DOI: 10.13957/j.cnki.tcxb.2022.02.019

西安东郊唐墓出土彩绘陶俑的颜料检测分析

荆海燕

(陕西历史博物馆，陕西 西安 710061)

摘 要：应用扫描电镜能谱仪和激光显微共聚焦拉曼光谱仪对西安东郊唐墓出土彩绘陶俑表面颜料的微观结构和组成进行科学分析。研究发现，这批陶俑表面颜料均为无机颜料，红色、铁红色、绿色、白色、黑色、桔色颜料的显色成分分别为朱砂、赤铁矿、孔雀石、铅白、炭黑、铅丹。其中，朱砂成分单一，无伴生矿物石英，可以确定是经过加工纯化或者人工合成的；黑色颜料的晶粒尺寸在纳米范围。分析结果为这批陶俑彩绘颜料的鉴定、保护修复工作提供科学依据。

关键词：彩绘陶俑；颜料；唐墓

中图分类号：TQ174.4+3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-2278(2022)02-0330-09

Pigments on Pottery Figurines Unearthed from Tang Dynasty Tomb in the Eastern Suburbs of Xi'an

JING Haiyan

(Shaanxi History Museum, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: Scanning electron microscopy (SEM) and confocal micro-Raman spectroscope (CMRS) were used to analyze the pigment composition of pottery figurines unearthed from Tang Dynasty Tomb in the Eastern Suburbs of Xi'an. The pigments were composed of inorganic mineral ones, with the red pigment of the pottery surfaces to cinnabar, the iron red pigment to be hematite, the white pigment to be white lead and the black pigment to be charcoal, while the orange one was minimum. The composition of the red pigments (cinnabar) is pure without quartz crystal, probably because it was purified or synthesized. The crystal size of charcoal is possibly at nanometer scale. This analysis result provides a scientific basis for pigment identification, cultural relic conservation and restoration in the future study.

Key words: pottery figurines; pigment; Tang dynasty tomb

0 引 言

在全国第一次文物普查中，陕西历史博物馆对一批 20 世纪 50 年代发掘的文物进行整理工作。工作期间，文保工作者整理出一箱共 30 件彩绘陶俑，档案记载这批彩绘陶俑在 1956 年出土于西安市东郊唐墓 005 工地，再无更具体的出土信息。这批陶俑类型多样，包括贵妇俑、仕女俑、天王俑、镇墓兽、骆驼、马等。唐代陶俑作为一定时期的产物，是唐代社会意识形态物化的艺术精品之一[1]。这批陶俑对研究唐代文化、政治、经济状况提供了丰富的实物资料。现存陶俑大多残破，表面彩绘起翘、脱落严重，有的彩绘甚至完全脱落。为了及时保护好这批陶俑，陕西历史博物馆对其进行科学研究。

鉴于文物样品的珍贵性，通常采取无损或者微损的分析手段。扫描电镜能谱分析和激光显微共聚焦拉曼光谱分析都能在取样极少的情况下对文物样品进行微观分析，广泛应用于文物保护领域[2–4]。本文应用扫描电镜能谱和激光显微共聚焦

收稿日期：2021–11–09。　**修订日期：**2022–02–21。
基金项目：陕西省科技厅基金(2021ZDLGY15-06)；陕西历史博物馆馆内课题(GJ2021021)。
通信联系人：荆海燕(1982–)，女，硕士，副研究馆员。

Received date: 2021–11–09.　**Revised date:** 2022–02–21.
Correspondent author: JING Haiyan (1982–), Female, Master, Associate researcher.
E-mail: 121281256@qq.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

拉曼光谱对陶俑已经脱落、起翘的彩绘颜料进行科学分析，了解其彩绘原料信息，同时与已有相关研究进行对比、印证和互补，并为今后的科学保护提供依据。

1　实　验

1.1　实验样品

采集陶俑已粉化脱落或起翘的红色、铁红色、绿色、白色、黑色、桔色颜料作为实验样品，见表 1。

1.2　实验方法

采用飞纳 Phenom XL 扫描电镜(配有能谱仪)分析颜料显微形貌，加速电压为 15 kV，工作距离为 5 mm，束斑为 4.0 μm ~ 5.0 μm。采用 LabRAM HR Evolution 激光显微共聚焦拉曼光谱仪分析颜料主要成分，激光器波长为 785 nm 或 532 nm，物镜为 50X，光斑尺寸为 1 μm，信息采集时间为 10 s，累计次数为 3 ~ 5 次，测量范围为 50 cm^{-1} ~ 2000 cm^{-1}。

2　结果与讨论

2.1　黑色颜料

由图 1 可见，6#黑色颜料在扫描电镜下呈板结状分布，表面布满小颗粒物；8#黑色颜料有明显的板结特征，放大 5000 倍可以看到有裂纹和碎小的颗粒分布。表 2 能谱仪面扫描结果显示 6#和 8#黑色样品中的 C 含量最高，推断黑色颜料为炭黑。对黑色样品进一步做拉曼光谱分析，如图 2 和图 3 所示。6#黑色颜料在 1364.6 cm^{-1}、1594.2 cm^{-1} 处出现明显信号峰，8#黑色颜料在 1344.6 cm^{-1}、1593.6 cm^{-1} 处出现明显信号峰。这与文献[5]炭黑的标准拉曼位移(1380 cm^{-1}、1596 cm^{-1})基本一致，因此，黑色颜料为炭黑。相比于标准谱图，6#、8#黑色拉曼峰向低波数移动，8#拉曼峰明显宽化，拉曼峰的宽化和移动可能受晶粒尺寸效应的影响，随着晶粒尺寸的减小，不少纳米材料的拉曼峰均发生红移[6]。这一现象说明黑色颜料的晶粒尺寸可能在纳米范围，8#晶粒尺寸小于 6#样品。相同现象也曾出现在河南班村遗址出土的仰韶文化时期彩陶的黑色颜料的分析中[7]。从外观肉眼观察，8#黑于 6#。综合上述情况来看，颜料的矿物成分和颗粒大小共同决定了颜料的颜色。炭黑由于性质稳定、遮盖力强、价格低廉，是中国古代常用的黑色颜料。春秋时期“钟离君柏”墓出土的彩绘陶器[8]使用炭黑，秦俑和汉阳陵彩绘陶俑[9]也用炭黑，唐张臣和墓彩绘陶俑[10]也使用炭黑，唐代的永泰公主墓出土彩绘陶器也有炭黑[11]，炭黑的应用可见一斑。

2.2　红色颜料

从图 4 的 SEM 照片可看出，红色颜料由大小不一的颗粒组成，放大 5000 倍时明显有一凹痕。EDS 能谱元素分析结果(见表 2)表明，样品中 Hg 和 S 的原子相对含量较高，且 Hg 与 S 的物质的量比值约为 1:1，推测其显色物相是朱砂。再对红色颜料进行拉曼光谱分析，由图 5 可知拉曼信号峰位于 252.6 cm^{-1}、342.1 cm^{-1} 处，经过对比，这与文献[12]中朱砂的拉曼特征峰相一致，确定红色颜料为朱砂。利用面扫描技术对 Hg、S、O、C 元素进行数据收集。从图 4 中可以清晰看到，Hg 与 S 在元

表 1　唐代陶俑的彩绘颜料样品信息表

Tab. 1 Information of the samples from polychrome pottery figurines for the Tang Dynasty

Sample number	Color and collection	Sample status	Name of the cultural relic
1#	Skirt orange	Powder	Tang dynasty painted Lokapala
2#	Helmet red	Powder	
3#	Back orange	Powder	Tang dynasty painted tomb guardian beast
4#	Lower leg white	Powder	
5#	Skirt green	Powder	Tang dynasty painted terracotta lady
6#	Bob black	Flake	
7#	Left foot red	Powder	Tang dynasty painted terracotta woman
8#	Bob black	Powder	
9#	Belly iron red	Flake	Tang dynasty painted terracotta camel

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

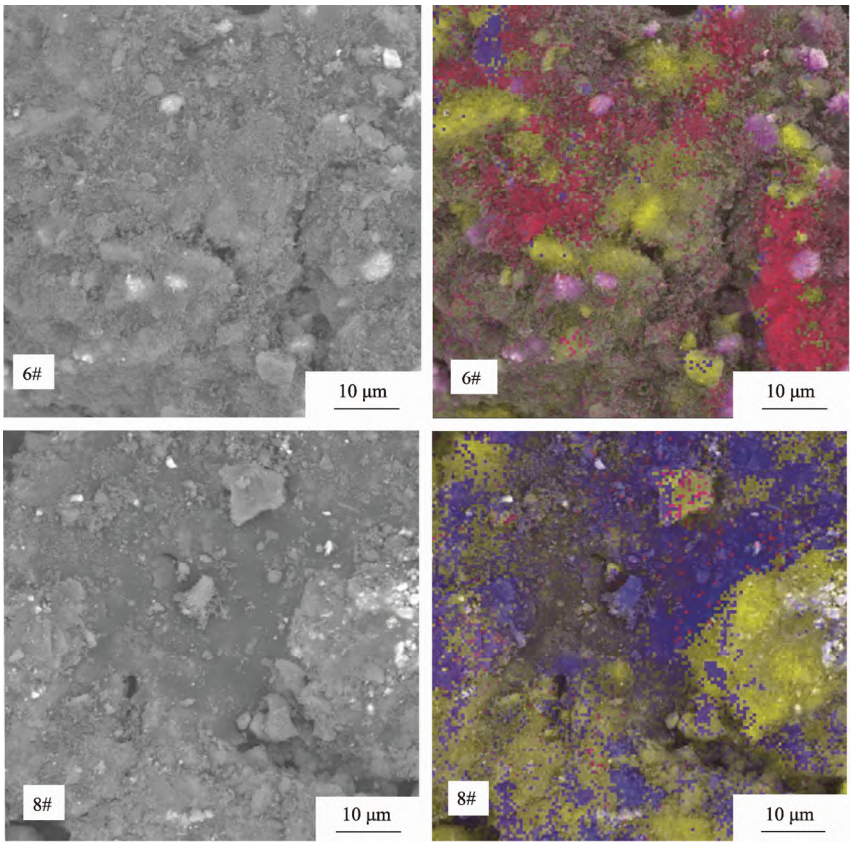


图 1 6#和 8#黑色颜料样品在扫描电镜下的形貌及元素分布面扫描图

Fig. 1 SEM images and EDS mapping profiles of the black pigment 6# and 8#

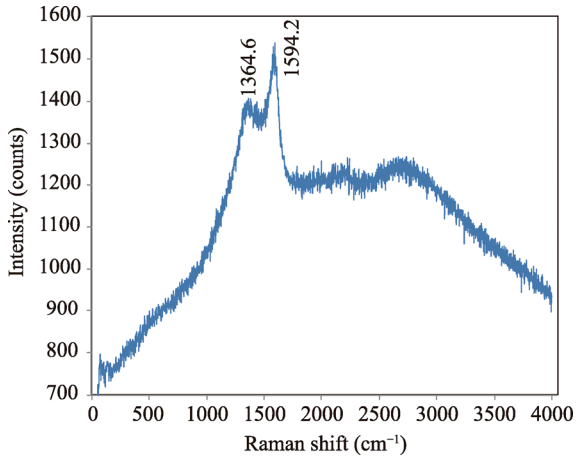


图 2 6#黑色颜料拉曼光谱图

Fig. 2 Black pigment Raman spectrum of Sample 6#

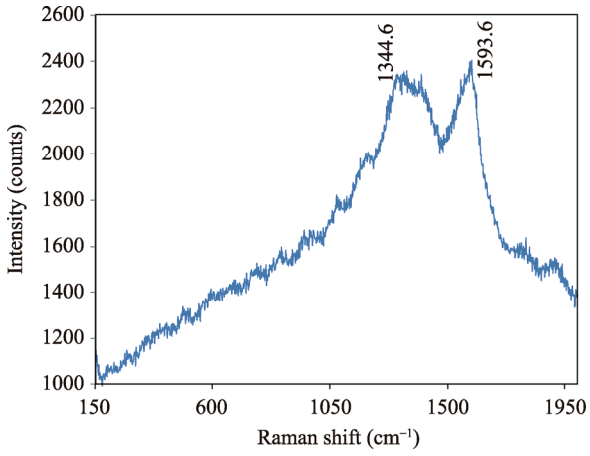


图 3 8#黑色颜料拉曼光谱图

Fig. 3 Black pigment Raman spectrum of Sample 8#

素分布上具有匹配对称性，与其他元素无关，基本以 HgS 颗粒的形式分布。另外，天然朱砂通常伴生有石英等矿物，而在红色颜料的拉曼峰中并未出现石英的拉曼峰(465 cm^{-1}) [13]，同时，面扫描结果也表明了朱砂的高纯度。以此可推断，红色颜料是经加工纯化或者人工合成的。

2.3 桔色颜料

1#桔色颜料在扫描电镜下以岩片状团聚在一起，周围有不均匀的片状颗粒分布，结晶度较差；3#桔色颜料呈岩片状发育，边缘不清晰，周边不均匀地分布有大小不一的块状颗粒(见图 6)。经 EDS 分析发现，样品含有 C、Pb、Si、Ca、O 等元素(见表 2)，其中：Pb、O 的原子百分含量较高，初步推测桔色颜料为铅丹。采用拉曼光谱分析对 1#、3#桔色样品进行检测，结果分别如图 7 和图 8 所示。由图 7 可知，1#桔色颜料在 119.5 cm^{-1}、149.0 cm^{-1}、

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

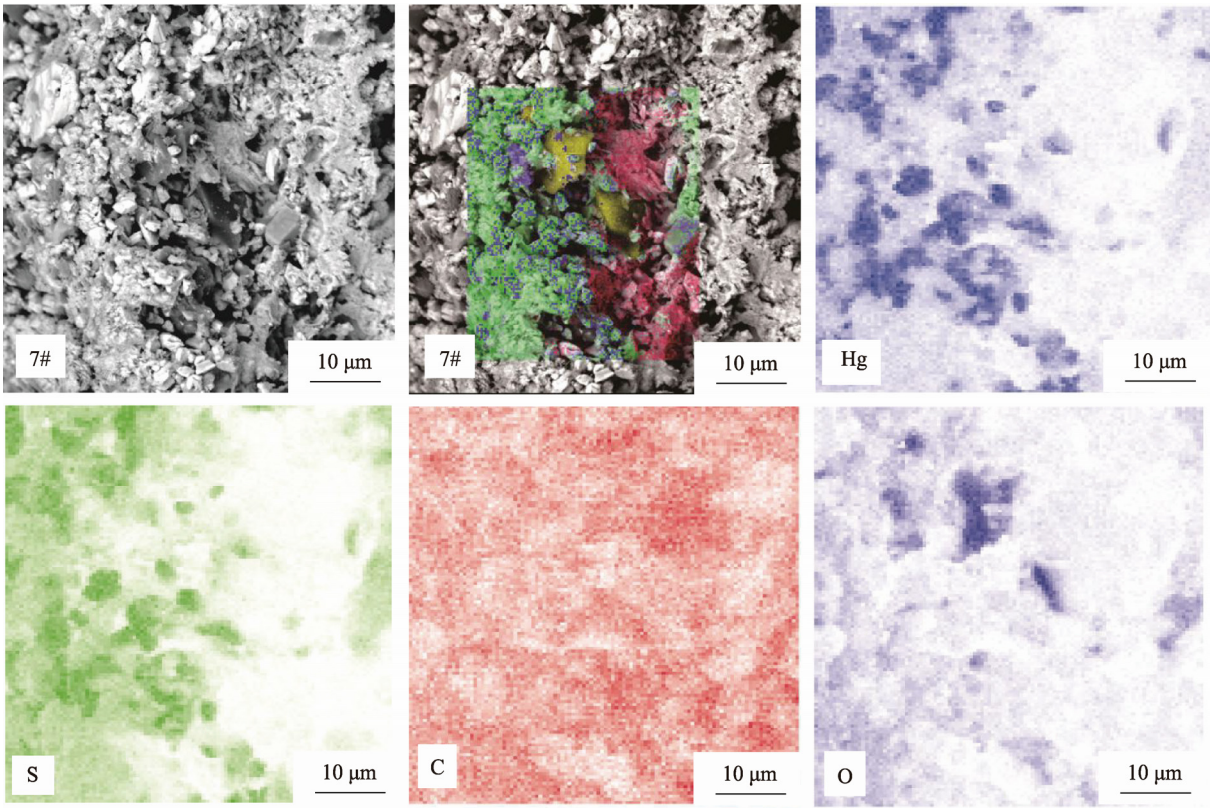


图 4　7#红色颜料样品在扫描电镜下的形貌及元素分布面扫描图
Fig. 4 SEM images and EDS mapping profiles of the red pigment 7#

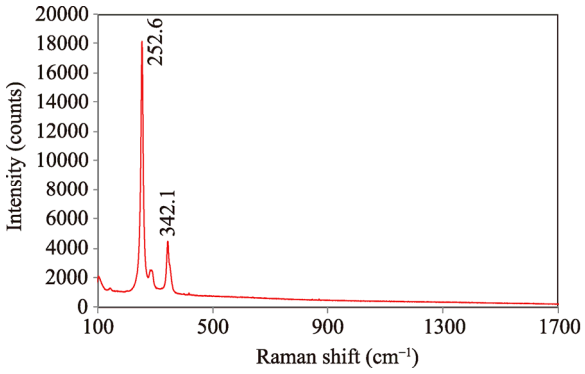


图 5　7#红色颜料拉曼光谱图
Fig. 5 Red pigment Raman spectrum of Sample 7#

223.9 cm^{-1}、312.2 cm^{-1}、389.1 cm^{-1}、548.1 cm^{-1}处有拉曼信号峰，3#桔色颜料在 119.5 cm^{-1}、149.6 cm^{-1}、223.9 cm^{-1}、314.6 cm^{-1}、389.9 cm^{-1}、547.4 cm^{-1}处有拉曼信号峰，这与铅丹的标准拉曼峰(120 cm^{-1}、151 cm^{-1}、223 cm^{-1}、313 cm^{-1}、390 cm^{-1}、548 cm^{-1})相吻合，因此，可以断定桔色颜料为铅丹(Pb_3O_4)。铅丹是古代常用的一种矿物颜料[14–15]，唐墓出土的陶片、壁画上也有使用[16]。其颜色鲜艳靓丽，但性质并不稳定。

2.4　铁红色

2#铁红颜料在扫描电镜下呈不均匀块状，颗粒间有空隙；9#铁红颜料在扫描电镜放大 10000 倍下呈云朵状，表层颗粒比较碎细，与下层结合不紧密，右上方有极细小的颗粒堆积(见图 9)。EDS 面扫描后发现样品中 O 元素原子百分比最大，Fe 元素原子百分比为 10%以上，推测样品的显色物相为赤铁矿(Fe_2O_3)，检测结果见表 2。铁红色颜料的拉曼光谱见图 10、11，2#铁红颜料拉曼吸收峰位于 139.0 cm^{-1}、223.0 cm^{-1}、290.8 cm^{-1}、407.7 cm^{-1}、605.4 cm^{-1}处，其中：强峰位于 290.8 cm^{-1}、407.7 cm^{-1}处。9#铁红颜料拉曼吸收峰位于 143.9 cm^{-1}、224.6 cm^{-1}、296.4 cm^{-1}、403.9 cm^{-1}，其中：强峰位于 296.4 cm^{-1}、403.9 cm^{-1}处。这与赤铁矿的拉曼特征峰相吻合，可断定为赤铁矿(Fe_2O_3)。Fe_2O_3 是赤铁矿的主要成分，在旧石器时代的山顶洞人遗址中就发现石珠及鲩鱼眼上骨被赤铁矿粉末染成红色[17]。唐代陶片和壁画残片[16]也都发现使用赤铁矿的痕迹。该颜料化学性质稳定，在常温条件下极不容易变色，因此，铁红色颜料的颜色和明亮度都无明显变化。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

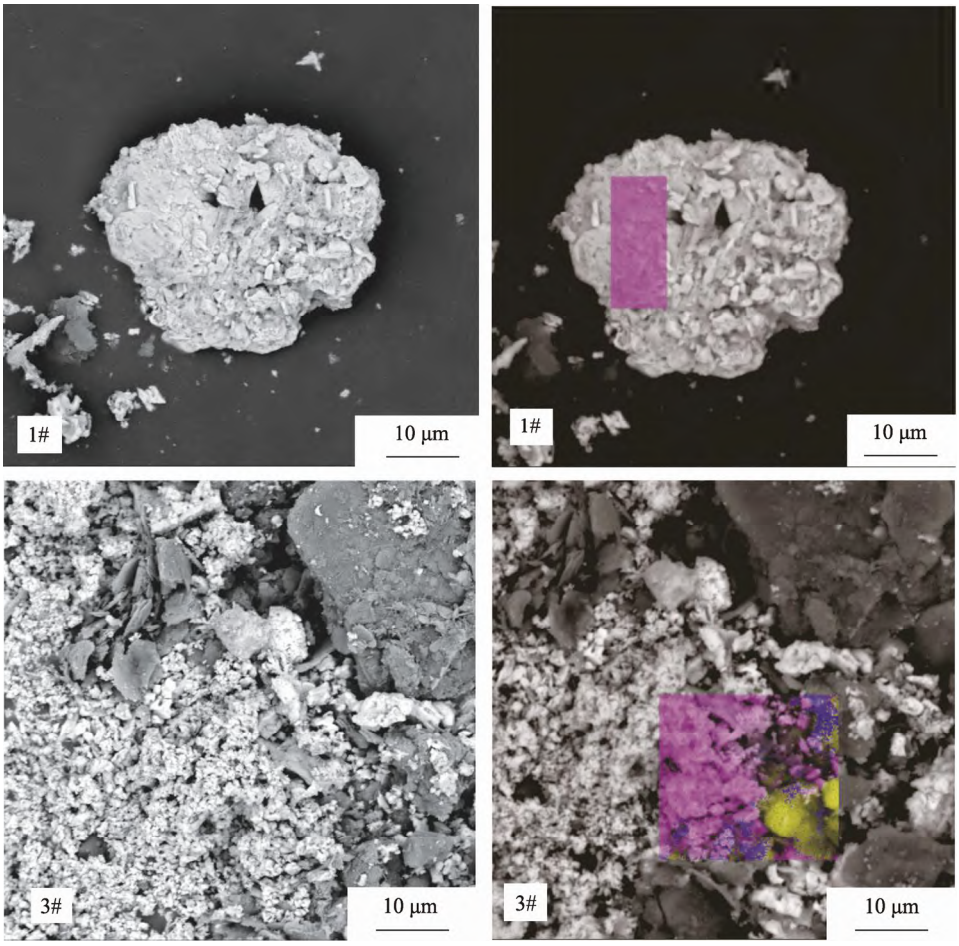


图 6 1#和 3#桔色颜料样品在扫描电镜下的形貌及元素分布面扫描图

Fig. 6 SEM images and EDS mapping profiles of the orange pigment 1# and 3#

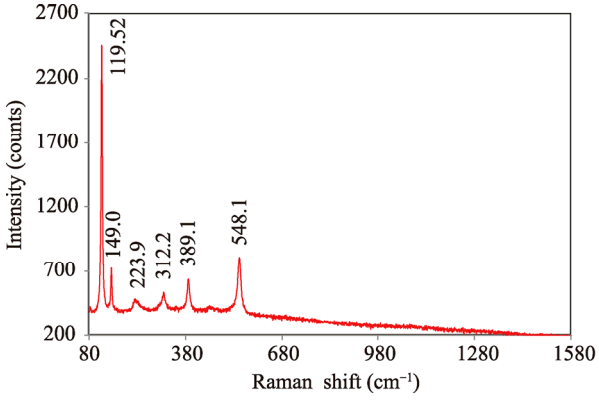


图 7 1#桔色颜料拉曼光谱图

Fig. 7 Orange pigment Raman spectrum of Sample 1#

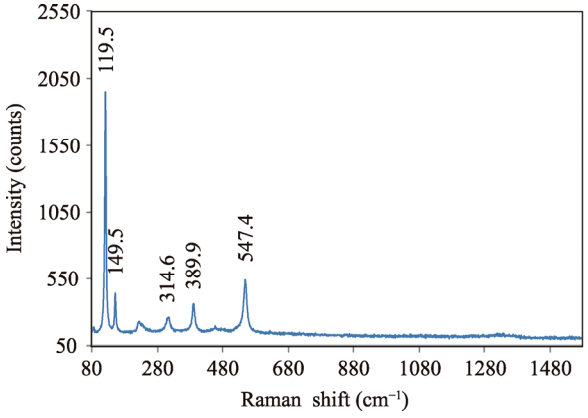


图 8 3#桔色颜料拉曼光谱图

Fig. 8 Orange pigment Raman spectrum of Sample 3#

2.5 白色颜料

4#白色颜料在扫描电镜下为蚕茧状结晶体，颗粒间有裂隙、空洞(见图 12)。能谱分析结果(见表 2)显示，样品中含有 C、Pb、O、Si、Br、Ca 等元素。其中，C、Pb、O 含量较高，推测该白色颜料可能为铅白。白色颜料的拉曼光谱见图 13，样品在 1051 cm^{-1} 处有拉曼吸收峰，与文献[18]中的铅白($2PbCO_3·Pb(OH)_2$)的拉曼光谱吻合，结合 EDS 的分析结果可断定该颜料为铅白。铅白是中国古代文物常用的白色颜料，是一种人工合成颜料，约公元前 300 年，中国已有人造铅白，在兵马俑、西汉壁画、敦煌壁画、唐代彩绘等文物上都有使用[19]。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

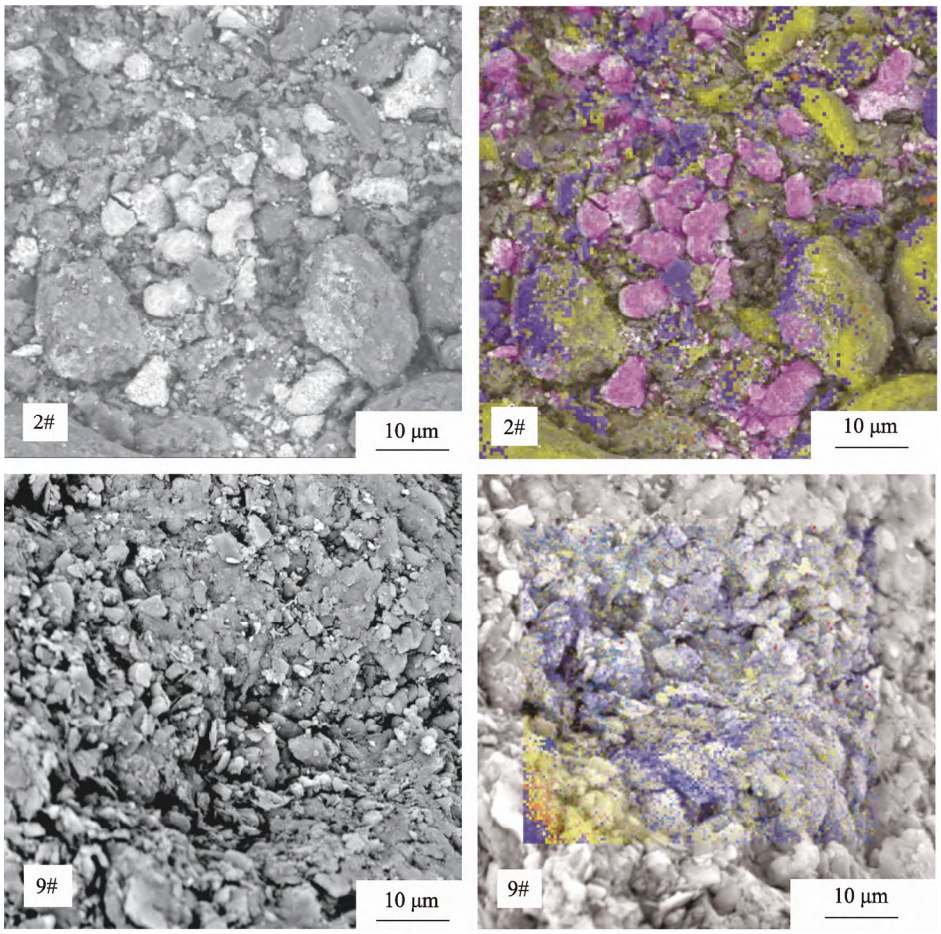


图 9　2#和 9#铁红色颜料样品在扫描电镜下的形貌及元素分布面扫描图
Fig. 9 SEM images and EDS mapping profiles of the iron red pigment 2# and 9#

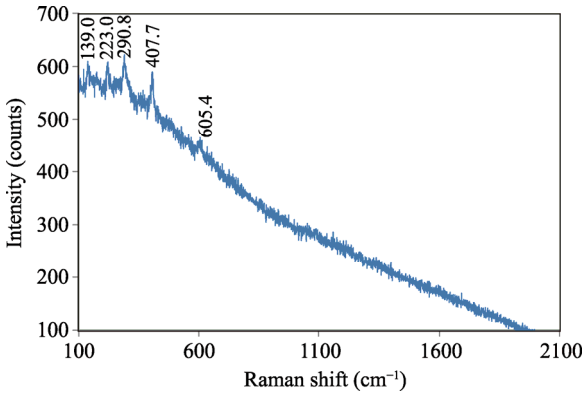


图 10　2#铁红色颜料拉曼光谱图
Fig. 10 Iron red pigment Raman spectrum of Sample 2#

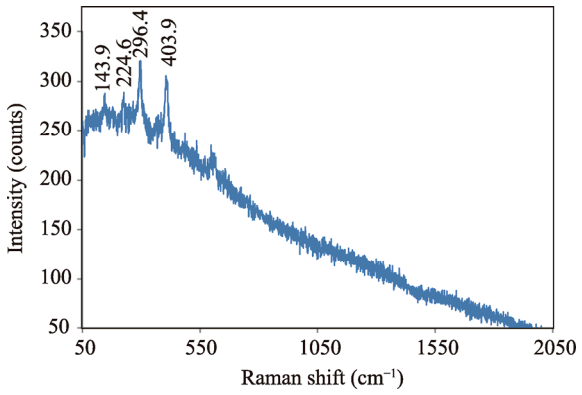


图 11　9#铁红色颜料拉曼光谱图
Fig. 11 Iron red pigment Raman spectrum of Sample 9#

2.6　绿色颜料

5#绿色颜料在扫描电镜放大 10000 倍下呈现不规则、大小不一的块状颗粒，伴有细小碎块颗粒(图 14)。通过面扫描后发现有 Cu 元素，其原子百分比为 32.32%(见表 2)，据此可推断，绿色颜料的显色物质是含 Cu 的化合物。进一步对绿色颜料进行拉曼光谱分析，如图 15 所示。在低波数区的 148.6 cm^{-1}、216.4 cm^{-1}、346.4 cm^{-1}、428.8 cm^{-1}、528.9 cm^{-1} 处有信号峰，高波数区的 1092.3 cm^{-1}、1488.8 cm^{-1}、3374.9 cm^{-1} 处也有明

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

显散射信号峰，与碱式碳酸铜($CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$)的拉曼光谱完全吻合[20]，据此判断其为孔雀石。孔雀石因其颜色与孔雀羽毛上斑点的绿色非常相似而得名，又叫石绿。其性质稳定、不易褪色，作为绿色颜料在中国古代被广泛应用。唐永泰公主墓出土彩绘陶器[11]、唐韦贵妃墓壁画[21]、洛阳孟津唐代壁画墓[22]出土的大量陶俑均使用孔雀石作为绿色颜料。

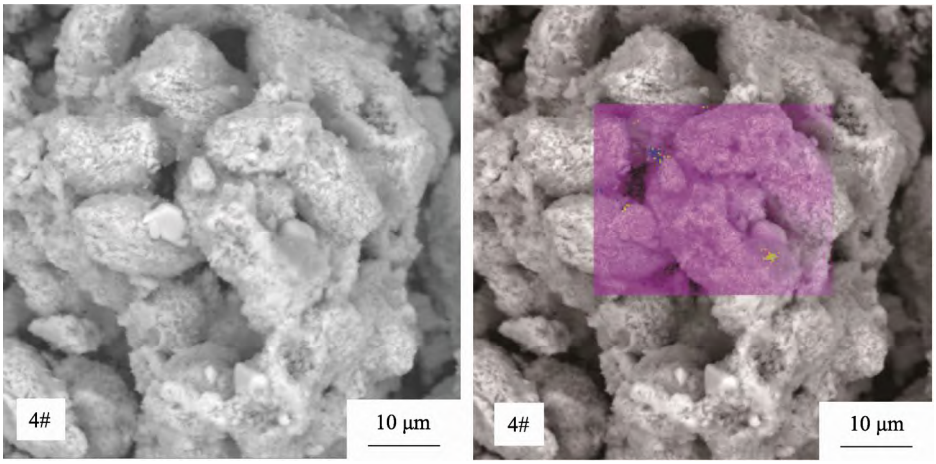


图 12 4#白色颜料样品在扫描电镜下的形貌及元素分布面扫描图

Fig. 12 SEM images and EDS mapping profiles of the white pigment 4#

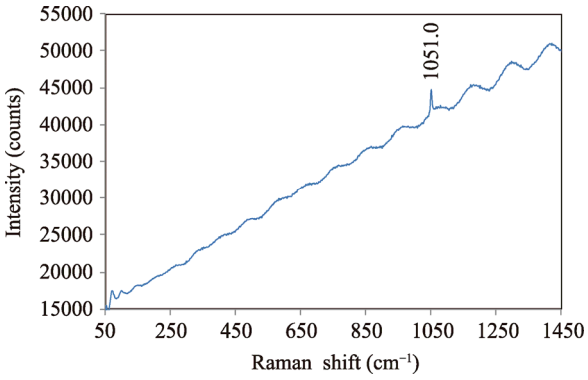


图 13 4#白色颜料拉曼光谱图

Fig. 13 White pigment Raman spectrum of Sample 4#

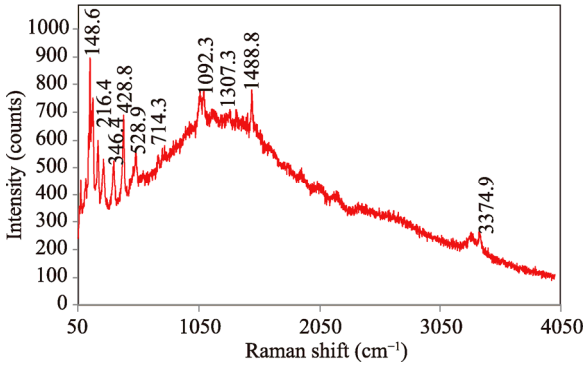


图 15 5#绿色颜料拉曼光谱图

Fig. 15 Green pigment Raman spectrum of Sample 5#

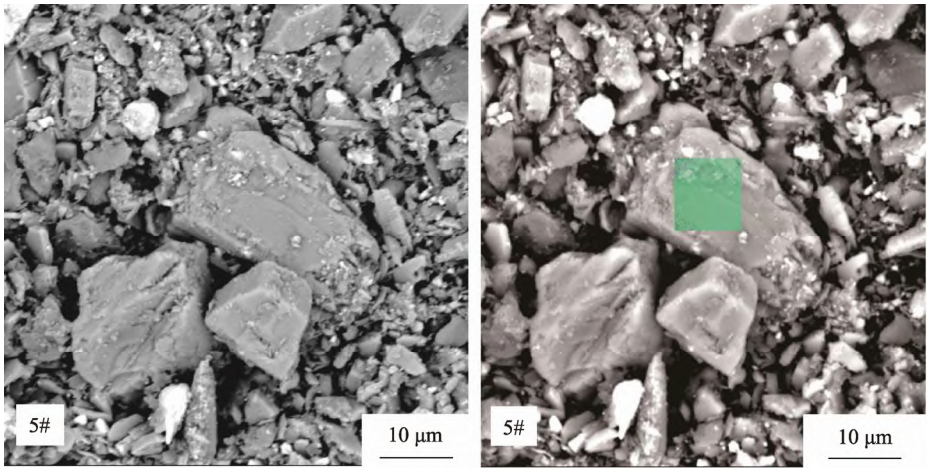


图 14 5#绿色颜料样品在扫描电镜下的形貌及元素分布面扫描图

Fig. 14 SEM images and EDS mapping profiles of the green pigment 5#

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　颜料 SEM-EDS 分析结果

Tab. 2 SEM-EDS analysis results of the pigments

Sample number	Proportion	C	Pb	Si	O	Ca	Br	Cu	Fe	Mg	Al	K	Hg	S
1# orange	wt.%	2.58	90.21	—	7.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	at.%	19.53	39.56	—	40.91	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2# iron red	wt.%	—	4.86	17.51	28.59	—	—	—	35.99	—	13.05	—	—	—
	at.%	—	1.81	16.08	52.21	—	—	—	17.38	—	12.48	—	—	—
3# orange	wt.%	5.86	64.77	4.83	18.08	2.16	4.30	—	—	—	—	—	—	—
	at.%	22.09	14.14	7.72	51.13	2.43	2.43	—	—	—	—	—	—	—
4# white	wt.%	2.43	84.74	1.02	8.77	0.88	2.16	—	—	—	—	—	—	—
	at.%	16.24	32.85	2.92	44.05	1.77	2.17	—	—	—	—	—	—	—
5# green	wt.%	8.91	—	1.34	21.56	—	2.51	65.67	—	—	—	—	—	—
	at.%	23.18	—	1.49	42.08	—	0.98	32.32	—	—	—	—	—	—
6# black	wt.%	44.45	—	10.99	31.34	3.78	9.44	—	—	—	—	—	—	—
	at.%	59.09	—	6.25	31.27	1.50	1.89	—	—	—	—	—	—	—
7# red	wt.%	0.27	—	0.03	0.16	—	—	—	—	—	—	—	48.50	51.04
	at.%	4.22	—	0.17	1.88	—	—	—	—	—	—	—	43.03	50.60
8# black	wt.%	47.86	18.43	9.33	15.84	—	8.54	—	—	—	—	—	—	—
	at.%	72.41	1.62	6.03	17.41	—	1.94	—	—	—	—	—	—	—
9# iron red	wt.%	—	—	12.74	33.19	12.74	—	—	21.83	0.99	9.71	4.37	—	—
	at.%	—	—	11.75	53.75	11.11	—	—	10.13	1.05	9.32	2.89	—	—

Note: wt.% indicates the percentage of weight, at.% indicates the atomic content of hundreds, "—" indicates that this element is not detected in the sample.

3　结　论

采用扫描电镜和激光显微共聚焦拉曼光谱对西安东郊唐墓出土的彩绘陶俑上脱落或起翘的彩绘颜料进行鉴定，证实了朱砂、赤铁矿、孔雀石等颜料的存在，这与相关唐代颜料研究结果相一致。西安东郊唐墓出土彩绘陶俑的颜料的分析结果，为其制作工艺方面的研究提供了科学依据，同时也为文物工作者开展针对性的保护工作提供了参考，具有重要的文物保护意义。

致谢：陕西历史博物馆白璐、侯鲜婷对样品分析检测提供了帮助，在此表示感谢！

参考文献：

[1] 卡尔·马克思, 弗里德里希·恩格斯. 马克思恩格斯全集[M]. 北京: 人民出版社, 1974.

[2] 杨娟. 扫描电镜在文物霉变病害分析中的应用[J]. 电子显微学报, 2020, 39(1): 65–70.
YANG J. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2020, 39(1): 65–70.

[3] 杨娟, 韦荃. 扫描电镜在拓片文物分析中的应用[J]. 电子显微学报, 2018, 37(4): 362–365.
YANG J, WEI Q. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2018, 37(4): 362–365.

[4] 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. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(7): 2026–2031.

[5] 刘照军, 韩运侠, 杨蕊, 等. 明代古墓葬壁画颜料的显微拉曼光谱分析[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 309–312.
LIU Z J, HAN Y X, YANG R, et al. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 309–312.

[6] ZI J, BÜSCHER H, FALTER C, et al. Raman shifts in Si nanocrystals [J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(2): 200–202.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[7] 左健, 许存义. 古壁画陶彩颜料的拉曼光谱分析[J]. 光散射学报, 1999, 11(3): 215–219.
ZUO J, XU C Y. Chinese Journal of Light Scattering, 1999, 11(3): 215–219.

[8] 杨玉璋, 张居中, 左健, 等. “钟离君柏”墓出土彩绘陶器颜料的光谱分析[J]. 光谱与光谱分析, 2010, 30(4): 1130–1133.
YANG Y Z, ZHANG J Z, ZUO J, et al. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(4): 1130–1133.

[9] 左健, 赵西晨, 吴若, 等. 汉阳陵陶俑彩绘颜料的拉曼光谱分析[J]. 光散射学报, 2002, 14(3): 162–165.
ZUO J, ZHAO X C, WU R, et al. Chinese Journal of Light Scattering, 2002, 14(3): 162–165.

[10] 杨景龙. 唐张臣和墓彩绘陶质文物的拉曼光谱和 X 衍射分析[J]. 文博, 2009(6): 407–411.
YANG J L. Relics and Museolgy, 2009(6): 407–411.

[11] 严静, 赵西晨, 梁嘉放, 等. 永泰公主墓出土彩绘陶器颜料的无损及微损调查与研究[J]. 文博, 2016(1): 93–100.
YAN J, ZHAO X C, LIAN J F, et al. Relics and Museolgy, 2016(1): 93–100.

[12] 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.

[13] 杨真真, 夏寅, 王丽琴, 等. 青海民和县出土马家窑文化彩陶的科学分析研究[J]. 文物保护与考古科学, 2021, 33(3): 81–91.
YANG Z Z, XIA Y, WANG L Q, et al. Sciences of Conservation and Archaeology, 2021, 33(3): 81–91.

[14] 李最雄. 敦煌莫高窟唐代绘画颜料分析研究[J]. 敦煌研究, 2002(4): 11–18.
LI Z X. Dunhuang Research, 2002(4): 11–18.

[15] 姜凯云, 孙延忠, 张志霞. 重庆钓鱼城遗址悬空卧佛彩绘颜料初步分析[J]. 文物保护与考古科学, 2020, 32(1): 98–105.
JIANG K Y, SUN Y Z, ZHANG Z X. Sciences of Conservation and Archaeology, 2020, 32(1): 98–105.

[16] 赵静, 王丽琴, 周文晖. 唐墓彩绘文物的保护研究[J]. 文物保护与考古科学, 2008, 20(2): 38–45.
ZHAO J, WANG L Q, ZHOU W H. Sciences of Conservation and Archaeology, 2008, 20(2): 38–45.

[17] 于锦绣, 杨淑荣. 中国各民族原始宗教资料集成·考古卷[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 1996.

[18] 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.

[19] 周国信. 中国西北地区古代壁画彩塑中的含铅白色颜料[J]. 文物保护与考古科学. 2012, 24(1): 95–103.
ZHOU G X. Sciences of Conservation and Archaeology, 2012, 24(1): 95–103.

[20] 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, 10(59): 2247–2266.

[21] 张群喜, 夏寅. 唐韦贵妃墓壁画备马图颜料分析研究[J]. 人类文化遗产保护, 2014(1): 18–23.
ZHANG Q X, XIA Y. Human Cultural Heritage Preservation, 2014(1): 18–23.

[22] 袁晓红, 张治国, 史家珍, 等. 洛阳唐代壁画墓出土彩绘陶俑的分析研究与保护修复[J]. 中国国家博物馆馆刊, 2013(10): 143–153.
YUAN X H, ZHANG Z G, SHI J Z, et al. Journal of National Museum of China, 2013(10): 143–153.

(编辑 王三海)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net