



期刊官网扫码浏览



更多信息扫码浏览

用生物技术的钥匙开启矿产资源利用的大门

邱冠周, 刘学端

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 生物冶金教育部重点实验室, 长沙 410083)

摘要: 生物冶金已应用于全球 50 多个国家和地区。中国在国际上最早建立了基于基因组学的冶金微生物量化技术, 实现了微生物浸矿行为研究由表现型向基因型转变; 建立了硫化矿分步氧化的微观化学反应模型, 实现了生物冶金研究从宏观到微观的跨越。生物冶金过程强化技术已在海内外得到大规模工业化应用, 建立了年处理矿石量达 6000 万 t 生物提铜厂; 形成了具有自主知识产权的 CCGRI 生物氧化提金技术, 建成了中国黄金行业的第一座高技术产业化示范工程; 硫化物包裹类铀矿的铀浸出率提高至 96%, 使铀矿开采品位从千分之一降低到万分之三。中国生物冶金已处于世界领先地位, 可使矿产资源利用率从 33% 提高到 96%, 大幅提升中国矿产资源的使用年限。

关键词: 生物技术; 生物冶金; 矿产资源; 浸矿行为

文章编号: 1004-0609(2019)-09-1848-11

中图分类号: TF18

文献标志码: A

在中国最早描述生物湿法冶金的记载是公元前六七世纪的《山海经》“松果之山, 瀍水出焉, 北流注于渭, 其中多铜”; 汉淮南王刘安撰写的《淮南万毕术》已有“白青得铁, 即化为铜”的胆水浸铜记载; 唐、宋年代已有官办的湿法炼铜工厂, 当时最高铜产量达到 100 多万斤每年^[1]。

1670 年有关于西班牙的里奥廷托矿用酸性矿坑水浸出含铜矿石的报道; 1947 年, 首次分离出浸矿细菌嗜酸氧化亚铁硫杆菌; 1958 年, 第一个生物湿法冶金专利成功申请^[2]。与此同时, 中南矿冶学院(现中南大学前身)何复熙教授于 1958 年在选矿楼成立了生物冶金实验室。中国科学院微生物研究所于 1960 年对铜官山铜矿进行铜的生物冶金工业试验研究。1970 年, 他们进行了处理量为 700 t 贫铀矿石的细菌堆浸扩大试验。1976 年, 第一届国际生物湿法冶金大会召开(至今已有 23 届)。1995 年, 中南工业大学(现中南大学)开始进行江西德兴铜矿表外矿废石的生物浸出试验, 并于 1997 年建成了年产 2000 t 的生物湿法提铜厂^[1]。

1999 年, 中南大学与美国橡树岭国家实验室合作开始进行浸矿微生物生态多样性研究。2004 年, 在世界上首次完成了冶金微生物模式菌株嗜酸氧化亚铁硫

杆菌 23270 的全基因组测序。2007 年, 中南大学制订和发布了《嗜酸氧化亚铁硫杆菌及其活性的基因芯片检测方法》的国家标准, 实现了高效浸矿菌种的快速、准确筛选^[3]。2005 年在中南大学和北京有色金属研究院的联合指导下, 中国紫金矿业集团 3 万 t 阴极铜生物提取厂建成, 阴极铜纯度达到国际 A 级标准。2011 年, 中南大学承办的第 19 届国际生物湿法冶金大会, 参会人员超过 500 名。并成立了国际生物湿法冶金学会, 总部设在长沙^[1]。

1 生物冶金对中国有色金属工业发展的意义

随着中国工业化进程的加快, 铜、金、铀等有色金属消费急剧增加, 我国矿产资源储量的保证程度形势严峻, 如铜基本储量保证年限不足 20 年, 金不足 15 年。而且现有有色金属资源的 70% 都属低品位、难处理复杂多金属矿。采用传统选冶技术不能经济有效处理该部分矿产资源, 使得我国金属矿产资源供给处于严重短缺的状况, 成为制约我国经济发展的主要因素之一。

基金项目: 国家重点基础研究计划资助项目(2004CB619200, 2010CB630900); 国家高技术研究发展计划资助项目(2007AA060900, 2012AA061500); 国家自然科学基金委创新群体资助项目(50321402, 50621063)

收稿日期: 2019-07-10; **修订日期:** 2019-08-22

通信作者: 邱冠周, 教授, 博士; 电话: 0731-88879815; E-mail: qgz@csu.edu.cn

生物冶金是利用微生物(细菌、真菌、微藻等)将矿石中的有价金属溶解出来, 通过之后的萃取电积工艺制备高纯金属的新型技术。与其他冶金工艺相比, 生物冶金具有运行成本低, 环境友好(见图 1), 并能有效回收低品位、复杂难处理矿产资源等优势。目前, 已经全球 50 多个国家和地区实施工业应用。

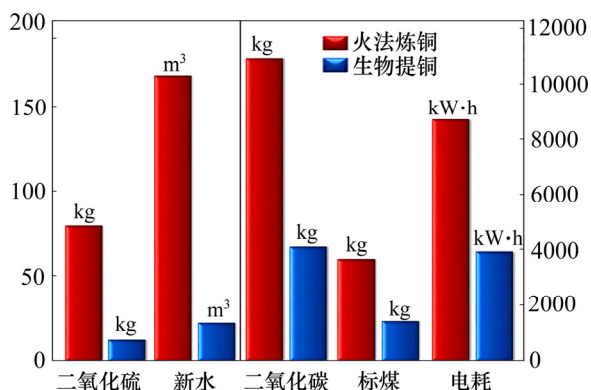


图1 生物提铜与火法炼铜的能耗与排放比较

Fig. 1 Comparison of energy consumption and pollutants emission between copper biohydrometallurgy and copper pyrometallurgy

在铜资源方面: 中国是现今世界第一大铜消费国, 但目前中国矿山自产铜仅占使用量的 20% 左右; 采用生物湿法冶金技术开发低品位的铜资源, 可以使可经济利用铜矿品位最低降至 0.1%, 中国铜资源量增加 2000 万 t 以上, 并应用于非洲等其他国家的低品位资源的开发利用。

在金矿资源方面: 我国目前难处理金矿资源约占已探明黄金储量的 2/3 以上, 开发利用难度非常大, 而生物预处理技术能有效利用这部分难处理金矿资源。随着生物预处理技术的发展, 中国黄金产量连续四年成为世界第一。该项技术的推广应用, 对保持中国黄金产量的世界领先水平 and 参与国际竞争具有重要的意义。

在铀资源方面: 生物冶金技术可使我国大量闲置或废弃的硫化物包裹类铀矿资源得到有效利用, 并希望使铀矿资源开采品位从目前的千分之一降低到万分之三, 从而使铀矿可经济开采储量大大增加。

2 中国生物冶金研究进展

2.1 从宏观到微观

1999 年之前, 我国生物湿法冶金研究仅停留在宏观的层次。高效冶金微生物的筛选主要通过肉眼判断,

选择从猪肝色的矿坑水中挑取样品(见图 2), 然后在合适的培养条件下进行浸矿微生物的培养, 并在显微镜下观察细胞数量(见图 3)。进一步通过浸矿试验测定不同细菌的氧化活性和抗性特征(见图 4)。当溶液 pH 下降(代表具有硫氧化能力)或者溶液颜色变成红色(代表具有亚铁氧化能力)时, 表明获得了较好的冶金微生物。在当时却无法得知为什么冶金微生物具有相应的硫或亚铁氧化能力, 缺乏基因层面的定量判断。

2004 年, 中南大学参加世界上第一个典型冶金微生物嗜酸氧化亚铁硫杆菌 23270 的全基因组测序研究工作(见图 5)。并在获得该菌全部 3217 个基因信息的



图2 猪肝色的酸性矿坑水

Fig. 2 Acid mine drainage with liver-coloured

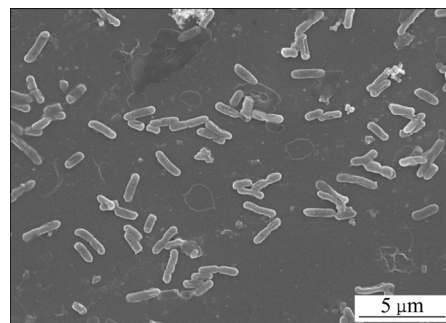


图3 扫描电镜下观察到的细菌

Fig. 3 Bacteria observed under SEM

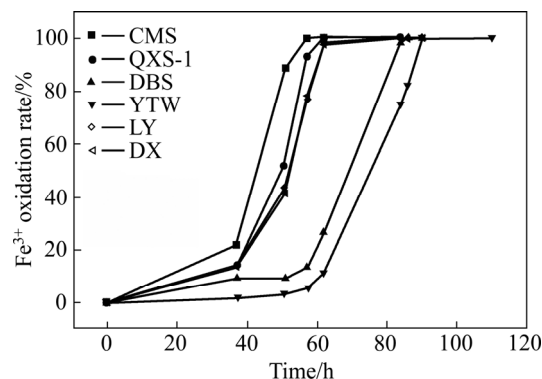


图4 不同 *A. f.* 菌株在氧化活性和抗性等方面的差异

Fig. 4 Bioleaching performance of *A. f.* strains with different oxidation activity and resistance activity and resistance of different *A. f.* strains lead to different leaching effects

基础上,构建了全基因组芯片,通过比较基因组学发现 320 个高氧化活性的基因,其中包括 135 个亚铁氧化、硫氧化以及抗性相关基因(见图 6)^[4],然后制定了《嗜酸氧化亚铁硫杆菌及其活性的基因芯片检测方法》国家标准(GB/T 20929—2007),实现了高效浸矿菌种的快速准确筛选。嗜酸氧化亚铁硫杆菌全基因组图谱及其注解为从基因水平开展浸矿机理奠定了基础,实现了微生物浸矿行为研究由表现型向基因型转变^[4]。

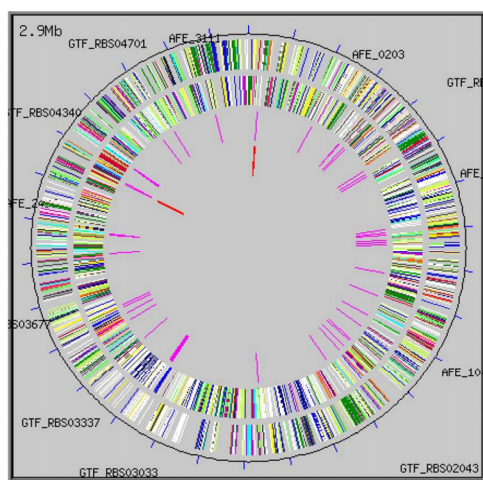


图 5 *A. f.* ATCC 23270 全基因组图谱

Fig. 5 Whole genomic spectrum of *A. f.* ATCC 23270

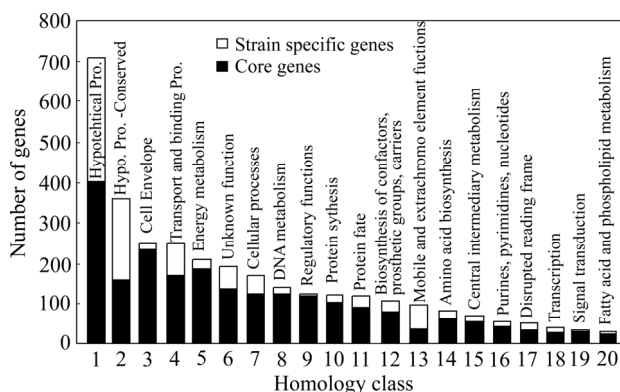


图 6 不同 *A. f.* 菌株共有和特有基因功能分布

Fig. 6 Common and specific gene function distribution of different *A. f.* strains

生物浸出的本质是微生物与矿石相互作用后矿石分步氧化分解,而这种反应主要发生在矿物-溶液-微生物多相界面上。因此,揭示生物冶金体系多相界面作用的微观机制具有重要的意义。从 2008 年开始,中南大学利用同步辐射等先进技术,探明了原生硫化铜矿生物浸出过程中的多种中间产物及其相应的化学反应,建立了硫化矿分步氧化模型(见图 7),阐明了该过程的动力学特性^[5]。确定了 Fe 优先溶解是含铁硫化铜

矿物溶解的初始步骤,发现了 Cu_2S 的生成是原生硫化铜矿溶解的关键步骤,低电位是其转化为 Cu_2S 的关键参数^[6-7]。调整浸出体系中总铁浓度及 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值,维持浸出体系的低电位(430 ± 20 mV)环境,铜的浸出速率可以提高 1 倍以上(见图 8)。

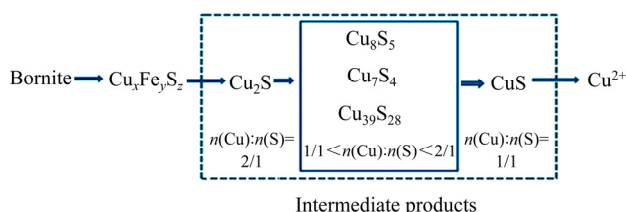


图 7 含铁硫化铜矿物浸出过程的分步氧化模型

Fig. 7 Stepwise oxidation model for bioleaching of copper sulfide containing iron

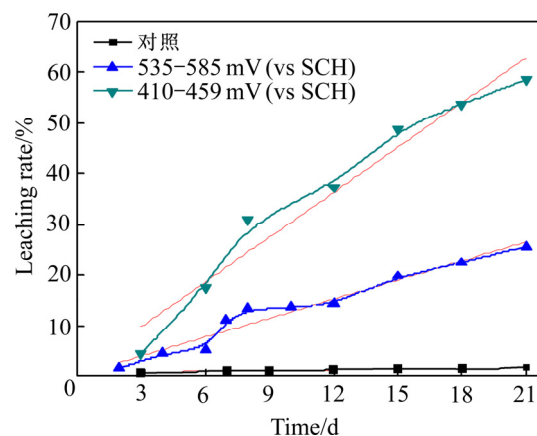


图 8 不同电位条件下铜浸出速率的变化

Fig. 8 Copper bioleaching rate under different potential conditions

2.2 从定性到定量

生物浸出过程中,浸矿微生物种类多、性状与功能差异大、相互作用关系复杂,而且大多数浸矿微生物目前尚不能人工培养,传统的以分离培养为基础的分析技术难以对浸矿微生物进行定量分析和实时监控。此外,由于微生物的功能活动是一种非常微观的作用,传统的生物化学反应测定方法不易定量分析。随着生物学技术的飞速发展,基因和基因组、宏基因组等技术越来越多被应用于生物冶金领域。尤其是基因组技术的应用,使得冶金微生物的定量化有了根本性的变化。从而使冶金微生物研究水平从单菌的单一功能提升到单菌整体功能和菌群整体功能(见图 9)。

采用基因组学方法可实时监测生物堆浸过程中微生物的生态多样性,从而为功能菌群的调控提供理论指导。中南大学于 2008 年在广东梅州玉水硫化铜矿率

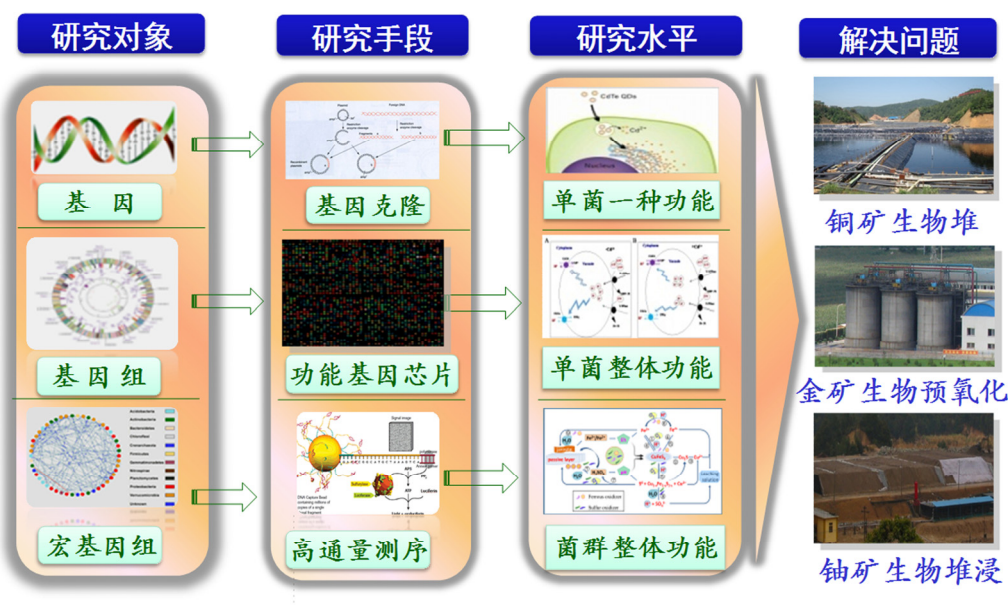


图 9 生物冶金的分子生物学技术

Fig. 9 Molecular biological technique of biohydrometallurgy

先开展低品位铜矿的地下生物堆浸研究, 根据群落多样性研究结果, 通过调整操作参数、定时接种等方法保持功能菌群的活性, 最终显著提高了浸出效率(见图 10)^[8]。

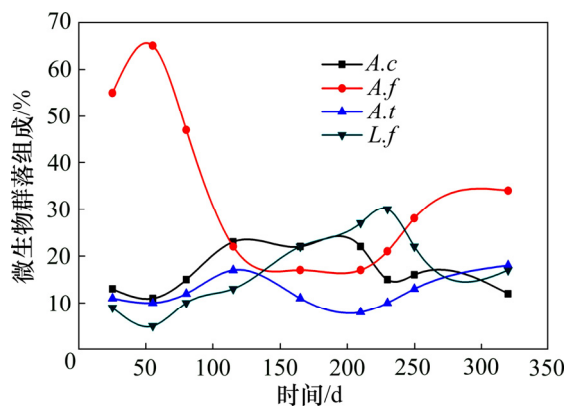


图 10 生物堆浸过程中微生物群落结构及其变化趋势

Fig. 10 Microbial community structure and its change trend during heap bioleaching process

冶金微生物的多样性水平与所采用宏基因组学方法评估技术相关, 多样性参数 OUT 随检测水平提升而明显升高。中南大学对江西德兴铜矿生物堆浸体系微生物多样性监测结果(见图 11~13)表明, 采用传统的克隆文库法测定, 仅有 30~60 个; 采用 454 测序法检测, 其 OUT 数为 200~300 个; 采用 MiSeq 测序法, 其 OTU 数达 1000~2000 个^[9]。

基因芯片技术是微生物群落结构与功能定量化检测的有效手段, 中南大学先后发展了 4 种冶金微生物

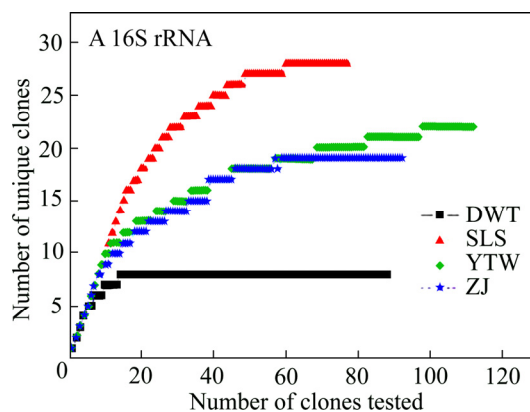


图 11 克隆文库法 OUT 30~60(克隆数 100~200)

Fig. 11 Clone library method OTU 30~60 (clone number 100~200)

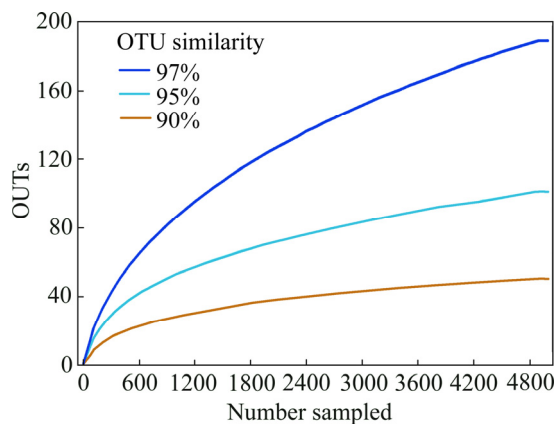


图 12 454 测序 OUT 200~300(Reads 数 5000~8000)

Fig. 12 454 sequencing OUT 200~300 (Reads number 5000~8000)

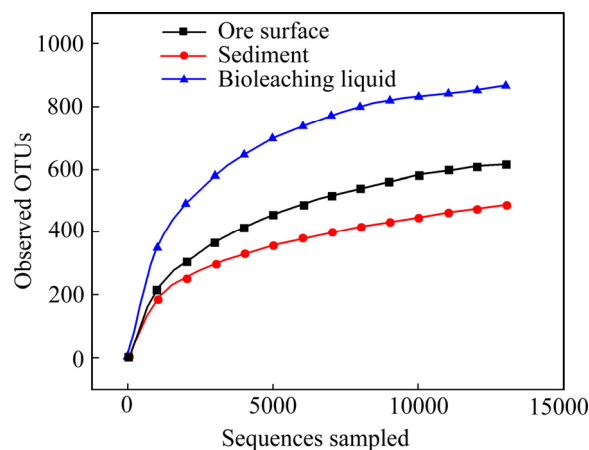


图 13 MiSeq 测序 OTU1000~2000(Reads 数 20000~30000)
Fig. 13 MiSeq sequencing OTU 1000–2000 (Reads number 20000–30000)

基因芯片技术(见表 1)^[10], 分别是可以实时监测复杂体系冶金微生物种群结构与动态的群落基因组芯片技术, 其检测灵敏度达 0.1 ng 基因组 DNA^[11]; 能准确定量分析冶金微生物铁硫氧化等活性的功能基因组芯片技术, 其检测灵敏度达 5 ng 基因组 DNA^[12]; 能快速筛选特定目标基因/基因簇的冶金微生物宏基因组芯片技术, 并利用该技术发现了大量未知的微生物和功能基因^[13]。上述系列基因芯片技术的开发, 实现

表 1 主要冶金微生物基因芯片特征比较^[10]

Table 1 Comparison of microarray characteristics of major bioleaching microorganisms^[10]

芯片类型	探针类型	提供的信息	灵敏度(DNA)	识别能力
群落基因组芯片 CGA	基因组 DNA	种群数量和丰度	0.1 ng	属、种
功能基因芯片 FGA	单个功能基因	种群结构与功能	5 ng	种、株系
宏基因组芯片	质粒 DNA 片段	基因簇	2 ng	新种、新基因

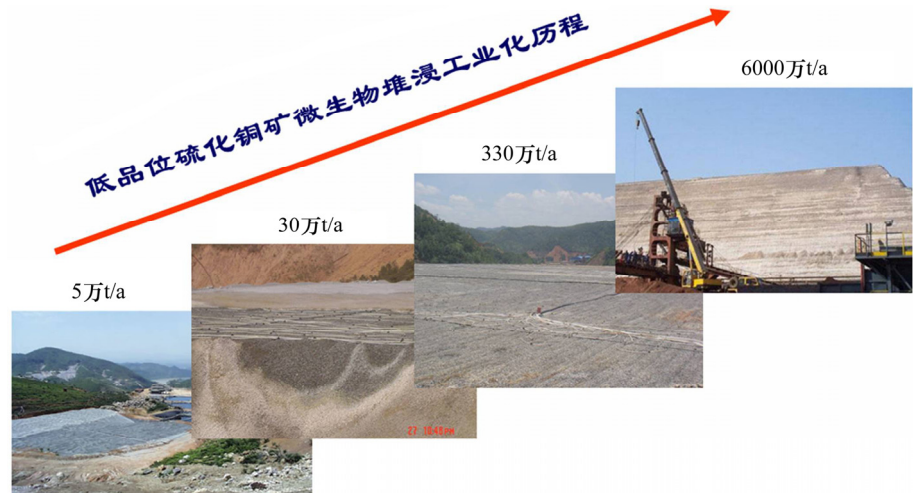


图 14 铜矿生物堆浸工业化应用
Fig. 14 Industrial application of heap bioleaching for copper ore

了冶金微生物群落结构与功能的定量化、准确和快速分析, 突破了硫化矿物氧化溶解机理研究的技术瓶颈。

2.3 从理论到实践

2.3.1 铜矿资源的生物冶金

铜矿是生物冶金技术应用最为广泛的对象之一。堆浸是铜矿生物冶金的主要应用类型。从 1995~2015 年的 30 年间, 铜矿生物堆浸的规模已从我国紫金山铜矿处理量的 5 万 t/a 增加至赞比亚卢安夏的 6000 万 t/a(见图 14)。截止至目前, 生物湿法冶金技术产铜量已超过全球铜产量的 20%^[14–15]。

1) 江西德兴铜矿极低品位铜尾矿的生物湿法冶金技术应用

中国江西德兴铜矿的生物堆浸工艺是生物冶金技术成功应用的典范。江西铜业公司德兴铜矿在几十年的露采过程中, 剥离了大量含铜约 0.05%~0.25% 的废矿石, 其总量超过了 3.5 亿 t, 含铜总量约为 60 万 t。由于该废矿石中的铜主要以原生硫化铜形式存在, 采用传统的选冶方法很难回收其中的铜资源。20 世纪 90 年代, 该公司与中南大学合作开展“德兴低品位硫化矿人工细菌浸出及萃取第三相防治方法研究”与“德兴铜矿低品位细菌浸出菌种改良和催化机理及其工业化应用研究”。通过中南大学先进的菌种定量化技术,

快速筛选获得了氧化活性高、抗有毒离子能力强的高效菌种, 显著提高了铜的浸出率和浸出速率。并建立了一座设计能力为 2000 t 电铜的生物浸出萃取电积工厂(见图 15)^[16-17]。



图 15 江西德兴铜矿微生物冶金工业应用

Fig. 15 Application of biohydrometallurgy in Dexing copper mine, Jiangxi province

2) 福建紫金山铜矿低品位次生硫化矿生物冶金技术及其应用

紫金山铜矿位于福建省上杭县, 该地已探明硫化铜矿储量 2.4 亿 t, 铜的平均品位为 0.063%。矿石中铜矿物以次生硫化矿为主, 主要包括辉铜矿、铜蓝和

硫砷铜矿等。由于铜品位非常低, 传统的浮选和熔炼工艺不能经济有效地处理这种矿石, 而生物湿法冶金工艺是一条可行之路。与传统工艺相比, 生物冶金技术不仅可以扩大资源储量, 减少能源消耗, 而且还可以减少酸化和温室效应, 具有较大的经济、社会及生态效益(见表 2)。紫金山铜矿已陆续建成产量 1 万 t、2 万 t 和 5 万 t/a 的低品位次生硫化矿生物冶金生产线^[18-19]。

3) 赞比亚谦比希铜矿

生物冶金研究成果不仅在国内取得了较好的效果, 还进一步推广到了国外。2010 年赞比亚矿业部与中南大学签订战略框架合作协议, 建立了“中国有色集团—中南大学赞比亚生物冶金技术产业化示范基地”, 采用生物冶金技术处理该国大量的表外矿及尾矿资源。

2011 年 3 月, 赞比亚谦比希湿法冶炼公司同中南大学合作开展低品位铜废矿石的生物堆浸工业研究。通过筛选、富集及驯化当地浸矿微生物, 使微生物较快适应了堆场环境, 并保持良好生长^[20]。针对复配微生物群落扩大培养速度慢、群落结构稳定性差、大规模堆场细菌定殖难的问题, 开发了以工业物料为培养基质的菌群高效扩培与快速定殖“三段法”, 培养规模从 5 L、50 L、1 m³、20 m³ 提高到 150 m³(见图 16)。将培养后的菌种接种到矿堆中, 可使整个堆浸体系细胞浓度显著提高, 从而缩短堆浸时间, 提高铜浸出速

表 2 生物提铜工艺与常规闪速炉炼铜对比

冶炼方法	资源/t	能耗		新水/m ³	CO ₂ /kg	SO ₂ /kg
		电耗/(kW·h)	标煤/kg			
生物提铜	307.46	3915.14	1402.22	21.76	4090.57	11.93
火法炼铜	278.41	8706.90	3656.24	168.09	10909.29	79.04
相对量	110.43%	44.97%	38.35%	12.85%	37.50%	15.09%

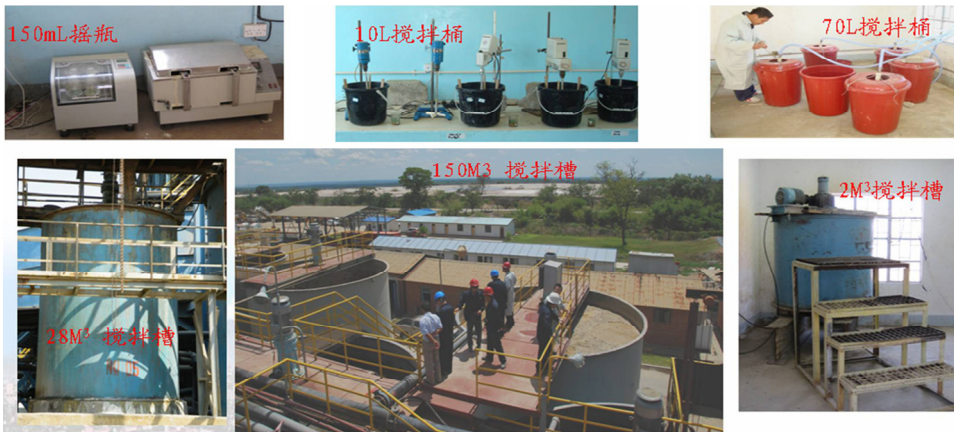


图 16 赞比亚谦比希铜矿浸矿微生物的扩大培养流程

Fig. 16 Expanded culture process of microorganisms from Chambishi copper mine in Zambia

率和浸出率^[21]。

在 60 万 t 低品位铜矿石的生物堆浸工业生产中，2 个月内铜的浸出率达到 50%，浸出液通过后续的萃取-电积工艺，获得纯度 99.99% 的阴极铜。在不改变原来工程条件的基础上，现有的生物冶金技术可使谦比希湿法炼铜厂堆浸铜产量提高了 20%，酸耗降低 35% 以上，大量以前不能回收的铜资源得到了有效利用(见表 3)^[22]。

4) 赞比亚穆利亚希铜矿

针对生物浸出体系中工程条件、物理化学因素和微生物群落结构与功能匹配难的问题，中南大学以中色卢安夏铜业公司穆利亚希堆浸厂为研究对象，开展多因素相互作用强化机制研究，利用宏基因组学技术，

对堆内的微生物群落结构与功能进行实时监测，明确了投放高效复配菌群组合在浸出过程中的作用，阐明了浸出过程不同阶段群落演替规律，浸出前期以嗜中温菌为主，中期以适度嗜热菌为主，后期以高温菌为主。同时发现堆内温度随浸出不同时期升高，由浸出初期的自然温度最高升至 65℃ 以上。进一步通过对生物浸出体系 pH 值和氧化还原电位(ORP)的研究，发现浸出过程酸平衡阶段以后，体系酸性增强，pH 下降，温度逐渐升高，ORP 逐步上升。其中温度的升高加快浸出反应，电位的升高抑制了黄铜矿转化为辉铜矿的进行，从而降低了浸出效率^[23-24]。在上述规律的基础上，开发了以“种群分段投放、电位调控和维持较低 pH”为核心的浸出体系优化调控技术(见图 17)。该技

表 3 生物冶金和原有酸浸工艺流程参数及技术指标对比
Table 3 Comparison of technological parameters and indicators between bioleaching and original acid leaching process

指标	矿石品位 ¹⁾ / %	浸出时间/ h	硫酸浓度/ (g·L ⁻¹)	采用浸矿 微生物	浸出液铜 浓度/(g·L ⁻¹)	总铜 浸出率/%	吨铜硫酸 消耗量/t	浸出液 pH 值
酸浸工艺指标	≥1.2	4~8	30~40	—	4~8	65~70	4.8	1.4~1.6
生物冶金流程指标	≥0.3 ²⁾	60	10~15	合适的菌种组合	3~5	85~90	2.2	1.8~2.1

1) 谦比希湿法公司的生产实际；2) 谦比希湿法的堆浸铜的品位为 0.3%~0.5%

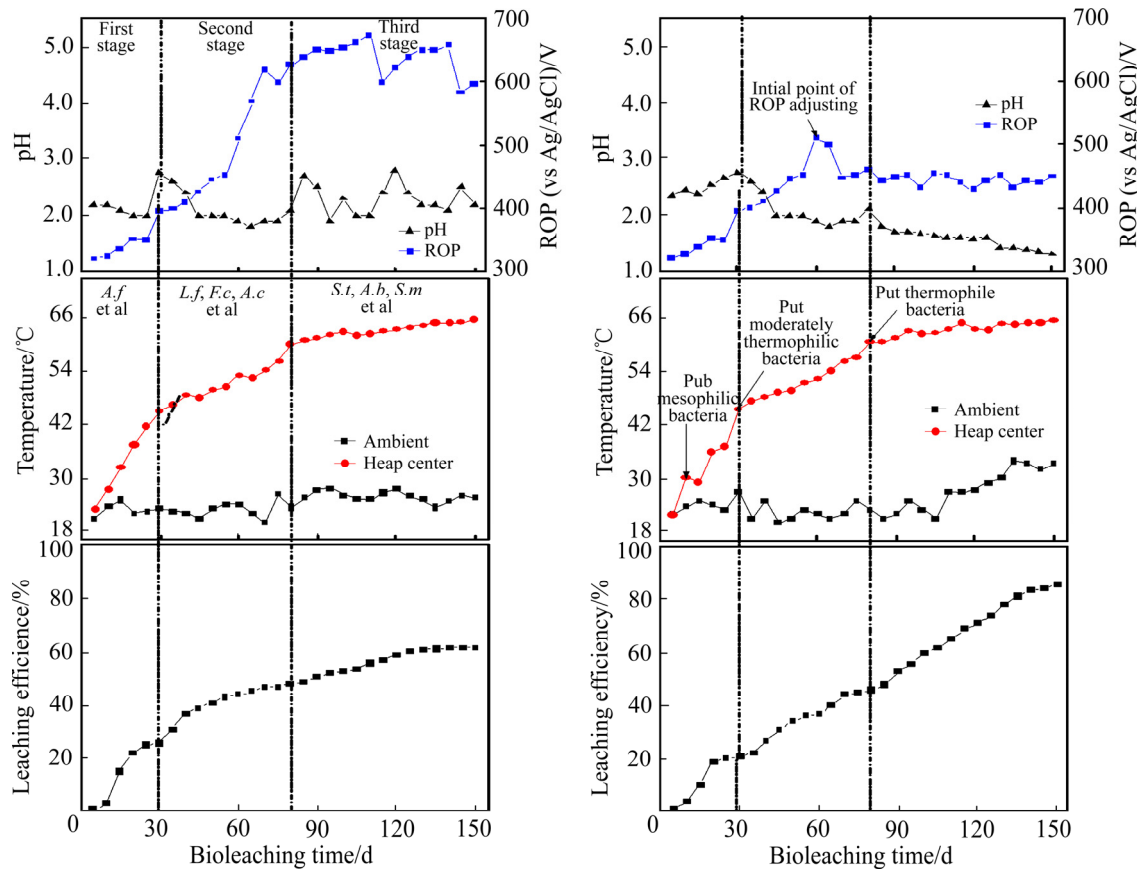


图 17 自然浸出体系与协同优化调控技术体系参数对比
Fig. 17 Comparison of parameters between natural leaching system and collaborative optimal control technology system

术应用于穆利亚希 6000 万 t 矿石堆浸厂, 通过 5 个月的浸出, 铜浸出率达 85%, 与自然浸出体系相比, 铜浸出率提高 25%。

2.3.2 金矿生物预处理工艺

我国目前难处理金矿资源约占已探明黄金储量的 2/3 以上, 开发利用难度非常大, 而生物预处理技术能有效利用这部分难处理金矿资源^[25]。随着生物预处理技术的发展, 中国黄金产量连续 12 年成为世界第一(见图 18)。该项技术的推广应用, 对保持中国黄金产量的世界领先水平 and 参与国际竞争具有重要的意义。

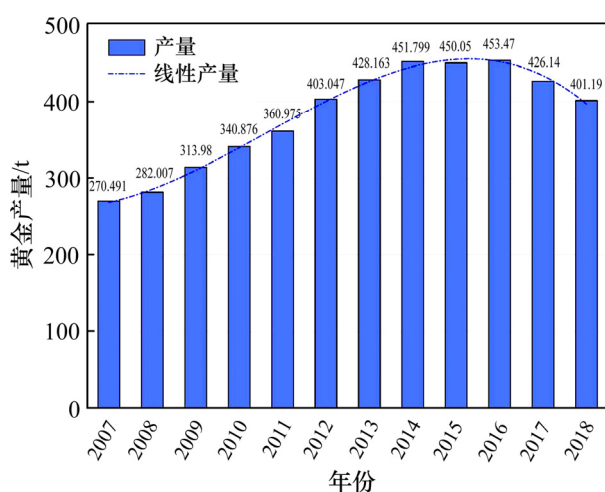


图 18 中国黄金产量

Fig. 18 Gold production in China

中国黄金辽宁天利金业公司以含砷难浸金精矿为主攻目标, 围绕着生物氧化-氰化提金技术路线, 对生物氧化提金技术进行了自主创新, 形成了完整的、具有自主知识产权的 CCGRI 生物氧化提金技术, 并实施了推广与示范。经过长期地对浸矿菌的定向培养、驯化, 获得了与国外 BIOX 工艺和 BACOX 工艺不同的浸矿工程菌(命名为 HY-系列菌)。以该菌种为核心进行相关工艺的技术开发, 形成了 CCGRI 技术系列。建设了国内黄金行业的第一座高技术产业化示范工程; 从 2003 年 7 月投产至今, 已稳定运行了 10 多年^[26]。

2.3.3 铀矿生物提取工艺

生物冶金技术可使我国大量闲置或废弃的硫化物包裹类铀矿资源得到有效利用, 铀浸出率可高达 96%(见图 19)^[27], 并有望使铀矿资源开采品位从目前的千分之一降低到万分之三, 从而使铀矿可经济开采储量大大增加。

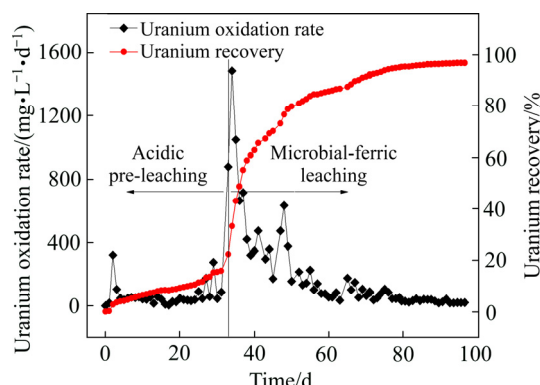


图 19 铀矿生物浸出氧化率与回收率

Fig. 19 Oxidation and recovery rate of uranium ore by bioleaching

3 展望

中南大学生物冶金重点实验室通过近 30 年的科研攻关, 已发表生物冶金方面学术论文 700 余篇, 以 Bioleaching 为关键词在 Web of Science 数据库进行检索发现, 中南大学生物冶金方向发表的论文数量位居全球第一。国际学术领域对中南大学生物冶金方面做的工作给予了较高评价。人类基因组计划副主席 George Weinstock 教授在 Forward for 24th International Mineral Processing Congress (IMPC) 中评价“没有想到世界的生物冶金研究已经达到了基因层次, 功能基因研究成果已付诸工业应用”。国际微生物生态学学会首任主席美国微生物学会主席 James Tiedje 院士评价“使生物冶金研究到达了基因层面和基因组水平, 在微生物功能基因组学研究方面与国际前沿同步”^[28]。

《Hydrometallurgy》杂志主编 David Muir 评价“三个量化方法为生物冶金做出重大贡献”。

另外, 赞比亚生物冶金产业化示范基地的建设, 能为生物冶金在海外的成功应用树立一面旗帜。生物冶金技术在赞比亚的推广应用使其可利用铜资源量扩大一倍, 可以大幅度提高铜资源的开发利用率, 打造赞比亚新的铜工业, 保持其产铜大国的地位, 同时也为我国输入大量的金属铜资源。在国内, 传统的采-选-冶-材料制造技术的资源利用率仅为 33% 左右, 而采用以物理、化学和生物为基础的矿产资源生物处理方法, 可使资源利用提高到 96% 左右, 相比增加 3 倍左右。资源利用率的提高可有效提高矿产资源使用年限, 从而保障国民经济可持续发展(见图 20)。生物冶金技术还可以扩大应用于深地矿产资源开采、城市矿山资源开发以及土壤重金属污染治理等多个领域, 其发展前景十分广阔。

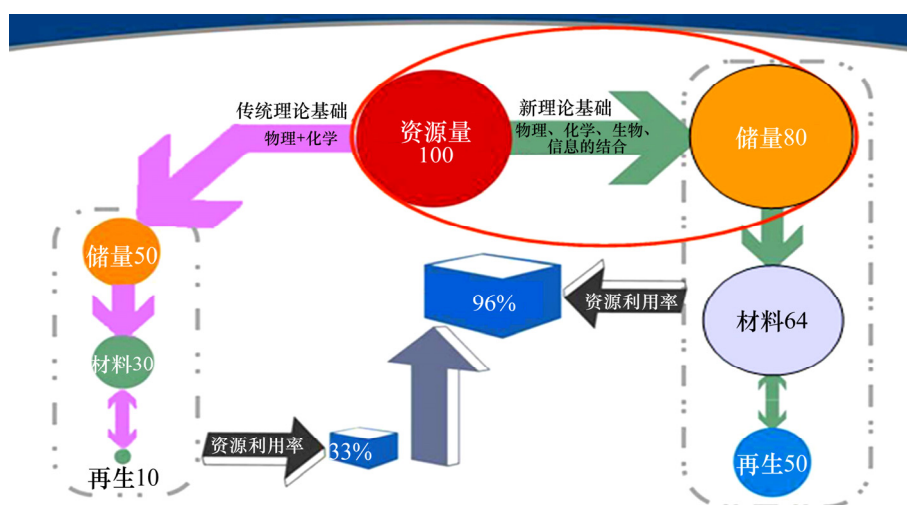


图 20 提高资源利用率保障国民经济可持续发展

Fig. 20 Improving utilization rate of resources to ensure sustainable development of national economy

致谢

感谢国家发改委高技术示范工程([2001]1907号)、国家重点基础研究发展计划资助项目(2004CB619200, 2010CB630900)、国家高技术研究发展计划资助项目(2007AA060900, 2012AA061500)、国家自然科学基金委创新群体(50321402, 50621063)与国际合作重点(国家自然科学基金委创新群体(50321402, 50621063)与国际合作重点)、国家教育部 111 计划(B07043)等项目的大力资助;感谢北京有色金属研究总院、中国科学院过程所、山东大学、北京矿冶研究总院,中国矿业大学,南华大学,东华大学等单位的合作与交流;感谢中国有色矿业集团有限公司、中国黄金集团有限公司、中国核工业集团有限公司、大冶有色金属集团控股有限公司、蒙自矿冶有限责任公司、江西铜业集团公司、广东大宝山矿业公司、广东金雁铜业公司等企业的支持。

REFERENCES

- [1] WANG D Z, QIU G Z, LIU X D. The progress of biohydrometallurgy in China[C]//Proceedings of 19th International Hydrometallurgy Symposium, 2011: 13–20.
- [2] BRIERLEY J A, BRIERLEY C L. Present and future commercial applications of biohydrometallurgy[J]. Hydrometallurgy, 2001, 59(2/3): 233–239.
- [3] 申 丽, 刘学端, 邱冠周. 基于基因芯片对微生物基因功能与群落结构分析的硫化矿生物浸出分析[J]. 生物工程学报, 2008, 24(6): 968–974.
SHEN Li, LIU Xue-duan, QIU Guan-zhou. Gene function

and microbial community structure in sulfide minerals bioleaching system based on microarray analysis[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2008, 24(6): 968–974.

- [4] LUO H L, SHEN L, YIN H Q, LI Q, CHEN Q J, LUO Y J, LIAO L Q, QIU G Z, LIU X D. Comparative genomic analysis of *Acidithiobacillus ferrooxidans* strains using the *A. ferrooxidans* ATCC 23270 whole-genome oligonucleotide microarray[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2009, 55(5): 587–598.
- [5] FANG C J, YU S C, WANG X X, ZHAO H B, QIN W Q, QIU G Z, WANG J. Synchrotron radiation XRD investigation of the fine phase transformation during synthetic chalcocite acidic ferric sulfate leaching[J]. Minerals, 2018, 8(10): 461.
- [6] GU G H, HU K T, ZHANG X, XIONG X X, YANG H S. The stepwise dissolution of chalcopyrite bioleached by *Leptospirillum ferriphilum*[J]. Electrochimica Acta, 2013, 103: 50–57.
- [7] GU Guo-hua, XIONG Xian-xue, HU Ke-ting, LI Shuang-ke, WANG Chong-qing. Stepwise dissolution of chalcopyrite bioleaching by thermophile *A. manzaensis* and mesophile *L. ferriphilum*[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(10): 3751–3759.
- [8] 王 军, 覃文庆, 邱冠周. 低品位复杂硫化铜矿生物浸出理论与实际[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2015: 110–129.
WANG Jun, QIN Wen-qing, QIU Guan-zhou. Theory and practice of bioleaching of low grade complex copper sulfide[M]. Changsha: Central south university press, 2015: 110–129.

- [9] ZHANG X, NIU J J, LIANG Y L, LIU X D, YIN H Q. Metagenome-scale analysis yields insights into the structure and function of microbial communities in a copper bioleaching heap[J]. BMC genetics, 2016, 17(1): 21.
- [10] YIN, H Q, LIU X D. Bioleaching microarrays for profiling microbial communities in acid mine drainage and bioleaching ecosystems[M]. Microarrays: Current Technology, Innovations and Applications, Book Chapter, 2014: 181–193.
- [11] CHEN Q J, YIN H Q, LUO H L, XIE M, QIU G Z, LIU X D. Micro-array based whole-genome hybridization for detection of microorganisms in acid mine drainage and bioleaching systems[J]. Hydrometallurgy, 2009, 95(1/2): 96–103.
- [12] YIN H Q, CAO L H, QIU G Z, WANG D Z, KELLOGG L, ZHOU J Z, DAI Z M, LIU X D. Development and evaluation of 50-mer oligonucleotide arrays for detecting microbial populations in Acid Mine Drainages and bioleaching systems[J]. Journal of Microbiological Methods, 2007, 70(1): 165–178.
- [13] GUO X, YIN H Q, CONG J, DAI Z M, LIANG Y L, LIU X D. RubisCO gene clusters found in a metagenome microarray from acid mine drainage[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2013, 79(6): 2019–2026.
- [14] YIN S H, WANG L M, KABWE E, CHEN X. YAN R F, AN K, ZHANG L, WU A X. Copper Bioleaching in China: Review and Prospect[J]. Minerals, 2018, 8(2): 32.
- [15] YANG S R, XIE J Y, QIU G Z, HU Y H. Research and application of bioleaching and biooxidation technologies in China[J]. Minerals Engineering, 2002, 15: 361–363.
- [16] WU A X, YIN S H, WANG H J, QIN W Q, QIU G Z. Technological assessment of a mining-waste dump at the Dexing copper mine, China, for possible conversion to an in situ bioleaching operation[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(6): 1931–1936.
- [17] LIU Q M, YU R L, QIU G Z, FANG Z, CHEN A L, ZHAO Z W. Optimization of separation processing of copper and iron of dump bioleaching solution by Lix 984N in Dexing Copper Mine[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(5): 1258–1261.
- [18] RUAN R M, WEN J K, CHEN J H. Bacterial heap-leaching: Practice in Zijinshan copper mine[J]. Hydrometallurgy, 2006, 83: 77–82.
- [19] RUAN R M, LIU X Y, ZOU G, CHEN J H, WEN J K, WANG D Z. Industrial practice of a distinct bioleaching system operated at low pH, high ferric concentration, elevated temperature and low redox potential for secondary copper sulfide[J]. Hydrometallurgy, 2011, 108: 130–135.
- [20] NGOM B, LIANG Y L, LIU X D. Cross-comparison of leaching strains isolated from two different regions: Chambishi and Dexing Copper Mines[J]. BioMed Research International, 2014, 2014: 11.
- [21] HAO X D, LIANG Y L, YIN H Q, MA L Y, XIAO Y H, LIU Y Z, QIU G Z, LIU X D. The effect of potential heap construction methods on column bioleaching of copper flotation tailings containing high levels of fines by mixed cultures[J]. Minerals Engineering, 2016, 98: 279–285.
- [22] 王 军, 覃文庆, 邱冠周. 低品位复杂硫化铜矿生物浸出理论与实际[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2015: 199–207.
- WANG Jun, QIN Wen-qing, QIU Guan-zhou. Theory and practice of bioleaching of low grade complex copper sulfide[M]. Changsha: Central South University Press, 2015: 110–129.
- [23] 郝晓东, 曾伟民, 彭堂见, 胡 琪, 梁伊丽, 尹华群, 邱冠周, 刘学端. 高通量测序技术分析不同温度下赞比亚低品位铜矿生物浸出过程中的微生物多样性[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(9): 2558–2564.
- HAO Xiao-dong, ZENG Wei-min, PENG Tang-jian, HU Qi, LIANG Yi-li, YIN Hua-qun, QIU Guan-zhou, LIU Xue-duan. Analysis of microbial diversity during bioleaching of low grade copper ore from Zambia using high-throughput sequencing technology at different temperatures[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(9): 2558–2564.
- [24] 刘媛媛, 杨洪英, 陈国宝, 佟琳琳, 金哲男, 肖发新. 难处理低品位铜钴矿的微生物浸出[J]. 材料与冶金学报, 2016, 15(2): 92–96.
- LIU Yuan-yuan, YANG Hong-ying, CHEN Guo-bao, TONG Lin-lin, JIN Zhe-nan, XIAO Fa-xin. Bioleaching of refractory low grade copper-cobalt ore[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2016, 15(2): 92–96.
- [25] BRIERLEY C L, BRIERLEY J A. Progress in bioleaching: part B: Applications of microbial processes by the minerals industries[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(17): 7543–7552.
- [26] 郝福来, 张谷平, 苏本臣, 高金昌. 生物氧化工艺在寒冷地区的工业应用[J]. 黄金, 2011, 3(11): 46–51.
- HAO Fu-lai, ZHANG Gu-ping, SU Ben-chen, GAO Jin-chang. Industrial application of biological oxidation process in cold regions[J]. Gold, 2011, 3(11): 46–51.
- [27] QIU G Z, LI Q A, YU R L, SUN Z X, LIU Y J, CHEN M A,

YIN H Q, ZHANG Y G, LIANG Y L, XU L L, SUN L M,
LIU X D. Column bioleaching of uranium embedded in
granite porphyry by a mesophilic acidophilic consortium[J].

Bioresource Technology, 2011, 102(7): 4697–4702.

[28] TIEDJE J. Foreword[J]. Transactions of Nonferrous Metals
Society of China, 2008, 18(6): 1–2.

Biotech key to unlock mineral resources value

QIU Guan-zhou, LIU Xue-duan

(School of Minerals Processing and Bioengineering, Key Laboratory of Biohydrometallurgy,
Ministry of Education, Central South University, China)

Abstract: Biohydrometallurgy has been applied in more than 50 countries and regions around the world. At present, the study of biometallurgy in China has entered the era of genomics. China firstly established the quantitative technology of bioleaching microorganisms based on genomics, which realized the transformation of the study on bioleaching behavior from phenotype to genotype. Meanwhile, stepwise oxidation model of sulfide ore was established at the microscopic level of chemical reaction, which realized the biohydrometallurgy from the macroscopic to the microscopic leap. Besides, the intensification technology of bioleaching process was applied industrially in the world on a large scale, and a bioleaching copper mine plant with an annual processing capacity of 60 million tons was established. CCGRI bio-oxidation gold extraction technology with independent intellectual property rights was formed, and the first high-tech industrialization demonstration project in China's gold industry was built. The leaching rate of sulphide coated uranium ore increased to 96%, and the grade of uranium ore reduces from 1/1000 to 3/10000. The study on biohydrometallurgy in China has been in the world leading level, which can improve the utilization rate of mineral resources from 33% to 96%, greatly improving the service life of China's mineral resources.

Key words: biotech; biohydrometallurgy; mineral resources; bioleaching behavior

Foundation item: Projects(2004CB619200, 2010CB630900) supported by the National Basic Research and Development Program of China; Projects(2007AA060900, 2012AA061500) supported by the National High-tech Research and Development Program of China; Projects(50321402, 50621063) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2019-07-10; **Accepted date:** 2019-08-22

Corresponding author: QIU Guan-zhou; Tel: +86-731-88879815; E-mail: qgz@csu.edu.cn

(编辑 龙怀中)