

微胶囊自愈合材料在沥青路面新建工程中的应用

杨站伟

新疆基础设施建设有限责任公司 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830011

【摘要】：微胶囊自愈合材料通过将再生剂、轻质油分或芳香组分修复介质封装于脲醛树脂、聚氨酯、环氧树脂、海藻酸钙等囊壁中，形成可在裂缝扩展过程中被动触发释放的功能化沥青路面材料体系。其作用过程主要依赖裂纹尖端应力诱导囊壁破裂，修复剂在毛细压力与界面润湿作用下向裂缝面迁移，补充老化沥青轻质组分，降低局部黏度，促进分子扩散和界面黏结恢复。工程应用需围绕材料选型、制备评价、拌和施工、服役监测建立全过程控制体系，重点控制10~100 μm粒径范围、160~190℃施工温度适应性、0.3%~0.5%沥青质量掺量、压实度和渗水性能等指标。应用案例表明，微胶囊自愈合混合料可用于中上面层裂缝控制，对疲劳裂缝、温缩裂缝及反射裂缝扩展具有抑制作用。

【关键词】：微胶囊；自愈合材料；沥青路面；裂缝修复

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.055

引言

沥青路面在交通荷载、温度循环、水损害及材料老化共同作用下易产生微裂纹，微裂纹进一步扩展并贯通后会诱发结构性开裂、渗水破坏和疲劳寿命衰减。该技术的关键不在于单一材料添加，而在于胶囊强度、热稳定性、掺量、层位布设和施工窗口之间的协同匹配。

1 微胶囊自愈合材料介绍

微胶囊自愈合材料是将修复剂封装于微尺度或亚毫米尺度囊壁内，并将其分散于基体材料中的功能化复合体系^[1]。用于沥青路面时，囊芯多选用再生剂、轻质油分或含芳香组分的修复介质，囊壁可采用脲醛树脂、聚氨酯、环氧树脂、海藻酸钙等材料。其工作机理表现为裂纹扩展至胶囊附近时诱发囊壁破裂，囊芯在毛细压力和界面润湿作用下迁移至裂纹面，补充老化沥青中损失的轻质组分，降低局部黏度，促进沥青分子扩散与界面黏结恢复^[2]。工程应用中，微胶囊粒径通常需兼顾分散性与储液量，过小会降低单颗胶囊有效修复剂含量，过大则易形成混合料内部弱界面；常见粒径控制范围为10~100 μm，热稳定性应覆盖沥青混合料160~190℃的拌和与压实温度区间，囊壁强度需满足施工存活与裂缝触发破裂之间的力学平衡。

2 微胶囊自愈合材料在沥青路面工程中的应用流程

微胶囊自愈合材料用于沥青路面工程时，应形成由材料设计、室内评价、施工植入和服役监测构成的完整技术流程。其一，依据道路等级、交通荷载、气候分区、结构层位和裂缝类型确定应用目标，疲劳裂缝风险较高的中面层、上面层更适合布设自愈合功能层。其二，建立微胶囊与沥青胶结料、矿料级配、油石比之间的相容性关系，避免因胶囊掺量过高导致高温稳定性下降或空隙率异常波动。其三，开展胶囊粒径、热失重、包覆率、压缩破裂强度、拌和存活率和愈合效率评价，筛选满足施工温度和荷载条件的材料体系。其四，在拌合楼完成定量

投放和温度控制，并在摊铺压实后检测压实度、厚度、渗水系数和平整度。服役期重点观测裂缝密度、裂缝宽度、疲劳寿命恢复率与养护干预频次^[3]。

2.1 材料选型与配伍设计

材料选型是微胶囊自愈合沥青路面应用的前置环节，核心在于囊芯修复剂、囊壁材料与沥青胶结料之间的物理化学匹配。其一，囊芯应具备较强的沥青再生能力和较低挥发损失，常以芳香分、饱和分含量较高的轻质油类或专用再生剂为主体，使其能够补充老化沥青中减少的低分子组分，改善胶结料的流变恢复能力。其二，囊壁应具备足够热稳定性和可控破裂特征，在160~190℃施工温度下保持完整，在裂缝尖端应力集中区发生脆裂或局部开裂。其三，掺量设计应避免单纯追求愈合效率，工程中常以沥青质量的0.3%~0.5%作为低掺量研究区间，高掺量需校核车辙因子、残留稳定性和冻融劈裂强度。配伍设计还需考虑胶囊密度与沥青胶浆接近程度，密度差过大可引起拌和分层和局部富集，影响混合料体积参数稳定性。

2.2 微胶囊制备

微胶囊制备应围绕粒径可控、囊壁均匀、包覆率稳定和施工存活率较高等指标展开。其一，乳液聚合法、原位聚合法、界面聚合法和离子凝胶法均可用于制备自愈合胶囊，其中乳液稳定性直接影响粒径分布和囊芯包覆均匀性；剪切速率、乳化剂掺量、水油比和反应温度是关键工艺参数。其二，性能评价应覆盖形貌结构、粒径分布、热稳定性、力学响应和修复剂释放特征，扫描电镜可观察囊壁致密性与表面粗糙度，热重分析可判定质量损失起始温度，显微压缩或纳米压痕可获得破裂强度与变形特征。

2.3 混合料拌和与施工控制

微胶囊自愈合沥青混合料的施工控制应重点处理胶囊均匀分散和施工损伤之间的矛盾。其一，投料方式可采用干法或湿法，干法通常将微胶囊与热集料短时混合后再加入沥青，适

用于颗粒强度较高、热稳定性较好的胶囊体系；湿法更强调胶囊在胶结料中的分散稳定性，但剪切作用可能增加囊壁破裂风险。其二，拌和温度应依据沥青类型确定，SBS改性沥青混合料常处于较高施工温度区间，出料温度和运输到场温度需满足压实窗口要求，胶囊体系应避免长时间高温滞留。其三，摊铺阶段应保持连续供料和稳定速度，减少混合料离析及温度离散；压实阶段宜采用“初压—复压—终压”分阶段成型，过强振动可能导致胶囊非设计破裂，压实不足又会增大空隙率和水损害风险。施工参数需与目标空隙率、压实度和层厚共同校核。

3 微胶囊自愈合材料在沥青路面新建工程中的应用案例

3.1 工程概况

微胶囊自愈合材料在沥青路面新建工程中的应用，宜优先布设于交通荷载作用显著、疲劳开裂风险较高的中上面层，以发挥其对微裂纹早期修复和裂缝扩展抑制作用。工程实施前，采用人工路检方式对既有路况进行基础调查，重点识别横向裂缝、纵向裂缝及龟裂等病害类型，并记录病害尺寸、形貌及桩号位置，为后续试验段布设和对比评价提供依据。

现场检测选取 K21+000~K22+100 和 K25+900~K27+000 两个长度均为 1.1km 的路段，结合裂缝率、病害分布和施工组织条件，最终在 K21+500~K21+750 全幅上面层铺筑自愈合沥青混合料试验段，长度约 250m，结构层采用 4cmSUP-13 自愈合沥青混合料与 8cmSUP-20 混合料组合。

3.2 材料配比与关键技术参数

自愈合微胶囊采用海藻酸钙包覆葵花籽油的复合结构，葵花籽油作为修复剂芯材，其 60℃黏度为 0.293Pa·s，闪点为 234℃，饱和分和芳香分分别为 62.3%和 38.6%，15℃密度为 0.937g/cm³，可与沥青轻质组分形成较好的相容性。胶囊制备时，海藻酸钠溶液质量分数控制为 2.5%，葵花籽油与海藻酸钠溶液质量比分别设置为 20:1、10:1、7:1 和 3:1，吐温 80 用量为葵花籽油体积的 5%，经 5000rpm 高速剪切 15min 后滴入 3%、50℃CaCl₂ 溶液中反应 4h，并在 25℃强制通风条件下干燥 24h。工程应用中，微胶囊推荐掺量为沥青质量的 0.3%~0.5%；考虑经济性和施工稳定性，试验段采用 0.3%掺量。SUP-13 混合料最佳沥青用量为 5.0%，SMA-13 混合料最佳油石比为 6.0%，均满足后续路用性能验证要求。

表 1 技术参数

项目	技术参数
微胶囊推荐掺量	沥青质量的 0.3%~0.5%
试验段采用掺量	沥青质量的 0.3%
SUP-13 最佳沥青用量	5.0%

SMA-13 最佳油石比	6.0%
试验段结构	4cmSUP-13 自愈合混合料+8cmSUP-20
葵花籽油闪点	234℃

3.3 应用方案

微胶囊自愈合材料的工程应用应围绕层位功能、裂缝控制需求和施工可操作性进行配置。对于新建沥青路面，可采用单层或双层自愈合沥青混合料方案：单层方案可将自愈合混合料设置于上面层或中面层，双层方案则可同时用于上面层和中面层，以增强结构对温缩裂缝、疲劳裂缝和反射裂缝的综合抑制能力。混合料类型宜选用 SMA-13、SUP-13、AC-20、SUP-20 等中上面层常用级配。施工时采用“干法”添加工艺，即自愈合微胶囊与热集料同步投入拌合锅，先干拌再喷入沥青湿拌，使微胶囊在沥青混合料中均匀分散并避免提前破损。拌和工艺参数宜控制为干拌 6~8s、湿拌 40~45s，总拌和周期 50~55s。通车 18 个月后的跟踪结果显示，自愈合 SUP-13 试验段裂缝数量为 0、裂缝长度为 0，而相邻普通 SUP-13 路段出现 3 条裂缝、总长 5.5m，说明该技术对裂缝萌生和扩展具有较明确的抑制效果。

4 微胶囊自愈合材料在沥青路面新建工程中的应用质量保障措施

4.1 原材料与微胶囊性能控制

微胶囊自愈合沥青混合料的质量基础在于胶囊本体性能与常规原材料质量的协同稳定。微胶囊应重点控制密度、粒径、外观完整性、热稳定性和掺量准确性，避免因密度差异导致拌和分散不均，或因热稳定性不足造成施工阶段提前失效。不同水油比胶囊密度存在明显差异，20:1、10:1、7:1 和 3:1 胶囊密度分别为 1.161、1.056、1.043、0.942g/cm³，其中 10:1 和 7:1 胶囊密度与沥青胶结料 1.035g/cm³ 接近，更利于混合料均匀拌和。粒径方面，微胶囊有效样品统计数量为 324 个，粒径主要集中在 5~35 μm，该区间占总量 85.2%，可满足在沥青胶浆中的分散要求。热稳定性方面，100℃质量损失低于 4%，200℃质量损失低于 10%，质量损失主要发生于 375~471℃区间，能够适应沥青混合料生产施工温度。试验段铺筑前，应对集料、沥青和微胶囊进行抽样检测，并完成拌合设备检修保养。

4.2 拌和、运输与摊铺过程控制

施工过程控制应以温度、时间和均匀性为核心，确保微胶囊在混合料中充分分散，同时避免高温过烧、装车离析和低温摊铺。SBS 改性沥青自愈合混合料施工时，沥青加热温度宜控制在 160~170℃，集料温度为 180~190℃，混合料出厂温度为 175~180℃，超过 190℃应废弃；混合料运到现场温度不低于 170℃，摊铺温度不低于 165℃，低于 140℃作为废料处理，

初压开始温度不低于 160℃，复压最低温度不低于 130℃，碾压终了温度不低于 110℃。运输环节宜采用 16t 以上自卸汽车，装料前车斗应清洁并涂刷隔离剂，装料过程中车辆前后移动、分堆装料，以降低粗集料离析风险；运输期间使用双层篷布覆盖保温、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℃，摊铺速度保持约 1.5m/min，螺旋布料器两侧混合料高度不低于送料器 2/3，两台摊铺机间距控制在 10m 以内。

4.3 压实、交验与长期服役观测控制

压实质量直接影响微胶囊自愈合体系的空间分布、路面密实状态和后期裂缝扩展行为，应按初压、复压、终压连续成型。试验段采用 5 台压路机协同施工，初压紧跟摊铺机进行，静压 1 遍，碾压速度 2km/h；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 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，直至路面无轮迹。交工验收应覆盖外观、厚度、压实度、横坡、渗水系数、平整度和构造深度等指标，外观应达到表面平整密实、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，控制标准为 100ml/min 且合格率 80%。长期观测应作为质量保障的延伸环节，通车 18 个月后自愈合试验段运行状况良好、无裂缝发生，并出现裂缝发展至自愈合混合料边缘后停止延伸的现象。

5 结语

微胶囊自愈合材料在沥青路面工程中的应用具有明确的材料功能逻辑和工程实施价值，其核心优势体现在修复剂定点释放、裂缝早期干预和服役性能恢复。实际应用中，应避免将微胶囊简单视为普通外加剂，而应从囊芯再生能力、囊壁可控破裂、拌和存活率、混合料路用性能和长期裂缝观测等方面开展系统评价。对于新建沥青路面，中上面层是较优应用层位，施工过程需严格控制温度、拌和时间、摊铺连续性和压实功输入。随着制备工艺稳定性和工程评价方法的完善，该技术可进一步服务于长寿命沥青路面与预防性养护体系建设。

参考文献：

- [1] 郑则文.建筑施工中混凝土裂缝自愈合机理及智能修复材料的研发与应用[J].石材,2025,(11):185-187.
- [2] 赵龙伟.微波诱导羰基铁粉改性沥青混合料自愈合性能评价[D].内蒙古农业大学,2025.
- [3] 刘博.水泥砂浆裂缝二次自修复微胶囊组装体的制备及其应用研究[D].武汉纺织大学,2025.