



不同孔隙结构下风化壳淋积型稀土的渗透特性

尹升华^{1,2}, 齐 炎^{1,2}, 谢芳芳², 陈 勋², 王雷鸣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)

摘要: 风化壳淋积型稀土开采过程中, 颗粒级配一直是影响矿体渗透性和浸矿效果的关键因素。为探究不同颗粒级配条件下风化壳淋积型稀土渗透特性规律, 选取 6 组不同配比的稀土矿样, 通过自制的变水头渗透装置开展室内实验, 有效模拟整个浸矿过程中矿体的孔隙结构, 分析不同粒径配比下矿样的渗透特性与浸矿效果。结果表明: 不同颗粒级配的稀土矿对应着不同的渗透效果, 基于试验数据得到孔隙率与渗透系数呈“类指数”的变化, 参照拟合结果得到修订的渗透系数模型, 并将修订模型进行了推广。机制分析认为: 孔隙比较小时稀土矿颗粒的结合水膜占据了有效孔隙, 对溶浸液流动具有极大的黏滞性。随着孔隙比的增大, 结合水膜效应逐渐弱化, 渗流效果显著增强。

关键词: 风化壳淋积型稀土; 渗透系数模型; 结合水膜效应; 孔隙结构

文章编号: 1004-0609(2018)-05-1043-07

中图分类号: TD865

文献标志码: A

风化壳淋积型稀土矿是我国特有、世界罕见的中重稀土矿^[1-2]。为满足我国稀土产业发展需求, 稀土工作者经过多年攻关, 自主研发出原地浸出开采离子型稀土新工艺, 实现风化壳淋积型稀土矿高效率、低成本及绿色化开采^[3-6]。然而, 在浸矿过程中, 由于溶浸液不断注入矿体, 矿体内部小颗粒发生迁移, 改变了矿体颗粒级配, 易产生该类矿床渗透性差, 溶浸液渗透效果不佳等现象, 进而导致浸出效率和资源回收率低, 甚至形成大量“盲区/死区”, 极大地降低资源利用率^[7-9]。因此, 研究不同颗粒级配下风化壳淋积型稀土矿的渗透特性对提高资源回收率具有实际指导意义。

浸出过程中, 风化壳淋积型稀土矿的浸出效果主要取决于浸矿溶浸液溶解有用矿物的能力和溶浸液在矿床中的渗透效果, 其中颗粒级配是影响矿体渗透性的重要指标之一^[10-12]。对此, 国内外学者开展了许多相关研究, 尹升华等^[13-14]针对具有 B 型颗粒结构特性稀土矿, 探讨浸矿对离子型稀土矿体结构的影响机制, 基于 Green-Ampt 土壤入渗模型, 初步探究了入渗水头和湿润峰深度之间的关系, 得到柱浸最优入渗水头。

吴爱祥等^[15]借用 X 光 CT 扫描技术与图像处理技术, 揭示了浸矿前后孔隙率和孔隙连通性的演化规律。胡凯建等^[16]采用柱浸试验的方法, 考察电场作用如何改善矿体渗透效果的作用机理, 得到电压与渗透系数变化的关系, 通过电场改变矿物双电层构造, 进而提高矿石渗透效果。李密等^[17]分析低品位铀尾矿浸出率低的问题, 采用常规酸浸以及不同氧化剂强化酸浸的实验, 得到辅助氧化剂破坏脉石结构并能强化浸出效果的结论。李健飞等^[18]着眼于混合稀土精矿提取工艺过程中的问题, 引进超声波改善渗流效果, 强化稀土精矿浸出。TAN 等^[19]进行树脂吸附和洗脱实验, 控制表面活性剂的化学反应, 引入复杂的表面活性剂以达到加快溶浸液溶解结果与溶浸液在矿床中的渗透。PETERSEN^[20]也开展矿石粒径效应在浸矿体系中的影响作用研究。对于矿石粒径或在不同颗粒级配条件下, 孔隙比是如何影响浸矿效果的作用规律研究甚少。

为此, 本文作者选配具有不同孔隙结构的 6 组试样, 采用自制的变水头渗流试验装置, 探讨在不同孔隙比条件下溶浸液渗流的变化规律, 得到孔隙比与渗透系数的变化关系。借助 Origin 软件曲线拟合, 建立

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51734001); 国家优秀青年科学基金资助项目(51722401); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600704)

收稿日期: 2017-03-20; 修订日期: 2017-06-05

通信作者: 尹升华, 教授, 博士; 电话: 010-62332750; E-mail: csuysh@126.com

了不同矿石粒径配比下稀土矿渗透系数修订模型。研究结果对于今后颗粒级配如何影响浸矿的理论研究方面具有较好的指导作用。

1 实验

1.1 实验矿样

本研究所采用的矿样取自江西省龙南某矿,利用孔径 $>0.6\text{ mm}$ 的标准筛和顶击式振筛机对试样颗粒进行了重配比。重配比后的试样各粒级组分及含量如图1所示。

为探索稀土矿渗透性与颗粒级配的关系,因此以孔隙比作为实验控制变量,设定孔隙比的变化范围为0.6~1.1。共制备6组试样,孔隙比分别为0.6、0.7、0.8、0.9、1.0、1.1。计算出配制不同孔隙比的试样所需烘干矿样和水的质量,如表1。分别称取不同孔隙比条件下对应量的粒径 $<2\text{ mm}$ 稀土矿样和蒸馏水,将蒸馏水均匀地喷洒在稀土矿样表面并充分搅和,经保鲜膜密封处理后放置恒温箱内24 h。

将调配好的稀土矿样放入装样筒中,塞上带顶盖的木塞,再使用铁锤均匀的敲击垫板,使木塞缓慢的

压入装样筒内。当木塞完全进入装样筒后,停止敲击。取出木塞,将直径为61.8 mm、高为40 mm的取土环刀插入试样中,敲击环刀使其压入试样内。拆卸装样筒,将环刀周围多余的矿样削除,测定环刀和试样的总质量,记录于表2。

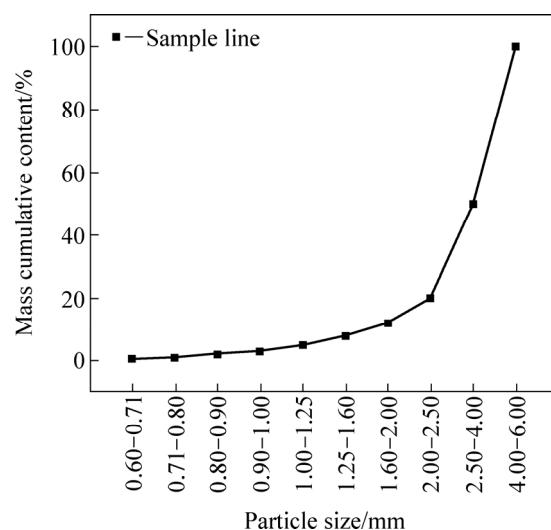


图1 试验矿样粒级组分及含量比例

Fig. 1 Concentration of sample size and content of test sample

表1 试样配比及特征参数

Table 1 Ratio and characteristic parameters of samples

Sample No.	Porosity ratio	Volume/ cm^3	Density/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	Water content/%	Quality of dried sample/g	Quality of water/g
1	0.6	600	2.71	15.81	1016.25	160.67
2	0.7	600	2.71	15.81	956.47	151.22
3	0.8	600	2.71	15.81	903.33	142.82
4	0.9	600	2.71	15.81	855.79	135.30
5	1.0	600	2.71	15.81	813.00	128.54
6	1.1	600	2.71	15.81	774.29	122.41

表2 试样和环刀总质量

Table 2 Total mass of sample and ring knife

Porosity ratio	Ring knife quality/g	Total quality of ring knife and sample/g	Sample quality/g	Sample volume/ cm^3	Sample density/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
0.6	99.13	334.36	235.23	119.92	1.96
0.7	99.14	320.53	221.39	119.92	1.85
0.8	99.13	308.22	209.09	119.92	1.74
0.9	99.12	297.21	198.09	119.92	1.65
1.0	99.13	287.31	188.18	119.92	1.57
1.1	99.11	278.33	179.22	119.92	1.49

1.2 实验装置

本实验矿样是具备黏性特性稀土矿, 若采用传统变水头实验装置会因试验时间过长, 微小气泡外泄以及流速缓慢等因子产生系统误差。为此在 TST-55 型土壤渗透仪装置的基础上预设了排气处理控制阀, 并在进水口加装了密封胶与止水夹。试验采用变水头试验方法测试出不同粒径配比下矿样的渗透系数, 试验装置如图 2 所示。

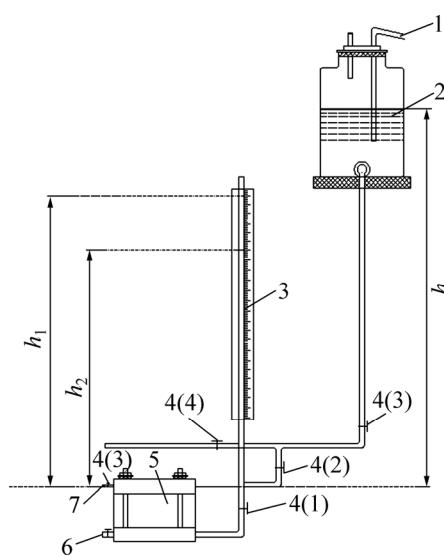


图 2 变水头渗透仪装置图

Fig. 2 Variable head permeability tester: 1—Water injection hole; 2—Leaching solution; 3—Scale; 4—Sealing clip device; 5—Penetration test device; 6—Venting device; 7—Outlet hole

1.3 实验方案

1) 将环刀试样装入渗透仪的套筒内, 并将套筒放在垫有滤纸的筒架透水板上。在试样顶部放入透水石, 压好垫圈, 盖上顶盖并用螺丝拧紧。

2) 连接好渗透仪与水头装置和供水装置, 打开供水瓶和止水夹 4(1)、4(2)、4(3), 让水通过进水管注入渗透仪流经土样。打开排气阀, 侧立渗透仪, 排除渗透仪底部的空气直至排出的水分无气泡, 关闭排气装置。

3) 保持一定的注水水头, 直至出水管口有水排出, 开始实验测定。

4) 当水头管内的水位达到需要高度时, 关闭止水夹 4(2)。分别测读初始水头高度 h_1 和终止水头高度 h_2 , 并测记起始和终止水头的间隔时间 Δt 和水温 θ 。每个试样重复实验 3 次, 取 3 次实验的平均值作为最终结果。

2 结果与分析

2.1 孔隙比对渗透性的影响规律

对 6 组重塑土试样变水头渗透试验所测数据, 采用常用对数公式计算渗透系数:

$$K_T = 2.3 \frac{aL}{A\Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

式中: a 为变水头管的断面积, 0.28cm^2 ; A 为试样的断面积, 29.98 cm^2 ; 2.3 为 \ln 的变换因数; L 为试样高度, 4 cm ; Δt 为测记水头的起始和终止间隔时间, s ; h_1 、 h_2 分别为起始和终止水头。

按下式换算为水温 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 的渗透系数 K_{20} :

$$K_{20} = 2.3 \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (2)$$

式中: η_T 、 η_{20} 分别为 θ 、 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时的动力粘滞系数。

由不同孔隙比试样与其对应的渗透系数曲线图(见图 3)可知, 试样的渗透系数随着孔隙比的变大而变

表 3 渗透试验数据记录

Table 3 Test data record of osmotic test

Porosity ratio	$\ln \frac{h_1}{h_2}$	$\Delta t/\text{s}$	$\theta/^\circ\text{C}$	$\frac{\eta_\theta}{\eta_{20}}$	$\bar{K}_\theta / (\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$K_{20}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
0.6	0.28	671	25	0.89	3.62×10^{-5}	3.22×10^{-5}
0.7	0.31	642	27	0.85	4.19×10^{-5}	3.56×10^{-5}
0.8	0.23	332	27	0.85	6.01×10^{-5}	5.11×10^{-5}
0.9	0.46	575	26	0.87	6.94×10^{-5}	6.04×10^{-5}
1.0	0.28	264	25	0.89	9.20×10^{-5}	8.19×10^{-5}
1.1	0.37	227	25	0.89	1.41×10^{-4}	12.6×10^{-5}

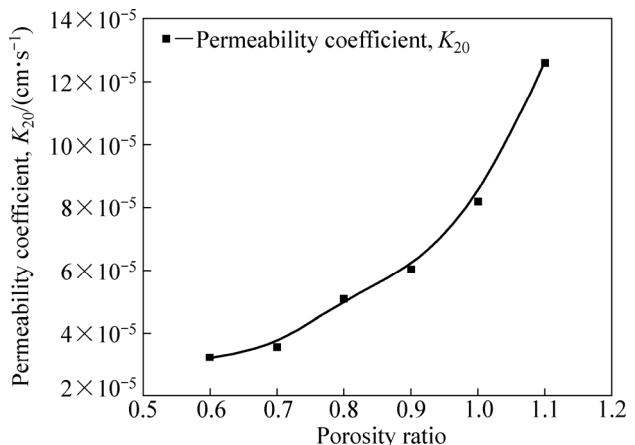


图 3 孔隙比与渗透系数的关系

Fig. 3 Relationship between porosity ratio and permeability coefficient

大, 即孔隙比越大试样的渗透系数也越大, 试样渗透性越好。分析二者的变化规律得到, 孔隙比与渗透系数并不是简单的线性变化关系, 而是函数“类指数”变化关系。

孔隙比是黏土矿物渗透性的主要影响因素之一。孔隙比的大小反映矿体内部孔隙数量, 而矿体渗透性与有效孔隙的有很大关系。在土颗粒体积一定的条件下, 孔隙比越大, 表示土体孔隙数量越多, 意味着连通孔隙出现的概率就越大。

由于风化壳淋积型稀土具有黏土矿物性质, 与水接触时, 颗粒表面负电荷在颗粒周围产生电场。水分子和水溶液中的阳离子在颗粒表面电场作用下被吸附, 形成了结合水膜。在孔隙比偏小时结合水膜所占据的孔隙面积比例较大, 一定程度上增大了无效孔隙比, 如图 4(a)所示。由于结合水膜受颗粒表面吸附力控制而不服从静水力学规律, 对溶浸液流动具有极大的黏滞性, 随着孔隙比进一步增大: 矿物颗粒颗粒表面距离增大, 结合水膜厚度逐渐降低, 使得颗粒间有效孔隙增大, 渗透系数随孔隙比的增大而迅速增大, 如图 4(b)所示。

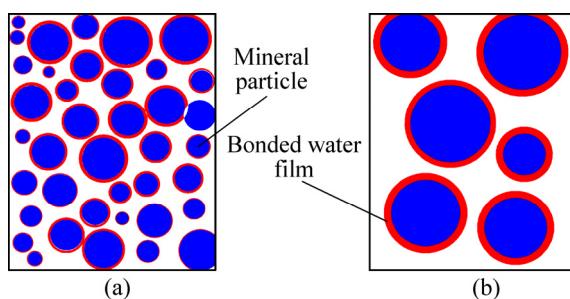


图 4 结合水膜在不同孔隙比下分布示意图

Fig. 4 Schematic diagram of distribution of water film at different porosity ratios

2.2 基于孔隙比的稀土矿渗透系数模型

作试样孔隙比与渗透系数的变化规律曲线, 如图 5。由图 5 中曲线可以看出, 试样的渗透系数与孔隙比呈正相关关系, 但二者并不是简单的线性关系。考虑当孔隙比 e 为 0 时, 渗透系数 K 应该等于或接近 0, 即曲线过原点, 所以分别参照太沙基公式、刘杰公式和柯森公式(将公式中的孔隙度统一转化成孔隙比), 设置拟合方程形式, 如式(3)、(4)、(5):

太沙基公式:

$$K_{20} = 2d_{10}^2 e^2 \Rightarrow y = ax^2 \quad (3)$$

刘杰公式:

$$K_{10} = 234n^3 d_{20}^2 = 234\left(\frac{e}{e+1}\right)^3 d_{20}^2 \Rightarrow y = a\left(\frac{x}{x+1}\right)^3 \quad (4)$$

柯森公式:

$$K_{18} = 780 \frac{n^3}{(1-n)^2} d_9^2 = 780 \frac{e^3}{e+1} \Rightarrow y = a \frac{x^3}{x+1} \quad (5)$$

利用 Origin 软件的曲线拟合功能, 分别按照上述拟合方程形式拟合曲线, 结果如表 4 所列。由表 4 可知, 实验所得试样渗透系数与孔隙比的变化规律采用柯森方程形式拟合度最高, 因此采用柯森方程形式拟合得到的公式来描述试样渗透系数与孔隙比的变化规律。

表 4 不同方程形式的拟合结果

Table 4 Fitting results of different equations

Formula type	Fitting result	Correlation Coefficient, R^2
TERZAGHI formula	$K_{20} = 8.85 \times 10^{-5} \cdot e^2$	0.936
LI Jie formula	$K_{20} = 6.90 \times 10^{-4} \cdot \left(\frac{e}{e+1}\right)^3$	0.880
KORMON formula	$K_{20} = 1.81 \times 10^{-4} \cdot \left(\frac{e^3}{e+1}\right)$	0.965

根据试样颗粒配比的有效粒径 $d_9=0.00136$, 对照柯森公式可将拟合方程式变换如下, 其变化曲线及方程形式拟合曲线如图 5。

$$K_{20} = 104.2 \frac{e^3}{e+1} d_9^2 \quad (6)$$

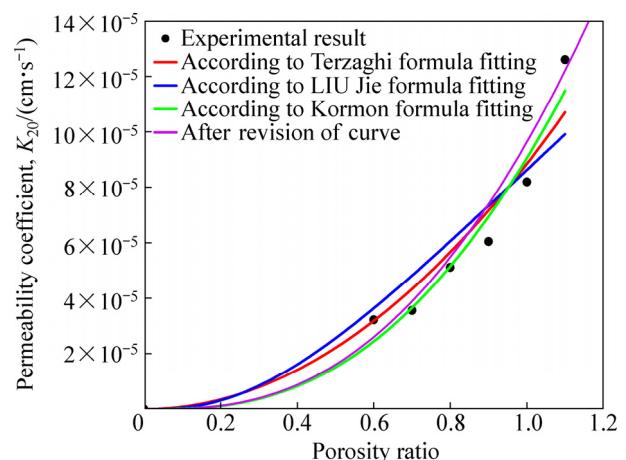


图 5 孔隙比与渗透系数的关系

Fig. 5 Relationship between variation of porosity ratio and permeability coefficient

2.3 修订后渗透系数模型验证

综上所述, 通过上述3个方程的拟合结果可知, 实验所得试样渗透系数与孔隙比的变化规律采用柯森方程形式拟合度最高, 参照经典的柯森公式得到了变换后的模型方程式。为使该修订模型更具广泛性, 需对渗透性与孔隙比之间的变化关系进行实验验证。因此, 在现有实验的基础上将孔隙比范围扩充为0.3~1.3, 共制备11组试样, 基于改进的渗透仪装置分别进行验证实验, 实验结果如图6所示。

由上图6中验证实验的结果与修订后柯森模型的对比可知, 孔隙比范围扩充后修订的渗透系数模型曲线与实验结果仍基本接近。风化壳淋积型稀土土离子呈羟基水合或水合状吸附于粘土矿物表面, 稀土矿晶体微观结构特征类似于粘土。因此, 在该孔隙比范围下的吻合结果具有普遍适应性。

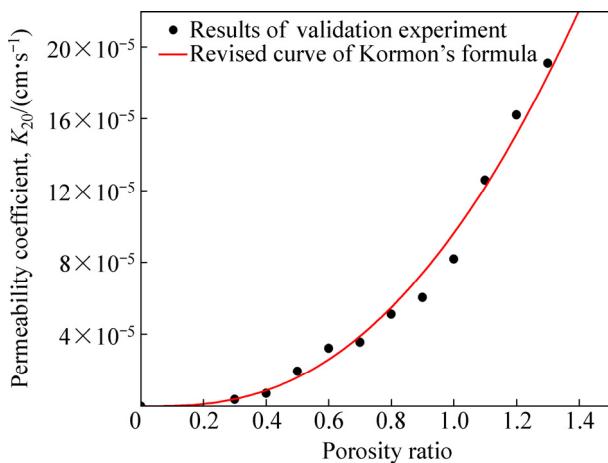


图6 验证实验结果与修订模型对比

Fig. 6 Comparison of test results with modified model

3 结论

1) 离子型稀土原地浸出时, 不同颗粒级配的矿体对应着不同的渗透系数。结果表明: 孔隙比与渗透系数并不是简单的线性变化关系, 而存在“类指数”变化关系。

2) 借助不同孔隙特性下土体的渗透系数经验公式, 根据试验数据对这些经验公式进行相关修正得到稀土矿渗透系数随孔隙比的变化关系, 建立稀土矿渗透系数模型, 基于验证实验将孔隙比范围扩充于0.3~1.3之间, 验证实验结果与修订模型基本吻合, 基本满足现场试验和理论研究需要, 对于同类研究也具有很好的借鉴作用。

3) 基于研究结果, 对于今后分析微细颗粒在浸矿

过程因迁移引起级配变化的渗流特性理论研究方面有一定指导作用。

REFERENCES

- [1] 周晓文, 温德新, 罗仙平. 南方风化壳离子型稀土矿提取技术研究现状及展望[J]. 有色金属科学与工程, 2012, 3(6): 81~85.
ZHOU Xiao-wen, WEN De-xin, LUO Xian-ping. The status quo and development trend of the extraction technology of ion-absorbed rare earth in southern China[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2012, 3(6): 81~85.
- [2] 钱婷婷, 方细辉, 吴红强, 曾庆华, 朱冬梅. 风化壳淋积型稀土土离子呈羟基水合或水合状吸附于粘土矿物表面, 稀土矿晶体微观结构特征类似于粘土。因此, 在该孔隙比范围下的吻合结果具有普遍适应性。
QIU Ting-sheng, FANG Xi-hui, WU Hong-qiang, ZENG Qing-hua, ZHU Dong-mei. Leaching behaviors of iron and aluminum elements of ion-absorbed-rare-earth ore with a new impurity depressant[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(9): 2986~2990.
- [3] 饶睿, 李明才, 张树标, 饶运章, 钟健民. 离子型稀土原地浸矿采场滑坡特征及防控试验研究[J]. 稀土, 2016, 37(6): 26~31.
RAO Rui, LI Ming-cai, ZHANG Shu-piao, RAO Yun-zhang, ZHONG Jian-min. Experimental study on landslide features and countermeasures of in-situ leaching stope of ion-type rare earth mines[J]. Chinese Rare Earths, 2016, 37(6): 26~31.
- [4] 李恒凯, 吴立新, 刘小生. 稀土矿区地表环境变化多时相遥感监测研究——以岭北稀土矿区为例[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(6): 1087~1094.
LI Heng-kai, WU Li-xin, LIU Xiao-sheng. Change detection of ground-surface environment in rare earth mining area based on multi-temporal remote sensing: A case in Lingbei in rare earth mining area[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2014, 43(6): 1087~1094.
- [5] 肖燕飞, 李开中, 王莉, 杨幼明, 刘徽平, 王超, 徐海波. 离子吸附型稀土矿稀土提取过程中天然放射性核素分布调查分析[J]. 中国稀土学报, 2016, 34(5): 625~631.
XIAO Yan-fei, LI Kai-zhong, WANG Li, YANG You-ming, LIU Hui-ping, WANG Chao, XU Hai-bo. Investigation of natural radionuclide distribution in rare earth extraction process from ion-adsorption type rare earths ore[J]. Journal of the Society Chinese of Rare Earths, 2016, 34(5): 625~631.
- [6] 陈德宏, 李宗安, 王志强, 王育民, 张志琦, 吴道高. 稀土熔盐电解用干式防渗料的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2014, 12(2): 43~46.
CHEN De-hong, LI Zong-an, WANG Zhi-qiang, WANG Yu-min, ZHANG Zhi-qi, WU Dao-gao. Study on dry impermeable materials in rare earth molten salt electrolysis[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2014, 12(2): 43~46.
- [7] 李永绣, 周新木, 刘艳珠, 李东平, 李静, 唐群. 离子吸附型稀土高效提取和分离技术进展[J]. 中国稀土学报, 2012, 30(3): 257~264.
LI Yong-xiu, ZHOU Xin-mu, LIU Yan-zhu, LI Dong-ping, LI

- Jing, TANG Qun. Development of high efficiency extraction and separation technologies of rare earths from ion-adsorbed type deposit[J]. Journal of the Society Chinese of Rare Earths, 2012, 30(3): 257–264.
- [8] 黄群群. 浸矿过程中离子型稀土矿体渗透性变化规律的试验研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2014.
- HUANG Qun-qun. Experimental study on permeability change rule of ion-absorbed rare-earth in ore leaching process[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2014.
- [9] QIU T S, ZHU D M, FANG X H, ZENG Q H, GAO G K, ZHU H L. Leaching kinetics of ionic rare-earth in ammonia-nitrogen wastewater system added with impurity inhibitors[J]. Journal of Rare Earths, 2014, 32(12): 1175–1183.
- [10] 左恒, 王贻明, 江怀春, 陈学松. 电场作用下离子型稀土矿浸矿溶浸液渗流特性研究[J]. 中国稀土学报, 2007, 25(1): 80–84.
- ZUO Heng, WANG Yi-ming, JIANG Huai-chun, CHEN Xue-song. Seepage properties of leaching solution in ion-absorbed rare earth deposits under effect of electric field[J]. Journal of the Society Chinese of Rare Earths, 2007, 25(1): 80–84.
- [11] 田君, 唐学昆, 尹敬群, 罗仙平. 风化壳淋积型稀土矿浸取过程中基础理论研究现状[J]. 有色金属科学与工程, 2012, 3(4): 48–52.
- TIAN Jun, TANG Xue-kun, YIN Jing-qun, LUO Xian-ping. Present situation of fundamental theoretical research on leaching process of weathered crust elution-deposited rare earth ore[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2012, 3(4): 48–52.
- [12] 李永绣, 张玲, 周新木. 南方离子型稀土的资源和环境保护性开采模式[J]. 稀土, 2010, 31(2): 80–85.
- LI Yong-xiu, ZHANG Ling, ZHOU Xin-mu. Current mining situation and potential development of rare earth in China[J]. Chinese Rare Earths, 2010, 31(2): 80–85.
- [13] 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[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(3): 506–510.
- WU Ai-xiang, YIN Sheng-hua, LI Jian-feng. Influential factors of permeability rule of leaching solution in ion-absorbed rare earth deposits with in-situ leaching[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2005, 36(3): 506–510.
- [14] 尹升华, 谢芳芳. 基于 Green-Ampt 模型离子型稀土柱浸试验入渗水头的确定[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(12): 2668–2675.
- YIN Sheng-hua, XIE Fang-fang. Research based on Green-Ampt model to determine the infiltration head of ion-absorbed rare earth with column leaching experiment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(12): 2668–2675.
- [15] 吴爱祥, 杨保华, 刘金枝, 张杰. 基于 X 光 CT 技术的矿岩散体浸出过程中孔隙演化规律分析[J]. 过程工程学报, 2007, 7(5): 960–966.
- WU Ai-xiang, YANG Bao-hua, LIU Jin-zhi, ZHANG Jie. Analysis of pore structure evolution of ore granular media during leaching based on X-ray computed tomography[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2007, 7(5): 960–966.
- [16] 胡凯建, 吴爱祥, 尹升华, 黄明清, 王少勇, 熊有为. 电场改善细粒级尾矿浸出渗透效果试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(10): 3989–3994.
- HU Kai-jian, WU Ai-xiang, YIN Sheng-hua, HUANG Ming-qing, WANG Shao-yong, XIONG You-wei. Experimental study on effect of electric field on permeability of fine tailings[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(10): 3989–3994.
- [17] 李密, 张彪, 张晓文, 黄婧, 丁德馨, 叶勇军. 从低品位铀尾矿中氧化浸出铀[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(1): 145–154.
- LI Mi, ZHANG Biao, ZHANG Xiao-wen, HUANG Jing, DING De-xin, YE Yong-jun. Oxidizing leaching of uranium from low-grade uranium tailings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(1): 145–154.
- [18] 李健飞, 李梅, 高凯, 张栋梁, 耿彦华, 耿金龙. 超声波强化浸出高品位混合稀土精矿[J]. 稀有金属, 2017, 41(2): 196–202.
- LI Jian-fei, LI Mei, GAO Kai, ZHANG Dong-liang, GENG Yan-hua, GENG Jin-long. Enhanced leaching process of high-grade mixed rare earth concentrate with ultrasonic technology[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2017, 41(2): 196–202.
- [19] TAN K, LI C, LIU J, QU H, XIA L, HU Y. A novel method using a complex surfactant for in-situ leaching of low permeable sandstone uranium deposits[J]. Hydrometallurgy, 2014, 150: 99–106.
- [20] PETERSEN J. Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores — A brief overview[J]. Hydrometallurgy, 2016, 165(1): 206–212.

Permeability characteristic of weathered crust elution-deposited rare earth ores under different pore structures

YIN Sheng-hua^{1,2}, QI Yan^{1,2}, XIE Fang-fang², CHEN Xun², WANG Lei-ming²

(1. Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal, Ministry of Education,
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)

Abstract: During the leaching of weathered crust elution-deposited rare earth ore, the grain grading is the key factor affecting the permeability of ore body and leaching results. In order to explore the feature rule of permeability of weathered crust elution-deposited rare earth ore under different grain grading conditions, six groups of rare earth of different grain grading were prepared. The indoor experiment was conducted on the self-made variable water head infiltration equipment to analyze the permeability of ore body and leaching results, which effectively simulate the ore body porous structure of the whole leaching process. The results show that the rare earth with different grain grading corresponds to different permeation effects results. Based on the experimental data, the relationship between porosity and permeability is summarized as “index relation”, and the modified permeability coefficient model is obtained by referring to the fitting results, the revised model is promoted. The mechanism analysis shows that the bonded water film of rare earth ore particles occupies the effective pores when the pores are relatively small, and it imposes great viscous effect on the flow of the solution. With the increase of porosity, the bonded water film effect is weakened and the effect of seepage is enhanced.

Key words: weathered crust elution-deposited rare earth; permeability coefficient model; bonded water film effect; particle grading

Foundation item: Project(51734001) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(51722401) supported by the National Science Foundation for Excellent Young Scholars of China; Project (2016YFC0600704) supported by the Program for National Key Research and Development of China

Received date: 2017-03-20; **Accepted date:** 2017-06-05

Corresponding author: YIN Sheng-hua; Tel: +86-010-62332750; E-mail:csuysh@126.com

(编辑 李艳红)