

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.111



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



封护材料对千手观音金箔表面易脆毛霉菌 生理代谢及腐蚀作用的影响

贺婧¹, 蔡亮¹, 蒋思维², 冯雪梅², 杨豪¹, 赵岗², 郭劲松¹

(1. 重庆大学环境与生态学院, 重庆 400045; 2. 大足石刻研究院, 重庆 402360)

摘要:大足石刻千手观音造像是宋代石窟艺术的代表作品之一。该造像虽于 2015 年完成修复, 后却因保存环境未得到有效改善而面临局部金箔起翘、开裂及微生物侵蚀等问题。前期对金箔环境微生物腐蚀机制的研究表明, 微生物代谢的基质材料诱导微生物定殖及金箔表面微环境发生变化, 但对封护材料对金箔表面微生物定殖与腐蚀机制的关联性仍缺乏深入研究。构建含生漆、松节油-生漆和桐油-生漆的易脆毛霉菌(*Mucor fragilis*)培养体系, 并结合金箔表面腐蚀模拟实验, 系统评估不同封护材料对微生物生理代谢及对金箔腐蚀过程的影响。结果表明: 生漆可与毛霉菌形成稳定的生物膜结构, 提供物理屏障并抑制有机酸分泌, 实现对金箔的有效保护; 松节油-生漆虽漆膜结构不均, 但凭借其持续弱碱性环境和低浓度胞外聚合物(EPS)有效抑制微生物黏附, 表现出一定的长期防护潜力; 桐油-生漆在初期通过氧化胁迫抑制微生物生长, 但随着脂肪酸作为碳源被利用, 其长期防护能力逐渐减弱。

关键词:千手观音; 金箔; 腐蚀; 易脆毛霉菌; 封护材料

中图分类号: TU-87; K879.3

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2026)03-0119-09

Effects of sealing materials on the physiological metabolism and corrosion action of *Mucor fragilis* on the gold foil surface of the Thousand-handed and Thousand-eyed Avalokitesvara

HE Qiang¹, CAI Liang¹, JIANG Siwei², FENG Xuemei², YANG Hao¹,
ZHAO Gang², GUO Jinsong¹

(1. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Dazu Engraving Research Institute, Chongqing 402360, P. R. China)

收稿日期: 2025-07-21

基金项目: 国家文物保护专项资金(文物保函[2011]262号); 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2022TIAD-KPX0095)

作者简介: 贺婧(1994-), 女, 主要从事藻类及环境微生物研究, E-mail: 2496288210@qq.com。

蒋思维(通信作者), 男, 研究馆员, E-mail: 1240071816@qq.com。

郭劲松(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: guo0768@cqu.edu.cn。

Received: 2025-07-21

Foundation items: National Special Funds for Cultural Heritage Conservation (Letter on Cultural Heritage Conservation [2011] No. 262); Special Key Project of Chongqing Technology Innovation and Application Development (No. CSTB2022TIAD-KPX0095)

Author brief: HE Qiang (1994-), main research interests: algae and environmental microorganisms, E-mail: 2496288210@qq.com. JIANG Siwei (corresponding author), research fellow of museum, E-mail: 1240071816@qq.com. GUO Jinsong (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: guo0768@cqu.edu.cn.

Abstract: The Dazu Thousand-handed and Thousand-eyed Avalokitesvara is widely regarded as a seminal example of Song Dynasty grotto art. Although the statue was restored in 2015, the preservation environment has not been effectively improved. It still suffers from issues such as gold foil delamination, cracking, and microbial erosion. Preliminary investigations by our research group into the microbial corrosion mechanisms on the gold foil indicated that the substrates generated from microbial metabolism could induce microbial colonization and alter the microenvironment of the gold foil surface. Nonetheless, the relationship between sealing materials and the microbiological colonization and corrosion processes on gold foil remains insufficiently studied. The present study established a *Mucor fragilis*-based culture system, incorporating raw lacquer, turpentine-modified lacquer, and tung oil-modified lacquer as sealing materials. These systems were combined with simulated corrosion experiments on gold foil surfaces to systematically evaluate the effects of different sealing materials on microbial physiological metabolism and the corrosion process. The results indicated that raw lacquer formed a stable biofilm structure with *Mucor fragilis*, providing both physical barrier and inhibition of organic acid secretion, thereby offering effective protection for the gold foil. Although the film morphology of turpentine-modified lacquer was relatively heterogeneous, its sustained mildly alkaline environment and low extracellular polymeric substances (EPS) concentration effectively suppressed microbial adhesion, suggesting a certain long-term protection potential. Tung oil-modified lacquer initially inhibited microbial growth through oxidative stress, but its protective effect diminished over time as fatty acid components were utilized as carbon sources.

Keywords: Thousand-handed and Thousand-eyed Avalokitesvara; gold foil; corrosion; *Mucor fragilis*; sealing materials

作为大足石刻世界文化遗产的重要构成要素,千手观音造像是中国现存最大的集石雕、彩绘、贴金于一体的摩崖造像,金箔腐蚀防治研究对其长久保存具有重要意义。尽管2008年至2015年实施的抢救性保护修复有效遏制了千手观音本体病害^[1-2],但因保存环境尚未得到有效改善,近年来持续跟踪监测发现,环境微生物尤其是真菌类微生物对造像表面金箔局部起翘、开裂和鼓泡等病害的诱导作用不容忽视。因此,深入探究微生物、封护材料与金箔之间的相互作用,对于提高贴金类石质文物的保护效果具有重要的理论和实践意义。

已有研究表明:多种真菌可在金属或金箔表面定殖,其代谢产物与封护材料之间的作用可能加速金箔的腐蚀过程^[3-4]。如Song等^[5]发现金属能调控真菌胞外聚合物的组成比例,从而促进其生物膜形成。Bohu等^[6]发现某些真菌能氧化并溶解环境中的金,为微生物引发金箔腐蚀提供了直接证据。封护材料作为微生物与金箔表面的关键界面,其理化特性可能通过影响真菌的代谢活动而间接影响金箔腐蚀过程。作为贴金文物表面常见的优势真菌,毛霉菌可能在该过程中发挥重要作用^[7]。传统贴金造像工艺常在金箔表面施加封护材料以起到防护作用,其中以生漆类封护材料使用最为广泛^[8-10]。研究表明,千手观音造像使用的封护漆主要由生漆与桐油按比例混合制成^[11],具有防水、防腐和保持光泽的功能^[12]。然而,由于桐油中富含 α -桐酸、油酸和棕榈

酸,在长期使用中耐腐蚀性较差,老化后易导致金箔脱落。因此,近代在修复过程中常以抗老化性更强且不影响光泽度的松节油(含 α -蒎烯、 β -蒎烯和柠檬烯)代替桐油,但金箔腐蚀问题仍未彻底解决。目前研究多集中于封护材料的理化性能^[13-14],对微生物与封护材料界面的相互作用及其对金箔腐蚀机制的影响仍需进一步研究。

笔者系统评估不同封护材料对金箔表面易脆毛霉菌(*Mucor fragilis*)生理特性及其引发的金箔腐蚀效应的影响。通过在含易脆毛霉菌的液体培养体系中加入3种不同封护材料(生漆、松节油-生漆和桐油-生漆),分析其对毛霉菌生物量、有机酸分泌和胞外聚合物(EPS)浓度的影响。同时,在金箔表面分别涂刷以上封护材料并接种毛霉菌,结合扫描电镜(SEM)与傅里叶变换红外光谱(FTIR)等技术,评估金箔腐蚀形貌特征变化。

1 材料和方法

1.1 实验设计

1.1.1 液体培养试验

为评估不同封护材料对易脆毛霉菌生理特性的影响,将0.5 mL的生漆、松节油-生漆、桐油-生漆分别加入到50 mL模拟培养基中,形成3种培养基。未添加封护漆的培养基作为空白实验组。经121 °C高压灭菌后,接种浓度为 2.5×10^5 个/mL的毛霉菌孢子悬液,于30 °C恒温培养箱中培养28 d,定期取

样分析。

1.1.2 金箔腐蚀实验

为探究不同封护漆对易脆毛霉菌定殖及金箔腐蚀形貌的影响,将15 μL 的生漆、松节油-生漆、桐油-生漆均匀涂刷在2.0 cm \times 1.0 cm的金箔表面,形成3种试样,以未涂刷的金箔作为空白实验组。封漆后的金箔在黑暗环境中静置7 d,再在其表面接种200 μL 浓度为 1×10^7 个/mL的毛霉菌孢子悬液,于30 $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度90%的恒温培养箱中培养28 d,定期取样分析。

1.2 实验材料

实验所用易脆毛霉菌(*Mucor fragilis*)分离自大足石刻宝顶山千手观音造像金箔表面。为真实模拟千手观音造像所处环境,采用特定盐溶液与马铃薯葡萄糖液体培养基(PDB培养基),按体积比9:1配制模拟培养基。该盐溶液中 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的质量浓度(分别为5.0、4.0、4.0 mg/L)依据历年来对造像环境中凝结水的离子监测数据设定,从而使培养条件更贴近易脆毛霉菌在金箔表面的真实微环境。将实验所用金箔(采购自南京金线金箔总厂)裁剪成2.0 cm \times 1.0 cm的标准试样。

千手观音造像的贴金层传统上以生漆为基本材料。研究表明,该造像在历次传统修复中通常将桐油和生漆按比例混合制成熟漆作为封护材料^[15]。然而,桐油在长期使用中易老化,从而成为金箔脱落的重要诱因。为解决这一问题,近代修复过程中常选用抗老化性更强且能保持光泽度的松节油代替桐油,与生漆共同配制使用。因此,选择生漆、松节油-生漆和桐油-生漆3种封护材料进行对比评价,其中生漆(日产梨子地漆)分别与松节油和桐油按体积比1:9混合配制。

1.3 分析方法

1.3.1 生物量和pH值测定

菌液经0.45 μm 玻璃纤维滤膜过滤后冷冻干燥至恒重,以计算生物量。培养液酸碱度采用pH计直接测定。

1.3.2 胞外聚合物(EPS)提取和浓度测定

胞外聚合物(EPS)采用热提取法^[16]。EPS中蛋白质浓度采用BCA蛋白浓度测定试剂盒(Solarbio, Beijing, China)测定,多糖浓度通过苯酚-硫酸法测定^[17]。

1.3.3 超氧化物歧化酶(SOD)和有机酸浓度测定

培养第7天取适量菌液,使用SOD活性检测试剂盒(Solarbio, Beijing, China)根据比色法测定SOD活性。菌液经0.22 μm 玻璃纤维滤膜过滤,参照GB 5009.157—2016采用高效液相色谱法测定有机酸浓度。

1.3.4 金箔表面毛霉菌浓度测定

参照GB 4789.15—2016对金箔表面毛霉菌数量进行检测。金箔表面毛霉菌浓度(个/cm²)计算公式为 $C=c\times n\times V/A$ 。式中: c 为毛霉菌菌落数,个; n 为稀释倍数; V 为毛霉菌孢子悬液初始体积,5 mL; A 为金箔面积,2 cm²。

1.3.5 金箔表面形貌和表面官能团测定

金箔样品经2.5%戊二醛于4 $^{\circ}\text{C}$ 固定8 h,随后用乙醇梯度脱水并冻干,用扫描电镜观察金箔腐蚀形貌,同时通过能量色散光谱(EDS)分析样品表面元素组成。采用傅里叶红外光谱(FTIR-ATR)分析金箔表面官能团变化。

2 结果和讨论

2.1 毛霉菌生物量、金箔表面毛霉菌浓度和培养液pH值变化

在整个培养周期内,毛霉菌生物量呈先增加-后减少-再增加的变化趋势(图1(a))。培养前7 d,毛霉菌以葡萄糖为主要碳源,导致生物量迅速增加,而在7~14 d内因溶解氧降低,导致生物量开始下降。14 d后,菌丝突破液面获取氧气,使生物量再次上升。培养结束时,不同封护材料处理的毛霉菌生物量存在差异,松节油-生漆实验组最小(366.0 mg/L),而桐油-生漆实验组最大(390.4 mg/L)。毛霉菌在不同封护材料处理下相对于空白实验组的生物量差值变化如图1(b)所示。生漆实验组在第3天时的生物量低于空白实验组,这主要源于漆酚等成分的抑菌作用^[18]。随着这些活性成分逐渐降解,抑制效应减弱,同时,漆膜中释放的有机物为毛霉菌提供额外碳源,所以在后续阶段生物量持续高于空白实验组,表现出从抑制转为促进的趋势。在培养前14 d,桐油-生漆实验组相对于空白实验组生物量的差值均为负值,说明该封护材料对毛霉菌生长具有抑制作用。随着培养时间的延长,桐油中的油酸等成分可作为碳源被毛霉菌利用,促进其生长,使生物量相对差值在21 d后由负转变为正。松节油-生漆实验组对毛霉菌生物量的影响呈更为复杂的阶段性变化。培养前14 d,由于同时含有单萜类和漆酚等多种抑菌成分,毛霉菌生长受到更持久的抑制^[19]。至第21天,随着抑菌成分降解并释放可利用物质,生物量短暂增加。但到第28天,因营养物质耗尽且有害副产物积累,抑制作用再次占据主导,生物量下降。因此,3类封护材料对毛霉菌生物量的影响均呈动态变化,最终效应取决于其活性成分的降解及其产物的可利用性与抑制性谁为主导。

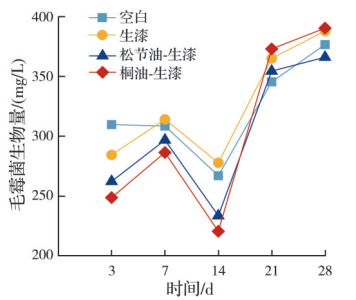
金箔表面毛霉菌浓度变化如图1(c)所示。前14 d,桐油-生漆实验组金箔表面毛霉菌浓度最低

(1.29×10^5 个/cm²), 抑菌效果明显。但在 14 d 后, 松节油-生漆实验组表面毛霉菌浓度最低, 说明其抑菌作用更加持久。生漆实验组因紫外灭菌过程中漆酚成分降解使其抑菌性减弱, 从而导致表面毛霉菌浓度始终较高^[20]。此外, 所有处理实验组的培养液最终 pH 值均趋于弱碱性(图 1(d)), 该环境条件不利于毛霉菌生长。松节油-生漆实验组最终 pH 值

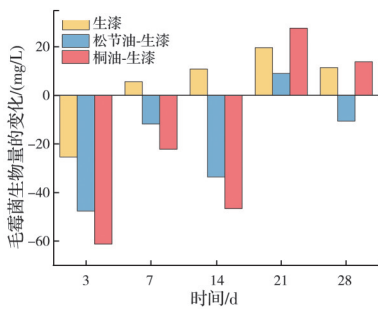
(7.95) 高于桐油-生漆实验组(7.56), 进一步证明其长期抑菌效果更优。该现象可能与松节油诱导金箔表面发生化学腐蚀反应, 促进碱性产物生成, 从而提高 pH 值并抑制微生物生长的作用机制有关。

2.2 有机酸浓度和超氧化物歧化酶(SOD)活性变化

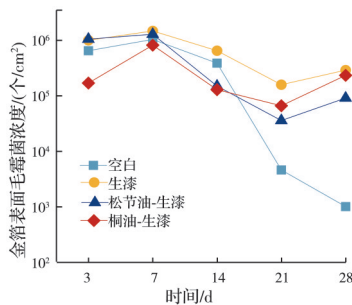
微生物通过代谢产酸是其诱发金属腐蚀的重要机制之一^[21-23]。实验第 7 天时, 检测到有机酸中柠檬酸浓度最高, 其次是苹果酸和草酸, 未检出乙酸(图 2(a))。所有封护材料处理下的总有机酸浓度均低于空白实验组(79.67 mg/L), 其中生漆实验组浓度最低(56.04 mg/L), 松节油-生漆实验组和桐油-生漆实验组有机酸浓度分别为 73.41、78.63 mg/L, 表明相比生漆, 松节油和桐油的加入会改变化学环境, 促进有机酸分泌, 增加金属酸蚀的风险^[24]。不同封护材料处理下 SOD 活性均高于空白实验组(1.53 U/g), 其中桐油-生漆实验组最高(71.57 U/g)(图 2(b)), 表明封护材料尤其是桐油-生漆引发了较强的氧化胁迫, 抑制毛霉菌生长。该结果与桐油-生漆实验组在培养初期生物量最低的结果相一致, 进一步印证了其在短周期内对毛霉菌生长具有显著的抑制效应。



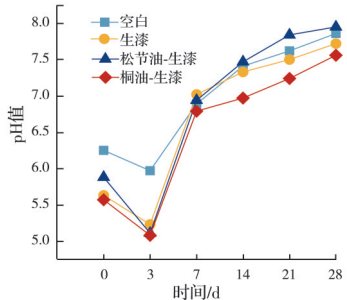
(a) 毛霉菌生物量



(b) 相对于空白实验组的毛霉菌生物量差值变化



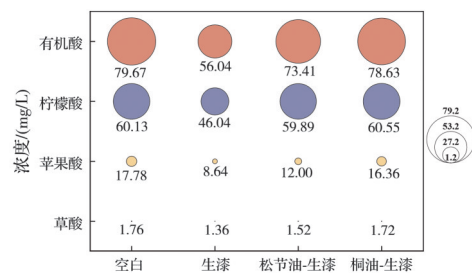
(c) 金箔表面毛霉菌浓度



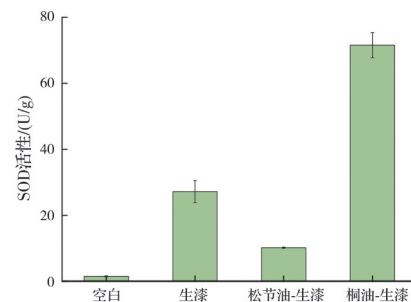
(d) 溶液 pH 值

图 1 不同封护材料处理下毛霉菌的生长特征和相关环境变化

Fig. 1 Growth characteristics of *Mucor* and related environmental changes under different sealing material treatments



(a) 第 7 天时的有机酸浓度



(b) 第 7 天时的 SOD 活性

图 2 不同封护材料处理下的代谢和抗氧化特征

Fig. 2 Metabolic and antioxidant characteristics under different sealing material treatments

2.3 胞外聚合物(EPS)浓度变化

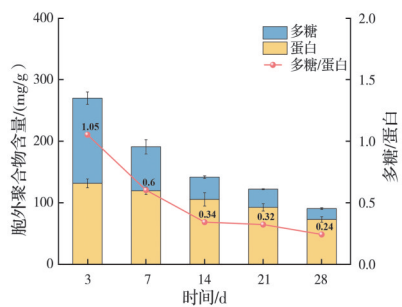
培养期间, 各实验组 EPS 中蛋白质和多糖浓度均呈下降趋势(图 3)。在空白实验组和生漆实验组中, 蛋白质浓度始终高于多糖。桐油-生漆实验组除第 3 天外, 其余时间均表现为蛋白质浓度高于多糖。

松节油-生漆实验组则在第3天和第7天出现多糖浓度高于蛋白质的情况,其余时间均是蛋白质浓度占优。在后期(第28天),松节油-生漆实验组中EPS浓度最低(64.70 mg/g干重),表明其不利于微生物黏附。而桐油-生漆实验组在初期EPS浓度(312.91 mg/g干重)低于生漆实验组(353.38 mg/g干重),但后期却最高(150.05 mg/g干重),表明其可能通过延缓EPS降解或持续诱导菌体分泌EPS,从而形

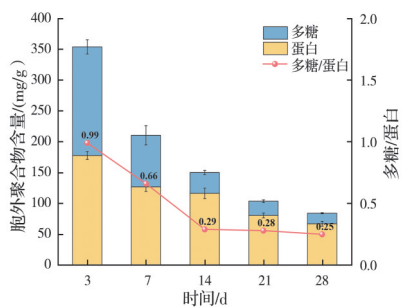
成更稳定的生物膜结构。此外,多糖/蛋白比值整体呈下降趋势,而在培养末期,所有封护材料处理下该比值普遍高于空白实验组,表明封护材料能调节毛霉菌的疏水性和对金属离子的吸附能力^[25-26]。

2.4 金箔表面形貌分析

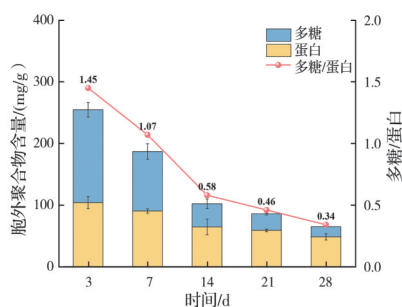
涂刷封护材料后,金箔表面结构随成分不同而发生变化,生漆和桐油-生漆形成的漆膜表面较平整,而松节油-生漆形成的漆膜表面不均匀且存在微小孔隙(图4)。通过EDS分析(表1)发现,3种封护材料处理下的金箔表面均检测到硫元素,而且所有封护漆表面均观察到不规则颗粒,推测这些颗粒可能来源于生漆中所含的硫杂质。培养结束后,尽管



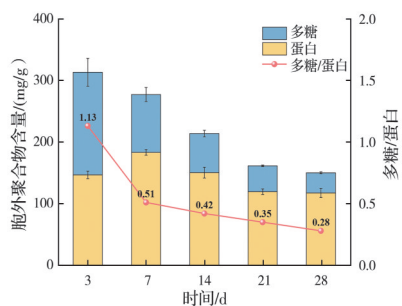
(a) 空白实验组



(b) 生漆实验组

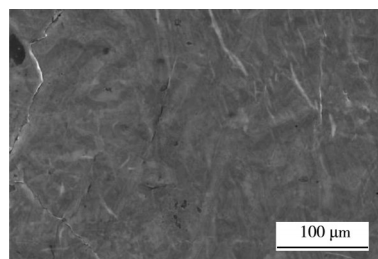


(c) 松节油-生漆实验组

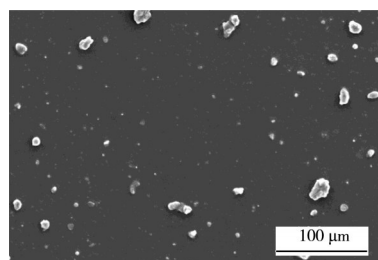


(d) 桐油-生漆实验组

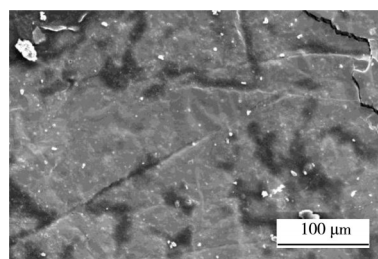
图3 不同封护材料处理下毛霉菌胞外聚合物浓度变化
Fig. 3 Changes in EPS concentration of *Mucor* under different sealing material treatments



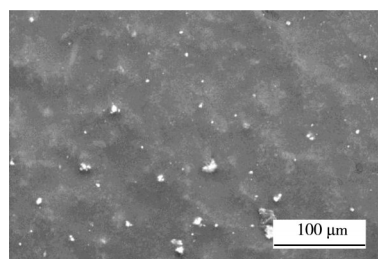
(a) 空白实验组



(b) 生漆实验组



(c) 松节油-生漆实验组



(d) 桐油-生漆实验组

图4 不同封护材料处理下金箔初始形貌
Fig. 4 Initial surface morphology of gold foil under different sealing material treatments

表 1 不同封护材料处理下金箔表面元素占比

Table 1 Elemental percentages on gold foil surfaces under different sealing material treatments

封护材料	C	N	O	P	S
生漆	62.44	6.03	25.61	2.98	2.94
松节油-生漆	53.93	5.45	18.36	10.60	11.65
桐油-生漆	66.32	6.98	22.51	2.07	2.12

毛霉菌在生漆漆膜表面分布密集,但漆膜未出现明显腐蚀迹象,而桐油-生漆实验组漆膜出现蜂窝状孔洞,松节油-生漆实验组则发生起翘与开裂(图 5)。这可能是因为生漆与毛霉菌之间形成了稳定的生物膜结构,在无其他添加组分干扰下,反而对金箔表面起到一定保护作用。以上结果表明,生漆形成的漆膜具有良好的抗微生物腐蚀性能,而松节油或桐油的添加可能破坏该结构,削弱其防护性能。

2.5 金箔表面官能团变化分析

不同封护材料处理下金箔表面红外光谱特征如图 6 所示。3 289、3 363 cm^{-1} 处的 O—H 振动峰源于生漆中的漆酚,2 925、2 855 cm^{-1} 处为亚甲基 C—H 振动峰,1 733 cm^{-1} 处的峰值对应酯基 C=O 拉伸振动,1 633 cm^{-1} 处为苯环骨架的 C=C 振动峰,1 033 cm^{-1} 处为醚类特征峰,722 cm^{-1} 处为—CH₂—吸收峰^[27-28]。毛霉菌腐蚀后,官能团峰位发生显著变化。松节油-生漆实验组和桐油-生漆实验组中 1 733 cm^{-1} (C=O) 峰减弱,表明酯基发生了水解,桐油-生漆实验组 722 cm^{-1} 峰的消失说明脂肪链结构易受生物降解。3 289 cm^{-1} (O—H) 和 1 633 cm^{-1} (C=C) 峰值增强,而 2 925、2 855 cm^{-1} (C—H) 峰值减小,这些变化特征与文物漆膜老化过程一致^[29]。表明毛霉菌的代谢作用加速了漆膜中酯基水解、脂肪链断裂及芳香结构氧化,削弱了其封护效果。

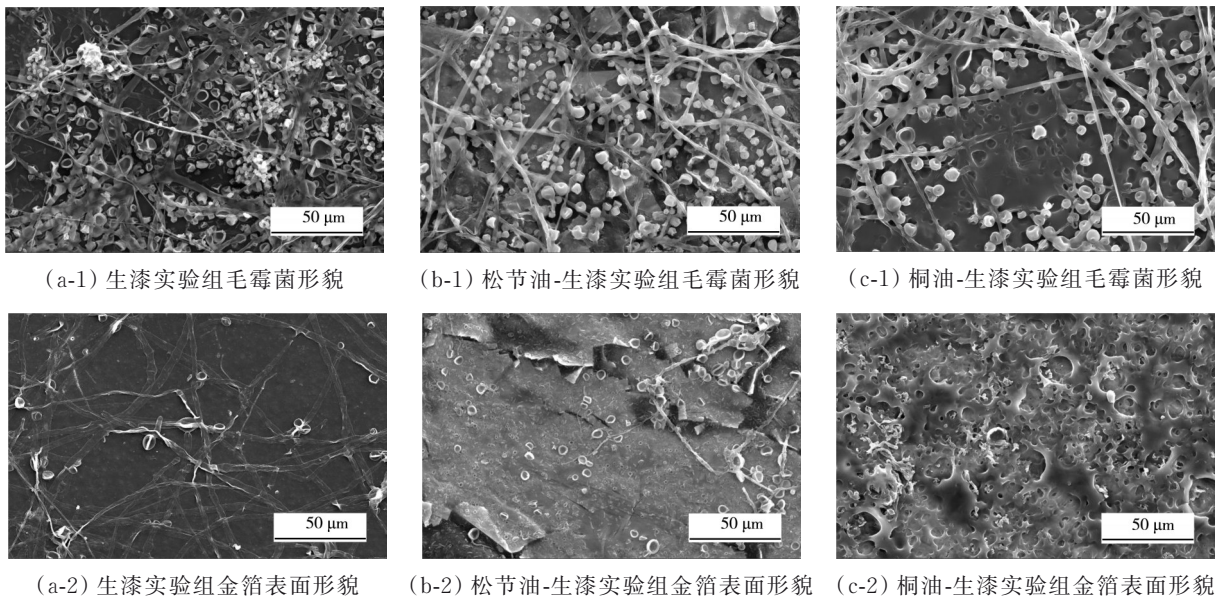


图 5 培养结束时不同封护材料处理下金箔及其表面毛霉菌的形貌

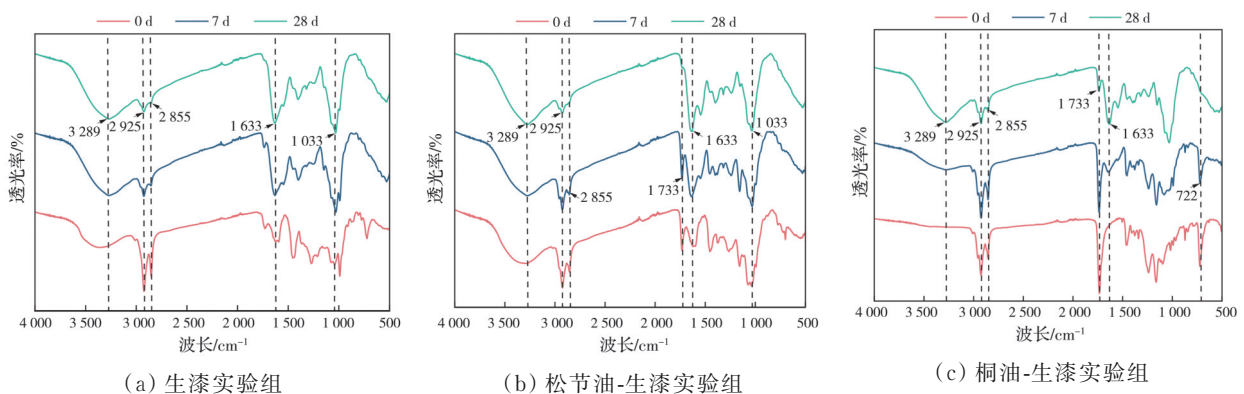
Fig. 5 Morphology of gold foil and surface *Mucor* under different sealing material treatments at the end of cultivation

图 6 不同封护材料处理下金箔红外光谱变化

Fig. 6 Infrared spectral changes of gold foil under different sealing material treatments

2.6 不同封护材料处理下金箔的腐蚀机制

不同封护材料处理下金箔的腐蚀机制受微生物代谢、漆膜理化特性及EPS功能的协同调控,但各封护材料的作用机制存在显著差异。生漆凭借致密的漆膜结构和较强的化学稳定性^[30],能有效阻隔水分和腐蚀介质在金箔表面的迁移。同时,漆酚及其氧化产物能显著抑制真菌代谢活性,减少有机酸的分泌,从而减弱微生物诱导的腐蚀作用。在金箔表面,生漆构建了物理屏障与生化抑制协同作用的双重防护,为金箔提供持续稳定的保护。松节油-生漆虽能通过低浓度EPS抑制微生物黏附,但其漆膜结构不均匀且易开裂,为腐蚀性介质侵入金箔界面提供了通道,从而加速了界面腐蚀。同时,漆膜中酯基发生水解(C=O峰减弱),不仅破坏分子结构,还会生成酸性产物^[31],这些产物在漆膜缺陷处积累,进一步诱发局部降解和裂纹扩展,严重削弱漆膜的屏障功能。尽管该体系具有一定的抑菌能力,但其结构损伤持续加剧,无法有效阻隔腐蚀介质渗入,最终导致金箔表面发生界面化学腐蚀并沿裂隙区呈斑块状扩展,表现出环境抑菌强但结构防护弱的特征。桐油-生漆在初期因强氧化胁迫抑制毛霉菌定殖和生长^[32-33],诱导微生物应激响应,使得EPS浓度相对较高。EPS不仅在金箔表面形成物理阻隔,还能通过其官能团与金属离子发生络合作用^[34],从而增强防护效果。然而,随着培养过程的持续,桐油中脂肪酸组分被微生物代谢利用,在解除原有碳源限制和促进微生物增殖的同时,也导致有机酸及其代谢副产物不断积累^[35]。这些物质在漆膜-金箔界面的蜂窝状孔洞等缺陷处聚集,形成局部酸性腐蚀微环境,加剧界面化学腐蚀和物质迁移,最终造成漆膜封护效果减弱,难以实现对金箔的长期有效保护。综上,生漆以稳定漆膜与代谢抑制为核心优势,在金箔的保护中表现出优异性能。尽管松节油-生漆和桐油-生漆能在特定阶段增强对金箔的保护,但由于结构缺陷或引入可被微生物代谢利用的底物,最终削弱了其整体抑菌防腐蚀的能力。因此,金箔封护材料的设计应综合考虑表面特性(如疏水性)、微生物代谢调控(碳源可利用性)和材料化学惰性,以实现结构完整性与微生物抑制性能的协同优化。

3 结论

通过构建含生漆、松节油-生漆和桐油-生漆的易脆毛霉菌培养体系,并结合金箔表面腐蚀模拟实验,评估了不同封护材料对微生物生理代谢和金箔

腐蚀过程的影响,得到以下结论:

1)生漆在整个培养周期维持了最高的表面毛霉菌浓度(2.9×10^5 个/cm²),但产生的有机酸浓度最低(56.04 mg/L),且漆膜未出现明显腐蚀迹象,表明生漆和毛霉菌之间形成了稳定的生物膜结构。

2)桐油-生漆在培养初期通过提高SOD活性(71.57 U/g)有效降低了表面毛霉菌浓度(1.29×10^5 个/cm²),表现出较强的早期抑菌能力。但随着培养时间的延长,其较高的有机酸含量(78.63 mg/L)与EPS产量(150.05 mg/g干重)为微生物提供了代谢底物,反而加剧了金箔的微生物腐蚀。

3)松节油-生漆在培养后期表现出更为持续的抑菌作用,维持了较高的pH值(7.95)且金箔表面毛霉菌浓度最低(9.13×10^4 个/cm²),但其漆膜结构疏松,存在防护稳定性不足的问题。

4)综合上述结果,建议在贴金文物修复中优先保留生漆的生物膜形成特性,同时针对桐油-生漆在长期防护中稳定性不足和松节油-生漆存在漆膜疏松的问题,开展成分调整和配方优化,以提升封护材料的整体防护性能。

参考文献

- [1] Chen Q, Gao F, Wang X, et al. Comprehensive analysis of the surface decoration layer of Buddha statues from Dazu rock carvings in China[J]. Analytical Letters, 2022, 55(13): 2058-2073.
- [2] 崔静. 大足石刻千手观音的妆奁美学特征探析[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
Cui J. The analysis of aesthetic characteristics of the ornaments and redecorations on Thousand-Handed Guanyin in Dazu rock carvings[D]. Chongqing: Southwest University, 2019. (in Chinese)
- [3] Keller N P. Fungal secondary metabolism: regulation, function and drug discovery[J]. Nature Reviews Microbiology, 2019, 17(3): 167-180.
- [4] Li X G, Zhang D W, Liu Z Y, et al. Materials science: share corrosion data[J]. Nature, 2015, 527(7579): 441-442.
- [5] Song W J, Yang Y Y, Liang X J, et al. Influence of metals and metalloids on the composition and fluorescence quenching of the extracellular polymeric substances produced by the polymorphic fungus *Aureobasidium pullulans*[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2020, 104(16): 7155-7164.
- [6] Bohu T, Anand R, Noble R, et al. Evidence for fungi and gold redox interaction under Earth surface conditions [J]. Nature Communications, 2019, 10: 2290.

- [7] 蔡亮. 环境湿度和封护漆组分对千手观音造像金箔霉菌腐蚀的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2024.
Cai L. Study on the effect of environmental humidity and components of sealant on the corrosion of Thousand-hand Avalokitesvara gold foil by *Mucor*[D]. Chongqing: Chongqing University, 2024. (in Chinese)
- [8] Li D, Li K, Fang J F. Research progress on modification and application of raw lacquer[J]. *ChemistrySelect*, 2022, 7(31): e202200943.
- [9] Hu W G, Fu W J, Zhao Y. Optimal design of the traditional Chinese wood furniture joint based on experimental and numerical methods[J]. *Wood Research*, 2024, 69(1): 50-59.
- [10] Zou Y M, Xia Y X, Yan X X. Effect of UV top coating microcapsules on the coating properties of fiberboard surfaces[J]. *Polymers*, 2024, 16(15): 2098.
- [11] Gao F, Zhou X, Zhou H, et al. Characterization and analysis of sandstone substrate, mortar layers, gold foils, and paintings of the Avalokitesvara Statues in Dazu County (China)[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2016, 21: 881-888.
- [12] Wu T, Xu W. Preparation of tung oil-modified raw lacquer films and application for mechanical carving technique[J]. *Coatings*, 2024, 14(10): 1264.
- [13] 黄美燕, 陈竹茵, 张荣, 等. 南方地区古建筑保护用桐油的抗老化改性研究[J]. *合成材料老化与应用*, 2022, 51(4): 44-47.
Huang M Y, Chen Z Y, Zhang R, et al. Study on anti-aging modification of the tung oil for conservation of traditional architecture in Southern China[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2022, 51(4): 44-47. (in Chinese)
- [14] 李思广, 付玉嫔, 蒋云东, 等. 高产脂思茅松松节油组分研究[J]. *四川林业科技*, 2018, 39(2): 33-36.
Li S G, Fu Y P, Jiang Y D, et al. A study of turpentine composition of high-resin-yield *Pinus kesiya* var. *langbianensis*[J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2018, 39(2): 33-36. (in Chinese)
- [15] 徐琪歆, 李元涛, 左洪彬. 千手观音造像髹漆贴金层修复方法研究[J]. *中国文物科学研究*, 2013(3): 24-32.
Xu Q X, Li Y T, Zuo H B. A study on restoration methods of the lacquer and gliding skin of the Thousand-Hand Bodhisattva of Dazu carvings[J]. *China Cultural Heritage Scientific Research*, 2013(3): 24-32. (in Chinese)
- [16] d'Abzac P, Bordas F, Joussein E, et al. Characterization of the mineral fraction associated to extracellular polymeric substances (EPS) in anaerobic granular sludges[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(1): 412-418.
- [17] Wang G L, Huang X X, Wang S, et al. Effect of food-to-microorganisms ratio on aerobic granular sludge settleability: microbial community, potential roles and sequential responses of extracellular proteins and polysaccharides[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118814.
- [18] 李东旭, 张娟妮, 张婷婷, 等. 漆酚聚合固化技术及其功能聚合物应用研究进展[J]. *林产化学与工业*, 2024, 44(1): 129-137.
Li D X, Zhang J N, Zhang T T, et al. Research progress on polymerization and curing technology of urushiol and its application in functional polymers[J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2024, 44(1): 129-137. (in Chinese)
- [19] de Matos Castro Silva D, de Luca Ito R K, Bonfietti L X, et al. Antifungal and antibacterial activity of terpenes for improvement of indoor air quality[J]. *Current Fungal Infection Reports*, 2020, 14(3): 299-309.
- [20] 王珂, 周和荣, 吴涛, 等. 两种波长紫外光辐照对生漆涂层性能及组成的影响[J]. *涂料工业*, 2023, 53(4): 21-27.
Wang K, Zhou H R, Wu T, et al. Effect of two wavelengths of ultraviolet irradiation on properties and composition of raw lacquer coating[J]. *Paint & Coatings Industry*, 2023, 53(4): 21-27. (in Chinese)
- [21] Jiang C M, Yang S X, Guo D, et al. Simulated microgravity accelerates alloy corrosion by *Aspergillus* sp. via the enhanced production of organic acids[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2022, 88(19): e00912-22.
- [22] Li Q W, Gong L L, Chen X J, et al. Dual role of microorganisms in metal corrosion: a review of mechanisms of corrosion promotion and inhibition[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2025, 16: 1552103.
- [23] Chen J N, Wu J J, Wang P, et al. Corrosion of 907 steel influenced by sulfate-reducing bacteria[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(3): 1469-1479.
- [24] Llamas M, Dourou M, González-fernández C, et al. Screening of oleaginous yeasts for lipid production using volatile fatty acids as substrate[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2020, 138: 105553.
- [25] Tang R, Luo H P, Prommer H, et al. Response of anaerobic granular sludge to long-term loading of roxarsone: from macro- to micro-scale perspective[J]. *Water Research*, 2021, 204: 117599.
- [26] More T T, Yadav J S S, Yan S, et al. Extracellular polymeric substances of bacteria and their potential environmental applications[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 144: 1-25.

- [27] Chen J P, Zhao J, Lin F C, et al. Polymerized tung oil toughened urushiol-based benzoxazine copper polymer coatings with excellent antifouling performances[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2023, 177: 107411.
- [28] 王晨. 古建彩绘地仗制作工艺中熟桐油与砖粉协同作用机制研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2021.
Wang C. Research on the synergistic mechanism of refined tung oil and brick powder in the production process of ancient architectural painted plaster base[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2021. (in Chinese)
- [29] 田兴玲, 贾政, 沈大娟, 等. 文物贴金用传统金胶漆耐湿污染大气腐蚀性能的研究[J]. *材料保护*, 2023, 56(9): 98-103, 153.
Tian X L, Jia Z, Shen D W, et al. Study on the corrosion resistance of traditional gold glue paint used for gilding of cultural relics to wet polluted atmosphere[J]. *Materials Protection*, 2023, 56(9): 98-103, 153. (in Chinese)
- [30] Lu R, Yoshida T, Miyakoshi T. Oriental lacquer: a natural polymer[J]. *Polymer Reviews*, 2013, 53(2): 153-191.
- [31] Sanden S A, Butch C J, Bartlett S, et al. Rapid hydrolysis rates of thio- and phosphate esters constrain the origin of metabolism to cool, acidic to neutral environments[J]. *iScience*, 2024, 27(11): 111088.
- [32] Pan P, Yan X X, Peng W W. Tung oil microcapsules prepared with different emulsifiers and their effects on the properties of coating film[J]. *Coatings*, 2022, 12(8): 1166.
- [33] Peng W W, Yan X X. Preparation of tung oil microcapsule and its effect on wood surface coating[J]. *Polymers*, 2022, 14(8): 1536.
- [34] De Beeck Mop, Persson P, Tunlid A. Fungal extracellular polymeric substance matrices: highly specialized microenvironments that allow fungi to control soil organic matter decomposition reactions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 159: 108304.
- [35] He J H, Chen Q H, Huang H B, et al. Development of novel anisotropic Janus composite particles based on Urushiol-iron/polystyrene polymer[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2015, 85: 15-21.

(编辑 胡英奎)