

矿石颗粒级配对堆浸体系三维孔隙结构的影响

尹升华^{1,2)}, 陈 勋^{1,2)}✉, 刘 超³⁾, 王雷鸣^{1,2)}, 严荣富^{1,2)}

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) 万宝矿产有限公司, 北京 100053

✉通信作者, E-mail: ckchenxun@163.com

摘 要 为研究堆浸体系矿石粒径分布对孔隙结构的影响, 对不同级配矿岩散体构成的浸柱开展显微 CT 扫描测试, 得到浸柱内部结构图像. 通过阈值分割算法对孔隙结构进行提取, 建立浸柱三维孔隙模型, 对浸柱体孔隙率和面孔隙率的空间分布特征进行研究. 利用最大球算法构建浸柱孔隙网络模型, 进而分析矿石粒径分布对孔喉半径、喉道长度、孔喉体积、形状因子和配位数等参数的影响规律. 结果表明: 矿石颗粒级配性越好, 矿堆孔隙率越低; 矿石粒径越均匀, 矿堆不同区域孔隙率差异越小; 矿石粒径分布对孔隙尺寸和连通性影响较为显著, 对孔喉形状因子影响较小. 随着细颗粒矿石的减少, 大孔隙增多, 孔喉半径、喉道长度和孔喉体积相应增大; 随着矿石粒径均匀性的增加, 堆浸体系中孤立孔隙所占比例减少, 高配位数孔隙所占比例增大, 即矿堆内的孔隙空间具有更好的连通性.

关键词 堆浸体系; 颗粒级配; 显微 CT; 三维孔隙结构; 孔隙网络模型

分类号 TD853

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

YIN Sheng-hua^{1,2)}, CHEN Xun^{1,2)}✉, LIU Chao³⁾, WANG Lei-ming^{1,2)}, YAN Rong-fu^{1,2)}

1) Key Laboratory of the Ministry of Education of China for High-efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

3) Wanbao Mining Co., Ltd., Beijing 100053, China

✉ Corresponding author, E-mail: ckchenxun@163.com

ABSTRACT Heap leaching is a widely used solution mining technology that enables various kinds of low-grade ores to be processed economically. The solution flow characteristics are very important factors in the leaching process, and they influence both the overall recovery and kinetics of the system. The properties of fluid flow in porous media are associated with the pore structure, which is influenced by the grain size and shape. To study the influence of ore particle size gradation on the pore structure of the heap leaching system, a micro-CT scanning test was conducted in ore columns with two grain size gradation types, and images of the internal structure of the leaching columns were obtained. A 3D digital pore model of the two leaching columns was then established, and the spatial distribution characteristics of 2D and 3D porosity were analyzed. The pore network models of the two columns were then extracted from the reconstructed 3D binary pore structures using the maximal ball fitting method, and the effect of the ore particle size distribution on the pore throat radius, throat length, pore throat volume, shape factor, and coordination number was analyzed. The results show that the porosity of the column comprising well-graded ore particles is lower than the column with uniformly graded grains. In addition, the 2D and 3D porosities of the well-graded ores show a relatively high degree of heterogeneity compared to those of the more uniformly graded

收稿日期: 2020-01-17

基金项目: 国家优秀青年科学基金资助项目(51722401); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-18-003C1); 国家自然科学基金重点资助项目(51734001)

ores. The ore particle size gradation has a significant influence on pore size and pore connectivity, but it has a minimal influence on the pore throat shape factor. The number of large pores increases with a decrease in the amount of fine ore, and the pore throat radius, throat length, and pore throat volume also correspondingly increase. When the uniformity of ore particle gradation is enhanced, the proportion of isolated pores decreases and the proportion of the number of high coordination pores increases.

KEY WORDS heap leaching system; ore size distribution; micro CT; 3D pore structure; pore network model

经过长期的采矿作业, 浅部高品位富矿开采殆尽, 低品位、难处理矿产资源的有效利用成为保障资源供给的重要途径^[1-2]。堆浸技术因其能有效处理低品位、复杂矿产资源的技术特点, 且具有投资少、设计简单、成本低等优势, 从而在铜、金、镍、铅锌等金属矿产资源开发方面得到了较为广泛的应用^[3-5]。对于堆浸体系而言, 溶液是浸矿药剂和反应产物的主要载体, 其在矿堆中的渗流效果对浸出过程具有重要影响^[6-7]。

矿石是堆浸体系最基本的构成要素, 国内外学者针对矿石粒径分布与溶液渗透之间的关系开展了系列研究工作^[8-11]。Ilankoon 和 Neethling^[12]开展了均匀颗粒和级配颗粒条件下溶液渗流实验, 分析了颗粒级配对堆浸体系溶液优先流行为的影响。Poisson 等^[13]利用直流电阻率成像技术对废石堆场内部结构及含水率分布进行了研究, 发现溶液在粗颗粒区流动性较好, 而在细颗粒区流动性较差。Yin 等^[14]开展了单一粒径和混合粒径条件下的毛细渗流实验, 研究了矿石平均粒径与矿堆内不可动溶液含量的关系。叶勇军等^[15]开展了不同粒径条件下铀矿堆浸体系溶液饱和渗流实验, 分析了粒径分维数对渗透率的影响, 结果显示, 随着粒径分维数的增加, 矿堆的渗透率逐渐减小。已有研究表明矿石粒径分布是影响矿堆渗透性和溶液渗流行为的关键因素之一, 然而在堆浸体系中孔隙网络是溶液渗流的通道, 所以矿石粒径分布必是通过影响孔隙结构而对溶液渗流行为产生作用的。

随着计算机断层扫描成像 (Computed tomography, CT) 等无损探测技术的推广应用, 相关学者在矿岩散体孔隙结构表征和探测方面开展了研究工作^[16-19]。Hoummady 等^[20]应用 CT 扫描研究了铀矿浸出过程中孔隙结构的变化特征, 得到了孔隙半径、孔隙率等参数变化规律。Lin 等^[21]利用显微 CT (micro-CT) 扫描得到了不同浸矿阶段矿石内部结构图像, 定量分析了浸矿过程中矿物颗粒形态和尺寸的变化规律。已有研究在堆浸体系孔隙结构无损探测方面取得了一定进展, 但在矿石粒径分布与孔隙结构参数之间关联性方面的

研究仍较为匮乏, 需进一步开展相关工作。

本文针对不同级配的矿岩散体开展显微 CT 扫描测试, 获取矿岩散体结构图像, 进而提取浸柱三维孔隙结构, 分析浸柱孔隙率空间分布的均匀性, 然后利用最大球算法建立矿岩散体孔隙网络模型 (Pore network model, PNM), 分析孔喉半径、孔喉体积、配位数等孔隙结构参数, 探讨矿石粒径分布对堆浸体系孔隙结构的影响。

1 实验

1.1 实验矿样

实验所用矿石取自云南某铜矿堆场破碎站, 矿石类型以变质石英砂岩、矽卡岩为主, 其次为绢云砂质板岩。金属矿物的赋存形式有硫化物、氧化物及自然元素, 脉石矿物以硅酸盐为主, 其次为碳酸盐类及氧化物类。对所取矿石进行破碎, 分别筛取 A (粒径: 0 ~ 10 mm), B (粒径: 5 ~ 10 mm) 两组矿石颗粒作为本次实验矿样。将两组将散体矿样分别装入内径 60 mm、高 70 mm 的有机玻璃柱内, 建立细观矿堆物理模型, 记为浸柱 A 和浸柱 B。浸柱 A、B 中矿石粒径分布曲线如图 1 所示, 可以看出, 浸柱 A 粒径分布曲线呈下凹型, 在该类型矿岩散体中粗颗粒骨架位置相对固定, 松散细颗粒可在粗颗粒之间孔隙中移动, 因此可能会造成局部孔隙堵塞; 浸柱 B 粒径分布曲线近似直线, 表明矿岩散体颗粒分布均匀, 此类散体中颗粒不易发生位移^[22]。

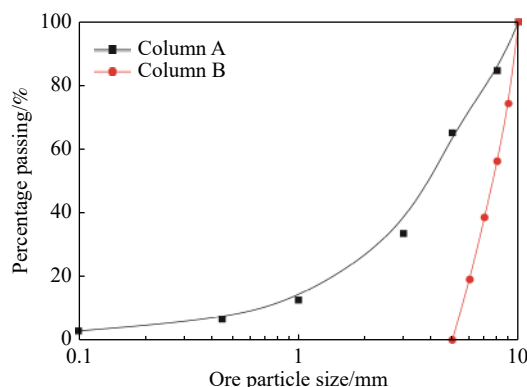


图1 矿石粒径分布曲线

Fig.1 Particle size distribution in ore columns

依据文献 [23] 中所述方法, 计算得到浸柱 A 和浸柱 B 中矿石的平均粒径分别为 4.37 mm 和 7.62 mm, 不均匀系数 C_u 分别为 7.27 和 1.63, 曲率系数 C_c 分别为 2.13 和 0.91, 这表明 A 组矿岩颗粒的级配良好, 颗粒不均匀性显著, 而 B 组矿岩颗粒相对较为均匀, 级配性差。

1.2 CT 扫描测试

本实验所用 CT 扫描设备为太原理工大学与中国工程物理研究院应用电子学研究所共同研制的 μ CT225KVFCB 型高精度显微 CT 试验系统, 主要包括微焦点 X 光机、数字平板探测器、高精度工作转台、数据采集系统等。该 CT 试验系统放大倍数为 1~400 倍, 试件尺寸范围为 $\phi 1 \sim 50$ mm, 最大空间分辨率为 0.485 μ m。

分别对 A、B 两浸柱进行 CT 扫描, 设置扫描参数为: CT 试验机管电压 120 kV, 电流 160 μ A, 投影幅数 400 幅, 旋转角度 360°, 放大倍数 4.14 倍, 图像在 XY 方向上的分辨率为 46.86 μ m。对 CT 扫描得到的原始数据采用锥束大锥角方法进行重建, 在 Z 方向共为 1500 层, 每层厚度为 46.67 μ m。重建得到浸柱 A、B 的二维横截面图像, 如图 2 所示。通过直观对比发现, 浸柱 B 中孔隙尺寸大于浸柱 A 中孔隙尺寸。

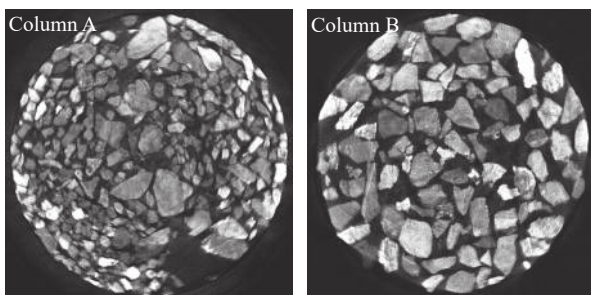


图 2 浸柱 CT 扫描图像

Fig.2 CT scanning images of ore columns

2 结果与讨论

2.1 图像预处理及孔隙提取

在 CT 扫描过程中, 会因受到扫描系统电子元器件扰动等影响而产生噪声信号, 因此, 在图像分割之前需要进行滤波或平滑处理, 以消除噪声或伪影, 增强样品结构特征 [24]。目前, 常用的滤波算法主要有高斯滤波、中值滤波、均值滤波和非局部均值滤波等。其中, 非局部中值滤波算法在矿石散体图像处理中可有效降低图像噪声干扰, 同时保持图像结构信息不被破坏。因此, 本研究采用非局部中值滤波算法对浸柱 CT 扫描原始图像进行

处理。同时, 由于浸柱截面图像中边界并不规则, 不利于数据分析, 因此, 对其进行裁剪, 得到直径为 1200 像素的圆形截面图像。滤波和裁剪后, 选取浸柱中间区域 1400 幅图像进行孔隙结构分析, 浸柱 A 和 B 的三维图像如图 3 所示。

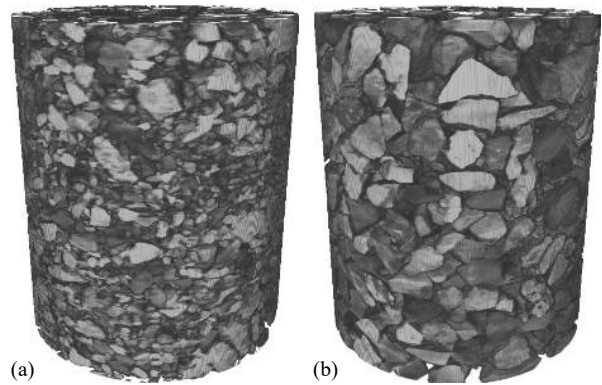


图 3 浸柱三维图像。(a)浸柱 A; (b)浸柱 B

Fig.3 3D reconstructed ore columns: (a) column A; (b) column B

由于在柱浸体系中, 矿石颗粒和孔隙区域的密度差异明显, 因此可利用阈值法进行孔隙结构提取。本文利用 Otsu 方法计算得到分割阈值, 并进行适当调整, 对比不同阈值下图像分割效果, 最终确定最佳阈值, 并对浸柱图像进行分割。利用 Avizo 软件对分割后的图像进行三维重构, 得到浸柱 A、B 的三维孔隙模型如图 4 所示, 浸柱 B 中的孔隙尺寸明显大于浸柱 A 中孔隙尺寸。

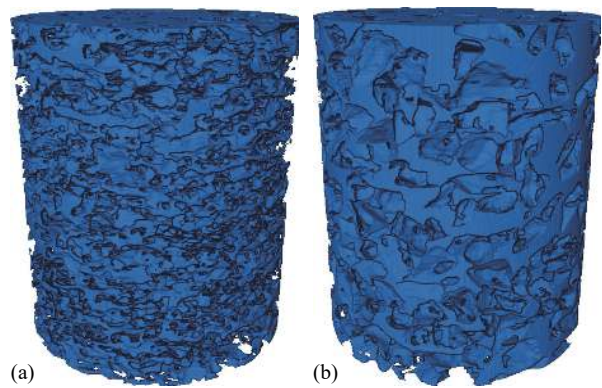


图 4 浸柱三维孔隙结构图像。(a)浸柱 A; (b)浸柱 B

Fig.4 3D pore image of ore columns: (a) column A; (b) column B

2.2 颗粒级配对孔隙率的影响

2.2.1 体孔隙率

分别统计浸柱 A、B 中的孔隙体素值和总体素值, 即可得到浸柱的体孔隙率。结果显示浸柱 A 孔隙率为 25.43%, 浸柱 B 孔隙率为 38.81%。可见, 浸柱 A 中矿石不均匀系数是浸柱 B 中矿石不均匀系数的 4.46 倍, 但浸柱 A 的孔隙率却为浸柱

B 孔隙率的 65.52%。结果表明,浸柱孔隙率与矿石不均匀系数呈负相关,矿石颗粒级配性越好,堆浸体系孔隙率越小,即由级配性好的矿石颗粒构成的矿堆更加致密。这是由于级配性越好,则矿石颗粒粒径越连续,在堆积过程中细颗粒可对粗颗粒之间的孔隙进行填充,进而降低总体孔隙率^[25]。

为分析浸柱体孔隙率分布的均匀性,将浸柱 A、B 分别按照图 5 所示方式划分为 8 个体积相等的扇形体,并计算各扇形体的孔隙率。同时,定义扇形区域相对孔隙率为扇形区域实际孔隙率与浸柱总孔隙率的比值,即为:

$$P'_i = \frac{P_i}{P} \quad (1)$$

式中: P'_i 为区域 i 的相对孔隙率; P_i 为区域 i 的实际孔隙率; P 为浸柱总孔隙率。

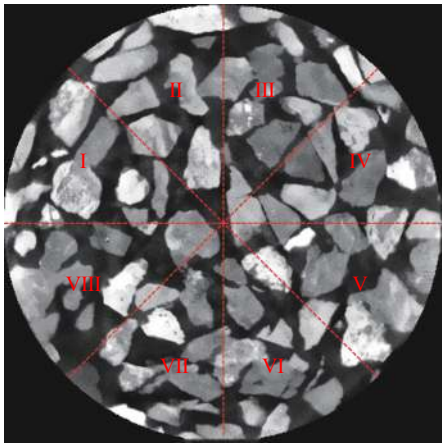


图 5 浸柱分区示意图

Fig.5 Schematic showing volume division of samples

计算得到浸柱 A、B 中各扇形体的相对孔隙率,绘制不同区域相对孔隙率分布曲线如图 6 所示。可以发现,浸柱 A 中各区域相对孔隙率分布曲线波动显著,各区域孔隙率与浸柱 A 总孔隙率差异较大,而浸柱 B 中各区域间孔隙率变化幅度较小,与总体孔隙率差别较小。这表明,粒径均匀的矿岩散体比级配良好矿岩散体,更有利于产生孔隙率分布均匀的孔隙空间。

2.2.2 面孔隙率

浸柱各横截面上孔隙体素与截面总体素的比值即为该截面的面孔隙率,计算得到浸柱 A 的 1400 层截面面孔隙率分布在 10.34% ~ 45.66%,浸柱 B 的 1400 层截面面孔隙率分布在 31.23% ~ 55.92%。浸柱 A、B 面孔隙率在高度方向上的分布特征如图 7 所示,可以看出,浸柱 A、B 面孔隙率在高度方向上均表现出两端高、中间低的趋势,且

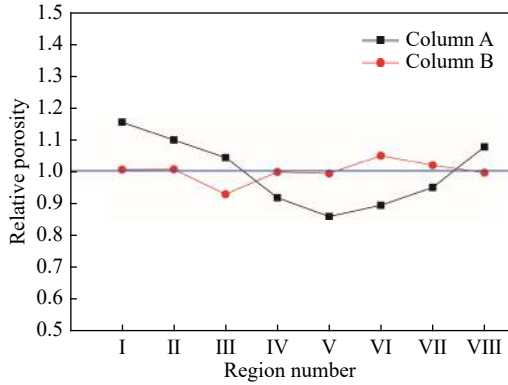


图 6 浸柱不同区域相对孔隙率变化

Fig.6 Relative porosity of different regions within ore columns

面孔隙率在不同层面高度上存在波动,表明散体孔隙率沿高度方向分布不均匀。同时,依据式(1)所示相对孔隙率计算方法,分别得到浸柱 A、B 各层面高度上的相对面孔隙率,其分布特征如图 8 所示。由图 8 可知,颗粒级配较好的浸柱 A 的相对面孔隙率在高度方向上波动幅度较大,而粒径组成较为均匀的浸柱 B 的相对面孔隙率在高度方向上波动幅度较小。计算得到浸柱 A 和 B 的面孔隙率方差分别为 0.004608 和 0.001319,则可知随着矿石颗粒不均匀系数下降 77.58%,相应的浸柱面孔隙率方差下降了 71.38%。结果表明,颗粒级配越好的矿岩散体在高度方向上孔隙率变异性越强,这与图 6 所示孔隙率在圆周方向上的分布特征具有一致性。

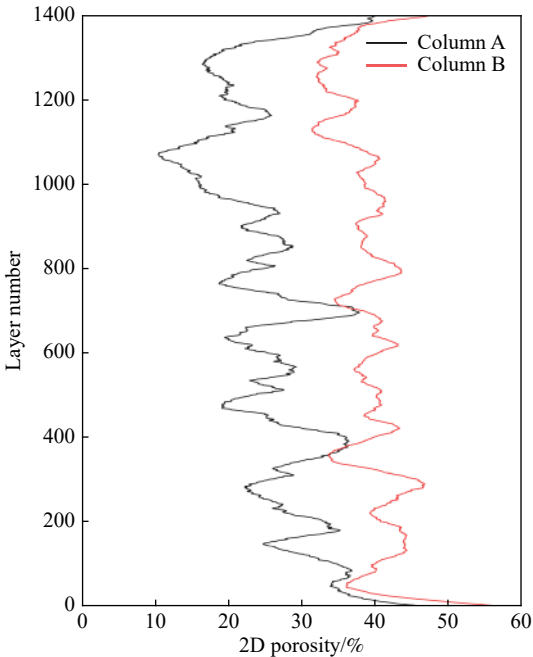


图 7 面孔隙率随浸柱高度变化曲线

Fig.7 Distribution of 2D porosity along ore column height direction

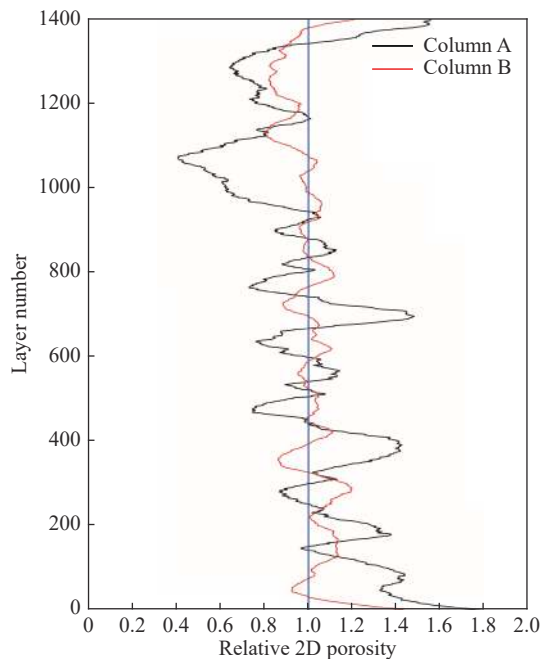


图 8 相对面孔隙率随浸柱高度变化曲线

Fig.8 Distribution of relative 2D porosity along ore column height direction

2.3 孔隙网络模型及参数分析

2.3.1 孔隙网络模型构建

由于试样孔隙空间相互连通, 难以针对三维孔隙模型进行定量分析, 故而采用等价孔隙网络模型进行量化研究. 孔隙网络模型具有和浸柱孔隙空间等价的真实拓扑结构, 可实现对复杂孔隙空间的量化描述. 本研究基于所构建的三维孔隙模型, 利用 Raeini 等^[26]优化的最大球算法建立浸柱 A 和浸柱 B 的孔隙网络模型如图 9 所示. 孔隙网络模型将孔隙空间划分为孔隙和喉道两部分, 分别由球和棍表示. 孔隙网络模型中, 球、棍

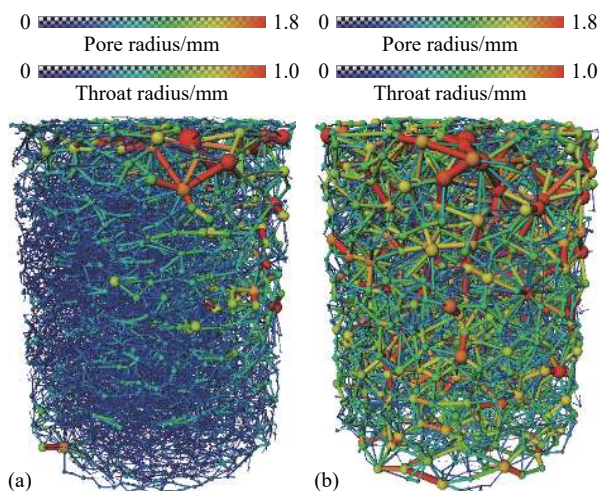


图 9 浸柱孔隙网络模型. (a) 浸柱 A; (b) 浸柱 B

Fig.9 Pore network model of ore columns: (a) column A; (b) column B

的数量表征了孔、喉的数量, 球、棍的大小则表征了孔、喉的大小^[27].

计算得到浸柱 A 的孔、喉数量分别为 14130 个和 31207 个, 浸柱 B 的孔、喉数量分别为 3553 个和 9806 个, 由图 9 可发现浸柱 A 中孔喉尺寸明显小于浸柱 B 中的孔喉, 并且浸柱 B 中孔喉尺寸空间分布较为均质. 孔喉的数量和大小与孔隙空间的复杂程度呈正相关, 矿石颗粒级配性越好, 则所构成矿堆的孔隙结构更为复杂. 分别统计浸柱 A 和浸柱 B 所对应孔隙网络模型的孔喉直径, 孔喉形状因子, 孔喉体积, 配位数等参数, 定量分析矿石粒径分布对浸柱孔喉参数的影响.

2.3.2 粒径分布对孔喉半径的影响

根据计算结果, 统计得到浸柱 A、B 孔喉数量随半径的分布情况如图 10 所示. 由图 10(a)可知, 浸柱 A、B 中孔隙半径分布规律总体相似, 随着孔隙半径的增大, 相应孔隙数量均表现出先增大后减小的趋势; 且浸柱 A、B 中孔隙数量最多的区间均为 0.1 ~ 0.2 mm, 该区间孔隙数量占总数的比例分别达到 30.11% 和 29.69%. 浸柱 A 中的小孔隙所占比例较大, 半径小于 0.7 mm 的孔隙占比达 94.61%, 而浸柱 B 中为 58.94%. 由图 10(b)可知, 浸柱 A、B 中喉道半径分布规律和孔隙半径分布规律相似, 浸柱 A 中多为小喉道, 半径小于 0.35 mm 的喉道数量占比达 90.60%, 而在浸柱 B 中仅为 52.96%. 计算得到浸柱 A、B 的平均孔隙半径分别为 0.33 mm 和 0.61 mm, 平均喉道半径分别为 0.19 mm 和 0.39 mm. 则可知, 相对于浸柱 A, 浸柱 B 的矿石平均粒径增加了 74.37%, 其平均孔隙半径和平均喉道半径也相应增大 84.85% 和 105.26%, 这表明, 随着矿石粒径的增大, 孔隙空间尺寸相应增大, 大尺寸孔隙空间所占比例增大.

2.3.3 粒径分布对喉道长度的影响

统计得到浸柱 A、B 中各喉道长度区间上喉道数量的分布特征如图 11 所示. 可见随着喉道长度的增加, 浸柱 A、B 中相应喉道数量占比均表现出先增大后减小的趋势. 同时可知, 浸柱 A 中短喉道数量占比较大, 其中 65.87% 的喉道长度小于 1 mm, 90.64% 的喉道小于 1.5 mm; 而浸柱 B 中长度小于 1 mm 的喉道数量仅占 19.10%, 长度 1.5 mm 以下的喉道数量也仅为 45.29%. 计算得到浸柱 A、B 的平均喉道长度为 0.91 mm 和 1.63 mm, 可知随着矿石平均粒径增加 74.37%, 浸柱平均喉道长度增加了 79.12%, 平均喉道长度的增幅与矿石平均粒径的增幅基本一致. 这说明, 随着矿石粒径的增大,

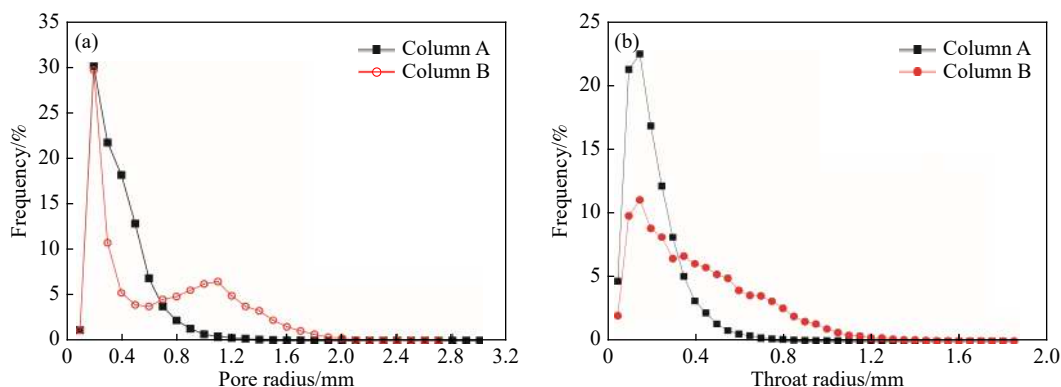


图 10 孔喉半径分布曲线。(a)孔隙;(b)喉道

Fig.10 Frequency distribution of radius: (a) pore; (b) throat

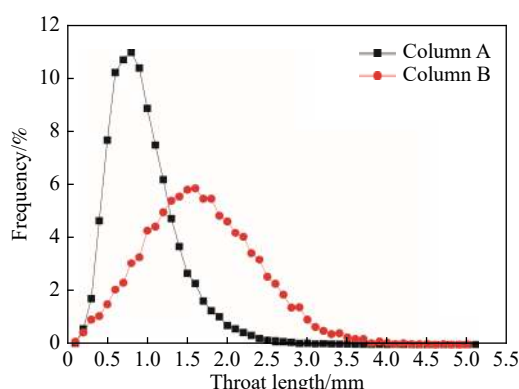


图 11 喉道长度分布曲线

Fig.11 Frequency distribution of throat length

孔隙空间中喉道长度也将增大,短喉道所占比例减少。

2.3.4 粒径分布对孔喉体积的影响

孔隙网络模型中的孔喉体积通过统计三维孔隙模型中对应的各孔喉区域体素值得到,图 12 所示为浸柱 A、B 中各孔喉体积区间上相应的孔喉数量分布频率。可以看出,绝大多数孔、喉的体积在 $0.001 \sim 100 \text{ mm}^3$, 小于 0.001 mm^3 和大于 100 mm^3 的孔喉数量极少。浸柱 A 中体积在 $0.1 \sim 1 \text{ mm}^3$ 的

孔喉数量最多,而浸柱 B 中体积在 $1 \sim 10 \text{ mm}^3$ 的孔喉数量最多。同时可知,浸柱 A 中体积大于 1 mm^3 的孔隙和喉道数量占比分别为 26.97% 和 18.88%; 而浸柱 B 中体积大于 1 mm^3 的孔隙和喉道数量占比则分别达 52.52% 和 58.10%, 浸柱 B 中大体积孔喉占比明显高于浸柱 A。计算得到浸柱 A、B 的平均孔隙体积分别为 1.20 mm^3 和 6.04 mm^3 , 平均喉道体积分别为 0.78 mm^3 和 4.23 mm^3 。则可知,在矿石平均粒径增加 74.37% 的情况下,浸柱中平均孔隙体积和平均喉道体积分别增加 403.33% 和 442.31%。上述研究显示孔喉半径、孔喉体积的分布特征具有良好的一致性,均表明随着浸柱中矿石颗粒尺寸的增大,孔隙空间中尺寸孔喉数量相应增多。

2.3.5 粒径分布对孔喉形状因子的影响

真实孔隙空间中孔、喉形状十分复杂,不便进行定量分析,因此定义形状因子 G ,以对孔、喉形状特征进行定量表征^[28]。对于喉道而言,其形状因子为:

$$G = \frac{R^2}{4A} \quad (2)$$

式中: R 为喉道内切圆半径; A 为喉道截面积。

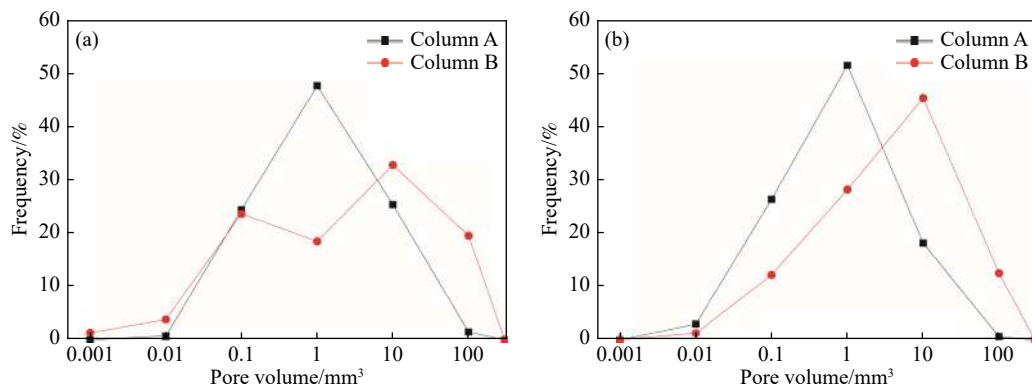


图 12 孔喉体积分布曲线。(a)孔隙;(b)喉道

Fig.12 Frequency distribution of pore volume: (a) pore; (b) throat

对于孔而言, 其形状因子等于相邻喉道形状因子的加权平均值. 计算得到浸柱 A、B 中各孔、喉空间对应的形状因子, 绘制各形状因子区间上孔、喉数量频率分布曲线, 如图 13 所示. 由图 13 可见, 浸柱 A、B 中孔喉形状因子分布区间均为 0.010 ~ 0.090, 且形状因子分布规律基本一致. 对于浸柱 A、B, 随着形状因子数值的增大, 相应的孔、喉数量均呈现出先增大后降低的趋势. 如图 13(a) 所

示, 浸柱 A 中形状因子在 0.029 ~ 0.030 间的孔隙数量最多, 占比为 5.20%; 浸柱 B 中形状因子在 0.032 ~ 0.033 间的孔隙数量最多, 占比为 5.98%. 对于喉道而言, 浸柱 A、B 中喉道数量最多的形状因子区间分别为 0.031 ~ 0.032 和 0.032 ~ 0.033. 总体而言, 浸柱 A、B 中孔喉数量在形状因子区间上的分布特征具有良好的一致性, 无显著差异, 表明颗粒级配的改变对孔隙结构形状因子的影响较小.

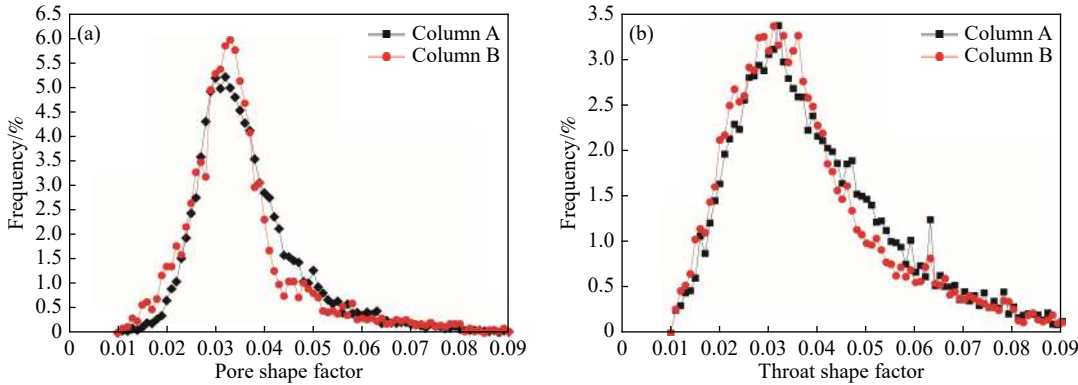


图 13 孔喉形状因子分布曲线. (a) 孔隙; (b) 喉道

Fig.13 Frequency distribution of shape factor: (a) pore; (b) throat

2.3.6 粒径分布对配位数的影响

配位数是指一个孔隙所连接的独立喉道个数, 其能有效反应孔隙空间的连通性. 统计得到浸柱 A、B 中孔隙体的配位数分别为 0 ~ 35 和 0 ~ 44, 各配位数相应孔隙数量分布频率如图 14 所示. 当配位数为 0 时, 表明该孔隙为孤立孔隙, 由图 14 可知, 浸柱 A 中孤立孔隙占比 3.8%, 浸柱 B 中孤立孔隙为 5.6%. 同时, 可发现当配位数大于 6 的情况下, 浸柱 B 中相应孔隙所占比例明显高于浸柱 A 中同配位数孔隙所占比例. 统计显示, 配位数大于 6 的孔隙在浸柱 A 中累计占比为 21.44%, 在浸柱 B 中累计占比 34.51%. 另外, 浸柱 A、B 中孔隙平均配位数分别为 4.41 和 5.51, 即随着矿石颗粒

不均匀系数下降 77.58%, 浸柱中孔隙平均配位数增加了 24.94%. 以上结果表明, 浸柱中孔隙平均配位数与矿石不均匀系数呈负相关, 即构成矿堆的矿石颗粒均匀性越好, 矿堆内孔隙空间的连通性越好, 孤立孔隙所占比例较少.

3 结论

(1) 矿石粒径分布对堆浸体系孔隙结构具有重要影响, 矿石颗粒级配性越好, 矿堆孔隙率越低. 矿石粒径越均匀, 矿堆孔隙率的空间分布也更具有均质性, 面孔隙率在不同高度上波动幅度较小. 粒径均匀的矿岩散体比级配良好矿岩散体, 更有利于产生较为均质的孔隙空间.

(2) 基于最大球算法建立的孔隙网络模型可有效表征孔隙空间的拓扑结构, 利于孔隙结构参数的定量描述. 对于堆浸体系, 孔隙网络模型中孔喉数量在各孔喉半径区间上的比例, 呈现出随半径的增大而先增大后减少的趋势; 同样, 孔喉数量随孔喉体积、孔喉形状因子、喉道长度等参数数值的增大也呈现先增大后减少的趋势.

(3) 矿石粒径分布对孔隙尺寸和连通性具有显著影响, 随着细颗粒矿石的减少, 大孔隙增多, 孔喉半径、喉道长度、孔喉体积等参数相应增大; 随着矿石粒径均匀性的增加, 孤立孔隙所占比例减少, 高配位数孔隙所占比例增大, 矿堆内孔隙空

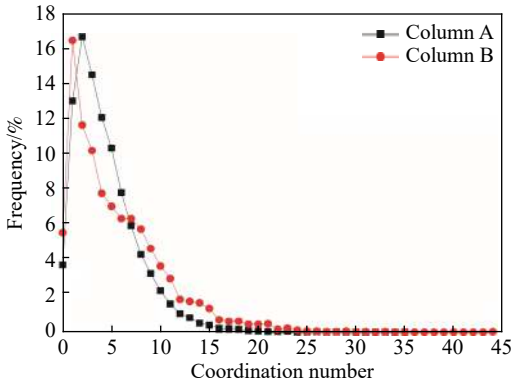


图 14 孔隙配位数分布曲线

Fig.14 Frequency distribution of coordination number

间具有更好的连通性。孔喉形状因子受矿石粒径分布影响较小, 浸柱 A(0~10 mm)和浸柱 B(5~10 mm)中各形状因子数值区间上孔喉数量的分布频率具有良好的一致性。

参 考 文 献

- [1] Ilankoon I M S K, Tang Y, Ghorbani Y, et al. The current state and future directions of percolation leaching in the Chinese mining industry: Challenges and opportunities. *Miner Eng*, 2018, 125: 206
- [2] Yin S H, Wang L M, Kabwe E, et al. Copper bioleaching in China: review and prospect. *Minerals*, 2018, 8(2): 32
- [3] Petersen J. Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores—a brief overview. *Hydrometallurgy*, 2016, 165: 206
- [4] 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)
- [5] Ghorbani Y, Franzidis J P, Petersen J. Heap leaching technology—current state, innovations, and future directions: a review. *Miner Process Extract Metall Rev*, 2016, 37(2): 73
- [6] Miao X X, Wu A X, Yang B H. Recent advances in heap leaching research: Characterisation and modelling. *Chin J Nonferrous Met*, 2018, 28(11): 2327
(缪秀秀, 吴爱祥, 杨保华. 堆浸水力学研究前沿: 结构表征与模型仿真. 中国有色金属学报, 2018, 28(11): 2327)
- [7] Bouffard S C, West-Sells P G. Hydrodynamic behavior of heap leach piles: Influence of testing scale and material properties. *Hydrometallurgy*, 2009, 98(1-2): 136
- [8] Wu A X, Wang S Y, Yang B H. Effect of particle structure on permeability of leaching dump. *Min Res Dev*, 2011(5): 22
(吴爱祥, 王少勇, 杨保华. 堆浸散体颗粒结构对溶浸液渗流规律的影响. 矿业研究与开发, 2011(5): 22)
- [9] Rong L W, Dong K J, Yu A B. Lattice-Boltzmann simulation of fluid flow through packed beds of spheres: effect of particle size distribution. *Chem Eng Sci*, 2014, 116: 508
- [10] Ilankoon I M S K, Neethling S J. Hysteresis in unsaturated flow in packed beds and heaps. *Miner Eng*, 2012, 35: 1
- [11] Ding D X, Li G Y, Xu W P, et al. Regularities for saturated water seepage in loose fragmented medium. *Chin J Geotech Eng*, 2010, 32(2): 180
(丁德馨, 李广悦, 徐文平, 等. 松散破碎介质中液体饱和和渗流规律研究. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 180)
- [12] Ilankoon I M S K, Neethling S J. Liquid spread mechanisms in packed beds and heaps. The separation of length and time scales due to particle porosity. *Miner Eng*, 2016, 86: 130
- [13] Poisson J, Chouteau M, Aubertin M, et al. Geophysical experiments to image the shallow internal structure and the moisture distribution of a mine waste rock pile. *J Appl Geophys*, 2009, 67(2): 179
- [14] Yin S H, Wang L M, Chen X, et al. Effect of ore size and heap porosity on capillary process inside leaching heap. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2016, 26(3): 835
- [15] Ye Y J, Ding D X, Li G Y, et al. Regularities for liquid saturated seepage in uranium ore heap for heap leaching. *Rock Soil Mech*, 2013, 34(8): 2243
(叶勇军, 丁德馨, 李广悦, 等. 堆浸铀矿堆液体饱和和渗流规律的研究. 岩土力学, 2013, 34(8): 2243)
- [16] 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
- [17] Ye J B, Zhang J F, Zou W L. Influences of grain shape on pore characteristics of filled breakstone aggregate. *Rock Soil Mech*, 2018, 39(12): 4457
(叶加兵, 张家发, 邹维列. 颗粒形状对碎石料孔隙特性影响研究. 岩土力学, 2018, 39(12): 4457)
- [18] Nosrati A, Skinner W, Robinson D J, et al. Microstructure analysis of Ni laterite agglomerates for enhanced heap leaching. *Powder Technol*, 2012, 232: 106
- [19] Cnudde V, Boone M N. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: a review of the current technology and applications. *Earth-Sci Rev*, 2013, 123: 1
- [20] Hoummady E, Golfier F, Cathelineau M, et al. A multi-analytical approach to the study of uranium-ore agglomerate structure and porosity during heap leaching. *Hydrometallurgy*, 2017, 171: 33
- [21] Lin Q, Neethling S J, Courtois L, et al. Multi-scale quantification of leaching performance using X-ray tomography. *Hydrometallurgy*, 2016, 164: 265
- [22] Wu A X, Yin S H, Li J F. Influential factors of permeability rule of leaching solution in ion-absorbed rare earth deposits with in situ leaching. *J Cent South Univ Sci Technol*, 2005, 36(3): 506
(吴爱祥, 尹升华, 李建锋. 离子型稀土矿原地溶浸溶浸液渗流规律的影响因素. 中南大学学报: 自然科学版, 2005, 36(3): 506)
- [23] Liu Y F, Zheng D S, Yang B, et al. Microscopic simulation of influence of particle size and gradation on permeability coefficient of soil. *Rock Soil Mech*, 2019, 40(1): 403
(刘一飞, 郑东生, 杨兵, 等. 粒径及级配特性对土体渗透系数影响的细观模拟. 岩土力学, 2019, 40(1): 403)
- [24] Yang B H, Wu A X, Miao X X. 3D micropore structure evolution of ore particles based on image processing. *Chin J Eng*, 2016, 38(3): 328
(杨保华, 吴爱祥, 缪秀秀. 基于图像处理的矿石颗粒三维微观孔隙结构演化. 工程科学学报, 2016, 38(3): 328)
- [25] Zhang S, Liu W Y, Granata G. Effects of grain size gradation on the porosity of packed heap leach beds. *Hydrometallurgy*, 2018, 179: 238
- [26] Raeini A Q, Bijeljic B, Blunt M J. Generalized network modeling: Network extraction as a coarse-scale discretization of the void space of porous media. *Phys Rev E*, 2017, 96(1): 013312
- [27] Jiao H Z, Wang S F, Wu A X, et al. Pore network model of tailings thickener bed and water drainage channel evolution under the shearing effect. *Chin J Eng*, 2019, 41(8): 987
(焦华喆, 王树飞, 吴爱祥, 等. 剪切浓密床层孔隙网络模型与导水通道演化. 工程科学学报, 2019, 41(8): 987)
- [28] Bultreys T, Lin Q Y, Gao Y, et al. Validation of model predictions of pore-scale fluid distributions during two-phase flow. *Phys Rev E*, 2018, 97(5): 053104