

中国材料大会 2025

暨新材料科研仪器与设备展

7 月 5-8 日, 2025

福建 厦门

FC05-文化遗产材料分论坛

FC05-Cultural Heritage Materials Symposium

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



FC05.文化遗产材料分论坛

分会主席：马啸、朱建锋、李炫华、王凤平、韩向娜

FC05-01

古建彩绘地仗物料表界面协同固化作用机制

胡道道*

陕西师范大学

我国古建筑彩绘历经百年而无恙，表明其涂层材料具有优越的耐久性能。依照“结构决定性质，性质决定功能”的自然科学基本理念，古建彩绘涂层材料耐久性与其微观结构有着必然联系。然而对传统工艺所蕴含的科学性缺乏深刻认知。本研究以古建彩绘地仗涂层制作工艺为依据，以粘结、填充及拉结等功能作为地仗涂层相关物料作用的基本归属定位，结合地仗层制作的多组分复合以及动态固化特点，以表界面化学原理为切入点，以微观和宏观检测技术为手段，通过关联微观结构与宏观性能，解析桐油炼制、油满调制、灰料调制及地仗层涂覆等传统工艺中，多组分表界面间微观相互作用与复合材料宏观性能关联性、地仗动态固化过程中的物料界面协同作用，揭示古建彩绘地仗耐久性的微观作用机制，为科学化修复文物提供普适性理论支持及有效技术支撑，为现代复合涂层材料研究提供有益借鉴。

FC05-02

考古出土秦俑科技考古研究进展

容波*

秦始皇帝陵博物院

报告以时间轴线回顾了秦俑及相关文物自发现以来的主要发掘阶段、重要考古发现及各阶段的发掘成果，介绍了近年来秦兵马俑一、二号坑现场应急保护实验舱及考古发掘平台建设。采用科技考古手段，在无损探测方面，利用地质雷达、电阻率法、磁法等地球物理探测手段对秦始皇陵及其周边区域进行探测的成果，如绘制三维结构图、发现地下遗迹等；采用 X 射线探伤、超声波检测、三维图像采集等无损检测技术在秦俑及相关文物内部结构、病害稳定性进行深度检测评估，并为文物保存管理提供了有效的科技支撑。秦俑胎体材料的研究揭示了秦代的陶器制作技术和资源利用情况，秦俑彩绘生漆及其添加物的鉴定、颜料及调和剂的分析研究，揭示秦代颜料制作技术，并为秦俑彩绘、铜车马、石甲冑、青铜剑等重要文物深层次研究提供了有效支撑。报告对未来秦俑及相关文物的科技考古研究方向进行展望，提出后续加强多学科合作深度研究的建议。

FC05-03

水硬性石灰-偏高岭土基文物修复与加固材料改性及抗冻融性研究

刘凡^{1,2}、王金华¹、刘绍军^{*2,3}

1. 复旦大学文物与博物馆学系

2. 科技考古与文物保护利用湖南省重点实验室

3. 中南大学粉末冶金研究院

水硬性石灰-偏高岭土（NHL-MK）基文物修复与加固材料在寒冷干燥地区使用时，因早期强度与抗冻融性能的不足，经常导致基体开裂、界面失效及残损破坏等问题而限制了其广泛应用。在材料冻融循环前后微观结构与宏观强度之间相互作用关系理解的基础上，通过分子界面改性及纳米粉末和微米纤维（晶须）复合，有效地改善了水硬性石灰-偏高岭土基材料的强度与抗冻融性能。研究结果表明，碳纳米管、纳米二氧化硅、碳酸钙晶须、玄武岩纤维和糯米浆掺杂均可有效地改善 NHL-MK 基材料早期（7 天）抗压与抗折强度。相对于未掺杂试样，复合掺杂 0.05wt%碳纳米管、2wt%纳米二氧化硅和 2%糯米浆的 NHL-MK 试样展现出良好的抗冻融性能。经冻融循环 20 次，试样抗压强度损失率为 8.71%（从 26.13MPa 至 23.85MPa）。碳纳米管与纳米二氧化硅粉末的高表面能不仅能够促进水化反应的进行，也能够作为填料优化材料的孔隙结构。同时，碳纳米管与基体材料之间的机械嵌合、桥连作用有效地阻止了微裂纹的产生。相比较，糯米

支链淀粉分子通过氢键作用增强颗粒的界面结合力，烷基的存在则提高了材料的憎水性，减少了冻融过程中的冰晶膨胀应力。

FC05-04

Lignocellulosic nanomaterials: isolation, properties and potential application for heritage preservation

姜锋*

加拿大不列颠哥伦比亚大学

Lignocellulosic nanomaterials, naturally derived nanoscale materials, have recently attracted significant attention due to their excellent rheological, mechanical, thermal, and optical properties. Nanocellulose can be extracted from lignocellulosic biomass through various chemical, biological, and mechanical approaches. Depending on the isolation method and any chemical modifications applied, the resulting nanocellulose can exhibit different properties tailored for diverse applications.

In this presentation, I will introduce several novel lignocellulosic nanomaterials with distinct functionalities. One example is dialcohol nanocellulose, produced via periodate oxidation followed by borohydride reduction. This material exhibits unique thermoplastic and rheological properties and can serve as an effective adhesive for binding wood and various substrates.

Additionally, reactive deep eutectic solvents (DES) can be employed to isolate lignocellulosic nanomaterials with excellent fire-retardant properties, attributed to surface modification of hydroxyl groups with ammonium sulfate. Lignocellulosic nanomaterials also possess strong film-forming capabilities and exhibit rheological properties suitable for 3D printing and constructing complex three-dimensional structures.

Finally, I will discuss the potential and emerging applications of nanocellulose in heritage preservation, including reinforcement of historical documents, consolidation of paint layers, adhesives, furniture repair, etc.

FC05-05

生物矿化技术在砂岩石窟和土遗址加固保护中的探索

武发思*、李洁、朱非清、郭青林

敦煌研究院

风化是岩土质文物长久保存的主要病害，防风化材料和技术研发在保护修复中需求迫切。本研究采用微生物/酶诱导的碳酸钙沉淀（MICP/ EICP）技术，基于甘肃北石窟寺砂岩和锁阳城遗址土的加固开展评估研究。结果显示，生物矿化后形成的碳酸钙晶体通过与细菌胞外聚合物协同作用，有效固结松散矿物颗粒而不堵塞孔隙，MICP 处理砂岩孔隙率仅降低 1.04%，加固前后色差变化 $\Delta E < 5$ ；MICP 加固后模拟试样的抗钻阻力、表面硬度和抗压强度分别提升 67%、15.2% 和 2.9 倍，加固深度达 20mm，砂岩力学性能提高。原位加固显示，生物矿化效果与矿化技术及所处崖面位置有关；MICP 加固后洞窟内砂岩抗钻阻力更强，加固深度约 10 mm；而 EICP 在窟外环境加固效果更优，加固深度达 20 mm。经过 1 年的定期监测发现，EICP 加固效果稳定性优于 MICP，受赋存外环境影响更小。通过对比锁阳城遗址土拌和制样和滴渗加固发现，生物矿化程度随模拟试样的养护时间而升高，拌和法的加固效果优于滴渗法。MICP 加固后高密度试样（ 1.7 g/cm^3 ）中碳酸钙沉淀更多，其波速、无侧限抗压强度分别增加了 7.13%、26%，而 EICP 加固后分别增加了 3.28%、8%。试样密度、风化程度及应用环境是影响加固效果的关键因素，当前亟需解决生物矿化后易溶盐含量增加及矿化产物流失等难题，并开展文物保护修复实际应用中的技术工艺改进和长效性评估。

FC05-06

明代皇室建筑红墙抹灰的制作工艺研究：以武当山建筑群与靖江王陵为例

魏国锋*、黄鑫允、孙天强

安徽大学

人类使用抹灰装饰和保护建筑的做法最早可以追溯到新石器时代，进入历史时期后，中国古代的抹灰工艺受到官府的管控，具有了一定工程规范和限制。作为皇室贵族才可使用的“红墙抹灰”，反应了中国古代社会普遍的审美认知和贵族阶级的特权，具有重要的研究价值。本研究从武当山建筑群和明代靖江王陵采集了多件红墙抹灰样品，采用 XRF、XRD、TG-DSC、IR 和 PLM 及碘淀粉滴定实验等分析手段，对样品的矿物组成、石灰类别和含量、有机添加剂和纤维种类进行了分析检测。结果显示，武当山建筑群官式红墙的抹灰分为两层，表层由赭石、红土和镁质石灰组成；里层则未添加赭石，红土添加量相对较少，主要由镁质石灰构成；表里两层均添加了植物纤维。对比发现，靖江王陵红墙抹灰同样为两层，但其表里两层均未添加纤维和红土，表层由钙质石灰和赭石混合而成，里层则完全由钙质石灰制成。复杂的官式红墙分层抹灰工艺，既反映了中国自古以来对“朱色”的尊崇和贵族阶级在建筑建制和建筑色彩上的特权，又显示出明代工匠对石灰材料较深的认知与理解。本研究梳理了中国古代官式红墙建筑的配方组成和抹灰工艺，为官式红墙建筑的保护与修缮提供了科学的指导意见。

FC05-07

钙基文物保护材料研究新进展-乙二醇钙材料

杨富巍、刘妍*

西北大学 文化遗产学院 文物保护技术系

钙基文物保护材料的核心成分是可溶钙盐、氧化钙、氢氧化钙、纳米氢氧化钙、烷氧基钙等钙化合物，其作用机制为材料在文物基体内部或表面发生反应生成碳酸钙。钙基保护材料可用于石灰岩文物、建筑文物、壁画等文物的表面防护、加固保护及脱酸防腐等。作为新兴钙基材料，乙二醇钙具有醇溶性好，渗透性强，碳酸化反应可控等优点。本汇报重点介绍了乙二醇钙材料在文物保护领域的研究进展，对其应用前景进行了分析与展望。

FC05-08

中国古代玉器的病害分类和修复保护策略

王荣*

复旦大学文物与博物馆学系

透闪石—阳起石玉器是中国传统文化的杰出代表，其保护传承非常值得关注。本文将玉器在入土埋藏前人类行为和入土埋藏后自然风化过程的影响作用进行有机结合，对狭义概念的透闪石—阳起石质出土玉器的病害特征、形成机制、修复和保护策略等方面进行了系统梳理。结果显示，出土玉器的病害特征主要包括 10 种，裂隙、剥落、断裂、残损等 4 种可因人类行为方式造成，表面污染、表面结核、孔洞、粉化、复合材料脱落等 5 种主要由自然受沁作用造成，色变现象可由人类行为方式和自然受沁作用分别或共同造成。出土玉器的修复应遵循最小干预性原则，一般不作处理；存在孔洞严重、粉化、复合材料脱落的玉器，建议加固封护（杂化硅氧烷材料），维持其基本外形。出土玉器的预防性保护需要设置中高湿度条件（50-60%），展陈时规避紫外光，保藏时使用无酸性材料包装。该项工作旨在将保护和考古工作紧密结合，不仅为玉器保护服务，也为玉器考古工作服务，进而有助于该类珍贵文化遗产的传承。

FC05-09

建材系列博物馆的创建与建材科技史若干问题的初步探讨

欧阳东*

暨南大学，中国混凝土博物馆

报告中国首家混凝土主题博物馆--中国磐石混凝土博物馆以及中国首家建材博物馆、中原建材博物馆、中国砂浆博物馆等其他水泥基建材系列博物馆创建的缘起、宗旨、创建过程、建设模式、馆藏和研究以及运营模式等，阐述了行业博物馆的建设对建材行业高质量发展的作用和意义。并对广义混凝土和狭义混凝土的若干科技史问题进行初步探讨。

FC05-10

三星堆出土饱水象牙加固前后力学性能评估分析研究

罗雁冰^{*1}、陈利伟¹、蒋金锐¹、徐栋^{1,2}、田永强¹、魏彦飞³

1. 四川大学

2. 云南省文物考古研究所

3. 甘肃省文物考古研究所

本研究针对三星堆遗址出土饱水象牙力学性能评估这一文物保护难题，在加固前出土饱水象牙评估方面，基于色差仪明度（CIE L*）和超声波声速（Hp）的无损检测技术，结合质构仪硬度（Hv）的微损分析方法，建立了多参数协同评估方法，确定了出土象牙脱水保存的临界超声声速阈值，构建了不同颜色象牙表面明度（L*）与硬度（Hv）之间的定量关系模型。在加固后象牙强度评估方面，基于新鲜完整象牙超声声速（Hp）与测距（R）的线性关系特征，通过获取加固后样品的超声声速（Hp）与微小样品的三点弯曲强度（Bs）性能指标，结合文献报道的新鲜象牙力学参数，实现了与对应加固材料加固处理后象牙力学强度（CBs）的精确反演。这两套评估方案首次系统构建了饱水象牙在不同保护阶段的力学性能评估体系，采用的无损和微损检测技术最大限度地降低了对珍贵文物的损伤风险，其多参数协同分析方法不仅为三星堆遗址饱水糟朽有机质文物的科学保护提供了关键技术方案，更为整个文物保护领域类似脆弱材质的力学性能评估树立了方法学典范。

FC05-11

基于两性离子聚合物的砂岩文物抗盐结晶风化保护材料制备与性能研究

梁军艳^{*}、李瑶、端维维、徐斌

西安交通大学

可溶盐循环结晶是导致户外砂岩文物风化的主要因素。采用保护材料对脆弱砂岩实施粘接加固，同时抑制盐结晶、促进可溶盐随水运移至砂岩表面而脱除，是科学解决盐结晶风化的有效途径。两性离子具有水/盐亲和效应，在降低盐结晶可能性与盐结晶压力方面具有明显优势。 CaCO_3 寡聚体具有小尺寸效应，且具有聚合交联能力和补充砂岩钙质胶结质的功能。硅氧烷通过共价键或非共价键与石质基体的羟基结合以增强矿物粒子之间的作用力，对脆弱砂岩文物起到加固保护作用。鉴于此，本研究设计并制备了磷酸胆碱型和甜菜碱型两性离子硅氧烷聚合物，并将其与 CaCO_3 寡聚体复合，制备用于砂岩文物抗盐结晶风化的保护材料。系统表征了该保护材料的化学结构、聚集态结构、粘接性能，以及涂层表面 NaCl 、 NaNO_3 、 KNO_3 、 Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 等多种盐溶液的润湿性、结晶压力和结晶形貌。将保护材料或其前驱体应用于砂岩保护实践。经系统评估证实，该类型保护材料在无损运移和脱除盐溶液方面具有明显优势。

FC05-12

不同腐蚀环境下青铜器锈层的腐蚀行为比较研究

夏琦兴^{*}

西北工业大学

青铜器作为中华文明的重要物质载体，其长期保存依赖于对腐蚀机理的深入认知。本研究聚焦环境成分对Cu-Sn合金腐蚀路径的影响关系，通过多尺度表征体系揭示腐蚀产物层形成规律，为针对性防护提供理论支撑。

首先，选用3.5 wt%氯化钠溶液作为腐蚀介质，以模拟青铜合金表面粉状锈的形成过程；选择西安关中某考古工地的土壤，分析其可溶性离子成分，配置考古土壤浸出液，并以此为腐蚀介质模拟青铜合金在考古土壤环境下形成普通锈层的过程。通过金相显微镜、扫描电子显微镜、XRD和XPS等表征青铜器锈层的微观结构和化学成分，利用电化学工作站、粗糙度仪、接触角仪等评价腐蚀过程的青铜器表面状态和腐蚀性能。结果表明，在NaCl溶液中，高浓度 Cl^- 会显著加速腐蚀进程，其生成的腐蚀产物如氯化亚铜CuCl与碱式氯化铜 $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ 结构疏松多孔，形成不稳定的锈层，即粉状锈。这些不稳定的腐蚀产物易

发生剥落,导致腐蚀活性反应持续进行,腐蚀程度不断加剧。相比之下,考古土壤环境中的青铜合金会形成以氧化铜 CuO 和碱式碳酸铜 $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ 为主的致密稳定锈层。该稳定锈层相较于 NaCl 环境中形成的不稳定锈层,具有更低的表面粗糙度与更小的接触角,能显著延缓腐蚀性介质向锈层深处扩散,进而对合金基体起到保护作用,使耐蚀性提升 1~2 个数量级。尽管考古土壤环境中形成的保护性锈层可暂时保护青铜合金,但其防护效能会因外部 Cl^- 的持续作用而逐渐衰减。一方面, Cl^- 可渗入锈层内部促进 CuCl 与 $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ 的生成,这类产物表面粗糙度高,会加剧腐蚀介质对基体的破坏;另一方面,含氯腐蚀产物会提高锈层对水性介质的润湿性,促使腐蚀介质向锈层深处扩散,导致腐蚀反应随时间推移持续加剧。本研究深化了对青铜器腐蚀机理的认知,为制定有效保护策略提供了科学依据。

FC05-13

饱水木质文物尺寸稳定性调控新材料

周逸航^{*1}、张治国²、韩向娜¹、韩刘杨¹、吴梦若¹、汪嘉君²、王恺³、胡东波⁴

1. 北京科技大学
2. 国家文物局考古研究中心
3. 北京联合大学
4. 北京大学

饱水木质文物脱水过程中的干燥收缩是该类文物的关键保护问题之一,直接关系到文物的外形与安全,填充加固与控制干燥条件是现有脱水定型技术的主要策略。但材料的保护效果并非仅通过填充(支撑孔隙)和加固(提升力学性能)起效。本研究提供了多种饱水木质文物尺寸稳定性调控新材料,分别通过苯硼酸氢键调控、离子液体维持溶胀、有机硅氧烷-二元醛多重交联等策略,实现不同降解程度饱水木质文物的高效脱水定型。利用分子动力学模拟、DFT 模拟计算、红外光谱、动态蒸汽吸附、抗缩率测试等方法研究、验证了上述新材料与木质文物的作用方式和尺寸稳定性调控机理。

FC05-14

基于消除光散射的褪色彩绘文物显现与加固关键技术研究

汪娟丽^{*}

西北工业大学

彩绘作为历史、艺术与科技的重要载体,其色彩是文化信息的关键元素。褪色问题导致文物美学价值与历史信息流失,亟待科学保护。传统观点认为,出土壁画及陶器彩绘的快速褪色源于颜料遇光及空气氧化分解。本研究认为褪色的核心机制并非无机颜料成分变化,而是由有机胶料(如动物胶、植物胶)老化降解形成的孔隙结构引发多重光散射效应,显著弱化颜料对光的吸收效率,导致视觉色彩模糊。基于此机制,本研究创建了“粘结与填充相结合的彩绘文物病害治理新方法:通过高分子材料与非挥发性液态稳定剂复合配制的加固体系,填充颜料层因胶料降解产生的空气-空隙、粒子间隙及界面孔隙,从根源上消除光散射现象,恢复彩绘原始光学特性与色彩饱和度。实验表明,该方法恢复彩绘文物古朴原貌,且无需依赖传统补色工艺,规避了干预性修复的伦理争议。研究为文物褪色问题提供了兼具科学性与可持续性的解决方案,为文化遗产保护领域的技术革新提供了理论依据与实践范式。

FC05-15

文物保护纳米新材料:从本体防护到赋存环境控制

卜凡兴^{*}

上海大学

石窟寺等不可移动文物和纸质文物等可移动文物是人类重要的文化遗产,但是其在赋存和保存环境中各种物理化学因素的长期耦合作用下,本体材料组分结构发生劣化,出现了各种各样的病害,普遍表现为部分本体材料流失、颜色发生变化、力学性能下降、劣化速度急剧增加。解决上述问题,亟需开发新型文物保护材料。本报告将介绍我们近期在石质文物加固材料、纸质文物脱酸加固材料和环境控制材料方面的研究进展,重点探讨其介微结构及与文物的交互作用对保护性能的影响。主要内容包括:杂化硅氧烷低聚

物、烷氧基钙低聚物、金属-有机配体配合物等石质文物保护材料的设计合成与保护效果研究，磷酸钙低聚物、粘土纳米片等纸质文物脱酸加固材料的设计合成与保护效果研究，及介孔 MOFs 和 COFs 等水和酸性气体吸附材料的设计合成与保护效果研究。

FC05-16

抗菌复合材料的设计合成及其在文物保护中的应用研究

李强*、张秉坚

浙江大学

微生物介导文物材料的生物污损及生物腐蚀等问题日益突出。尽管传统单一组分的有机或无机抗菌剂得到广泛应用，但其在生物安全性、稳定性、可逆性、兼容性等方面有待进一步研究。因此，开发新型的高效抗菌复合材料对于文化遗产的保护至关重要。水凝胶是由亲水性聚合物链通过化学或物理交联形成的三维网络，在文物表面污垢及有机材料的去除方面效果显著。将季磷盐离子液体装载到水凝胶中，并通过调控分子间的作用力，进而实现抗菌剂的缓释。聚乙烯醇水凝胶中多巴胺掺杂可以增强对文物干/湿界面的粘附，抗菌、去污性能提高。基于有机-无机共聚技术，构建磷酸钙寡聚体/醛基化海藻酸钠/氨基化纳米氧化锌抗菌复合材料。无机钙离子寡聚体通过有机物的调控形成兼容性高的羟基磷灰石。醛基化聚合物作为交联剂，通过席夫碱动态共价键和离子键的协同作用，提高了抗菌剂在砂岩基体的稳定性。研究工作为文物保护用抗菌材料的结构设计、制备及应用提供了指导。

FC05-17

一步法无氟制备多功效超疏水材料及其石质文物防风化应用探索

曹颐骥*¹、王聪²、铁付德¹、董文强¹

1. 西北工业大学

2. 西北大学

超疏水表面在功能应用方面的巨大前景受到广泛关注。本研究针对现阶段超疏水材料存在的耐久性差、潜在健康和污染风险及对多孔基体机械强度增强（加固性能）不足等问题，通过调控三甲氧基辛基硅烷（TMOS）、四针状氧化锌（T-ZnO）和纳米 SiO₂ 的摩尔比，开发出一种兼具抑菌、加固性能的无氟超疏水涂层。研究发现，当 TMOS/SiO₂/T-ZnO 摩尔比为 3:1:1 时，制备的三元复合材料涂层性能最优：表面粗糙度达 23.66 μm ，水接触角为 166°，且对革兰氏阳性菌和阴性菌的抑菌率在 2.0 g/L 浓度下分别达到 82% 和 78%。由于三维结构的 T-ZnO 具有各向同性的优异机械和化学稳定性，显著提升了涂层表面粗糙度及其耐化学侵蚀/机械磨损性能（耐磨损循环次数达 100 次）。进一步通过微钻孔测试证实，该涂层可使多孔基材的表层机械强度提升约 20%。机理研究表明，T-ZnO 与 SiO₂ 在 TMOS 原位凝胶化过程中作为三维骨架填料，有效强化了二氧化硅网络结构。多物理场模拟揭示了涂层扩散能力与相对浓度梯度对其力学性能的调控机制。本研究提出的绿色制备策略具有工艺简便、多功能集成等优势，为露天建筑材料、砖石质文物表面防风化材料的设计和规模化制备提供了新思路。

FC05-18

天然水硬性石灰基文物保护材料的改性设计及应用探索

张宏斌*、朱子锐、姬瑜甫、王奕、王金华

复旦大学

天然水硬性石灰（NHL）因其可持续性及其在历史建筑修复中的适配性而备受关注。然而，其硬化时间长、水化速度慢等问题影响了施工性、强度发展和结构耐久性。本研究聚焦于以火山灰活性辅助胶凝材料改性 NHL，重点探究纳米偏高岭土及合成沸石对其性能、微观结构及增强机制的影响。结果表明，纳米偏高岭土及合成沸石作为高效纳米或多孔火山灰材料，显著加速了 NHL 的水化进程，优化了水化产物组成（如促进更多水化硅酸钙凝胶 C-S-H 形成），并致密化了微观结构。这有效缩短了凝结硬化时间，显著提升了材料的早期与后期力学强度、抗水渗透性及体积稳定性。本研究同时探究了实验室养护与实际修复保护过程中水硬性材料的性能发展差异，模拟养护实验表明所研发改性水硬性材料即使在较差的养护条件下

仍能表现出较好的性能发展。该材料已成功应用于云冈石窟、花山岩画等重要不可移动文物的修复加固，表现出优异的兼容性和加固效果，为 NHL 基材料在文物保护领域提供了性能更优越、应用前景更广阔的新选择。

FC05-19

河南巩义大坡墓地出土汉代铁器科技分析及相关问题探讨

樊伟、赵志文、杨浩淼*

河南省文物考古研究院

巩义大坡墓地作为河南地区重要的两汉时期遗址，其出土的铁器为研究汉代冶铁技术提供了珍贵材料。本研究选取墓地出土的铁锛、铁镞、铁刀和铁釜等 8 件代表性铁器，进行系统的显微组织观察与化学成分分析。分析结果表明，这批铁器材质类型多样，包括白口铁、麻口铁等铸造生铁制品，以及脱碳铸铁、韧性铸铁和铸铁脱碳钢等退火制品。大坡墓地不同用途器物在制作工艺上呈现出一定的技术选择性：生活用具均采用生铁材质直接铸造而成，而手工工具和农具则普遍经退火处理。本研究不仅丰富了对两汉时期河南地区生铁冶炼和退火处理技术体系的认识，也为深入探讨汉代冶铁技术的发展演变提供了重要的科学依据。此外，本研究通过大坡墓地出土铁器研究为切入点，结合河南地区出土 363 件铁器的材质工艺分析发现，该时期冶铁业呈现以生铁技术为主导的显著特征。这一技术特征与“盐铁官营”政策密切相关，体现了汉代“技术选择-制度约束”的典型互动模式，为理解中国古代冶金技术与社会制度的相互关系提供了重要案例。

FC05-20

极端服役环境 X 射线显微 CT 开发与应用

李仁庚*¹、杨尚京²、李思纯²

1. 南京工业大学

2. 长三角先进材料研究院

显微原位 CT (4D-CT) 通过集成显微 CT 系统与多场耦合模块，实现了文物在模拟历史保存环境下的无损动态观测。该技术利用 X 射线穿透性获取内部结构三维数据，结合专用原位台可模拟温湿度变化、应力腐蚀等环境。主要优势包括：1. 非破坏性解析制作工艺 2. 真伪鉴别与修复痕迹识别 3. 多材质动态演化监测 4. 铭文与表面信息提取。原位 CT 以微米级分辨率(空间精度达 1 μ m)和多工况模拟能力(-100°C~2000°C)，实现了文化遗产从“静态解剖”到动态无损诊断的跨越，为文物制作技艺解码、真伪鉴定及预防性保护提供了四维时空证据链。

FC05-21

纳米纤维素复合材料用于纸质文物预防性保护研究

闫玥儿*¹、张旭¹、姚晶晶²

1. 复旦大学

2. 上海市质量监督检验技术研究院

纸质文物在长期保存过程中会出现酸化老化现象。准确检测纸张酸度对评估纸质文物的老化状况、延长其保存寿命具有重要意义。不同区域下，纸张酸化程度和酸性分布的快速识别至关重要。在荧光传感技术的启发下，合成了对 pH 敏感的碲化镉量子点和罗丹明 B 荧光探针，并将其负载在细菌纤维素膜的纳米纤维上，实现了对纸张酸度的可视化检测。由于碲化镉量子点和罗丹明 B 探针在 pH 值检测范围上的互补性，复合细菌纤维素膜在酸性到中性 (pH 3.0-7.5) 范围内都能显示出明显的 pH 值响应。更重要的是，改性细菌纤维素膜中两种探针的荧光颜色对比鲜明，可确保肉眼直观地检测纸张的 pH 值和酸度分布。改性细菌纤维素膜检测纸张 pH 值的可行性通过平头 pH 电极法得到了验证。荧光细菌纤维素膜应用于 pH 值梯度分布的模型纸后，可观察到清晰的颜色从红色到绿色的过渡。此外，大多数纸张填料、油墨和颜料中的金属离子以及一些糖类和氨基酸都不会对复合细菌纤维素膜的 pH 响应产生干扰，这表明它在纸张 pH 检测方面具有很大的潜力。

对于酸化的纸质文物而言,脱酸是解决酸化问题、延长保存寿命的重要手段。但与此同时,最小干预和可逆性这两个重要保护指标也应受到重视。受细菌纤维素的优越性能及其与纸张结构高度相似性的启发,制备了矿化细菌纤维素膜,并将其应用于纸质文物的脱酸和预防性保护。通过酶诱导矿化,实现了羟基磷灰石(HAP)和碳酸钙(CaCO_3)纳米颗粒在细菌纤维素网络纳米纤维上的均匀高负载矿化。通过调节酶浓度和矿化时间,有效地控制了矿化无机物的大小、形貌、结构以及碱性和碱储量。与传统的HAP/ CaCO_3 浸渍脱酸法相比,HAP/ CaCO_3 矿化细菌纤维素膜表现出更高效、持久的脱酸性能。细菌纤维素膜的多尺度纳米通道为纸张和细菌纤维素膜之间提供了离子交换和酸碱中和通道。最重要的是,这种矿化细菌纤维素脱酸方法是可逆的,细菌纤维素可以随时从纸质文物中去除,且不会对其造成任何伤害,保证了纸张的原始结构和纤维形态不被改变。更为巧妙的是,矿化细菌纤维素膜独特的有机-无机复合结构使其具有优异的阻燃性能,实现了对纸质文物的高效阻燃保护。以上结果表明,矿化细菌纤维素膜可以作为有效的纸质文物可逆脱酸和预防性保护新材料。

FC05-22

陶制文物常用粘接材料的评价及改性研究

张彪*

陕西科技大学

陶制文物作为人类历史和文化遗产的重要组成部分,有着独特的艺术价值和深厚的历史意义,是人类文明发展历程的见证。然而,由于自然环境的影响和人为活动的破坏,这些珍贵的陶制文物正面临损毁,急需保护和修复。为了保护和修复这些文物,本研究通过秦东陵土压坯烧制以模拟出土陶制文物,并使用三种不同类型的陶制文物修复常用有机粘接材料进行粘接,随后进行长时间的老化实验,系统研究了几种粘接材料在不同老化条件下的性能变化,并探讨了苯甲基硅树脂单一改性、T-CaSiO₃与苯甲基硅树脂协同改性环氧树脂对树脂颜色、化学键变化、力学性能、湿热老化、紫外老化等方面的影响,分析改性环氧树脂在陶制文物修复中的应用。结果表明:环氧树脂在粘接强度和紫外光照条件下表现优异,苯甲基硅树脂的添加显著改善了环氧树脂的耐湿热性,T-CaSiO₃与苯甲基硅树脂协同改性显著提高了环氧树脂的耐湿热和耐紫外老化性能。本研究不仅为陶制文物的保护和修复工作提供了科学的基础,同时也为文物保护技术的进步提供了重要的支持。

FC05-23

铅丹热致可逆转变的原位拉曼研究

李泉水、李岩、马俊杰、王凤平*

北京科技大学

铅丹(Pb_3O_4)是最早由人工制备的颜料之一,通过煅烧铅白(水白铅矿, $2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$)制得,公元前5世纪的中国即已使用。铅丹广泛存在于壁画、彩绘和油画等艺术品中。常温下铅丹性质稳定,但在500°C以上会还原为黄铅矿(PbO)。随后,在特定条件下,黄铅矿可随温度降低快速重新氧化为铅丹。然而,这一转变过程及其再氧化条件尚不明确。因此,本研究通过原位拉曼技术观测铅丹的可逆转变过程,并探究其可逆条件。通过研究发现,还原过程始于570°C,路径为 $\text{Pb}_3\text{O}_4 \rightarrow \alpha\text{-PbO} \rightarrow \beta\text{-PbO}$;再氧化过程始于560°C,420°C完成,路径为 $\beta\text{-PbO} \rightarrow \alpha\text{-PbO} \rightarrow \text{Pb}_3\text{O}_4$;570~600°C区间内, $\beta\text{-PbO}$ 与 $\alpha\text{-PbO}$ 可完全再氧化为 Pb_3O_4 ,且三者转变同步进行;温度升降方向决定反应路径,超过600°C或惰性气氛(如Ar)会导致不可逆转变。

FC05-24

抗菌超疏水型砂岩文物用纳米复合涂层的构筑与应用

刘俊莉*, 易云霄, 朱建锋*, 刘辉

陕西科技大学材料科学与工程学院(文物保护科学与技术学院)

中国历史源远流长,传统文化更是博大精深,文物作为历史的物证,具有重要价值和不可再塑性。然

而，文物的损坏、自然风化、潮解、霉变等问题一直困扰着无数学者。因此，如何更好地将文物保存并传承下去，成为文物保护学者们的研究课题。凹凸棒石（Pal）作为一种黏土矿物，具有天然的纳米棒状结构，且其组分与砂岩类文物相似，易于负载各类材料，可用于砂岩文物的保护。然而，凹凸棒石本身无法成膜，具有易脱落、抗菌及耐水性差等缺陷。

基于以上研究背景，本研究通过负载离子改性、表面修饰等手段对 Pal 进行微结构调控。首先，在普鲁士蓝/凹凸棒石纳米复合材料（CuFePBA/Pal）上，引入银离子（ Ag^+ ），通过电化学置换法对材料进行改性，得到灰白色的银离子改性铜铁普鲁士蓝类似物/凹凸棒石（ $\text{Ag}^+\text{CuFePBA/Pal}$ ）纳米复合材料。接着，引入 1H,1H,2H,2H-全氟癸基三乙氧基硅烷，采用溶胶-凝胶法在砂岩文物模拟试块上构建氟化硅烷包覆银离子改性铜铁普鲁士蓝类似物/凹凸棒石（ $\text{Fluor@Ag}^+\text{CuFePBA/Pal}$ ）抗菌超疏水文物保护涂层，氟化硅烷与 $\text{Fluor@Ag}^+\text{CuFePBA/Pal}$ 纳米复合材料脱水缩聚，提高了涂层的疏水及抗老化性能。实验结果表明：复合涂层色差 ΔE 为 0.11，肉眼无法分辨颜色区别；其对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抗粘附率均为 99.9%。砂岩模拟样块经营养化处理并接种混合菌液后，培养 90 天菌斑覆盖面积约占整体面积的 17%左右；再次喷涂涂层后，持续观察 90 天，未出现菌斑。复合涂层的静态接触角可达 162.0° ，且经紫外老化处理三周后，水接触角为 151.5° ，经高温高湿老化处理四周后，水接触角为 150.2° ，表明所得复合涂层具有良好的耐紫外老化和湿热老化性能。本研究为凹凸棒石基纳米复合涂层在砂岩等文物表面防护、应用与发展奠定了理论与技术基础。

FC05-25

安徽淮南武王墩一号墓出土编钟架的制作工艺研究

温婧琦*

国家文物局考古研究中心

本研究对安徽淮南武王墩一号墓出土的彩绘漆木编钟架进行了系统的科学分析，旨在揭示战国晚期楚国高等级漆器的制作工艺特征。采用色差仪、便携式显微镜、曲面微区 X 射线荧光光谱（XRF）、激光拉曼及热裂解气相色谱-质谱（Py-GC/MS）等多种无损及微损分析技术，对编钟架的装饰图案、颜料成分、绘制工艺及漆膜成分进行了综合研究。结果表明，编钟架立柱主要饰有凤鸟纹，朱砂（ HgS ）、雌黄（ As_2S_3 ）及碳酸钙（ CaCO_3 ）等为主要颜料，成膜材料为中国漆，并添加植物油调制成色漆。凤鸟纹饰色彩鲜明，布局庄重，充分体现了战国晚期楚国漆艺的高度发展及贵族墓葬礼制的重要性。研究结果为楚国漆器的工艺技术研究提供了关键参考，并为高等级漆木器的保护与复原提供了科学依据。

FC05-26

土遗址加固材料研究新进展

王锋*

国家文物局考古研究中心

土遗址是具有历史、艺术和科学价值的土质人类活动遗迹，其本体由较为脆弱的土质材料组成。在自然、人类活动等因素诱发下，土遗址常出现裂隙变形、掏蚀、坍塌、片状剥蚀等病害。除了采用锚固、支顶加固等物理方法提高土体的稳定性外，使用各类加固材料处理也是增加土遗址整体结构强度的重要措施。梳理近 5 年国内外土遗址加固材料的研究发现，微纳米、生物矿化、材料复合改性等技术越来越多地应用于土遗址保护领域。针对干旱半干旱地区的土遗址，在传统材料基础上，研究者不断研发微纳米氢氧化钙及其复合材料、微生物或酶诱导碳酸钙沉积（MICP/EICP）、聚丙烯酸-丙烯酰胺-2-丙烯酰胺基-甲基丙磺酸复合材料（P(AA-AM-AMPS)）等材料或技术，已形成了较为成熟的研发应用体系，但在抗冻融、防盐害等方面仍需突破；而针对潮湿地区的土遗址，虽然也研发了无机胶凝复合材料、无机矿物聚合物等新材料，但大多处于对样块的模拟实验阶段，在实际场景下的应用效果有待更多验证。通过对比各类材料的制备、评价和应用情况，以期对土遗址加固材料的研究提供思路。

FC05-27

有机酸对馆藏文物的腐蚀危害

张然*^{1,2}、毋妍^{1,2}、李沫^{1,2}、吴娜^{1,2}、王克青^{1,2}、晏德付^{1,2}、许梦颖^{1,2}、李路希^{1,2}、李朝晖^{1,2}、成小林^{1,2}

1. 中国国家博物馆

2. 金属文物保护国家文物局重点科研基地（中国国家博物馆）

本报告介绍有机酸对各类文物材质的腐蚀机理、病害现象和案例分析。馆藏环境有机酸特别是甲酸、乙酸来源广泛。多种文物本体材料、装修家具材料、环境控制材料和文物保护和标记材料都会释放有机酸，在相对密闭的环境中会积累到较高浓度，引发各类文物材质的腐蚀劣化。有机酸会引发金属（铅、铁、铜、锌、镉等）腐蚀，其中对铅的腐蚀最严重，会形成“铅花”病害。含有碱性钠钾化合物的铜质品也易受有机酸腐蚀，生成铜钠或铜钾复盐，其中钠钾的来源包括铸造工艺、埋藏环境、使用过程、保护修复过程引入以及连接的其他材质（如玻璃或珐琅）等。有机酸对石灰质（部分陶瓷、粘土、砖瓦、化石、矿石、贝壳、蛋壳、珍珠、珊瑚、骨角牙等）的腐蚀通常表现为泛盐，其中对贝壳的腐蚀被称为“拜恩病”或“拜恩泛盐”；苏打玻璃也容易受有机酸腐蚀形成晶体或渗出溶液；醋酸纤维素胶片则有“醋酸综合征”病害，释放乙酸的同时不断加速劣化；此外，有机酸还会造成纸张纤维素降解，以及颜料变色等。中国国家博物馆文保院团队从 2020 年起持续关注有机酸对馆藏文物的腐蚀，至今已发现相关文物案例 48 例，有机酸盐类腐蚀产物 13 种。

FC05-28

从界面粘附角度探讨高强度水凝胶对中国纸质艺术品的保护性清洁

陈强*

国科温州研究院（温州生物材料与工程研究所）

迄今为止，宣纸水墨画文物的清洁与保护一直是一项精细且具有挑战性的任务。宣纸由表面粗糙的纤维素构成，易吸附灰尘，这导致传统清洁过程中清洁效果不佳且可能造成不可逆损伤。水凝胶是清洁艺术品最有效的工具之一，然而在宣纸清洁实践中，由于界面粘附问题，多数水凝胶难以实现精细的清洁效果。在此，为对宣纸的保护性高效清洁，本研究以物理强度高、刚度适宜的聚乙烯醇 / 聚 (N- (2 - 羟乙基) 丙烯酰胺) (PVA/PHEAA) 水凝胶为模型，系统研究了水凝胶与宣纸之间的界面粘附行为，并采用多种技术评估清洁效果。研究发现，当界面粘附能低于 4 J/m^2 时，可实现保护性高效清洁目的。据我们所知，这是首篇评估水凝胶在纸质艺术品清洁中粘附作用的报告，将为文物保护实践提供新视角。

FC05-29

龙村遗址出土彩陶制作工艺及产地研究

肖娟英*

四川省文物考古研究院

孔龙村遗址位于四川省阿坝藏族羌族自治州马尔康市脚木足乡，是一处距今约 5500—4800 年的新石器时代晚期遗址，分布面积约 10 万平方米。该遗址出土的陶器类型丰富，其中彩陶占有重要地位。本研究采用多学科科技分析手段，包括 X 射线荧光光谱 (XRF)、电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS)、扫描电镜-能谱分析 (SEM-EDS)、傅里叶变换红外光谱 (FTIR)、X 射线衍射 (XRD)、偏光显微镜、拉曼光谱及热膨胀分析等，对遗址出土彩陶的胎体成分、颜料类别、制作工艺及产地进行了系统性研究。结果表明：（1）孔龙村彩陶的制作工艺可分为两类，可能对应不同的生产来源；（2）彩陶烧成温度普遍较高，均达 900°C 以上，反映了新石器时代晚期彩陶烧制技术的成熟。本研究为探讨川西高原史前彩陶的生产体系及区域文化交流提供了重要科学依据。

FC05-30

馆藏贝叶经典型污染物综合分析

邵慧琪*¹、成小林¹、杨琴¹、李娜²、吴娜¹

1. 中国国家博物馆

2. 中国文化遗产研究院

贝叶经是最古老的文献典籍形式之一，具有重要的历史文献价值，因其特殊的叶片材质极易受到外界因素影响而产生病害。通过对国博馆藏两函贝叶经保存状况进行调研，其表面存在水渍、漆渍等典型污染物，这些污染物直接影响贝叶经的外观形貌，甚至可能危害文物本体稳定性。本研究针对两函馆藏贝叶经文物，采集其可见反射图像和紫外荧光图像，使用便携式 pH 计、色度仪对水渍和无水渍区域的物理性质参数进行测试，结果表明紫外光条件下水渍线更加明显，水渍区域容易区分，且水渍区域的 pH 值降低，出现了明显色差。大面积微区 X 射线荧光成像和傅里叶变换红外光谱 ATR 测试结果表明，水渍区域 K、Ca、P、S、Mn 等元素出现聚集，纤维素和半纤维素的相对含量降低。使用微区傅里叶变换红外光谱仪对漆渍污染物进行分析，结果表明，漆渍样品中存在动物胶，然后使用热裂解气相色谱质谱仪进行分析，表明样品为干性油。同时棕榈酸和硬脂酸 P/S 比为 1.35，符合桐油的 P/S 区间。此外，在样品中识别到了 9-(邻丙基苯基)壬酸甲酯，进一步确认样品为熟桐油。本研究基于多种分析技术对贝叶经典型污染物进行综合表征，为贝叶经的科学合理保存提供了基础，对贝叶经污染的清洗和去除具有重要的指导意义。

FC05-31

基于 GRA-GEP 融合算法的古建筑木构件无损检测关键性能指标的预测模型研究

程丽婷*

故宫博物院

古建筑木构件的内部劣化（如蛀蚀、腐朽、裂隙）及力学性能退化是威胁其结构安全与历史价值延续的关键因素。传统的目视检测和局部取样方法存在主观性强、破坏性、信息有限等弊端，难以满足精准评估与预防性保护的需求。本研究提出并实践了一种融合多维度无损检测（Multi-Dimensional Non-Destructive Testing, MD-NDT）技术的创新方法，结合灰色关联度分析方法（GRA）和基因表达式编程算法（GEP），建立木构件的弹性模量预测模型，旨在实现对古建筑木构件内部状态与性能的全面、精确、无损解析。

FC05-32

原位无损光谱技术在大幅面油画颜料识别和创作技法分析上的应用研究

赵丹丹^{*1}、黄燕³、杨琴^{1,2}、吴娜^{1,2}、李毓^{4,5}、张拓¹、颜宇¹、郝铎颖⁶

1. 中国国家博物馆

2. 金属文物保护国家文物局重点科研基地（中国国家博物馆）

3. 常德市鼎城区文物保护中心

4. 中国科学院高能物理研究所

5. 文物领域核技术应用与装备国家文物局重点科研基地（中国科学院高能物理研究所）

6. 中国科学技术大学

分析技术和设备应用于文物保护受文物尺寸和现场条件影响较大。馆藏大幅面油画具有可移动和不便移动双重属性，有必要探索其快捷、有效的分析检测流程和技术。本文以两幅中国国家博物馆藏的大幅面油画为研究对象，依据其文物特征和现场条件，筛选出几种无损检测技术：多光谱摄影技术、X 射线荧光面扫描技术、光纤反射光谱技术和高光谱成像技术，联合应用于其颜料识别和创作技法研究。结果表明，依托多光谱成像，高光谱成像与大幅面 X 射线荧光成像技术等宏观成像技术的聚类分析结果可以获得油画的创作技法信息和颜料的分类；随后根据绘画表层颜料的分布对多光谱图像进行分割，可确定颜料分布区域；最后采用光纤反射光谱技术对颜料层进行信息解读，运用图像数字提取技术将颜料分布和颜料材料信息相关联，可较为准确的识别油画表层的颜料分布信息。通过几种操作较为便捷设备的综合运用，可快速、准确地获取大幅面油画丰富的潜在信息，包括油画的光油层与底稿层信息、创作过程中的修改与隐藏信息、颜料种类及分布信息。

本研究建立的应用光谱技术开展油画原位无损快速分析检测的流程和方法，适用于大部分同类油画藏品，为建立中国大幅面油画分析检测技术规程提供重要参考。

FC05-33

古旧书画传统修裱技艺科学化提升

邢惠萍*、胡道道、何贝

陕西师范大学

书画文物能够源远流长，得益于传承了上千年精湛的修裱技艺，但修裱后书画在长期收卷过程中再次发生折痕、断裂，使书画文物长期处于反复修裱过程中。因此，破解这难题，对保护优秀书画文化遗产、提升其艺术价值和观赏性、传承其历史与文化价值、展现独特的民族文化具有重要的作用。

本文从书画文物传统修裱技艺工序出发，围绕各主要修复工艺中存在影响书画耐久性的问题，从清洗过程中书画颜料亲水微凝胶加固研究、小托过程中缩水甘油醚改性纳米纤维素加固折痕研究、大镶过程中不同叠层之间纸张力学匹配研究等角度，对传统书画修裱过程进行了全面的梳理与提升研究，为传统书画修裱工艺科学化研究，更好的传承珍贵书画文物提供技术支撑。

FC05-34

米氢氧化钙有机凝胶的制备及壁画表面失效保护材料去除研究

朱金萌*

西北工业大学

有机凝胶将能有机溶剂锁定在聚合物网络中，在防冰、抗生物污染、文化遗产保护等方面有应用前景。但其合成方法仍较为复杂且成本较高。本文介绍了一种简单且经济的制备方法，即通过结晶诱导聚合物沉淀来制备有机凝胶，其过程涉及将含羰基的聚合物、纳米氢氧化钙和过量乙酸乙酯直接混合。在形成过程中，纳米氢氧化钙与乙酸乙酯反应生成乙醇和醋酸钙，其中聚合物的羰基与醋酸钙中的 Ca^{2+} 形成离子键。由于醋酸钙在乙酸乙酯和乙醇中的溶解度较低，从而引发结晶。醋酸钙与聚合物之间的相互作用使聚合物从溶剂中分离，形成一种网络结构，将多余的乙酸乙酯和乙醇锁定其中。更为重要的是，这种有机凝胶不仅可以加入其前驱体中的 12 种有机溶剂进行包封并形成凝胶，还能有效去除壁画上的各种失效聚合物保护材料，且不会留下残留物。

FC05-35

阻燃抑菌涂层体系与木材可逆保护研究

冯蕊*、张亦婷

西北工业大学

古木建筑、桥梁、木牍等木质文物是不可再生的宝贵文化遗产，具有重大历史、科学和文化价值。因其纤维素有机质的基本构成，面临严峻的破损、霉菌与火灾损毁威胁。传统高分子树脂类保护材料虽能有效改善上述问题，但难以安全去除，难以满足文物可逆性保护原则。本研究基于动态键构建了一种多元复合涂层材料，通过涂层组分-结构-性能（阻燃等级、抗菌率、透明度、水活化分解）的关联规律研究与配方优化，该涂层材料在不影响木材外观的基础上，可协同实现木材的阻燃与抗菌保护。同时，该涂层可通过水活化从基材表面去除，实现固化涂层的无损剥离与基材的无残留再生，对于文物的可逆高效保护具有重要意义。

FC05-36

生物酶可控变性表面自组装纸质文物霉渍去除新策略

曹静*

西北工业大学

纸质文物在流传以及长期保存的过程中易受霉菌侵害形成霉渍，加速纸张的老化，从而严重影响其寿命与承载文化信息的完整性。而传统纸质文物霉渍去除技术通常存在二次损伤、缺少治防一体化等应用局限。为此，本项目提出了生物酶可控变性表面自组装实现去除纸质文物霉渍的新思路：通过探究二硫键选择性断裂对生物酶构象的影响规律，调控二硫键断裂的选择性还原途径，从而实现生物酶可控变性及其对纸张霉渍的有效去除；拟采用光谱学、显微学及分子动力学模拟等方法，系统研究可控变性生物酶在纸张表面的自组装行为，明确其与纸张相互作用机制，从而有效调控生物酶在纸张表面的活性与稳定性；应对纸张霉渍的复杂成分，设计构建系列多酶协同与级联霉渍去除新体系，考察其在霉渍治防一体

化过程的实施效果,明确 多酶协同效应与级联机制,进一步优化“降解-修复-防护”全链条一体化治防体系,以期推进生物酶可控变性自组装体系在纸质文物除霉领域的研究进程。

FC05-37

正硅酸乙酯加固遗址土体的效果及作用机理研究——基于初始含水率与环境湿度的耦合影响分析

徐树强*

山东大学

为了探究初始含水率与环境湿度耦合作用对正硅酸乙酯加固遗址土体效果的影响及作用机理,继而为获得更好的土遗址防风化加固保护效果所需技术参数提供依据,本研究以山东定陶 M2 汉墓外围夯土遗存防风化加固保护为例,模拟制备了 0%、5%、10%与 14.5%初始含水率的重塑夯土试样,采用正硅酸乙酯加固后分别置于 35%、65%与 85%相对湿度条件下养护 28 天,测试不同试样加固前后的基本物理、力学与耐久性能,并通过扫描电镜、红外光谱及 X 射线光电子能谱等微观测试分析阐明了机理。研究表明,正硅酸乙酯主要通过水解反应生成 Si-O-Si 基团加强了土体颗粒间的连接并起到一定填充孔隙的作用,并且土体初始含水率与环境湿度对这一效应产生显著影响。在相同湿度养护条件下,正硅酸乙酯对低含水率(本文中 0%与 5%)土体的力学性能与耐久性能改善效果更优,而对高含水率(本文中 10%与 14.5%)土体加固效果微弱。对于相同含水率的土体,过高的养护湿度条件(本文中 85%)不利于正硅酸乙酯发挥加固效果。本研究的成果对正硅酸乙酯加固土遗址的适用性、工艺参数和加固效果的优化具有重要的参考意义。

FC05-38

缩水甘油醚在文物照片增韧与抗卷曲修复中的应用研究

刘姣姣*

西北工业大学

明胶-纸基文物照片表界面易发生脆性卷曲、折条甚至断裂成渣等自毁性病害,严重威胁此类文物的安全。然而,人们对其界面结构、病害机制、修复新材料缺乏关注。基于此,本文研究主要包括以下 3 个方面:(1)基于干湿交替诱发照相明胶构象变化的病害机制。调研了民国时期严重脆化卷曲、断裂的巨幅文物照片病害现状,探析了文物照片劣化界面结构组成与卷曲成因;通过调控干湿交替循环参数制备不同收缩率的明胶薄膜样品,获取不同样品微观形貌、分子结构、结晶度、官能团变化之间的内在关联,揭示干湿环境诱发明胶薄膜收缩与明胶超分子相互作用的构象变化规律。(2)缩水甘油醚增强照相明胶湿热老化性能研究。研究了丙三醇三缩水甘油醚、乙二醇二缩水甘油醚等多元醇缩水甘油醚/明胶复合薄膜,在高湿和高温加速老化环境下的溶胀行为、分子结构、机械强度、断裂截面等性能,从宏观尺寸、微观结构、表面性能和力学性能等方面揭示了复合薄膜的抗湿热老化机制。(3)脆化卷曲文物照片修复保护应用研究。在病害机制和缩水甘油醚抗老化性能认知基础上,提出了基于缩水甘油醚增塑和交联协同作用的文物照片增韧和抗卷曲新策略,并设计了溶胀、展平、定型等修复保护工艺,成功实现了民国时期严重脆化卷曲文物照片的完整修复。为珍贵涂层纸基文物修复保护提供理论和技术支持。

FC05-39

GIS 视野下的陕西明长城堡军事聚落时空分布特征量化研究

杜昱民*

西北工业大学

本研究以榆林镇明长城防御体系“三十六营堡”与大边、二边防线构成的堡军事聚落作为研究对象,结合明长城修筑时序及敌军入侵顺序等因素,利用 GIS 技术对明长城核密度分布、坡度及坡向分布、河流系统进行深入研究,确定影响堡军事聚落的自然因素;基于文献史料记载,结合克里金插值法得出榆林镇防御体系的军力分布云图,重点对骑兵、步兵两种兵种的数量及密度进行系统研究,引入军力可达域分析堡中驻军抵达大边、二边的空间距离及所需时长,进而从时空角度剖析榆林镇防御体系的军事布局及调度情况;结合自然及军事两种要素,引入 XTENT 重力模型量化表征堡军事聚落在榆林镇明长城防御体系的影响力,并应用主成分分析法对自然因素、军事要素进行权重计算与排序,得出影响榆林镇堡军事聚落分布

的重要因子，深入揭示明长城建筑布局规律及我国古代军事思想的科学性。

FC05-40

竹质文物的人工模拟老化及其降解机理

赵婷、程卓越、秦毅、朱建锋*

陕西科技大学

竹质文物承载着中华文明的发展历程，是历史文化研究的关键实物。因其埋藏期间长期受地下水侵蚀，大多呈现饱水状态；出土后的环境骤变易导致竹筒开裂、剥离及变形。然而，系统性研究脱水、定型、防护与修复技术时，缺乏有效的真实饱水竹质文物样本，因此人工模拟老化竹质文物的制备具有重要实践意义。本研究分别采用水浴法和水热法在氢氧化钠（NaOH）溶液中实施竹质文物人工模拟老化，深入探究了水浴处理时间与水热 NaOH 溶液浓度对模拟竹筒样品含水率、微观结构、形貌特征、化学成分及物理性能的影响，并阐明其降解机制。结果表明：人工降解模拟竹质文物的最大含水率可控制在 200%–650%之间，样品质地柔软呈海绵状，符合既有文献报道的饱水竹质文物特征；NaOH 溶液会促进半纤维素和木质素的优先降解以及无定形纤维素的部分降解，且水热法对该过程的加速效应尤为显著。随着水浴时间延长，模拟样品的最大含水率变化较小（稳定在约 200%），但强度与硬度显著下降；相较之下，水热法在高温高压条件下破坏了竹材表面致密结构，随着 NaOH 浓度升高，化学反应速率加快，半纤维素、木质素及纤维素降解程度加剧，导致薄壁组织与纤维组织塌陷，样品孔隙率与含水率上升（最高达 $594.70 \pm 32.01\%$ ），力学性能急剧劣化。本方法为不同含水率竹质文物的模拟制备提供了重要参考，为后续竹质文物加固材料及评价体系研究奠定基础。

FC05-41

浙江地区明清木质基底彩画的材质工艺与保护材料初探

沈灵*

浙大城市学院

浙江地处我国东南沿海，气候湿润，具有冬冷夏热的特点。该地区彩画多见于民居建筑，分布零散且保存状况普遍不佳，有关其材质工艺、病害机理等基础研究报道相对匮乏。本研究选取浙江 20 处明清时期彩画遗存，通过现场调查与微损采样，初步厘清了其绘制工艺流程。本研究突破了以往认为浙江地区彩画主要为无地仗或薄地仗的认知：自明代起，当地已广泛采用桐油混合铅白作为基底；至清代，部分地区则发展出使用地仗的工艺，主要分为以方解石为基底的类型和使用“土地仗”（部分构件甚至为多层结构）的类型。在病害方面，除潮湿环境引发的霉菌滋生、颜料剥落及水渍外，浙江彩画普遍存在含铜颜料黑变现象，这对彩画色彩原貌的判定与断代造成影响。基于上述材料工艺分析，本研究制备了多种类型的彩画模拟试样，并针对南方特有的潮湿环境与温度变化，开展了干湿循环老化实验，系统比较了明胶、丙烯酸类材料及水性氟碳树脂在加固效果与耐久性能方面的差异。

FC05-42

藏式古建筑外墙土质饰面材料综合分析-以布达拉宫为例

伍洋*¹、达桑²、戴仕炳¹、张吉伟¹

1. 同济大学

2. 布达拉宫管理处

作为中国传统建筑的组成部分，藏式古建筑历史悠久，特点鲜明，具有重要的研究与保护价值。随着气候变化降雨增多，以及城市扩展带来的粉尘污染，以土为主要材料的藏式古建筑外墙饰面病害加剧。本文基于对布达拉宫外墙饰面的现场调查，综合采用偏光显微镜、XRD、XRF 以及色谱法对饰面材料进行矿物学、化学成分分析，揭示“甜墙”主要由高岭土、牛奶和白糖以及少量骨胶组成。通过水蒸气透过性、热传导性以及耐水性等物理性质测试，表明传统土质饰面材料具备良好的透气与隔热性能，可对内部石墙起到保护作用。但耐水性较差，需进行改良研究。研究成果可从材料学角度阐释藏式建筑土质饰面的劣化机

理，并为后续建筑外墙保护提供参考。

FC05-43

齐国刀币的标准化生产研究——基于临淄齐古城出土战国铸币遗存的科技分析

马仁杰、崔剑锋*

北京大学考古文博学院

金属铸币的起源和古代经济的货币化长期以来一直是考古学和经济史的研究重点。东周时期，商品经济空前繁盛，金属铸钱开始登上历史舞台，直至被秦半两统一，四百年来的金属货币发展出了种类形制极其复杂的货币体系。然而，关于早期铸钱遗址的最直接的考古信息很少发现。2019年，考古学者在齐国临淄故城的小城西门外地点发现大规模铸钱遗物，初步判断为一处铸钱废弃物堆积坑，这为系统研究战国晚期齐国铸钱业的技术水平和产业规模提供了可能，对于研究秦统一货币之前早期货币的标准化历程至关重要。总之，齐国各时期的金属货币形制特征鲜明，流行时间明确。在这样一个清晰的年代框架之下，窥探齐国金属货币背后的生产背景与流通范围，正是研究齐国经济状况和社会文化的一个很重要的切入点。

综合分析显示，战国晚期齐国铸钱手工业，在冶炼技术、制范工艺、合金配比等生产环节上，遵循相辅相成、环环相扣的发展轨迹。制作钱范采用夹砂灰陶，粉砂含量适中，含有一定粘土成分，热膨胀率明显更低。钱范表面存在均匀的分型涂层。这些都是综合钱币合金配比特征，出于控制产品形变，标准化生产的需求而特别选取的制范工艺。该遗址存在冶炼含硫铜铅矿石得到冰铜，并加入锡料进行合金化的工艺，或许还存在冰铜精炼后，加入锡铅原料配制合金的过程，这样的冶炼技术能够大幅提高铜铅合金的生产效率。

炉渣、钱范和“齐大刀”基本都属于一类相同的高比值铅，这是山东半岛地区首次确证的利用这类铅资源的冶铸遗物。以上分析进一步明确战国时期齐国铸钱铅料来源的演变与合金成分的变迁高度同步。个别铸钱遗物的资源特征与燕明刀十分接近，亦符合辽东地区铅矿的特性。不排除齐国最开始使用的高比值铅原料来自于本地，而部分高铀铅原料或许在燕据齐地之后才出现。总之，以上分析充分揭示出战国晚期“齐大刀”的生产具有高度的标准化，表现在其冶炼技术高效便捷、制范工艺统一稳定、产品材质均匀一致，矿料来源相对固定。统一化、标准化的铸钱生产，正是田齐时期垄断货币铸造权、发展商品经济的直观体现。

FC05-44

Effectiveness evaluation of silicone oil emulsion in-situ polymerization for dehydration of waterlogged wooden artifacts

吴梦若*

北京科技大学

Organosilicon materials have shown potential as dehydration agents for waterlogged wooden artifacts. These materials can polymerize under normal conditions to form polymers with favorable mechanical strength, antibacterial properties, and aging resistance. However, the insolubility of most organosilicon hindered their penetration into waterlogged wood, which may lead to an unwanted cracking. This study aimed to evaluate the effectiveness of polydimethylsiloxane (PDMS) and hydroxy-terminated polydimethylsiloxane (PDMS-OH) with low viscosity and moderate reactivity for dehydrating waterlogged wooden artifacts from the Nanhai No.1 shipwreck. Four surfactants ((3-aminopropyl) triethoxysilane (APTES), alkyl polyoxyethylene ether (APEO), tri-methylstearyl ammonium chloride (STAC), and fatty alcohol polyoxyethylene ether (AEO)) and cosurfactant composite systems were employed to transform the two kinds of water-repellent silicone oils into 8 groups of highly permeable oil-in-water (O/W) emulsions. Under the catalysis of a neutral catalyst, in-situ polymerization occurred within the wood cells. Group P2-2 formulated with PDMS-OH and APEO showed best efficiency in maintaining the appearance of the wood during dehydration. The dehydrated wood exhibited a natural color and texture with a minimal volume shrinkage rate of 1.89%. The resulting polymer adhered uniformly to the cell walls,

providing effective reinforcement to the wood cell structure. The weight gain rate of the wood was only 218%, and the pores of the cell lumen were well maintained for future retreatment. This method effectively controlled the sol-gel reaction process of the organosilicon and prevented damage to the wooden artifact during the dehydration process. Moreover, the dehydrated wood samples only experienced a low weight gain of 17% at 95% relative humidity (RH), indicating their great environmental stability.

FC05-45

古旧书画无胶矾修裱研究

邢惠萍*、胡道道、尚小临、何贝、李思杨、陈锐、王思敏、张景怡

陕西师范大学

中国传统书画历史源远流长，古旧书画仍能保留至今，得益于传承了上千年的优异装裱与修裱技艺。施胶矾是传统书画修裱工艺的最典型特征。施胶矾不仅在书画修裱中起到固色、防洇化等作用，而且在增强糟朽画芯力学强度、缩小新旧纸张伸缩差异性、实现修裱工艺的可操作性等方面发挥着极其重要的作用。正是胶矾在书画修裱中的多重功能，使糟朽书画在传统简洁修裱工艺实施中，实现了古旧书画艺术风格及收展功能的有效恢复。遗憾的是，施胶矾修裱书画存在着众所周知的脆性老化难题。长期以来，尽管为此众多学者开展了大量研究，但一直缺乏应对良策。施胶矾修复书画耐久性改性、施胶矾修裱多功能性工艺替代，成为破解施胶矾修裱书画脆化断裂千年难题的最大挑战。

本文介绍了陕西师范大学历史文化遗产保护中心无胶矾书画修裱的探索与实践。依据固色、全色、小托、镶活、大托等书画修裱主要工艺过程，阐释了应对胶矾多功能需求的多工序衔接无胶矾书画修裱全程工艺，结合微观结构与宏观性能关联性研究，揭示无胶矾与传统施胶矾修裱书画性能的共性与差异性机制，为探索古旧书画传统修裱技艺传承创新之策，开拓新思路、开辟新路径。

FC05-46

内蒙古鄂托克 8 号遗址馆恐龙足迹化石风化治理研究

代黎洋*

北京科技大学科技史与文化遗产研究院

恐龙足迹化石是恐龙在湿度、粘度、颗粒度适中的地表行走留下的脚印所形成的化石，其形成和保存环境十分少见。恐龙足迹化石对研究恐龙的生活习性、运动方式、古生态环境以及古地理等方面都具有重要意义。内蒙古鄂托克旗查布地区的下白垩统地层中所发现的恐龙足迹化石，种类丰富，数量庞大，世所罕见，具有极高的科研、科普以及美学价值。但遗憾的是目前很多恐龙足迹化石都面临严重风化问题，尤其是在原址保护的 8 号遗址馆，遗址馆室内的足迹化石出现了不同程度的风化现象，表现为化石表面逐渐破碎酥粉，足迹变得模糊不清，直到完全消失。因此，亟需找出引起馆内足迹化石产生严重风化问题的原因，并开发出相应的防风化材料与技术，为足迹化石的抢救性保护提供科学支撑。

为解决内蒙古鄂托克 8 号遗址馆馆内的恐龙足迹化石面临严重风化的现实问题，首先对恐龙足迹化石出现严重风化现象的产生原因进行科学研究，采用岩性分析、可溶盐分析、孔隙率和孔径分布测试等多种科学技术手段，关联馆内环境监测数据，通过模拟加速盐风化实验和冻融实验分别验证其对足迹化石风化的影响，最终确定影响足迹化石严重风化的主要因素。其次，针对馆内严重风化足迹化石亟需保护材料的问题，选取两组有机硅类的保护材料作为足迹化石风化治理的防风化材料，通过对保护处理前后的渗透性、疏水性、硬度、色差、耐盐及耐冻融等方面的综合效果进行评估，筛选出符合需求的防风化材料，以实现足迹化石的科学有效保护。

结果表明，鄂托克 8 号遗址馆内恐龙足迹化石遭受严重风化的机理是由于馆内的足迹化石中含有大量可溶盐，主要为 NaCl 和 Na₂SO₄。受温度和降雨等因素影响，化石内部发生强烈的水盐运移活动，导致水分不断将盐分运移到化石表面。然而，由于化石表面加固涂层硝基清漆的阻碍，水分难以蒸发，盐在界面处积累并不断地进行溶解/结晶过程，最终形成酥粉状的盐风化现象。根据模拟实验结果，可溶盐 Na₂SO₄是导致鄂托克 8 号遗址馆内恐龙足迹化石产生严重风化现象的主要原因，而冻融作用的影响相对有限。

针对适用于鄂托克 8 号遗址馆室内恐龙足迹化石的防风化材料问题,本研究通过对 3 种商品有机硅材料(MH、10%ZH 和 CYKH-09)和 3 种 TEOS 基复合有机硅材料(10%W5、10%E5 和 10%O3)分别进行了保护效果评估。综合各项基本性能测试、盐老化以及冻融老化的实验结果,在 6 种加固材料中,经 10%ZH 和 10%W5 加固剂处理后的砂岩样品的强度均能得到明显提升,同时具有吸水率低、良好的疏水性能、孔隙率降低小,颜色变化以及表面形貌未有明显改变的特点,并且还具备优异的透气性、耐盐老化以及耐冻融性能。此两种材料均有望用于未来鄂托克 8 号遗址馆室内足迹化石的风化治理工作中。本研究将为解决鄂托克 8 号遗址馆恐龙足迹化石的严重风化问题提供了科学和技术支撑,对保护内蒙古鄂托克旗查布地区珍贵的恐龙足迹化石,保存珍贵化石本体,延续其科研、科普和美学价值,具有重要意义。

FC05-47

不同环境因素对贝叶经性能的劣化作用研究

章文杰¹、王珊²、韩刘杨¹、郭宏*¹

1. 北京科技大学
2. 中国文化遗产研究院

贝叶经是珍贵的文化遗产,了解环境因素对其性质的影响对有效的保护至关重要。本研究通过模拟老化来评估温度、相对湿度和光辐射等环境因素对贝叶经的影响,使用包括扫描电子显微镜(SEM)、动态水分吸附(DVS)、热机械分析(TMA)、傅里叶变换红外光谱(FT-IR)和 X 射线衍射(XRD)等多种技术评估其性能变化。结果表明,低温或高温、干燥或潮湿、紫外光和红外光等条件均会对贝叶经产生负面影响。在高温或干燥条件下,贝叶经会出现弯曲、开裂、机械强度降低、吸湿性下降和化学降解。在潮湿条件下,真菌生长会破坏贝叶经的结构。紫外光和红外光均会导致贝叶经变色和开裂。这些变化会影响颜色、光泽、吸湿性、纤维素结晶度和热稳定性,从而削弱机械性能。储存在 25°C、50%相对湿度和可见光下的贝叶经没有出现显著损坏,表明该水平是其保护的最好状态。本研究提供了贝叶经在不同环境因素条件下降解机制的见解,并提出了相应的保护建议。

FC05-48

基于腐蚀大数据技术的劣化金属文物跨尺度数据挖掘研究

谈金龙¹、李晓刚*^{1,2}

1. 北京科技大学新材料技术研究院
2. 国家材料腐蚀与防护科学数据中心

影响金属文物保护的一大技术难题是对其腐蚀机理的认识及缓蚀性能的评价,本研究利用材料腐蚀大数据理论的最新研究成果,以室外积累的环境腐蚀大数据及实验室加速试验获取的腐蚀数据作为数据源,通过机器学习和传统腐蚀研究的结合获取环境因素中引起劣化青铜文物腐蚀的关键要素,并通过大数据驱动分析,揭示在复杂动态环境下的新型腐蚀规律,发现当前未识别的腐蚀机制,进一步丰富和完善现有腐蚀理论。同时,通过自动化数据采集和数据挖掘技术,根据特定腐蚀数据,动态调整选材策略,设计最佳的文物保护材料和缓蚀防护方案。基于以上学习训练模型,建立环境因子及组织结构预测劣化金属文物腐蚀规律的方法。

FC05-49

遗址土质地与夯实对可见-近红外光谱-含水率模型的影响

周紫薇¹、乔尚孝²、郭宏¹、贺翔*¹

1. 北京科技大学 科技史与文化遗产研究院/材料考古与保护教育部重点实验室
2. 云冈研究院/石窟寺保护与传承山西省重点实验室/云冈学研究国家文物局重点科研基地

遗址土体含水率、质地和密实程度是土遗址长久保存的重要影响因素。可见-近红外光谱常用于土壤表面含水率的快速原位无损表征,但针对土遗址等文化遗产的数据集和反演方法研究少,夯土质地与密实程度等关键特征对可见-近红外光谱-含水率模型的影响尚不明确。为提高含水率检测精度,研究遗址土质地与密实程度对光谱-含水率模型的耦合影响,本研究采集五处遗址不同质地的土样,在实验室内配制不同

含水率的系列重塑土和散土样本，通过地物光谱仪获取光谱数据，经多元散射校正（MSC）处理，提取光谱特征波段，采用偏最小二乘回归法（PLSR）、多元线性回归法（MLR）、支持向量机法（SVM），构建土壤含水率的反演模型。结果表明，SVM 模型的精度最高，基于通用波段（1379-1382 nm、1440-1450 nm、1982-1995 nm）建立的模型在验证集上的决定系数（ RP^2 ）为 0.96，均方根误差（RMSE）为 2.50，显著优于 PLSR 及 MLR 模型。遗址土质地、密实程度会对土壤水分预测模型产生重要影响，改变特征波段和预测精度，然而其影响易被含水率、有机物含量等其他因素掩盖，造成光谱预测质地等参数的效果不佳。本研究优化了反演模型，提升了基于可见-近红外反射光谱的土遗址表面含水率分析精度和工程适用性，对土遗址预防性保护具有重要实践价值。

FC05-50

西安一初唐高等级贵族墓出土“青瓷”的分析研究与科学鉴定

郭瑞*

陕西科技大学

在一座严重被盗的初唐高等级贵族墓中出土 3 件随葬残青釉瓶，2 件完整器，1 件残缺。此类器物在新城长公主墓、李凤墓中均有出土，釉面多青黄半透明、剥离严重，胎体灰白，一直以来该器型被认为是青瓷。为明确此类器物原料特征及烧制工艺，在利用器型量化分析确定器物代表性的基础上，以该器物为代表，利用超景深显微镜、色度仪、能量色散 X 射线荧光光谱、拉曼光谱、X 射线衍射等分析技术，首次对此类器型的化学组成、烧成温度进行分析研究，结果表明：该器物胎体具有典型北方高铝低硅特征，胎体烧成温度约为 1200-1300℃，釉中含有大量铅元素，烧成温度约为 700-800℃，可能为仿青瓷形制的铅釉器。结合釉面剥离情况，该器物极有可能为采用了二次烧制工艺的随葬明器。本次分析进一步丰富了此类器物原料特征及烧制工艺的认识，对以往此类器物为“青瓷”的观点进行了首次校验，为后续此类器物的发现与鉴定提供了重要科学参考依据。

FC05-51

重庆大足北山石刻 122 龕颜料成分分析与历史探究

邵芮琪、周双林*

北京大学考古文博学院

重庆大足北山石刻作为世界文化遗产大足石刻的重要组成部分，其颜料与工艺分析揭示了唐宋时期石窟艺术的技术特征与审美演变。本研究聚焦北山石刻 122 龕中的 11 个颜料样品，通过科学分析初步揭示了其无机颜料的使用特征，为深入理解该地区石刻彩绘工艺提供了基础数据。主要通过现代科技手段，如扫描电镜、能谱、激光拉曼光谱和红外光谱的应用，进一步明确了颜料成分及其风化机理，为保护修复提供了科学依据。实验过程中对样品进行了系统的成分鉴定。分析结果表明，北山石刻彩绘以铁红、铅丹、石绿等矿物颜料为主，还发现了墨绿砷铜矿的存在，这可能是大足北山石刻特有的矿物颜料，很少在其他地区发现，为不同地区颜料使用特点的研究打下基础。

FC05-52

晋祠圣母殿彩塑开裂机制及保护对策研究

李季璋、郭宏*

北京科技大学

我国拥有数量庞大的彩塑，由于自身材质特点和环境作用，塑像结构性病害普遍存在。彩塑的制作材料与工艺以及保护修复已有较多研究，同时在文物本体的保护修复有着成熟的经验。而关于彩塑的结构力学却鲜有研究，相关成果比较薄弱。但随着时间推移，我国大量的彩塑都可能面临此类问题，未来彩塑的结构力学分析是彩塑保护研究中不可或缺的部分。本次研究将补充晋祠圣母殿木骨泥塑颈部开裂机制研究，在此基础上进行彩塑保护材料综合性能的评价和认识，可为我国同种制作工艺的塑像保护提供借鉴意义。

课题创新点：

（1）晋祠圣母殿塑像整体表现出现的颈部开裂与整体塑像的结构稳定性有关，把复杂的彩塑开裂因

素定性定量的反映出来显然属于结构、材料力学范畴。彩塑关于这方面的问题,目前国内外研究成果较少,保护修复实践中也考虑的很少,忽视了材料的力学性能对整体结构的影响。系统的研究圣母殿彩塑的结构与材料力学,能够补充此类塑像所出现的损坏原因及保护修复技术的研究,具有重要的意义。

(2) 本文以圣母殿内木骨泥塑本体为研究对象,通过无损检测以及数字信息采集,建立彩塑内部支撑系统力学结构模型、地仗层结构模型,采用有限元分析方法结合材料性能实验,对塑像颈部重心偏移进行了数值计算,以确定塑像颈部开裂机理,进而对彩塑的保护和材料选择提供理论依据。同时,在三维模型的基础上,进行修复区域几何形态的精确量算及数据分析,进而完成虚拟修复效果模型,提升修复效果的准确性和可信度,可为彩塑类文物数字化保护提供参考。

(3) 综合考虑材料特性、与原地仗层物理性能的相似性、抗收缩性和无侧限抗压强度等因素,筛选出适合晋祠圣母殿彩塑地仗层的修复材料与技术。

FC05-53

陶器工艺复杂化的早期进程:中国史前黑陶控制渗碳深度的科学与实验研究

吴寒筠¹、崔剑锋²、韩建业*¹

1. 中国人民大学

2. 北京大学

黑陶是新石器时代晚期开始广泛流行于各地区与文化的一类陶器。通常认为黑陶的呈色工艺有渗碳与黑陶衣两种,而由渗碳呈色同时具备陶衣特征的“陶衣渗碳陶”无人研究。通过对公元前 3000~2500 年前后不同地区与文化遗址出土陶衣渗碳陶的科学分析与模拟实验,我们发现与常见的一次烧成渗碳黑陶不同,陶衣渗碳陶需要于二次烧成中进行陶衣渗碳。一次烧成难以精准控制渗碳深度,不利于体现表面刻划纹饰,而陶衣渗碳陶可以通过陶衣的厚度在二次烧成中控制渗碳深度,进而达到突出刻划纹饰的视觉效果。结合精细的表面磨光,我们得到了与考古样品相似刻划黑陶。陶衣渗碳陶是目前发现最早的使用二次烧成工艺的陶瓷制品。这项复杂又高超的创新技术具有突显刻划纹饰的功能,也体现出社会文明的进步。

FC05-54

成都蒲江博物馆明墓石刻彩绘结晶盐病害种类及其成因分析

宋权帅¹、查剑锐¹、白玉龙²、陈龙³、张遥¹、郭宏*¹

1. 北京科技大学

2. 成都文物考古研究院

3. 蒲江博物馆

成都蒲江博物馆明墓石刻彩绘出土于成都地铁七号线川师车辆段明墓群,其为明代蜀王府的宦官墓葬群,墓室主体由石材构筑,满饰彩绘,具有极高的价值。然而在长期保存过程中,这批石刻彩绘遭受了严重的盐害破坏。本研究通过光学显微镜(OM)、显微共聚焦激光拉曼光谱(RAM)、离子色谱(IC)、X射线荧光光谱(XRF)、X射线衍射(XRD)及岩相显微镜(PLM)等分析手段,明确盐害成分以 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (石膏)为主,且其非本体固有盐分。保存环境调查结果证明出土前酸雨、土壤与地下水的相互作用在石刻彩绘表面形成盐害。最后根据这批石刻彩绘的保存经过,将 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 对彩绘层的破坏过程分为两个阶段:埋藏阶段与发掘现场原位保存阶段。本研究可为盐害的治理及预防提供依据。

FC05-55

北京市孔庙和国子监博物馆丹陛石刻上红色污染物形成机理研究

王媛媛*

北京科技大学

石质文物在室外环境中长期暴露,易因物理、化学及生物因素发生表面变色,其中红色污渍现象尤为常见。目前研究表明,此类变色可能由三种机制引起:(1)石质基材自身矿物的化学转化,(2)外源性污染物(如大气颗粒物、金属离子)的沉积与反应,或(3)微生物定植及其代谢产物的色素沉积。为明确红色污渍的形成机制,本研究以北京市国子监3处丹陛石刻的红色污渍为对象,通过微生物分离培养结合

化学分析技术（如扫描电子显微镜-能谱分析、X 射线衍射及高效液相色谱等），鉴定出关键致色真菌群落，并解析其代谢产物与污渍形成的关联。结果表明，微生物代谢活动在红色污渍的形成中起主导作用，其分泌的色素类物质（如类胡萝卜素、醌类化合物）与石质基材发生复合反应，加剧了表面劣化。本研究首次系统揭示了该地区石刻红色污渍的微生物成因，为石质文物生物病害的防治提供了理论依据，对拓展文化遗产保护中的微生物降解机制认知具有重要科学价值。

墙报

FC05-P01

宋代酱釉的物化组成及呈色机理研究

王甜*、夏森伟、王芬、朱建锋

陕西科技大学

古瓷酱釉以其造型丰富、工艺精湛、釉色难以复制，是中国古陶瓷的经典品类之一，具有极高的收藏和文化价值。近年来，研究者深入探讨了酱釉中氧化铁的结晶形态和赋存形式，发现釉面酱色来源于表面赋存的微米级亚稳相 ϵ -Fe₂O₃ 晶体。但不同窑址出土的酱釉在成分、晶体结构和呈色上的差异，以及釉面异彩感的来源和呈色机理仍不明晰。此外，釉中高纯度微米级 ϵ -Fe₂O₃ 晶体的生长及其在高温酱釉瓷中的稳定机制等关键问题仍需进一步研究。

为此，本论文选取了陕西耀州窑、银沟遗址、河南当阳峪窑、新安窑、段店窑、河北井陉窑、山西浑源窑以及福建建窑等出土的宋代酱釉为研究对象，系统的研究了胎釉的物化组成及微观结构，解析了胎釉物化组成对釉中 ϵ -Fe₂O₃ 晶体形成的作用机制，阐明了高纯微米级 ϵ -Fe₂O₃ 晶体的形成机理及技术原理；建立了晶体的微观结构与外观呈色的构效关系，揭示酱釉的呈色机理与色彩异化原理；基于此，使用实验考古法成功复制了两种典型的耀州窑酱色釉品种。本课题旨在研究古瓷酱釉色变的机理和技术原理，为证析此类以氧化铁为着色剂的古代名瓷，并为挖掘珍贵古陶瓷的科学价值和保护利用技术打下理论基础。主要的研究结果为：

（1）揭示了高纯微米级 ϵ -Fe₂O₃ 晶体的形成机理及技术原理。在宋代不同窑口的酱釉样品中，釉层均出现分层现象，表层为铁系晶体析晶层，底层为黑色玻璃基质。浑源窑酱釉表面析晶层为赤铁矿，其他窑口酱釉表面析晶层均为 ϵ -Fe₂O₃ 晶体。对不同省份窑口出土酱釉中的 ϵ -Fe₂O₃ 晶体进行分析，发现具有明显的地域性差异，而这种差异的形成和釉中其他元素的组合和比例差异密切相关。来自北方窑口的样品通常钙含量较低，这有利于 ϵ -Fe₂O₃ 晶体的形成，但晶体尺寸较小。相反，南方窑口的样品钙含量较高， ϵ -Fe₂O₃ 晶体尺寸较大，使得釉面颜色更加偏向于红褐色。此外，釉中硅、铝元素等的增加不利于 ϵ -Fe₂O₃ 晶体的生长和稳定。此外，研究发现釉中 ϵ -Fe₂O₃ 晶体中部分 Fe 元素被其他等元素取代，降低了晶体的有序度，从而提高了晶体稳定性。

（2）揭示了珍贵古瓷酱釉色彩异化的科学原理。研究表明，酱色釉在 550 至 580nm 之间有强烈的反射峰，对应黄褐色至红褐色。釉中主要晶体相均为分支状或棕榈叶状 ϵ -Fe₂O₃ 晶体，且晶体中存在元素取代引起了结构的紊乱。取代元素使得晶体的呈色加深。并且，分支状或棕榈叶状的 ϵ -Fe₂O₃ 晶体是由间距约为 230-500 nm 整齐排列的分支组成，这些分支又由间距在 100-110 nm 之间的薄片晶体偏移堆积构成。这些次级枝晶形成的梳状结构可作为衍射光栅，使光相干衍射产生结构色。不同角度的散射和反射光谱结果显示，次级枝晶和光的相干衍射在不同角度显示不同的颜色，使釉面呈现不同角度的异色性。此外，相对较小的尺寸的片状或棒状晶体结构能够与入射光发生全反射，提高釉面的光泽度。

（3）实验考古学方法成功复原了宋代耀州窑两种典型酱釉品种：黄棕色和红棕色釉。研究表明，随着铁含量的增加，样品颜色由黄棕色转变为红棕色，且还原性气氛更有利于 ϵ -Fe₂O₃ 晶体的形成。针对色差显著的黄棕色和红棕色酱釉进行的分析，黄棕色釉面主要含有棕榈叶状和枝状 ϵ -Fe₂O₃ 晶体，而红棕色釉面则主要由片层状、枝状、球状及棕榈叶状赤铁矿构成。尽管晶体类型不同，两者均展现出相同的棕榈叶状结构。通过多角度反射光谱和散射反射光谱分析，本研究发现，尽管黄棕色和红棕色釉面颜色存在差异，两种釉均表现出类似的可见随角异色现象，这种现象是由棕榈叶状枝晶与光的相干衍射作用所致，从而进一步证实了古瓷釉面的异彩效果不仅源于晶体的化学色，而且也受到晶体微纳结构形成的结构色影响。

FC05-P02

用于砂岩质石窟寺防风化保护的新型杂化硅氧烷材料开发与应用研究

李政¹、王荣¹、黄继忠²、卜凡兴^{*2}

1. 复旦大学
2. 上海大学

硅氧烷具有渗透性好、可以原位固化形成 Si-O-Si 键的能力及耐久性好等优点，已在石窟寺防风化保护中展现出了良好的应用潜力。但目前常用的硅氧烷材料普遍存在固化后易开裂、与砂岩质石窟寺文物本体中非硅酸盐组分（如钙质胶结）缺乏化学键合力等缺陷，限制了其在保护中的广泛应用。本研究通过“分子结构工程策略”精准调控硅氧烷分子结构和功能基团，获得了固化性能良好、与砂岩本体多种矿物组分具有良好键合力的新型杂化硅氧烷防风化保护材料。研究结果表明，与传统硅氧烷相比，研发的新型杂化硅氧烷对天龙山石窟砂岩和云冈石窟砂岩具有更好的保护效果，这得益于其特殊的分子结构，线型硅氧烷链段的引入为体系提供了柔性，缓解了开裂的发生，同时特征官能团的引入增强了硅氧烷与砂岩的键合力。该研究为砂岩质石窟寺防风化保护提供了新的材料体系，并为解决硅氧烷保护材料的现有缺陷提供了创新思路。

FC05-P03

贝叶经文物保护修复中黏接材料研究

姚娜*

广西师范大学

贝叶经文物修复是世界性难题，面临的关键问题是修复材料使用。本研究主要是对传统黏接剂进行多项性能分析与对比，筛选适合贝叶经修复黏接剂。利用旋转黏度计和流变仪对各类传统黏接剂黏度进行分析，初步筛选黏度高的黏接剂，然后用物性仪测试筛选的黏接剂黏性及与贝叶结合的黏附力和剥离强度等性能，同时用密度泛函理论（DFT）比表面积测试分析贝叶的孔径，以及用激光粒度仪分析黏接剂的粒径，结合扫描电镜-能谱仪分析贝叶形貌结构及与黏接剂结合特征等。此外，针对贝叶经文物的典型病害，制作模拟病害样品，并利用筛选出黏接剂和云南当代贝叶作为修补材料进行试修复实验。本研究可为贝叶经文物修复材料使用提供数据参考，同时为贝叶经文物的保护与修复提供科技支撑。

FC05-P04

出土饱水象牙现场保护技术研究

李思凡、王冲*、王凤娇、肖庆

四川省文物考古研究院

本研究针对常用考古发掘现场文物临时固形材料开展调研，对其基本性能、使用工艺、应用实例及操作中的优缺点等方面进行系统分析，结合文物保护基本原则和出土饱水象牙保存现状，选定薄荷醇、石膏和高分子绷带作为象牙临时固形的备选材料。在此基础上，构建 3 组评估指标（包括材料的基本性能、操作便捷性、对象牙保存环境的适应性）共计 15 个小项，对上述三种固形材料开展筛选实验，并结合层次分析法、专家打分法和模糊综合评价法对实验结果进行综合评价。结果显示：医用高分子绷带加固强度高，质量轻，安全无害无污染，操作使用便捷，透气性好，更适合作为出土饱水象牙考古现场提取的临时固形材料。

高分子绷带贴敷加固后的象牙底面呈圆弧状，水平放置时稳定性仍较差，安全性不足，且对于一些较长或弧度较大的象牙而言，单一高分子绷带壳加固强度不足，难以支撑完成提取、运输和保存等工作。为进一步探究不同工艺和不同组合保护壳在实际提取过程中象牙的受力情况，本研究选取具有代表性的象牙采集三维数据，应用有限元三维仿真分析方法，分别建立“多层绷带”、“绷带+石膏”、“绷带+Pvc 条+石膏”等不同结构固形材料保护壳有限元分析模型，分析象牙提取过程中的变形及应力分布情况。结果表明：固形时应至少贴敷 4 层高分子绷带，“绷带+Pvc 条+石膏”保护壳可实现较大体量象牙固定并提供整体刚度，同时 Pvc 条还可防止脆性断裂的发生，为出土饱水象牙提取工作提供安全保障。

仅发表论文

FC05-PO01

非水分散体材料和有机硅材料加固砂岩的效果对比

周双林¹、杨琴²、陈卉丽³、刘轩成^{*4}

1. 北京大学考古文博学院
2. 中国国家博物馆
3. 大足石刻研究院
4. 大同市博物馆

采用丙烯酸树脂非水分散体材料和有机硅材料分别对砂岩样品进行加固，并通过颜色、孔隙率、机械强度、耐水性、加固材料分布等多种试验指标对加固效果进行评估。最后，在大足石刻进行了现场试验。通过实验室和现场的试验，对比非水分散材料和有机硅材料加固砂岩的差异，确定了非水分散体材料对砂岩的加固作用，并分析了其优缺点。

FC05-PO02

广西花山岩画颜料层微观特征及风化机理研究

王奕¹、朱子锐¹、崔彪¹、王金华¹、杨清平²、张宏斌^{*1}

1. 复旦大学
2. 广西文物保护与考古研究所

花山岩画位于中国广西左江流域，反映了骆越先民的社会、经济、文化和艺术风貌，被列入世界文化遗产名录。然而在长期保存过程中，岩画出现了表面开裂、颜料层剥落等病害，严重影响了其价值留存。为了进一步揭示岩画颜料层劣化的机制，研究采用了扫描电子显微镜 - 能谱仪 (SEM-EDS)、微区 X 射线荧光光谱仪 (μ -XRF)、显微拉曼光谱仪和 X 射线衍射仪 (XRD) 等方法，对花山岩画表层微观特征进行分析。结果表明，岩画表层为硫酸钙、颜料层和岩石层组成的三层复合结构，其中硫酸钙部分嵌入颜料层中，且结合紧密，难以去除。硫酸钙的分布差异表明，硫 (S) 元素主要来自外部环境。对岩画样品的 XRD 分析结果显示，硫酸钙的相变在岩画病害的发生和发展中起着重要作用。该研究从微观角度为花山岩画表层结构的研究提供了新的视角，也为岩画类遗产的保护和深入研究提供了科学参考。

FC05-PO03

基于多种无损检测技术的云冈石窟砂岩壁面风化评估

洪杰¹、张悦^{*1,2}、陈浩宇¹、苏康迪¹、程远^{1,2}、闫宏彬³、黄继忠^{1,2}

1. 上海大学文化遗产与信息管理学院
2. 硅酸盐质文物保护教育部重点实验室 (上海大学)
3. 云冈研究院

云冈石窟是我国北方地区典型的砂岩质石窟，距今 1500 余年，价值极高。在长期的自然环境及人类活动影响下，石窟本体表面出现了不同类型和程度的风化病害，对文物保存造成严重威胁。为科学评估第 10 窟砂岩壁面的风化现状，综合采用超声波、回弹及 X 射线荧光技术对前室西壁和诵经道北壁距地面 2 m 范围部分开展原位无损检测，分别获取超声波速、表面硬度和化学元素含量等指标的空间分布特征，并通过 CRITIC-线性加权法相结合，实现风化砂岩的综合量化评估。结果表明：壁面波速随着深度增加呈现增加趋势，前室西壁靠近地面的波速值最低，而诵经道波速分布相对均匀，表面硬度的变化趋势整体与波速相似。云冈砂岩的主要化学元素包括 Si、Ca、Al 和 K，风化壁面存在显著的 Ca 元素流失和 S 元素富集。基于主要化学元素含量计算得到了化学风化指数 (MWPI) 和化学蚀变指数 (CIA) 的分布特征，发现以高度 1 m 为界，下部区域的化学风化程度更高。砂岩的宏观物理指标与化学指标之间存在较强的关联性，CRITIC-线性加权综合评估模型分析发现，所有指标中波速所占权重最高，其次为硬度、MWPI、CIA 和 Ca 含量，并且诵经道北壁的风化现状比前室西壁更加严重。砂岩壁面的差异风化现象与洞窟整体历史变化

及局部微环境密切相关。前室主要受降雨积水、气体污染物以及温湿度剧烈波动的影响，风化病害特征以开裂和崩解破碎为主，后室诵经道主要受山体渗水、凝结水和可溶盐富集的影响，风化病害特征多为粉状风化和片状剥离。