

# 莫高窟第245窟裂隙渗水对壁画产生的病害破坏研究

牛贺强<sup>1,2</sup> 王丽琴<sup>3</sup> 郭青林<sup>1,2</sup>

(1. 敦煌研究院, 甘肃敦煌, 736200; 2. 国家古代壁画保护工程技术研究中心, 甘肃敦煌, 736200; 3. 西北大学文化遗产学院, 陕西西安, 710069)

**摘要** 本文通过对第245窟壁画的制作材料、工艺及易溶盐含量等分析, 根据分析结果制作与原壁画基本相同的实验试块, 依据东壁壁画病害形成原因设计壁画病害模拟实验, 在实验循环过程中壁画试块出现不同的现象和病害, 如颜料层开裂、泡状起甲、起甲、脱落、带状或球形疱疹、疱疹状脱落、酥碱、裂缝、片状或锥形盐壳等多种病害, 通过观察裂隙渗水实验产生不同病害和变化现象, 验证渗水对壁画产生的病害以及破坏作用。

**关键词** 壁画 盐害 裂隙渗水 模拟实验

## 引言

莫高窟第245窟位于莫高窟南区中段二层, 营建于沙州回鹘时期。第245窟为沙州回鹘时期的代表洞窟, 壁画中出现回鹘文化艺术特有的编织纹佛光图案、三珠火焰纹、波状云头纹卷草边饰等装饰纹样, 以及独具特点的回鹘族男女供养人画像等沙州回鹘艺术形象, 在回鹘研究、宗教美术表现形式、传统中国画技法与材料、佛教艺术发展研究等方面具有丰富的史料价值<sup>[1-3]</sup>, 其建筑装饰纹样、着装服饰等方面提供的科学资料, 在莫高窟同时期的洞窟中, 表现出不可替代的历史、艺术与科学价值。

第245窟位于中层, 因前部洞身外伸, 降水沿地震后产生的裂隙和洞窟开凿产生的裂隙入渗, 使地层中的盐分发生溶解和运移, 造成洞内局部壁画酥碱<sup>[4]</sup>, 见图1。莫高窟壁画因降雨沿地震后产生的裂隙进入壁画, 溶解了岩体中大量盐分, 并带入壁画结构中, 导致洞窟内部分壁画产生酥



图1 第245窟东壁壁画酥碱、空鼓、盐壳病害

碱<sup>[4-7]</sup>、空鼓、疱疹<sup>[8]</sup>等病害(图1)。本文根据第245窟壁画制作材料和工艺分析、地仗含盐量分析结果,设计裂隙渗水对壁画产生病害的模拟实验,观察裂隙渗水对壁画产生的破坏现象和病害情况。

## 1 壁画制作材料及工艺分析

### 1.1 壁画颜料分析

利用X射线衍射仪对取自第245窟的6个粉末状颜料样品进行物相分析,分析仪器为日本理学电机Dmax/2500衍射仪,测试条件为:管压40kV,管流100mA,采用连续扫描,扫描范围 $5^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 。第245窟壁画颜料XRD物相分析结果见表1。

表1 第245窟壁画颜料XRD物相分析结果

样品编号	颜色	主要物相	显色物相	显色物相化学式
M245WN02	白色	氯铅矿、硬石膏、生石膏	氯铅矿、硬石膏、生石膏	$PbCl_2$ 、 $CaSO_4$ $CaSO_4 \cdot 2H_2O$
M245WN03	绿色	生石膏、硬石膏、石英、氯铜矿	氯铜矿	$Cu_2Cl(OH)_3$
M245WS06	灰色	生石膏、石英、方解石、白云母、绿泥石	生石膏	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
M245WS07	棕色	石英、生石膏、硬石膏、方解石、绿泥石、白云母、块黑铅矿	块黑铅矿	$PbO_2$
M245WE09	白色	生石膏、硬石膏、石英	生石膏、硬石膏	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 、 $CaSO_4$
M245WN16	肉色	硬石膏、氯铅矿、石英、生石膏	—	—

莫高窟第245窟壁画颜料XRD物相分析结果表明,壁画均使用传统矿物颜料,大面积的白色底色层主要使用石膏类材料,也有少量石英,菩萨面部白色颜料为氯铅矿,绿色颜料为氯铜矿,主尊佛华盖区域棕色颜料为二氧化铅,灰色与肉色颜料未发现显色物质。第245窟壁画中部分红色铅颜料产生了变色现象,由铅丹变为二氧化铅。

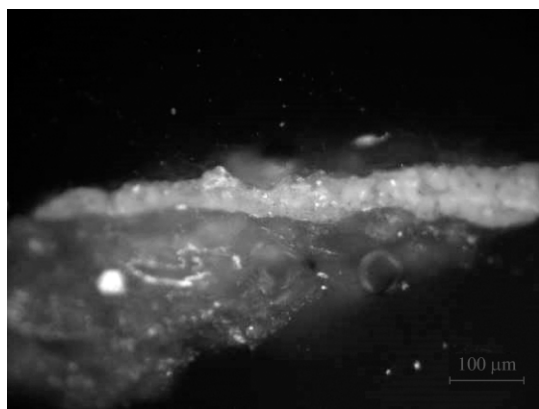


图2 莫高窟第245窟壁画颜料层显微镜剖面图

根据第245窟壁画6个颜料样品以及剖面样品的分析结果得知,壁画颜料层的绘画材料是:铅丹、二氧化铅、蓝铜矿、氯铜矿、赤铁矿、石膏等,均为传统无机矿物颜料。第245窟的壁画颜料较单一,主要有白色、红色、绿色、蓝色四种。对掉落的颜料层碎片作剖面分析,壁画绘画层较薄,厚度为 $10 \sim 50 \mu m$ ,第245窟壁画蓝色颜料剖面形貌见图2。

## 1.2 壁画地仗分析

### 1.2.1 壁画地仗样品的XRD物相分析

壁画地仗样品来源：第245窟甬道西壁下边缘及甬道北壁下边缘处地仗。分析仪器为理学电机Dmax/2500衍射仪，测试条件为：管压40kV，管流100mA，采用连续扫描，扫描范围 $3^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 。地仗样品XRD图谱见图3。

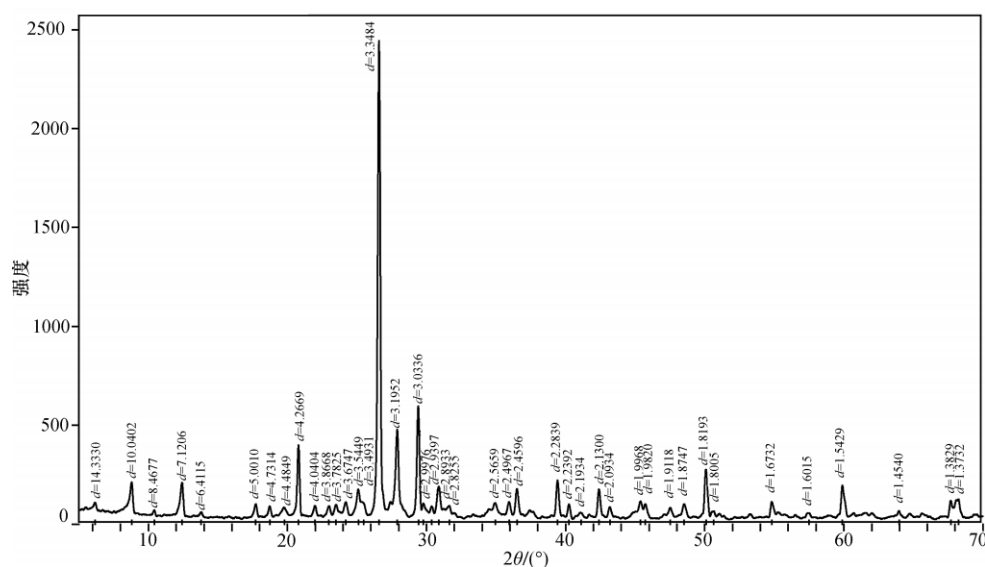


图3 第245窟地仗样品的XRD图谱

分析结果表明，地仗样品物相主要为石英、方解石、钠长石、白云母、绿泥石和白云石。

### 1.2.2 地仗颗粒粒径分析

采用注射进样型粒度分析仪AccuSizer 780粒度仪对第245窟地仗样品进行颗粒分析，采用的传感器为LE400-0.5。样品处理说明：取土样0.0569g，加入去离子水40.7614g，摇匀静置24h后测量。实验进样量为0.05mL，运行60s。

AccuSizer 780粒度仪受检测限（0.57）影响，将分析的数据绘制成粒径频率曲线，见图4。从粒径分析曲线和分析结果得出，单峰（mode，亦称众数）为 $0.6\mu\text{m}$ ，以黏粒（小于 $5\mu\text{m}$ ）为主，不含黏粒，地仗样品的颗粒组成与莫高窟窟前宕泉河床的沉积粉土（敦煌称为澄板土，粒径众数为 $1.6\mu\text{m}$ ，见图5）接近，这种粉土粒度很细，一般都在 $0.05 \sim 0.001\text{mm}$ ，作为地仗材料，这类地仗的特点是密度大，强度高，表面平整度好，易于作画。

纤维含量分析方法为：取M245WE11样品若干，称重，用带橡胶头的研棒研磨，将筛出的植物纤维称重，得出麻纤维含量约占地仗的2.5%。

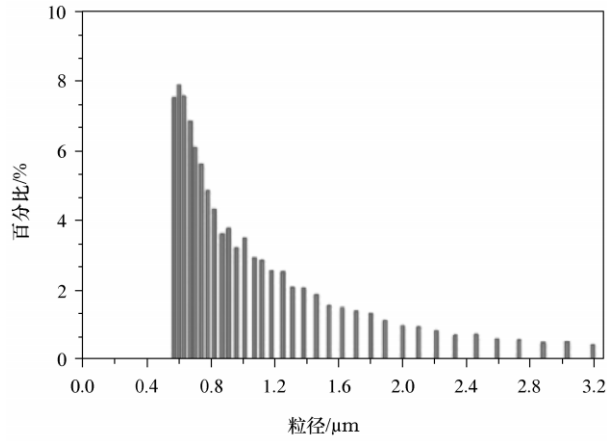


图4 第245窟地仗样品粒径分析图

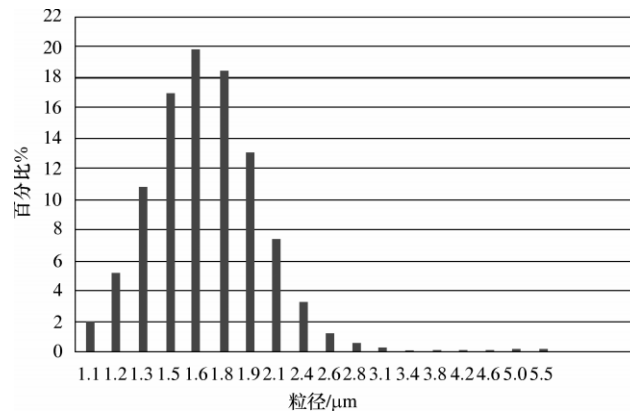


图5 当地澄板土粒径分析图

### 1.2.3 地仗易溶盐分析

对取自第245窟的5个土样进行易溶盐含量的测定。方法如下：在实验室将烘干的土样浸泡于去离子水中，严格控制水土比为5：1，在超声振荡器上振荡3min。采用注射针头过滤器（孔径0.45μm）过滤上部清液，利用戴安ICS-90睿智型离子色谱仪对清液进行分析，分析条件见表2。根据土样浸泡处理时的固液比，对仪器分析结果进行计算。为方便使用，土样中的离子含量用百分比表示，分析结果见表3。

表2 阴阳离子分析条件

名称	阳离子	阴离子
分析柱	CS12A	AS14
淋洗液	20mmMSA（甲烷磺酸）	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> （3.5mm）/NaHCO <sub>3</sub> （1.0mm）
淋洗液速度	1.0mL/min	1.2mL/min
系统压力	1320psi	1219psi
抑制电流	59mA	24mA

表3 第245窟壁画地仗可溶盐分析结果

样品编号	各种离子含量/%							总盐量/%
	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	
M245WW10	0.2793	0.0666	0.2334	0.2180	0.0257	0.0104	0.0749	0.9084
M245WE11	19.3847	3.1790	2.8502	13.7495	0.6622	0.0990	0.2679	40.1925
M245WN12	0.6162	0.0621	0.3326	0.4557	0.0234	0.0041	0.0466	1.5406
M245WN13	0.6537	0.0672	0.3464	0.5960	0.0331	0.0202	0.1247	1.8414
M245WE14	0.8189	0.2001	2.1250	0.9796	0.0823	0.0615	0.7553	5.0228

通过对地仗可溶盐的离子色谱数据分析发现,莫高窟第245窟壁画地仗可溶盐阴离子以Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>为主,含有少量的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>,阳离子以Na<sup>+</sup>为主,同时含有少量的Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>。从整体来看,第245窟易溶盐含量较高,大部分样品的可溶盐含量在1%以上,东壁壁画病害区域易溶盐含量超过40%,是正常壁画含盐量的几十倍,故推测此盐分必为进入壁画结构中不断累积的外来盐分。外来盐分进入洞窟必须借助水的作用,这与张明泉、张虎元、曾正中等在《莫高窟壁画酥碱病害产生机理》<sup>[4]</sup>中阐述到莫高窟第245窟位于崖体中层,因前部洞身外伸,降雨雨水沿地震后产生的裂隙和洞窟开凿产生的裂隙入渗,使地层中的盐分发生溶解和运移,造成洞内局部壁画酥碱,并认为决定壁画酥碱发生发展的主要因素是水的来源和地层的透水性,对莫高窟壁画来说,无水则安,有水则患。因此,开展裂隙渗水对壁画病害的研究颇具意义。莫高窟第245窟因窟顶部裂隙渗水导致洞窟内壁画产生酥碱、盐壳病害,见图6。



图6 第245窟北壁壁画酥碱、盐壳病害

## 2 实验部分

### 2.1 壁画试块制作

壁画试块的支撑体为两片厚度基本相同的砂砾岩片石,采集于莫高窟南侧大泉河防洪工程两侧刷除的岩体,将两块砂砾岩片石之间预留2cm宽间隙,固定于竹胶板上,澄板土和沙重量比为3:1,加入3%麻(以100g沙土中加入3g麻计)和制成的泥抹在片石支撑体上。试块制作材料见图7,实验试块长约35cm,宽约25cm。试块干燥后,用方解石粉和5%明胶涂于表面作底色层,并在底色层上绘制石青、石绿、朱砂、雌黄等矿物颜料。壁画试块中黏土含量为1500g,沙500g,加入麻纤维60g。

### 2.2 实验条件

在裂隙渗水实验中,窟顶岩体内含盐量、雨水渗透量及盐分溶解量均为未知数,未能测出崖体入渗裂隙水的实际浓度,故本次实验模拟裂隙渗水对壁画产生病害情况,采用浓度为0.5%、1%、

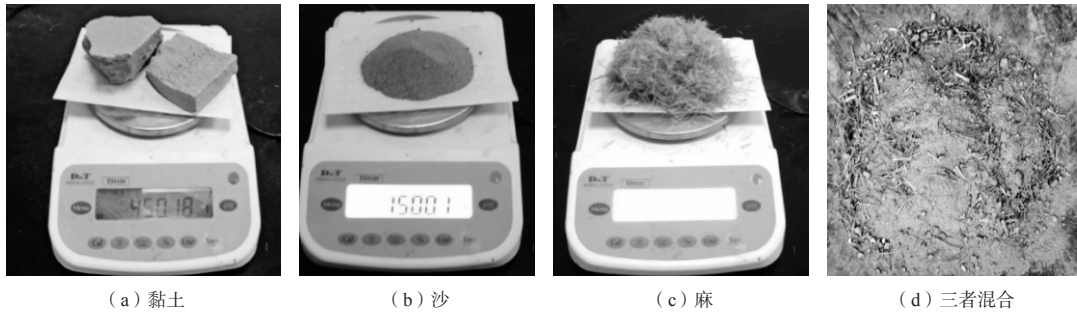


图7 实验试块制作材料

1.5%混合盐水进行实验模拟。对东壁壁画M245WE11地仗样品中可溶盐含量经过成盐计算<sup>[9]</sup>得知，地仗样品中主要盐分为NaCl和Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>，其中100g地仗样品中NaCl质量为31.93g，Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>质量为4.86g，这两种混合盐的质量比约为6.57 : 1。

实验模拟条件：按照莫高窟壁画制作材料和工艺制作三个实验试块，干燥后在三个试块背部裂隙处用注射器分别注射浓度为0.5%、1%、1.5%混合盐水15mL，将实验试块放置于恒温恒湿箱中在温度25℃、相对湿度25%条件下3h后，置入温度25℃、相对湿度75%条件下3h，每一次循环后，向三个试块a、b、c背部裂隙处分别注射浓度为0.5%、1%、1.5%混合盐水15mL，模拟洞窟中裂隙渗水对壁画的影响和产生的病害，实验试块及循环情况见图8，实验试块渗水模型见图9。

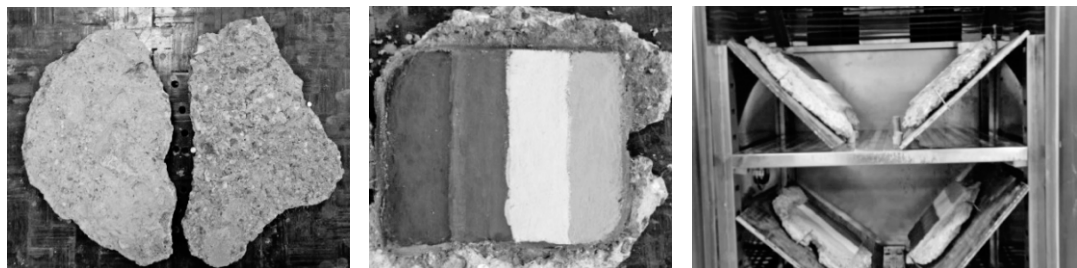


图8 实验试块砂砾岩石支撑体、制成试块、恒温恒湿箱循环

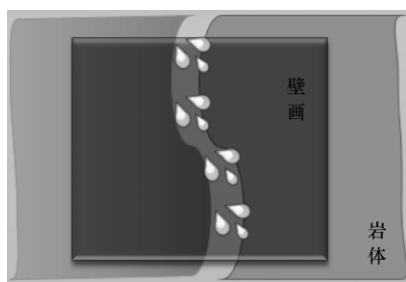


图9 实验试块渗水模型

### 2.3 实验结果

壁画试块a在经过200次实验循环（入渗盐分约15g）后，表面小裂纹和凸起较多，绿色颜料表面两处凸起部位开裂，开裂缝较长，棕色颜料有三处微小皱褶，大多棕色颜料出现粉末颗粒状。试块a经过400次循环（入渗盐分约30g混合盐）后，试块整体疏松，膨胀凸起变厚，试块表面不同程度凸起变形严重，蓝色、绿色和棕色颜料层开裂起翘严重，为片状起甲，绿色颜料表面凸起较多，整体地仗酥碱严重以至于在背部渗水、试块倾斜75°时，部分起甲的棕色颜料因地仗酥碱丧失与地仗黏接力而掉落成碎片，从脱落处可见其地仗酥碱严重，地仗均为已酥松的粉土颗粒，地仗中细麻纤维部分已

糟朽，若试块稍有倾斜，其表面的地仗颗粒将会随之掉落。试块a在循环过程中变化状况见图10。

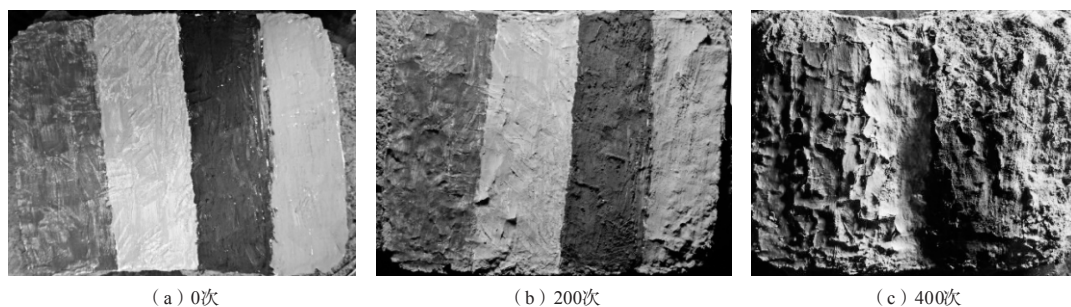


图10 试块a实验循环过程中变化状况

壁画试块b在经过200次循环（入渗约30g混合盐）后，表面凸起较多，主要分布于片石两侧背部裂隙渗水时流向部位，中间部位布满小裂纹和微小颗粒，出现泡状起甲、球形疱疹、带状疱疹病害，棕色颜料层上有粉末状微小泡堆积；经过400次循环（入渗约60g混合盐）后，试块b整体形变较严重，表面布满大小不等的凸起，部分凸起为颜料层起甲，部分凸起为地仗连带颜料层共同凸起，表面颜料为整片盐壳，盐壳呈锥形立体结构，大多盐壳锥形顶部开裂，其中绿色颜料处较严重，试块b在循环过程中变化状况见图11。

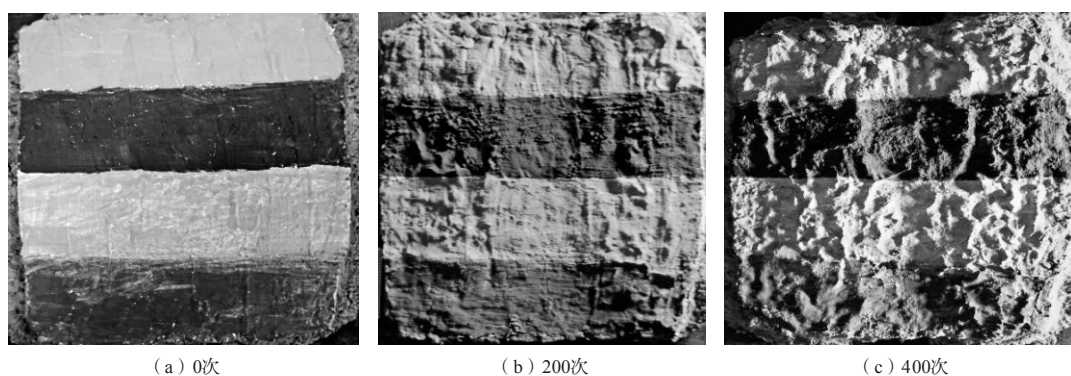


图11 试块b在循环过程中变化状况

壁画试块c在经过200个实验循环（入渗约45g混合盐）后，表面有较多凸起，整体颜料粉化严重，中间绿色颜料粉末颗粒较多，棕色颜料表面有较多的微小疱疹颗粒，部分为疱疹状脱落，蓝色和黄色颜料凸起部位开裂较多，棕色、绿色和蓝色颜料起翘卷曲严重，部分较小的甲片已脱落。经过400次循环（入渗约90g混合盐）后，绿色颜料上出现微小疱疹颗粒和盐颗粒，被疱疹顶起的颜料为粉末状，黄色和蓝色颜料层卷曲起翘、开裂，为片状起甲，裂缝和凸起较多，棕色颜料起翘卷曲和泡状凸起较为严重，棕色颜料出现坚硬的堆积凸起，成为锥形盐壳，部分凸起顶部周围呈粉末状土颗粒，表现为盐壳和酥碱病害共同作用，试块c在循环过程中变化状况见图12。

## 2.4 实验结论

实验现象和结果表明，多次少量渗入的混合盐水可导致壁画产生颜料粉化、裂缝、脱落、疱

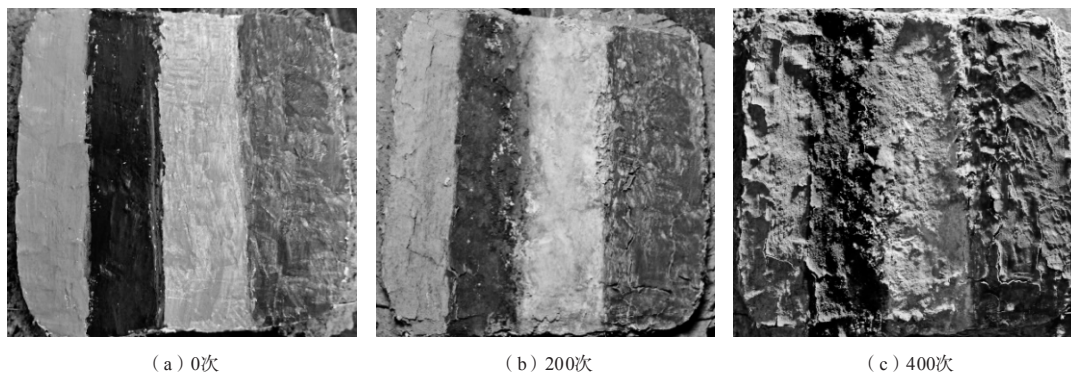


图12 试块c在循环过程中变化状况

疹、疱疹状脱落、起甲、酥碱、盐壳等病害。在实验过程中，壁画试块依次出现不同的现象和病害，最初壁画表面出现小裂纹、凸起疱疹、粉化、泡状起甲、疱疹状脱落、起甲，直到后期整个地仗酥碱，在不断渗入过程中出现盐壳现象，对壁画产生极大的破坏作用。

### 3 结 论

(1) 莫高窟第245窟壁画颜料层的绘画材料均为传统矿物颜料，绘画层均较薄，厚度为 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 。壁画底色层厚度范围为 $50 \sim 150 \mu\text{m}$ ，材质为石膏。地仗层主要由黏土颗粒组成，与敦煌当地澄板土颗粒组成类似，地仗中麻纤维含量为2.5%。根据壁画制作材料分析，如矿物颜料、地仗土物相和粒径，以及结合壁画样品的绘画层厚度、细泥层厚度和剖面结构等，得出第245窟表层壁画制作材料和工艺基本一致。

(2) 对地仗样品可溶盐进行分析，第245窟壁画地仗含盐量整体较高，含盐量均在1%以上，盐离子以 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 为主，东壁酥碱空鼓复合病害区域含盐量达40%，比较其他地仗样品含盐量，调查莫高窟地仗样品分析记录得知，为外来盐分进入壁画结构中，外来盐分的迁移进入壁画的过程是导致东北角壁画产生病害的主要原因。

(3) 通过模拟实验得知，少量的低浓度混合盐水长期入渗产生的壁画颜料开裂、粉化、疱疹、起甲、颜料脱落、盐壳、地仗酥碱等多种复合病害足以破坏壁画结构，少量高浓度的混合盐水长期入渗壁画，产生颜料粉化、疱疹、疱疹状脱落、起甲、地仗酥碱和盐壳等多种复合病害，对壁画产生极大的破坏作用。

### 4 存在的问题

裂隙渗水实验中，混合盐水从壁画试块背部裂隙处渗入时，盐水的渗透方向无法控制，同时裂隙渗水后水汽盐分运移方向与洞窟内实际裂隙渗水相比存在很大的误差，洞窟内实际渗水过程中水分的运移受相关动力学影响具有潜在的方向性，且模拟实验中温湿度老化条件未能代表洞窟内实际温湿度场，老化实验中温湿度起加快实验速率的作用，只能进行破坏现象观察，如何精确解释第245窟内裂隙渗水对壁画的破坏作用，从微观角度把握水盐渗水作用对壁画产生病害变化，还需要展开进一步的研究。



## 参 考 文 献

- [ 1 ] 敦煌研究院, 甘肃省文物局. 甘肃石窟志 [M]. 兰州: 甘肃教育出版社, 2011: 12.
- [ 2 ] 敦煌研究院. 讲解莫高窟 [M]. 杭州: 浙江文艺出版社, 2006.
- [ 3 ] 敦煌文物研究所. 敦煌莫高窟内容总录 [M]. 北京: 文物出版社, 1982.
- [ 4 ] 张明泉, 张虎元, 曾正中, 等. 莫高窟壁画酥碱病害产生机理 [J]. 兰州大学学报, 1995, (1): 96-101.
- [ 5 ] 郭宏, 段修业, 李军. 莫高窟53窟壁画酥碱病害原因的初步研究 [J]. 敦煌研究, 1992, (3): 73-85, 129-140.
- [ 6 ] 郭宏, 李最雄, 裘元勋, 等. 敦煌莫高窟壁画酥碱病害机理研究之三 [J]. 敦煌研究, 1999, (3): 153-175.
- [ 7 ] 陈港泉. 敦煌莫高窟壁画盐害分析及治理研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [ 8 ] 陈港泉. 引起莫高窟第351窟壁画疱疹病害发生的水分来源分析及疱疹病害初步模拟试验 [J]. 敦煌研究, 2010, (6): 54-58.
- [ 9 ] 靳治良, 陈港泉, 夏寅, 等. 硫酸盐与氯化物对壁画的破坏性对比研究——硫酸钠超强的穿透、迁移及结晶破坏力证据 [J]. 文物保护与考古科学, 2015, (1): 29-38.