文章编号: 1004-0609(2013)01-0229-09

高含泥氧化铜矿水洗-分级堆浸工艺

王少勇^{1,2}, 吴爱祥^{1,2}, 王洪江^{1,2}, 尹升华^{1,2}, 顾晓春³

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院,北京 100083;
2. 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;
3. 云南铜业集团公司,昆明 650051)

摘 要:通过室内实验分析高泥矿堆渗透性影响因素,探明入堆颗粒粒径、颗粒结构、泥质对浸堆渗透性的影响规律。结果表明:-1 mm 的粒级的物料对浸堆渗透性具有恶化作用,去除后浸堆的渗透系数可增加 19~47 倍;入堆颗粒粒径与矿堆渗透系数呈二阶指数函数关系,当粒径小于 10 mm 时,渗透系数随粒径增大而缓慢增加;当粒径大于 10 mm 时,渗透系数随着粒径的增大而迅速增加。最后,提出采用水洗-分级工艺将-1 mm 粒级物料进行槽浸和搅拌浸出,将+1~-5 mm 和+5~-25 mm 的物料进行分级筑堆、分区喷淋的堆浸方式。采用此工艺后,浸堆的渗透系数增加为原矿的 8~50 倍,综合浸出率由不到 10%提高到 63.98%,使高含泥氧化铜矿得到成功堆浸。
 关键词:高含泥;低渗透性;堆浸;水洗-分级;浸出率
 中图分类号:TD85387

Craft of wash-classification of heap leaching used in high-clay copper oxide ore

WANG Shao-yong^{1,2}, WU Ai-xiang^{1,2}, WANG Hong-jiang^{1,2}, YIN Sheng-hua^{1,2}, GU Xiao-chun³

(1. School of Civil and Environment Engineering,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal, Ministry of Education,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. Yunnan Copper Group Co., Ltd., Kunming 650051, China)

Abstract: The factors which affect the permeability of high-clay heap were analyzed. The laws of permeability affected by particle nature, particle structure and gain size were discussed through room experiments. The results show that the ore particles with size of -1 mm play worsen effect on permeability. After removing these particles, the coefficient of permeability will increase by 19–47 times; exponential function relation is also found between particle diameter and permeability coefficient of permeability. When the size is less than 10 mm, the permeability coefficient increases slowly; when the size is bigger than 10 mm, the permeability increases quickly. Finally, the craft of wash-classification is brought, which is consisted of that the ore particles with size of -1 mm are in tank leaching and agitation leaching, the ore particles with sizes of +1--5 mm and +5--25 mm are in heap leaching with classification dump and partition liquid arrangement. After the craft is used, the permeability coefficient of heap is 8–50 times as that of crude ore, and the comprehensive leaching rate increases from 10% up to 63.98%. The high-clay copper oxide ore is leached successfully. **Key words:** high-clay; poor permeability; heap leaching; washing-classification; leaching rate

收稿日期: 2011-06-17; 修订日期: 2012-08-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50934002,51074013,51104011);教育部长江学者与创新团队发展计划项目(IRT0950)

通信作者: 吴爱祥, 教授, 博士; 电话: 010-62334680; E-mail: wuaixiang@126.com

中国有色金属学报

铜资源现状为三多三少,即贫矿多、富矿少;共 生、伴生矿多,单一矿少:难处理矿多,易处理矿少。 品位低、复杂难处理是我国铜资源特点。由此可见, 大力开发处理低品位、复杂难处理铜矿技术对增加铜 产量、缓解铜的供需矛盾,增强我国在国际铜市场上 的竞争能力是十分必要的。高含泥氧化铜矿属于复杂 难处理铜资源的典型代表,这类矿石的特点是易破碎、 含泥量大,氧化率高。我国氧化铜矿资源中,高含泥 氧化铜矿占 2/3。传统选冶工艺无法从中经济地回收 铜[1-3],采用堆浸技术是一种比较合理的工艺。但是, 由于含泥量大导致的堆浸过程中渗透性差的问题,直 接影响堆浸工艺的应用与推广。堆浸技术的成功与否 主要取决于两个方面^[4]:一方面是溶浸液对有用矿物 的溶解能力;另一方面是溶浸液在矿堆中的渗透效果。 高含泥氧化矿氧化率极高,具有良好的可浸性。因此, 改善高泥矿堆渗透性就成为处理高含泥氧化矿的关 键。制粒技术[5-7]是处理高泥氧化矿的有效手段,但是 制粒工艺需要制粒设备,且要使用粘结剂;目前制粒 粘结剂多为碱性,而高泥氧化矿最优的浸出方式是在 酸性条件下,因此,制粒工艺也受到很大的限制。在 矿堆中添加疏松物得到了尝试,但受到试剂来源、价 格等因素的影响,大规模应用还为时尚早。在布液方 式方面,加压逆流浸出技术和加负压进行强化浸出技 术目前还没有得到工业应用[8]。本文作者以云南某高 含泥氧化铜矿为研究对象,通过实验研究探明颗粒结 构、粒径及泥质对堆体渗透性的影响规律,提出水洗 -分级筑堆的堆浸新工艺,并在云南某铜矿得到成功 应用,对处理高含泥氧化铜矿具有重要的指导意义。

1 实验

1.1 实验矿样

1.1.1 矿样的化学性质

矿样取自于云南某铜矿,主要元素分析结果如表 1 所列,铜品位在1.013%。铜矿铜物相分析结果如表 2 所列。通过表 2 所列铜物相来看,氧化率为 63.02%, 结合率为 21.13%。说明该矿具有良好的可浸性。

表1 铜矿多元素分析

Table 1	Chemical	composition	of copper ore	(mass	fraction,	%))
---------	----------	-------------	---------------	-------	-----------	----	---

Cu	Fe	MgO	CaO
1.013	11.28	1.35	10.68
SiO ₂	Al_2O_3	S	Zn
47.78	7.62	0.46	0.198

 Table 2
 Phase analysis of copper ore

State of Cu	Cu grade/%	Distribution/%
Combined CuO	0.228	21.13
Free CuO	0.452	41.89
Active CuS	0.089	8.25
Inertia CuS	0.31	28.73
Total Cu	1.079	100

1.1.2 矿样的粒级组成

将矿样倒入标准分析筛中,石子孔径分别为10.0、5.0、2.0、1.0、0.5、0.2和0.1 mm,置于筛析机上震筛10~15 min,得该氧化矿的级配曲线如图1所示。



Fig. 1 Particle size distribution of ore sample

1.2 实验原理

室内渗透实验按原理分有两大类^[9]:变水头法和 常水头法。前者适用于渗透性较小的介质,后者适用 于透水性较大的介质。根据取样粒径在-25 mm,属于 透水性较大的介质,固渗透性实验采用变水头法测量 渗透系数,变水头法渗透实验原理如图 2 所示。在渗 透试验过程中时刻 t₀时,水头量管中水头为 h₀, t₁时 刻的水头量管中水头为 h₁,在时间间隔 Δ t=t₁-t₂ 内, 量管中水量变化为

$$dQ = a(h_0 - h_1) \tag{1}$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; a 为截面积, m^2 ; $h_0 和 h_1$ 为时间 $t_0 = t_1$ 时刻的液位高度, m。

由 Darcy 定律可知, 流经样品的流体流量为

$$\mathrm{d}Q = K \frac{h}{L} A \mathrm{d}t \tag{2}$$

式中: A 为样品断面积, m²; L 为样品长度, m; h 为



图 2 变水头法渗透系数测试原理图



水头高度, m; K 为渗透系数, m/s。 由式(1)和 (2)可得

$$K = \frac{aL}{A\Delta t} \ln \frac{h_0}{h_1} \tag{3}$$

由于本试验装置为统一管径, *a*=A, 故式(3)可变 为

$$K = \frac{L}{\Delta t} \ln \frac{L_0 - L_1}{L_0 - L_2}$$
(4)

式中: L_0 为渗透柱上下表面之间的长度, m; L_1 为起 始液面至渗透柱上表面长度, m; L_2 为最终液面至渗 透柱上表面长度, m; Δt 为液面从 L_1 到 L_2 经历的时 间, s。

1.3 实验步骤

1) 将原矿进行筛分分级为+1~-5 mm、+1~-2 mm、-1 mm、-0.6 mm、-0.28 mm、+1~-25 mm、+2~-25 mm、+5~-25 mm;

2) 按照上述实验方法进行渗透性测试;

3) 对堆场中的+1~-5 mm 和+5~-25 mm 两级水 洗矿样进行渗透性测试;

4)记录实验数据,对比原矿与分级矿样、水洗矿
 样渗透性变化规律。

2 结果分析

不同粒级渗透性测试结果见表 3。由表 3 可见, -0.28 mm、-0.6 mm 和-1 mm 粒级矿样的渗透系数低

表3 不同粒径渗透系数记录表

 Table 3
 Log sheet of osmotic coefficient of different particle size

Particle size/mm	Osmotic coefficient/(cm \cdot h ⁻¹)
+15	463.11
+12	160.33
-1	26.12
-0.6	29.68
-0.28	0.44
Raw	49.05
+125	944.95
+225	2 336.64
+525	3 722.54

于未分级原矿的渗透系数,说明对于粒级在-1 mm 以下的矿样,通过分级来改善颗粒结构的措施对提高浸堆的渗透性效果不明显。分析原因主要是-1 mm 粒级的颗粒为泥质,其对溶浸液有黏滞作用。所以,将-1 mm 粒级的矿样不入堆进行堆浸,而进行槽浸和搅拌浸出。+1~-2 mm 和+1~-5 mm 粒级矿样的渗透系数分别为原矿的 3.2 和 9.4 倍, +1~-25 mm、+2~-25 mm 和+5~25 mm 粒级矿样的渗透性也大幅度改善,其渗透系数分别是原矿的 19.1、75.9 和 47.6 倍,说明调节粒径组合可明显提高浸堆的渗透性。

对颗粒粒径与渗透性进行拟合分析(见图 3),结果 表明,颗粒直径与其组成的堆体的渗透系数成二阶指 数关系。当粒径小于 10 mm 时,粒径改变对提高浸堆 的渗透性无明显作用;当颗粒粒径大于 10 mm 时,颗 粒粒径变化对浸堆的渗透性影响明显。



图 3 颗粒直径与渗透系数的关系

Fig. 3 Relationship between particle size and permeability coefficient

3 高泥矿堆渗透性影响因素分析

3.1 黏土矿物对渗透性的影响

高泥矿堆中的黏土矿物与水相互作用时,在黏土 颗粒周围会产生一个电场[10],呈强极性状态的水分子 和水溶液中的阳离子在土粒表面的静电引力作用下, 被土粒强烈地吸附,它们共同构成了强结合水层(见图 4(a))。强结合水因受土粒表面的强吸附力控制而不服 从静水力学规律,不受重力控制而流动。随着离土粒 表面距离的加大,水化阳离子的浓度逐渐降低,直至 达到孔隙中水溶液的正常浓度为止,水分子亦从定向 排列逐渐变成正常的随机状态。从强结合水层表面直 至阳离子浓度正常这个范围称为弱结合水层(见图 4(b)),弱结合水的黏滞度亦较正常状态的大。强结合 水层和弱结合水层构成了扩散层,土粒表面的负电荷 和扩散层合起来称为双电层,随着土颗粒距离进一步 加大,颗粒之间孔隙变大,可以存在自由流动的自由 水(见如图 4(c)),自由水受重力控制,决定了整个矿堆 的渗透性。



Fig. 4 Water physical properties of clay particle surface in different states: (a) Solid or semisolid state; (b) Plastic state; (c)

Flow state

黏土颗粒的膨胀性是其水理性质的重要体现,其 膨胀大致分两个阶段^[11]:第一阶段为干颗粒表面吸附 单层水分子形成粒间膨胀;第二阶段由于双电层的形 成,使黏粒或晶层进一步推开,形成渗透膨胀。黏土 矿物遇水时膨胀,使得土粒间孔隙更小,阻碍自由水 的流动;其次黏土中的结合水对自由水有较强黏滞作 用而产生很大的阻力,这也正是高泥矿堆渗透性差的 一个重要原因。

3.2 颗粒结构对渗透性的影响

浸堆的颗粒结构是指入堆散体颗粒和孔隙的空间 相互排列以及颗粒间的联结特征的综合,其中的孔隙 是溶浸液渗流的通道,而孔径大小及其分布决定着溶 浸液的渗流路径和渗流速度。因此,堆浸矿岩散体的 结构是影响溶液渗流的主要因素,并最终影响到浸出 效果。按颗粒的排列及联结情况可以分为下列4种^[12]。

1) 单粒结构

单粒结构是破碎制粒堆浸散体的特征,其特征是 颗粒粒径大小相似,颗粒间没有联结力,或联结力非 常微弱,可以忽略不计。按颗粒的相互排列,可以把 单粒结构分为疏松的和紧密的(见图 5)。

2) 蜂窝状结构

当浸堆的粗颗粒(粒径大于 5 mm)体积分数大于 70%时,矿石颗粒以松散拱架形式堆积,细料填不满 粗料间的空隙,堆体整体以大颗粒构成骨架承受载荷, 小颗粒基本不承受载荷,浸堆具有大孔隙性、弹性, 这些性质与散体的强度和变形有密切关系(见图 6)。

3) 包裹结构

浸堆的粗颗粒体积分数小于 30%时,粗颗粒矿块 被粉矿分割包裹,浸堆呈现黏土特性,一般孔隙性和 渗透性较低(见图 7)。当粗颗粒体积分数介于 30%和 70%之间时,浸堆的力学特性和渗流特性由粗细颗粒 共同承担。

4) A 型和 B 型结构

ABERG^[13-15]根据粒级曲线的形状,将颗粒的结构 分为两种: A型和 B型。A型颗粒集合体中微细颗粒 比较多,颗粒级配曲线的下端相对较陡;而 B型颗粒 集合体中微细颗粒相对较少,因此,颗粒级配曲线的 下端比较平缓(见图 8),这类颗粒中的微细颗粒容易发 生迁移,而导致孔隙堵塞。在 A型结构的颗粒集合体 中,每个颗粒和周围充分多的颗粒接触,其位置是不 变的。具有 B型结构的颗粒集合体中,仅有部分颗粒 位置固定,他们组成土的骨架,其它颗粒和周围的颗 粒接触较少,可在不扰动周围其它颗粒的情况下在一 定范围内自由移动(见图 9)。



图5 浸堆体系的单粒结构^[12]

Fig. 5 Single particle structures of dump leaching system^[12]:(a) Loose; (b) Closely packed



图 6 浸堆体系的蜂窝状结构^[12]

Fig. 6 Cellular structure of dump leaching system^[12]

由图 1 所示级配曲线可以得出,该高含泥氧化铜 矿为的粗颗粒(+5 mm)在 63%左右,介于包裹结构与 蜂窝状结构之间,渗流特性由粗细颗粒共同承担;其



图7 浸堆体系的包裹结构^[12]

Fig. 7 Surrounded structure of dump leaching system^[12]



图8 A和B型颗粒结构级配曲线

Fig. 8 Particle size distribution curves of particle structure types A and B





Fig. 9 Schematic diagram of blockage of particle structure type B

次,曲线下凹,为B型颗粒结构,细颗粒容易在粗颗 粒组成的骨架颗粒之间运移,在孔隙较小的地方容易 发生拱堵现象,降低浸堆整体的渗透性,这也是高泥 矿堆渗透性随着浸出时间的增加逐渐降低的主要原 因。

3.3 分级筑堆对渗透性的影响机理

分级筑堆的设计原理就是利用不同粒级物料的渗透性不同来设计筑堆。尽管粗粒级区的孔隙大,在喷淋强度很小的情况下,从粗粒级区流出的溶液所占的比率远远小于从细粒级区流出溶液所占的比率。这主要是因为细粒级区比表面积大,对溶液的吸附能力强,并且细粒级区孔隙和裂隙直径较小,能产生较大的负孔隙水压力,使溶液从粗粒级区进入细粒级区^[16-17],如图 10 所示。随着喷淋强度的加大,细粒级区逐渐达到饱和状态,溶液开始作横向流动,进入粗粒级区,粗粒级区出液率逐渐增大,并远远超过细粒级区。因此,在喷淋强度较大的情况下,液流优先发生在粗粒级区。



图 10 粗、细颗粒区内优先液流示意图

Fig. 10 Schematic diagrams of preferential flow in coarse and fine particles

4 工程应用

4.1 存在问题

2007年9月,云南某铜矿建成湿法厂相应的基础 设施,进行了堆浸工业试验,首期入堆矿量10多万t, 主要为露天开采的氧化矿,矿石经两段破碎后,粒级 在-25 mm,为入堆高含泥原矿,由自卸汽车运输筑堆, 并开始布液浸出实验。至2007年11月底,经过近3 个月的堆浸试生产,浸出效果差,浸出率不到10%, 堆场渗透性差,溶浸液无法正常渗透循环,浸堆表面 径流与积液现象严重(见图11),电铜厂堆浸因此停产。





4.2 水洗-分级工艺

根据以上分析研究,本文作者提出了基于洗矿 机+旋流器的水洗-分级工艺。水洗指采用洗矿机将矿 石进行预处理,-1mm 细砂矿约占处理矿量的 20%左 右,对堆体的渗透性具有恶化作用,不入堆进行堆浸, 而改为槽浸和搅拌浸出,其工艺流程如图 12 所示。首 先将原矿矿石破碎至-25 mm,并进行筛分。+5~-25 mm 进入洗矿机,其返砂粗粒级直接入堆,而+1~-5 mm 粒级直接进入旋流器继续分级,返砂+1~-5 mm 粒级入堆,-1 mm 粒级进入搅拌槽进行槽浸。-0.28 mm 粒级的泥质进入浓密机,50%浓度底流进行搅拌 浸出,酸度为 50 g/L,液固比为 3:1,浸出 2 h 后进行 压滤,滤液进行澄清后进入料液池,滤饼保证水分不 超过 15%,加石灰中和后进入堆渣场。

分级指将矿石根据粒级组成分为粗中细粒级,并 对粗、细颗粒进行分区堆置,从而达到提高粒级均匀 度的目的(见图 13)。块状矿石量较大,可堆放在堆场 中央区域。细粒矿石产量较小,在堆场周边区域堆放, 杜绝均匀混合堆放,保证堆场主体部分能够顺利浸出。 在分区堆放之后,采用不同的布液强度进行分区布液。 块状矿石区采用较大的布液强度,细粒矿石区采用较 小的布液强度,使整个堆场得到充分的浸润。+5 mm 的块状矿石堆放区域采用的布液强度为 20~100 L/(m²·h),+1~-5 mm 的细粒矿石堆放区域采用的布液 强度为 5~20 L/(m²·h)。

4.3 效果分析

通过采用水洗-分级工艺,浸堆的渗透性明显改善,消除了堆场表面的径流与积液现象。图 14 所示为 采用此工艺后的堆场表面,较未采用此工艺堆场表面 (见图 11)积液明显减少。在浸堆处取两种粒级的矿样



图 12 水洗-分级浸出工艺流程示意图

Fig. 12 Schematic diagram of dump leaching with washing and classification





Fig. 13 Schematic diagram of classification heap and partition liquid arrangement

(+1~-5 mm 和+5~-25 mm),对其渗透性进行测试并 与原矿进行对比,其测试结果见表 4。由表 4 可见, 原矿的渗透系数最低,且随着浸出时间的增长,下降 也比较快。+1~-5 mm 粒级矿样的渗透系数为原矿的 8~10 倍,+5~-25 mm 粒级矿样的渗透系数为原矿的 50 倍左右,且随着浸出时间的增长,渗透系数下降缓

Raw ore		Washed ore with $+15$ mm in size		Washed ore with $+525$ mm in size		
Leaching time/d	Permeability coefficient/ (cm·h ⁻¹)	Leaching time/d	Permeability coefficient/ (cm·h ⁻¹)	Leaching time/d	Permeability coefficient/ (cm·h ⁻¹)	
1	57.6	1	468	1	3 133.6	
2	50.4	2	464.4	2	2 525.9	
3	46.8	3	454.5	3	2 457.5	
4	43.2	4	446.4	4	2 273.6	
5	36.0	5	432.0	5	2 196.0	

表4 现场堆样渗透系数变化记录表
Table 4 Permeability coefficient of different size fraction in heap leaching

			• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •		
Leaching time/d	Permeability coefficient/ (cm·h ⁻¹)	Leaching time/d	Permeability coefficient/ (cm·h ⁻¹)	Leaching time/d	Perme coefficient
1	57.6	1	468	1	3 13
2	50.4	2	464.4	2	2 52
3	46.8	3	454.5	3	2 45
4	43.2	4	446.4	4	2 27
5	36.0	5	432.0	5	2 19



图 14 水洗-分级后堆场浸堆表面 Fig. 14 Surface of dump after washing-classification

慢目能满足堆浸要求,说明水洗-分级工艺对改善浸 堆渗透性效果显著。

此浸出工艺特点是堆浸为主,槽浸、搅浸为辅的 堆浸-槽浸-搅拌浸联合浸出;进入堆浸的矿量占70% 左右,浸出率在 59.3%左右; +0.28~-1 mm 粒级的细 砂进行槽浸,浸出率 71.75%: 将-0.28 mm 粒级的微 细粒泥矿进行搅拌浸出,浸出率在 43.5%;综合浸出 率达到了 63.98%。

5 结论

1) 分析了高含泥矿堆渗透性差的原因。首先, 黏 土矿物遇水膨胀导致颗粒间孔隙变小,阻碍了自由水 的顺利通过;其次,颗粒表面结合水对溶浸液自由水 具有黏滞及吸收作用, 增大溶浸液的渗流阻力。

2) 堆体的颗粒粒径与其渗透系数成二阶指数关 系,当粒径小于10mm时,其渗透系数随着粒径的增 加而缓慢增加;当粒径大于10mm时,其渗透系数随 着粒径的增加迅速增加。

3)-1 mm 粒级物料对堆体渗透性影响最大, 对堆 体渗透性具有恶化作用,不宜入堆。以-1 mm 粒径作 为堆浸与槽浸或搅浸的分界线。

4) 提出了水洗-分级浸出新工艺。矿堆中+1~-5 mm 和+5~-25 mm 粒级物料占 70%,采用分级筑堆、 分区喷淋的堆浸方式; +0.28~-1 mm 粒级物料视为细 砂,进入进行槽浸;-0.28 mm 视为泥质,进行搅拌浸 出。运用此工艺可使堆体的渗透性明显提高,渗透系 数为原矿的 8~50 倍,浸出率由原来的不到 10%提高 到 63.98%。

REFERENCES

[1] 赵 劲. 高含泥、高风化金矿石合理选矿工艺研究[J]. 云南冶 金, 2006, 25(3): 291-296.

ZHAO Jin. A study on the rational dressing technology of Au ore with high argillation & weathering intensity[J]. Yunnan Metallurgy, 2006, 25(3): 291-296.

[2] 孔胜武. 某高含泥氧化铜矿石的可选性探讨[J]. 有色金属(选 矿部分), 2002(4): 1-3. KONG Sheng-wu. Discussion of the wash ability of some high clay oxidized copper[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing

Section), 2002(4): 1-3. [3] 胡福成, 张健良. 低品位高含泥铁帽金矿提金工艺的研究[J]. 矿冶, 1995, 4(2): 51-56.

HU Fu-cheng; ZhANG Jian-liang. Study on gold extraction from low-grade iron cap gold ore with high mud content[J]. Mining and Metallurgy, 1995, 4(2): 51-56.

- [4] 李青松, 吴爱祥, 尹升华. 矿堆中溶浸液渗流效果的控制机 理研究[J]. 西部探矿工程, 2005(12): 73-75. LI Qing-song, WU Ai-xiang, YIN Shen-hua. Study of control mechanical on effect of seepage in dump leaching[J]. West-china Exploration Engineering, 2005(12): 73-75.
- 谭海明. 低品位高含泥氧化铜矿的制粒堆浸新工艺研究[J] [5] 邵阳学院学报: 自然科学版, 2005, 2(1): 92-93. TAN Hai-ming. A study on granulated heap leaching of lowly graded and highly-mudded oxidized copper ore[J]. Journal of Shaoyang University: Natural Science, 2005, 2(1): 92-93
- [6] 吕 萍. 低品位高含泥氧化铜矿制粒堆浸新工艺的研究[J].

矿业研究与开发,2001,21(2):32-34.

LÜ Ping. A study on granulated heap leaching of low graded and highly-mudded oxidized copper ore[J]. Mining Research and Development, 2001,21(2): 32–34.

- [7] 黎湘虹,黎澄宇,王 卉. 鑫泰含泥氧化铜矿制粒预处理堆 浸工艺[J]. 有色金属, 2009(1): 86-90.
 LI Xiang-hong, LI Cheng-yu, WANG Hui. Acidified granulation pretreatment-heap leaching processing of argillious oxidized copper ore from Xintai Co. Ltd [J]. Nonferrous Metals, 2009(1): 86-90.
- [8] 王洪江,吴爱祥,顾晓春,张新普,张 仪. 高含泥氧化铜矿 石分粒级筑堆技术及其应用[J]. 黄金,2011,32(2):46-50.
 WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang, GU Xiao-cun, ZHANG Xin-pu, ZHANG Yi. Technique of classification heap-constructing of copper oxide ore with high-clay and its application[J]. Gold, 2011, 32(2): 46-50.
- [9] 王贻明, 吴爱祥, 左 恒, 杨保华. 微粒渗滤沉积作用对铜矿 排土场渗流特性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(12): 2074-2078.
 WANG Yi-ming, WU Ai-xiang, ZUO Heng, YANG Bao-hua.

Effect of particles sedimentation during leaching on seepage characteristic of copper dumps[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(12): 2074–2078.

[10] 洪毓康. 土质学与土力学[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 1993: 27-29.

HONG Yu-kang. Soil science and soil mechanics[M]. 2nd Edition. Beijing: China Communications Press, 1993: 27–29.

- [11] 吴爱祥,李青松,尹升华,姜立春.改善高泥矿堆渗透性的机 理研究[J]. 湘潭矿业学院学报,2003,18(4):1-5.
 WU Ai-xiang, LI Qing-song, YIN Sheng-hua, JIANG Li-chun. Study on the mechanism of improving the penetrability of the high-clay ore heaps[J]. Journal of Xiangtan Mine Institute, 2003, 18(4): 1-5.
- [12] 王贻明.应力波强化堆浸渗流的理论与试验研究[D].长沙: 中南大学,2008:84-86.
 WANG Yi-ming. Theory and test study on seepage reinforcement by stress wave in heap leaching[D]. Changsha: Central South University, 2008: 84-86.
- [13] ABERG B. Void ratio of non-cohesive soils and similar materials[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1992, 118(9):1315–1334.
- [14] ABERG B. Hydraulic conductivity of Non-cohesive soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1992, 118(9): 1335–1347.
- [15] ABERG B. Washout of grains from filtered sand and gravel materials[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1993, 119(1): 36–53.
- [16] WU Ai-xiang, YIN Sheng-hua, LIU Jin-zhi, YANG Bao-hua. Formative mechanism of preferential solution flow[J]. Journal of Central South University of Technology, 2006, 13(5): 590–594.
- [17] LUXMOORE R J, JARDINE P M, WILSON G V, ZELAZNY L
 W. Physical and chemical controls of preferred path flow through hill slope[J]. Geodenna, 1990, 46:139–154.

(编辑 何学锋)