



基于CT无损检测的脆弱青铜器腐蚀评估

李磊, 席晓琦, 陈卓, 韩玉, 赵洪枫, 王春晖, 陈家昌, 黄霞, 王鑫光, 陈俊英, 闫宾

Disease Assessment of Fragile Bronzes Through CT Nondestructive Testing

LI Lei, XI Xiaoqi, CHEN Zhuo, HAN Yu, ZHAO Hongfeng, WANG Chunhui, CHEN Jiachang, HUANG Xia, WANG XinGuang, CHEN Junying, and YAN Bin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2024.008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

弹性波CT技术在大足石刻岩体破碎带探测中的应用

Application of Elastic Wave CT Technique on Detection of Fracture Zone in the Rock Mass of Dazu Stone Carvings

CT理论与应用研究. 2018, 27(1): 35–44

能谱CT在缺血性心脏病患者心功能评估中的临床应用研究

Clinical Application of Dual Energy Spectral CT in Evaluating Cardiac Function in Patients with Ischemic Heart Disease

CT理论与应用研究. 2021, 30(3): 354–360

双能量CT在痛风诊断和评估中的研究进展

Dual-energy CT in Gout: Advances in Diagnosis and Assessment

CT理论与应用研究. 2019, 28(4): 513–518

CT图像计分及MMP-9、NSE检测对小儿颅脑损伤预后价值评估

Evaluation of CT Image Score and MMP-9, NSE Detection in the Prognosis of Children with Craniocerebral Injury

CT理论与应用研究. 2019, 28(5): 577–583

大足石刻北山168窟围岩病害高频瑞雷波成像

High-frequency Rayleigh Wave Imaging of Diseases in Surrounding Rock Mass of Beishan Cave 168 of Dazu Rock Carvings

CT理论与应用研究. 2021, 30(4): 425–436

基于人工智能的胸部CT肺结节检出及良恶性诊断效能评估

Evaluation of Detection and Diagnostic Efficiency of Pulmonary Nodules by Chest CT Based on Artificial Intelligence

CT理论与应用研究. 2021, 30(6): 709–715



关注微信公众号，获得更多资讯信息

李磊, 席晓琦, 陈卓, 等. 基于CT无损检测的脆弱青铜器腐蚀评估[J]. CT理论与应用研究(中英文), 2024, 33(5): 585-593. DOI:[10.15953/j.ctta.2024.008](https://doi.org/10.15953/j.ctta.2024.008).

LI L, XI X Q, CHEN Z, et al. Disease Assessment of Fragile Bronzes Through CT Nondestructive Testing[J]. CT Theory and Applications, 2024, 33(5): 585-593. DOI:[10.15953/j.ctta.2024.008](https://doi.org/10.15953/j.ctta.2024.008). (in Chinese).

基于CT无损检测的脆弱青铜器腐蚀评估

李磊¹, 席晓琦¹, 陈卓¹, 韩玉¹, 赵洪枫¹, 王春晖¹,
陈家昌², 黄霞³, 王鑫光², 陈俊英³, 闫镔^{1✉}

1. 中国人民解放军战略支援部队信息工程大学信息系统工程学院, 郑州 450001
2. 河南省文物考古研究院, 郑州 450001
3. 郑州大学材料科学与工程学院, 郑州 450001

摘要: 目前对脆弱青铜器的分析主要依赖于对样品横截面、表面等二维层面的研究, 如光学和电子显微镜、拉曼光谱分析、X射线荧光光谱分析(XRF)等。CT作为一种快速、无损的检测手段, 可以对青铜器的内部结构、腐蚀情况、腐蚀分布等作出更详细的表征和检测。本文从青铜器腐蚀定性观测、青铜器腐蚀分层提取、青铜器腐蚀特征提取与分析等方面, 通过分析脆弱青铜器的CT成像结果, 实现对脆弱青铜器中内部腐蚀进行分析、定位和测量, 为脆弱青铜器的腐蚀评估与保护研究提供数据支撑, 进一步验证CT技术在文物保护领域的重要价值和应用前景。

关键词: 文物CT; 青铜保护; 青铜器腐蚀评估

DOI:[10.15953/j.ctta.2024.008](https://doi.org/10.15953/j.ctta.2024.008) 中图分类号: TP 391. 41 文献标识码: A

青铜器是中华文明的重要组成部分, 具有重要的历史价值、科学价值和极高的艺术价值。青铜器的发展体现了历史的变迁和社会、经济、政治、文化、科技的发展。目前, 国内馆藏青铜器多来源于各地出土文物, 受地下埋藏环境及其他因素的影响, 在历经上千年的腐蚀后, 青铜器出土时多已残破不堪且严重腐蚀矿化, 并且在出土后, 腐蚀病害会进一步发展蔓延, 对青铜器的保护、传承与利用威胁极大。因此, 开展脆弱青铜器腐蚀评估与保护技术研究具有重大意义。

目前, 国内外对脆弱青铜器文物腐蚀成分信息的分析和识别, 被广泛采用的方法主要有光学显微镜金相分析、电子显微镜分析、计算机断层扫描成像(CT)技术和X射线衍射分析(XRD)技术等^[1-5]。但现有的文物腐蚀诊断方法只能检测和分析出文物的表面信息, 仍存在诸多技术局限性, 在分析结果中引入大量的错误信息, 从而导致对文物的腐蚀诊断出现偏差。

1977年, X射线CT扫描首次应用于考古领域, 由德里克·哈伍德·纳什在加拿大多伦多应用于一具年轻女性木乃伊^[5]。经过几十年的发展与应用, CT成像在文物保护与考古研究领域逐渐形成了比较完整和科学的保护研究体系, 不仅为文物的保护和研究提供了重要方法和技术, 而且使得文物研究从表观主观观察, 发展成为从外部形貌分析到内部微观结构研究、具有定性和定量特征的全方位科学研究^[6]。近年来, 我国故宫博物院、山西省博物院、上海高能物理研究所等均在基于X射线的考古研究与保护方面取得了突破性进展^[7-13]。意大利^[14]、埃及^[15-16]、匈牙利^[17]等世界各地的博物馆, 都将X射线扫描成像作为文物考古研究的重要研究手段之一^[18-20]。

现代文物保护研究的核心就是不断利用最新、最先进的现代手段和科学方法实现对文物全方位、全系统、完整的了解和认识, 从而制定合理与科学的保护措施, 以最大限度地保持和保护文物的物质与文化内涵, 延长文物的寿命^[6]。

本文从青铜器腐蚀CT检测能力验证、青铜器多模态成像对比、青铜器腐蚀情况分析与测量等方

收稿日期: 2024-01-15。

基金项目: 国家重点研发计划(馆藏脆弱青铜器保护关键技术研究(2020YFC1522002))。

面，通过分析脆弱青铜器的 CT 结果，快速、准确地对脆弱青铜器中的腐蚀进行分析及定位，并对 CT 图像中青铜器腐蚀区域分割，为脆弱青铜器保护提供强有力的支撑，进一步验证 CT 技术在文物保护领域的重要价值和应用前景。

1 青铜器腐蚀定性观测

图 1 (a) 所示为焦作修武新庄沟村东墓地出土带鞘铁剑（样品 1），剑鞘内为木质已腐朽完全，仅余外包铜皮、银皮和铜条箍，剑身为铁质，铁质剑身锈蚀粘连在铜质剑鞘内，重点对带鞘铁剑内部的腐蚀情况和剑鞘内部组合结构进行分析。

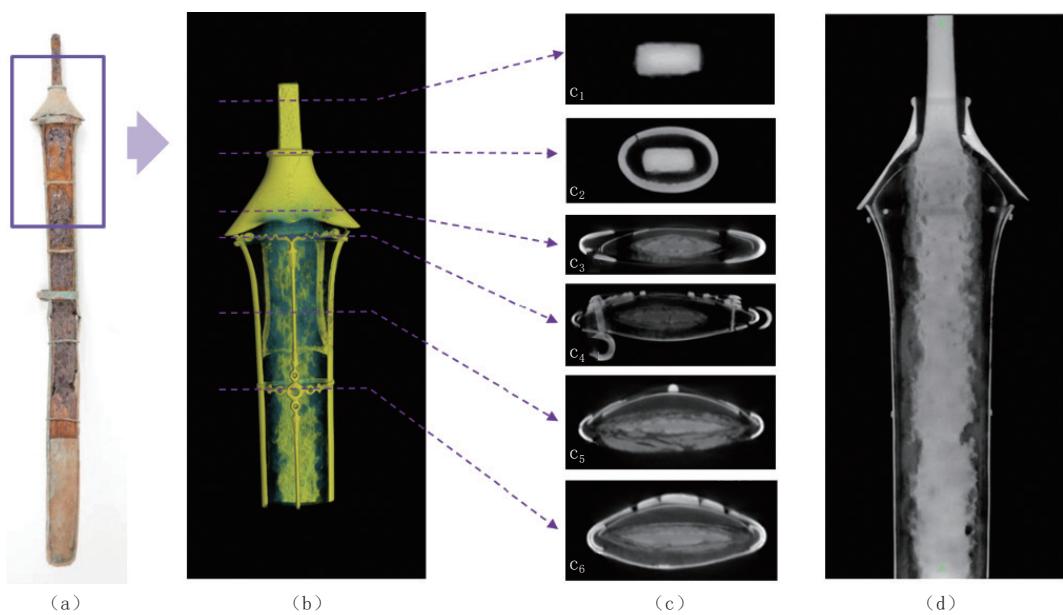


图 1 古青铜剑 CT 成像结果
Fig. 1 CT imaging results of an ancient bronze sword

本文从带鞘铁剑局部 CT 扫描成像结果中挑选了 6 层横向切片图像（图 1(c)）及 1 层纵向切片图像（图 1(d)），观察带鞘铁剑不同部位的腐蚀情况和内部结构。图 1(c₁) 和图 1(c₂) 所示为铁剑剑格的 CT 切片图像，该区域成像清晰，内部未腐蚀；图 1(c₃) 和图 1(c₄) 所示为铁剑剑柄的 CT 切片图像，该区域的外包铜皮、铜条箍无明显锈蚀，内部铁剑剑身轻微腐蚀；如图 1(c₅) 和图 1(c₆) 所示为铁剑剑身的 CT 切片图像，铁质剑身锈蚀粘连在剑鞘内，剑身区域腐蚀严重。古青铜剑 CT 纵向切片图像如图 1(d) 所示，从结果中可以清晰的观察到带鞘铁剑不同位置的套合、铆接结构信息，以及铁剑剑身不同位置腐蚀程度差异。

此外，对于一些造型复杂青铜器，CT 能清晰直观的观察到青铜器内部的连接结构、腐蚀或者表面装饰下的纹饰造型细节等铸造工艺信息，这是其他手段无法达到的。如图 2 中铜观音菩萨佛造像为周口市博物馆馆藏，器物造型规整端庄，制作精美，器身表面有彩绘贴金装饰。

图 2 所示为青铜器佛像（样品 2）的完整 CT 扫描结果。结果显示，佛像头颈和肩部内腔泥芯内存在一根金属质连接柱，连接柱截面近方形，上端实心封闭，中间为中空结构，下端呈不齐整断口，局部弯曲变形，其应为佛像铸造时内设头颈泥芯与肩腹部泥芯连接柱，防止泥芯在内收细颈部断裂。

图 3 所示为青铜器佛像的局部成像对比图。左边是带有彩绘和贴金装饰的佛像光学图像，可以看到局部金箔和彩绘脱落处露出部分铜佛像表面的不完整衣饰脉络细节。右边是佛像 CT 图像，可清晰展现未脱落彩绘金箔区下青铜佛像衣饰铸造细节（红框内）。



图 2 青铜器佛像的 CT 实验结果
Fig. 2 CT experimental results of bronze Buddha statues

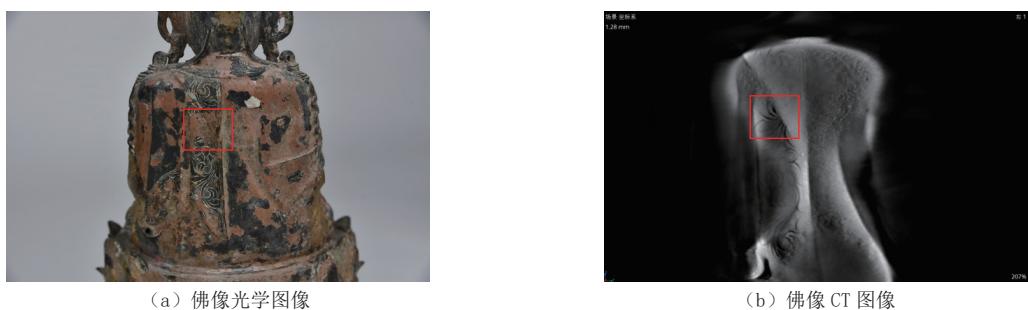


图 3 佛像对比图
Fig. 3 Comparison of Buddha statues

2 青铜器腐蚀分层提取

2.1 青铜器腐蚀 CT 图像分析

为了验证基于 CT 图像的青铜器腐蚀病害分层的正确性，本文在不同仪器设备上尝试包括 CT 成像在内的多种检测手段，检测样品为青铜硬币（样品 3）残片（图 4 (a)）。分别对青铜硬币残片进行整体 CT 成像和局部高分辨率 CT，高分辨扫描的体素尺寸为 $2.9 \mu\text{m}$ ，实验结果如图 4 (b) 和图 4 (c) 所示。

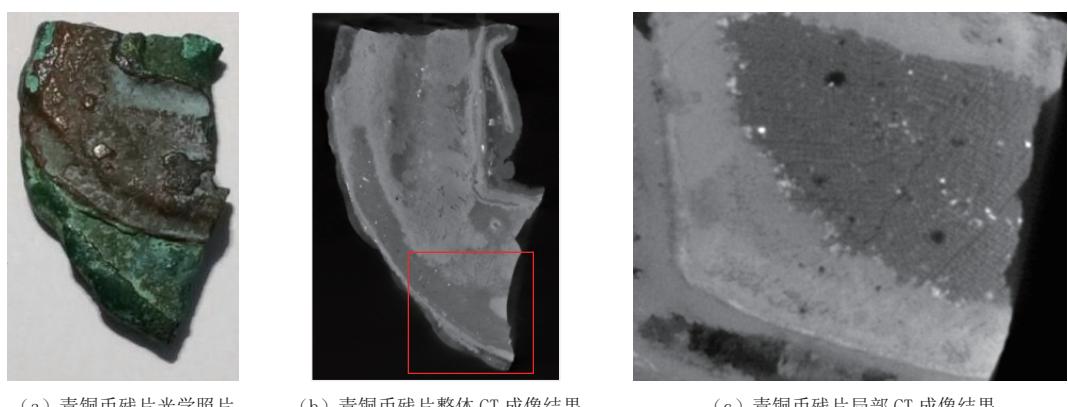


图 4 青铜硬币残片 CT 成像结果
Fig. 4 CT imaging results of bronze coins

光学显微镜成像结果可以观察彩色的物体表面信息。结果对比如图 5 所示。从图中可以看出，CT 结果与光学显微镜成像结果有较清晰的对应关系，并且在 CT 结果中能够观察出难以分辨的孔洞。此外，CT 成像是三维成像，能够对物体的内部结构信息、内部缺陷及孔洞信息进行无损检测，这是光学显微镜、电子显微镜等检测手段无法达到的。

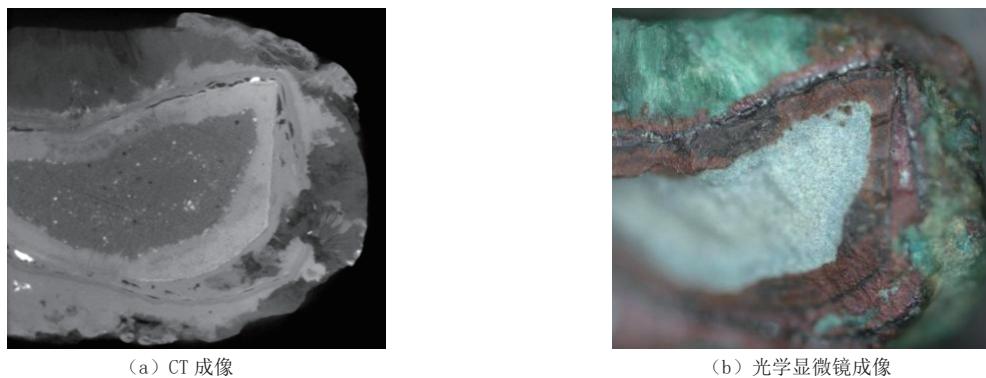


图 5 CT 和光学显微镜成像结果对比

Fig. 5 Comparison of CT and optical microscopic imaging results

图 6 是 CT 和电子显微镜成像结果对比图。电子显微镜的分辨率能达到纳米级，但其视野有限，只能对特定的某些区域进行分析和成像。从图中可以看出，CT 成像结果的对比度比电镜结果更高，各区域间的界限更加清晰和明显。

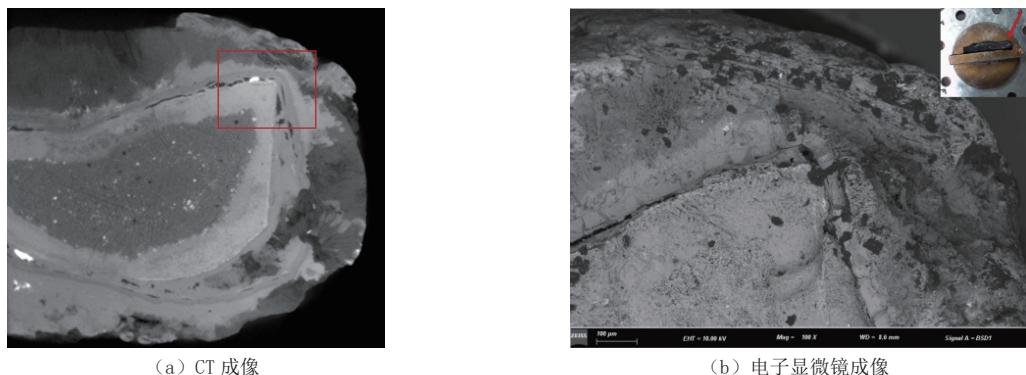


图 6 CT 和电子显微镜成像结果对比

Fig. 6 Comparison of CT and optical microscopic imaging results

图 7 是 X 射线荧光光谱分析结果图。微区 X 射线荧光光谱分析技术是对不均匀样品、不规则样品、甚至小件样品和包裹物进行高灵敏度的、非破坏性的元素分析的首选方法。X 射线荧光光谱分析结果，可以为能谱 CT 材料分析提供参考，同时也验证了青铜器 CT 图像分层提取的正确性。

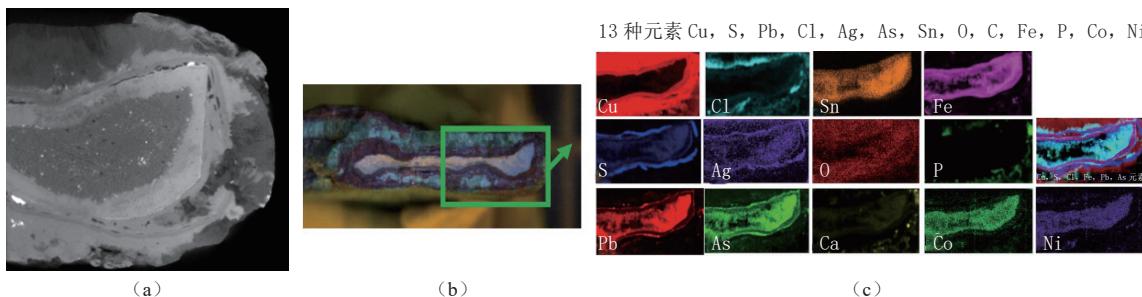


图 7 X 射线荧光光谱分析结果

Fig. 7 Comparison of CT and optical microscopic imaging results

2.2 青铜器腐蚀区域分层提取与分析

对青铜器(样品4)进行取样,然后在光学显微镜下对其进行成像和分析,如图8红色区域为基体腐蚀区,蓝色区域为铅偏析腐蚀区,黄色区域为锈层区域。再对同一样品进行CT成像,找到CT图像中相应的位置,可以明显看出,光学显微镜中划分出的区域,在CT图像中均能找到对应的腐蚀区,红色区域为基体腐蚀区,蓝色区域为铅偏析腐蚀区,黄色区域为锈层区域。相比光学显微镜的结果,CT结果的灰度值、对比度等方面,均要优于光学显微镜。

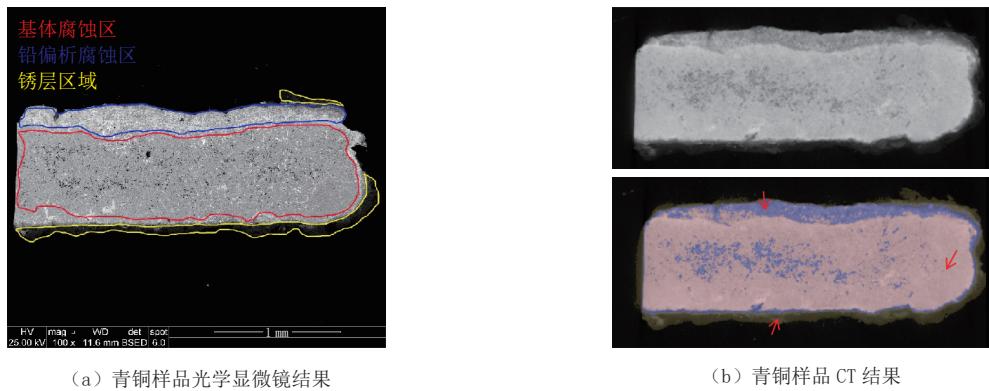


图8 光学图像与CT成像对比

Fig. 8 Comparison of optical image with CT image

同时,对另一青铜器(样品5)残片也进行相同操作,如图9所示。图9(a)为青铜样品光学显微镜结果,红色区域为基体区域,蓝色区域为腐蚀区域,绿色区域为铅偏析腐蚀区,黄色区域为锈层区域。再对该样品进行CT成像(图9(b)),找到CT图像中相应的位置(图9(c))。可以明显看出,光学显微镜中划分出的区域,在CT图像中均能找到对应的腐蚀区,红色区域为基体腐蚀区,蓝色区域为腐蚀区域,绿色区域为铅偏析腐蚀区,黄色区域为锈层区域。该样品的结果对比更加明显,光学显微镜中灰度值、形态难以区分的区域,在CT结果中非常直观、清晰。

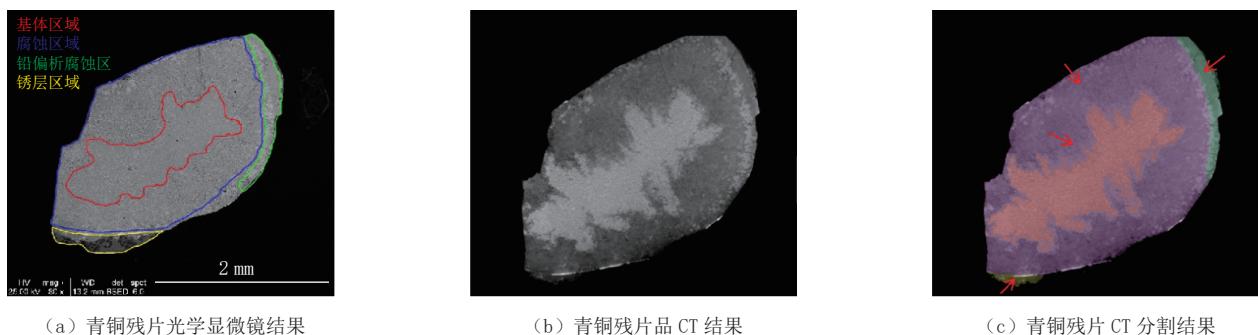


图9 青铜残片分割结果

Fig. 9 Bronze fragment segmentation results

3 青铜器腐蚀特征提取与分析

3.1 青铜器孔隙率特征分析

除了利用CT定性观察青铜器的内部结构、腐蚀情况等,本文还对青铜器文物进行内部孔隙率特征分析,孔隙空间分布以及孔隙占比的定量分析。

在历经数百上千年的腐蚀后,青铜器内部有许多腐蚀形成的孔洞、裂隙等各种腐蚀病害。CT检

测能够将这些病害都呈现出来，并对这些腐蚀进行定量分析。图 10 为青铜器（样品 6）样块的孔隙率检测结果图。左侧坐标轴代表孔隙体积大小，以及与之相对应的颜色。从三视图中，可以看出孔隙的空间、大小分布。此外，也对孔隙率、孔隙体积进行了计算。本文所测量的青铜器材料体积约为 8.95 mm^3 ，孔隙体积约为 0.34 mm^3 ，孔隙率约为 3.66%。图 10 右侧为部分孔隙的直径、体积、体素等具体信息。

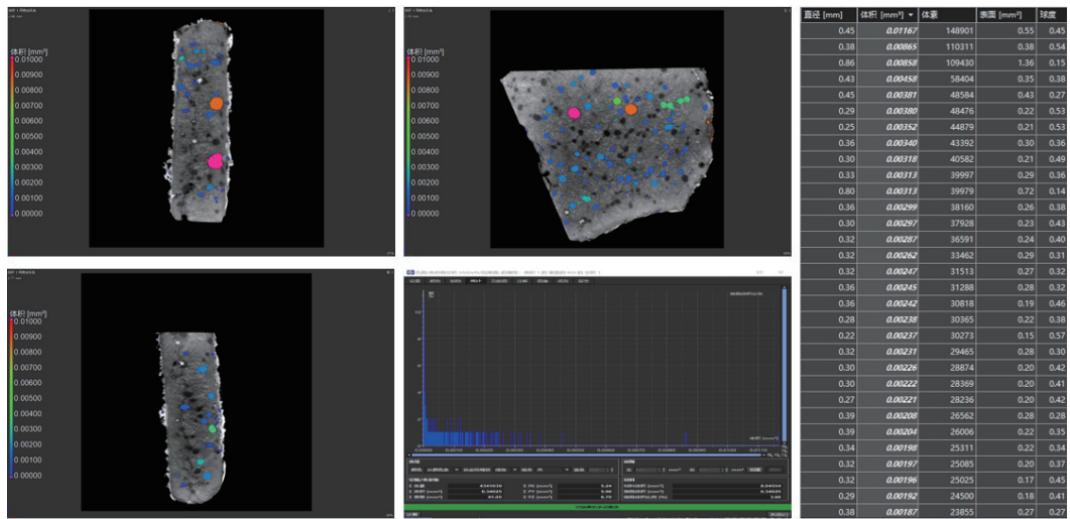


图 10 青铜样品内部孔洞分析
Fig. 10 Analysis of internal holes in a tin bronze sample

3.2 模拟青铜器锈层测量

本文采用一种新型氨基酸基无机-有机杂化水凝胶去除模拟腐蚀铜片表面的有害锈，然后对附着有害锈的水凝胶进行高分辨率 CT 成像，最后利用 Dragonfly 软件测量水凝胶除锈的深度。根据测量结果，水凝胶可以有效去除铜表面的有害锈，深度约为 $90\sim100 \mu\text{m}$ 。

首先制备一块模拟腐蚀铜片，然后在铜片上均匀包覆一层新型氨基酸基无机-有机杂化水凝胶。经过一段时间后，撕下水凝胶，可以观察到，水凝胶上均匀地附着一层铜锈（图 11 (a)）。取下一部分附着铜锈的水凝胶进行高分辨 CT 扫描成像（图 11 (b)）。

将水凝胶放在旋转轴的中心，采集 CT 图像。小样本可以获得更高的分辨率。参数设置如表 1。然后通过 2001 张投影图像重建三维 CT 图像。扫描结果如图 12 所示。利用 Dragonfly 软件处理 CT 结果。从切片图像可以看到水凝胶和有害锈迹之间的边界。图像中明亮的区域是有害锈层，有孔隙的区域是水凝胶层。最后，我们选择了多张不同的切片图像，并在 Dragonfly 软件中测量了水凝胶层和有害锈层。红线测量有害锈层的深度，绿线测量水凝胶的厚度。根据测量结果，水凝胶层的厚度约为 $400\sim500 \mu\text{m}$ 。水凝胶去除有害锈的深度约为 $90\sim100 \mu\text{m}$ 。



图 11 水凝胶光学照片
Fig. 11 Hydrogel optical photograph

表1 实验参数
Table 1 Experimental parameters

电压/kV	电流/μA	功率/W	像素大小/μm	曝光时间/s	投影图像
50	80	4	5.635	2.5	2001

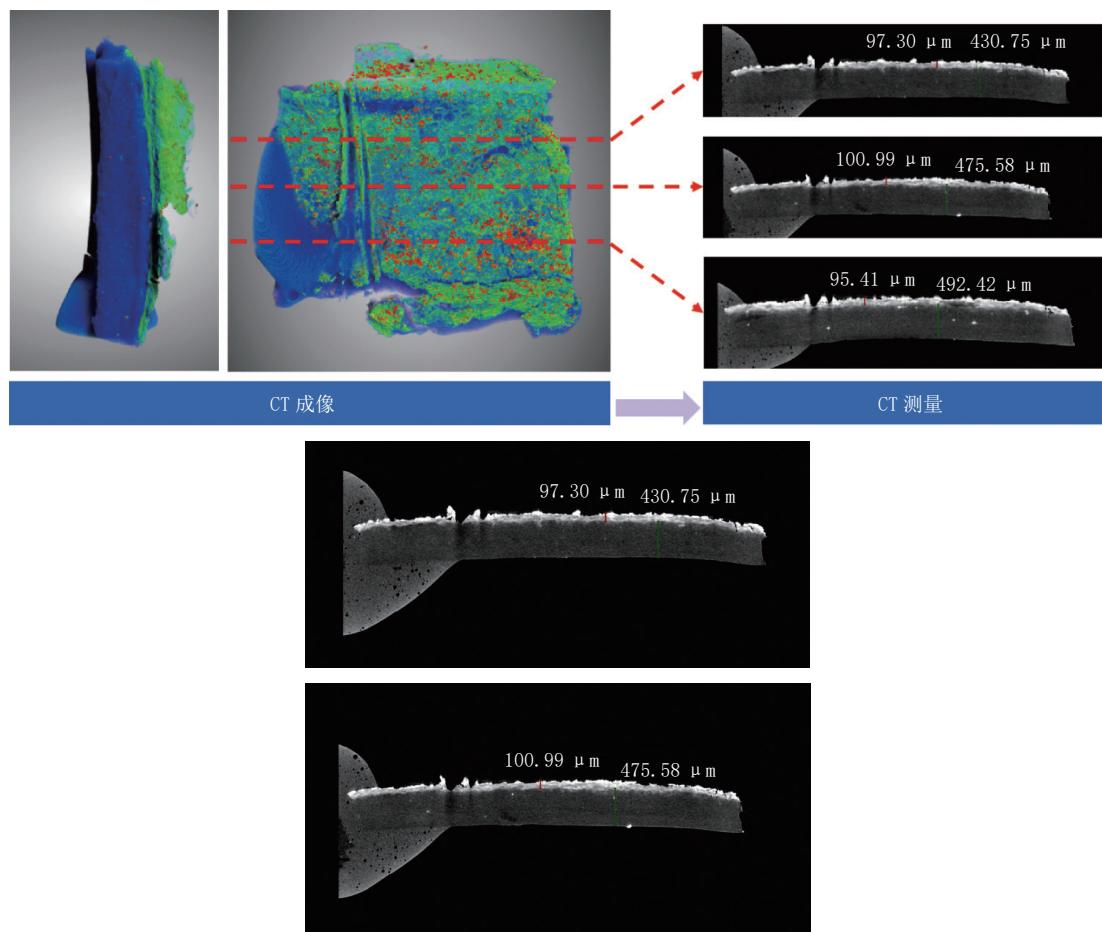


图12 部分水凝胶的CT结果
Fig. 12 CT results of a portion of the hydrogel

4 结束语

现代文物保护研究的核心就是不断利用最新、最先进的手段和方法实现对文物全方位的科学了解和认识，制定合理与科学的保护措施和修复方案，从而最大限度地保持和保护文物的物质与文化内涵，延长文物的寿命。CT技术以其高分辨、高稳定性、无需真空、无损检测等优势成为文物保护研究的重要手段。

本文围绕脆弱青铜器保护研究，从青铜器腐蚀定性观测、青铜器腐蚀分层提取、青铜器腐蚀特征提取与分析等方面入手，初步研究基于CT无损检测的脆弱青铜器保护技术。可以看出，CT能够对青铜器的内部结构、腐蚀情况、腐蚀分布等进行快速、准确的分析，是脆弱青铜器保护研究的一种重要手段。本文利用CT在青铜器腐蚀评估和保护效果检测等方面的进行多种探索和尝试，为后续文物归档、保护和修复提供了重要依据。

参考文献

- [1] 李涛, 秦颖, 罗武干, 等. 古代青铜器锈蚀产物的拉曼和红外光谱分析[J]. 有色金属, 2008, (2): 149–152.

- LI T, QIN Y, LUO W G, et al. Analysis of corrosion product on ancient bronzes with combined use of Raman spectroscopy, FTIR, and other analytical techniques[J]. Nonferrous Metals, 2008, (2): 149–152. (in Chinese).
- [2] 董少华, 杨军昌, 杜家平, 等. 显微红外光谱透射法快速鉴别“粉状锈”[J]. 文物保护与考古科学, 2019, 31(1): 111–117.
- DONG S H, YANG J C, SHU J P, et al. Rapid identification of powdery rust using transmission infrared microspectroscopy[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2019, 31(1): 111–117. (in Chinese).
- [3] 胡毅捷, 张蓓, 夏培朝, 等. 澄城刘家洼遗址出土青铜器腐蚀成因研究[J]. 文物保护与考古科学, 2022, 34(2): 78–87.
- HU Y J, ZHANG B, XIA P C, et al. Research on the causes of corrosion of bronze artifacts from Liujiawa site, Chengcheng County[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2022, 34(2): 78–87. (in Chinese).
- [4] TARBay J G, MARÓTI B, KIS Z, et al. Non-destructive analysis of a late bronze age hoard from the velem-szent vid hillfort[J]. Journal of Archaeological Science, 2021, 127(2021): 105320. DOI:[10.1016/j.jas.2020.105320](https://doi.org/10.1016/j.jas.2020.105320).
- [5] MANAL A, MAHER, X-ray computed tomography of a late period falcon bronze coffin[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2020, 166(2020): 108475. DOI:[10.1016/j.radphyschem.2019.108475](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108475).
- [6] 魏龙, 陈刚, 冯向前, 等. 现代射线技术与文物保护/考古应用研究[J]. 敦煌研究, 2018, 2(2): 78–86.
- WEI L, CHEN G, FENG X Q, et al. Modern radiographic technologies and their applications in heritage conservation and archaeological research[J]. Dunhuang Research, 2018, 2(2): 78–86. (in Chinese).
- [7] 解晋, 闫文祥. 馆藏出土青铜器保护中的X射线成像技术的应用及展望[J]. 文物世界, 2016, 4(2): 74–77.
- XIE J, YAN W X, Application and prospect of X-ray imaging technology in the protection of unearthed bronzes[J]. World of Antiquity, 2016, 4(2): 74–77. (in Chinese).
- [8] 丁忠明, 周亚, 吴来明. 计算机断层扫描技术(XCT)在子仲姜盘制作工艺研究中的应用[J]. 文物保护与考古科学, 2017, 29(5): 12–25.
- DING Z M, ZHOU Y, WU L M. XCT computed tomography studies on the manufacturing techniques of Zi Zhong Jiang Pan[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2017, 29(5): 12–25. (in Chinese).
- [9] 丁忠明, 周亚, 李园. X-CT技术透视皿方罍制作工艺[J]. 江汉考古, 2021, 2021(4): 116, 125.
- DING Z M, ZHOU Y, LI Y. X-ray computed tomography (CT) scans reveals the manufacture of min Fanglei-wine jar[J]. Jianghan Archaeology, 2021, 2021(4): 116, 125. (in Chinese).
- [10] 史宁昌, 刘建宇, 张雪雁. X射线成像技术在故宫文物保护中的应用——以故宫藏青铜器检测为例[J]. 故宫学刊, 2017, 1(1): 276–281.
- SHI N C, LIU J Y, ZHANG X Y. Application of X-ray imaging technology in the protection of cultural relics in the forbidden city-taking the detection of bronzes in the Forbidden City as an example[J]. Palace Museum Journal, 2017, 1(1): 276–281. (in Chinese).
- [11] 刘圆圆, 张少君, 李雯婷, 等. X射线技术在检测青铜器文物病害结构中的应用[C]//中国核物理学会核结构专业委员会, 中国科学院理论物理研究所, 中国高等科学技术中心, 等. 第十五届全国核结构大会论文摘要集, 2014: 1.
- [12] 邓阳全, 魏艳艳, 童蕾旭, 等. 工业CT检测青铜器扫描参数的优化[C]//东亚文化遗产保护学会. 成都华通博物馆 中国文物保护技术协会文物保护研究检测基地, 2013: 4.
- [13] 刘圆圆, 李元吉, 郑鹏, 等. 双能CT技术在小尺寸青铜器病害诊断中的应用研究[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(10): 1909–1913. DOI:[10.7538/yzk.2015.49.10.1909](https://doi.org/10.7538/yzk.2015.49.10.1909).
- LIU Y Y, LI Y J, ZHENG P, et al. Application research of dual energy CT technology in defect diagnosis for small size bronze[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(10): 1909–1913. DOI:[10.7538/yzk.2015.49.10.1909](https://doi.org/10.7538/yzk.2015.49.10.1909). (in Chinese).
- [14] REEDY C L. 3D documentation and analysis of porosity in deteriorated historic brick[J]. Studies in Conservation, 2020, 65(51): 5258–5261.
- [15] JILLIAN A G. Ancient egyptian subadult mummies: Unwrapping childhood in the ancient past[D]. London: The University of Western Ontario, 2021.
- [16] TANTIL M, BERRUYER C, TAFFOREAU P, et al. Automated segmentation of microtomography imaging of Egyptian mummies[J]. PLoS ONE, 2021, 16(12): e0260707. DOI:[10.1371/journal.pone.0260707](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260707).
- [17] CAMERON J B. Evaluating cranial nonmetric traits in mummies from pachacamac, peru: The utility of semi-automated image segmentation in paleoradiology[D]. London: The University of Western Ontario, 2021.
- [18] LI J, GUERIAU P, BELLATO M, et al. Synchrotron-based phase mapping in corroded metals: Insights from early copper-base artifacts[J]. Analytical Chemistry, 2019, 91(3): 1815–1825. DOI:[10.1021/acs.analchem.9b01815](https://doi.org/10.1021/acs.analchem.9b01815).

analchem. 8b02744.

- [19] XU K, TREMSIN A S, LI J, et al. Microstructure and water absorption of ancient concrete from Pompeii: An integrated synchrotron microtomography and neutron radiography characterization[J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 139: 106282. DOI:[10.1016/j.cemconres.2020.106282](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106282).
- [20] ARSENAULT A. Social stratification & mummification in ancient egypt: The inevitability of variability in the post-new kingdom mummification program[D]. London: The University of Western Ontario, 2021.

Disease Assessment of Fragile Bronzes Through CT Nondestructive Testing

LI Lei¹, XI Xiaoqi¹, CHEN Zhuo¹, HAN Yu¹, ZHAO Hongfeng¹, WANG Chunhui¹, CHEN Jiachang², HUANG Xia³, WANG XinGuang², CHEN Junying³, YAN Bin^{1✉}

1. Faculty of Information Systems Engineering, Chinese People's Liberation Army Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China
2. Henan Provincial Institute of Cultural Relics and Archaeology, Zhengzhou 450001, China
3. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Current analysis of fragile bronzes mainly relies on the research of two-dimensional aspects such as sample cross-sections and surfaces while typically utilizing optical and electronic microscopy, Raman spectroscopy, and X-ray fluorescence spectroscopy (XRF). As a fast and nondestructive testing method, computer tomography (CT) can be used to characterize and detect the internal structures, corrosion conditions, and corrosion distribution of bronzes. This study used the CT imaging results of fragile bronzes to analyze, locate, and measure corrosion in fragile bronzes quickly and accurately, thus providing strong support for corrosion evaluation and protection research of fragile bronzes. The results verified the value and application prospects of CT technology in the protection of cultural relics.

Keywords: cultural relics CT; bronze protection; ronze ware disease evaluation



作者简介：李磊，男，博士，信息工程大学教授，主要从事 CT 成像技术与应用，E-mail：leehotline@163.com；闫镔✉，男，博士，信息工程大学教授，主要从事 CT 成像技术与应用，E-mail：ybspace@hotmail.com。