

微生物修复裂缝的质量标准

陈禹键¹ 胡冰涛¹ 郭棋惠雅² 梁栋³ 焦健² (通讯作者)

1 北京中建建筑科学研究院有限公司, 北京, 100076;

2 北京城市学院生物医药学部, 北京, 100094;

3 天津市政工程设计研究总院有限公司, 天津, 300392;

摘要: 本文涉及微生物修复剂在混凝土裂缝修复中的应用规范, 采用分类设定标准、全流程管控的方式, 围绕材料质量标准、生产检验、应用适配及效果验收展开综述, 对推动微生物修复技术的规范化应用、保障混凝土结构修复效果与安全性具有重大意义。

关键词: 微生物修复剂; 混凝土裂缝修复; 质量标准; 生产检验; 应用适配; 效果验收; 生物安全性; 矿化能力

DOI: 10.69979/3029-2727.26.01.063

引言

混凝土作为建筑工程中应用最广泛的材料之一, 其裂缝问题一直是影响结构耐久性与安全性的关键因素。传统裂缝修复方法多依赖人工修补或化学材料填充, 存在操作复杂、成本较高及可能对环境造成负面影响等局限^[14]。近年来, 微生物修复技术凭借其环境友好、可持续修复的特性, 成为混凝土裂缝修复领域的研究热点与创新方向——利用微生物代谢活动生成碳酸钙等矿化物, 可自主填充裂缝, 实现“自修复”效果^[6]。

为推动微生物修复技术的规范化应用, 确保修复剂的安全性、有效性及工程适配性, 本文系统构建了微生物修复剂的全流程技术体系。从材料质量标准入手, 明确生物安全性底线与不同剂型的关键性能指标, 为修复剂的生产与筛选提供依据; 通过细化生产检验流程(出厂检验与全面验证), 实现对产品质量的全周期管控, 降低性能波动风险; 结合修复剂与混凝土的应用适配要求, 从配合比设计、施工工艺到养护制度进行针对性优化, 保障修复剂在工程环境中充分发挥效能; 最终通过多维度的效果验收指标与分阶段检验, 验证修复技术的实际效果, 确保其既满足专项修复性能, 又符合传统混凝土工程的质量标准。

1 材料质量标准

1.1 基础要求与修复剂剂型划分

1.1.1 生物安全性控制的基础要求

生物安全性控制需遵循以下通用要求(适用于各类剂型): 不使用基因工程菌种, 所用菌种需从自然环境中分离纯化或通过人工定向选育获得^[6], 严禁使用经DNA诱变、重组等人工手段改变遗传物质的菌种。同

时, 菌种需经过急性口服毒性试验[参照现行国家标准《食品安全国家标准 急性经口毒性试验》(GB 15193.3)执行], 且急性毒性剂量(LD_{50})需大于5000mg/kg体重, 以确保其不会对施工作业人员及周边环境造成生物学危害。

1.1.2 修复剂的剂型划分

微生物修复剂按微生物是否依托载体保护, 可分为非固载型与固载型两类。非固载型微生物修复剂是指微生物未借助载体实现保护的修复剂剂型。其外观多为松散、无结块的粉尘状粉末, 可通过外观检查可筛选出结块等不符合物理性状要求的产品。固载型微生物修复剂是指微生物通过载体(如吸附性材料、包埋基质等)实现保护的修复剂剂型。其外观通常为颗粒状, 且需满足颗粒大小均匀、无明显杂质等要求, 可通过外观检验排除颗粒不均、杂质过多等物理缺陷。

1.2 关键性能指标体系

1.2.1 非固载型修复剂

非固载型修复剂因无载体保护, 其菌种与钙离子均处于游离态, 因此需重点保障其生物活性, 无需检测物理力学性能, 具体要求如下:

(1) 矿化能力 $\geq 250\text{mg/g}$ 。该指标直接反映修复剂填充混凝土裂缝的潜力^[8]——矿化物含量越高, 进入混凝土缝隙的填充量越多, 修复效果越好^[1]。

(2) 有效活菌数 $\geq 10.0 \times 10^8 \text{ CFU/g}$ 。有效活生物的测定方法需符合现行国家标准《食品安全国家标准食品微生物学检验 菌落总数测定》(GB 4789.2)。活菌是矿化反应的“执行者”, 其数量达标是保障微生物持续代谢活性、维持矿化过程稳定进行的基础。

(3) 可溶性钙离子含量应控制在 $11000 \sim 28000 \text{mg}/100\text{g}$ ^[4]。测定依据为国家标准《食品安全国家标准 食品中钙的测定》(GB 5009.92) 中的 EDTA 法。钙离子作为微生物矿化生成碳酸钙的核心原料, 此范围含量可确保矿化反应的原料供应^[1], 同时也为裂缝填充提供必要的物质基础。

1.2.2 固载型修复剂

固载型修复剂通过载体实现对菌种和钙离子的保护, 需重点保障其物理稳定性与长效修复能力。具体要求如下:

(1) 矿化能力 $\geq 70 \text{mg/g}$ 。矿化物作为填充裂缝的主体材料, 其生成量直接反映修复剂对混凝土裂缝的填充能力; 有效活菌数 $\geq 2.5 \times 10^8 \text{CFU/g}$ ^{[3][10]}。该指标通过检测载体破碎后的菌体数量, 评估其在载体保护下的实际活性; 90d 细菌抗碱性 $\geq 95\%$ 。这一指标可确保菌体在混凝土高碱性环境下的存活率和活性, 保障修复效果的长效性^[3]。

(2) 物理力学指标: 粒径 $2.36 \sim 4.75 \text{mm}$ 。抗压强度初始压力 $\geq 70 \text{N}$ (在 C30-C40 混凝土标准养护环境下测定)^[2]; 7 天抗压强度 $70 \sim 80 \text{N}$ (在模拟孔内溶液养护条件下测定); 28 天抗压强度 $85 \sim 95 \text{N}$ ^[12]。含水率 $\leq 3.0\%$, 控制含水率可避免因拌和水量过大影响混凝土性能, 同时保证微生物在载体内部的生存环境稳定^[7]。

(3) 载体和芯材指数安全, 环保, 无污染, 无味。硫酸盐含量: 载体 $\leq 0.06\%$ ^[5]; 芯材 $\leq 7.2\%$ 。载体硫酸盐含量严格控制 (远低于芯材), 可减少对钢筋的潜在侵蚀风险。碱性抑制性: 载体碱性抑制性 ≤ 10.0 。该指标确保其不阻碍混凝土内部碱性环境的形成, 同时为微生物提供适宜的生存条件^[9]。

2 生产检验

2.1 出厂检验

适用于每批产品出厂前的快速筛查, 确保基本性能达标。

2.1.1 批次划分

1. 非固载型修复剂: 以 10 吨为一批, 不足 10 吨按一批计。

2. 固载型修复剂: 以 20 吨为一批, 不足 20 吨按一批计。

非固载型因无载体保护, 活性成分 (如活菌、游离钙离子) 易受生产波动影响, 小批次划分可更精准控制质量; 固载型依托载体稳定性, 批次规模可适当放大, 兼顾检验效率与成本。

2.1.2 检验项目

(1) 非固载型: 检测矿化力、水分、润湿时间、细度 (0.315mm 筛筛余 $\leq 5.0\%$)。

聚焦影响施工分散性和短期活性的关键指标 (无载体保护时, 需确保产品能均匀混合、快速发挥作用)。

(2) 固载型: 检测矿化力、吸水率、粒径、表观密度 ($1900 \sim 2100 \text{kg/m}^3$)、初始单颗粒抗压碎力。

重点验证载体结构稳定性 (如粒径是否合规、抗压碎力是否满足施工需求, 避免运输或搅拌中破碎)。

(3) 判定规则

由厂方质检部门逐批检验, 合格产品附质量合格证出厂; 若有 1 项指标不合格, 需加倍取样复检, 复检仍不合格则整批返工。

2.2 全面验证

2.2.1 触发条件

适用于全项目性能验证, 在关键节点触发, 确保产品长期稳定性与安全性, 触发条件包括但不限于:

(1) 常规周期: 正常生产时每 6 个月;

(2) 产量阈值: 非固载型累计产量达 50 吨、固载型达 150 吨;

(3) 特殊情况: 新产品试制或转厂生产、菌种 / 主原辅料 / 关键技术发生重大变更、产品停产 90 天以上恢复生产、出厂检验结果与上次型式检验差异显著等^[7]。

上述情况可能导致产品性能整体波动, 需通过全面检验排查潜在风险。

2.2.2 检验项目

需覆盖全部技术指标:

(1) 非固载型: 包括矿化力、EBC、可溶性 Ca^{2+} 、吸水率、润湿时间、含水率、pH 值、细度、有害物质含量 (氯离子、硫酸根离子、总碱量) 等;

(2) 固载型: 包括矿化力、EBC、细菌抗碱力、可溶性 Ca^{2+} 、吸水率、表观密度、粒径、单颗粒抗压碎力 (初始及不同养护龄期)、载体及芯材有害物质含量 (氯离子、硫酸根离子、总碱量)、载体 pH 值等。

不仅验证基本功能, 更需全面评估长期稳定性 (如细菌抗碱力)、工程兼容性 (如有害物质对钢筋的影响) 和生物安全性, 确保产品适配混凝土环境且无潜在风险。

(3) 判定规则: 毒性检测项目判定为“有毒 / 致病性”或有效活菌数不合格时, 直接判定整批不合格, 不予复检 (此类指标涉及核心安全与效能, 不可逆转);

其他项目若有 1 项不合格, 允许加倍取样复检, 复检仍不合格则判定整批不合格。

逻辑: 优先保障生物安全性与核心效能, 同时通过复检

机制降低检验误差影响，兼顾严谨性与实操性。

3 修复剂与混凝土的应用适配

材料合格后，需通过针对性的配合比设计、施工控制与养护措施，确保修复剂与混凝土“协同工作”，充分发挥修复效能。具体要求如下：

3.1 配合比设计

根据修复剂剂型差异，需针对性优化混凝土配合比参数：

(1)掺量控制：非固载型修复剂掺量为0.4%~1.1%（占胶凝材料总量），固载型修复剂掺量为1.5%~3.5%（占胶凝材料总量）^[1]。

(2)砂率与用水量：结合剂型特性调整砂率（固载型因含颗粒状载体，砂率可适当提高以保证拌和物均匀性）^[9]和用水量（非固载型需避免过量用水导致活菌流失），确保修复剂不影响混凝土拌和物的流动性、保水性及硬化后的强度发展。

在发挥修复剂功能的同时，维持混凝土基本性能稳定，避免因参数不匹配导致施工困难或结构强度受损。

3.2 施工控制

施工过程需根据修复剂剂型特点调整工艺，确保其在混凝土中均匀分布：

(1)搅拌：固载型修复剂可在混凝土拌和物基本均匀后适当缩短搅拌时间（避免载体过度分散）；非固载型修复剂需先将骨料与70%的水搅拌15s，再加入水泥和修复剂继续搅拌，以提升其分散性^[13]。

(2)振捣：固载型修复剂混凝土振捣需遵循“捣实且防颗粒上浮”原则，振捣时间控制在10~30s（短于普通混凝土）——因载体密度略低于骨料，过长振捣易导致分层^[3]；若振捣后表面出现修复剂上浮，需用抹子将其压入砂浆，保证分布均匀。

(3)运输：采用搅拌运输车运输，全程避免离析，运输时间需符合《预拌混凝土》（GB/T 14902）要求，

防止修复剂因运输时间过长失活或载体破损。

通过适配剂型的施工工艺，减少修复剂损耗或分布不均，确保其在混凝土内部形成有效“修复体系”。

3.3 养护制度：为微生物活性创造条件

养护需兼顾混凝土强度发展与微生物生存环境，分阶段制定要求：

3.3.1 裂缝前养护

与普通混凝土一致，需符合《混凝土结构工程施工规范》（GB 50666）、《大体积混凝土施工标准》（GB 50496）等标准，通过覆盖保湿、控温等措施确保混凝土强度正常增长，为后续修复提供稳定基体。

3.3.2 裂缝后养护

需为微生物矿化反应创造适宜环境：

(1)保湿方式：采用覆盖、洒水、喷雾等非密闭方式（避免使用薄膜或养护剂隔绝空气，微生物需氧气参与代谢）^[11]；

(2)营养补充：养护用水宜添加尿素、氯化钙等微生物营养物，促进矿化反应原料供应；

(3)时间与温度：养护时间不少于28d，冬期需采取保温措施，使混凝土表面温度维持在10℃~40℃（微生物活性适宜区间）^[2]，保障矿化反应持续进行。

通过针对性养护，为微生物提供水、营养和适宜温度，确保裂缝产生后修复剂能快速启动矿化反应，实现裂缝填充。

通过配合比、施工、养护的“兼容性设计”，既能保障混凝土结构本身的工程性能，又能为修复剂发挥作用创造最优条件，最终实现“结构强度”与“自修复能力”的双重保障。

4 效果验收

4.1 核心指标

以裂缝修复后的功能恢复程度为核心，通过多项指标综合评估修复效果，具体要求如表1：

表1 裂缝自修复性能核心指标

项目	初次开裂（28d）	二次开裂（28d）	测试方法
面积修复率	≥95%	≥80%	图像采集 + 二值化处理 ^[1]
抗水渗透修复率	≥95%	≥80%	50cm水头下渗水速度差 ^{[4][12]}
抗氯离子渗透修复率	≥95%	≥80%	电通量法（GB/T 50082） ^[8]
超声波传播速度	≥3.0km/s	≥2.5km/s	CECS 21（超声检测） ^[11]
平均修复深度	≥25mm	≥25mm	硝酸铜显色 + 多点测量 ^{[2][14]}

这些指标直接反映裂缝是否被有效填充（如面积修复率、修复深度）及混凝土功能是否恢复（如抗渗性、超声波传播速度），其中初次开裂修复要求更高，确保

结构在首次出现裂缝时能快速恢复完整性。

4.2 流程检验

通过分阶段检验，确保“材料合格”且“应用

后整体性能达标”：

4.2.1 原材料验收

微生物修复剂进场时需按批次抽检：

1. 非固载型：检测有效活菌数、可溶性钙离子含量和密度；

2. 固载型：在非固载型检测项目基础上，加测 1h 吸水率和表观密度^[5]。

3. 检验批次划分：非固载型每 50t 为一批，固载型每 200t 为一批（不足均按一批计）；取样量需满足检测需求（非固载型 $\geq 5\text{kg}$ ，固载型 $\geq 40\text{kg}$ ），并留存密封样品半年备查。

4.2.2 混凝土性能检验

微生物自修复混凝土性能检验的取样频率规定为：每 100m³ 同配合比混凝土或每个工作班拌制的同配合比混凝土，取样次数不应少于 1 次；当一次连续浇筑的同配合比混凝土超过 1000m³ 时，每 200m³ 取样不应少于 1 次^[10]。必测项目包括裂缝面积修复率和修复后超声波传播速度（通过现场留样试件检测）^[13]，确保修复剂掺入后，混凝土的裂缝修复效果与结构整体性达标。

4.2.3 验收依据

微生物自修复混凝土的质量验收需兼顾专项修复性能与传统工程标准：

1. 专项要求：需满足裂缝自修复核心指标（如面积修复率、抗渗修复率等），且试验报告中必须注明裂缝龄期、宽度、养护条件及测试龄期（这些变量直接影响修复效果评估）；

2. 通用标准：需符合《混凝土结构工程施工质量验收规范》（GB 50204）、《地下防水工程质量验收规范》（GB 50208）等现行国家标准，确保修复后的混凝土结构满足强度、耐久性等基本工程要求。

通过“专项指标 + 传统标准”的双重验收，既验证微生物修复技术的特有效果，又确保其适配传统混凝土工程的质量体系，实现技术创新与工程安全的统一。

参考文献

- [1] 咸洋, 冯琼, 刘军君, 等. 微生物矿化沉积混凝土裂缝效果 [J]. 材料科学与工程学报, 2025, 43 (03): 435-443.
- [2] 王立成, 邹凯. 水浸-室内环境下开裂微生物砂浆的

长期修复能力试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (03): 842-851.

[3] 闫铁成, 杜永杰. 不同负载方式对微生物芽孢及混凝土后期裂缝修复效果的影响 [J]. 材料科学与工程学报, 2024, 42 (06): 979-990.

[4] 马建斌. 不同钙源对微生物自修复混凝土裂缝的修复效果及其机理分析 [J]. 材料科学与工程学报, 2024, 42 (05): 839-849.

[5] 路伟, 胡思斯, 王亚妹, 等. 载体材料对微生物自修复效果的影响 [J]. 材料科学与工程学报, 2024, 42 (04): 680-691.

[6] 韦双妮, 王英辉, 赖俊翔, 等. 微生物自修复混凝土研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (08): 2737-2747+2757.

[7] 徐建妙, 周源源, 程峰, 等. 多层复配微胶囊的制备及其在混凝土裂缝自修复中的应用 [J]. 生物工程学报, 2025, 41 (01): 448-460.

[8] 李克亮, 颜辰, 陈希, 等. 三种微生物矿化修复再生混凝土裂缝效果对比分析 [J]. 材料导报, 2025, 39 (02): 63-70.

[9] 侯福星, 白一鸣, 沈頤, 等. 微生物自修复混凝土载体材料研究进展 [J]. 材料导报, 2024, 38 (13): 84-98.

[10] 韩瑞凯, 张家广, 马奥炜, 等. 增强再生骨料固载混菌对混凝土裂缝自修复性能的影响试验研究 [J]. 土木与环境工程学报 (中英文), 2024, 46 (05): 135-142.

[11] 韩晓冬, 赵永克, 袁伟. 微生物矿化修复公路混凝土早期裂缝研究 [J]. 公路, 2023, 68 (06): 429-433.

[12] 花素珍, 张家广, 高沛, 等. 增强再生骨料固载混菌的混凝土裂缝自修复性能 [J]. 复合材料学报, 2023, 40 (11): 6299-6310.

[13] 周耀, 王若琪, 刘斌, 等. 微生物修复混凝土裂缝的力学性能试验研究 [J]. 公路交通科技, 2022, 39 (12): 134-138.

[14] 高瑞晓, 王剑云. 微生物矿化沉积碳酸钙技术修复混凝土既有微裂缝研究进展 [J]. 材料导报, 2023, 37 (01): 96-105.

作者简介：陈禹键（1992.09-），男，汉族，北京人，本科，高级工程师，研究方向：建筑材料。

通讯作者：焦健（1990.04-），女，汉族，北京市东城区人，博士，副教授，研究方向：生物建造。