

外加电场强化生物浸出的研究进展

刘泓伟¹, 王学刚^{1,2}, 龙杰¹, 高璞璞¹, 万子聪¹, 刘超^{1,2}

(1. 东华理工大学 水资源与环境工程学院, 江西 南昌 330013;

2. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013)

[摘要] 在当前能源紧缺、碳达峰与碳中和的背景下,生物浸出技术因其成本低、污染小、操作简便等优点而被广泛地应用于各种矿产资源的提取,但因浸出速率缓慢,严重影响其实际应用。因此本文讨论了外加电场对生物浸出的强化效果,以外加电场对微生物细胞胞外电子传递、细胞渗透性以及群落的影响为例,分析了外加电场强化生物浸出的机理。最后分析了外加电场对浸出过程中金属溶解率、溶液溶质和微生物的渗流能力的影响,提出了如何从电化学强化的角度提升生物浸出效率,为今后该领域的研究提供借鉴与参考。

[关键词] 电场;生物浸出;胞外电子传递;渗流;微生物;金属浸出

[中图分类号] TF803.2⁺1 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2022)05-0073-06

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/TF.2022.05.011

生物浸出是利用微生物或其代谢产物对矿物进行氧化、还原、溶解、吸收等作用,将固相中某些不溶性成分(如金属)分离提取出来的一种技术^[1],具有成本低、污染小、操作简便的特点,是处理低品位矿、废矿、尾矿及表外矿的较佳方法,目前已在铜矿^[2]、铀矿^[3-5]、锌矿^[6]、难处理金矿的预处理^[7]等生产过程中得到应用。然而,生物浸出最大的局限性在于其浸出速率很慢,因此它的实际应用受到了严重限制。若能采用物理、生物或化学方法提高细菌的细胞活性,强化生物浸出过程,将大幅提高资源的利用程度^[8]。外加电场是一种增强细菌活性的电化学生物强化方法,通过施加一定的外加电压,利用电化学反应或者电解反应中产生的大量活性物质强化微生物的细胞活性和生长繁殖速度,从而提高生物浸出反应速率,缩短浸出时间。为此,国内外学者在电化学生物强化方面进行了相关研究工作^[9]。而

在这些研究中使用的电化学设备系统现在被统一命名为生物电反应器(Bioelectrochemical reactor, BER)^[10]。BER与一直受到广泛关注的MFC(微生物燃料电池)不同的是:BER是通过电流作用于微生物,以刺激微生物的代谢。通常BER的设计有2种主要配置——单室和双室,其主要部分由直流电源、电极、液体培养物组成,但结构和组成可能会有很大差异,双室和单室最大的区别就是有无阴/阳离子交换膜;无论是单室还是双室,BER对微生物的代谢生长均具有显著的影响。Yunker等^[11]利用双室BER研究了外加电流对氧化亚铁硫杆菌生长的影响,结果表明,与传统的培养技术相比,在反应器中外加直流电流时,能使细胞产率系数提高8.0倍。Li等^[12]通过构建一个单室BER研究电流对氧化亚铁硫杆菌生长特性的影响,发现在30 mA的电流强度下,84 h内细菌细胞浓度能达到 1.39×10^9 cell/mL,比不使用电流的常规培养方法细菌浓度增速快10倍。

缩短生物浸出时间可大大提高资源化程度,是解决这一技术耗时长度的关键。已有的报道多从初始pH值、初始 Fe^{2+} 浓度、初始 Fe^{3+} 浓度、温度、颗粒大小等内在因素进行考虑,对外场作用如电场等外在因素的研究鲜有报道。因此,本文着重整理了以电场对微生物的刺激作用和浸出过程中的强化效果类

[收稿日期] 2022-06-02

[作者简介] 刘泓伟(1998—),男,湖南常德人,硕士研究生。

[通信作者] 王学刚(1979—),男,甘肃靖远人,博士,教授,主要从事水污染治理技术微生物湿法冶金等工作。

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(52064001),江西省自然科学基金资助项目(20202BAB1203022,20202BAB1213016)。

[引用格式] 刘泓伟,王学刚,龙杰,等.外加电场强化生物浸出的研究进展[J].中国有色冶金,2022,51(5):73-78,85.

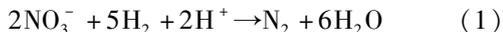
型文献,重点分析电场对细菌胞外电子传递以及对浸出体系中的溶浸液渗透性能的影响,阐述如何从电化学强化角度提升生物浸出效率。

1 外加电场对微生物的影响机制

1.1 外加电场对强化微生物作用的机理

自浸矿微生物被发现以来,细菌与矿物间的作用机制就一直备受关注。2003年,Crundwell^[13]提出了一套完整生物浸出理论,被许多科学学者所接受,微生物直接或间接利用其代谢物、酶、胞外聚合物等与金属/金属氧化物发生氧化、还原、络合等作用而实现金属离子的浸出,而这一过程涉及电化学反应和微生物代谢的电子传递。外加电场是一种直接或间接强化微生物电子传递和微生物代谢的新兴技术,在废水处理领域展现了巨大的潜力,而生物浸出的效率与矿堆中微生物的活性息息相关。因此,分析电场对微生物强化作用的机理,将有助于推进电场强化技术在生物浸出的领域的应用。通常在BER中,电场对微生物的强化有2种方式(图1)^[14]。

1)一种方式是利用中介体或部分细菌电子传递链的阴极还原作为细菌的能量来源,细菌通过电子传递链将电子传递到末端还原酶,然后还原被氧化的底物。Nakasono等^[15]采用BER通过控制电位电势强化氧化亚铁硫杆菌的生长,利用电极电化学反应为氧化亚铁硫杆菌提供 Fe^{2+} 能源物质或者将浸出体系中的 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} ,从而增加细菌的生物量。Feleke等^[16]利用BER中的阴极发生的脱氮反应,改变阴极的电位及条件,使附着在系统阴极的微生物以直接或者间接的形式将氢气当成电子的供体来还原硝酸盐,从而提高硝酸盐的降解率,其原理是利用阴极上生成的氢气向细胞提供额外电子供体,其反应途径见公式(1)。



2)另一种方式是BER系统通过直接对终端还原酶进行阳极氧化,或者通过可溶性介质的间接阳极氧化提供连续的合适的电子受体,使微生物能使用可溶性介质作为合适的电子受体来氧化各种还原基质。Tartakovsky等^[17]通过在传统厌氧生物系统中加入电场,使阳极产生氧气创造了微好氧条件,强化了微生物对污染物的降解,使甲烷产量提高了10%~25%,反应器稳定性也得到了提高。Lu

等^[18]利用生物电化学系统强化微生物修复石油烃污染的土壤,发现在阳极附近的土壤总石油烃的去除率(63.5%~78.7%)是常规修复(37.6%~43.4%)的2倍,这是因为电极对电子受体的补充使微生物的生长和代谢增强,缩短了修复周期。

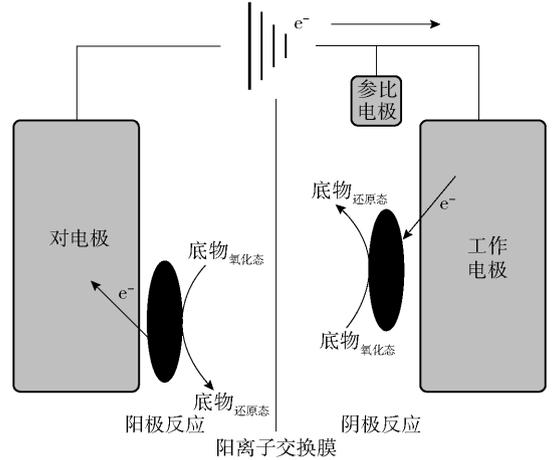


图1 微生物电刺激示意^[14]

Fig. 1 Schematic diagram of microbial electrical stimulation^[14]

1.2 外加电场对胞外电子传递的影响

由于BER的最终目标是为微生物提供必要的电子流,而微生物代谢过程就是一个电子供体与电子受体之间发生电子传递,从而生成水或其他还原型产物,产生大量的三磷酸腺苷(ATP),所以研究微生物和电极之间的电子传递过程对促进微生物的代谢生长变得尤为重要。

微生物与电极之间的电子传递被称之为胞外电子传递,一般分为3种类型(图2)^[19]:①通过细胞与电极表面的相互作用直接进行胞外电子传递^[19];②利用微生物菌毛作为胞外电子传递的纳米导线^[20-21];③通过细胞与电极之间的生物活性穿梭体和介质进行间接胞外电子传递^[22-23]。有研究表明,电极可作为电子源,在微生物和电极之间进行直接胞外电子传递^[24]。Beese等^[25]在利用电化学系统强化产甲烷古菌合成甲烷的过程中发现,古菌可以直接利用石墨阴极的电子进行电子传递,高效地生产甲烷。Wang等^[26]用生物电化学技术和硫酸盐降解菌结合的方式处理硫酸盐废水的过程中发现,当电流为1.5 mA时,硫酸盐去除效率最高,比不加电流时提高了14.9%。这是由于电刺激促进细胞外

物质分泌,加快了生物膜形成,生物膜的形成进而加速了细菌与电极之间的电子转移,加速细菌进入快速生长期,这一结论可通过扫描电镜检测进一步证实。同时电化学阻抗谱(EIS)分析表明生物膜中的硫酸盐还原菌可以直接加速电子转移到阴极的速率。

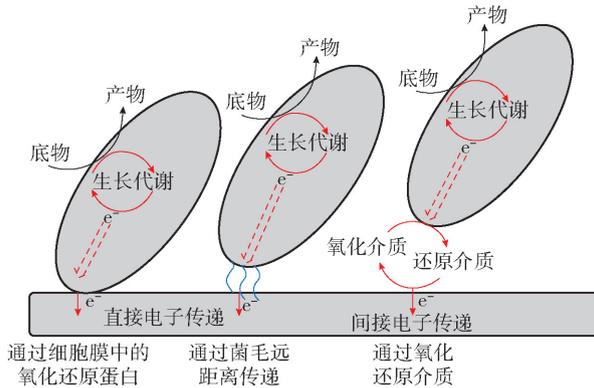


图2 微生物胞外电子传递示意^[19]

Fig.2 Schematic diagram of extracellular electron transfer in microorganisms^[19]

外加电场可以直接或间接地加速微生物胞外电子传递的速率,而电子转移的速度与微生物的能量代谢呈正相关,微生物的能量代谢与生物浸出效率相关。综上所述,生物浸出过程涉及的反应机制、浸出微生物的能量代谢均涉及胞外电子传递,因而研究电化学强化胞外电子传递的机制对于生物浸出具有重要意义。

1.3 外加电场对微生物细胞渗透性的影响

细胞膜是由磷脂构成的半透性膜,能够将生物细胞与外界隔绝,阻挡有害物质和吸收外界营养物质,也可以起到生物细胞之间交流的作用。载体蛋白和通道蛋白对物质的跨膜运输至关重要,其中载体蛋白通过构型变化或结合作用,对物质进行转运。通道蛋白质是由转运蛋白质组成的含水通道,能使溶质经扩散通过膜,是一种被动转运。通道分为持续开放通道与瞬间开放通道,其中瞬间开放通道受到跨膜电势的影响。

有研究表明外加电场可以改变通道蛋白的开放时间和改变细胞膜内外的电势差,从而使得微生物细胞的代谢更快、更加高效^[27-28]。Wu等^[29]在研究氧化亚铁硫杆菌在BER中从电镀污泥中提取重金属的过程中发现,在0.2V电压下生长的氧化亚铁

硫杆菌体积更大,细胞膜更厚、更透明,这表明细菌对额外的电压有响应。由此,可得出细胞形态(如细胞大小、细胞膜通透性等)的变化会影响细胞对铁离子的吸收,导致细胞膜表面电荷分布不同,并导致带电物质的分布、运动和磁取向发生变化,使 Fe^{2+} 进入内膜的时间更早,被氧化的速度更快,有利于细菌的生长。

外加电场能改变细胞通道蛋白的开放时间,加快物质跨膜运输的速率;通过改变细胞膜内外的静息电位,增加细胞膜的通透性,促进物质与细胞间的传输。而微生物细胞对物质的传导速率是影响微生物生长代谢的重要因素,因此研究电场对微生物细胞渗透性影响的机理对提高生物浸出的速率具有重要意义。

1.4 外加电场对微生物群落的影响

在BER中,合适的电场可以对目标微生物进行富集,使得该类微生物在微生物群落结构中的相对丰度增加。还有就是某些微生物可以间接或直接与电极产生作用,使得该种微生物有着较高的生物活性,能抵消一部分极端环境产生的不利影响^[30]。当在降解有些毒性较高的污染物时,在电刺激作用下,微生物会产生更多的酶,使得该种微生物保持较高的活性,增加了该种微生物在群落结构中的相对丰度^[31]。

Tian等^[32]在通过利用生物电化学系统处理有机废水的过程中发现,施加的电压可以影响细菌群落的发展,且在阴极表面观察到大量富集的产氢细菌、醋酸杆菌属和厌氧菌属,有利于提高对低浓度有机废水的厌氧消化效率。Yang等^[33]在通过利用无膜套筒式生物电化学系统处理煤气化废水的过程中发现,在电场的作用下微生物在门水平上没有变化,但在属水平上目标微生物有显著的变化,且对苯酚去除率和COD去除效率分别提高了2.6倍和2.1倍。Wei等^[34]在通过利用BER强化浸出印刷电路板中铜的过程中发现,直流电场能选择性富集氧化亚铁硫杆菌,且其比例由常规的31.6%增加到外加电场的48.1%,证明了直流电场对氧化亚铁硫杆菌活性的强化作用。

综上所述,外加电场可以增加微生物的多样性,提高目标微生物在整个群落的相对丰度,这对于特定菌种的提取富集具有重要研究意义;与此同时,某些微生物还能直接或间接与电极发生作用来提高自

身的活性,抵抗外界环境中不利因素的影响,这对提高微生物的环境适应能力具有重要作用。

2 外加电场对生物浸出的影响

2.1 提高金属的溶解率

生物浸出反应机制有3种:直接浸出、间接浸出、直接与间接协同浸出^[35]。直接浸出是指微生物通过自身细胞表面特有的酶将金属或金属氧化物氧化从而使其溶解,同时微生物获得了生长繁殖所需要的能量。间接浸出是指微生物不与矿物接触,而是通过微生物的代谢产物与金属/金属氧化物发生氧化、还原、络合、酸浸等作用来实现金属离子的浸出。

Ahmadi等^[36]在利用电化学装置生物浸出高品位黄铜矿中发现,电化学生物浸出比常规生物浸出铜的回收率高约35%。主要原因可能是通过外加电场以电化学的方式控制氧化还原电位,显著降低了氧化铁在黄铜矿表面的沉淀,限制了黄铜矿表面钝化层的形成,从而提高了铜的溶解率。Wu等^[29]在研究氧化亚铁硫杆菌在BER中从电镀污泥中提取重金属的过程中发现,电压0.2V的电化学浸出率高于常规浸出,这可能是电场有利于细菌在氧化 Fe^{2+} 的过程中电子发生转移,协同促进了重金属的溶解,从而提高了浸出率。

综上所述,外加电场可以通过控制反应的氧化还原电位,来限制矿物表面钝化层的形成、减少沉淀的产生、提高目标金属的溶解率;通过促进浸矿细菌的电子转移,协同提高金属的溶解率,从而提高生物浸出的浸出率,但目前针对这类的研究鲜有报道。

2.2 提高溶液溶质和微生物的渗流能力

有研究表明,在多孔介质流体中通过施加电场作用流体,渗流速度明显变快^[37],而微生物浸出体系就是一个由固、液、气组成的多孔介质体系。微生物和所需要的营养物质均以溶质的形式存在于溶浸液中,并以溶浸液为载体在矿石孔隙网络中进行传输,所以溶浸液渗透性能是影响微生物浸出效率的主要因素之一^[38]。

左恒等^[39]在研究外加电场对提高微生物浸矿性能影响的试验中发现,微生物在电场作用下渗流能力明显增强,且微生物渗流速度随电场强度的增加而递增,这是由于作用在微生物溶液上的电能不仅可以转化为流体的动能,还能克服溶液渗流阻力。

胡凯建等^[40]在研究电场改善细粒级尾矿浸出渗透效果的试验中发现,电场可以改变浸出体系内部的双电层结构,扩大渗流通道,同时双电层中的离子在电场作用下加速迁移并带动渗流液运动,渗流速度加快,同时打通某些“盲区”封闭的通道,改善了浸出体系的渗透效果。在此基础上王少勇等^[41]在研究外加电场对细粒散体浸堆渗透性影响的试验中发现,通电的柱子浸出液流出的体积比不通电的大,这是由于电场作用能够降低双电层厚度,使渗流通道的截面积增加,降低溶液渗流阻力,从而溶浸液的渗流速度增大;其次,电场对颗粒微孔隙间及渗流盲区的毛细水起到电渗驱动作用,促进不动液的流动。王少勇等^[42]在研究电场对尾矿浸出过程中溶质迁移规律影响的试验中发现,电场作用下的溶质迁移是在渗流场与电场共同作用下的耦合迁移,外加电场可改善溶质在浸柱内的均匀性,加快浸出体系被溶质穿透的进程,并且溶质迁移速率随电场强度的增大而增大。这是由于溶质在体系中的迁移主要是依靠电迁移作用,阳极和阴极会分别吸附浸出体系中的阴离子和阳离子,从而影响浸出体系的溶浸液渗透性能。

综上所述,外加电场可以通过改变浸出体系内部的双电层结构,扩大渗流通道,同时加速电子迁移带动渗流液运动,改善浸出体系中溶浸液渗流能力;通过利用电迁移作用吸附浸出体系中的阴离子和阳离子向两极运动,可改善溶质在浸柱内的均匀性;利用电能转化为动能克服溶液的渗流阻力,加快微生物的渗流速度,对提高微生物浸出的浸出效率具有重要意义。

3 结论与展望

随着我国生态文明建设的快速推进,资源节约与综合利用成为矿冶行业发展的重要指导理念。生物浸出技术因其成本低、环境友好、操作简便、经济节约等优点而被广泛地应用于各种矿产资源的开发与利用,但因浸出时间长,严重制约了其实际应用,如何研究出高效、环保、周期短的电场强化生物浸出技术是未来发展的一个重要方向。为了推进电场强化技术在生物浸出领域的应用,还需在以下方面做进一步研究。

1) 外加电场可以直接或间接地加速微生物胞外电子传递的速率,而生物浸出过程涉及的反应机

制、浸出微生物的能量代谢均涉及胞外电子传递。借鉴电场强化生物技术对废水处理的原理与方法,进一步研究外加电场促进细胞胞外电子传递机制,从而提高生物浸出的效率。

2) 外加电场能加快物质跨膜运输的速率,而微生物细胞对物质的传导速率是影响微生物生长代谢的重要因素,故研究电场对微生物细胞渗透性影响的机理,提高浸矿生物的生长活性,对推进生物浸出技术在实际中的应用具有重要意义。

3) 外加电场可以减少浸出过程中沉淀的产生,提高目标金属的溶解率。研究电场促进金属溶解的影响因素,分析电场对浸出体系渗流能力增强的作用,根据生物浸出技术应用中的不足与缺陷,在继续深入探究其浸出机理的基础上,进一步提高生物浸出的效率。

[参考文献]

- [1] BRIERLEY C L. How will biomining be applied in future? [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(6): 1302–1310.
- [2] SHANG H, GAO W, WU B, et al. Bioleaching and dissolution kinetics of pyrite, chalcocite and covellite [J]. Journal of Central South University, 2021, 28(7): 2037–2051.
- [3] WANG X, LIU Y, SUN Z, et al. Heap bioleaching of uranium from low-grade granite-type ore by mixed acidophilic microbes [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2017, 314(1): 251–258.
- [4] WANG X, LI P, LIU Y, et al. Uranium bioleaching from low-grade carbonaceous-siliceous-argillaceous type uranium ore using an indigenous *Acidithiobacillus ferrooxidans* [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2018, 317(2): 1033–1040.
- [5] WANG X, SUN Z, LIU Y, et al. Effect of particle size on uranium bioleaching in column reactors from a low-grade uranium ore [J]. Bioresource Technology, 2019, 281: 66–71.
- [6] 李旭, 高文成, 温建康, 等. 锌的生物浸出技术现状及研究进展 [J]. 工程科学学报, 2020, 42(6): 693–703.
LI Xu, GAO Wencheng, WEN Jiankang, et al. Technology status and research progress of zinc bioleaching [J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(6): 693–703.
- [7] EGAN J, BAZIN C, HODOUIN D. Effect of particle size and grinding time on gold dissolution in cyanide solution [J]. Minerals, 2016, 6:68.
- [8] NANCHARAI Y V, MOHAN S V, LENS P N L. Biological and bioelectrochemical recovery of critical and scarce metals [J]. Trends in Biotechnology, 2016, 34(2): 137–155.
- [9] DOMINGUEZ-BENETTON X, VARIA J C, POZO G, et al. Metal recovery by microbial electro-metallurgy [J]. Progress in Materials Science, 2018, 94: 435–461.
- [10] J, CAMERON, THRASH, et al. Electrochemical stimulation of microbial perchlorate reduction [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(5): 1740–1746.
- [11] YUNKER S B, RADOVICH J M. Enhancement of growth and ferrous iron oxidation rates of *T. Ferrooxidans* by electrochemical reduction of ferric iron. Biotechnol. Bioeng., 1986, 28, 1867–1875.
- [12] LI X, LIU Y, ZENG G, et al. Direct current stimulation of *Thiobacillus Ferrooxidans* bacterial metabolism in a bioelectrical reactor without cation-specific membrane. [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(15): 6035–6038.
- [13] CRUNDWELL F K. How do bacteria interact with minerals? [J]. Hydrometallurgy, 2003, 71(1–2): 75–81.
- [14] THRASH J C, COATES J D. Direct and indirect electrical stimulation of Microbial Metabolism [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(11): 3921–3931.
- [15] NAKASONO S, MATSUMOTO N, SAIKI H. Electrochemical cultivation of thiobacillus ferrooxidans by potential control. Bioelectrochem. Bioenerg, 1997, 43, 61–66.
- [16] FELEKE Z, ARAKI K, SAKAKIBARA Y, et al. Selective reduction of nitrate to nitrogen gas in a biofilm-electrode reactor [J]. Water Research, 1998, 32(9): 2728–2734.
- [17] TARTAKOVSKY B, MEHTA P, BOURQUE J S, et al. Electrolysis-enhanced anaerobic digestion of wastewater [J]. Bioresource technology, 2011, 102(10): 5685–5691.
- [18] LU L, HUGGINS T, JIN S, et al. Microbial metabolism and community structure in response to bioelectrochemically enhanced remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(7): 4021–4029.
- [19] PANKRATOVA G, HEDERSTEDT L, GORTON L. Extracellular electron transfer features of Gram-positive bacteria [J]. Analytica Chimica Acta, 2019, 1076: 32–47.
- [20] SUMMERS Z M, FOGARTY H E, LEANG C, et al. Direct exchange of electrons within aggregates of an evolved syntrophic coculture of anaerobic bacteria [J]. Science, 2010, 330(6009): 1413–1415.
- [21] ROTARU A E, SHRESTHA P M, LIU F, et al. A new model for electron flow during anaerobic digestion: direct interspecies electron transfer to *Methanosarcina* for the reduction of carbon dioxide to methane [J]. Energy & Environmental Science, 2014, 7(1): 408–415.
- [22] TANG J, ZHUANG L, MA J, et al. Secondary mineralization of ferrihydrite affects microbial methanogenesis in *Geobacter-Methanosarcina* cocultures [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2016, 82(19): 5869–5877.
- [23] KATO S, HASHIMOTO K, WATANABE K. Microbial interspecies electron transfer *via* electric currents through conductive minerals [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109(25): 10042–10046.
- [24] KRACKE F, VASSILEV I, KRÖMER J O. Microbial electron

- transport and energy conservation—the foundation for optimizing bioelectrochemical systems[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2015, 6: 575.
- [25] BEESE-VASBENDER P F, GROTE J P, GARRELF S J, et al. Selective microbial electrosynthesis of methane by a pure culture of a marine lithoautotrophic archaeon[J]. *Bioelectrochemistry*, 2015, 102: 50–55.
- [26] WANG K, SHENG Y, CAO H, et al. Impact of applied current on sulfate-rich wastewater treatment and microbial biodiversity in the cathode chamber of microbial electrolysis cell (MEC) reactor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 307: 150–158.
- [27] DENG J, SCHOENBACH K H, BUESCHER E S, et al. The effects of intense submicrosecond electrical pulses on cells[J]. *Biophysical journal*, 2003, 84(4): 2709–2714.
- [28] GOLZIO M, ROLS M P, TEISSIE J. In vitro and in vivo electric field-mediated permeabilization, gene transfer, and expression[J]. *Methods*, 2004, 33(2): 126–135.
- [29] WU P, ZHANG L, LIN C, et al. Extracting heavy metals from electroplating sludge by acid and bioelectrical leaching using *Acidithiobacillus ferrooxidans*[J]. *Hydrometallurgy*, 2020, 191: 105225.
- [30] FENG H, ZHANG X, GUO K, et al. Electrical stimulation improves microbial salinity resistance and organofluorine removal in bioelectrochemical systems[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2015, 81(11): 3737–3744.
- [31] LIU Y, ZHANG Y, QUAN X, et al. Effects of an electric field and zero valent iron on anaerobic treatment of azo dye wastewater and microbial community structures[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 2578–2584.
- [32] TIAN T, QIAO S, YU C, et al. Bio-electrochemically assisting low-temperature anaerobic digestion of low-organic strength wastewater[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 335: 657–664.
- [33] YANG L H, CHENG H Y, DING Y C, et al. Enhanced treatment of coal gasification wastewater in a membraneless sleeve-type bioelectrochemical system[J]. *Bioelectrochemistry*, 2019, 129: 154–161.
- [34] WEI X, LIU D, HUANG W, et al. Simultaneously enhanced Cu bioleaching from E-wastes and recovered Cu ions by direct current electric field in a bioelectrical reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 298: 122566.
- [35] 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.
- [36] AHMADI A, SCHAFFIE M, MANAFI Z, et al. Electrochemical bioleaching of high grade chalcopyrite flotation concentrates in a stirred bioreactor[J]. *Hydrometallurgy*, 2010, 104(1): 99–105.
- [37] 郭俊庆, 康天合, 康健婷, 等. 煤岩流体电动力学研究进展[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019(3): 511–526.
- GUO Junqing, KANG Tianhe, KANG Jianting, et al. Research progress of electrokinetic dynamics of rock and fluid[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019(3): 511–526.
- [38] PETERSEN J. Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores: a brief overview[J]. *Hydrometallurgy*, 2016, 165: 206–212.
- [39] 左恒, 吴爱祥, 王贻明. 电场作用对提高微生物浸矿性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17(7): 1177–1181.
- ZUO Heng, WU Aixiang, WANG Yiming. Effect of electric field on improving leaching ability of microbe[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17(7): 1177–1181.
- [40] 胡凯建, 吴爱祥, 尹升华, 等. 电场改善细粒级尾矿浸出渗透效果试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(10): 3989–3994.
- HU Kaijian, WU Aixiang, YIN Shenghua, et al. Experimental study on effect of electric field on permeability of fine tailings[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2012, 43(10): 3989–3994.
- [41] 王少勇, 吴爱祥, 尹升华, 等. 外加电场对细粒散体浸堆渗透性的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(7): 1864–1870.
- WANG Shaoyong, WU Aixiang, YIN Shenghua, et al. Effect of applied electric field on permeability of fine granules heap[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(7): 1864–1870.
- [42] 王少勇, 吴爱祥, 尹升华, 等. 电场对尾矿浸出过程中溶质迁移规律的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(2): 535–542.
- WANG Shaoyong, WU Aixiang, YIN Shenghua, et al. Effect of electric field on solute transport in tailings leaching process[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2021, 52(2): 535–542.

Research progress on enhanced bioleaching with electric field

LIU Hong-wei¹, WANG Xue-gang^{1,2}, LONG Jie¹, GAO Ying-ying¹, WAN Zi-cong¹, LIU Chao^{1,2}

(1. School of Water Resources and Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

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

Abstract: Under the background of current energy shortage, carbon peaking and carbon neutralization, bioleaching

(下转第 85 页)