

团 体 标 准

T/CCTAS XX—202X

水泥混凝土裂缝微生物修复技术指南

Microbial repair technical and guidance for cement concrete cracks

征求意见稿

(本草案完成时间：2024 年 9 月)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国交通运输协会 发 布

目 次

前 言 II

1 范围1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 修复材料制备 2

4.1 原材料 2

4.2 仪器和设备 3

4.3 微生物固载工艺 3

5 微生物修复浆液制备 3

5.1 仪器和设备 3

5.2 微生物修复浆液菌株的要求 4

5.3 微生物菌株的活化培养 4

5.4 微生物修复浆液的基本组份 5

5.5 生物修复浆液的组份配比 5

6 微生物修复工艺与质量控制 5

6.1 微生物修复工艺 5

6.2 修复质量控制 7

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国交通运输协会交通工程设施分会提出。

本文件由中国交通运输协会标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：上海城建职业学院、浙江交工宏途交通建设有限公司、中交路桥华东工程有限公司、浙江华涛科技信息咨询有限公司。

本文件主要起草人：李涛、蒋华龙、刘钊、闫晓慧、刘婷、黄昊、杨瑞华、韩帮军、宋冰、陈宵梅、张敏、陆晓峰、顾豪杰、金磊、鲍春钱、郭林园、王永强、荆旭、王珂、梁安泉、何茂林、张邦、文有华。

水泥混凝土裂缝微生物修复技术指南

1 范围

本文件规定了水泥混凝土结构物裂缝微生物修复材料的修复材料制备、微生物修复浆液制备、微生物修复工艺和质量控制等内容。

本文件适用于公路、桥梁、隧道、建筑物和水工结构等水泥混凝土结构物裂缝的修复。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 19870 工业检测型红外热像仪

GB/T 50081 混凝土物理力学性能试验方法标准

GB/T 50082 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准

CECS 21: 2000 超声法检测混凝土缺陷技术规程

DB32/T 4168 建设工程红外热成像法检测技术规程

T/CECS 1114 工程结构数字图像法检测技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

菌株 strain

菌株是指从不同来源的标本中分离而得的相同菌种，它表示任何由一个独立分离的单细胞（或单个病毒体）通过无性繁殖而成的纯遗传型群体及其一切后代，一种微生物的每一不同来源的纯培养物或纯分离物均可称为某菌种的一个菌株。

3.2

培养基 culture medium

培养基又称生长介质，是由人工配制，用于培养微生物、细胞、组织、生物体，有利其生长繁殖或代谢物产生的固态、半固态、液态混合营养基质或介质。

3.3

微生物固载材料 microbial immobilization materials

微生物固载材料是指用于承载和固定微生物细胞或生物活性物质，以实现微生物在特定环境中的稳定存在和高效作用的物质。

注：微生物固定化载体材料分为无机载体、有机高分子载体和复合载体三大类。

3.4

微生物固载工艺 microbial immobilization process

微生物固载工艺是一种将特选的微生物固定在选定的载体上，限制或定位于一定的空间区域，使其高度密集并保持生物活性的现代生物技术。

3.5

微生物修复浆液 microbial remediation slurry

微生物修复浆液是一种碳酸盐矿化菌矿化沉积液，由菌株、培养基、钙源及营养成分组成的多元和复杂的有机体系。

注：其组份主要包含微生物体在生命周期过程中新陈代谢产生的可溶性蛋白和可溶性含有多糖类几丁质的大分子有机物，含不可溶物质的细胞体。

3.6

微生物固载喷涂液 microbial supported spray coating solution

微生物固载喷涂液是一种专门配制的用于将微生物稳定固定在载体表面的溶液。

注：其组份包括工业水玻璃、偏高岭土和水。通过按比例（工业水玻璃：偏高岭土：水=1.0:2.2:1.1）混合制备，形成具有良好附着性、化学稳定性和生物相容性的涂层。该涂层可均匀喷涂在已经承载微生物的载体材料上，确保微生物能够在载体表面稳定生长并发挥其功能。

4 修复材料制备

4.1 原材料

4.1.1 菌株

本文件指菌株细胞体（碳酸钙的成核位点），细胞生物膜上的极性分子在水溶液中极易电离，通常使生物膜表面带负电荷，使得溶液中的阳离子表面阴离子发生相互吸附作用，成为碳酸盐矿化沉积的成核位点。

4.1.2 微生物培养基

培养基应提供微生物生长所需的营养物质，应依据使用环境进行专门配制，以促进脲酶菌和其他具有特定代谢功能的微生物生长。

4.1.3 微生物固载材料

应采用孔隙结构好，吸附性，生物相容性好，易降解，机械强度高的载体材料，常用的载体材料有无机载体、天然有机载体、合成高分子载体和复合载体材料，如壳聚糖、纤维素、陶粒、硅藻土、珊瑚礁钙质砂。

4.2 仪器和设备

包括超净工作台、纯水仪、高压蒸汽灭菌锅、高速离心机、气浴恒温振荡仪等。

4.3 微生物固载工艺

本文件载体材料为珊瑚礁钙质砂，珊瑚礁钙质砂固载工艺流程如图 1 所示。其工艺步骤如下：

- a) 把珊瑚礁加工成 0~5mm 粒径的钙质砂，并清洗、烘干和高压蒸汽灭菌处理；准备喷涂液（用工业水玻璃、高岭土和水按 1:2.2:1.1 的比例配制）；
- b) 将菌液与珊瑚礁钙质砂一同放入真空吸附锅中，使菌液刚好没过珊瑚礁砂表面，并将真空锅锅盖拧紧，浸泡 15min；
- c) 浸泡结束后关闭进气口，打开吸气口，开启真空泵，锅内气压逐渐降低，当气压降为负压值 0.06MPa 时关闭吸气口阀门，并立即停止真空泵工作，对珊瑚礁砂进行静置吸附处理 15min；
- d) 将吸附处理后的珊瑚礁砂用筛网过滤多余菌液，置于烘箱中烘干至恒重，烘箱温度应不高于 40℃；
- e) 将烘干后的珊瑚礁砂均匀平铺在喷涂桶内进行外包裹处理，采用喷枪将喷涂液均匀喷涂至珊瑚礁砂表面，每喷涂 2s~3s 后立即翻转珊瑚礁砂颗粒进行另一侧喷涂，循环此过程 2~3 次；
- f) 将外包裹处理后的珊瑚礁砂置于室内，养护 12h 后在 40℃条件下烘干，完成微生物的固载。

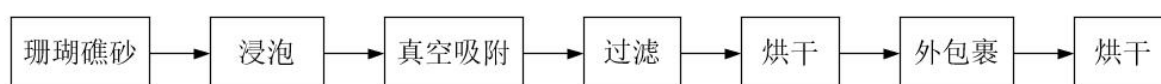


图 1 珊瑚礁钙质砂固载工艺流程图

5 微生物修复浆液制备

5.1 仪器和设备

包括超净工作台、纯水仪、高压蒸汽灭菌锅、高速离心机、气浴恒温振荡仪、紫外分光光度计、冰箱、电导率仪、电热鼓风干燥箱、卧式恒温振荡器等。

5.2 微生物修复浆液菌株的要求

5.2.1 应无毒无害，通常情况下不具有致病性；应有较强的生命力，能够长时间保持自身活性。

5.2.2 应具备较强的耐碱性能，能够在混凝土内部高碱性环境下保持较好的活性。

5.2.3 自身能够在一定程度上抵抗混凝土拌合过程或养护过程中存在的碰撞、挤压等外力作用，具备一定的抗机械应力作用。

5.2.4 在自身生长代谢及诱导矿化反应过程中，不宜产生对环境有害的物质，环保无污染。

5.3 微生物菌株的活化培养

5.3.1 配制培养基

先用精度 0.01g 的电子秤称量培养基所需组份，同时采用搪瓷杯装 800mL 超纯水置于电磁炉上加热，待水沸腾后加入药品试剂，并同时用玻璃棒搅拌，待杯中的试剂溶解完全后分装于锥形瓶中，用封口膜封口。

5.3.2 高温灭菌

将离心管、移液枪等试验器材用报纸包裹完全，与水 and 配制好的培养基，放置在高压蒸汽灭菌锅中高温灭菌，灭菌温度为 121℃，灭菌时长为 20min。

5.3.3 安瓿开封

预先打开紫外光灭菌灯对超净工作台灭菌处理 15min，然后采用 75% 的酒精棉对安瓿外表面进行擦拭消毒，将安瓿尖端处置于火焰上方加热 30s 取下，滴上少量冷却无菌水，观察到安瓿尖端开裂后用镊子或锉刀轻轻敲打，直至安瓿开封。

5.3.4 活化

用移液枪吸取约 0.3mL~0.5mL 的培养基滴入已开封的安瓿内，振荡使菌种冻干粉溶解呈现为悬浮状，用移液枪将其全部吸至装有培养基的离心管中，离心管内液体培养基应不超过 5mL，置于 30℃ 恒温条件下静止培养 24h，获得第 0 代菌株，即原始菌株。

5.3.5 扩大培养

用移液枪吸取步骤 5.3.4 中获得的 24h 菌液，接种于装有培养基的锥形瓶中，接种量为 1mL，置于恒温摇床中振荡培养 24h（30h，150rpm），即可获得第 1 代工作菌，可见明显浑浊则培养成功。

5.3.6 菌种保存

初始活化后的菌株用甘油管冷冻保藏于-70℃冰箱中，培养成功的菌株离心放入4℃的冰箱中保存。

5.4 微生物修复浆液的基本组份

微生物修复浆液的基本组份为微生物菌株、培养基、钙源和营养物质。

5.5 生物修复浆液的组份配比

5.5.1 微生物菌株：好氧嗜碱型芽孢杆菌。

5.5.2 培养基：蛋白胨、肉浸膏、尿素和蒸馏水。蛋白胨使用浓度宜在0.5g/L~1.0 g/L之间，肉浸膏使用浓度宜在0.5 g/L~1.0 g/L，尿素使用浓度应控制在0.1 g/L~0.2 g/L范围内，蒸馏水应保证其纯净度；培养基中的所有成分应能够提供足够的营养，以支持菌株的生长和代谢。

5.5.3 钙源：乳酸钙或乙酸钙，乳酸钙使用浓度为0.1 g/L~0.5 g/L；乙酸钙：使用浓度为0.1 g/L~0.5 g/L；考虑其对微生物的适应性和修复效果，钙源的加入量应根据具体修复需求确定；钙源的用量根据修复要求和微生物的需求添加。

5.5.4 微生物修复浆液的配比：根据实际需求选定微生物浓度（确定每升浆液中所需的菌株数量，单位：CFU/mL）、培养基浓度（浓度适合菌株生长）、钙源添加量（依据需求选择最有效的钙源浓度）；按照一定的比列进行配制。

6 微生物修复工艺与质量控制

6.1 微生物修复工艺

6.1.1 修复工艺流程

混凝土裂缝微生物修复工艺主要包括修复准备、裂缝清理、裂缝修复和再次修复等。具体修复流程如图2所示。

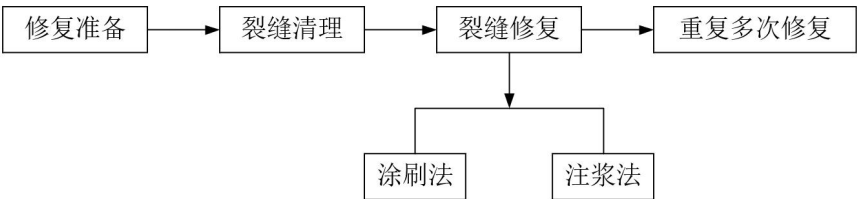


图2 修复工艺流程

6.1.2 修复准备

6.1.2.1 初步清理：使用钢丝刷或凿子沿裂缝边缘轻轻刷除或凿除松动的混凝土块、灰尘、油污等杂质。

6.1.2.2 深度清理：对于较深的裂缝，需要确保裂缝内部干净无杂质，确保没有残留的灰尘和碎屑。

6.1.2.3 清洗裂缝：使用清水喷壶或高压水枪对裂缝进行冲洗，确保裂缝内部和周围表面干净湿润。清洗后，应等待裂缝表面自然干燥或用干净的布擦干，以便后续修补工作的进行。

6.1.3 修复方法

6.1.3.1 涂刷法

具体步骤如下：

- a) 用吹风机吹干需修复的混凝土结构物裂缝；
- b) 将微生物修复浆液用刷子均匀的涂在混凝土结构物构件表面；
- c) 用装有 5%乳酸钙的喷壶向构件表面均匀喷洒钙源，第一次喷涂完毕后，静置 15 分钟；重复该过程，涂刷 8 次直至形成多层凝胶保护层。

6.1.3.2 注浆法

具体步骤如下：

- a) 用吹风机吹干需修复的混凝土结构物裂缝；
- b) 待裂缝干燥后将微生物浆液用针管均匀注入裂缝中，再注射 5%乳酸钙溶液，使裂缝空间处于溶液饱和状态，静置 1 小时，重复该过程，进行 7 次注浆。

6.1.3.3 注意事项

注意事项如下：

- a) 对于形状不规则或深度较大的裂缝，可采用分段注射法或多次涂刷法，确保修复材料能够充分填充裂缝；
- b) 若修复后效果不明显，可考虑增加修复材料的注入量或优化微生物培养条件；

c) 在高温季节施工时，应尽量避免阳光直射，采取遮阳措施；在低温季节施工时，应采取加热保温措施。

6.2 修复质量控制

6.2.1 修复质量检测方法

6.2.1.1 渗透率测试：使用渗透系数测定仪对修复后的混凝土进行渗透率测试，结果应符合表 1 中的要求。

6.2.1.2 抗碳化测试：依据 GB/T 50082 标准进行 14 天的碳化深度测试，确保深度不大于 5mm。

6.2.1.3 电通量测试：使用电通量测试仪测试混凝土抗氯离子渗透性，结果应符合表 1 中的要求；

6.2.1.4 抗压强度测试：依据 GB/T 50081 标准测试修复后混凝土的抗压强度，结果应达到设计要求的 80%以上。

6.2.1.5 粘结强度测试：依据 GB/T 50081 标准测试修复材料与原混凝土的粘结强度，结果应不低于 1.5 MPa。

6.2.1.6 循环冻融测试：依据 GB/T 50082 标准进行冻融循环试验，质量损失应不超过 5%。

6.2.1.7 超声波检测：依据 CECS21：2000。通过超声波的传播速度和衰减系数，评估裂缝修复的密实度和均匀性。

6.2.1.8 红外热成像：依据 GB/T 19870、DB32/T 4168；利用热成像技术检测修复后裂缝区域的温度分布，识别内部缺陷和裂缝。

6.2.2 修复质量检验要求

修复质量检验应包括微生物矿化能力、混凝土试件渗透率、抗碳化、电通量、氯离子迁移系数；目测观察裂缝的修复效果；通过无损检测方法检验裂缝等病害的修复效果，修复质量应符合表 1 的要求。

表 1 修改质量检验要求

序号	项目	检测指标	允许差	检测依据
1	外观目测	表面无明显裂缝，且能够观测到白色结晶物	\	观测法、人工智能裂缝识别法

2	渗透率	渗透系数不大于 $5.460 \times 10^{-6} \text{mm/s}$	$\pm 0.5 \times 10^{-6} \text{mm/s}$	GB/T 50082
3	抗碳化性能	14d 碳化深度不大于 5mm	$\pm 0.1 \text{mm}$	GB/T 50082
4	抗氯离子渗透性	氯离子迁移系数不大于 $8.82208 \times 10^{-13} \text{m}^2/\text{s}$ 或电通量不大于 397.58677C	$\pm 1 \times 10^{-13} \text{m}^2/\text{s}$ $\pm 50 \text{C}$	GB/T 50082
5	抗压强度	修复后混凝土的抗压强度应达到设计要求的 80%以上	$\pm 5\%$	GB/T 50081
6	粘结强度	修复材料于原混凝土的粘结强度应不低于 1.5MPa	$\pm 0.1 \text{MPa}$	GB/T 50081
7	耐久性	修复后的混凝土在冻融循环试验中的质量损失应不超过 5%	$\pm 1\%$	GB/T 50082
8	无损检测	超声波检测、红外热成像、数字图像处理等无损检测技术	\	CECS21: 2000 GB/T 19870 DB32/T 4168 T/CECS 1114