

浮选药剂对嗜酸氧化亚铁硫杆菌 浸出低品位铜尾矿的影响

董颖博, 林海, 傅开彬, 莫晓兰, 温洪伟

- (1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083;
2. 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 以分离于湖北某铜矿的嗜酸氧化亚铁硫杆菌 LD-1 菌株(*At.f*LD-1)为研究对象, 研究了 4 种不同碳链长度黄药、丁胺黑药、2 号油、11 号油单一浮选药剂和由这些药剂组成的 5 种组合药剂对 *At.f*LD-1 菌株生长、氧化活性以及浸出尾矿效率的影响规律。结果表明: 单一浮选药剂均会影响 *At.f*LD-1 菌的氧化活性, 影响程度有所差异, 起泡剂对菌种的影响最小, 捕收剂的影响较大; 5 种组合浮选药剂对 *At.f*LD-1 菌株生长、氧化活性和浸铜效率的抑制作用从小到大顺序为丁基黄药+丁胺黑药+2 号油、异丙基黄药+丁胺黑药+2 号油、异戊基黄药+丁胺黑药+2 号油、乙基黄药+异戊基黄药+2 号油、乙基黄药+丁胺黑药+2 号油。

关键词: 浮选药剂; 微生物浸出; 嗜酸氧化亚铁硫杆菌; 低品位铜尾矿; 浸铜效率

中图分类号: TD925.5

文献标志码: A

Effect of flotation reagents on bioleaching of low grade copper tailings by *Acidithiobacillus ferrooxidans*

DONG Ying-bo, LIN Hai, FU Kai-bin, MO Xiao-lan, WEN Hong-wei

- (1. School of Civil and Environmental Engineering,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: The effects of seven flotation reagents (four xanthate collectors of different carbon lengths, butylamine, oil 2 and oil 11) and five combinations of these flotation reagents on the growth, activity and bio-leaching capability of the strain *Acidithiobacillus ferrooxidans* LD-1 separated from some copper mine in Hubei Province, China was studied. The results show that these flotation reagents can all depress the growth and activity of the strain *At.f*LD-1. The depression of the collectors is stronger than that of frother. From weak to strong, the inhibition effects of these five combinations of reagents on the growth, activity and bio-leaching capability of the strain *At.f*LD-1 are in the following order: combinations of butyl xanthate, butylamin and oil 2; combinations of isopropyl xanthate, butylamin and oil 2; combinations of isoamyl xanthate, butylamin and oil 2; combinations of ethyl xanthate, isoamyl xanthate and oil 2; combinations of ethyl xanthate, butylamin and oil 2.

Key words: flotation reagent; microbiological leaching; *Acidithiobacillus ferrooxidans*; low grade copper tailings; copper leaching efficiency

矿产资源是不可再生资源。目前, 随着人类的不
断开发和利用, 世界各地矿产资源已日趋减少, 但对

其需求量却日益增长, 因此, 开发选别低品位矿和复
杂矿的意义越来越大^[1-2]。该类矿石采用传统选冶工艺

基金项目: 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室资助项目

收稿日期: 2010-11-08; 修订日期: 2011-03-23

通信作者: 林海, 教授, 博士; 电话: 010-62332526; E-mail: linhai@ces.ustb.edu.cn

无法经济回收，而微生物浸矿技术具有成本低、投资少、工艺流程短、设备简单、应用范围宽、易于管理、环境友好以及能够处理用传统方法不能经济回收的贫、细、杂矿石等特点，已越来越受到国内外相关研究者的关注，微生物浸矿技术有望在矿物加工界得到越来越广泛的应用^[3-5]。

目前，微生物浸矿技术主要应用于低品位矿物资源的再利用并取得了很好的成绩，但它离大规模的工业应用还有相当长的一段距离，有待进一步进行大量的基础研究和应用研究^[6]。例如，微生物浸矿技术在处理浮选尾矿和浮选精矿时，很多因素会影响浸矿细菌的氧化活性。其中，尾矿和精矿中残余的浮选药剂对细菌活性会产生较大影响，从而影响浸出效果。因此，研究浮选药剂对细菌活性和浸矿效率的影响规律具有重要意义，它可以对浸出浮选精尾矿的实践起到一定的指导作用。目前，国内外在浮选药剂对浸矿菌种活性及浸矿效率影响领域的研究颇少。BRIERLY 等^[7-10]的研究得出，在硫化锌精矿菌种浸出过程中，需要先进行脱药，因为矿物上残余的浮选药剂对浸出有较大影响，并对比总结出了 4 种浮选药剂对菌种生长抑制作用的顺序。覃文庆等^[11]通过研究指出，3 种浮选药剂对浸矿菌种活性的抑制能力从小到大的顺序为：丁基醚醇，乙基黄药，丁胺黑药。未脱药和脱药后采用铁闪锌精矿浸出 35 d 后，锌的浸出率分别为 61%和 92%，进一步验证了浮选药剂对浸矿细菌活性的影响^[11]。然而已有的研究存在浮选药剂选择代表性不强、范围不够广、没有研究混合浮选对细菌影响等不足，因而难以对含有浮选药剂矿样的微生物浸出技术起有效的指导作用。

本文作者以实验室已开发出的优良浸出铜尾矿菌种 LD-1 作为实验菌株，选择常用的、有代表性的 7 种铜矿物浮选药剂：乙基黄药、异丙基黄药、丁基黄药、异戊基黄药、丁胺黑药、2 号油、11 号油，重点研究了 5 组复合药剂对 LD-1 菌生长、活性的影响以及对尾矿浸出体系的影响规律。

1 实验

1.1 菌种及培养基的制备

实验所用菌种为嗜酸氧化亚铁硫杆菌 LD-1 菌株 (*Atf*LD-1 菌株)，采自湖北大冶某铜矿酸性矿坑水中，经过筛选、分离纯化、耐铜驯化培养、适应目标处理

尾矿环境驯化培养以及诱变培养后所得。菌种最佳培养条件如下：初始 pH 值 2.0，摇床温度 30 ℃、转速 160 r/min。采用改进型 9K 培养基^[12]，其组成见表 1。

表 1 改进型 9K 培养基组分和含量
Table 1 Components and concentration of improved 9 K medium

Component	Concentration/(g·L ⁻¹)
(NH ₄) ₂ SO ₄	2.0
KCl	0.1
K ₂ HPO ₄	0.25
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.25
FeSO ₄ ·7H ₂ O	44.2

1.2 实验矿样

试验矿样取自湖北大冶某废弃尾矿，其主要铜矿物成分为黄铜矿、微量铜蓝。矿样化学多元素分析结果和 XRD 谱分别如表 2 和图 1 所示。尾矿中主要含有石英、方解石和白云石等脉石矿物，含铜矿物含量较低。尾矿粒度为小于 250 μm 的占 85%。

表 2 铜尾矿的化学分析结果
Table 2 Chemical analysis results of copper tailing (mass fraction, %)

Cu	Fe	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Zn
0.20	9.40	5.32	45.39	8.98	6.46	0.02
K ₂ O	Na ₂ O	CaO	TiO ₂	Mn	P	Mo
3.43	1.78	18.38	0.28	0.22	0.11	0.03

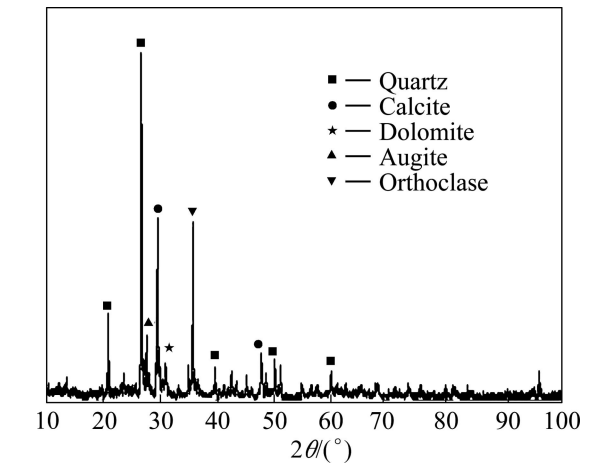


图 1 铜尾矿的 XRD 谱
Fig.1 XRD pattern of copper tailings

1.3 浮选药剂对细菌活性的影响

浮选药剂对 *At.f* LD-1 菌株活性影响试验均在 250 mL 锥形瓶中进行,装入 90 mL 已灭菌 pH 值为 2.0 的改进型 9K 培养基,接入 *At.f* LD-1 菌液 10 mL(浓度为 1.00×10^7 cell/mL),然后分别加入 10 mg/L 和 80 mg/L 的 7 种浮选药剂、以及分别加入 10 mg/L 的 5 组组合浮选药剂,置于 30 °C、160 r/min 的空气浴恒温摇床内振荡培养。定期测定培养液中 pH 值、氧化还原电位(φ)、培养液中活菌数目和 Fe^{2+} 浓度。

1.4 尾矿浸出实验

尾矿浸出实验均在 250 mL 锥形瓶中进行,瓶内装入 90 mL 已灭菌 pH 值为 2 的稀硫酸溶液,加入 10 mL *At.f* LD-1 菌液(细菌浓度均为 1.0×10^8 cell/mL),然后分别加入 10 mg/L 的 5 组组合浮选药剂,矿浆质量浓度为 50 g/L,置于 30 °C、160 r/min 的空气浴恒温摇床内振荡培养,定期测定浸出液中活菌数目和 Cu^{2+} 浓度。蒸发掉的水分用蒸馏水补足,取样消耗的液量用相应的溶液补充,使锥形瓶内溶液至 100 mL 刻度线。

1.5 分析方法

亚铁离子的浓度采用重铬酸钾滴定法测定;用 S20 seveneasy pH 仪测量浸出体系的 pH 值,采用铂-甘汞复合电极在 PHS-2F 型 pH 计的电位档测定浸出体系氧化还原电位; Cu^{2+} 浓度采用原子吸收光谱法测定;采用 ZBM-300E 无穷远生物显微镜观察细菌并采用血球计数板测定浸出液中活细菌的数量,菌种的氧化活性用细菌氧化亚铁的能力来表示。

2 结果和讨论

2.1 单一浮选药剂对 *At.f* LD-1 菌活性的影响

图 2 和 3 所示分别为 7 种单一浮选药剂在不同用量下,24h 内 *At.f* LD-1 菌培养体系中 Fe^{2+} 的氧化率情况。不加浮选药剂的试验编号记作 0[#],加入乙基黄药、异丙基黄药、丁基黄药、异戊基黄药、丁胺黑药、2 号油、11 号油的试验编号分别记作 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#]、6[#]、7[#]。结果表明,7 种浮选药剂均会影响 *At.f* LD-1 菌的 Fe^{2+} 氧化率,影响程度差异较大,起泡剂对菌种的影响很小,捕收剂的影响较大,尤其是丁胺黑药和乙基黄药;同一种浮选药剂作用下随着药剂用量的增

加,会降低 Fe^{2+} 的氧化速率,如异丙基黄药用量为 10 mg/L 时,24 h 时 Fe^{2+} 氧化率为 50.16%;当用量增加至 80 mg/L 时,24 h 时 Fe^{2+} 氧化率降低为 39.64%,大大低于异丙基黄药用量为 10 mg/L 时的 Fe^{2+} 氧化率。其它浮选药剂随着用量的增加呈现同样的规律。另外,从以上两图中,均可以得出 7 种浮选药剂对 *At.f* LD-1 菌氧化活性的抑制作用从小到大的顺序为:11 号油、2 号油、丁基黄药、异丙基黄药、异戊基黄药、乙基黄药、丁胺黑药。

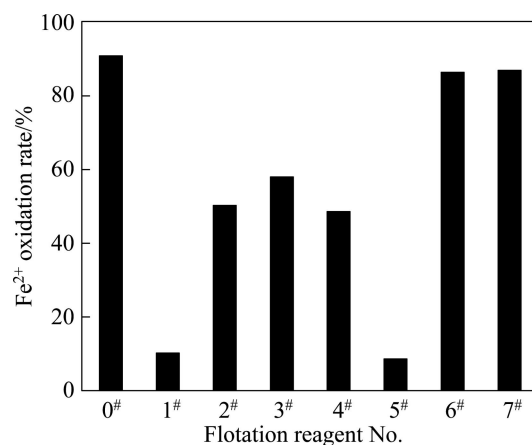


图 2 不同浮选药剂对菌种氧化活性的影响

Fig.2 Effects of reagents on activity of *At.f* LD-1 strain (dosage: 10 mg/L; time: 24 h)

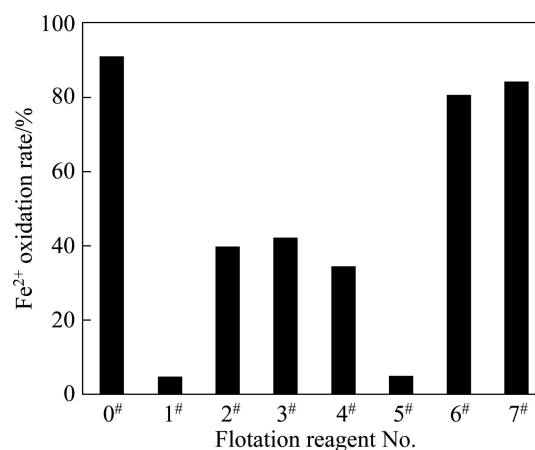


图 3 不同浮选药剂对菌种氧化活性的影响

Fig.3 Effects of reagents on activity of *At.f* LD-1 strain (dosage: 80 mg/L; time: 24 h)

本试验结果表明,不同碳链的黄药类浮选药剂对菌种活性影响差异较大,其原因可能是烃基黄原酸钠在酸性介质中与硫酸发生分解反应生成了烃基醇和 CS_2 ,醇类和 CS_2 对浸矿细菌均有抑制作用。醇类的杀

菌和抑菌作用随其相对分子质量的增大而作用增强。低级醇能溶于水，相对分子质量增大溶解度就降低，正丁醇在水中的溶解度有 8%，异戊醇在水中的溶解度只有 2.75%，而矿物中残留的浮选药剂浓度远低于此溶解度，因此，随着相对分子质量的增大，由醇类抑菌作用所造成的浸矿细菌活性的降低越来越明显。黄药类捕收剂在酸性介质中生成的另一反应产物 CS₂ 会引起生物氧化减慢，但在各烃基黄原酸钠用量相同的情况下，随着相对分子质量的增大，所生产 CS₂ 的量会逐渐减少，故由 CS₂ 所造成的浸矿细菌活性的降低程度也逐渐减弱。丁胺黑药对菌种的抑制作用是因为丁胺黑药的胺基在酸性溶液中对细菌的某些酶和一些特定的膜蛋白有毒性，从而影响菌种的氧化活性。

2.2 组合浮选药剂对 *At.f*LD-1 菌的影响

在实际浮选工艺生产中，浮选药剂常常是联合使用的，因此，按照实际浮选工艺中的药剂制度设计合理的浮选药剂组合，进行组合药剂对 *At.f*LD-1 菌活性的影响试验。组合药剂是根据每种浮选药剂的结构和特性及在选矿中所起的作用，将药剂按一定的比例进行有效组合，使之发挥协同效应，满足浮选过程中的不同要求，提高选别分离效果从而达到理想的选矿指标^[13]。捕收剂是金属矿浮选工艺中必不可少的选矿药剂，一般用单一品种捕收剂即能达到理想效果，但是在处理复杂多金属矿矿石时，往往选矿指标达不到理想状态，甚至精矿质量低下，精矿回收率也提不高。因此，近年来，采用不同种类的药剂组合应用于浮选工艺中。不仅有捕收剂组合使用，也出现了不少起泡剂、抑制剂和絮凝剂的组合使用^[14-15]。因此，本文作者根据常规的浮选药剂种类组合及用量比例，设计了 5 种常用的组合药剂，研究其对 *At.f*LD-1 菌株生长、繁殖及氧化活性的影响规律，药剂总量均为 10 mg/L，其组合方式见表 3。

表 3 浮选药剂组合方式

Sample No.	Combination of flotation reagents	Proportion (mass ratio)
a	Ethyl xanthate +butylamin+ oil 2	7:2:1
b	Isopropyl xanthate +butylamin+ oil 2	7:2:1
c	Butyl xanthate +butylamin+ oil 2	7:2:1
d	Isoamyl xanthate +butylamin+ oil 2	7:2:1
e	Ethyl xanthate + isoamyl xanthate + oil 2	4.5:4.5:1

图 4 和 5 所示分别为在 5 种组合药剂下 *At.f*LD-1 菌株培养过程中 pH 和氧化还原电位(φ)随时间的变化情况，并与不加任何药剂的空白体系进行了对比。由图 4 可见，pH 均呈先升高后逐渐下降的趋势。因为细菌在代谢过程中会消耗 H⁺，在培养初期，培养液中的主要反应为 Fe²⁺的氧化，细菌的参与促进了该反应加速进行，从而导致 pH 快速升高；此后随着培养过程的进行，Fe³⁺增多，Fe³⁺发生水解使培养体系酸度增加，pH 有所下降^[16]。由图 5 可见，在细菌生长过程中，Fe²⁺的氧化为细菌的生长提供必须的能量，使溶液中 Fe³⁺浓度增加，溶液的 φ 逐渐升高；当 Fe²⁺氧化完全时， φ 达到最高值，且维持在相对稳定的范围内^[17]。由此可知，培养液中浮选药剂使 pH 和 φ 随时间的变化趋

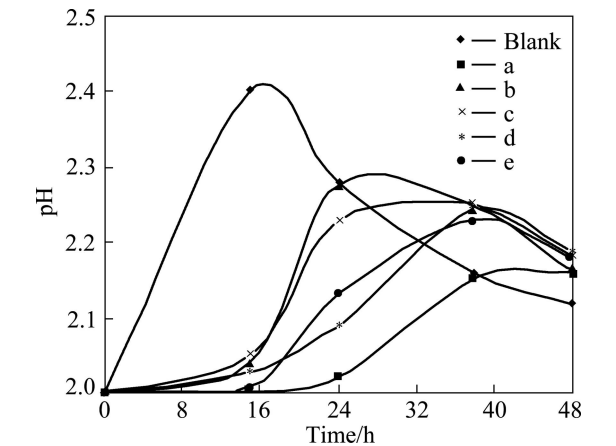


图 4 不同组合浮选药剂下菌种培养过程 pH 随时间变化曲线

Fig.4 Changing curves of pH in solution with different combinations of flotation reagents

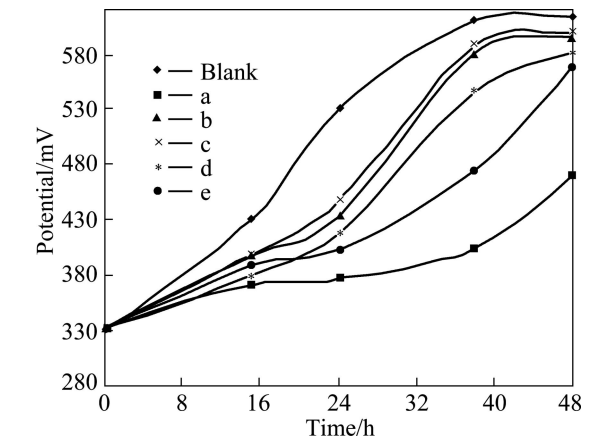


图 5 不同组合浮选药剂下菌种培养过程电位随时间变化曲线

Fig.5 Changing curves of potential in solution with different combinations of flotation reagents

势发生了较大变化。含组合药剂的培养体系的 pH 变化趋势滞后于不含药剂的培养体系的,且不同的药剂组合所导致的 pH 滞后程度所有差异;在相同培养时间内,含组合药剂体系的 φ 与空白体系的 φ 相比均有不同程度的降低,而不含药剂的空白体系的 φ 在 38 h 已接近稳定状态,维持在 600~610 mV。

图 6 所示为 5 种不同组合药剂对 *At.f*LD-1 菌株氧化活性影响。从图 6 可以看出,培养基中加入这 5 种组合药剂,均会降低 *At.f*LD-1 菌株的氧化活性;不同药剂组合对菌种活性影响程度有所差异。其中,菌种活性降低最为明显的是组合 a,48 h 时 Fe^{2+} 的氧化率为 72.21%;其次为组合 e,38 h 时 Fe^{2+} 的氧化率已接近 100%;影响程度最小的是药剂组合 c。

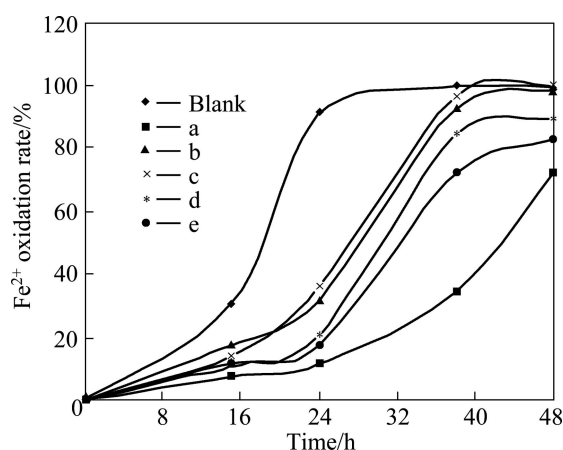


图 6 不同组合浮选药剂下菌种的氧化率随时间的变化曲线

Fig.6 Changing curves of Fe^{2+} oxidation rate with different combinations of flotation reagents

2.3 不同组合浮选药剂对 *At. f* LD-1 菌活性的影响规律

5 种不同组合浮选药剂对 *At.f*LD-1 菌株生长的影响如图 7 所示,并与不加任何药剂的空白体系作对比。由图 7 可见,不同组合药剂对菌种的生长影响有所差异。其中,药剂组合 c 和组合 b 对菌种生长影响较小,生长曲线和空白试验中菌种生长曲线差异很小;其次为药剂组合 d 和组合 e,在其作用下延缓了菌种的生长速度;抑制作用最强的是组合 a 药剂。因此,可以得出 5 种组合浮选药剂对 *At.f*LD-1 菌株生长影响的程度从小到大的顺序如下:组合 c、组合 b、组合 d、组合 e、组合 a。

图 8 所示为 5 种组合浮选药剂在相同用量下,24h 内 *At.f*LD-1 菌株培养体系中 Fe^{2+} 的氧化率情况。从图 8 可以看出,与空白体系相比,在 5 种组合浮选药剂

作用下, Fe^{2+} 的氧化率均有不同程度的降低,24h 时 Fe^{2+} 的氧化率分别为 10.64%、33.87%、35.87%、20.90% 和 16.84%。由此可以得出 5 种组合浮选药剂对 *At.f* LD-1 菌株氧化活性的抑制作用从小到大的顺序如下:组合 c、组合 b、组合 d、组合 e、组合 a。与 5 种组合浮选药剂对 *At.f* LD-1 菌株生长的抑制作用顺序相同。

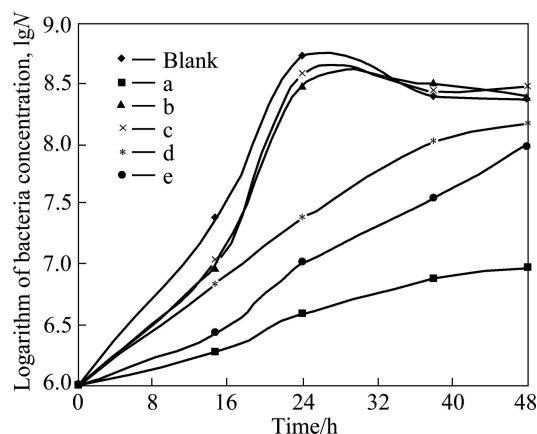


图 7 不同组合浮选药剂下菌种的生长曲线

Fig.7 Growth curves of strain with different combinations of flotation reagents

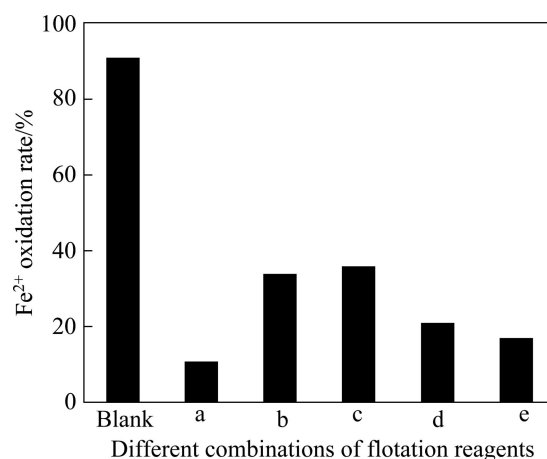


图 8 不同药剂组合对菌种氧化率的影响

Fig.8 Effects of different reagents combinations on oxidation rate of *At.f*LD-1 strain (dosage: 10 mg/L; time: 24 h)

2.4 组合浮选药剂对 *At. f* LD-1 菌浸出尾矿的影响

矿物上残留的浮选药剂对浸出有较大影响,一方面是因为浮选药剂会改变矿物表面的润湿性等表面性质;另一方面浮选药剂会影响浸矿细菌的生长,从而改变细菌的氧化活性^[10]。本试验主要考察了 5 种组合浮选药剂对 *At. f* LD-1 菌浸出尾矿效率的影响。在 5

种不同组合浮选药剂作用下, *At.f*LD-1 菌株在浸出尾矿体系的生长情况如图 9 所示。由图 9 可见, 不同组合药剂对菌种在浸矿体系的生长影响有所差异。其中, 药剂组合 c 和组合 b 对菌种生长影响较小, 生长曲线和空白试验中菌种生长曲线差异很小; 其次为药剂组合 d, 在其作用下延缓了菌种在浸矿体系的生长速度; 抑制作用较强的是药剂组合 e 和组合 a, 使菌种在整个浸矿过程生长都很缓慢。因此, 得出 5 种组合浮选药剂对 *At.f*LD-1 菌株在浸矿体系生长影响的程度从小到大顺序如下: 组合 c、组合 b、组合 d、组合 e、组合 a。这与 5 种组合药剂对 *At.f*LD-1 菌株在改进型 9K 培养基中生长抑制顺序相同。

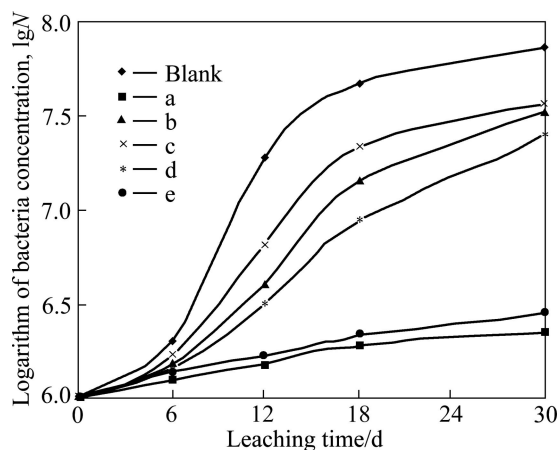


图 9 不同组合药剂作用下菌种在浸矿体系的生长曲线

Fig.9 Growth curves of strain in leaching system with different reagents combinations

图 10 所示为 5 种组合浮选药剂在相同用量下, 对 *At.f*LD-1 菌株浸出尾矿体系中铜浸出率的对比。从图 10 可以看出, 与空白体系相比, 在 5 种组合浮选药剂作用下, 浸出体系中铜浸出率均有不同程度的降低, 浸出 30d 时铜浸出率分别为 17.5%、32%、32.9%、30.7%和 22.9%。从而可以得出 5 种组合浮选药剂对 *At.f*LD-1 菌株浸出尾矿效率的抑制作用从小到大顺序如下: 组合 c、组合 b、组合 d、组合 e、组合 a。与这 5 种组合药剂对 *At.f*LD-1 菌株在改进型 9K 培养基中 Fe^{2+} 氧化率影响大小顺序相同。

通过以上研究可知, 不同组合浮选药剂对 *At.f*LD-1 菌生长情况、氧化活性以及浸出尾矿效率的影响规律相同, 在药剂总用量相同条件下, 各组合抑制作用从小到大的顺序均如下: 组合 c(丁基黄药+丁胺黑药+2 号油; 7:2:1)、组合 b(异丙基黄药+丁胺黑药+2

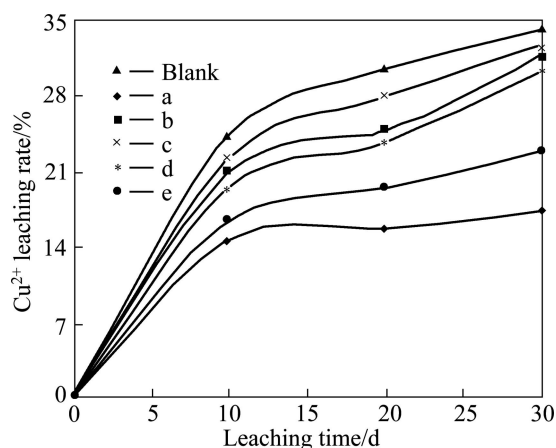


图 10 不同组合浮选药剂对尾矿的浸出效果

Fig.10 Copper leaching rates with different reagents combinations

号油; 7:2:1)、组合 d(异戊基黄药+丁胺黑药+2 号油; 7:2:1)、组合 e(乙基黄药+异戊基黄药+2 号油; 4.5:4.5:1)、组合 a(乙基黄药+丁胺黑药+2 号油; 7:2:1)。单一浮选药剂对菌种活性的影响试验表明, 乙基黄药和丁胺黑药对菌种活性的抑制作用较大, 因此, 组合 a 对菌种的抑制作用也最大; 其它药剂组合的抑制规律也与组成该药剂组合的单一药剂的抑制规律一致。这些影响规律表明, 黄药类、黑药类捕收剂对菌种的活性以及浸矿效率影响较大, 因此在浸出含有这些药剂的矿样前需要进行脱药预处理。同时, 应深入研究不同浮选药剂对菌种抑制作用机理, 从而更加有针对性地提高菌种的抗药性和抗毒性, 这对于加速微生物浸矿工艺的大规模工业化具有指导意义。

3 结论

1) 所研究的 7 种单一浮选药剂均会影响 *At.f*LD-1 菌的生长, 影响程度差异较大, 起泡剂对菌种的影响很小, 捕收剂的影响较大, 尤其是丁胺黑药和乙基黄药; 相同浮选药剂随着药剂用量的增加, *At.f*LD-1 菌的氧化活性随之降低。在相同药剂用量下, 7 种浮选药剂对 *At.f*LD-1 菌氧化活性影响的程度从小到大顺序如下: 11 号油、2 号油、丁基黄药、异丙基黄药、异戊基黄药、乙基黄药、丁胺黑药。

2) 5 种组合浮选药剂对 *At.f*LD-1 菌株生长繁殖影响和氧化活性影响规律也相同, 抑制作用从小到大

顺序均如下:组合c(丁基黄药+丁胺黑药+2号油;7:2:1)、组合b(异丙基黄药+丁胺黑药+2号油;7:2:1)、组合d(异戊基黄药+丁胺黑药+2号油;7:2:1)、组合e(乙基黄药+异戊基黄药+2号油;4.5:4.5:1)、组合a(乙基黄药+丁胺黑药+2号油;7:2:1)。

3) 通过组合浮选药剂对菌种浸出尾矿效率影响试验可知,5种组合浮选药剂对 *At.f* LD-1 菌株在浸矿体系生长影响以及对浸铜效率影响从小到大顺序均如下:组合c、组合b、组合d、组合e、组合a。与组合药剂对 *At.f*₆ 诱变菌在改进型9K培养基中的生长、Fe²⁺氧化率影响规律相同。

4) 烃基黄药对菌种的抑制作用主要是由烃基黄原酸钠在酸性介质中生成的烃基醇和CS₂对浸矿细菌的抑制作用造成的。浮选药剂对菌种生长和氧化活性的抑制作用会影响微生物浸出浮选精尾矿的效率,因此,为了消除或降低浮选药剂对微生物浸出过程的负面影响,需要提高浸矿菌种的性能和对浮选精尾矿进行脱药处理。

REFERENCES

- [1] 卢颖,孙胜义.组合药剂的发展及规律[J].矿业工程,2007,5(6):42-44.
LU Ying, SUN Sheng-yi. The development and the combined law of composite reagents[J]. Mining Engineering, 2007, 5(6): 42-44.
- [2] BRIERLY J A, BRIERLY C L. Present and future commercial applications in biohydrometallurgy[J]. Hydrometallurgy, 2001, 59(3): 233-239.
- [3] 王玉棉,李军强.微生物浸矿的技术现状及展望[J].甘肃冶金,2004,26(3):36-39.
WANG Yu-mian, LI Jun-qiang. Development status and prospect of microbial leaching technology[J]. Gansu Metallurgy, 2004, 26(3): 36-39.
- [4] 董颖博,林海.低品位铜尾矿微生物浸出技术的研究进展[J].金属矿山,2010(1):11-15.
DONG Ying-bo, LIN Hai. Research progress on bioleaching technology of low-grade copper ore[J]. Met Mine, 2010(1): 11-15.
- [5] 李雄,柴立元,王云燕.生物浸矿技术研究进展[J].工业安全与环保,2006,32(3):1-3.
LI Xiong, CHAI Li-yuan, WANG Yun-yan. Research progress on bioleaching technology[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2006, 32(3): 1-3.
- [6] 蒋鸿辉,王琨.生物选矿的应用研究现状及发展方向[J].中国矿业,2005,14(9):76-78.
JIANG Hong-hui, WANG Kun. The present situation of applied research on microbe mineral processing and development direction[J]. China Mining Magazine, 2005, 14(9): 76-78.
- [7] BRIERLEY J A. Expanding role of microbiology in metallurgical processes[J]. Mining Engineering, 2000, 52(11): 49-53.
- [8] AGEeva S N, KONDRATEVA T F, KARAVAIKO G I. Phenotypic characteristics of *Thiobacillus Ferrooxidans* strains[J]. Microbiology, 2001, 70(2): 186-194.
- [9] LOON H Y, MADGWICK J. The effect of xanthate flotation reagents on bacterial leaching of chalcopyrite by *Thiobacillus Ferrooxidans* [J]. Biotechnol Lett, 1995, 17(4): 997-1000.
- [10] BRIERLEY C L. Bacterial succession in bioheap leaching[J]. Hydrometallurgy, 2001, 59(2): 249-255.
- [11] 覃文庆,王军,蓝卓越,陈永海.浮选药剂对浸矿细菌活性的影响[J].中南大学学报:自然科学版,2004,35(5):759-762.
QIN Wen-jun, WANG Jun, LAN Zhuo-yue, CHEN Yong-hai. Effect of flotation reagents on activity of bacteria in bioleaching[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2004, 35(5): 759-762.
- [12] DONG Ying-bo, LIN Hai, JIANG Le-yong. Recovery of copper resource from mine solid waste using microbial technology[C]//The International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, USA: IEEE Computer Society, 2010, 6: 4710-4713.
- [13] 卢颖,孙胜义.组合药剂的发展及规律[J].矿业工程,2007,5(6):42-44.
LU Ying, SUN Sheng-yi. The development and the combined law of composite reagents[J]. Mining Engineering, 2007, 5(6): 42-44.
- [14] 余增辉.组合选矿药剂在贵金属矿浮选工艺中的应用[J].江苏冶金,2003,31(4):31-33.
YU Zeng-hui. The application of composite reagents in flotation process of polymetallic ore [J]. Jiangsu Metallurgy, 2003, 31(4): 31-33.
- [15] 谢广元.选矿学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2001:455-456.
XIE Guang-yuan. Mineral processing[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001: 455-456.
- [16] 夏乐先,彭安安,郭雪,邱冠周,柳建设.两株不同来源的嗜酸氧化亚铁硫杆菌对黄铜矿浸出的研究[J].现代生物医学进展,2009,9(6):1068-1070.
XIA Le-xian, PENG An-an, GUO Xue, QIU Guan-zhou, LIU Jian-she. Comparison of the bioleaching ability of native and standard strains of *acidithiobacillus ferrooxidans* in chalcopyrite recovery[J]. Progress in Modern Biomedicine, 2009, 9(6): 1068-1070.
- [17] ROHWERDER T, GEHRKE T, KINZLER K. Bioleaching review part A: progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2003, 63(3): 239.

(编辑 何学锋)