

宋代彩塑彩绘颜料及重绘时间研究

——以紫金庵罗汉塑像为例

崔 强^{1, 2, 5} 水碧纹^{1, 2, 5} 武发思^{1, 2} 冯雅琪^{1, 2} 善忠伟^{1, 2, 6}
付倩丽³ 凤 霞⁴

(1. 敦煌研究院保护研究所, 甘肃敦煌, 736200; 2. 国家古代壁画与土遗址保护工程技术研究中心, 甘肃敦煌, 736200; 3. 秦始皇帝陵博物院, 陕西西安, 710600;
4. 苏州市吴中区紫金庵景点管理处, 江苏苏州, 215107;
5. 西北大学文化遗产学院, 陕西西安, 710127;
6. 北京化工大学材料科学与工程学院, 北京, 100029)

摘要 苏州紫金庵罗汉塑像是中国古代彩绘泥塑中的艺术珍品, 但关于此处彩绘塑像制作材料研究较少, 缺乏系统科学的认识。本研究利用X射线荧光、X射线衍射、拉曼光谱等多种分析方法对彩塑的材质进行系统调查。研究发现彩绘颜料除传统无机颜料如朱砂、铅丹、石青外, 还有多种近现代人工合成颜料如铬黄、巴黎绿、人造群青。通过对人工合成颜料的相关考证, 发现与资料记载的紫金庵彩绘塑像最新装銮时间并不相符, 为紫金庵罗汉塑像的文史资料研究提供了新的线索。

关键词 泥塑 彩绘 人造颜料 重绘

引 言

紫金庵位于江苏省苏州市吴中区东山镇, 创自南朝梁陈时期, 历代多次重修增筑, 现存一殿一堂, 其中罗汉堂南北两侧保存的十六尊罗汉彩塑为宋代名匠雷潮夫妇所造^[1]。此间罗汉造像造型生动、神态各异, 被人称之“精神超忽、呼之欲活”, 是我国古代彩绘泥塑中不可多得的艺术珍品^[2], 2006年被列为全国重点文物保护单位。

以往对紫金庵罗汉塑像的研究侧重于造像艺术和历史价值^[3], 对本体制作材料和工艺方面的研究相对较少。紫金庵罗汉塑像制成至今已有800多年, 彩绘层病害较为严重, 而其绘制材料信息匮乏制约了塑像保护修复工作的进行, 因此系统开展紫金庵罗汉塑像制作材料的科学研究就显得尤为重要。本研究利用原位无损调查手段结合实验室微量样品分析方法, 对紫金庵罗汉像使用的彩绘材料进行系统全面的分析研究, 并对罗汉像重绘时间进行了探讨。

1 研究对象与分析方法

1.1 研究对象

罗汉堂为紫金庵主体建筑，现存彩绘泥塑共计59尊（图1）。其中大型塑像6尊，为三世佛、观音菩萨和二弟子，高度为170~180cm；罗汉等神位像24尊，高度约为100cm；护法天神悬塑24尊，高度约为90cm；其余小型塑像5尊，高度皆小于50cm。

综合塑像的形制规格、塑成年代、空间布局等因素，对堂内多个彩塑展开X射线荧光无损检测，并在此基础上选取具有代表性的降龙罗汉（北壁）、听经罗汉（南壁）以及渡海观音（背屏西向面）进行微损取样在实验室展开相关分析研究，取样信息如表1所示。



图1 紫金庵罗汉塑像（局部）

表1 罗汉堂彩绘塑像样品信息表

序号	取样位置	颜色	分析方法
1	降龙罗汉右小腿衣衫小方格	红色	XRF；RAM
2	听经罗汉腿部衣衫花纹	橙色	XRF；XRD
3	降龙罗汉里层衣衫边缘	黄色	XRF；XRD；RAM
4	降龙罗汉右脚附近衣衫	绿色	XRF；XRD
5	听经罗汉右腿衣衫	绿色	XRF；XRD
6	渡海观音脚下海浪	绿色	XRF；XRD
7	降龙罗汉右脚附近衣衫	蓝色	XRF；XRD；RAM
8	渡海观音脚下鳌鱼颈部	蓝色	XRF；XRD
9	渡海观音脚下海浪	蓝色	XRF；XRD；RAM
10	降龙罗汉右膝	白色	XRF；XRD

1.2 分析仪器与方法

1.2.1 X射线荧光分析（XRF）

美国尼通（NITON）XL3t-800合金分析仪，高性能微型X射线管，银靶50kV/40μA（最大值），Peltier半导体制冷，高分辨率SI-PIN X射线检测器（分辨率195keV），高性能滤光片系统，ASICS DSP4096像元多道分析器，检测时间1min，采用土壤分析模式。

1.2.2 X射线衍射分析（XRD）

日本理光（Rigaku）Dmax/2500型X射线衍射仪。铜靶，分析电压40kV，电流100mA，连续扫描；扫描范围5°~70°，石墨单色器滤波。

1.2.3 显微拉曼光谱分析 (MLRS)

英国雷尼绍 (Renishaw) Renishaw inVia型显微激光拉曼光谱仪。激发光波长为514nm, 波数在 $100 \sim 3000\text{cm}^{-1}$ 范围内, 波数精度为 $\pm 1\text{cm}^{-1}$, 物镜为100 $\times$ 镜头, 光斑尺寸为 $1\mu\text{m}$, 信息采集时间为10s, 累加次数3~5次。

2 实验结果与分析

2.1 红色颜料

X射线荧光分析检测结果显示红色颜料主要元素为汞 (Hg) 和铅 (Pb) 元素。拉曼检测结果显示, 在 252cm^{-1} 、 282cm^{-1} 和 343cm^{-1} 处均有明显的特征峰出现, 与朱砂的拉曼峰匹配度极高^[4, 5], 可以确定红色颜料为朱砂 (HgS) (图2)。

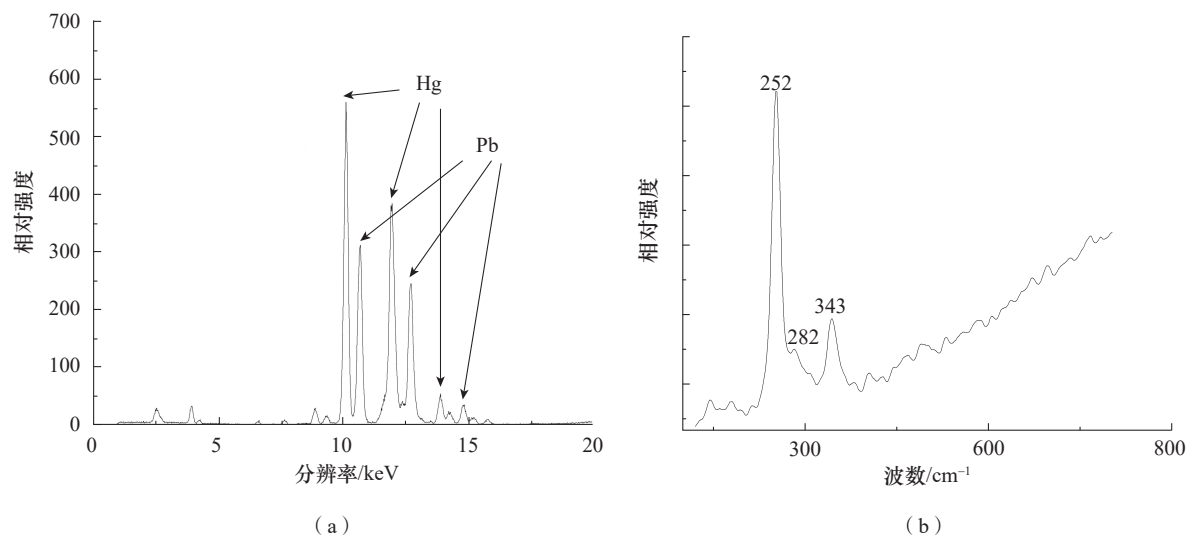


图2 红色颜料分析结果
(a) 荧光; (b) 拉曼

2.2 橙色颜料

X射线荧光分析检测结果显示橙色颜料主要元素为铅 (Pb) 元素。X射线衍射分析检测结果显示在 2θ 为 14.100° 、 26.277° 、 30.697° 存在衍射峰, 对应的d值分别为: 6.26、3.39、2.91, 这与铅丹的特征衍射峰相一致。样品在 2θ 为 29.353° 、 39.407° 、 43.177° 存在衍射峰, 对应的d值分别为: 3.03、2.29、2.09, 这与方解石的特征衍射峰相一致 (图3)。因此确定橙色颜料显色成分为铅丹 (Pb_3O_4), 方解石应为底色层成分。

2.3 黄色颜料

X射线荧光分析结果显示, 黄色颜料主要元素为铅 (Pb) 和铬 (Cr) 元素。拉曼检测结果显

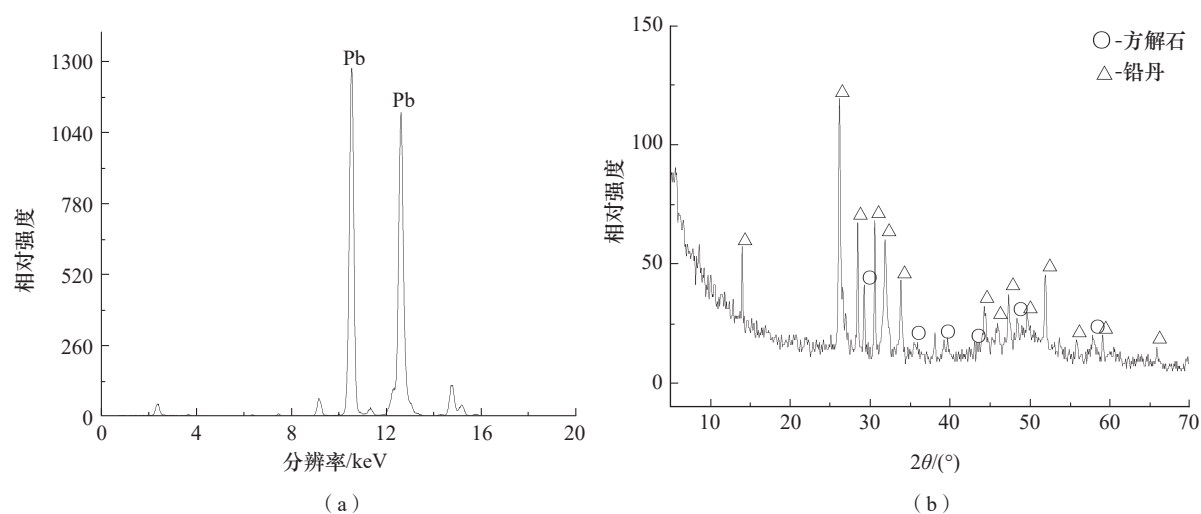


图3 橙色颜料分析结果

(a) 荧光; (b) 衍射

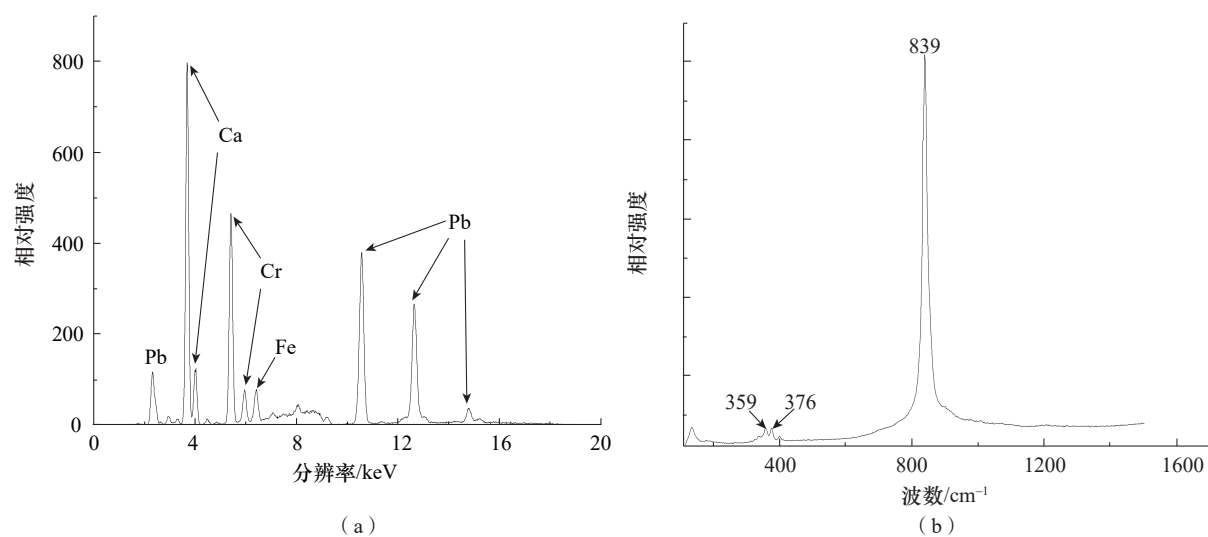


图4 黄色颜料分析结果

(a) 荧光; (b) 拉曼

示,在 359cm^{-1} 、 376cm^{-1} 、 839cm^{-1} 处有特征峰出现,这与铅铬黄的特征峰相符合^[6, 7],可以确定黄色颜料显色成分为铅铬黄(PbCrO_4) (图4)。

2.4 绿色颜料

X射线荧光分析检测结果显示绿色颜料主要元素为砷(As)和铜(Cu)元素。X射线衍射分析检测结果显示,04号样品在 2θ 为 29.348° 、 29.833° 、 43.129° 存在衍射峰,对应的d值分别为:3.06、2.96、2.13,这与砷铅矿 $[\text{Pb}_5(\text{AsO}_4)_3\text{Cl}]$ 的特征衍射峰相一致。05号样品在 2θ 为 29.353° 、 29.830° 、 43.133° 存在衍射峰,对应的d值分别为:3.04、2.99、2.10,这与砷铅矿 $[\text{Pb}_5(\text{AsO}_4)_3\text{Cl}]$ 的特征衍射峰相一致。同时此样品在 2θ 为 9.117° 、 19.603° 、 33.340° 存在衍射峰,对应的d值分别为:9.69、4.52、2.68,这与巴黎绿 $[\text{Cu}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{AsO}_2)_2]$ 的特征衍射峰相一致。06号样品在 2θ

为 16.267° 、 17.653° 、 32.384° 存在衍射峰，对应的d值分别为：5.46、5.02、2.77，这与氯铜矿（ $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ ）的特征衍射峰相一致（图5）。

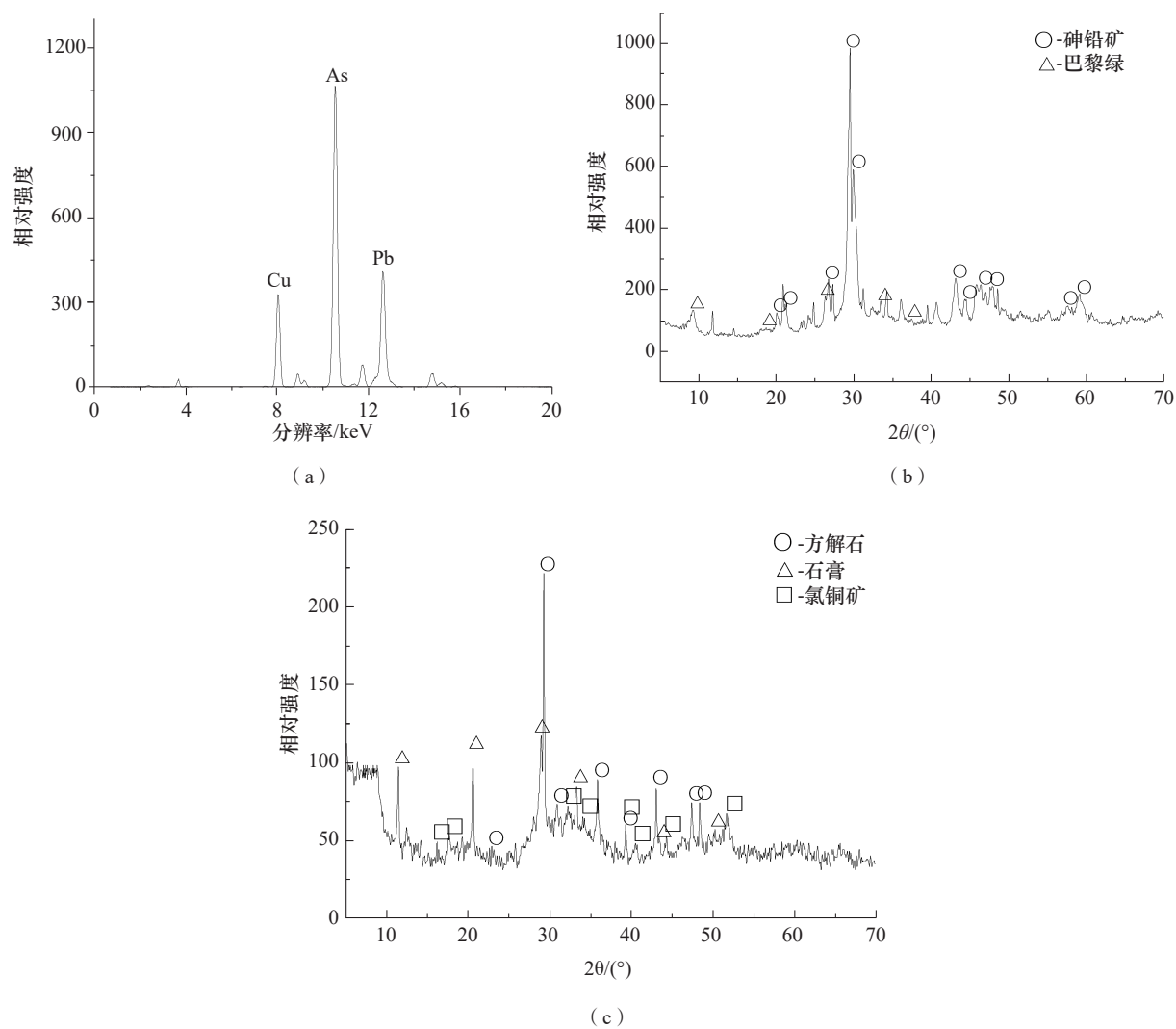


图5 绿色颜料分析结果
(a) 荧光；(b) 衍射（巴黎绿+砷铅矿）；(c) 衍射（氯铜矿）

有学者对重庆大足石刻小佛湾造像绿色颜料分析研究发现，巴黎绿和白铅矿共存时会受环境因素影响形成变色产物氯砷钠铜石和砷铅矿^[8]。王丽琴等人对大足石刻大佛湾绿色颜料分析研究发现，含铅、含砷颜料在潮湿环境中会与氯离子反应生成砷铅矿^[9, 10]。紫金庵所在地位于北亚热带季风海洋性气候区，温暖潮湿多雨，彩塑白色颜料为方解石和水白铅矿的混合物，绿色颜料为巴黎绿，彩塑的泥质可提供氯离子，从而具备反应生成砷铅矿的条件。因此绿色颜料中的砷铅矿很有可能是白色和绿色颜料发生一系列反应后产生的。

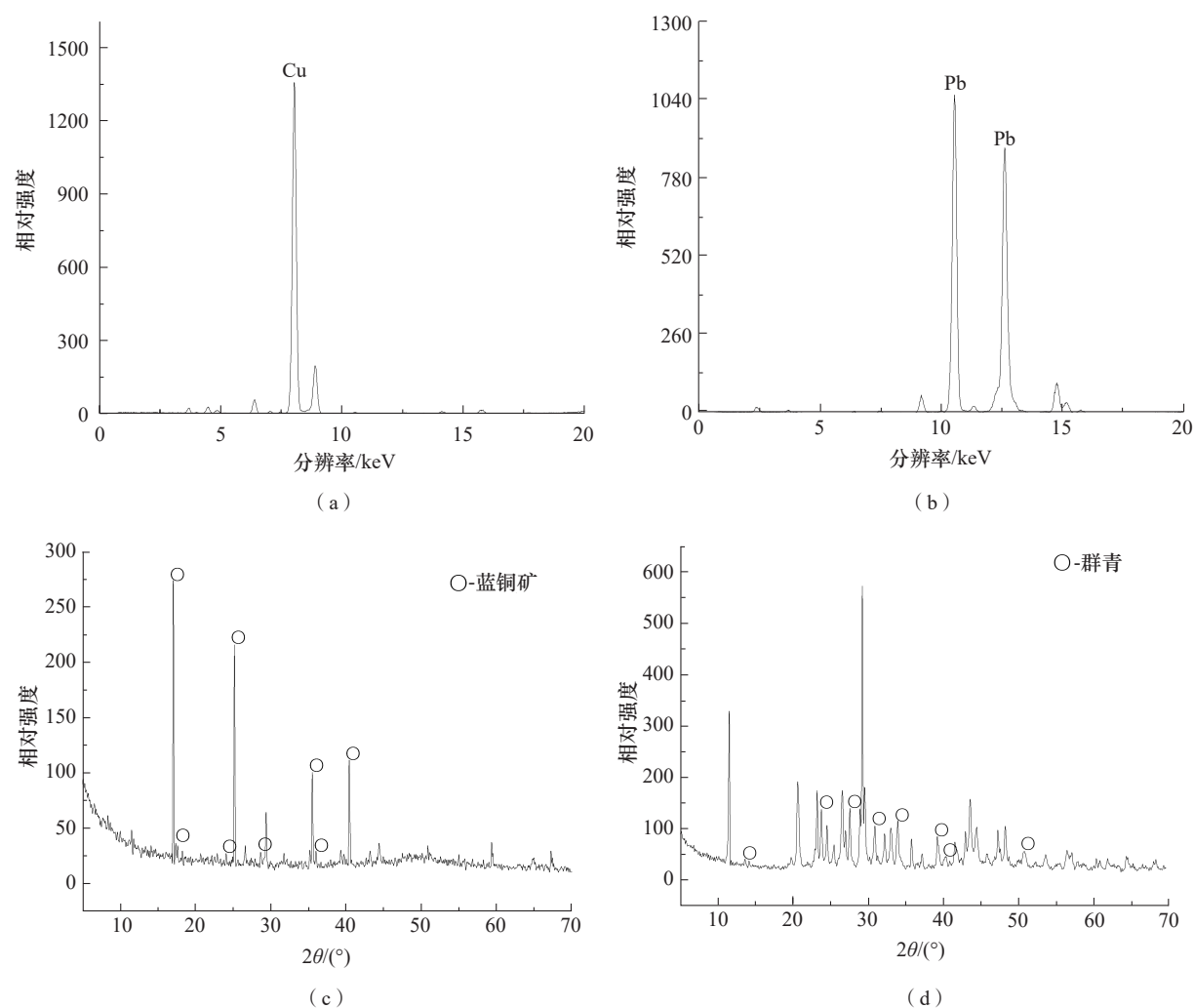
2.5 蓝色颜料

X射线荧光分析检测结果显示个别蓝色颜料含有铜（Cu）元素，其余蓝色只检测到铅（Pb）元

素。X射线衍射分析检测结果显示,08号样品在 2θ 为 17.133° 、 25.237° 、 35.637° 存在衍射峰,对应的 d 值分别为:5.17、3.52、2.52,这与蓝铜矿(石青) $[2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2]$ 的特征衍射峰相一致。07和09号结果较为相似,其中09号样品在 2θ 为 13.753° 、 23.937° 、 34.163° 存在衍射峰,对应的 d 值分别为:6.44、3.71、2.62,这与青金石(天然群青)或群青(人工合成)的特征衍射峰相一致(图6)。

对两种蓝色样品进行拉曼光谱分析,08号样品的主信号峰为 139cm^{-1} 、 177cm^{-1} 、 249cm^{-1} 、 285cm^{-1} 、 334cm^{-1} 、 402cm^{-1} 、 542cm^{-1} 、 764cm^{-1} 、 837cm^{-1} 、 938cm^{-1} 、 1095cm^{-1} 、 1424cm^{-1} 、 1578cm^{-1} ,这与蓝铜矿(石青)的拉曼特征峰基本一致^[11, 12]。而07和09号样品在 265cm^{-1} 、 547cm^{-1} 、 584cm^{-1} 、 812cm^{-1} 、 1093cm^{-1} 、 1633cm^{-1} 和 259cm^{-1} 、 547cm^{-1} 、 806cm^{-1} 、 1093cm^{-1} 、 1643cm^{-1} 等处均出现特征峰,这与青金石(天然群青)和群青(人工合成)颜料的特征峰基本相符(图6)^[13]。

由于青金石(天然群青)和群青(人工合成)的颜色及化学组成大体相同,以往对其辨识较为困难。随着相关研究的不断深入,刘璐瑶、张秉坚对彩绘文物蓝色颜料群青的鉴定技术加以总结,提出几种辨别群青颜料是否为人工合成的方法^[14]。例如检测样品的伴生矿物信息^[15],观察颜料颗粒的微观形貌^[16],查看红外光谱在 2340cm^{-1} 处是否有吸收峰^[17]等。由于人工合成群青材质纯度很高,所得拉曼结果也会较为完整,在 260cm^{-1} 、 548cm^{-1} 和 583cm^{-1} 处的三个峰分别为 S^{3-} 的



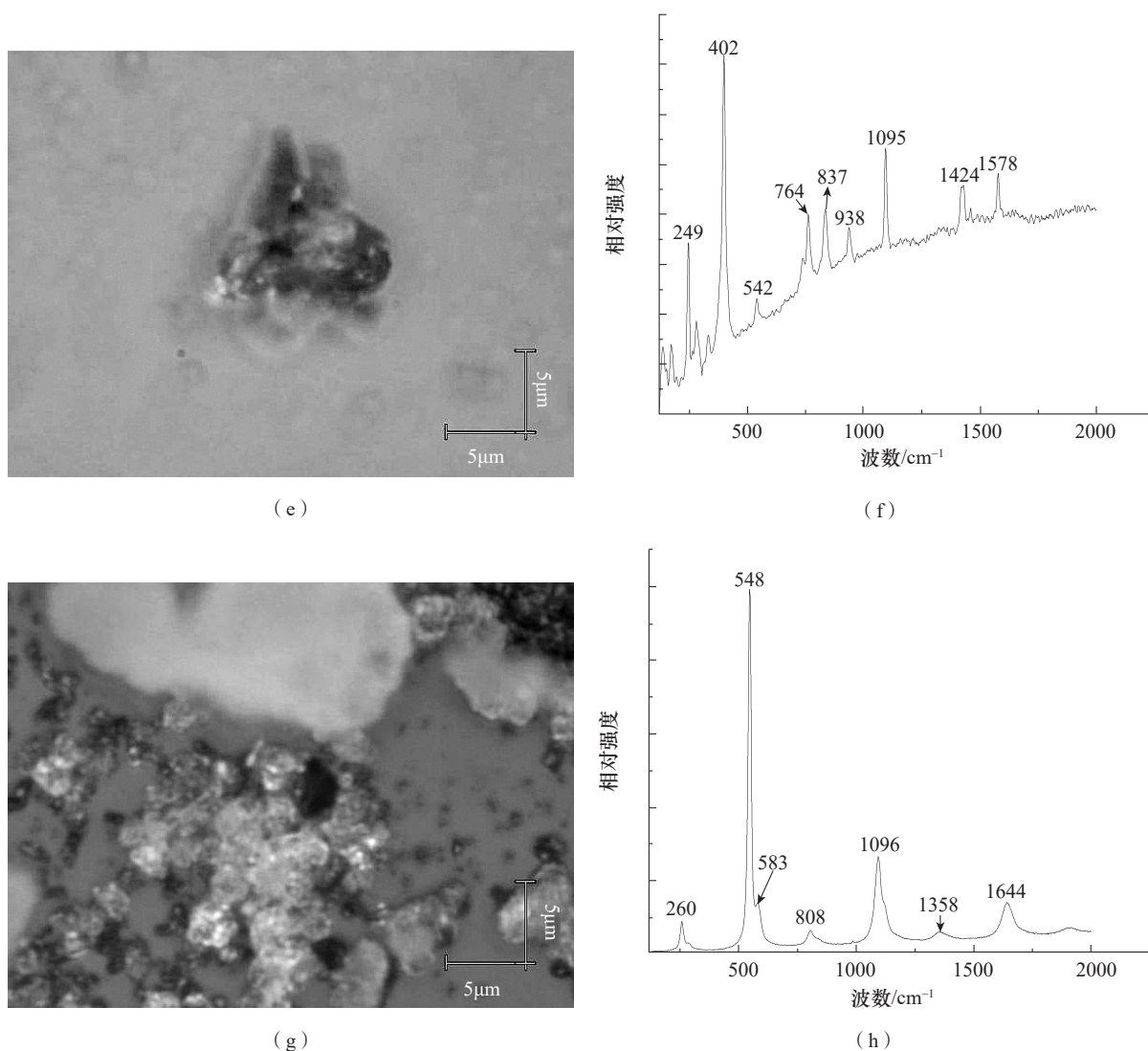


图6 蓝色颜料分析结果

(a) 荧光 (蓝铜矿); (b) 荧光 (群青); (c) 衍射 (蓝铜矿); (d) 衍射 (群青);
(e) 拉曼颗粒 (蓝铜矿); (f) 拉曼谱图 (蓝铜矿); (g) 拉曼颗粒 (群青); (h) 拉曼谱图 (群青)

弯曲振动峰、 S^{3-} 的对称伸缩振动峰和 S^{2-} 的对称伸缩振动峰^[18]。同时会出现倍频峰,如 1096cm^{-1} ($2 \times 548 = 1096$)、 1644cm^{-1} ($3 \times 548 = 1644$)等;结合峰,如 808cm^{-1} ($260 + 548 = 808$)、 1358cm^{-1} [$260 + (2 \times 548) = 1358$]、 1904cm^{-1} [$260 + (3 \times 548) = 1904$]等^[19]。综合上述信息,结合紫金庵的历史修缮资料,基本可以确定罗汉彩绘所用蓝色颜料应为人工合成群青 ($\text{Na}_{6-10}\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{S}_{2-4}$)。

2.6 白色颜料

X射线荧光分析检测结果显示,表层白色颜料主要元素为铅(Pb)元素,底层白色颜料主要元素为钙(Ca)元素。X射线衍射分析检测结果显示10号样品在 2θ 为 24.673° 、 27.187° 、 34.163° 存在衍射峰,对应的d值分别为:3.60、3.28、2.62,这与水白铅矿的特征衍射峰相一致。11号样品在 2θ 为

29.353°、39.407°、43.177°存在衍射峰，对应的d值分别为：3.03、2.29、2.09，这与方解石的特征衍射峰相一致（图7）。因此可以判定紫金庵白色颜料有水白铅矿（ PbCO_3 ）和方解石（ CaCO_3 ）。从多个样品的检测结果可见，水白铅矿不仅作为白色颜料，在其他颜色区域还作为底色层存在。

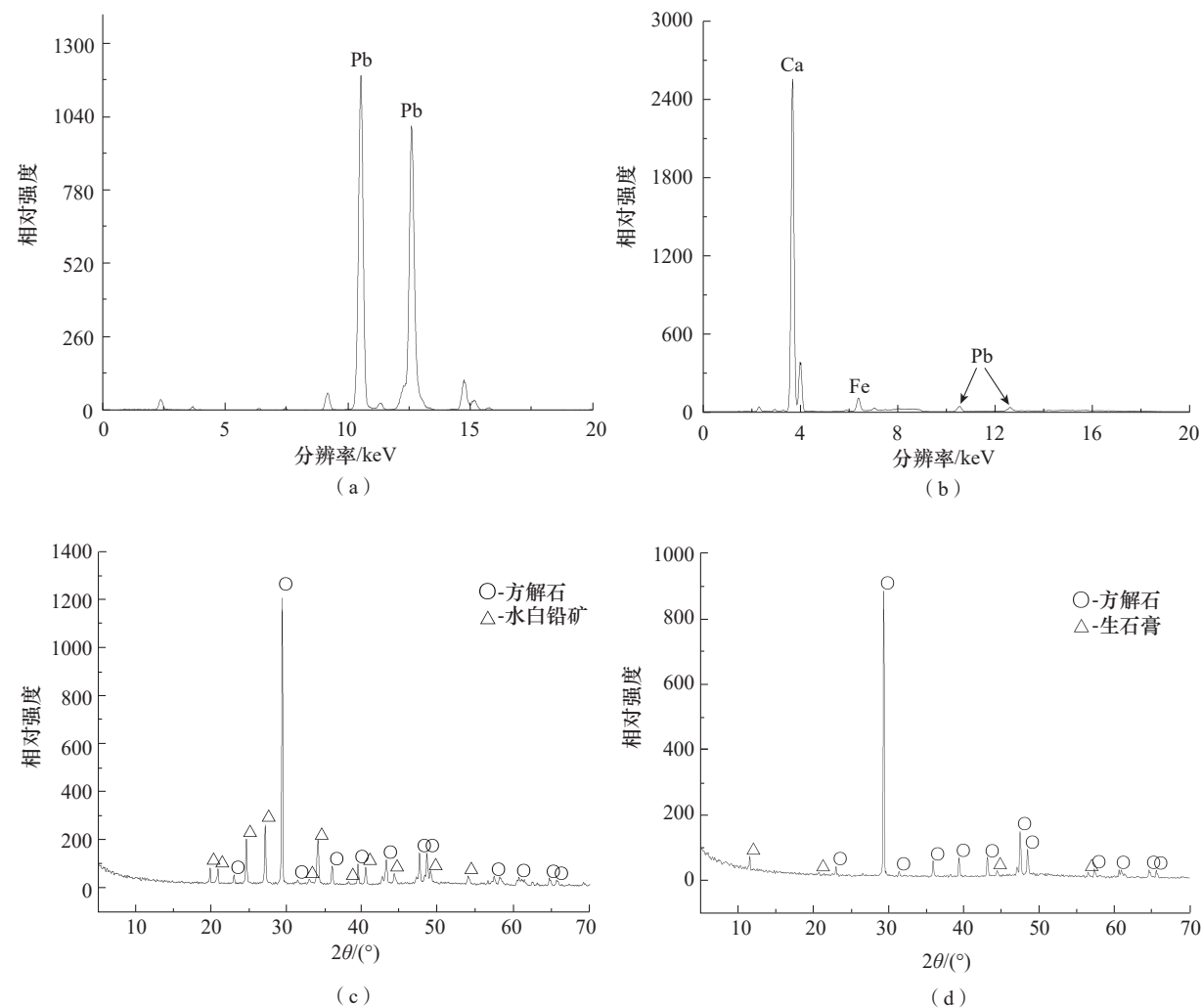


图7 白色颜料分析结果
(a) 荧光（水白铅矿）；(b) 荧光（方解石）；(c) 衍射（水白铅矿）；(d) 衍射（方解石）

3 人工合成颜料与重绘时间分析

据《太湖备考》记载“清初康熙间重修”^[1]，这是已知最新的塑像重绘时间。但此次对罗汉塑像彩绘颜料的调查结果发现重绘时所用颜料多处存在铬黄、巴黎绿、群青等人工合成颜料。

铅铬黄颜料的合成始于西伯利亚所发现的铬酸铅矿石的分析和研究。1809年法国化学家 L.N.Vauquelin 首先合成铬酸铅，1818年德国开始工业化生产^[20]。铬黄以其色彩鲜艳、遮盖力强、着色力好等特点，成为近现代国内彩绘文物重绘时首选材料之一。马燕莹等人对山西纯阳宫藏明代星宿彩塑所用颜料调查时发现，黄色颜料为铅铬黄，绿色颜料为铅铬黄和群青的混合物^[13]。王传

昌等人对山东灵岩寺彩绘罗汉的颜料进行检测分析,发现罗汉塑像重绘多达六次,其中橙色颜料为铅铬黄和铅丹的混合物^[21]。王乐乐等人对西藏拉萨大昭寺转经廊壁画颜料进行检测分析发现橘黄色是铅丹中添加铅铬黄,橘红色是朱砂中添加铅铬黄,通过铅铬黄等材料的使用推测转经廊主尊佛像应绘制于清代晚期到20世纪80年代之间^[22]。徐军平等人在山东章丘西河遗址的彩画颜料中发现有铅铬黄颜料,研究认为此处所用铅铬黄颜料是从欧洲进口^[23]。

巴黎绿首次发现于19世纪初。1814年,位于德国施韦因富特(Schweinfurt)的Wilhelm Sattler公司第一次商业生产了巴黎绿。1822年,Braconnot和Liebig分别撰写文章,公开了巴黎绿的成分和制作方法,此后,巴黎绿得以被广泛生产和使用^[24]。19世纪50年代巴黎绿始用于中国绘画之中,其作为重绘颜料使用情况较为普遍,如周国信在大同云冈石窟清代12窟重绘的壁画中发现了巴黎绿^[25]。王丽琴等分析了来自山西、北京的27个颜料样品,其中15个为巴黎绿^[26]。何秋菊等分析了收藏于北京印刷学院印刷史研究室晚清时期的道教人物画像,其上绿色颜料为巴黎绿^[27]。20世纪末至21世纪初,由于巴黎绿有剧毒,加之接触到空气中的硫化氢变黑等原因,而陆续停止使用^[28]。

人工合成群青(ultramarine blue)是指19世纪30年代(最早1828年)西方用工业方法生产的群青。晚清时期从欧洲传入中国,直到1927年我国化学家戴安邦、凌鼎钟等先辈才发起用四川等地国产原料合成群青。敦煌石窟从清代至1940年使用的合成群青都是从国外进口的^[29]。赵凤燕等人对西安周至关帝庙壁画颜料进行分析研究发现蓝色颜料为人造群青,结合其他结果和资料推测壁画重绘时间为光绪七年^[30]。杨晋松等人对成都武侯祠彩绘进行分析研究发现蓝色颜料为人造群青,赵云塑像脸部历史上经过两次重绘^[31]。

综合以上分析,铅铬黄、巴黎绿和人造群青三种颜料传入中国的时间均晚于1840年,这与文献中紫金庵罗汉堂塑像彩绘最后一次装銮时间为“清康熙年间”的记载不符,初步推断“清康熙年间”的重绘并不是紫金庵彩塑的最后一次装銮。

结 语

通过多种检测仪器对紫金庵罗汉塑像的分析结果互相印证可知:

1) 颜料种类:

红色颜料确定为朱砂(HgS)。

橙色颜料确定为铅丹(Pb_3O_4)。

黄色颜料确定为铬黄(PbCrO_4)。

绿色颜料确定为氯铜矿 $[\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}]$,巴黎绿 $[\text{Cu}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{AsO}_2)_2]$,其中巴黎绿存在变色现象,变色产物为砷铅矿 $[\text{Pb}_5(\text{AsO}_4)_3\text{Cl}]$ 。

蓝色颜料确定为石青 $[2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2]$,人造群青($\text{Na}_{6-10}\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{S}_{2-4}$)。

白色颜料确定为方解石(CaCO_3)、水白铅矿(PbCO_3)。

2) 彩塑中铬黄、巴黎绿、群青皆为近现代人工合成颜料,从而可推断彩塑最后一次装銮的时间不应早于这些合成颜料始造和在中国的始用年代。对相关材料信息梳理研究,结果表明紫金庵罗汉塑像最后一次装銮时间晚于已有记载的清代康熙年间(1662~1722年),应为1850~1900年,即清代咸丰帝和光绪帝时期。

参 考 文 献

- [1] 华东艺专美术史教研组. 洞庭东山紫金庵古塑罗汉考察记 [J]. 文物参考资料, 1955 (9): 12-21.
- [2] 尚荣. 苏州保圣寺、紫金庵罗汉雕塑研究 [J]. 南京艺术学院学报 (美术与设计), 2020 (3): 105-110.
- [3] 郭思瑶. 浅谈三处宋代罗汉彩塑造像的艺术风格 [J]. 文博, 2015 (5): 109-112.
- [4] 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.
- [5] Roy A. A Handbook of Their History and Characteristics [A], Washington DC: National Gallery of Art, Oxford: Oxford University Press, 1993, (2): 9.
- [6] Vandenaabeele P, Paepe P D, Moens L. Study of the 19th century porcelain cards with direct Raman analysis [J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2008, 39 (8): 1099-1103.
- [7] Ma Z Z, Wang L Q, Yan J, et al. Chromatographic, Microscopic, and Spectroscopic Characterization of a Wooden Architectural Painting from the Summer Palace, Beijing, China [J]. Analytical Letters, 2019, (12): 1670-1680.
- [8] Li Z M, Wang L L, Chen H L, et al. Degradation of emerald green: scientific studies on multi-polychrome Vairocana Statue in Dazu Rock Carvings, Chongqing, China [J]. Heritage Science, 2020, 8 (1).
- [9] 王丽琴, 马彦妮, 张亚旭, 等. 基于拉曼光谱鉴定世界遗产大足卧佛颜料及相关研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40 (10): 3199-3204.
- [10] Simoen J, Meyer S D, Vanmeert F, et al. Combined Micro- and Macro scale X-ray powder diffraction mapping of degraded Orpiment paint in a 17th century still life painting by Martinus Nelliuss [J]. Heritage Science, 2019, 7: 83.
- [11] Bell I M, Clark R J H, Gibbs P J. Raman spectroscopic library of natural and synthetic pigments (pre-~1850 AD) [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 1997, 53 (12): 2159-2179.
- [12] Bouchard M, Smith D C. Catalogue of 45 reference Raman spectra of minerals concerning research in art history or archaeology, especially on corroded metals and coloured glass [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2003, 59 (10): 2247-2266.
- [13] 马燕莹, 张建华, 胡东波. 山西太原纯阳宫所藏明代一尊星宿彩塑颜料分析 [J]. 文物保护与考古科学, 2015, 27 (4): 50-60.
- [14] 刘璐瑶, 张秉坚. 彩绘文物中蓝色颜料群青的鉴定技术研究 [J]. 黑龙江科学, 2021, 12 (2): 7-14.
- [15] Schmidt C M, Walton M S, Trentelman K. Characterization of lapis lazuli pigments using a multitechnique analytical approach: implications for identification and geological provenancing [J]. Analytical Chemistry, 2009, 81 (20): 8513-8518.
- [16] Aceto M, Agostino A, Fenoglio G, et al. Non-invasive differentiation between natural and synthetic ultramarine blue pigments by means of 250-900 nm FORS analysis [J]. Analytical Methods, 2013, 5 (16): 4184-4189.
- [17] Derrick M R, Stulik D, Landry J M. Infrared spectroscopy in conservation science [M]. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 1999.
- [18] Prieto A C, Martínez O, Souto J, et al. Study of a tabernacle with a remarkable architectural structure: In situ examination using Raman spectroscopy [J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2013, 44 (8): 1156-1162.
- [19] Colomban P. Lapis lazuli as unexpected blue pigment in Iranian Lājvardina ceramics [J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2003, 34 (6): 420-423.
- [20] 杜昌林. 对铅铬颜料的再认识 [J]. 中国涂料, 2012, 27 (7): 14-17.
- [21] 王传昌, 李志敏, 万鑫, 等. 山东长清灵岩寺宋代罗汉像彩绘分析研究 [J]. 文物保护与考古科学, 2018, 30 (6): 37-47.
- [22] 王乐乐, 李志敏, 张晓彤, 等. 西藏拉萨大昭寺转经廊壁画制作工艺研究 [J]. 文物保护与考古科学, 2014, 26 (4): 84-92.
- [23] 徐军平, 王伟峰, 夏寅. 章丘西河遗址清墓壁龛提取及彩画颜料分析 [C] //中国化学会应用化学委员会, 考古与文物保

- 护化学科学委员会, 秦始皇兵马俑博物馆, 等. 文物保护研究新论(二). 北京: 文物出版社, 2010: 285-290.
- [24] 何秋菊, 李涛, 施继龙, 等. 道教人物画像颜料的原位无损分析[J]. 文物保护与考古科学, 2010, 22(3): 61-68.
- [25] 周国信, 程怀文. 云冈石窟古代壁画颜料剖析[J]. 考古, 1994, (10): 948-951.
- [26] 王丽琴, 严静, 樊晓蕾, 等. 中国北方古建油饰彩画中绿色颜料的光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(2): 453-457.
- [27] 何秋菊, 李涛, 施继龙, 等. 道教人物画像颜料的原位无损分析[J]. 文物保护与考古科学, 2010, 22(3): 61-68.
- [28] Lombardo C C. Forever Gothic? Analysis and Interpretation of the Interior of the Great North Bedchamber at Strawberry Hill [D]. philadelphia: University of Pennsylvania, 2006: 90-92.
- [29] 王进玉. 敦煌石窟合成群青颜料的研究[J]. 敦煌研究, 2000(1): 76-81.
- [30] 赵凤燕, 冯健, 孙满利, 等. 西安周至胡家堡关帝庙壁画颜料分析研究[J]. 文博, 2017(4): 95-100.
- [31] 杨晋松, 郭宏, 陈坤龙, 等. 成都武侯祠彩塑的制作工艺和颜料科学分析研究[J]. 中国文物科学研究, 2016(2): 64-69.