

**T/CECS XXXX-202X**

**中国工程建设标准化协会标准**

**石质文物微生物保护性修复技术规程**

Technical specification for microbial protective restoration of stone cultural relics

（征求意见稿）

**中国XX出版社**

中国工程建设标准化协会标准

**石质文物微生物保护性修复技术规程**

Technical specification for microbial protective restoration of stone cultural relics

**T/CECS XXX-202X**

主编单位：重 庆 大 学

大 足 石 刻 研 究 院

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：202X年 X 月 X 日

**中国XX出版社**

202X　北　　京

前　　言

《石质文物微生物保护性修复技术规程》（以下简称“规程”）根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2024年第二批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字〔2024〕28号）的要求进行编制。编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考国内外有关标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分8章和4个附录，主要内容包括：总则、术语和符号、基本规定、材料、病害勘察与取样分析、微生物修复材料选择与制备、工艺流程、检测与验收等。

本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国工程建设标准化协会勘测专业委员会归口管理，由重庆大学负责具体技术内容的解释。实施过程中如有意见或建议，请反馈至重庆大学土木工程学院（地址：重庆市沙坪坝区沙北街83号，邮编：400045，邮箱：###）。

主编单位：重庆大学

大足石刻研究院

参编单位：重庆市文物考古研究院

敦煌研究院

云冈研究院

龙门石窟研究院

重庆大学建筑规划设计研究总院有限公司

重庆大学溧阳智慧城市研究院

内蒙古工业大学

南京艺术学院

江苏斯维尔建筑设计院有限公司……【待补充】

主要起草人：刘汉龙 杨 阳 陈卉丽 周大庆 赵 彬 卢继文 陈建平 武发思 李 驰 周 庆 肖 杨 马朝龙刘小雨 叶 琳 李天晓 孔纲强 乔尚孝 胡 斌 刘远坚 朱 敏 高学成 邹 谭 史金权 吴焕然等……【待补充】

主要审查人：【待补充】

目 次

[1 总 则 1](#_Toc4063)

[2 术语和符号 2](#_Toc20943)

[2.1 术语 2](#_Toc9703)

[2.2 符号 3](#_Toc981)

[3 基本规定 5](#_Toc9119)

[4 材 料 6](#_Toc32503)

[4.1 微生物材料 6](#_Toc18041)

[4.2 反应底物 6](#_Toc1599)

[4.3 石粉 6](#_Toc23354)

[5 病害勘察与取样分析 8](#_Toc22997)

[5.1 一般规定 8](#_Toc30224)

[5.2 病害测量 8](#_Toc26415)

[5.3 取样分析 9](#_Toc22673)

[6 微生物修复材料制备与施工 12](#_Toc13210)

[6.1 一般规定 12](#_Toc23716)

[6.2 微生物补配修复材料 12](#_Toc7172)

[6.3 微生物裂隙灌浆材料 13](#_Toc13207)

[6.4 微生物防风化加固材料 13](#_Toc7227)

[6.5 施工要求 14](#_Toc746)

[7 检测与验收 16](#_Toc8442)

[7.1 防风化加固 16](#_Toc29863)

[7.2 灌浆 16](#_Toc17269)

[7.3 粘接检测 17](#_Toc16186)

[7.4 评估和建议 19](#_Toc589)

[附录A 微生物修复菌种筛选记录表 20](#_Toc2331)

[附录B 微生物培养及菌液质量检测表 21](#_Toc27407)

[附录C 微生物修复石质文物施工记录表 22](#_Toc28368)

[附录D 微生物修复效果评估及监测表 23](#_Toc162)

[用词说明 24](#_Toc26138)

[引用标准名录 25](#_Toc20063)

附：条[文说明 26](#_Toc20280)

**Contents**

1 General Provisions 1

2 Terms and Sympols 2

2.1 terms 2

2.2 symbols 3

3 Basic Requirements 5

4 Materials 6

4.1 microbial materials 6

4.2 reaction substrates 6

4.3 stone powder 6

5 Disease Investigation and Sampling Analysis 8

5.1 general provisions 8

5.2 disease measurement 8

5.3 sampling analysis 9

6 Selection and Preparation of Microbial Restoration Materials 12

6.1 general provisions 12

6.2 microbial supplementary restoration materials 12

6.3 microbial fracture grouting materials 13

6.4 microbial weathering resistance reinforcement materials 13

6.5 Construction Requirements 14

7 Inspection and Acceptance 16

7.1 Weathering Resistance Reinforcement 16

7.2 grouting 16

7.3 adhesion inspection 17

7.4 evaluation and suggestions 19

Appendix A Record Sheet for Screening of Microbial Remediation Strains 20

Appendix B Record Sheet for Microbial Cultivation and Quality Detection of Bacterial Solution 21

Appendix C Construction Record Sheet for Microbial Remediation of Stone Cultural Relics 22

Appendix D Record Sheet for Effect Evaluation and Monitoring of Microbial Remediation 23

Word description 24

List of quoted standards 25

Attached: Explanation of Provisions 26

# 

# 1 总 则

**1.0.1** 为规范石质文物微生物保护性修复的技术要求，做到安全适用、技术先进、经济合理、质量可靠、环境友好，制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于微生物矿化修复石质文物的病害勘察、取样分析、微生物修复材料、工艺、检测与验收。

**1.0.3** 石质文物微生物保护性修复应用除应符合本规程规定外，尚应符合国家现行有关标准和现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

# 2 术语和符号

## **2.1 术语**

**2.1.1 石质文物 stone cultural relics**

指一切以天然岩石为原料加工的制品类文物，分为不可移动石质文物和可移动石质文物，本规程不涉及可移动石质文物。

**2.1.2 不可移动石质文物 immovable stone cultural relics**

指在历史、艺术、科学等方面具有重要价值，且无法或不宜整体移动的石质文物，包括石窟寺、摩崖石刻、碑刻、石雕、岩画等。

**2.1.3 石质文物材质 texture of stone cultural relics**

指承载石质文物所蕴含历史信息的物质实体，包括石质文物本体和石质文物表面装饰层。石质文物本体指经过人为工艺处理，由天然岩石或石材转变而成的文物主体部分，以下简称石质。表面装饰层中的金箔、彩绘等不在本规程范围内。

天然岩石或石材主要分为以下类型：

a) 岩浆岩：花岗岩、玄武岩、安山岩等。

b) 沉积岩：砂岩、页岩、石灰岩等。

c) 变质岩：大理岩、板岩、片麻岩等。

**2.1.4 石粉 stone powder**

**由天然石材经破碎、粉磨、筛分等工艺加工而成的，用于石质文物微生物修复的粉状材料。**

**2.1.5 石质文物保存环境 conservation environment of stone cultural relics**

指对石质文物保存状态产生直接或间接影响的物理、化学、生物等各类因素的总和。包括露天环境、半露天环境、室内环境及地下环境。

**2.1.6 石质文物病害 diseases of stone cultural relics**

指在石质文物长期保存过程中，由于自然因素与人为因素交互作用，致使石质文物在物质成分、结构构造以及外貌形态等方面出现一系列不利于文物安全，有损文物历史、艺术和科学价值展现的不良变化。包括物理病害、化学病害、生物病害等。

**2.1.7 微生物岩土加固技术 microbially induced calcite precipitation**

微生物加固技术是指微生物诱导碳酸钙沉淀技术，是一种利用微生物矿化作用改善土体物理力学性质的新型技术。

**2.1.8 石质文物修复技术 repair techniques of stone cultural relics**

为消除或减缓石质文物本体病害采取的修复措施，包括清洗、脱盐、预加固、加固、灌浆、粘接、补全、封护、勾缝、协色、成品保护等。基本流程如图1。

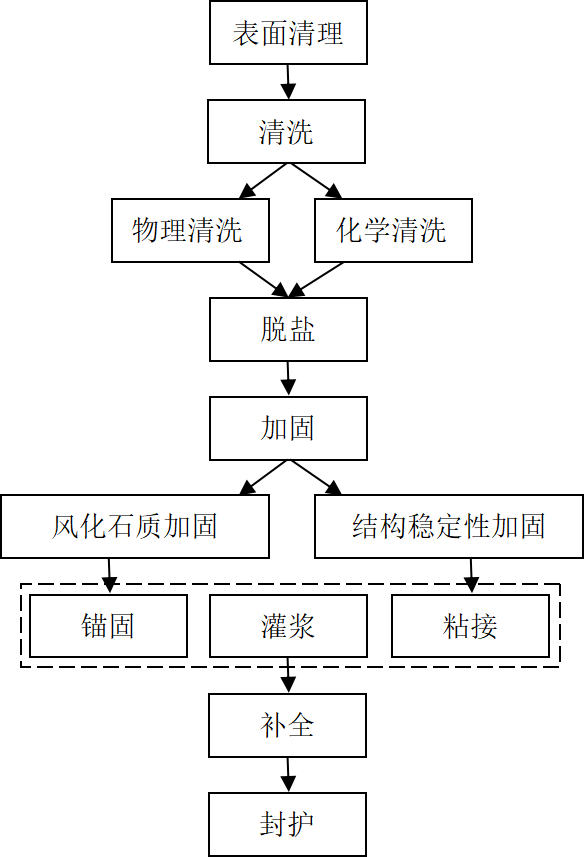


图1 石质文物修复操作基本流程

## **2.2 符号**

U————每分钟催化1微摩尔底物转化的酶量。

OD600————细菌溶液在600nm波长处的吸光值。

mol/L————每升溶液中含有的物质的量的浓度单位。

mm————长度单位。

# 

# 3 基本规定

**3.0.1** 石质文物修复应以审批通过的保护修复方案为依据，且应具备完整的勘察设计施工资料。

**3.0.2** 石质文物修复的适用范围为可移动石质文物和不可移动石质文物。

**3.0.3** 石质文物修复应根据石质文物材质、病害程度、保存环境等因素确定。

**3.0.4** 石质文物修复应遵循真实性、最小干预、可识别性和最大兼容性的原则。

**3.0.5** 石质文物修复所选材料应无毒、无害，不会对文物、人员或环境造成危害。

**3.0.6** 修复材料应易于去除，而不损伤石质文物本体，以便将来的再次修复或保护处理。

**3.0.7** 修复材料应与石质文物的原始材料在物理、化学性能上相接近，不能改变和破坏文物的原制作材料。

**3.0.8** 修复效果应具有长期稳定性，有利于石质文物的长期保存。

**3.0.9** 石质文物修复技术人员应经过专业培训，掌握修复技能，了解修复对象。

**3.0.10** 石质文物修复应及时收集资料，做好科学、规范的档案记录。

**3.0.11** 石质文物修复工程实施阶段，应做好修复对象、修复人员及周边环境的防护措施。

**3.0.12** 石质文物修复施工中应对文物本体和修复工艺、材料开展跟踪监测。

**3.0.13** 根据保存状况、艺术效果确定历史修复材料的保留或去除，并严格按照石质文物修复操作流程进行修复操作，其中具有重要价值的历史修复材料去除后应予保存。

**3.0.14** 微生物培养完成后，应对微生物活性、密度进行量化。

**3.0.15** 石质文物微生物修复应采取安全措施，微生物材料制备、储存及操作过程应满足无菌、通风等安全要求。

**3.0.16** 本规程所用试剂和水，应使用分析纯试剂和电导率≤0.055μs/cm（25℃）的去离子水。

# 4 材 料

## **4.1 微生物材料**

**4.1.1** 微生物菌种应来源于石质文物赋存环境，通过筛选、分离、扩培后获得，且无毒无害、具备诱导碳酸盐沉淀的可矿化能力。

**4.1.2** 微生物的筛选、分离、提纯和培养等应按照标准化无菌操作。

**4.1.3** 培养基使用的试剂包括酵母提取物、大豆蛋白胨、氯化铵、氢氧化钠等。

**4.1.4** 微生物的培养应在室内无菌条件下（25℃±2℃）进行。

**4.1.5** 培养得到的菌液活性应不小于10U且OD600小于1，并验证胶结效果可靠。

**4.1.6** 应根据石质文物的病害情况和修复目标，选择特点和功能最为适宜的一种或几种微生物实施修复。

## **4.2 反应底物**

**4.2.1** 使用的反应底物包括尿素、醋酸钙及氢氧化镁等分析纯试剂。

**4.2.2** 溶解底物所用的液体应为去离子水，底物pH宜控制在6.0-8.5范围内。

## 

## **4.3 石粉**

**4.3.1** 制备石粉选用的石材应优先选用与石质文物同质地单元、同岩性的原生石材，可从石质文物周边非文物保护区域岩石露头、废弃矿料中选取，或采用经确认岩性一致的替代石材，确保材料物理化学性质与文物本体高度匹配。

**4.3.2** 所制备的石粉不应含有重金属、有机污染物或强氧化性物质等有毒或抑制微生物脲酶活性的成分。

**4.3.3** 使用颚式破碎机或锤式破碎机将大块石材破碎成较小颗粒，且级配良好，再通过超细磨粉机将颗粒研磨至所需细度。

**4.3.4** 操作时佩戴防护装备，避免粉尘吸入，同时采取除尘、降噪等环保措施，减少污染。

**4.3.5** 石粉含水率不应大于1%。

# 5 病害勘察与取样分析

## **5.1 一般规定**

**5.1.1** 石质文物风化病害的表现形式包括裂隙、空鼓、粉化剥落、片状剥落、酥碱泛盐、水锈结壳、表面溶蚀、表面污染和生物病害，现场调查时应观察与辨识不同表现形式的砂岩质文物风化病害，查明其分布范围、表面形态和发育程度等特征。

**5.1.2** 文物风化病害勘察过程中，应选择对文物影响最小的技术手段，优先选择无损检测技术，合理规划勘察技术路线与内容，保障文物安全。

**5.1.3** 应在搜集文物相关资料和查明文物所在区域环境条件的基础上，对文物风化病害展开详细勘察，可取样开展室内研究。

**5.1.4** 应结合定性与定量的技术手段，注重应用现代检测与分析技术，从病害类型、发育位置、分布范围、几何尺寸、表面形貌变化、物质成分变化等方面分析砂岩质文物风化病害特征。

**5.1.5** 应在查明石质文物风化病害特征的基础上，选择具有代表性的取样点。

**5.1.6** 应在文物的隐蔽部位取样，避免损伤文物的价值。

**5.1.7** 为减少对文物的干扰，宜少取样，避免重复取样。

**5.1.8** 石质文物勘察取样及检测分析工作尚应符合《石质文物保护工程勘察规范》WW/T 0063相关的规定。

## **5.2 病害测量**

**5.2.1** 病害测量项目

石质文物风化病害调查测量项目见表1。

表1 石质文物风化病害调查测量项目

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 病害类型  测量项目 | 裂隙 | 空鼓 | 粉化剥落 | 片状剥落 | 酥碱泛盐 | 水绣结壳 | 表面溶蚀 | 表面污染 | 生物病害 |
| 长度 | √ | √ | - | √ | √ | √ | - | √ | √ |
| 宽度 | √ | √ | - | √ | √ | √ | - | √ | √ |
| 面积 | - | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| 厚度（深度） | - | √ | √ | √ | - | - | √ | - | - |
| 注：√表示应测试的项目，-表示不需要测试的项目。 | | | | | | | | | |

**5.2.2** 测量方法

应根据风化病害的分布范围选择测量工具，分布范围小时，可用卷尺、直尺、千分尺、游标卡尺等工具测量：分布范围大时，宜用皮尺、塔尺、激光测距仪等工具测量。当有石质文物的三维影像资料时，可通过计算机测量。

## **5.3 取样分析**

石质文物风化病害勘察过程中可采集的样品包括岩样、水样和生物样。

**5.3.1** 风化岩样的取样方法

**1** 根据文物所在区域的地质环境、风化特征等确定取样点，样品应反映石质文物风化病害的特征。

**2** 取粉状风化岩样时，用手术刀刮取或用毛刷刷至滤纸上，再装入试样盒(管)内密封。

**3** 取片状剥离风化岩样时，用镊子夹取薄层剥落物，当片状剥离呈多层时，应分层取样，再装入试样盒(管)内密封。

**4** 取块状风化岩样时，可使用手持式取样钻机，宜优先采集掉落的块状风化岩样。

**5** 风化岩样的取样量应根据石质文物风化病害试验设计要求确定。

**6** 在保存封装片状剥离风化岩样和块状风化岩样时应采用缓冲材料填塞，防止样品结构破坏。

**5.3.2** 水样的取样方法

**1** 按照水对石质文物破坏形式的差异，影响石质文物风化的水可分为地下水、面流水、凝结水和渗水，取水样时应分类采集，水样的取样量应根据砂岩质文物风化病害试验设计要求确定。

**2** 地下水水样可通过水井或钻孔等采集。

**3** 面流水水样可使用漏斗和取样瓶在面流水汇集处采集。

**4** 渗水水样可使用漏斗和取样瓶在渗水点采集。

**5.3.3** 生物样的取样方法

**1** 采集苔藓或地衣时，可用手术刀或铲子沿植物与岩体的分界面将其分离，对于紧密固着在岩体上的苔藓或地衣,宜在文物周围岩体选取同种植物,用锤子和凿子将植物和岩块一起采集,装入样品袋，同一取样点至少取2份样品。

**2** 微生物取样时，用接种针，镊子或手术刀将微生物样品收集到无菌滤纸或玻璃片上,再装入试样盒(管)内，用无菌塞子或胶条密封，同一取样点至少取2份样品。

**3** 对于表面酥粉的石质文物，可用浸蒸馏水的无菌棉签擦拭文物表面，粘取微生物样品，再装入试样盒(管)内，用无菌塞子或胶条密封。

**5.3.4** 测试分析要求

**1** 测试分析方法包括原位测试和室内测试，应优先选择无损或微损的原位测试。石质文物风化病害原位测试分析方法见表2，石质文物风化病害室内测试分析方法见表3。

表2 石质文物风化病害原位测试分析方法

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 病害类型  分析方法 | 裂隙 | 空鼓 | 粉化剥落 | 片状剥落 | 酥碱泛盐 | 水绣结壳 | 表面溶蚀 | 表面污染 | 生物病害 |
| 内窥镜照相 | √ | √ | - | √ | - | - | - | - | - |
| 多/高光谱照相 | √ | √ | √ | - | √ | - | √ | √ | √ |
| 显微镜分析 | - | - | √ | - | √ | - | √ | √ | √ |
| X射线探伤 | √ | √ | - | √ | - | - | - | - | - |
| X射线CT检测 | √ | √ | - | √ | - | - | - | - | - |
| 超声波检测 | √ | √ | - | √ | - | √ | - | - | - |
| 红外光谱分析  （便携式） | - | - | √ | - | √ | - | √ | √ | - |
| 激光拉曼光谱分析（便携式） | - | - | √ | - | √ | √ | - | √ | - |
| X射线荧光光谱分析（便携式） | - | - | √ | - | √ | √ | - | √ | - |
| 注：√表示应测试的项目，-表示不需要测试的项目。 | | | | | | | | | |

表3 石质文物风化病害室内测试分析方法

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 分析方法  样品类型 | 块状岩样 | 片状岩样 | 粉状  岩样 | 水样 | 苔藓地衣样品 | 微生物样品 |
| 岩石薄片鉴定 | √ | ∆ | ∆ | - | - | - |
| 土工试验分析 | √ | ∆ | ∆ | - | - | - |
| 水质分析 | - | - | - | √ | - | - |
| 扫描电镜分析 | √ | √ | √ | - | - | √ |
| X射线衍射分析 | √ | √ | √ | - | - | - |
| 红外光谱分析 | √ | √ | √ | - | - | - |
| 激光拉曼光谱分析 | √ | √ | √ | - | - | - |
| X射线荧光光谱分析 | √ | √ | √ | - | - | - |
| 化学全分析 | √ | √ | √ | - | - | - |
| 离子色谱分析 | √ | √ | √ | √ | - | - |
| 品种（菌种）鉴定 | - | - | - | - | √ | √ |
| 注：√表示应测试的项目，∆表示样品规格符合测试条件时可测试的项目，-表示不需要测试的项目。 | | | | | | |

**2** 应及时送样进行室内测试，优先展开对样品无损或微损的测试项目。

**3** 应观察与测试岩样的微观结构、化学成分、矿物组成、可溶盐含量、胶结物与胶结程度等:对规格满足物理力学性质测试条件的岩样,可检测其密度、粒径、含水率、孔隙率、渗透系数、软化系数、抗拉强度、抗压强度、抗钻特性等指标。

**4** 应测试水样的可溶盐含量、pH值、色度、浊度、电导率等水质特征。

**5** 应观察与测试生物样品的种属、形态、大小、颜色、生长习性、生长周期等特征。

# 6 微生物修复材料制备与施工

## **6.1 一般规定**

**6.1.1** 渗透性

修复材料应具有较强的均匀渗透能力，能够渗透到石质文物的未风化部分，形成有效的加固层。

**6.1.2** 固化性

修复材料在石质内部添加后，应能发生相应的反应并固结，且固结完成后产生的化合物不会对石质产生影响和危害。

**6.1.3** 强度

固结的强度应适中，既能提供必要的支撑和保护，又不会对石质文物造成额外的压力或损伤。

**6.1.4** 兼容性

修复材料的物理化学等性质应与石质文物本体材料相接近。修复后的石质文物应能适应其所处的保存环境，修复材料应在该环境下保持稳定。

**6.1.5** 可操作性

修复材料应易于操作和应用，具有明显的实施可行性。修复材料和工艺应具有可逆性。

## **6.2 微生物补配修复材料**

**6.2.1** 根据石质文物材质取样分析结果，确定胶结物质，包括钙质胶结、镁质胶结、黏土胶结等。

**6.2.2** 采用与胶结物质一致的钙质或镁质材料作为制备微生物补配修复材料使用的反应底物。

**6.2.3** 选取与石质文物相同材质的石粉作为补配修复的原材料。

**6.2.4** 微生物补配修复材料由石粉、微生物菌液、尿素和反应底物均匀混合后制备得到，操作时控制好黏稠度，应以不挂流为宜。

**6.2.5** 使用的石粉、尿素、反应底物的质量比为10:1.5:1，单位为g；微生物菌液和尿素的固液比为2:1，单位为ml；所有材料均匀混合后得到含水率（ω） 为15%~18%的微生物补配修复材料。具体含水率应根据粘稠度进行适量调整。

**6.2.6** 配制补配修复材料时需注意材料的颜色、质地、强度等与原文物的一致性。

## **6.3 微生物裂隙灌浆材料**

**6.3.1** 根据石质文物材质取样分析结果，确定胶结物质，包括钙质胶结、镁质胶结、黏土胶结等。

**6.3.2** 采用与胶结物质一致的钙质或镁质材料作为制备微生物灌浆材料使用的反应底物。

**6.3.3** 将微生物菌液、尿素、反应底物均匀混合后制备得到微生物灌浆材料，灌浆时裂隙封口堵漏应严实，防止灌浆时产生漏浆。

**6.3.4** 裂缝宽度小于0.5mm的裂缝采用针头或蠕动泵低压灌注微生物灌浆材料，裂缝大于0.5mm的裂缝需采用粒径小于0.3mm的石粉拌合微生物菌液、尿素、反应底物后制备得到的微生物灌浆材料进行灌浆。

**6.3.5** 使用的尿素溶液浓度为不宜大于4mol/L、反应底物浓度不宜大于4mol/L，具体浓度应根据灌浆效果进行适量调整。

**6.3.6** 灌浆加固应在间隔12小时后循环进行，不宜小于2次，具体次数视裂缝宽度和加固效果确定。

## **6.4 微生物防风化加固材料**

**6.4.1** 根据石质文物材质取样分析结果，确定胶结物质，包括钙质胶结、镁质胶结、黏土胶结等。

**6.4.2** 确定胶结物质后，通过采用与胶结物质一致的钙质或镁质材料作为制备微生物防风化加固材料使用的反应底物。

**6.4.3** 将微生物菌液、尿素、反应底物均匀混合后制备得到单相微生物防风化加固材料，或依次使用微生物菌液和尿素、反应底物的混合液。

6.4.4 当风化程度较轻，风化层较薄（＜2mm），可单独采用喷洒加固方法；当风化程度较重，风化层较厚（＞2mm），可联合使用喷洒、贴敷吸附加固方法；当岩体表面粉化严重（类落砂），可联合使用喷洒、滴渗加固方法。

**6.4.5** 适用于微生物防风化加固材料的石质文物材料孔隙率不宜小于10%。

**6.4.6** 使用的尿素溶液浓度不宜大于2mol/L、反应底物浓度不宜大于2mol/L，具体浓度应根据加固方案和加固效果进行适量调整。

**6.4.7** 防风化加固应在间隔12小时后循环进行，加固次数宜为5~8次，具体次数视风化程度而定。

## **6.5 施工要求**

**6.5.1** 基本要求

**1** 微生物保护性修复石质文物的施工需遵循文物保护“最小干预”“可逆性” 原则。

**2** 现场施工流程及工艺应与修复方案一致。方案的编制应符合《石质文物保护修复方案编写规范》WW/T 0007相关的规定。

**6.5.2** 前期准备与评估

**1** 采用微生物修复材料进行保护性修复施工前应对石质文物的病害类型、劣化成因、矿物组成、孔隙率、赋存环境等进行详细监测分析。

**2** 选取与目标文物同类型石材样本，模拟文物真实劣化状态，进行微生物保护性修复室内试验。

**3** 应设置不少于3种工况进行室内模拟试验，如不同的微生物菌种、反应底物浓度、石粉颗粒级配和工艺等，并设置模拟文物保存环境老化试验。

**4** 根据微观分析、力学性能测试及耐候性结果，确定修复方案。

**6.5.3** 现场局部试验

**1** 根据室内试验结果，确定2~3套修复方案进行现场局部试验。

**2** 施工前应对使用的微生物菌液、尿素、反应底物等修复材料进行质量检验，确保其符合要求

**3** 按照修复方案在目标文物表面选取隐蔽、典型病害区域，并设置试验区隔离带，进行小范围试验。

**4** 应对施工过程进行全程监控，做好施工记录，包括材料使用情况、施工工艺参数、文物状态变化等。如发现问题，应分析原因并调整方案，在问题解决前应停止继续施工。

**5** 施工结束后第7天、14天、28天进行效果评估，重点检查加固层均匀性、与基材结合度及表面硬度。

**6** 局部试验达到预期效果时，可申请进入现场应用，否则返回室内试验重新优化。

**6.5.4** 现场应用

**1** 现场应用前应经过室内试验及现场局部试验的可行性验证，并确定最终的修复方案，且修复方案通过专家评审。

**2** 施工前应对使用的微生物菌液、尿素、反应底物等修复材料进行质量检验，确保其符合要求；并按照修复方案对目标文物进行保护性修复。

**3** 应对施工过程进行全程监控，定期检查修复进度和质量，做好施工记录，包括材料使用情况、施工工艺参数、文物状态变化等。如发现问题，应立即上报，并分析原因调整方案，在问题解决前应停止继续施工。

**4** 施工过程中产生的废弃物、废水等应按照环保要求进行处理，不得随意排放。

**5** 施工结束后第7天、14天、28天进行效果评估，重点检查加固层均匀性、与基材结合度及表面硬度。

# **7 检测与验收**

## 7.1 防风化加固

**7.1.1** 验收标准

**1** 加固器具、加固材料的使用，以及操作流程符合设计要求；

**2** 风化石质加固后颜色无变化，表面无眩光；

**3** 风化石质加固后强度明显提升，以接近同材质未风化石质强度为宜，且不同部位强度差不应大于10%；

**4** 加固后未新增裂隙，原有微裂隙无明显扩展，符合“最小干预”原则；

**5** 孔隙率、渗透率与同材质未风化部位接近；

**6** 评估方法参照表4执行，加固质量符合表4的要求；

表4 加固质量要求及评估方法

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 项目 | 质量要求 | 评估方法 |
| 1 | 表面颜色 | 无变化 | 目测 |
| 2 | 表面形貌 | 无眩光 | 目测 |
| 3 | 强度 | 接近或低于同材质未风化石质强度 | 硬度计检测 |
| 4 | 孔隙率 | 与同材质未风化部位接近 | 压汞法 |
| 5 | 渗透率 | 与同材质未风化部位接近 | 稳态法 |

**7** 砂岩质石质文物的检测评估应符合《砂岩质文物防风化材料保护效果评估方法》WWT 0028相关规定。

**7.1.2** 成品保护

用棉纸、塑料膜、棉布等对已经完成的加固修复部位进行遮护，防止降尘、修复材料及其他因素造成污染和破坏。

## 7.2 灌浆

**7.2.1** 验收标准

**1** 灌浆器具、材料的使用，以及操作流程符合设计要求；

**2** 灌浆后，风化裂隙和空鼓无扩展；

**3** 裂隙、空鼓部位浆液填实、填满，固结后无空腔，浆液固结体强度接近本体强度；

**4** 锚固灌浆锚孔内浆液填实、填满，锚杆稳固，浆液固结体强度接近本体强度；

**5** 局部修补颜色与本体接近或致，修补材料固结体与本体高差控制在±1m以内；

**6**  局部修补材料固结体强度低于本体强度；

**7**  评估方法参照表5执行，灌浆质量符合表5的要求。

表5 灌浆质量要求及评估方法

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 项目 | | 质量要求 | 评估方法 |
| 1 | 裂隙、空鼓灌浆 | 风化裂隙和空鼓表面形貌 | 灌浆后无扩展 | 目测、尺量 |
| 内部结构 | 浆液填实、填满，无空腔 | 敲击检测风化裂隙、空鼓 |
| 超声波或地质雷达检测应力裂隙和构造裂隙 |
| 灌浆材料固结体强度 | 接近或低于本体强度 | 岩石贯入阻力仪检测 |
| 2 | 埋植锚杆后 | 锚孔内部结构 | 浆液填实、填满，无空腔 | 超声波检测 |
| 锚孔内浆液固结体强度 | 接近本体强度 | 硬度计检测 |
| 3 | 灌浆后的局部修补 | 表面颜色 | 与本体接近或一致 | 目测、色卡对比 |
| 表面形貌 | 与本体的允许偏差±1mm | 目测、尺量 |
| 固结体强度 | 低于本体强度 | 硬度计检测 |

**7.2.3** 成品保护

用棉纸、塑料膜、棉布等对已经完成的灌浆修复部位进行遮护，防止降尘、修复材料及其他因素造成污染和破坏。

## 7.3 粘接检测

**7.3.1** 验收标准

**1** 粘接器具、材料的使用，以及操作流程符合设计要求；

**2** 粘接材料填实、填满，无空腔；

**3** 粘接后无明显错位，错位允许偏差在±3mm以内；

**4** 粘接材料固结体强度接近本体强度；

**5** 锚杆粘接锚孔内浆液填实、填满，锚杆稳固，浆液固结体强度接近本体强度；

**6** 局部修补颜色与本体颜色接近或致，修补材料固结体与本体高差控制在±1mm以内；

**7** 局部修补材料固结体低于本体强度；

**8** 评估方法参照表6执行，粘接质量符合表6的要求。

表6 粘接质量要求及评估方法

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 项目 | | 质量要求 | 评估方法 |
| 1 | 断裂粘接 | 粘接后的表面形貌 | 错位允许偏差±3mm | 目测、尺量 |
| 内部结构 | 粘接材料填实、填满，无空腔 | X射线探伤机或超声波检测 |
| 粘接材料固结体强度 | 接近本体强度 | 硬度计或岩石贯入阻力仪检测 |
| 2 | 粘接后的局部修补 | 局部修补的表面颜色 | 与本体接近或一直 | 目测、色卡对比 |
| 表面形貌 | 与本体的允许偏差±1mm | 目测、尺量 |
| 修补材料固结体强度 | 低于或接近本体强度 | 硬度计检测 |
| 3 | 埋植锚杆 | 锚孔内部结构 | 浆液填实、填满，无空腔 | 超声波检测 |
| 锚孔内浆液固结体强度 | 接近本体强度 | 硬度计检测 |

**7.3.2** 成品保护

**1** 粘接部位应做好支护，在粘接材料完全固化前，严禁扰动；

**2** 用棉纸、塑料膜、棉布等对已经完成的粘接修复部位进行遮护，防止降尘、修复行为及其他因素造成污染。

## 

## **7.4 评估和建议**

**7.4.1** 评估：

**1** 检查修复技术应用的合理性、材料选择的适宜性及修复工艺的精细度。

**2** 评估修复后文物在视觉上的完整性、协调性，以及是否恢复了其原有的艺术美感。

**3** 审核修复过程中是否有效保留了文物的历史痕迹、制作工艺等信息，避免“新造旧”现象。

**4** 考察修复材料及方法对环境的影响，包括是否使用了环保材料，修复过程是否产生有害物质排放。

**7.4.2** 建议：

**1** 根据评估报告，提出具体改进建议，包括但不限于技术优化、材料替换、后续维护方案等。

**2** 建议建立文物修复后的长期监测机制，定期复检文物状态，及时调整保护措施。

**3** 鼓励通过展览、讲座等形式，增强公众对文物修复工作的认识与参与，提升社会整体的文物保护意识。

**4** 建立修复项目反馈机制，收集专家、公众及利益相关方的意见，不断优化修复技术与评估体系。

附录A 微生物修复菌种筛选记录表

单位： 编号：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 项目  序号 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 文物编号 |  |  |  |  |
| 文物名称及地点 |  |  |  |  |
| 病害类型 |  |  |  |  |
| 采样环境描述 |  |  |  |  |
| 采样日期 |  |  |  |  |
| 筛选菌种名称 |  |  |  |  |
| 筛选方法 |  |  |  |  |
| 矿化能力验证 |  |  |  |  |
| 是否有毒、有害 |  |  |  |  |
| 筛选结论是否适用 |  |  |  |  |
| 采样人/筛选测试人 |  |  |  |  |
| 其他说明： | | | | |

日期： 年 月 日

附录B 微生物培养及菌液质量检测表

单位： 编号：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 项目  序号 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 菌种名称 |  |  |  |  |
| 培养批次 |  |  |  |  |
| 培养基配方 |  |  |  |  |
| 传代次数 |  |  |  |  |
| 培养条件（温湿度等） |  |  |  |  |
| 培养周期 |  |  |  |  |
| 菌液活性检测 |  |  |  |  |
| OD600检测值 |  |  |  |  |
| 胶结效果验证情况 |  |  |  |  |
| 测试日期 |  |  |  |  |
| 测试人 |  |  |  |  |
| 其他说明： | | | | |

日期： 年 月 日

附录C 微生物修复石质文物施工记录表

单位： 编号：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 项目  序号 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 文物编号 |  |  |  |  |
| 修复区域 |  |  |  |  |
| 菌种名称及浓度 |  |  |  |  |
| 施工工艺 |  |  |  |  |
| 施工工具 |  |  |  |  |
| 处理次数 |  |  |  |  |
| 间隔时间（h） |  |  |  |  |
| 施工环境 |  |  |  |  |
| 施工起止日期 |  |  |  |  |
| 施工人员 |  |  |  |  |
| 其他说明： | | | | |

日期： 年 月 日

附录D 微生物修复效果评估及监测表

单位： 编号：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 项目  序号 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 文物编号 |  |  |  |  |
| 修复区域 |  |  |  |  |
| 修复前病害描述 |  |  |  |  |
| 修复前照片编号 |  |  |  |  |
| 修复后即时评估 |  |  |  |  |
| 短期监测情况 |  |  |  |  |
| 中期监测情况 |  |  |  |  |
| 长期监测情况 |  |  |  |  |
| 检测项目及方法 |  |  |  |  |
| 施工人员 |  |  |  |  |
| 其他说明： | | | | |

评估人： 日期： 年 月 日

用词说明

为便于在执行本规程条款时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

**1** 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

**2** 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

**3** 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

**4** 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

**引用标准名录**

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。

《石质文物保护修复方案编写规范》WW/T 0007

《石质文物病害分类与图示》WW/T 0002

《砂岩质文物防风化材料保护效果评估方法》WW/T 0028

《馆藏砖石文物病害与图示》GB/T 30688

《馆藏砖石文物保护修复记录规范》GB/T 33289

《石质文物保护工程勘察规范》WW/T 0063

《可移动文物病害评估技术规程 石质文物》WW/T 0062

《不可移动石质文物保养维护规程》T/CSBZ 013

《文物建筑维修基本材料 石材》WW/T 0052

《中国文物古迹保护准则》

中国工程建设标准化协会标准

石质文物微生物保护性修复技术规程

**T/CECS XXX-202X**

# 条文说明

制定说明

本规程依据《2024年第二批协会标准制订、修订计划》（建标协字[2024]28号）的要求编写。

石质文物微生物保护性修复技术作为一种创新的文物保护科技手段，具有修复精准度高、材料兼容性强、干预程度低、以及环境友好性强、长期稳定性好等优势，相较于传统物理化学修复方法在全周期保护过程中可降低文物二次损伤风险。鉴于近年来石质文物微生物修复机理研究的突破性进展及保护实践需求的激增，为系统规范石质文物微生物保护性修复技术流程，整合最新研究成果，建立标准化操作规范，推动该技术的科学化应用与普及，本规范针对石质文物微生物修复的材料、病害勘察与取样、施工工艺要求及检测验收等关键环节分别作出了规定。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定，《石质文物微生物保护性修复技术规程》编制组按主要章、节、条顺序编制了本规范的条文说明。本条文说明不具备与标准正文及附录同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目次

1 总 则…………………………………………………………………………29

2 术语和符号………………………………………………………………………30

3 基本规定…………………………………………………………………………31

4 材 料…………………………………………………………………………33

5 其他说明…………………………………………………………………………35

**1 总则**

**1.0.1** 石质文物微生物保护性修复技术，契合石质文物修复“最小干预”“不引入异物”的特殊需求，正逐步成为石质文物保护的重要手段，为规范微生物加固技术在石质文物保护性修复中的应用，科学指导相关工程实施，做到安全适用、技术先进、确保质量、保护环境、经济合理，实现石质文物微生物保护性修复技术的推广应用，制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于微生物矿化修复石质文物的病害勘察、取样分析、微生物修复材料、工艺、检测与验收。

**1.0.3** 石质文物微生物保护性修复应用除应符合本规程规定外，尚应符合国家现行有关标准和现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

**2 术语和符号**

**2.0.1** 本文件第2章采用的术语符号及其含义，是根据下列原则确定的：

**1** 凡国家现行标准已规定的，一律加以引用，不再另行给出定义或说明；

**2**  凡国家现行标准尚未规定的，由本标准自行给出定义和说明；

**3**  当国家现行标准已有该术语及其说明，但未按准确的表达方式进行定义或定义所概括的内容不全时，由本标准完善其定义和说明。

**3 基本规定**

**3.0.1** 本文件第3.0.1条根据石质文物修复的核心管控要求，旨在确保修复工作的科学性、规范性与可追溯性。

**3.0.2** 本文件第3.0.2条中适用范围是在充分考虑可移动石质文物和不可移动石质文物的区别和共性后给出的，两类文物通常存在体量、保存环境的不同，但其病害本质均为岩石矿物结构受损，在材质分析、病害诊断、修复材料选择等核心技术环节具有共通性。微生物矿化修复技术具有操作灵活、环境适应性强的特点，具备在不同场景下的通用性。

**3.0.3** 本文件第3.0.3条重点强调石质文物修复工作必须摒弃单一因素考量，以系统性思维构建科学修复体系，旨在确保修复工作的科学性、精准性与长效性。

**3.0.4** 本文件第3.0.4条中真实性要求保留文物原始历史信息，以考古调查和科学检测为依据；最小干预强调按病害分级渐进修复，优先采用可逆手段；可识别性要求修复部分与原始文物在材质或视觉上形成区分；最大兼容性要求修复材料与技术需满足长期协同稳定。

**3.0.5** 本文件第3.0.5条规定了石质文物修复过程中使用的材料必须无毒无害，避免对文物造成二次损害，威胁人员健康、污染环境。

**3.0.6** 本文件第3.0.6条规定了文物修复的“可逆性”，要求修复材料易去除且不伤本体，是落实“最小干预”原则的关键。

**3.0.7** 本文件第3.0.7条主要遵循“材料兼容性”及“不改变文物原状”的原则，禁止使用含不可逆成分或色料的材料，确保文物原真性与历史信息完整，为修复工作提供科学指引。

**3.0.8** 本文件第3.0.8条旨在规避短期修复致文物反复受损风险，结合“最小干预” 工艺，确保修复效果长效稳定。

**3.0.9** 本文件第3.0.9条规定了技术人员经专业培训，掌握材料特性与修复技能，熟悉文物本体状况，保障修复专业性。

**3.0.10** 本文件第3.0.10条规定了及时收集修复资料，规范建档，留存文物原始信息与修复过程数据，为后续研究和维护提供依据。

**3.0.11** 本文件第3.0.11条考虑修复现场安全需求，需对文物本体、人员及周边环境采取防护措施，防止修复过程中机械碰撞、化学污染等意外损害。

**3.0.12** 本文件第3.0.12条中通过对文物本体、工艺及材料的跟踪监测，及时发现修复过程中材料兼容性、结构稳定性等问题，确保修复方案有效实施。

**3.0.13** 本文件第3.0.13条规定了历史修复材料的去留应从文物保存的安全性、艺术需求和历史价值等方面综合分析，重要材料去除后妥善保存，保留文物历史信息。

**3.0.14** 本文件第3.0.14条中微生物活性与密度直接影响修复效果及文物长期稳定性。量化检测微生物活性与密度，可确保修复过程中微生物作用可控。

**3.0.15** 本文件第3.0.15条规定了微生物材料在制备、储存及操作过程应满足的要求，微生物的质量直接影响微生物材料的有效性。在制备过程中，若环境未达无菌标准，易引入杂菌污染，导致微生物群落失衡，影响修复效果，甚至产生对文物有害的代谢产物；储存环节缺乏无菌环境，会加速微生物变异或失活，降低修复有效性。确保通风条件是为了规避微生物气溶胶扩散风险的关键，防止操作人员吸入有害微生物，同时避免代谢产生的有害气体。

**3.0.16** 本文件第3.0.16条规定了所用试剂和水的使用标准，避免因杂质引入对石质文物造成不可逆损害。

4 材料

**4.0.1** 本文件第4章中，给出了微生物材料、反应底物、石粉等材料的要求。

**4.1 微生物材料**

**4.1.1** 本文件第4.1.1条规定了微生物菌种的选择要求，主要遵循“不引入异物”原则，考虑其安全性、有效性。

**4.1.2** 本文件第4.1.2条中微生物筛选、分离、提纯和培养环节，严格遵循标准化无菌操作，是保障修复用微生物纯度与活性的必要前提。

**4.1.3** 本文件第4.1.3条主要结合实验室可能会用到的微生物培养基材料，给出了部分常用试剂。

**4.1.4** 本文件第4.1.4条主要结合实验室微生物培养经验给出。

**4.1.5** 本文件第4.1.5条规定了菌液活性和浓度等指标，基于实验总结得出微生物在该活性和浓度下最为适宜，可有效胶结、加固，保证微生物具备充足代谢能力，驱动碳酸盐沉淀等反应的同时，避免代谢不足或过度，造成效果不佳或文物孔隙堵塞。

**4.1.6** 本文件第4.1.5条主要考虑不同石质文物病害机理各异，修复目标也有区别，需针对性匹配微生物功能，如诱导碳酸盐沉淀能力强的菌种修复裂隙，耐盐微生物辅助脱盐等。选用最适宜一种或几种微生物，可避免盲目用菌导致的无效修复或过度干预，让微生物修复策略与文物病害精准适配，实现科学、高效的文物保护。

**4.2 反应底物**

**4.2.1** 本文件第4.2节主要结合实验室成果和现场应用经验总结，给出了常用的反应底物试剂和适宜的pH值。

**4.3 石粉**

**4.3.1** 本文件第4.3.1条~第4.3.2条根据文物保护修复“同质兼容”的理念，规定了石粉原材料的选择关键是与文物本体的岩性、理化性质相匹配，同时不应含有可能对文物本体造成损害以及抑制微生物活性的成分。

**4.3.2** 本文件第4.3.3~第4.3.5条规定了石粉的制作应健康环保、工艺合理且含水率低于1%。石粉含水率过高可能影响矿化反应的胶结，通常参与矿化的微生物为好氧菌，石粉含水率过高会挤占孔隙空间，减少氧气含量，抑制微生物呼吸与代谢，同时，低含水率有助于石粉与文物表面更好地贴合，使矿化形成的碳酸钙修复层紧密附着。

5 其他说明

**5.0.1** 本文件第5章中，给出了石质文物病害勘察和取样分析的常规方法和基本要求。按照一般规定、病害测量、取样分析三个部分分别提出相应要求。

**5.0.2** 本文件第6章中，给出了微生物修复材料的制备与施工要求。按照一般规定、微生物补配修复材料、微生物裂隙灌浆材料、微生物防风化加固材料及施工要求五个部分分别提出相应要求。

**5.0.3** 本文件第7章中，给出了微生物修复后的评估和建议，并就此两个部分分别提出相应要求。

**5.0.4** 附录A~附录D是在综合考虑实施过程中会涉及到的重要环节，其目的是便于实施人员记录留档使用。