



微生物浸铀研究进展

文旭祥, 孙占学, 周义朋, 徐玲玲, 刘顺亮

(东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013)

摘 要: 随着对天然铀需求的不断增加, 低品位及难浸铀矿的开采日渐受到关注, 微生物溶浸是解决此类铀资源开发的重要技术之一。浸铀工艺主要为堆浸和地浸, 大量的室内及野外微生物浸铀试验研究表明, 微生物浸铀技术应用于工业生产是可行的。浸矿微生物经过诱导驯化, 其耐受性可以得到明显提升, 能适应高氟铀矿石、低温以及强酸等环境条件, 如可在氟含量为 2~3.98 g/L 的尾液中良好生长, 在 8~10 ℃ 的低温条件下能保持良好的活性, 也能较好地生长于 pH 为 1.2~2.0 甚至低至 0.6 的强酸环境中。驯化诱导是提高菌种对浸矿环境适应性的通常的技术途径, 采用土著菌并适当加以驯化培养, 往往能获得对本土矿区适应能力更强的优良菌种。研究表明混合菌种之间存在协同作用, 浸矿效果优于单一菌种的。微生物浸铀的间接作用是明确的, 但微生物直接作用铀矿物的观点目前仍存在争论。从微生物浸铀机理、耐受性研究、菌种培养选育和微生物浸铀技术的实践应用研究 4 个方面, 对近 20 年的成果进行了综述, 就微生物浸铀尤其是在地浸方面的发展进行了分析与展望。

关键词: 微生物浸铀; 浸矿机理; 耐受性; 菌种培养

文章编号: 1004-0609(2020)-02-0411-10

中图分类号: TF18

文献标志码: A

随着核电对天然铀需求的增长及铀矿资源的持续开采, 易于处理的高品位铀资源正在减少, 低品位或难浸铀矿的开采日渐受到关注, 微生物浸出技术被认为是最具应用前景的技术之一^[1]。微生物浸铀是利用嗜酸性微生物在有氧条件下氧化矿石中(或人为添加)的 FeS_2 或溶液中的 Fe^{2+} , 产生强氧化剂 Fe^{3+} 将矿石中难溶的四价铀氧化成易溶的六价铀。与传统工艺相比较, 微生物浸出工艺耗费经济成本低, 对于周边环境危害污染较小, 矿物资源的浸出率更高^[2-5]。在 20 世纪 40 年代, 微生物技术开始试验于金属矿产的浸出。1947 年, COLMER 等^[6]分离出一种细菌, 能将硫化矿中 Fe^{2+} 进行氧化, 被命名为氧化亚铁硫杆菌(*T.f.*)。微生物浸出技术最初应用于从低品位铜矿石中回收铜, ZIMMERLEY 等^[7]在 1955 年最先提出铜矿微生物堆浸技术, 并将此技术申请专利实践到工业应用中。直至 20 世纪 80 年代中期, 微生物浸出技术在铀资源开发中取得了突飞猛进的进展, 加拿大安大略省奥特湖地区的丹尼森矿通过微生物浸出地下采矿场中断裂矿石中的铀, 1987 年生产 U_3O_8 380 t^[8]。生物浸出剂被认为是自 20 世纪 80 年代以来最具有经济效益的手段^[9], 美国、俄罗斯、加拿大、印度等国开始广泛利

用微生物法溶浸铀矿^[10]。

国内有关铀矿微生物浸出的研究始于 20 世纪 60 年代末^[11], 目前, 主要工业应用于堆浸、地浸等^[12]。在 20 世纪 70 年代初期对湖南 711 铀矿 700 t 贫矿进行了微生物堆浸扩大试验^[13], 近年来, 在 721、745 等大型铀矿基地成功开展了高氟及表外铀矿等不同类型铀矿石的工业化试验^[12], 而在微生物地浸方面研究开始较晚, 在 20 世纪 90 年代末才开始进行一部分探索研究工作^[14]。当前微生物浸铀技术已展示出广阔的应用前景, 并取得良好的经济效益。

1 微生物浸矿机理

微生物浸出主要应用于硫化矿, 使其金属阳离子进入溶液。学术界认为微生物对矿物作用的机理有三种: 直接作用、间接作用和直接与间接作用都存在的联合作用^[15-16]。直接作用就是直接浸蚀金属矿物, 即浸矿微生物吸附在矿石表面直接氧化溶解矿石中的硫化矿物^[17]。SILVERMA 等^[18]提出, 晶体结构是影响微生物浸矿过程中的重要因素之一, 晶格排列差的更容

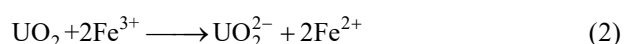
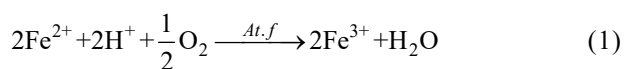
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41772266, 41572231); 江西省重点研发计划项目(20161BBH80051)

收稿日期: 2019-03-01; 修订日期: 2019-06-28

通信作者: 孙占学, 教授, 博士; 电话: 0791-83897597; E-mail: sunzhanxue@aliyun.com

易被细菌浸蚀。然而,这种直接作用机制遭到很大质疑^[19-20]。SAND等^[21-24]认为金属硫化物经过硫代硫酸盐和多聚硫化物两个途径而溶解,这两种机理被认为是化学途径,且能解释所有无机硫化物的出现,微生物起到催化作用,即间接作用。杨洪英等^[25]对包裹了黄铁矿的毒砂抛光片和纯毒砂粉末采用氧化亚铁硫杆菌(SH-T)对这两者氧化行为做了试验研究,观察了SH-T对抛光片和粉末表面的作用过程,应用X射线光电子谱分析指出,SH-T对毒砂氧化浸出以间接作用为主,对黄铁矿氧化浸出以直接作用为主,其SH-T对毒砂的吸附作用小于黄铁矿。POGLIANI等^[26]采用氧化亚铁硫杆菌对硫化铜矿物进行生物浸出实验,在培养基中添或不添加硫酸亚铁、纤维素膜袋包或不包裹矿样以及接种细菌等条件进行交叉实验,研究其对浸铜效果的影响,结果表明氧化亚铁硫杆菌对矿物的直接作用和间接作用是同时存在,即联合作用,并且都起着重要作用。

大多学者认为微生物对低品位铀矿相互作用基于间接作用机制,即嗜酸细菌代谢作用将矿石中富含或人为添加的低价铁和硫氧化成Fe(III)和硫酸,Fe(III)和硫酸作为氧化剂使难溶的 UO_2 氧化成易溶的 UO_2^{2+} ^[27-32]。金属硫化物晶格被细菌和三价铁离子浸蚀的破坏,将内部的铀暴露出来扩大了矿石内的孔隙度且使其渗透性得到了改善,强化浸铀的过程,提高了铀浸出动力学的作用^[33]。主要化学反应为



不过,也有研究者认为微生物浸铀过程中存在直接作用,需氧条件下,微生物通过酶的作用直接将 UO_2 氧化成 UO_2^{2+} ,但没有直接的证据表明确实存在具有这种能力的微生物^[29, 34-37]。

还有研究表明,微生物不仅具有催化氧化作用,还有还原作用,即外界电子供体作用下微生物将离子形态的六价铀还原为沉淀的四价铀。20世纪90年代初,LOVELY等^[38]首次提出厌氧条件下三价铁还原细菌可以通过耦合有机物如乳糖的氧化和六价铀的还原来获取能量用于生长。随后又有研究指出,*Desulfovibrio desulfuricans*^[39]和*Desulfovibrio vulgaris*^[40]也具有还原六价铀的能力。众多微生物还原六价铀实验表明,在厌氧或缺氧条件下,易滋养还原性微生物进行六价铀的还原^[41-43]。事实上,大部分铀矿地下水所处的环境是一个缺氧环境。原位实验表明,当地下水中溶氧(DO)为0.33 mg/L时,还原性微生物仍然可

以对六价铀还原。因此,在地浸采铀过程中,针对地下水DO低的矿区,为防止微生物对六价铀还原,降低浸出率,可对下注的溶浸液充空气或氧气以提高DO。

2 微生物耐受性研究

近年来,国内外学者对浸矿微生物的环境耐受性进行了广泛研究,如溶液中重金属离子、温度、pH、通气量和亚铁离子浓度。

浸矿微生物主要为自养型微生物,重金属离子浓度过高时会导致浸矿菌体的死亡。李洪枚等^[44-46]研究了 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Co^{2+} 和 Mg^{2+} 对*At.f*生长活性的影响,结果表明,重金属离子浓度过高对*At.f*的生长活性有抑制作用,而后分别进行培养驯化,对比驯化前后停滞期和对数期 Fe^{2+} 氧化速率,微生物对各重金属离子的耐受能力显著提高,这是由于菌体内外渗透压变化,细菌经过驯化提高代谢调节能力,以适应重金属离子浓度更高的环境。王清良等^[47]研究了单一离子对*At.f*活性影响大小,结果表明,单一离子对*At.f*活性影响由大到小为 F^- 、 U 、 Mn^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Zn^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} ,即使是低浓度的 F^- 都严重影响*At.f*活性,氟浓度为0.05 g/L时,*At.f*就基本失去活性。对于氟浓度较高的矿床,对*At.f*进行驯化诱导,可较大幅度提高*At.f*的耐氟性。李立松^[48]为了让氧化亚铁硫杆菌菌株具有一定的耐氟性,对氧化亚铁硫杆菌株NJLGS18进行了耐氟性的培养,培养前后菌株耐氟性从5 mg/L提升至40 mg/L。李广悦等^[49]将*At.f*经过紫外线诱变,成功诱导*At.f*耐酸耐氟性提高,在氟浓度为0.6 g/L能较好生长。李江等^[50]通过对菌群(0B5)进行分离、驯化后,能完全适应高氟铀矿石(F1.23%)的浸出,在含氟2~3.98 g/L的尾液中细菌生长良好,铀的浸出率提高大约3%,浸出周期较之前缩短一个多月,耗酸从4.95%下降到3.14%。然而关于不同离子对浸铀菌株生长活性的影响,大多停留于一个相对理想体系内。如9k、高温或单一菌种方面等,往往忽略了实际浸出过程中的浸矿尾液的复杂型和多种菌种协同效应等因素。刘顺亮等^[51-52]利用实际浸矿尾液作为培养基,研究了 Cl^- 、 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 对*Acidithiobacillus ferrooxidans*(*At.f*)、*Acidithiobacillus thiooxidans*(*At.t*)为主的3种混合菌种的影响,表明混合菌分别在 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 、 Cl^- 浓度为741、1092、192 mmol/L的尾液中完全被抑制生长,且抑制效应主要在停滞期,通过多代培养驯化 Mn^{2+} 和 Al^{3+} 离子对混合菌

的活性影响降低较为明显。

耐低温是微生物浸出所具备的耐受性条件之一。丹尼森矿微生物浸出地下采矿现场试验表明,温度随着季节性变化也很大影响微生物浸出过程,夏季铀的浸出浓度明显高于其他3个季节铀的浸出浓度^[8]。胡凯光等^[53]对 *Atf* 在低温环境下进行氧化 Fe^{2+} 的试验,当溶液温度低至 7~8 °C 时,溶液中 Fe^{2+} 浓度和电位不再发生变化,说明细菌暂时失去铁氧化活性。而后,袁榛等^[54]对 *Atf* 10 °C、15 °C、20 °C 3 个诱变低温培养,发现 15 °C 诱变效果最佳, Fe^{2+} 氧化率较原菌株提高 14%。张德诚等^[55]模拟低温条件(8~10 °C)下对 *Atf* 进行低温驯化培养,得到了活性较好的低温驯化菌,其浸矿率优于原始菌株的。在新疆低品位高耗酸砂岩型铀矿矿区,冬季地下水温度一般维持在 14~15 °C,蒋小辉等^[56]发现经过长期驯化从矿区提取的土著菌(氧化亚铁硫杆菌)在现场试验中能够保持较好的活性,将 Fe^{2+} 氧化至 Fe^{3+} , 提高矿层中 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}_T$ 值。

在微生物浸出过程中,环境的酸碱性是影响矿物氧化溶解和浸出率的关键之一。浸矿菌的生长受到溶液酸度的影响,其是一种嗜酸又能微量产酸的细菌。相关资料报道, *Atf* 的 pH 生长范围在 1.3~4.5^[57], 最适 pH 范围在 1.7~2.5^[58]。当 pH 过低时,抑制细菌的细胞代谢,吸附在生物膜表面的菌体得不到补充,固定化细胞越来越少,从而细菌丧失氧化 Fe^{2+} 的能力;当 pH 值过高时,便会析出黄钾铁矾类物质,此类沉淀物质将矿石包裹形成一层膜,减缓或停止微生物浸出^[59]。因而培养选育能在低 pH 条件下保持良好活性的浸矿菌株具有重要意义。龙中儿等^[60]将氧化亚铁硫杆菌先进行定向培育再连续培养筛选后得到耐强酸环境的驯化菌(pH 为 1.7~2.0)。国外,在进行细菌浸出的室内和野外扩大试验, pH 一般在 1.5~1.7, 还有报道 pH 在 1.2~1.3^[57, 59, 61]。尚未有发现 *Atf* 在 pH<1.2 条件下依旧能保持较高活性的报道,而后刘亚洁等^[62]将 *Atf* 通过紫外线诱导再定向筛选, *Atf* 最适 pH 在 1.2~2.0, 在 pH=0.6 的强酸环境下也能生长。周义朋等^[63]现场试验发现,在酸度达到 4 g/L 时,地浸效果最佳,不易在矿层中产生沉淀,还有在条件相同的情况下,适当提高溶液酸度有利于微生物浸铀效率,每提高 1 g/L 的酸度,浸铀效率提高 2%~3%。

氧化亚铁硫杆菌还是一类典型的好氧菌,只是自然溶液中的 DO 远达不到微生物浸出过程的需求,为满足细菌的需求可通过向溶液中充气或加快循环速度提高 DO。有实验采用振荡培养箱在温度、pH 值、氧化亚铁硫杆菌等条件保持不变,通过调节转速以改变

空气进入培养基中的速度^[14]。结果表明,细菌在持滞期时,细菌的氧化还原电位(ORP)值没有明显差别,而进入生长对数期时,细菌较为活跃,繁殖速率大大提升,此时细菌对氧和二氧化碳的需求增大,不同震荡速度下的菌液中 ORP 值差别也较为明显,因此充气越好,细菌繁殖速度越快,ORP 增长越快。胡凯光等^[64]在新疆某铀矿微生物地浸现场,通过改变生物反应器中溶液流量,监测不同流量下 Fe^{2+} 转化率,探究通气量对细菌铁氧化活性的影响。试验结果表明,就固体生物反应器,不同溶液最佳通气量不同。通气量过小时, Fe^{2+} 无法被完全氧化;通气量过大时,不仅不会促进氧化,而且会造成动力浪费,甚至造成固定细菌脱落,影响氧化效果。

Fe^{3+} 是酸法浸铀体系中的重要氧化剂,将四价铀氧化成六价铀后被还原成 Fe^{2+} , 而 Fe^{2+} 是氧化亚铁硫杆菌的能源,细菌从 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} 的过程中获得能量, Fe^{2+} 通过消耗细胞质内的质子将电子传递给分子氧,促使合成 ATP 维持微生物活性^[65-66]。梅健等^[67]对 *Atf* 在高铁离子浓度下生长情况进行研究,发现过低 Fe^{2+} 不能够为细菌生长提供足够能量,而过高 Fe^{2+} 会抑制细菌的生长,初始 Fe^{2+} 浓度从 10 g/L 增大, Fe^{2+} 氧化率呈先上升后下降的趋势。周义朋等^[63]在某砂岩铀矿微生物浸出试验中发现,含微生物的高铁溶液液(4 g/L 酸度、2 g/L Fe^{3+})与酸法浸出(5 g/L 酸度)相比,前者浸铀效率高于后者 27%,同时也发现在酸度相同条件下, Fe^{3+} 浓度越高,微生物浸出液铀浸出率越高,但当 Fe^{3+} 含量达到 2 g/L 后,继续增加 Fe^{3+} 含量对浸铀没有明显提升。

3 菌株培养选育技术

培育高效活性微生物是微生物浸矿应用的关键。微生物浸出相较于传统工艺浸出是一个更为复杂的化学反应,微生物浸出过程既有细菌自身的生物化学反应又有菌浸剂浸矿的化学反应^[68]。所以培养环境适应能力强,氧化活性高的菌株,是目前微生物浸出技术的重要方向。

3.1 菌种协同作用

大量研究表明,微生物浸出中采用混合菌群与单一菌种相比浸矿效果更优,这引起大家对开发混合浸矿菌剂的重视^[69-71]。李江等^[72]在微生物柱浸试验中发现,混合菌群更能适应浸出体系,表现出对铁和硫的高氧化性能,循环利用尾液浸出不仅浸出率稳定也可

降低成本, 适合应用于低品位铀矿的开采。朱艳杰等^[73]研究了砂岩型铀矿床中本源 *At.f.*、*At.t.* 对黄铁矿及铀矿浸出的协同作用。实验结果表明在浸出过程中确实存在协同作用, 在浸出黄铁矿实验中最佳浸出效率的 *At.f.* 和 *At.t.* 菌量比例对含黄铁矿的铀矿菌浸也具有很大的促进作用。在混合菌种中, 除了主要的矿物菌种外, 另一部分非浸矿细菌能够加速金属浸出, 这样的一些微生物被统称为辅助浸矿细菌, 它们在微生物浸矿过程中也起到了至关重要的作用, 在一定程度上促进了细菌的浸矿效率, 这也可能是微生物浸矿体系中, 微生物之间存在协同作用的体现^[74]。细菌生长过程中新陈代谢产生的有机物会对自养菌生长产生抑制作用, 从而影响浸矿菌的活性^[75]。GURUNG 等^[76]研究了在微生物浸矿过程中自养菌 *At.f.* 与异养菌 *A. cryptum* 之间的协同作用, 研究发现, *At.f.* 能有效氧化各种化学形态的硫, 使 *A. cryptum* 生长不受浸矿液中硫代硫酸盐的影响, 同时, 浸出体系中部分有机物可以被 *A. cryptum* 分解, 阻碍有机物抑制 *At.f.* 菌的生长。异养菌能够产生维生素类的生长因子对矿物的浸出起到促进作用。

3.2 菌种选育方法

为了使浸矿菌种适应不同矿床的环境, 目前选育技术多采用诱变和驯化的方法。也有研究者将这两种方法联合使用, 熊英等^[77]将 *At.f.* 菌先驯化再进行诱变选育, *At.f.* 菌前后氧化活性提高了 40 多倍。还有些研究者提出利用土著菌代替也是一种较好的手段。相关研究表明, 利用矿层中的土著细菌对本土矿区的浸矿, 比在实验室培养的细菌效果更佳^[78-79], 这可能是因为微生物在该环境下经过长期的进化, 进行了一定的驯化过程, 对矿层中的重金属和有机物有良好的耐受性, 故对本土矿有更高的亲和性。NGOM^[80]研究了浸出菌株组合(分别分离德兴铜矿和赞比亚谦比希铜矿), 从赞比亚和德兴分离到的群落在浸出赞比亚矿样时浸出率分别为 89% 和 84%。该结果表明合适的生理和生化条件是一个浸矿菌株应用于生物浸出所必需的, 使用土著微生物是提高生物浸出效率的一个较好的方案。

4 微生物浸铀技术的实践应用

目前, 微生物浸铀技术的实践应用研究主要开展于硬岩铀矿的地表堆浸和砂岩型铀矿地浸。

微生物堆浸技术是将采出的矿石破碎到一定粒径再堆置起来, 并均匀地将微生物溶浸液喷淋在堆体上,

微生物溶浸液流经矿石并将金属提取出来。东华理工大学研究团队针对南方硬岩铀矿山的铀资源回收, 开展了系列室内浸出与现场堆浸试验。对我国南方某硬岩难浸铀矿石进行了最佳工艺参数研究, 对不同酸度、矿浆固液比、三价铁浓度的摇瓶交叉试验, 确定了微生物浸铀与酸度、菌液三价铁、液固比与 Eh 的联系^[81]。对某铀矿山堆浸生产线混合铀矿石进行微生物柱浸串联试验, 130 d 的三柱串联铀回收率分别为 81.83%、78.89% 和 81.43%, 耗酸率分别为 10.73%、10.73% 和 11.08%, 均有效促进铀的浸出^[82]。据 721 矿山南废石(矿石铀品位 0.0245%)微生物柱浸实验, 88 d 浸出的铀回收率达到 63%~76.3%, 耗酸率仅为 2.02%~2.40%; 随后开展的南废石现场微生物堆浸试验 120 d 浸出的铀回收率达到 55.92%(渣品位 0.0093%), 耗酸较低(2.69%), 表明利用微生物浸废石中的铀是可行的, 为废矿石中的铀回收提供了一个新途径^[12]。对微生物堆浸后的尾渣(品位为 0.014%)进行不同喷淋条件下的微生物柱浸试验, 结果表明采用小喷淋量或间歇式喷淋能有效回收矿渣中的铀, 成本低且污染小^[83]。

微生物地浸是基于传统酸法地浸工艺, 利用菌浸液代替原有的化学溶液, 从天然埋藏条件下相似于酸法地浸的工艺进行原位浸矿^[84]。KAKSONEN 等^[85]探索了原位环境的水下生物氧化概念, 通过模拟地下曝气提高微生物活性促进铁的氧化和减少单质硫的堆积, 报道了微生物地浸的可行性。ABDULLA 等^[86]从埃及矿石中提取放线菌菌株, 通过对含铀的砂岩、花岗岩和锰矿进行无菌和有菌的室内摇瓶实验发现, 利用放线菌提取铀相比于传统化学工艺可以减少污染, 经济效益更高。原核工业第六研究所在 512 矿床进行了用菌液代替双氧水的试验^[87]。试验结果表明, 两者浸铀效果相近, 利用微生物作为氧化剂代替双氧水是完全可行的, 且成本降低 70%。南华大学先后在新疆某铀矿开展生物浸铀试验研究, 关于细菌在低温条件下存活和生物反应器的设计方面做出了一定贡献^[58]。针对 512 矿床难浸铀资源的回收问题, 东华理工大学先后在该矿床新采区和老采区进行了“两段法”生物地浸采铀试验, 即通过地表设施培养生产菌液作为溶浸液注入矿层进行浸铀, 新块段“4 注 1 抽”生物地浸试验铀浓度比酸浸提高 3.7 倍, 老采区采用“6 注 2 抽”和“11 注 6 抽”生物地浸采铀试验铀浓度比酸法提高 60%~170%。该工艺于 2013 年在 512 矿床进行推广应用, 取得了显著优于酸法的效果, 但菌液生产能力不足成为规模化应用的制约瓶颈, 需要建设庞大的地表设施才能满足采区规模的生产需求, 为破解这一难题, 本文作者之一的周义朋及其团队提出在矿层

原位培养繁殖铁/硫氧化细菌进行地浸采铀的技术思路,以实现生物地浸技术产业化应用,目前野外试验已取得阶段性成果,在提高地下菌密度、菌活性以及浸铀增效等方面取得了理想效果。

5 展望

虽然微生物浸出在应用研究、基础研究方面取得了一定的成果,未来发展很有前景,但是对微生物浸矿的浸矿菌株培养、扩大工业实用性及复杂的机制等方面仍需进行深入研究。

1) 对于微生物浸出技术,高性能浸矿菌种的选育尤为重要,现仍是嗜酸微生物在生物冶金方面应用的瓶颈之一。目前仍需要加强耐重金属离子、耐寒、耐高温等高活性浸矿微生物筛选驯化及嗜酸异养微生物的选育与浸矿的应用研究。

2) 加深对浸矿机理的研究。铀矿物与浸铀微生物的相互作用是否存在直接作用机制还存在争论。事实上,铀矿的生物浸出是一种在极端酸性条件下,发生在铀矿物-溶浸液(含菌溶液)界面的相互作用过程,是一个亟待加强研究的新领域。可以重点对硫酸介质中矿物界面物理化学和矿物学特征以及目标铁(硫)氧化还原菌胞外聚合物及其物理化学和生物化学特征进行研究,进而对生物浸出过程中铀矿物-溶浸液(含菌溶液)间的相互作用开展研究。这对帮助我们了解微生物与铀矿之间是否存在直接作用过程及机制以及相互作用界面的物理化学、生物化学特征和矿物形貌变化规律都起到至关重要的作用。

3) 改善生物反应器制约性问题。目前,我国生物地浸铀矿技术,主要是将有价金属回收处理后的尾液在地表氧化槽中通过微生物将 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} , 获得成熟菌液再注入矿层中进行浸铀,即所谓的“两段法”微生物地浸采铀工艺。该工艺虽然可以大幅度提高浸铀效率,但菌液生产能力有限,需要较为庞大的地表生物氧化设施,这是制约该工艺规模化工业应用的瓶颈。在矿层原位植菌进行浸铀浸出是实现生物溶浸技术突破这一瓶颈的重要方向,该技术如果获得突破,将为生物地浸技术在低品位砂岩型铀资源开发中规模化应用铺平道路,并具有广阔的应用前景。

REFERENCES

[1] 陈 薇. 微生物浸出技术研究及其应用现状[J]. 盐业与化工, 2014, 43(12): 8-11.

- CHEN Wei. Research and application of microbial leaching technology[J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 2014, 43(12): 8-11.
- [2] BRIERLEY J A, BRIERLEY C L. Present and future commercial applications of biohydrometallurgy[J]. Hydrometallurgy, 2001, 59: 233-239.
- [3] EHRLICH H L. Past, present and future of biometallurgy[J]. Hydrometallurgy, 2001, 59: 127-134.
- [4] EHRLICH H L. Beginnings of rational bioleaching and highlights in the development of biohydrometallurgy: A brief history[J]. The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection, 2004, 4(2): 102-112.
- [5] WATLING H R. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides—A review[J]. Hydrometallurgy, 2006, 84: 81-108.
- [6] COLMER A R, HINEKEL M E. The role of microorganisms in acid mine drainage: A preliminary report[J]. Science, 1947, 106(2751): 253-256.
- [7] ZIMERLEY S R, WILSON D G, PRATER J D. Cycle leaching process employing iron oxidizing bacteria: US Patent, 2829964[P]. 1958.
- [8] TUOVINEN O H, BHATTI T M. Microbiological leaching of uranium ores[J]. Minerals and Metallurgical Processing, 1999, 16(4): 51-60.
- [9] MILLER P C. Large scale bacterial leaching of a copper-zinc ore in situ[C]// LAWRENCE R W. Proceedings of the Sixth International Symposium on Biohydrometallurgy. Vancouver: Fundamental and Applied Biohydrometallurgy, 1985: 215-239.
- [10] 尹升华, 吴爱祥, 王洪江, 韩 斌. 微生物浸出低品位矿石技术现状与发展趋势[J]. 矿业研究与开发, 2010, 30(1): 46-49.
- YIN Sheng-hua, WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang, HAN Bin. Current status and present situation and developing trend of low-grade ore bioleaching technology[J]. Mining Research and Development, 2010, 30(1): 46-49.
- [11] 肖碧泉, 阳奕汉, 陈 立, 何小同, 马良彬, 陈箭光, 刘春招. 氧化亚铁硫杆菌的吸附尾液驯化试验[J]. 铀矿冶, 2016, 35(4): 275-281.
- XIAO Bi-quan, YANG Yi-han, CHEN Li, HE Xiao-tong, MA Liang-bin, CHEN Jian-guang, LIU Chun-zhao. Domestication test of *Thiobacillus ferrooxidans* by absorbed uranium tailing solution[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2016, 35(4): 275-281.
- [12] 孙占学, 刘金辉, 刘亚洁, 李 江, 陈功新, 王学刚, 李学礼, 史维浚. 硬岩铀矿生物堆浸研究进展[J]. 中国矿业,

- 2012, 21(增刊): 422–423.
- SUN Zhan-xue, LIU Jin-hui, LIU Ya-jiang, LI Jiang, CHEN Gong-xin, WANG Xue-gang, LI Xue-li, SHI Wei-jun. Latest development in uranium bio-heap leaching of hard rock-type uranium ores in China[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(zk): 422–423.
- [13] 肖芳欢. 三二〇铀矿床改用留矿淋浸采矿法可行性初探[J]. 铀矿开采, 1990(1): 7–11.
- XIAO Fang-huan. A preliminary study on the feasibility of retaining ore by spraying leaching method for 320 uranium deposit[J]. Uranium Mining, 1990(1): 7–11.
- [14] 杨洪英, 杨立. 细菌冶金学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 163–184.
- YANG Hong-ying, YANG Li. Bacterial metallurgy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 163–184.
- [15] 张在海, 王淀佐, 邱冠周, 胡岳华. 细菌浸矿的细菌学原理[J]. 湿法冶金, 2000, 19(3): 16–21.
- ZHANG Zai-hai, WANG Ding-zuo, QIU Guan-zhou, HU Yue-hua. The bacteriological fundamental of bacterial leaching[J]. Hydrometallurgy of China, 2000, 19(3): 16–21.
- [16] 张析, 王军, 王进龙. 生物浸出技术及其应用研究进展[J]. 世界有色金属, 2016(7): 110–112.
- ZHANG Xin, WANG Jun, WANG Jin-long. Research progress of bioleaching technology and its application[J]. World Nonferrous Metal, 2016(7): 110–112.
- [17] SAND W, GEHRKE T, HALLMANN R, SCHIPPERS A. Sulfur chemistry, biofilm, and the (in)direct attack mechanism—A critical evaluation of bacterial leaching[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1995, 43: 961–966.
- [18] SILVERMAN M P, EHRLICH H L. Microbial formation and degradation of minerals[J]. Advances in Applied Microbiology, 1964, 6: 153–206.
- [19] ROHWERDER T, GEHRKE T, KINZLER K, SAND W. Bioleaching review part A: Progress in bioleaching: Fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2003, 63(3): 239–248.
- [20] VERA M, SCHIPPERS A, SAND W. Progress in bioleaching: Fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation—part A[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(17): 7529–7541.
- [21] SCHIPPERS A, JOZSA P G, SAND W. Sulfur chemistry in bacterial leaching of pyrite[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1996, 62(9): 3424–3431.
- [22] SCHIPPERS A, ROHWERDER T, SAND W. Intermediary sulfur compounds in pyrite oxidation: Implications for bioleaching and biodepyritization of coal[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1999, 52(1): 104–110.
- [23] SCHIPPERS A, SAND W. Bacterial leaching of metal sulfides proceeds by two indirect mechanisms via thiosulfate or via polysulfides and sulfur[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1999, 65(1): 319–321.
- [24] SCHIPPERS A, JOZSA P G, KOVACS Z M, JELEA M, SAND W. Large-scale experiments for microbiological evaluation of measures for safeguarding sulfidic mine waste[J]. Waste Manage, 2001, 21(2): 139–146.
- [25] 杨洪英, 杨立, 魏绪钧. 氧化亚铁硫杆菌(SH-T)氧化毒砂的机理[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(2): 323–327.
- YANG Hong-ying, YANG Li, WEI Xu-jun. Mechanism on biooxidation of arsenopyrite with *Thiobacillus ferrooxidans* strain SH-T[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(2): 323–327.
- [26] POGLIANI C, CURUTCHET G, DONATI E, TEDESCO P H. A need for direct contact with particle surfaces in the bacterial oxidation of in the absence of a chemical lixiviant[J]. Biotechnology Letters, 1990, 12(7): 515–518.
- [27] 焦学然, 孙占学, 刘思维, 陈功新, 刘亚洁, 李江. 酸度及酸化介质对铀矿石微生物浸出酸化的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2014(4): 33–37.
- JIAO Xue-ran, SUN Zhan-xue, LIU Si-wei, CHEN Gong-xin, LIU Ya-jie, LI Jiang. Effects of acidity and medium on acidification of uranium bioleaching[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2014(4): 33–37.
- [28] SAND W, GEHRKE T. Extracellular polymeric substances mediate bioleaching/biocorrosion via interfacial processes iron(III) ions and acidophilic bacteria[J]. Research in Microbiology, 2006, 157(1): 49–56.
- [29] PAL S, PRADHAN D, DAS T, SUKLA L B, CHAUDHURY G R. Bioleaching of lowgrade uranium ore using *Acidithiobacillus ferrooxidans*[J]. Indian Journal of Microbiology, 2010, 50(1): 70–75.
- [30] MUNOZ J A, GONZBLEZ F, BLIZQUEZ M L, BALLESTER A. A study of the bioleaching of a Spanish uranium ore. Part I: A review of the bacterial leaching in the treatment of uranium ores[J]. Hydrometallurgy, 1995, 38(1): 39–57.
- [31] OLSON G J, BRIERLEY J A, BRIERLEY C L. Bioleaching review part B: Progress in bioleaching: Applications of microbial processes by the minerals industries[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2003, 63(3): 249–257.
- [32] HAMIDIAN H, REZAI B, MILANI S A, VAHABZADE F, SHAFARIE S Z. Microbial leaching of uranium ore[J]. Asian Journal of Chemistry, 2009, 21(8): 5808–5820.

- [33] 陈 向, 廖德华. 铀矿石生物浸出机理及国内外工艺应用研究现状[J]. 中国资源综合利用, 2012, 30(1): 34–36.
CHEN Xiang, LIAO De-hua. Study on bacteria leaching mechanism of uranium ore and status ore of application at home and abroad[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2012, 30(1): 34–36.
- [34] DISPIRITO A A, TALNAGI JR J W, TUOVINEN O H. Accumulation and cellular distribution of uranium in *Thiobacillus ferrooxidans*[J]. Archives of Microbiology, 1983, 135: 250–253.
- [35] SOLJANTO P, TUOVINEN O H. A microcalorimetric study of U(IV)-oxidation by *Thiobacillus ferrooxidans* and ferric-iron[C]// TRUDINGER P A. Biogeochemistry of Ancient and Modern Environments. Heidelberg: Springer, 1980: 469–475.
- [36] KALINOWSKI B E, OSKARSSON A, ALBINSSON Y, JOHANNA A, JENSEN A O, ANDLID T, PEDERSEN K. Microbial leaching of uranium and other trace elements from shale mine tailings at Ranstad[J]. Geoderma, 2004, 122: 177–194.
- [37] ZAMMIT C M, BRUGGER J, SOUTHAM G, REITH F. In situ recovery of uranium-the microbial influence[J]. Hydrometallurgy, 2014, 150: 236–244.
- [38] LOVLEY D R, PHILIPS E J P, GORBY Y A, LANDA E R. Microbial reduction of uranium[J]. Nature, 1991, 350(6317): 413–416.
- [39] LOVLEY D R, PHILLIPS E J P. Reduction of uranium by *Desulfovibrio desulfuricans*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1992, 58(3): 850–856.
- [40] LOVLEY D R, PHILLIPS E J P. Reduction of chromate by *Desulfovibrio vulgaris* and its *c3 cytochrome*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1994, 60(2): 726–728.
- [41] SHARP J O, LEZAMA-PACHECO J S, SCHOFIELD E J, JUNIER P, ULRICH K U, CHINNI S, VEERAMANI H, MARGOT-ROQUIER C, WEBB S M, TEBO B M, GIAMMAR D E, BARGAR J R, BERNIER-LATMANI R. Uranium speciation and stability after reductive immobilization in aquifer sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2011, 75(21): 6497–6510.
- [42] SUZUKI Y, KELLY S D, KEMNER K M, BANFIELD J F. Direct microbial reduction and subsequent preservation of uranium in natural near-surface sediment[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, 71(4): 1790–1797.
- [43] LIU J X, XIE S B, WANG Y H, LIU Y J, CAI P L, XIONG F, WANG W T. U(VI) reduction by *Shewanella oneidensis* mediated by anthraquinone-2-sulfonate[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(12): 4144–4150.
- [44] 李洪枚, 柯家骏. Cu^{2+} 对氧化亚铁硫杆菌生长活性的影响[J]. 黄金, 2000, 21(6): 27–29.
LI Hong-mei, KE Jia-jun. Effect of Cu^{2+} on the growth and activity of *Thiobacillus ferrooxidans*[J]. Gold, 2000, 21(6): 27–29.
- [45] 李洪枚, 柯家骏. Ni^{2+} 和 Co^{2+} 对氧化亚铁硫杆菌活性的影响[J]. 有色金属, 2000, 52(1): 49–51.
LI Hong-mei, KE Jia-jun. Effect of Ni^{2+} and Co^{2+} on activity of *Thiobacillus ferrooxidans*[J]. Nonferrous Metals, 2000, 52(1): 49–51.
- [46] 李洪枚, 柯家骏. Mg^{2+} 对氧化亚铁硫杆菌生长活性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(4): 576–578.
LI Hong-mei, KE Jia-jun. Effect of Mg^{2+} on growth and activity of *Thiobacillus ferrooxidans*[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(4): 576–578.
- [47] 王清良, 邱冠周, 余润兰, 胡鄂明, 张洪灿, 熊 骁. 地浸采铀溶液中共存离子对氧化亚铁硫杆菌活性的影响[J]. 中国矿业, 2015, 24(6): 116–119.
WANG Qing-liang, QIU Guan-zhou, YU Run-lan, HU E-ming, ZHANG Hong-chan, XIONG Xiao. Effects of coexisting ions on activity of *Thiobacillus ferrooxidans* in in-situ leaching of uranium[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(6): 116–119.
- [48] 李立松. 嗜酸性硫杆菌的耐氟培养及其在重金属浸出中的应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 19–33.
LI Li-song. Study on fluoride resistant culture of *acidithiobacillus* and its application in heavy metal leaching[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016: 19–33.
- [49] 李广悦, 刘玉龙, 丁德馨, 王有团, 王永东, 聂小琴, 胡南. 氧化亚铁硫杆菌耐酸耐氟紫外线诱变的研究[J]. 铀矿冶, 2009, 28(2): 76–80.
LI Guang-yue, LIU Yu-long, DING De-xin, WANG You-tuan, WANG Yong-dong, NIE Xiao-qing, HU Nan. Studies on ultraviolet mutation of *Thiobacillus ferrooxidans*[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2009, 28(2): 76–80.
- [50] 李 江, 饶 军, 刘亚洁, 孙占学, 李学礼, 史维浚. 高氟铀矿石微生物堆浸工业试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2011(7): 26–29.
LI Jiang, RAO Jun, LIU Ya-jie, SUN Zhan-xue, LI Xue-li, SHI Wei-jun. Industrial bio-heap leaching of uranium ores rich in fluorite[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2011(7): 26–29.
- [51] 刘顺亮, 孙占学, 史维浚, 李泽兵, 陶 峰, 潘 昕. 含氯浸铀尾液对混合浸铀菌株生长动力学影响的研究[J]. 有

- 色金属(冶炼部分), 2018(8): 32–36.
- LIU Shun-liang, SUN Zhan-xue, SHI Wei-jun, LI Ze-bing, TAO Feng, PAN Xin. Effect of chlorine ion concentration on growth kinetics of mixed bacterium in uranium bioleaching[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(8): 32–36.
- [52] 刘顺亮, 李泽兵, 史维浚, 蒋亚飞, 张晓玲, 孙占学. 特殊离子对嗜酸性铁氧化混合菌活性的影响[J]. 稀有金属, 2019, 43(8): 854–862.
- LIU Shun-liang, LI Ze-bing, SHI Wei-jun, JIANG Ya-fei, ZHANG Xiao-ling, SUN Zhan-xue. Effect of special ions on the activity of acidophilic ferric oxide mixtures[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2019, 43(8): 854–862.
- [53] 胡凯光, 王清良, 刘迎九, 史文革, 胡士河, 胡银才, 方遒. 381 地浸矿山细菌氧化作用扩大试验[J]. 铀矿冶, 1998, 18(2): 90–96.
- HU Kai-guang, WANG Qing-liang, LIU Ying-jiu, SHI Wen-ge, HU Shi-he, HU Yin-cai, FANG Qiu. On Bacteria oxidizing enlargement scale test for uranium in-situ leaching at 381 mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1998, 18(2): 90–96.
- [54] 袁 檬, 翁沁玉, 卢进登. 嗜酸性氧化亚铁硫杆菌低温诱变试验研究[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2016, 38(6): 557–560.
- YUAN Meng, WENG Qin-yu, LU Jin-deng. Experimental study on ultraviolet mutation of *Acidithiobacillus ferrooxidans* at low temperature[J]. Journal of Hubei University (Natural Science), 2016, 38(6): 557–560.
- [55] 张德诚, 谢 凌, 罗学刚. 低温驯化氧化亚铁嗜酸硫杆菌强化浸出黄铜矿的研究[J]. 材料研究与应用, 2008, 2(1): 51–54.
- ZHANG De-cheng, XIE Ling, LUO Xue-gang. The research on accelerating bioleaching rate at low temperature with the domesticated *Acidithiobacillus ferrooxidans*[J]. Materials Research and Application, 2008, 2(1): 51–54.
- [56] 王清良, 胡鄂明, 李锦鹏, 阳奕汉, 蒋小辉, 徐益群, 邱冠周. 地浸采铀细菌浸出试验研究[J]. 矿冶工程, 2010, 30(4): 5–8.
- WANG Qing-liang, HU E-ming, LI Jin-peng, YANG Yi-han, JIANG Xiao-hui, XU Yi-qun, QIU Guan-zhou. Experimental research on bacterial leaching in in-situ leaching mining of uranium[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2010, 30(4): 5–8.
- [57] FOWLERT A, HOMESPR R, CRUNDWELLF K. Mechanism of pyrite dissolution in the presence of *Thiobacillus ferrooxidans*[J]. Applied and environmental Microbiology, 1999, 65(7): 2987–2993.
- [58] 周洪波, 毛 峰, 王玉光. 嗜酸微生物与生物冶金技术[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(2): 269–276.
- ZHOU Hong-bo, MAO Feng, WANG Yu-guang. Acidophilic microorganisms and bioleaching technology[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(2): 269–276.
- [59] 李宏煦, 刘晓荣, 邱冠周, 胡岳华. 驯化氧化亚铁硫杆菌浸出废铜矿中铜的研究[J]. 矿冶工程, 2001, 21(1): 40–42.
- LI Hong-xu, LIU Xiao-rong, QIU Guan-zhou, HU Yue-hua. Copper leaching from discarded copper minerals using acclimatized *T. Ferrooxidans*[J]. Mining and metallurgical engineering, 2001, 21(1): 40–42.
- [60] 龙中儿, 黄运红, 蔡昭铃, 丛 威, 欧阳藩. 低 pH 的氧化亚铁硫杆菌选育及氧化硫酸亚铁初步研究[J]. 过程工程学报, 2002, 2(5): 415–419.
- LONG Zhong-er, HUANG Yun-hong, CAI Zhao-ling, CONG Wei, OU Yang-fan. Adaption of *Thiobacillus ferrooxidans* tolerating low pH and biooxidation of ferrous sulphate[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2002, 2(5): 415–419.
- [61] SCHRENK M O, EDWARDSK K J, GOODMAN R M, HAMERS R J, BANFIELD J F. Distribution of *Thiobacillus ferrooxidans* and *Leptospirillum ferrooxidans*: Implications for generation of acid mine drainage[J]. Science, 1998, 279(5356): 1519–1522.
- [62] 刘亚洁, 李 江, 陈功新, 刘 艳. 紫外线诱变获得耐极低 pH 的氧化亚铁硫杆菌突变株[J]. 有色金属(冶炼部分), 2005(3): 6–9.
- LIU Ya-jie, LI Jiang, CHEN Gong-xin, LIU Yan. An *Acidobacillus ferrooxidans* mutant tolerating the extremely low pH obtained by ultraviolet mutagenesis[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2005(3): 6–9.
- [63] 周义朋, 沈照理, 何江涛, 刘金辉, 史维浚. 某砂岩型铀矿床矿石微生物浸出试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2014(10): 54–56.
- ZHOU Yi-peng, SHEN Zhao-li, HE Jiang-tao, LIU Jin-hui, SHI Wei-jun. Bioleaching of uranium ore from sand-type uranium deposit[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2014(10): 54–56.
- [64] 胡凯光, 王清良, 廖建军, 黄仕元. 通气量影响细菌快速氧化亚铁的探讨[J]. 中国矿业, 2003, 12(6): 54–56.
- HU Kai-guang, WANG Qing-liang, LIAO Jian-jun, HUANG Shi-yuan. Study on the air flow's impact on quick oxidization of Fe^{2+} by bacteria[J]. China Mining Magazine, 2003, 12(6): 54–56.
- [65] 戴艳霞, 刘宏伟, 廖立琴, 刘学端. 硫酸铁对嗜酸氧化亚铁硫杆菌铁代谢基因表达的影[J]. 现代生物医学进展,

- 2009, 9(21): 4010–4014.
- DAI Yan-xia, LIU Hong-wei, LIAO Li-qin, LIU Xue-duan. Influence of ferric sulphate on expression of genes involved in iron metabolism in *Acidithiobacillus ferrooxidans*[J]. Progress in Modern Biomedicine, 2009, 9(21): 4010–4014.
- [66] 刘元东. 嗜酸氧化亚铁硫杆菌浸矿过程铁硫代谢体系的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008: 60–95.
- LIU Yuan-dong. Study on the system of iron and sulfur metabolism of the process of *Acidithiobacillus ferrooxidans* leaching minerals[D]. Changsha: Central South University, 2008: 60–95.
- [67] 梅健, 陶秀祥, 袁鹏慧. 高铁离子浓度环境下氧化亚铁硫杆菌的生长行为[J]. 选煤技术, 2007(3): 14–16.
- MEI Jian, TAO Xiu-xiang, YUAN Peng-hui. *Ferrosoferric oxide Thiobacillus* growing behavior in circumstance of high thick iron ion[J]. Coal Preparation Technology, 2007(3): 14–16.
- [68] 胡凯光, 谭凯旋, 杨仕教, 刘国福, 梁建龙. 微生物浸矿机理和影响因素探讨[J]. 湿法冶金, 2004, 23(3): 113–121.
- HU Kai-guang, TAN Kai-xuan, YANG Shi-jiao, LIU Guo-fu, LIANG Jian-long. Bacteria leaching mechanism and effect factors[J]. Hydrometallurgy of China, 2004, 23(3): 113–121.
- [69] QIU Guang-zhou, FU Bo, ZHOU Hong-bo, LIU Xi, GAO Jian, LIU Fei-Fei, CHEN Xin-hua. Isolation of a strain of *Acidithiobacillus caldus* and its role in bioleaching of chalcopyrite[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2007, 23(9): 1217–1225.
- [70] ZHANG Jing-hong, ZHANG Xu, NI Yong-qing, YANG Xiao-juan, LI Hong-yu. Bioleaching of arsenic from medicinal realgar by pure and mixed cultures[J]. Process Biochemistry, 2007, 42(9): 1265–1271.
- [71] NGUYEN V K, LEE M H, PARK H J, LEE J U. Bioleaching of arsenic and heavy metals from mine tailings by pure and mixed cultures of *Acidithiobacillus spp*[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015, 21: 451–458.
- [72] 李江, 刘亚洁, 周谷春, 车江华. 低品位铀矿石微生物柱浸试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2012(6): 36–39.
- LI Jiang, LIU Ya-jie, ZHOU Gu-chun, CHE Jiang-hua. Column bioleaching of low-grade uranium ore[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2012(6): 36–39.
- [73] 朱艳杰, 庞园涛, 杨柳, 黄建新. 基于铀矿中本源硫杆菌对黄铁矿和铀矿浸出的协同作用[J]. 岩土力学, 2016, 37(s1): 334–340.
- ZHU Yan-jie, PANG Yuan-tao, YANG Liu, HUANG Jian-xin. Synergism effect on leaching pyrite and uranium ore by thiobacillus in sandstone type uranium ore[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(s1): 334–340.
- [74] 冯光志, 石玉, 舒玉凤. 微生物浸出技术及其在尾矿开发中的应用[J]. 生物学杂志, 2016, 33(1): 92–97.
- FENG Guang-zhi, SHI Yu, SHU Yu-feng. Microbial leaching technology and its application in the exploitation of the tailings[J]. Journal of Biology, 2016, 33(1): 92–97.
- [75] 朱宏飞, 李辉, 刘东奇. 三种浸矿细菌协同作用的回顾及展望[J]. 微生物学通报, 2016, 43(12): 2730–2737.
- ZHU Hong-fei, LI Hui, LIU Dong-qi. A review of synergy development and prospect of three leaching bacteria[J]. Microbiology China, 2016, 43(12): 2730–2737.
- [76] GURUNG A, CHAKRABORTY R. The role of *Acidithiobacillus ferrooxidans* in alleviating the inhibitory effect of thiosulfate on the growth of acidophilic *Acidiphilium* species isolated from acid mine drainage samples from Garubathan, India[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2009, 55(9): 1040–1048.
- [77] 熊英, 胡建平, 林滨兰, 郑存江. 氧化亚铁硫杆菌的驯化与诱变选育[J]. 矿产综合利用, 2001(6): 27–30.
- XIONG Ying, HU Jian-ping, LIN Bin-lan, ZHENG Cun-jiang. Study on the domestication and mutagenic selection of *Thiobacillus ferrooxidans*[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2001(6): 27–30.
- [78] BRYAN C G, JOULIAN C, SPOLAORE P, EL ACHBOUNI H, CHALLAN-BELVAL S, MORIN D, D'HUGUES P. The efficiency of indigenous and designed consortia in bioleaching stirred tank reactors[J]. Minerals Engineering, 2011, 24(11): 1149–1156.
- [79] DENG Xin-hui, CHAI Li-yuan, YANG Zhi-hui, TANG Chong-jian, WANG Yang-yang, SHI Yan. Bioleaching mechanism of heavy metals in the mixture of contaminated soil and slag by using indigenous *Penicillium chrysogenum* strain F1[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 248/249: 107–114.
- [80] NGOM B. 赞比亚浸矿微生物的特性及其在生物浸出系统中的作用[D]. 长沙: 中南大学, 2014: 64–82.
- NGOM B. Characterization of leaching microorganisms isolated from Zambia and their roles in bioleaching systems[D]. Changsha: Central South University, 2014: 64–82.
- [81] 李兴华, 陈功新, 孙占学, 刘金辉, 史维浚. 难浸铀矿石微生物浸铀试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(10): 29–32.
- LI Xing-hua, CHEN Gong-xin, SUN Zhan-xue, LIU Jin-hui, SHI Wei-jun. Bioleaching of low grade uranium ore[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2016(10): 29–32.
- [82] 梁升, 王学刚, 孙占学. 铀矿石微生物柱浸串联工艺试

- 验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(5): 22–25.
- LIANG Sheng, WANG Xue-gang, SUN Zhan-xue. Microbial column leaching series test of uranium ore[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2016(5): 22–25.
- [83] 朱 鹏, 陈建昌, 尉小龙, 徐巧兵, 刘巍平. 砂岩型铀矿床地浸采铀工艺方法概述[J]. 采矿技术, 2011, 11(4): 4–6.
- ZHU Peng, CHEN Jian-chang, WEI Xiao-long, XU Qiao-bing, LIU Wei-ping. Overview of in-situ leaching uranium mining process in sandstone type uranium deposits[J]. *Mining Technology*, 2011, 11(4): 4–6.
- [84] 李 江, 刘亚洁, 车江华, 饶 军. 微生物柱浸法从铀矿石堆浸尾渣中回收铀的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2012(11): 37–40.
- LI Jiang, LIU Ya-jie, CHE Jiang-hua, RAO Jun. Uranium recovery from uranium mineral bio-heap residues with microbial column leaching process[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2012(11): 37–40.
- [85] KAKSONEN A H, PERROT F, MORRIS C, REA S, BENVIE B, AUSTIN P, HACKL R. Evaluation of submerged bio-oxidation concept for refractory gold ores[J]. *Hydrometallurgy*, 2014, 141: 117–125.
- [86] ABDULLA H M, TAHERH S, IBRAHIMH A. Bioleaching of uranium from Egyptian rocks using native actinomycete strains[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2017, 35: 91–99.
- [87] 王清良, 胡鄂明, 李锦鹏, 阳奕汉, 蒋小辉, 徐益群, 邱冠周. 地浸采铀细菌浸出试验研究[J]. 矿冶工程, 2010, 30(4): 5–8.
- WANG Qing-liang, HU E-ming, LI Jin-peng, YANG Yi-han, JIANG Xiao-hui, XU Yi-qun, QIU Guan-zhou. Experimental research on bacterial leaching in in-situ leaching mining of uranium[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2010, 30(4): 5–8.

Advances in research on microbial leaching of uranium

WEN Xu-xiang, SUN Zhan-xue, ZHOU Yi-peng, XU Ling-ling, LIU Shun-liang

(State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment,
East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: With the increasing demand of natural uranium, the exploitation of low-grade or complex uranium ores has been attracting more and more attention. The biological leaching is one of the important techniques for exploitation of such uranium resources. At present, heap leaching and in-situ leaching are the main processes for uranium recovery. Numbers of laboratory experiments and field trails show that the microbial leaching is a feasible technique for industrial production of uranium from low-grade or refractory ores. The tolerance of microorganism which has been mutated and acclimated can be improved obviously, and it can be adapted to high fluorine uranium ores, low temperature and high acidity environments. For example, the acclimated bacteria can grow well in mining tails with fluorine content of 2–3.98 g/L, under the condition of low temperature of 8 °C, and in solution of which pH is 1.2–2.0 or even in a higher acidity solution (pH is low to 0.6). Acclimation and induction are common technical ways to improve the adaptability of bacteria species to leaching environment, and indigenous bacterias often have better adaptability to native mining areas. The results also show that there is a synergistic effect between mixed strains and the leaching effect is better than that of single strain. The indirect action of microbial on uranium ore is clear, but the view of direct action of microorganism on uranium ore is still controversial. The mechanism of uranium leaching by microorganism, the study of tolerance, the breeding of bacteria and practical application research of microbial leaching uranium technology were reviewed, especially in the past 20 years. The development of bioleaching of uranium, especially in-situ leaching, was prospected.

Key words: bioleaching of uranium; mechanism of uranium leaching; microorganism tolerance; microbial strain culture

Foundation item: Projects(41772266, 41572231) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(20161BBH80051) supported by the National Basic Research Development Program of Jiangxi Province, China

Received date: 2019-03-01; **Accepted date:** 2019-06-28

Corresponding author: SUN Zhan-xue; Tel: +86-791-83897597; E-mail: sunzhanxue@aliyun.com

(编辑 李艳红)