

用于文物研究的X射线成像技术开发和应用

许琼 中国科学院高能物理研究所副研究员

X射线CT成像技术可以无损地获得文物内部的三维结构信息，可用于考古探测、文物保存状况评估、修复方案制定和真伪鉴别等方面。

中国科学院高能物理研究所（IHEP）具有丰富的文物检测分析实践经验，自主研发了多种CT成像设备，可满足多种文物样品的成像需求。比如，利用自主研发的专用CT，对战国时期的“陈璋壶”本体与附件的连接方式及铸造工艺进行分析。对青海都兰热水墓群2018血渭一号墓出土印章文字进行辨认，对云南罗平圭山古墓出土漆盒装箱进行预探测，对国家博物馆藏铁质文物病害状况进行调查，为考古与文物保护方案的制定提供了科学数据支撑。

CT技术还可以和X射线荧光分析、三维扫描技术相结合，通过多维信息融合显示，形成文物的多模三维图像，应用VR技术直观形象地展示文物内外的多种物理、化学信息。中国科学院高能物理研究所最新研发的具有曲面自动导航功能的X射线微区荧光成像系统，解决了现有仪器只能对平面文物进行X射线荧光成像获得元素分布的测题，可对器物三维立体表面区域进行自动扫描获取元素的分布信息。

**石窟寺保护与技术装备现状与思考——以石窟寺岩体结构探测与监测技术装备为例**

陈卫昌 中国文化遗产研究院石窟及石刻岩土保护研究所副所长

石窟寺岩体稳定性、渗水病害和表层岩体风化是石窟保护面临的关键问题，对于这些问题的认知和解决在很大程度上依赖于保护研究装备的进步与完善。石窟寺与山体相连，洞窟形制复杂多样，岩体变形破坏机理差异大，岩体失稳模式和机理的研究离不开岩体结构及力学行为的多细化探测和监测。然而，岩体结构探测、变形监测因涉及多尺度、高精度、长时序、多场耦合以及最小干预等特殊要求而十分复杂。

在石窟寺结构和岩体探测中，技术装备上创新采用多自由度模块化研发思想，适应不同尺度复杂结构洞窟探测要求；具有智能控制系统和紧急制动功能，设置安全距离，满足安全性探测要求；可以搭载任意重量小于5千克的探测仪器，实现多重病害探测，以及病害精准定位。结合石窟岩体的多尺度监测，石窟岩体稳定性评估模型的物理参数更为精确，几何模型更符合实际状况，因此评估结果也更能客观反映石窟岩体的稳定性状态。

在开展石窟砂岩细观力学行为的研究中，通过建立砂岩力学行为不同尺度的参数关联，实现了层状岩体弹性模量的跨尺度表达，从而使研究样品尺寸缩小到毫米级，可实现最低程度扰动文物本体。另一项是石窟岩体加固的综合监测评价技术，通过利用BIM和三维激光扫描技术，构建了石窟寺病害管理平台，实现了石窟概况、病害描述、加固方法、长度和面积测量、区分高光功能，同时还实现了指示牌系统、病害分区、加固档案管理、加固过程可视化等功能。

以石窟寺为中心，多学科、跨领域是石窟寺保护的基本特点，要求我们必须从石窟保护研究实际出发，围绕石窟特点和实际需求，思考技术装备的发展，支撑研究和解决实际问题。

**基于多场耦合足尺模拟的岩土质文物劣化机理及防治技术研究**

王彦武 敦煌研究院保护研究所副所长

报告主要从研究背景、多场耦合环境模拟实验室构建、边界条件的提取和加载方式、风化机理及防治技术、水分运移机

敦煌研究院保护研究所副所长王彦武在专题研讨会中发言

理及防治技术、现场试验研究六个方面介绍基于多场耦合足尺模拟的岩土质文物劣化机理及防治技术研究。

多年来，敦煌研究院等国内研究机构对石窟寺、土遗址等遗址的病害机理、保护技术等方面进行了深入研究，但受试验样品尺寸效应和多重环境因素耦合条件难以施加的影响，研究结果和工程实践之间有效衔接尚存差距。敦煌研究院在多年研究成果的基础上，启动建设我国文物保护领域首个多场耦合实验室，并于2020年底投入运行。

实验室主要由夏季仓、冬季仓、风雨仓等构成，可实现零下30℃至60℃的温度、10%至90%相对湿度，构建了可模拟温度、湿度、日照、降雨、降雪等各种环境条件的实验室，解决了以往单因素模拟试验的不足，实现了多场耦合条件下开展足尺寸模型试验。

针对岩土质文物浅表层劣化机理及防治技术试验研究中存在的尺寸效应问题，构建了多场耦合环境模拟实验室和便携式风蚀雨蚀装置，提出了考虑环境因子相似性的多场耦合边界条件提取和加载方法。

借助多场耦合环境模拟实验室的风雨仓、冬季仓、夏季仓，开展了土遗址浅表层劣化足尺模拟试验，揭示了土遗址浅表层土颗粒冻胀分离和起壳的风化机理，研发了集化学加固、生物矿化、软覆盖和保护棚为一体的土遗址防风化加固技术体系；利用多场耦合环境模拟实验室，开展了砂砾岩足尺砂箱模拟试验，结合长周期现场环境监测揭示了干旱环境下砂砾岩石窟寺水汽运移机制，并构建了基于架空盖板的TPO水平崖顶洞窟防渗技术；使用便携式风蚀雨蚀模拟装置，开展了现场加固效果试验评价研究，验证了防风化技术的有效性。

**海洋出水木质文物研究与保护**

孙健 国家文物局考古研究中心副主任

海水环境水况复杂，盐度高、生物多样等特点对水下文化遗产的腐蚀破坏作用较为严重，水下文化遗产在海洋环境下的腐蚀机理和进程是目前研究的重点。海洋中的沉船、近海遗址所出的木质文物，脱离原始环境接触到空气后，存在酸化、霉变、脱水等一系列变化，保护工作面临严峻挑战。

国家文物局考古研究中心与各科研单位，借助水下考古发掘实践，对出水木质文物腐蚀机理、提取材料和工艺、脱盐和加固处理工艺、保存环境温湿控制等方面存在的科学问题及技术开发进行了多种探索。针对脆弱文物的水下提取，开发了藜芦醇为代表的下水临时固形材料与提取技术，还开发了环氧树脂复合层临时固形材料与提取技术，适用于低能见度的深水环境和不同水温海域，而且可提取的文物种类较多，提取方式也灵活便捷。在“南海I号”考古发掘中，使用薄醇醇对船体结构进行加固，更加容易提取脆弱船体木材，此项技术对水下考古发掘起到重要促进作用。

木材酸化是沉船保护中出现的新问题，为此，我们开展了微生物脱除材料的研究。前期实验表明，氧化亚铁硫杆菌对木材中的黄铁矿等铁质沉积物有很好的脱除效果。木质文物里面有大量的海洋微生物，有目的地选择抑菌试剂并开展防霉试验，从而对海洋出水木材所产生的霉变进行有效控制。

国家文物局考古研究中心副主任孙健在专题研讨会中发言

国家文物局考古研究中心