



中华人民共和国文物保护行业标准

WW/T 0113—2023

古代壁画起甲病害修复技术规范

Technical specification for flaking restoration of ancient murals

2023-12-06 发布

2024-07-01 实施

国家文物局 发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 工作流程 1

5 黏结材料实验室评估 2

6 修复工艺及要求 3

7 现场试验 4

8 修复效果评估 5

附录 A（资料性） 敦煌莫高窟壁画起甲模拟试块制作方法 6

附录 B（资料性） 敦煌莫高窟壁画起甲病害模拟试验方法 7

附录 C（资料性） 敦煌莫高窟壁画起甲病害黏结材料老化试验方法 8

附录 D（规范性） 古代壁画起甲病害修复效果评估表 9

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。

本文件由国家文物局提出。

本文件由全国文物保护标准化技术委员会（SAC/TC 289）归口。

本文件起草单位：敦煌研究院。

本文件主要起草人：樊再轩、苏伯民、陈港泉、牛贺强、戴川、李燕飞、张化冰、李菱志、李璨。

浙江文旅标技委

古代壁画起甲病害修复技术规范

1 范围

本文件规定了古代壁画起甲病害的黏结材料实验室评估、修复工艺及要求、现场试验、修复效果评估。

本文件适用于石窟寺壁画、寺观殿堂壁画、墓室壁画及馆藏壁画起甲病害的修复。

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 2943 胶粘剂术语

GB/T 21650.2 压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度 第2部分：气体吸附法分析介孔和大孔

GB/T 30237 古代壁画病害与图示

WW/T 0006 古代壁画现状调查规范

3 术语和定义

GB/T 30237 和 GB/T 2943 界定的术语和定义以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

材料工作性能 working properties of material

黏结材料在使用过程中短期内所表现出的性能。

注：包括渗透性、水汽透过性、黏结性等。

3.2

材料表现性能 performance properties of material

黏结材料使用后的长期性能与行为。

注：包括耐久性、安全性、有效性等。

3.3

软化 softening

使起甲颜料层可塑性增强的过程。

4 工作流程

古代壁画起甲病害修复的工作流程，依次为黏结材料实验室评估、修复工艺及要求、现场试验、修复效果评估。

5 黏结材料实验室评估

5.1 壁画模拟试块制作

按照 WW/T 0006 中给出的方法对壁画制作材料及工艺进行分析，根据分析结果，采用与壁画相同或者相近的材料、工艺制作壁画模拟试块。

附录 A 以敦煌莫高窟壁画为例给出一种壁画模拟试块制作方法。

5.2 壁画起甲病害模拟试验

按照 WW/T 0006 中给出的方法进行环境调查及监测，根据壁画环境监测结果和病害机理，参照壁画赋存环境一年内的温度、相对湿度的极值和极值出现频率，设置加速老化试验条件，进行病害模拟试验。

附录 B 以敦煌莫高窟壁画为例提供一种壁画起甲病害模拟试验方法。

5.3 评估方法及指标

5.3.1 一般要求

材料应无毒、无腐蚀，耐老化性能较好，对文物本体不造成伤害，对环境不造成污染，且在老化后可再处理。

5.3.2 理化要求

5.3.2.1 pH

采用酸度计或精密 pH 试纸测试材料（实施浓度）的 pH，黏结材料的 pH 应在 6.5～7.5 之间。

5.3.2.2 接触反应

将材料滴渗到试块表面并进行观察，表面出现变色、气泡或溶蚀等现象，说明材料存在安全隐患。

5.3.2.3 色差值

用色度仪测量试块的色度值。试块经黏结材料修复前后色差值应小于或等于 3。

5.3.2.4 光泽度

用光泽度仪测量试块的光泽度。试块经黏结材料修复前后光泽度相差范围—2～2。

5.3.3 黏结材料工作性能评估及指标

5.3.3.1 概述

通过对不同浓度黏结材料进行测试，评估其工作性能。

5.3.3.2 评估指标

5.3.3.2.1 渗透性

用显微镜观察、测量黏结材料渗透深度，渗透深度不小于 2 mm。

5.3.3.2.2 水汽透过性

将黏结材料滴渗于试块表面，干燥后将试块用密封蜡密封于装有 50 mL~100 mL 蒸馏水的透湿杯内的槽台上，在恒温恒湿的环境中放置一周，每天称重，按照公式（1）计算水汽透过率。滴渗黏结材料前后水汽透过性不低于空白试块水汽透过性的 35%。

$$WVT = \Delta m / (V \times t) \dots\dots\dots (1)$$

式中：

WVT ——水汽透过率，单位为克每立方米小时（g/m³·h）；

Δm ——质量变化，单位为克（g）；

V ——试块体积，单位为立方米（m³）；

t ——水汽透过试验时间，单位为小时（h）。

注：空白试块指未经过黏结材料处理的试块。

5.3.3.2.3 孔隙率

按照 GB/T 21650.2 的方法进行检测。将材料滴渗在试块表面，对其加固前后进行孔隙检测。滴渗黏结材料前后孔隙率与空白试块相比减少不超过 30%。

5.3.3.2.4 黏结力

用黏结材料将试块两两黏结拉拔试验。一组试验为两个试块（Φ4.8 cm），一个涂颜料层，一个不涂颜料层。将 5 mL 的黏结材料，分 2 次~3 次，连续均匀滴渗在试块模具表面，将试块两两黏结，干燥后在万能材料试验机上进行拉拔试验，测试黏结力。黏结力应在 0.025 MPa~0.116 MPa 之间。

5.3.4 老化试验及黏结材料表现性能评估

5.3.4.1 人工老化试验

人工老化试验包括湿热老化试验、可溶盐老化试验、紫外光老化试验等，通过观察、对比老化过程中试块相对空白试块发生的变化情况以及病害出现时间和严重程度，对黏结材料的表现性能进行评估。参照壁画赋存环境一年内的温度、相对湿度的极值和极值出现频率，设置人工老化试验条件。附录 C 以莫高窟壁画起甲病害黏结材料为例给出一种老化试验方法。

5.3.4.2 自然老化试验

将试块放置于壁画赋存环境中，测试在光照、温度、相对湿度等多种因素影响下，材料性能发生变化的规律。试验期宜不少于三年，应不少于一年。

6 修复工艺及要求

6.1 清洁画面

壁画上有尘土、细沙等污染物时，应用洗耳球将翘起颜料层背后的尘土或细沙清理干净，并用软毛刷将壁画表面的尘土清除干净。当壁画颜料层非常脆弱、颜料层甲片悬浮时，应控制清洁力度，并使用贴纸或低浓度黏结材料对颜料层进行预加固。

6.2 加固地仗层

颜料层起甲区域的地仗层处于酥碱、疏松、易脱落的状态时，应对地仗层进行加固处理。用 7

号针头（外径 0.7 mm）的注射器将低浓度的黏结材料滴渗在起甲颜料层底部疏松的地仗层上进行加固。加固时应少量多次，根据地仗疏松的程度，滴渗次数宜为 2 次~4 次。黏结材料引入工具除注射器外，也可使用滴管、毛笔等。

6.3 软化处理

起甲颜料层较为坚硬或带有表面涂层，加固前应做软化处理。软化处理方式有：用去离子水、乙醇溶液、丙三醇溶液等进行软化；用电热修复刀、蒸汽修复笔等工具进行软化。

6.4 加固颜料层

用 7 号针头（外径 0.7 mm）的注射器将黏结材料从裂缝和起甲裂口处滴渗到起甲颜料层背部。加固过程中避免壁画表面留下胶痕、眩光。根据颜料层起甲的严重程度和颜料层的厚度，滴渗次数宜为 2 次~4 次。对颜料层泡状起甲且表面无裂纹的壁画，需在泡状颜料层侧面用 6 号针头（外径 0.6 mm）开孔，以便黏结剂注射到颜料层背部。若泡状颜料层较厚或者较脆，开孔前应再次进行软化处理。黏结材料引入工具除注射器外，也可使用滴管、毛笔等。

6.5 回贴颜料层

黏结材料被颜料层和地仗层吸收后，用垫有棉纸的修复工具轻压平裂口处，使裂缝闭合，用修复工具均匀按压其他位置，使起甲颜料层回贴于地仗表面。回贴时按压力度应均匀，避免在颜料层、地仗过于湿胀的时候按压而损伤壁画或留下按压痕迹。

6.6 滚压颜料层

颜料层回贴后，在颜料层表面敷贴棉纸，用纺绸包裹医用脱脂棉制成的棉球进行滚压，使颜料层与地仗层充分黏结。滚压时应控制方向和力度，从颜料层未裂口处向开裂处滚压，避免褶皱和气泡产生，保持壁画表面平整。

6.7 表面加固

在颜料层起甲区域滴渗黏结材料进行加固处理。颜料层表面应无眩光、胶痕，且与周围未起甲壁画画面协调。

7 现场试验

7.1 试验环境

壁画起甲病害修复的试验环境应符合下列要求：

- a) 壁画表面温度不低于 12℃，壁画所处环境相对湿度不超过 80%；
- b) 露天壁画起甲病害修复的现场试验应选择晴天，并做好防风、防雨等措施；
- c) 不存在扬尘、高湿、高温、强烈光线照射等问题。

7.2 修复试验

用实验室筛选出的黏结材料在壁画保护现场进行试验，以验证黏结材料的可行性、修复工艺的可操作性，并对修复效果进行评估。

8 修复效果评估

8.1 评估内容

评估内容包括画面整体协调性、表面清洁效果、修复痕迹、颜料层缺失情况、回贴程度、画面层位状况等。按照表 D.1 中的要素进行评估。

8.2 评估方法

8.2.1 裸眼观察法

对修复后画面的整体协调性、表面清洁效果、修复痕迹、颜料层缺失情况等 进行观察。观察时可在侧光下进行，并辅 以修复前后照片对比。

8.2.2 显微镜观察法

用 5 倍~10 倍显微镜观察颜料甲片的合缝状况、颜料层与地仗层的黏结状况、颜料层层位状况和颜料颗粒分布状况。

8.2.3 紫外光检测观察法

用 (365±20) nm 紫外光灯观察黏结材料在壁画表面有无胶痕。

8.3 等级划分

8.3.1 不合格

裸眼可见修复后壁画画面有灰尘污渍、修复工具按压痕迹、表面整体不协调以及颜料层缺失比例超过起甲壁画修复总面积的 1‰、单片颜料甲片缺失面积超过 0.25 cm² 其中任一状况，均判定为不合格。

注：在图像扫描仪或照相机对壁画进行 1：1 信息采集的基础上，将图片导入制图软件，缩放到实际大小，绘制 1：1 矢量图，计算起甲病害修复前后的颜料层缺失比例和单片颜料甲片缺失面积。

8.3.2 合格

裸眼观察未出现灰尘污渍、修复工具按压痕迹、表面整体不协调以及颜料层缺失比例不超过起甲壁画修复总面积的 1‰、单片颜料甲片缺失面积不超过 0.25 cm² 的状况，判定为合格。

8.3.3 优良

在显微镜下观察颜料甲片的合缝紧密自然，颜料层与地仗层紧密黏结，颜料层层位关系未扰乱，颜料颗粒分布均匀，且在紫外光下壁画表面未出现胶痕，判定为优良。

附录 A
(资料性)
敦煌莫高窟壁画起甲模拟试块制作方法

A.1 规格

试块直径约 9 cm，厚度约 1.2 cm，质量约 100 g。

A.2 制作材料

黏土和沙质量比为 3 : 1，加入质量为黏土和沙总重 3% 的麻纤维。其中黏土粒径小于等于 0.075 μm ，沙粒粒径小于等于 150 μm ，麻纤维直径小于等于 80 μm ，长约 10 mm。黏土、沙和麻纤维均经脱盐处理。

A.3 制作方法

将黏土、沙和麻纤维混合均匀后与去离子水按照 4 : 1 的质量比例混合，充分搅拌后涂抹于模具中，在室温下自然干燥，避免阳光照射。用质量分数为 5% 的明胶溶液调和方解石粉均匀涂刷在试块表面作为底色层，干燥后用相同方法在底色层上涂刷所修复壁画的主要颜料，形成彼此平行的色带，见图 A.1。

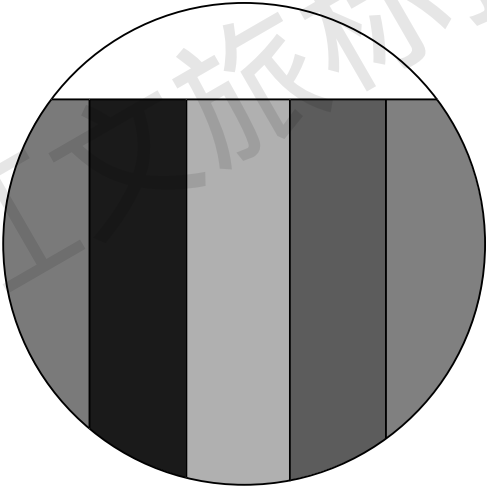


图 A.1 壁画起甲模拟试块

附录 B
(资料性)
敦煌莫高窟壁画起甲病害模拟试验方法

表 B.1 以敦煌莫高窟壁画为例提供一种壁画起甲病害模拟试验方法。

表 B.1 敦煌莫高窟壁画起甲病害模拟试验方法

试验方法	设备	试验步骤	备注
湿热老化试验	恒湿恒温箱	a) 试块置于温度 $(55\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $(25\pm 2)\%$ 的恒湿恒温箱内，保持 6 h； b) 试块置于温度 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $(80\pm 2)\%$ 的恒湿恒温箱内，保持 6 h； c) 完成 a)～b) 步骤为一个循环，多次循环直至试块出现颜料起翘、龟裂、起泡等现象为止，并以照片和文字的形式记录	恒湿恒温箱：温湿度程序控制调节
紫外光老化试验	干燥箱、紫外线老化箱	a) 试块置于 $(60\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的干燥箱内，干燥 24 h； b) 试块置于温度 $(45\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $(50\pm 2)\%$ 的紫外老化箱内，照射 100 h； c) 完成 a)～b) 步骤为一个循环，多次循环直至试块出现颜料起翘、龟裂、起泡等现象为止，并以照片和文字的形式记录	a) 干燥箱：温度可控制在 $(60\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 范围内； b) 紫外线老化箱：装有辐照度为 $350\text{ W}/\text{m}^2$ 氙灯的老化箱，灯管与箱体平行，试块与灯管的距离为 500 mm，紫外线辐射波长控制在 $350\text{ nm}\sim 450\text{ nm}$
混合老化试验 (紫外光老化+ 湿热老化)	干燥箱、紫外线老化箱、 恒湿恒温箱	a) 试块置于 $(60\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的干燥箱内，干燥 24 h； b) 试块置于温度 $(45\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $(50\pm 2)\%$ 的紫外老化箱内，照射 48 h； c) 试块置于温度 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $(80\pm 2)\%$ 的恒湿恒温箱内，保持 24 h； d) 完成 a)～c) 步骤为一个循环，多次循环直至试块出现颜料起翘、龟裂、起泡等现象为止，并以照片和文字的形式记录	a) 干燥箱：温度可控制在 $(60\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 范围内； b) 紫外线老化箱：装有辐照度为 $350\text{ W}/\text{m}^2$ 氙灯的老化箱，灯管与箱体平行，试块与灯管的距离为 500 mm，紫外线辐射波长控制在 $350\text{ nm}\sim 450\text{ nm}$ ； c) 恒湿恒温箱：温湿度程序控制调节
模拟壁画起甲病害试验任选上述之一，在试验条件允许的情况下，推荐混合老化试验			

附录 C
(资料性)
敦煌莫高窟壁画起甲病害黏结材料老化试验方法

表 C.1 以敦煌莫高窟壁画为例提供一种壁画起甲病害黏结材料老化试验方法。

表 C.1 敦煌莫高窟壁画起甲病害黏结材料老化试验方法

试验方法	设备	试验步骤	备注
湿热老化试验	恒湿恒温箱	a) 试块置于温度 $(55 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $(25 \pm 2)\%$ 的恒湿恒温箱内，保持 6 h； b) 试块置于温度 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $(80 \pm 2)\%$ 的恒湿恒温箱内，保持 6 h； c) 完成 a)～b) 步骤为一个循环，循环次数不少于 120 次； d) 每次循环后取出试块，观察试块表面是否有裂纹、起甲、粉化、脱落等现象，并以照片和文字的形式记录	恒湿恒温箱：温湿度程序控制调节
可溶盐老化试验	恒温恒湿箱、天平	a) 试块置于温度 $(35 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $(30 \pm 2)\%$ 的恒温恒湿箱内，保持 6 h； b) 试块置于温度 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $(80 \pm 2)\%$ 的恒温恒湿箱内，保持 6 h； c) 完成 a)～b) 步骤为一个循环，循环次数不少于 80 次； d) 每次循环后取出试块，观察试块表面是否有裂纹、疱疹、酥碱、粉化、盐霜、脱落等现象，并以照片和文字的形式记录	a) 恒温恒湿箱：温湿度程序控制调节； b) 天平：称重 500 g 以上，灵敏度 0.1 mg； c) 可溶盐老化试块制作时加入 1% 硫酸钠
紫外光老化试验	干燥箱、紫外线老化箱	a) 试块置于 $(60 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 的干燥箱内，干燥 24 h； b) 试块置于温度 $(45 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 $(50 \pm 2)\%$ 的紫外老化箱内，照射 100 h 为一个循环，循环次数不少于 6 次； c) 每次循环后取出试块，观察试块表面是否有裂纹、起甲、粉化、变色等现象，并以照片和文字的形式记录	a) 干燥箱：温度可控制在 $(60 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 范围内； b) 紫外线老化箱：装有辐照度为 $350\text{ W}/\text{m}^2$ 氙灯的老化箱，灯管与箱体平行，试块与灯管的距离为 500 mm，紫外线辐射波长控制在 350 nm～450 nm
自然老化试验		将试块放置于与壁画赋存环境中，测试试块在光、温度、相对湿度等因素的影响下，材料性能发生变化的规律，并以照片和文字的形式记录	试验期宜不少于 3 年，最短应不少于 1 年。在试验条件允许的情况下，可长期监测与评估

附录 D
(规范性)
古代壁画起甲病害修复效果评估表

表 D.1 规定了古代壁画起甲病害修复效果评估所包含的要素。

表 D.1 古代壁画起甲病害修复效果评估表

项目名称：

编号：

裸眼观察 评估	画面整体	协调与否		协调 ☐ 不协调 ☐
	表面清洁效果	灰尘、污染物等		有 ☐ 无 ☐
	修复痕迹	压痕		有 ☐ 无 ☐
	颜料层缺失情况	缺失比例超过起甲壁画 修复总面积的 1‰		是 ☐ 否 ☐
		单片颜料甲片缺失面积超过 0.25 cm ²		是 ☐ 否 ☐
仪器检测 评估	修复痕迹	胶痕		有 ☐ 无 ☐
	回贴程度	颜料甲片合缝状况		自然 ☐ 不自然 ☐
		颜料层与地仗层的黏结状况		有效黏结 ☐ 无效黏结 ☐
	画面状况	绘画颜料层层位状况		扰乱 ☐ 无扰乱 ☐
		颜料颗粒分布状况		均匀 ☐ 不均匀 ☐
评估结果	不合格 ☐ 合格 ☐ 优良 ☐			
评估意见				
评估人	(签字) 日期： 年 月 日		评估单位	(盖章) 日期： 年 月 日
校核人	(签字) 日期： 年 月 日			