离子型稀土开采过程中导流井井周矿体颗粒脱落运移临界流速研究

周 扬[1]，潘栋彬[1,2*]，曾云霜[1]
（1.江西理工大学战略金属矿产资源低碳加工与利用江西省重点实验室，江西 赣州 341000；
2.自然资源部复杂条件下钻采技术重点实验室（吉林大学），吉林 长春 130026）

摘要：离子型稀土是我国独具特色、世界罕见的矿产资源，主导了全球的中重稀土供给，具有配分齐全、高科技应用元素多与综合利用价值大的特点。但离子型稀土开采过程中易出现井壁坍塌，进而造成边坡失稳。本文分析了导流井井周矿体颗粒受力状态，建立了矿体颗粒脱落运移临界流速计算模型，研究了不同影响因素下矿体颗粒脱落运移临界流速。结果表明，矿体颗粒脱落运移的临界流速随颗粒半径、排列角度、摩擦系数的增大而增大。静电力受浸矿液浓度的影响，但其对矿体颗粒脱落运移临界的影响不大。此外，浸矿液粘度增大能够显著降低临界流速。本研究能够为离子型稀土安全高效开发提供理论与技术支撑。

关键词：离子型稀土矿；井壁坍塌；矿体颗粒；脱落运移；临界流速。
中图分类号：TD26；P634 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-9686(2024)S1-0112-05

Study on the critical flow rate of diversion well in the mining process of ionic rare earth

ZHOU Yang[1], PAN Dongbin[1,2*], ZENG Yunshuang[1]
(1. *Jiangxi Provincial Key Laboratory of Low-Carbon Processing and Utilization of Strategic Metal Mineral Resources, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi* 341000, *China*;
2. *Key Laboratory of Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions, MNR, Jilin University, Changchun Jilin* 130026, *China*)

Abstract: Ionic rare earth ore is a unique mineral resource in China and rare in the world. It dominates the global supply of medium and heavy rare earth, and has the characteristics of complete distribution, many high-tech application elements and great comprehensive utilization value. However, in the process of ionic rare earth mining, the well wall is prone to collapse, resulting in slope instability. This paper analyzed the calculation model of the critical velocity of the migration volume of the ore body particles under different influence factors. The results show that the critical flow rate of the ore particles increases with the particle radius, arrangement angle and friction coefficient. Electrostatic power is affected by the concentration of immersion liquid, but it has little influence on the migration of ore body particles. In addition, the viscosity of the solution can significantly reduce the critical flow rate. This study can provide theoretical and technical support for the safty and efficient development of ionic rare earth.

Key words: ionic rare earth ore; wall collapse; ore body particles; shedding and migration; critical flow rate

收稿日期：2024-07-31 **DOI：**10.12143/j.ztgc.2024.S1.016
基金项目：江西省自然科学基金“离子型稀土矿体浸矿过程中侵蚀孔洞形成与演化规律研究”（编号：20224BAB213044）；战略金属矿产资源低碳加工与利用江西省重点实验室项目（编号：2023SSY01041）
第一作者：周扬，男，汉族，2002年生，硕士研究生，地质工程专业，研究方向为离子型稀土矿山开发，江西省赣州市红旗大道86号，zhouyang05245911@outlook.com。
通信作者：潘栋彬，男，汉族，1994年生，讲师，硕士生导师，地质工程专业，博士，研究方向为岩土渗流侵蚀与水合物钻采，江西省赣州市红旗大道86号，pandbedu@163.com。
引用格式：周扬，潘栋彬，曾云霜.离子型稀土开采过程中导流井井周矿体颗粒脱落运移临界流速研究[J].钻探工程，2024，51(S1)：112-116.
ZHOU Yang, PAN Dongbin, ZENG Yunshuang. Study on the critical flow rate of diversion well in the mining process of ionic rare earth[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 112-116.

0　引言

离子型稀土矿(又称离子吸附型稀土矿或风化壳淋积型稀土矿),是我国独具特色、世界罕见的矿产资源,主导了全球的中重稀土供给,具有配分齐全、高科技应用元素多与综合利用价值大的特点[1-3]。离子型稀土矿的安全高效开发顺应国家稀土战略需求,对保障稀土供给与推动稀土产业升级具有至关重要的意义。

原地浸矿法是目前离子型稀土的主要开采方法。通过注液井将浸矿液[以$(NH_4)_2SO_4$溶液为主]注入矿体内,在渗流过程中浸矿液置换出矿体中吸附的稀土阳离子,通过在矿山底部设置导流井收集母液,进而实现开采[4],如图1所示。该方法不需要采剥矿体,对环境影响小且生产成本低,成为了目前国际公认的离子型稀土矿山高效绿色开采技术[5]。然而,离子型稀土矿山长期浸矿过程中面临导流井井壁坍塌与山体滑坡等问题[6-7]。离子型稀土矿主要是全风化花岗岩,由石英与粘土矿物组成,具有弱胶结、松散易侵蚀与孔裂隙多的特点[8-10]。原地浸矿过程中,浸矿液的侵入会导致导流井井周矿体内孔隙流体压力升高,有效应力降低,将严重降低骨架颗粒间的结合力,当浸矿液的渗流速度超过临界流速,流体驱动力会大于矿体颗粒间结合力,导致其脱落运移[11-13]。少部分矿体颗粒脱落运移可能引起孔喉堵塞,降低矿体渗透性,大量的颗粒脱落运移会破坏导流井井周矿体结构,导致井壁坍塌,可能引发边坡失稳[14-15]。因此,明确浸矿液渗流过程中导流井井周矿体颗粒脱落运移临界流速演变规律是指导注液开采工程的关键,也是控制稀土矿山导流井井壁稳定与边坡稳定的基础与前提。但目前学者主要围绕原地浸矿过程中离子型稀土矿体力学特性与孔渗特性开展研究,对矿体颗粒脱落运移临界流速的关注极少,亟待开展相关研究。

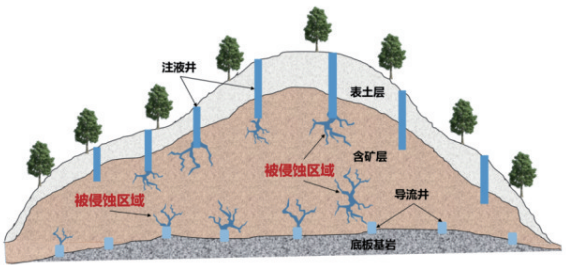
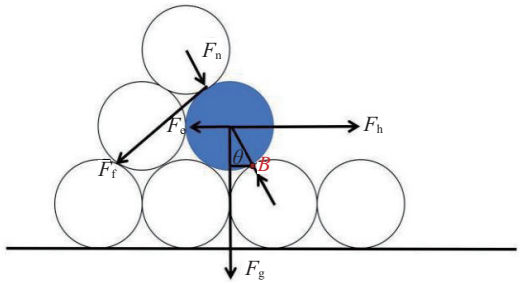


图1　离子型稀土矿原地浸矿示意[14]

据此,本文针对离子型稀土原地浸矿开采过程,以导流井井周矿体颗粒为研究对象,通过理论分析矿体颗粒受力平衡状态,建立矿体颗粒脱落运移临界流速计算模型,全面探讨了矿体颗粒粒径、排布角度、粒间摩擦系数与浸矿液(硫酸铵溶液)浓度对矿体颗粒脱落运移临界流速的影响规律。

1　数学模型

稀土颗粒启动运移的基本条件是颗粒的力矩平衡条件被破坏,如图2所示,将矿体颗粒视为等直径球形颗粒,矿体颗粒在脱落运移过程中受到多种力的作用。



F_g—颗粒的浮重,N;F_n—颗粒之间的挤压力,N;
F_f—颗粒间的摩擦力,N;F_h—液流的推动力,N;
F_e—颗粒受到的静电力,N

图2　矿体颗粒受力示意[16]

假定颗粒绕支点B转动脱落,通过B点建立力矩平衡方程如下:

$$F_g r\cos\theta + 2F_f r - F_e r\sin\theta \leqslant F_h r \cdot \sin\theta \tag{1}$$

式中:r——矿体颗粒半径,m。

1.1　浮重的计算

浸矿过程中,矿体颗粒处于液体环境中,受到液体的浮力,浮重的表达式如下:

$$F_g = \frac{4}{3}\pi\left(\rho - \rho_{液}\right)r^3 g \tag{2}$$

式中:ρ——矿体颗粒密度,kg/m^3;$\rho_{液}$——浸矿液浓度,kg/m^3。

1.2　粒间摩擦力的计算

矿体颗粒之间存在相互挤压作用,在平衡力矩中作用为摩擦力阻力矩,阻碍着矿体颗粒的运移启动。颗粒间的摩擦力通过挤压力可求得,摩擦力的方向沿颗粒间的切线,运动趋势方向的反方向。矿体颗粒的挤压力可以通过地层的荷载压强作用于颗粒的最大横截面积上等效求出,埋深地层的压力

包括土骨架的压力和土孔隙中的浸矿液压力。

$$F_n=[\varphi\rho_{液}gh+(1-\varphi)\rho gh]\pi r^2 \tag{3}$$

$$F_f=2mF_n \tag{4}$$

式中：m——颗粒间的摩擦系数；h——矿体颗粒埋藏深度；θ——矿体颗粒堆积角度；φ——孔隙度，根据等直径球形颗粒模型，孔隙度计算公式为：

$$\varphi=1-\frac{\pi}{6(1-\cos\theta)\sqrt{1+2\cos\theta}} \tag{5}$$

1.3 静电力的计算

静电力是两颗粒间的相互作用力在微观尺度的表现，如图2所示，是为球形颗粒和平板颗粒的相互作用，根据DLVO理论的基础，半径为r的球形颗粒与平板颗粒之间的作用力计算公式[17]如下：

$$F_T=-\frac{dV_T}{dh} \tag{6}$$

$$F_T=-\frac{Ar}{6h'^2}-\pi\varepsilon r\left(\phi_{01}^2+\phi_{02}^2\right)\left\{\left[\frac{2\phi_{01}\phi_{02}}{\phi_{01}^2+\phi_{02}^2}\left(-\frac{2\kappa e^{(-\kappa h')}}{\left[1+e^{(-\kappa h')}\right]1-e^{(-\kappa h')}}\right)\right]+\frac{2\kappa e^{(-2\kappa h')}}{\left[1-e^{(-2\kappa h')}\right]}\right\} \tag{7}$$

$$F_e=F_T \tag{8}$$

式中：h——两颗粒表面间距，m；A——Hamaker常数，取值2×10^{-20} J[16]；κ^{-1}——德拜长度，m，根据浸矿液浓度和类型（2%硫酸铵溶液），取值0.555 nm[18]；h'——颗粒间距，取20 nm；ε——真空介电常数，$\varepsilon=8.854\times10^{-12}c^2\cdot J^{-1}\cdot K^{-1}$；$r$——球形颗粒半径，m；$\varphi_{01}$、$\varphi_{02}$——颗粒表面电位，但对于离子型稀土矿体颗粒来说，表面电位只有一个，本文用Zeta电位进行计算，取19.15 mV[19]。

1.4 液流推力的计算

矿体颗粒受到液流的推力来源于渗流的渗透压推力，当渗流从高压区流到低压区时，会形成一个压力差区域带，在这个区域带内，水会不断地从高压区向低压区流动，从而产生推力。该推力可以用达西定律求解如下：

$$k=\frac{1000Q\mu\Delta X}{A\Delta P} \tag{9}$$

式中：A——以分析颗粒为中心的单元体的截面积，m^2；ΔX——以分析颗粒为中心的单元体的长度，m；k——渗透率，m^2；ΔP——以分析颗粒为中心的单元体在流速方向上的渗透压，Pa。

单元体受到的推力为：

$$F=A\Delta P=\frac{1000Q\mu\Delta X}{k} \tag{10}$$

在此单元体中共有N个微粒：

$$N=\frac{A(1-\varphi)\Delta X}{\frac{4}{3}\pi r^3} \tag{11}$$

根据Kozeny方程，渗透率还可以表示为：

$$k=\frac{\varphi^3}{KS_b(1-\varphi)^2} \tag{12}$$

式中：φ——孔隙度；K——Kozeny常数，$k=5$；S_b——松散沉积物比表面，m^2/m^3，$S_b=3/r$。

代入得出：

$$k=\frac{\varphi^3r^2}{45(1-\varphi)^2} \tag{13}$$

再将式（13）代入式（10）得到单个颗粒受到推力：

$$F_h=\frac{F}{N}=60000\pi\mu\frac{1-\varphi}{\varphi^2}ru \tag{14}$$

式中：u——矿体颗粒启动运移的临界流速，m/s。

1.5 力矩平衡方程

根据式（1）的力矩平衡条件，当稀土矿体颗粒达到启动运移临界渗流速度条件时，其受力满足：

$$F_g r\cos\theta+2F_f r-F_e r\sin\theta=F_h r\sin\theta \tag{15}$$

将式（2）、（3）、（4）、（7）、（14）代入式（15）得出矿体颗粒启动运移的临界流速为：

$$u=\frac{\frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho-\rho_{液})\cot\theta+\frac{2m[\varphi p_{液}gh+(1-\varphi)\rho gh]\pi r^2}{\sin\theta}-F_e}{60000\pi\mu\frac{1-\varphi}{\varphi^2}r} \tag{16}$$

2 结果与讨论

2.1 颗粒半径对临界流速的影响

为研究颗粒半径对离子型稀土矿体导流井井周矿体颗粒脱落运移临界流速的影响，取浸矿液[$(NH_4)_2SO_4$溶液]的粘度$\mu=1.01$ mPa·s，矿体颗粒颗密度$\rho=2500$ kg/m³，矿体颗粒堆积角度$\theta=60°$，

粒间摩擦系数 $m=0.3$,埋深 $h=10$、20、30 m 分别根据式(16)求出不同矿体颗粒粒径条件下致使颗粒运移的浸矿液临界渗流速度,如图3所示。由图3可知,浸矿液临界渗流速度随着颗粒半径的增大而线性增大,在不同埋深条件下,临界流速的增长趋势是一致的。这是由于埋藏越深,颗粒间的挤压力越大,摩擦力越大,而重力和摩擦力皆为其运动的阻力,颗粒半径增大也显著提升了颗粒围绕参考点转动的阻力矩。由此可以认为,在离子型稀土原地开采过程中,细小颗粒更容易从矿体中运移至导流井。

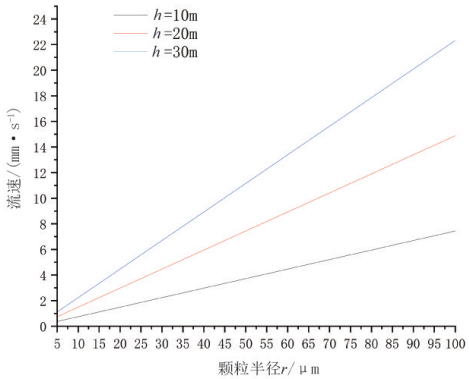


图3　颗粒半径与临界流速关系

2.2　排列角度对临界流速的影响

分别取颗粒半径5、10、15、20、30、50 μm,取浸矿液[$(NH_4)_2SO_4$溶液]的粘度 $\mu=1.01$ mPa•s,矿体颗粒颗密度 $\rho=2500$ kg/m^3,矿体颗粒堆积角度 $\theta=60°$,粒间摩擦系数 $m=0.3$,埋深 $h=10$ m,求出不同排列角度下致使颗粒运移的浸矿液临界渗流速度,如图4所示。由图4可知,浸矿液临界渗流速度随排列角度的增加而增加,但斜率在逐渐变缓。这是由于排列角度的增大,孔隙增大,孔隙中的渗流速度损失也增大,会导致对颗粒的推力减小,若要使力矩保持平衡,则临界流速增大。

2.3　摩擦系数对临界流速的影响

分别取颗粒半径5、10、15、20、30、50 μm,取浸矿液[$(NH_4)_2SO_4$溶液]的粘度 $\mu=1.01$ mPa•s,矿体颗粒颗密度 $\rho=2500$ kg/m^3,矿体颗粒堆积角度 $\theta=60°$,粒间摩擦系数 $m=0.3$,埋深 $h=10$ m,求出不同的摩擦系数的条件下致使颗粒运移的浸矿液临界渗流速度,如图5所示。由图5可知,浸矿液临界渗流速度随摩擦系数的增大而线性增大,这是因为摩擦力阻碍着颗粒运移,摩擦系数的增大提升了颗粒

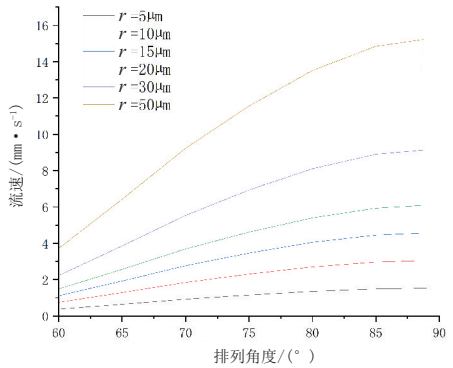


图4　排列角度与临界流速关系

受到的阻力距,根据力矩公式,推力矩也要增大才能达到平衡,从而导致推动颗粒运移的液流推力要增大,从而临界流速也增大。

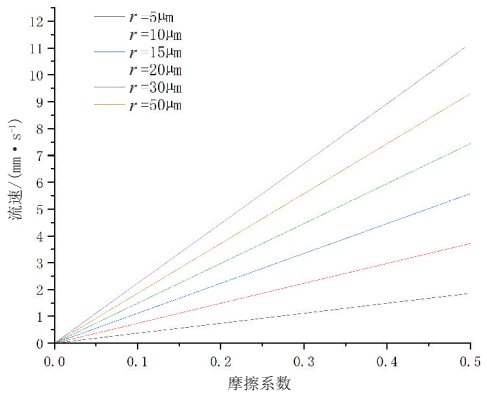


图5　摩擦系数与临界流速关系

2.4　浸矿液浓度对临界流速的影响

分别取颗粒半径5、10、15、20、30、50 μm,矿体颗粒颗密度 $\rho=2500$ kg/m^3,矿体颗粒堆积角度 $\theta=60°$,粒间摩擦系数 $m=0.3$,埋深 $h=10$ m,求出不同粘度条件下致使颗粒运移的浸矿液临界渗流速度,如图6所示。由图6可知,浸矿液临界渗流速度随着粘度的增大而减小,粘度的增大提升了颗粒受到的推力距,在阻力距保持不变的情况下,浓度(粘度)更大的液流推动颗粒要更容易,其临界流速更低。

小范围的改变浸矿液[$(NH_4)_2SO_4$溶液]浓度,使得颗粒表面电位发生变化而浸矿液的粘度改变较小,r 取20 μm,其他条件不变,根据式(16)求出不同电位条件下致使颗粒运移的浸矿液临界渗流速度,如图7所示。由图7可知,颗粒表面电位的大小对矿体颗粒脱落运移的临界流速影响较小,但随颗粒间距的减小,静电力增大,矿体颗粒脱落运移临

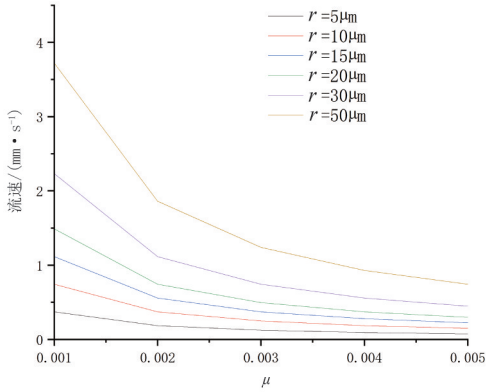


图6 粘度与临界流速关系

界流速也有所增大。由浸矿液[$(NH_4)_2SO_4$溶液]浓度引起的静电力变化对临界流速的影响不大。

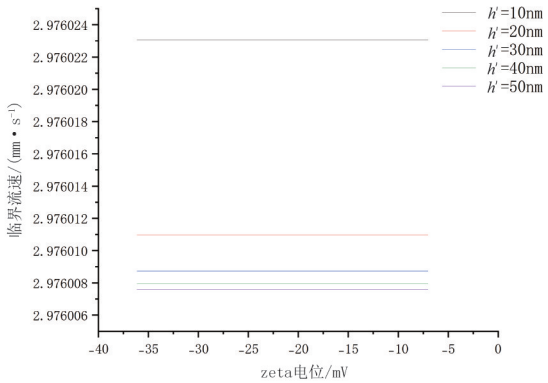


图7 颗粒表面电位与临界流速关系

3 结论

(1)在稀土矿开采过程中,矿体颗粒半径、排列角度对导流井井周矿体颗粒脱落运移产生重要影响,颗粒半径的增大显著的增大了颗粒运移的临界流速,而临界流速也随排列角度的增大而增大,但其递增幅度不断减小。

(2)颗粒间的摩擦系数和浸矿液浓度也影响着矿体颗粒运移的临界流速,摩擦系数的增大提高了阻力矩,临界流速也增大,浸矿液浓度的提升增大液体粘度,提升了动力矩,致使临界流速减小。但粒间静电力受浸矿液浓度的影响较小,导致粒间静电力对临界流速几乎不起作用。实际开采过程中可以通过减小浸矿液粘度、土体改性(提升摩擦系数、增大颗粒半径)等方式来改变颗粒脱落运移的临界流速来减少导流井井周矿体颗粒流失,降低井壁坍塌风险。

参考文献:

[1] 池汝安,田君.风化壳淋积型稀土矿化工冶金[M].北京:科学出版社,2006.

[2] Chi R, Tian J, Li Z, et al. Existing state and partitioning of rare earth on weathered ores[J] Journal of Rare Earths, 2005, 23(6):756-759.

[3] 刘余九.中国稀土产业现状及发展的主要任务[J].中国稀土学报,2007,25(3):257-263.

[4] 池汝安,田君,罗仙平,等.风化壳淋积型稀土矿的基础研究[J].有色金属科学与工程,2012,3(4):1-13.

[5] Moldoveanu G A, Papangelakis V G. An overview of rare-earth recovery by ion-exchange leaching from ion-adsorption clays of various origins[J]. Mineralogical Magazine, 2016,80(1)63-76.

[6] Yang X J, Lin A, Li X L, et al. China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation[J]. Environmental Development, 2013,8(1):131-136.

[7] 郭钟群,赵奎,金解放,等.离子型稀土开发面临的问题与绿色提取研究进展[J].化工进展,2019,38(7):3425-3433.

[8] 李慧,徐志高,余军霞,等,风化壳淋积型稀土矿矿石性质及稀土在各粒级上的分布[J].稀土,2012,33(2):14-18.

[9] 池汝安,刘雪梅.风化壳淋积型稀土矿开发的现状及展望[J].中国稀土学报,2019,37(2):129-140.

[10] 郭钟群,周尖荣,徐虹,等.漫矿作用下离子型稀土强度弱化及滑坡研究进展[J].稀土,2022,43(3):9-22.

[11] 蒋舒,路瑞利,位伟,等.原地浸矿诱发离子型稀土矿山边坡变形机制及其稳定性研究[J].武汉大学学报(工学版),2024,57(5):545-553.

[12] 冯秀娟,王小青,张书荣,等.离子吸附型稀土原地浸矿颗粒运移与孔隙结构演变及模型构建研究现状及展望[J/OL].稀土,1-14[2024-10-14]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/15.1099.TF.20240326.0946.001.html.

[13] 尚白红,路昌明,汤澍,等.离子型稀土采场滑坡成因与预测方法研究[J].世界有色金属,2022,(18):168-170.

[14] 郭钟群,周尖荣,徐虹,等.浸矿作用下离子型稀土强度弱化及滑坡研究进展[J].稀土,2022,43(3):9-22.

[15] 谢芳芳,尹升华,袁长林,等.浸矿液对离子型稀土矿孔隙影响机制研究[J].稀土,2018,39(6):48-56.

[16] 刘浩伽,李彦龙,刘昌岭等.水合物分解区地层砂粒启动运移临界流速计算模型[J].海洋地质与第四纪地质,2017,372(5):166-172.

[17] 张志军,刘炯天,冯莉,等.基于DLVO理论的煤泥水体系的临界硬度计算[J].中国矿业大学学报,2014,43(1):120-125.

[18] 秦福元,刘伟,王文静,等.Zeta电位计算过程中Henry函数的优化表达式[J].光学学报,2017,37(10):328-335.

[19] 彭浩,胡世丽,王观石,等.浸矿剂浓度对离子型稀土矿体抗剪强度参数的影响[J].稀土,2022,43(6):58-64.

(编辑 王文)