

文章编号:0253-9993(2007)07-0710-04

原地爆破浸出开采中的溶质运移特性

李启成, 段小林

(南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 研究了某铀矿原地爆破浸出开采中的溶质运移特性, 针对溶质在矿堆中的输运与分布受到对流、分子扩散、机械弥散、吸附和化学反应等多种因素的影响, 基于质量守恒定律推导出了原地爆破浸出过程溶质运移的基本方程。采用解析-优化法确定了溶质运移的水动力弥散系数和阻滞系数等有关参数, 结合解析-优化参数得出溶液浓度值与试验测试值拟合曲线吻合, 并通过现场工业浸出试验验证了数学模型的有效性。

关键词: 原地爆破浸出; 溶质运移; 模型; 解析-优化解

中图分类号: TD868 **文献标识码:** A

Properties of solute transport of stope leaching

LI Qi-cheng, DUAN Xiao-lin

(School of Mechanical Engineering, Nanhua University, Hengyang 421001, China)

Abstract: The properties of solute transport during stope leaching were investigated. The solute's transport and distribution were affected by molecular diffusion, convection, mechanical dispersion, adsorption, chemical reactions and so on. Based on mass conservation method, the equations of solute transport during stope leaching were derived. The hydrodynamic dispersion and retard coefficient were obtained by analysis-optimization method. The model was used to predicted experimental solution concentration. Predicted results fit experimental results well.

Key words: stope leaching; solute transport; model; analysis-optimization solution

原地爆破浸出是一种在矿体自然埋藏条件下进行原地爆破落矿筑堆, 对矿堆进行布液浸出, 通过溶浸液与矿物的化学反应选择性地溶解从矿石中浸出有价金属, 集采选、冶于一体的新型开采方法。原地爆破浸出开采是利用井巷工程和挤压爆破技术, 就地崩落矿石, 构筑矿石微细裂隙发育、级配合理、孔隙度均匀适度、渗透性良好的采场矿堆, 其特点是80%左右的矿石留在原采场就地布液浸出, 20%左右的附产矿石出露地表堆浸^[1,2]。该方法采切工程量少, 废石、尾渣排放量少, 有利于矿区环境保护和矿山退役后的环境复治理。同时以其工艺简单、投资少、见效快、管理简单等诸多优点而被广泛应用于铀、金、铜、稀土等金属矿床的开采。近年来对原地爆破浸出技术的研究, 特别是对浸出过程的溶质运移机理的理论和实验还有待进一步深入研究。

原地爆破浸出是利用溶浸液将矿石中的可溶性物质有选择地溶解下来, 由固相转入液相, 是一个十分复杂的液固液扩散传质、非均相化学反应过程。浸出中溶质运移将直接影响浸出的效果, 而溶质的运移过程在本质上为传质过程, 这里的“质”通常指某种“物质”, 它溶混于裂隙液或裂隙气体中, 随裂隙液或

裂隙气体的流动而移动, 并被吸附于固体颗粒表面. 影响溶质在饱和或非饱和矿堆中输运过程的基本因素有对流、分子扩散、机械弥散及吸附和化学反应等^[3].

为了研究原地爆破浸出开采中的水动力学特性, 利用我国某铀矿矿床从事现场原地爆破浸出试验. 基于固相、裂隙中溶质的质量守恒定律推导了描述溶质运移过程的反应-对流-扩散控制方程, 探求岩体裂隙溶质运移的定量时空分布规律, 建立相应的溶质运移三维流的数学模型. 采用解析-优化法确定溶质运移的水动力弥散系数和阻滞系数等有关参数, 结合解析-优化参数计算浸出中溶液浓度值与试验测试值, 使正确评价和预测浸出效果更具有科学性和理论性.

1 浸出过程中溶质运移的影响因素

(1) 溶质的对流 溶质随着溶液的运动而移动的过程称为溶质的对流. 当溶液的流动为达西流时, 随之携带的溶质对流通量密度与溶质浓度的关系表达式为 $J_e = qC$, 其中, J_e 为溶质的对流通量密度, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; q 为比流量, 即单位时间通过单位面积的水量, m/s ; C 为溶质浓度, mol/m^3 .

如果用孔隙率 n 和渗流速度 u 来表示比流量, 则有 $q = nu$. 可得

$$J_e = nuC. \quad (1)$$

式(1)表示溶质随溶浸液对流运动而产生的溶质运移.

(2) 溶质分子扩散 分子扩散是由于流体中分子的自由运动而产生的, 通常由高浓度向低浓度扩散. 由 Fick 定律, 扩散通量 J_d 正比于浓度梯度, 即

$$J_d = -nD_d \text{grad}C, \quad (2)$$

式中, D_d 为溶质的有效扩散系数.

(3) 机械弥散 机械弥散作用可表示为

$$J_e = -nD_e \text{grad}C, \quad (3)$$

式中, D_e 为机械弥散系数. 由于分子扩散与机械弥散的效果类似, 于是两个作用可以叠加而合为一项, 统称为水动力弥散系数, 即 $D = D_d + D_e$.

(4) 吸附和化学反应 溶浸液在矿堆中流动时, 伴随着各种化学反应的发生, 如溶解与沉淀、络合与离解、吸附与解吸附、氧化与还原等. 这些反应对溶质的运移产生很大影响, 而且主要反映在源、汇项上^[4]. 假设在裂隙表面为线性平衡等温吸附, 溶解相与吸附相之间的关系为 $S = K_f C$. 则吸附与解吸附的变化表示在源汇项 W 中为

$$W = -\rho_b \frac{\partial S}{\partial t} = -\rho_b K_f \frac{\partial C}{\partial t}. \quad (4)$$

式中, S 为单位长度裂隙表面积吸附的溶质质量, kg/m^2 ; ρ_b 为单位体积的孔隙介质中固体颗粒的质量, kg/m^3 ; K_f 称为分布系数.

2 溶质运移基本方程

首先不考虑吸附和化学反应等, 仅考虑对流、扩散和机械弥散的作用, 把式(1)~(3)联立起来, 总通量记为 J , 在一维流情况下可得 $J = nuC - nD(\text{d}C/\text{d}x)$.

任取一微元 $[x, x + \text{d}x]$, 单位时间内积余的溶质通量为 $\Delta J = -\frac{\partial}{\partial x}(nuC - nD \frac{\partial C}{\partial x})\text{d}x$.

由于溶质质量的积余, 便引起内部溶质浓度的变化. 由质量守恒定律可得

$$\frac{\partial(nC)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(nD \frac{\partial C}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial x}(nuC). \quad (5)$$

式(5)称为对流-弥散方程. 其中方程右边第1项称为弥散项, 第2项称为对流项.

考虑吸附和化学反应时, 引入式(4)使式(5)可推广到一般情况, 可得对于均质、各向同性多孔

介质中的溶质运移三维流的基本方程为

$$\frac{\partial(nC)}{\partial t} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ii} n \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i n C) - \rho_b k_f \frac{\partial C}{\partial t} \quad (6)$$

若介质的孔隙率 n 为常数, 则式 (6) 变为

$$\left(1 + \frac{\rho_b}{n} K_f \right) \frac{\partial C}{\partial t} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ii} \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i C) \quad (7)$$

引进阻滞系数 (或称阻滞因子) $R = 1 + \frac{\rho_b}{n} K_f$, 代入式 (7) 可得

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ii} \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i C),$$

式中, x 为三维空间中的点, 其坐标为 x_1, x_2, x_3 ; u 沿 3 个方向的速度分量为 u_1, u_2, u_3 .

3 原地爆破浸出试验

为了研究原地爆破浸出开采中的水动力学特性, 利用我国某铀矿矿床从事现场原地爆破浸出试验 (图 1). 该矿床属低温热液裂隙充填单轴型矿床, 主要成分为沥青铀矿-硫化物-碳酸盐类型. 采用自上而下中深孔分段挤压爆破留矿法落矿筑堆, 形成一个矿石块度适宜、微裂隙发育、孔隙度较佳的地下矿堆. 矿堆垂直高度 35.4 m, 倾角 70° . 采取堰塘布液、上盘钻孔注液、预埋管网滴淋的联合布液系统, 矿堆底部集中集液的浸出工艺流程.

在原地爆破浸出现场试验的基础上进行了裂隙介质溶质运移试验, 配置不同浓度的溶浸液和控制不同渗流速度, 重复多次试验, 探求不同流速下溶质运移的规律. 通过对不同渗流速度、不同浓度溶浸液的溶质运移试验, 根据由日统计的化学分析报表在距离浓度源垂直高度 15 m 处得到了

如图 2 所示的几组试验测量值. 图 2 (a) 溶浸液初始浓度 $C_0 = 12 \text{ g/L}$, 布液强度 $V = 25 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 图 2 (b) 溶浸液初始浓度 $C_0 = 8 \text{ g/L}$, 布液强度 $V = 20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

对比图 2 (a), (b) 可以发现, 前者与后者形

状不同, 试验 2 是第 1 次在矿堆中进行的试验, 分析其原因, 是由于存在裂隙壁对溶浸液中的离子交替吸附作用. 由于裂隙壁对溶浸液中离子的吸附, 相当于对溶质的运移产生了阻滞作用, 即弥散作用相对减少, 而对流作用就相对增大, 因此出现了浓度锋面较陡的现象. 多次试验后, 矿堆裂隙壁与离子的交替吸附作用减弱, 此时的浓度分布曲线如图 2 (b) 所示.

4 解析 - 优化法确定溶质运移参数

由试验结果可知, 对裂隙介质初次试验时, 必须考虑裂隙壁对溶浸液中离子的交替吸附作用. 假定吸附作用为均衡吸附, 则裂隙中溶质运移一维模型的定解问题可以表示为

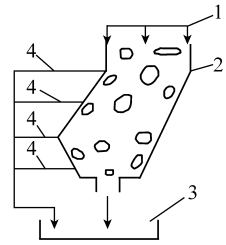


图 1 原地爆破浸出现场试验

Fig. 1 Schematic representation of slope leaching experiment

1——联合布液系统; 2——地下矿堆;
3——总集液池; 4——分段集液池

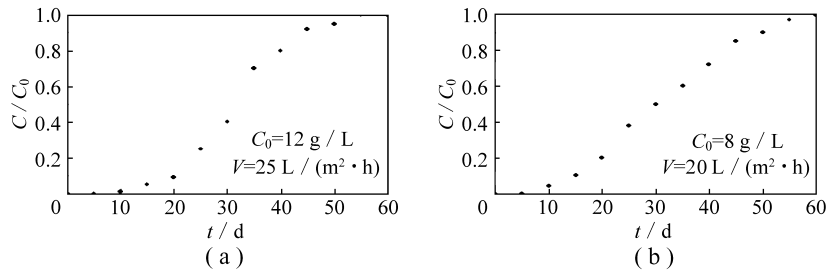


图 2 C/C_0 随时间 t 的变化

Fig. 2 C/C_0 change with operating time

$$\begin{cases} R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x}, \\ C(x, 0) = 0, \\ C(0, t) = C_0, \\ C(\infty, t) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

式(8)的解析解可以表示为

$$\frac{C(x, t)}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x - ut/R}{2\sqrt{Dt/R}}\right) + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{ux}{D}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x + ut/R}{2\sqrt{Dt/R}}\right). \quad (9)$$

余误差函数 $\operatorname{erfc}(x)$ 的近似表达式为

$$\operatorname{erfc}(x) = \begin{cases} 1 - \sqrt{1 - \exp(-C^2 x^2)} & (x \geq 0) \\ 1 + \sqrt{1 - \exp(-C^2 x^2)} & (x < 0) \end{cases} \quad 1 < C < \sqrt{2}, C = \text{const}. \quad (10)$$

为方便计算,在误差允许范围内,在 $x \in (-\infty, \infty)$ 上将 C 取成常数.用最优化的方法可以求得 C 值,当 $C = 1.105$,已经能够满足计算精度要求.算例表明,这种近似公式与其他方法相比有较高的精度^[5].因此采用式(10)的近似公式进行优化计算溶质运移参数.

水动力弥散系数 D 是表征在一定流速下,多孔介质对某种污染物弥散能力的参数.阻滞系数 R 反映的是裂隙壁对溶质吸附的程度,由于吸附作用对溶质运移起了阻滞作用,因此称为阻滞系数.如同一般地下水资源评价中求参数问题一样,用水动力弥散理论研究原地爆破开采中溶质运移时,准确获取水动力弥散系数、阻滞系数等有关参数是对浸出效果作出正确评价和预测的重要前提.

优化方法采用传统的单纯形法.选取图2(a)所示试验结果作为参数优化的试验值,先给出若干组参数,用式(9)计算结果作为计算值,将若干组计算值与试验值进行拟合,经过优化计算就可得到本次试验的溶质运移参数 D 和 R .解析-优化参数计算溶液浓度值与试验测试值的对比曲线(图3),由图3可知,计算值与试验值相吻合.

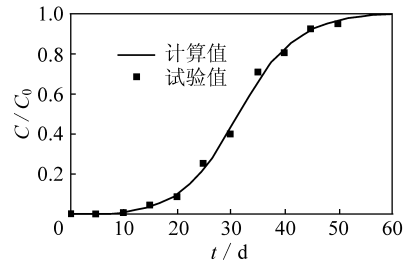


图3 解析-优化参数计算溶液浓度值与试验值拟合曲线

Fig.3 Comparison of model and experimental results

5 结 语

原地爆破浸出开采中溶质在矿堆中的运输与分布受到对流、分子扩散、机械弥散、吸附和化学反应等多种因素影响.针对原地爆破浸出开采中化学及水动力学溶质运移的耦合作用,基于质量守恒定律,推导了裂隙介质中溶质运移过程的反应-对流-扩散基本方程,并建立了对于均质、各向同性多孔介质中的溶质运移三维流的基本方程.采用解析-优化法确定了溶质运移的水动力弥散系数和阻滞系数等有关参数,结合解析-优化参数得出溶液浓度值与试验测试值拟合曲线吻合,并通过现场工业试验验证了数学模型的有效性,有助于探求岩体裂隙介质中溶质运移的定量时空分布规律的认识和应用.

参考文献:

[1] 全爱国, 欧阳建功. 我国原地爆破浸出开采及其发展前景 [J]. 铀矿冶, 2001, 20 (1): 1~5.
 [2] 全爱国. 原地爆破浸出采铀的工艺技术及应用前景 [J]. 铀矿冶, 1998, 17 (1): 1~6.
 [3] 王昌汉. 溶浸液渗滤速度与其调整 [J]. 铀矿冶, 2002, 21 (1): 7~11.
 [4] 阙为民, 谭亚辉, 曾毅君, 等. 原地浸出采铀反应动力学和物质运移 [M]. 北京: 原子能出版社, 2002. 164~216.
 [5] 缪协兴, 刘卫群, 陈占清. 采动岩体渗流理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2004. 50~81.