

# 高性能再生沥青混合料在公路养护中的应用与性能评价

邱 果

汉中市南郑区农村公路管理站 陕西 汉中 723100

**摘要：**高性能再生沥青混合料在公路养护中应用广泛。本文阐述其组成与制备技术，包括材料组成设计及制备工艺创新；分析核心应用场景，涵盖路面病害修复、预防性养护和特殊路段养护；构建性能评价体系，涉及基础物理、路用、耐久及功能性能；提出性能优化策略，从材料设计、生产工艺和施工工艺方面改进。研究成果为公路养护提供技术支撑，推动再生沥青混合料高效应用。

**关键词：**高性能再生沥青混合料；公路养护；应用场景；性能评价；优化策略

引言：公路交通作为国民经济重要基础，养护工作至关重要。传统养护材料与工艺面临资源消耗大、成本高、环保性差等问题。高性能再生沥青混合料凭借资源循环利用、性能优良等优势，成为公路养护领域研究热点。通过合理利用旧沥青路面材料，经科学设计制备，可有效修复路面病害、提升路用性能。深入研究其应用与性能评价，对推动公路养护技术升级、实现可持续发展意义重大。

## 1 高性能再生沥青混合料的组成与制备技术

### 1.1 材料组成设计

旧沥青路面材料作为再生混合料的核心组分，需通过破碎筛分实现分级利用。

针对不同粒径范围的回收料，需针对性开展含泥量控制与沥青老化程度检测，确保旧料掺配比例与新料形成级配互补<sup>[1]</sup>。再生剂的选择需兼顾化学改性与物理调和双重路径，化学改性剂通过分子链断裂与重组恢复旧沥青的流变性能，物理调和剂则依赖低黏度组分稀释老化沥青的硬质成分。

在材料组成设计过程中，还需重点关注旧料的老化均匀性，通过多点取样检测确定老化程度分布范围，对老化差异较大的旧料进行分区处理后再掺配，避免局部性能短板影响整体混合料质量。

同时结合工程所在区域的气候条件针对性调整材料参数，高温地区侧重提升沥青软化点，寒冷地区则强化低温延度指标，确保混合料适配地域环境特性。

新集料掺配需强化与旧料的嵌挤结构，优先选用碱性石料提升黏附性，通过调整新沥青的针入度与软化点，实现新旧沥青的相容性匹配。级配设计需遵循骨架密实原则，通过间断级配优化矿料间隙率，确保混合料在高温抗车辙与低温抗裂性能间取得平衡。

### 1.2 制备工艺创新

温拌再生技术通过引入有机降黏剂或水基发泡剂，在120-140℃温度区间实现沥青的流动性调控，较传统热拌工艺能耗降低30%以上，同时减少挥发性有机物排放。

厂拌热再生工艺采用双滚筒连续式拌和设备，通过独立加热系统实现RAP与新料的梯度升温，避免局部过热导致的沥青二次老化；

就地热再生则利用大型加热机组对原路面进行原位加热软化，经耙松、复拌后直接摊铺，适用于大面积连续病害修复。

复合改性技术通过多组分协同作用提升混合料综合性能，橡胶粉改性可显著提高弹性恢复能力与降噪效果，纤维增强则通过桥接裂缝机制延缓疲劳破坏，纳米二氧化硅通过填充效应优化沥青胶浆的微观结构，使混合料的动稳定度提升40%以上。

工艺参数控制需结合材料特性进行动态调整，如温拌剂的掺量需根据RAP含水率实时修正，纤维的分散度需通过高速剪切工艺保障。

## 2 再生沥青混合料在公路养护中的核心应用场景

### 2.1 路面病害修复

裂缝修复需根据裂缝宽度与深度选择适配的再生材料类型。对于宽度小于5mm的微裂缝，采用高黏度再生沥青结合灌缝工艺，通过材料渗透填充实现裂缝自愈合；针对宽度超过10mm的块状裂缝，需先铣刨破损层，再铺筑再生混合料形成结构补强层<sup>[2]</sup>。

车辙修复需重点提升混合料的高温稳定性，通过调整再生剂掺量降低旧沥青的感温性，同时优化压实工艺参数确保压实度达到设计要求。对于深度超过30mm的重度车辙，需分层填筑再生混合料，每层压实厚度控制在8-12cm，避免因压实不足导致二次变形。

坑槽修复需兼顾快速开放交通与长期耐久性，采用冷补型再生混合料时，需通过添加快凝型添加剂缩短固

化时间；使用热拌再生料时，需严格控制摊铺温度与碾压遍数，确保层间粘结强度满足规范要求。

## 2.2 预防性养护

薄层罩面技术通过铺筑2-4cm厚的再生沥青层实现路面功能提升。该技术需选用间断级配再生混合料，利用粗集料骨架结构增强抗滑性能，通过掺入橡胶粉或纤维稳定剂降低行车噪声。

封层技术分为碎石封层与稀浆封层两类：碎石封层通过同步洒布改性乳化沥青与集料形成防水磨耗层，适用于中等交通量道路；稀浆封层采用细粒式再生混合料，通过调整油石比实现抗老化与应力吸收功能的平衡。

预防性养护的核心在于“早干预、少投入”，需建立路面性能长期监测体系，结合气象数据、交通荷载数据构建预测模型，精准预判病害发展趋势。

预防性养护时机的选择需基于路面性能衰变模型，当路面PCI指数降至80以下或裂缝率超过5%时，应及时实施封层或罩面处理，避免病害扩展导致养护成本增加。

## 2.3 特殊路段养护

桥梁铺装层再生需兼顾结构减重与抗疲劳性能。采用轻质再生混合料时，需通过掺入玻璃纤维或玄武岩纤维增强材料韧性，同时控制铺装层厚度不超过8cm以减轻恒载。

隧道内路面再生需满足防火、防滑与耐化学腐蚀要求，需选用阻燃型再生沥青并掺入耐磨集料，表面构造深度控制在0.8-1.2mm范围内。对于长隧道通风受限区域，需采用温拌再生技术降低施工烟气排放，拌和温度控制在130℃以下以减少有害气体生成。

对于高海拔寒冷路段，再生混合料需强化低温抗冻性设计，添加抗冻剂提升冰点抗性；对于沿海盐雾地区，需选用耐盐蚀再生剂与防腐集料，抑制氯离子对路面结构的侵蚀。施工过程中还需采取专项防护措施，确保恶劣环境下的施工质量与作业安全。

特殊路段养护施工前需开展专项试验段验证，通过性能检测与数值模拟优化材料配比与施工工艺参数。

## 3 再生沥青混合料的性能评价体系

### 3.1 基础物理性能

密度、空隙率与矿料间隙率的协同控制是再生混合料设计的关键。

密度指标需结合理论最大密度与现场压实密度进行双控，确保混合料达到设计密实度要求。

空隙率设计需兼顾高温稳定性与水稳定性，通常控制在3%-6%范围内，过小易导致车辙病害，过大则可能引发水损害。

矿料间隙率的优化需通过级配调整实现，粗集料形成骨架结构时，需确保细集料充分填充间隙，避免出现离析现象<sup>[3]</sup>。

### 3.2 路用性能

高温稳定性评估以车辙试验动稳定度为核心指标，试验需在60℃条件下模拟重载交通作用，动稳定度值不低于3000次/mm，数值越高表明抗变形能力越强。

低温抗裂性通过弯曲试验破坏应变进行量化，试验温度设定为-10℃，破坏应变需达到2000 $\mu\epsilon$ 以上，以抵抗寒冷地区温度收缩产生的脆性断裂。

水稳定性评价包含浸水马歇尔残留稳定度与冻融劈裂强度比两项指标，残留稳定度需大于80%，冻融劈裂强度比应不低于75%，两项指标共同反映混合料在水分作用下的抗剥落能力。对于多雨地区或地下水位较高路段，水稳定性指标需提高5%-10%以增强适应性。

路用性能评价需结合工程实际工况进行指标适配调整，针对重载交通路段，需提高高温稳定性指标阈值，动稳定度可提升至4000次/mm以上；对于季冻区路段，强化低温抗裂性检测，除弯曲试验外，增加低温收缩试验评估材料收缩特性。同时，引入动态加载试验模拟实际行车荷载的交变作用，更精准地反映混合料的长期路用性能表现。

### 3.3 耐久性

抗疲劳性能测试采用四点弯曲疲劳试验，在10Hz加载频率与100 $\mu\epsilon$ 应变水平下，混合料需承受不低于100万次循环加载而不发生破坏，能量耗散分析可进一步揭示材料内部损伤演化规律。

抗老化性能通过压力老化容器加速试验模拟长期使用过程，试验后针入度比需大于60%，延度保留率应不低于50%，流变性质变化需满足PG分级要求。对于开放交通5年以上的再生路面，需钻取芯样开展实际老化程度检测，与实验室加速试验结果进行对比验证。

耐久性指标设计需考虑交通荷载等级，重载交通路段应提高抗疲劳与抗老化标准10%-15%。

### 3.4 功能性能

抗滑性能评价结合摆式摩擦系数与构造深度两项指标，摆值需大于55BPN，构造深度应控制在0.8-1.2mm范围内，确保雨天行车安全性。功能性能评价需紧扣路面使用功能定位，构建多维度评价体系。

除常规指标外，增加行车舒适性相关指标检测，如路面平整度（IRI值），确保再生路面满足行车平顺性要求。

同时，针对智能化交通发展需求，探索再生混合料与路面感知元件的兼容性评价，确保在不影响功能性能

的前提下,实现路面智能化监测功能的集成应用。

降噪性能通过纹理深度与吸声系数进行量化,纹理深度越大,轮胎与路面接触噪声越低,吸声系数需在1000Hz频段达到0.2以上以有效吸收行车噪声。

排水性能评估以孔隙率与渗透系数为关键参数,孔隙率需大于15%以保证排水通道畅通,渗透系数应不低于100m/d以快速排除路面积水<sup>[4]</sup>。对于海绵城市道路建设,排水性能指标需根据设计降雨重现期进行动态调整,确保暴雨工况下路面无积水现象。

功能性能指标需与路面使用功能定位相匹配,城市快速路应优先满足抗滑与降噪要求,郊区公路则需强化排水性能设计。

#### 4 再生沥青混合料性能优化策略

##### 4.1 材料设计优化

多级掺配技术通过高比例RAP与新型再生剂的协同作用实现性能突破。复合改性技术通过橡胶粉与纤维的协同增强效应提升混合料综合性能,橡胶粉在高温条件下形成弹性网络,吸收车辆荷载产生的应力,降低车辙深度;纤维材料通过桥接作用抑制裂缝扩展,提高抗疲劳寿命。二者按质量比2:1掺入时,混合料的动稳定度较单一改性体系提升30%,低温弯曲破坏应变提高25%。

##### 4.2 生产工艺改进

智能拌和设备通过多参数耦合控制实现生产过程精准化。

温度监测系统采用红外传感器阵列,实时采集拌和锅内物料温度,当温度偏差超过 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 时自动调整加热功率。

掺配比例控制模块集成称重传感器与变频给料机,确保RAP、新集料、再生剂添加误差小于1%。

3D打印技术应用于异形病害修复时,需开发专用喷头与材料输送系统。喷头运动轨迹根据病害三维模型生成,打印层厚控制在5-10mm以保证成型精度。材料输送系统采用双螺杆挤出机,通过调节转速实现不同黏度再生混合料的连续供给。试验段验证显示,3D打印修复区域与原路面粘结强度可达1.2MPa,材料利用率较传统方法提高30%。

##### 4.3 施工工艺创新

非开挖快速修复技术将就地热再生与冷补工艺进行功能整合。

对于深度小于8cm的表层病害,采用红外加热机组对原路面进行局部加热,待旧料软化后耙松并掺入再生剂与新集料,最后通过复拌机完成再生层铺筑<sup>[5]</sup>。

针对深度超过8cm的深层病害,先采用冷补材料填充底部空隙,再铺筑热拌再生混合料形成复合结构。

无人机巡检系统搭载多光谱相机与激光雷达,可识别0.1mm级裂缝与2mm级车辙变形。AI病害识别算法通过深度学习模型对采集数据进行处理,自动生成包含病害位置、类型与严重程度的数字地图。修复方案生成模块根据病害特征调用材料数据库,推荐最优修复工艺与材料配比。

##### 结束语

高性能再生沥青混合料在公路养护中的应用,有效解决了资源利用与养护质量的矛盾。通过科学的组成设计与制备工艺创新,使性能不断提升,在多种养护场景中发挥关键作用。完善的性能评价体系为质量把控提供依据,优化策略则进一步挖掘应用潜力。随着技术持续进步,高性能再生沥青混合料将在公路养护领域发挥更大价值,为公路交通的稳定运行提供坚实保障。

##### 参考文献

- [1] 龚萍.环氧沥青再生混合料在公路路面养护中的应用[J].交通世界,2025(29):45-47.
- [2] 李实成,陈金华.冷拌再生改性沥青混合料在重载密集山区干线公路养护上的应用研究[J].价值工程,2024,43(22):5-7.
- [3] 马禹霖.高速公路养护管理中的热再生沥青混合料应用研究[J].运输经理世界,2023(28):139-141.
- [4] 雷建.废旧沥青混合料再生在高速公路修复中的应用[J].时代汽车,2025(17):154-156.
- [5] 陈小宁,范雨,宋世杰,等.不同旧料处理方式对农村公路泡沫沥青冷再生混合料路用性能的影响研究[J].工程与建设,2025,39(3):707-709,719.