

氧化铜矿堆浸双重介质分形渗流演化规律

薛振林, 吴爱祥, 尹升华, 刘超

(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)

摘要: 为了揭示氧化铜矿堆浸过程中散体介质及渗流状态的演化规律, 通过阐述堆浸体系孔隙和裂隙双重介质概念, 结合氧化铜酸浸实验、CT 技术和扫描电镜技术, 在微观和细观层面研究孔隙和裂隙分形演化特征, 得到孔隙率和渗透率随浸出时间的演化规律, 建立氧化铜堆浸随时间演化的分形双重介质渗流模型。结果表明: 氧化铜矿石经酸浸后, 微观形貌变化较大, 裂隙分形盒维数明显增加; 而颗粒间孔隙的分形盒维数略微减小。考虑了堆浸双重介质、介质间窜流、动态孔隙率和渗透率以及分形演化规律的渗流模型更符合实际, 可在理论上揭示溶浸液渗流过程的一般规律。

关键词: 氧化铜; 堆浸; 分形; 双重介质; 渗流

中图分类号: TF19

文献标志码: A

Evolution rules of dual medium fractal seepage in copper oxide ore heap leaching

XUE Zhen-lin, WU Ai-xiang, YIN Sheng-hua, LIU Chao

(Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to reveal the evolution rules of granular ore medium and seepage state in the process of copper oxide ore heap leaching, the concept of pore-fracture double-porosity media in dump leaching was illustrated, and the pore-fracture fractal evolution characteristics were researched in microscopic and mesoscopic level by the copper oxide acid leaching experiments, CT and SEM techniques. The evolution rules of the porosity and permeability with leaching time were obtained, and the fractal seepage model of copper oxide dump leaching for double-porosity system was established. The results show that the microstructure of copper oxide changes greatly after acid leaching, the fracture fractal dimension increases obviously; but the fractal dimension of pore between particles decreases a little. The seepage model is more realistic to consider the dual media, interporosity flow state between the media, dynamic porosity and permeability, and the fractal evolution rules, which can reveal the general rule of seepage process in dump leaching.

Key words: copper oxide; dump leaching; fractal; media with double-porosity; seepage

堆浸系统是以孔隙网络为纽带, 气相、固相和液相相互作用及温度场、浓度场和渗流场交互耦合, 形成的复杂动态系统。堆浸多孔介质由不同粒径和形状的矿石堆积而成^[1], 介质中存在各种细微孔-裂隙。浸

出过程中, 由于受多种因素的影响, 如物理因素、化学因素和微生物因素等^[2-4], 矿岩散体孔、裂隙尺寸、孔隙率及连通性等随浸出的进行不断变化, 使得堆浸过程渗流更为复杂, 单一的多孔介质渗流已难以描述。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374035); 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-13-0669); 全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目(201351)

收稿日期: 2013-12-26; **修订日期:** 2014-05-04

通信作者: 吴爱祥, 教授, 博士; 电话: 010-62333563; E-mail: wuaixiang@126.com

国内外学者基于堆浸渗流过程和浸润面演化等,建立了经典的数学模型,其中以陈喜山渗流模型、王昌汉模型、CARIAGA 模型为代表。DOUNFFARD 等^[5]对堆浸过程中溶液渗流动力学进行了研究,建立了基于对流时间、动水与不动水比率、扩散时间和孔径等变量的 PSPD 模型,但模型均未能全面地反映浸出过程的实际规律。因此,迫切需要从新角度出发,研究堆浸体系介质和渗流演化的一般规律。PFEIFER 等^[6]较早地发现了多孔介质具有分形孔隙结构特征。近年来,杨建等^[7]通过分析不同样品的孔隙分布分维数,研究了松散颗粒孔隙结构的分形特征。张彦洪等^[8]应用分形几何理论,建立了分形信息维数与岩体渗透系数的关系。HUNT^[9]基于分形几何概念对多孔介质的饱和与非饱和条件下流体渗透输运性质进行了研究。LI 等^[10]建立了铝土矿浸出过程的分形动力学模型和三水铝矿物理一致性的浸出模型,考虑了粒级分形维数特征与反应活性分形维数特征。王恩志等^[11]提出了双重裂隙系统渗流原理,建立了能详细描述主次裂隙系统渗流机制的双重裂隙渗流模型。

本文作者以分形理论与双重介质理论为基础,试图阐明堆浸体系的双重介质体系概念,揭示孔隙和裂隙在浸出过程中的演化规律与动态分形特征,分析分形演化特征与渗流作用关系,建立氧化铜堆浸随时间演化的分形双重介质渗流模型,从理论上揭示氧化铜堆浸的一般规律。

1 堆浸体系双重介质概念

双重介质是指存在于同一渗流系统中,同时具有两种不同渗透能力的多孔介质^[12]。堆浸体系中主要存在颗粒间的大孔隙和颗粒内裂隙两种渗流通道,如图1所示。大孔隙与颗粒形状、大小及空间排列等因素有关。大孔隙具有较强的导水能力,是渗流的主导通道,控制着溶液分布,对温度调节和溶液输送等过程具有重要作用。矿石内的原生和次生微裂隙的渗透性较差,但其数量多,为溶浸液提供了贮存空间。溶浸液在其中流动缓慢,滞流时间长,为溶液与矿物反应创造了有利的环境。堆浸孔隙和裂隙介质系统相互交织联系在一起,形成了一个复杂连续的双重介质系统。

堆浸体系双重介质的定义不仅考虑了矿石颗粒间孔隙的发育特征和分布规律,而且考虑了矿石内部裂隙渗透机制。综合孔隙和裂隙的不同渗透特性,更真实地反映了堆浸复杂介质中的渗流。

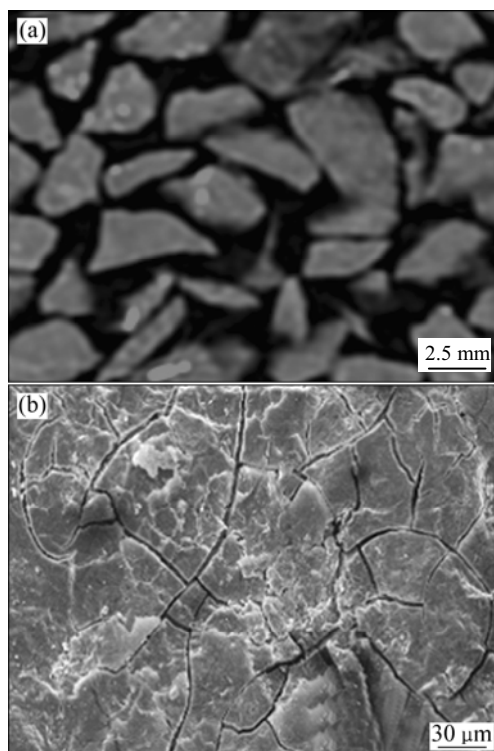


图1 堆浸体系中孔隙和裂隙介质形貌

Fig. 1 Morphologies of pore-fracture media of dump leaching system: (a) Pores between ores; (b) Fracture in ore

2 孔隙、裂隙演化实验

针对堆浸体系中孔隙和裂隙双重介质在细观和微观的不同尺度特征,选取柱浸实验联合 CT 技术研究颗粒间孔隙的分形特征,选取颗粒浸泡实验联合电镜扫描技术研究颗粒微裂隙系统的分形特征。

2.1 实验材料

实验矿样取自云南某矿的氧化铜矿石,将矿样破碎至粒径小于 10 mm,并进行筛分分级,混合均匀后用于孔隙演化实验。裂隙演化实验将原矿加工成 2.0 cm×1.5 cm×0.5 cm 的长方体。

2.2 实验仪器

孔隙演化实验仪器为 Carl Zeiss 公司生产的 EVO@18 钨灯丝扫描电子显微镜,分辨率为 3.0 nm@30 kV。裂隙演化实验仪器选用螺旋 CT 机,型号为 SOMATOM Sensation 16。

2.3 实验过程

颗粒间孔隙演化实验:选取不同粒径矿石进行混

合,均匀置于有机玻璃柱中,玻璃柱高度为540 mm,内径为60 mm,进行常规酸浸实验,时间为15 d。酸浸开始前和结束后,利用X射线CT技术无损伤地探测矿石颗粒间孔隙结构,得到实验前后孔隙结构CT图像。

采用氧化铜矿颗粒浸泡实验,对矿石颗粒微裂隙的演化进行研究。以SEM作为观测手段。矿石样品经喷碳处理,不进行抛光和离子减薄处理。取浓度为60 g/L硫酸500 mL进行酸浸实验,分别在反应进行12、24和48 h后,取出酸浸样品进行自然干燥,对相同标识区进行观察,得到不同时间的SEM像。

3 结果与讨论

3.1 图像获取及预处理

通过不同尺度的实验得到孔隙和裂隙随时间推移的图像,首先对图像进行预处理。对于孔隙演化的CT图像,用孔隙结构图像处理方法提取孔隙结构参数信息,对获得的图像进行二值化处理,得到二值图像,实验结果如图2所示。

首先利用Image J软件对SEM像分别进行加工,得到其裂隙特征,然后进行二值化处理,得到二值图像,结果如图3所示。

3.2 孔隙和裂隙的分形维数演化规律

堆浸的矿岩散体是无序的非均匀介质,其孔隙和裂隙结构具有随机性,难以用传统的欧几里德理论描述。分形几何学理论能够更加深刻地描述、研究和分析杂乱无章、不规则和随机的自然现象^[13]。堆浸体系中颗粒间形成不同大小和形状、连通或非连通的随机

孔隙或通道,不同尺度下它们具有自相似性,符合分形理论特征。分形理论可以更准确地描述堆浸双重多孔介质结构的演化特征。

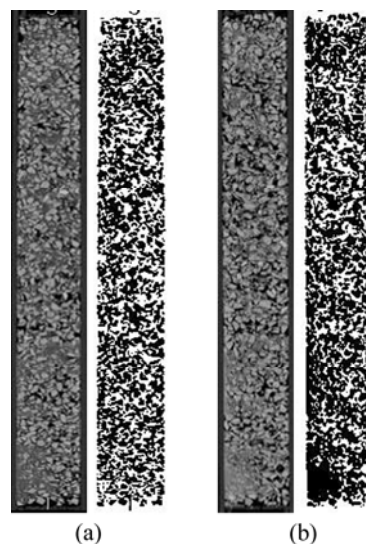


图2 颗粒间的孔隙演化特征

Fig. 2 Pore evolution characteristics between particles: (a) Before leaching; (b) After leaching

3.2.1 计算分形维数

在实际应用中分形维数通常是指分形盒维数^[14]。设 $F \subset R^n$ 为任意非空有界集合, $N_\delta(F)$ 表示覆盖集 F 所需直径最大为 δ 的集的最少数目,则 F 的下、上分形盒维数分别定义为

$$\text{Dim}_B(F) = \liminf_{\delta \rightarrow \infty} \frac{\lg N_\delta(F)}{-\lg \delta} \quad (1a)$$

$$\text{Dim}_B(F) = \limsup_{\delta \rightarrow \infty} \frac{\lg N_\delta(F)}{-\lg \delta} \quad (1b)$$

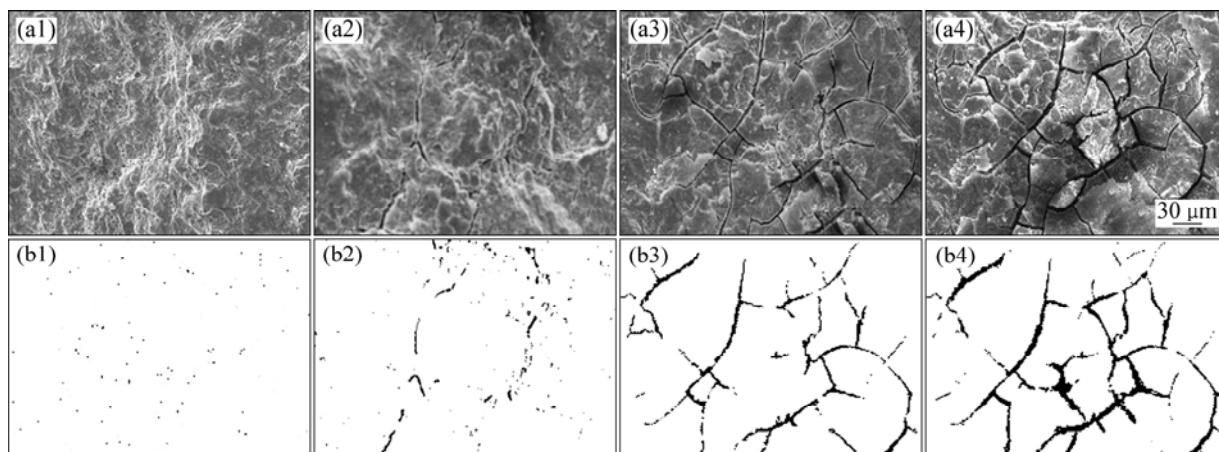


图3 颗粒表面裂隙演化特征

Fig. 3 Evolution characteristics of particle surface crack: (a1)–(a4) SEM images; (b1)–(b4) Binary images; (a1), (b1) 0 h; (a2), (b2) 12 h; (a3), (b3) 24 h; (a4), (b4) 48 h

若其相等,即将这个值称为 F 的分形盒维数,即

$$\text{Dim}_B(F) = \lim_{\delta \rightarrow \infty} \sup \frac{\lg N_\delta(F)}{-\lg \delta} \quad (2)$$

对实验结果进行分形维数计算,以浸出 48 h 后的颗粒裂隙分形为例,将经过预处理的图像通过分形计算软件 Fractal Fox 进行计算,得到该图的分形盒维数,结果如图 4 所示。图 4 表明,48 h 后分形盒维数 D 为 1.55461。

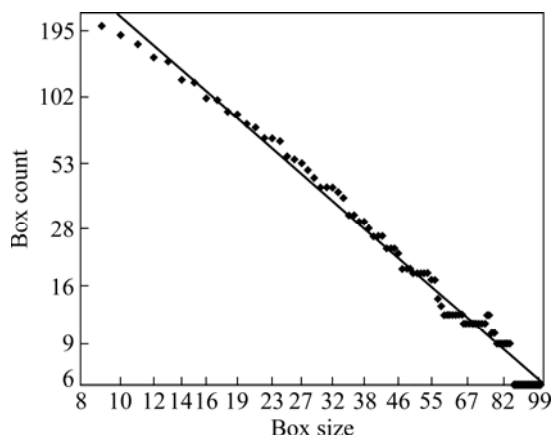


图 4 酸浸 48 h 后裂隙分形盒维数计算结果

Fig. 4 Calculated results of fracture fractal box dimension after acid leaching for 48 h

3.2.2 裂隙分形演化规律

通过上述方法分别计算得到不同浸出时间的裂隙分形盒维数,计算结果如下: 0 h, $D=1.174\ 49$; 12 h, $D=1.249\ 73$; 24 h, $D=1.484\ 40$; 48 h, $D=1.554\ 61$ 。通过线性拟合得到裂隙分形盒维数随时间的演化规律,结果如图 5 所示。

裂隙分形盒维数 $D_1(t)$ 与时间 t 的拟合结果为

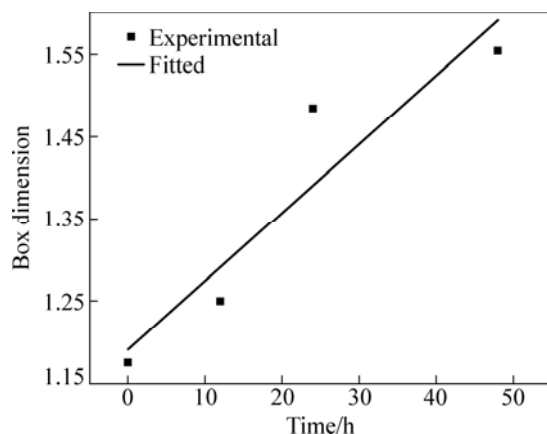


图 5 裂隙分形盒维数演化规律

Fig. 5 Evolution rule of fracture fractal dimension

$$D_1(t) = 1.19054 + 0.00835t \quad (3)$$

结果表明,氧化铜矿石经过酸浸作用后微观形貌发生了很大变化。随着酸浸的进行,矿物颗粒表面微裂隙发育逐渐加深,裂隙更为明显,分形盒维数逐渐增加,并且增加幅度较大。

3.2.3 孔隙分形演化规律

计算颗粒间孔隙在浸出前后的分形盒维数,结果如下: 浸出前 $D=1.7980$, 浸出后 $D=1.7432$ 。通过线性拟合得到孔隙分形盒维数 $D_2(t)$ 随时间演化规律,拟合结果为

$$D_2(t) = 1.798 - 0.000152t \quad (4)$$

结果表明: 虽然随着酸浸实验的进行,介质内有颗粒的运移、沉积和流失等现象出现,但颗粒间的孔隙分形盒维数无较大变化,分形盒维数仅略微减小,其计算结果体现的是整个堆浸散体介质的固有属性。

3.3 孔隙率与渗透率的演化规律

经分析,孔隙和裂隙双重介质随堆浸反应的进行是动态变化的,其变化导致渗透率的变化,进而对渗流状态产生影响。以孔隙和裂隙分形演化特征计算结果为依据,分别采用毛细管束模型^[15]和裂隙模型的渗透率表达式,计算氧化铜堆浸过程中动态的孔隙和裂隙渗透率和孔隙率随浸出时间的演化规律。动态渗透率为

$$k_1(t) = \frac{\lambda_{1a}^3}{12\eta^0} \frac{D_1(t)}{\delta[2 + \delta_1 - D_1(t)]} (1 - \lambda^{-2 + \delta_1 - D_1(t)}) \quad (5)$$

将式(3)代入式(5)得

$$k_1(t) = \frac{\lambda_{1a}^3}{12\eta^0} \frac{1.19054 + 0.00835t}{\delta(2 + \delta_1 - 1.19054 - 0.00835t)} (1 - \lambda^{-2 + \delta_1 - 1.19054 - 0.00835t}) \quad (6)$$

$$k_2(t) = \frac{\lambda_{2a}^3}{128A^0} \frac{D_2(t)}{\delta[3 + \delta_2 - D_2(t)]} (1 - \lambda^{-3 + \delta_2 - D_2(t)}) \quad (7)$$

将式(4)代入式(7)得

$$k_2(t) = \frac{\lambda_{2a}^3}{128A^0} \frac{1.798 - 0.000152t}{\delta(3 + \delta_2 - 1.798 + 0.000152t)} (1 - \lambda^{-3 + \delta_2 - 1.798 + 0.000152t}) \quad (8)$$

动态孔隙率为

$$\phi_1(t) = \frac{\lambda_{1a}}{\eta^0} \frac{D_1(t)\delta_1}{D_1(t) + \delta_1 - 2} \left(\frac{1}{\frac{1}{\lambda_1^{D_1(t)+\delta_1-2}} - 1} - 1 \right) \quad (9)$$

将式(3)代入式(9)得

$$\phi_1(t) = \frac{\lambda_{1a}}{\eta^0} \frac{(1.19054 + 0.00835t)\delta_1}{1.19054 + 0.00835t + \delta_1 - 2} \left(\frac{1}{\frac{1}{\lambda_1^{1.19054+0.00835t+\delta_1-2}} - 1} - 1 \right) \quad (10)$$

$$\phi_2(t) = \frac{\pi\lambda_{2a}^2}{4A^0} \frac{D_2(t)\delta_2}{D_2(t) + \delta_2 - 3} \left(\frac{1}{\frac{1}{\lambda_2^{D_2(t)+\delta_2-3}} - 1} - 1 \right) \quad (11)$$

将式(4)代入式(11)得

$$\phi_2(t) = \frac{\pi\lambda_{2a}^2}{4A^0} \frac{(1.798 - 0.000152t)\delta_2}{1.798 - 0.000152t + \delta_2 - 3} \left(\frac{1}{\frac{1}{\lambda_2^{1.798-0.000152t+\delta_2-3}} - 1} - 1 \right) \quad (12)$$

式中: $D(t)$ 为分形盒维数随时间的演化规律; λ_{1a} 为最大缝宽; λ_{2a} 为最大毛管直径; δ 为渗流通道的迂曲度, $\delta = L_c / L_m$, L_c 为渗流通道的平均长度, L_m 为研究区域长度; $k(t)$ 为渗透率随时间的变化规律, 只与介质本身结构特性有关; $\phi(t)$ 为孔隙率随时间的变化; η^0 为裂缝的单位深度; A^0 为多孔介质单位横截面。

这样, 就得到了氧化铜堆浸过程中孔隙和裂隙的渗透率和孔隙率随浸出时间的演化规律。

3.4 孔隙和裂隙间的窜流分析

孔隙和裂隙的渗透特性不同, 存在着两个平行渗流场。溶液浸入矿石中与矿物反应, 同时将溶解的成分通过裂隙运移出颗粒, 孔隙和裂隙间不断地发生着窜流现象。这种窜流现象在以往研究中经常被忽略, 但其对浸出过程有很大影响。这种现象可用窜流系数进行描述, 窜流系数反映溶浸液在介质间的窜流能力。其大小取决于颗粒内裂隙与粒间孔隙渗透率的比值和矿石被分割的程度。窜流系数定义为

$$\lambda = \alpha \frac{K_1}{K_2} r_w^2 \quad (13)$$

式中: K_1 和 K_2 分别为颗粒内裂隙系统和颗粒间孔隙系统的渗透率; α 为形状因子, 各式中下标 1 代表裂隙系统, 下标 2 代表孔隙系统; 形状因子 α 与矿石颗粒的大小和正交裂隙组数有关, 矿石颗粒越小, 裂隙密度越大, 形状因子越大。WARREN 等^[16]提出的 α 的表达式为

$$\alpha = \frac{4n(n+2)}{L^2} \quad (14)$$

式中: n 为正交裂隙组数; L 为岩块的特征长度, m。

4 双重介质分形渗流模型的建立

考虑氧化铜堆浸中双重介质动态的分形演化特征, 应用 Warren-Root 模型^[16]将堆浸体系进行适当简化: 具有互相垂直孔隙和充满孔隙的岩块两个相互影响的系统。考虑两种介质间窜流、分形演化规律的影响, 建立氧化铜堆浸的双重介质分形渗流演化模型。

4.1 运动方程

设达西定律对孔隙和裂隙均适用, 则渗流速度公式如下:

对于裂隙系统,

$$v_1(t) = -\frac{K_1(t)}{\mu} \text{grad} p_1 \quad (15)$$

对于孔隙系统,

$$v_2(t) = -\frac{K_2(t)}{\mu} \text{grad} p_2 \quad (16)$$

式中: $v_1(t)$ 和 $v_2(t)$ 分别为裂隙和孔隙的渗流速度; μ 为有效孔隙度; $\text{grad} p_1$ 和 $\text{grad} p_2$ 分别为裂隙和孔隙的梯度压力。

4.2 窜流方程

孔隙和裂隙之间存在压力差, 窜流速度与压力差的大小有关。堆浸过程中溶浸液流速缓慢, 孔隙和裂隙间溶液的交换较为缓慢, 可以视为稳定过程。则有窜流方程:

$$q(t) = \frac{\alpha \rho_0 K_1(t)}{\mu} (p_1 - p_2) \quad (17)$$

式中: $q(t)$ 为单位时间内单位体积散体介质流出的流体质量, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; ρ_0 为液体初始密度; p_1 和 p_2 分别为压力。

4.3 状态方程

视孔隙介质和裂隙介质流体均为微可压缩流体,

则

裂隙压缩特性为

$$\phi'_1(t) = \phi_1(t) + C_{\phi_1} (p_1 - p_i) \quad (18)$$

式中: C_{ϕ_1} 为裂隙压缩系数。

孔隙的压缩特性为

$$\phi_2'(t) = \phi_2(t) + C_{\phi_2}(p_2 - p_i) \quad (19)$$

式中: C_{ϕ_2} 为孔隙压缩系数。

对于流动的溶浸液有

$$\rho = \rho_0[1 + C_L(p - p_i)] \quad (20)$$

式中: ρ 和 ρ_0 分别为任一压力和初始压力下液体的密度; C_L 为液体压缩系数。

由于介质和流体具有微可压缩性, 分别求 $\rho\phi_2'(t)$ 和 $\rho\phi_1'(t)$, 舍去高阶无穷小后对时间求导有

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi_1'(t)\rho) = \rho_0 C_1 \frac{\partial(\phi_1(t)p_1)}{\partial t} \quad (21)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi_2'(t)\rho) = \rho_0 C_2 \frac{\partial(\phi_2(t)p_2)}{\partial t} \quad (22)$$

式中: $C_1 = (C_L + \frac{C_{\phi_1}}{\phi_{1_0}})$, $C_2 = (C_L + \frac{C_{\phi_2}}{\phi_{2_0}})$ 。

4.4 连续方程

孔隙和裂隙的连续性方程分别如下:

对于裂隙系统,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi_1'(t)\rho) + \text{div}(\rho v_1) + q(t) = 0 \quad (23)$$

对于孔隙系统,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi_2'(t)\rho) + \text{div}(\rho v_2) - q(t) = 0 \quad (24)$$

假设堆浸系统中各项同性, 则可以将对流项简化为

$$\text{div}(\rho v_1) = -\frac{K_1(t)}{\mu} \rho_0 \text{div}(\text{grad} p_1) \quad (25)$$

$$\text{div}(\rho v_2) = -\frac{K_2(t)}{\mu} \rho_0 \text{div}(\text{grad} p_2) \quad (26)$$

因此, 最终方程为

$$C_1 \frac{\partial(\phi_1'(t)p_1)}{\partial t} - \frac{K_1(t)}{\mu} \text{div}(\text{grad} p_1) + \frac{\partial K_1(t)}{\mu} (p_1 - p_2) = 0 \quad (27)$$

$$C_2 \frac{\partial(\phi_2'(t)p_2)}{\partial t} - \frac{K_2(t)}{\mu} \text{div}(\text{grad} p_2) - \frac{\partial K_1(t)}{\mu} (p_1 - p_2) = 0 \quad (28)$$

最后, 将 $k_1(t)$ 、 $k_2(t)$ 、 $\phi_1'(t)$ 和 $\phi_2'(t)$ 代入各式即可得到描述氧化铜堆浸双重介质分形渗流演化规律的微分方程。

5 结论

1) 阐述了堆浸体系孔隙和裂隙双重介质概念, 在

微观和细观层面研究孔隙和裂隙分形演化特征, 得到分形盒维数随时间变化的拟合方程。结果表明, 氧化铜矿石经酸浸后微观形貌变化较大, 裂隙分形维数明显增加; 而颗粒间孔隙的分形维数仅略微减小。

2) 计算得到了描述孔隙率与渗透率随浸出的演化规律方程, 通过引入窜流系数描述了孔隙和裂隙介质间的窜流状态。

3) 综合考虑氧化铜堆浸体系的双重介质特性和分形演化规律, 得到了其运动方程、窜流方程、状态方程和连续方程, 建立了氧化铜堆浸随时间演化的分形双重介质渗流模型, 从理论上揭示了溶浸液渗流过程的一般规律。

REFERENCES

- [1] GUYON E. Disorders in granular matte[J]. Physica A, 2005, 357(5): 150-158.
- [2] PRADHAN N, NATHSARMA K C, RAO K S, SUKLA L B, MISHRA B K. Heap bioleaching of chalcopyrite: A review[J]. Minerals Engineering, 2008, 21(5): 355-365.
- [3] LEATY M J, DAVIDSON M R, SCHWARZ M P. A model for heap bioleaching of chalcocite with heat balance: Bacterial temperature dependence[J]. Minerals Engineering, 2005, 18(13): 1239-1252.
- [4] MOUSAVI S M, JAFARI A, YAGHMA S, VOSSOUGH M, SARKOMAA P. Computer simulation of fluid motion in a porous bed using a volume of fluid method: application in heap leaching[J]. Minerals Engineering, 2006, 19(10): 1077-1083.
- [5] DOUNFFARD S C, DIXON D G. Investigative study into the hydrodynamics of heap leaching processes[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2001, 32(5): 763-776.
- [6] PFEIFER P, AVNIR D. Chemistry in nonintegral dimensions between two and three[J]. J Chemphys, 1983, 79(7): 3369-3558.
- [7] 杨建, 陈家军, 杨周喜. 松散砂粒孔隙结构、孔隙分形特征及渗透率研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(3): 93-98.
- YANG Jian, CHEN Jia-jun, YANG Zhou-xi. Study of pore structure, pore fractal feature and permeability of unconsolidated sand[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(3): 93-98.
- [8] 张彦洪, 柴军瑞. 考虑渗流特性的岩体结构面分形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28: 3423-3429.
- ZHANG Yan-hong, CHAI Jun-rui. Study on fractal property of fractured rock mass considering seepage characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28: 3423-3429.
- [9] HUNT A G. Percolative transport in fractal porous media[J]. Chaos Solitons and Fractals, 2004, 19: 309-325.

- [10] LI B, ANH V N. Developing a physically consistent model for gibbsite leaching kinetics[J]. Hydrometallurgy, 2010, 104: 86–98.
- [11] 王恩志, 王洪涛, 孙 役. 双重裂隙系统渗流模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17: 400–406.
WANG En-zhi, WANG Hong-tao, SUN Yi. Study on seepage flow model in double fracture systems[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17: 400–406.
- [12] 刘慈群, 郭尚平. 多重介质渗流研究进展[J]. 力学进展, 1982, 12(4): 360–364.
LIU Ci-qun, GUO Shang-ping. Research review on multimedia percolation[J]. Advances in Mechanics, 1982, 12(4): 360–364.
- [13] 李伟才, 张建光. 分形理论在渗流力学中的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2009(2): 20–22.
LI Wei-cai, ZHANG Jian-guang. The application of fractal theory in seepage mechanics[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2009(2): 20–22.
- [14] 朱 凯, 李晓宁. 分形维数及其在图像分析中的应用研究[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2010, 38(2): 176–179.
ZHU Kai, LI Xiao-ning. Research on fractal dimension and its application in image analysis[J]. Journal of Henan Normal University: Natural Science, 2010, 38(2): 176–179.
- [15] ANDRADE J J, ALMEDIA M P, MENDES F J, HAVLIN S, SUKI B, STANLEY H E. Fluid flow through porous media: The role of stagnant zones[J]. Physical Review Letters, 1997, 79(20): 3901–3904.
- [16] WARREN J E, ROOT P J. The behavior naturally fractured reservoirs[J]. SPE Journal, 1963, 228(3): 245–255.

(编辑 陈卫萍)