

文章编号:1001-4810(2005)01-0071-06

云冈石窟砂岩中碳酸盐胶结物化学风化及相关文物病害研究^①

马在平^{1,2}, 黄继忠³, 张洪²

(1. 中国地质大学(北京)材料科学与工程学院, 北京 100083; 2. 石油大学(华东)地球资源与信息学院, 山东 东营 257061; 3. 云冈石窟文物研究所, 山西 大同 037007)

摘要:云冈石窟地区云冈组上段砂岩中碳酸盐胶结物的含量普遍在10%以上,其主要矿物成分为含铁方解石和含铁白云石。在碳酸盐胶结物化学风化过程中发生的化学反应包括碳酸盐矿物溶解、 Fe^{2+} 离子氧化及 Fe^{3+} 离子水解,以及石膏、泻利盐、水碳镁石、球碳镁石等矿物结晶。水、砂岩中裂隙和层理发育、大气污染等是影响碳酸盐胶结物化学风化的主要外因。碳酸盐胶结物化学风化引发了多种文物病害,对云冈石窟的文物价值造成严重破坏。

关键词:砂岩;碳酸盐胶结物;化学风化作用;文物病害;云冈石窟

中图分类号:K928.7

文献标识码:A

0 前言

云冈石窟位于山西省大同市西郊武周山南麓,距大同市区约16km。其始凿于北魏和平初年(公元460年),兴盛于5世纪60年代至90年代,延续到6世纪20年代,是我国早期石窟艺术的代表作及现存最大的古代石窟群之一;1961年被国务院列入第一批全国重点文物保护单位;2001年被联合国教科文组织列为“世界文化遗产”。

长期的风化作用对云冈石窟造成了严重破坏。在东西长约1km的窟区内,现存主要洞窟45个,大小窟龕252个,雕像 5.1×10^4 尊,石雕面积 $1.8 \times 10^4 \text{m}^2$,不同程度的风化破坏现象随处可见。虽然从20世纪50年代末期开始,人们即陆续开展了关于云冈石窟风化病害的研究和防治工作,但是,由于自然条件复杂,对石窟岩体风化作用的机理认识不足,加上工程措施不到位等,目前,云冈石窟的风化病害问题仍然十分突出并引起社会广泛关注^[1]。

云冈石窟地区出露的地层包括中侏罗统云冈组

上段碎屑岩层及第四系亚粘土、轻亚粘土层^[2]。前者是一套以砂岩为主的辫状河流沉积^[3],地层产状平缓,云冈石窟即雕凿于其中。文物研究工作者发现,碳酸盐胶结物在包括云冈石窟在内的我国众多砂砾岩类石窟岩体中广泛分布^[4~7],但是,从文物保护角度对其风化作用进行专门性的研究尚未见公开报道。

在对云冈石窟石雕及其围岩风化情况进行实地观察的基础上,应用手工采集、手持式工程钻机钻取等方法,从窟内外允许部位获取了大量岩石及其风化产物样品,又收集了国家“十五”重点文物保护工程——“云冈石窟防水保护工程”在窟区顶部北侧布置的3口深钻孔云冈组上段碎屑岩的岩芯样品,经室内分析测试,本文对云冈石窟地区砂岩中碳酸盐胶结物的化学风化情况及相关文物病害等进行了研究。

1 碳酸盐胶结物的矿物成分和分布

根据镜下鉴定,云冈石窟地区云冈组上段的砂岩多属中厚层粗、中粒岩屑砂岩及长石质岩屑砂岩,其

① 基金项目:国家文物局科研项目“水对云冈石窟石雕的作用及防治对策”(编号200115)研究成果

第一作者:马在平(1962—),男,副教授,在职博士生,主要研究方向:矿物学、岩石学、矿床学。

收稿日期:2004-11-08

中片麻岩岩屑、石英岩岩屑、石英(图版之1,见文末。下同)、长石(以微斜长石为主)(图版之2)等碎屑颗粒含量约65%,粘土杂基含量约10%,高岭石胶结物含量为5%~10%;碳酸盐胶结物含量多在10%以上,部分样品中可达20%左右(一般说来,层理发育的中粒砂岩中,碳酸盐胶结物含量较高)。砂岩碎屑颗粒分选、磨圆程度差(图版之1),以孔隙式胶结为主。

应用薄片染色法^[8]鉴定发现,碳酸盐胶结物主要由含铁方解石和含铁白云石组成,二者可独立或以后者交代并包围前者的方式存在于碎屑颗粒间孔隙内(图版之3,4)。

2 碳酸盐胶结物化学风化机理

2.1 碳酸盐胶结物化学风化方式

2.1.1 碳酸盐矿物溶解

云冈石窟地区云冈组上段砂岩中碳酸盐胶结物的溶解现象既可见于岩体露头浅表部,也可出现在深钻孔岩芯的不同深度,并具显著的镜下和肉眼识别标志。在镜下,当碳酸盐胶结物发生部分溶解时,其剩余部分呈连续或断续残留边状、悬浮状并在溶解形成的孔隙内壁形成铁锈色沉淀物(图版之5,其成因见下文);当碳酸盐胶结物完全溶失时,则只能在溶解孔隙内壁见到一圈铁锈色沉淀物。从手标本上看,新鲜砂岩多呈灰绿色、灰色,碳酸盐胶结物发生显著溶解的砂岩表面因出现密集铁锈色斑点而呈土黄色(图版之6)。

总结镜下观察结果发现:①不同碳酸盐矿物的溶解速率不同,即含铁方解石普遍比含铁白云石溶解得快,当二者一起出现时,水溶液往往从碳酸盐胶结物裂隙等部位进入其内部优先溶解含铁方解石;②裂隙越发育处的砂岩样品,其所含碳酸盐胶结物的溶解程度越高;③层理面附近的碳酸盐胶结物普遍比层理内部的溶解程度高。

对于地表环境下方解石与白云石之间溶解速率差异问题,前人曾经从水溶液中CO₂含量、盐溶效应^[9]及环境温度、压力的影响^[10]等方面进行了解释。我们认为,含铁方解石中FeO含量低于含铁白云石^[11]可能也是二者之间存在溶解速率差异的一个不可忽视的原因。因为含铁白云石FeO含量较高,所以,当其风化后,将生成较多的铁锈色物质并在其残留部分周围积聚(图版之7),从而阻碍了溶解作用的进程。至于岩体不同部位碳酸盐胶结物溶解程度不等,其主要原因则在于各部位水溶液流通性不同,本文将在下文“影响碳酸盐胶结物化学风化的外部因

素”部分作进一步解释。

碳酸盐胶结物溶解后,在砂岩体内形成了新的孔隙空间,导致岩石孔隙度增加。根据对风化程度不同的砂岩的物性实测结果作孔隙度、渗透率关系图(图1),发现孔隙度与渗透率之间有显著的正相关关系。又通过压汞法^[8]对部分砂岩样品进行孔隙结构分析,其结果如表1所示。由表可以看出,随岩石颜色从灰色到浅灰色至土黄色、褐黄色的变化(意味着碳酸盐胶结物风化析出的铁锈色物质逐渐增加及砂岩风化程度逐渐加深),岩石的孔隙度也不断增加,其平均孔喉半径亦变大。岩石孔隙度与渗透率和平均孔喉半径之间的正相关关系预示着在碳酸盐胶结物不断溶解、岩石风化逐渐加剧的过程中,砂岩体内部水溶液的流动将渐畅、渐快。近年来的研究发现,不饱和水溶液流速越高,方解石的溶解速率越高^[12]。由此可以认为,云冈石窟砂岩中方解石的溶解进程是以一定加速度进行的。

2.1.2 Fe²⁺离子氧化及Fe³⁺离子水解

在砂岩碳酸盐胶结物溶解过程中,Fe²⁺离子析出、氧化成Fe³⁺离子并发生水解,其产物即为前文提及的分布于碳酸盐胶结物溶解孔隙内壁的铁锈色物质。前人通过实验发现,Fe³⁺离子的水解产物包括针铁矿和赤铁矿^[13]。由于条件限制,此次研究工作中未能测定出Fe³⁺离子水解产物的矿物相。

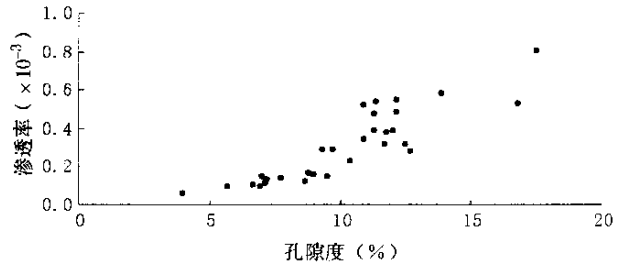


图1 部分砂岩样品孔隙度与渗透率关系图*

Fig. 1 Relationship between the porosity and permeability of some sandstone samples

* 图中孔隙度和渗透率值系分别应用美国岩芯公司CoreLAB孔隙度仪和CoreLAB渗透率仪测得(下同)

2.1.3 次生盐类矿物结晶

应用X射线衍射技术对从部分洞窟内石雕和无石雕洞壁表面采集的样品进行分析,发现了多种次生盐类矿物。考虑到碳酸盐胶结物与次生盐类矿物化学成分的相关性,推断与砂岩中碳酸盐胶结物风化有关的次生盐类矿物有石膏、泻利盐、水碳镁石、球碳镁石等,它们是由碳酸盐胶结物中的CaCO₃、MgCO₃组分与溶解于水中的O₂、SO₂、CO₂等经以下一系列化学

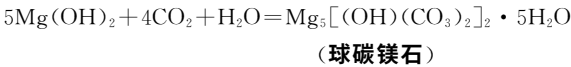
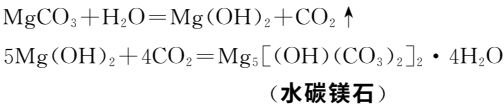
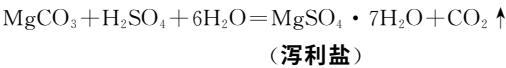
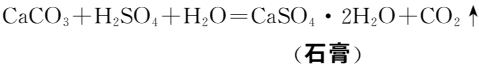
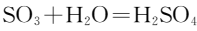
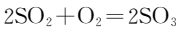
表 1 部分砂岩样品孔隙度及平均孔喉半径值*

Tab. 1 The porosity and pore throat's average radius of some sandstone samples

序号	岩石名称	采集位置	平均孔喉半径(μm)	孔隙度(%)
1	褐黄色含细砾长石质岩屑粗砂岩	7 号孔,12.60m	0.350	13.0
2	土黄色含细砾长石质岩屑粗砂岩	7 号孔,14.80m	0.362	16.3
3	灰色长石质岩屑中砂岩	7 号孔,19.51m	0.035	7.5
4	浅灰色长石质岩屑粗砂岩	7 号孔,22.20m	0.112	8.4
5	浅灰色长石质岩屑粗砂岩	7 号孔,25.69m	0.153	11.1

* 应用胜利油田产 SS-55 高压孔隙结构仪测定

反应形成的:



石膏(其特征衍射峰 d 值分别为 0.756nm、0.427 nm、0.306 nm、0.287 nm 和 0.268 nm)在 43 窟北壁中上部呈不连续薄皮壳状附着于岩石表面,在从 3 窟东壁和 5 窟内雕像表面刷落的粉末中亦可见及(图 2 之 1、2、3)。泻利盐(其特征衍射峰 d 值分别为 0.598 nm、0.535 nm、0.421 nm、0.286 nm 和 0.266 nm)、水碳镁石(其特征衍射峰 d 值分别为 0.920nm、0.641 nm、0.554 nm、0.334 nm 和 0.286 nm)、球碳镁石(其特征衍射峰 d 值分别为 1.080 nm、0.817nm、0.509 nm、0.311 nm 和 0.293 nm)等一起出现于 3 窟 1 号平碶顶部表面的不连续薄皮壳中(图 2 之 4)。

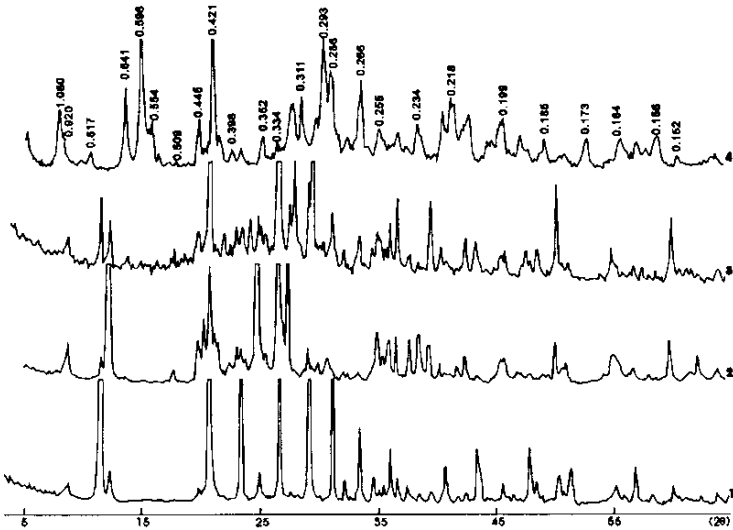


图 2 部分含次生盐类矿物样品的 X 射线衍射谱图

Fig. 2 XRD patterns of some samples containing secondary salt minerals

1. 43 窟北壁中上部盐皮壳; 2. 3 窟东壁表面粉末; 3. 5 窟石雕表面粉末; 4. 3 窟 1 号平碶顶部盐皮壳

2. 2 影响碳酸盐胶结物化学风化的外部因素

砂岩中碳酸盐胶结物的化学风化作用从本质上说是在表生环境下发生的一系列复杂的水—岩反应。综合以往相关研究成果和本次研究工作的新发现,我们认为影响云冈石窟砂岩中碳酸盐胶结物化学风化的外部因素主要有三点:

2. 2. 1 多种形态的水

在碳酸盐胶结物溶解、Fe²⁺ 离子氧化及 Fe³⁺ 离子水解、次生盐类矿物结晶等化学反应过程中,水既是反应介质,也是重要的反应物。因此,水对碳酸盐胶结物的化学风化至关重要。在云冈石窟地区,水的存在形态包括渗透水、凝结水、毛细水及片状流水。渗透水

是指大气降水通过裂隙、孔隙等通道渗入岩体内部的水。云冈石窟地区虽处于大陆性半干旱气候区,年平均降雨量仅为423.8mm,降雪亦仅为200mm左右,但由于降雨多在每年7—9月(月平均达100mm以上),降雪时间也相对集中,窟区上部第四系覆盖层较薄(多不超过8m)且渗透性好,基岩顶部起伏不平,大气降水极易在基岩顶部低洼处聚集并沿裂隙下渗。当遇到泥岩等隔水层时,则形成暂时性上层滞水并通过岩石孔隙侧向渗透。

云冈石窟曾经有半数以上的洞窟北壁及窟顶有显著渗水现象,其表现通常为小片潮湿状,渗水严重时(主要在降水集中期),可见微细的水流或滴水。经过长期反复治理,目前,仍有8个洞窟渗水严重,而洞窟后壁潮湿现象则更为普遍^[14]。前人曾经对2窟内渗水进行化学分析,发现其水化学类型为HCO₃—Ca·Mg,水溶液pH值为7.7^[4],反映渗水对砂岩中碳酸盐胶结物有显著的溶解作用。

凝结水是指潮湿空气进入洞窟后,其所含水分在温度较低的岩石表面冷凝形成的水。研究人员曾对5个洞窟内的空气含水状况进行了连续6天的观测,发现其相对湿度均在80%以上,有时达饱和^[4]。另有实验表明,在雨季约1昼夜时间内,第5窟砂岩表面的凝结水量可达28kg^[15]。

由于20世纪70年代临时修建的窟前路面标高超过部分窟内地面,雨季时发生雨水倒灌使21个较大的洞窟中有14个(7~20窟)窟内长期积水。通过毛细作用,窟内积水可到达壁面约2m高处。1994年10月,采取工程措施使上述窟前地面下降约1m后,毛细水对砂岩中碳酸盐胶结物的风化作用才得到有效控制。

片状水流主要见于降水期间窟外无遮挡的砂岩表面。对裸露于窟区顶部及东西向开凿面上的砂岩浅表部碳酸盐胶结物的风化作用有重要意义。

2.2.2 较发育的裂隙和层理

云冈石窟砂岩中发育多种成因的裂隙,包括构造裂隙、卸荷裂隙和风化裂隙等。其中,切割最深、沟通范围最广的是构造裂隙,其走向共有4个方向^[4],均与东西向开凿面斜交且为高角度裂隙,在窟内北壁及窟外崖壁有出露,风化后裂隙间距显著扩大。

卸荷裂隙平行于洞窟内壁及窟外崖壁壁面发育,前人研究发现其出现范围为离崖壁30m以内且愈近崖壁密度越大^[4]。此次研究在观察3窟东、北壁沿卸荷裂隙垮塌岩体的同时,于10窟诵经道北壁西侧用手持式工程钻机垂直壁面钻孔,发现卸荷裂隙间距集中在2cm至5cm之间。
风化裂隙主要发育于东西向开凿面上及窟区顶

部裸露或浅埋藏砂岩的浅表部,方向不一。

各种裂隙的存在,为水溶液活动提供了良好的通道。例如,在3号深钻孔31.64m(不含第四系覆盖层厚度)处,可见水溶液沿构造裂隙下渗引起的砂岩严重风化现象(图版之6);2002年12月8日,在3窟1号平洞口顶部,可见沿卸荷裂隙下渗水溶液冻结形成的冰柱。

另外,受沉积作用控制,云冈石窟砂岩中平行层理、交错层理等十分发育。层理面是岩体中的薄弱部位,水溶液较顺畅地沿层理面进入岩体内部,可加速碳酸盐胶结物的风化。为了定量了解层理对渗透性的影响,挑选了5个砂岩样品,分别测定其水平和垂向渗透率值(见表2),发现前者明显高于后者。

2.2.3 燃煤造成的大气SO₂污染

据文献报道,由于工业生产和生活用煤、煤矸石堆自燃等,云冈石窟地区大气中SO₂含量严重超标^[15]。云冈石窟文物研究所在1988年至1997年对窟内外空气中SO₂含量和雨水酸碱度进行监测,发现SO₂日均值窟外为0.093mg/m³,5窟内为0.064mg/m³,16窟内为0.075mg/m³;雨水pH值平均为6.75。

溶解有丰富SO₂的酸性水溶液加剧了碳酸盐胶结物的溶解,也是云冈石窟地区石膏、泻利盐等硫酸盐类次生矿物广泛分布的重要原因。

3 与碳酸盐胶结物风化有关的文物病害形态

经历了漫长风化作用的云冈石窟,其残留石雕表面呈现多种风化病害形态。其中,与砂岩中碳酸盐胶结物化学风化有关的包括变色、条纹状切割、沙化等,它们对石窟的文物价值造成了严重的破坏。

3.1 变色

如前文所述,云冈石窟石雕岩体在未风化时主要呈灰绿色、灰色。在其所含碳酸盐胶结物遭受一定程度风化后,由于铁锈色物质大量形成、次生盐类矿物积聚于表面等,将使石雕颜色发生改变。一般而言,无次生盐类矿物显著集聚的石雕表面多呈土黄色和以土黄色为主的杂色(图版之8,9);洞窟北壁,特别是其下部的石雕表面,因次生盐类矿物丰富,往往呈白色、灰白色(图版之10)。

石雕表面变色、尤其是不均匀变色,使其视觉效果变差,有明显积盐的石雕其表面的完整性也往往受到破坏(见下文“沙化”部分)。

3.2 条纹状切割

表现为石雕表面被疏密不等、形态不一的凹入条纹切割(图版之9),本次研究测得的最大切割深度达

20cm。其成因在于水溶液顺层理界面进入并将界面两侧的碳酸盐胶结物溶解,从而导致碎屑颗粒等岩石组分脱落、界面间距扩大,使原本均一完好的石雕表面出现各种层理的痕迹。

此种病害形态分布广泛,在云冈窟区各洞窟内、外部的石雕表面均可见到。其危害在于使石雕表面的完整性和视觉效果均受到严重影响。

3.3 沙化

表现为石雕表面疏松并呈碎屑状自然脱落。这种现象的形成与水溶液长期作用于石雕岩体而使其浅表部碳酸盐胶结物溶解殆尽,甚至连微斜长石等砂岩骨架组分也严重风化和次生盐类矿物在岩体浅表部结晶膨胀等有关。

此种病害形态多见于云冈窟区渗水较显著部位的石雕(图版之10)。受其影响,石雕多损毁严重,甚至面目全非。

表 2 部分砂岩样品水平和垂向渗透率值

Tab. 2 Horizontal and vertical permeability of some sandstone samples

序号	岩石名称	采集位置	水平渗透率 ($\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$)	垂向渗透率($\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$)
1	褐黄色含细砾长石质岩屑粗砂岩	7 号孔,12.60m	0.285	0.104
2	土黄色含细砾长石质岩屑粗砂岩	7 号孔,14.80m	0.804	0.531
3	灰色长石质岩屑中砂岩	7 号孔,19.51m	0.130	0.099
4	浅灰色长石质岩屑粗砂岩	7 号孔,22.20m	0.164	0.099
5	浅灰色长石质岩屑粗砂岩	7 号孔,25.69m	0.226	0.149

4 结 论

(1)云冈石窟地区云冈组上段砂岩中的碳酸盐胶结物主要由含铁方解石和含铁白云石组成,其含量普遍在10%以上。

(2)砂岩中碳酸盐胶结物化学风化反应的方式包括含铁方解石及含铁白云石溶解, Fe^{2+} 离子氧化及 Fe^{3+} 离子水解,石膏、泻利盐、水碳镁石、球碳镁石等次生盐类矿物结晶等;影响碳酸盐胶结物化学风化的主要外因包括多种形态的水、砂岩体裂隙和层理发育及大气 SO_2 污染等。

(3)与碳酸盐胶结物风化有关的石雕病害形态包括变色、条纹状切割、沙化等,它们对石窟的文物价值造成了严重的破坏。

参考文献

[1] 池茂花,丁若亭.云冈石窟顶部渗水严重[EB/OL].维修工程十月动工.新华网,2002.2.9.
[2] 黄继忠.云冈石窟地质特征研究[J].东南文化,2003(5):91—93.
[3] 王随继.大同盆地中侏罗世河流沉积体系及古河型演化[J].沉积学报,2001,19(4):501—505.

[4] 黄克忠,解廷藩.云冈石窟石雕的风化与保护[A]见:潘别桐,黄克忠主编.文物保护与环境地质[C].北京:中国地质大学出版社,1992:19—33.
[5] 张赞勋,付林森,等.大足石刻砂岩岩石学特征[J].重庆建筑大学学报,1995,17(2):58—62.
[6] 李最雄.丝绸之路石窟的岩石特征及加固[J].敦煌研究,2002,(4):73—83.
[7] 李黎,谷本亲伯.龙游石窟地质环境及病害的初步调查[J].敦煌研究,2002(4):92—96.
[8] 陈丽华,姜在兴.储层实验测试技术[M].东营:石油大学出版社,1994:16—17,207—214.
[9] 翁金桃.方解石和白云石的差异溶蚀作用[J].中国岩溶,1984,(1):29—36.
[10] 杨俊杰,黄思静,等.表生和埋藏成岩作用的温压条件下不同组成碳酸盐岩溶蚀成岩过程的实验模拟[J].沉积学报,1995,13(4):49—50.
[11] 郑浚茂,庞明编.碎屑储集岩的成岩作用研究[M].北京:中国地质大学出版社,1989:11.
[12] 刘再华,W Dreybrodt. DBL 理论模型及方解石溶解、沉积速率预报[J].中国岩溶,1998,17(1):1—7.
[13] 徐拔和著.土壤化学选论[M].北京:科学出版社,1986:71—72.
[14] 郭桂香.世纪维修[J]中国文化遗产,2004(1):12—23.
[15] 李海,石云龙,等.大气污染对云冈石窟的风化侵蚀及防护对策[J].环境保护,2003,(10):44—47.

图 版



图版说明：1. 岩屑砂岩中的石英岩岩屑(A)、白云母石英片岩岩屑(B)、石英(Q)等(3窟主室东壁,正交光,×40);2. 长石质岩屑砂岩中的微斜长石碎屑(M)等(3窟内1号平硐口西侧,正交光,×100);3. 含铁方解石(紫红色)充填碎屑颗粒(F)间孔隙(7号孔,12.60m;单偏光,×40);4. 含铁方解石(紫红色)与含铁白云石(淡蓝色)一起充填碎屑颗粒(F)间孔隙(7号孔,22.20m;单偏光,×40);5. 碎屑颗粒(F)间含铁方解石(紫红色)部分溶解后形成孔隙(P)和铁锈色残留边;其未溶解部分呈悬浮状、残留边状(1号孔,27.99m;单偏光,×100);6. 碳酸盐胶结物风化后在岩芯上呈现的密集铁锈色斑点(3号孔,31.46m);7. 含铁白云石(淡蓝色)风化后形成丰富的铁锈色物质(2、3窟间崖壁表面;单偏光,×40);8. 石雕表面因水溶液活动引起的条带状切割及变色(14窟东壁);9. 石雕表面沙化并变色(灰白)(18窟北壁底部)

(下转第 82 页)

ANALYSIS TO CAVE ACCIDENTS IN US AND UK AND DISCUSSION ON SECURITY MEASURES

WANG Xiao-qing^{1,2}, TIAN Ming-zhong¹, ZHU Jia-wei¹

(1. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 2. *Qufu Normal University, Qufu, Shandong, 273165, China*)

Abstract: The modern cave expedition is more popular in the developed countries and has become a weekend and holiday sport. Most of the developed countries have special caving rescue organizations in order to aid the people in caving accidents. By analysis of caving accidents in the United States and United Kingdom etc. , the causes of caving accidents can be divided into: cave topography or rock falling, illness or hypothermia, flood, trapped or lost, equipment failure etc. The caving accidents often occurred in spring, summer and autumn. The age of people involved in accidents is frequently between 15~34, especially in 20~24. Except hypothermia, exhausted and drowned, other caving accidents like limb, head and body injure are often found and leg-lower or ankle injure is most often. The measures of keeping cavers away from caving accidents are also discussed according to caving experience from developed countries.

Key words: Caving; Caving accidents; The rule of caving accidents; The security measures

(上接第76页)

CHEMICAL WEATHERING OF CARBONATE CEMENT IN SANDSTONE AND THE RELATED CULTURAL RELIC DISEASES IN YUNGANG GROTTOES

MA Zai-ping^{1,2}, HUANG Ji-zhong³, ZHANG Hong²

(1. *School of Material Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

2. School of Geo-Resource and Information, University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China;

3. *Institute of Yungang Grottoes, Datong, Shanxi 037007, China)*

Abstract: Carbonate cement is universally more than 10% in sandstones of the upper Yungang formation in Yungang Grottoes area. It's mainly composed of ferriferous calcite and ferriferous dolomite. Chemical reactions that happened during the weathering of carbonate cement include dissolution of ferriferous calcite and ferriferous dolomite by water, Fe^{3+} hydrolyzing and crystallization of gypsum, epsomite, dypingite and hydromagnesite. The water, fractures and stratification are major external causes for the weathering of carbonate cement which has led to cultural relic diseases and serious damages to the value of cultural relic in Yungang Grottoes.

Key words: Sandstone; Carbonate cement; Chemical weathering; Cultural relic disease; Yungang Grottoes