

废弃锂电池生物提锂的强化策略与展望

张 静^{1,2}, 陈 赓², 肖 勇^{1,2,*}

(1. 福州大学 环境与安全工程学院, 福建福州 350108; 2. 中国科学院城市环境研究所
区域与城市生态安全全国重点实验室, 福建厦门 361021)

摘要: 随着新能源汽车与储能产业的快速发展, 从废弃锂离子电池中实现高效、绿色的锂资源回收已成为亟待解决的重要问题。相比传统火法与湿法冶金, 生物浸出因反应条件温和、环境友好及成本较低而具有显著潜力, 但其浸出效率、过程稳定性及工程放大能力仍有待提升。为此, 本文围绕废弃锂离子电池生物提锂的强化策略进行探讨, 首先阐释功能微生物参与锂浸出的关键作用机制, 以多尺度耦合机制为主线, 重点从微生物层面和工程层面对强化策略进行总结。在微生物层面, 归纳了通过功能微生物筛选、适应性驯化、人工合成微生物等手段增强酸解、络合及氧化还原过程的研究进展; 在工程层面, 系统梳理了 pH、碳源、矿浆浓度等参数优化以及工艺时序优化对浸出性能的影响。同时, 进一步总结了生物浸出与物理、化学辅助浸出、电化学调控等技术的协同强化路径。最后, 针对生物提锂在代谢供给、界面过程与材料演化、选择性浸出以及工程与传质运行方面的难题, 展望了未来通过合成生物学、挖掘锂特异性模块、智能化调控以及多技术耦合推动生物提锂向高效化、稳定化与工业化发展的研究方向, 为实现锂资源的可持续循环利用提供支持。

关键词: 锂离子电池; 生物浸出; 锂回收; 强化策略; 绿色冶金

中图分类号: X505

文献标识码: A

Enhancement Strategies and Perspectives for Lithium Bioleaching from Spent Lithium-Ion Batteries

ZHANG Jing^{1,2}, CHEN Geng², XIAO Yong^{1,2,*}

(1. College of Environment and Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. State Key Laboratory for Ecological Security of Regions and Cities, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract: The rapid growth of electric vehicle and energy storage sectors has driven a substantial increase in global lithium demand, highlighting the urgent need to recover lithium from spent lithium-ion batteries as a strategy to alleviate resource scarcity, reduce costs, and mitigate environmental impacts. Conventional recovery methods, including pyrometallurgy and hydrometallurgy, are constrained by high energy consumption, significant environmental burdens, and limited selectivity, thereby hindering their feasibility for large-scale and sustainable lithium recycling. In this context, bioleaching has emerged as a promising alternative owing to its mild operating conditions, environmental compatibility, and relatively low cost; however, leaching efficiency and process stability remain suboptimal. This review focuses on strategies to enhance lithium bioleaching from spent lithium-ion batteries, beginning with an elucidation of the fundamental mechanisms through which functional microorganisms mediate lithium extraction. Based on these mechanisms, enhancement

收稿日期: 2025-12-31

修回日期: 2026-03-20

接受日期: 2026-03-23

DOI: 10.20078/j.eep.20260407

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(22276183); 中国科学院青年创新促进会优秀会员资助项目(Y2022082)

第一作者: 张 静(2000—), 女, 海南万宁人, 硕士研究生, 主要研究方向为固废处理与资源化。E-mail: zhangjing1@iue.ac.cn

*通讯作者: 肖 勇(1982—), 男, 湖南长沙人, 研究员, 主要研究方向为环境工程微生物。E-mail: yxiao@iue.ac.cn

strategies are systematically discussed from both microbial and engineering perspectives, with multiscale coupled mechanisms serving as the central framework. At the microbial level, recent advances in functional strain screening—including the isolation of indigenous microorganisms and the development of non-acidophilic systems—as well as adaptive evolution and synthetic biology approaches (e.g., genetic engineering and the construction of synthetic microbial consortia), are reviewed for their capacity to improve acidolysis, complexation, and redox-mediated leaching processes. At the engineering level, the transition from conventional parameter optimization (e.g., pH, carbon source, and pulp density) to data- and model-driven process optimization is examined, alongside the contribution of process scheduling to enhancing leaching kinetics and operational stability. Furthermore, synergistic strategies that combine bioleaching with physical, chemical, or electrochemical interventions are critically analyzed. To address key bottlenecks in bioleaching-based lithium recovery, including metabolic supply limitations, microbe–material interfacial processes, material evolution, selective dissolution, and mass-transfer constraints, future research should prioritize the following directions: (1) integrated multi-omics analyses combined with network modeling to elucidate metabolic allocation, stress-response regulation, and microbe–material interfacial dynamics under complex environmental conditions; synthetic biology tools can enable rational design of microbial strains and consortia to enhance efficiency and selectivity; (2) mechanistic studies of lithium handling, encompassing lithium sensing, transmembrane transport, and intracellular accumulation, which can facilitate the identification or design of engineerable, lithium-specific functional modules, enabling engineered microorganisms to achieve in situ selective lithium recovery during dissolution; and (3) from an engineering perspective, a shift from single-factor empirical optimization to cross-scale, multi-level, and intelligent process control strategies, maximizing system-wide efficiency. The integration of life-cycle assessment and techno-economic analysis is also recommended to systematically evaluate environmental performance and economic feasibility, thereby providing a robust foundation for stable scale-up and industrial application. In summary, this review systematically examines the mechanisms and enhancement strategies of lithium bioleaching from spent lithium-ion batteries and aims to promote the synergistic advancement of microbial innovation and engineering integration, ultimately providing theoretical and technical guidance for establishing a sustainable, efficient, and industrially viable framework for green lithium recovery.

Keywords: Lithium-ion battery; Bioleaching; Lithium recycling; Enhanced strategy; Green metallurgy

0 引 言

当前,全球能源结构加速向低碳化转型,新能源汽车与储能产业快速发展,显著拉动了锂离子电池(LIBs)的需求增长。作为核心储能载体^[1],LIBs的规模化应用推动锂资源消费持续攀升,未来全球对锂的需求将远超目前供应能力。我国作为最大锂消费国,锂资源储量丰富,但由于资源禀赋条件复杂、开发难度大及品位差异显著等因素^[2],仍高度依赖进口^[3]。锂资源的分布不均提升了锂的战略价值,也加剧供应链的脆弱性,对新能源产业发展形成挑战。与此同时,伴随 LIBs 产业规模

扩张,大量使用寿命到期的 LIBs 快速累积^[4],若处置不当将引发资源浪费与环境污染。值得注意的是,LIBs 中锂含量高于矿石且更容易提纯^[4]。因此,从废弃 LIBs 中高效回收锂不仅可缓解资源紧张、降低供应成本并减少环境压力^[4-5],而且对加速全球能源结构转型,并实现“双碳”目标具有重要意义。

传统的锂回收技术包括火法冶金、湿法冶金和直接回收^[6]。火法冶金工艺成熟、处理规模大且反应速率快,但其高温条件导致能耗显著增加,同时锂易进入炉渣相,回收率偏低,并伴随有害气体排放^[7]。湿法冶金是目前应用最广泛的方法,具

有较高的金属回收率和相对较低的能耗,但酸浸过程易造成设备腐蚀和多金属共溶,带来二次污染的同时增加后续分离难度^[8]。直接回收环境负荷较小,但受材料适配性和产品纯度限制,通常仍需与其他工艺耦合精炼以实现高品质回收^[9]。传统技术虽已实现工业化,但在环境友好性、资源效率等方面难以实现协同优化。如何在复杂多金属体系中实现锂的高回收与低环境负荷提取已成为当前锂回收领域的核心挑战。因此,发展绿色、可持续且选择性高的替代技术已成为必然趋势。

在此背景下,生物浸出作为一种环境友好的资源回收方法^[10],近年来逐渐成为研究热点。与传统方法相比,生物浸出具有工艺条件温和、能耗低、环境污染小的优点,尤其适合处理低品位矿石或复杂废弃 LIBs^[11]。此外,部分微生物能够在特定条件下实现金属浸出的选择性调控^[12]。然而,在复杂多金属体系中,生物浸出仍面临浸出速率慢、稳定性不足,以及工程放大与连续化运行经验有限等问题。因此,亟须建立机制认知框架与过程强化策略体系,为推动生物提锂技术工程化应用奠定理论基础。

面对日益增长的锂资源需求与生物浸出技术的瓶颈,本综述旨在系统梳理基于废弃 LIBs 生物提锂技术从微生物机制到工艺强化策略的最新进展,以多尺度耦合机制为主线,依次阐释其功能微生物类型及浸出机制,分析微生物层面、工程层面以及多技术协同的关键强化策略。进一步结合现有成果,提出当前领域有待突破的技术瓶颈。最后,展望技术集成与绿色化、高值化协同发展路径,进而推动锂回收向高浸出率、低能耗与全过程绿色化的方向实现范式革新。

1 生物浸出提锂的微生物学基础

生物浸出提锂本质上是一种由微生物驱动的生物化学界面过程,其核心在于金属的迁移与转化。因此,深入解析功能微生物的群落结构、代谢特性及其在浸出机制,为生物提锂过程强化与体系优化的提供理论基础。

1.1 关键功能微生物

生物浸出提锂体系的效能依赖于功能微生物的代谢与物种多样性。根据能量与碳源利用方式,这些微生物主要分为化能自养型和异养型微生物两类^[13]。

化能自养型微生物以无机物氧化为能源、以

CO₂ 为主要碳源^[14],其中嗜酸菌能在低 pH 下稳定生长,为应用最广的类群^[10]。典型功能菌如氧化亚铁硫杆菌(*Acidithiobacillus ferrooxidans*)和氧化硫硫杆菌(*Acidithiobacillus thiooxidans*),分别通过氧化 Fe²⁺和硫化物产生 Fe³⁺和 H₂SO₄,促进金属浸出^[10],钩端螺旋菌属(*Leptospirillum*)则以 Fe²⁺作为能源^[14]。多数嗜酸菌对高浓度金属具有良好耐受性,能在废弃 LIBs 复杂浸出体系中维持较高活性。

化能异养微生物主要包括异养细菌和真菌,通过分泌有机酸参与金属浸出^[13]。相比细菌,真菌能利用多种碳源、适应更宽 pH 范围,在废弃 LIBs 浸出体系中表现出更短的滞后期、更强的耐受性以及更高的浸出潜力^[15]。曲霉属(*Aspergillus*)和青霉属(*Penicillium*)是应用最广的真菌类群^[16],可利用蔗糖、葡萄糖等碳源并分泌柠檬酸、草酸与葡萄糖酸等代谢产物,对金属浸出具有显著作用^[17]。此外,部分细菌与真菌(如 *Pseudomonas*、*Clitocybe* 等)可通过产氰代谢形成稳定络合物,实现金属的高效浸出^[18]。

上述功能微生物的多样性决定了作用机制与代谢途径的差异。因而,在明确关键菌群组成的基础上,有必要从微观层面进一步阐明锂浸出的内在机制。

1.2 锂生物浸出机制

在化学反应机制分析,生物浸出主要涉及酸解、络合和氧化还原三类反应路径^[19],通过破坏废弃 LIBs 中过渡金属(钴、镍、锰等)氧化物的晶格稳定性,使其溶解或重构,从而影响锂的释放(图 1(a))。酸解指微生物产生的无机酸(如 H₂SO₄)或有机酸(如柠檬酸)提供质子(H⁺),攻击金属氧化物或硫化物,促使其浸出金属离子^[20]。例如,*Acidithiobacillus thiooxidans* 通过氧化硫元素生成 H₂SO₄,黑曲霉(*Aspergillus niger*)通过分泌有机酸破坏材料晶格结构并促进锂的释放^[17]。络合机制中,有机酸阴离子(如柠檬酸盐、草酸盐)与金属离子配位形成稳定络合物,从而降低金属离子活度、抑制再沉淀并推动金属进一步浸出^[20]。如 *Aspergillus nige* 代谢产生草酸等,与锂或其他金属离子形成络合物,进而影响锂的释放^[16]。氧化还原机制通过微生物介导电子转移,改变金属价态,降低晶格稳定性,从而促进金属浸出^[14]。例如 *Acidithiobacillus ferrooxidans* 氧化 Fe²⁺为 Fe³⁺,后者作为氧化剂进一步氧化 LiCoO₂,推动 Co 的浸出并协同锂的释放^[21]。此外,部分金属还原菌可

在中性或弱碱性条件下通过胞外电子传递介导固液界面的电子交换,从而诱导废弃 LIBs 中金属的还原溶解^[22]。胞外电子传递机制是通过 c 型细胞色素外膜蛋白(如 CymA、MtrC 等)及电子中介体(如黄素类化合物)将胞内代谢电子传递至金属氧化物表面,典型微生物如希瓦氏菌属(*Shewanella*)和地杆菌属(*Geobacter*)^[23]。*Shewanella* 可在厌氧条件下还原过渡金属、破坏材料结构,从而促进锂的释放^[24]。

根据微生物与废弃 LIBs 的相互作用方式,浸出机制可划分为接触与非接触机制(图 1(b))^[19]。接触浸出指微生物直接附着于 LIBs 表面,通过物理接触、生物膜形成及局部代谢反应实现界面酸化或氧化^[14, 20]。例如 *Acidithiobacillus ferrooxidans* 可通过细胞外聚合物(EPS)黏附行为并形成局部

反应微环境^[21]。非接触浸出则依赖代谢产物(如 Fe^{3+} 、 H_2SO_4 、有机酸等)在溶液中扩散并间接浸出金属^[12],例如 *Acidithiobacillus ferrooxidans* 氧化生成的 Fe^{3+} 可在无需直接附着的情况下实现锂的浸出,并在一定程度上降低金属毒性的影响^[14]。

综上,针对废弃 LIBs 体系,锂的生物浸出受微生物代谢供给(代谢活性物如酸、配体、氧化还原介体等)、界面过程(细胞黏附、生物膜形成、局部微环境调控等)、材料结构演化(金属价态转变、晶格破坏等)以及多相传质扩散(尤其在高矿浆浓度下)等多尺度耦合机制的共同控制。厘清上述协同机制不仅有助于揭示锂生物浸出的本质,而且可识别不同体系下的限速步骤与主导驱动力,从而为构建动力学模型、评估过程稳定性及在高矿浆浓度的放大设计提供理论与工程依据。

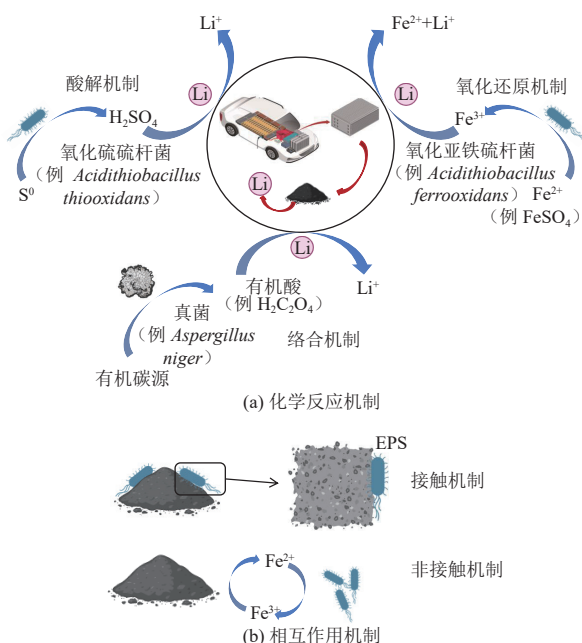


图 1 锂生物浸出机制

Fig. 1 Mechanism of lithium bioleaching

2 锂生物浸出的多技术强化策略

在废弃 LIBs 资源化利用中生物浸出法研究日益深入,然而单一生物过程常因传质效率低、金属离子竞争及微生物活性不足而受限。因此,研究趋势正转向强化微生物性能、工程调控以及多技术协同策略。

2.1 微生物层面

废弃 LIBs 生物浸出效率主要取决于微生物的金属耐受性和代谢能力。面对复杂的金属组分和严苛的理化条件,相关研究一方面致力于挖掘更适配的天然功能菌株,构建有效且可控的浸出微环境,另一方面探索通过驯化、共培养与代谢调控等策略提升微生物性能(图 2)。

2.1.1 功能微生物的筛选

在微生物筛选策略上,来源于酸性矿山的菌株因长期暴露于酸性条件与金属胁迫环境,通常在生物浸出体系中表现出更强的金属耐

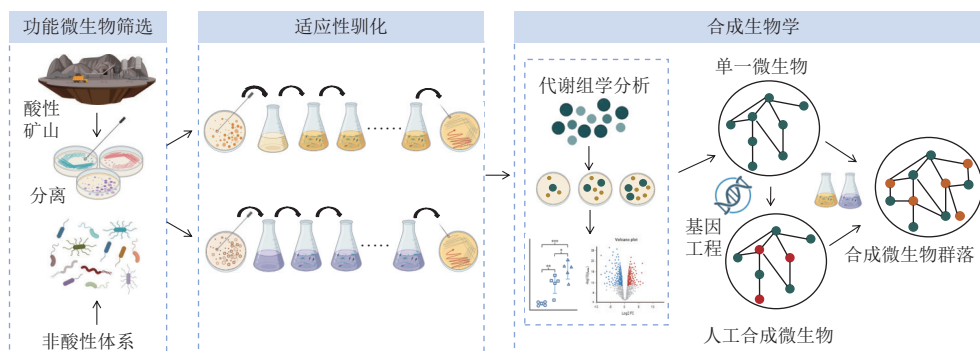


图 2 微生物层面强化策略

Fig. 2 Enhancement strategies at the microbial level

受性和代谢活性,兼具 Fe^{2+} 和硫氧化能力,具有良好的浸出性能^[25]。YUN 等^[26] 从酸性矿山环境中分离 *Ferrocalcibacillus organovorans* N10 和 *Acidithiobacillus ferrooxidans* P7 在, 24 h 内其对镍钴锰(NCM111)三元正极材料的锂浸出率可达 97%,显著优于标准菌株,验证了特定环境来源微生物的优势。然而酸性体系加速材料解构的同时伴随过渡金属的同步浸出,导致浸出选择性受限。

为突破酸性体系的固有限制,研究逐渐转向利用差异化代谢途径实现多样化的温和驱动模式。KORDLOO 等^[27] 利用嗜碱菌 *Glutamicibacter nicotianae* 代谢色氨酸水解产氨,驱动 pH 升至 9.0,创造碱性浸出环境,在 10 g/L 矿浆浓度下反应 30 d,实现 43.75% 锂浸出率。尽管浸出效率低于酸性路径,但证明了碱性生物浸出的可行性。MAHANDRA 等^[28] 在接近中性条件下利用 *Thiobacillus thioparus* 代谢产生生物硫酸,实现约 65% 的锂浸出率, <1% 的铁浸出率,表现出显著选择性。基于有机酸介导的温和浸出策略,XIA 等^[29] 首次采用食品级嗜酸乳杆菌 *Lactobacillus acidophilus* 产生的乳酸作为绿色浸出剂,在 2.5 g/L 矿浆浓度下锂浸出率超过 85%,且过程温和、对耐腐蚀设备的依赖较低。氧化还原溶解机制也为锂的高效浸出提供了新思路。VISHWAKARMA 和 HAIT^[30] 利用铜绿假单胞菌 *Pseudomonas aeruginosa* 天然产铁载体特性,在中性环境和 1 g/L 葡萄糖条件下,144 h 内实现锂浸出率 >99%,并结合人工神经网络模型对实验结果进行预测。此外,在中性、厌氧条件下 *Shewanella* 异化还原过渡金属氧化物,实现 78% 的锂浸出,并通过二次矿化提高环境安全性^[22, 24]。相对而言,温和体系驱动的路径在环境兼容性与选择性方面更具优势,但常受代谢供给与材料解构速率限制,浸出动力学相对缓慢。

目前,功能微生物筛选研究从强酸嗜酸菌体系向温和条件体系的演进,致力于构建兼具高效性与选择性的浸出微环境,为后续锂的分离纯化及高值化再生奠定基础。

2.1.2 微生物的适应性驯化

从自然环境或特定生境中筛选的功能菌株是生物浸出的重要菌种资源,实际废弃 LIBs 体系中普遍存在高金属负荷、复杂有机溶剂等复合胁迫,影响微生物活性和浸出效率,往往难以直接应用天然功能菌株。适应性驯化通过逐步提高 LIBs 粉末或金属离子浓度等方式施加选择压力,诱导

微生物发生定向进化,使其在不引入外源基因的前提下获得更高耐受性与更优浸出表现^[31]。微生物进化机制可分为金属排斥和金属耐受^[32]。前者借助细胞壁封存和固定金属,并诱导产生胞外多糖、铁载体等化合物,实现络合与屏蔽降低生物可利用度,阻止金属进入细胞质;后者在金属进入细胞后,通过螯合、酶促转化降低毒性与金属感应调控等维持内在稳态^[12, 32]。2 种机制的共同作用不仅能够提升微生物耐受性,系统性改变代谢产物,而且通过 EPS 的黏附行为改变固液界面微环境,从而影响材料结构以及在高矿浆浓度下的稳定性。LALROPUA 等^[25] 通过三阶段渐进式驯化,使混合菌群在高浓度混合金属溶液中仍保持高代谢活性,相比未驯化群落,其生物量与 SO_4^{2-} 产率均显著提高。BAHALOO HOREH 等^[33] 使用 0.3%~1.0% (质量体积比)废弃 LIBs 浓度驯化 *Aspergillus niger*,缩短菌株进入对数期的时间,重构有机酸类型,从草酸主导转变成葡萄糖酸主导,同时增加有机酸产量,在 1.0% 浓度条件下锂浸出率达到 100%,表明适应性驯化能有效提升微生物代谢供给能力。总体而言,适应性驯化可在较短时间内获得适用于高强度浸出工况的耐受性菌株或群落,为提升浸出效率与过程稳定性提供可行途径。

2.1.3 合成生物学

合成生物学是将工程原理应用于分子生物学,以工程化和可预测的方式设计、构建或重构生物系统^[34]。在该领域发展初期,研究主要聚焦于人工合成微生物,利用基因工程和合成生物学工具对单一微生物进行系统性改造^[35],通过提高产酸或产配体能力,优化 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 转化过程或解除抑制作用,维持并放大原有浸出驱动力,从而促进材料解构与锂释放。JUNG 等^[36] 利用 CRISPRi/dCas12a 系统敲低 *Acidithiobacillus ferrooxidans* 的 *petB2* 基因,使其在高硫(0.5%)条件下解除铁氧化抑制并增强铁氧化能力,从而提高生物浸出效率。同样地,KHAN 等^[37] 通过构建 *Gluconobacter oxydans* 工程菌株强化葡萄糖酸生成能力,实现 89% 的锂浸出率。此外,GUMULYA 等^[38] 系统总结嗜酸菌耐酸性、耐金属、耐渗透压和耐热等潜在靶点,为人工合成微生物设计提供理论依据。

然而,目前针对人工合成微生物用于废弃 LIBs 提锂的研究仍有限,大多数研究仍聚焦于天然菌株,工程菌株更多应用于采矿体系或其他金属(如钴、镍、锰)的提取过程中。在废弃 LIBs 浸

出体系中, 锂通常在材料晶格被破坏后以游离 Li^+ 的形式释放, 现阶段工程化改造更容易提升材料解构与总体浸出速率, 而难以实现对锂的选择性调控。根本原因在于生物体系中缺乏锂特异性结合位点和选择性过滤器, 且锂的跨膜转运多依赖于 Na^+/K^+ 通道的非特异性利用^[39], 缺乏高选择性的识别与富集机制, 导致合成生物学在该领域缺乏明确的工程靶点, 这在一定程度上限制了针对废弃 LIBs 锂的专向微生物设计与策略开发。目前仅有少量研究尝试将锂结合肽锚定于大肠杆菌外膜蛋白 *OmpC*, 构建对锂具有高度选择性的生物吸附剂, 其在真实锂电池废水中锂去除率为 50.13%^[40]。

相较于单一微生物, 合成微生物群落可以通过代谢互补与功能分工, 在降低单菌代谢负担的同时维持体系稳定性, 从而提升金属浸出率^[11, 41]。XIN 等^[42] 构建“混合能源-混合菌群”(MS-MC) 体系, 利用 *Acidithiobacillus thiooxidans* 产生的 H_2SO_4 溶解锂, 同时由 *Leptospirillum ferriphilum* 构建 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 转化并参与材料解构。异养型真菌 *Aspergillus niger* 和 *Aspergillus tubingensis* 通过分泌柠檬酸与草酸的互补性提高有机酸产量并强化锂酸解浸出^[43], 印证了合成菌群在复杂金属体系中的协同增效潜力。值得注意的是, 合成微生物群落不仅可以提升锂浸出效率, 还显示出潜在环境效益与工业化优势, 例如 GU 等^[44] 从酸性矿山排水中富集高效嗜酸菌群落, 在 10 g/L 的矿浆浓度下 2 d 内实现 99% 的锂浸出率, 且碳足迹比湿法冶金低 40%, 反映了群落优化与绿色冶金理念的协同优势。

综上所述, 微生物层面的增强浸出策略呈现由自然菌株筛选向人工理性设计, 再向构建群落协同的系统化演进趋势。现阶段工程化改造仍然以增强微生物代谢供给与耐受性为主, 未来发展应推动合成生物学提锂向多环节协同调控转变。

2.2 过程强化与工程控制策略

过程强化与工程控制旨在通过优化体系运行条件与工艺流程, 克服传质、动力学和代谢方面的限制, 创造可控的反应微环境, 从而实现锂的高效浸出与过程经济性。

2.2.1 反应参数调控

在生物浸出体系中, pH、碳源、矿浆浓度等是影响生物浸出的核心变量参数(图 3), 通过调控参数影响代谢供给、界面过程、材料变化以及多相传质扩散等多尺度耦合机制从而影响浸出率。其

中 pH 调控对维持微生物活性及其反应状况至关重要。对于多数嗜酸菌, 低 pH(2.0~2.5) 不仅有利于维持生长, 更有利于 H^+ 供给和 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 转化过程, 而 pH 上升则削弱酸解和氧化还原反应, 导致浸出率下降^[14, 25]。XIN 等^[42] 通过定期添加 H_2SO_4 调控 pH, 使金属的平均浸出率超过 95%。真菌通常在 pH(3.0~7.0) 条件下生长, 其分泌有机酸的类型和比例也会随环境 pH 的变化而发生改变^[14]。在 *Aspergillus niger* 体系中, 将 pH 控制在 5.44 左右, 既有利于柠檬酸或葡萄糖酸生成又能抑制草酸积累形成沉淀, 从而在 2% 矿浆浓度下实现锂完全浸出^[45], 突显 pH 调控在锂生物浸出中的关键作用。

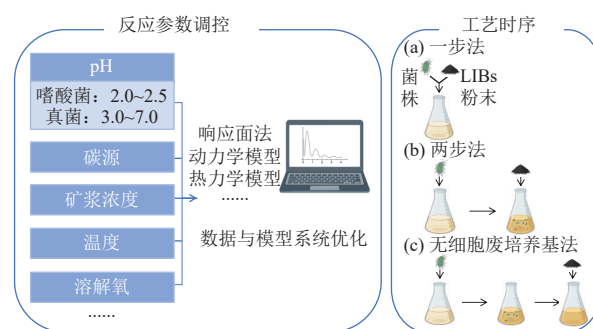


图 3 过程强化与工程控制策略

Fig. 3 Process intensification and engineering control strategies

碳源类型及其浓度直接影响微生物的生长和代谢产物, 尤其是有机酸的分泌。不同碳源可显著改变微生物分泌的有机酸类型并导致金属浸出差异。例如蔗糖促进 *Penicillium* sp. JMET 24 分泌更高浓度的草酸和柠檬酸, 将锂浸出率提升至 65.07%, 显著优于马铃薯葡萄糖培养基体系的 40.58%^[16]。当 *Aspergillus* 以低成本工业副产物酒糟作为碳源时, 不仅降低成本、提高有机酸产量和锂浸出率, 还使酒糟废液中的 BOD、COD 降低 50%, 体现废弃物资源化在绿色回收中的潜力^[43]。因此, 优化碳源不仅能够通过增强产酸等代谢过程提高锂浸出率, 还可以借助低成本、易获取的替代碳源降低运行费用, 提升过程经济性, 对工艺放大与工程应用具有重要意义。

矿浆浓度作为关键工程参数, 直接影响体系的生物毒性水平、传质条件及经济性。实际工况需要处理更高的矿浆浓度以提升处理效率与经济性, 但矿浆浓度升高会导致重金属累积, 从而降低溶解氧而抑制微生物, 并加剧颗粒聚集与扩散阻

力,降低锂浸出率^[27]。研究表明,当矿浆浓度由0.1%升至1.0%(10 g/L)时,锂浸出率由99.88%降至65.00%^[16]。面对该挑战,通过优化参数仍可在较高负荷矿浆下实现锂的高效浸出,NASERI等^[46]在40 g/L矿浆浓度下实现100%的锂浸出率,表明在合理调控体系条件的前提下,矿浆负荷与浸出效率之间仍可实现有效平衡。

除上述关键参数外,温度、溶解氧等间接主导浸出路径,通过调控微生物代谢速率与反应动力学影响锂的浸出率^[14]。多数嗜酸菌在25~35℃、真菌在20~40℃温度范围内表现出最佳的生长和浸出性能^[11],超出最佳范围时,微生物代谢活性受到抑制导致酸或 Fe^{3+} 生成减少,降低浸出率。NIU等^[47]在2%矿浆浓度下,将温度从30℃升至35℃,使锂浸出率从78%提高至89%,但温度进一步升至40℃时 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 和细胞密度减少,浸出率降至40%。溶解氧兼具能量供给与终端电子受体的双重功能^[14],通常使用130~170 r/min的摇床进行通气。如果供氧不足会限制微生物产酸或氧化能力,而转速过高会导致细胞壁破裂,降低金属浸出率^[15]。总之,温度、溶解氧等运行参数可通过影响代谢速率与反应动力学来调控浸出效率与稳定性,在体系组成不变的情况下具有良好的过程可控性。

由于上述参数并非相互独立,因此优化相应策略正由传统经验单一参数试错逐步转向数据与模型驱动的多参数系统优化转变。相关研究通过引入统计建模与机制模型,对多种操作参数的交互效应进行定量解析,缩短实验周期的同时提升过程可控性。RAUTELA等^[48]通过响应面法(RSM)耦合缩核动力学模型,量化时间、浆密度、接种量的交互效应,在模型指导下48 h内实现锂浸出率86%,并有效缓解了高矿浆浓度引发的颗粒聚集问题。总体而言,合理的参数组合在提升代谢通量的同时缓解传质受限,从而提高锂浸出率,统计模型也为生物浸出过程的高效设计与调控提供了重要理论支撑。然而,单纯优化静态反应参数难以克服批式浸出实验中反应剂消耗与产物抑制等动态限制,因此强化策略需从参数调控转向工艺流程的结构创新,进而提高金属浸出率与经济性。

2.2.2 浸出工艺的时序优化

浸出工艺的时序与操作模式主要是通过调控代谢物供给节奏与毒性暴露强度,进而影响金属

浸出率。现有研究常采用一步法、两步法或无细胞废培养基法(图3)。一步法中微生物与废弃LIBs粉末同步作用,虽有利于黏附或生物膜形成,从而强化局部界面反应,但金属毒性使微生物生长受限,影响浸出率^[11]。两步法先在无废料环境下培养微生物至对数期并积累代谢产物,再加入废弃LIBs粉末启动浸出,可以显著缓解微生物的毒性抑制,使代谢供给更稳定地转化为界面有效反应并推动材料结构破坏^[11]。PAKOSTOVA等^[49]通过比较发现,两步法将锂浸出率由92.9%提升至98.7%。LALROPUIA等^[25]利用先产酸后浸出的两步策略使锂及其他过渡金属在7 d内接近100%浸出,显著优于化学浸出。无细胞废培养基法通过预先积累代谢物并移除菌体,仅利用代谢产物进行浸出,可最大限度降低金属毒性影响^[11]。ALAVI等^[43]在柠檬酸积累环境下快速完成锂浸出。SHOKRI等^[50]利用*Acidithiobacillus thiooxidans*产生生物硫酸并浓缩,在100 g/L高矿浆浓度下实现95.2%的锂浸出率,展现了废培养基法在高负载条件下的应用潜力。此外,针对高矿浆浓度导致的浸出剂消耗快与菌体失活问题,研究采用循环补充菌体或浸出剂的半连续强化策略,通过维持浸出剂浓度与微生物代谢活性延长有效反应时间。ROY等^[51]在100 g/L矿浆浓度下补充3轮*Acidithiobacillus ferrooxidans*培养液,72 h内使锂浸出率从单轮操作的20%提升至60%,有效缓解高负载下微生物失活的问题。类似地,NASERI等^[52]通过逐步添加*Acidithiobacillus thiooxidans*产生的生物硫酸,在60 g/L矿浆浓度下将锂浸出率从43%提升至93%,同时将浸出时间缩短50%。

时序优化的本质是通过过程分段与补给策略,实现代谢供给的稳定输出并降低毒性抑制,使其持续作用于固液界面并诱导材料结构解构,同时在高矿浆浓度条件下缓解非均相传质瓶颈,实现微生物代谢与反应动力学的同步提升。

2.3 多技术耦合与协同强化策略

当前,在废弃LIBs体系中,生物浸出与物理、化学或电化学手段的耦合成为重要研究方向。通过构建多技术协同体系,可协同突破传质受限、反应动力学缓慢等瓶颈,从而提高锂浸出率和过程可控性(图4)。

物理场耦合可通过改变材料微结构与固液界面状态降低扩散阻力,为微生物创造更有利的反应环境,因此更适合解决生物浸出中常见的传质受

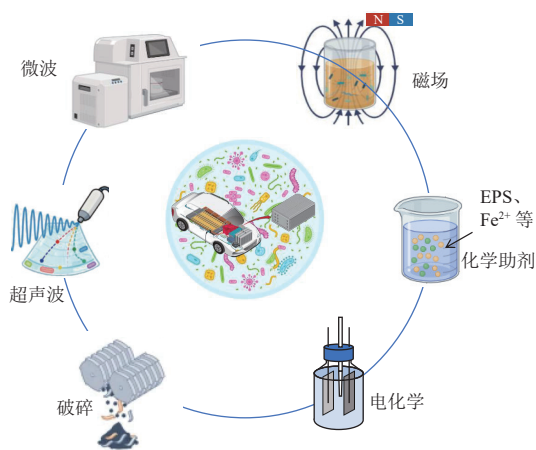


图 4 多技术耦合与协同强化策略

Fig. 4 Multi-technology coupling and synergistic intensification strategies

限与反应启动慢的问题。例如,超声空化可诱导颗粒破碎与表面活化,增强传质并促进晶格缺陷形成^[53]。将超声波与 *Acidithiobacillus ferrooxidans* 耦合,在 30 g/L 矿浆浓度下将锂浸出率从 93.1% 提升至 99.7%,周期缩短至 5 d,且无需额外铁源,降低成本和二次污染风险^[54]。物理-生物耦合还可以通过降低前处理强度降低整体能耗。例如 GARCIA 等^[55] 直接将破碎至 5 mm 的未分级黑粉处理 30 min,在减少 80% 的预处理步骤的同时使得锂的浸出率超 90%,特别适用于多金属共存的复杂 LIBs 废料。此外,部分微生物对外加物理场具有响应特性。利用 *Acidithiobacillus ferrooxidans* 可产生磁性纳米粒子的特性^[56],在静态磁场(5 mT)中,3 d 内实现锂的完全浸出,浸出速率较无磁场条件提高了 4 倍^[57]。研究还发现磁场能促进 *Acidithiobacillus ferrooxidans* 的生长磁小体生成及细胞附着,增强浸出效率。综上,物理-生物的耦合本质上是通过材料结构或界面重构打通扩散通道,同时激活生物响应,同步解除传质与附着限制,实现更快、更有效的浸出过程。

针对难溶正极材料(如 LiCoO_2 、 LiFePO_4) 中锂离子受晶格束缚的问题,可以引入适量络合剂、催化剂等化学助剂,使化学反应与微生物代谢协同作用。一方面可借助微生物自身产生的 EPS 增强菌体吸附、缓解金属毒性并调控代谢通路,优化生物浸出性能。以 *Lactobacillus acidophilus* 浸出废弃 LIBs 为例,添加该菌经适应性驯化后产生的 EPS,可在 5 g/L 矿浆条件下将锂浸出率从 60.8% 提升至 77.1%,同时将铁浸出率从 68.5% 降至 5.8%^[29],表明 EPS 可通过固液环境调控以及络合

屏蔽提升锂浸出率的同时实现选择性增强。另一方面,通过引入外部化学助剂,例如废铁屑(Fe^{2+}),可与中度嗜热微生物优先还原正极材料中的高价态过渡金属,从而破坏晶格结构促进锂浸出率达 84%,有效缓解金属竞争^[58]。

在此基础上,生物-电化学耦合通过电化学驱动离子迁移或微生物代谢,显著加速金属浸出动力学。MUKHOPADHYAY 等^[59] 将 *Gluconobacter oxydans* 产生的含葡萄糖酸溶液与电化学系统耦合,在 55 °C 下 4~8 h 内实现了锂的近完全提取,说明电化学可有效放大代谢供给到固液界面有效反应的转化效率。进一步地,电化学手段可结合吸附^[60] 或沉淀^[61] 实现锂空间或阶段选择性分离,与后续分离富集过程一体化集成。生物-电化学耦合不仅利用外加势场强化动力学,缩短反应周期,还可以推动生物提锂迈向可调控、可集成的流程强化。

综上所述,多技术耦合策略围绕瓶颈分解与功能互补形成的系统性强化策略,在代谢供给、界面过程、材料与传质、工艺条件等环节协同作用,提升锂浸出率的同时,为生物提锂向高效化、绿色化与工程化发展提供过程强化思路。

3 总结与展望

近年来,通过菌种选育、适应性驯化及工艺参数优化,锂的浸出效率显著提升。生物浸出与其他技术的耦合创新,以及微生物共培养体系的代谢互补策略,成为提高锂浸出效率的重要途径。然而,生物浸出的进一步强化和工业化仍受多重限制,其根源在于构建的“代谢供给、界面过程、材料结构演化、传质扩散”多尺度耦合机制链条各环节尚未实现稳定匹配。

(1)代谢供给层面:实际废弃 LIBs 体系中的高渗透压、高金属离子浓度及有机溶剂残留等复合胁迫易导致细胞损伤与代谢失衡,使微生物适应性不足,造成代谢供给不稳定,构成核心生物学限制;尽管适应性驯化能够在一定程度上提升耐受性,但在复杂环境下,驱动力的稳定输出仍缺乏保障。

(2)界面过程与材料演化层面:过渡金属价态调控不足、材料表面钝化或再沉淀现象等,限制材料晶格解构效率,导致锂浸出动力学偏慢,制约生物浸出的规模化应用。同时,材料解构往往伴随金属共溶增强的问题。

(3)选择性调控层面:目前关于废弃 LIBs 提锂的基因工程菌研究仍有限,现有成果多集中于采矿领域,且工程菌株更偏向提升总体金属浸出率,针对废弃 LIBs 中锂的高效提取仍缺乏专向菌种与策略。

(4)工程与传质扩散层面:在高矿浆浓度下的氧传递受限、颗粒聚集、盐累积与固液分离问题高度耦合,连续反应器与全流程集成设计尚不完善,驱动力的维持及长期稳定运行仍存在障碍。这些工程约束限制了实验室成果向规模化工艺过渡。

未来研究可重点向以下方向推进。

(1)借助多组学与网络建模深入解析复合胁迫下的代谢分配、耐受调控与界面行为。进一步将 CRISPR 编辑、定向进化与预测模型等工具引入废弃 LIBs 提锂领域,针对铁/硫氧化途径、有机酸合成及胞外电子传递等关键过程进行改造,增强微生物产酸耐酸性、金属耐受性,并构建高效合成微生物群落。

(2)未来应着力探索锂在微生物体系中的感知、跨膜转运与胞内富集机制,挖掘或设计可工程化的锂特异性功能模块。进一步研究工程菌在释放锂的同时实现原位选择性回收,从根本上降低共溶金属的分离成本。

(3)推动由单因素经验优化向跨尺度、多层级的集成强化策略转变,构建多级耦合反应体系,发展模块化、连续化与智能化生物浸出工艺,重点解决供氧或混合、固液分离、浸出剂补给与盐或杂质积累等关键约束。借助人工智能和机器学习对运行参数进行动态优化,实现对 pH、溶解氧与关键代谢产物的在线监测与反馈调节,实现过程调控由经验驱动向数据驱动转变,达到全流程效率最大化。同时结合生命周期评估与技术经济分析,系统评估生物提锂工艺的环境绩效与经济可行性,为其工业化应用提供科学支撑。

当前,生物浸出提锂技术正处于从机制探索向过程强化的关键阶段,未来发展将依托生物学创新、工程优化与智能协同,有望实现绿色、稳定且可持续的锂资源循环利用体系。

参考文献 (References):

[1] 谭金珠. “双碳”目标背景下中国锂电池行业国际竞争力分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2025, 15(8): 71-74+82. TAN Jinzhu. Analysis of international competitiveness of China's lithium battery industry in the context of "dual carbon" targets[J]. Modern Industrial Economy and Informa-

tionization, 2025, 15(8): 71-74+82.

[2] 窦立荣, 刘化清, 常德宽, 等. 全球锂资源分布、产业现状和中国面临的挑战与对策[J]. 中国科学院院刊, 2025, 40(3): 494-510. DOU Lirong, LIU Huaqing, CHANG Dekuan, et al. Challenges and countermeasures for lithium resources in China and analysis of global distribution and industry status[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025, 40(3): 494-510.

[3] YUAN Jiehui, LIU Zhihong, ZHOU Ting, et al. Sustainable development of lithium-based new energy in China from an industry chain perspective: Risk analysis and policy implications[J]. Sustainability, 2023, 15(10): 7962.

[4] LIN Mengyu, CHEN Yongqiang, WANG Chengyan, et al. Towards preferential lithium recovery from spent lithium-ion batteries: Phase transition mechanisms, technical innovation and future perspectives[J]. Progress in Materials Science, 2026, 156: 101557.

[5] ZHANG Bin, XIN Qingyao, CHEN Siyuan, et al. Lithium-ion battery recycling relieves the threat to material scarcity amid China's electric vehicle ambitions[J]. Nature Communications, 2025, 16: 6661.

[6] MA Xiaotu, MENG Zifei, BELLONIA M V, et al. The evolution of lithium-ion battery recycling[J]. Nature Reviews Clean Technology, 2025, 1(1): 75-94.

[7] QU Guorui, WEI Yonggang, LIU Cuiping, et al. Efficient separation and recovery of lithium through volatilization in the recycling process of spent lithium-ion batteries[J]. Waste Management, 2022, 150: 66-74.

[8] ZHOU Jingjing, YU Haoxuan, MEI Yanrun, et al. Green and selective recovery of lithium by phosphate based leaching system from spent lithium iron phosphate batteries[J]. Waste Management, 2026, 209: 115196.

[9] JOSE S A, STOLL J L, SMITH T, et al. Critical review of lithium recovery methods: Advancements, challenges, and future directions[J]. Processes, 2024, 12(10): 2203.

[10] JONES S, SANTINI J M. Mechanisms of bioleaching: Iron and sulfur oxidation by acidophilic microorganisms[J]. Essays in Biochemistry, 2023, 67(4): 685-699.

[11] MOAZZAM P, BOROUMAND Y, RABIEI P, et al. Lithium bioleaching: An emerging approach for the recovery of Li from spent lithium ion batteries[J]. Chemosphere, 2021, 277: 130196.

[12] ZHANG Xu, SHI Hongjie, TAN Ningjie, et al. Advances in bioleaching of waste lithium batteries under metal ion stress[J]. Bioresources and Bioprocessing, 2023, 10(1): 19.

[13] SARKODIE E K, JIANG Luhua, LI Kewei, et al. A review on the bioleaching of toxic metal(loid)s from contaminated soil: Insight into the mechanism of action and the role of influencing factors[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 1049277.

[14] BISWAL B K, BALASUBRAMANIAN R. Recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries using microbial agents for bioleaching: A review[J]. Frontiers in Micro-

- biology, 2023, 14: 1197081.
- [15] TRIVEDI A, VISHWAKARMA A, SAAWARN B, et al. Fungal biotechnology for urban mining of metals from waste printed circuit boards: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 323: 116133.
- [16] CHANDAKHIAW T, TEAUMROONG N, PIROMYOU P, et al. Efficiency of *Penicillium* sp. and *Aspergillus* sp. for bioleaching lithium cobalt oxide from battery wastes in potato dextrose broth and sucrose medium[J]. *Results in Engineering*, 2024, 24: 103170.
- [17] GEROLD E, KADISCH F, LERCHBAMMER R, et al. Bio-metallurgical recovery of lithium, cobalt, and nickel from spent NMC lithium ion batteries: A comparative analysis of organic acid systems[J]. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 2024, 13: 100397.
- [18] ALI FARAMARZI M, MOGHARABI MANZARI M, BRANDL H. Bioleaching of metals from wastes and low-grade sources by HCN-forming microorganisms[J]. *Hydrometallurgy*, 2020, 191: 105228.
- [19] PRIYADARSINI S, DAS A P. Lithium bioleaching: A review on microbial-assisted sustainable technology for lithium bio-circularity[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 69: 106744.
- [20] SETHURAJAN M, GAYDARDZHIEV S. Bioprocessing of spent lithium ion batteries for critical metals recovery—A review[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 165: 105225.
- [21] TONIETTI L, ESPOSITO M, CASCONI M, et al. Unveiling the bioleaching versatility of *acidithiobacillus ferrooxidans*[J]. *Microorganisms*, 2024, 12(12): 2407.
- [22] LI Min, ZHANG Danni, HOLMES D E, et al. Genetic and transcriptomic analysis of microbial electro-extraction for releasing metals from spent Lithium-Ion batteries[J]. *Biore-source Technology*, 2026, 440: 133479.
- [23] HAZZAN O O, ZHAO Biyi, XIAO Yong. Strategies for enhancing extracellular electron transfer in environmental biotechnology: A review[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(23): 12760.
- [24] KIM S, LEE K, KIM K, et al. Reductive dissolution of NCM cathode through anaerobic respiration by *shewanella putrefaciens*[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(41): 18345–18355.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] KORDLOO M, BOROUMAND Z, ABDOLLAHI H, et al. Lithium recovery from waste aluminum electrolyte via bioleaching: Comparative insights into acidic and alkaline pathways using *Aspergillus Niger* and *Glutamicibacter nico-tianae*[J]. *Waste Management*, 2025, 206: 115043.
- [28] MAHANDRA H, HEIN G, FARAJI F, et al. A novel neutrophilic bacteria based process for selective LiFePO₄ cathode recycling[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 195: 107015.
- [29] XIA Qiuli, ZHANG Danni, LI Zhong, et al. Bioleaching of valuable metals from spent lithium iron phosphate batteries using food-grade *Lactobacillus acidophilus*[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 521: 166799.
- [30] VISHWAKARMA A, HAIT S. Selective lithium extraction from spent lithium-ion batteries using siderophores produced by *Pseudomonas aeruginosa*: Efficacy, kinetics, and artificial neural network modeling[J]. *Process Biochemistry*, 2024, 146: 115–127.
- [31] KAKSONEN A H, DENG Xiao, BOHU T, et al. Prospective directions for biohydrometallurgy[J]. *Hydrometallurgy*, 2020, 195: 105376.
- [32] OLEŃSKA E, MALEK W, SWIECICKA I, et al. Bacteria under metal stress—Molecular mechanisms of metal tolerance[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2025, 26(12): 5716.
- [33] BAHALOO HOREH N, MOUSAVI S M, BANIASADI M. Use of adapted metal tolerant *Aspergillus Niger* to enhance bioleaching efficiency of valuable metals from spent lithium-ion mobile phone batteries[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 197: 1546–1557.
- [34] CAPENESS M J, HORSFALL L E. Synthetic biology approaches towards the recycling of metals from the environment[J]. *Biochemical Society Transactions*, 2020, 48(4): 1367–1378.
- [35] AMINIAN DEHKORDI J, RAHIMI S, GOLZAR AHMADI M, et al. Synthetic biology tools for environmental protection[J]. *Biotechnology Advances*, 2023, 68: 108239.
- [36] JUNG H, INABA Y, BANTA S. CRISPR/dCas12a knock-down of *Acidithiobacillus ferrooxidans* electron transport chain bc₁ complexes enables enhanced metal sulfide bioleaching[J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 2024, 300(9): 107703.
- [37] KHAN S R, KHAN M M, SRIVASTAVA K, et al. Sustainable recovery of critical metals from spent lithium-ion batteries through gluconic acid-based bioleaching: Techno-economic analysis, life cycle assessment and process optimization[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 516: 163714.
- [38] GUMULYA Y, BOXALL N J, KHALEQUE H N, et al. In a quest for engineering acidophiles for biomining applications: Challenges and opportunities[J]. *Genes*, 2018, 9(2): 116.
- [39] JAKOBSSON E, ARGÜELLO MIRANDA O, CHIU S W, et al. Towards a unified understanding of lithium action in basic biology and its significance for applied biology[J].

- [The Journal of Membrane Biology](#), 2017, 250(6) : 587–604.
- [40] SELVAMANI V, JEONG J, MARUTHAMUTHU M K, et al. Construction of the lithium binding peptide displayed recombinant *Escherichia coli* for the specific lithium removal from various metal polluted wastewater[J]. [Journal of Environmental Chemical Engineering](#), 2023, 11(1): 109029.
- [41] ROY J J, CAO Bin, MADHAVI S. A review on the recycling of spent lithium-ion batteries (LIBs) by the bioleaching approach[J]. [Chemosphere](#), 2021, 282: 130944.
- [42] XIN Yayun, GUO Xingming, CHEN Shi, 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.
- [43] ALAVI N, PARTOVI K, MAJLESSI M, et al. Bioleaching of metals from cellphones batteries by a co-fungus medium in presence of carbon materials[J]. [Bioresource Technology Reports](#), 2021, 15: 100768.
- [44] GU Jinghan, NIE Yuanyuan, LI Zaiyu, et al. Efficient bioleaching of Li from waste lithium–iron phosphate batteries by acidophilic bacterial consortium: Enrichment condition, Li recovery, and brief carbon footprint analysis[J]. [Chemical Engineering Journal](#), 2025, 509: 161450.
- [45] 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.
- [46] NASERI T, BAHALOO HOREH N, MOUSAVI S M. Bacterial leaching as a green approach for typical metals recovery from end-of-life coin cells batteries[J]. [Journal of Cleaner Production](#), 2019, 220: 483–492.
- [47] NIU Zhirui, ZOU Yikan, XIN Baoping, et al. Process controls for improving bioleaching performance of both Li and Co from spent lithium ion batteries at high pulp density and its thermodynamics and kinetics exploration[J]. [Chemosphere](#), 2014, 109: 92–98.
- [48] RAUTELA R, YADAV B R, KUMAR S. Process optimization of bioleaching for sustainable recovery of metals from waste lithium-ion batteries[J]. [Bioresource Technology](#), 2026, 443: 133839.
- [49] PAKOSTOVA E, GRAVES J, LATVYTE E, et al. A novel closed-loop biotechnology for recovery of cobalt from a lithium-ion battery active cathode material[J]. [Microbiology](#), 2024, 170(7): 001475.
- [50] SHOKRI Z, MOUSAVI S M, OMIDKHAH M R. Advancing sustainable lithium recovery from spent laptop lithium-ion battery cathodes through high pulp density bioleaching followed by Li_2CO_3 precipitation: Process intensification and environmental insights[J]. [Journal of Environmental Chemical Engineering](#), 2025, 13(3): 117014.
- [51] ROY J J, MADHAVI S, CAO Bin. 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.
- [52] NASERI T, MOUSAVI S M. Improvement of Li and Mn bioleaching from spent lithium-ion batteries, using step-wise addition of biogenic sulfuric acid by *Acidithiobacillus thiooxidans*[J]. [Heliyon](#), 2024, 10(18): e37447.
- [53] VIECELI N, BENJAMASUTIN P, PROMPHAN R, et al. Recycling of lithium-ion batteries: Effect of hydrogen peroxide and a dosing method on the leaching of LCO, NMC oxides, and industrial black mass[J]. [ACS Sustainable Chemistry & Engineering](#), 2023, 11(26): 9662–9673.
- [54] ZHANG Shaoliang, CHEN Qin, GU Weihua, et al. Ultrasound enhances the recycling process and mechanism of lithium from spent LiFePO_4 batteries by *Acidithiobacillus ferrooxidans*[J]. [Scientific Reports](#), 2025, 15: 24490.
- [55] GARCIA L, MORELL J, LAO C, et al. Metal recovery from discarded lithium-ion batteries by bioleaching coupled with minimal mechanical pre-treatment[J]. [Minerals](#), 2025, 15(6): 566.
- [56] KIM J, NWE H H, YOON C S. Enhanced bioleaching of spent Li-ion batteries using *A. ferrooxidans* by application of external magnetic field[J]. [Journal of Environmental Management](#), 2024, 367: 122012.
- [57] HONG J H, KIM J, HAN Ejin, et al. Magnetic field-assisted bioleaching of cathode materials from spent Li-ion batteries using *Acidithiobacillus ferrooxidans*[J]. [Chemosphere](#), 2025, 376: 144303.
- [58] GHASSA S, FARZANEGAN A, GHARABAGHI M, et al. Novel bioleaching of waste lithium ion batteries by mixed moderate thermophilic microorganisms, using iron scrap as energy source and reducing agent[J]. [Hydrometallurgy](#), 2020, 197: 105465.
- [59] MUKHOPADHYAY A, ALIPANAH M, DIAZ L A, et al. Electrochemically assisted (bio) leaching of end-of-life lithium-ion batteries for critical metals recovery[J]. [ACS Sustainable Chemistry & Engineering](#), 2024, 12(37) : 14119–14127.
- [60] HUANG Tao, LIU Longfei, ZHANG Shuwen. Recovery of cobalt, lithium, and manganese from the cathode active materials of spent lithium-ion batteries in a bio-electro-hydrometallurgical process[J]. [Hydrometallurgy](#), 2019, 188: 101–111.
- [61] BANIASADI M, UPVAN K, POURHOSSEIN F, et al. Towards a circular economy in lithium ion battery recycling by integrating microbial processes with electrowinning and precipitation for sustainable metal recovery[J]. [Journal of Environmental Management](#), 2025, 395: 127891.