

文章编号: 1005-1538(2021)06-0047-05  
DOI: 10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.20200601791

# 云冈石窟盐类析出物与石雕表面风化破坏形式的关系研究

任建光<sup>1,3</sup>, 黄继忠<sup>2,3</sup>, 任志伟<sup>1</sup>, 胡翠凤<sup>3</sup>

(1. 云冈研究院, 山西大同 037007; 2. 上海大学, 上海 200444; 3. 山西大同大学, 山西大同 037000)

**摘要:** 云冈石窟盐害机理研究对于治理策略选择具有重要意义, 为探析云冈石窟风化砂岩破坏形式与岩面伴生盐类析出物的关系, 本工作采用 XRD 法进行了矿物组成的半定量测试, 采用酸碱中和法进行了 CO<sub>2</sub> 含量测定, 另外采用 XRD 进行了盐类矿物和硅酸盐矿物定性鉴定, 试图探析云冈石窟风化砂岩破坏形式与岩面伴生盐类析出物的关系。结果显示: 云冈石窟岩面片状风化与砂岩碳酸盐含量高有关, 而粉状风化与岩石中石膏含量高有关, 不同盐类结晶析出与洞窟环境有关, 这些研究结果对云冈石窟风化病害治理有借鉴意义。

**关键词:** 云冈石窟; 盐类析出物; 风化病害; XRD

**中图分类号:** K879.22 **文献标识码:** A

## 0 引言

云冈石窟位于山西省大同市西郊武周山南麓, 依山开凿, 东西绵延 1 km, 为我国规模最大的古代石窟群之一, 距今已有 1 600 年的历史。现存大小窟龕 252 个, 雕像 51 000 余尊, 雕刻面积达 18 000 m<sup>2</sup>, 雕刻内容丰富。云冈石窟是皇家授意兴建的第一座佛教石窟群, 为中国佛教石窟艺术高峰期的经典杰作, 在承袭来自南亚和中亚地区佛教石窟艺术影响的同时, 赋予佛教石窟艺术以明确的中国特征和地方精神, 对其后的中国乃至东亚地区的佛教石窟艺术有着深远的影响, 具有极高的文物价值。云冈石窟 1961 年被公布为全国重点文物保护单位, 2001 年被列入《世界遗产名录》, 2007 年被评为国家 5A 级旅游景区。

云冈石窟处于温带大陆性半干旱气候区域, 年平均气温 7~10℃, 1 月最冷, 7 月最热; 年平均降水量 432.8 mm, 雨季集中在 7~9 月, 月最高降水量达到 100 mm 以上; 年平均蒸发量 1 748 mm, 其中 6 月最大蒸发量为 801.8 mm, 12 月蒸发量为 74.9 mm; 年积雪在 20 mm 左右, 冻结期为 10 月下旬至次年 4

月, 平均冻结深度 1.5 m, 全年无霜期 120 d。云冈石窟顶部北属高台地构造剥蚀低山丘陵区, 南临十里河, 窟区被南北向自然大冲沟(东谷、西谷)分割为东、中、西三部分, 出露中侏罗统上部和第四系地层, 云冈佛像开凿于中侏罗统上部云冈组(J<sub>2</sub>y)砂岩透镜体上<sup>[1]</sup>。十里河为区域内唯一较大季节性河流, 地下水主要有风化壳网状裂隙潜水、第四纪冲洪积层孔隙潜水以及上层滞水等类型<sup>[1]</sup>, 云冈石窟四周被煤矿包围, 环境条件较差。

千百年来, 由于自然和人为因素的摧残破坏, 云冈石窟风化病害十分严重, 主要破坏形式有以下几种: 1) 粉状风化。在许多石雕表面产生一层白色粉末状或絮状风化产物, 手触即落。2) 片状风化。在石雕表面呈薄片状剥落, 薄片厚度随岩石中矿物颗粒的粗细而不同, 粗砂岩形成的薄片厚度为 3~4 mm, 细砂岩形成的薄片厚度为 0.5~1 mm; 薄片常翘起卷曲, 往往有多层重叠, 在片与片或片与岩体间常有白色粉末状或雪花糊状物。3) 带状、洞穴状风化。这是指与岩体层理大致平行, 凹凸相间呈带状或洞穴状的风化形态, 大小不一, 深度 10~30 cm, 它是与岩性有关的差异性风化。4) 板状风

收稿日期: 2020-06-17; 修回日期: 2020-10-13

基金项目: 国家文物局文化遗产保护领域科学和技术研究课题资助(2013-YB-HT-012), 山西省科技攻关项目资助(20130313035-2), 山西省重点研发计划项目资助(201803D31014)

作者简介: 任建光(1971—), 男, 副研究馆员, 2006 年硕士毕业于中国地质大学(北京)固体地球物理学专业, 研究方向为文物保护, 遗产监测, E-mail: 274174236@qq.com

化,是指开挖洞窟造像后,在窟内拐角及高大佛像突出的部位,形成大致平行壁面的卸荷裂隙,逐渐呈板状剥落,板厚在 2~4 cm。上述的粉状与片状风化破坏形式普遍存在于石雕上。

另外,在云冈石窟洞窟内各壁分布着各种形态的盐类析出物。较为普遍的是棉絮状,质白而疏松,少数浅黄色,干涸后呈黄褐色,有的富集成团,也有连成片状;其次为钟乳状,灰白色,较坚硬,突出于壁面的颗粒直径约 1~2 mm,若连在一起便呈泉华状;还有少数呈皮壳状的薄膜覆盖于岩石的表面,干涸后发生龟裂、翘起。盐类形成的自然因素主要是水对砂岩的溶滤作用,使岩层中含有钙、镁碳酸盐的胶结物及黄铁矿结核被水氧化、水解<sup>[2]</sup>;另外,云冈石窟石雕上的盐类析出也有人类活动引起的因素,如人类圈养牲畜是洞窟内下部盐类的来源之一,也曾在维修中不恰当使用普通水泥造成了盐类聚集,还有环境污染造成的盐类的增加等<sup>[3]</sup>。盐类的运移和堆积与水的运移条件有很大的关系<sup>[2]</sup>,云冈石窟石雕表面的主要盐类矿物有:水碳镁石(三水菱镁矿)、六水泻盐、多水菱镁矿、水菱镁矿、石膏、泻利盐、赤铁盐、硅钙石、无水芒硝、天然碱等十多种<sup>[2,4]</sup>。

云冈石窟风化砂岩岩面上盐类分布最广泛、最常见,其以矿物结晶和水合作用对岩面造成了严重的破坏<sup>[5]</sup>。黄克忠<sup>[2,4]</sup>、曲永新<sup>[4]</sup>、黄继忠<sup>[1,3,5]</sup>等就云冈石窟盐类的存在形态、种类、来源及对岩石的破坏原理做了较详细的探索,但已有的研究对盐类析出物与石雕风化破坏形式的关系没有进行深入探讨。本工作将采用 XRD 法矿物组成的半定量测试、

酸碱中和法 CO<sub>2</sub> 含量测定、盐类矿物和硅酸盐矿物的定性鉴定等方法,探析云冈石窟风化砂岩的破坏形式与其岩面所伴生的盐类析出物的关系,研究成果不仅对于世界文化遗产云冈石窟的风化病害及盐害的治理,而且为我国同类型石窟文物保护中认识风化砂岩的破坏形式与盐害关系提供了科学的方法和手段,对于我国石窟文物保护具有重要意义。

## 1 盐类样品采集及制备

选取云冈石窟常见的粉末状和片状风化破坏形式进行研究,作者于冬季 2 月初分别在云冈第 9 窟前室北壁、第 10 窟前室北壁和第 3 窟后室南壁进行了盐分样品采集,共计 5 个样品,及时送至中国科学院地质研究所进行盐分成分测试。

经观察,所采集样品具有两种类型,一类为软质絮状毡状粉状物和伴生的薄岩片,另一类为软质粉状絮状物与风化岩屑。通过筛分处理,先分别将 >0.25 mm 的岩屑、岩片和中粗砂粒及 <0.25 mm 粉状物相分离,并分别碾细至 <0.074 mm(过 200 目筛),对前者进行全岩 XRD 法矿物组成的半定量测试和酸碱中和法 CO<sub>2</sub> 含量测定,对后者则进行盐类矿物和硅酸盐矿物的定性鉴定。

## 2 测试结果及分析

### 2.1 盐类所伴生的岩片、岩屑颗粒的矿物成分测定

风化岩片、岩屑 XRD 法矿物半定量测试结果表明(表 1),这些样品的主要矿物为石英(44.5%~69.4%)、钾长石(8.6%~22.3%)、高岭石与云母(13.6%~28.5%)。

表 1 风化岩片、岩屑全岩 XRD 法矿物半定量测试及酸碱中和碳酸盐(CO<sub>2</sub>)测定结果

Table 1 Weathered rock fragments and cuttings whole rock XRD method mineral semi-quantitative test and acid-base neutralized carbonate (CO<sub>2</sub>) measurement results (%)

分析号	样品号	取样地点	风化岩面破坏形式	样品特征	XRD 法矿物成分定量测试结果							CO <sub>2</sub>
					石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	菱铁矿	高岭石与云母	
5221-2	YG9-1	9 窟外室北壁西侧	片状风化	浅灰色软质毡状絮状物粉状物与硬质砂岩岩片	56.1	8.6	—	—	7.7	—	27.6	8.81
5222-2	YG9-2	9 窟外室北壁东侧	片状风化	浅灰色厚 0.5~1.5 mm 风化岩片与片后软质粉状析出物	51.5	21.0	—	—	—	3.3	24.5	5.16
5223-2	YG10-1	10 窟外室北壁西侧	片状风化	灰色厚 0.5~2.5 mm 硬质风化岩片与粉状析出物	44.5	22.3	—	—	—	4.7	28.5	6.44
5224-2	YG3-1	3 窟内室南壁东侧	粉状风化	灰色直径 >0.25~3.5 mm 风化岩屑与粉状物共存	67.4	14.8	—	—	—	1.7	16.1	1.42
5225-2	YG3-2	3 窟内室南壁中部	粉状风化	灰色直径 0.25~5.0 mm 风化岩屑与粉状物共存	69.4	16.1	—	—	—	0.9	13.6	1.19

酸碱中和法 CO<sub>2</sub> 含量测定结果显示(表 1) 这些岩石样品中含有少量碳酸盐,如白云石(7.7%)、菱铁矿(0.9%~4.7%) ,但没有检测出斜长石、方解石(含量 <1%) ,表明石雕表面的方解石可能遭到了水的强烈溶解,而斜长石可能在云冈石窟砂岩的成岩过程中普遍遭受酸性地下水蚀变作用,已普遍转化为自生高岭石。另外,不同样品中,风化小岩片、岩屑中虽普遍含有碳酸盐(CO<sub>2</sub>) 矿物,但含量高低明显不同,含量高低与石雕表面岩石破坏形式似乎有关。

### 2.2 对 <0.25 mm 质粉状、絮状细粒物进行 XRD 法矿物组成的半定量测试和硅酸盐矿物的定性鉴定

对 <0.25 mm 软质粉状、絮状细粒物质 XRD 测试结果表明(图 1) ,它们并非全部为盐分矿物,其中仍然含有较多细粒石英、高岭石、伊利石(云母)和长石。第一类盐分矿物即为岩片伴生的析出物。主要盐类为六水泻盐(MgSO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O) ,同时伴生少量石膏(CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) ;而第二类矿物主要盐类为石膏。六水泻盐是不稳定的盐类矿物,在潮湿环境下吸水可转化为泻盐(MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O) ,而泻盐在干燥环境下失水后也可转化为六水泻盐。

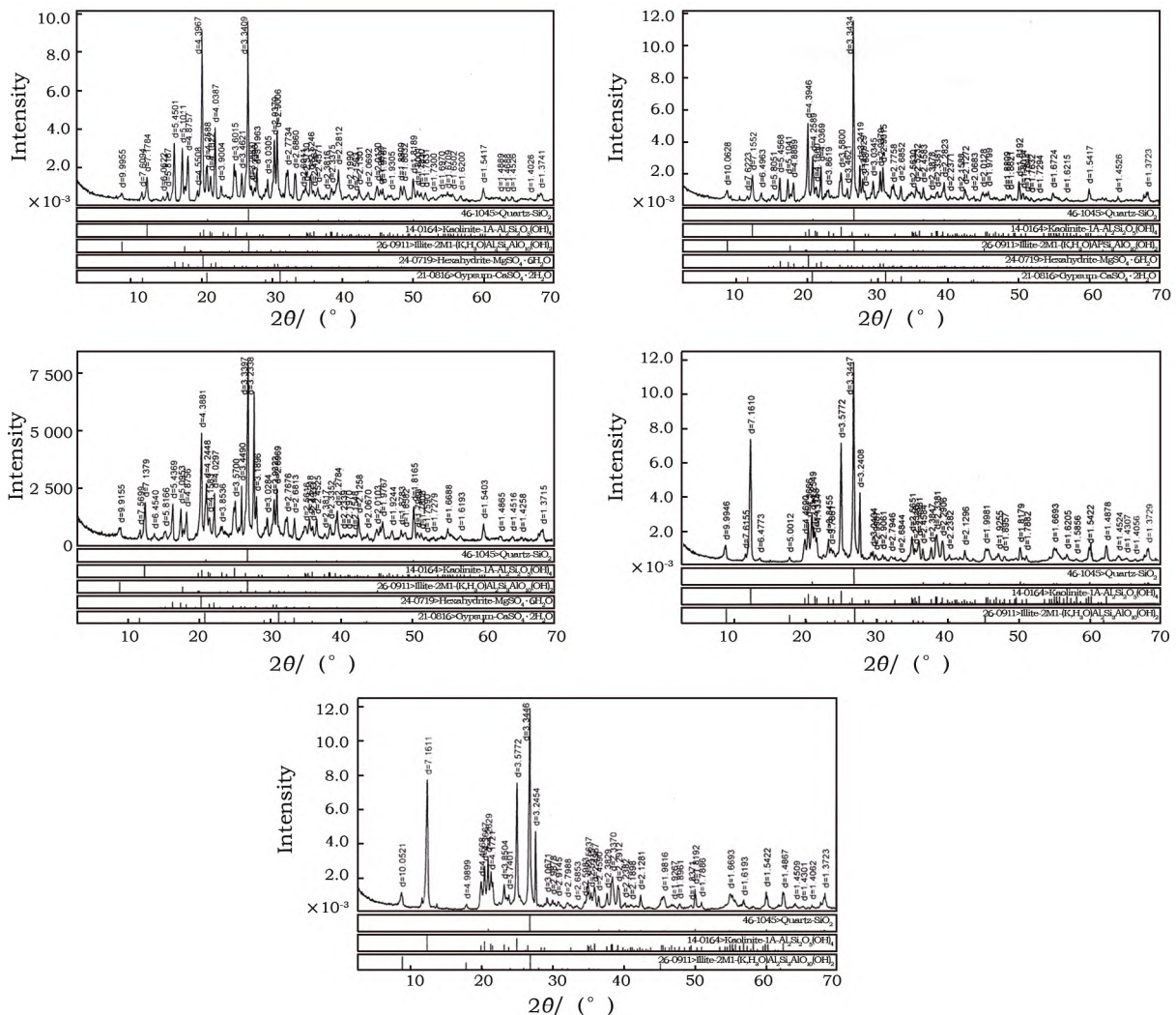


图 1 对 <0.25 mm 软质粉状、絮状细粒物进行 XRD 法矿物组成的定量测试

Fig. 1 Quantitative test of mineral composition by XRD method for soft powdery and flocculent fine particles <0.25 mm

### 3 讨论

根据以上的测试结果,对采集盐分样品与云冈石窟岩面不同风化破坏形式的关系进行探讨。风化

砂岩岩片、岩屑中虽普遍含有碳酸盐(CO<sub>2</sub>) 矿物,但含量高低明显不同,含量高低与石雕表面岩石破坏形式有关,含量高者(YG9-1、YG9-2、YG10-1)对石雕表面起明显的胶结作用,而成岩片状分布,阻

止盐析出表面,因此盐类析出物形成聚集和盐胀作用使之裂开(翘起),形成片状风化破坏形式。而碳酸盐含量低的(YG3-1、YG3-2)胶结作用弱,风化岩屑与盐分混杂共存,以粉状破坏形式存在于石雕岩面上。

另外,按盐类矿物的溶解度大小,它们沉淀次序是方解石( $\text{CaCO}_3$ )、白云石 $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ 、菱铁矿( $\text{FeCO}_3$ )形成在前,石膏居中,泻盐形成在后,即碳酸盐的胶结作用在前,硫酸盐形成在后,并产生盐胀作用,是产生片状破坏的原因之一。盐类矿物成分不同与石雕表面岩石破坏形式特别是碳酸盐胶结作用强弱关系,是此次测试研究的新进展,也是今后深入研究的问题之一。

石雕表面风化破坏形式与其所伴生的盐类矿物是泻盐还是石膏,就云冈砂岩而言,不完全取决于云冈石窟的风化岩片、岩屑和全岩,而是由其洞窟内的微环境起决定作用。片状风化及泻盐和石膏出现频次最大在进深小,受外界影响大,环境变化剧烈的洞窟,而粉状风化和石膏结晶多出现在内部进深大,环境较为潮湿、稳定的洞窟。

在云冈石窟,许多洞窟后壁及所雕琢的石雕表面是粉末状风化破坏形式大量出现的地方,而粉状物是以石膏为主的盐类,其形成和分布都与水的活动密切相关。石窟内的渗水、外部的凝结水和底部的毛细水与空气中的氧气、二氧化碳、二氧化硫等长期对石雕表面长石、胶结物中的钙质、黏土类矿物进行水合作用和溶滤作用,同时水将盐类带到石雕面集聚而成含水盐类矿物,这些盐类与风化产物被淋滤掉落后,石窟表面往往只剩下一些石英颗粒,手触即落。

而石雕表面的片状风化破坏形式多出现在洞窟内前部和洞窟外立壁,其薄片常翘起卷曲,往往有多层重叠,在片与片或片与岩体间常有白色粉末状或雪花糊状物,多为碳酸盐和以六水泻盐为主,伴生少量石膏的硫酸盐水化物,此类风化在日照、通风较好的地点更为明显。

#### 4 结 论

1) 云冈石窟砂岩风化岩片或岩屑中碳酸盐矿物的含量不同,其所伴生的盐类矿物也不同,片状破坏形式的风化砂岩碳酸盐含量高,盐类析出物以六水泻盐为主,且含有少量石膏;而粉状破坏形式的风化砂岩岩屑中碳酸盐含量却很低,其盐类析出物为石膏。

2) 碳酸盐矿物含量高者对石雕表面起明显的胶结作用,碳酸盐含量低的胶结作用弱,盐类矿物成分不同与石雕表面岩石破坏形式特别是碳酸盐胶结作用强弱关系,是此次测试研究的新进展,也是今后深入研究的问题之一。

3) 按盐类矿物的溶解度大小,方解石( $\text{CaCO}_3$ )、白云石 $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ 、菱铁矿( $\text{FeCO}_3$ )沉淀在前,石膏居中,泻盐形成在后,即碳酸盐的胶结作用在前,硫酸盐形成在后,并产生盐胀作用,是产生片状破坏的原因之一。

4) 云冈石窟风化砂岩破坏形式与其所伴生的盐类矿物析出受洞窟微环境控制,片状风化及泻盐和石膏出现频次最大在进深小,受外界影响大,环境变化剧烈的洞窟,粉状风化和石膏结晶多出现在内部进深加大,环境较为潮湿、稳定的洞窟。

#### 参考文献:

- [1] 黄继忠. 云冈石窟地质特征研究[J]. 东南文化, 2003(5): 91-93.  
HUANG Jizhong. Research on the geological features of Yungang Grottoes[J]. Southeast Culture 2003(5): 91-93.
- [2] 潘别桐, 黄克忠. 文物保护与环境地质[M]. 武汉: 中国地质出版社, 1992: 20-23.  
PAN Bietong, HUANG Kezhong. Cultural relics protection and environmental geology[M]. Wuhan: China Geological Publishing House, 1992: 20-23.
- [3] 黄继忠, 袁道先. 水与盐对云冈石窟石雕的影响初探[J]. 文物世界, 2005(4): 61-66.  
HUANG Jizhong, YUAN Daoxian. The influence of water and salt on the stone carvings of Yungang Grottoes[J]. Cultural Relics World 2005(4): 61-66.
- [4] 曲永新, 黄克忠, 徐晓岚, 等. 大同云冈石窟石雕表面和表层的粉状物及其在石雕风化中的作用研究[C]//中国地质学会工程地质专业委员会编. 全国第三次工程地质大会论文集(上卷). 成都: 成都科技大学出版社, 1988.  
QU Yongxin, HUANG Kezhong, XU Xiaolan, et al. Study on the powdery substance on the surface and surface of the stone sculptures in the Yungang Grottoes of Datong and its role in the weathering of stone sculptures[C]//Engineering Geology Professional Committee of the Geological Society of China. The Third National Project Selected Papers of the Geological Conference (Volume 1). Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1988.
- [5] 黄继忠. 水对云冈石窟石雕的作用及防治对策[N]. 中国文物报, 2006-07-21(8).  
HUANG Jizhong. The effect of water on the stone carvings of Yungang Grottoes and its prevention and control measures[N]. China Cultural Relics News 2006-07-21(8).

## Study on the relationship between salt precipitates in Yungang Grottoes and the surface destruction forms of stone carvings

REN Jianguang<sup>1,3</sup>, HUANG Jizhong<sup>2,3</sup>, REN Zhiwei<sup>1</sup>, HU Cuifeng<sup>3</sup>

(1. *Yungang Grottoes Research Institute, Datong 037007, China;*

2. *Shanghai University, Shanghai 200444, China;*

3. *Shanxi Datong University, Datong 037000, China)*

**Abstract:** Research on the mechanism of salt damage in Yungang Grottoes is of great significance to the selection of treatment strategies. In this paper, X-ray diffraction (XRD) was used to conduct semi-quantitative analysis of mineral composition and the acid-base neutralization method was used to determine CO<sub>2</sub> content, XRD was also used to conduct qualitative identification of salt minerals and silicate minerals, in an attempt to analyze damage patterns in weathered sandstone in Yungang Grottoes. The relationship with the salt precipitates associated with the rock surface. The results suggest that the flaky weathering of the rock face at Yungang Grottoes is related to the high carbonate content of the sandstone, and the powdery weathering is related to the high content of gypsum in the rock. The crystallization of different salts is related to the cave environment. These research results have reference significance for the treatment of weathering diseases in Yungang Grottoes.

**Key words:** Yungang Grottoes; Salt precipitate; Weathering disease; XRD

(责任编辑 潘小伦; 校对 马江丽)