

公路工程沥青混合料自愈合性能与施工控制

杨站伟

新疆基础设施建设有限责任公司 新疆乌鲁木齐 830011

DOI: 10.32629/ems.v8i7.21210

[摘要] 针对公路沥青路面运营期易产生微裂纹、裂缝扩展快及养护成本高等问题, 本文围绕微胶囊自愈合材料在沥青混合料中的工程应用展开研究。通过在 SUP-13、SMA-13 等中上面层混合料中掺入沥青质量 0.3% 的自愈合微胶囊, 结合干法拌和、温度控制、摊铺压实及交工验收措施, 分析其施工适应性与自愈合效果。结果表明, 微胶囊可显著提升沥青胶结料 HI 值, 并使 SUP-13、SMA-13 混合料 HR 分别提高至 67.65% 和 79.49%, 现场试验段通车 18 个月未出现裂缝, 表现出良好的抗裂和延缓裂缝扩展能力。

[关键词] 微胶囊; 自愈合沥青混合料; 施工控制; 裂缝修复

引言:

沥青路面在车辆荷载、温度变化和水损害共同作用下, 内部微裂纹会逐渐发展为宏观裂缝, 进而降低结构承载能力和服役寿命。传统养护多在裂缝形成后被动处治, 难以及时抑制早期损伤扩展。微胶囊自愈合技术通过将修复剂包覆于胶囊内部, 当裂缝穿过胶囊时释放芯材, 促进裂缝界面愈合, 为提升沥青路面耐久性提供了新的技术路径。

1 工程概况

本工程以沥青混合料裂缝自愈合技术在公路中上面层中的实体应用为对象, 核心目标是在常规沥青路面结构中引入具有裂缝响应能力的微胶囊材料, 使路面在运营荷载和环境作用下形成微裂纹后, 依靠胶囊破裂释放修复剂, 延缓裂缝贯通和扩展。前期现场采用人工步检方式对路面裂缝病害进行调查, 检测内容包括横向裂缝、纵向裂缝及局部龟裂, 并同步记录裂缝尺寸、形貌、位置桩号等信息, 为试验段布设和后续效果对比提供基础数据。

2 公路工程沥青混合料自愈合施工方案

2.1 自愈合材料掺配与结构层位设计

自愈合沥青混合料宜优先布设于路面中上面层, 原因在于该区域直接承受温度循环、车辆荷载和表层裂缝萌生作用, 微胶囊释放修复剂后更容易参与微裂纹闭合与沥青轻质组分补充。工程应用中, 微胶囊推荐掺量为沥青质量的 0.3% ~ 0.5%, 并优先用于 SMA-13、SUP-13、AC-20、SUP-20 等中上面层混合料; 从经济性与功能发挥平衡考虑, 实体试验段采用 4cm SUP-13 自愈合上面层, 掺量为沥青质量 0.3%。

材料体系以海藻酸钙为囊壁、葵花籽油为芯材修复剂,

葵花籽油在 60℃ 下黏度为 0.293Pa·s, 闪点 234℃, 饱和分和芳香分分别为 62.3% 和 38.6%, 与沥青轻质组分具有较好相容性, 可在裂缝处发挥再生和流动填充作用。混合料配合比设计方面, SUP-13 最佳沥青用量为 5.0%, SMA-13 最佳油石比为 6.0%, 并通过浸水马歇尔、冻融劈裂、车辙和低温弯曲试验验证路用性能满足规范要求。

2.2 自愈合微胶囊干法拌和工艺

自愈合微胶囊在拌和阶段采用“干法”加入, 即将微胶囊与热集料同步投入拌合锅, 先进行短时间干拌, 再喷入改性沥青进行湿拌。该工艺的技术关键在于保证胶囊均匀分散, 同时避免胶囊在投料、拌和和高温停留过程中提前破损。实体工程采用人工投放方式, 适合短试验段和微胶囊批量有限的施工条件; 若进入大面积连续施工, 可进一步改造为独立计量仓或螺旋投料装置, 以提高投料稳定性。拌和时间控制为干拌 6 ~ 8s、湿拌 40 ~ 45s, 整个拌和周期 50 ~ 55s; 该时间安排较常规混合料适当延长干拌阶段, 有利于微胶囊在矿料骨架中预分散。温度控制方面, SBS 改性沥青加热温度为 160 ~ 170℃, 集料温度 180 ~ 190℃, 混合料出厂温度 175 ~ 180℃, 超过 190℃ 应废弃; 运至现场温度不低于 170℃, 摊铺温度不低于 165℃, 低于 140℃ 作为废料处理, 以避免低温施工造成压实不足或高温损伤微胶囊。

2.3 运输、摊铺与压实成型方案

运输环节采用 16t 以上自卸汽车, 装料前清洁车厢, 并在侧板和底板均匀涂刷隔离剂, 严禁残液聚集于车厢底部。装料时车辆应前后移动、分堆装料, 降低粗集料离析风险; 运输过程中采用双层篷布覆盖, 兼顾保温、防雨和防污染,

摊铺现场至少保持 3 辆运料车等候，施工过程中摊铺机前方宜安排 2~3 辆运料车连续供料^[1]。摊铺机开工前 0.5~1h 预热熨平板，使其温度不低于 100℃，摊铺温度宜控制在 160~170℃，最低不低于 155℃；摊铺速度根据拌和能力、摊铺宽度和厚度综合确定，工程中控制为 1.5m/min，并要求全过程缓慢、均匀、连续。压实采用初压—复压—终压工艺，配置 5 台压路机。初压紧跟摊铺机，静压 1 遍，速度 2km/h；复压先由双钢轮压路机振压 2 遍，再采用 30t 胶轮压路机碾压 3 遍，速度均为 3.5km/h；终压采用双钢轮压路机静压 1 遍，速度 4km/h，直至表面无明显轮迹^[2]。

3 公路工程沥青混合料自愈合性能分析

3.1 沥青胶结料自愈合性能分析

胶结料层面的自愈合评价采用动态剪切流变仪

Time-Sweep 模式，通过“加载—间歇—加载”路径考察 SBS 改性沥青在不同损伤水平下的愈合指数 HI。

试验条件为应变控制 12%、加载频率 10Hz、平行板直径 8mm、板间距 2mm、试验温度 30℃、间歇时间 300s；微胶囊掺量设置为 0%、0.1%、0.2%、0.3%，损伤度分别选取 15%、30%、45%和 50%。结果显示，随着微胶囊掺量提高，SBS 沥青 HI 值持续增大；在 15%损伤度下，HI 由未掺胶囊时的 0.744 提高至 0.3%掺量时的 0.953；在 50%损伤度下，HI 由 0.108 提高至 0.356，提升幅度更为显著。

该规律说明微胶囊对高损伤、疲劳或老化程度较高的沥青具有更强的修复贡献，其作用并非简单增韧，而是通过裂纹触发释放修复剂，改善裂缝界面处轻质组分供给与局部流动性^[3]。

表 1 不同微胶囊掺量下 SBS 改性沥青自愈合指数 HI

微胶囊掺量/%	HI（15%损伤）	HI（30%损伤）	HI（45%损伤）	HI（50%损伤）
0	0.744	0.321	0.193	0.108
0.1	0.793	0.573	0.284	0.194
0.2	0.868	0.665	0.337	0.239
0.3	0.953	0.781	0.492	0.356

3.2 沥青混合料裂缝自愈合性能分析

混合料自愈合性能采用 CT 三维扫描与数字图像处理相结合的方法评价。试验以四点弯曲小梁为对象，试件尺寸为长度 380mm±5mm、高度 50mm±6mm、宽度 63mm±6mm；先扫描获得初始空隙率 VV₀，再在 300μ ε 应变控制条件下加载 3000 次，扫描获得损伤后空隙率 VV₁，随后将试件置于 25℃、湿度不超过 35%的环境箱中静置 24h，模拟裂缝自愈合过程，再次扫描获得愈合后空隙率 VV₂。每组平行试件

不少于 4 个，通过空隙率恢复程度计算裂缝自愈合指数 HR。试验结果表明，SUP-13 普通混合料 HR 为 48.39%，掺 0.3%微胶囊后提高至 67.65%；SMA-13 普通混合料 HR 为 57.50%，掺 0.3%微胶囊后提高至 79.49%。SMA-13 由于初始空隙率更小、油石比更高且存在玛蹄脂结构，自愈合基础性能优于 SUP-13；微胶囊加入后，两类混合料均表现出明显裂缝恢复能力提升。

表 2 掺加微胶囊前后 SUP-13 与 SMA-13 混合料自愈合性能试验结果

混合料类型	VV ₀ /%	VV ₁ /%	VV ₂ /%	HR/%
SUP-13	4.81	5.12	4.97	48.39
SUP-13（掺沥青质量 0.3%微胶囊）	4.74	5.08	4.85	67.65
SMA-13	4.02	4.42	4.19	57.50
SMA-13（掺沥青质量 0.3%微胶囊）	4.00	4.39	4.08	79.49

3.3 现场服役性能与工程效益分析

实体工程服役效果表明，自愈合混合料不仅能够改善室内裂缝恢复指标，也能在实际交通和环境作用下延缓裂缝发展^[4]。通车 18 个月，K21+500~K21+750 自愈合 SUP-13

试验段整体运行状况良好，未出现裂缝复发；现场还观察到 3 处外侧车道裂缝发展至自愈合混合料边缘后停止延伸，表明该材料对裂缝尖端扩展具有阻滞作用。与相邻普通 SUP-13 路段对比，自愈合 SUP-13 试验段裂缝数量为 0、裂缝长度为

0m; 普通 SUP-13 路段 K26+800 ~ K27+000 出现 3 条裂缝, 总长度 5.5m。经济性方面, 当前小规模生产条件下, 掺入包覆修复剂微胶囊后每吨沥青混合料成本提高约 60 ~ 80 元; 若实现规模化生产, 成本增幅有望控制在 20 元/t 以内。结合试验段应用效果, 自愈合混合料较普通混合料每公里可减少灌缝成本 1000 元以上, 并可降低裂缝养护对交通运行的干扰。

4 公路工程沥青混合料自愈合性施工控制措施

4.1 原材料进场与微胶囊计量投放控制

公路工程沥青混合料自愈合施工质量首先取决于原材料稳定性和微胶囊计量精度。施工前应对集料、SBS 改性沥青及自愈合微胶囊进行抽样检测, 重点核查集料级配、洁净程度、沥青技术指标、微胶囊外观完整性、含水状态和分散性, 确认各项指标满足设计及施工技术要求后方可组织试拌^[9]。微胶囊作为功能性组分, 其掺量宜按沥青质量控制, 工程应用推荐范围为 0.3% ~ 0.5%, 试验段采用 0.3% 掺量, 既能保证裂缝触发后的修复剂供给, 又可兼顾成本和拌和稳定性。投料方式宜采用“干法”工艺, 即微胶囊与热集料同步投入拌合锅, 先完成干拌分散, 再喷入沥青进行湿拌; 小规模试验段可采用人工投放, 但大面积施工宜配置独立计量投料装置, 避免人工投料造成批次波动。拌合设备施工前需完成检修、保养和计量校准, 保证冷料供给、热料筛分、沥青喷洒和微胶囊投放同步稳定。

4.2 拌和、运输与摊铺温度控制

自愈合沥青混合料对施工温度较敏感, 温度控制应贯穿拌和、出厂、运输、摊铺和碾压全过程。采用 SBS 改性沥青时, 沥青加热温度宜控制在 160 ~ 170℃, 集料温度控制在 180 ~ 190℃, 混合料出厂温度控制在 175 ~ 180℃, 超过 190℃ 的混合料应废弃; 运至现场温度不低于 170℃, 摊铺温度不低于 165℃, 低于 140℃ 作为废料处理。拌和阶段为提高微胶囊在矿料骨架中的均匀分散程度, 干拌时间宜延长至 6 ~ 8s, 喷入沥青后湿拌 40 ~ 45s, 整体拌和周期控制为 50 ~ 55s。运输车辆宜采用 16t 以上自卸汽车, 车厢侧板和底板应涂刷隔离剂但不得积液, 装料时车辆前后移动、分堆装料, 减少粗集料离析; 运输过程采用双层篷布覆盖, 实现保温、防雨和防污染。摊铺前熨平板应提前 0.5 ~ 1h 预热至不低于 100℃, 摊铺速度宜保持约 1.5m/min, 施工中不得随意变速, 保证厚度、温度和密实度连续稳定。

4.3 碾压成型、交工检测与服役跟踪控制

自愈合沥青混合料压实应遵循紧跟摊铺、慢速均匀、分阶段成型的原则, 避免因急转、急停或过度振压引起混合料推移、离析及微胶囊非服役性破损。现场可配置 5 台压路机, 采用初压—复压—终压组合工艺。初压应紧跟摊铺机进行, 静压 1 遍, 速度控制为 2km/h, 并及时检查平整度和路拱; 复压先采用双钢轮压路机振压 2 遍, 速度 3.5km/h, 再采用 30t 胶轮压路机碾压 3 遍, 速度同为 3.5km/h, 相邻碾压带重叠 1/3 ~ 1/2 轮宽; 终压紧接复压进行, 采用双钢轮压路机静压 1 遍, 速度 4km/h, 直至路表无明显轮迹。交工检测应覆盖外观、厚度、压实度、横坡、渗水系数、平整度和构造深度等指标, 其中外观应平整密实、无明显轮迹、裂缝、推挤、油斑、油包和离析; 压实度代表值应大于马歇尔密度 97% 或最大理论密度 93%, 渗水系数按 1 次/200m/车道检测, 质量要求为 100ml/min 且合格率 80%。通车后还应建立裂缝复发和扩展跟踪机制, 以裂缝数量、长度及边缘扩展状态评价自愈合材料长期服役效果。

5 结束语

微胶囊自愈合沥青混合料在公路工程中具有较好的应用可行性, 其施工工艺可与常规沥青混合料基本衔接, 仅需强化微胶囊计量投放、拌和时间、施工温度和压实过程控制。工程应用结果表明, 该技术能够改善混合料裂缝恢复能力, 减少裂缝复发和后期灌缝养护需求。后续应进一步开展规模化生产、长期服役观测和不同气候区适应性研究, 以完善其工程推广体系。

[参考文献]

- [1]叶颖慈. 沥青及沥青混合料损伤—愈合行为感知及多尺度表征[D]. 浙江师范大学, 2025.
- [2]吕朝伟. 纳米 SiO₂-OMMT 复配改性沥青及混合料自愈合性能研究[D]. 重庆交通大学, 2025.
- [3]唐资江. 高钛重矿渣沥青混合料微波加热修复性能试验研究[D]. 南昌大学, 2025.
- [4]刘新, 陆瑞标, 杨林, 等. 冷补钢渣沥青混合料的制备与性能研究[J]. 混凝土世界, 2025, (2): 43-46.
- [5]唐杰, 赵华, 高红成. 碳化硅粉填充沥青混合料微波自愈合性能及合理掺量[J]. 材料导报, 2024, 38(20): 101-110.