

特约评述

DOI: 10.12211/2096-8280.2025-022

生物法回收电池关键金属研究进展

朱思羽¹, 赵炫焯², 虞雯静², 曹竞天², 刘思慧³, 钱文达³, 贾海洋²

(¹ 北京理工大学医学技术学院, 北京 100081; ² 北京理工大学化学与化工学院, 北京 102488; ³ 北京理工大学生命学院, 北京 100081)

摘要: 随着新一轮能源革命的加速推进, 锂离子电池作为核心储能器件正迎来爆发式增长。然而快速增长的产能背后, 大量退役电池引发的资源浪费和环境污染问题日益凸显。这些废弃电池中蕴藏着丰富的锂、钴、镍等高价战略金属资源, 若不妥善回收, 不仅造成巨大经济损失, 还会因重金属泄漏对生态环境构成严重威胁。传统的火法冶金和湿法冶金回收工艺都存在能耗高、污染重等问题, 难以满足绿色发展需求。生物法回收技术凭借其低碳排放、低运营成本和环境友好的显著优势, 已成为当前研究热点。本文系统阐述了生物浸出、生物吸附、生物富集和生物矿化等生物法回收技术的核心机制, 详细分析了微生物代谢产酸浸出、功能菌株筛选吸附、基因工程改造以及矿化产物应用等关键环节的技术突破。生物法回收不仅可缓解关键金属资源短缺, 还将推动绿色冶金领域的革新, 为循环经济提供新的技术范式, 有望在未来逐步实现工业化应用, 助力全球锂电产业的可持续发展。

关键词: 生物浸出; 生物吸附; 生物富集; 生物矿化; 电池回收

中图分类号: Q819 文献标志码: A

Advances in biological recovery of key battery metals

ZHU Siyu¹, ZHAO Xuanye², YU Wenjing², CAO Jingtian², LIU Sihui³, QIAN Wenda³, JIA Haiyang²

(¹ School of Medical Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; ² School of Chemistry and Chemical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 102488, China; ³ School of Life Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: With the rapid expansion of lithium-ion battery (LIB) production driven by the global energy transition, the disposal of end-of-life batteries has emerged as a critical challenge due to resource depletion and environmental hazards. Conventional pyrometallurgical and hydrometallurgical recycling methods, while dominant, face significant drawbacks such as high energy consumption (exceeding 1000 °C for pyrometallurgy), substantial carbon emissions (about 3.5 tons CO₂/ton of batteries), and toxic wastewater generation (pH<2, 2~3 tons/ton of batteries), underscoring the urgent need for sustainable alternatives. Biological recovery technologies, leveraging microbial metabolic activities, have gained prominence as eco-friendly, low-cost solutions for reclaiming strategic metals like lithium, cobalt, nickel,

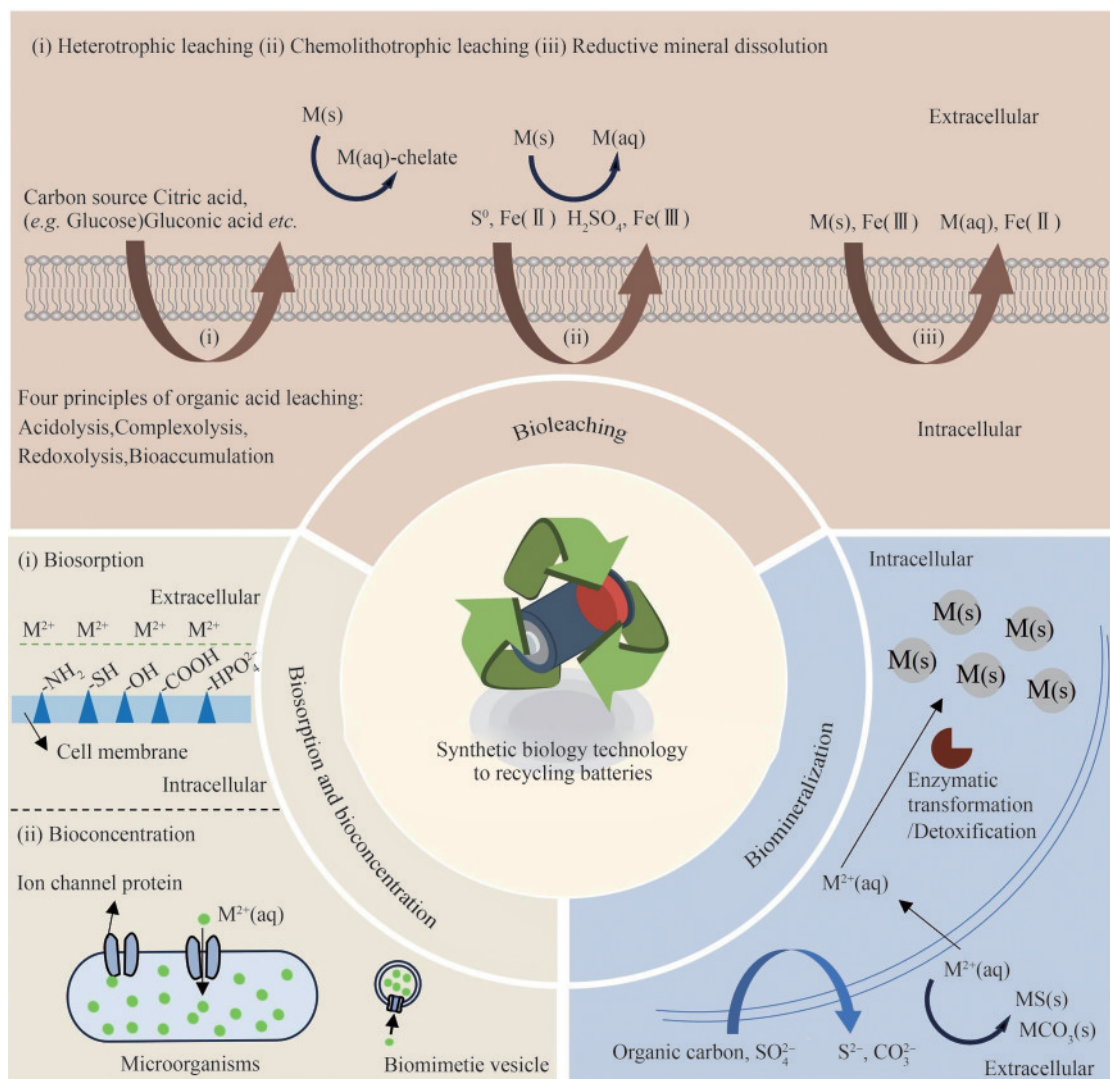
收稿日期: 2025-03-24 修回日期: 2025-06-23

基金项目: 国家重点研发计划“合成生物学”重点专项(2023YFA0914803)

引用本文: 朱思羽, 赵炫焯, 虞雯静, 曹竞天, 刘思慧, 钱文达, 贾海洋. 生物法回收电池关键金属研究进展[J]. 合成生物学, 2025, 6(6): 1349-1366

Citation: ZHU Siyu, ZHAO Xuanye, YU Wenjing, CAO Jingtian, LIU Sihui, QIAN Wenda, JIA Haiyang. Advances in biological recovery of key battery metals [J]. Synthetic Biology Journal, 2025, 6(6): 1349-1366

and manganese. This review systematically examines four core biotechnological approaches—bioleaching, biosorption, bioaccumulation, and biomineralization—detailing their mechanisms, advancements, and industrial scalability. Bioleaching, facilitated by acidophilic bacteria (e.g., *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A. thiooxidans*) and fungi (e.g., *Aspergillus niger*), employs microbial metabolites such as organic acids (citric, gluconic) and $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{SO}_4$ to dissolve metal oxides from battery “black mass,” achieving recovery rates of 60%~80% for Li and 85%~90% for Co/Ni under optimized conditions (30~40 °C, pH 1.5~3.0). Innovations in fungal strain engineering and co-culture systems (e.g., sulfur- and iron-oxidizing bacteria) have enhanced leaching kinetics and metal selectivity, while response surface methodology (RSM) has optimized parameters like pulp density (1 : 5~1 : 10) and aeration (1 L/min). Biosorption exploits functional groups (e.g., carboxyl, amino) on microbial cell walls to immobilize metal ions via electrostatic interactions, with engineered strains like *Escherichia coli* expressing metallothioneins demonstrating 7-fold higher Ni^{2+} uptake. Bioaccumulation, enabled by synthetic biology, focuses on intracellular metal transport systems, such as NikABCDE transporters, though challenges like metabolic burden and metal toxicity persist. Biomineralization harnesses microorganisms (e.g., sulfate-reducing bacteria) to precipitate dissolved metals as stable minerals (e.g., MnCO_3 , NiS), which can be directly converted into electrode materials. For instance, fungal-synthesized MnCO_3 -derived MycMnO_x/C composites exhibit exceptional supercapacitor performance (>350 F/g) and LIB cycling stability (>90% capacity retention after 200 cycles). Despite these advances, bottlenecks remain, including prolonged leaching



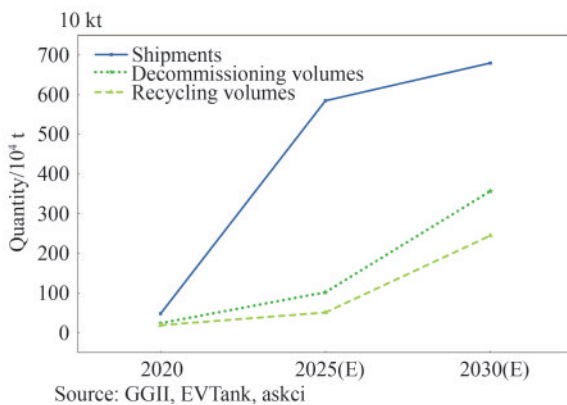
cycles, scalability limitations, and the need for genetic engineering to enhance microbial metal tolerance and acid production. Emerging strategies, such as CRISPR-Cas9-mediated pathway optimization, biomimetic ion channels (e.g., NH_2 -pillar[5]arene for Li^+ selectivity), and hybrid biohydrometallurgical processes, promise to bridge these gaps. Coupled with policy incentives and declining operational costs (projected at \$1000~2000/ton, 25%~40% lower than hydrometallurgy), bio-recovery technologies are poised to revolutionize the LIB recycling industry, aligning with circular economy principles and achieving near-zero carbon emissions (<0.5 tons CO_2 /ton of batteries). Future research should focus on the convergence of synthetic biology, materials science, and process engineering to achieve industrial-scale implementation, ultimately fostering a truly sustainable and resilient battery supply chain.

Keywords: bioleaching; biosorption; bioaccumulation; biomineralization; battery recovery

在全球能源危机加剧与环境污染问题日益严峻的背景下，新能源的开发与应用已成为国内外广泛关注的重点议题^[1-2]。如今新能源汽车产业蓬勃发展，锂离子电池凭借其卓越的高能量密度、长使用寿命和低维护成本^[3]作为新能源汽车的核心动力来源^[4]。根据国际能源署（International Energy Agency, IEA）的数据，全球电动汽车销量已从2015年的70万辆跃升至2022年的1000万辆^[5]，实现跨越式增长。电动汽车的急速增长直接推动了锂离子电池产业的快速发展 [图1(a)]，2023年全球锂离子电池的出货量已达到1202.6 GWh，EV TANK 预计锂离子电池的出货量将持续增长，

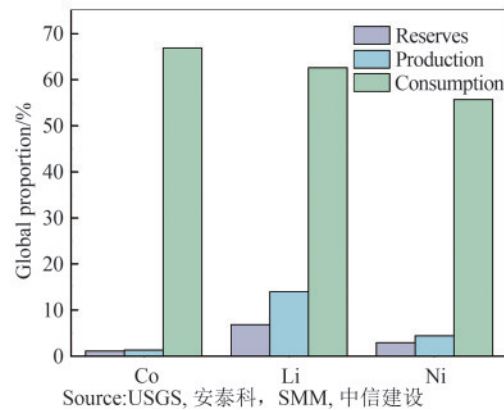
至2030年有望突破5004.3 GWh^[6]。

然而锂离子电池需求的激增 [图1(b)]，必然促使锂、钴、镍、锰等关键金属矿产的大规模开采，这一过程将对环境和资源造成严重的破坏^[7]。尤其值得关注的是，三元锂电池所需的镍、钴等元素常存在于低品位矿石中^[8]，其开采与加工过程繁多复杂，并且会加剧环境污染问题。此外，消费电子产品中的锂离子电池寿命通常为1~3年，而动力电池的寿命为8~10年，即随着锂离子电池生产规模的持续扩大，退役电池的数量也将大幅增加。而退役锂电池若得不到及时地处置，将对环境安全构成巨大的潜在风险^[9]。当废旧锂电池



(a) 预计中国动力电池出货量（蓝色直线）、报废量（深绿色点线）和回收量（浅绿色划线）（1 GWh的电池大约重达769231千克，即约769.23 t，数据来源于GGII, EVTank, askci）

(a) Estimated Chinese power battery shipments (blue line), end-of-life (dark green dotted line), and recycling (light green lines) (1 GWh battery weighs approximately 769231 kilograms, or 769.23 tons, data sourced from GGII, EVTank, askci)



(b) 锂离子电池关键金属（锂、钴、镍）中国储量、产量、消费量全球占比（数据来源于USGS、安泰科、SMM、中信建设）

(b) Global share of China's reserves, production, and consumption of key metals for lithium-ion batteries (lithium, cobalt, and nickel) (Data sourced from USGS, Antaiko, SMM, CITIC Construction)

图1 锂离子电池发展趋势

Fig. 1 Lithium-ion battery development trends

破损时，其正极材料中的元素可能与环境中的水分、酸性物质和氧气发生化学反应，进而引发大气、水体和土壤中的重金属污染^[10]。其中，钴和镍等重金属离子具有较强的生态毒性^[11]，不仅严重威胁水生生物的生存，还可能通过生物累积效应进入食物链，最终影响人类健康。此外，电池的负极材料、电解质、隔膜材料及黏合剂等组件在未得到妥善处置的情况下，也会对环境造成污染。

因此，废旧锂离子电池的回收处理已成为实现资源循环利用和减少环境污染的关键步骤^[2, 12]。锂电池回收旨在通过先进的技术手段高效提取废旧电池中的锂、钴、镍等贵金属，并实现电池材料的再生利用，从而形成闭环经济体系^[13]。据统计，2023年中国废旧锂离子电池的实际回收量为62.3万吨^[6]。随着新能源汽车保有量的持续增长，废旧电池的数量预计将不断攀升，这为锂电池回收产业提供了丰富的原料来源。然而，遗憾的是，目前全球范围内只有不到5%的锂离子电池得到了有效的回收利用^[5]，这一现状主要源于现有回收技术的局限性及面临的挑战。

目前，工业界主流的锂离子电池回收技术主要依赖提取冶金工艺，具体分为火法冶金（pyrometallurgy）和湿法冶金（hydrometallurgy）两种方法^[14]。火法冶金无需预处理步骤，通过高温（超过1000℃）条件下直接将废旧锂电池转化为过渡金属元素和富锂渣。然而，这一过程能耗较高，碳排放量大，回收效率较低^[15-18]。与之相比，湿法冶金则较为复杂：首先需要将分拣^[19-20]后的锂离子电池通过放电^[21]、拆解^[22]、破碎^[23-25]、筛分^[26-27]等处理工序，得到富含金属元素的“黑

粉”。接下来，黑粉与无机强酸反应浸出金属元素，最终通过纯化提取液获得金属盐^[28-29]。然而，这一过程中需要大量化学试剂且化学过程复杂，生成的酸性废水若未得到妥善处理，会造成严重的环境污染。此外，萃取分离无机离子过程复杂且成本较高（图2，表1）。因此，当前锂电池回收产业亟须一种浸出率高、能耗低、环保且成本合算的回收技术^[36]。

近年来，生物回收（biorecovery）凭借其独特的环保属性与经济效益，正在颠覆传统冶金技术的局限性。相较于火法冶金的高碳排放（约3.5 t CO₂/t 电池）和湿法冶金的高污染废水排放（pH<2的酸性废水2~3 t/t 电池），生物法通过微生物代谢产生的有机酸替代强酸试剂，可大幅减少化学试剂的消耗，并显著降低运营成本^[30, 37]。此外，其对低品位原料的适应性较强，通过微生物代谢产酸在常温常压下实现金属选择性浸出，锂、钴、镍等关键金属的回收效率接近主流湿法工艺，同时避免了酸性废水与有毒气体的排放，碳排放量可降至0.5 tCO₂/t 电池，大幅降低环境污染^[31]。尽管当前生物法的金属浸出周期较长，但通过菌株改良与工艺优化，其处理效率正在稳步提升。此外，生物法的设备投资成本仅为湿法冶金的25%~40%，结合低碳政策支持，其综合成本竞争力将进一步增强^[38]（图2，表1）。总体而言，生物法在资源效率、环境兼容性及技术迭代潜力方面具有显著优势，是推动锂离子电池产业链向“零碳循环”范式转型的重要手段。

生物回收技术主要包括生物浸出、生物吸附、生物富集和生物矿化等方法，这些策略主要通过生物作用有效提取并回收电池中的关键金属，且

表1 火法冶金、湿法冶金与生物法的综合对比^[30-35]

Table 1 Comprehensive comparison of pyrometallurgy, hydrometallurgy and bioprocesses^[30-35]

指标	火法冶金	湿法冶金	生物回收
设备投资	最高(>1000万美元)	中等(500万~800万美元)	最低(<200万美元)
能源消耗	极高(反应温度>1000℃)	高(化学试剂加热至60~90℃)	低(常温常压)
碳排放	约3.5 tCO ₂ /t 电池	约1.8 tCO ₂ /t 电池	<0.5 tCO ₂ /t 电池
金属回收率	锂<50%，钴/镍80%~85%	锂70%~85%，钴/镍>95%	锂60%~80%，钴/镍85%~90%
废水/废气	高(NO _x /SO ₂ 排放)	酸性废水(pH<2, 2~3 t/t 电池)含重金属离子(钴、镍);处理成本>40%	可忽略(无害微生物代谢物;微生物可循环利用)
运营成本	5000~8000美元/t	3000~5000美元/t	预估1000~2000美元/t
规模化程度	成熟技术(占全球产能35%)	主导技术(占全球产能60%)	实验室/中试阶段

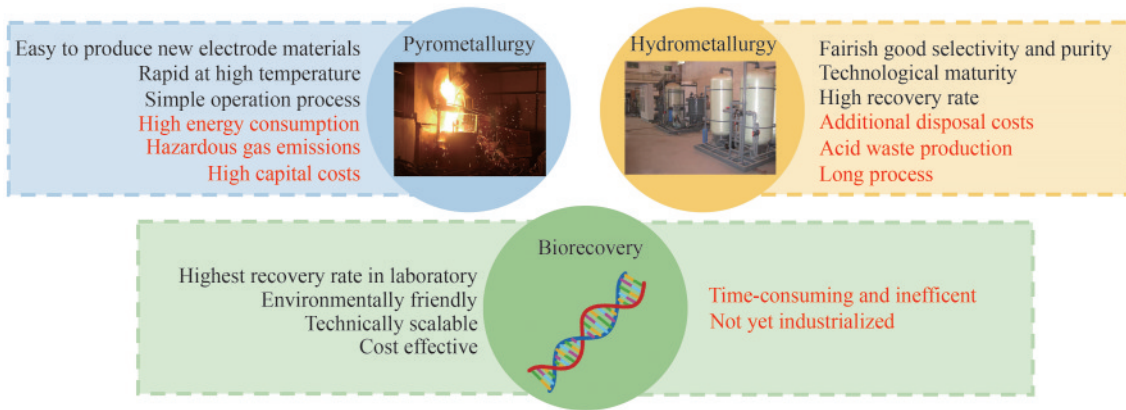


图2 火法冶金、湿法冶金和生物回收的优势与劣势对比

Fig. 2 Advantages and disadvantages of pyrometallurgy, hydrometallurgy and biorecovery

因其显著的环境友好性而广泛受到认可。本文综述了国内外在生物浸出、生物吸附、生物富集和生物矿化等领域的最新研究进展，旨在为高效、低成本生物法回收电池中关键金属离子提供新的思路和技术路径。

在冶金与回收废矿以及催化剂领域被大量研究与应用（图3）^[9, 39-41]。

1 生物浸出

生物浸出（bioleaching），不同于传统的化学浸出冶金法，是一种利用微生物代谢活动来回收废旧锂离子电池中金属元素的新型绿色回收方法，

1.1 浸出微生物及其作用机制

生物浸出技术的核心在于利用特定微生物及其代谢产物作为浸出工具。细菌和真菌均可用于此过程（图3，表2），但它们的工作机制和适用场景有所不同。

在细菌方面，化能自养型硫/铁氧化细菌是最主要的参与者。根据其最适生长温度，这些细菌可分为三类：嗜中温菌（最适生长温度低于

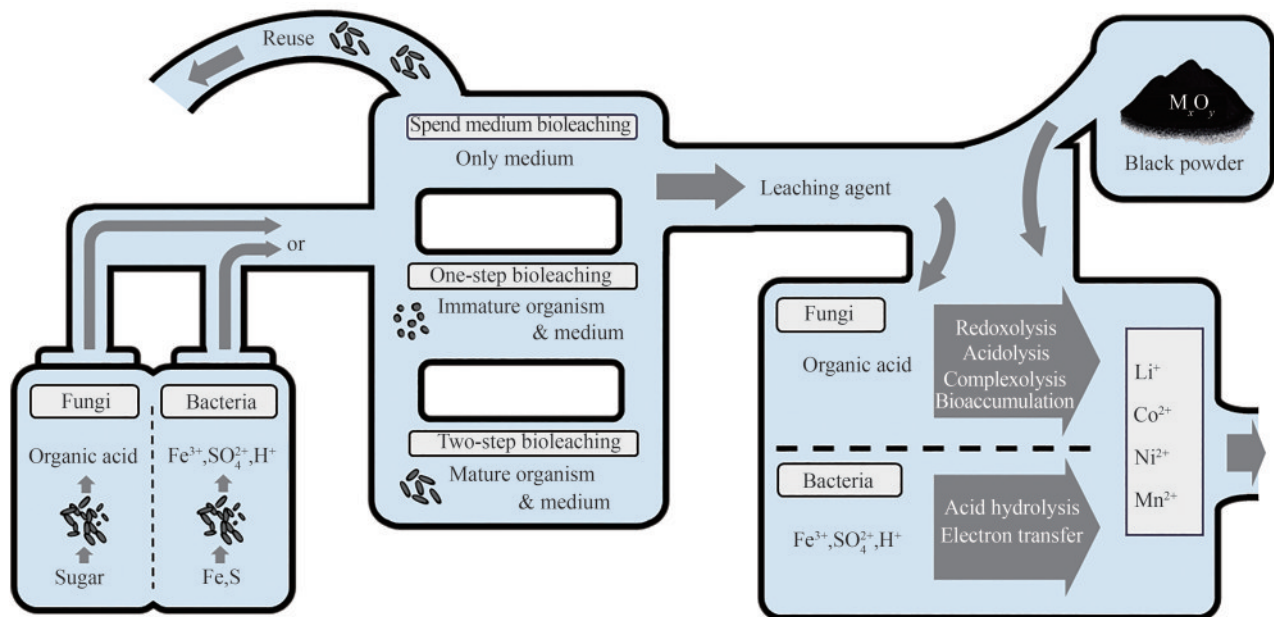


图3 真菌与细菌生物浸出

Fig. 3 Fungal and bacterial bioleaching

表2 常见用于金属浸出的细菌和真菌^[9, 42-44]Table 2 Bacteria and fungi commonly used in metal bioleaching^[9, 42-44]

细菌			真菌
嗜中温菌 (Mesophiles, 28~37 °C, pH 1.5~2.0)	中度嗜热菌 (Moderate thermophiles, 40~60 °C, pH 1.5~2.5)	嗜热菌 (Thermophiles, 60~80°C, pH 1.0~4.0)	(Fungi, 25~35 °C, pH 3.0~7.0)
氧化亚铁嗜酸硫杆菌 (<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>)	喜温嗜酸硫杆菌 (<i>Acidithiobacillus caldus</i>)	金属硫化叶菌* (<i>Sulfolobus metallicus</i>)	黑曲霉 (<i>Aspergillus niger</i>)
氧化硫嗜酸硫杆菌 (<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>)	嗜铁钩端螺菌 (<i>Leptospirillum ferriphilum</i>)	嗜酸热硫化叶菌* (<i>Sulfolobus acidocaldarius</i>)	简青霉 (<i>Penicillium simplicissimum</i>)
氧化铁钩端螺菌 (<i>Leptospirillum ferrooxidans</i>)	嗜酸硫化杆菌 (<i>Sulfobacillus acidophilus</i>)	硫磺矿硫化叶菌* (<i>Sulfolobus solfataricus</i>)	产黄青霉 (<i>Penicillium chrysogenum</i>)
阿尔伯特嗜酸硫杆菌 (<i>Acidithiobacillus albertensis</i>)	嗜酸热原体菌* (<i>Thermoplasma acidophilum</i>)	布氏硫化叶菌* (<i>Sulfolobus brierleyi</i>)	黄曲霉 (<i>Aspergillus flavus</i>)
耐铁嗜酸硫杆菌 (<i>Acidithiobacillus ferridurans</i>)	嗜酸铁原体菌* (<i>Ferroplasma acidophilum</i>)	双能硫化叶菌* (<i>Sulfolobus ambioalous</i>)	烟曲霉 (<i>Aspergillus fumigatus</i>)
嗜酸喜酸菌 (<i>Acidiphilium acidophilum</i>)	嗜酸铁原体嗜酸亚种* (<i>Ferroplasma acidarmanus</i>)	勤奋生金球菌* (<i>Metallosphaera sedula</i>)	米曲霉 (<i>Aspergillus oryzae</i>)
铁氧化酸微菌 (<i>Acidimicrobium ferrooxidans</i>)	嗜热铁原体菌* (<i>Ferroplasma thermophilum</i>)	嗜热硫氧化硫化杆菌 (<i>Sulfobacillus thermosulfidooxidans</i>)	土曲霉 (<i>Aspergillus terreus</i>)
多食嗜酸菌 (<i>Acidiphilium multivorum</i>)		环庚基脂环酸芽孢杆菌 (<i>Alicyclobacillus cycloheptanicus</i>)	
嗜铁嗜酸硫杆菌 (<i>Acidithiobacillus ferriphilus</i>)			
食铁嗜酸硫杆菌 (<i>Acidithiobacillus ferrivorans</i>)			
食有机物氧化亚铁嗜酸芽孢杆菌 (<i>Ferroacidibacillus organovorans</i>)			

注：表格中标记*的为古菌。

40 °C)、中度嗜热菌 (40~60 °C) 以及嗜热菌 (60~80 °C)^[9]。研究显示, 嗜中温菌在生物浸出研究中更为常见。

嗜中温微生物, 包括氧化亚铁嗜酸硫杆菌 (*Acidithiobacillus ferrooxidans*)^[45]、氧化硫嗜酸硫杆菌 (*Acidithiobacillus thiooxidans*)^[31] 和氧化亚铁钩端螺菌 (*Leptospirillum ferrooxidans*)^[9] 等, 其中硫氧化细菌和铁氧化细菌在生物浸出中较为常见, 它们利用大气中的二氧化碳作为碳源, 亚铁离子 (Fe²⁺) 或元素硫 (S) 作为能量来源, 可以在 pH 值为 1~3、温度低于 40 °C 的环境中生长^[40]。这些细菌通过产生硫酸 (H₂SO₄) 和铁离子 (Fe³⁺) 来促进黑粉中金属的溶解^[46-47], 其中硫酸中的质子能够进攻金属氧化物并释放金属离子, 同时也参

与二价铁离子的氧化过程, 从而为微生物提供能量。Wu 等^[47] 观察到, 在含亚铁离子 (Fe²⁺) 和黄铁矿 (pyrite) 的浸出实验中, 钴的回收率显著高于其他组别。他们推测, 作为能量来源的亚铁离子在被氧化为三价铁离子的过程中, 通过微生物膜的作用将电子传递给金属, 从而还原钴 (Co³⁺), 使其能够溶解于溶液中。因此, 一些研究者倾向于同时使用硫氧化细菌和铁氧化细菌进行联合生物浸出^[48-49], 以提高金属浸出效率。

与嗜中温菌相比, 中度嗜热菌和嗜热菌在生物浸出中的潜力可能更大, 因为较高的温度有助于提高浸出动力学。中度嗜热菌则包括喜温嗜酸硫杆菌 (*Acidithiobacillus caldus*) 和嗜铁钩端螺菌 (*Leptospirillum ferriphilum*)^[50] 等, 这些菌种常作

为单一或联合浸出菌种使用^[9, 51-52]。尽管一些极端嗜热菌已成功从自然环境中分离出来,并在研究中有应用^[53],但基于极端嗜热菌的生物浸出实验目前仍较为稀少。

在真菌方面,可用于生物浸出的主要是黑曲霉 (*Aspergillus niger*)、筒青霉 (*Penicillium simplicissimum*) 以及产黄青霉 (*Penicillium chrysogenum*)^[9, 50]。这些真菌以糖类为碳源,可以代谢产生以羧酸为代表的有机酸,例如柠檬酸、葡萄糖酸、草酸、苹果酸等^[54-55]。这些真菌和其代谢的有机酸可通过四种原理,即酸解 (acidolysis)、络合 (complexolysis)、氧化还原 (redoxolysis) 以及生物富集 (bioaccumulation)^[9, 41, 56],进行相互作用浸出金属。其中,酸解和络合是主要作用机制,有机酸可以电离出质子和亲水性基团,质子进攻金属氧化物,从而使金属离子被释放到溶液中,带有多个羧基和羟基的有机酸可以将其螯合,形成可溶性的金属络合物,促进金属离子的溶出^[57]。而氧化还原在浸出的作用中相对较小^[41],主要通过氧化剂 (如 H_2O_2) 协同增强金属浸出,如 Mossali 等^[58]发现还原性有机酸柠檬酸与过氧化氢的组合可以提高镍与钴的浸出率。生物富集则通过真菌细胞表面对金属离子的吸附作用间接促进浸出。真菌的细胞壁由不同的功能基团组成,如羟基、氨基、羧基、磷酸基和硫酸基等,这些能够结合金属离子,且部分金属离子可进入菌丝内富集^[59]。在 Bayraktar 等^[60]的研究中, *A. niger* 吸附了9%溶解的镍,从而打破溶解平衡,提高金属离子溶解率。因此,真菌浸出的核心在于其代谢产生的有机酸及其螯合能力。

1.2 浸出效率的优化策略

高效的生物浸出依赖于对微生物培养和浸出条件的精细调控。优化的核心物理参数包括:固液比 (通常1:5至1:10,保证充分接触)、温度 (匹配微生物最适范围,细菌30~40 °C或更高,真菌25~35 °C) 以及搅拌与通气 (如200~300 r/min, 1 L/min, 提高溶氧促进代谢)^[9, 61]。例如,在含铜矿石的浸出过程中,通过调整固液比为1:7,浸出温度为35 °C,并在每分钟通入1.5 L空气的条件下,金属回收率可达到90%以上^[62]。

化学参数的调控同样关键。化能自养型细菌以 CO_2 作为碳源,故可以适当地向培养基中通入 CO_2 以促进细菌的生长^[9]。而以黑曲霉为代表的异养型真菌则主要利用糖类 (常用蔗糖) 作为碳源^[63-64]。使用糖加工副产物、马铃薯加工废物、甘蔗渣等进行替代,在经济方面效益更为显著^[65]。优化研究表明,过高的糖浓度抑制真菌生长,过高的pH则促进草酸生成 (可能沉淀Co、Mn),而特定碳源浓度 (如蔗糖浓度约117 g/L) 和初始pH (如pH约5.4) 可最大化有益有机酸 (柠檬酸、苹果酸、葡萄糖酸) 产量并抑制草酸,从而显著提升浸出率^[9, 41, 63-66]。氮源类型也会影响真菌的生长和代谢。真菌在较高氮源浓度下会提高对碳源的消耗和生长,并生产草酸^[67]。刘浩等^[66]的研究发现,使用无机氮源硫酸铵可以得到最高的苹果酸产量,因为其更容易被菌体分解利用。金属离子对微生物的生长也十分重要。对于自养细菌如 *A. ferrooxidans*, 亚铁离子是其能源;而微量元素钙、镁、锰、锌等也会影响微生物活性^[9]。此外,引入金属离子 (如铜离子和银离子) 能够进一步促进氧化还原反应的进行,加快金属离子的溶解浸出^[68]。

微生物协同是提升效率的重要策略。硫氧化菌 (如氧化硫嗜酸硫杆菌 *Acidithiobacillus thiooxidans*) 和铁氧化菌 (如氧化亚铁嗜酸硫杆菌 *Acidithiobacillus ferrooxidans*) 的协同培养主要通过代谢过程产生硫酸和铁离子,分别增强浸出过程中的酸性环境和氧化性条件,减少了氧气依赖并增强了金属溶解的驱动力^[40]。此外,采用统计优化方法如响应面分析法 (response surface methodology, RSM) 可有效解析多参数间的复杂交互作用,为规模化浸出提供理论依据和优化条件^[39]。如 Bahaloo Horeh 等^[55]通过响应面分析法,发现在蔗糖浓度为116.90 g/L,初始pH为5.44条件下,获得最高的柠檬酸、苹果酸与葡萄糖酸浓度和最低的草酸浓度,最终回收了100%锂和77%锰 (固液比2%)。

1.3 浸出方式的比较与选择

针对废旧电池材料的生物浸出,主要有三种操作模式:一步浸出法 (one-step bioleaching), 两

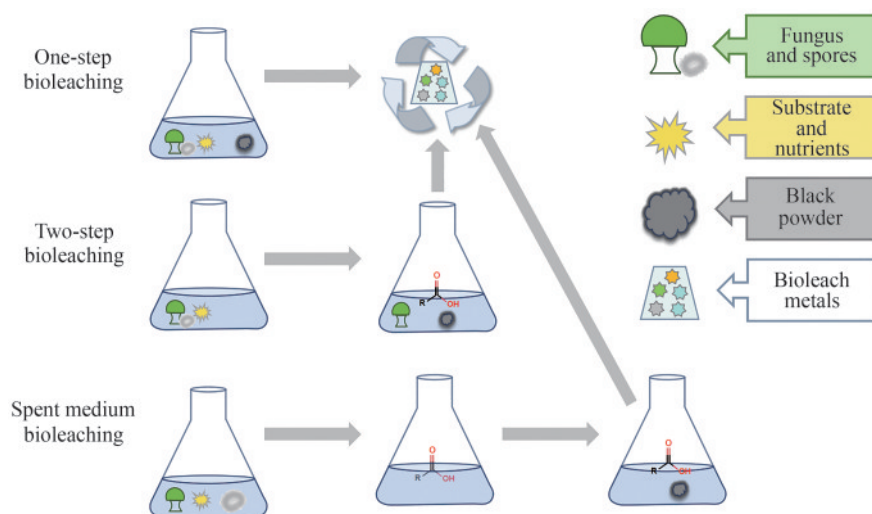


图4 三种浸出方式示意图^[39]

Fig. 4 Schematic diagram of one-step bioleaching, two-step bioleaching and spent medium bioleaching^[39]

步浸出法 (two-step bioleaching) 和介质浸出法 (spent medium bioleaching)^[39, 69-72] (图4)。一步法浸出在微生物生长阶段即加入物料, 操作简单但浸出物中重金属毒性常导致浸出率偏低^[73]。两步法浸出先让微生物增殖至高活性期再加入浸出液, 利用预积累的代谢产物 (酸、 Fe^{3+}) 可有效促进金属溶解, 效率较高, 但需严格控制微生物对金属离子的耐受性, 且浸出过程通常不能加热; 此外, 混合培养时还需协调种间关系^[74-75]。而废培养基法浸出仅使用微生物代谢后的培养基 (不含菌体), 不受微生物存活限制, 可加热加速反应并能灵活调整培养基比例, 相比前两种方法具有更高的浸出效率。但这种方法缺少微生物细胞的生物吸附作用, 可能导致部分浸出速率损失^[50, 76-77]。

生物浸出技术通过利用微生物及其代谢产物来浸出和回收金属离子, 其效率依赖微生物协同、培养参数 (固液比/温度/碳氮源等) 的精细优化, 以及浸出方式 (一步法、两步法或介质浸出法) 的针对性选择, 在平衡操作复杂度与回收率的同时, 凸显了绿色回收废旧电池金属的潜力。

2 生物吸附与生物富集

在锂离子电池回收领域, 生物吸附与生物富集技术因其环境友好性和选择性优势, 成为替代传统化学浸出的重要策略^[78]。

2.1 生物吸附

电池黑粉经过浸出处理后, 能够获得含锂、钴、镍、锰等金属离子的浸出液, 这些金属离子可以通过吸附固定进行后续回收操作^[76] (图5)。金属离子的吸附通常通过静电作用与阴离子官能团的相互作用来实现, 吸附所用的生物材料可能是特定菌株或人工合成的生物复合材料。在吸附过程中, 金属离子被较为牢固地固定在吸附剂表面, 从而完成从原有环境到吸附剂表面的转移, 通常不改变其原有的化学状态^[79]。与传统的金属回收方法相比, 生物吸附技术具有低成本和环境友好性的特点^[80]。

微生物 (尤其是细菌和真菌) 通过细胞壁表面丰富的羧基 ($-\text{COOH}$)、氨基 ($-\text{NH}_2$)、磷酸基 ($-\text{PO}_4^{3-}$) 等官能团^[81] 与金属离子发生静电吸附、配位结合或离子交换。大量研究表明, 不同种类的细菌对金属离子的吸附行为存在显著差异, 这与细菌的种类、生长环境、细胞表面结构以及金属离子的性质等因素密切相关。在过去几十年中, 学者们对细菌吸附金属离子的机制进行了广泛而深入的研究^[82]。早期的研究多集中在常见的革兰氏阳性菌和阴性菌 (如枯草芽孢杆菌、大肠杆菌等) 对重金属离子的吸附行为, 采用批量吸附实验测定吸附等温线和吸附动力学, 并结合表面络合模型解析金属离子与细菌表面活性位点的相互作用机制, 进而确定热力学稳定常数^[83-85]。近

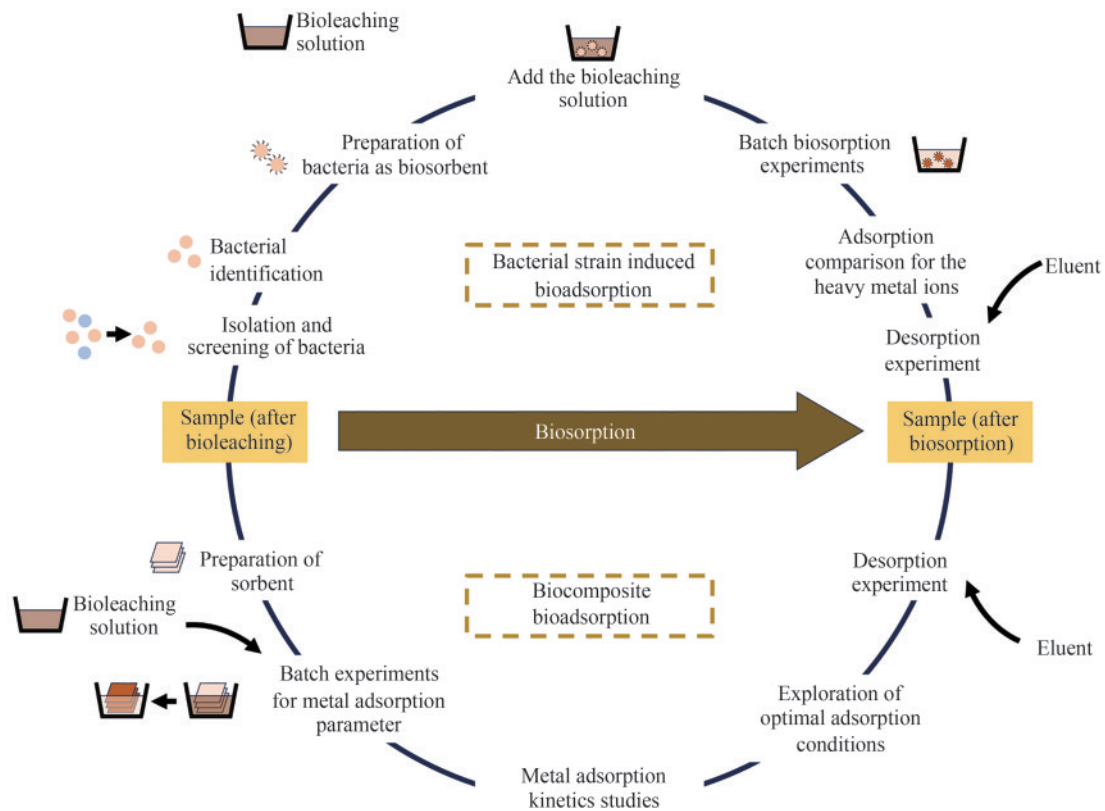


图5 两种生物吸附技术的实验流程

Fig. 5 Experimental procedures for two biosorption techniques

年来,随着研究的深入,特殊功能细菌(如铁氧化细菌、锰氧化细菌等)逐渐成为研究的热点。这些细菌由于其独特的代谢途径与金属离子之间存在紧密的关联。例如, Horsfall 等^[86]发现 *Shewanella oneidensis* MR-1 对 Mn^{2+} 的吸附能力突出,通过分泌胞外聚合物(EPS)形成生物沉淀;而 *Desulfovibrio alaskensis* G20 对 Co^{2+} 和 Ni^{2+} 的吸附具有高选择性,两者联用可实现浸出液中金属的分步回收。Vázquez-Ortega 等则发现,能够氧化锰的假单胞菌对 $Mn(II)$ 的吸附能力显著增强,且该吸附过程具有可逆性^[87-88]。此外,特殊环境下分离出的菌种也被广泛用于金属吸附能力的评估^[89]。例如, Jardine^[90]筛选了南非温泉中的芽孢杆菌及相关菌种,评估其对 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 等重金属离子的生物吸附能力,并探讨其在生物修复有毒污染物中的应用潜力。此外,真菌(如 *Aspergillus niger*)通过代谢产酸(柠檬酸、苹果酸和葡萄糖酸)萃取金属离子,同时其菌丝体兼具浸出与吸附双功能^[91]。

2.2 生物富集

不同于生物吸附,生物富集是一个新陈代谢活跃的过程,微生物利用导入器复合物将金属离子摄入细胞内空间,通过脂质双分子层形成一条转运途径^[92-93]。通过跨膜转运蛋白等的蛋白质工程设计、建立生物启发的仿生离子通道,是目前实现生物富集的普遍方法(图6)。

生物富集现象在自然界中的天然细胞内广泛存在^[94-95],但受制于细胞内部的复杂结构,尤其是基因和蛋白质的表达调控水平,以及金属离子对细胞的毒性^[96]。细胞内基因的选择性表达、蛋白质合成的效率及其功能发挥、细胞在面对环境中金属离子浓度变化的应激响应机制^[97]均在很大程度上决定了生物富集能力的上限。鉴于这些内在限制,为了进一步提升生物富集的效果,就需要借助合成生物学的先进手段,来优化并重组细胞内的表达蛋白机制,以期在促进目标蛋白高效表达的同时,维持细胞的正常生长与代谢活动,从而实现表达蛋白机制与细胞生长之间的最佳权

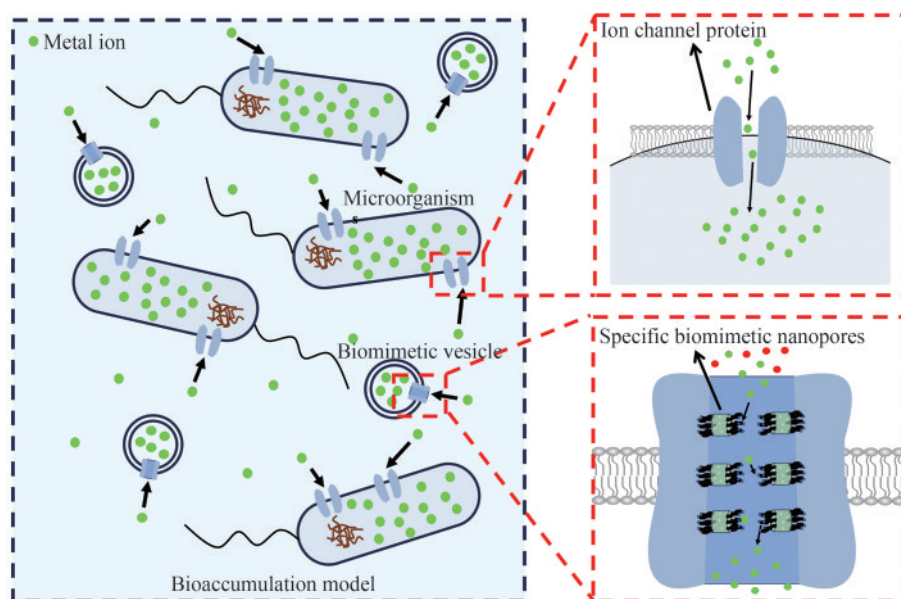


图6 生物富集模型

Fig. 6 Bioaccumulation model

衡^[98-100]。Valix等^[101]研究了包括绳状青霉、臭曲霉、筒青霉在内的真菌菌株对红土镍矿（镍、钴、铁、镁和锰）中可浸出的不同重金属的耐受性，并通过在培养皿中随着培养基中金属浓度的增加重复传代培养来选择耐受菌株，获得了高镍耐受性的菌株。Diep等^[102]对大肠杆菌进行了改造，使其过表达其天然NikABCDE转运蛋白和异源金属硫蛋白，以捕获水中的镍离子与对照相比，工程菌株的镍生物蓄积性能提高了7倍，但也观察到由于代谢负担或诱导物（IPTG）毒性，细胞活力急剧下降。Gahlot等^[103]通过合成生物学手段设计重组非致病性大肠杆菌表达铜结合肽（cMBP2/cMBP3），成功构建出高效富集铜离子的工程菌株，耐受浓度超过土壤 EC_{50} 毒性阈值160倍。Yang等^[104]发现小球藻UTEX 2341在异养培养条件下对铜、锰等离子具有很强的抗性，并能通过胞内积累和胞外固定有效地去除这些离子。目前为止，相较于使用工程菌，大多数文献倾向于在废水中筛选金属耐受性较高的野生菌进行生物富集，因为前者需要合成生物学来优化重组表达蛋白机制（即导入-存储系统）与细胞生长之间的权衡^[92]。

由于重金属离子对细胞具有破坏作用，受启发于自然界生物累积的模型，仿生离子通道（Bionic ion channel）应运而生。仿生结构有效避免了细胞因金属毒性而凋亡以至于难以实现生物

富集的问题，是高效富集金属离子的一种方法。如Li等^[105]构建了一种以胺-柱[5]芳烃(NH_2 -pillar[5]arene, NP5)为锂离子(Li^+)对受体的仿生纳米通道，其在分子水平上通过强烈的主客体相互作用对氯化锂离子具有良好的亲和性，且能够高选择性识别 Li^+ 。

3 生物矿化与电极制备

生物矿化是指通过生物体内或微生物的作用，使溶解的金属离子在生物体内或其外部环境中沉积形成固体矿物的过程。这一技术已经在多个领域得到广泛应用，尤其是在环境治理和材料制备方面。在电池回收领域，生物矿化技术具有显著的绿色环保特性，其过程通常在常温、常压下进行，能耗低，且不产生有害废弃物，符合现代环境保护和可持续发展的需求，具有重要的研究和应用潜力^[106]（图7）。Bullen等^[107]研究证实，革兰氏阳性菌*Paenibacillus polymyxa*通过分泌多糖改变含锂矿物（如石英芒硝和方解石）的表面化学性质，使其疏水性增强。实验显示，经*P.polymyxa*处理24 h的锂辉石在饱和溶液中沉降速率最高，为微生物辅助锂回收提供了新策略。Horsfall团队发现，*Shewanella oneidensis* MR-1和*Desulfovibrio*

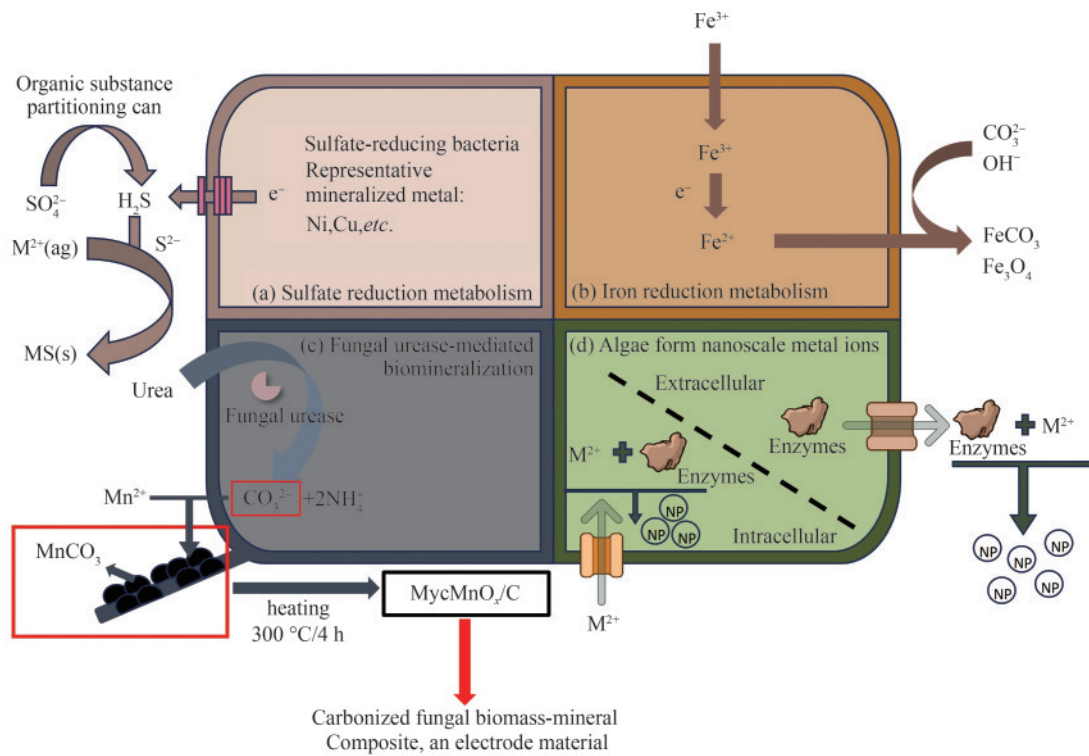


图7 基于微生物的生物矿化过程

Fig. 7 Microbial-based biomineralization process and preparation of electrode materials

alaskensis G20可协同选择性沉淀锰、钴和镍离子，其中*S. oneidensis* MR-1在100 mg/L Mn^{2+} 溶液中去除效率达83%（生成 $MnCO_3$ 纳米颗粒），而*D. alaskensis* G20在10 mg/L Co^{2+}/Ni^{2+} 混合溶液中实现>70%的金属去除率^[108]。

细菌在生物矿化中的作用通过其代谢活动进行金属离子的还原。许多细菌，如硫酸还原菌（sulfate-reducing bacteria, SRB）和铁还原菌（如*Geobacter sulfurreducens*），能够通过其代谢过程还原溶解的金属离子并沉淀成金属矿物^[109]。

硫酸还原菌主要通过硫酸盐还原代谢作用，利用有机物作为电子供体，将硫酸根离子（ SO_4^{2-} ）还原为硫化物（如 H_2S ），进而与金属离子（如铜、镍等）生成硫化物沉淀^[110-111]。Sitte等^[112]通过金属硫化物沉淀，从采矿现场获得的SRB富集培养物可承受高达30 mmol/L的镍离子和40 mmol/L钴离子的金属浓度，并形成了非晶态硫化镍（NiS）、纳米晶（ α -NiS）和钴镍黄铁矿。在制备镍铁硫化物/氧化物纳米复合材料用于高效的氧析出反应（oxygen evolution reaction, OER）催化剂的研究中，掺杂了镍的生物矿化产物在热处理后得到的

电催化剂表现出卓越的催化活性和性能。这种电催化剂在10 mA/cm²的电流密度下，其过电位和塔菲尔斜率分别为230 mV和46 mV/dec，该电催化剂性能甚至超过了商用 RuO_2 电催化剂^[113]。

铁还原菌（FeRB）能够通过代谢过程将溶解的 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} ，并通过微生物的电子传递机制将其转化为铁矿物（如 Fe_3O_4 或 Fe_4O_5 ）。在Han等^[114]的研究中，利用铁还原菌*Shewanella oneidensis* MR-4，通过氧化有机物或氢气，将三价铁还原为二价铁并被释放到溶液中，与 CO_3^{2-} 反应形成了微米大小的菱铁矿矿物。在Yoon等^[115]研究中，通过在土壤微生物燃料电池（MFC）电极中引入驯化的微生物群落（soil/sediment MFC, SMFC），在阴极和阳极的样品中，无定形的铁酸盐分别从赤铁矿和鹅铁矿中生物转化出了高度结晶和分层结构的二级纳米团簇。

真菌，特别是一些丝状真菌，在生物矿化过程中具有显著的作用。真菌不仅能够通过分泌有机酸调节周围环境的pH值，促进金属离子的溶解和还原，而且与更简单的细菌细胞形式相比，丝状真菌生长习性可以为金属在生物吸附、代谢物

分泌和金属或准金属物种的氧化还原后沉淀提供成核位点, 促进矿⁺物定向形成^[116]。通过酸性条件 (pH<2.5, 30 °C) 下培养 *Purpureocillium lilacinum* Y3 菌株并结合多尺度分析 (X 射线衍射、扫描电镜、傅里叶红外光谱), 研究发现其分泌的胞外多聚物 (EPS) 通过游离 P=O 基团作为矿化过程成核位点, 与 Fe³⁺ 形成 P—O—Fe 键, 显著促进 Fe(OH)₃ 转化为黄铁矿⁺ (jarosite)^[117]。研究利用红色面包霉 (粗糙脉孢菌) 合成的锰氧化物作为锂离子电池的电极材料。这种材料在充放电循环 200 次后, 电池容量的保持率仍在 90% 以上, 显示了出色的循环稳定性。这是首次报告利用真菌生物矿化过程合成电极材料的研究, 表明真菌生物矿化在生物材料合成方面具有巨大的应用潜力^[118]。此外, 从生物细胞结构中获得的具有高孔隙率的碳质材料增加了活性炭表面积, 这可能产生卓越的电性能, 有望成为微型电池和电化学电容器中的有用电极材料^[119]。研究者使用真菌粗糙脉孢菌 (*Neurospora crassa*) 利用其脲酶介导的生物矿化过程, 将锰离子和尿素转化为锰碳酸盐, 并将其转化为电极材料。菌丝周围形成了各种形态的矿物, 其中主要成分是菱锰矿 (MnCO₃)。经过高温处理形成一种名为 MycMnO_x/C 的复合材料。研究发现, 这种复合材料在超级电容器中显示出高比电容 (>350 F/g), 并且在锂离子电池中具有良好的循环稳定性 (200 次循环后保留超过 90% 的容量)^[120]。利用内生真菌 *Aspergillus nidulans* 合成钴氧化物纳米颗粒, 这些纳米颗粒可以应用于能量存储, 具有 389 F/g 的特定电容, 显示出其电储能能力^[121]。

藻类通过生物吸附和代谢将金属离子转化为纳米颗粒, 经热处理后可制得高导电性电极材料^[122]。研究团队通过生物矿化手段改变了绿藻细胞的氢酶活性, 使其能在自然条件下实现高效持续光合产氢。这种技术通过仿生硅矿化制备了一种新型的“绿藻-二氧化硅”自组装复合体, 实现了细胞的空间功能分化。在复合体表层的细胞进行正常的光合作用产生氧气, 同时隔绝内部细胞和外界的联系; 在复合体内部的细胞则通过光合产氧和呼吸作用的平衡制造出一个无氧环境, 激活氢酶活性, 从而实现光合产氢。这一发现为通

过材料化学改造光合生物进而实现光生物产氢提供了新的思路, 并为生物能源的制备提供了新的策略^[123]。

4 挑战与展望

随着全球对锂离子电池需求的不断增加, 电池金属的回收已成为实现可持续发展的关键环节。生物法回收锂离子电池由于其环境友好性和低成本优势, 已逐渐成为一个具有研究价值的方向。通过生物浸出、生物吸附、生物富集和生物矿化等工艺, 可以有效回收锂、钴、镍、锰等电池中的关键金属离子, 并可进一步将这些产物用于电极材料的再生, 实现锂离子电池废物的循环利用。然而, 目前该领域尚处于起步阶段, 如何提高回收效率并降低成本, 仍然是一项巨大的挑战, 但是技术创新与跨学科融合正推动该领域向高效、精准、可持续的方向发展。

传统生物浸出依赖天然微生物的代谢产酸能力, 其效率受限于菌种对金属毒性的敏感性和代谢通量的天然限制。合成生物学为此提供了突破方向: 通过基因编辑技术增强菌株的金属耐受性 (如导入金属转运蛋白基因^[124]), 或设计代谢通路以提升有机酸产量 (如优化黑曲霉的柠檬酸合成途径^[125]), 从而提高金属离子的浸出效率。此外, 借鉴枯草芽孢杆菌中的群体感应调控机制^[126], 未来可开发能感知环境变化 (如金属离子浓度) 并动态调节自身行为 (如自诱导表达酸分泌基因或抗金属毒性蛋白) 的工程微生物群落, 实现浸出过程的智能优化。生物吸附与富集技术正从自然菌种筛选向工程化改造迈进。

(1) 通过合成生物学定制化吸附能力 例如, 利用 CRISPR-Cas9 基因编辑技术, 在大肠杆菌中串联表达人源金属硫蛋白基因 (hMT-A), 显著提高了对镉和砷的吸附能力 (最高分别达 6.36 mg/g 和 7.59 mg/g 干重细胞)^[127], 该策略可直接应用于定制对锂离子电池关键金属 (如锂、钴、镍) 具有高亲和力与选择性的工程菌株或蛋白。

(2) 仿生材料设计 例如, 基于亚纳米级孔道的 COF 膜 (如 0.78 nm 通道) 可实现锂离子的选择性渗透, 其 Li⁺/Mg²⁺ 选择性达 36, 通量显著高于

传统膜材料^[128]。

生物矿化技术在锂离子电池关键金属回收领域的未来突破将主要依赖于合成生物学与仿生矿化的深度融合与协同创新。以 Echavarri-Bravo 团队的研究为例，通过基因工程改造的 *S. oneidensis* MR-1 菌株，成功从锰酸锂 (LMO) 和锂镍锰钴氧化物 (NMC) 废料中选择性回收锰并生成具有均匀球形形貌的碳酸锰 (MnCO_3)，经煅烧转化为钠-锰-磷酸盐“细长石型”相 $[\text{Na}_{8.71}\text{Mn}_{22}(\text{PO}_4)_{18}]$ ，为生物矿化材料直接再生为电极组分提供了实证路径^[129]。另一方面，借鉴天然生物矿化机制开发仿生材料，如开发仿生磁性纳米催化剂^[130]或利用仿生模板通过生物分子（如蛋白质、多糖）或合成聚合物调控金属氧化物的结晶路径，实现形貌和晶相的精准控制，或开发新型仿生磁性纳米催化剂用于金属分离。

综上所述，生物法回收技术以其绿色可持续的独特优势，正为电池金属循环利用开辟新路径。未来研究将聚焦于：运用合成生物学工具（基因编辑、智能响应系统等）强化微生物金属耐受性与目标产物合成，开发生物/仿生高选择性吸附材料，并设计工程菌株实现电极组分定向生物矿化再生，通过跨学科创新突破技术瓶颈，克服当前电池金属生物回收的效率和成本瓶颈，推动资源回收与能源材料领域的协同发展^[131-132]。

参 考 文 献

- [1] CHU S, MAJUMDAR A. Opportunities and challenges for a sustainable energy future[J]. Nature, 2012, 488(7411): 294-303.
- [2] DEGEN F, WINTER M, BENDIG D, et al. Energy consumption of current and future production of lithium-ion and post lithium-ion battery cells[J]. Nature Energy, 2023, 8(11): 1284-1295.
- [3] LARCHER D, TARASCON J M. Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage[J]. Nature Chemistry, 2015, 7(1): 19-29.
- [4] PLACKE T, KLOEPSCH R, DÜHNEN S, et al. Lithium ion, lithium metal, and alternative rechargeable battery technologies: the odyssey for high energy density[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2017, 21(7): 1939-1964.
- [5] IEA. Global EV outlook 2023: catching up with climate ambitions[M]. Paris: OECD Publishing, 2023.
- [6] EVTank. 中国锂离子电池回收拆解与梯次利用行业发展白皮书(2024年)[R]. 2024.
- [7] CASTELVECCHI D. Electric cars and batteries: how will the world produce enough?[J]. Nature, 2021, 596(7872): 336-339.
- [8] WANG H T, FENG K S, WANG P, et al. China's electric vehicle and climate ambitions jeopardized by surging critical material prices[J]. Nature Communications, 2023, 14: 1246.
- [9] ROY J J, CAO B, MADHAVI S. A review on the recycling of spent lithium-ion batteries (LIBs) by the bioleaching approach [J]. Chemosphere, 2021, 282: 130944.
- [10] MROZIK W, ALI RAJAEIFAR M, HEIDRICH O, et al. Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries[J]. Energy & Environmental Science, 2021, 14(12): 6099-6121.
- [11] BANZA LUBABA NKULU C, CASAS L, HAUFROID V, et al. Sustainability of artisanal mining of cobalt in DR Congo[J]. Nature Sustainability, 2018, 1(9): 495-504.
- [12] XU C J, BEHRENS P, GASPER P, et al. Electric vehicle batteries alone could satisfy short-term grid storage demand by as early as 2030[J]. Nature Communications, 2023, 14: 119.
- [13] LI Y K, LV W G, HUANG H L, et al. Recycling of spent lithium-ion batteries in view of green chemistry[J]. Green Chemistry, 2021, 23(17): 6139-6171.
- [14] RAUTELA R, YADAV B R, KUMAR S. A review on technologies for recovery of metals from waste lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2023, 580: 233428.
- [15] SAYILGAN E, KUKRER T, CIVELEKOGLU G, et al. A review of technologies for the recovery of metals from spent alkaline and zinc-carbon batteries[J]. Hydrometallurgy, 2009, 97(3/4): 158-166.
- [16] BLUMBERGS E, SERGA V, PLATACIS E, et al. Cadmium recovery from spent Ni-Cd batteries: a brief review[J]. Metals, 2021, 11(11): 1714.
- [17] PRADHAN S, NAYAK R, MISHRA S. A review on the recovery of metal values from spent nickel metal hydride and lithium-ion batteries[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2022, 19(5): 4537-4554.
- [18] SILVESTRI L, FORCINA A, SILVESTRI C, et al. Circularity potential of rare earths for sustainable mobility: recent developments, challenges and future prospects[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 292: 126089.
- [19] ZHANG G Q, LI L M, CHOI S. Robotic automated battery sorting system[C]//2012 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA). April 23-24, 2012, Woburn, MA, USA. IEEE, 2012: 117-120.
- [20] WANG L, LIU J R, YE Q, et al. Sorting method of lithium-ion batteries in mass production[J]. IOP Conference Series: Earth

- and Environmental Science, 2020, 512(1): 012127.
- [21] CHEN X P, LUO C B, ZHANG J X, et al. Sustainable recovery of metals from spent lithium-ion batteries: a green process[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2015, 3(12): 3104-3113.
- [22] ZHENG R J, WANG W H, DAI Y K, et al. A closed-loop process for recycling $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_{(1-x-y)}\text{O}_2$ from mixed cathode materials of lithium-ion batteries[J]. Green Energy & Environment, 2017, 2(1): 42-50.
- [23] DORELLA G, MANSUR M B. A study of the separation of cobalt from spent Li-ion battery residues[J]. Journal of Power Sources, 2007, 170(1): 210-215.
- [24] GOODENOUGH J B, PARK K S. The Li-ion rechargeable battery: a perspective[J]. Journal of the American Chemical Society, 2013, 135(4): 1167-1176.
- [25] ZHANG T, HE Y Q, WANG F F, et al. Chemical and process mineralogical characterizations of spent lithium-ion batteries: an approach by multi-analytical techniques[J]. Waste Management, 2014, 34(6): 1051-1058.
- [26] WANG X, GAUSTAD G, BABBITT C W. Targeting high value metals in lithium-ion battery recycling *via* shredding and size-based separation[J]. Waste Management, 2016, 51: 204-213.
- [27] WANG H F, LIU J S, BAI X J, et al. Separation of the cathode materials from the Al foil in spent lithium-ion batteries by cryogenic grinding[J]. Waste Management, 2019, 91: 89-98.
- [28] MARYAM SADEGHI S, JESUS J, SOARES H M V M. A critical updated review of the hydrometallurgical routes for recycling zinc and manganese from spent zinc-based batteries [J]. Waste Management, 2020, 113: 342-350.
- [29] HU X F, ROBLES A, VIKSTRÖM T, et al. A novel process on the recovery of zinc and manganese from spent alkaline and zinc-carbon batteries[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 411: 124928.
- [30] FADLIAH, RAYA I, TABA P, et al. The advances in the recovery process for precious metals from nickel slag, a review [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2024, 1339(1): 012030.
- [31] BISWAL B K, BALASUBRAMANIAN R. Recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries using microbial agents for bioleaching: a review[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1197081.
- [32] 郭丽丽. 动力电池回收:从“0”到“1000”,尽享行业发展红利 [R/OL]. 2022. (2022-08-01) [2025-01-01]. https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202208011576751772_1.pdf?1659372203000.pdf.
- GUO L L. Power battery recycling: from “0” to “1000”, enjoying the dividends of industry development[R/OL]. 2022. (2022-08-01) [2025-01-01]. https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202208011576751772_1.pdf?1659372203000.pdf.
- [33] 郭宇, 于刚强, 陈标华. 废锂离子电池的冶金回收工艺研究进展[J]. 北京工业大学学报, 2024, 50(2): 230-245.
- GUO Y, YU G Q, CHEN B H. Research progress on metallurgical recovery process of waste lithium batteries[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2024, 50(2): 230-245.
- [34] BENZAL MONTES E. Study and optimisation of copper bioleaching process for electronic waste valorisation[D]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2021.
- [35] WANG N B, GARG A, SU S S, et al. Echelon utilization of retired power lithium-ion batteries: challenges and prospects [J]. Batteries, 2022, 8(8): 96.
- [36] HUA Y, ZHOU S D, HUANG Y, et al. Sustainable value chain of retired lithium-ion batteries for electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2020, 478: 228753.
- [37] VINCI G, ARANGIA V C, RUGGIERI R, et al. Reuse of lithium iron phosphate (LiFePO_4) batteries from a life cycle assessment perspective: the second-life case study[J]. Energies, 2024, 17(11): 2544.
- [38] Lithium-ion battery recycling: market and innovation trends for a green future[R/OL]. Chemical Abstracts Service (CAS), 2025. (2025-02-18) [2025-03-01]. <https://web.cas.org/marketing/pdf/INSGENENGBRO102412-CAS-Insights-Lithium-Ion-Full-Report-Digital.pdf>.
- [39] SANTHIYA D, TING Y P. Use of adapted *Aspergillus niger* in the bioleaching of spent refinery processing catalyst[J]. Journal of Biotechnology, 2006, 121(1): 62-74.
- [40] BOSECKER K. Bioleaching: metal solubilization by microorganisms[J]. FEMS Microbiology Reviews, 1997, 20(3/4): 591-604.
- [41] PATHAK A, KOTHARI R, VINOBA M, et al. Fungal bioleaching of metals from refinery spent catalysts: a critical review of current research, challenges, and future directions[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 280: 111789.
- [42] DUSENGEMUNGU L, KASALI G, GWANAMA C, et al. Overview of fungal bioleaching of metals[J]. Environmental Advances, 2021, 5: 100083.
- [43] DEVI A S, GANESH S. Recent bioleaching approaches employed for the extraction of metals in mining fields for the purpose of utilization and creating the sustainable future[J]. Environmental Quality Management, 2024, 33(4): 317-333.
- [44] YUN S, JUNG H, LEE H J, et al. Bioleaching of valuable metals from three cathode active materials comprising lithium nickel cobalt manganese (NCM) oxide using indigenous microorganisms[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2024, 135: 552-560.
- [45] MISHRA D, KIM D J, RALPH D E, et al. Bioleaching of metals from spent lithium ion secondary batteries using

- Acidithiobacillus ferrooxidans*[J]. Waste Management, 2008, 28 (2): 333-338.
- [46] XIN B P, ZHANG D, ZHANG X, et al. Bioleaching mechanism of Co and Li from spent lithium-ion battery by the mixed culture of acidophilic sulfur-oxidizing and iron-oxidizing bacteria[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(24): 6163-6169.
- [47] WU W J, LIU X C, ZHANG X, et al. Mechanism underlying the bioleaching process of LiCoO₂ by sulfur-oxidizing and iron-oxidizing bacteria[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2019, 128(3): 344-354.
- [48] XIN Y Y, GUO X M, CHEN S, et al. Bioleaching of valuable metals Li, Co, Ni and Mn from spent electric vehicle Li-ion batteries for the purpose of recovery[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 116: 249-258.
- [49] HEYDARIAN A, MOUSAVI S M, VAKILCHAP F, et al. Application of a mixed culture of adapted acidophilic bacteria in two-step bioleaching of spent lithium-ion laptop batteries[J]. Journal of Power Sources, 2018, 378: 19-30.
- [50] ROY J J, ZAIDEN N, DO M P, et al. Microbial recycling of lithium-ion batteries: challenges and outlook[J]. Joule, 2023, 7 (3): 450-456.
- [51] ILYAS S, KIM M S, LEE J C. Integration of microbial and chemical processing for a sustainable metallurgy[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2018, 93(2): 320-332.
- [52] ILYAS S, ANWAR M A, NIAZI S B, et al. Bioleaching of metals from electronic scrap by moderately thermophilic acidophilic bacteria[J]. Hydrometallurgy, 2007, 88(1-4): 180-188.
- [53] DU PLESSIS C A, BATTY J D, DEW D W. Commercial applications of thermophile bioleaching[M]//Biomining. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007: 57-80.
- [54] BISWAL B K, JADHAV U U, MADHAIYAN M, et al. Biological leaching and chemical precipitation methods for recovery of Co and Li from spent lithium-ion batteries[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(9): 12343-12352.
- [55] BAHALOO-HOREH N, MOUSAVI S M. Enhanced recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries through optimization of organic acids produced by *Aspergillus niger*[J]. Waste Management, 2017, 60: 666-679.
- [56] MISHRA D, RHEE Y H. Microbial leaching of metals from solid industrial wastes[J]. Journal of Microbiology, 2014, 52 (1): 1-7.
- [57] AMIRI F, MOUSAVI S M, YAGHMAEI S, et al. Bioleaching kinetics of a spent refinery catalyst using *Aspergillus niger* at optimal conditions[J]. Biochemical Engineering Journal, 2012, 67: 208-217.
- [58] MOSSALI E, PICONE N, GENTILINI L, et al. Lithium-ion batteries towards circular economy: a literature review of opportunities and issues of recycling treatments[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 264: 110500.
- [59] KAPOOR A, VIRARAGHAVAN T. Fungal biosorption: an alternative treatment option for heavy metal bearing wastewaters: a review[J]. Bioresource Technology, 1995, 53 (3): 195-206.
- [60] BAYRAKTAR O. Bioleaching of nickel from equilibrium fluid catalytic cracking catalysts[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2005, 21(5): 661-665.
- [61] RAWLINGS D E. Heavy metal mining using microbes[J]. Annual Review of Microbiology, 2002, 56: 65-91.
- [62] NADERI M, SHAFIIE S Z, KARAMOZIAN M, et al. Optimization of parameters affecting recovery of copper from Sarcheshmeh low-grade sulfide ore using Bioleaching[J]. Journal of Mining and Environment, 2017, 8(4): 523-537.
- [63] DAS S, NAIK DESHAVATH N, GOUD V V, et al. Bioleaching of Al from spent fluid catalytic cracking catalyst using *Aspergillus* species[J]. Biotechnology Reports, 2019, 23: e00349.
- [64] HAMAD H O, ALMA M H, ISMAEL H M, et al. The effect of some sugars on the growth of *Aspergillus niger*[J]. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Doğa Bilimleri Dergisi, 2015, 17(4): 7.
- [65] 熊结青, 杨儒文, 佟毅, 等. 黑曲霉种子及其制备方法以及黑曲霉发酵产柠檬酸的方法: CN115703995A[P]. 2023-02-17.
- XIONG J Q, YANG R W, TONG Y, et al. *Aspergillus niger* seed and its preparation method and the method of citric acid production by fermentation of *Aspergillus niger*: CN115703995 A[P]. 2023-02-17.
- [66] 刘浩, 徐永学. 一种高产L-苹果酸的黑曲霉基因工程菌株及其构建与应用: CN109207383B[P]. 2020-08-04.
- LIU H, XU Y X. A genetically engineered strain of *Aspergillus niger* with high production of L-malic acid and its construction and application: CN109207383B[P]. 2020-08-04.
- [67] BEHERA B C. Citric acid from *Aspergillus niger*: a comprehensive overview[J]. Critical Reviews in Microbiology, 2020, 46(6): 727-749.
- [68] BALLESTER A, BLÁZQUEZ M L, GONZÁLEZ F, et al. Catalytic role of silver and other ions on the mechanism of chemical and biological leaching[M]//Microbial processing of metal sulfides. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007: 77-101.
- [69] ROY J J, MADHAVI S, CAO B. Metal extraction from spent lithium-ion batteries (LIBs) at high pulp density by environmentally friendly bioleaching process[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 280: 124242.
- [70] SETHURAJAN M, GAYDARDZHIEV S. Bioprocessing of spent lithium ion batteries for critical metals recovery-a review [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 165:

- 105225.
- [71] HOREH N B, MOUSAVI S M, SHOJAOSADATI S A. Bioleaching of valuable metals from spent lithium-ion mobile phone batteries using *Aspergillus niger*[J]. Journal of Power Sources, 2016, 320: 257-266.
- [72] BAHALOO-HOREH N, VAKILCHAP F, MOUSAVI S M. Bio-hydrometallurgical methods for recycling spent lithium-ion batteries[M]//Recycling of spent lithium-ion batteries. Cham: Springer International Publishing, 2019: 161-197.
- [73] LALROPUA L, KUCERA J, RASSY W Y, et al. Metal recovery from spent lithium-ion batteries via two-step bioleaching using adapted chemolithotrophs from an acidic mine pit lake[J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1347072.
- [74] GU Z Y, AIKEBAIER Y, AREFIEVA V, et al. Using microbiological leaching method to remove heavy metals from sludge[J]. Eurasian Journal of Soil Science (Ejss), 2017, 6 (1): 51.
- [75] KANESALINGAM B, FERNANDO W A M, PANDA S, et al. Harnessing the capabilities of microorganisms for the valorisation of coal fly ash waste through biometallurgy[J]. Minerals, 2023, 13(6): 724.
- [76] ROY J J, RAROTRA S, KRIKSTOLAITYTE V, et al. Green recycling methods to treat lithium-ion batteries E-waste: a circular approach to sustainability[J]. Advanced Materials, 2022, 34(25): 2103346.
- [77] MADRIGAL-ARIAS J E, ARGUMEDO-DELIRA R, ALARCÓN A, et al. Bioleaching of gold, copper and nickel from waste cellular phone PCBs and computer goldfinger motherboards by two *Aspergillus niger* strains[J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2015, 46(3): 707-713.
- [78] HANSDA A, KUMAR V, ANSHUMALI. A comparative review towards potential of microbial cells for heavy metal removal with emphasis on biosorption and bioaccumulation[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2016, 32 (10): 170.
- [79] MOREIRA Y H B, MANTEGAZINI D Z, ANDRADE G R S, et al. Reciclagem de baterias de íon-lítio: Uma breve revisão sobre os processos, avanços e perspectivas[J]. Brazilian Journal of Production Engineering, 2024, 10(1): 36-52.
- MOREIRA Y H B, MANTEGAZINI D Z, ANDRADE G R S, et al. Recycling of lithium-ion batteries: a brief review of processes, advancements, and prospects[J]. Brazilian Journal of Production Engineering, 2024, 10(1): 36-52.
- [80] WANG J L, CHEN C. Biosorbents for heavy metals removal and their future[J]. Biotechnology Advances, 2009, 27(2): 195-226.
- [81] 朴永哲, 黄玮, 崔玉波. 细菌对重金属的抗性及其解毒机理研究进展[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(6): 250-254.
- PIAO Y Z, HUANG W, CUI Y B. On the research advances of the resistance and de-toxicity power of bacteria from heavy metals[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(6): 250-254.
- [82] YE J S, YIN H, MAI B X, et al. Biosorption of chromium from aqueous solution and electroplating wastewater using mixture of *Candida lipolytica* and dewatered sewage sludge[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(11): 3893-3902.
- [83] SHAHID A, PANDEY C, AHMAD F, et al. Bacterial bioremediation: strategies adopted by microbial-community to remediate lead from the environment[J]. Journal of Applied Biology & Biotechnology, 2021: 18-24.
- [84] DAUGHNEY C J, HETZER A, HEINRICH H T M, et al. Proton and cadmium adsorption by the archaeon *Thermococcus zilligii*: generalising the contrast between thermophiles and mesophiles as sorbents[J]. Chemical Geology, 2010, 273(1-2): 82-90.
- [85] 燕传明, 贺卓, 葛占标, 等. 两株重金属抗性细菌对铅镉吸附特性的比较研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(9): 3597-3604.
- YAN C M, HE Z, GE Z B, et al. Comparative study on adsorption characteristics of lead and cadmium by two heavy metal resistant bacteria[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(9): 3597-3604.
- [86] ECHAVARRI-BRAVO V, AMARI H, HARTLEY J, et al. Selective bacterial separation of critical metals: towards a sustainable method for recycling lithium ion batteries[J]. Green Chemistry, 2022, 24(21): 8512-8522.
- [87] VÁZQUEZ-ORTEGA A, FEIN J B. Thermodynamic modeling of Mn(II) adsorption onto manganese oxidizing bacteria[J]. Chemical Geology, 2017, 464: 147-154.
- [88] NNAJI N D, ANYANWU C U, MIRI T, et al. Mechanisms of heavy metal tolerance in bacteria: a review[J]. Sustainability, 2024, 16(24): 11124.
- [89] AL-AJALIN F A, IDRIS M, ABDULLAH S R S, et al. Biosorption of lead and copper by epiphytic rhizobacterial species isolated from *Lepironia articulata* and *Scirpus grossus* [J]. Journal of Ecological Engineering, 2024, 25(2): 44-61.
- [90] JARDINE J L. Potential bioremediation of heavy metal ions, polycyclic aromatic hydrocarbons and biofilms with South African hot spring bacteria[J]. Bioremediation Journal, 2022, 26(3): 261-269.
- [91] RENDÓN-CASTRILLÓN L, RAMÍREZ-CARMONA M, OCAMPO-LÓPEZ C, et al. Bioleaching techniques for sustainable recovery of metals from solid matrices[J]. Sustainability, 2023, 15(13): 10222.
- [92] DIEP P, MAHADEVAN R, YAKUNIN A F. Heavy metal removal by bioaccumulation using genetically engineered microorganisms[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2018, 6: 157.
- [93] CHOJNACKA K. Biosorption and bioaccumulation - the

- prospects for practical applications[J]. *Environment International*, 2010, 36(3): 299-307.
- [94] STURINI M, GIROMETTA C, MARASCHI F, et al. A preliminary investigation on metal bioaccumulation by *Perenniporia fraxinea*[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, 98(4): 508-512.
- [95] WIECZOREK J, BARAN A, BUBAK A. Mobility, bioaccumulation in plants, and risk assessment of metals in soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 882: 163574.
- [96] YIN K, WANG Q N, LV M, et al. Microorganism remediation strategies towards heavy metals[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 360: 1553-1563.
- [97] ZHAO M H, ZHANG C S, ZENG G M, et al. Toxicity and bioaccumulation of heavy metals in *Phanerochaete chrysosporium*[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(5): 1410-1418.
- [98] DENG X, LI Q B, LU Y H, et al. Genetic engineering of *E. coli* SE5000 and its potential for Ni²⁺ bioremediation[J]. *Process Biochemistry*, 2005, 40(1): 425-430.
- [99] DENG X, HE J M, HE N. Comparative study on Ni²⁺-affinity transport of nickel/cobalt permeases (NiCoTs) and the potential of recombinant *Escherichia coli* for Ni²⁺ bioaccumulation[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 130: 69-74.
- [100] DENG X, LI Q B, LU Y H, et al. Bioaccumulation of nickel from aqueous solutions by genetically engineered *Escherichia coli*[J]. *Water Research*, 2003, 37(10): 2505-2511.
- [101] VALIX M, TANG J Y, MALIK R. Heavy metal tolerance of fungi[J]. *Minerals Engineering*, 2001, 14(5): 499-505.
- [102] DIEP P, SHEN H L, WIESNER J A, et al. Engineered nickel bioaccumulation in *Escherichia coli* by NikABCDE transporter and metallothionein overexpression[J]. *Engineering in Life Sciences*, 2023, 23(7): 2200133.
- [103] GAHLOT D K, TAHERI N, MAHATO D R, et al. Bioengineering of non-pathogenic *Escherichia coli* to enrich for accumulation of environmental copper[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 20327.
- [104] YANG J S, CAO J, XING G L, et al. Lipid production combined with biosorption and bioaccumulation of cadmium, copper, manganese and zinc by oleaginous microalgae *Chlorella minutissima* UTEX2341[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 175: 537-544.
- [105] LI G, WANG Y, LUAN H H, et al. Highly selective transport and enrichment of lithium ions through bionic ion pair receptor nanochannels[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(27): 32753-32761.
- [106] BAI X, SUN Y Z, LI X F, et al. A deep dive into spent lithium-ion batteries: from degradation diagnostics to sustainable material recovery[J]. *Electrochemical Energy Reviews*, 2024, 7(1): 33.
- [107] BULLEN D. Utilization of *paenibacillus polymyxa* in the recovery of lithium bearing minerals[D]. Michigan: Michigan Technological University, 2021.
- [108] ECHAVARRI-BRAVO V, AMARI H, HARTLEY J, et al. Selective bacterial separation of critical metals: towards a sustainable method for recycling lithium ion batteries[J]. *Green Chemistry*, 2022, 24(21): 8512-8522.
- [109] YAN J, WANG S J, ZHONG K Q, et al. Sulfate reduction and heavy metal removal by a novel metal-resistant sulfate-reducing bacterium: mechanism and optimization[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2019, 168: 88-99.
- [110] KUMAR M, NANDI M, PAKSHIRAJAN K. Recent advances in heavy metal recovery from wastewater by biogenic sulfide precipitation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 278: 111555.
- [111] DENG L Y, REN W Q, LI M, et al. Photoelectrochemical and energy storage properties for metal sulfides regulated by biomineralization of sulfate reducing bacteria[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 340: 130741.
- [112] SITTE J, POLLOK K, LANGENHORST F, et al. Nanocrystalline nickel and cobalt sulfides formed by a heavy metal-tolerant, sulfate-reducing enrichment culture[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2013, 30(1): 36-47.
- [113] ZHANG W Q, LIU H X, YING J, et al. Preparation of nickel-iron sulfide/oxide nanocomposites by biomineralization of sulfate-reducing bacterium for efficient oxygen evolution[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 475: 146211.
- [114] HAN X H, WANG F X, ZHENG S L, et al. Morphological, microstructural, and *in situ* chemical characteristics of siderite produced by iron-reducing bacteria[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(25): 11016-11026.
- [115] YOON Y, KIM B, CHO M. Mineral transformation of poorly crystalline ferrihydrite to hematite and goethite facilitated by an acclimated microbial consortium in electrodes of soil microbial fuel cells[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 902: 166414.
- [116] ŠEBESTA M, VOJTKOVÁ H, CYPRICHOVÁ V, et al. Mycosynthesis of metal-containing nanoparticles: fungal metal resistance and mechanisms of synthesis[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(22): 14084.
- [117] BAO P, XIA M C, LIU A J, et al. Extracellular polymeric substances (EPS) secreted by *Purpureocillium lilacinum* strain Y3 promote biosynthesis of jarosite[J]. *RSC Advances*, 2018, 8(40): 22635-22642.
- [118] 用真菌首次合成电池电极材料[J]. *光学精密机械*, 2016(2): 26-27.
- First synthesis of battery electrode materials from fungi[J]. *Optical Precision Machinery*, 2016(2): 26-27.
- [119] KLAUS-JOERGER T, JOERGER R, OLSSON E, et al. Bacteria as workers in the living factory: metal-accumulating

- bacteria and their potential for materials science[J]. Trends in Biotechnology, 2001, 19(1): 15-20.
- [120] LI Q W, LIU D Q, JIA Z, et al. Fungal biomineralization of manganese as a novel source of electrochemical materials[J]. Current Biology, 2016, 26(7): 950-955.
- [121] VIJAYANANDAN A S, BALAKRISHNAN R M. Biosynthesis of cobalt oxide nanoparticles using endophytic fungus *Aspergillus nidulans*[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 218: 442-450.
- [122] BARCIELA P, CARPENA M, LI N Y, et al. Macroalgae as biofactories of metal nanoparticles; biosynthesis and food applications[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2023, 311: 102829.
- [123] XIONG W, ZHAO X H, ZHU G X, et al. Silicification-induced cell aggregation for the sustainable production of H₂ under aerobic conditions[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2015, 54(41): 11961-11965.
- [124] HIGASHI S L, ZHENG Y J, CHAKRABORTY T, et al. Adaptive metal ion transport and metalloregulation-driven differentiation in pluripotent synthetic cells[J]. Nature Chemistry, 2025, 17(1): 54-65.
- [125] ZHANG L H, ZHENG X M, CAIRNS T C, et al. Disruption or reduced expression of the orotidine-5'-decarboxylase gene *pyrG* increases citric acid production: a new discovery during recyclable genome editing in *Aspergillus niger*[J]. Microbial Cell Factories, 2020, 19(1): 76.
- [126] XU K D, TONG Y, LI Y, et al. Efficient, flexible autoinduction expression systems with broad initiation in *Bacillus subtilis*[J]. ACS Synthetic Biology, 2021, 10(11): 3084-3093.
- [127] MA Y, LIN J Q, ZHANG C J, et al. Cd(II) and As(III) bioaccumulation by recombinant *Escherichia coli* expressing oligomeric human metallothioneins[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 185(2-3): 1605-1608.
- [128] WU T, QIAN Y J, ZHU Z B, et al. Imine-linked 3D covalent organic framework membrane featuring highly charged sub-1 nm channels for exceptional lithium-ion sieving[J]. Advanced Materials, 2025, 37(8): e2415509.
- [129] ECHAVARRI-BRAVO V, MARSLAND I, JENSEN M V, et al. Characterization and reuse of lithium-ion battery cathode material recovered through a bacterial process[J]. Advanced Energy Materials, 2025: 2405901.
- [130] 周雁红, 李夏兰, 张光亚. 生物大分子介导仿生矿化制备磁性纳米粒子的研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(5): 2719-2729.
- ZHOU Y H, LI X L, ZHANG G Y. Research progress of biomacromolecular-mediated biomimetic mineralization for the preparation of magnetic nanoparticles[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(5): 2719-2729.
- [131] 肖璐, 李寅. 生物固碳: 从自然生物到人工合成[J]. 合成生物学, 2022, 3(5): 833-846.
- XIAO L, LI Y. Biological carbon fixation: from natural to synthetic[J]. Synthetic Biology Journal, 2022, 3(5): 833-846.
- [132] 孙韬, 张卫文, 胡章立, 等. 合成生物学助力碳中和: 新底盘、新策略与新技术[J]. 合成生物学, 2022, 3(5): 821-824.
- SUN T, ZHANG W W, HU Z L, et al. Synthetic biology for carbon neutrality: new chassis, new strategies and new technologies[J]. Synthetic Biology Journal, 2022, 3(5): 821-824.



通讯作者: 贾海洋(1988—),男,教授,博士生导师。研究方向为合成生物学分子调控工具的开发、人工细胞等仿生系统的构建与应用、新型人工细胞代谢工厂设计与工程应用、基于生物大分子的3D打印微型机器人的设计与构建、新型抗体开发与高通量抗体筛选技术的研发等。

E-mail: haiyangjia@bit.edu.cn



第一作者: 朱思羽(2004—),女,本科生。研究方向为耐辐射微生物环境应答机制与蛋白质组学解析、合成生物学驱动的废旧锂电池金属生物回收技术以及基于无细胞合成与微流控技术的空间原位药物制备等前沿交叉领域。

E-mail: 1120222466@bit.edu.cn