

龙门石窟奉先寺普贤菩萨琉璃眼珠的调查研究

朱佩 刘轶

龙门石窟研究院, 河南 洛阳 471023

Abstract: In 2022, during the Fengxian Temple protection project at the Longmen Grottoes, a significant discovery was made during disease investigation. It was found, for the first time, that the Pratyekabuddha on the right side of the Rushena Buddha had a glazed eye, with residual traces of painted pigment on the statue's surface. Non-destructive testing using portable equipment confirmed that the glazed eyeballs contained a high lead content, indicating the presence of typical artificial glaze. The head of the statue was adorned with painted pigment, including lead white and iron red. This newfound revelation not only represents an important outcome of the overall disease investigation at Fengxian Temple but also provides valuable data to support future archaeological and cultural heritage preservation efforts at the Longmen Grottoes. Moreover, it holds significant value in analyzing and exploring the stone carving techniques employed during the Tang Dynasty.

Keywords: Fengxian Temple, Glazed eye, Painted pigment, None-destructive analysis

摘要: 在2022年龙门石窟奉先寺保护工程中, 经过病害调查, 首次发现卢舍那大佛右胁侍普贤菩萨有琉璃眼珠, 造像表面还有彩绘颜料残留。经过便携式设备的无损检测证实该琉璃眼珠含铅量较高, 为典型的人造琉璃。其头部的彩绘颜料为铅白、铁红等。本次新发现不仅是整个奉先寺病害调查的重要成果, 更为龙门石窟以后的考古和文物保护工作提供了有效的数据支撑, 对分析探索唐代石质文物雕刻工艺具有重要价值。

关键词: 奉先寺; 琉璃眼珠; 彩绘颜料; 无损检测

龙门石窟位于河南省洛阳市南5千米处的伊水两岸, 依龙门山而雕刻, 始凿于北魏孝文帝迁都洛阳之际。现存2345窟龕, 10万余尊造像, 2800余品碑刻题记, 为研究中国古代政治、经济、宗教、美术、书法、雕刻、地理以及中外文化交流等提供了重要资料。其中最为宏伟壮观的造像龕当属奉先寺大卢舍那造像龕, 它开凿于唐代, 规模宏大, 气势庄严, 拥有精湛的雕刻艺术, 折射出盛唐时期强大的经济国力, 代表了唐

代文化艺术的高峰。卢舍那雕像倚山端坐, 通高17.14米, 头高4米, 耳长1.9米, 为龙门石窟最大的造像。其左右两边二弟子分别为阿难和迦叶, 再两侧分别为普贤和文殊菩萨, 天王力士等造像。(图一) 本次新发现的琉璃眼珠位于阿难右侧的普贤菩萨眼睛。普贤菩萨头戴花蔓宝冠, 面相丰满圆润, 颈系珠宝项链, 身挂华绳璎珞, 赤足立于束腰八角莲花座上。雕刻精细华丽, 双目俯视, 神情端庄矜持, 显示出菩萨雍容华贵的



图一 奉先寺大卢舍那像龕



图二 普贤菩萨

气质^[1]。(图二)

2021年12月,龙门石窟奉先寺渗漏水治理和危岩体加固保护工程启动,龙门石窟研究院在奉先寺的各壁面均搭建了高达窟顶的脚手架,借用此次机会,研究人员针对奉先寺的造像窟龕进行近距离病害调查,调查过程中发现普贤菩萨的眼珠为琉璃构成,利用粘接材料将弧形琉璃眼珠镶嵌于眼睛内。对此,研究人员使用便携式X射线荧光光谱仪、便携式拉曼光谱仪等仪器对琉璃眼珠和表面彩绘颜料等情况进行检测。普贤菩萨琉璃眼珠在龙门石窟首次发现,以往的龙门石窟史书文献中也无记载。

二 调查结果

经过病害调查和测量,普贤菩萨通高12.81米,肩宽2.26米。头高1.96米,发冠高0.8米,鼻高0.18米,鼻长0.63米。右眼上眼睑长0.56米,下眼睑长0.51米,上眼睑深0.28米;眼球宽0.12米,高0.07米。左眼上眼睑长0.58米,眼球宽0.12米,高0.07米;眼球右侧残,残存部分宽0.07米,厚0.58米。



图三 普贤菩萨右眼与左眼现状



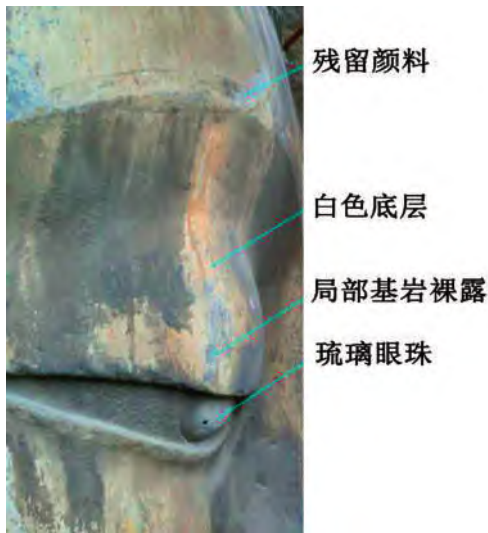
图四 普贤菩萨左眼与卢舍那大佛左眼

普贤菩萨头部保存较为完整,人为修补痕迹较少,风化、裂隙等病害也较少,在右侧发髻有一条卸荷裂隙长1.71米,左侧发髻沿右眼下方至右耳有一条层面裂隙长1.24米,从鼻子垂直向下至下巴有一条卸荷裂隙长0.64米。头部右侧靠近崖壁位置有明显可见的水痕。此外,普贤头部表面有大面积白色的地丈层,其质地均匀、结构致密、表面光滑,上方有颜料残留,如黑色的眉毛、红色头冠残留等。

普贤菩萨右眼眼珠完整,镶嵌于眼内,从清理出来的表面可以看出,眼珠为明显的暗绿色琉璃质状态,且质地均匀,熠熠生辉。左眼仅余外侧一半,眼珠形状呈弧形,厚度均匀,从侧面观察,眼珠呈中空结构,表面上有一定风化物覆盖。(图三,图四)

普贤菩萨右眼眼珠完整,镶嵌于眼内,从清理出来的表面可以看出,眼珠为明显的暗绿色琉璃质状态,且质地均匀,熠熠生辉。左眼仅余外侧一半,眼珠形状呈弧形,厚度均匀,从侧面观察,眼珠呈中空结构,表面上有一定风化物覆盖。(图三,图四)

奉先寺普贤菩萨眼睛的构造,底层为造像灰岩,沿虹膜外侧开凿楔口,内小外扩,呈喇叭



图五 普贤菩萨头部表面遗存及测试点

叭状，用于承接瞳孔。瞳孔为碗形，边缘加工成与楔口相同的坡度，契合度较好。两眼略微不对称，右眼狭长，大眼角（靠近鼻梁位置）角度很小，约为30°，而左眼大眼角角度较大，约为45°。右眼眼珠形状规则，对称，而左眼眼珠大眼角一侧的眼珠略为梯形。初步分析，此乃工匠有意为之，这是因为，普贤菩萨胁侍卢舍那大佛，身形略微向左转动，不对称的眼珠，是考虑到透视效果，反应出古人巧夺天工的雕塑水平。

卢舍那大佛双眼内无眼珠，但是通过观察其开凿方式，可见与普贤菩萨相似的喇叭状楔口，推断卢舍那大佛在造像时具有与普贤菩萨相似的眼睛结构，后期可能缺失。

为更好地研究普贤菩萨头部彩绘颜料和眼珠材质情况，研究人员采用便携式X射线荧光

光谱仪（XRF）、便携式激光拉曼分析仪及超声波对造像表面残留颜料和两个眼珠进行无损检测。

三 无损检测

1. 检测仪器

本次检测方法主要为现场便携式仪器无损检测。采用

便携式X射线荧光光谱仪（X-ray Fluorescence Spectrometer）、便携式激光拉曼分析仪（laser Raman spectrometer）、超声波无损检测仪（Ultrasonic testing instrumentation）等设备对文物表面进行无损检测。

便携式X射线荧光光谱仪简称XRF，采用高性能微型X射线管，采用银靶，激发源50KV/200uA（最大值），一般用于检测Mg~U元素，可用于土壤、矿石模式、地质元素分析。

利用便携式激光拉曼分析仪可以对颜料、矿石、玉器、玻璃等材质文物进行定性分析，由拉曼光谱分析结果能够获得文物的分子信息，对科学认识文物的材料组成有显著作用^[2]。

超声波无损检测仪具有无损分析和高分辨率的特征，利用超声波在岩体介质中的传播，可以判断岩体内部的风化状况、裂隙分布及缺陷几何

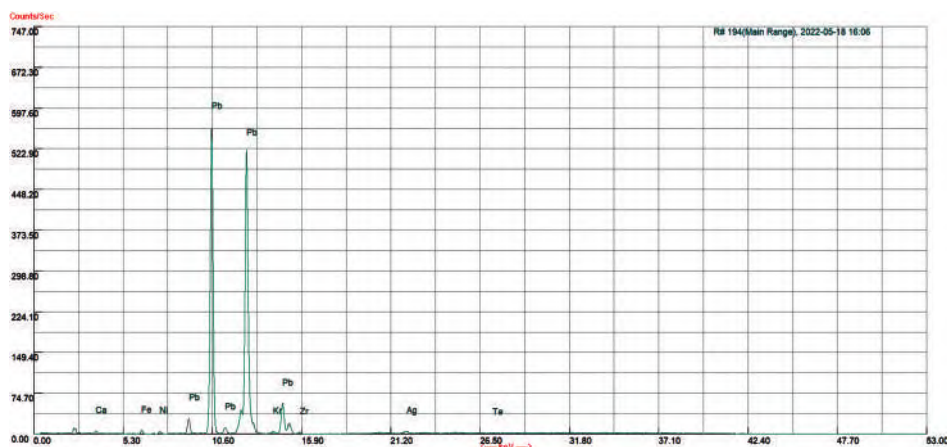
表1 测试点位置及测试内容表

序号	位置	测试项目	描述
1	右眼上方	XRF、超声波	造像保存完整，为保存比较好的灰白色底层。
2	右眼上凸出部	XRF、超声波	岩石完整，表面灰白色，光滑，无明显风化现象。
3	右眼外上	XRF、超声波	造像本体保存良好，在灰白色覆盖层表面有灰褐色覆盖。
4	鼻子凸出部	XRF	鼻子保存良好，表面有灰白色的覆盖层，结构完整。
5	发饰表面凸出部	XRF	造像本体保存良好。表面残留铁红色颜料层。
6	发饰表面凸出部	XRF	造像本体保存良好。表面残留铁红色颜料层。
7	右眼眉毛	XRF	造像本体保存良好，眉毛清晰可辨，表面有轻微灰白色污染物覆盖。
8	右眼眼珠	XRF、超声波、拉曼	暗绿色玻璃质琉璃，表面被污染物覆盖，中间裸露。结构完整，保存良好。
9	左侧眼珠	XRF、超声波、拉曼	眼珠琉璃分为左右两半，右侧靠鼻梁一半脱落遗失。琉璃结构清晰可辨，但表面为污染物覆盖。

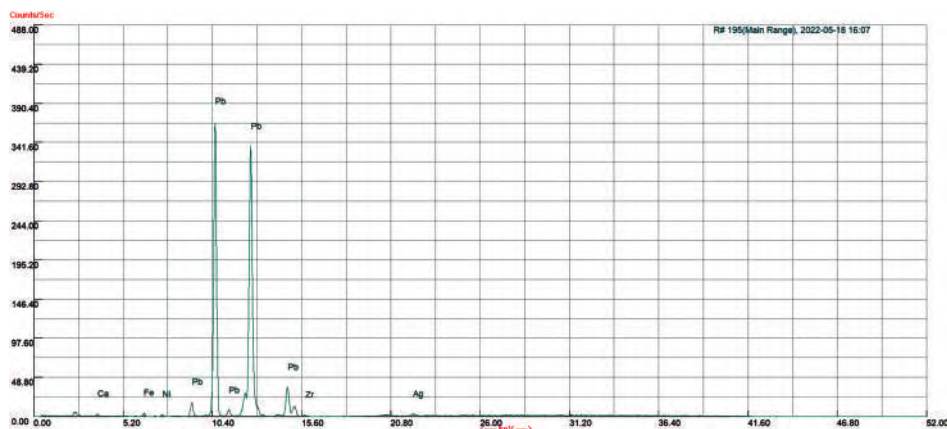
形态等结构特征，被广泛应用于石质文物的无损检测中^[3]。

2. 检测对象

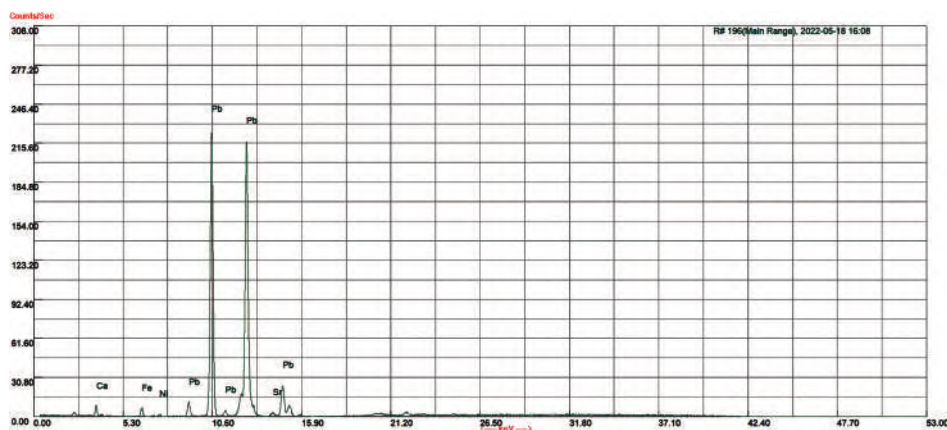
本次检测主要针对卢舍那大佛右胁侍普贤菩萨头部开展。主要对造像表面的残留颜料、涂层、琉璃眼珠等开展检测（表1），测试点位见图五。



图六 测试1点号XRF数据图



图七 测试2点号XRF数据图



图八 测试点3号XRF数据图

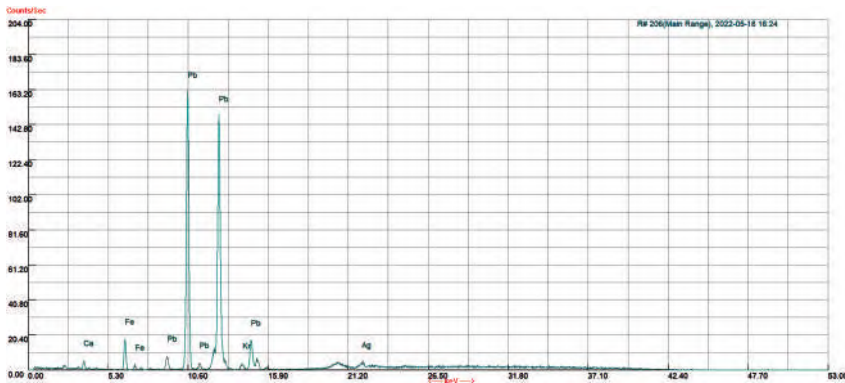
四 检测结果与分析

1. 本体岩石表层及颜料检测分析及结论

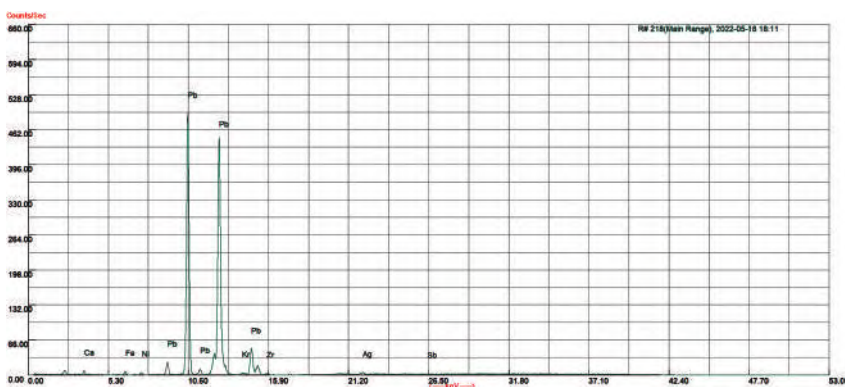
普贤菩萨头部表面的一层白色物质，因其质地致密、表面光滑，使其具有良好的抗风化能力，除局部（眼珠上方突起部位）存在脱落外，大部保存完好。（表2）

1号测试点为相对完整的白色底层，超声波检测波形完整，无明显的结构破损。根据表1的便携式XRF测试结果表明，主要的元素为Pb（铅），质量百分比为16.722%，其次为Ca（钙），含量为2.915%，其余元素含量均不高。（图六）2号测试点位于1号正下方，保存条件基本类似。从XRF测试结果看，测试谱图和分析结果基本一致，特别是Pb、Ca的含量基本一致。（图七）从测试结果可知，1号点和2号点样品成分一致，为人为调配均匀后铺设而成。同时，值得注意的是1号和2号检测点位均检测出As（砷），且含量均超过了1%。

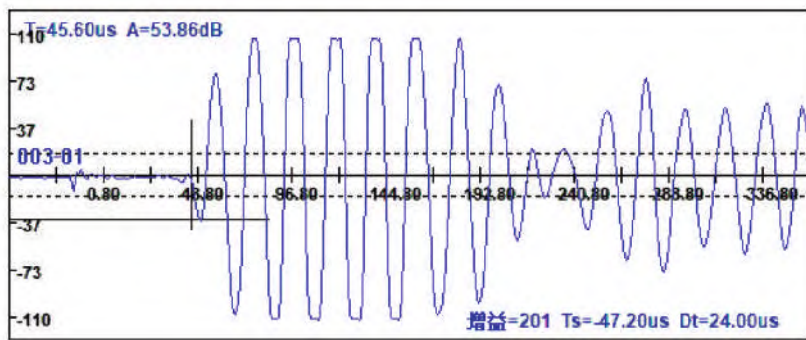
3号测点和4号测点位置比较特殊。3号样表面覆盖了一层灰褐色的覆盖物，XRF



图九 测试点4号XRF数据图



图一〇 测试点7号XRF数据图



图一一 琉璃眼珠超声波测试结果

测试结果表明，Pb的含量约为1、2号样50%，Ca的含量大幅度提高，Fe含量略微增加。结合现场调查，初步分析，这种灰褐色的覆盖物，可能为底层上粘结材料风化和短期水害共同作用形成。（图八）4号点位置相对更为凸出，Pb的含量进一步降低，Ca的含量增加，K含量增加也很明显，原子序数低于Mg的成分达到85%。（图九）总的规律是活动性强成分随风化营力作用增强而增加。

7号点位的XRF测试结果表明，测试曲线与1、2、3号样基本类似，主要元素为Pb、Ca，含

量分别为14.749%、7.394%，而可能显黑色的Fe、Mn元素与1、2、3号样相对比，也无明显的差距。（图一〇）5号点靠近短期的水害冲刷区，而6号点几无水害，颜料保存更好。这两点相对于脸部测试点，最大的特点就是Pb的含量很低，分别为0.903%、0.322%，而Fe、Mn等元素增加，其中Fe分别为1.812%和8.906%，含量与是否受水害作用有关，渗水区明显降低。保存良好的6号点应反映了早期的物质组成。

从上述XRF结果可以看出，造像表面大量发现Pb（铅元素），并残留有As（砷）、Cu（铜）、Sb（锑）等元素，这些元素应与矿物颜料有关。如含As的雄黄、雌黄（化学式分别为 As_2S_3 、 As_2S_2 ）、含Cu的孔雀石、蓝铜矿〔化学式分别为 $2CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$ 、 $CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$ 〕、含Pb的铅白和铅丹〔前者白色，化学式 $2PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$ ，后者红色，化学式为 Pb_3O_4 〕^[4]。上述

彩绘颜料除了铅白以外，由于长时间暴露于自然环境下，会出现氧化、碳酸化等现象，从而使颜料失去本身原有的颜色，且出现风化脱落，仅部分残留于造像表面。

在现场调查过程中，除了底部大量分布的白色涂层外，在普贤菩萨造像表面发现了多处颜料，可以明显观察到的颜色是眉毛处的黑色颜料和头冠处的红色颜料。通过XRF结果可知（6号测点），发冠处残留的红色颜料主要为铁红（ Fe_2O_3 ），铁红在自然环境下，稳定性好。另外眉毛处黑色颜料，初步分析以C质（黑烟子）为

主。后期有风化污染物轻微遮盖, 稍微显灰白色。

普贤菩萨脸部普遍存在一层白色涂层, 其结构致密, 均匀分布, 表面光滑, 直接位于基岩表面, 从测试结果可以看出, 主要成分为Pb, 其矿物为铅白。铅白即碱式碳酸铅, 古代称为胡粉、铅粉和水粉等, 在明朝的《天工开物》《本草纲目》有确切记载, 是古代绘画和化妆品的重要颜料^[5]。并且常使用铅白颜料作为打底层, 使后续彩绘颜料更容易上色且颜色均匀明艳, 白色打底之后再涂刷其他颜色或者进行贴金, 也为后期抵御自然风化发挥了一定作用^[6]。在自然环境中, 铅白可与环境中的CO₂发生反应, 以及脱水反应, 生成PbCO₃, 相对于熟石灰, 铅白碳化导致孔隙增加率更小。PbCO₃相对于CaCO₃, 抗水溶解能力更好。因此, 铅白的存在, 可能在一定程度上保护灰岩本体。

2. 普贤菩萨眼珠检测与分析

从超声波结果可以看出, 琉璃波形完整, 保存良好, 证实普贤菩萨眼珠为典型琉璃眼珠。(图一一)

针对普贤菩萨的眼珠, 选取多个采样点进行XRF测试。8号点位为右眼, 该眼珠中间覆盖物被清理掉, 露出琉璃的新鲜面, 结构致密, 经测试, 摩氏硬度约为7。右眼覆盖物测试点位为8-1, 清理出的琉璃部位测试点位为8-2和8-3。左眼测试点位为9号, 9-1和9-2点位为眼珠正面, 表面有黄褐色覆盖物, 下面为厚片状琉璃, 厚度约0.9cm。9-3点位为左眼琉璃垂直于面部的断面, 表面也有少量的褐黄色覆盖物。总体来说, 8-2和8-3测试数据直接反映琉璃的成分, 8-1基本为后期覆盖物的数据。9号点位因覆盖物相对薄弱, 能部分

表2 测点1#至7#XRF结果表 (%)

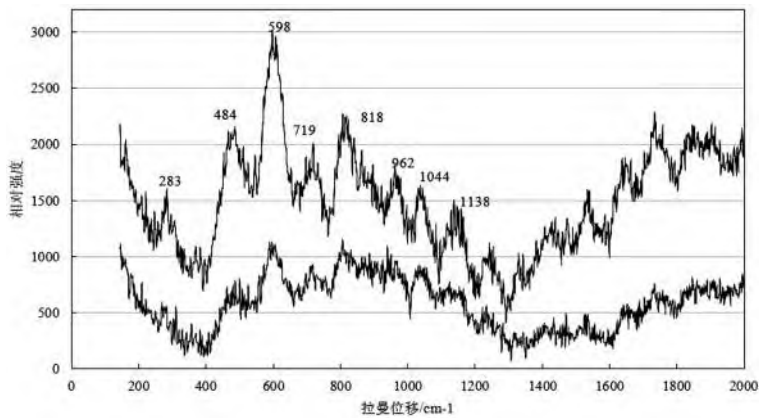
成分/ %	样品编号						
	1	2	3	4	5	6	7
Pb	16.722	16.813	8.883	4.379	0.903	0.322	14.749
Ca	2.915	2.689	8.509	5.824	0.823	21.088	7.394
Fe	0.572	0.595	0.832	1.808	1.812	8.906	0.69
K	0.723	0.584	0.708	1.698	0.032	0.846	0.674
As	1.003	1.06	0.475	0.338	0.114	0.087	1.013
Mn	0.127	0.132	0.066	0.041	0.175	1.627	0.151
Ti	0.075	0.041	0.077	0.248	0.012	0.237	0.091
Co						0.75	
Sb		0.193	0.072				0.157
Sn		0.135	0.054				0.119
Zn	0.034	0.029	0.024	0.013	0.032	0.056	0.05
Sr	0.012	0.011	0.021	0.019	0.039	0.056	0.019
Ag					0.121		
Ni	0.027						0.051
Mo	0.017	0.017	0.006			0.016	0.014
Cu	0.014			0.027			0.021
Zr						0.021	
Cr				0.014			
Bal	77.758	77.584	80.227	85.587	95.541	65.828	74.703

表3 测点8#至9#XRF结果表 (%)

成分/ %	8号点(右眼)			9号点(左眼)		
	8-1覆盖物	8-2、8-3裸露琉璃		9-1、9-2眼珠正面	9-3琉璃断面	
Pb	12.822	51.979	54.359	30.855	27.174	28.609
Ca	17.645	0.405	0.314	8.509	11.694	8.973
Cu	0.223	2.534	2.53	1.237	1.325	1.267
K	0.853			2.181	1.279	1.829
Fe	1.648	0.445	0.435	0.746	0.708	0.745
As		1.192	1.224			
Sb	0.062	0.634		0.298	0.239	0.27
Sn	0.048	0.476		0.234	0.201	0.194
Mn	0.034	0.104	0.134	0.046	0.066	0.082
Ti	0.216	0.028		0.064	0.076	0.067
Zn	0.029	0.119	0.12	0.043	0.037	0.049
Mo	0.009	0.072	0.079	0.036	0.029	0.033
Sr	0.015					
Bal	66.346	41.568	40.763	55.577	57.033	57.744

反映琉璃成分。

从表3中可以看出, 8-2与8-3的数据基本一致, 琉璃中Pb的含量很高, 质量百分比超过50%, 平均为53%, 说明其为典型的人造含铅琉璃。Ca的含量很低, 另外有少量的Cu(铜)、Mo(钼)、As(砷)、Zn(锌)等金属元素, 应为原料中带来或人为添加, 用于控制琉璃色泽



图一二 普贤菩萨眼珠琉璃拉曼谱图

等。仪器测试范围以外的成分含量 40.763%~41.568%，应为 Si（硅）、O（氧）等成分，即石英质材料，这一部分通过拉曼光谱数据来进行验证。

图一二为经过处理的琉璃 Raman 谱图（8-2 号点位），从结果来看，该琉璃有比较明显的峰为 283cm^{-1} 、 484cm^{-1} 、 598cm^{-1} 、 818cm^{-1} 、 962cm^{-1} 和 1044cm^{-1} 等。虽然，便携式 Raman 未能采集到 $140\sim 3200\text{cm}^{-1}$ 范围内的 Pb-O 结构单元 $[\text{PbO}_4]$ 振动峰^[7]，但 818cm^{-1} 峰是铅玻璃的特征峰^[8-9]。 484cm^{-1} 、 598cm^{-1} 、 1044cm^{-1} 等是 Si-O-Si 化学键振动^[8, 10]，而玻璃中的主要成分则是 SiO_2 。

8-1 为右眼表面覆盖物测试结果。测试结果表明 Pb、Ca 量基本相等，Fe 含量较高，可能与局部受渗水影响有关。9 号点位的 3 个测试数据结果基本相同，其各组分含量介于 8-1 与 8-2、8-3 之间，是因为左眼表面有覆盖层，覆盖层比较薄，风化作用弱，测试数据应是表层覆盖物和下部琉璃的综合数据。

测试结果表明，普贤菩萨右眼琉璃眼珠是一块完整的人造琉璃，并采用石灰类物质与岩石粘结，结合致密。琉璃被誉为中国五大名器之首、佛家七宝之一。而奉先寺普贤菩萨保存的完整唐代琉璃实物是首次发现，历经千年保存至今，弥足珍贵，充分反应了古代工匠们精湛的雕刻水平，以及当时唐代经济的高度发展和唐代文化的高度繁荣。

五 结论

在奉先寺保护工程开展过程中，首次发现卢舍那大佛右肋侍普贤菩萨表面有彩绘颜料和琉璃眼珠。通过便携式仪器对琉璃眼珠和残留的颜料进行无损检测，最终确认普贤菩萨的眼珠确为人工造琉璃制品。本文的研究是石灰岩石质文物无损检测分析的典型案例，为日后文物表面无损检测提供了良好的范例。为

后续奉先寺造像雕刻工艺分析、龙门石窟彩绘颜料调查、石窟文化艺术考古等工作提供了基础资料，同时也对龙门石窟的文物保护工作具有重要的参考价值。

- [1] 苏健. 龙门石窟历史与美学论集 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2021.
- [2] 于宗仁. 文物保护移动实验室功能构建及其综合分析方法应用 [D]. 兰州大学博士学位论文, 2017.
- [3] 任建光, 王书, 孟田华等. 超声波无损检测技术在世界文化遗产地云冈石窟保护中的应用 [J]. 工程勘察, 2021 (6).
- [4] 马彦妮. 大足石刻卧佛彩绘颜料分析及表面微生物研究 [D]. 西北大学硕士学位论文, 2021.
- [5] 李海磊. 4-6 世纪中国北方地区壁画色彩技术及应用研究 [D]. 上海大学博士学位论文, 2019.
- [6] 张紫月. 重庆大足石刻宝顶山圆觉洞及北山孔雀明王窟彩绘工艺研究 [D]. 中央民族大学硕士学位论文, 2020.
- [7] 赵志强. 新疆巴里坤石人子沟遗址群出土玻璃珠的成分体系与制作工艺研究 [D]. 西北大学硕士学位论文, 2016.
- [8] Sampaio D.V., Picinin A., Moulton Benjamin- J.A.. Raman scattering and molecular dynamics investigation of lead metasilicate glass and supercooled liquid structures [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 499: 300-308.
- [9] B.n. meera A.K.-Sood-N, Chandrabhas-and-J, Ramakrishna. Raman study of lead borate glasses [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 126.
- [10] 千福熹, 赵虹霞, 李青会等. 湖北省出土战国玻璃制品的科技分析与研究 [J]. 江汉考古, 2010 (2).

(责任编辑: 黄林纳)