文章编号: 1004-0609(2007)12-2074-05

微粒渗滤沉积作用对铜矿排土场渗流特性的影响

王贻明¹, 吴爱祥^{1,2}, 左 恒¹, 杨保华¹

(1. 中南大学 资源与安全工程学院,长沙 410083;2. 北京科技大学 土木与环境工程学院,北京 100083)

摘 要:针对排土场堆浸过程中微粒渗滤沉积作用对矿堆孔隙率的影响,建立微细颗粒沉积和堆体渗流数学模型。 在一维条件下,利用有限差分法对模型进行理论计算,并通过实验进行验证,结果表明:微粒的渗滤沉积降低浸 堆的孔隙率,增大溶液的渗透阻力;在常流量动水头条件下,渗滤沉积首先发生在模型注液端的20 cm 以内,沿 渗流方向上,流体压力随时间延长而增大;在常水头条件下,随时间的推移,渗流速度逐渐降低,表明堆体的渗 透性降低,与排土场浸堆实际情况相符。因此,应采取必要的技术措施,防止微粒渗滤沉积,这对于改善堆体的 渗透性和提高浸出率,具有重要的意义。

关键词:微粒;渗滤沉积;排土场;渗流特性;数学模型
 中图分类号:TD 853.87
 文献标识码:A

Effect of particles sedimentation during leaching on seepage characteristic of copper dumps

WANG Yi-ming¹, WU Ai-xiang^{1, 2}, ZUO Heng¹, YANG Bao-hua¹

(1. School of Resource and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

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

Abstract: Based on the effect of particles sedimentation during leaching on the seepage characteristic of copper dumps, a mathematic model describing the law of particles sedimentation and seepage in dump was built. The theoretical solution of one-dimensional model resulted by finite difference method and a simulation test was carried out to validate it. The results show that the particles sedimentation decreases the porosity of dump and increases the resistance of seepage. To keep a fix flux and fluctuant pressure, the particles would deposit within the 20 cm zone along the streamline, and the flow pressure increases with prolonging time. On the other hand, to keep a fix pressure, the flow velocity also decreases. This indicates that the permeability of dump was decayed. These phenomena are identical with the facts of dump leaching. So it is important to take technical measures to prevent particles from depositing for improving the permeability of dump and increasing the metal leaching rate in practice.

Key words: particles; infiltration deposition; dump; seepage characteristic; mathematic model

随着开采条件好的富矿资源逐渐枯竭和湿法冶金 技术的发展,露天矿排土场的表外氧化矿和含矿尾矿 成为可利用资源,对排土场及尾矿的浸出成为资源利 用最有效的手段之一^[1-2]。但排土场由于筑堆偏析及含 泥量高等不利因素,存在因堆体渗透性差而导致的浸 出率低等问题^[3-4]。吴爱祥等^[5-6]研究排土场浸堆的渗 流规律,探讨改善高含泥矿堆渗透性的途径^[7]。实际 排土场浸出过程中存在堆体渗透性逐渐降低的问题,

收稿日期: 2007-04-11; 修订日期: 2007-07-02

通讯作者: 王贻明,高级工程师,博士研究生; 电话: 0731-8830851; E-mail: zhywang@126.com

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2004CB619205); 国家科技创新群体资助项目(54321042); 国家杰出青年科学基金资助项目 (50325415); 国家自然科学基金资助项目(50574099)

影响到浸出效果和金属回收率。除机械压实和粉矿及 泥质成分含量高等原因外,微细颗粒的迁移沉淀对堆 体渗透性的影响也是较大。对于悬浮微粒渗滤沉积对 多孔介质渗流特性的影响,主要集中在环保领域污染 物运移的研究中^[8-9],而在石油开采领域则着重微粒沉 积对地层伤害的研究^[10-11],对于排土场渗流的研究则 着眼于边坡的稳定性^[12-13]。

对于堆浸排土场,其渗透性的好坏及其均匀性对 浸出效果有很大影响,微细颗粒随溶浸液在浸堆中的 迁移沉积,降低堆体的孔隙率,局部形成相对隔水层, 是堆体渗透性降低的主要原因,过去只是定性研究微 粒迁移沉淀对堆体的淤塞作用^[7],对微细颗粒在堆体 中随溶浸液的运移与沉淀规律及其对排土场渗流特性 的影响则研究不多。本文作者利用流体动力学原理, 建立悬浮微粒渗滤沉积的数学模型,探讨出悬浮液浓 度、沉降速度与堆体孔隙率及渗透性的关系,改善浸 堆渗透性具有积极的意义。

1 悬浮颗粒渗滤沉积规律

1.1 悬浮颗粒沉积条件

由于排土过程中颗粒的自然分选作用,细颗粒大 多集中在排土场上部,较粗颗粒则集中在排土场底部 ^[15],因此排土场上部渗透系数小,向下渗透系数逐渐 增大。当溶浸液大量喷淋或骤降暴雨时,上部松散的 微细颗粒或粘土在水流的作用下,可能随液流在堆体 孔隙中迁移,形成固液两相流体即悬浮液。当流体流 速发生变化时,可能在局部沉淀下来。

地下水动力学的研究结果表明^[11,14],颗粒沉积是 孔裂隙被充填的原因。悬浮液存在一最小流动速度 (*v*_{KP}),即微细颗粒开始沉积的临界速度值。当 *v*<*v*_{KP} 时,固相颗粒开始沉积,裂隙壁底处沉积物增加,直 到液流速度达到 *v*_{KP}时为止。

在弱饱和溶液运动的条件下,临界速度值随浓度 的增大而增大。在高浓度悬浮溶液里,分子相互结合, 沉积到底部,形成结构混合体。因此,浓度开始增大 时,临界速度值减小。对不稳定溶液运动的临界速度 值可由经验-半经验公式求得^[14]。

1.2 悬浮颗粒渗滤沉积规律

随溶液迁移的悬浮颗粒渗滤沉积过程对排土场的 淤塞作用可归结为悬浮质在堆体中的运移和颗粒沉 淀,对流体流动状态的影响则主要表现在浸堆渗透性 降低及对流量与流体压力的影响。从影响机理角度分 析,淤塞作用之所以影响溶浸液的流动状态,是因为 淤塞导致浸堆孔隙结构及孔隙率的改变,从而使排土 场堆体的渗透性发生变化。这种淤塞影响可用 3 个数 学方程来表述,即: 悬浮质运移方程、悬浮质沉淀动 态方程和悬浮液渗流方程。

1.2.1 悬浮质的运移方程

设悬浮质的密度函数为 $\rho = \rho(x, y, z, t)$, 排土场的 孔隙度为 $\phi = (x, y, z, t)$, 且悬浮液符合牛顿流体的性 质。根据多孔介质流体力学的理论, 在流体流动区域 内的源汇项为 0, 而排土场的孔隙度在不断变化, 所 以, 在饱和排土场中流动的悬浮液渗流满足以下连续 性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = -\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi)$$
(1)

式中 v_x 、 v_y 、 v_z 分别为悬浮液在x、y、z方向上的渗透速度分量。

令 φ_s = φ_s(x, y, z, t)为悬浮液的体积分数,即单位体积悬浮液中固相所占体积。根据悬浮液的液-固二相性质,可得:

$$\rho = \rho_{\rm w} + \varphi_{\rm s} \left(\rho_{\rm s} - \rho_{\rm w} \right) \tag{2}$$

式中 ρ_w 为悬浮液的液相密度, ρ_s 为悬浮液的固相密度。

假设 ρ_w 和 ρ_s 在流动过程中是恒定的,将式(2)代入式(1)可得:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\varphi_{s}v_{x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\varphi_{s}v_{y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\varphi_{s}v_{x}) = -\frac{\partial}{\partial t}(\varphi_{s}\phi)$$
(3)

式(3)即为悬浮质在浸堆中的运移方程。

1.2.2 悬浮质沉淀动态方程

对于细颗粒状的悬浮质,当流速小于临界流速时, 悬浮颗粒开始沉淀,颗粒沉淀速度跟排土场孔隙率及 溶液中固体颗粒的浓度成正比,可用下式表达:

$$m_{\rm s} = m(x, y, z, t) = \rho_{\rm s} K_{\rm eff} \Delta V \phi \varphi_{\rm s}$$
(4)

式中 *m*_s为单位时间内沉淀下来的固体颗粒质量,*K*_{eff} 为有效沉淀系数,与有效孔隙度有关,Δ*V*为流场中任 意一单元体的体积。由于沉淀下来的悬浮质的体积*V*_s 与介质孔隙体积的改变量是相等的,因此有:

$$m_{\rm s} = \rho_{\rm s} v_{\rm s} = \rho_{\rm s} \Delta V \frac{\partial \phi}{\partial t} \tag{5}$$

将式(5)代入式(4),得到反映悬浮质沉淀导致堆体 孔隙率动态变化的方程:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = K_{\rm eff} \phi \, \varphi_{\rm s} \tag{6}$$

1.2.3 悬浮液的渗流速度方程

由于排土场筑堆过程的自然分选,细颗粒多集中

在堆体上部。生产实践表明,粒径小于 5 mm 所占比 例(*P*₅)大于 30%时,渗透性将大大降低,因此,排土 场的淤塞多发生在堆体的上部,根据实验和观测成果,此时排土场上部的渗流符合 Darcy 定律,因此,悬浮 液在排土场中的渗流速度可用 Darcy 定律表示,即:

$$v = -\frac{k}{\mu} \frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}l} \tag{7}$$

式中 h为水头值; l为流经长度; µ为悬浮液的动力 粘滞性系数; k为多孔介质的渗透率。

与水的渗流过程不同,在悬浮液的渗透过程中由 于悬浮质的淤塞作用,多孔介质的渗透率 k 也是个变 量。据 Carman 和 Kozeny 的研究,多孔介质的渗透率 主要取决于介质的孔隙度 ø和孔隙的比表面积 a_v 可表 示为

$$k = \frac{C\phi^2}{a_y^2} \tag{8}$$

式中 C为常数, *a*_v为孔隙比表面积,将式(8)代入式 (7)即得到悬浮液在多孔介质中的渗流速度方程:

$$C = -C \frac{\phi^3}{\mu a_y^2} \frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}l} \tag{9}$$

2 实验验证

2.1 实验

为了验证数学模型的正确性,设计两个一维渗透 实验。其中一次为常流量变水头实验,另一次为常水 头变流量实验。实验装置为自行研制,主要包括渗流 柱、注液系统、测量系统,渗流柱及容器采用透明有 机玻璃制作,测量系统包括液压表、天平、量筒、直 尺、秒表等。

实验所用介质材料取自德兴铜矿,破碎磨细后的 平均粒径为 *d*₅₀ = 0.3 mm,不均匀系数为 *C*_u = 2.5; 悬 浮液为粘土-水混合液,其中的粘土的粒径均小于 74 μm。悬浮液的体积浓度为 80 g/L。为防止悬浮液絮凝 造成过早沉淀,对悬浮液进行人工搅拌。由于试样呈 均质和各向同性,实验柱的初始孔隙度(*φ*₀)可视为与 位置无关的常数,因此可以用容重差法求得。介质固 相即孔隙的比表面积 *a*_v可根据平均粒径、初始孔隙度 和砂粒的平均密度求得。通过无离子水渗透实验可以 测出试样柱的初始渗透率 *k*₀。已知 *k*₀、*φ*₀和 *a*_v后,便 可用式(9)计算出系数 *C*。表1列出试样柱的有关初始 参数值,*S*₀为实验样品横截面积,*l*为流经长度。

表 1	实验参数值
-nc =	- 四シメ田

Table 1Parameters of test

S_0/cm^2	<i>l</i> /cm	k_0/cm^2	ϕ_0	$a_{\rm v}/{\rm cm}^{-1}$	С
315	100	4.4×10^{-6}	0.35	38.1	0.12

2.2 计算条件

模型的理论解采用有限差分法进行计算。

1) 简化模型

在一维渗流条件下,淤塞影响问题的基本模型由 以下3个方程组成:

$$\frac{\partial}{\partial x} [\varphi_{\rm s}(x,t) V(x,t)] = -\frac{\partial}{\partial t} [\varphi_{\rm s}(x,t) \phi(x,t)]$$
(10)

$$\frac{\partial \phi(x,t)}{\partial t} = K_{\text{eff}} \ \phi(x,t) \ \varphi_{\text{s}}(x,t) \tag{11}$$

$$V(x,t) = -C \frac{\phi^3(x,t)}{\mu a_v} \frac{\mathrm{d}p(x,t)}{\mathrm{d}x}$$
(12)

式中 x 为流体渗流方向, p 为压力头。 2) 定解条件 定流量变水头条件下的定解条件有: 初始条件 $\phi(x,0) = \phi_0$, $p(0,0)=p_0$, $\phi_s(x,0)=0$; 边界条件 $\phi_s(0,t) = \phi_{s,0}, \phi_s(1,t) = \phi_{s,1}, V(0,t) = V(1,t)$ $t) = V_{00}$ 常水头条件下的定解条件有:

初始条件 $\phi(x, t) = \phi_0$, $\phi_s(x, 0) = 0$; 边界条件 $\phi_s(0, t) = \phi_{s,0}$, $\phi_s(1, t) = \phi_{s,1}$, $p(0, t) = p_0$, $p(1, t) = p_1$ 。

2.3 计算及实验结果分析

图 1 所示为理论计算的常流量变水头条件下悬浮 液压力在渗流方向上的分布和不同位置、不同时刻的 压力实测值。比较不同时刻的压力分布曲线及实测值







可以看出,理论值与实验值吻合较好。由于悬浮液的 沉淀淤塞,孔隙率降低,使得在流量不变的条件下柱 子的注入压力逐渐增大,亦即渗透阻力随着淤塞过程 呈不断增长的趋势,增长趋势在柱子的前半端尤为明 显。其原因主要在于悬浮液的大颗粒首先在前半段沉 淀,很快造成淤塞所致。

图 2 所示为常流量时不同位置处流体压力随时间 变化曲线的理论值和和实测值。从图中可见,沿着渗 流方向距离的增加,流体压力降低,即水力坡降降低, 可见,沉淀淤塞首先在注液端,并随着时间的推移, 沉淀范围逐渐扩展。主要原因在于悬浮液中的大颗粒 优先沉淀于注液端,使端部的孔隙率降低,渗透阻力 增加。在渗透方向的后部主要沉淀的是相对微细颗粒, 使孔隙率降低平缓,渗透阻力增加缓慢。

图 3 所示为常水头条件下悬浮液渗流量随时间的 变化,从图中可以看出,在水头一定的情况下,柱子





Fig.2 Curves of flow pressure vs time at different positions with fix flux



图 3 常水头时流量随时间的变化曲线

Fig.3 Curve of flux vs time at fix flow pressure

的流量即渗流速度下降,主要是由于悬浮颗粒沉淀淤 塞,导致孔隙率降低,渗透阻力增加,渗透系数降低 所致。

3 结论

 建立微细颗粒在排土场浸堆中的运移和沉积 数学模型,应用该模型分析微细颗粒渗滤沉积对排土 场浸堆的渗流特性的影响规律,其理论分析与实验结 果吻合较好。

 2) 微细颗粒的渗滤沉积对排土场浸堆的渗透性 影响很大,特别是对高含泥或粉矿含量较高的浸堆, 由于筑堆过程的自然分选,对堆体上部的渗透性影响 更为明显,这在德兴铜矿祝家堆浸场已得到证实。

3)降低排土场浸堆的微细颗粒(5 mm 以下粉矿)的含量,改变筑堆方式,如机械筑堆和造粒筑堆等,改善堆体的孔隙结构分布,可以有效减少微细颗粒渗滤沉淀对堆体孔隙率及渗透性的影响,提高浸出效果。

REFERENCES

[1] 刘业翔. 有色金属冶金基础研究的现状及对今后的建议[J].
 中国有色金属学报, 2004, 14(S1): 22-24.

LIU Ye-xiang. Current status and future proposals of fundamental research in nonferrous metallurgy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(S1): 22–24.

- [2] Watson J H P, Beharrell P A. Extracting values from mine dumps and tailings[J]. Minerals Engineering, 2006, 19: 1580–1587.
- [3] 刘久清. 德兴铜矿湿法炼铜工艺现状及存在问题[J]. 湿法冶金, 2001, 20(3): 123-126, 132.
 LIU Jiu-qing. Status and problems of copper hydrometallurgy in Dexing Copper Mine[J]. Hydrometallurgy of China, 2001, 20(3): 123-126, 132.
- [4] 吴爱祥,王洪江,王 劼,潘 伟.大型排土场细菌浸出新工 艺[J].中国有色金属学报,2006,16(6):1100-1107.
 WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang, WANG Jie, PAN Wei. New techniques of bacterial leaching in large dump of copper mine[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(6): 1100-1107.
- [5] YIN Sheng-hua, WU Ai-xiang. Experimental study of preferential solute transportation during dump leaching[J]. Journal of China University of Mining & Technology(English Edition), 2006, 16(4): 418–422.
- [6] WU Ai-xiang, YIN Sheng-hua, LIU Jin-zhi, YANG Bao-hua. Formative mechanism of preferential solution flow during dump leaching[J]. Journal of Central South University of Technology, 2006, 13(5): 590–594.

- [7] 李青松, 吴爱祥, 尹升华, 姜立春. 改善高含泥矿堆渗透性的 机理研究[J]. 湘潭矿业学院学报, 2003, 18(4): 1-4.
 LI Qing-song, WU Ai-xiang, YIN Sheng-hua, JIANG Li-chun.
 Study on the mechanism of improving penetrability of the high-clay ore heaps[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 2003, 18(4): 1-4.
- [8] Compere F, Porel G, Delay F. Transport and retention of clay particles in saturated porous media. Influence of ionic strength and pore velocity[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2001, 49: 1–21.
- [9] Silliman S E. Particle transport through two-dimensional, saturated porous media: influence of physical structure of the medium[J]. Journal of Hydrology, 1995, 167: 79–98.
- [10] 刘想平,侯立鹏. 油田注入水中固体颗粒对地层伤害的数学 模型[J]. 江汉石油学院学报, 1995, 17(2): 69-74.
 LIU Xiang-ping, HOU Li-peng. A mathematical method for simulating formation damage due to solid particle invasion during water injection[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1995, 17(2): 69-74.
- [11] 范翔宇,夏宏泉,陈 平,赵 军,唐雪萍,刘 彬.钻井液 固相侵入深度的计算方法研究[J].天然气工业,2006,26(3): 75-77.

FAN Xiang-yu, XIA Hong-quan, CHEN Ping, ZHAO Jun,

TANG Xue-ping, LIU Bin. Study on calculating method of invasion depth of mud solid phase[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(3): 75–77.

- [12] 周玉新,周志芳. 矿山排土场非线性渗流数值计算[J].岩石力 学与工程学报, 2004, 23(13): 2215-2220.
 ZHOU Yu-xin, ZHOU Zhi-fang. Numerical computation of nonlinear seepage for mine waste dump[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2215-2220.
- [13] Omraci K, Soukatchoff V M, Tisot J P, Piguet J P, SLN L N. Stability analysis of lateritic waste deposits[J]. Engineering Geology, 2003, 68: 189–199.
- [14] 乔卫国,张玉侠,宋晓辉,赵 童. 水泥浆液在岩体裂隙中的流动沉积机理[J]. 岩土力学,2004,25(1):14-16.
 QIAO Wei-guo, ZHANG Yu-xia, SONG Xiao-hui, ZHAO Tong. Flow deposition mechanism of cement slurry in rockmass fractures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1): 14-16.
- [15] 谢学斌,潘长良. 排土场散体岩石粒度分布与剪切强度的分形特征[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 287-291.
 XIE Xue-bin, PAN Chang-liang. Fractal characteristics of size distribution and shear strength of bulky rock material in waste pile of mines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2): 287-291.

(编辑 龙怀中)