

基于扫描电镜图像和微观渗流模型的云冈石窟砂岩风化特征分析

汪 军, 徐金明, 龚明权, 王亚磊

Investigating weathering features of sandstones in the Yungang Grottoes based on SEM images and micro-scale flow model

WANG Jun, XU Jinming, GONG Mingquan, and WNAG Yalei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202101022>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于数字图像相关方法的裂隙砂岩应变场演化规律及前兆识别

Evolution law of strain field and precursor identification of flawed sandstone based on Digital Image Correlation method

张科, 李娜 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 150-156

基于IPP图像处理的膨胀土微观结构定量研究

A quantitative study of microstructure of expansive soil based on IPP image processing

侯超群, 席瑶, 孙志彬, 高可可 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 156-156

基于数字图像处理的颗粒流厚度动态提取方法研究

A study of the dynamic extraction method for granular flow thickness based on digital image processing

吴越, 李坤, 程谦恭, 王玉峰, 龙艳梅, 姜润昱, 宋章, 刘毅 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 151-159

红层砂岩高温后蠕变试验研究

Creep tests of red-bed sandstone after high temperature

李畅, 任光明, 孟陆波, 代晗, 张晓东, 李科 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 71-71

融化压缩下水泥改良冻土的微观孔隙特征演变

Microcosmic pore characteristics evolution of the cement improved frozen soil after thawing compression

尹振华, 张建明, 张虎, 王宏磊 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 97-105

管道流模型参数敏感性分析及其在许家沟泉域的应用

A sensitivity analysis of conduit flow model parameters and its application to the catch area of the Xujiagou spring

武亚遵, 李彦涛, 林云, 曲鹏冲 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 68-75



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202101022

基于扫描电镜图像和微观渗流模型的云冈石窟砂岩 风化特征分析

汪 军¹, 徐金明¹, 龚明权², 王亚磊¹

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 2. 山西大同大学云冈学院, 山西 大同 037009)

摘要: 风化作用、岩石微观结构、岩石微观渗流特性定量关系的研究是石窟文物有效保护的重要基础, 砂岩风化作用严重影响了岩体上石窟文物的有效保护。本次研究使用扫描电镜 (SEM) 获得云冈石窟不同窟体砂岩的微观图像, 根据图像增强和图像分割技术得到了岩石中颗粒和孔隙的数字特征参数, 从微观角度建立了反映孔喉连接特性的渗流模型, 得到了不同窟体岩石的局部水力传导系数, 分析了数字特征参数、水力传导系数、风化作用之间的关系。结果表明, 风化作用对石窟砂岩微观结构具有很大影响; 砂岩孔隙平均长轴长度大小对应的风化程度分别是全风化或强风化、中等风化、微风化或未风化, 长度分别为大于 40 μm 、25 ~ 35 μm 、15 ~ 25 μm ; 风化程度越高、水力传导系数越大, 随着风化程度的增高、水力传导系数的范围为 $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$; 水力传导系数与孔喉尺寸、孔喉连通性密切相关; 孔喉半径比增大时、水力传导系数也增大。

关键词: 云冈石窟; 砂岩风化; 数字特征参数; 孔喉连接

中图分类号: P642.24

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)06-0122-09

Investigating weathering features of sandstones in the Yungang Grottoes based on SEM images and micro-scale flow model

WANG Jun¹, XU Jinming¹, GONG Mingquan², WANG Yalei¹

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. School of Yungang Studies, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China)

Abstract: The quantitative relationship among the weathering, microscale structure, and microscale flow properties is a fundamental issue for the efficient preservation of the cultural relics in the grottoes. Sandstone weathering may affect the efficient preservation of the cultural relics in the grotto rocks. In this study, the microscopic images of the sandstones of various grottoes in the Yungang Grottoes are obtained by Scanning Electronic Microscopy (SEM), and the digital characteristic parameters of the particles and pores in the rock are obtained by using the image enhancement and image segmentations. A flow model reflecting the characteristics of the pore-throat connection is also established in the microscopic scale. The local hydraulic conductivity coefficients of the rocks at various grottoes are then obtained. The relationship among the hydraulic conductivity coefficients, digital characteristic parameters, and weathering levels is further explored. The results show that the weathering much affects the microstructure of the grotto sandstones; the corresponding great-small order of the weathering for the average long axes of pores are the complete or high weathering, the moderate weathering, and the slight weathering or fresh sandstones, respectively, with the axes of greater than 40 μm , 25 to 35 μm , and 15

收稿日期: 2021-01-12; 修订日期: 2021-03-11

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC1520500); 山西省重点研发计划项目 (201803D31080)

第一作者: 汪军 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程计算技术的研究工作。E-mail: wangjun50707@163.com

通讯作者: 徐金明 (1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事工程地质与岩土工程的教学与科研工作。E-mail: xjming@163.com

to 25 μm . The higher levels of weathering will result in the greater hydraulic conductivities ranging from 1×10^{-9} to 1×10^{-4} cm/s; the hydraulic conductivity is closely related to the size and connectivity of the pore-throats; and the increases in the pore-throat radius ratios will result in the increase in the hydraulic conductivities.

Keywords: Yungang Grottoes; sandstone weathering; digital feature parameters; pore-throat connection

云冈石窟是我国重点保护文物,具有极高的艺术、科学和文化价值,并以其特有的研究价值被列为世界文化遗产。但是,由于一千多年来各种自然及人为因素的影响,云冈石窟面临“围岩崩落、洞窟渗水、雕刻品风化”等方面的严重病害。其中,风化作用是当前云冈石窟文物保护工作所面临的最严峻问题。

为了有效研究风化作用对云冈石窟文物的影响,可以使用扫描电镜(Scanning Electronic Microscopy, SEM)图像对文物所在岩石进行分析。SEM技术具有无扰动、操作便捷、可重复分析等优点,相关研究已经取得了很大进展。孙寅森等^[1]使用图像分析软件提取页岩SEM图像中孔隙的定量信息,分析了分形维数、有机质含量、矿物成分、孔隙度的相关性;张鹏飞等^[2]根据二维高分辨率扫描电镜(2D-SEM)图像孔隙灰度获得了页岩中孔隙的分布,研究了孔隙形态和孔径分布分形维数;张吉群等^[3]利用计算机图形学处理技术,探讨了孔隙分析中去除噪声、提取孔隙、识别喉道、计算孔隙(岩体孔隙之间相互连接较为狭窄的通道)属性等方面的问题;周宏伟等^[4]根据分形理论得到了描述多孔介质孔隙空间分布的随机分形模型;唐朝生等^[5]计算了多个SEM图像对应土体的表观孔隙率,研究了阈值大小、分析区域大小、扫描点位置、放大倍率等因素对土体微观结构的影响。

云冈石窟文物位于砂岩之中,岩石微观渗流特性对风化作用也有一定影响,可以根据孔隙分布方式、通过建立相应几何或物理模型分析这一影响。比如, Benavente 等^[6]基于孔隙连通性来分析孔隙结构特征,讨论了渗透率与孔隙率的关系,提出了计算渗透率的一个通用模型; Bernabe 等^[7]利用网络仿真方法建模,通过调整微观特征参数模拟了枫丹白露砂岩孔径非均质性和孔隙连通性对渗透率的影响; Nishiyama 等^[8]使用排水法研究渗流过程中沉积岩的孔隙变化,根据运输孔隙度计算渗透率大小,提高了预测的准确程度。

风化作用、岩石微观结构、岩石微观渗流特性密切相关,但这三者关系的定量分析还没有引起足够重视。本次研究拟使用SEM图像来计算砂岩微观数字特征参数,通过建立砂岩渗流几何模型、提出砂岩局

部水力传导参数的计算方法,分析微观图像数字参数、局部水力传导参数、岩石风化程度之间的关系,研究成果对石窟文物保护与风化治理具有一定的参考价值。

1 基于 SEM 图像的砂岩风化特征

砂岩风化作用取决于岩石内部颗粒和孔隙的类型与分布,这一类型与分布可以使用SEM图像来反映、使用数字特征参数来表征。因此,研究时使用现场采集的砂岩样品,在室内进行SEM试验,利用图像增强处理和图像分割技术获取不同窟体砂岩SEM图像中颗粒和孔隙的类型与分布、计算颗粒和孔隙的数字特征参数,分析颗粒和孔隙的类型与分布、图像数字特征参数、岩石风化程度之间的关系。

1.1 样品与 SEM 图像的获得

砂岩样品取自山西省大同市云冈石窟。石窟开凿于大同市西郊侏罗系砂岩山体中。其中石窟主体为云冈组砂岩,厚度40~50 m,顶部覆盖有第四系砂砾石和粉土层。不同风化程度时岩性稍有差异。砂岩完全风化时多为细砂岩或中砂岩,未风化时多为粗砂岩,其它风化程度时多为中砂岩。同时,风化程度越强,岩体破碎越严重,裂隙发育程度越高。云冈石窟不同石窟窟体风化程度^[9]如图1所示。

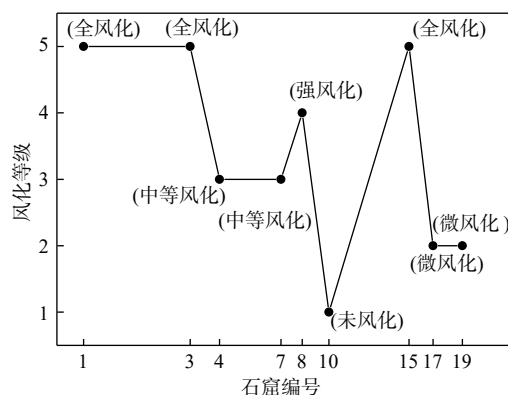


图1 不同窟的砂岩风化等级^[9]

Fig. 1 Weathering levels of sandstone in various grottoes^[9]

图1中,横坐标石窟编号对应于不同窟体的相对位置,可见,1、3、8和15窟为全风化或强风化,4和

7 窟为中等风化, 10、17 和 19 窟为微风化或未风化。采用上海大学 JSM-6007F 型扫描电子显微镜进行试

验, 同时摄取放大 1 000 倍时的 SEM 图像, 不同窟的 SEM 图像见图 2。

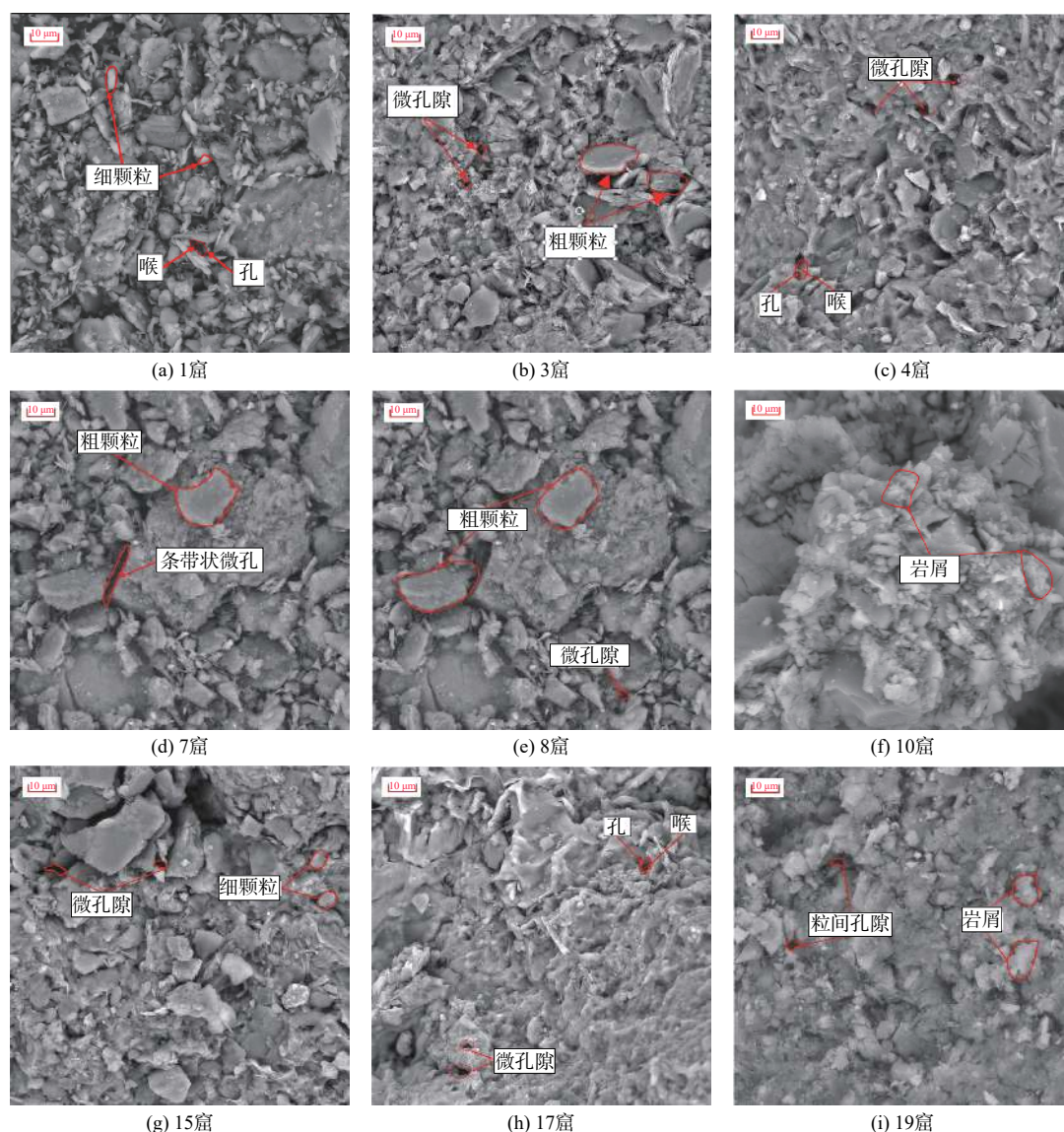


图 2 不同窟砂岩样本的 SEM 图像

Fig. 2 SEM images of sandstone samples in various grottoes

1.2 颗粒和孔隙分布的确定

为了确定图 2 中颗粒和孔隙的分布, 使用图像增强技术对图 2 进行降噪处理, 得到不同窟 SEM 图像灰度直方图(如图 3 是图 2(d)得到的灰度直方图)。进而根据灰度直方图、采用 canny 边缘检测法, 得到了不同风化程度下图像中颗粒与孔隙的分布。如图 2(a)(d)(h)对应的颗粒与孔隙分布见图 4(a)(b)(c)。图 4(a)(b)(c)分别代表全风化、中等风化、微风化下样品中的孔隙分布, 图中红色线代表孔隙的边界、白色和黑色部分分别代表砂岩的颗粒和孔隙。

1.3 石窟砂岩的微观数字特征参数

在 SEM 图像中, 颗粒和孔隙的特征参数能够比较好地表征岩石结构特征^[10-12]。研究时, 石窟砂岩数字特征采用颗粒数量、颗粒平均粒径、颗粒平均圆度(颗粒中所有角或边平均曲率半径与最大内接圆半径的比值)、面孔隙率(孔隙的百分比含量)、孔隙总数、孔隙平均面积、孔隙平均长轴长度(所有孔隙的平均长度)、孔隙平均短轴长度(所有喉的平均长度)、孔隙平均周长来表征。表 1 为颗粒数量、颗粒平均粒径、颗粒平均圆度、面孔隙率的计算结果。

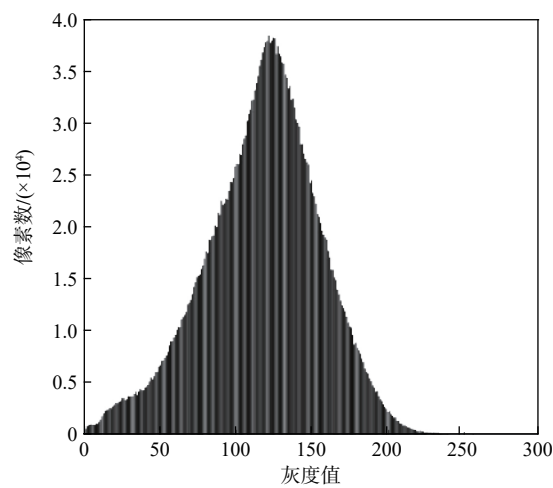


图 3 由图 2 (d) 得到的灰度直方图
Fig. 3 Grayscale histogram from SEM image in Fig. 2 (d)

图 5 为不同窟砂岩 SEM 图像中的孔隙总数及孔隙平均面积。由图 5 可知, 全风化或强风化的 1、3、8 和 15 窟, 孔隙数量大于 100 个, 孔隙平均面积大于 $1\,000\,\mu\text{m}^2$, 密集程度很高; 中等风化的 4 和 7 窟, 孔隙数量分别为 159, 86 个, 孔隙平均面积小于 $500\,\mu\text{m}^2$, 密集程度较高; 微风化或未风化的 10、17 和 19 窟, 孔隙数量小于 100 个, 孔隙平均面积分别为 248.65, 599.22,

$537.52\,\mu\text{m}^2$, 密集程度较低。
图 6 为不同窟砂岩 SEM 图像中孔隙的平均长轴长度、平均短轴长度及平均周长。由图 6 可知, 全风化或强风化的 1、3、8 和 15 窟, 孔隙以小孔隙为主, 孔隙平均长轴长度大于 $40\,\mu\text{m}$, 孔隙平均短轴长度为 $4\sim 7\,\mu\text{m}$, 1、8 和 15 窟孔隙平均周长大于 $250\,\mu\text{m}$, 3 窟孔隙平均周长最小 (为 $154.63\,\mu\text{m}$); 中等风化的 4 和 7 窟, 孔隙以小孔隙及细小孔隙为主, 孔隙平均长轴长度分别为 $33.11, 27.72\,\mu\text{m}$, 孔隙平均短轴长度分别为 $4.21, 3.62\,\mu\text{m}$, 孔隙平均周长相差较大, 分别为 $262.01, 105.71\,\mu\text{m}$; 微风化或未风化的 10、17 和 19 窟, 孔隙以细小孔隙为主, 孔隙平均长轴长度主要为 $15\sim 25\,\mu\text{m}$, 孔隙平均短轴长度为 $3\sim 4\,\mu\text{m}$, 孔隙平均周长分别为 $215.35, 129.61, 174.74\,\mu\text{m}$ 。

1.4 数字特征参数与风化程度的关系
孔隙结构特征是岩石的内在因素, 砂岩颗粒的几何形态决定了孔隙大小, 孔隙通常是同时存在且相互联结^[13-14]。砂岩渗透率与孔隙喉道中孔隙半径大小、孔隙连通性有关, 而渗流大小又会影响到石窟窟体的风化程度^[15-17]。

结合表 1、图 2、图 5、图 6 可知:

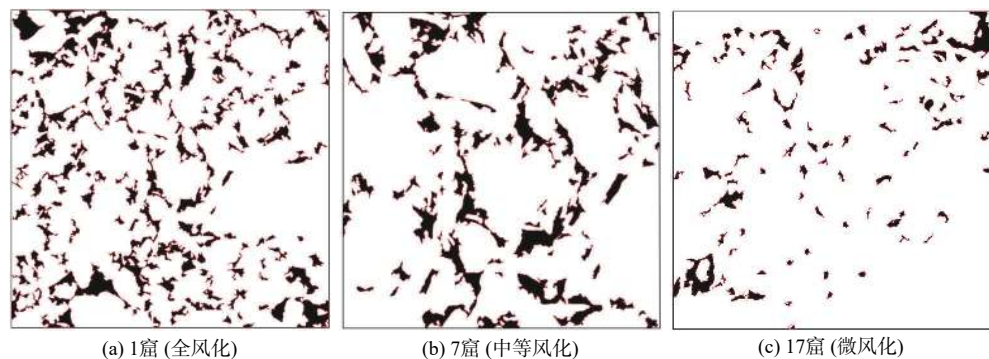
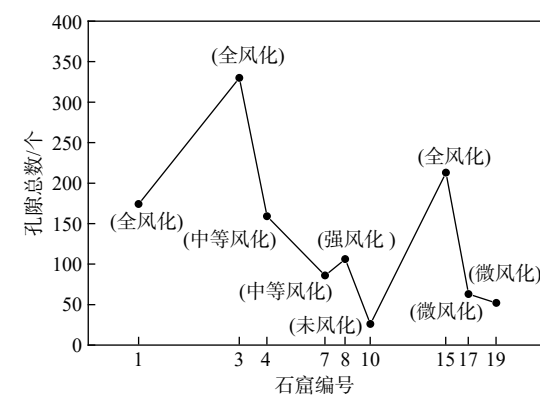


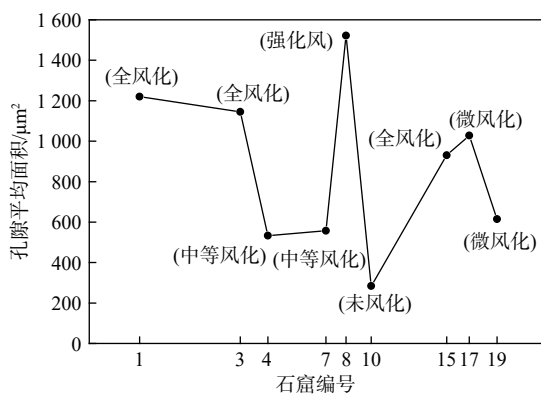
图 4 不同窟砂岩样品的孔隙分布
Fig. 4 Pore distributions of sandstone samples in various grottoes

表 1 不同窟砂岩样品 SEM 图像的数字特征参数

Table 1 Digital parameters of SEM images for sandstone samples in various grottoes				
石窟编号	颗粒数量/个	颗粒平均粒径/ μm	颗粒平均圆度	面孔隙率/%
1	305	10.65	0.42	36.85
3	419	14.74	0.48	30.13
4	214	8.47	0.43	14.32
7	189	4.98	0.40	17.32
8	286	9.48	0.45	31.38
10	79	4.43	0.26	18.38
15	331	16.94	0.52	33.22
17	128	2.47	0.29	19.89
19	72	4.91	0.34	12.20



(a) 孔隙总数



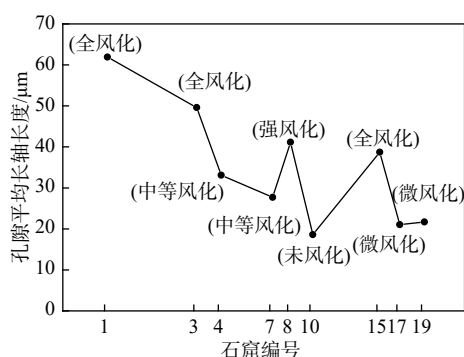
(b) 孔隙平均面积

图 5 不同窟砂岩 SEM 图像的孔隙总数及平均面积

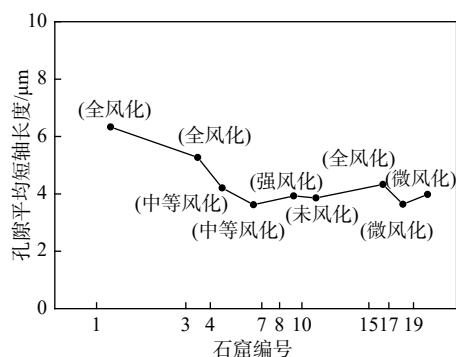
Fig. 5 Pores numbers and average areas of SEM images for sandstone samples in various grottoes

(1) 对于全风化或强风化的石窟砂岩(1、3、8和15窟), 颗粒之间分界清晰, 接触方式以点接触为主, 局部出现点-线接触。颗粒较为细小, 平均粒径为 $9 \sim 17 \mu\text{m}$, 颗粒平均圆度为 $0.4 \sim 0.6$ 。形状呈圆形和亚圆形, 孔隙类型以微孔隙为主, 多属次生孔隙。平均孔隙数量为 206 个, 面孔隙率大于 30%, 孔隙平均周长以 3 窟最小(为 $154.63 \mu\text{m}$)。其它窟(1、8 和 15 窟)大于 $250 \mu\text{m}$, 孔隙平均长轴长度大于 $40 \mu\text{m}$, 孔隙平均短轴长度为 $4 \sim 7 \mu\text{m}$ 。孔喉连接通道形态复杂, 主要为管束状和缩颈状, 孔喉长度越大, 孔喉间连通性最好。

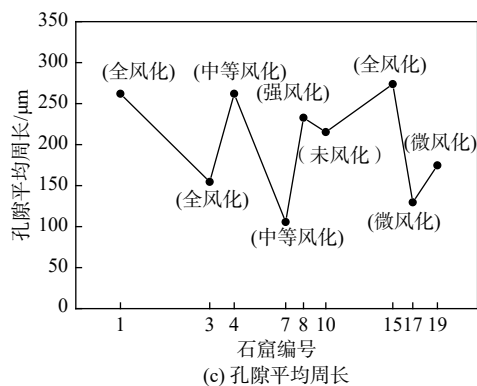
(2) 对于中等风化的石窟砂岩(4 和 7 窟), 颗粒之间分界较为清晰, 接触方式主要为点-线接触。颗粒多为细颗粒, 少部分为粗颗粒, 平均粒径为 $4 \sim 9 \mu\text{m}$, 颗粒平均圆度为 $0.4 \sim 0.5$ 。形状呈亚圆形和次棱角, 孔隙类型以条带状微孔为主, 多属次生孔隙, 平均孔隙数量为 123 个, 面孔隙率分别为 14.32%、17.32%, 孔隙平均周长相差较大, 分别为 $262.01, 105.71 \mu\text{m}$, 孔隙平均长轴长度为 $25 \sim 35 \mu\text{m}$, 孔隙平均短轴长度为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 。



(a) 孔隙平均长轴长度



(b) 孔隙平均短轴长度



(c) 孔隙平均周长

图 6 不同窟砂岩 SEM 图像的孔隙尺寸

Fig. 6 Pore sizes of SEM images for sandstone samples in various grottoes

孔喉连接通道形态较为单一, 为缩颈状, 孔喉长度相对较大, 孔喉间具有一定连通性。

(3) 对于微风化或未风化的石窟砂岩(10、17 和 19 窟), 颗粒之间分界模糊, 接触方式主要为线接触, 局部出现点-线接触。颗粒为粗颗粒, 平均粒径为 $2 \sim 5 \mu\text{m}$, 颗粒平均圆度为 $0.2 \sim 0.4$ 。形状呈棱角和次棱角, 孔隙类型以粒间孔隙为主, 多属原生孔隙, 平均孔隙数量为 47 个, 面孔隙率小于 20%, 孔隙平均周长为 $120 \sim 220 \mu\text{m}$, 孔隙平均长轴长度为 $15 \sim 25 \mu\text{m}$ (其中, 10 窟最小, 为 $18.01 \mu\text{m}$), 孔隙平均短轴长度为 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ 。孔喉连接通道细小、形态弯曲, 以弯片状为主, 孔喉长

度较小, 孔喉间连通性很差。

综上所述, 砂岩 SEM 图像数字特征参数与风化程度关系密切。随着风化程度的加深, 颗粒数量、颗粒平均粒径、平均孔隙数量、面孔隙率都逐渐提高, 平均孔隙数量由未风化时的 47 个增加到全风化时的 206 个, 面孔隙率由未风化时的 12.20% 增加到全风化时的 36.85%, 孔隙平均长轴长度、平均短轴长度、孔喉连通性与风化程度具有较好的相关关系: 风化程度越高, 孔隙长轴和短轴平均长度越大, 孔喉长度越长, 孔喉间连通性越好。

值得注意的是, 10、17 和 19 窟颗粒平均粒径较小, 与风化程度大小关系并不完全一致。这说明风化程度不仅与颗粒大小有关、也取决于矿物颗粒的成分和类型, 具体关系还需要进一步研究。

2 基于微观渗流模型的砂岩风化特征

2.1 考虑孔喉通道的微观渗流模型

根据孔隙孔径分布, 使用 Poiseuille 定律和 Darcy 定律可以比较准确地计算岩石的水力传导系数^[18-20]。Tsakiroglou 等^[21]认为, 应该考虑不同尺寸孔隙间孔喉连通性对水力传导系数的影响。水的渗流是云冈石窟砂岩风化作用的重要影响因素, 而这种渗流又与岩石微观孔隙中孔喉的半径、分布、连通性密切相关。因此, 下面将在建立考虑孔喉通道微观渗流模型的基础上, 通过估算局部水力传导系数来分析石窟砂岩的风化特征。

假设流体厚度足够小, 流体为平行光滑平板间的层状流, 流速只有与通道接触时才发生改变, 流体运动方向为渗流通道的轴向(图 7)。

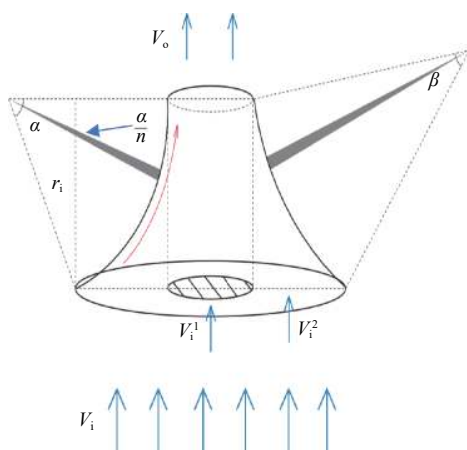


图 7 基于孔喉通道的微观渗流模型

Fig. 7 Microscale flow model based on pore-throat connections

图 7 中, r_i 和 r_o 分别为流入孔和流出喉的半径(即为同一孔隙的长轴与短轴), V_i 和 V_o 分别为单位时间内流入孔和流出喉的流量。将 V_i 分为 2 部分: (1) 直接通过孔喉通道、而与通道壁不接触的部分 V_i^1 ; (2) 流体通过孔喉通道时与通道内壁接触的部分 V_i^2 。则 V_i^1 和 V_i^2 分别为:

$$V_i^1 = \frac{r_o^2}{r_i^2} \cdot V_o \quad (1)$$

$$V_i^2 = \frac{r_i^2 - r_o^2}{r_i^2} \cdot V_o \quad (2)$$

将孔喉连接通道简化为圆弧, 两边圆弧对应的圆心角分别为 α 和 β 。因为一般孔的尺寸远大于喉的尺寸, 可假设圆弧通道长度等于 r_i 。将图 7 中阴影部分与通道入口面积相当区域的渗出流量视为 V_o^1 、接触通道壁部分沿通道壁切线方向的渗出流量视为 V_o^2 , 则流出孔道的渗出流量 V_o 为:

$$V_o = V_o^1 + V_o^2 \quad (3)$$

$$V_o^1 = V_i^1 \quad (4)$$

孔喉内径不断缩小时, 通道内壁会产生摩阻力。为了确定通道壁上的渗流速度, 将圆心角 α 与 β 分为若干个无穷小的角单元($n \rightarrow \infty$ 时 $\alpha/n \rightarrow 0, \beta/n \rightarrow 0$)。假设通道内壁上任一点流束的速率完全相同、沿通道壁法线方向的流束完全损失、沿通道壁切线方向的流束沿通道壁流动, 则通道壁切线方向的渗出流量 V_o^2 为:

$$V_o^2 = \frac{r_i^2 - r_o^2}{r_i^2} \cdot V_i \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \cos \frac{n-i}{n} (\alpha + \beta)}{n} \quad (5)$$

流体穿过圆柱形孔喉通道时, 由 Poiseuille 定律可知, 水力梯度 J 为:

$$J = \frac{\eta V^2}{d 2g} \quad (6)$$

式中: η 、 d ——水的动粘滞系数和水流的流束直径;

g ——重力加速度。

将式(5)代入式(6)并化简, 得:

$$J = \frac{\eta V^2}{d 2g} = \frac{\eta}{2gd} \left(\frac{r_i^2 - r_o^2}{r_i^2} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sin 2\alpha}{4\alpha} + \frac{\sin 2\beta}{4\beta} + 1 \right) \cdot V_i^2 \quad (7)$$

根据式(7), 单个孔隙的水力传导系数为:

$$k = \frac{V_o}{J} = \frac{2gd}{\eta V_i} \cdot f(\delta) \quad (8)$$

式中: δ ——流入孔与流出喉半径的比值。

$$f(\delta) = \frac{r_i^2}{(r_i^2 - r_o^2)} \cdot \left(\frac{4(\beta \sin \alpha + \alpha \sin \beta)}{\beta \sin 2\alpha + \alpha \sin 2\beta + 4\alpha\beta} \right) \quad (9)$$

2.2 水力传导系数的估算

通过现场数据观测与云冈石窟地质特征研究^[22]可以得到不同石窟水的动粘滞系数 η 。假设渗入速度 V_i 为常数, 流束直径 d 与孔隙阈值直径有关, 重力加速度取 $g=9.8 \text{ kg/m}^2$ 。根据 SEM 图像得到式(8)中的数字特征参数(表 2)。

表 2 不同窟体砂岩 SEM 图像的孔隙特征参数

Table 2 Pore digital parameters of SEM images for sandstones in various grottoes

石窟编号	$r_i/(10^{-6} \text{ m})$	$r_o/(10^{-6} \text{ m})$	$d/(10^{-6} \text{ m})$	$\eta/(10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
1	61.90	6.33	101.42	1.42
3	49.02	5.27	84.81	1.38
4	33.11	4.21	51.98	1.38
7	27.72	3.62	39.32	1.30
8	41.17	3.93	69.58	1.38
10	18.01	3.86	31.80	1.30
15	58.73	4.33	125.27	1.42
17	21.03	3.64	40.83	1.34
19	21.69	3.98	51.94	1.34

假定孔喉通道中所有孔隙对水流贡献相同、水流达到临界直径才能通过孔隙渗透, 将表 2 中的孔隙特征参数代入式(8), 可以得到不同窟体砂岩的水力传导系数。

2.3 风化特征分析

岩石孔隙中水的渗流与孔喉尺寸、孔喉间连通性及组合类型有重要的关系, 孔喉半径比(孔喉通道中孔半径与相应喉半径的比值)是影响岩石风化程度的重要参数^[23]。表 3 为云冈石窟不同窟体砂岩的孔喉半径比和水力传导系数。

表 3 不同窟体砂岩的风化特征参数

Table 3 Weathering characteristic parameters for sandstones in various grottoes

石窟编号	孔喉半径比	水力传导系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	9.78	1.14×10^{-5}
3	9.30	7.71×10^{-5}
4	8.80	8.86×10^{-7}
7	7.66	9.23×10^{-8}
8	10.48	4.23×10^{-6}
10	4.01	2.09×10^{-9}
15	13.56	8.64×10^{-5}
17	5.02	2.14×10^{-8}
19	5.44	3.31×10^{-8}

云冈石窟不同窟体砂岩孔喉半径比的计算结果如图 8 所示。

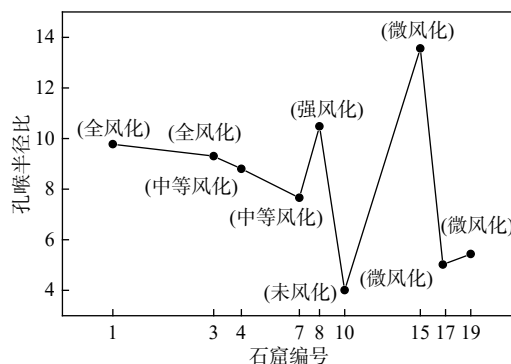


图 8 不同窟体砂岩的孔喉半径比

Fig. 8 Pore-throat radius ratio of sandstone samples in various grottoes

由表 2、表 3、图 8 可知, 石窟风化程度与孔喉半径比关系密切: 对于全风化或强风化的石窟砂岩(1、3、8 和 15 窟), 孔喉半径最大, 孔喉半径比为 9~14; 对于中等风化的石窟砂岩(4 和 7 窟), 孔喉半径相对较大, 孔喉半径比分别为 8.80、7.66; 对于微风化和未风化的石窟砂岩(10、17 和 19 窟), 孔喉半径最小, 孔喉半径比为 4~6, 其中未风化时(10 窟)的孔喉半径比与全风化时(15 窟)的孔喉半径比相差达到 3 倍。

云冈石窟不同窟体砂岩局部水力传导系数的计算结果如图 9 所示。

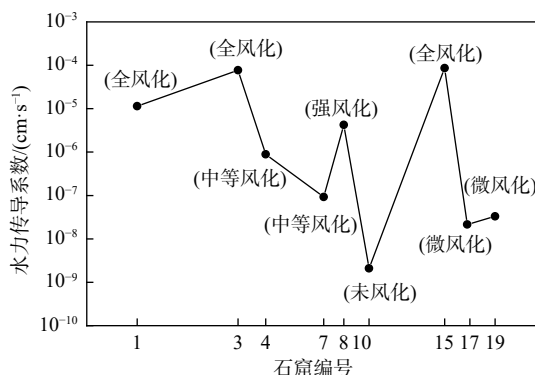


图 9 不同窟体砂岩的水力传导系数

Fig. 9 Hydraulic conductivities of sandstone samples in various grottoes

从图 9 可以看出, 全风化或强风化时(1、3、8 和 15 窟), 4 个窟水力传导系数为 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, 其中全风化时(15 窟)的水力传导系数最大; 中等风化时(4 和 7 窟), 水力传导系数为 $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$; 未风化或微风化时(10、17 和 19 窟), 水力传导系数为

$1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$, 其中未风化时(10窟)的水力传导系数最小。

综上所述,孔喉半径比、水力传导系数与风化程度呈正相关;石窟风化程度越高,则孔喉半径比和水力传导系数越大;孔喉半径比对不同窟体砂岩水力传导系数也有影响,孔喉比半径越大、水力传导系数也越大。

3 结论

(1)根据云冈石窟砂岩 SEM 图像处理结果,全风化或强风化、中等风化、未风化或微风化时,颗粒形状分别呈圆形和亚圆形、亚圆形和次棱角、棱角和次棱角,平均颗粒粒径分别为 $9 \sim 17 \mu\text{m}$ 、 $4 \sim 9 \mu\text{m}$ 、 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 。

(2)SEM 图像中,全风化或强风化、中等风化、未风化或微风化时,孔隙平均长轴长度分别为大于 $40 \mu\text{m}$ 、 $25 \sim 35 \mu\text{m}$ 、 $15 \sim 25 \mu\text{m}$,孔隙平均面积分别为大于 $1\,000 \mu\text{m}^2$ 、小于 $500 \mu\text{m}^2$ 、 $240 \sim 600 \mu\text{m}^2$ 。

(3)根据孔喉连通渗流模型,随着石窟风化程度的增加,孔喉半径比也不断增大:全风化或强风化、中等风化、微风化和未风化时,孔喉半径比分别为 $9 \sim 14$ 、 $7 \sim 9$ 、 $4 \sim 6$ 。

(4)对于孔喉连通特征来说,风化程度越高,水力传导系数越大:全风化或强风化、中等风化、未风化或微风化时,水力传导系数分别为大于 $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、 $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 、 $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$;水力传导系数的整个变化范围为 $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。

参考文献 (References) :

- [1] 孙寅森,郭少斌.基于图像分析技术的页岩微观孔隙特征定性及定量表征[J].地球科学进展,2016,31(7):751-763. [SUN Yinsen, GUO Shaobin. Qualitative and quantitative characterization of shale microscopic pore characteristics based on image analysis technology[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(7): 751-763. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 张鹏飞,卢双舫,李俊乾,等.基于扫描电镜的页岩微观孔隙结构定量表征[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(2):19-28. [ZHANG Pengfei, LU Shuangfang, LI Junqian, et al. Quantitative characterization of microscopic pore structure for shales using scanning electron microscopy[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2018, 42(2): 19-28. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张吉群,胡长军,和冬梅,等.孔隙结构图像分析方法及其在岩石图像中的应用[J].测井技术,2015,39(5):550-554. [ZHANG Jiqun, HU Changjun, HE Dongmei, et al. Image analysis method of pore structure and its application in rock image[J]. *Well Logging Technology*, 2015, 39(5): 550-554. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 周宏伟,谢和平.多孔介质孔隙度与比表面积的分形描述[J].西安矿业学院学报,1997,17(2):97-102. [ZHOU Hongwei, XIE Heping. Fractal description of porosity and specific surface area of porous media[J]. *Journal of Xi'an Mining Institute*, 1997, 17(2): 97-102. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 唐朝生,施斌,王宝军.基于SEM土体微观结构研究中的影响因素分析[J].岩土工程学报,2008,30(4):560-565. [TANG Chaosheng, SHI Bin, WANG Baojun. Factors affecting analysis of soil microstructure using SEM[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(4): 560-565. (in Chinese with English abstract)]
- [6] BENAVENTE D, PLA C, CUETO N, et al. Predicting water permeability in sedimentary rocks from capillary imbibition and pore structure[J]. *Engineering Geology*, 2015, 195: 301-311.
- [7] BERNABÉ Y, LI M, MAINEULT A. Permeability and pore connectivity: a new model based on network simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2010, 115(B10): B10203.
- [8] NISHIYAMA N, YOKOYAMA T. Estimation of permeability of sedimentary rocks by applying water-expulsion porosimetry to Katz and Thompson model[J]. *Engineering Geology*, 2014, 177: 75-82.
- [9] 孟田华,杨成全,卢玉和,等.SEM和X-Ray对云冈石窟石雕风化物的分析[J].山西大同大学学报(自然科学版),2014,30(4):17-21. [MENG Tianhua, YANG Chengquan, LU Yuhe, et al. Analysis of the Yungang grottoes weathered stone with SEM and X-ray approaches[J]. *Journal of Shanxi Datong University (Natural Science Edition)*, 2014, 30(4): 17-21. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 谢云鹏,陈秋南,黄小城,等.深埋隧道炭质板岩微观结构及单轴压缩试验研究[J].水文地质工程地质,2020,47(1):96-102. [XIE Yunpeng, CHEN Qiunan, HUANG Xiaocheng, et al. An experimental study of microstructure and uniaxial compression test of carbonaceous slate in a deep buried tunnel[J].

- Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(1): 96 – 102. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王光谦, 孙其诚. 颗粒物质及其多尺度结构统计规律[J]. 工程力学, 2009, 26(增刊2): 1 – 7. [WANG Guangqian, SUN Qicheng. Granular matter and the scaling laws[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(Sup2): 1 – 7. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 李日运, 吴林峰. 岩石风化程度特征指标的分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3830 – 3833. [LI Riyun, WU Linfeng. Research on characteristic indexes of weathering intensity of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3830 – 3833. (in Chinese with English abstract)]
- [13] BARAKA-LOKMANE S, MAIN I G, NGWENYA B T, et al. Application of complementary methods for more robust characterization of sandstone cores[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(1): 39 – 56.
- [14] THEODOROPOULOU M A, SYGOUNI V, KAROUTSOS V, et al. Relative permeability and capillary pressure functions of porous media as related to the displacement growth pattern[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2005, 31(10/11): 1155 – 1180.
- [15] 谢渊, 王剑, 江新胜, 等. 鄂尔多斯盆地白垩统含水层储水岩石特征与介质结构研究[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(2): 11 – 19. [XIE Yuan, WANG Jian, JIANG Xinsheng, et al. Structure of water-bearing media and characteristics of water-bearing rocks of the Lower Cretaceous aquifer in the Ordos Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(2): 11 – 19. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 杨建, 康毅力, 李前贵, 等. 致密砂岩气藏微观结构及渗流特征[J]. 力学进展, 2008, 38(2): 229 – 236. [YANG Jian, KANG Yili, LI Qiangui, et al. Characters of micro-structure and percolation in tight sandstone gas reservoirs[J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(2): 229 – 236. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 郭永春, 谢强, 文江泉. 红层软岩结构特征与工程评价初探[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(6): 86 – 90. [GUO Yongchun, XIE Qiang, WEN Jiangquan. Engineering criterion of structure-stability of soft rocks of red beds[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(6): 86 – 90. (in Chinese with English abstract)]
- [18] DESBOIS G, URAI J L, KUKLA P A, et al. High-resolution 3D fabric and porosity model in a tight gas sandstone reservoir: a new approach to investigate microstructures from mm- to nm-scale combining argon beam cross-sectioning and SEM imaging[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 78(2): 243 – 257.
- [19] HAMMECKER C, MERTZ J D, FISCHER C, et al. A geometrical model for numerical simulation of capillary imbibition in sedimentary rocks[J]. Transport in Porous Media, 1993, 12(2): 125 – 141.
- [20] BENAVENTE D, LOCK P, ÁNGELES GARCÍA DEL CURA M, et al. Predicting the capillary imbibition of porous rocks from microstructure[J]. Transport in Porous Media, 2002, 49(1): 59 – 76.
- [21] TSAKIROGLOU C D, IOANNIDIS M A. Dual-porosity modelling of the pore structure and transport properties of a contaminated soil[J]. European Journal of Soil Science, 2008, 59(4): 744 – 761.
- [22] 黄继忠. 云冈石窟地质特征研究[J]. 东南文化, 2003(5): 91 – 93. [HUANG Jizhong. A study on the geological character of Yungang grotto[J]. Southeast Culture, 2003(5): 91 – 93. (in Chinese)]
- [23] CAI J C, ZHANG Z E, WEI W, et al. The critical factors for permeability-formation factor relation in reservoir rocks: Pore-throat ratio, tortuosity and connectivity[J]. Energy, 2019, 188: 116051.

编辑: 张明霞