

# 细菌快速氧化新疆地浸采铀吸附尾液中 $\text{Fe}^{2+}$ 现场扩大试验研究

魏小辉<sup>1</sup>, 王清良<sup>1\*</sup>, 雷治武<sup>1</sup>, 胡鄂明<sup>1</sup>, 王红强<sup>1</sup>, 赵建飞<sup>1</sup>, 李德<sup>2</sup>, 李鹏<sup>2</sup>, 于长贵<sup>2</sup>, 徐益群<sup>2</sup>

1. 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001;  
2. 新疆中核天山铀业有限公司, 新疆 伊宁 835000

中图分类号: TF18 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2020)04-0009-08  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.04.002

**摘要** 为了节省酸法浸铀过程中氧化剂用量,以多孔耐酸陶粒作载体固定耐冷嗜酸硫杆菌,在新疆某酸法地浸采铀矿山构建了高7.0 m、内径2.0 m、总容积17.8 m<sup>3</sup>的新型高效生物反应器,进行快速氧化地浸采铀吸附尾液中  $\text{Fe}^{2+}$  扩大试验研究。研究表明,在现场温度为5~24℃、吸附尾液中  $\text{Fe}^{2+}$  浓度为200~300 mg/L、通气量为59.0 m<sup>3</sup>/h时,生物反应器的最大流量可达28.2 m<sup>3</sup>/h, Eh(氧化还原电位)大于570 mV,尾液中  $\text{Fe}^{2+}$  在低温环境下可被快速完全氧化。该试验结果为细菌代替氧化剂氧化吸附尾液中  $\text{Fe}^{2+}$  的拓展应用提供了借鉴意义。

**关键词** 地浸采铀;生物反应器;耐冷嗜酸硫杆菌;亚铁氧化

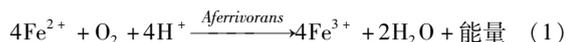
## 前言

$\text{Fe}^{3+}$  是一种天然的氧化剂,能将  $\text{U}^{4+}$  氧化成  $\text{U}^{6+}$ 。提高  $\text{Fe}^{3+}$  在溶浸液中的浓度,可加快酸法地浸采铀中铀的浸出速率。为了充分利用地浸采铀吸附尾液中的  $\text{Fe}^{2+}$ ,地浸采铀矿山中常以工业双氧水作为氧化剂氧化  $\text{Fe}^{2+}$ ,但双氧水有易分解、效率低、价格昂贵等缺点。

微生物浸出与传统的浸铀工艺相比,具有更高浸出效率、减少氧化剂消耗、减轻环境污染等优点<sup>[1]</sup>。随着对微生物浸出技术的研究不断深入,它不仅在矿物加工领域内得到了有效推广,在水污染防治<sup>[2]</sup>、电子废物中金属的回收<sup>[3]</sup>等方面也得到广泛应用。在浸矿过程中,中温菌(28~45℃)是最常用的浸矿微生物,此外还有中等嗜热菌(45~55℃)和极端嗜热菌(60~85℃)。而中温菌<sup>[4]</sup>中最常见的主要有嗜酸性氧化亚铁硫杆菌(*Acidithiobacillus. ferrooxidans* 简称 *A. f.*)、嗜酸性氧化硫硫杆菌(*Acidithiobacillus. thiooxidans* 简称 *A. t.*)及氧化亚铁微螺菌(*Leptospicillus. ferroxidans* 简称 *L. f.*)三种。以上三种中温菌很难在较低温度下生长繁殖,考虑到我国新疆地区全年平均气温在4~13

℃,因此需要找到一种能够适应新疆当地的低温环境,且能有效氧化地浸采铀吸附尾液中  $\text{Fe}^{2+}$  的细菌。

耐冷嗜酸硫杆菌(*Acidithiobacillus. ferrivorans* 简称 *A. ferrivorans*),好氧,革兰氏阴性菌,硫杆菌属,是一种耐受性强、化能无机自养型微生物。Hallberg KB等<sup>[5]</sup>在研究从金属矿山中分离的四种细菌时,首次将其中一种嗜酸菌命名 *A. ferrivorans*。Sergio等<sup>[6]</sup>在矿井排水中获得的富集培养物中发现了氧化  $\text{Fe}^{2+}$  和硫化物的细菌,以 *A. ferrivorans* 和 *L. f.* 为主,该菌株能以亚铁、硫、硫代硫酸盐、四硫黄铁矿为能源生长。陈鹏等<sup>[7]</sup>对 *A. ferrivorans* 的生长特性作了深入研究,结果表明, *A. ferrivorans* 能在5~25℃条件下氧化生长,且氧化  $\text{Fe}^{2+}$  的速率高于 *A. f.* *A. ferrivorans* 以氧化亚铁离子或还原态硫化物获得能量,作为电子传递链上的各种细胞色素都具有特定的氧化还原电位,随着  $\text{Fe}^{3+}$  增加培养液中的氧化性随之增强。*A. ferrivorans* 以氧化  $\text{Fe}^{2+}$  成  $\text{Fe}^{3+}$  作为主要代谢途径,而  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  的外在表征为 Eh 的大小,即细菌氧化尾液中  $\text{Fe}^{2+}$  的速率与尾液的 Eh 存在正相关性<sup>[8]</sup>。细菌代谢亚铁的反应式<sup>[9]</sup>为:



收稿日期:2020-03-25

基金项目:“快速氧化  $\text{Fe}^{2+}$  的移动床生物反应器及快速氧化  $\text{Fe}^{2+}$  的方法”专利转化现场扩大试验研究(2018KH45)

作者简介:魏小辉(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向:微生物冶金。Email:1226411956@qq.com;

通信作者:王清良(1969-),男,教授,博士,主要从事地浸采铀研究。Email:670566869@qq.com。

此外,陈鹏<sup>[10]</sup>还研究了 *A. ferriivorans* 的生长特性,当尾液 Eh 数值达到 550 mV 及以上,所测得  $\text{Fe}^{2+}$  基本已氧化完全。因此,Eh 超过 550 mV 可以作为  $\text{Fe}^{2+}$  氧化完全的分界线。王清良等<sup>[11]</sup> 在新疆某酸法地浸矿山水冶车间内搭建小型生物反应器,利用 *A. ferriivorans* 连续氧化吸附尾液中的  $\text{Fe}^{2+}$ ,其生物反应器能够长期运行,氧化效果显著,且相较于双氧水作氧化剂,能节约成本约 72.63%。基于此,本试验在新疆某酸法地浸矿山水冶车间设计建造新型高效生物反应器,辅加陶粒作为生物载体,接种耐冷嗜酸硫杆菌作为氧化剂并固定培养。通入地浸采铀吸附尾液进行试验研究,通过探讨细菌在氧化  $\text{Fe}^{2+}$  过程中的 pH、Eh、DO 值(溶解氧浓度)等变化,为细菌代替双氧水作氧化剂的拓展应用提供数据基础。

表 1 吸附尾液成分

Table 1 Components of adsorption tail solution

Component	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{Fe}^{2+}$	$\Sigma \text{Fe}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$	U
Content/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	8 450	1.85	250	323	525	635	520	82	28.6	456	<0.5

股份有限公司;高分辨冷场发射扫描电镜(SU8010),日本日立公司;超高分辨率热场发射扫描电镜(QUANTA400FEG),美国 FEI。

## 1.2 高效生物反应器的设计与建造

高效生物反应器为自行设计建造,如图 1 所示。生物反应器材质为不锈钢,高 7.0 m,内径 2.0 m,总容积 17.8  $\text{m}^3$ 。向其中加入强耐酸性、直径为 3~5 mm 的陶粒作为生物载体,有效装填容积为 9  $\text{m}^3$ ,细菌有效反应体积为 10  $\text{m}^3$ 。现有带填料的生物反应器<sup>[12]</sup> 主要分为悬浮式生物填料反应器和固定式生物填料反应器,主要被广泛应用于污水处理方面,在地浸采铀方面应用较少。以往的固定式生物填料反应器缺点在于生物反应器运行长时间以后,内部会积累结垢物质,形成膜污染<sup>[13]</sup>,且生物填料一般都具有使用寿命,长时间使用难更换。新型高效生物反应器经过改进,较以往生物反应器更具灵活性和可操作性:生物反应器底部具有出口阀,载体可灵活装卸,便于清洗;生物反应器塔体可移动,可随工业需求运往不同场地。高效生物反应器采用下部进液,上部出液的运行模式,配液池中的吸附尾液由潜水泵经进液管路泵到反应器内部,再由布液装置向四周均匀布液,吸附尾液流经附有细菌的陶粒载体,细菌充分氧化吸附尾液中的  $\text{Fe}^{2+}$  后从生物反应器顶部溢流管流出;通气方式与进液方式基本相似,也采用下部进气,上部出气,螺旋杆式空气压缩机提供压缩空气,经由生物反应器底部布气装置均匀布气,作为细菌的氧气来源。在生物反应器的 3 个不同

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试剂与仪器

*A. ferriivorans*,新疆某酸法地浸矿山水冶车间内小型生物反应器<sup>[11]</sup>;  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;吸附尾液,新疆中核天山铀业有限公司某厂水冶车间,成分如表 1 所示;生物陶粒,荣阳绿锦活性炭有限公司;pH 计(pHS-3B),上海仪电科学仪器股份有限公司;螺旋杆式空气压缩机,上海优耐特斯压缩机有限公司;气体流量计,杭州逸控科技有限公司;恒流泵(BT00-300T),保定兰格恒流泵有限公司;液体流量计,新疆中核天山铀业有限公司;便携式溶解氧测定仪(JPB-607A型),上海仪电科学仪器

高度位设有取样点,同时每个高度位同一水平不同位置处设置 3 个取样口,共 9 个取样口,用以取样测量。“4、5、6”分别表示反应器上部水平线、中部水平线、下部水平线高度位置;“a、b、c”分别表示反应器同水平不同位置,“a”为罐内边缘位置,“b”为罐内中间位置,“c”为罐内中心位置,组合对应 9 个不同的取样口。

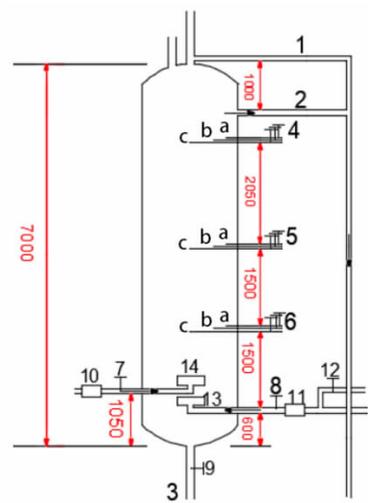


图 1 高效生物反应器结构简图

1、2 - 溢流管;3 - 排液管;4、5、6 - 取样口;7、8、9 - 不锈钢球阀;10 - 气体流量计;11 - 液体流量计;12 - 排液管;13 - 布液装置;14 - 布气装置

Fig. 1 Structure diagram of the high efficiency bioreactor  
1, 2 - Overflow pipe; 3 - Drain pipe; 4, 5, 6 - Sampling port; 7, 8, 9 - Stainless steel ball valve; 10 - Gas flowmeter; 11 - Liquid flowmeter; 12 - Drain pipe; 13 - Liquid distribution device; 14 - Air distribution device

### 1.3 耐冷嗜酸亚铁硫杆菌氧化吸附尾液工艺流程

在室外现场地表新建立的高效生物反应器,需要在生物反应器内部加入陶粒,以作为细菌的氧化载体。新加入的陶粒上并没有细菌的附着,从室内的小型生物反应器内移植部分有细菌附着的活性陶粒作为菌源。小型生物反应器<sup>[11]</sup>长期运行,氧化作用显著、稳定,其内部陶粒上附着的菌体,具有良好的活性。现场吸附尾液在配液池加酸调节 pH 后,进入高效生物反应器内,尾液中的 $\text{Fe}^{2+}$ 被载体上的 *A. ferrivorans* 氧化为 $\text{Fe}^{3+}$ 。培养好的菌液作为溶浸液注入铀矿层与矿石作用,从抽出孔抽出的浸出液经吸附后成为吸附尾液,再次进入配液池加酸如此反复循环,流程如图 2 所示。

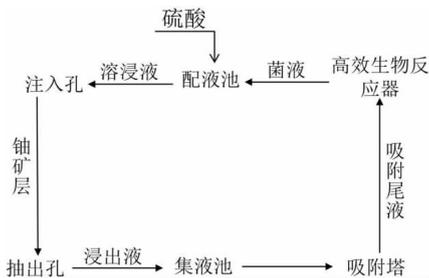


图 2 *A. ferrivorans* 氧化吸附尾液的工艺流程

Fig. 2 The technological process of *A. ferrivorans* as oxidant

### 1.4 细菌扩大培养

当电位超过 500 mV 时,从生物反应器顶部加入 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,每次加入量为 10 kg,继续通气培养,反复 3 次;重复前面步骤,从上部取样口取样分析生物反应器中菌液电位;当电位超过 500 mV 时,再次从生物反应器顶部加入绿矾,每次加入量为 15 kg,继续通气培养如此反复进行 5 次,细菌扩大培养完成。

### 1.5 细菌流动氧化

试验条件为尾液温度 5 ~ 24 °C,在通气量 59.0  $\text{m}^3/\text{h}$  保持不变的情况下,逐步增大通液流量,同时从生物反应器 9 个取样口取样,测量取样口流出液的 pH、Eh、DO,通过横向及纵向分析,研究其变化规律。取样时间点为每天 8:00 及 20:00;调节通液流量时间点为每天 8:30 及 20:30,连续操作。尾液流量调节幅度根据所测量尾液 Eh 大小相应调整,若 Eh > 570 mV,则可以继续稳步加大流量;若 Eh < 570 mV,则需停止增大流量,待 Eh 数值上升到 570 mV 以上,方可继续增加尾液流量。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 生物陶粒表面 SEM 及 EDS 分析

图 3 为不同运行时期下陶粒表面的 SEM 及 EDS 图,通过对比图 3 中(a)、(b)、(c)会发现,陶粒表面出现了不同程度的被侵蚀的痕迹。其中图 3(a)为未投入生物反应器的原始陶粒表面的 SEM 图,其表面较为光滑平坦;图 3(b)、(c)分别为生物反应器运行 3 个月和运行 6 个月下陶粒表面的 SEM 图,其表面表现出凹凸不平的沟壑状,且随着氧化时间的增加,沟壑程度愈加明显。陶粒表面凹痕增多,使其与细菌接触的比表面积增大,更多细菌能够镶嵌于凹缝中,为细菌的附着提供场所,利于陶粒表面的生物膜<sup>[14]</sup>形成和固定。同时,观察图 3(b)、(c)发现,其表面布满了长条状的晶体物质,这种物质在原始陶粒上是没有出现的,通过 EDS 分析并结合吸附尾液成分表,推测该物质为硫酸钙晶体。 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  两种离子在陶粒表面积累到一定的浓度,就会生成硫酸钙晶体,这是一种结晶垢<sup>[15]</sup>,随着高效生物反应器的运行和时间的积累,晶体体积会不断变大从而阻碍了陶粒表面生物膜的生成,不利于细菌在陶粒表面的黏附和聚集。

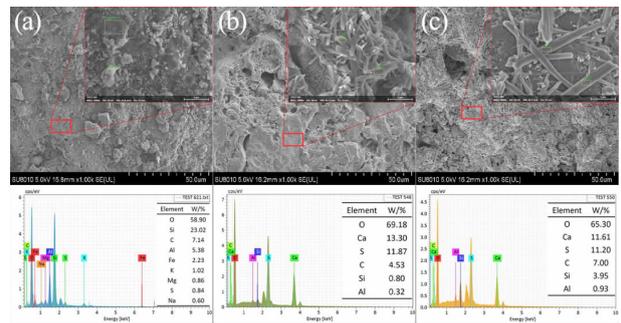


图 3 不同运行时期下陶粒表面的 SEM 及 EDS 结果:(a) 原始陶粒表面;(b) 3 个月后的陶粒表面;(c) 6 个月后的陶粒表面

Fig. 3 SEM and EDS results of ceramsites surface in different operation periods;(a) Original ceramsites surface;(b) Ceramsites surface after 3 months;(c) Ceramsites surface after 6 months

### 2.2 生物反应器细菌氧化流动尾液 Eh 变化

*A. ferrivorans* 经过扩大培养,生物陶粒得到充分挂膜,保持通气量 59.0  $\text{m}^3/\text{h}$  不变的条件下,开始逐步增大尾液流量,进行生物反应器内的流动氧化。原始尾液的 Eh 为 420 mV,经过细菌氧化,Eh 逐渐升高,出口 Eh 达 570 mV 以上,生物反应器连续 14.5 d 内尾液流量调节情况如图 4 所示。

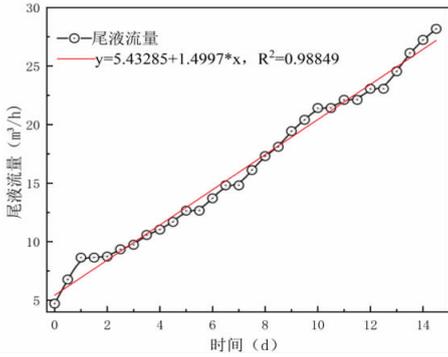


图4 生物反应器内尾液流量调节情况  
Fig. 4 Regulation of tail liquor flow in bioreactor

由图4可以看出,尾液流量基本呈线性增长,初始流量为4.7 m<sup>3</sup>/h,经过14.5 d连续调节后,高效生物反应器最大流量达到28.2 m<sup>3</sup>/h。尾液流量在增大过程中,几乎没有停滞阶段,反映出了生物反应器强大的氧化能力。

生物反应器内同水平方向不同取样口 Eh 随时间变化如图5所示。观察图5可知,尾液流经在6水平方向时,Eh(c点) > Eh(b点) > Eh(a点)(图5(c));尾液流动到5水平方向时,Eh(c点)依旧最高,而 Eh(b点)和 Eh(a点)此时已经基本相同(图5(b));尾液继续流动到4水平方向时,同水平线三个点 Eh 数值

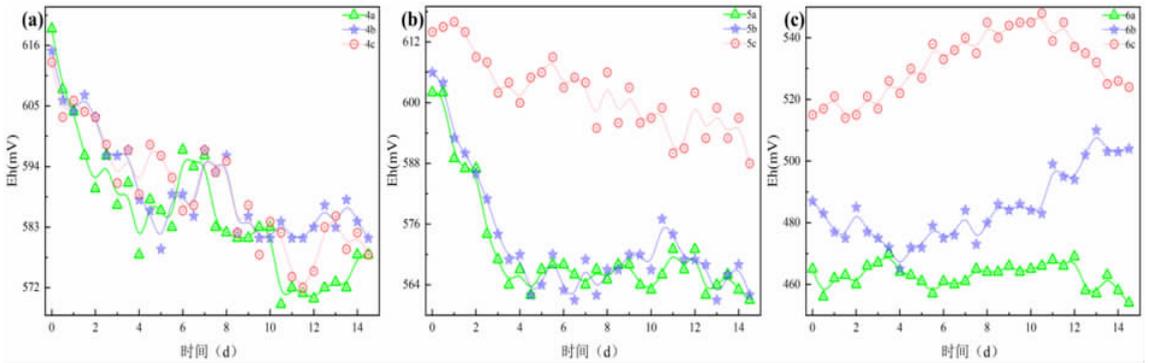


图5 生物反应器内同水平方向不同取样口 Eh 随时间变化:(a)塔内4水平方向横向对比;(b)塔内5水平方向横向对比;(c)塔内6水平方向横向对比  
Fig. 5 Eh of different sampling ports in the same horizontal direction in the bioreactor with time: (a) horizontal comparison of 4 horizontal lines in the tower; (b) horizontal comparison of 5 horizontal lines in the tower; (c) horizontal comparison of 6 horizontal lines in the tower

差别基本不大(图5(a))。猜测可能是由于不同水平方向尾液流速有所不同,氧化停留时间不同而导致每一水平不同取样口 Eh 都有所差别。6水平方向尾液

流速最大,横向三个点 Eh 差别也最大,随着由下而上尾液流速逐渐降低,同水平方向上三个点 Eh 差别也逐渐减小,到4水平方向,三个点的 Eh 已经基本相同。

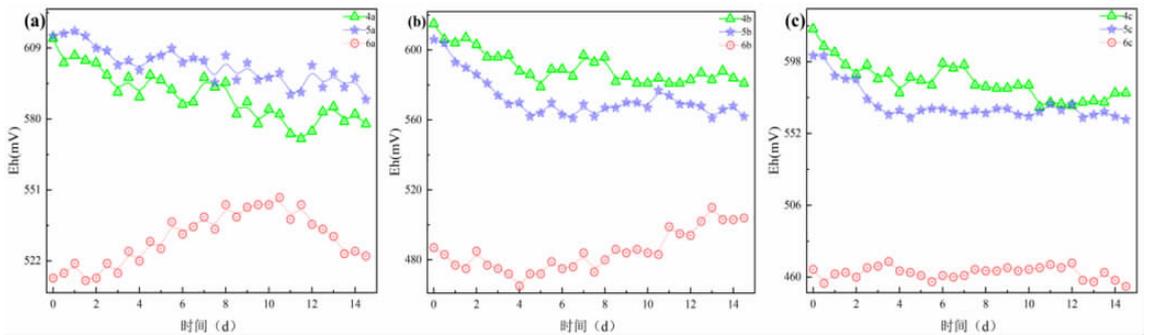


图6 生物反应器内同垂直方向不同取样口 Eh 随时间变化:(a)塔内a点纵向对比;(b)塔内b点纵向对比;(c)塔内c点纵向对比  
Fig. 6 Eh of different sampling ports in the same vertical direction in the bioreactor with time: (a) longitudinal comparison of point a in the tower; (b) longitudinal comparison of point b in the tower; (c) longitudinal comparison of point c in the tower

生物反应器内同垂直方向不同取样口 Eh 随时间 变化如图6所示。观察图6(a)、(b)、(c)可知,随着尾

液流量的不断增加,高效生物反应器内 5 水平方向和 4 水平方向尾液的 Eh 呈现下降趋势,在此期间,4 水平方向最高 Eh 为 619 mV,最低 Eh 为 571 mV,表明流出尾液中的  $Fe^{2+}$  已经基本氧化完全。同时,对比图 6 (b)、(c)和图 6(a)会发现,在生物反应器内 b 点和 c 点的垂线上,随着尾液的流动方向(由下到上),Eh 会因为尾液中的  $Fe^{2+}$  的氧化而不断上升;而在生物反应器内的 a 点垂线上,5 水平方向尾液 Eh 反而高于 4 水平方向。猜测可能是由于气相和液相从高效生物反应

器底部并流,经过陶粒层时,产生了返混现象<sup>[16,17]</sup>,使得尾液在塔内的流动情况及停留时间发生了改变,从而破坏了正常流动方向尾液的氧化情况,最终导致塔内 a 点同垂线上 5 水方向尾液 Eh 反而高于 4 水平方向。

### 2.3 生物反应器细菌氧化流动尾液 pH 变化

原始尾液 pH 为 1.10 左右,细菌在氧化过程中,pH 变化也反映其相关的氧化情况。

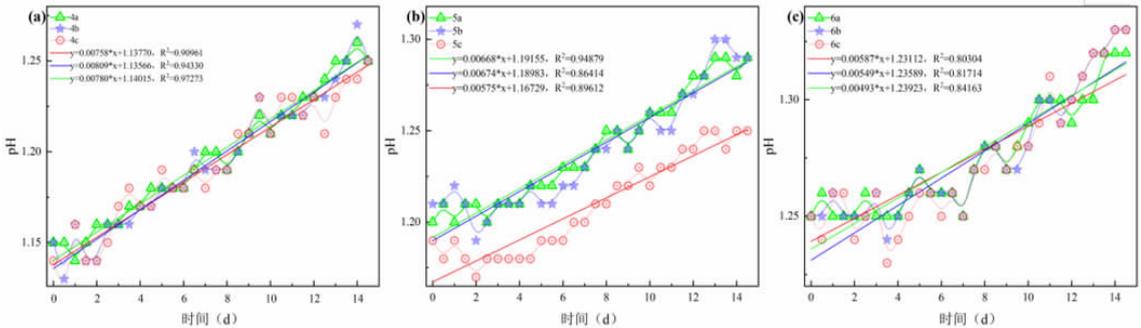


图 7 生物反应器内同水平方向不同取样口 pH 随时间变化:(a)塔内 4 水平方向横向对比;(b)塔内 5 水平方向横向对比;(c)塔内 6 水平方向横向对比

Fig. 7 pH of different sampling ports in the same horizontal direction in the bioreactor with time: (a) horizontal comparison of 4 horizontal lines in the tower; (b) horizontal comparison of 5 horizontal lines in the tower; (c) horizontal comparison of 6 horizontal lines in the tower

图 7 为生物反应器内同水平方向不同取样口 pH 随时间变化图。观察图 7 会发现 4 水平方向及 6 水平方向同一水平方向不同位置尾液 pH 基本没有差别,而 5 水平方向的情况为 pH (a) 与 pH (b) 相差不大,pH

(c) 最小,参照对比图 5 (b) 及其分析,结果与分析相符合。同时观察图 7、图 8,对 pH 曲线作线性拟合,大部分拟合线的  $R_2$  的取值都非常高,表明了 pH 在塔内呈现线性分布的变化规律。

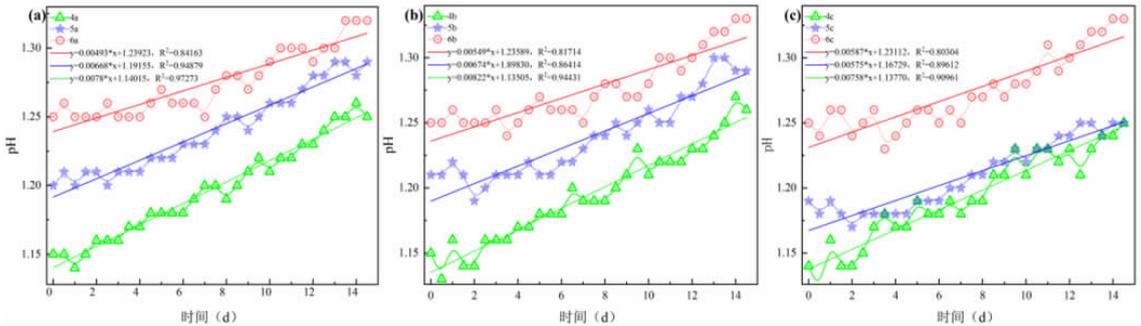


图 8 生物反应器内同垂直方向不同取样口 pH 随时间变化:(a)塔内 a 点纵向对比;(b)塔内 b 点纵向对比;(c)塔内 c 点纵向对比

Fig. 8 pH of different sampling ports in the same vertical direction in the bioreactor with time: (a) longitudinal comparison of point a in the tower; (b) longitudinal comparison of point b in the tower; (c) longitudinal comparison of point c in the tower

生物反应器内同垂直方向不同取样口 pH 随时间变化如图 8 所示。从图 8 中可以很明显看出,生物反应器内尾液流动状态下,4、5、6 三个水平方向的 pH 值

有明显的分层现象,大小顺序分别为 pH(6 水平方向) > pH(5 水平方向) > pH(4 水平方向)。4、5、6 水平方向的 pH 值随着尾液流动方向逐步下降,pH 下降总体

变化值为 0.2 左右,最低 pH 值也在 1.0 以上,属于细菌的耐酸范围之内。pH 下降主要是因为尾液中的  $Fe^{2+}$  被 *A. ferrivorans* 快速氧化,  $Fe^{3+}$  所占比例增多,  $Fe^{3+}$  水解同时使尾液中  $H^+$  增多<sup>[18]</sup>。同时结合图 6 中相同测量位置的尾液 Eh 可知, Eh 越大,其相对应尾液的 pH 越小。高效生物反应器内的氧化能力是相对固定的,随着尾液流量的不断增大,塔内尾液中  $Fe^{2+}$  被氧化的程度和细菌氧化的程度是逐渐降低的,因此 pH

线整体呈现上升趋势, Eh 线整体呈现下降趋势。

### 2.4 生物反应器细菌氧化流动尾液 DO 变化

*A. ferrivorans* 为好氧菌,在不同 DO 浓度条件下,细菌的活性也有所差别。经过长期监测,原始尾液的 DO 值平均约为 3.2 mg/L。通过比较相同位置不同 DO 大小下 Eh 的变化,从而推测细菌的活性状态。

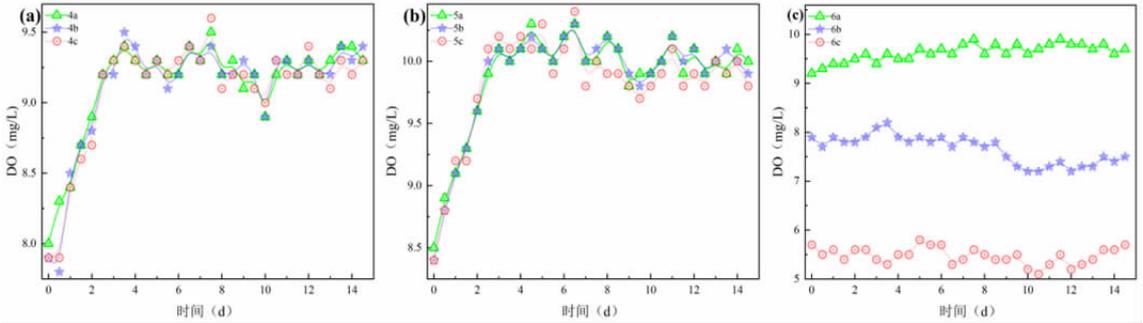


图 9 生物反应器内同水平方向不同取样口 DO 随时间变化:(a)塔内 4 水平方向横向对比;(b)塔内 5 水平方向横向对比;(c)塔内 6 水平方向横向对比

Fig. 9 DO of different sampling ports in the same horizontal direction in the bioreactor with time: (a) horizontal comparison of 4 horizontal lines in the tower; (b) horizontal comparison of 5 horizontal lines in the tower; (c) horizontal comparison of 6 horizontal lines in the tower

图 9 为生物反应器内同水平方向不同取样口 pH 随时间变化图。从图 9 中反映,4 水平方向和 5 水平方向的尾液在塔内同一水平不同取样口 DO 值基本相同;而 6 水平方向表现出明显的分层,即  $DO(a \text{ 点}) > DO(b \text{ 点}) > DO(c \text{ 点})$ ,猜测是因为压缩空气进入塔内时,在塔底产生了气体回流现象<sup>[19]</sup>。布气装置出口处,空气从此处进入塔内,出口处覆盖的陶粒形成了挡

板的作用,使得中间气流过大,边缘气流相对较小,从而造成空气在 6 水平方向的停留时间有所差别,即 a 点空气停留时间更长,氧气融入的更多,表现出 6 水平方向 DO 明显的分层现象。同时,对比图 5(c)和图 9(c),发现 DO 越小,其相应位置的 Eh 反而越大,表明在 6 水平方向上,最适 DO 在 5.5 mg/L 左右时,细菌活性状态最佳。

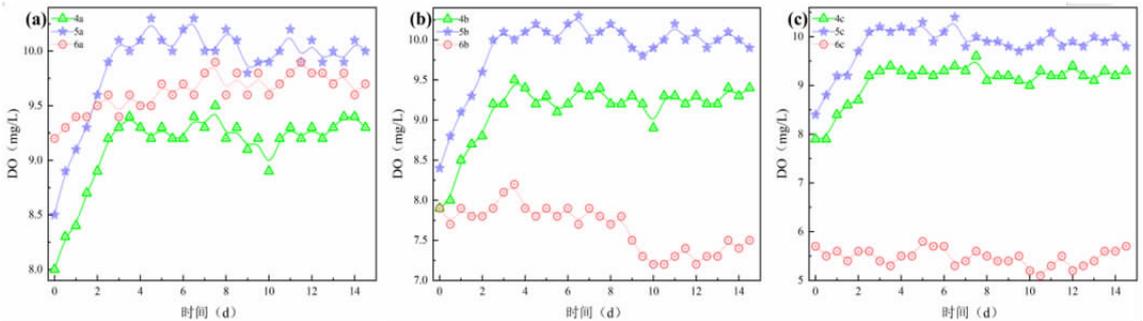


图 10 生物反应器内同垂直方向不同取样口 DO 随时间变化:(a)塔内 a 点纵向对比;(b)塔内 b 点纵向对比;(c)塔内 c 点纵向对比

Fig. 10 DO of different sampling ports in the same vertical direction in the bioreactor with time: (a) longitudinal comparison of point a in the tower; (b) longitudinal comparison of point b in the tower; (c) longitudinal comparison of point c in the tower

生物反应器内同垂直方向不同取样口 DO 随时间 变化如图 10 所示。观察图 10(a)、(b)、(c)发现,DO

变化曲线分为2个阶段:0~2.5 d内为启动阶段,尾液流量低于  $9.3 \text{ m}^3/\text{h}$ ,流量较小,DO随着高效生物反应器运行时间的增长而迅速上升,同样可能是由于a点垂直线方向返混现象较为明显,图10(a)中4、5、6水平方向的DO大小表现异常,分布不均;2.5~14.5 d为稳定阶段,塔内a点垂线方向表现为  $\text{DO}(5 \text{ 水平方向}) > \text{DO}(6 \text{ 水平方向}) > \text{DO}(4 \text{ 水平方向})$ (图10(a)),塔内b点及c点垂线方向表现为  $\text{DO}(5 \text{ 水平方向}) > \text{DO}(4 \text{ 水平方向}) > \text{DO}(6 \text{ 水平方向})$ (图10(b)、(c))。尾液从底部进入生物反应器,与布气装置所提供的压缩空气充分接触,氧气迅速融入,而随着尾液在生物反应器由下而上的流动,细菌氧化  $\text{Fe}^{2+}$  过程中迅速消耗大量的融入氧气,流量稍显过大,压缩空气与进入尾液在6水平方向不能充分接触融入,在空气上升到5水平方向时,彻底融入,使得  $\text{DO}(5 \text{ 水平方向})$  高于  $\text{DO}(6 \text{ 水平方向})$ ,同时,随着尾液从5水平方向到4水平方向的继续流动,这一段的细菌氧化也最为活跃,氧气消耗也最快,使得  $\text{DO}(5 \text{ 水平方向})$  高于  $\text{DO}(4 \text{ 水平方向})$ 。

### 3 结论

(1)温度范围在  $5 \sim 24 \text{ }^\circ\text{C}$  之间,通气量为  $59.0 \text{ m}^3/\text{h}$  时,生物反应器试验最大流量可达  $28.2 \text{ m}^3/\text{h}$ ,出口尾液 Eh 稳定在  $570 \sim 600 \text{ mV}$ ,尾液中的  $\text{Fe}^{2+}$  可被完全氧化。

(2)生物反应器内细菌氧化流动尾液状态下,塔内同水平方向:在塔内底部入口处,随着塔内中心位置向边缘位置移动,DO会逐渐增大,细菌氧化速率会逐渐降低,  $\text{DO} = 5.5 \text{ mg/L}$  时,细菌活性最佳;随着尾液从塔体底部到上部的流动,同水平方向上尾液各基本数值会趋于相同。

(3)生物反应器内细菌氧化流动尾液状态下,塔内同垂直方向:随着压缩空气的通入,DO在塔体中部表现出最大值;在塔内边缘位置,塔体中部细菌的氧化速率最快;在塔内中心及中间位置,随着尾液从塔体底部到上部的流动,尾液中  $\text{Fe}^{2+}$  含量逐渐降低,细菌氧化速率逐渐加快。

(4)初步试验结果表明:现场试验通气量和尾液流量对细菌氧化  $\text{Fe}^{2+}$  影响很大,由于试验期间流量计和溶液泵的量程限制,生物反应器氧化尾液流量尚未到达最大,试验期间仅达到  $28.2 \text{ m}^3/\text{h}$ ;若相关条件改善,生物反应器的最大氧化尾液流量有望继续提升。

### 参考文献:

- [1] 王芷晴,周秀艳,李雪洁,等.生物浸矿领域中功能微生物的研究进展[J].金属矿山,2019(11):125-131.
- [2] SHI CHAOHONG, ZHU NENGWU, SHANG RU, et al. Simultaneous heavy metals removal and municipal sewage sludge dewaterability improvement in bioleaching processes by various inoculums [J]. World journal of microbiology & biotechnology, 2015, 31 (11): 1719 - 1728.
- [3] PRIYA ANSHU, HAIT SUBRATA. Comparative assessment of metallurgical recovery of metals from electronic waste with special emphasis on bioleaching[J]. Environmental science and pollution research international, 2017, 24(8): 6989 - 7008.
- [4] 赵凯,黎广荣,周义朋,等.砂岩型铀矿浸出研究进展.有色金属(冶炼部分)[J].2019(6):40-48.
- [5] KEVIN B. HALLBERG, ELENA GGONZALEZ - TORIL, D. BARRIE JOHNSON. Acidithiobacillus ferrivorans, sp. nov.; facultatively anaerobic, psychrotolerant iron-, and sulfur-oxidizing acidophiles isolated from metal mine-impacted environments[J]. Extremophiles, 2010, 14 (1): 9 - 19.
- [6] SERGIO BARAHONA, CRISTINA DORADOR, RUIYONG ZHANG, et al. Isolation and characterization of a novel Acidithiobacillus ferrivorans strain from the Chilean Altiplano; attachment and biofilm formation on pyrite at low temperature[J]. Research in Microbiology, 2014, 165(9): 782 - 793.
- [7] 陈鹏,王清良,胡鄂明,等.耐冷嗜酸硫杆菌的生长特性和固定化培养[J].金属矿山,2018(3):90-6.
- [8] 张瑞,刘亚洁,徐玲玲,等.不同初始总铁量下的冶金菌液培养过程中  $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$  值、pH值和Eh值的变化规律及其对冶金菌液生产的影响[J].冶金丛刊,2008(5):4-6.
- [9] 杨开智.氧化亚铁硫杆菌对原生砷矿的浸出工艺及机理初探[D].成都:成都理工大学,2017.
- [10] 陈鹏.耐冷嗜酸硫杆菌快速氧化地浸采铀吸附尾液中  $\text{Fe} \sim (2+)$  工艺与应用研究[D].衡阳:南华大学,2018.
- [11] 王清良,陈鹏,胡鄂明,等.耐冷嗜酸硫杆菌快速氧化地浸采铀吸附尾液中  $\text{Fe} \sim (2+)$  [J].化工进展,2018(10):3995-4005.
- [12] 王汉青,节梦瑞,张会宁,等. BF - MBR 处理废水及膜污染控制的研究进展[J].水处理技术,2020(5):1-7.
- [13] 高放,马林,霍涛,等.膜生物反应器污染及防控方法研究进展[J].环境工程,2020(3):69-75.
- [14] 丁文川,曾晓岚,王永芳,等.生物炭载体的表面特征和挂膜性能研究[J].中国环境科学,2011(9):1451-1455.
- [15] 韩正伟,刘志红,张翠,等.磷矿浮选废水结垢物硫酸钙与阻垢剂作用机理研究[J].矿冶工程,2018(4):102-105.
- [16] 陶芳芳,宁尚雷,靳海波,等.气液并流向上填充鼓泡塔液体混合特性的研究[J].化学工程,2020(5):64-68.
- [17] 王威杰,雍玉梅,杨超,等.三维上流式反应器床层流动和返混特性[J].化工学报,2018(1):381-388.
- [18] 姜艾伶,刘佳欣,熊慧欣,等. A. ferrooxidans 培养过程中 Al/Fe(摩尔比)对铁矿物形成产物的影响[J].岩石矿物学杂志,2019(6):782-788.
- [19] 金捷,朱红萍,王成刚. PECVD 布气装置气流场的模拟分析[J].现代制造工程,2012(12):93-96.

# Expansion Experimental Study for Rapid Oxidation of $\text{Fe}^{2+}$ in Adsorption Tail Solution of In-situ Uranium Leaching by a Bacteria in Field in Xinjiang

WEI Xiaohui<sup>1</sup>, WANG Qingliang<sup>1\*</sup>, LEI Zhiwu<sup>1</sup>, HU Eming<sup>1</sup>, WANG Hongqiang<sup>1</sup>, ZHAO Jianfei<sup>1</sup>, LI De<sup>2</sup>, LI Peng<sup>2</sup>, YU Changgui<sup>2</sup>, XU Yiqun<sup>2</sup>

1. School of Resources, Environment and safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China;

2. CNC Tianshan Uranium Industry Co., Ltd., Yining 835000, Xinjiang, China

**Abstract:** In order to save the amount of oxidants for acid leaching of uranium, a new type of high-efficiency bioreactor with 7.0 m in height, 2.0 m in inner diameter and 17.8 m<sup>3</sup> in total volume was designed and constructed in a uranium mine of Xinjiang, porous acid resistant ceramics were selected as the carriers of bacteria, and the  $\text{Fe}^{2+}$  in the tail liquor of in-situ leaching of uranium by *Acidithiobacillus ferrivorans* immobilized on the carriers at low temperature, to carry out an extended experimental study. The results showed that the maximum flow rate of bioreactor was 28.2 m<sup>3</sup>/h when  $\text{Fe}^{2+}$  concentration was 200~300 mg/L and aeration rate was 59.0 m<sup>3</sup>/h under the condition of 5~24 °C in the field, and the  $\text{Fe}^{2+}$  in the tail liquor could be oxidized rapidly and completely when the Eh (Redox potential) was above 570 mV. This experiment provides reference significance for the application of bacteria instead of oxidant to oxidize and adsorb  $\text{Fe}^{2+}$  in tail liquor.

**Key words:** in-situ leaching of uranium; bioreactor; *acidithiobacillus ferrivorans*; ferrous oxide

**引用格式:**魏小辉,王清良,雷治武,胡鄂明,王红强,赵建飞,李德,李鹏,于长贵,徐益群. 细菌快速氧化新疆地浸采铀吸附尾液中  $\text{Fe}^{2+}$  现场扩大试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(4): 9-16.

Wei XH, Wang QL, Lei ZW, Hu EM, Wang HQ, Zhao JF, Li D, Li P, Yu CG and Xu YQ. Expansion experimental study for rapid oxidation of  $\text{Fe}^{2+}$  in adsorption tail solution of in-situ uranium leaching by a bacteria in field in Xinjiang[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2020, 40(4): 9-16.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)