



文化遗产科学领域同步辐射分析应用新进展

雷勇*

故宫博物院, 北京 100009

*通讯作者, E-mail: leiying@dpm.org.cn

收稿日期: 2023-07-03; 接受日期: 2023-08-09; 网络版发表日期: 2023-10-25

摘要 近年来, 以同步辐射为代表的大科学装置在古代合成材料的深入研究中发挥了重要作用, 在历史、考古和艺术品研究领域的一些新近研究中提供了重要视角和难题解决途径. 本文介绍了梵高油画颜料的同步辐射应用分析、中国古代富铁高温釉中 $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 晶体的发现和合成机理研究、明代铜红瓷釉的着色机理和衰败之谜解析、不稳定金属锈蚀产物的同步辐射显微CT定量法鉴别和分布研究、丝绸之路出土古代玻璃眼珠制作工艺的显微CT分析等经典案例. 从中汲取的成功经验也会继续推动同步辐射先进技术特点的充分发挥, 促进世界文明发展过程中难点问题的解决和科学阐释.

关键词 文化遗产, 同步辐射, 颜料, 陶瓷, 金属, 玻璃

1 引言

随着人类社会的进步发展, 为了提高生产效率和一些特殊追求(如对色彩的喜好), 古人对天然材料的利用和使用不断增大. 但是, 受制于天然材料属性和供给限制, 也催生了合成材料(如玻璃^[1]和陶瓷^[2]、金属^[3,4]、颜料^[5]等)的发明和改进. 这种古代合成材料工艺的完善和发展, 得益于经验的逐渐积累, 以及外来甚至其他类别工艺的不断影响. 几乎同时, 由于自然(如天然原料的供给)、政治(如政权更替)、战争等因素, 某些工艺的发展过程也可能出现起伏甚至下滑和衰亡的情况(如中国古代硅酸铜钡材料的消失^[6]). 这种古代合成材料发展过程的科学解析, 为历史、考古等领域的研究提供了重要视角和难题解决途径. 由于这类视角和途径需要科学分析手段的深入参与, 有效分析方法学的建立和高新技术的不断引入成为这类研究开展

的重要基础.

在古代手工业产品制作过程中, 原材料和工艺质量的控制, 很大程度上依靠经验积累, 不似现代材料可以实现的精细控制. 在显微尺度下, 古代产品多数属于非均质材料和多种材质的复合体. 这种非均质材料, 往往包含原料、杂质、工艺条件、反应温度等工艺过程信息. 这些信息也为古代科技的研究(如产地和工艺起源)提供了重要线索和依据.

但是, 这些线索的发现和确认也对显微尺度下的科学分析提出了很高的要求. 与此同时, 珍贵文物分析既有避免破坏性制样和原位分析的要求, 也有高效率分析的需求(需要在尽量短的时间内完成分析, 避免可能出现的意外和文物伤害). 但是, 面对这种既要采用微区(有时会小于微米尺度)检测, 又要尽可能提高效率的要求, 一般台式分析仪器很难满足, 特别是珍贵文物的科学分析.

引用格式: Lei Y. The new progress of synchrotron radiation applications in heritage science. *Sci Sin Chim*, 2023, 53: 2283–2289, doi: 10.1360/SSC-2023-0125

同步辐射光源具有高亮度、高强度、高度准直、宽能谱、单色性、可调谐等优异特性, 其亮度是室内光源的成千上万倍甚至百万倍. 利用同步辐射谱学、衍射/散射、成像等分析方法的高空间分辨(~ 10 nm)、高探测灵敏($\sim$ ppb)、高能量分辨($\sim$ meV)、快时间分辨(微秒/皮秒)以及三维无损等技术特点, 可获取文物的物质成分、物相结构、化学形态、显微结构等信息, 综合研究其从宏观到微观、从分子到原子电子的多尺度物质结构特征, 揭示文物制作材料及工艺, 进行文物原料溯源、产地溯源, 为珍稀文物的保护修复提供科学指导. 以同步辐射为代表的大科学装置具有束线光通量大、分析灵敏度高等特点, 其保证了微束分析的精度和准确度. 同步辐射特有的X射线吸收谱分析数据, 更是提供了独特的物相结构信息.

本文列举了颜料、陶瓷、玻璃、金属研究领域的最新经典案例, 总结了近些年来同步辐射技术推动的文化遗产科学领域的快速发展.

2 一幅梵高油画的同步辐射分析带来的经典成功案例

近些年来, 同步辐射在文化遗产领域影响力最大的研究成果之一, 是几位学者利用德国汉堡的DESY PetraIII同步辐射装置取得的成功案例. 几位来自荷兰代尔夫特科技大学、比利时安特卫普大学、荷兰Kröller-Müller博物馆、法国博物馆保护和研究中心、欧洲同步辐射装置的几位科学家通力合作, 共同在梵高的一幅看似普通的油画作品中发现和复原了其不为人知的另一个人物的肖像^[7]. 在进行同步辐射X射线荧光(SR-XRF)的元素面分布扫描之前, 该油画已经进行过红外和X光照相分析. 遗憾的是, 红外和X光照片只提供了模糊的人物影像. 但是, 这也激发了科学家尝试更高科技手段的兴趣. 随后, DESY Petra III同步辐射装置提供的元素面分布信息, 意外地提供了一幅更加清晰的人像轮廓(图1). 这个轮廓是锑(Sb)元素的面分布信息提供的, 而X射线吸收近边结构谱(X-ray absorption near edge structure, XANES)分析结果确定了Sb元素代表了一种称为铅锑黄的颜料. 根据Sb的同步辐射分析结果复原的人物肖像, 居然和梵高早期绘制的乡村妇女的形象相吻合, 极大地提升了这幅只有30 cm×40 cm油画的艺术与科学价值. 由此, 也掀起了

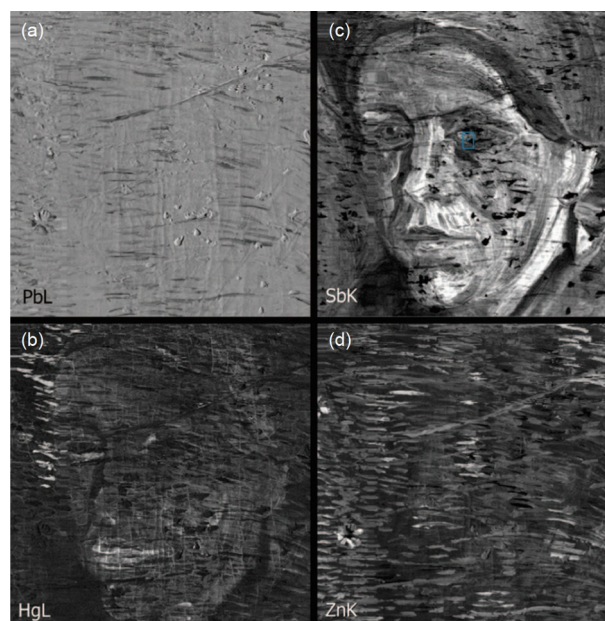


图1 基于同步辐射X射线荧光光谱(SR-XRF)对元素的分布进行分析^[7]. (a) Pb, (b) Hg, (c) Sb, (d) Zn (网络版彩图)

Figure 1 The distribution of elements analyzed by SR-XRF [7]. (a) Pb, (b) Hg, (c) Sb, (d) Zn (color online).

众多油画进行X射线荧光元素面扫, 并基于成像结果解析绘画过程的热潮. 现在, 很多油画作品的元素浓度面分布信息已经成为绘画工艺研究的基本要求. 更有商业公司适时研制了大尺寸X射线荧光扫描(scanning macro X-ray fluorescence)设备. 尽管售价昂贵, 这类设备仍然成为许多博物馆购买的重要分析设备和研究利器. 这个油画的同步辐射研究案例囊括了从有效研究到成功商业开发过程, 堪称近年来艺术品同步辐射技术应用研究的经典案例. 尽管大尺寸X射线荧光面扫技术只能提供元素的分布信息, 但其取得的成功也促进了相关物相信息扫描技术的快速发展. 影响力比较大的案例是安特卫普大学采用X射线粉末衍射(XRPD)面扫技术在油画《带珍珠耳环女人》上的成功应用^[8]. 与此同时, 故宫博物院与中国科学院遥感与数字地球研究所(后并入中国科学院空天信息创新研究院)合作开发的高光谱扫描平台在中国书画分析中也取得了不错的应用, 特别是其更高的扫描效率和能够提供有机颜料的分布信息是广域X射线荧光扫描成像技术(macro X-ray fluorescence, MA-XRF)和XRPD技术所不具备的^[9]. 目前, 中国书画分析与油画分析也成为相互激励、共同发展、相互取长补短的研究领域.

3 中国古代高温富铁釉的显微表征和古代烧制工艺研究

为了提高陶瓷容器表面的憎水性和抗渗透性, 古人使用草木灰作为制作硅酸盐玻璃材料(玻璃、陶瓷釉)的重要助熔剂. 中国文明发源于具有亚热带气候的长江、黄河流域, 而西方文明发源于干旱的近东地区. 这种气候差别导致当地植物种类的较大差异, 也体现在干旱地区植被中Na、K的含量明显高于亚热带植物, Ca的含量刚好相反. 因此, 亚热带阔叶植物制作的木灰中Ca含量也比旱生植物灰高很多. 这种助熔剂成分差异带来东西方硅酸盐合成材料制作工艺的起源不同. 由于Ca的助熔能力比K、Na要差, 也提升了中国古代先民制作陶瓷釉的技术门槛. 距今约3500年前, 发端于商代原始瓷的最早高温釉开始出现, 约1050℃左右的烧制温度明显高于近东地区出现的古代玻璃^[10].

经过近1500年的技术积累, 青瓷于东汉出现并得到快速发展. 青瓷胎和釉的原料中都开始混入高比例的黏土(含有大量Al)^[10]. 由于Al₂O₃很好的耐火性能, 这种胎釉的原料组成再次提高了中国高温釉的烧制温度. 这也开创了中国瓷釉高钙、高铝、高温烧制的特点, 这与西方玻璃低铝、低钙、相对低温烧制的特点差异明显^[11]. 这种中国工匠经过几千年的传承和积累发展起来的独特工艺体系, 由于原料独特且烧制温度要求更高, 窑炉反应体系控制更加复杂(特别是一氧化碳参与), 促成一些特殊晶体的生成和反应过程的出现.

现代化学工业中, 这种反应体系很少采用, 深入的显微尺度研究不够充分, 一些特殊物相和反应机理表征仍是空白领域. 但是这种反应体系和新晶体对一些前进乏力的材料合成领域却提供了新的可能解决方

案. 最具代表性的就是 ϵ -Fe₂O₃晶体的发现和合成机理解析. 它的发现得益于最初在美国同步辐射装置上进行的实验. 2014年, 还在美国的刘志教授和上海硅酸盐研究所李伟东教授合作, 利用美国伯克利大学的同步辐射光源ALS的微区X射线衍射(micro X-ray diffraction, μ -XRD)以及斯坦福大学同步辐射光源SSRL的微区X射线荧光光谱(micro X-ray fluorescence, μ -XRF)和微区X射线吸收近边结构(micro X-ray absorption near edge structure, μ -XANES)分析, 结合扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)的形貌分析, 在南宋建盏的兔毫和油滴釉中发现和确认其内部具有20 μ m左右的针状小晶体, 即 ϵ -Fe₂O₃晶体^[12]. 2018年, 上海同步辐射光源SSRF魏向军等^[13]与故宫博物院合作借助同步光束线的 μ -XRF、 μ -XANES、二维掠入射X射线衍射(2D grazing incidence X-ray diffraction, 2D GIXRD)对清代御窑紫金釉样品进行分析, 发现了微米级的高纯 ϵ -Fe₂O₃. 这先后两个研究成果也浓缩了中国大科学装置的快速发展历程, 从最开始携带样品到国外的同步辐射装置上完成科学分析到几年后在国内新一代同步辐射装置上完成科学实验, 中国大科学装置的发展也见证了文化遗产科学领域快速发展的进程. 近年来, 中国古代酱釉中不断发现的 ϵ -Fe₂O₃, 也确立了这种晶体合成技术连续传承, 存在千年的历史, 也激活了久已沉寂的中国古陶瓷材料科学研究领域, 成为古陶瓷材料研究领域的热点(图2)^[13-25]. 这种亚稳态的过渡态铁氧化物, 是一种优良的磁性材料, 但受制于合成技术不够高效, 仍然无法广泛使用, 而中国古代积累的高温瓷釉工艺或许能为这种材料的高效合成开启新思路^[26]. 从中也可以看到中国古陶瓷传统烧制工艺和中国古代中医两个中国传统领域的相似之处: 屠呦呦在中国古代传统中医典籍中从用于疟疾治疗的中药

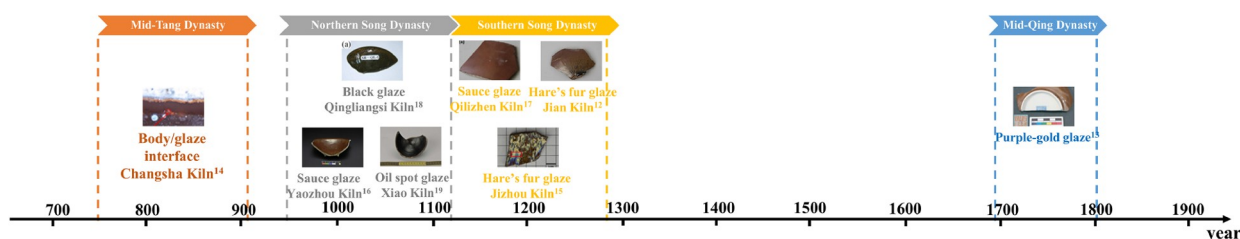


图2 近年来, 陆续在我国黑釉瓷上发现的 ϵ -Fe₂O₃晶体, 其烧制工艺至少传承发展了数百年^[12-19] (网络版彩图)

Figure 2 Recently, ϵ -Fe₂O₃ crystals have been successively identified on black-glazed porcelain nationwide, the firing techniques of which have been inherited, handed down and further developed at least hundreds of years ^[12-19] (color online).

中发现了青蒿素^[27], 与在中国传统高温瓷釉中找寻新晶体和复原古代合成机理的过程, 异曲同工。未来在中国古代高温釉中有机会有不断发现新晶体, 并推动新材料合成技术的发展。

4 中国古代高温铜红釉明代工艺难点的科学解析

至少在3000年前, 在埃及和美索不达米亚就发现有铜红玻璃。尽管中国瓷器中的铜红瓷釉出现较晚, 但在烧制工艺方面, 属于典型的高温釉反应体系下, 通过CO的气固反应对铜氧化物进行还原和着色处理, 不同于古代西方高钠、低铝的铜红玻璃^[28]。中国铜红瓷釉烧成温度更高, 更加耐用。

中国独有的高温铜着色釉的艺术价值和地位在明代达到鼎盛。但是, 关于明代铜红釉的烧制过程解析, 烧制原料短缺及明代后期发展衰败的原因仍存在争论。具体来说就是两个问题: 明代早期洪武(明太祖朱

元璋在位期间的年号)釉里红色彩偏暗黑色的原因不明; 史书中提到的明代后期原料“鲜红土”绝迹导致釉里红产品衰败^[29], 鲜红土的矿物属性不明。

故宫博物院古陶瓷科研人员与上海光源合作, 以研究故宫出土铜红釉残片为契机, 通过科学检测、文献调查、地矿分析、反应动力学研究等方法, 对明清铜红釉中铜着色原理及原料来源问题进行了解析。该课题组^[30]利用同步辐射硬X射线微聚焦技术分析铜红釉瓷器中元素组成特征、铜微粒(晶体)的物相及分布、铜原料及基础釉体系, 系统探究了影响铜红釉色的因素及铜红釉微观领域中铜元素的呈色原理。研究将同步辐射显微X射线衍射分析(SR- μ -XRD)和TEM衍射分析方法相结合, 确定铜红釉中起着色作用的晶体为纳米级铜单质(图3)。在明早期铜红釉中发现不规则的铜原料矿物残留, 帮助确认了硫化亚铜(Cu_2S)颗粒的存在, 为推断明早期铜红釉的原料提供了重要的证据。研究结合古代文献中“鲜红土断绝”的记载, 推测明代釉里红所用的铜原料可能来自混有少量硫铜矿的

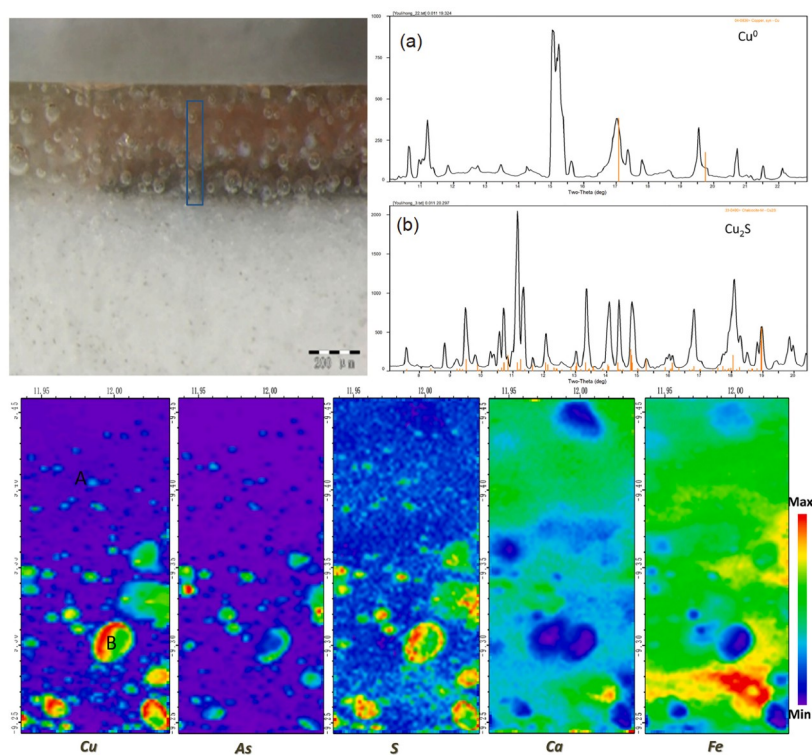


图3 铜红釉截面的光学显微照片和Cu、As、S、Ca和Fe元素的成像结果^[30]。(a, b) 基于SR- μ -XRD对Cu元素成像中选择的点进行物相分析(网络版彩图)

Figure 3 An optical image of underglaze red cross-section and element mapping of Cu, As, S, Ca and Fe^[30]. (a, b) SR- μ -XRD of the points selected based on the results of Cu fluorescence mapping (color online).

赤铜矿, 科学地解释了明代中后期几近消亡的原因. 该研究方法学的重要亮点是通过反应动力学证明高温铜红釉烧制工艺的复杂性, 特别是通过一氧化碳还原 CuO 的反应过程对硫化亚铜(Cu₂S)的去除几乎没有帮助, 这是导致洪武釉里红色彩发暗的主要工艺原因.

5 不稳定腐蚀中间产物的显微CT定量法鉴别和分布研究

金属材料的使用是古代文明发展的重要推动力, 也是古代人类社会和文化研究不可或缺的珍贵物质遗存. 金属腐蚀也是文物最常见的文物劣化现象之一, 它的锈蚀机理研究与一些不稳定锈蚀中间产物的鉴别和分布密切相关. 这类反应中间产物在暴露空气中的存在时间较短, 它们的鉴别和分布表征也是金属腐蚀机理研究领域的重要限制因素之一. 现阶段针对铜器锈蚀的分析主要依赖于样品剖面的制备, 同时经光学显微镜与扫描电子显微镜分析的结合使用来获得. 在这个过程中不稳定的锈蚀产物很容易转化成更稳定的产物, 从而无法被检测到.

近年来, 基于同步辐射的各种科技(如X射线衍射技术与X射线吸收谱学技术等)被越来越多地应用于古代金属制品与有机质文物分析中^[31~33]. 来自欧洲的同步辐射科学家, 应用基于同步辐射光源的X射线断层扫描法(显微CT)对铜器样品整体进行分析, 并通过高分辨率的显微CT对整个样品实施了三维空间的化学相鉴定与其分布定位. 此项工作所研究的样品为发掘于美索不达米亚平原南部及印度河流域的史前铜器碎片(公元前3000~2000年). 在使用多色X射线作为入射光的条件下, 通过针对衰减系数的定量计算鉴定出了铜器中的深层锈蚀产物, 特别是通过对显微CT切片的统计处理发现鉴别了一般难以探测到的CuCl (一种十分不稳定的腐蚀中间产物), 并基于各化学相的空间分布做出了阐述(图4)^[34]. 这种半定量显微CT物相分析方法对于样品没有特殊的前处理需求(如抛光与打磨), 因此可以有效避免由于样品准备工作所导致的不稳定化学相转变, 是一种不稳定的化学相(即无法进行样品前处理)的非破坏观察法. 这种方法的开发无疑打开了不稳定锈蚀中间产物鉴别的一扇大门, 很多锈蚀机理可以跨越以往无法探测到的不稳定中间产物的障碍, 得到更加系统的阐释.

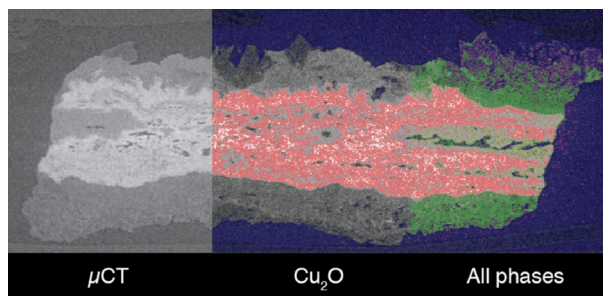


图 4 基于SR-μ-CT对不同含铜物相的鉴定并给出的空间分布信息^[34] (网络版彩图)

Figure 4 The identification of copper compounds and their spatial distribution provided by SR-μ-CT ^[34] (color online).

6 丝绸之路出土玻璃眼珠的显微CT分析与工艺研究

在世界历史文明的长河中, 玻璃是人类利用自然资源发明创造出的最早的合成材料之一, 最早出现于公元前约2500年的两河流域, 并以其丰富的功能性和可塑性, 在文明发展交流史中占据重要的历史地位^[1]. 作为出土玻璃器物的一类代表, 玻璃珠饰由于造型丰富、便于携带且价格昂贵, 在陆地和海洋丝绸之路上有着跨越地域与文明的广泛传播, 是产地与商贸地之间经济、文化与社会链性研究的代表性对象. 中国出土古代玻璃珠饰来源上主要分为贸易输入和中国自产两种情况, 亦不排除玻璃原料进口后进行本地加工的可能性.

利用现代科技考古手段不仅可以更为明确古代西方玻璃的产地来源与制作工艺, 还可以探索古玻璃技术传播和本土化发展的关联性, 是展现中华文明与世界文明交流互见、兼容并蓄、多元一统的科学鉴证. 同步辐射X射线CT成像技术在中国古代玻璃珠饰工艺中的应用研究近年来已经得到了多方面验证, 并取得了较为显著的科研成果. 成倩与张雪雁^[35]通过对新疆山普拉墓地出土的蜻蜓眼玻璃珠的工艺研究表明, 可以通过CT图像分辨出玻璃珠不同色彩、不同质地材料的差异性. 研究发现一枚附带珠孔的蜻蜓眼圆珠, 时代为公元4世纪. 虽然表面呈现出“貌似”配以深蓝色眼形装饰的白色玻璃珠, 但CT图像揭示出其内部存在一层疏松多孔的非玻璃质的胎体, 仅凭肉眼无法观察到如此复杂精细的制作工艺(图5). 这一枚小小的珠饰, 不仅展现出丝绸之路上古代玻璃工匠精巧的工艺水

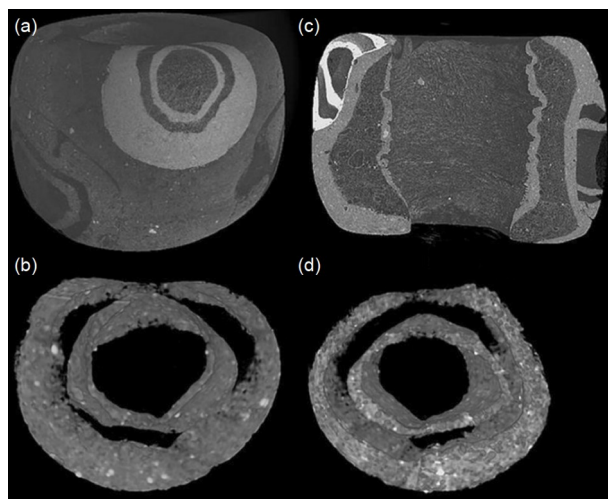


图 5 基于SR- μ -CT对蜻蜓眼玻璃珠的制作工艺进行分析^[35]. (a) 玻璃珠的三维成像结果, 指出眼睛的位置(高亮部分); (b) 玻璃珠的纵向剖面图; 眼睛部位前视图(c)和后视图(d)

Figure 5 The analysis of manufacturing technology of glass bead based on SR- μ -CT ^[35]. (a) The 3D diagram of glass bead to point out the location of the special eye (with highlight). (b) The longitudinal section of the bead; the front view (c) and back view (d) of the extracted eye.

平, 也间接地反映出当时玻璃材料昂贵难得的特点. 此外, 显微CT纵向与切向的图像分析可以展示玻璃内部气孔的变形与尺寸, 以及不同色料之间接触面的细微差异, 从而推断出玻璃珠饰烧制塑性的主要流程^[36]. 这一研究方法的应用, 填补了国际古玻璃研究领域的空白.

7 总结

上述同步辐射技术在文化遗产科学领域的典型案例, 代表了先进科学技术推动的文化遗产科学研究. 越来越多的古代材料可以借助科学大装置, 特别是同步辐射的技术特点进行科学表征, 促进代表性难点问题的解决, 对中国乃至世界文明的发展进行阐释.

致谢 感谢西北大学的李嘉怡博士, 上海光源的魏向军研究员, 故宫博物院的贾翠博士、关明博士、张雪雁女士和国家文物局考古研究中心成倩女士在本论文撰写中提供的相关资料.

参考文献

- 1 Tait H. *Five Thousand of Years of Glass*. Philadelphia: University of Pennsylvania Press, 2004
- 2 Prudence MR. *Pottery Analysis: A Sourcebook*. University of Chicago Press, 1987
- 3 David AS. *Copper and Bronze in Art: Corrosion, Colorants, Conservation*. Los Angeles: Getty Publications, 2002
- 4 David AS, Gerhard E. *Iron and Steel in Art: Corrosion, Colorants, Conservation*. London: Archetype Publications, 2009
- 5 Berke H. *Chem Soc Rev*, 2007, 36: 15–30
- 6 Wang ZJ, Liu Z. *Nat Mater*, 2023, 22: 144–145
- 7 Dik J, Janssens K, Van Der Snickt G, van der Loeff L, Rickers K, Cotte M. *Anal Chem*, 2008, 80: 6436–6442
- 8 De Meyer S, Vanmeert F, Vertongen R, van Loon A, Gonzalez V, van der Snickt G, Vandiver A, Janssens K. *Herit Sci*, 2019, 7: 67
- 9 Li GH, Chen Y, Sun XJ, Duan PQ, Lei Y, Zhang LF. *MicroChem J*, 2020, 155: 104699
- 10 Nigel W. *Chinese Glazes: Their Origins, Chemistry and Recreation*. Philadelphia: University of Pennsylvania Press, 1999
- 11 Henderson J. *The Science and Archaeology of Materials: An Investigation of Inorganic Materials*. London: Routledge, 2000
- 12 Dejoie C, Sciau P, Li W, Noé L, Mehta A, Chen K, Luo H, Kunz M, Tamura N, Liu Z. *Sci Rep*, 2014, 4: 4941
- 13 Liu Z, Jia C, Li L, Li X, Ji L, Wang L, Lei Y, Wei X. *J Am Ceram Soc*, 2018, 101: 5229–5240

- 14 Shen B, Sciau P, Wang T, Brunet M, Li J, Lu W, Zhu T. *Ceramics Int*, 2018, 44: 18528–18534
- 15 Xu C, Li W, Lu X, Zhang W, Luo H, Guo J. *Ceramics Int*, 2018, 44: 19461–19473
- 16 Wen R, Wang D, Wang L, Dang Y. *Ceram Int*, 2019, 45: 10589–10595
- 17 Wang L, Wang Y, Zhang M, Li Q, Wu J, Liu Z, Li L, Wei X. *Anal Chem*, 2019, 91: 13054–13061
- 18 Liu ZW, Zhang ZG, Li H, Wu W, Hua JJ, Cheng GF, Lin CC. *Key Eng Mat*, 2011, 492: 112–117
- 19 Xu Y, Qin Y, Ding F. *Ceram Int*, 2017, 43: 8636–8642
- 20 Hoo Q, Liang Y, Yan X, Wang X, Cao T, Cao X. *J Eur Ceramic Soc*, 2020, 40: 4340–4347
- 21 Li M, Li W, Lu X, Xu C. *J Chin Ceram Soc*, 2020, 7: 11 (in Chinese) [李玫, 李伟东, 鲁晓珂, 徐嫦松. 硅酸盐学报, 2020, 7: 11]
- 22 Kusano Y, Nakata H, Peng Z, Maki RSS, Ogawa T, Fukuhara M. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13: 38491–38498
- 23 Guan M, Kang B, Wei X, Li G, Jia C, Li H, Ding Y, Lei Y. *Herit Sci*, 2021, 9: 21
- 24 Wang T, Hole C, Ren Z, Zhang P, Shi P, Zhu J, Luo H, Wang F, Sciau P. *J Eur Ceram Soc*, 2021, 41: 6049–6058
- 25 Li G, Wang Z, Zhou J, Kang B, Ding Y, Guan M, Wei X, Lei Y. *Herit Sci*, 2023, 11: 58
- 26 Lei Y. *Palace Museum J*, 2023, 1: 33–49 (in Chinese) [雷勇. 故宫博物院院刊, 2023, 1: 33–49]
- 27 Tu Youyou Facts. <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2015/tu/facts/>
- 28 Wood N. *Chin Copper Red Glaze*, 1992, 11–35
- 29 Wang SM. *Peep From The Sky* (in Chinese) [王世懋. 窥天外乘]
- 30 Jia C, Li G, Guan M, Zhao J, Zheng Y, Wang G, Wei X, Lei Y. *J Eur Ceram Soc*, 2021, 41: 3809–3815
- 31 Reguer S, Mirambet F, Dooryhee E, Hodeau JL, Dillmann P, Lagarde P. *Corr Sci*, 2009, 51: 2795–2802
- 32 Iacconi C, Autret A, Desplanques E, Chave A, King A, Fayard B, Moulherat C, Leccia É, Bertrand L. *J Archaeol Sci*, 2022, 149: 105686
- 33 Bertrand L. *Physical Techniques in the Study of Art Archaeology & Cultural Heritage*. Amsterdam: Elsevier, 2007. 97–114
- 34 Li J, Guériau P, Bellato M, King A, Robbiola L, Thoury M, Baillon M, Fossé C, Cohen SX, Moulhéat C, Thomas A, Galtier P, Bertrand L. *Anal Chem*, 2019, 91: 1815–1825
- 35 Cheng Q, Zhang X, Guo J, Wang B, Lei Y, Zhou G, Fu Y. *Archaeol Anthropol Sci*, 2019, 11: 937–945
- 36 Zhang X, Lei Y, Cheng Q, Zhou G. *Microchem J*, 2020, 156: 104798

The new progress of synchrotron radiation applications in heritage science

Yong Lei*

The Palace Museum, Beijing 100009, China

*Corresponding author (email: leiyong@dpm.org.cn)

Abstract: The applications of synchrotron radiation in heritage science have been developed significantly based on a number of new typical cases, including the hidden paintings discovery of Van Gogh's by synchrotron radiation based X-ray fluorescence elemental mapping, the identification of ε -Fe₂O₃ in Chinese high-fired black porcelain glaze, the identification of raw material and colorants in the copper red glaze, the synchrotron-based mapping in corroded metals, and the manufactural analysis of the Silk Road eye beads by micro SR computed tomography. This progress summarized implies the great trend of synchrotron radiation applications in cultural heritage.

Keywords: heritage, synchrotron, pigment, ceramic, metal, glass

doi: [10.1360/SSC-2023-0125](https://doi.org/10.1360/SSC-2023-0125)