	12.5	8.3	6.2
RAP	100	96.2	77.2	43.0	27.8	20.4	16.0	11.1	8.4	7.6
再生料	100	96.7	80.6	48.7	31.6	22.4	17.1	11.2	8.1	7.4
技术要求	100	90 ~ 100	68 ~ 85	38 ~ 68	24 ~ 50	15 ~ 38	10 ~ 28	7 ~ 20	5 ~ 15	4 ~ 8

(四) 施工温度

沥青混合料对温度特别敏感，其黏弹性表现受施工温度的影响，因此，在就地热再生施工过程中，需加强温度控制。按热再生工艺的要求，施工时环境温度需控制在 15℃ 以上，避免沥青流动性不足，对混合料拌和和压实效果造成不良影响。

为了让施工时的热量分布均匀，需采用实时测温的设备，比如红外测温仪、数字式插入热电偶这些，密切监测温度变化。就地热再生是持续加热的过程，热量从路面表层慢慢往里面传，理论上能传到 4-5 厘米深，但沥青混合料导热性差，加热时温度分层明显，表面的沥青容易老化严重，而深层的软化不足，最后再生层的成型效果和结实程度都会受影响。

为了提高热再生的效率，而且减少沥青受热老化的风险，需从热工理论出发，研究旧沥青材料的传热规律，调节再生设备加热系统的功率和热量释放方式调得更合。施工时，需根据不同再生机组加热段对应的路面温度情况，灵活调整加热温度、速度和时间。另外，也可采用

间歇加热、分区域分段控温等方法，缩小上下层的温差，使得材料软化得更均匀，提高再生质量和施工时的可控性^[4]。

(五) 施工检验

沥青路面就地热再生施工完成后，需加强施工质量检查，判断符合道路规范和使用要求。重点检查路面平整度、压实度、表面防滑效果。

再生后的路面表面得平整、密实、均匀，避免有松散的地方、裂缝，而且不能出现骨料分布不均、沥青浮在表面或者离析等问题。尤其是不同施工段之间的搭接处，需衔接得顺滑、牢固，达到热熔粘结的质量标准，保证路面结构的连续性和整体的受力性能。

三、沥青路面再生技术在公路养护中的成本效益分析

为了了解沥青路面就地热再生在实际公路养护中的成本效益，将再生沥青混合料和常规热拌 AC-13 混合料的原料成本做对比。所有材料的价格都包含运到现场的运费，可全面反映采购成本，具体数据如表 3。

表 3 每 t 再生沥青混合料与热拌沥青混合料原材料成本比较

规格型号	单价 / (元·t ⁻¹)	热拌沥青混合料		热再生沥青混合料	
		消耗量 / t	费用 / 元	消耗量 / t	费用 / 元
碎石	70	0.618	43.26	0.030	2.10
机制砂	75	0.304	22.80	0.089	6.68
矿粉	200	0.029	5.80	—	—
SBS 改性沥青	5214	0.049	255.49	0.0093	48.49
再生剂	17949	—	—	0.0016	28.72
材料费用小计 / 元			327.35		85.99
差价 / 元					241.37
成本节约 1%					73.7

从数据能看出来，当再生混合料里回收旧料 (RAP) 的掺量达到 88% 时，原材料总成本比常规热拌混合料低 73.7%。与张筱薇等学者通过实际工程和实验研究大致相同，说明再生技术在节省原材料成本方面有很大优势^[5]。

传统工艺较为复杂，而再生技术直接在现场处理旧料，无需堆放废料，既省时间，而且污染比较少。值得注意的是，就地热再生虽然在材料与施工环节具有优势，但初期设备投入相对较大。

结语

综上所述，本文结合实例，对公路养护施工中沥青路面再生技术的应用策略与效果进行探究。根据本次案例分析，在公路养护中，应当结合实际情况选用适宜的沥青路面再生技术类型，加强旧沥青处理、级配调整、控温等关键技术环节控制。该项技术应用成本效益显著，对案例项目的应用成本进行计算，材料能省 73.7%，虽然在设备采购应用方面的成本投入比较大，但是有利于

提高公路养护施工质量，通过推广应用该项技术，有利于提高公路工程养护成本效益。

参考文献

[1] 覃智芳. 沥青混凝土热再生技术在山区公路路面养护工程中的应用 [J]. 交通世界, 2025, (17): 64-66.
 [2] 周凡. 高速公路沥青路面病害的成因与预防性养护技术研究 [J]. 交通建设与管理, 2025, (02): 194-197.
 [3] 赵东辉. 基于沥青路面现场热再生技术的高速公路沥青路面养护 [J]. 广东建材, 2024, 40 (12): 134-136.
 [4] 李文学. 基于厂拌热再生技术的公路沥青路面养护方法 [J]. 中国科技信息, 2024, (19): 103-105.
 [5] 倪晓明. 公路旧沥青路面现场热再生技术研究 [J]. 低碳世界, 2024, 14 (04): 118-120.