文章编号:1674-2869(2024)04-0417-07

# 乙酸铵助浸风化壳淋积型稀土矿过程研究

陈文斗[1],张臻悦[1,2],龙 菲[1],池汝安[1,2,3],陈 卓*[1,2]
1. 武汉工程大学资源与安全工程学院,湖北 武汉 430074;
2. 绿色化工教育部重点实验室(武汉工程大学),湖北 武汉 430074;
3. 湖北三峡实验室,湖北 宜昌 443007

**摘 要**:针对目前风化壳淋积型稀土矿浸出过程中稀土浸出率低、中重稀土浸出效果差、稀土浸出液中杂质铝含量高以及浸取过程中黏土矿物膨胀率高等系列问题,采用0.20 mol/L硫酸铵为浸取剂,乙酸铵为助浸剂,探究乙酸铵对稀土浸出过程及黏土矿物膨胀性能的协同作用。结果表明:乙酸铵最佳助浸浓度为0.04 mol/L,此时稀土浸出率提高了4.81%,杂质铝的浸出率减小了48.66%,稀土总浓度提高了45.18 μg/g,其中轻稀土浓度减小了27.26 μg/g,中重稀土增加了72.44 μg/g,表明乙酸铵强化了中重稀土的浸出。同时,乙酸铵浓度为0.04 mol/L时黏土矿物膨胀率为2.951%,相对硫酸铵作为单一浸取剂时膨胀率降低了1.298%。随乙酸铵助浸剂浓度的变化,稀土浸出率与Zeta电位变化成正比,黏土矿物膨胀率与Zeta电位变化呈反比,当乙酸铵浓度为0.04 mol/L时,黏土矿物表面Zeta电位为-18.26 mV。对于淋浸尾矿,添加乙酸铵后的尾矿则有较好的防膨性能,膨胀率仅为2.054%。本研究对风化壳淋积型稀土矿的稀土原地高效浸出提供了一定的有益指导。

**关键词**:风化壳淋积型稀土矿;乙酸铵;助浸;浸出率;膨胀
**中图分类号**:TD865 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202404035

# Leaching process of weathered crust elution-deposited rare earth ore assisted by ammonium acetate

*CHEN Wendou*[1], *ZHANG Zhenyue*[1,2], *LONG Fei*[1], *CHI Ru'an*[1,2,3], *CHEN Zhuo*[*1,2]
1. School of Resource and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Key Laboratory for Green Chemical Process of Ministry of Education, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
3. Hubei Three Gorges Laboratory, Yichang 443007, China

**Abstract**: In light of a series of issues such as low leaching efficiency of rare earth, poor leaching effect of medium and heavy rare earth, high impurity aluminum in rare earth leaching solution, and high clay mineral swelling ratio in the current leaching process of weathered crust elution-deposited rare earth ore, we used 0.20 mol/L ammonium sulfate as the leaching agent and ammonium acetate as the assisting leaching agent to explore the synergy of ammonium acetate on the rare earth leaching process and the swelling properties of clay minerals. The results show that the optimal assisted leaching concentration of ammonium acetate is 0.04 mol/L, under which the leaching efficiency of rare earth increases by 4.81%, the leaching efficiency of impurity aluminum decreases by 48.66%, and the total concentration of rare earth increases by 45.18 μg/g. The concentration of light rare earth decreases by 27.26 μg/g, and that of medium and heavy rare earth

**收稿日期**:2024-04-23
**基金项目**:国家自然科学基金(52304293、52222405、92162109、52074195)
**作者简介**:陈文斗,博士研究生。Email: witcwd@163.com
***通信作者**:陈 卓,博士,讲师。Email: 23051105@wit.edu.cn
**引文格式**:陈文斗,张臻悦,龙菲,等. 乙酸铵助浸风化壳淋积型稀土矿过程研究[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(4):417-423.

increases by 72.44 μg/g, indicating that ammonium acetate enhances the leaching of medium and heavy rare earth. Meanwhile, the swelling ratio of clay mineral is 2.951%, and the expansion rate is reduced by 1.298% compared with that of ammonium sulfate as a single leaching agent. With the change of the concentration of ammonium acetate, the leaching efficiency of rare earth is positively proportional to the change of Zeta potential, and the swelling ratio of clay minerals is inversely proportional to the change of Zeta potential. When the concentration of ammonium acetate is 0.04 mol/L, the Zeta potential on the surface of clay minerals is −18.26 mV. For the leached tailings, the leached tailings with ammonium acetate added have better anti-swelling performance, and the swelling ratio is only 2.054%. This study provides some beneficial guidance for the efficient in-situ leaching of rare earth from weathered crust elution-deposited rare earth ores.

**Keywords**: weathered crust elution-deposited rare earth ore; ammonium acetate; assisted leaching; leaching efficiency; swelling

风化壳淋积型稀土矿富含经济价值极高的中重稀土,也是我国关键战略性矿种之一[1-3]。风化壳淋积型稀土矿中稀土主要以水合或羟基水合离子形式吸附于黏土矿物上,这也决定了该矿用常规的选矿方法难以回收。风化壳淋积型稀土矿开采工艺经历了池浸、堆浸和原地浸出三代回收稀土工艺,目前以硫酸铵或氯化铵为浸取剂的原地浸出工艺已普遍应用于风化壳淋积型稀土矿[4-6]。而在风化壳淋积型稀土矿的原地浸出过程中,往往会出现稀土浸出率低,稀土浸出液中杂质含量高,黏土矿物膨胀率大等问题[7],从而造成矿山的经济成本增加,稀土回收困难等。因此,开展对风化壳淋积型稀土矿的高效浸出,以及浸取过程中黏土矿物的防膨研究很有必要。

针对上述问题与不足,Zhang等[8]提出了一种新的风化壳淋积型稀土矿原地浸出工艺。即浸取剂直接注入全风化层,避开腐殖层,只对全风化层和半风化层进行淋浸。该方法可以明显降低稀土浸出液中的杂质铝含量,提高稀土产品的纯度。欧阳克氙等[9]在稀土浸出过程中添加抑铝浸矿剂HZA优化稀土浸出过程,结果表明在浸矿剂中加入质量分数0.05%的抑铝剂HZA,并调节浸矿剂溶液pH为5.5,此时浸出液中铝的含量减少56.85%,而不影响稀土的浸出效果。He等[10]采用氯化铵和硝酸铵的混合物作为浸出剂,从而提高风化壳淋积型稀土矿石中稀土的浸出效率和浸出率。在氯化铵与硝酸铵的摩尔比为1:1,铵离子浓度为0.20 mol/L,液固比为2:1,浸取剂pH在4~8时,稀土的最大浸出率可达91.00%,稀土的浸出平衡时间比铝的浸出平衡时间短25 min,有利于降低铝的浸出。陈卓等[11]研究了风化壳淋积型稀土矿浸取过程中镁盐浸取剂对黏土矿物膨胀性能的影响,发现硝酸镁在室温下表现出最佳的抑制黏土矿物水化膨胀和分散的能力,0.20 mol/L硝酸镁的防膨率为65.00%。

目前的研究主要集中在提高稀土浸取率,降低杂质浸出率和抑制黏土矿物膨胀的单一方面,且对稀土提高浸出率时中重稀土的变化和尾矿膨胀率的研究较少。本文采用硫酸铵作为浸取剂,乙酸铵作为助浸剂,探讨了乙酸铵对风化壳淋积型稀土矿浸出过程中的稀土浸出率、杂质抑制率和黏土矿物膨胀率的协同作用,同时研究了乙酸铵对中重稀土浸出的影响和稀土尾矿的影响,为工业生产中提高稀土浸出率强化中重稀土浸出、减少杂质浸出和保障矿山安全的协同作用提供理论指导和技术支撑。

## 1 实验部分

### 1.1 矿样性质

实验所用矿样选自滇南地区某风化壳淋积型稀土矿,通过X射线荧光光谱法(X-ray fluorescence spectrometer, XRF)分析了该矿样的化学组成,结果如表1所示。

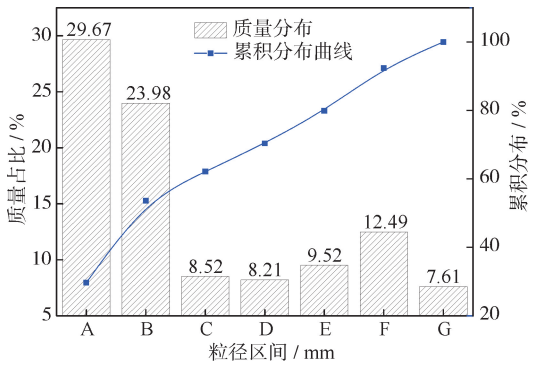
由表1可知,矿石中主要化学成分为$SiO_2$占60.796%,其次是$Al_2O_3$占31.808%,REO占0.112%。这是由于风化壳淋积型稀土矿主要由黏土矿物组

表1 矿样化学组成

Tab. 1 Chemical composition of ore sample %

| 成分 | REO | $Al_2O_3$ | CaO | $SiO_2$ | $MnO_2$ | ZnO | MgO | $P_2O_5$ | $K_2O$ | $SO_3$ | $TiO_2$ | $Fe_2O_3$ | $Rb_2O$ | 烧失量 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 质量分数 | 0.112 | 31.808 | 0.106 | 60.796 | 0.386 | 0.018 | 0.541 | 0.109 | 1.569 | 0.188 | 0.098 | 1.058 | 0.038 | 3.173 |

成，而黏土矿物的主要成分为铝硅酸盐矿物[12-13]。稀土矿样经标准筛进行筛分，得到矿样的各粒级区间的质量分布，结果如图1所示。




注：A为+0.85 mm；B为+0.250~0.850 mm；C为+0.150~0.250 mm；D为+0.106~0.150 mm；E为+0.075~0.106 mm；F为+0.038~0.075 mm；G为−0.038 mm。

**图1　矿样粒径分布**

Fig. 1　Particle size distribution of ore sample

稀土矿粗粒级矿物（+0.25 mm）占比53.65%，该粒级矿石主要为细小的石英砂，稀土含量较少，在细粒级区间（C−G）中粒级F（+0.038~0.075 mm）的质量占比最高为12.49%，因此合理高效地利用细粒级矿物有利于提高稀土回收率。

### 1.2　试剂及仪器

实验所用试剂均为国药分析纯，所有溶液均用去离子水配制而成。

浸出实验采用自制控速淋浸装置（图2），膨胀实验采用PCY型智能黏土膨胀仪（图3），其余主要仪器为X射线荧光光谱仪（CHTN-0657）、电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS）、扫描电镜能谱仪（SEM-EDS）、Zetasizer Nano（英国Malvern仪器公司）等。

### 1.3　方　法

按四分法称取烘干后的矿样250 g于玻璃交换柱中，添加液固比为2∶1的0.20 mol/L硫酸铵与

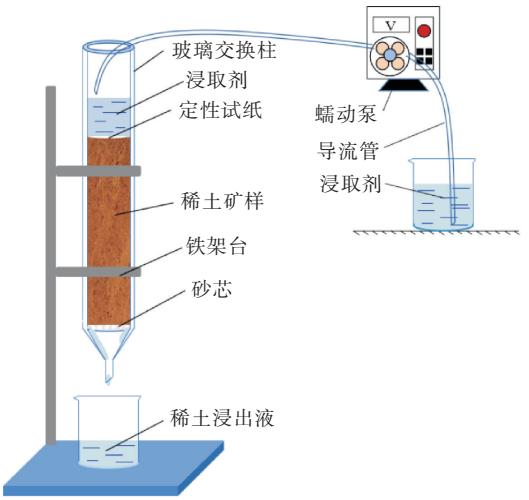



**图2　自制淋浸装置**

Fig. 2　Self-made leaching device

不同浓度乙酸铵混合溶液进行稀土浸出实验，通过ICP-MS检测稀土浸出液稀土和铝离子的浓度。

称取干燥矿样2 g，在压片机下保持8 MPa压力5 min，记录样品压片后长度$H_0$，装入PCY型智能黏土膨胀仪中测定其膨胀率。膨胀率用$\delta$表示，计算公式如下[14-15]：

$$\delta = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100\% \qquad (1)$$

其中$\delta$为膨胀率，$\Delta H$为矿样变化量，$H_0$为矿样原始压片长度。

通过Zetasizer Nano电位仪测定稀土矿在不同电解质溶液中的Zeta电位。

## 2　结果与讨论

### 2.1　乙酸铵浓度对稀土浸出的影响

为了探究乙酸铵浓度对稀土浸出过程的影响，以0.20 mol/L硫酸铵为浸取剂，添加不同浓度乙酸铵作为助浸剂，探究乙酸铵浓度对风化壳淋积型稀土矿稀土和铝浸出效果的影响，结果如图4

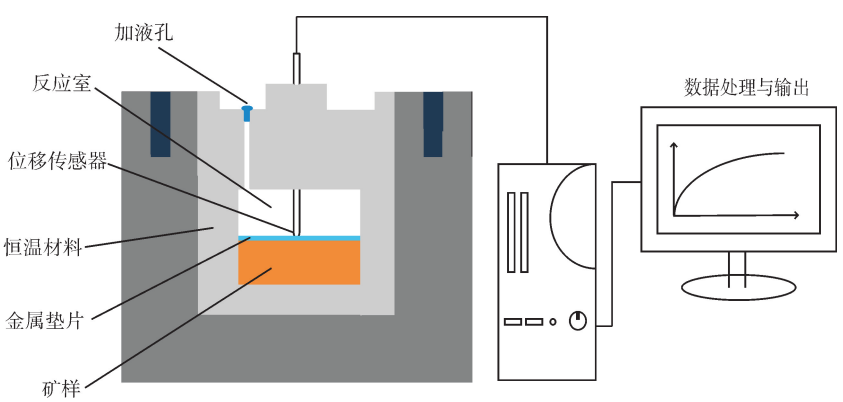



**图3　PCY型智能膨胀仪**

Fig. 3　Schematic diagram of PCY intelligent dilatometer

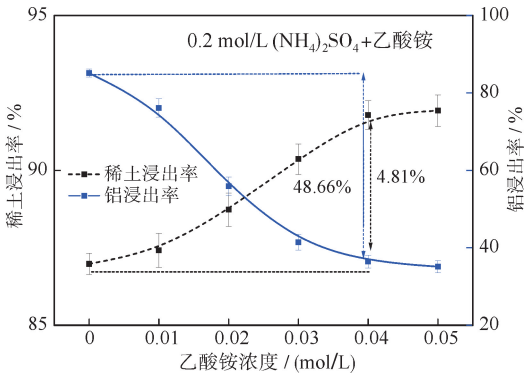


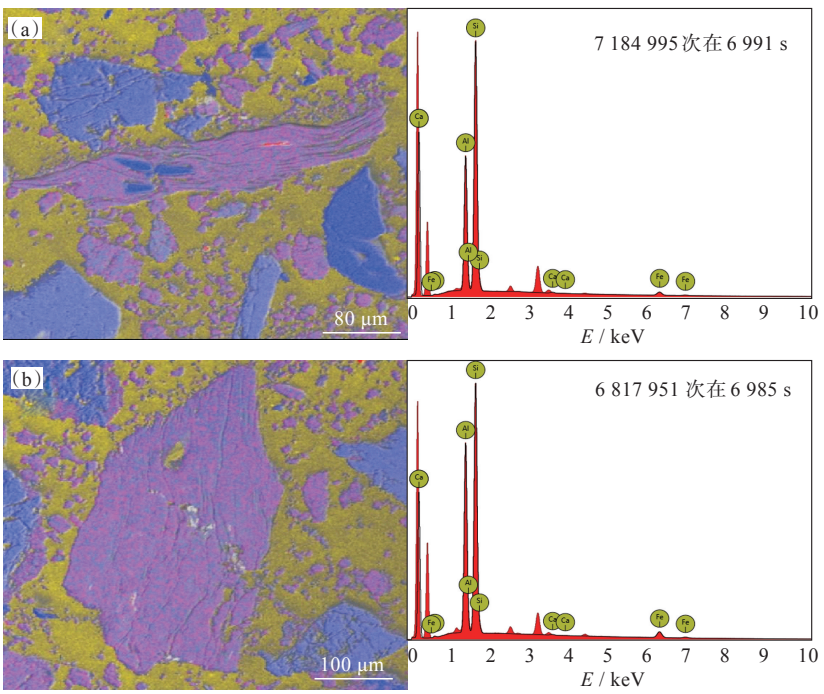

**图4 乙酸铵浓度对稀土矿浸出过程的影响**

Fig. 4 Effects of ammonium acetate concentration on leaching process of rare earth ore

所示。

由图4可知，随着乙酸铵浓度的增加，稀土浸出率逐渐增加，而杂质铝的浸出率明显降低。当乙酸铵浓度达到0.04 mol/L时，反应基本达到平衡，此时稀土浸出率为91.78%，杂质铝浸出率为36.45%，稀土浸出率相对提高了4.81%，杂质铝的浸出率则相对减小了48.66%。表明乙酸铵作为助浸剂在提高稀土浸出率的同时，有明显的抑铝作用。为了验证乙酸铵的抑铝作用，通过扫描电镜能谱仪(SEM-EDS)分别对两种浸取剂淋浸尾矿进行分析，结果如图5所示。通过定性和半定量计算两种矿样中硅、铝相对含量以及硅铝比值$R$，结果如表2所示。

由图5可知，矿样主要由Si、Al、Fe、Ca等元素组成，其中蓝色区域为硅，粉色区域为铝。通过定性和半定量分析可知不同矿样中Si、Al相对含量以及硅铝比。由表2可知，由硫酸铵作为浸取剂的尾矿矿样中铝离子含量明显少于复配浸取剂尾矿矿样，硅铝比$R_A > R_B$，说明添加乙酸铵助浸剂后有




注：(a)中为0.20 mol/L硫酸铵为浸取剂的淋浸尾矿；(b)中为0.20 mol/L硫酸铵与0.04 mol/L乙酸铵复配浸取剂的淋浸尾矿。

**图5 淋浸尾矿扫描电镜能谱**

Fig. 5 The SEM-EDS patterns of leaching tailings

**表2 硅和铝相对含量及硅铝比**

Tab. 2 Relative content of silicon and aluminum and ratio of Silicon to aluminum %

| 矿样 | $w$(Si) | $w$(Al) | $w$(其他) | $R[m(\mathrm{Si})/m(\mathrm{Al})]$ |
|---|---|---|---|---|
| A | 78.26 | 14.38 | 7.36 | 5.44 |
| B | 58.30 | 33.41 | 8.29 | 1.74 |

较好的抑铝作用。

## 2.2 乙酸铵对中重稀土浸出的影响

为了探究添加乙酸铵作为助浸剂时对稀土矿浸出过程中重稀土的影响，对比了有无乙酸铵添加时的稀土配分模式，以及中重稀土含量，其中浸出液中稀土配分通过ICP-MS检测。不同浸取剂下稀土浸出液中稀土配分模式如图6(a)所示，不同浸取剂下轻、中及重稀土含量相对占比如图6(b)所示，不同浸取剂下浸出液中稀土浓度图6(c)所示。

由图6(a)可知，在添加乙酸铵作为助浸剂后，轻稀土元素镧、镨、钕的配分值明显有所减小，而

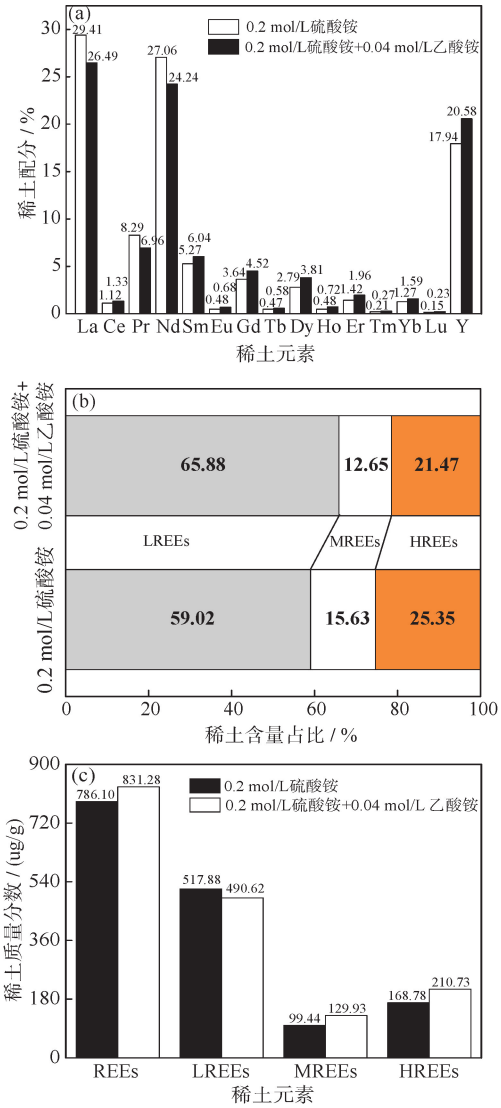



**图6　乙酸铵对中重稀土的影响**

Fig. 6　Effects of ammonium acetate on medium and heavy rare earth elements

重稀土元素钇的配分值明显增加，通过对所有稀土元素的配分值分析，发现乙酸铵提高稀土浸出率主要是通过强化对中重稀土的浸出。由图6(b)可知，添加乙酸铵后，轻稀土含量占比减少6.86%，中稀土含量增加了2.98%，重稀土含量增加了3.88%。稀土浓度如图6(c)所示，添加乙酸铵作为助浸剂后，稀土总浓度提高了45.18 μg/g，其中轻稀土浓度减小了27.26 μg/g，中重稀土增加了72.44 μg/g。说明添加乙酸铵助浸剂有利于中重稀土的浸出。

## 2.3　乙酸铵对风化壳淋积型稀土矿膨胀性能的影响

2.3.1　*乙酸铵浓度对黏土矿物膨胀率的影响*　为了探究乙酸铵浓度对风化壳淋积型稀土矿浸矿过程中黏土矿物膨胀率的影响，分别检测了在纯水、0.20 mol/L硫酸铵溶液以及0.20 mol/L硫酸铵与不同浓度的乙酸铵复配溶液中黏土矿物的膨胀率。结果如图7所示。

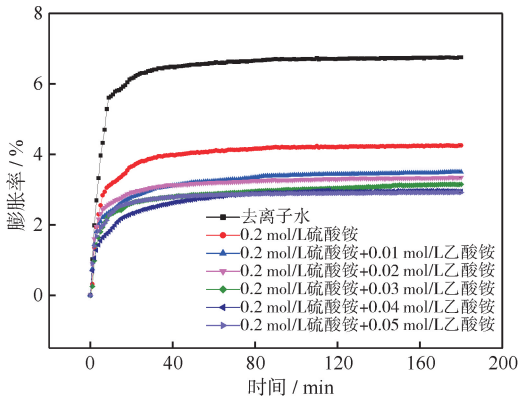



**图7　乙酸铵浓度对黏土矿物膨胀率的影响**

Fig. 7　Effect of ammonium acetate concentration on the swelling ratio of clay minerals

由图7可知，黏土矿物膨胀率随时间增加不断增大，当反应时间达到80 min后，黏土矿物膨胀率基本达到平衡。此时黏土矿物在去离子水中的膨胀率为6.754%，在0.20 mol/L的硫酸铵溶液中黏土矿物的膨胀率为4.249%。添加乙酸铵助浸剂后，随着乙酸铵浓度的增加，黏土矿物膨胀率逐渐减小，在乙酸铵浓度达到0.04 mol/L后继续增加乙酸铵浓度，黏土矿物膨胀率基本不变，此时黏土矿物膨胀率为2.951%。因此，在风化壳淋积型稀土矿浸出过程中，添加助浸剂乙酸铵有利于抑制黏土矿物的膨胀，乙酸铵最佳浓度为0.04 mol/L，黏土矿物膨胀率为2.951%，相对硫酸铵作为单一浸取剂时膨胀率降低了1.298%。

2.3.2　*黏土矿物Zeta电位分析*　为了研究风化壳淋积型稀土矿浸出过程中，稀土浸出率及黏土矿物膨胀率与Zeta电位的关系，分别检测了不同乙酸铵添加剂浓度下黏土矿物的Zeta电位，分析了稀土浸出率与黏土矿物Zeta电位的关系如图8(a)所示，黏土矿物膨胀率与Zeta电位的关系如图8(b)所示。

由图8可知，随着乙酸铵的浓度增高，矿样中黏土矿物表面的Zeta电位绝对值逐渐减小，这是由于电解质阳离子与吸附在黏土矿物表面的稀土离子发生离子交换反应，从而形成更稳定的双电层结构，使得Zeta电位绝对值减小。在乙酸铵助浸剂浓度为0.04 mol/L时，黏土矿物表面Zeta电位为−18.26 mV。稀土浸出率与Zeta电位变化成正比，这是因为随着反应的进行，稀土离子不断地被交换出来。黏土矿物膨胀率与Zeta电位变化呈反

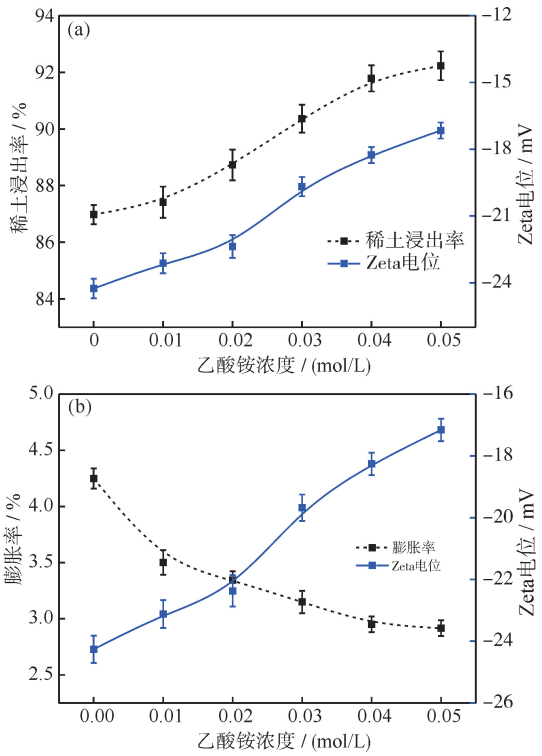



**图8 黏土矿物Zeta电位与稀土浸出率及膨胀率之间的关系**

Fig. 8 Relationship between Zeta potential and rare earth leaching efficiency and swelling ratio

比，这是因为电解质阳离子可扩散进入黏土矿物晶层间，减少表面片状结构间的双电层斥力，降低黏土表面双电层厚度，促进黏土矿物颗粒间絮凝，从而使黏土膨胀受到抑制[16]。

2.3.3 淋浸尾矿膨胀性能分析 为了验证乙酸铵抑制黏土矿物膨胀的性能，分别取0.20 mol/L硫酸铵及0.20 mol/L硫酸铵和0.04 mol/L乙酸铵复配溶液的淋浸尾矿，烘干后探究其遇水后的膨胀性能，模拟矿山原地浸出工艺结束后的尾矿遇雨水时的膨胀性能。分别检测不同浸取剂尾矿遇水时的膨胀率，结果如图9所示。

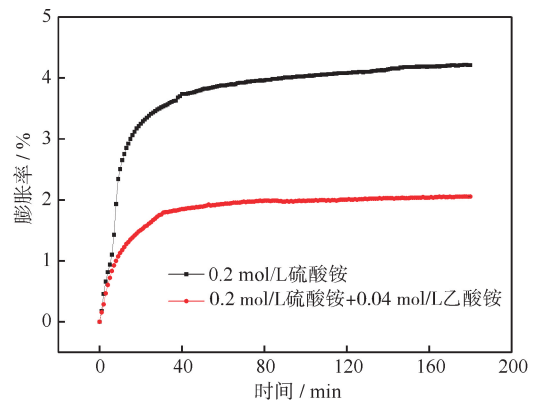



**图9 淋浸尾矿的膨胀性能**

Fig. 9 Swelling property of leaching tailings

由图9可知，淋浸尾矿同样具有一定的吸水膨胀性，随时间的变化，尾矿膨胀率不断增大，当反应时间达到80 min后尾矿膨胀率基本达到平衡，此时经0.20 mol/L硫酸铵浸出后的尾矿二次遇水后的膨胀性能同样偏高，尾矿膨胀率为4.209%。硫酸铵和乙酸铵复配浸取剂淋浸尾矿则有较好的防膨性能，膨胀率仅为2.054%。这是因为乙酸铵能改变黏土矿物晶层间的结构，使得黏土矿物的吸水膨胀性能降低。因此添加乙酸铵作为助浸剂后对矿山的安全生产具有重要意义。

## 3 结 论

本文研究了0.20 mol/L的硫酸铵作为浸取剂，乙酸铵作为助浸剂时的稀土浸出过程与黏土矿物膨胀过程的协同作用，探究了黏土矿物Zeta电位与稀土浸出率以及黏土矿物膨胀率之间的关系，结论如下：

乙酸铵作为助浸剂在提高稀土浸出率的同时，有明显的抑铝作用，乙酸铵的最佳助浸浓度为0.04 mol/L，此时稀土浸出率为91.78%，杂质铝浸出率为36.45%，相较于不添加乙酸铵时稀土浸出率提高了4.81%，杂质铝的浸出率减小了48.66%。添加乙酸铵助浸剂有利于中重稀土的浸出，稀土总浓度提高了45.18 μg/g，其中轻稀土浓度减小了27.26 μg/g，中重稀土增加了72.44 μg/g。添加乙酸铵助浸剂对黏土矿物的膨胀有较好的抑制作用，当乙酸铵浓度为0.04 mol/L时，黏土矿物膨胀率为2.951%，相对硫酸铵作为单一浸取剂时膨胀率降低了1.298%。随着乙酸铵助浸剂浓度的变化，稀土浸出率与Zeta电位变化成正比，黏土矿物膨胀率与Zeta电位变化成反比，当乙酸铵浓度为0.04 mol/L时，黏土矿物表面Zeta电位为−18.26 mV。对于淋浸完成后的尾矿，不同浸取剂尾矿在遇水时的膨胀性能不同，添加乙酸铵助浸剂后的淋浸尾矿防膨性能更好，膨胀率仅为2.054%。

### 参考文献

[1] 张臻悦，何正艳，徐志高，等. 中国稀土矿稀土配分特征[J]. 稀土，2016，37(1)：121−127.

[2] CHEN W D，ZHANG Z Y，LONG F，et al. Rare earth occurrence states of weathered crust elution-deposited rare earth ores in southern Yunnan [J]. Minerals，2023，13：554.

[3] YANG H F，SHA A Y，HE Z Y，et al. Swelling inhibition and infiltration promotion mechanism of polyethyleneimine [J]. Journal of Central South

University，2024，31(2)：317-329.
[4] 池汝安，张臻悦，余军霞，等. 风化壳淋积型稀土矿研究进展[J]. 中国矿业大学学报，2022，51(6)：1178-1192.
[5] 赵龙胜，黄小卫，冯宗玉，等. 风化壳淋积型稀土矿开采过程污染防控技术现状及趋势[J]. 中国稀土学报，2022，40(6)：988-997.
[6] XIAO Y F，CHEN Y Y，FENG Z Y，et al. Leaching characteristics of ion-adsorption type rare earths ore with magnesium sulfate [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China，2015，25(11)：3784-3790.
[7] HE Z Y，ZHANG R，SHA A Y，et al. Anti-swelling mechanism of DMDACC on weathered crust elution-deposited rare earth ore[J]. Journal of Rare Earths，2022，40(11)：1803-1811.
[8] ZHANG Z Y，HE Z Y，YU J X，et al. Novel solution injection technology for in-situ leaching of weathered crust elution-deposited rare earth ores [J]. Hydrometallurgy，2016，164：248-256.
[9] 欧阳克氙，饶国华，姚慧琴，等. 南方稀土矿抑铝浸出研究[J]. 稀有金属与硬质合金，2003(4)：1-3.
[10] HE Z Y，ZHANG Z Y，YU J X，et al. Kinetics of column leaching of rare earth and aluminum from weathered crust elution-deposited rare earth ore with ammonium salt solutions [J]. Hydrometallurgy，2016，163：33-39.
[11] CHEN Z，ZHANG Z Y，LIU D F，et al. Swelling of clay minerals during the leaching process of weathered crust elution-deposited rare earth ores by magnesium salts [J]. Powder Technology，2020，367：889-900.
[12] ZHANG Z Y，HE Z Y，ZHOU F，et al. Swelling of clay minerals in ammonium leaching of weathered crust elution-deposited rare earth ores [J]. Rare Metals，2018，37(1)：72-78.
[13] ZHOU L B，WANG X J，HUANG C G，et al. Development of pore structure characteristics of a weathered crust elution-deposited rare earth ore during leaching with different valence cations [J]. Hydrometallurgy. 2021，201：105579.
[14] 陈文斗，张臻悦，池汝安. 羧酸铵盐浸取剂对风化壳淋积型稀土矿助浸过程研究[J]. 金属矿山，2020(5)：191-196.
[15] 吴明，吕鸿庆，周多多，等. PDDA对稀土原地浸出过程中的抑膨作用机理研究[J]. 金属矿山，2024(1)：226-232.
[16] 王园. 膨胀土的变形性能[J]. 工程勘察，1997(5)：14-18.

本文编辑：张　瑞

☆

(上接第416页)

[12] 金守峰，侯一泽，焦航，等. 基于改进AlexNet模型的抓毛织物质量检测方法[J]. 纺织学报，2022，43(6)：133-139.
[13] 井奚月，乔婕，么秀华，等. ZFNet模型在胶质瘤MRI诊断中的应用[J]. 中国现代神经疾病杂志，2021，21(3)：156-161.
[14] 孟森，黄海松，朱云伟，等. 基于U~2-Net和VGG16的天然气泄露检测[J]. 激光与红外，2023，53(3)：386-393.
[15] 王溢琴，董云云，刘慧玲. 基于GoogLeNet和空间谱变换的高光谱图像超分辨率方法[J]. 光学技术，2022，48(1)：93-101.
[16] 蔡嘉辉，王琨，董康，等. 基于DenseNet和随机森林的电力用户窃电检测[J]. 计算机应用，2021，41(增刊1)：75-80.
[17] 吴永清，唐娜，黄璐瑶，等. 可见近红外光谱结合多元统计分析的面粉吸水率检测模型构建[J]. 光谱学与光谱分析，2023，43(9)：2825-2831.
[18] 谭正林，张芸，刘军. 一种近红外光谱优化方法、装置、系统以及存储介质：CN202310688655.1 [P]. 2024-01-05.
[19] ROY A G，NAVAB N，WACHINGER C. Concurrent spatial and channel ‘squeeze & excitation’ in fully convolutional networks [C]//Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention-MICCAI 2018：21st International Conference，September 16-20，2018，Proceedings，Part I. Granada，Spain：Springer International Publishing，2018：421-429.
[20] 黄海霞，李耀翔，张哲宇. 基于ResNet的森林土壤碳含量近红外预测模型[J]. 森林工程，2023，39(6)：164-171.

本文编辑：张　瑞