

面向成本与性能均衡的沥青双改性化工工艺优化及产业化控制研究

李义飞 (中铁六局集团有限公司国际事业部, 北京 100037)

摘要: 双改性沥青在高温重载工况下拥有优良的稳定性与弹性协同特性, 但是材料成本与工艺适应仍然存在推广障碍。本文围绕改性剂配比、温控剪切、分散效率等关键参数展开分析, 结合典型工程实践, 验证 SBS+ 抗车辙剂体系在性能控制与能耗压降方面的工程适配性。研究提出一套能兼顾性能与成本的工艺调控策略, 为双改性沥青在复杂环境下的产业化应用提供参考依据。

关键词: 双改性沥青; 反应控制; 成本平衡; 分散体系; 工艺适应性; 工程验证

中图分类号: F426.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 007-0028-03

Research on process optimization and industrialization control of asphalt double modification chemical industry for the balance of cost and performance

Li Yifei (International Business Department, China Railway Sixth Group Co., Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: Double modified asphalt has excellent stability and elastic synergy characteristics under high temperature and heavy load conditions, but there are still obstacles in the promotion of material cost and process adaptation. In this paper, the key parameters such as modifier ratio, temperature controlled shearing, dispersion efficiency and so on are analyzed. Combined with typical engineering practice, the engineering adaptability of SBS+anti rutting agent system in performance control and energy consumption pressure drop is verified. The research puts forward a set of process control strategy that can take into account both performance and cost, which provides a reference for the industrial application of double modified asphalt in complex environment.

Key words: double modified asphalt; Reaction control; Cost balance; Dispersed system; Process adaptability; Engineering verification

在重载运输频次提升与气候高温化背景下, 道路结构长期稳定性要面对更大考验。常规单一的改性沥青在剪切变形、高温流动与疲劳损伤等方面存在性能边界, 没有办法长期适应多变量工况干扰, 部分高温干旱区域的道路项目中, 基层结构与面层之间容易产生粘结滑移或热黏应力集中, 进而影响结构协同与路面完整性。为了增强材料的弹塑兼容性与耐久响应能力, 多选用双改性体系改善分子网络结构与高温黏弹特性, 但是这个方式在材料复配、工艺温控与现场摊铺环节还是有一些成本控制压力, 特别是在大面积施工中, 化工工艺的参数稳定性与配方经济性对材料推广提出更高要求。

1 双改性沥青的应用需求与成本约束

1.1 高温重载适应需求

高温干旱带道路路面长期处在高剪切与热交变状态, 塑性流变和早期破损频发。实测区段地表温度最高有 80℃, 重载车辆平均一日通行量超过 4 万辆, 摊铺结构在稳定期内承压极限频繁波动, 一些病害段引入双改性沥青后, 试样软化点维持在 76℃, 轮碾稳定度达 2300 次/mm, 变形控制明显比常规改性结构优

良^[1]。如图 1 所示, 现场结构失稳与材料重建过程反映出该方式在高温场景下具备温控压实协同优势。



图 1 高温环境下道路重建现场图

1.2 材料成本控制压力

在批量施工过程中, 双改性材料的改性剂配比直

接影响单方造价与反应能耗。掺量控制在 2.8% - 4.0% 区间时,材料性能指标波动可控,但是每增加 1% 掺量,单位成本平均上浮约 120 元人民币,如果现场反应温控或分散效率失稳,容易导致改性剂残留偏析与成膜不均,进而增加重复喷洒或摊铺风险,所以一般实际作业中往往结合沥青等级、剂型特性与摊铺设备响应能力,对掺量边界与能耗效率进行统一调配。

2 双改性沥青化工工艺的核心优化路径

2.1 反应配比与温控优化

项目用 SBS+ 抗车辙剂双改体系, SBS 为中石化 F832 型,掺量 5.2%; 抗车辙剂为苏博特润强 -MA103 型,掺量 0.3%。基质沥青选用 70# 重交沥青,最佳沥青用量是 3.6%,油石比控制在 3.73%。反应阶段依托 CL-3000II 型拌合设备,温控设定在 170℃ - 190℃,剪切速率维持在 4500 - 5500r/min,以保障物料均匀反应与结构形成稳定性^[2]。剪切周期设定为 35 - 50min,系统压力动态调节至 0.25 MPa 上下,进料端与转子叶轮之间设置恒温循环层,目的是减缓高温碳化风险。反应釜封口选择氮气顶压方式,压力维持在 0.02 - 0.04 MPa 之间,防范氧化析油与杂相入侵,反应中期同步抽取液检测剪切表观粘度与布氏旋转粘度,指标稳定区域控制在 2.5 - 3.0 Pa·s (135℃),判定相容结构初步形成后再进入延缓段温保相处理。

2.2 分散体系与均质效率调节

在沥青用量与油石比参数确定之后,改性反应体系要在冷却前完成剪切乳化流程。混合料首先经低速螺旋缓冲降压,防控剪切突变诱发聚团回弹,再进入设有撞击齿盘与挡板的初级乳化区完成粒径打散,最终引导到剪切定向区,增强界面融合。在均质过程设定中,重点不在绝对转速,也可以看调节剪切梯度与分散路径的协调性。操作中,分散室转子 - 定子间隙控制在 0.2 - 0.3 mm,颗粒在离心作用下完成轴向与切向交错运动,形成网状剪切轨迹,助剂不用表面活性剂主导,另外选用共聚体嵌段预乳化形式,引导粒子与基质油相界面发生包裹重组,从而降低界面张力,稳定结构状态。在尾段增黏阶段不加入另外的高分子链段,而是选择控温方式慢慢下调体系黏度,让粒径分布保持在 $D_{90} \leq 30 \mu\text{m}$ 内,粒子长轴方向与油膜层基本保持一致,便于摊铺过程中横向稳定与剪切抗性维持。

2.3 复配结构与成本控制路径

在沥青双改体系中,材料协同结构并不是简单得比例叠加,也需要围绕目标性能区间设定相容路径,进一步匹配造价边界与工艺弹性。在基层铺装应力传导为主的场景中,复配更侧重的是弹性恢复结构稳定;

而在表层抗剪切与抗车辙性能要求更强的路段,常采用以高温刚性聚合物为主的抗车辙剂体系,搭配柔性嵌段材料提高相容性^[3]。部分项目尝试在 SBS 基础上引入再生橡胶粉颗粒,形成弹 - 刚协同结构,虽然橡胶粉本身并非典型抗车辙剂,但可在一定程度上缓解应力集中与裂纹扩展,属于功能复合优化思路。

基础沥青的选择亦作为调节因子参与复配路径规划,70# 与 90# 号沥青在针入度与溶胀性能上的差异,为配比提供反向调节空间。在控制单方成本的策略中,就不用掺量压缩为主手段,而是以结构功能的等效替代为目标基准,比如在强粘层体系中,把部分橡胶粉掺量替换为高吸油低温弹性改性蜡类结构体,形成自适应形变缓冲区。这个方式在节约材料单价的同时减少二次剪切过程中粒径漂移现象,整体提升材料网络稳定窗口,让最终的反应产物在标准弹性恢复率控制线(60%以上)内保持性能均衡,而总原料成本较常规双改体系也实现压缩。

2.4 应用条件下的工艺适应设计

双改性沥青虽在材料体系内具有性能支撑能力,但它的可施工性还是受到现场环境与节奏变化强烈干扰,特别是高温区段或交通高频道路中,摊铺稳定性容易被降温速率与节奏误差削弱。工程应用中,摊铺起始温度需要维持在 165℃ - 175℃,但在干热风压叠加下,材料从罐装到摊铺落料的时间窗口被压缩到不够 40min,造成热分布不均与局部粘结滑移^[4]。

对于此问题,作业端一般借助预热 - 摊铺一体化设备,把料斗至熨平板段设为定温控带,用红外感温反馈系统对落料点进行动态温补,同时针对结构层次差异,把基层压实节奏适度放缓,让其与双改面层之间的接触应力趋于同步,避免因短时硬化导致界面剪切脱层。在多风、降雨频繁区段,部分摊铺班组采用分段成型策略,用施工窗口断面作单位分区推进,确定每一段料温衰减和设备响应保持匹配区间。

3 典型工程实践中的产业化应用研究

3.1 项目背景与环境适配性

本次实践依托巴基斯坦 N5 公路灾后重建项目,工段在信德省莫罗至拉尼普尔段,属亚热带高温干旱气候区,地表温度峰值可达 80℃,雨季洪涝与热胀冷缩交替发生,导致原路面结构多处塌陷、剥落与流动变形。这条路段车流量维持在 4 - 5 万辆/日,重载车辆占比高,对摊铺材料的热稳定性与黏结性能构成持续干扰,试验段引入双改性沥青体系,配合分层热控摊铺工艺,围绕多变量环境设定产业化施工适配路径。

3.2 材料组合与摊铺策略设计

巴基斯坦 N5 公路 K318 - K404 段属于典型的高

表 1 双改性沥青施工关键段性能与成本反馈汇总表

监测维度	指标说明	数据区间	工程反馈意义说明
回弹模量 (MPa)	基层结构压实后 24h 回弹响应	52 - 68	反映压实节奏与结构稳定协调关系
材料热衰减率	拌合站至摊铺点温降幅度	8 - 14℃	标记运输链关键调温点
SBS 单位价	每吨成本 (根据当月市场)	10400 - 11500 元	成本压力集中区, 反推掺量优化空间
抗车辙剂单位价	每吨成本 (润强 -MA103 型)	23400-25159 元	单价较高但掺量较小, 对总造价构成敏感边界
单段摊铺能耗	压路与控温设备每 100m 油耗	5.2 - 6.1 升 / 段	与施工节奏、物料衰减相关联

温强载通行走廊,日车流超过4万辆,重型车辆比例高,结构负载持续集中,常规改性材料在热黏稳定性与摊铺窗口控制方面容易出现适配不足问题^[5]。现场选用的双改性沥青材料,用针入度 70# 基质沥青为基础,掺配线性嵌段型 SBS 和细粒径橡胶粉,材料预混采用双轴螺旋推进装置完成一次分布,进到主反应段后控制反应温度稳定于 180℃,搅拌时间限定 60min,确定橡胶粒体膨胀充分但不发生碳化。高剪切均质系统用于调节粒径与分布状态,分散后进入静置保温段,延时 20min 以稳定剪切后的界面结构。

摊铺工艺采用多段温控同步推进模式,整个流程划分成前处理段、摊铺主段与压实校准段。落料前设置红外温感网格识别系统,通过每 10m 测点反馈料温值,实时调整螺旋送料速率与分布宽度,控制落料起始温度维持在 165℃ 以上,摊铺设备配置温控带板,覆盖熨平板全段,防范因尾端温降出现微区脱层。摊铺作业以中早段为主,避开午后极端地温,目的是减少摊铺前端与压实后端之间的节奏错位。

压实工序用单车双轮回弹同步装置,在第一轮静压形成结构初位后,第二轮进行节奏修正与热区闭合。每一段摊铺长度约控制在 90m 内,用压路机两个来回为一个节拍单元,系统借助距离传感器感知是否进入节奏临界区,同一时刻触发调整滚压速度。摊铺线与拌合站之间设置料温衰减对照台账,每批次记录料温、输送时间与摊铺时间差,以识别是否存在温控失稳段,局部工段布设结构调试区,试验不同的粒径橡胶粉对摊铺厚度适应性的影响,保证在高温延迟软化带内,摊铺层厚与压实密度保持对应。

3.3 性能反馈与成本追踪分析

摊铺完成之后,项目现场设立结构反馈和成本数据同步采集区,根据摊铺顺序分别建立初始回弹模量、剪切沉降趋势与材料消耗记录(含 SBS、抗车辙剂及基质沥青用量)三类指标通道三类指标通道。在典型高温段(K318 - K360)范围内开展性能反馈监测,摊铺结束之后 24h 借助轻型落锤装置进行初始模量测试,记录各压实单元的回弹响应值,并对基层相对沉降趋

势进行同步标记,结构波动较大的边带区以 90cm 间距设点,采集数据纳入摊铺节奏回放系统,对照压路机节拍识别是否存在节奏漂移导致的微结构偏移。

物料能耗追踪用入料计量与温差识别结合方式,在摊铺主段设红外感温补偿区,对每批物料进场与落料温差进行记录,并结合运输时间自动判定能源衰减区间,单位耗油量折算与燃料价格按月报制更新,并和同类型项目基准值对照。材料成本监测采用联单分解方式,标注各类改性剂在不同配比下的单位价浮动,形成技术参数 - 成本响应的一一映射关系(见表 1)。

4 结语

围绕双改性沥青在高温重载工况下的工程适应问题,本文侧重了材料结构协同与工艺节奏控制核心路径,展开了从反应配比、分散调节到现场摊铺的系统研究,结合典型项目实践,完成结构性能与成本因子的过程追踪,确定了不同摊铺参数下的适应区间与造价压力构成。研究强调产业化路径中各工序节点的协同闭合,提出在极端气候下双改性体系的调控逻辑与适配机制,对复杂环境中新型改性材料的推广应用具有现实参考价值。

参考文献:

- [1] 于宗鑫. 改性沥青 AC-5 应力吸收层在公路养护中的应用 [J]. 山西建筑, 2026, 52(03): 144-148.
- [2] 姜添镗, 余龙光, 黄丰, 等. 路用环氧化天然橡胶开发及其改性沥青性能研究 [J/OL]. 应用化工, 2026, 01(20): 1-9.
- [3] 丁忠杰. 公路路面工程透层沥青施工技术应用 [J]. 产品可靠性报告, 2025, (12): 149-151.
- [4] 黄方成, 张宝鑫, 赵嘉明, 等. 道路用沥青改性剂研究进展 [J]. 合成材料老化与应用, 2025, 54(06): 45-52.
- [5] 佚名. 深耕路用新材料打造高新产业链 [J]. 西部交通科技, 2025, (02): 2-3.

作者简介:

李义飞 (1981-), 男, 汉族, 河北张家口人, 本科, 高级工程师, 现任职于中铁六局巴基斯坦 N5 公路项目经理部, 研究方向为公路工程及海外工程管理。