工程科学学报
Chinese Journal of Engineering

基于形态学开运算的浸矿体系孔隙结构及其演化特征

王雷鸣 李辉 尹升华 潘晨阳 廖文胜

Pore structure and its evolution characterization in leaching systems *via* morphological open operation

WANG Leiming, LI Hui, YIN Shenghua, PAN Chenyang, LIAO Wensheng

引用本文:
王雷鸣, 李辉, 尹升华, 潘晨阳, 廖文胜. 基于形态学开运算的浸矿体系孔隙结构及其演化特征[J]. 工程科学学报, 2024, 46(2): 199–208. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2022.12.01.001
WANG Leiming, LI Hui, YIN Shenghua, PAN Chenyang, LIAO Wensheng. Pore structure and its evolution characterization in leaching systems *via* morphological open operation[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(2): 199–208. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2022.12.01.001

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.12.01.001

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

矿石颗粒级配对堆浸体系三维孔隙结构的影响

Effects of ore size distribution on the pore structure characteristics of packed ore beds

工程科学学报. 2020, 42(8): 972 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.01.17.002

渗流作用下风化壳淋积型稀土矿细观孔隙结构演化特征

Evolution characteristics of mesoscopic pore structure of weathered crust elution–deposited rare earth ore under solution seepage

工程科学学报. 2021, 43(10): 1283 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.02.24.003

纳米隔热材料的孔隙结构特征与气体热传输特性

Pore structure of nano–porous thermal insulating materials and thermal transport *via* gas phase in their pores

工程科学学报. 2019, 41(6): 788 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.06.011

玄武岩三维细观孔隙模型重构与直接拉伸数值试验

Three–dimensional microscopic model reconstruction of basalt and numerical direct tension tests

工程科学学报. 2019, 41(8): 997 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.08.005

硫化铜矿粒孔隙模型重构与溶液渗流模拟

Pore model reconstruction of copper sulfide ore agglomerate and simulation of solution seepage

工程科学学报. 2021, 43(4): 495 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.02.27.002

不同应力状态下孔隙结构特征对土–水特征曲线的影响

Influence of pore structure characteristics on soil–water characteristic curves under different stress states

工程科学学报. 2017, 39(1): 147 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.01.019

工程科学学报, 第 46 卷, 第 2 期: 199−208, 2024 年 2 月
Chinese Journal of Engineering, Vol. 46, No. 2: 199−208, February 2024
https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2022.12.01.001; http://cje.ustb.edu.cn

基于形态学开运算的浸矿体系孔隙结构及其演化特征

王雷鸣[1,2)], 李　辉[2)], 尹升华[1,2)✉], 潘晨阳[2)], 廖文胜[3)]

1) 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083　2) 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083
3) 核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149
✉通信作者, E-mail: csuysh@126.com

摘　要　立足堆浸体系的偏析分层复杂结构, 结合 X-ray CT 无损探测、形态学开运算处理、MATLAB 和 OsiriX 可视化软件等手段, 引入颗粒间孔隙的当量孔隙尺寸、面积、数量等关键表征参量, 如从二维量化和三维可视化层面揭示浸矿体系中颗粒间孔隙结构特征及其演化规律. 研究发现, 细颗粒夹层呈“包裹体”状且均位于粗矿石颗粒的内部, 分析认为其是造成堆浸体系颗粒偏析和分层的重要致因; 浸矿作用下微细颗粒迁移导致矿堆内部发生沉积压实作用, 由 197 mm 降至 180 mm 以下; 浸矿 21 d 后, 矿堆上部孔隙呈增大趋势, 下部孔隙率呈减小趋势, 此外, 纵向当量孔隙的直径由 2.81 mm 减小至 2.18 mm, 其变化趋势和程度要显著大于横向颗粒间孔隙的当量直径; 对比浸矿 0 d 和 21 d 的柱浸体系三维颗粒间孔隙结构, 证实了细颗粒夹层所处区域的粘结聚集以及细颗粒夹层周边区域形成溶液绕流、溶液优势流动路径.

关键词　金属矿; 堆浸技术; 颗粒偏析; 颗粒间孔隙; 三维可视化
分类号　TG862

Pore structure and its evolution characterization in leaching systems *via* morphological open operation

WANG Leiming[1,2)], *LI Hui*[2)], *YIN Shenghua*[1,2)✉], *PAN Chenyang*[2)], *LIAO Wensheng*[3)]

1) Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2) School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
3) Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, Beijing 101149, China
✉Corresponding author, E-mail: csuysh@126.com

ABSTRACT　Heap leaching has been widely used in mining low-grade sulfide copper minerals because of its outstanding advantages of low cost, fast infrastructure, and effective recovery. However, the segregation and stratification of crushed ore feeds during the dumping and stacking process of heap leaching are significant and prone to occur, leading to preferential flow paths and low heap leaching efficiency. Based on the complex segregation and layered structure of the heap leaching system, combined with X-ray CT nondestructive detection, morphological open operation processing, MATLAB and OsiriX visualization software, and other means, the key characterization parameters, such as the equivalent pore size, area, and number of pores between particles, are introduced. This study explores the intergranular pore structure characteristics and evolution regulation of the leaching system from the perspective of two-dimensional quantification and three-dimensional visualization. This study found that the fine interlayers are in the shape of “inclusions”

收稿日期: 2022−12−01
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52374112, 52204124, 52034001); 北京市自然科学基金面上资助项目(2232080); 国家博士后创新人才支持计划资助项目(BX20220036); 中国博士后科学基金资助项目(2022M710356); 金属矿山安全与健康国家重点实验室开放基金资助项目(2021-JSKSSYS-01); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金资助项目(SKLCRSM22KF006); 绿色化工过程教育部重点实验室开放基金资助项目(GCP202108); 中央基本科研业务费资助项目(FRF-IDRY-21-010, QNXM20220001)

and are inside the coarse ore particles. The analysis demonstrates that it is an important cause of particle segregation and stratification in the heap leaching system. The migration of fine particles under the action of ore leaching leads to sedimentary compaction, which decreased from 197 mm to below 180 mm. After 21 days of ore leaching, the pores in the upper and lower parts of the ore heap showed increasing and decreasing trends, respectively. In addition, the diameter of the longitudinal equivalent pores decreased from 2.81 to 2.18 mm; the change trend and extent were considerably greater than the equivalent diameter of the transverse intergranular pores. When comparing the three-dimensional intergranular pore structures of the column leaching system for 0 and 21 days of ore leaching, it is evident that the fine particle interlayer is located in the bonding and aggregation region. The peripheral area of the fine particle interlayer also forms the circumvention and dominant flow path of the solution. This suggests the coexistence of hydraulic erosion and reactive dissolution in the heap leaching system. The combined effect of these processes leads to bonding and aggregation in the area where the fine particle interlayer is located, forming solution and dominant flow paths in the area surrounding the fine particle interlayer. These preferential flow paths may result in the solution not actually participating in the leaching reaction and leaving the heap leaching system, which is undesirable and should be avoided in real heap leaching systems.

KEY WORDS　metal ore; heap leaching technology; particle segregation; interparticle pore; three-dimensional visualization

我国矿产贫矿多、富矿少、资源禀赋性差，采用传统采选方式开采低品位铜矿、金矿具有成本高流程长等难点，难以有效满足我国矿产资源保供的重要战略. 在此背景下，堆浸技术凭借其低成本、基建快、作业简单等突出优势，可以有效实现低品位矿、尾矿和废石中有价金属元素的高效浸出作业，被广泛应用于国内外铜、金、铀等战略矿产资源开采[1−2].

然而，堆浸体系内矿物溶蚀剥离、渗流冲蚀拖曳、孔裂结构劣化多过程共存，是气–液两相、非饱和复杂浸出反应体系，其内部的孔裂结构异常复杂[3]. 非制粒矿堆通常采用多种颗粒尺寸的矿石筑堆，颗粒尺寸分布、比重等差异较大，直接导致矿石颗粒偏析（Particle segregation）和颗粒分层（Particle stratification）问题[4−5]. 其中，相邻矿石颗粒相互堆叠形成颗粒间孔隙（Inter-particle pores），它被视为堆内溶液流动的潜在渗流通道.

可见，颗粒偏析分层现象导致颗粒间孔隙结构不均且异常复杂，极易导致堆体渗透性差、矿物浸出效率低等瓶颈问题[6]，使得铜金属回收效率低于预期. 对此，为进一步探索堆浸体系细观颗粒间孔隙结构及其演化规律，国内外学者将计算机断层扫描（Computed tomography, CT）、紫外荧光扫描（UV fluorescence）等探测手段与数字图像处理、可视化等新兴技术相结合，在土壤、石油储层、岩石等多孔介质或含裂隙介质结构表征方面取得了成功[7−10]. 其中，中国国际科技合作奖获得者、美国工程院院士 Jan D Miller 团队率先将 X-ray CT 探测扫描技术应用至地表堆浸体系[11]，使相关研究和机理认识迈入细观层面；随后，我国吴爱祥等专家接续探索了 X-ray CT 技术探究了矿岩散体浸出过程中的溶液渗流规律，分析了体积密度、粒度级配等因素孔隙率和孔径分布的影响[12]. 在此背景下，二维 CT 图像的处理精度就成为直接影响三维建模可信度的重要因素，以 MATLAB、深度学习等为代表的图像处理手段被逐步应用，初步实现了更为精准地的浸矿体系细观孔隙结构量化表征[13−14]. 其中，van der Merwe 等[15] 利用 CT 技术和 CDD 数码摄像机等装置，结合图形算法提出了散体堆内溶液持液稳定性的新见解，探索了对散体堆内固、液、气三相介质进行表征方法. 在堆浸体系内存在着矿石表面裸露孔、矿石颗粒间连接孔、矿石颗粒内部的封闭孔等多种孔隙结构[16]. 当前，本领域普遍认可浸矿体系孔隙结构主要包括颗粒内孔隙、颗粒间孔隙. 溶浸液由矿堆顶部喷淋管网进入矿堆，经颗粒间孔隙进行流动扩散，发生浸矿反应和溶质交换. 在喷淋过程中，溶液逐渐填充了部分的孔隙，形成了溶液优先流和溶液停滞流[17−18]. 溶液优先流是堆内溶液流动快速传导的主要形式，其流动路径较为稳定，表现为大孔道、大流量的溶液流，主要由溶液自身重力驱动，形成的渗流路径通常可串联导通矿堆，该优先流路径的形成、稳定与颗粒间孔隙结构特征密切相关，细颗粒夹层等非均匀孔隙偏析结构是造成矿堆内部的颗粒偏析和溶液绕流的重要因素[19]；这其中，偏析矿堆中的细颗粒夹层（Fine interlayers）对于改变溶液渗流路径和影响矿物浸出效率起到了重要作用[20]. 已有研究也逐步证实了堆浸体系内的矿石颗粒粒径是直接影响表面张力、负孔隙水压力、基质吸力、堆渗透率等关键参量的重要因素[21−22]. 然而，当前对于浸矿体系颗粒间孔隙结构的国内外研究成果，大多是针对静态、瞬态或是不考虑浸矿作用下孔

隙结构表征及其演化规律, 对于浸矿作用影响下细观孔隙结构动态演化和三维可视化研究仍有待进一步补充.

对此, 本文在硫化铜矿柱浸实验的基础上, 结合 X-ray CT 无损探测技术、形态学开运算处理、MATLAB 数学工具、OsiriX DICOM Viewer 可视化软件与 Origin 数据处理等手段, 探究了矿物浸出作用对矿石散体孔隙结构特征演化的影响, 利用颗粒间孔隙数量(纵向颗粒间孔隙、横向颗粒间孔隙)、当量孔隙尺寸等关键参量, 实现浸矿体系细观孔隙结构的三维量化表征, 相关研究对堆浸体系非均匀孔隙结构特征、渗流盲区形成机理和不良浸矿效果的深入理解形成良好支撑.

1 细观孔隙结构探测获取及其特征分析

1.1 浸矿实验方法与方案

实验矿石取自福建某次生硫化铜矿山. 在粒径组成方面, 矿石粒径介于 0 ~ 6 mm, 其中, 粒径介于 2 ~ 4 mm 颗粒质量占比 35.19%, 粒径介于 4 ~ 6 mm 颗粒质量占比 45.57%. 在化学组分方面, 矿石中的 Cu 质量分数为 0.70%, Fe 质量分数为 1.67%, S 质量分数为 1.10%. 硫化铜矿占含铜总量的 92.86%, 主要金属矿物为辉铜矿、铜蓝、黄铜矿和硫砷铜矿, 含有一定量的黄铁矿, 主要的脉石矿物为石英.

图 1 为基于 X-ray CT 扫描的矿石柱浸体系细观孔隙结构特征. 采用矿石柱浸的实验方法, 将碎矿自然倾倒至有机玻璃柱内, 如图 1(a)所示, 有机玻璃柱的柱体高度为 120 mm, 内径 ϕ40 mm, 厚度为 3 mm, 上下各设置一法兰盘, 其直径为 ϕ120 mm, 用于承托与固定柱体. 本实验填充矿石的质量为 200 g. 利用含有嗜酸氧化亚铁硫杆菌(*Acidthiobacillus ferrooxidans*)、氧化硫硫杆菌(*Acidthiobacillus thiooxidans*)的去铁 9 K 溶液作为溶浸液[23], 设置喷淋强度为 20 $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$, 初始细菌浓度(个数)为 4×10^7 mL^{-1}, 控制实验温度在 25±2 ℃, 实验过程中检测溶液中铜离子浓度, 浸矿周期 21 d.

1.2 基于 X-ray CT 的细观孔隙结构探测获取

为进一步揭示浸矿体系的颗粒间孔隙结构特征, 在浸矿 0、21 d, 利用 X-ray CT 扫描仪对装有矿石颗粒堆的有机玻璃柱进行无扰动探测, 获取二维片层图像, 如图 1(a)所示. 设置 CT 扫描装置环扫电压为 140 kV, 电流为 300 mA, CT 图像的扫描间距为 0.6 mm. 如图 1(b)所示, 经 X-ray CT 扫描后, 获取轴向 CT 片层数量为 43(有效截面 18), 水平 CT 片层数量是 107(有效截面 70), 然后, 将 CT 图像导入 OsiriX v.5.8.1、MATLAB 和 Image Pro plus 6.0 软件来实现图像处理和 3D 渲染, 由图 1(c)和(d)可见, 粗碎矿石、细碎矿石共同构成了浸矿体

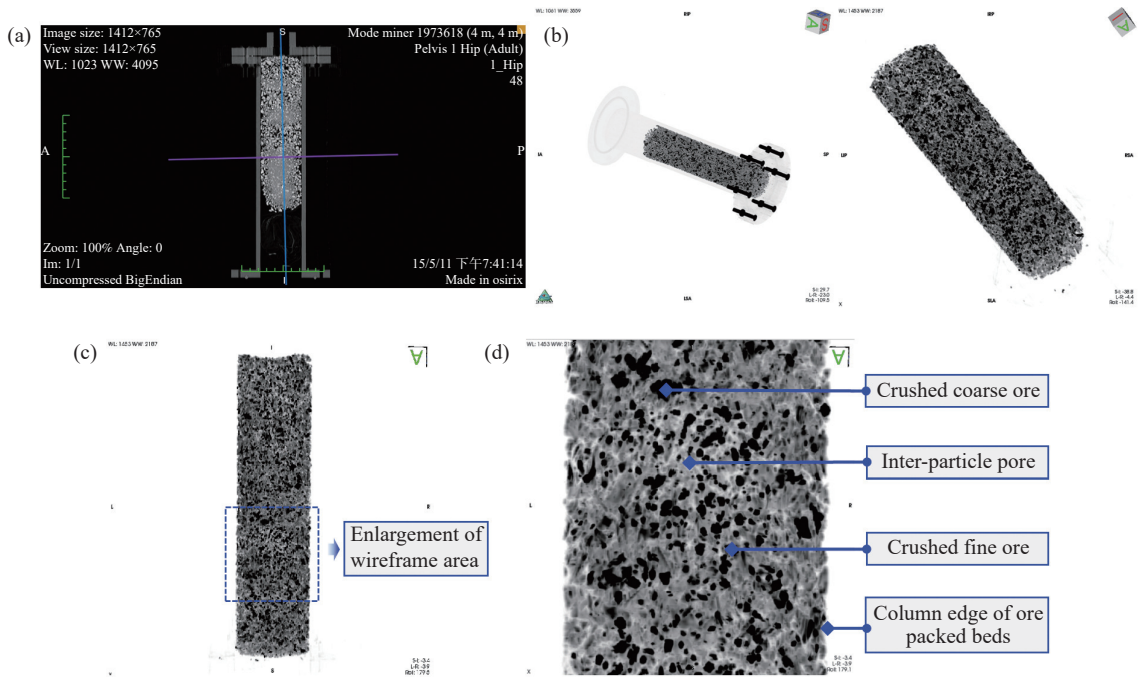


图 1 基于 X-ray CT 扫描的矿石柱浸体系细观孔隙结构特征. (a) CT 截面图像处理器; (b) 矿堆三维特特征; (c) 矿堆正视图; (d) 矿堆细观孔隙结构特征

Fig.1 Mesoscale pore structure characteristics of ore column leaching based on X-ray CT scanning: (a) CT cross-sectional view; (b) 3D view of ore packed beds; (c) front view of ore packed beds; (d) mesoscale pore network features of ore packed beds

系内的颗粒间孔隙, 这也是本文的重要研究对象.

1.3　基于形态学开运算的 CT 图像处理

形态学运算是针对二值化图像依据数学形态学的集合论方法发展起来的图像处理方法. 它的主要用途是获取物体拓扑和结果信息, 并通过物体和结构元素相互作用的某些运算, 得到物体更本质的形态, 主要包括形态学开运算和闭运算. 本文将采用形态学开运算的方法实现 CT 图像处理过程优化.

形态学开运算需要依次历经侵蚀(或称腐蚀)、膨胀两个过程, 如图 2 所示.

(1) 侵蚀阶段(Corrosion), 是图像中围绕中心区的周边部分被侵蚀或腐蚀, 表述为相邻区域用极小值代替(图中体现为红框周边绿色部分被侵蚀), 高亮区域减少, 如图 2(a)所示;

(2) 膨胀阶段(Expansion), 是图中白色部分进行膨胀扩张, 表述为相邻区域用极大值代替(图中), 高亮区域增加, 如图 2(b)所示.

该方法可将大量尺寸过小的不良噪点去掉, 避免对孔隙结构计算形成干扰. 包括以下基本特征:

(1) 对于每个开运算, 计算所有像素值和的基础上, 可计算某一尺寸的孔隙数量占孔隙总量百分比;

(2) 以尺寸不断增大的圆盘型结构元素对二值化图像进行形态学开运算, 统计出孔隙尺寸分布;

(3) 由于矿柱孔隙形状不一、大小不同, 因此无法准确计算每一个孔隙的直径, 所计算出的孔隙尺寸实际上是该孔隙腐蚀膨胀出圆的当量直径.

2　结果与讨论

2.1　基于形态学开运算的二维孔隙结构量化特征分析

非制粒堆浸体系内颗粒间孔隙结构呈异质性且异常复杂, 宏观表现为颗粒偏析和分层现象, 这是导致矿堆浸出效果不佳的重要因素[24]. 因此, 直观表征浸矿作用下矿堆孔隙结构演化特征, 是揭示和分析偏析孔隙结构与浸矿反应关联影响的重要手段.

对此, 本文获取了浸矿前后典型截面处的 2D 孔隙结构特征, 如图 3 所示. 矿堆内部自上而下存在三个细颗粒夹层(A、B 和 C), 其中, 细颗粒夹层 A 和 B 位于矿堆上部区域, C 位于矿堆下部区域; 此外, 由于粗细颗粒的比重密度等差异导致, 三个细颗粒夹层呈“包裹体”状且均位于粗矿石颗粒的内部, 这与实际工业矿堆中颗粒偏析分层现象相一致. 通过对比研究发现: (1) 对比纵截面片层可见, 在浸矿作用下三个细颗粒夹层区域(A、B 和 C)均存在不同程度的发育和扩展, 其中, 细粒夹层 A 的发育程度更高且与细粒夹层 B 趋于连接贯通; (2) 对比四组横截面片层可见, 同一高度的颗粒间孔隙结构均存在显著变化, 表现为微细颗粒占比和位置变化, 剖析上述现象认为, 在溶液渗流拖曳和毛细作用下, 微细颗粒发生轴向迁移, 伴随着浸矿反应可观测到的颗粒沉积、化学胶结和矿堆压实现象.

为了进一步量化揭示浸矿作用下矿堆内同一高度处颗粒间孔隙演化规律, 本文以 89 mm 高度

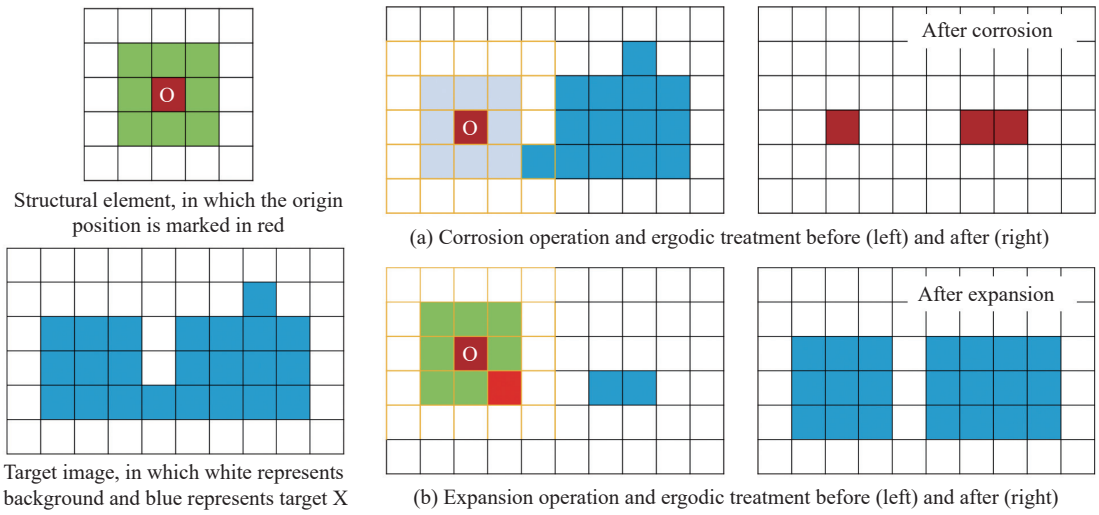


图 2　基于形态学开运算的图像处理基本原理. (a) 腐蚀与遍历处理; (b) 扩展与遍历处理

Fig.2　Basic principles of image processing based on morphological open operation: (a) corrosion operation and ergodic treatment; (b) expansion operation and ergodic treatment

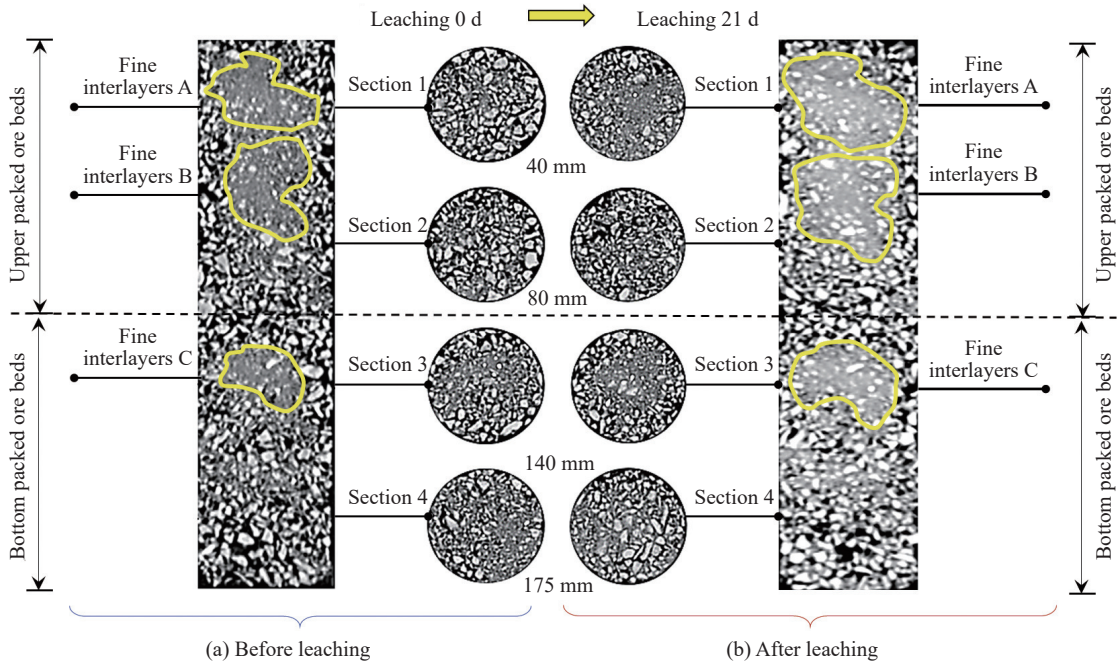


图 3 浸矿前后典型截面处的 2D 孔隙结构特征. (a) 浸矿前; (b) 浸矿后

Fig.3 2D pore structure characteristics of typical sections before and after ore leaching: (a) before leaching; (b) after leaching

为界线分为矿柱上部、矿柱下部两组, 利用 MATLAB 数学软件和形态学开运算处理方法, 获取浸矿前后颗粒间孔隙的数量和尺寸分布, 如图 4 所示. 其中, 图 4(a)和(b)为纵向孔隙, 图 4(c)和(d)为横向孔隙. 此外, 利用 Origin 进行曲线拟合获得孔隙尺寸曲线和当量孔隙直径.

浸矿前后纵向颗粒间孔隙变化, 如图 4(a)和(b)可见: (1) 在矿堆上部, 直径小于 2.0 mm 的纵向颗粒间孔隙占比较高(69.7%), 直径大于 5.0 mm 的纵向颗粒间孔隙极少, 仅占孔隙数量 0.8%, 当量孔隙直径由 1.26 mm 增大至 2.38 mm, 这表明浸矿导致矿堆上部的纵向颗粒间孔隙尺寸趋于增大; (2) 在矿堆下部, 直径介于 2.0 ~ 5.0 mm 的纵向颗粒间孔隙占比较高(71.4%), 并且, 大直径孔隙占比明显高于矿堆上部, 占比为 4.1%, 纵向当量孔隙直径由 2.81 mm 减小至 2.18 mm.

类似地, 浸矿前后横向颗粒间孔隙变化如图 4(c)和(d)可见. 结合图 4(a)和(b)进行分析: (1) 在矿堆上部, 直径小于 2.0 mm 的横向颗粒间孔隙占比小于纵向孔隙占比(69.7%), 但仍占比较高, 约为 52.6%, 直径介于 2.0 ~ 3.5 mm 的横向颗粒间孔隙占 16.2%, 当量孔隙直径由 1.49 mm 增大至 1.81 mm; (2) 在矿堆下部, 直径大于 5.0 mm 的横向颗粒间孔隙优于纵向, 占总量 4.5%, 直径介于 2.0 ~ 3.5 mm 的横向颗粒间孔隙数量明显高于矿堆上部, 占比为 49.9%, 横向当量孔隙直径由 2.77 mm 减小至 2.38 mm.

综上可见, 不论是矿堆上部、下部还是颗粒间孔隙横向、纵向特征, 浸矿作用可导致颗粒间孔隙尺寸分布趋于均匀, 即矿堆上部的原本较小直径的孔隙尺寸增大, 矿堆下部原本较大直径的孔隙尺寸减小. 此外, 对比堆内纵向、横向当量孔隙直径可知, 纵向孔隙当量直径的增大或减小程度要显著大于横向孔隙当量直径, 分析认为这是由于溶液浸矿过程中纵向溶液冲刷作用比横向毛细扩散溶液流量更大, 由此导致浸矿作用下溶液渗流路径(颗粒间孔隙)的尺寸变化差异.

2.2 基于 OsiriX 和图像色彩强度的颗粒偏析特征及其影响分析

由于粗颗粒、细颗粒的密度差异, 导致在堆浸体系矿石倾倒过程中非常容易观察到颗粒分层和偏析现象[25]. 对此, 本文采用 OsiriX 和 Image Pro Plus 获取三维表面图, 实现了浸矿体系颗粒间孔隙结构特征的三维重建与强度分析, 如图 5 所示.

图 5 中的颜色模式使用 RGB 颜色标准, 其强度范围介于 0 ~ 255, 强度值与柱内的原位密度成正比, 换言之, 该区域原位密度越高, 颜色强度值越高. 其中, 红色部分代表矿石; 黄色部分代表孔隙和流动通道, 该方法可形象地揭示浸矿前后颗粒间孔隙结构的三维特征.

由图 5(a)可见, (1) 浸矿 21 d 后, 细颗粒夹层所在位置出现显著的集聚现象(红色高亮区域),

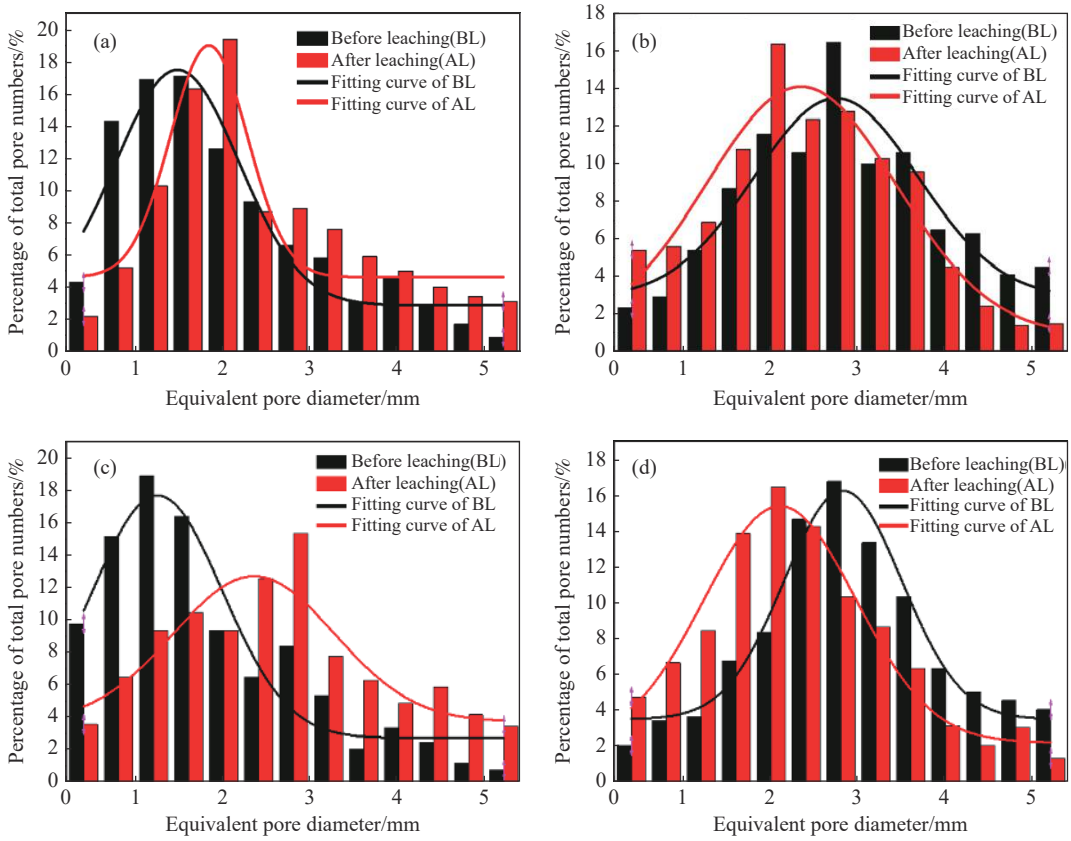


图 4　浸矿前后典型截面处当量连通孔隙尺寸及其占比. (a) 柱堆上部横向连通孔隙; (b) 柱堆下部横向连通孔隙; (c) 柱堆上部纵向连通孔隙; (d) 柱堆下部纵向联通孔隙

Fig.4　Equivalent connected pore size and its proportion at typical sections before and after ore leaching: (a) transversely connected pores in the upper part of packed beds; (b) transversely connected pores in the lower part of packed beds; (c) longitudinally connected pores in the upper part of packed beds; (d) longitudinally connected pores in the lower part of packed beds

这表明该区域密度高, 即浸矿导致细颗粒夹层发生粘结聚集; (2) 浸矿 21 d 后, 细颗粒夹层周边形成显著“空区”, 即溶液绕流和优势流动路径. 由图 5(b)可见, 一些小的锥形尖端被合并形成新柔和尖端, 相邻矿石间距趋于增大. 分析认为: 这是由于浸矿反应产物、脉石、泥质颗粒和不反应物相互粘结导致矿堆内部的微细孔隙堵塞. 由图 5(c)可见, 浸矿后侧视图中轮廓显示为“W 形”, 这个锥形尖端即为细粒夹层, 在细粒夹层两侧存在两个凹陷区域, 即溶液绕流的所在孔隙区域并逐步形成溶液优势流动. 在渗流拖曳和毛细作用下溶液渗透进入矿物界面发生浸出反应形成了新的裂缝和孔隙; 此外, 在溶液冲刷作用下, 一些极微小的矿石颗粒和淤泥被从柱系统中带走. 非饱和流体冲刷流道侧壁, 延长流道宽度.

2.3　颗粒偏析条件下浸矿体系三维孔隙结构特征

为了研究柱内部阶段细粉区域的形态, 选择了一些通过 3D 表面渲染处理的典型纵向截面, 其中细颗粒区域聚集在一起(图 6). 较亮区域表示含溶液的矿石, 较暗区域表示该柱中的流体流动通道. 与图 4 中观测到的细颗粒夹层的事实保持一致, 自上而下存在的三处偏析颗粒区域分别进行标注.

如图 6 所示, 对比浸出 0 d 和 21 d, 主要有以下发现: (1) 伴随着溶液拖曳和微细颗粒迁移作用, 浸矿 21 d 后矿堆高度由约 197 mm 降低至 180 mm 以下, 即存在一定的矿堆压实沉积现象; (2) 由细颗粒夹层构成的三个主要区域趋于增大, 细颗粒夹层周边的孔隙通道数量明显减少; (3) 浸矿后, 溶液流动优势路径将三个孤立的细颗粒夹层逐步形成导通. 结合前人研究成果, 分析导致上述现象的诱因主要有三: 一是在双电/离子层、溶液表面张力等微观力的作用下[26], 相邻矿石颗粒间的吸力随着颗粒间距离的减小而增大, 颗粒间黏连由物理层面的颗粒间液桥连结到化学层面的反应产物黏结, 宏观表现为充分的毛细润湿现象和细颗粒所在区域的显著扩展[27]; 二是矿石颗粒之间的一些微裂缝逐渐合并成更大的孔隙, 推断溶液优

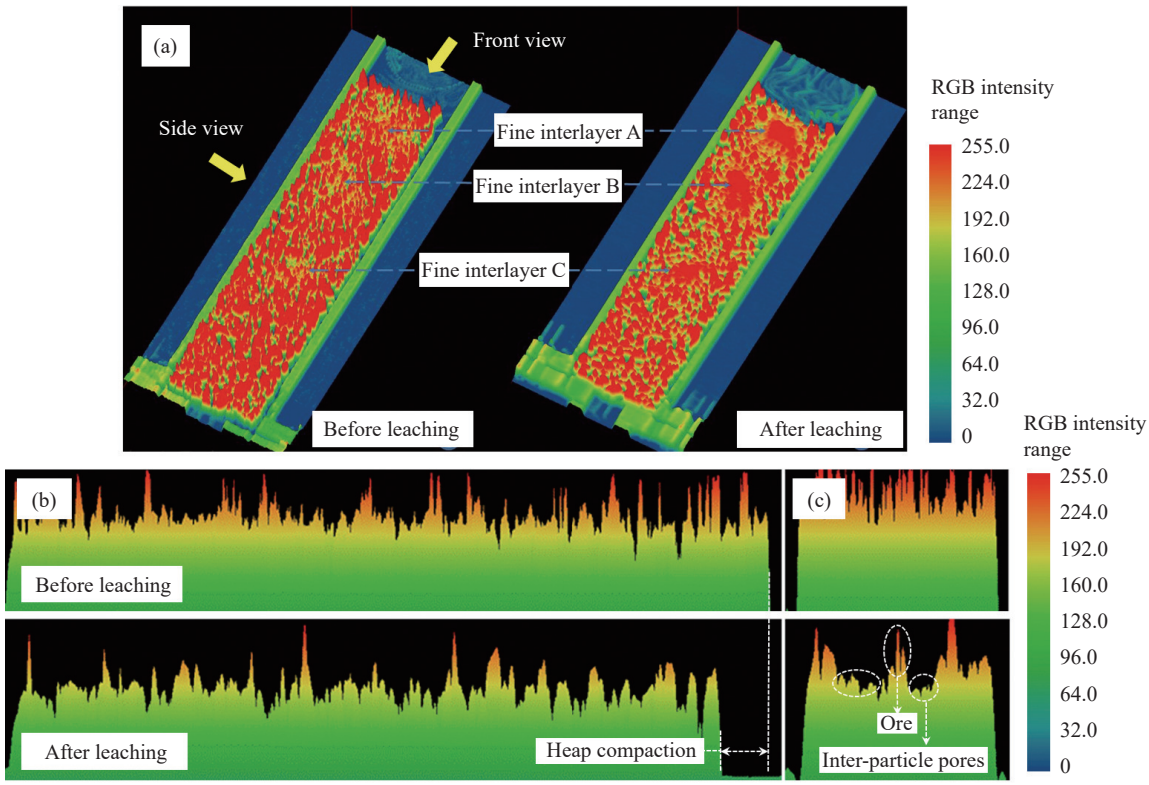


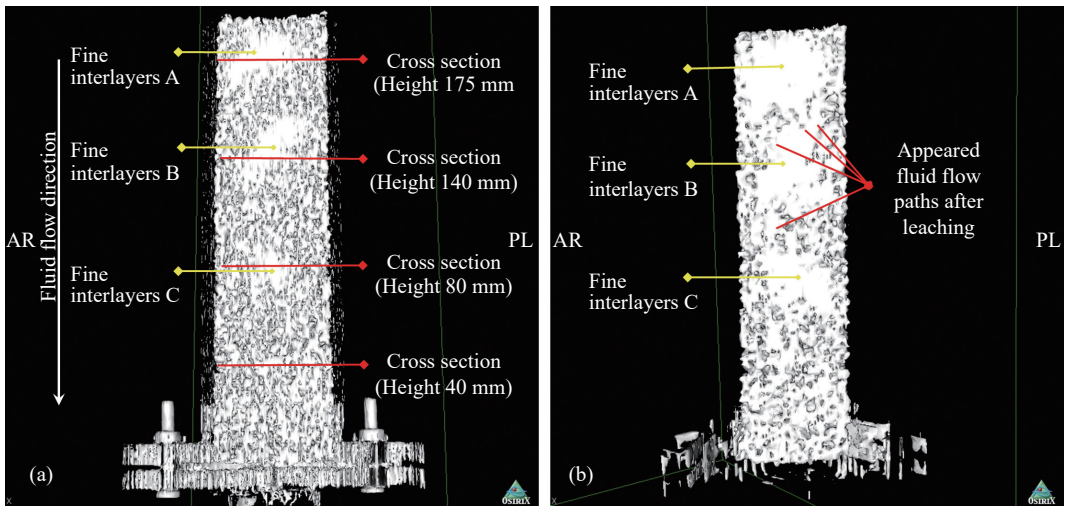
图 5 基于 OsiriX 色彩强度表征的浸矿前后细观孔隙结构演化. (a) 孔隙结构三维彩色强度图; (b) 侧视图; (c) 正视图

Fig.5 Evolution of mesoscale pore structure before and after ore leaching based on OsiriX color intensity characterization: (a) 3D color intensity view of pore structure; (b) side view; (c) front view

势流动逐步在颗粒间孔隙内形成并不断冲刷扩展渗流通路[28–29]; 三是由于泥浆、石英等不溶性化合物与浸矿反应产物发生不良黏结作用, 宏观表现为形成细颗粒包裹体和结块现象[30].

为更好地表征浸矿作用下颗粒间孔隙结构演化特征, 本文截取了 175、140、80 和 40 mm 处的 CT 片层, 考察了四个典型片层的颗粒间孔隙数量及其当量面积的关系. 其中, 实际面积 1 mm^2 等于 100 当量面积, 等面积值范围为 0 ~ 2000, 如图 7 所示.

如图 7(a)所示, 浸矿 21 d 后, 细颗粒夹层所在区域面积显著增大. 如图 7(b)所示, 在 40、80、140 和 175 mm 处矿石区域面积的增加倍数分别为 11.9、3.21、3.26 和 1.79, 颗粒间孔隙面积分别减少为原有对应面积的 0.437、0.229、0.319 和 0.228. 由图 7(c)可见, 浸矿后矿堆内的颗粒间孔隙尺寸分布更加均匀且更大. 以 40 mm 截面为例, 浸矿 0 d 时, 颗粒间孔隙的当量面积主要集中于 0 ~ 200 且对应孔隙的数量多介于 50 ~ 150 个, 较大当量面积的孔隙数量较少; 然而, 浸矿 21 d 时, 具有较小当量面积(0 ~ 200)、较大当量面积(600 ~ 2000)的颗



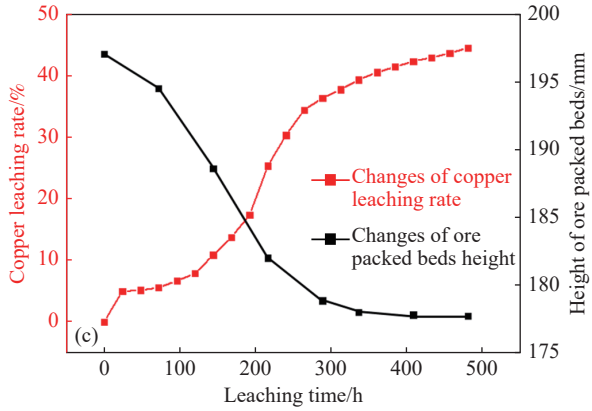


图 6　浸矿前后柱浸体系细观孔隙截面的三维可视化与量化分析. (a) 浸矿前矿堆纵截面; (b) 浸矿后矿堆纵截面; (c) 铜浸出率与堆高随浸出时间变化

Fig.6　3D visualization of micropore section and quantitative analysis of column leaching system before and after leaching: (a) longitudinal section of ore packed beds before leaching; (b) longitudinal section of ore packed beds after leaching; (c) copper leaching rate and heap height with the leaching time

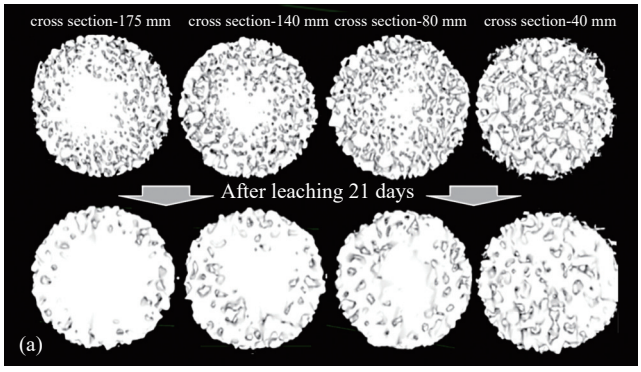
粒间孔隙均有显著增加. 这证实了在溶液冲蚀和反应溶蚀的作用下, 颗粒间孔隙发生聚合重构, 逐步形成较小尺寸的浸润型孔隙结构(低渗毛细扩散区)和较大尺寸的颗粒间孔隙结构(溶液流动的优势路径).

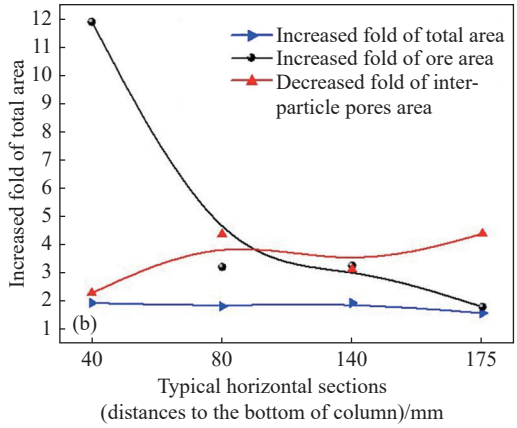
3　结论

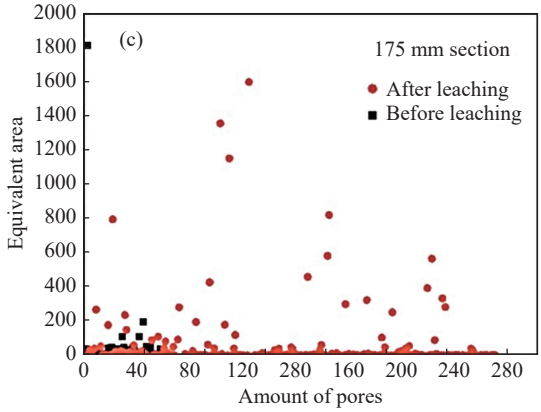
本文立足偏析矿堆结构, 结合 X-ray CT 无损探测技术、形态学开运算处理、MATLAB 和 OsiriX 可视化软件, 结合当量孔隙尺寸、面积、数量、孔隙率和铜浸出率等关键参量, 探究了浸矿作用下颗粒间孔隙结构特征及其演化规律, 主要研究发现包括:

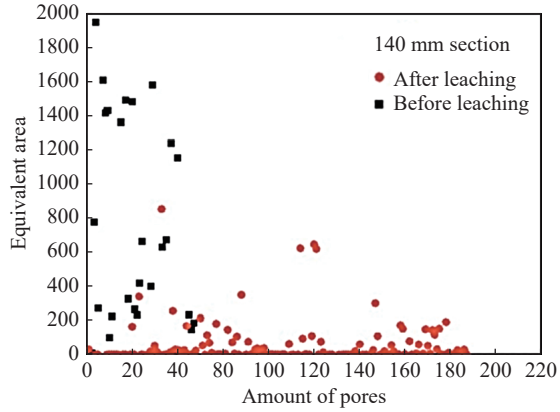
(1) 非制粒矿堆内颗粒间孔隙结构异常复杂, 其中, 细颗粒夹层呈“包裹体”状且均位于粗矿石颗粒的内部, 是造成堆浸体系颗粒偏析和分层的重要致因;

(2) 浸矿作用下微细颗粒迁移导致矿堆发生沉









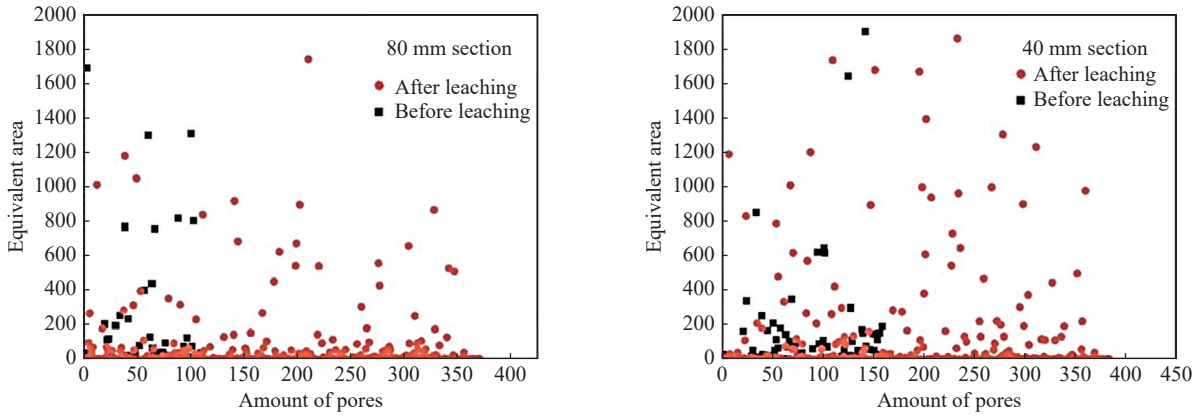


图 7 浸矿前后典型截面处孔隙结构演化及当量孔隙面积分布. (a) 浸矿前后典型截面孔隙结构; (b) 当量孔隙面积及数量分布; (c) 当量孔隙面积与孔隙尺寸分布规律

Fig.7 Pore structure evolution and equivalent pore area distribution at typical sections before and after ore leaching: (a) evolution of pore structure in typical cross-sections before and after ore leaching; (b) distribution of equivalent area and pore number; (c) distribution of equivalent pore area and pore number

积压实作用, 其中, 纵向孔隙当量直径的变化程度要显著大于横向孔隙当量直径;

(3) 浸矿体系内渗流冲蚀与反应溶蚀作用共存, 二者共同作用倾向于导致细颗粒夹层所在区域发生粘结聚集, 细颗粒夹层周边区域形成溶液绕流和优势流动路径.

参 考 文 献

[1] Ghorbani Y, Franzidis J P, Petersen J. Heap leaching technology–current state, innovations and future directions: A review. *Miner Process Extr Metall Rev*, 2016, 37(2): 73

[2] Yin S H. *Special Mining Technology*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2021
(尹升华. 特殊采矿技术. 北京: 冶金工业出版社, 2021)

[3] Lin Q, Neethling S J, Courtois L, et al. Multi-scale quantification of leaching performance using X-ray tomography. *Hydrometallurgy*, 2016, 164: 265

[4] Wang L M, Li X W, Yin S H, et al. Characterization of liquid seepage hysteresis and capillary diffusion behavior in unsaturated ore heap. *Chin J Eng*, 2023, 45(3): 359
(王雷鸣, 李希雯, 尹升华, 等. 非饱和矿堆溶液渗流迟滞与毛细扩散行为表征. 工程科学学报, 2023, 45(3): 359)

[5] van Staden P J, Petersen J. The effects of simulated stacking phenomena on the percolation leaching of crushed ore, Part 1: Segregation. *Miner Eng*, 2018, 128: 202

[6] van Staden P J, Petersen J. The effects of simulated stacking phenomena on the percolation leaching of crushed ore, Part 2: Stratification. *Miner Eng*, 2019, 131: 216

[7] Yin S H, Wang L M, Wu A X, et al. Progress of research in copper bioleaching technology in China. *Chin J Eng*, 2019, 41(2): 143
(尹升华, 王雷鸣, 吴爱祥, 等. 我国铜矿微生物浸出技术的研究进展. 工程科学学报, 2019, 41(2): 143)

[8] Song X, Yang B H, Wu A X, et al. Pore size evolution of granular ore media during heap leaching. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2009, 40(6): 1712
(宋鑫, 杨保华, 吴爱祥, 等. 堆浸过程中矿岩散体粒间孔隙尺寸的演化规律. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(6): 1712)

[9] Xue H Q, Xu R N, Jiang P X, et al. Characterization of rock microstructure using 3d X-ray computed tomography. *Chin J Theor Appl Mech*, 2015, 47(6): 1073
(薛华庆, 胥蕊娜, 姜培学, 等. 岩石微观结构 CT 扫描表征技术研究. 力学学报, 2015, 47(6): 1073)

[10] Yin S H, Chen X, Liu C, et al. Effects of ore size distribution on the pore structure characteristics of packed ore beds. *Chin J Eng*, 2020, 42(8): 972
(尹升华, 陈勋, 刘超, 等. 矿石颗粒级配对堆浸体系三维孔隙结构的影响. 工程科学学报, 2020, 42(8): 972)

[11] Dhawan N, Safarzadeh M S, Miller J D, et al. Recent advances in the application of X-ray computed tomography in the analysis of heap leaching systems. *Miner Eng*, 2012, 35: 75

[12] Wu A X, Yin S H, Yang B H, et al. Study on preferential flow in dump leaching of low-grade ores. *Hydrometallurgy*, 2007, 87(3-4): 124

[13] Ghadiri M, Harrison S T L, Fagan-Endres M A. Effect of X-ray μCT scanning on the growth and activity of microorganisms in a heap bioleaching system. *Solid State Phenom*, 2017, 262: 143

[14] Lang Y X, Liang Z Z, Duan D, et al. Three-dimensional parallel numerical simulation of porous rocks based on CT technology and digital image processing. *Rock Soil Mech*, 2019, 40(3): 1204
(郎颖娴, 梁正召, 段东, 等. 基于 CT 试验的岩石细观孔隙模型重构与并行模拟. 岩土力学, 2019, 40(3): 1204)

[15] van der Merwe W, Nicol W, de Beer F. Three-dimensional analysis of trickle flow hydrodynamics: Computed tomography image acquisition and processing. *Chem Eng Sci*, 2007, 62(24): 7233

[16] Miller J D, Lin C L, Hupka L, et al. Liberation-limited grade/recovery curves from X-ray micro CT analysis of feed

material for the evaluation of separation efficiency. *Int J Miner Process*, 2009, 93(1): 48

[17] Wang L M, Yin S H, Wu A X, et al. Effect of stratified stacks on extraction and surface morphology of copper sulfides. *Hydrometallurgy*, 2020, 191: 105226

[18] Zhu W Y, Li H, Deng Q J, et al. Review on mesoscopic flow theory in porous media. *Chin J Eng*, 2022, 44(5): 951
(朱维耀, 李华, 邓庆军, 等. 多孔介质细观流动理论研究进展. 工程科学学报, 2022, 44(5): 951)

[19] Wang L M, Yin S H, Wu A X. Visualization of flow behavior in ore-segregated packed beds with fine interlayers. *Int J Miner Metall Mater*, 2020, 27(7): 900

[20] Wang L M, Yin S H, Deng B N, et al. Copper sulfides leaching assisted by acidic seawater-based media: Ionic strength and mechanism. *Miner Eng*, 2022, 175: 107286

[21] Wang L M, Yin S H, Wu A X, et al. Synergetic bioleaching of copper sulfides using mixed microorganisms and its community structure succession. *J Clean Prod*, 2020, 245: 118689

[22] Zhou Y C, Xu H L, Chen J D, et al. Particle migration and clogging in porous media with seepage. *Chin J Geotech Eng*, 2022, 44(2): 255
(周永潮, 许恒磊, 陈佳代, 等. 渗流作用下多孔介质内颗粒迁移与堵塞规律研究. 岩土工程学报, 2022, 44(2): 255)

[23] Chen H, Yang B, Chen X H. Identification and characterization of four strains of *Acidithiobacillus ferrooxidans* isolated from different sites in China. *Microbiol Res*, 2009, 164(6): 613

[24] Wang L M, Yin S H, Wu A X. Ore agglomeration behavior and its key controlling factors in heap leaching of low-grade copper minerals. *J Clean Prod*, 2021, 279: 123705

[25] Odidi M D, Fagan-Endres M A, Harrison S T L. Moisture absorption rates via capillary suction within packed beds — The effect of material and fluid properties with implications for heap leaching operations. *Hydrometallurgy*, 2023, 215: 105975

[26] Fernando W A M, Ilankoon I M S K, Rabbani A, et al. Applicability of pore networks to evaluate the inter-particle flow in heap leaching. *Hydrometallurgy*, 2020, 197: 105451

[27] Wang L M, Zhang X Q, Yin S H, et al. Three-dimensional characterisation of pore networks and fluid flow in segregated heaps in the presence of crushed ore and agglomerates. *Hydrometallurgy*, 2023, 219: 106082

[28] Maghsoudy S, Bakhtiari O, Maghsoudy S. Tortuosity prediction and investigation of fluid flow behavior using pore flow approach in heap leaching. *Hydrometallurgy*, 2022, 211: 105868

[29] Wang L M, Yin S H, Zhang X L, et al. Hydrodynamic hysteresis and solute transport in agglomerated heaps under irrigation, stacking, and bioleaching controlling. *Minerals*, 2022, 12(12): 1623

[30] Que Y, Weng B, Cai S L, et al. Analysis of preferential flow migration in unsaturated transparent soil. *Rock Soil Mech*, 2022, 43(4): 857
(阙云, 翁斌, 蔡松林, 等. 非饱和透明土优先流迁移规律分析. 岩土力学, 2022, 43(4): 857)