

文章编号: 1002-1582(2026)01-0048-06

纳秒激光清洗技术在青铜器上的应用

于燕¹, 李晨毓^{2*}, 刘瀚文², 张雪雁², 段佩权²

(1. 故宫博物院 文保修复部, 北京 100009)

(2. 故宫博物院 文保标准部, 北京 100009)

摘 要: 青铜器大多数曾经埋藏在地下, 因而受到土壤或地下水中所含各类物质的侵蚀而在表面形成不同的腐蚀产物。表面的污染物或者腐蚀产物可能会对青铜器本体产生损害, 因此这些有害物质的清洗显得尤为重要。激光清洗技术被广泛应用于工业领域, 由于文物是不可再生、不可替代的中华优秀文明资源, 激光清洗技术近20多年才被应用于文物保护领域。文章利用激光共聚焦显微拉曼光谱仪和X射线荧光光谱仪对两件青铜器表面的成分进行科学分析。拉曼的结果表明, 铜镜表面的红色腐蚀产物为羟基氧化铁, 淡蓝色腐蚀产物为非晶态二氧化锡; 半圆形青铜器表面的蓝色腐蚀产物为靛蓝, 绿色腐蚀产物可能为钴绿, 红色腐蚀产物为羟基氧化铁。X射线荧光光谱仪的结果表明, 铜镜表面除基体元素Cu、Sn、Pb, 还有Fe、Ca、Al、Si、S、Zn等元素; 半圆形青铜器除基体元素Cu、Sn、Pb, 还有Fe、Zn、Ca、Si、S等元素。两个青铜器表面腐蚀产物的清洗分别尝试利用焦点处和非焦点处激光清洗。结果表明, 离焦时激光能量密度为 $3.8\text{J}/\text{cm}^2$, 重复频率1Hz, 脉冲数为5个, 铜镜清洗效果较好。在焦点处, 清洗半圆形青铜器时激光能量密度为 $89\text{J}/\text{cm}^2$, 重复频率为10Hz, 清洗次数为1次, 清洗效果较好; 离焦时, 激光能量密度为 $2.87\text{J}/\text{cm}^2$, 重复频率为1Hz, 脉冲数为5个, 半圆形青铜器会产生较好的清洗效果。实验结果探索出激光清洗技术在青铜器清洗的可能性和实用性。

关 键 词: 激光清洗技术; 青铜器; 腐蚀; 污染物

中图分类号: O439

文献标识码: A

Application of nanosecond laser cleaning technology on bronze ware

YU Yan¹, LI Chenyu^{2*}, LIU Hanwen², ZHANG Xueyan², DUAN Peiquan²

(1. Department of Conservation and Restoration, The Palace Museum, Beijing 100009, China)

(2. Department of Conservation Standards, The Palace Museum, Beijing 100009, China)

Abstract: Most bronze artifacts were used to bury underground, where they were eroded by various substances in the soil or groundwater, forming different corrosion products on their surfaces. Surface contaminants or corrosion products may damage the bronze itself, making the removal of these harmful substances particularly crucial. Laser cleaning technology has been widely applied in industrial fields. Since cultural relics are irreplaceable and non-renewable resources of China's outstanding civilization, laser cleaning technology has only been used in the field of cultural heritage preservation in the past two decades. This study employs a laser confocal Raman spectrometer and X-ray fluorescence spectrometer to scientifically analyze the composition of corrosion products on the surfaces of two bronze artifacts. Raman results indicate that the red corrosion product on the bronze mirror is iron oxyhydroxide, while the light blue corrosion product is amorphous tin dioxide. The blue

收稿日期: 2025-07-03; 收到修改稿日期: 2025-10-16

基金项目: 国家重点研发计划专项资助(2020YFE0204600); 故宫博物院2022年度科研课题“青铜器激光清洗标准流程及关键参数研究”的研究成果(KT2022-12), 得到北京故宫文物保护基金会学术故宫万科公益基金会专项经费资助

作者简介: 于燕(1992—), 女, 馆员, 硕士, 从事金属文物保护修复研究。yuyantgzy@163.com

李晨毓(1989—), 女, 副研究馆员, 博士, 从事激光清洗在文物上的研究。

* 通讯作者: lichenyu@dpm.org.cn

corrosion product on the semicircular bronze artifact is indigo, and the green corrosion product may be cobalt green. The red corrosion product of the semicircular bronze artifact is iron oxyhydroxide. X-ray fluorescence spectrometer results show that in addition to the base elements Cu, Sn, and Pb, the bronze mirror also contains Fe, Ca, Al, Si, S and Zn. The semicircular bronze artifact contains Cu, Sn, Pb, Fe, Zn, Ca, Si and S. The cleaning of corrosion products on the surfaces of both bronze artifacts was attempted using laser cleaning at both the focal and non-focal points. The results demonstrate that in the defocused form, the laser energy density is 3.8 J/cm^2 , a repetition frequency of 1 Hz and five pulses, the cleaning effect on the bronze mirror was optimal. At the focal point, cleaning the semicircular bronze artifact with laser energy density of 89 J/cm^2 , a repetition frequency of 10 Hz and one pulse achieved good results. Defocusing at the laser energy density of 2.87 J/cm^2 , a repetition frequency of 1 Hz and five pulses also yielded favorable cleaning outcomes. The experimental findings explore the feasibility and practicality of laser cleaning technology for bronze artifact conservation.

Keywords: laser cleaning technology; bronze; corrosion; pollutant

0 引言

青铜器的神奇之处在于,其既可以作为装饰用品也可以作为器物^[1],并且能够呈现出各种颜色,例如模仿金的华丽颜色,墨玉的黑色,朱砂的红色,橄榄的淡绿色和银子般的反射效果。与青铜不同,金不会变色,同样铁也不会产生吸引人的锈层,没有其他合金像青铜一般拥有如此多的特性^[2]。青铜器的主要成分是以铜为主的合金,即使表面布满锈蚀产物后仍受人喜爱^[3]。青铜器不断地受到腐蚀,它亲身经历了岁月的流逝,表面锈蚀产物的存在表明了它与氧气、水、可溶盐和二氧化碳以及土壤等相互作用的结果^[4]。但这些锈蚀产物及表面其他附着物或污染物的存在,可能会在挖掘之后的保存过程中随着时间的流逝进一步对青铜器产生有害损伤,另一方面也会影响青铜器本身的价值。在19世纪和20世纪前期,青铜器表面的保护处理一般是利用化学和电化学方法来除去全部锈蚀^[5]。随着科技的进步,还可以利用激光的形式除去表面的锈蚀产物等。

激光清洗技术的发展得益于激光器的发展,1960年5月梅曼发明了人类历史上的第一束激光,对全世界不同领域的应用都有较大的影响。为了让激光能够传输,激光器应运而生^[6]。激光器根据工作介质,可分为固体、气体和液体激光器。激光清洗技术在工业等领域已有长足稳定发展,但由于文物保护领域的珍贵性和特殊性,激光清洗技术在国内发展较为缓慢,但国外已有较多不同类型文物激光清洗的案例^[7]。常应用于文物上的激光器是Nd:YAG激光器、CO₂激光器和准分子激光器等。根据清洗文物类型的不同,从而选择不同类型的激光器^[8]。本文主要研究的是激光清洗技术在金属文物青铜器上的应用,对于此类文物的激光清洗,前人也做了大量的实验研究,例如Siano^[9]等是较早对金属类文物进行激光清洗的实验

小组,金属类型包括银质钱币和青铜器等。一般的实验流程清洗前,对表面污染物或腐蚀产物的成分进行检测与分析,然后利用适合的激光器对其进行清洗^[10]。银质钱币表面的成分包含铜、银的氧化物、泥土和无机物等。激光清洗后显示清洗效果较好,表面无明显损伤^[11];在20世纪70年代末至90年代初,中央公园的许多青铜雕像都涂上了漆作为保护措施。在自然环境下,这些涂层超过了它们的使用寿命,不再能充分保护雕塑。2010年开始,一场去除和翻新涂层的周期性运动就此展开。Basso^[12]等利用1064nm的固体激光器对中央公园的Samuel F. B. Morse雕像表面的污染物和保护层进行激光清洗。在国外,将激光清洗技术应用于金属类文物的应用有很多,例如佛罗伦萨贝弗龙小镇^[13];亚历山大·汉密尔顿的大型户外青铜纪念碑进行重新镀金的清洗和表面处理^[14]。在国内,对激光清洗青铜器研究较多的有沈依嘉^[15],其研究的主要对象为四件青铜器残片,实验流程为在残片表面覆盖一层凝胶,将凝胶作为中间介质,可进一步保护青铜器表面防止损伤,从而达到文物安全的目的。华东理工大学蔡晶芳^[16]等针对常见锈蚀产物疏松绿锈在干式、湿式和琼脂凝胶三种状态下,用钕钇铝石榴石激光器进行激光清洗,并对其安全清洗阈值展开了研究。

本文利用中国—希腊文物保护技术“一带一路”联合实验室研发的激光清洗设备尝试对两件青铜器表面的腐蚀产物或者污染物进行清洗。实验结果表明青铜器表面的腐蚀产物或者污染物可以利用激光来进行清洗,并可以探索出大概的参数范围,但由于青铜器存在环境使其表面的成分复杂,所以清洗程度与效果应与青铜修复师探讨确保其符合文物保护的原则。

1 实验设备

本文所使用的激光清洗设备针对的文物类型

为石质文物、青铜器和画类文物等，是纳秒激光清洗设备。对小型的石质、青铜和画类文物样品，可以利用振镜系统研究其损伤阈值和清洗阈值等。对于大型的样品，可利用导光臂系统进行大面积清洗。因此本文的设备对小样品实现机械清洗，大样品实现人工清洗^[17]。该设备输出的激光波长有三束，分别为 1064nm、532nm 和 355nm，可实现 1064nm、532nm 和 355nm 的单独输出，实现任意两个波长的混合输出，实现 1064nm、532nm 和 355nm 的混合输出。根据不同的文物类型选取不同的波长，例如青铜器一般采用波长为 1064nm 的激光来进行清洗，石质文物一般采用 1064nm 和 355nm 混合波长的激光来进行清洗，而油画一般采用波长为 532nm 的激光来进行清洗。纳秒激光系统主要由激光器、控制电源、光学部分和机械部分等组成。对于激光清洗系统来说最为重要的组成部分即激光器，是激光清洗效果的关键；控制电源为整个系统的运作提供能量；光学部分是将激光器的光引导进入振镜系统或者导光臂系统；机械部分是改变待测样品的位置。激光器主要由纳秒振荡级、放大级和频率变换模块等部分组成。输出单脉冲能量 $>900\text{mJ}$ 、中心波长 1064nm 的纳秒激光^[18]。之后频率变换模块将 1064nm 的纳秒激光频率变换，分别输出单脉冲能量 $>300\text{mJ}$ 、中心波长 532nm 和单脉冲能量 $>150\text{mJ}$ 、中心波长 355nm 的纳秒激光。激光器的脉冲宽度为 10ns，重复频率 1~10Hz，光束直径约为 10mm。该设备的实物图如图 1 所示。综上所述，专研的文物激光清洗实验平台的实验流程主要是纳秒激光输出激光（1064nm、532nm 和 355nm），经过光束控制系统进入振镜系统或者导光臂系统，通过三维样品台的位置变化和操作人员的位置变化改变待测样品的位置从而实现全面清洗^[19]。但该设备在实践应用的过程中也存在不足，未来将根据实际文物需求，改进设备。



图 1 文物激光清洗全链路实验平台示意图

2 实验样品

如图 2 所示，铜镜的尺寸纵向最长为 7.8cm，横向最长为 8cm。表面存在简单装饰，并且存在缺损，从图中可以观察到表面呈现红色产物和淡蓝色产物，还有一些土，从肉眼观察可见红色的污染物表明铜镜与含铁类的位置曾存放在一处。另一个用于激光清洗的青铜器如图 3 所示，半圆形青铜器横向最长为 11.5cm，纵向长度为 7.5cm，表面存在凸起的形状，表面存在绿色腐蚀产物、蓝色腐蚀产物和红色腐蚀产物。这两种器形一般作为镜子使用。

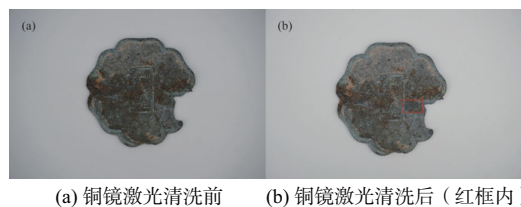


图 2 铜镜激光清洗对比照片

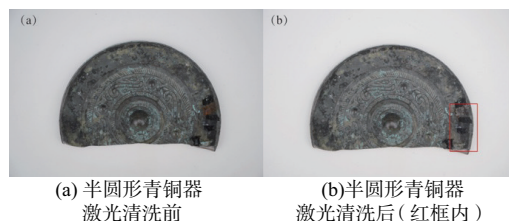


图 3 半圆形青铜器激光清洗对比照片

3 表面腐蚀产物和污染物成分分析

由于待测样品较小，可利用 X 射线荧光光谱仪和激光共聚焦显微拉曼对待测青铜器表面的成分进行原位测试。实验结果为激光清洗表面污染物成分或者腐蚀产物的成分提供参考。

3.1 X 射线荧光光谱

微束 X 射线荧光能谱仪（Bruker 公司，M4 Tornado，德国），对样品清洗前的元素组成进行测试分析，实验参数为 Rh 靶，电压 50kV，电流 200 μA ，采集步长为 10 μm ，采集时间为 120s。光斑大小为 20 μm 。采用该设备对激光清洗区域进行元素测试。测试的点位是图 2（b）的红色框图内，总共测试 6 个点位。元素分析的结果如图 4 所示，实验结果表明：除铜镜基体元素 Cu、Sn、Pb，还有 Fe、Ca、Al、Si、S、Zn 等元素。其含量举例如表格 1 所示。点 3 和点 5 测试的位置从肉眼上观察是一致的，两者的 Fe 的含量有较大的差别，其他元素的含量波动不大，但测试的只是元素的平均含量，只作为参考。点 2 和点 6 测试的是红色位置的光谱，点 2 的含 Fe 量高达 50%。点 1 和点 4 测试的是土的光谱，与其他的点相比多了 K。

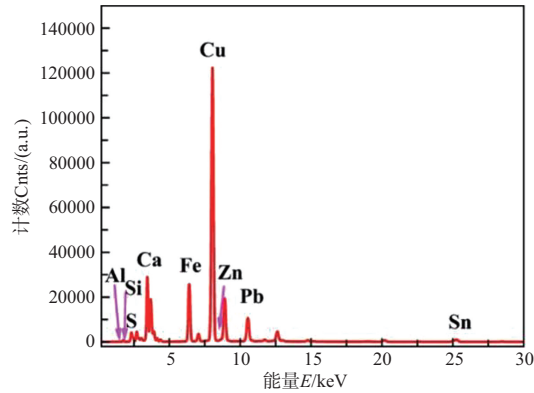


图4 铜镜的X射线荧光光谱图

表1 点3和点5位置的元素含量平均值

项目	元素	质量百分比
点3/点5	铝(Al)	0.26/0.72
	硅(Si)	1.14/1.5
	硫(S)	0.18/1.84
	氯(Cl)	0.065/0
	钙(Ca)	2.29/2.21
	铁(Fe)	0.29/6.7
	铜(Cu)	32.67/29.86
	锡(Sn)	58.87/50.98
	锌(Zn)	0.06/0.11
	砷(As)	1.15/1.46
	铅(Pb)	3.01/4.61

对另一个半圆形的青铜器表面进行XRF光谱测试，测试的点位是图3（b）的红色框图内，总共测试5个点位。元素分析的结果如图5所示，实验结果表明：除基体元素Cu、Sn、Pb，还有Fe、Zn、Ca、Si、S等元素。点5、点3和点4测试的是红色污染物的区域，基体元素Sn的含量高达55%，Pb的含量为5.3%，其余含量较高的即为Fe，含量为14.67%。点1和点2测试的是绿色区域，Si的含量为15.5%，其他元素与点3和点4类似，但不存在S。

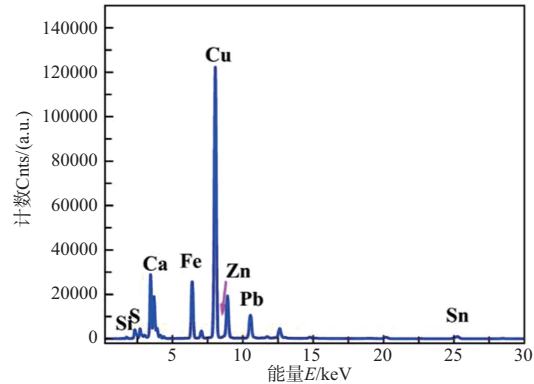


图5 半圆形青铜器的X射线荧光光谱图

3.2 拉曼光谱

激光显微共聚焦拉曼光谱仪（RENISHAW公司，Invia，英国），显微镜（Leica公司，DM2700，德国），激光器波长分别为532nm和785nm，能够探测的光谱范围为200~1000nm，光谱分辨率为1cm⁻¹，作用于样品上的能量不超过1.5mW，防止样品激光损伤。选取的点为微观状态下的不同颜色，铜镜的实验结果如图6所示，6（a）是红色腐蚀产物的显微拉曼光谱图，显示为羟基氧化铁^[20]，猜测可能是与其他富含Fe的物质共存一处^[21]；6（b）是淡蓝色腐蚀产物的显微拉曼光谱图，显示为非晶态二氧化锡^[22]。

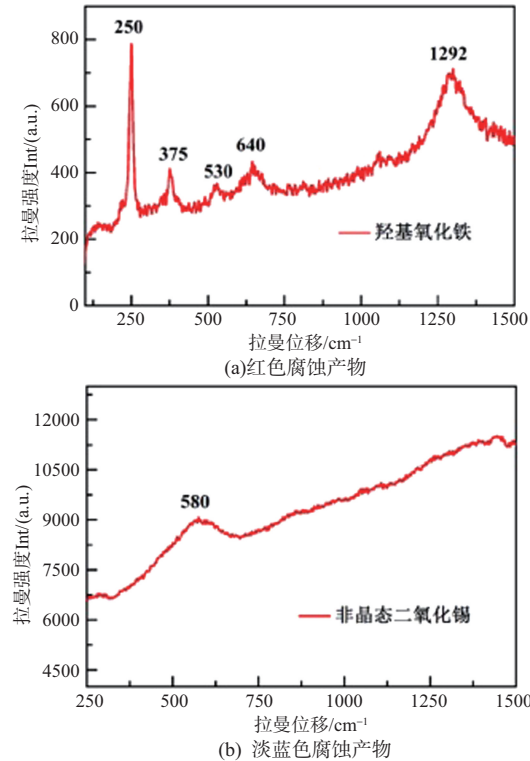


图6 铜镜的显微拉曼光谱图

同时利用显微拉曼测试半圆形青铜器表面的腐蚀产物，选取的点为微观状态下的不同颜色，半圆形青铜器的实验结果如图7所示，7（a）是蓝色腐蚀产物的显微拉曼光谱图，显示为靛蓝；7（b）是绿色腐蚀产物的显微拉曼光谱图，可能为钴绿，红色的腐蚀产物与铜镜的结果相同，也为羟基氧化铁。

4 激光清洗青铜器表面腐蚀产物或者污染物

关于铜镜的激光清洗，采用焦点处的激光清洗和离焦点的激光清洗，测得波长为1064nm的纳秒激光的焦斑大小为约65.5μm，根据公式：能量密度=2×单脉冲能量（J）/被侧面处光斑大小（cm²）=J/cm²，即可得到能量密度的大小。首先采用焦点

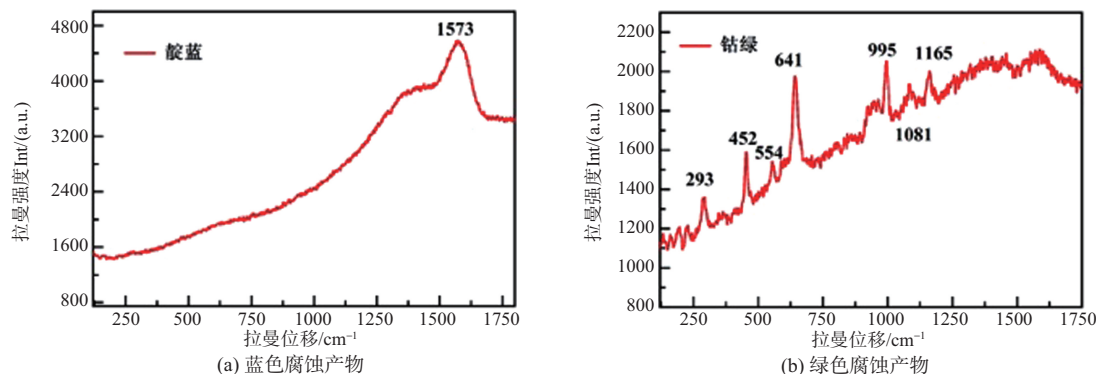


图 7 半圆形青铜器的显微拉曼光谱图

处的激光清洗，清洗的位置是存在红色污染物的位置，设置的实验参数是扫描速度为1mm/s，重复频率10Hz，两个线之间的间距为0.4mm，可计算出清洗1次的时间为3.6s。保持激光能量密度为89J/cm²，清洗次数分别为1次、2次、3次和5次，清洗次数为1次时，激光开始产生剥蚀效果。同理尝试激光能量密度为71.2J/cm²、59.3J/cm²、47.5J/cm²、35.6J/cm²、29.7J/cm²、23.7J/cm²，清洗效果并不明显。增加激光能量密度最大为1187J/cm²，清洗次数为5次，表面存在较强的剥蚀效果，但焦点处的激光清洗区域太小且激光能量密度较大，易对青铜器产生损伤。因此尝试离焦处的激光清洗。当激光能量密度为3.8J/cm²，重复频率1Hz，脉冲数为5个时，清洗效果较为明显，尝试利用此参数清洗一个长方形区域如图2所示，发现是可以去除红色的腐蚀产物，但表面呈现暗灰色，原因可能是表面的红色腐蚀产物羟基氧化铁中的Fe离子随着时间的流逝已与青铜器基体的成分混合在一起。

对于半圆形青铜器表面的绿色污染物，利用焦点处的激光清洗，激光能量密度为89J/cm²，重复频率为10Hz，清洗次数为1次，即能达到较好的清洗效果，原因在于绿色的腐蚀产物在青铜器表面呈现点状分布，如利用较大光斑的激光进行清洗，可能损害青铜器的基体^[23]。对于红色腐蚀产物，由于区域较大，采用离焦的激光进行清洗，当激光能量密度为2.87J/cm²，重复频率为1Hz，脉冲数为5个时，会产生较好的清洗效果，但对两件青铜器清洗效果的评价，本文只采用肉眼观察的方法，原因在于青铜器表面的腐蚀产物清洗程度应与修复文物的文物修复者进行讨论，从而达到一个清洗的标准和界限^[24-26]。

5 结 论

故宫博物院拥有较多的青铜器，一般来源于历史收藏、私人捐献等，由于保存环境的影响，

会在表面形成不同类型的腐蚀产物，这些腐蚀产物不一定都对青铜器产生损害，有可能会阻止外界环境对青铜器本体进一步侵害，提高其艺术价值。相反，也可能在青铜器表面形成可诱发锈蚀，可能需要去除。去除青铜器表面的锈蚀产物的方法多种多样，一般采用物理、化学等方法。但随着科学技术的进步，激光清洗技术逐步应用到文物保护领域，但由于激光具有剥蚀特性，可能会损害文物表面的特性，所以激光清洗技术在国内的文物保护领域应用并不广泛。本文鉴于文物安全考虑，选取两件不是文物的青铜器样品，利用激光显微拉曼技术和X射线荧光技术对表面的成分进行检测。并利用焦点处激光清洗和离焦处的激光清洗对两件青铜器进行激光清洗参数探测，激光清洗技术可以实现对表面的红色产物和绿色产物等进行清洗，上述激光清洗参数的选取能够为激光清洗青铜器文物提供数据参考。

参考文献:

- [1] 大卫·斯科特. 艺术品中的铜和青铜:腐蚀产物,颜料,保护[M]. 科学出版社,2009:123—130.
Scott D A. Copper and bronze in art: Corrosion, colorants, conservation[M]. Getty Publications,2002:145—156.
- [2] 邹非池, 刘建宇, 刘瀚文, 等. 古代青铜器锡腐蚀产物研究回顾——特点、表征方法、腐蚀模型[J]. 文物保护与考古科学 2024, 36(04):128—142.
Zou Feichi, Liu Jianyu, Liu Hanwen, et al. Review of the research on tin corrosion products of ancient bronze: properties, characterization methods and corrosion models[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2024, 36(04):128—142.
- [3] 刘瀚文, 谢振斌, 郭建波, 等. 四川三星堆遗址三号祭祀坑出土青铜器浅蓝色粉末状腐蚀产物的科学分析[J]. 腐蚀与防护, 2024, 45(04):39—45.
Liu Hanwen, Xie Zhenbin, Guo Jianbo, et al. Scientific analysis of powdered corrosion products of bronzes excavated from the Sanxingdui Site in Sichuan[J]. Corrosion & Protection, 2024, 45(04):39—45.
- [4] 李青会, 袁仪梦, 谢尧亭, 等. 翼城大河口墓地出土青铜器残片锈蚀层的科技分析[J]. 文博, 2024, (03):162—168.
Li Qinghui, Yuan Yimeng, Xie Yaoting, et al. Technological

- analysis of the corroded layer of bronze ware fragments unearthed from the Dahekou Cemetery in Yicheng[J]. *Relics and Museology*, 2024, (03):162—168.
- [5] 钟家让. 出土青铜器的锈蚀因素及其防护研究[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 2004, (01):44—47.
- Zhong Jiarang. Study on the conservation of bronzes and influential of powder rust[J]. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2004, (01):44—47.
- [6] Maiman T H. Stimulated optical radiation in ruby[J]. *Nature*, 1960, 187(4736):493—494.
- [7] Buccolieri G, Nassisi V, Buccolieri A, et al. Laser cleaning of a bronze bell[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 272:55—58.
- [8] Siano S, Pini R. Analysis of the blast waves induced by Q-switched Nd:YAG laser photodisruption of absorbing targets[J]. *Optics Communications*, 1997, 135(4-6):279—284.
- [9] Siano S, Salimbeni R, Pini R, et al. Laser cleaning methodology for the preservation of the Porta del Paradiso by Lorenzo Ghiberti[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2003, 4(S1):140—146.
- [10] Fusi F, Mercatelli L, Basile V, et al. A new method based on contact surface profilometry for quantitative measurement of re-sorbed bone volume[J]. *Physica Medica: European Journal of Medical Physics*, 2005, 21(1):41—46.
- [11] Matteini M, Lalli C, Tosini I, et al. Laser and chemical cleaning tests for the conservation of the Porta del Paradiso by Lorenzo Ghiberti[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2003, 4:147—151.
- [12] Basso E, Pozzi F, Reiley M C. The Samuel F. B. Morse statue in central park: scientific study and laser cleaning of a 19th-century American outdoor bronze monument[J]. *Heritage Science*, 2020, 8(1):81.
- [13] Striova J, Castellucci E. Free-running Er: YAG laser cleaning of mural painting specimens treated with linseed oil, “beverone” and Paraloid B72 [C]// *Lasers in the Conservation of Artworks VIII*. London: Taylor & Francis Group, 2011:85—92.
- [14] Dajnowski A, Dajnowski B A. Using the new G.C. laser cleaning system for cleaning and surface preparation for re-gilding of a large outdoor bronze monument of Alexander Hamilton[C]// *Lasers in the Conservation of Artworks XI*. Kraków, Poland: NCU Press, Toruń, 2017:217—228.
- [15] 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(03):1—13.
- Shen Yijia, Zhou Hao, Shen Jingyi. Applied research on the agar gel-mediated laser cleaning of bronze objects[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2018, 30(03):1—13.
- [16] 蔡晶芳, 周浩, 闫莹, 等. 激光清洗表面疏松绿锈青铜器的阈值研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(11):326—335.
- Cai Jingfang, Zhou Hao, Yan Ying, et al. Study on threshold value of laser cleaning loose surface green rust bronzes[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11):326—335.
- [17] 李晨毓, 张雪雁, 刘瀚文, 等. 纳秒激光清洗技术在紫禁城大理石上的应用[J]. *光学技术*, 2024, 50(04):500—507.
- Li Chenyu, Zhang Xueyan, Liu Hanwen, et al. Application of nanosecond laser cleaning technology on marble in the Forbidden City[J]. *Optical Technique*, 2024, 50(04):500—507.
- [18] 李晨毓, 胡文哲, 张雪雁, 等. 双波长纳秒激光清洗技术在大理石文物上的应用[J]. *中国光学(中英文)*, 2024, 17(05):1050—1059.
- Li Chenyu, Hu Wenzhe, Zhang Xueyan, et al. Application of dual-wavelength nanosecond laser cleaning technology on stone artifacts[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(05):1050—1059.
- [19] 李晨毓, 曲亮, 刘晓龙, 等. 激光清洗技术在文物上的应用[J]. *中国文物科学研究*, 2021, (01):52—60.
- Li Chenyu, Qu Liang, Liu Xiaolong, et al. Application of laser cleaning technology in cultural relics[J]. *China Cultural Heritage Scientific Research*, 2021, (01):52—60.
- [20] Coccato A, Bersani D, Coudray A, et al. Raman spectroscopy of green minerals and reaction products with an application on cultural heritage research[J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2016, 47(12):1429—1443.
- [21] 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.
- [22] Huang B X, Tornatore P, Li Y S. IR and Raman spectroelectrochemical studies of corrosion films on tin[J]. *Electrochimica Acta*, 2001, 46(5):671—679.
- [23] Jelvani S, Maleki M H, Khadir S, et al. Laser cleaning on bronze artefacts by the XeCl laser[J]. *Optik*, 2021, 242(2):167316.
- [24] Lee H, Cho N, Lee J. Study on surface properties of gilt-bronze artifacts, after Nd:YAG laser cleaning[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 284:235—241.
- [25] Pini R, Siano S, Salimbeni R, et al. Tests of laser cleaning on archeological metal artefacts[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2000, 1(S1):S129—S137.
- [26] Sansonetti A, Colella M, Letardi P, et al. Laser cleaning of a nineteenth-century bronze sculpture: In situ multi-analytical evaluation[J]. *Studies in Conservation*, 2015, 60(sup1):S28—S33.