

高韧性强韧沥青混合料在桥面铺装中的耐久性评价与施工控制

刘 健

(江西诚正工程咨询有限公司, 江西 赣州 341000)

摘要 高韧性强韧沥青混合料是提升桥面铺装耐久性的关键材料, 依托改性沥青高黏弹特性与纤维增强作用, 可针对性抵御铺装病害。本文探讨了高韧性强韧沥青混合料的组成特性与桥面常见病害诱因, 明确了材料性能与病害防控的适配性, 并在此基础上构建了多维度耐久性评价体系, 既解析荷载、环境、材料作用机制, 又建立含力学、抗老化、抗水损害、抗裂的指标体系, 还形成实验室与现场结合的评价模型。同时提出细化原材料控制、混合料配合比优化、工艺调控及现场检测反馈等施工控制策略, 以期为促进高韧性强韧沥青混合料的应用提供借鉴。

关键词 高韧性强韧沥青混合料; 桥面铺装; 耐久性评价; 抗裂性能

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.32.021

0 引言

《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》明确要求“提升基础设施耐久性, 加强桥梁等重要结构物的长期性能监测与维护”。桥面铺装作为桥梁与车辆直接接触的结构层, 其耐久性直接关系到桥梁服役安全与运营成本。传统沥青混合料桥面铺装因材料性能限制, 易受动荷载反复作用、温度循环变化、雨水浸泡影响, 出现温度裂缝、重载车辙、水损害等病害, 严重缩短桥梁寿命。高韧性强韧沥青混合料作为新型功能材料, 具备良好抗裂性、抗变形能力及疲劳寿命, 是解决桥面铺装耐久性问题的有效途径^[1]。本文拟从该材料特性出发, 构建耐久性评价体系、提出施工控制策略, 为提升桥面铺装使用寿命提供技术参考。

1 高韧性强韧沥青混合料的特性及其在桥面铺装中的应用需求

高韧性强韧沥青混合料是桥面铺装专用新型材料, 以高模量沥青为核心粘结剂, 搭配聚酯 / 玄武岩纤维、矿粉 / 粉煤灰活性填料形成复合体系——高模量沥青提供粘结与抗变形基础, 纤维借桥接效应抑裂缝, 活性填料优化界面提升沥青—集料粘结力。其关键性能为: 纤维增强抗裂性, 抵御温变与荷载致裂缝; 高模量沥青强化抗变形, 耐重载无永久车辙; 活性填料改善胶浆稳定性, 延长疲劳寿命; 界面优化降层间剥离风险。桥面铺装易现温度裂缝、重载车辙、水损害、层间剥离, 材料需具备高韧性、强适应性、抗老化、

抗疲劳性。该混合料匹配需求, 能解决病害, 对提升铺装耐久性、保障桥梁安全至关重要^[2]。

2 高韧性强韧沥青混合料桥面铺装的耐久性评价体系

2.1 耐久性影响因素分析

荷载是桥面铺装耐久性下降的直接诱因。车辆动荷载反复作用产生交替应力, 累积后促使内部萌生微裂缝并扩展, 最终引发疲劳破坏; 重载超载则加剧永久变形, 破坏沥青与集料粘结, 加速车辙和裂缝蔓延。环境是重要的外部条件。温度循环使铺装层热胀冷缩, 应力超限时诱发温度裂缝, 低温下材料更脆、裂缝难愈合; 雨水渗入削弱粘结力, 引发唧泥、坑槽等水损害; 紫外线长期照射加速沥青老化, 使其失塑性、变脆, 混合料抗裂性下降。材料是内在基础。沥青老化导致针入度降低、延度减小, 抗裂性变差; 集料级配不稳定会引发空隙率失衡, 进而导致铺装层结构强度波动; 纤维分散不均则难以抑制裂缝萌生扩展, 甚至在团聚处形成应力集中, 成为损坏起点^[3]。

2.2 耐久性评价指标体系构建

结合桥面铺装病害特征与使用场景, 建立多维度耐久性评价指标体系。力学性能指标反映混合料抵抗荷载作用的能力, 包括弯拉强度、疲劳寿命、抗变形能力, 其中弯拉强度需 $\geq 4.5 \text{ MPa}$, 疲劳寿命需 ≥ 100 万次(四点弯曲疲劳试验, 应力比 0.5), 抗变形能力以动稳定性表征, 需 $\geq 3\,000$ 次/mm (60 °C, 0.7 MPa)。

抗老化指标反映混合料长期使用中的性能保持能力，包括残留针入度比、老化后延度、软化点增量，残留针入度比需 $\geq 70\%$ (100 °C, 5 h 老化)，老化后延度(10 °C)需 $\geq 15 \text{ cm}$ ，软化点增量 $\leq 8 \text{ °C}$ 。抗水损害指标反映混合料抵御雨水侵蚀的能力，包括马歇尔稳定度残留率、冻融劈裂强度比、渗水系数，马歇尔稳定度残留率需 $\geq 85\%$ (浸水48 h)，冻融劈裂强度比需 $\geq 80\%$ (25次冻融循环)，渗水系数 $\leq 100 \text{ mL/min}$ 。抗裂指标反映混合料抵抗裂缝产生与扩展的能力，包括低温弯曲应变、裂缝扩展速率，低温弯曲应变需 $\geq 2500 \mu\epsilon$ (-10 °C, 50 mm/min)，裂缝扩展速率 $\leq 0.01 \text{ mm/次}$ (三点弯曲裂缝扩展试验)^[4]。

2.3 耐久性评价方法与模型建立

实验室评价方法主要通过模拟实际服役环境与荷载条件，对混合料耐久性进行量化分析^[5]。室内疲劳试验采用四点弯曲疲劳试验，通过控制应力或应变水平，测定混合料的疲劳寿命；加速老化试验采用压力老化容器(PAV)结合紫外线老化试验，模拟沥青混合料在长期使用中的老化过程；水损害模拟试验采用冻融循环试验(25次循环)，评价混合料在雨水浸泡与温度变化共同作用下的抗水损害能力。现场评价方法则通过无损检测与长期监测，反映铺装层的实际使用状态，无损检测技术包括地质雷达、超声波检测，用于检测铺装层内部缺陷(如空洞、离析)；长期性能监测系统采用应变片、温度传感器，实时监测铺装层的应力、温度变化。结合灰色关联分析确定各影响因素的权重，明确不同指标对耐久性的贡献程度；采用BP神经网络构建耐久性评价模型，输入各评价指标数据，输出耐久性等级与剩余寿命预测值，实现对桥面铺装耐久性的定量化评估与寿命预测。

表1 高韧性强韧沥青混合料原材料技术要求表

原材料类型	技术参数	要求值	检验 / 预处理要求
沥青(粘结剂)	25 °C针入度	60 ~ 80 dmm	需做薄膜烘箱老化试验，残留针入度比 $\geq 80\%$ ；恒温存储于130 ~ 140 °C保温罐
	10 °C延度	$\geq 20 \text{ cm}$	
	软化点	$\geq 50 \text{ °C}$	
集料	0.075 mm通过率	3% ~ 5% (连续密级配)	筛分试验控制级配偏差；进场后干燥除尘，含水率 $\leq 1\%$ 、粉尘含量 $\leq 1\%$
	压碎值	$\leq 26\%$	
	粗集料棱角性	$\geq 12 \text{ s}$	
纤维(增强剂)	长度	6 mm(聚酯纤维)	水洗法检测分散均匀性，无结团；使用前机械预分散
	抗拉强度	$\geq 500 \text{ MPa}$	
	水中分散率	$\geq 95\%$	

3 高韧性强韧沥青混合料桥面铺装的施工控制策略

3.1 原材料质量控制

明确高韧性强韧沥青混合料原材料技术要求(见表1)：沥青需满足25 °C针入度60 ~ 80 dmm、10 °C延度不小于20 cm、软化点不低于50 °C；集料采用连续密级配，0.075 mm通过率3% ~ 5%，压碎值不大于26%，粗集料棱角性不小于12 s；纤维选用6 mm聚酯纤维，抗拉强度不小于500 MPa，水中分散率不低于95%。制定原材料进场检验标准：沥青需进行薄膜烘箱老化试验，残留针入度比不小于80%；集料通过筛分试验控制级配偏差在规范允许范围内；纤维采用水洗法检测分散均匀性，确保无结团现象。提出原材料存储与预处理措施：沥青恒温存储于130 ~ 140 °C的保温罐中，防止老化；集料进场后进行干燥除尘，含水率不大于1%，粉尘含量不大于1%；纤维使用前采用机械分散法预先分散，避免施工中结团影响混合料均匀性。

3.2 混合料配合比设计优化

基于桥面铺装耐久性要求，采用正交试验选取沥青用量、集料级配、纤维掺量、活性填料比例为因素，以抗裂性、抗变形能力、疲劳寿命为指标，确定各参数的最佳组合；通过响应面法建立指标与参数的回归模型，进一步优化参数组合，得到最佳配合比参数(见表2)：沥青用量4.5% ~ 5.0%，集料级配为AC-13型连续密级配，纤维掺量0.2% ~ 0.3%，活性填料(矿粉+水泥)比例10% ~ 12%。重点分析纤维掺量对混合料性能的影响：纤维掺量从0.1%增加到0.3%时，低温弯曲应变提高20% ~ 30%，车辙深度减小15% ~ 25%，但掺量超过0.3%后，混合料均匀性下降，抗变形能力提升趋缓。通过马歇尔试验验证稳定性不小于8 kN、流值2 ~ 4 mm，

表 2 高韧性强韧沥青混合料最佳配合比参数及性能验证表

类别	参数名称	最佳取值范围 / 类型	性能验证指标	验证要求值
配合比参数	沥青用量	4.5% ~ 5.0%	马歇尔稳定度	$\geq 8 \text{ kN}$
	集料级配	AC-13 型连续密级配	马歇尔流值	2 ~ 4 mm
	纤维掺量	0.2% ~ 0.3% (超 0.3% 则均匀性下降)	车辙试验动稳定性	$\geq 3000 \text{ 次/mm}$
	活性填料比例 (矿粉 + 水泥)	10% ~ 12%	低温弯曲试验破坏应变	$\geq 2500 \mu\epsilon$

车辙试验动稳定性不小于 3 000 次/mm, 低温弯曲试验破坏应变不小于 $2500 \mu\epsilon$, 确保配合比合理性。

3.3 施工工艺参数调控

针对高韧性强韧沥青混合料特性, 优化施工工艺参数: 拌合工艺需控制沥青加热温度 150 ~ 160 °C、集料加热温度 170 ~ 180 °C, 拌合温度 160 ~ 170 °C, 拌合时间 45 ~ 60 s (干拌 10 ~ 15 s, 湿拌 35 ~ 45 s), 并明确纤维添加顺序——先加集料, 再加纤维, 干拌后加沥青, 避免纤维结团; 摊铺工艺要求摊铺温度 $\geq 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 摊铺速度 2 ~ 3 m/min (保持匀速, 避免停机待料), 采用非接触式平衡梁控制摊铺厚度, 误差 $\leq \pm 5 \text{ mm}$; 压实工艺选择 10 ~ 12 t 钢轮压路机 (初压) + 25 t 胶轮压路机 (复压) 组合, 遵循先轻后重的压实顺序 (初压 → 复压 → 终压), 压实遍数 6 ~ 8 遍 (初压 2 遍, 复压 3 ~ 4 遍, 终压 1 ~ 2 遍)。为防止施工过程中材料性能衰减, 需采取保温篷布覆盖 (摊铺后立即覆盖, 防止温度快速下降)、快速压实 (从摊铺到初压时间不超过 15 min) 等措施。

3.4 现场质量检测与反馈

建立现场质量检测体系: 一方面, 施工过程中需实时监测拌合温度 (用温度传感器)、摊铺厚度 (用激光测厚仪)、压实度 (用核子密度仪), 确保参数符合设计要求; 另一方面, 施工后需通过钻芯取样检测密度与空隙率 (每 1 000 m² 取 1 个芯样, 空隙率控制在 4% ~ 6%)、地质雷达检测内部缺陷 (采用 1 GHz 天线, 识别空洞、离析等问题)、摆式仪检测抗滑性能 (BPN 不小于 45)。针对检测中发现的问题, 制定质量问题反馈与整改机制: 压实度不足 (小于 96%) 时, 用钢轮压路机补压 1 ~ 2 遍; 混合料离析 (局部粗集料集中) 时, 调整拌合时间 (延长 10 ~ 15 s) 或摊铺速度 (降低 0.5 ~ 1 m/min); 层间粘结不良 (钻芯发现剥离) 时, 清除表面浮料, 重新洒布粘层油 (用量 0.3 ~ 0.5 kg/m²), 再摊铺上层混合料。通过闭环管理, 确保施工质量符合设计要求。

4 结束语

针对高韧性强韧沥青混合料桥面铺装构建的耐久性评价体系, 全面涵盖铺装耐久性关键影响因素, 建立含抗裂性、抗变形能力、疲劳寿命等的多维度指标及对应评价模型; 配套的施工控制策略则细化原材料筛选标准、配合比优化方法、摊铺压实工艺参数及全过程检测环节。二者结合能有效提升铺装抗裂、抗变形性能与疲劳寿命, 切实解决传统铺装温度裂缝易扩展、重载车辙深等病害, 为工程量化评估提供科学依据, 为施工技术实施提供具体参考。相较前人研究, 本文评价体系更具系统性, 施工控制策略更贴合工程实际, 弥补了过往“重材料性能优化、轻施工过程管控”的研究短板——以往研究多聚焦材料本身, 对施工环节缺乏细致方案, 而本文形成“性能评价—施工控制”全流程体系。但研究存在局限: 未深入探索纤维分散性实时检测技术, 当前检测依赖离线方式; 铺装长期服役性能监测数据积累不足, 难以反映不同环境下的性能衰减规律。未来可嵌入智能传感器实现纤维分散动态监测, 持续积累长期数据, 提升耐久性预测精度, 为桥面铺装长效服役完善技术支撑。

参考文献:

- [1] 杨嘉, 王斌斌, 刘攀, 等. 热拌封闭型聚氨酯沥青制备及其固化动力学 [J]. 热固性树脂, 2025, 40(03):35-41.
- [2] 项震宇, 陈军, 张佳熳, 等. 基于数字散斑相关方法的老化沥青混合料疲劳开裂行为探究 [J]. 公路, 2025, 70(06): 11-18.
- [3] 侯志勇, 赵毅, 刘树祥, 等. 微波加热钢渣沥青混合料老化性能及微观机理研究 [J]. 公路, 2025, 70(06):342-352.
- [4] 艾欣满, 曹继伟, 冯德成, 等. 物理精细分离工艺下厂拌热再生沥青混合料质量监测 [J]. 公路交通科技, 2025, 42(06):67-75.
- [5] 丁湛, 田晨曦, 张慧馨, 等. SBS 改性沥青的黏流特性及压实温度确定 [J]. 化学工程, 2025, 53(06):58-62, 88.