



敦煌石窟砾岩多尺度颗粒结构与孔隙特征

张慧慧^{1,2}, 王彦武², 郭青林², 唐春安³

1. 故宫博物院, 北京 100009; 2. 敦煌研究院 国家古代壁画与土遗址保护工程技术研究中心, 甘肃 敦煌 736200;

3. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024

摘要 石窟围岩的颗粒与孔隙结构特征直接影响石窟结构的长期稳定性。以敦煌石窟砾岩为研究对象, 选取榆林窟东崖酒泉组砾岩, 开展颗粒分析、矿物学检测与 CT 扫描试验。研究发现: ① 砾岩由大粒径砾石主导骨架 (> 10 mm 占 73.6%), 细颗粒呈分级填充特征, 颗粒形态以球形最常见, 不规则颗粒导致局部孔隙形态复杂; ② CT 结果表明砾岩孔隙率平均约 5%, 但沿 z 方向在 0~41% 之间剧烈波动, 孔隙与喉道呈多尺度分布, 中等尺度孔隙 (约 200 μm) 和较短喉道 (约 40 μm) 最为常见, 孔喉比集中在 2 左右, 体现出较好的连通性; ③ 矿物构造表现为“硬砾石-弱胶结”状态, 砾石以石英、长石为主, 胶结物富含方解石和绿泥石, 决定了其水敏性和易劣化特征。多尺度结构、孔隙网络与矿物相共同控制砾岩的渗透性与风化敏感性, 为理解敦煌石窟围岩的耐久性 & 制定保护策略提供了科学依据。

关键词 敦煌石窟; 砾岩; 砾石颗粒; CT 扫描; 孔隙结构

中图分类号: K854.3 DOI: 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2026-02-009

Multi-scale grain structure and pore characteristics of conglomerate from the Dunhuang Grottoes

ZHANG Huihui^{1,2}, WANG Yanwu², GUO Qinglin², TANG Chun'an³

1. The Palace Museum, Beijing 100009, China;

2. National Engineering Research Center for Conservation of Ancient Wall Paintings and Earthen Sites, Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, China;

3. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

Abstract The grain and pore structures of grotto surrounding rock directly influence the long-term stability of the cave system. Using conglomerate from the Jiuquan Formation on the eastern cliff of the Yulin Grottoes as the research object, particle-size analysis, mineralogical testing, and CT scanning were conducted. The results show that: ① The conglomerate is dominated by a coarse-gravel framework (> 10 mm accounting for 73.6%), with fine particles filling the intergranular spaces in a graded manner. Spherical grains are most common, whereas irregular grains lead to locally complex pore geometries. ② CT results indicate an average

收稿日期: 2025-10-26 修回日期: 2025-12-15

基金项目: 国家自然科学基金 (42502282); 甘肃省科技创新人才计划 (25JR6KA017); 甘肃省科技计划项目 (23ZDGF001)。

第一作者: 张慧慧, 女, 博士, 馆员, 从事岩土质文物预防性保护研究, huihzhang@126.com。

通信作者: 王彦武, 男, 博士, 副研究馆员, 从事石质和土遗址保护研究, wangyanwu@dha.ac.cn。

porosity about 5%, but with strong fluctuations ranging from 0 ~ 41% along the z-axis. Pores and throats exhibit a multiscale distribution; medium-sized pores (about 200 μm) and short throats (about 40 μm) are the most frequent, with pore-throat ratios concentrated around 2, indicating relatively good connectivity. ③The rock mass manifests as a "hard gravel-weakly cemented" structure from a mineralogical perspective, gravels are mainly quartz and feldspar, while the cement is rich in calcite and chlorite, imparting water sensitivity and susceptibility to deterioration. The multiscale structure, pore network, and mineral phases jointly control the permeability and weathering sensitivity of the conglomerate. These findings provide a scientific basis for understanding the durability of Dunhuang Grottoes surrounding rock and for formulating appropriate conservation strategies.

Keywords Dunhuang Grottoes; conglomerate rock; gravel particles; CT scanning; pore structure

敦煌石窟群位于丝绸之路重镇敦煌市以东的祁连山北麓岩壁上,是集佛教艺术与工程岩体奇观于一体的文化遗产^[1]。石窟群始建于公元 366 年,历经北凉、隋唐至元代持续开凿,至今保存有洞窟 800 余座,壁画约 45 000 m^2 ,彩塑 2 000 余尊^[2],具有不可再生和需要原位保护的表征^[3]。敦煌石窟所赋存的地层由洪水搬运碎屑物沉积而成,受地质演化历史中的环境气候等因素控制,导致砾石颗粒在空间分布上呈现随机性和离散性^[4]。石窟赋存地层主体由块状砾石与细颗粒基质交错胶结组成,胶结物类型多为钙质和泥质胶结^[5],沉积物主要包含花岗岩、石英岩、辉长岩、千枚岩、片麻岩和石灰岩等碎屑颗粒^[6]。该地层具有明显的水平层理,不同地层的颗粒级配、胶结强度与孔隙结构存在显著差异^[4,7],这种多尺度、非均质特征对岩体力学性能及渗透性具有深远影响,是石窟稳定性与保护研究的关键^[8]。

在砾石颗粒特征研究方面,学者们通过分析沉积构造、颗粒特征和支撑方式等构建岩相分类体系,揭示岩相与储层物性的关联。例如,吕超等采用高清相机与分割算法获取河流冲积层圆砾石颗粒的二维轮廓,分析其形貌和堆积特性^[9];单祥等聚焦于储层敏感性分析,得出百口泉组储层的盐敏性、速敏性和碱敏性特点^[10];张婧茹等构建不同级配特征的砾岩数值模型,分析了砾石级配参数对砾岩力学性质和裂缝扩展规律的影响^[11]。在岩石孔隙结构特征研究方面,传统方法如压汞法、气体吸附法、核磁共振等虽能获取孔隙大小分布、比表面积等参数,但在精细刻画岩石内部复杂三维结构上存在局限^[12]。近年来,CT 扫描技术在岩石孔隙结构研究中的应用日益广泛,能够提供高分辨率的孔隙与基质分布信息,实现材料内部结构的三维无损成像,为深入研究砾岩

孔隙结构的细节特征提供了新的途径^[8]。例如,熊健等运用微 CT 技术深入剖析了岩样孔隙结构,发现其孔隙形状多不规则且孔喉尺寸各异^[12]。然而,现有砾岩砾石颗粒形貌和孔隙结构特征研究成果多集中在油气勘探开发领域,针对敦煌石窟砾岩地层试样的相关研究相对较少,且其内部结构与渗透性的关联有待深入探讨。

已有关于敦煌石窟围岩的工程地质与力学研究多集中于宏观岩体工程特性与渗透性测试^[6],以及现场水分分布与宏观稳态分析^[7]。这些工作为认识石窟围岩整体稳定性提供了重要基础。然而,针对砾岩内砾石颗粒形态、三维空间分布及其与孔喉结构耦合影响的高分辨率、无损三维分析在文化遗产保护语境中仍较少。本文通过将工业 CT 三维成像、三维激光扫描颗粒形貌重构与孔喉球棒模型相结合,从颗粒-基质-孔喉 3 层尺度耦合分析砾岩的孔隙结构特征,弥补了现有研究在微观孔喉结构与砾石形貌量化关联性方面的空白,从而为石窟围岩的渗透性、干湿循环响应与病害发育机制提供更直接的物理依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

本研究从榆林窟东崖南侧酒泉组砾岩地层开采长约 120 cm、宽 60 cm、厚 75 cm 的砾岩石块开展实验室研究。砾岩的取样、切割、研磨和抛光等工作严格参照《水利水电工程岩石试验规程》^[13]中的相关标准执行,以确保试样的质量和实验结果的可靠性。

1.2 实验方法

构建如图 1 所示砾岩多尺度模型,将从榆林窟开采的酒泉系砾岩试样划分为 4 个尺度。具体

如下:宏观尺度[20 cm, 1 m]、中观尺度[1 mm, 20 cm)、细观尺度[0.1 mm,1 mm)、微观尺度小于0.1 mm。依次开展 CT 扫描、颗分实验和三维激光扫描试验,用于观察砾岩试样的剖面结构和

砾石颗粒的形貌特征,进一步通过扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线衍射分析(XRD)了解不同颗粒的细-微观形貌特征和矿物构成。

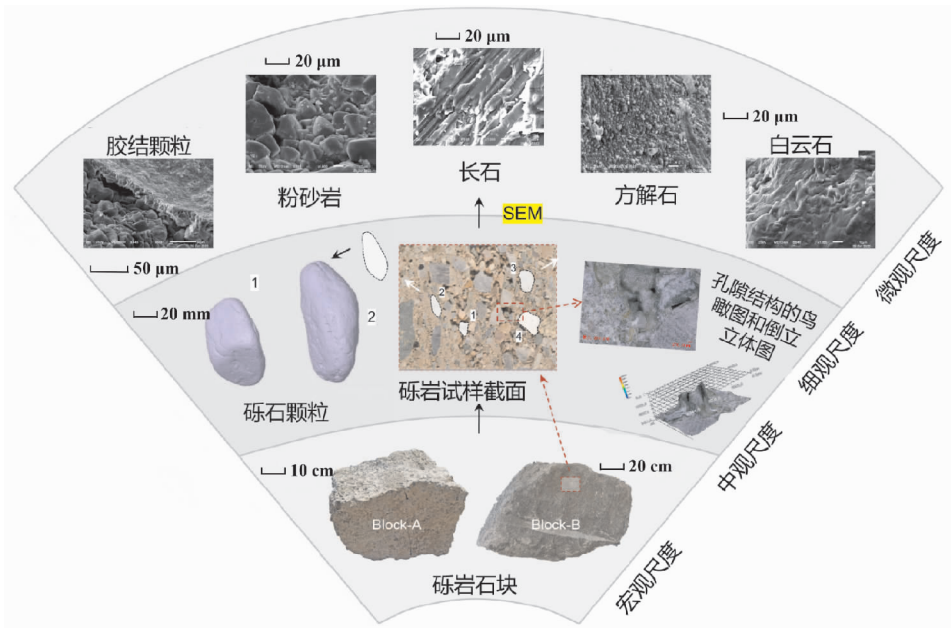


图 1 砾岩多尺度模型

Fig. 1 Multi-scale structural modelling of conglomerates

计算机断层扫描(CT)技术通过检测 X 射线穿透样品时的衰减系数差异,实现材料内部结构的三维无损成像,衰减系数(μ)主要由物质的密度(ρ)与原子序数(Z)共同决定。对于砾岩体系而言,其主要组分为硅酸盐与碳酸盐矿物,化学组成差异较小,因此 CT 图像中的灰度值可近似反映局部区域的相对密度分布。灰度值越高,表示该区域密度越大、结构更致密;灰度值较低则对应孔隙或松散部分。本研究采用 nanoVoxel-3000 系列工业 CT 设备(天津三英精密仪器股份有限公司),以电压 150 kV、电流 180 μ A、分辨率 47.16 μ m 的参数对砾岩试样进行 CT 扫描,获取其颗粒-孔隙三维分布特征。

基于《土工试验方法标准》^[14],采用振筛法对砾岩颗粒进行颗分试验。将破碎后样品依次通过孔径 60、40、20、10、5、2 mm 的标准筛,振筛分离后称量各粒径段颗粒质量,计算质量占比并绘制级配曲线,分析砾岩的粒度组成特征。接下来,使用三维激光扫描技术获取砾岩试样中不同种类和形状的砾石颗粒的三维点云数据,分析砾石颗粒的形态特征。

通过 JSM-6610LV 型 SEM(日本 JEOL,分辨

率 5.0 nm,电压 25 kV)获取砾岩颗粒表面形貌特征。使用 Dmax/2500 型 X 射线衍射分析仪,在 40 kV 电压和 100 mA 电流条件下,采用连续扫描方式,在 2θ 衍射角度为 $3^\circ \sim 40^\circ$ 的范围内对砾岩试样不同的砾石颗粒和胶结物粉末进行扫描,步长为 0.02° ,每步的扫描时间为 2 s。最后,使用 MDI JADE 软件对衍射数据进行分析,以确定不同样品的矿物组成。

2 砾岩结构特征

2.1 砾岩颗粒分布特征

图 2 展示了砾岩试样中不同砾石颗粒的粒径分布。根据粒度划分,4 块砾岩样品被归类为卵石砾岩。其中,粒径为[10, 20) mm 的颗粒占比最大,均值为 39.18%;粒径为[20, 40) mm 的颗粒占比为 24.17%;粒径大于 40 mm 的颗粒占比为 10.25%。粒径大于等于 10 mm 的砾石颗粒占比为 73.6%,是砾岩样品的主要构成部分。粒径为[5,10) mm 的颗粒占比为 14.57%,粒径为[2,5) mm 的颗粒占比为 7.07%,而粒径小于 2 mm 的砂粒占比最小,仅为 4.76%。

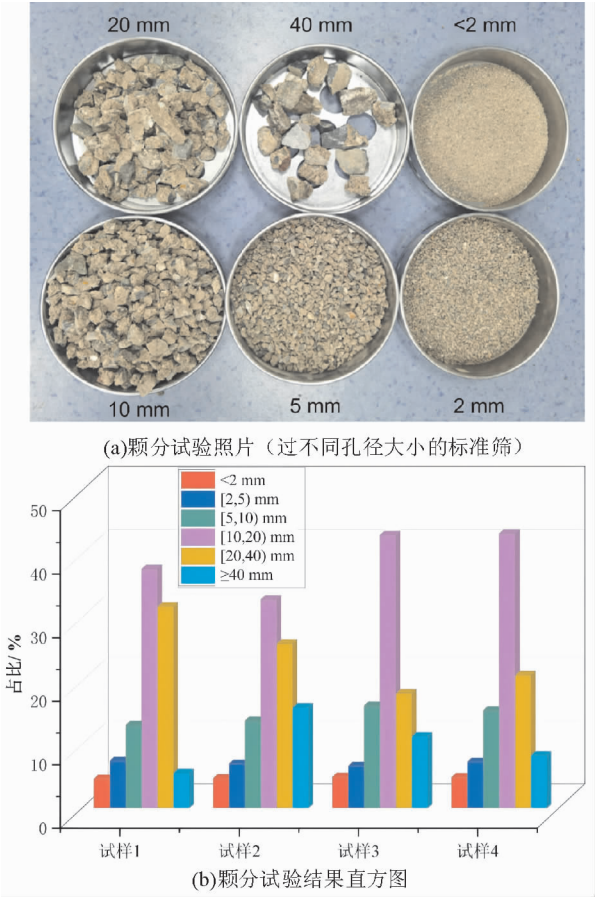


图 2 砾岩试样室内筛分试验结果

Fig. 2 Particle testing of conglomerate samples

使用方差分析不同试样中各粒径颗粒的分布情况, 粒径小于 2 mm 的颗粒方差为 0.01, 粒径为[2, 5) mm 的颗粒方差为 0.09, 粒径为[5, 10) mm 的颗粒方差为 1.5, 粒径为[10, 20) mm 的颗粒方差为 18.33, 粒径为[20, 40) mm 颗粒的方差为 26.97, 粒径大于等于 40 mm 的颗粒方差为 14.62。以上数据表明, 粒径大于等于 10 mm 的颗粒分布具有较大的离散性, 这可能与砾岩地层在沉积过程中, 水流搬运颗粒的随机性有关。相比之下, 粒径小于 10 mm 的颗粒的分布较为均匀, 细颗粒的均匀分布可能与沉积过程中不同颗粒沉积的先后顺序有关, 大颗粒因自重较大首先沉积在河底, 形成砾岩骨架, 而细小颗粒随后沉积并填充砾岩骨架中的孔隙, 逐步形成较为均匀的分布。

2.2 砾石颗粒形貌特征

收集尺寸和形状具有代表性的砾石颗粒, 使用三维激光扫描仪获取各砾石颗粒的三维数字点云文件, 构建图 3 所示砾石三维数字模型。将砾石最大投影面中的最长段作为砾石的长轴(L),

最宽段为中轴(I), 最大厚度为短轴(S)^[15]。根据 Zingg^[16] 分类方法, 如表 1 所示, 基于 L 、 I 、 S 的比例大小, 砾石可以分为扁长形 (blades)、扁平形 (discoids)、棍棒形 (rods) 和球形 (spheroids) 4 种形状。实验室砾岩试样中砾石颗粒的形状分类见图 4, 球形颗粒比例最大, 其次为扁平形、棍棒形和扁长形。

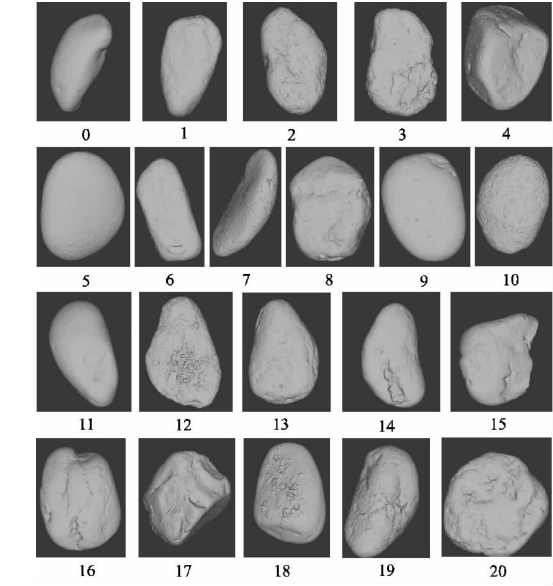


图 3 砾石颗粒的三维数字模型

Fig. 3 3D digital model of gravel particles

表 1 砾石形状分类^[17]

Tab. 1 Classification of gravel morphology^[17]

分类	I/L	S/I	形状
I	$>2/3$	$<2/3$	扁平形
II	$>2/3$	$>2/3$	球形
III	$<2/3$	$<2/3$	扁长形
IV	$<2/3$	$>2/3$	棍棒形

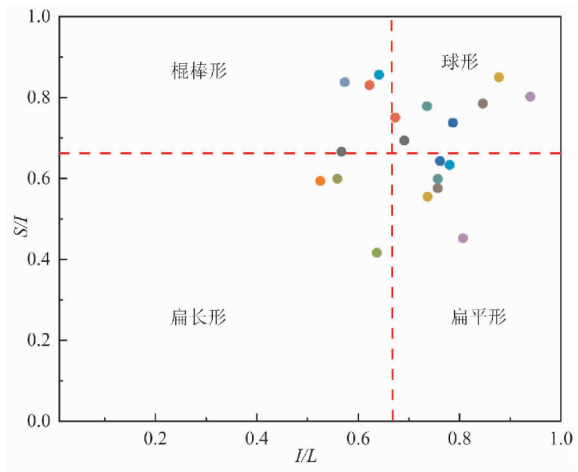


图 4 砾石形状分类图解

Fig. 4 Shape classification of gravels

2.3 砾石颗粒分布特征

基于 CT 扫描图片,通过三维可视化技术,可定量评估不同密度范围内颗粒的大小、分布和体积百分比。图 5 展示了对高密度颗粒(黄色标记,CT 扫描图像中灰度值 $T \geq 200$)、中密度颗粒(紫色标记,CT 扫描图像中灰度值 $100 \leq T < 200$)和低密度颗粒(蓝色标记,CT 扫描图像中灰度值 $T < 100$)的阈值分割与识别结果。高密度颗粒占研究区域的 13%,中密度颗粒占研究区域的 33%,低密度颗粒占研究区域的 49%。

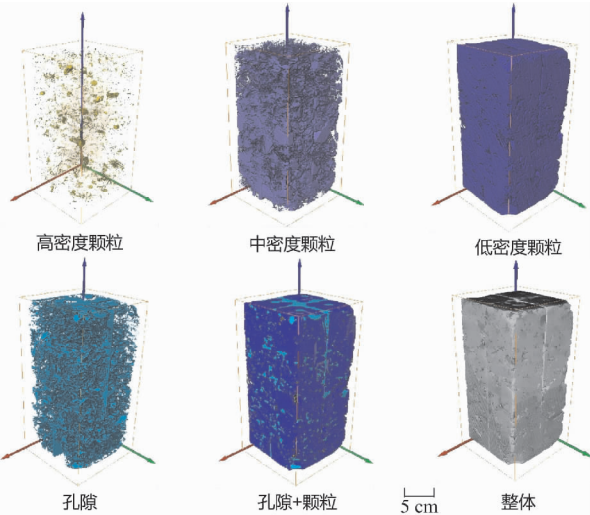


图 5 砾岩试样 CT 扫描三维重构图

Fig. 5 3D reconstruction of CT scan of conglomerate sample

不同密度颗粒以及不同粒径区间的颗粒数量与体积分布统计结果表明:高密度颗粒中等等效直径为 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 的颗粒数量最多,但体积贡献主要来自等效直径大于 $1\,600 \mu\text{m}$ 的颗粒,其体积占比达 46.79%;中密度颗粒的粒径分布较为分散,其中,等效直径 $\leq 100 \mu\text{m}$ 的颗粒数量最多,然而其体积占比仅为 0.06%,相较之下,等效直径大于 $1\,600 \mu\text{m}$ 的颗粒在体积上占据绝对优势,体积占比高达 96.28%;对于低密度颗粒,等效直径 $\leq 100 \mu\text{m}$ 的颗粒数量最多,但体积主要由等效直径大于 $1\,600 \mu\text{m}$ 的颗粒贡献,其体积占比高达 99%,尽管这类颗粒数量最少。

2.4 砾岩内部孔隙分布特征

图 6 显示了根据 CT 扫描图像灰度值对砾岩结构进行的阈值分割,其中,浅蓝色表示孔隙区域,占比约 5%。为了解试样的孔隙分布特征,逐层统计了砾岩试样 CT 扫描图片中的孔隙率,如图 7 所示。 z 轴方向逐层面孔隙率计算公式为: z 轴方向逐层面孔隙率 = z 轴方向逐层孔隙面积/

逐层面面积 $\times 100\%$ 。图 7(b)展示了面孔隙率的变化曲线,显示孔隙率最大值为 41%,最小值约为 0%,这一显著的差异表明砾岩内部孔隙在垂向上的分布极不均匀,曲线呈现明显的波浪式起伏。这种波动特征反映了砾岩内部由不同密度和粒径的颗粒所构成的复杂结构,部分层面存在相对集中的孔隙带,而部分层面几乎无孔隙,显示出典型的非均质性。

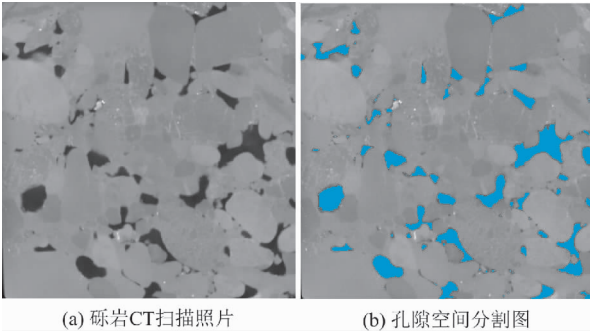


图 6 砾岩 CT 扫描孔隙空间分割图

Fig. 6 Conglomerate rock pore space segmentation based on CT scan image

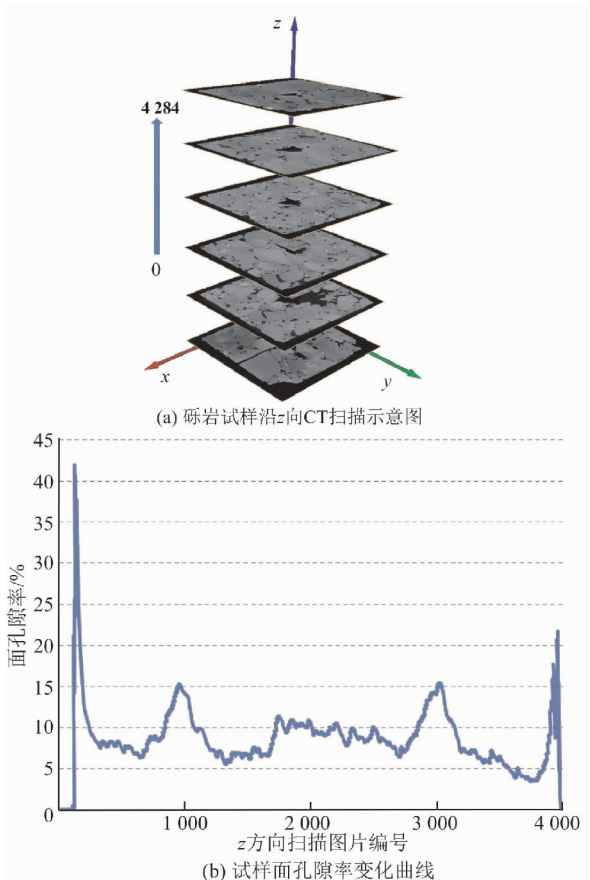


图 7 z 方向扫描切面逐层面孔隙率变化曲线

Fig. 7 Level-by-level porosity variation curves for z -direction scanning profiles

在试样内部截取 $600 \times 600 \times 600$ 像素的数据体(图 8 中红框部分),并基于球棒模型(Pore Network Model)对其孔隙和喉道结构进行精细化定量分析。图 8 显示了分析区域内的孔隙空间分布情况,相关孔喉特征参数见表 2。研究区域内孔隙半径的最大值为 $1\,399.46\ \mu\text{m}$,平均值为 $191.32\ \mu\text{m}$ 。其中,孔隙半径约 $200\ \mu\text{m}$ 的数量最多,占比约 34%,表明中等尺度孔隙在样本中具有较高的普遍性。喉道半径的最大值为 $598.63\ \mu\text{m}$,平均值为 $105.1\ \mu\text{m}$,而最常出现的喉道半径为 $40\ \mu\text{m}$,占比约 26%。喉道长度方面,最大值

可达 $1\,400\ \mu\text{m}$,最常见长度为 $270\ \mu\text{m}$,占比 27.3%。总体来看,该区域的孔隙与喉道均呈现出较强的非均匀性和多尺度特征。孔喉比是影响岩石渗透能力的关键参数。一般而言,较大的孔喉比意味着喉道相对孔体更为狭窄,从而对流体流动形成限制,可能导致渗透性下降。本研究中孔喉比的最大值为 39.55,平均值为 2.25,其中孔喉比约为 2 的情况最为常见,占比 70%。这一分布说明试样中多数孔喉结构保持了相对协调的尺寸比例,流体在孔隙空间内可获得连续的通道。

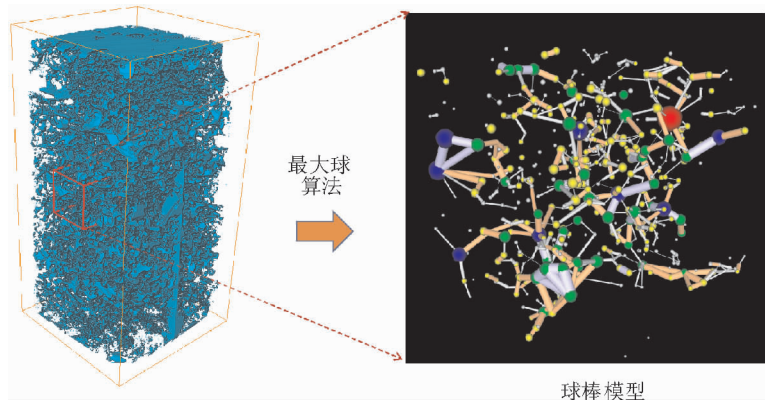


图 8 试样孔喉结构分析示意图
Fig. 8 Schematic of hole throat structure analysis
表 2 孔喉特征参数表
Tab. 2 Characteristic parameters of hole throat

参数	孔隙半径/ μm	喉道半径/ μm	孔喉比	孔隙体积/ μm^3	喉道体积/ μm^3
最大值	1 399.46	598.63	39.55	5.6×10^{10}	3.16×10^9
平均值	191.32	105.10	2.25	8.1×10^8	1.11×10^8

2.5 砾岩物相分析与矿物组成特征

为揭示砾岩中砾石颗粒与胶结物的矿物组成差异,对 8 个代表性砾石样品及 1 个胶结物样品

进行 XRD 分析,其衍射谱图见图 9,定量分析结果见表 3。

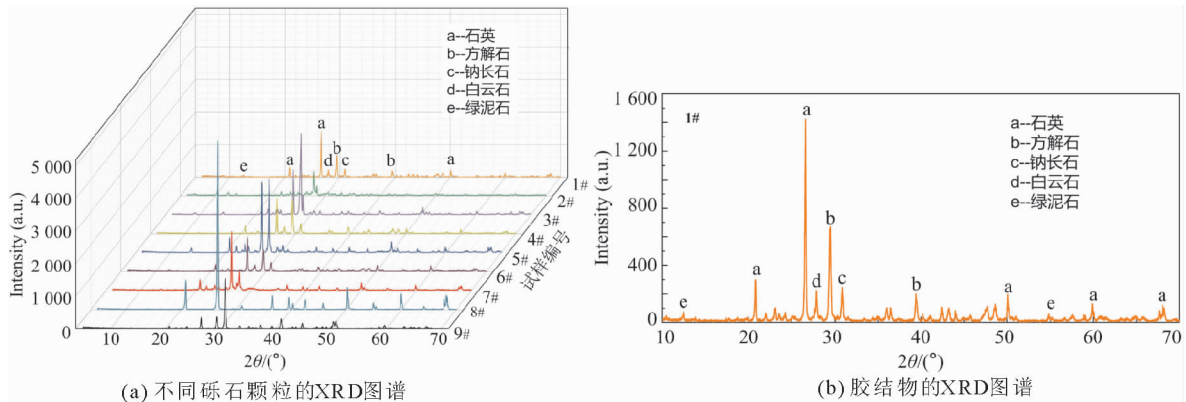


图 9 不同砾石颗粒的 XRD 图谱
Fig. 9 XRD patterns of different gravel particles

表 3 砾岩 XRD 分析结果

Tab. 3 XRD analysis results of different gravel particles

单位:%

样品	石英	方解石	钠长石	白云石	闪石	白云母	绿泥石	钾长石
1#	35.5	28.8	13.5	10.2	4.5	2.7	4.8	
2#	2.5	2.9	54.8		30.2		9.6	
3#	2.5	16.0	79.9	1.6				
4#	26.9	40.8	13.3	13.9		1.8	3.3	
5#	25.9	3.5	70.6					
6#	34.9	33.3	16.3	15.5				
7#	44.3	3.4	36.3			2.0		14.0
8#	94.8	1.2		4.0				
9#	10.1	16.7		73.2				

样品 1 为砾岩胶结物,主要由石英、方解石、钠长石和白云石组成,伴有闪石、白云母及少量绿泥石。绿泥石的存在表明胶结物中含有一定比例的黏土组分,具有水敏性和膨胀潜势,可能导致干湿循环下的微裂隙扩展。样品 2~9 为不同砾石颗粒的代表样品,其矿物组成差异明显。样品 2 富含钠长石(54.8%)与白云石(30.2%),含少量石英与方解石;样品 3 以钠长石(79.9%)为主,方解石含量次之;样品 4 的矿物成分较复杂,含方解石(40.8%)、石英、钠长石与少量绿泥石;样品 5 以钠长石(70.6%)和石英为主;样品 6 由石英(31.2%)、方解石(33.3%)及少量白云石(15.5%)构成;样品 7 以石英(44.3%)和钠长石为主,伴随少量方解石与绿泥石;样品 8 几乎完全由石英(94.8%)构成;样品 9 则富含钠长石(62.1%)和方解石(28.3%)。结果表明,石英在大多数砾石中占主导地位,显示出高硬度与化学稳定性,是砾岩骨架强度的重要来源,钠长石和方解石则反映出岩石经历了复杂的成岩与胶结过程。部分样品中较高的方解石含量说明砾石颗粒也可能经历了次生钙质胶结。

3 砾岩结构对渗透性的影响分析

3.1 砾石颗粒对内部孔隙结构的影响

从颗粒分布情况来看,粒径大于 10 mm 的砾石颗粒占比达 73.6%,是砾岩的主要构成部分,这些较大颗粒在沉积过程中先沉积,形成了砾岩的基本骨架。在骨架形成后,粒径较小的颗粒逐渐沉积并填充到骨架颗粒之间的孔隙中。这种不

同粒径颗粒的分级填充,使得砾岩内部孔隙结构复杂多样。大颗粒之间存在较大孔隙,而小颗粒填充在其中,形成了较小的孔隙。这种孔隙大小不一的分布特征,为流体在砾岩中的流动提供了多种可能的通道,影响了砾岩的渗透性。

在砾石颗粒形貌方面,球形颗粒比例最大,其次为扁平形、棍棒形和扁长形。不同形状的颗粒在堆积时会形成不同形状的孔隙。球形颗粒在堆积时,颗粒之间形成的孔隙相对较为规则,多呈近似球形或椭球形,孔隙的连通性较好,有利于流体流动。而扁平形、棍棒形和扁长形颗粒在堆积时,由于颗粒形状的不规则性,会使孔隙形状变得复杂,可能出现狭窄的裂缝状孔隙或不规则的通道。这些复杂形状的孔隙会对流体流动产生较大的阻力,降低砾岩的渗透性^[17-18]。

基于 CT 扫描的分析结果显示,高密度、中密度和低密度颗粒在砾岩中所占比例不同,其分布也存在差异。高密度颗粒相互胶结形成相对致密的骨架结构;中密度颗粒分布较广,填充在高密度颗粒之间;低密度颗粒则多分布在孔隙和颗粒间的薄弱部位。这种不同密度颗粒的分布差异导致了孔隙连通性的变化。在高密度颗粒集中区域,孔隙连通性较差,流体流动困难,而在低密度颗粒较多的区域,孔隙连通性相对较好,有利于流体流动^[19]。

3.2 砾岩孔隙特征对渗透性的影响

孔隙率是影响渗透性的重要因素。本研究中 CT 扫描砾岩试样的孔隙率约为 5%,从 z 轴方向逐层面孔隙率变化曲线来看,孔隙率在试样内部分布极不均匀,最大值可达 41%,最小值接近

0%。这种不均匀的孔隙分布意味着流体在岩石内部的渗流路径复杂多变,高孔隙率区域为流体提供了更多的潜在渗流通道,而低孔隙率区域则可能对流体流动形成阻碍。孔隙率越大,流体在其中流动的通道越多,理论上渗透性越好。但在实际情况中,孔隙率高的区域可能由于孔隙分布不均匀或孔隙形状复杂,使得流体在岩石内部的流动速度和方向发生改变,从而影响整体的渗透性^[20]。

较大的孔隙提供了流体流动的主要通道,而喉道的大小和连通性则决定了流体能否顺利通过^[21]。一般来说,喉道半径越大、孔喉比越小,流体流动的阻力越小,渗透性越好。在本研究中,砾岩试样具有较大的孔隙半径(最大值为 1 399.46 μm ,平均值为 191.32 μm ,200 μm 左右的孔隙半径最为常见,占比约 34%)和较高的孔喉比(最大值为 39.55,平均值为 2.25,最常见的孔喉比为 2,占比 70%),这使得其具有一定的渗透潜力,但同时也存在部分较小喉道限制了流体流动的情况。

孔隙的形态和连通性也对渗透性有着关键作用^[22]。根据球棒模型分析,试样中存在各种形状和大小的孔隙,以及相互连接的喉道,这些喉道的半径和长度差异较大,且喉道的连通性决定了流体能否在孔隙之间顺利流动。本研究中,喉道半径的平均值为 105.1 μm ,而最常见的喉道半径为 40 μm ,占比约 26%。较小的喉道半径会导致流体流动阻力增大,降低渗透性,但同时,较大的喉道半径(如最大值 598.63 μm)又为流体提供了一定的快速渗流通道。因此,这种孔隙结构使得砾岩的渗透性具有一定的复杂性和多样性。

3.3 矿物相与胶结特征对孔隙结构及渗透性的影响

砾岩中砾石颗粒与胶结物的矿物组成共同决定了其孔隙结构与力学响应特征。XRD 分析表明,砾石颗粒以石英和钠长石为主,局部伴有方解石与白云石,胶结物则富含方解石和绿泥石,呈明显的钙质-泥质双重胶结特征。石英含量高的砾石(如样品 7、8)硬度大、化学稳定性高,形成坚硬的骨架结构,而富含方解石或白云石的胶结物则易受化学溶蚀或湿干交替作用影响,导致孔隙边界弱化和局部脱落。

CT 三维重构结果显示,砾岩内部孔喉结构呈现明显的非均质性:高密度区多对应于方解石胶结富集带,孔隙率低、孔喉不连通;低密度区则常

富集绿泥石或黏土组分,孔隙率高、连通性强。这种“硬质砾石-弱胶结基质-可渗透孔隙”结构,使砾岩在受力或环境循环作用下表现出明显的应力集中与微裂纹沿界面扩展的特征。方解石胶结区的脆性破坏与绿泥石胶结区的可塑性变形共同导致砾岩的力学非均质性和疲劳敏感性。这种矿物学-孔隙结构的耦合效应解释了敦煌石窟围岩在干湿、冻融环境下易沿砾石-基质界面产生剥落与崩解的微观机制。因此,从多尺度视角看,砾岩的力学稳定性不仅受宏观结构与孔隙度控制,更源于微观矿物相的组合与胶结方式。高石英含量的砾石提供强度框架,钙质胶结决定孔隙闭合程度,而黏土矿物的存在则支配湿度响应与裂隙演化过程。这一认识为揭示敦煌石窟围岩长期风化与退化规律提供了矿物学基础,也为文物岩体的环境响应预测与防护材料匹配提供了科学依据。

4 结论

本研究基于榆林窟酒泉组砾岩,构建了宏观-中观-细观-微观多尺度结构模型,系统揭示了砾岩的颗粒组成、三维结构、孔隙特征与矿物组成,对认识敦煌石窟围岩的结构非均质性与渗透机制具有重要科学价值,主要结论如下。

1) 砾岩颗粒组成具有显著的级配特征,大粒径砾石主导骨架结构,细颗粒主要填充于骨架孔隙中,形成分级填充结构。大颗粒分布的高离散性反映了沉积过程中强烈的水动力差异,而小颗粒的均匀分布体现了后期沉积的选择性填充过程。

2) 砾石颗粒形貌多样,以球形为主,其次为扁平形、棍棒形和扁长形。球形颗粒有利于形成规则且连通性较好的孔隙结构,而不规则颗粒易导致裂缝状或狭窄孔隙增多。整体来看,砾岩内部孔隙结构高度非均质,孔喉尺寸呈多模态分布,多数孔隙保持较好连通性,但局部狭窄喉道仍对流体贯通形成限制。

3) 砾石颗粒以石英与长石类矿物为主,提供高强度骨架。胶结物富含方解石与绿泥石,表现出钙质-泥质混合胶结特征,易受干湿循环、溶蚀作用影响。局部富含方解石区对应 CT 中密度高、孔隙率低的致密带,而绿泥石富集区对应低密度、高孔隙率的弱界面。

4) 砾岩的内部结构、矿物相与孔隙特征共同控制其渗透性与风化敏感性。大粒径骨架决定主要渗流路径,细粒的填充作用与不规则颗粒的存在易造成局部堵塞。孔隙结构的强非均质性导致渗流呈现多路径、非稳定特征。钙质胶结区脆性大、易产生界面裂纹,绿泥石富集区水敏性强、易膨胀软化,使砾石-基质界面成为优先弱化带。

致谢:本文得到“北京故宫文物保护基金会”专项经费和香港赛马会全力支持,公益慈善研究院独家捐助。

参考文献

- [1] 苏国庆,杨惠福,樊锦诗. 甘肃石窟志[M]. 兰州:甘肃教育出版社,2011:5-15.
- [2] 赵晓星. 莫高窟之外的敦煌石窟[M]. 兰州:甘肃人民美术出版社,2017:11-17.
- [3] 李最雄. 丝绸之路古遗址保护[J]. 中国文化遗产, 2004(3):118-122.
- LI Z X. Protection of ancient sites along the Silk Road [J]. Chinese Cultural Heritage, 2004(3):118-122.
- [4] 王旭东,张明泉,张虎元,等. 敦煌莫高窟洞窟围岩的工程特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6):756-761.
- WANG X D, ZHANG M Q, ZHANG H Y. et al. Engineering characteristics of rock surrounding of the Mogao Grottoes in Dunhuang [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6):756-761.
- [5] 李宝兴. 论甘肃西部“洞窟地层”的特征与时代[J]. 甘肃地质, 1987(2):61-77.
- LI B X. The features and ages of the "Grottoes strata" in west part of Gansu Province [J]. Gansu Geology, 1987(2):61-77.
- [6] 王旭东,郭青林,李最雄,等. 敦煌莫高窟洞窟围岩渗透特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10):3139-3144.
- WANG X D, GUO Q L, LI Z X. et al. Research on permeability of surrounding rock at Dunhuang Mogao Grottoes [J]. Geotechnical Mechanics, 2010, 31(10):3139-3144.
- [7] 王彦武,王旭东,朱毓,等. 甘肃瓜州榆林窟东崖体水分分布特征研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(2):238-243.
- WANG Y W, WANG X D, ZHU Y. et al. The moisture characteristics of surrounding rocks in the eastern Cliff of the Yulin Grottoes, Guazhou, Gansu Province [J]. Journal of Lanzhou University, 2021, 57(2):238-243.
- [8] ZHANG H H, GUO Q L, WANG Y W, et al. Cross-scale analysis on the mechanical behavior of the conglomerate of Yulin Grottoes in China[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024, 178:105750.
- [9] 吕超,张迎宾,刘钢,等. 冲积层砾石颗粒形态特征及其堆积特性[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2021, 40(1):40-48.
- LYU C, ZHANG Y B, LIU G, et al. Gravel particle morphology and accumulation characteristics of alluvial layer[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology, 2021, 40(1):40-48.
- [10] 单祥,徐洋,郭华军,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷北斜坡玛131井区块三叠系百口泉组储层敏感性评价[J]. 地质科技情报, 2017, 36(1):176-182.
- SHAN X, XU Y, GUO H J, et al. Reservoir sensitivity evaluation of the Triassic Baikouquan Formation in Ma131 block of Mabei Slope in Mahu Depression, Junggar Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(1):176-182.
- [11] 张婧茹,闫伟,王剑波,等. 砾石级配参数对砾岩力学性质和裂缝扩展规律的影响[J]. 石油科学通报, 2024, 9(5):798-807.
- ZHANG J R, YAN W, WANG J B, et al. The influence of gravel grading parameters on the mechanical properties and crack propagation of conglomerate[J]. Petroleum Science Bulletin, 2024, 9(5):798-807.
- [12] 熊健,唐勇,刘向君,等. 应用微CT技术研究砂砾岩孔隙结构特征——以玛湖凹陷百口泉组储集层为例[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(2):236-243.
- XIONG J, TANG Y, LIU X J, et al. Using micro-CT scanning technology to study characteristics of pore-Structures in sandy conglomerate: A case from Baikouquan Formation in Mahu Sag, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(2):236-243.
- [13] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程岩石试验规程:SL/T 264—2020[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2020.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社, 2019.
- [15] 王节涛,裴来政,张宏鑫,等. 大别山南麓阳逻组砾石层砾石形貌学研究[J]. 中国地质, 2021, 48(1):139-148.
- WANG J T, PEI L Z, ZHANG H X, et al. Morphology of gravels from the Yangluo Formation in the Southern Piedmont of Dabie Mountains [J]. Geological Chi-

na, 2021, 48(1): 139-148.

[16] 周剑,马刚,周伟,等. 基于 FDEM 的岩石颗粒破碎后碎片形状的统计分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(2): 348-357.

ZHOU J, MA G, ZHOU W, et al. Statistical analysis of fragment shape of rock grain after crushing based on FDEM[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2021, 55(2): 348-357.

[17] 张家发,叶加兵,陈劲松,等. 碎石颗粒形状测量与评定的初步研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 343-349.

ZHANG J F, YE J B, CHEN J S, et al. A preliminary study of measurement and evaluation of breakstone grain shape[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 343-349.

[18] 杨永浩,魏作安,陈宇龙,等. 基于图像处理技术的尾矿颗粒形态研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3689-3695.

YANG Y H, WEI Z A, CHEN Y L, et al. Study on the shapes of tailings particles based on microscopy and image processing technologies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3689-3695.

[19] XUE Q, ZHANG L W, XU L, et al. Computed X-ray tomography investigation of porosity and permeability of the Liujiagou Formation sandstone exposed to CO₂-saturated brine[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2023, 97(3): 946-955.

[20] JIANG M L, ZHANG Y F, LIU Y. Analyzing the micro-pore characteristics of tight oil reservoirs through the implementation of mercury intrusion technique[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(17): 1787.

[21] XU H J, FAN Y R, HU F L, et al. Characterization of pore throat size distribution in tight sandstones with nuclear magnetic resonance and high-pressure mercury intrusion[J]. Energies, 2019, 12(8): 1528.

[22] ZHANG W K, SHI Z J, TIAN Y M. An improved method to characterize the pore-throat structures in tight sandstone reservoirs: Combined high-pressure and rate-controlled mercury injection techniques[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2020, 38(6): 2389-2412.

(编辑 李 静)