

激光与光电子学进展

激光技术在文物保护中的应用

王晨露¹, 冯圆媛¹, 尤文浩², 凌雪^{1*}

¹西北大学文化遗产学院, 陕西 西安 710069;

²北京大学考古文博学院, 北京 100871

摘要 激光作为 20 世纪出现的一种特殊辐射, 经过 60 余年的发展, 激光技术不断拓展, 在许多领域取得了丰硕的应用成果, 其中在文物保护领域也有着一定的应用。通过梳理在文物保护研究中应用的激光清洗技术、三维激光扫描技术、激光拉曼分析技术、激光剥蚀技术、激光焊接技术等进展情况, 重点分析了这些激光技术的应用特点, 并展望了激光技术在文物保护工作中的未来方向, 以期能为激光技术与文物保护相关研究带来新参考。

关键词 激光技术; 文物清洗; 文物分析; 焊接

中图分类号 K854.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1700003

Application of Laser Technology in Cultural Relics Protection

Wang Chenlu¹, Feng Yuanyuan¹, You Wenhao², Ling Xue^{1*}

¹College of Cultural Heritage, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;

²School of Archeology and Museology, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract Lasers as a form of specialized radiation appeared in the 20th century. Laser technology is still evolving after more than 60 years of development. It has achieved positive outcomes in various fields, including cultural relic protection, and has various uses. This study analyzed the application of laser cleaning technology, three-dimensional laser scanning technology, laser Raman analysis technology, laser denudation technology, laser welding technology, and other progress in cultural relic protection research. The application characteristics of these laser technologies were examined, and the future direction of laser technology in cultural relic protection was provided to establish a new standard for laser technology and cultural relic protection-related research.

Key words laser technology; cultural relics cleaning; analysis of cultural relics; welding

1 引言

文物是人类在生活生产、社会活动中遗留下来的, 具有历史、艺术和科学价值的物质遗存, 它是先民留下的珍贵历史文化遗产, 在当代社会生活中也有着十分重要的现实意义。不同材质的文物在与其赋存环境相互作用的过程中, 将不可避免地发生不同程度的劣化, 甚至导致文物的消失。由于文物是不可再生的珍贵历史遗存, 为最大化揭示及保护其所包含的价值信息, 探索自然科学领域的新技术在文物保护方面的应用成为一项极为重要的研究内容。目前已有一些无损或微损分析技术应用在文物保护研究中, 其中包括激光技术的应用^[1]。

激光产生并应用于 20 世纪 60 年代, 因其具有单向性好、亮度高、颜色纯、能量大等特点被广泛应用于军事、医学、工业等领域, 属于一项尖端技术, 备受相关人员的重视^[2], 70 年代首次应用于文物组成研究与清洗保护工作中^[3], 但因激光技术不甚成熟, 激光器种类较少, 而文物本身存在着结构脆弱复杂、取样困难、资源珍贵的特点, 以及激光设备的分析误差和使用阈值等原因制约了其在文物行业的推广应用。现在, 随着激光技术的不断发展, 激光控制系统的不断精细化, 激光设备逐渐丰富, 方法体系日渐完善, 该技术在文物保护领域的应用也得到了越来越多的关注。因此, 本文通过梳理文献, 总结激光技术在文物保护领域的现有应用成果, 讨论该技术在文物保护领域的应用进展及发

收稿日期: 2021-11-10; 修回日期: 2021-12-16; 录用日期: 2021-12-21

基金项目: 陕西省教育厅产业化培育项目(15JF006)、国家科技部对发展中国家科技援助项目(KY201901008)

通信作者: lxue@nwu.edu.cn

展趋势, 以期为该技术的后续开发及应用提供新的借鉴。

2 文物保护中应用的激光技术

目前, 激光技术在文物保护领域内的应用主要有激光清洗技术、三维(3D)激光扫描技术、激光拉曼分析技术、激光剥蚀技术、激光焊接技术等。

2.1 文物表面污染的激光清洗技术

激光清洗技术是利用高功率且合适能量阈值内的激光照射污染部位, 通过热效应、机械效应和光化学效应清除物体表面的污染物^[4]。与传统清洗方法相比, 能够精准定位, 达到微米级污染物的清洗, 对于有机及无机污染物均可进行清洗, 且基本不会产生附加污染, 具有智能可控、自动高效, 绿色环保等优点^[5]。最常见使用的激光器有 Nd-YAG 激光器和 Nd-YVO₄ 激光器^[6-7], 清洗方法主要有干式清洗法、湿式清洗法、激光等离子体冲击波、惰性气体法、非化学腐蚀法等^[8]。

20 世纪 70 年代美国科学家 Asums 等^[9]认为激光可以对古代壁画和雕塑等文物进行清洗, 并首次利用激光对威尼斯的石质表面硬壳污染物进行一系列清洗实验, 证实其效果, 开启了激光清洗技术在文物保护领域的应用。其后, Andreotti 等^[10]对来自北卡罗来纳州艺术博物馆一幅 15 世纪的镶板画路易斯·博拉萨进行激光清洗, 并通过傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 和气相色谱-质谱联用 (GC-MS) 分析证实这是一种安全有效去除目标污染物的方法。20 世纪 90 年代各国专家使用激光清洗技术在建筑及石质文物清洗方面进行了多次尝试, 联合国教科文组织使用激光清洗技术清理了法国 Amiens 大教堂, 以及欧洲国家在奥地利维也纳 Stephans 大教堂、波兰 Grob Nieznanego Zolnierza 等均进行了清洗尝试, 并取得了显著成果^[3]。

进入 21 世纪, 随着激光器的发展, 激光清洗技术的可操作性大大提升, 从而在文物保护领域逐渐获得了更大的关注。当前, 已在石质、金属、陶瓷、壁画等无机质类型文物的污染物清洗保护中得到了一定的应用。

在石质文物方面, 激光清洗技术可实现对石质文物表面有机污染物, 如油漆、墨迹、烟熏以及水泥污渍等硬质石灰质污染物的精准去除。齐扬等^[11]分别对砂岩表面多种污染物进行干式和湿式清洗阈值实验, 并针对山西大同云冈石窟进行现场激光清洗, 表明 1064 nm 波长的激光可有效去除云冈石窟表面的墨迹和烟熏类典型污染物, 这是国内首次将激光技术应用于大型石质文物的表面清理。叶亚云等^[12]在针对砂岩表面的墨迹污染采用激光清除, 在测试得出的最佳方式和参数下, 表明此方法有效可行, 并应用在四川绵阳碧水寺石质文物的烟熏污染物上, 取得了良好效果。此外, 齐扬等^[13]、周伟强等^[14]、张秉坚等^[15]在

云冈石窟、花山岩画表面进行了清洗实验, 效果良好, 证明了该技术在石质文物表面应用的安全性及有效性, 并建立了激光清洗石质文物表面污染物的操作工艺规范。王昊等^[16]利用单波长激光清洗机 (型号: EOS1000LQS), 以水为液膜, 采用湿式清洗有效去除了以铁氧化物为主要成分的黄色污染物, 表明激光清洗技术针对出水石雕的表面污染物也有很好的清洗效果。

在金属文物方面, 激光清洗技术的重要作用对象之一是青铜器的表面锈层。蒋德宾等^[17]用激光清洗技术有效地去除了青铜文物表面的有害锈层; 张晓彤等^[18]采用液膜法, 对一件鎏金青铜文物进行激光垂直照射清洗, 证明了激光清洗技术的可行性。但李荃等^[19]通过青铜器的除锈实验, 提出需慎重使用激光技术对文物进行清洗除锈工作。近年来, 众多学者不断优化液膜材质及厚度、激光器波长及能量参数等工作参数, 以提升清洗工作的安全性。沈依嘉等^[20]利用 Nd:YAG 激光器与琼脂凝胶联用的方法, 针对春秋到唐代青铜器上的土锈、绿锈、粉状锈等锈蚀开展清洗实验, 证明根据锈蚀情况采用不同的激光器参数可有效对青铜器的锈蚀进行清洗, 并且琼脂凝胶的使用一方面通过凝层的厚度控制, 可以控制激光作用于文物表面的强度, 另一方面可以起到表面降温作用, 对文物更安全。此外, Raza 等^[21]利用准分子激光器, 针对银质文物表面主要以硫化银为主的黑色结垢的清洗非常有效, 且不会显著地去除银基底, 可以认为这是一种去除银质表面硫化银结壳的新方法。

在陶瓷文物方面, 使用湿式激光清洗技术清除陶瓷器表面的硬结物及沉积膜被证明具备可行性, 且清洗效果良好。张力程等^[22]利用 Nd:YAG 激光器, 针对上海博物馆馆藏汉代女俑表面黑斑展开清洗实验, 证明了利用液膜法可以有效去除由多种矿物质所组成的黑色斑迹。张欢^[23]利用调 Q 高功率 Nd:YAG 激光器对“南澳 I 号”出水瓷器基底以及表面硬结物开展损伤阈值以及清洗效果实验, 发现采用湿式清洗法, 在明胶或琼脂作为介质的情况下, 对于钙质凝结物和硅质凝结物有良好的清洗效果, 此为出水瓷器激光清洗的典型案例。

在壁画文物方面, 已开始利用激光清洗技术清除壁画表面泥质污染物及微生物污染。Gaetani 等^[24]通过确定激光的脉冲模式、波长、频率和能量密度, 来确定壁画上去除物质的最佳工作条件, 并通过测量温度、pH 值、电导率和光谱测试, 检查激光辐射对壁画表面的影响。王佳等^[25]利用 Nd:YAG 激光器对韩休墓壁画表面污染物展开清洗实验, 发现可以有效去除壁画表面微生物污染以及红色颜料表面泥质污染物。

此外, 在书画类等有机质文物方面也开展了尝试^[26-27], 赵莹^[28]利用适当的激光能量密度对宣纸表面

的霉菌进行成功清洗,并且对于基底不产生损伤。但是,由于此类文物的清洗阈值普遍低于待清理物质,例如细菌、霉菌,尘埃、虫斑的阈值,因此这方面的工作成果不多。

2.2 文物数字化信息的三维激光扫描技术

三维激光扫描技术是 20 世纪 90 年代出现的,用来获取复杂几何物体的影像与图形数据的一种测量技术。激光扫描仪对待测对象发射激光脉冲,根据反射原理进行测距,通过测角系统获取物体三维坐标信息,再借助软件进行点云数据优化及三维模型建立,从而将实物信息转化为数据信息进行储存。与传统测绘技术相比,三维激光扫描技术因具有精密精度、快速高效、非接触性等优点,而被广泛应用于文物信息提取、文物虚拟修复、文物数字化展示、文物病害调查、文物预防性保护等文物保护的各个方面。

对于大型不可移动类文物而言,目前三维激光扫描技术已可以精确提取石窟寺、古建筑、土遗址等文物的色彩、材质、表面形貌、空间结构等信息,并建立文物三维模型,丰富文物数字化信息档案。大雁塔^[29]、大同华严寺^[30]、白马寺^[31]等古建筑皆进行了三维采集工作,2019 年法国著名建筑巴黎圣母院遭受火灾^[32],但在 2015 年 Andrew Tallon 曾利用三维激光扫描仪对巴黎圣母院进行三维点云数据采集,为巴黎圣母院的修复及三维模型提供了详细的数据支持。同时,该技术也是文物数字化展示的数据采集手段,云冈石窟^[33]、敦煌莫高窟^[34]、大足石刻^[35]、摩崖石刻^[36]、甘谷大像山大佛^[37]等石窟寺均采用三维激光扫描技术采集文物点云数据及表面纹理数据,成功建立石窟三维模型,将模型与虚拟现实(VR)技术相结合,可实现石窟的数字化全景展示,将模型与 3D 打印等手段相结合,可进行复制洞窟的建造,实现在保障文物安全的前提下进行文物实物展示。南竣祥等^[38]利用 Leica P40 三维激光扫描技术,基于所测定的点云数据及建立的模型数据测量得到秦蜀古栈道的几何信息,结果表明可以对人员无法到达的区域进行数据测量,满足传统文物的测量精度,并为文物保护提供技术支撑。此外,三维激光扫描技术可进行文物病害的识别与测量,通过三维结构及彩色纹理的测量比对,识别病害种类及范围,甚至完成三维病害图的绘制,将病害统计工作从二维推向三维。目前,此方法在石质文物^[39]及古建筑^[40]表面也进行了一些尝试。

三维激光扫描技术在陶俑、青铜器等可移动文物的数字化保护中也发挥了重要的作用。许辰等^[41]对河南巩义花地嘴遗址出土的高领陶罐进行全数字化数据采集和处理,将其完整、无损地记录下来。马静^[42]利用逆向工程软件 Geomagic studio 12 测得的点云数据进行处理,构建三角网并建立三维表面模型,实现三维模型的创建,并将此技术运用在兵马俑上。杨艳等^[43]以司母戊鼎为例,进行点云数据处理、

独立图像模型建立、纹理塑造、模型合并等多个关键步骤的研究,总结出了一套适用于三维彩色文物模型的建立。程虎伟等^[44]对绛县横水西周墓地青铜器进行激光三维扫描,有效保存和利用了三维几何数据信息,虽然对于小口类器物、复杂镂空纹饰等特殊形制器物内壁还没有很好的解决办法,但是仍然认为其在文物的保护及展示利用方面中具有广阔的应用前景。

此外,该技术与地理信息系统(GIS)及数据库技术相结合,可科学建立文物保护管理系统,大幅提升文物信息化程度,使馆藏文物管理及展示更加数字化、精细化、可视化^[45],如山西侯马晋国遗址测绘与文物信息管理系统的建立,实现了高质量文物信息的管理系统,为侯马的文物保护规划和文物开发利用建立了良好的数据基础和现代化的管理手段^[46]。还可将激光技术和雷达技术相结合,并配合全球定位系统,该技术多用于采集户外文物古建的三维数据库,再辅助计算机技术,建立相关数据库,实现文物的三维虚拟展示。对于文物古迹的研究、修缮工作起到了很大的帮助^[47]。

2.3 文物材质的激光拉曼光谱分析技术

激光拉曼光谱分析技术是通过拉曼位移进行分子结构的定性分析,具有无损、分辨率高、操作方便、抗干扰强、数据直观的特点,在少量样品的情况下也能获取物质分子的结构、相互作用等信息。

拉曼光谱分析技术在古代壁画、彩绘陶器等表面颜料的化学组成,青铜器锈蚀产物分析及其锈蚀生成原因,其他文物组成结构分析和病害机理等研究中有了较为广泛的应用。沈大娟等^[48]总结了截至 2015 年 3 月以来拉曼光谱在文物考古中的应用情况,表明在文物考古领域,拉曼光谱分析技术涵盖了宝玉石、金属锈蚀产物、陶瓷器结构研究、颜料、胶结材料等各个方面。此后,赵灵委等^[49]利用该技术成功对庙底沟遗址出土的仰韶文化彩陶彩绘区进行物相分析,并基于此初步构建了一个彩陶碗的物理和化学多源信息数字化模型。王荣等^[50]利用拉曼光谱仪对安徽史前孙家城等遗址出土的玉石器成功检测,并且有效的克服荧光背景,为玉器的无损鉴别提供经验。成小林等^[51]对江西新干商墓出土青铜器粉状锈的拉曼光谱分析,结果表明拉曼光谱在分析非晶态的硅酸盐类锈蚀产物方面具有其独特的优点。除上述典型案例外,该方法在颜料^[52-59]、金属^[60-62]、纸质^[63-66]、纺织品^[67]等文物保护研究中均有突出成果。除了文物成分定性研究之外,付倩丽^[68]在彩绘结构分析认知的基础上,开启了拉曼光谱在古代彩绘矿物颜料定量方面新的尝试性应用。

2.4 文物化学组成测定的激光剥蚀技术

激光具有高能量的特点使其被作为一种剥蚀方法与其他分析仪器进行联用。由于文物具有不可再生

性,以尽量保持文物原貌为原则,激光剥蚀技术具有原位、微区、微损分析则显示出了优势。目前,在文物保护研究领域内使用的主要有激光剥蚀等离子体质谱和激光诱导击穿光谱分析技术。

20 世纪 80 年代出现的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱是一种微区化学组成测定新技术,该技术利用激光剥蚀技术实现微区采样形成剥蚀气溶胶,再送至电感耦合等离子体质谱仪中进行原位、微区、痕量分析和元素微区分布特征分析,具有预处理便捷、灵敏度高、分析速度快、所需样品量少等特点。目前该方法已应用于青铜器、古玻璃等文物化学组成的测试研究。凌雪等^[69]利用激光剥蚀等离子体质谱测定陕西地区出土的春秋时期秦青铜器微量元素,表明此技术对于青铜器的矿料来源和矿冶技术问题研究有着很好的应用前景。斯琴毕力格等^[70]利用激光剥蚀电感耦合等离子体原子发射光谱和激光剥蚀电感耦合等离子体质谱对一批古代钾玻璃的主量、次量和微量元素进行测试,表明此方法十分适合古代文物的高精度分析。尤其是飞秒激光等离子体质谱技术由于其脉宽(时间)极短,大大降低基体表面在测试时的温度,且在低脉冲能量下可以达到高峰值功率,也降低了过程可能发生的分馏效应,提高测量结果的精准度^[71],在文物研究中可用于原位同位素分析^[72]。

激光诱导击穿光谱法是一种基于等离子体发射光谱分析进行成分检测的方法,它是激光脉冲发射至待测样品表面诱导形成发射光谱,经过光纤传输至光谱仪进行分析检测^[73],实现了激光剥蚀技术和激光诱导击穿光谱技术的结合,具有快速、灵敏度高、可对多种元素同步分析的优点,且不需要制备样品或对样品损伤极小,适合不宜取样的文物分析。该方法目前在砖瓦、陶器等文物中得到了广泛应用。卢芳琴等^[74]利用该技术对三个不同地方的青砖进行检测分析,并获得了各样品的特征光谱,表明该技术可以在对文物损伤很小的情况下,快速对文物进行定性和定量分析。吴卫红等^[75]利用该技术对凌家滩遗址出土陶器进行成分检测,成功鉴别出不同类型的麝和料。

2.5 文物修复的激光焊接技术

激光焊接技术是利用光子轰击被焊接金属表面形成金属蒸汽,这种激光光束能量密度较高,可达到使物体受热融化再冷却来完成焊接的目的,且蒸发的金属可以保证焊缝对激光的吸收量^[76]。与传统焊接方法相比,由于文物表面的形状、图案比较复杂,激光焊接对文物的热影响和文物形变程度均较小,组织均匀,晶体粒度细,更加适合精细焊接,焊接完成后物体的多种性能都优于传统焊接。

激光焊接多用于青铜器,特别是薄壁青铜器的局部焊接和修复^[77],我国自 20 世纪 90 年代以来,利用该技术修复了一些青铜器文物,是对传统青铜器修复方法的重要补充。胡家喜等^[78]采用该技术成功修复了九

连墩出土的破损双音编钟,经测试发现不仅完全复原了文物的尺寸和形貌特征,而且在音频、音色方面完全恢复其特征,为古代金属乐器的修复尤其是形声方面的复原提供了一套全新的技术路线和工艺流程。叶心适等^[79]采用二氧化碳激光器配合 YAG 固体脉冲激光器,对陕西城固汉代铜耳杯的边缘至底部开裂区域进行激光焊接修复,最终在显微镜下所观察到的焊点和焊缝具有明显的修复效果。

3 激光技术应用存在的不足及其方向

3.1 存在的不足

对于文物激光清洗技术而言,文物所能承受的激光能量阈值需要做大量的预实验。文物的成分千差万别,其最佳的清洗阈值尚未完整建立,而最佳阈值的确立与激光器的波长、功能、自适应安全调控等方面息息相关,若低于最佳阈值则会导致清洗达不到预期效果,若高于最佳阈值则会对文物造成不可挽回的伤害,对于文物这种不可再生资源来说具有极大的风险,因此前期预实验工作较为繁琐,这无疑降低了清洗的效率。并且激光清洗设备的成本相比于传统化学或手工机械除锈要高得多,这也是激光清洗在文物保护领域中没有普及的原因之一。另外,湿式清洗法可能会对文物造成二次损伤,并且液膜的去除方式也是需要考虑的问题。

激光三维扫描技术的实际精度与标示精度会存在差异,尤其是针对圆弧形轮廓地方,测量的精度会比其他平坦的地方精度下降,导致扫描精度模糊,文物数据的完整性无法得到保证,因此采集的目标纹理数据不能真实地还原现实,而且海量数据处理过程复杂且对物理存储设备的容量性要求较高。另外对于非透明文物而言,发射的激光无法穿透到文物内部,导致不能获取目标实体的材质、成分、温度、湿度等全方位的信息。

激光拉曼光谱分析的光学参数对不同振动峰重叠和拉曼散射强度有较大的影响,可能会导致测量不准确。有些文物的成分会随着时间的变化而发生变化,以及埋藏环境和处理样品的过程中可能会带入新的杂质,这些外界干扰都会导致分析结果不准确。随着拉曼光谱在文物领域的普及以及现场分析的需求,如何改良尽可能不受环境影响的、适用于现场分析的仪器是需要攻克的难题。

由于激光剥蚀技术常与其他检测手段联用,其技术水平还不太高,匮乏专业数据处理软件,文物材料在测试过程中产生的分馏效应以及基体的效应仍然会对检测结果造成影响,因此对于相关软件的开发以及对于数据的校正是发展该技术的主要任务。

激光焊接技术作为一种会造成局部高温的修复手段,目前多应用于金属类文物(主要用于青铜器)的修复中,应用面相对较窄。

3.2 未来发展方向

激光相关技术目前正处于发展阶段,在文物保护领域,国外使用激光技术对文物进行分析检测和保护较早,国内还存在很大的发展空间。

激光清洗技术可作为文物保护未来的发展方向之一,为了实现激光清洗的规模使用,应在其他清洗领域推广该技术,从而调动科研机构研发激光清洗设备的积极性,促进相关产业发展,努力克服设备昂贵对普及造成的影响。在操作安全性方面,激光器本体可增加指示光源,确定激光器的位置,或改进移动平台,利用机械手和光纤进行无接触式清洗,从而实现激光防护。激光清洗技术现多应用于陶瓷、金属、石质等一些性能相对稳定的文物中,在未来的研究中应注重其他类型文物的清洗,对于较为脆弱的文物应对保护液膜的种类进行进一步筛选研究,从而实现在液膜的保护下激光器还可起到良好的清洗效果,增加其应用的广泛性。此外可以通过建模以及计算机模拟技术详细分析文物表面待清洗成分,理论计算清洗阈值,提高清洗效率。

激光三维扫描技术目前需要攻克的主要困难是测绘过程中出现的海量数据处理,其中包括很多无用噪点需要去除,未来会有更多的智能算法对该类无用噪点进行降噪,便于更好地进行建模。此外,激光三维扫描技术与虚拟现实技术相结合,更多地应用于虚拟修复以及数字博物馆的虚拟展示中,尽可能提高三维模型的精度是文物数字化的重要趋势,与此同时,在文物的测绘方面也会尽可能地减小设备误差和测试误差,减少环境对于测绘的影响,进一步提高测绘精度。

激光拉曼光谱技术在文物保护领域应用较为广泛。未来激光拉曼技术不仅可以用于定性分析,对于彩绘表面的成分分析而言,根据待测区域的物质分布图,可以计算出各物质的面积占比,进而换算出各颜料的百分含量比,得出对于彩绘颜料的半定量分析。另外在古生物体的检测中,目前已经有学者认为基于激光拉曼技术可以提供一种独特的分子振动信息对脱氧核糖核酸(DNA)进行检测,并有望实现单分子水平超灵敏度检测^[80]。

激光剥蚀技术联用的质谱技术,除整体分析外,微区探针分析、原位同位素比值测定、指纹分析都将是重要的发展趋势。尤其是在激光剥蚀电感耦合等离子体质谱微区分析技术中,可以对微区内的气体、液体组成进行成分分析,从而得到某种元素的流动情况。而指纹分析和同位素分析则依托于未来建立健全的不同来源的元素质谱库,从谱图的重叠程度可以直接判断样品来源。此外,飞秒或者皮秒技术会大大减少激光剥蚀样品的时间,降低其热效应的同时也降低了剥蚀过程中元素的分馏效应,将是未来激光器的发展方向。

激光焊接技术作为一种绿色环保的技术手段,尤

其在制造业,国内外都给予了较高的关注,作为一种不可逆的修复手段,在焊接材料的选择上,应尽可能地对待焊接文物本体材料保持一致。在焊接技术系统方面,应结合智能化技术,在灵敏的智能监控系统条件下进行自动化、智能化激光焊接修复。

文物保护是社会科学与自然科学交叉的学科之一,随着激光相关技术趋于成熟,会有越来越多的学者尝试使用新型激光仪器与技术来保护、研究文物本体及其内涵价值。

4 结束语

综上所述,激光技术在文物保护研究领域的使用还处于起步阶段。主要在以下方面有所应用:

1) 激光清洗技术。利用合适的激光参数照射污染部位从而达到清除表面污染物的目的,已经在石质、金属、陶瓷、壁画等无机类文物上有所应用,并在书画类等有机质文物开展尝试。

2) 文物数字化的三维激光扫描技术。利用三维激光扫描获得文物几何数据,借助测绘软件转化为文物的三维模型信息。目前主要在大型不可移动文物(如古建、石窟寺等)及部分可移动文物(陶俑、青铜器等)上进行应用,实现文物的信息提取、病害调查、数字化展示等。另外,还可建立文物保护的管理系统,提升文物的信息化程度。

3) 文物物质结构的激光拉曼光谱分析。激光拉曼技术因其无损或微损的特点常用于文物分子组成和结构的研究,目前在彩绘类文物的化学组成、青铜器锈蚀产物分析、玉器的无损鉴别及有机类文物成分分析等方面有所发展。

4) 文物化学组成测定的激光剥蚀技术。激光剥蚀技术由于其具有原位、微区的优势,作为一种剥蚀方法常与其他仪器进行联用,目前应用于文物化学组成测定的技术包括激光剥蚀电感耦合等离子体质谱及激光诱导击穿光谱,可以成功对于青铜器、古玻璃等文物的化学组成进行测试研究。

5) 激光焊接技术。利用激光焊接的竖斑直径小以及光束能量高的特点,主要针对金属类文物,尤其是复杂薄壁青铜器进行焊接修复,此种方法对于文物的热影响和变形程度均较小,可以更好地还原文物的形貌特征。

虽然仍有不足之处,但是激光技术在文物保护与修复工作中的成功应用,显示出其独特的优势,具有十分广阔的开发和应用前景。

参 考 文 献

- [1] 凌雪, 吴萌蕾, 廖原, 等. 文物研究与保护中的无损分析技术[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(7): 2026-2031.
Ling X, Wu M L, Liao Y, et al. Nondestructive techniques in the research and preservation of cultural

- relics[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(7): 2026-2031.
- [2] 董远浩. 激光技术在不同领域的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2019(12): 99.
Dong Y H. Application of laser technology in different fields[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2019(12): 99.
- [3] 宋峰, 伍雁雄, 刘淑静. 激光清洗的发展历程[J]. 清洗世界, 2005, 21(6): 37-40.
Song F, Wu Y X, Liu S J. History of laser cleaning development[J]. Cleaning World, 2005, 21(6): 37-40.
- [4] 王泽敏, 曾晓雁, 黄维玲. 激光清洗工艺的发展现状与展望[J]. 激光技术, 2000, 24(2): 68-73.
Wang Z M, Zeng X Y, Huang W L. Status and prospect of laser cleaning procedure[J]. Laser Technology, 2000, 24(2): 68-73.
- [5] 艾思飞, 王非森, 汪倩, 等. 高温氧化钛合金激光清洗机理与工艺[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(21): 2114012.
Ai S F, Wang F S, Wang Q, et al. Laser cleaning mechanism and process of high-temperature-oxidized titanium alloy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(21): 2114012.
- [6] 张杨, 陈永骞, 朱广志, 等. 单光束叠加脉冲 Nd:YAG 激光器的研究[J]. 激光技术, 2016, 40(3): 311-314.
Zhang Y, Chen Y Q, Zhu G Z, et al. Research of the superposed pulsed Nd: YAG laser in a single beam[J]. Laser Technology, 2016, 40(3): 311-314.
- [7] 李燕凌, 贾凯, 顾宪松, 等. 25 kHz、约 2 ns 声光调 Q Nd:YVO₄ 激光器研究[J]. 激光技术, 2018, 42(1): 34-38.
Li Y L, Jia K, Gu X S, et al. Study on an acousto-optical Q-switched Nd: YVO₄ laser with 25 kHz repetition rate and about 2 ns pulse duration[J]. Laser Technology, 2018, 42(1): 34-38.
- [8] 宋启良, 胡振峰, 梁秀兵, 等. 激光清洗技术的发展与应用[J]. 新技术新工艺, 2019(4): 1-5.
Song Q L, Hu Z F, Liang X B, et al. Development and application of laser cleaning technology[J]. New Technology & New Process, 2019(4): 1-5.
- [9] Asmus J F, Murphy C G, Munk W H. Studies on the interaction of laser radiation with art artifacts[J]. Proceedings of SPIE, 1974, 0041: 19-30.
- [10] Andreotti A, Brown W P, Camaiti M, et al. Diagnosis of materials and effectiveness of Er:YAG laser cleaning as complementary treatment in a panel painting attributed to Lluís Borrassà (fifteenth century)[J]. Applied Physics A, 2016, 122(6): 122.
- [11] 齐扬, 周伟强, 陈静, 等. 激光清洗云冈石窟文物表面污染物的试验研究[J]. 安全与环境工程, 2015, 22(2): 32-38.
Qi Y, Zhou W Q, Chen J, et al. Laser cleaning of contaminants on the surface of Yungang grottoes[J]. Safety and Environmental Engineering, 2015, 22(2): 32-38.
- [12] 叶亚云, 齐扬, 秦朗, 等. 激光清除石质文物表面污染物[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0903005.
Ye Y Y, Qi Y, Qin L, et al. Laser cleaning of contaminations on the surface of stone relics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(9): 0903005.
- [13] 齐扬, 周伟强, 周萍, 等. 激光清洗石质文物工艺[J]. 江汉考古, 2015(1): 112-117.
Qi Y, Zhou W Q, Zhou P, et al. Technology of laser cleaning stone cultural relics[J]. Jiangnan Archaeology, 2015(1): 112-117.
- [14] 周伟强, 齐扬, 叶亚云. 广西花山岩画表面污染物去除研究[J]. 中原文物, 2013(2): 97-100.
Zhou W Q, Qi Y, Ye Y Y. Study on the removal of pollutants from the surface of Huashan rock paintings in Guangxi[J]. Cultural Relics of Central China, 2013(2): 97-100.
- [15] 张秉坚, 尹海燕. 石质文物的清洗技术和清洗效果检测[J]. 石材, 2000(7): 23-25.
Zhang B J, Yin H Y. Cleaning technology and effect detection of stone cultural relics[J]. Stone, 2000(7): 23-25.
- [16] 王昊, 付永海. 海洋出水石雕文物表面污染物激光清洗实验研究[J]. 应用激光, 2018, 38(4): 623-629.
Wang H, Fu Y H. Experimental study on laser cleaning of surface contaminants in marine stone sculptures cultural relic[J]. Applied Laser, 2018, 38(4): 623-629.
- [17] 蒋德宾, 罗毅, 高敏. 脉冲激光去除青铜文物锈斑的研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 1986, 16(4): 19-23, 136.
Jiang D B, Luo Y, Gao M. A research for removing rust on the surface of the bronze relics by the pulse laser[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 1986, 16(4): 19-23, 136.
- [18] 张晓彤, 张鹏宇, 杨晨, 等. 激光清洗技术在了一件鎏金青铜文物保护修复中的应用[J]. 文物保护与考古科学, 2013, 25(3): 98-103.
Zhang X T, Zhang P Y, Yang C, et al. Laser cleaning technology in the conservation of gilt bronze[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2013, 25(3): 98-103.
- [19] 李荃, 沈引平. 对激光清除青铜器粉状锈技术的分析和探讨[J]. 文物保护与考古科学, 1990, 2(1): 22-25.
Li Q, Shen Y P. Analysis and discussion of cleaning away powdery rust of bronze by laser technology[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 1990, 2(1): 22-25.
- [20] 沈依嘉, 周浩, 沈敬一. 琼脂凝胶在青铜文物激光清洗中的应用研究[J]. 文物保护与考古科学, 2018, 30(3): 1-13.
Shen Y J, Zhou H, Shen J Y. Applied research on the agar gel-mediated laser cleaning of bronze objects[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2018, 30(3): 1-13.
- [21] Raza M S, Das S S, Tudu P, et al. Excimer laser cleaning of black sulphur encrustation from silver surface[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 113: 95-103.
- [22] 张力程, 周浩. 激光清洗技术在了一件汉代彩绘女陶俑保护修复中的应用[J]. 文物保护与考古科学, 2017, 29(2): 67-75.
Zhang L C, Zhou H. Restoration of a polychrome female pottery figurine from Han Dynasty using laser cleaning

- techniques[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2017, 29(2): 67-75.
- [23] 张欢. “南澳 I 号”沉船出水瓷器类文物表面凝结物激光清洗实验研究[J]. *中国文化遗产*, 2019(5): 23-30.
Zhang H. Experimental study on laser cleaning of condensate on outlet porcelain of the "Nanao" sunken ship [J]. *China Cultural Heritage*, 2019(5): 23-30.
- [24] Gaetani C, Santamaria U. The laser cleaning of wall paintings[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2000, 1: S199-S207.
- [25] 王佳, 霍晓彤, 杨文宗. 馆藏壁画表面污染物的激光清洗初步研究[J]. *文物保护与考古科学*, 2020, 32(1): 61-69.
Wang J, Huo X T, Yang W Z. Preliminary research on laser cleaning of mural contaminants[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2020, 32(1): 61-69.
- [26] Belli R, Miotello A, Mosaner P, et al. Laser cleaning of ancient textiles[J]. *Applied Surface Science*, 2005, 247 (1/2/3/4): 369-372.
- [27] Kolar J, Strlič M, Müller-Hess D, et al. Laser cleaning of paper using Nd: YAG laser running at 532 nm[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2003, 4: 185-187.
- [28] 赵莹. 书画类文物激光清洗试验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009: 17-45.
Zhao Y. Research on laser cleaning of Chinese painting and calligraphy[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009: 17-45.
- [29] 蔺小虎, 姚顽强, 马润霞, 等. 基于海量点云数据的大雁塔三维重建[J]. *文物保护与考古科学*, 2017, 29(3): 67-72.
Lin X H, Yao W Q, Ma R X, et al. Three dimensional reconstruction of the Great Wild Goose Pagoda based on massive point cloud data[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2017, 29(3): 67-72.
- [30] 刘翔宇. 大同华严寺及薄伽教藏殿建筑研究[D]. 天津: 天津大学, 2015: 219-264.
Liu X Y. Architecture research on the great Huayan monastery and its sutras hall in Datong City[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015: 219-264.
- [31] 李永强, 刘会云, 冯梅, 等. 大型古建筑文物三维数字化保护研究: 以白马寺齐云塔为例[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 31(2): 186-190.
Li Y Q, Liu H Y, Feng M, et al. Research on 3D digitization protection of large historic building relic take great white horse temple's Qiyun pagoda for example [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2012, 31(2): 186-190.
- [32] 李卫伟, 张予正, 刘科. 数字技术在文物保护利用工作中的应用探讨——以巴黎圣母院火灾启示为中心[J]. *北京文博文丛*, 2019(3): 110-117.
Li W W, Zhang Y K, Liu K. Discussion on the application of word technology in the protection and utilization of cultural relics: centered on the Enlightenment of Notre Dame fire in Paris[J]. *Beijing Cultural Relics and Museums*, 2019(3): 110-117.
- [33] 李丽红. 三维激光扫描技术在云冈石窟数字化中的应用[J]. *经纬天地*, 2018(6): 41-43, 47.
Li L H. Application of 3D laser scanning technology in the digitization of Yungang Grottoes[J]. *Survey World*, 2018(6): 41-43, 47.
- [34] 夏国芳, 胡春梅, 范亮. 一种面向造像类文物的真三维模型精细重建方法[J]. *敦煌研究*, 2018(3): 131-140.
Xia G F, Hu C M, Fan L. A method for reconstructing precise 3D models for statues[J]. *Dunhuang Research*, 2018(3): 131-140.
- [35] 赵岗, 黄能迁, 隆凌生. 大足石刻数字测绘探索与实践[J]. *石窟寺研究*, 2017: 387-394.
Zhao G, Huang N Q, Long L S. Exploration and practice of digital surveying and mapping of Dazu rock carvings[J]. *Studies of the Cave Temples*, 2017: 387-394.
- [36] 孙保燕, 翁裕育, 周贤君. 基于Remake的三维建模技术在摩崖石刻数字化重建中的应用[J]. *文物保护与考古科学*, 2018, 30(4): 110-114.
Sun B Y, Weng Y Y, Zhou X J. Application of Remake-based 3D modeling technology to digital reconstruction of cliff carvings[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2018, 30(4): 110-114.
- [37] 井哲帆, 汪万福, 王坤, 等. 三维激光扫描技术在文物保护中的应用——以甘谷大像山大佛三维建模为例[J]. *石窟寺研究*, 2017: 407-416.
Jing Z F, Wang W F, Wang K, et al. Application of 3D laser scanning in conservation of cultural relics: a case study of 3D modeling of great big buddha in Gangu county [J]. *Studies of the Cave Temples*, 2017: 407-416.
- [38] 南竣祥, 梁爽, 李海泉, 等. 秦蜀古道三维扫描测量精度分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2017, 40(3): 213-214, 217, 220.
Nan J X, Liang S, Li H Q, et al. The measurement accuracy analysis of Qinshu Road 3D scanning[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2017, 40 (3): 213-214, 217, 220.
- [39] 孙依纯. 成都博物馆藏石兽文物三维勘测及病害调查研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2020.
Sun Y C. Three dimensional survey and disease investigation of stone and animal cultural relics in Chengdu museum[D]. Beijing: Central University for Nationalities, 2020.
- [40] 杨三. 三维激光扫描技术在文物建筑勘察中的应用[J]. *施工技术*, 2020, 49(21): 15-17.
Yang S. Application of 3D laser scanning technology in the survey of historic building[J]. *Construction Technology*, 2020, 49(21): 15-17.
- [41] 许辰, 李曼, 焦谷雨. 三维激光扫描在考古信息采集后期的应用: 以花地嘴陶高领罐为例[J]. *大众考古*, 2018 (6): 36-39.
Xu C, Li M, Jiao G Y. Application of three-dimensional laser scanning in late stage of archaeological information acquisition: taking Huadizui ceramic high-collar tank as an example[J]. *Popular Archaeology*, 2018(6): 36-39.
- [42] 马静. 三维激光扫描技术在陶俑三维建模中的应用[J]. *测绘标准化*, 2017, 33(2): 39-41.
Ma J. Application of 3D laser scanning in 3D modeling of terra cotta figurine[J]. *Standardization of Surveying and Mapping*, 2017, 33(2): 39-41.

- [43] 杨艳, 王晏民, 黄明. 基于深度图像的司母戊鼎三维重构及其应用[J]. 测绘通报, 2014(S2): 187-189, 208.
Yang Y, Wang Y M, Huang M. Three-dimensional reconstruction and application of smooth valentine ding based on depth image[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(S2): 187-189, 208.
- [44] 程虎伟, 高振华, 陈鑫. 浅谈三维数字技术在古代青铜器保护中的应用: 以绛县横水西周墓地青铜器三维扫描为例[J]. 文物世界, 2013(6): 57-60.
Cheng H W, Gao Z H, Chen X. Talking about the application of three-dimensional digital technology in the protection of ancient bronzes: taking the three-dimensional scanning of bronzes in the western zhou cemetery in Hengshui county as an example[J]. World of Antiquity, 2013(6): 57-60.
- [45] 崔力鹏. 基于 GIS 和三维激光扫描技术的文物保护管理系统的设计与实现[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019: 15-65.
Cui L P. Design and implementation of cultural relics protection management system based on GIS and 3D laser scanning technology[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019: 15-65.
- [46] 汪祖进. 面向文物保护的 3S 技术及其集成应用[J]. 文物保护与考古科学, 2002, 14(2): 52-58.
Wang Z J. Application of 3S-technology and its integration in protection of cultural relics[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2002, 14(2): 52-58.
- [47] 刘斌, 张军, 鲁敏, 等. 激光雷达应用技术研究进展[J]. 激光与红外, 2015, 45(2): 117-122.
Liu B, Zhang J, Lu M, et al. Research progress of laser radar applications[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(2): 117-122.
- [48] 沈大娟, 郑菲, 吴娜, 等. 拉曼光谱在文物考古领域的应用态势分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(9): 2657-2664.
Shen D W, Zheng F, Wu N, et al. Trend analysis of Raman application in cultural relics and archaeological research[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(9): 2657-2664.
- [49] 赵灵委, 陈海龙, 赵虹霞, 等. 庙底沟遗址出土仰韶文化彩陶的科学研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(5): 1420-1429.
Zhao L W, Chen H L, Zhao H X, et al. A scientific research of the painted potteries of the Yangshao culture from the Miao-di-Gou site[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(5): 1420-1429.
- [50] 王荣, 朔知, 承焕生. 安徽史前孙家城和黄家堰等遗址出土玉器的无损科技研究[J]. 复旦学报(自然科学版), 2011, 50(2): 121-130, 253.
Wang R, Shuo Z, Cheng H S. Non-destructively scientific research on the prehistoric jades unearthed from the Sunjiacheng and Huangjiayan site of Anhui Province [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2011, 50(2): 121-130, 253.
- [51] 成小林, 潘路. 新干商墓青铜器非晶与纳米晶锈蚀产物结构的分析研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(5): 1270-1273.
Cheng X L, Pan L. Research on the mineral phase and component of non-crystalline and nano-crystalline corrosion products on bronzes unearthed from Shang tomb in Xingan[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(5): 1270-1273.
- [52] 陈冬梅, 司长代, 龙世佳. 光谱技术在文物绘画用胶结材料中的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(3): 961-966.
Chen D M, Si C D, Long S J. Research progress of spectral technologies of binding media used in paintings [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(3): 961-966.
- [53] 王雪培, 赵虹霞, 刘松, 等. 古代多色硅酸盐制品的光谱学分析及方法学研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(12): 4045-4051.
Wang X P, Zhao H X, Liu S, et al. Research method and spectral analysis of ancient polychromatic silicate artifacts[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(12): 4045-4051.
- [54] 武锋强, 杨武年, 李丹. 基于高光谱成像与拉曼技术的艺术画颜料成分对比检测研究[J]. 矿物学报, 2014, 34(2): 166-170.
Wu F Q, Yang W N, Li D. Research on art painting pigment composition recognition based on hyperspectral imaging technique and Raman spectra[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2014, 34(2): 166-170.
- [55] 司艺, 蒋洪恩, 王博, 等. 新疆阿斯塔那墓地出土唐代木质彩绘的显微激光拉曼分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(10): 2607-2611.
Si Y, Jiang H E, Wang B, et al. Raman microspectroscopic analysis of polychrome wooden artifact from the Astana tomb of the Tang dynasty, Xinjiang, China[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(10): 2607-2611.
- [56] 曾庆光, 张国雄, 谭金花. 开平碉楼灰雕和壁画颜料碎片原材料的拉曼光谱分析[J]. 光散射学报, 2011, 23(2): 158-161.
Zeng Q G, Zhang G X, Tan J H. Raman analysis of the raw materials of the plaster sculpture and fresco pigments in Kaiping Diaolou tower[J]. The Journal of Light Scattering, 2011, 23(2): 158-161.
- [57] 常晶晶. 古代壁画中矿物颜料的拉曼光谱研究[C]//第十六届全国分子光谱学学术会议论文集. 北京: 中国光学学会、中国化学会, 2010: 279-280.
Chang J J. Raman spectra of the pigments in ancient wall paintings[C]//Proceedings of the 16th National Molecular Spectroscopy Academic Conference. Beijing: China Optical Society, China Chemical Society, 2010: 279-280.
- [58] Edwards H G M, Wolstenholme R, Wilkinson D S, et al. Raman spectroscopic analysis of the enigmatic Comper pigments[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2007, 387(6): 2255-2262.
- [59] Burgio L, Clark R J H. Library of FT-Raman spectra of pigments, minerals, pigment media and varnishes, and supplement to existing library of Raman spectra of pigments with visible excitation[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy,

- 2001, 57(7): 1491-1521.
- [60] 崔亚量, 郑桂梅, 李建新, 等. 唐代铜佛像表面残片的拉曼光谱分析[J]. 分析科学学报, 2011, 27(4): 431-434.
Cui Y L, Zheng G M, Li J X, et al. Raman spectra and elements evaluation of a Tang dynasty Buddha[J]. Journal of Analytical Science, 2011, 27(4): 431-434.
- [61] McCann L I, Trentelman K, Possley T, et al. Corrosion of ancient Chinese bronze money trees studied by Raman microscopy[J]. Journal of Raman Spectroscopy, 1999, 30(2): 121-132.
- [62] Frost R L, Martens W, Klopogge J T, et al. Raman spectroscopy of the basic copper chloride minerals atacamite and paratacamite: implications for the study of copper, brass and bronze objects of archaeological significance[J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2002, 33(10): 801-806.
- [63] 裔传臻. 拉曼光谱在纸质文物研究中的应用[J]. 文物保护与考古科学, 2018, 30(3): 135-141.
Yi C Z. Applications of Raman spectroscopy to the analysis of paper relics[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2018, 30(3): 135-141.
- [64] 张慧, 张金萍, 朱庆贵. 现代分析技术在古旧纸本字画保护修复中的应用[J]. 文物修复与研究, 2014: 393-398.
Zhang H, Zhang J P, Zhu Q G. The application of modern analysis technology in the protection and restoration of ancient paper calligraphy and painting[J]. Restoration and Research of Cultural Relics, 2014: 393-398.
- [65] 李涛. 中国古代纸质文物的无损化学分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2010: 53-62.
Li T. Technical investigation of ancient Chinese paper based materials with non-destructive chemical methods [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010: 53-62.
- [66] Zhou W H, Gan Q, Ji J X, et al. Non-destructive identification of pigments printed on six Imperial China Engraved Coiling Dragon stamps[J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2016, 47(3): 316-320.
- [67] 陈磊, 裴克梅, 康晓静, 等. 表面增强拉曼光谱对纺织品文物中茜素和茜紫素的快速检测[J]. 纺织学报, 2019, 40(3): 76-82.
Chen L, Pei K M, Kang X J, et al. Rapidly detection of alizarin and purpurin in textile relics by surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(3): 76-82.
- [68] 付倩丽. 古代矿物颜料拉曼光谱定量分析方法模拟实验研究[D]. 西安: 西北大学, 2016: 7-48.
Fu Q L. Simulation experiment study on ancient mineral pigment quantitative analysis by Raman spectroscopy[D]. Xi'an: Northwest University, 2016: 7-48.
- [69] 凌雪, 贾腊江, 柳小明, 等. 春秋时期秦青铜器微量元素激光剥蚀等离子体质谱[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48(1): 8-14.
Ling X, Jia L J, Liu X M, et al. Trace elements in Qin bronzes from the spring and autumn period determined by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2012, 48(1): 8-14.
- [70] 斯琴毕力格, 李青会, 干福熹. 激光剥蚀-电感耦合等离子体-原子发射光谱/质谱法分析中国古代钾玻璃组分[J]. 分析化学, 2013, 41(9): 1328-1333.
Siqin B L G, Li Q H, Gan F X. Analysis of ancient Chinese potash glass by laser ablation inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry/mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2013, 41(9): 1328-1333.
- [71] 陈开运, 范超, 袁洪林, 等. 飞秒激光剥蚀-多接收电感耦合等离子质谱原位微区分析青铜中铅同位素组成-以古铜钱币为例[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(5): 1342-1349.
Chen K Y, Fan C, Yuan H L, et al. High-precision *in situ* analysis of the lead isotopic composition in copper using femtosecond laser ablation MC-ICP-MS and the application in ancient coins[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(5): 1342-1349.
- [72] Iñáñez J G, Bellucci J J, Rodríguez-Alegria E, et al. Romita pottery revisited: a reassessment of the provenance of ceramics from Colonial Mexico by LA-MC-ICP-MS[J]. Journal of Archaeological Science, 2010, 37(11): 2698-2704.
- [73] 张大成, 冯中琦, 魏宽, 等. 远程激光诱导击穿光谱技术与应用(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(10): 1030001.
Zhang D C, Feng Z Q, Wei K, et al. Remote laser-induced breakdown spectroscopy and its application[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(10): 1030001.
- [74] 卢芳琴, 史彦超, 王逢睿, 等. 利用激光诱导击穿光谱分析法检测古建筑砖瓦成分[J]. 广州化工, 2018, 46(9): 80-82.
Lu F Q, Shi Y C, Wang F R, et al. Element analysis of blue brick and tile of ancient architecture with laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2018, 46(9): 80-82.
- [75] 吴卫红, 姚政权, 王京, 等. 凌家滩遗址出土陶器的 LIBS-PCA 分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(2): 628-631.
Wu W H, Yao Z Q, Wang J, et al. Quick classification of pottery from Lingjiatan site (3000BC) based on laser induced breakdown spectroscopy and principal component analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(2): 628-631.
- [76] 刘海, 陈辉. 激光功率对异种钢激光焊接接头组织与性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 2314007.
Liu H, Chen H. Effect of laser power on microstructure and properties of dissimilar steel's laser welded joint[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 2314007.
- [77] 叶心适, 张津生, 陈静, 等. 可控激光束焊接薄壁青铜器工艺实验[J]. 文物保护与考古科学, 2003, 15(2): 10-13, 66.
Ye X S, Zhang J S, Chen J, et al. Controlled laser beam welding used in restoration of thin-wall ancient bronzes [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2003, 15(2): 10-13, 66.
- [78] 胡家喜, 曾晓雁, 张翔, 等. 九连墩战国编钟形声复原

- 研究[J]. 文物保护与考古科学, 2009, 21(2): 17-26.
- Hu J X, Zeng X Y, Zhang X, et al. Recovery both the morphological and acoustic characteristics of JIU-LIANDUN chimes in the warring states period[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2009, 21(2): 17-26.
- [79] 叶心适, 张津生, 刘林西, 等. 激光焊接修复汉代青铜耳杯[J]. 文博, 2004(3): 51-55.
- Ye X S, Zhang J S, Liu L X, et al. Repairing bronze ear cup of Han Dynasty by laser welding[J]. Relics and Museology, 2004(3): 51-55.
- [80] 唐玉龙, 郭周义. 激光拉曼光谱技术在生物分子 DNA 研究中的应用和进展[J]. 激光生物学报, 2004, 13(5): 386-393.
- Tang Y L, Guo Z Y. The application and development of Raman spectroscopy on biological molecule DNA[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2004, 13(5): 386-393.