

氧化亚铁硫杆菌的稀有金属生物浸出技术研究进展

杭姚明¹, 刘玉蓉^{1*}, 鲍泽文¹, 徐子微²

¹河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

²河北省煤田地质局新能源地质队, 河北 邢台

收稿日期: 2025年11月24日; 录用日期: 2026年1月4日; 发布日期: 2026年1月15日

摘要

嗜酸性氧化亚铁硫杆菌(*Acidithiobacillus ferrooxidans*)是典型的化能自养嗜酸微生物, 具有氧化 Fe^{2+} 和还原态硫化物的能力, 在金属生物浸出和绿色冶金过程中占据核心地位。本文在梳理国内外相关研究的基础上, 系统综述了嗜酸性氧化亚铁硫杆菌的形态学与生理生化特征、铁硫能量代谢及其对多金属环境的耐受性, 总结了该菌的分离纯化方法、保藏与复苏技术以及固定化策略的优缺点, 重点解析了其在低品位金属矿、工业固体废物及含稀土/钇体系中的生物浸出应用进展。对比传统化学浸出工艺, 嗜酸性氧化亚铁硫杆菌参与的生物浸出在降低药剂消耗和环境负荷方面具有明显优势, 但仍存在浸出周期长、浸出率有待提高、矿物-微生物互作机理不清晰及高效浸矿菌株和工程化反应器不足等问题。最后, 本文从高通量筛选与定向驯化、基因工程与代谢调控、新型固定化载体与过程强化以及与智能化监控相结合等方面, 对嗜酸性氧化亚铁硫杆菌在稀有金属特别是稀土资源绿色开发中的应用前景进行了展望, 为相关基础研究与工程放大提供参考。

关键词

嗜酸性氧化亚铁硫杆菌, 生物浸出, 稀有金属, 稀土

Research Progress on the Bioleaching Technology of Rare Metals by *Thiobacillus ferrooxidans*

Yaoming Hang¹, Yurong Liu^{1*}, Zewen Bao¹, Ziwei Xu²

¹School of Geoscience and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

²New Energy Geology Team, Hebei Provincial Bureau of Coal Geology, Xingtai Hebei

Received: November 24, 2025; accepted: January 4, 2026; published: January 15, 2026

*通讯作者。

文章引用: 杭姚明, 刘玉蓉, 鲍泽文, 徐子微. 氧化亚铁硫杆菌的稀有金属生物浸出技术研究进展[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(1): 9-18. DOI: 10.12677/ag.2026.161002

Abstract

Acidithiobacillus ferrooxidans is a typical chemolithoautotrophic acidophilic microorganism with the ability to oxidize Fe^{2+} and reduced sulfur compounds, playing a core role in metal bioleaching and green metallurgy. Based on a review of relevant domestic and international research, this paper systematically summarizes the morphological and physiological biochemical characteristics of *A. ferrooxidans*, its iron-sulfur energy metabolism, and its tolerance to multi-metal environments. It also summarizes the advantages and disadvantages of the separation and purification methods, preservation and revival techniques, and immobilization strategies of this bacterium. The paper focuses on the progress of its application in the bioleaching of low-grade metal ores, industrial solid wastes, and rare earth/yttrium systems. Compared with traditional chemical leaching processes, bioleaching involving *A. ferrooxidans* has obvious advantages in reducing reagent consumption and environmental load, but there are still problems such as long leaching cycles, low leaching rates, unclear mechanisms of mineral-microbe interaction, and insufficient efficient leaching strains and engineered reactors. Finally, the paper looks forward to the application prospects of *A. ferrooxidans* in the green development of rare metals, especially rare earth resources, from aspects such as high-throughput screening and directed domestication, genetic engineering and metabolic regulation, new immobilization carriers and process intensification, and integration with intelligent monitoring, providing references for related basic research and engineering scale-up.

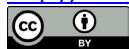
Keywords

Acidithiobacillus ferrooxidans, Bioleaching, Rare Metals, Rare Earths

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球矿产资源日益紧缺与“双碳目标”背景下，从电子废弃物、赤泥、冶炼渣及废催化剂等工业固废中回收稀土、镍、钴、铜等关键金属已成为资源冶金的重要方向。这些固废普遍存在赋存形态复杂、品位低、难处理性强等特征，使传统湿法冶金虽能通过酸浸、氨浸等方式实现金属溶出，但面临酸耗高、副盐排放量大和二次污染风险突出等问题，难以满足绿色冶金需求。相比之下，生物浸出凭借酸耗低、能耗小、流程简单等优势，被认为是处理复杂固废的绿色替代技术，并在电子废弃物、含铁固废及硫化矿渣等多类体系中展现出良好的金属活化与溶出效果[1] [2]。

在众多生物浸出微生物中，氧化亚铁硫杆菌(*Acidithiobacillus ferrooxidans*)因能够氧化 Fe^{2+} 和硫化物、生成 Fe^{3+} 和硫酸，从而持续强化金属硫化物与铁基固废的化学溶蚀，是目前应用最广、研究最成熟的核心菌株。大量研究已证实 *A. ferrooxidans* 能显著提升固废浸出动力学[3] [4]，例如在含 Cu 固废体系中铜浸出率可超过 90%，在 Fe-As 渣中促进深度氧化与金属迁移，在电子废弃物处理中明显提高 Cu、Zn、Ni 的浸出效率[5]。本文系统梳理了嗜酸性氧化亚铁硫杆菌的生物学特性、分离保藏方法、浸出关键影响因素、实际应用案例及其浸矿作用机理，并对固定化技术的发展方向进行了展望，以期为推动该技术在工业规模的应用提供参考。

在众多生物浸出菌群中，氧化亚铁硫杆菌(*Acidithiobacillus ferrooxidans*)因能够同时氧化 Fe^{2+} 和还原态硫化物，持续生成 Fe^{3+} 和 H_2SO_4 ，被广泛用于硫化矿及含铁固废的浸出过程。大量研究已证实 *A.*

ferrooxidans 能显著提升固废浸出动力学[3][4], 例如在含 Cu 固废体系中铜浸出率可超过 90%, 在 Fe-As 渣中促进深度氧化与金属迁移, 在电子废弃物处理中明显提高 Cu、Zn、Ni 的浸出效率[5]。然而现有研究多聚焦于铜、锌等常规有色金属, 对于稀有金属特别是稀土和钪等关键战略资源的系统梳理仍相对不足。一方面, *A. ferrooxidans* 参与的稀土浸出多被当作“伴随现象”零散报道, 缺乏对矿物类型、共存离子和 pH 缓冲效应等特殊工况的针对性分析; 另一方面, 关于其在稀土体系中代谢调控和细胞表面过程的机理研究也较为薄弱, 限制了工艺放大与过程优化。基于此, 本文在总结 *A. ferrooxidans* 生物学特性及分离保藏技术的基础上, 更加侧重评述其在稀有金属特别是稀土资源生物浸出中的应用现状与关键科学问题, 旨在“描述已有工作”的基础上进一步提炼共性规律和技术瓶颈, 为后续研究路线的设计提供参考。

2. 氧化亚铁硫杆菌的生物学特征

2.1. 形态特征

氧化亚铁硫杆菌广泛分布于自然环境中, 如土壤、海水、淡水、沉积物、硫磺泉、火山灰和各种金属硫化物矿石产生的酸性矿山废水[6]。通常呈短杆状, 大小约为 $0.5\sim 1.0\ \mu\text{m} \times 1.0\sim 3.0\ \mu\text{m}$, 细胞单个存在或成对、成链状排列有鞭毛, 能活泼运动。在不同的培养基上, 其菌落形态会有所不同, 例如在 9K 固体培养基上培养可生成红棕色菌落, 直径约 0.5 mm; 而在硫代硫酸盐培养基上培养则呈中央黄色、外周白色的菌落, 且菌落相对较小, 直径约为 0.1~0.2 mm [7]。

2.2. 氧化亚铁硫杆菌的生理特征

2.2.1. 化能自养性

氧化亚铁硫杆菌具有化能自养的代谢方式[8][9]。它能够利用亚铁离子、元素硫或还原态的硫化物等无机物作为能源, 通过氧化这些物质获得生长所需的能量。在这个过程中, 细菌还会利用卡尔文循环固定空气中的二氧化碳作为其碳源, 用于合成自身所需的有机物质。这种独特的代谢方式使得氧化亚铁硫杆菌能够在缺乏有机碳源的环境中生存和生长。

2.2.2. 嗜酸性

A. ferrooxidans 能够在非常低的 pH 值下生长, 具有适应极端酸性环境的能力。它们通过维持细胞内相对中性的 pH 来保护其生物大分子[9]。最适生长 pH 值一般在 1.8 至 2.0 之间。其嗜酸特性与其代谢过程密切相关。在酸性条件下, 氧化亚铁硫杆菌能够有效地氧化亚铁离子和硫等底物[10], 这一过程涉及电子传递链和 ATP 合成, 同时产生硫酸等酸性物质, 进一步维持了其生长环境的酸度。这种嗜酸特性使得氧化亚铁硫杆菌在矿山酸性废水、含硫温泉等酸性环境中广泛分布。

2.2.3. 好氧性

A. ferrooxidans 是专性化能自养菌, 进行好氧呼吸。它利用 CO_2 作为碳源, 并吸收氮、磷等无机营养来合成自身细胞。*A. ferrooxidans* [11]表现出过氧化氢酶阳性反应, 这是好氧细菌的典型特征之一, 此外, 该菌株在葡萄糖氧化产酸测试中也呈阳性, 进一步证实了其好氧代谢能力。研究表明[12], 提高溶解氧浓度可以显著加快氧化亚铁硫杆菌对硫代硫酸钠和亚硫酸氢钠的利用速度, 高效地将矿石中的金属硫化物氧化, 释放出金属离子。因此, *A. ferrooxidans* 的好氧性使其在生物冶金和生物修复领域具有潜在的应用价值, 特别是在处理含硫矿物和重金属污染的场合[9]。

3. 分离纯化与保藏方法

固体培养是微生物研究的关键技术, 但对于氧化亚铁硫杆菌(*Acidithiobacillus ferrooxidans*)这类好氧

嗜酸自养菌而言, 其固体培养面临生长缓慢、对通氧要求高, 以及常用琼脂在酸性条件下水解产生抑制物等多重挑战[13] [14]。因此, 发展有效的分离纯化与保藏技术是实现其工业化应用的基础。

在分离纯化方面, 核心在于克服凝固剂抑制与优化培养条件。研究者通过调整培养基成分, 如使用减磷 ISP 培养基或控制硫酸亚铁浓度(≤ 22 g/L), 以提高克隆率[15]。更为关键的是, 采用新型凝固剂如 Gelrite(脱乙酰吉兰糖胶)替代琼脂, 可有效减免抑制作用, 是目前较理想的凝固剂[16] [17]。此外, 在特定培养基中加入硫氰酸钾并结合间歇培养, 也能显著提升分离效果[18]。在方法学上, 双层平板法的创新极大地提高了检出效率。周顺桂等[19]通过在底层涂布酵母 R30, 使检出率提升 2.1 倍; 褚祺[20]改进此法, 利用下层红酵母消耗上层硫杆菌代谢产生的可溶性有机物并提供 CO_2 作为碳源, 进一步促进了硫杆菌的生长。

在菌种保藏方面, 为规避传代培养易导致的菌种退化, 冷冻干燥与液氮冷冻是主要长期保藏手段。Estibaliz D [21]使用甜菜碱作保护剂于 -80°C 保存, 获得最高 40% 的存活率; 周吉奎等[22]还证实该菌具有较强的耐干燥特性, 干燥保存后活性可快速恢复。张燕飞[23]通过优化, 确定由甘油 5%、海藻糖 15%、蔗糖 18%、牛血清蛋白 10% 组成的保护剂配方, 可使存活率达 94%。吴雪玲[24]则发现 30% 的 GP 浓度为液氮保藏最佳条件, 复苏率达 84.4%, 且复苏后培养时 GP 残留浓度以 0.6% 为宜。对于中短期保藏, 杨宇等[25]研究发现, 使用 $\text{pH} = 6.8$ 的单蒸水悬浮菌体于 4°C 保存, 效果与传代保藏接近。

综上所述, 通过优化凝固剂、培养基及采用双层平板法等创新, *A. ferrooxidans* 的分离纯化效率已显著提高; 同时, 基于优化保护剂的冷冻干燥、液氮冷冻及简便的短期保藏方法, 为其菌种资源的长期稳定保存提供了可靠方案。这些技术的进步为其深入研究与规模化应用奠定了坚实基础。

4. 稀土生物浸出体系的特殊性与挑战

与传统铜、锌等金属硫化矿相比, 稀土及钇资源的矿物学类型和赋存形态更加复杂, 既包括独居石、氟碳铈矿、磷钇矿等含磷、含氟矿物, 也包括白云鄂博矿中稀土与铁矿物的紧密共生, 以及南方离子型稀土矿中粘土矿物表面的离子交换态 REE^{3+} 。这类矿物常伴生大量碳酸盐、硅酸盐和黏土, 使体系具有显著的 pH 缓冲能力, 酸性浸出过程中必须持续消耗 H^+ 才能维持 *A. ferrooxidans* 生长所需的强酸环境, 直接导致能耗增加与浸出周期延长[26]。离子型稀土矿化体在铵盐浸出过程中的“拖尾现象”与 NH_4^+ 残留, 也从侧面反映了此类矿物体系中 pH 缓冲与迁移行为的复杂性[27]。

稀土矿及含稀土固废中普遍含有较高浓度的 Fe、Al、Ca、Mg 等基体金属以及 F^- 、 CO_3^{2-} 、 PO_4^{3-} 等阴离子, 一方面易与 REE^{3+} 竞争络合或共沉淀, 降低 REE 在溶液中的有效浓度、增加后续分离难度; 另一方面会改变矿浆的离子强度与渗透压, 对 *A. ferrooxidans* 的细胞膜、电化学梯度和电子传递链产生抑制, 从而削弱其 $\text{Fe}^{2+}/\text{S}^{2-}$ 氧化能力。离子型稀土矿中 NH_4^+ 、有机质和可交换阳离子含量较高, 不仅带来氮素迁移和环境风险, 也增加了微生物在适应性和代谢调控上的负担[28]。随着开发对象由传统独居石等一次矿产拓展至磷石膏、赤泥、煤系资源、荧光粉等多种二次资源, 矿物组成和共伴生元素的差异进一步放大了“矿物-微生物-溶液”耦合过程的复杂性[26] [29]。

近年的研究表明, 在这些复杂体系中往往需要构建“自养铁/硫氧化菌 + 异养产有机酸或铁载体菌”的协同体系, 才有可能在兼顾环境优势的前提下获得较理想的 REE 浸出率。例如, 在含 REO 的荧光粉中利用 Kombucha 共生体系通过有机酸选择性浸出 Y、Eu 等稀土, 在多种工业固废中则根据 REE 赋存相与共伴生元素差异, 针对性选择自养菌或异养菌群才能取得较好效果[29]; 在煤系稀土资源处理中, 多种产表面活性剂和有机酸的菌株可显著提高 Yb、Er 等 REE 的迁移率, 但仍面临 REE 与其他痕量元素共浸出的选择性[30] [31]。

因此, 相较于传统金属硫化矿生物浸出, *A. ferrooxidans* 在稀土/钇体系中的应用不仅要解决如何持

续产生足够 Fe^{3+} 和 H^+ 的经典问题, 更需综合考虑复杂矿物学、共存离子干扰和 pH 缓冲等多重因素, 并通过矿物预处理、工艺条件精细调控以及与产有机酸或产生铁载体菌株的协同作用, 实现对 REE 的选择性动员。已有研究显示, 在 monazite 体系中将 *A. ferrooxidans* 与 *Enterobacter aerogenes* 共培养, 可将总 REE 浸出浓度由约 $23.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高至约 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 显著优于单菌体系, 从机理上印证了在稀土生物浸出中构建多菌种协同体系的必要性。

5. 氧化亚铁硫杆菌的浸出机理

氧化亚铁硫杆菌能够从矿物及固废中浸出金属, 主要依赖于其独特的代谢能力, 通过直接和间接两种作用机理, 以及多种生化反应的协同来实现。

5.1. 直接作用与间接作用

生物浸出过程可分为直接作用、间接作用和混合作用。直接作用是指细菌通过其细胞膜上的特异性酶系直接催化并氧化不溶性的金属硫化物, 使金属以离子形式释放到溶液中, 细菌在此过程中从矿物获取能量。间接作用则是指氧化亚铁硫杆菌将液相中的 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} , 强氧化性的 Fe^{3+} 再与矿物发生化学氧化反应, 将金属溶出, 其本质是微生物代谢产物(主要为 Fe^{3+} 和 H_2SO_4)作为浸出剂的化学浸出过程[1][2]。

5.2. 主要生化作用机制

氧化亚铁硫杆菌对金属的浸出是其多种生化机制协同作用的结果, 这些机制相互关联、相互促进, 共同构成了其高效生物浸出的基础(见图 1)。其核心在于通过酸解、氧化还原以及络合等途径, 破坏矿物或固废的稳定结构, 从而将目标金属离子释放到溶液中。酸解作用是该菌浸矿过程的起点和基础, 菌体在代谢硫或还原态硫化物时持续产生硫酸, 使浸出环境维持在高酸度状态; 这些反应产生的 H^+ 能够直接攻击并破坏矿物的晶体结构, 通过质子置换反应将晶格中的金属离子解离出来, 这一过程对于处理如赤泥等强碱性固废尤为重要, 因为它能有效中和固废的碱性并为后续反应创造必要的酸性条件[32]。

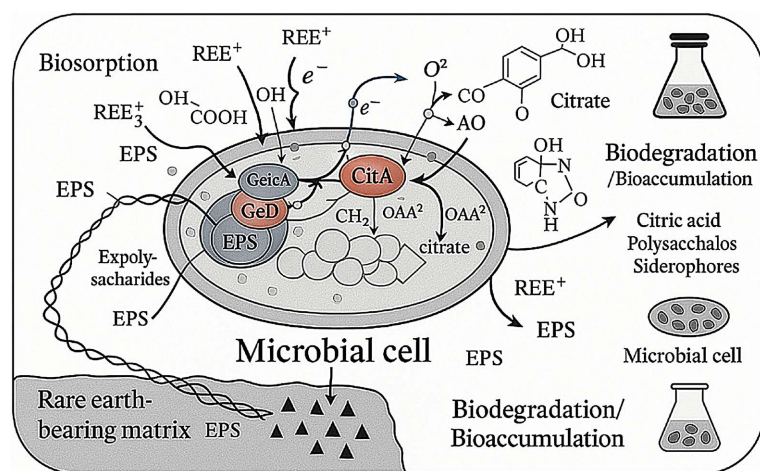


Figure 1. Iron oxide sulfide bacterium leaching mechanism diagram

图 1. 氧化亚铁硫杆菌浸出机理图

单一的酸解作用往往不足以高效溶解所有类型的矿物, 尤其是那些具有较高氧化还原电位的金属硫化物。此时, 氧化还原作用便发挥着不可替代的核心功能。氧化亚铁硫杆菌能够将其生长所必需的能源

物质 Fe^{2+} 高效地氧化为强氧化剂 Fe^{3+} (反应式为: $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{e}^-$), 新生成的 Fe^{3+} 作为一种强大的化学氧化剂, 可以进一步与矿物发生化学反应, 例如将黄铜矿(CuFeS_2)中的 Cu^{2+} 溶出, 或是将晶质铀矿(UO_2)氧化为可溶性的 UO_2^{2+} , 从而实现金属的间接浸出[33]。与此同时, 该菌还能直接氧化元素硫(S^0)或硫代硫酸盐($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$)等还原态硫, 此过程不仅持续提供了浸出所需的酸, 还确保了菌体能量代谢的循环进行。

在复杂的实际浸出体系中, 尤其是在存在多种微生物或代谢产物的环境下, 络合作用也成为促进金属浸出的一个重要机制。尽管氧化亚铁硫杆菌自身以产生无机酸为主, 但在其代谢过程中或与其他产有机酸微生物(如黑曲霉)共培养时, 体系内会产生诸如柠檬酸、草酸等小分子有机酸; 这些有机酸阴离子能够与溶液中的稀土或稀有金属离子形成稳定的、可溶性的络合物或螯合物, 从而显著降低溶液中游离金属离子的浓度, 从化学平衡的角度推动浸出反应持续向溶解方向进行, 最终达到提高目标金属总浸出率与浸出速度的效果[8] [11]。综上所述, 氧化亚铁硫杆菌对稀有金属的浸出并非依赖单一机制, 而是酸解、氧化还原与络合等多种生化途径协同的复杂过程, 它们共同构成了该菌从复杂固废中绿色、高效回收有价金属的理论基础。

6. 氧化亚铁硫杆菌的应用

氧化亚铁硫杆菌作为一种重要的浸矿微生物, 因其能够氧化 Fe^{2+} 为 Fe^{3+} 以及氧化还原态硫化物, 在生物冶金和环境治理领域展现出巨大的应用潜力。其应用范围涵盖从低品位矿石、固体废弃物中回收有价金属, 到处理含硫、含重金属的废气与废水。

6.1. 在生物浸出与资源回收中的应用

6.1.1. 从固废中回收稀有金属

氧化亚铁硫杆菌被广泛应用于从各类固体废物中浸出稀有金属。研究表明, 利用该菌及其混合菌群处理赤泥、粉煤灰、废旧锂电池等固废, 能有效回收其中的钴、镍、锂、稀土元素等(见表 1)。例如, Bahalo-Horeh 等[34]应用黑曲霉对废旧锂电池进行生物浸出, 成功浸出了 100%的锂、38%的钴、45%的镍和 72%的锰。而 Ghassa 等[35]利用嗜热化石细菌(包括嗜酸氧化亚铁硫杆菌、嗜铁钩端螺旋体等)的混合培养物, 在矿浆密度 1%的条件下, 从废旧锂电池中浸出了 99%的钴和镍以及 84%的锂。Homayoun 等[36]的研究发现, 将自养嗜酸氧化亚铁硫杆菌与异养产气肠杆菌共培养用于浸出独居石中的稀土元素, 其浸出量分别是单一菌株浸出量的 1.7 倍和 6.8 倍, 显示了微生物协同浸出的显著优势。

Table 1. A.f research on the recovery of metals from solid waste
表 1. A.f 回收固体废弃物中金属的研究

基质	微生物种类	浸出效果	回收量	浸出方式与条件	参考文献
WPCBs	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Cu 99.74%, Pb 91.92%	—	摇瓶法; 30℃; 100 rpm	Jessica Silva <i>et al.</i> , 2023 [37]
电子废物	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Cu 84%, Ni 96%, Ga 60%	—	20%浆料; 29℃; 140 rpm	Fatemeh Pourhossein <i>et al.</i> , 2018 [38]
WPCBs	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> ; <i>Acidiphilium acidophilum</i>	Cu 96%, Zn 94.5%, Ni 75%, Pb 74.5%, Ag 46%, Au 38%; REE: Sc 31%, La 27%, Ce 27%, Nd 24%	—	7.5%浆料; 30℃; 170 rpm	Anshu Priya <i>et al.</i> , 2020 [39]
油炼厂废物	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	—	—	混凝土槽; 28℃; pH 2.0~2.5; S:L = 1:10	Akmaral <i>et al.</i> , 2023 [40]

续表

PCBs	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Cu 1047 mg/L	—	30℃; 180 rpm	Aven <i>et al.</i> , 2021 [41]
干式焚烧炉渣	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Al 41%, Co 64%, Mn 11%, Cd 7%, Cr 13.7%	—	25℃; 100 rpm	Romy Auerbach <i>et al.</i> , 2019 [42]
填埋场渗滤液 沉渣	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Al > 90%, Co > 80%, Cr > 80%, Cu > 80%, Fe > 80%, Mg > 90%, Mn > 80%, Zn > 90%	—	30℃; 180 rpm; 10%硫磺; 1.5%渣料	Tomasz <i>et al.</i> , 2021 [43]

6.1.2. 处理电子废弃物

从电子废弃物(如废旧印刷电路板)中回收金属是氧化亚铁硫杆菌的另一重要应用。Nie 等[44]研究了以棉纱固定氧化亚铁硫杆菌对废旧电路板中金属的浸出效果。结果表明, 在生物氧化反应器曝气速率为 1 L/min 时, 曝气 12 h 后亚铁平均氧化速率可达 0.54 g/(L·h), 亚铁氧化率达到 96.90%。在反应 96 h 后, 当金属粉含量为 12 g/L、停留时间 6 h、曝气速率 1 L/min 时, 铜的浸出效率最高达到 91.68%, 同时锌、镁、铝和镍的提取率也较高。

6.2. 在环境治理中的应用

氧化亚铁硫杆菌在废气脱硫方面效果显著。王玉建等[45]采用 PVA-Ca(NO₃)₂ 法包埋固定氧化亚铁硫杆菌, 并构建了生物-化学二级反应器新工艺用于处理硫化氢。结果表明, 该工艺对 H₂S 的脱除率可达 99% 以上。Cheng 等[46]将氧化亚铁硫杆菌固定在聚氨酯泡沫上, 用于处理模拟天然气中的高浓度 H₂S, 其对亚铁的最大氧化速率高达 4.12 kg/(m³·h), 在处理浓度约为 15,000 mg/m³ 的 H₂S 时, 化学-生物一体化工艺的去除率约为 80%。

在脱除 SO₂ 方面, 陶清芳等[47]的研究表明, 通过载体(多面空心球、陶瓷拉西环和活性炭)固定化后, 菌株的氧化能力显著提高, 单个菌体氧化能力提高了 17%, 在脱硫塔中进行循环脱硫实验时, 脱硫效率能持续稳定在 80% 以上。同时, 氧化亚铁硫杆菌可用于处理酸性矿山废水等含重金属的污水。Kande 等[48]以颗粒活性炭为载体固定氧化亚铁硫杆菌, 采用吸附过滤技术在生物反应器内有效去除了污水中的钠及其他金属离子, 处理后的水中钠浓度低于世界卫生组织规定的最大污染水平, 取得了良好的去除效果。这证明了固定化技术能有效提升其在污水处理中的效能和稳定性。

6.3. 固定化技术对其应用效能的提升

游离的氧化亚铁硫杆菌存在生长周期长、对环境条件敏感、易流失等问题。固定化技术通过将菌体固定在载体上, 能显著提高其稳定性、生物活性和重复利用性, 从而大幅提升其在各领域的应用效能[49]。浸出速率提升方面, 李志章等[50]以焦炭为填料固定氧化亚铁硫杆菌, 细菌挂膜后仅需 12 h, Fe²⁺ 氧化率便能达到 95.28%, Fe²⁺ 平均氧化速率是游离细胞时的 8 倍。机械强度与稳定性方面, 使用聚乙烯醇(PVC)小球[51]、聚丙烯泰勒花环[52]等人工合成高分子材料或海藻酸钠-聚丙烯酰胺复合材料[53]进行固定, 制备的固定化菌株不仅机械强度高, 而且能长期保持稳定的生物氧化活性, 更适合于工业化应用。

综上所述, 氧化亚铁硫杆菌通过其独特的氧化功能, 在稀有金属回收、环境修复和矿物合成等领域发挥着不可替代的作用。结合固定化技术, 可以克服其游离状态的诸多缺点, 显著提升反应速率、稳定性和处理效率, 为其大规模的工业化应用奠定了坚实的基础。未来的研究应继续致力于优化固定化工艺、开发新型复合载体, 并进一步探索其在复杂体系中的应用潜力。

7. 问题与展望

尽管氧化亚铁硫杆菌在低品位金属矿和复杂固废的生物浸出中已展示出良好应用潜力，但围绕稀有金属尤其是稀土和钇资源的开发利用仍处于起步阶段，存在若干共性问题。

(1) 浸出效率和选择性不足。现有稀土/钇生物浸出体系普遍存在周期长、终点浸出率有限的问题，且常伴随大量 Fe、Al、Ca 等基体金属共浸出，增加后续分离负担。如何在保持绿色、低药耗优势的同时，通过调控菌群结构、工艺条件或协同试剂，实现对稀土/钇的选择性强化浸出，是下一阶段需要重点攻克工程化难题。

(2) 矿物-微生物互作机理不清。目前研究多停留在 $\text{Fe}^{2+}/\text{S}^{2-}$ 氧化和酸解等宏观过程，对 *A. ferrooxidans* 在稀土矿物表面的生物膜形成、EPS 作用及关键电子传递蛋白介导的界面反应缺乏系统认识。亟需结合基因组学、转录组学、蛋白质组学和表面表征技术，从分子和多尺度角度揭示“矿物结构-表面修饰-细胞响应-浸出行为”之间的关系，为菌株改造和矿物预处理提供依据。

(3) 高效菌株和稳定菌群体系匮乏。目前用于稀土/钇体系的 *A. ferrooxidans* 多源于传统矿山酸性废水或菌种库，其在高稀土离子、氟/碳酸根及强缓冲体系中的适应性和遗传稳定性尚不明确。未来应依托高通量筛选和连续驯化平台，从稀土矿区和固废堆场中挖掘并定向进化适用于多金属、低 pH 和高离子强度条件的优势菌株。

围绕上述问题，未来研究可按如下思路逐步推进：首先，在矿物表征和浸出行为的定量研究基础上，筛选具有代表性的稀土/钇矿物及固废体系，建立“结构-性质-浸出响应”数据库；在此之上，利用基因组学、转录组学和蛋白质组学等组学手段解析 *A. ferrooxidans* 在不同稀土/钇体系下的应激响应与代谢通路重构，锁定关键调控基因和蛋白，并探索合成生物学介入的可行性；同时，发展以固定化 *A. ferrooxidans* 为核心的多菌种协同浸出工艺，引入产有机酸或产生铁载体的共培养菌群，以提高稀土元素的选择性和浸出速率；在此基础上，结合过程强化和数字化监控技术，搭建中试规模的连续生物浸出装置，系统评估其在实际固废处理中的运行性能及相对于传统湿法工艺的经济和环境优势。通过基础机理研究与工程应用验证的双向推动，有望逐步构建以 *A. ferrooxidans* 为核心的稀土/钇绿色生物冶金技术体系。

参考文献

- [1] 李小燕, 张卫民, 高曙光, 等. 微生物浸矿技术在处理低品位铜矿中的现状及发展趋势[J]. 中国矿业, 2007, 16(7): 91-93, 97.
- [2] 刘玉龙, 李广悦, 胡南, 等. 嗜酸氧化亚铁硫杆菌耐重金属离子连续转接驯化试验研究[J]. 铀矿冶, 2020, 39(1): 27-32.
- [3] Malik, L. and Hedrich, S. (2022) Ferric Iron Reduction in Extreme Acidophiles. *Frontiers in Microbiology*, **12**, Article 818414. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.818414>
- [4] Zhang, S., Yan, L., Xing, W., Chen, P., Zhang, Y. and Wang, W. (2018) *Acidithiobacillus ferrooxidans* and Its Potential Application. *Extremophiles*, **22**, 563-579. <https://doi.org/10.1007/s00792-018-1024-9>
- [5] Liang, G., Mo, Y. and Zhou, Q. (2010) Novel Strategies of Bioleaching Metals from Printed Circuit Boards (PCBs) in Mixed Cultivation of Two Acidophiles. *Enzyme and Microbial Technology*, **47**, 322-326. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2010.08.002>
- [6] Hedrich, S., Schlömann, M. and Johnson, D.B. (2011) The Iron-Oxidizing Proteobacteria. *Microbiology*, **157**, 1551-1564. <https://doi.org/10.1099/mic.0.045344-0>
- [7] Yan, L., Zhang, S., Liu, H., Wang, W., Chen, P. and Li, H. (2016) Optimization of Magnetosome Production by *Acidithiobacillus ferrooxidans* Using Desirability Function Approach. *Materials Science and Engineering: C*, **59**, 731-739. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.10.060>
- [8] 邓明强, 白静, 白建峰, 等. 影响嗜酸氧化亚铁硫杆菌生长及生物浸出效率的研究进展[J]. 湿法冶金, 2016, 35(3): 171-175.
- [9] 高雪彦, 陈林旭, 陈显轲, 等. 嗜酸硫杆菌在工农业中的应用[J]. 生物技术通报, 2022, 38(5): 36-46.

- [10] Tuovinen, O.H. and Kelly, D.P. (1973) Studies on the Growth of *Thiobacillus ferrooxidans*. I. Use of Membrane Filters and Ferrous iron Agar to Determine Viable Numbers, and Comparison with 14 CO_2 -Fixation and Iron Oxidation as Measures of Growth. *Archiv für Mikrobiologie*, **88**, 285-298. <https://doi.org/10.1007/bf00409941>
- [11] 邓恩建, 杨朝晖, 曾光明, 等. 氧化亚铁硫杆菌的研究概况[J]. 黄金科学技术, 2005, 13(5): 8-12.
- [12] 张再利. 氧化亚铁硫杆菌与氧化硫硫杆菌的特性及应用研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 中山大学, 2024.
- [13] 吴李川, 陈茂, 邓佳禹, 等. 氧化亚铁硫杆菌及其应用研究进展[J]. 山东化工, 2017, 46(5): 53-54, 58.
- [14] Liu, X. (2008) Metabolism of Organic Compounds by Extremely Acidophilic, Obligately Chemolithoautotrophic Thiobacilli: A Review. *Chinese Journal of Biotechnology*, **24**, 1-7. [https://doi.org/10.1016/s1872-2075\(08\)60001-1](https://doi.org/10.1016/s1872-2075(08)60001-1)
- [15] Manning, H.L. (1975) New Medium for Isolating Iron-Oxidizing and Heterotrophic Acidophilic Bacteria from Acid Mine Drainage. *Applied Microbiology*, **30**, 1010-1016. <https://doi.org/10.1128/am.30.6.1010-1016.1975>
- [16] Garcia, O.J., Mukai, J.K. and Andrade, C.B. (1992) Growth of *Thiobacillus ferrooxidans* on Solid Medium: Effects of Some Surface-Active Agents of Colony Formation. *The Journal of General and Applied Microbiology*, **38**, 279-282. <https://doi.org/10.2323/jgam.38.279>
- [17] Khalid, A., Bhatti, T. and Umar, M. (1993) An Improved Solid Medium for Isolation, Enumeration and Genetic Investigations of Autotrophic Iron- and Sulphur-Oxidizing Bacteria. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **39**, 259-263. <https://doi.org/10.1007/bf00228616>
- [18] 张在海. 铜硫化矿生物浸出高效菌种选育及浸出机理[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2002.
- [19] 周顺桂, 王世梅, 余素萍, 等. 污泥中氧化亚铁硫杆菌的分离及其应用效果[J]. 环境科学, 2003(3): 56-60.
- [20] 褚祺. 嗜酸性硫杆菌的分离纯化及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [21] Díaz-Tena, E., Rojo, N., Gurtubay, L., Rodríguez-Ezquerro, A., López de Lacalle, L.N., Oyanguren, I., et al. (2016) Biomachining: Preservation of *Acidithiobacillus ferrooxidans* and Treatment of the Liquid Residue. *Engineering in Life Sciences*, **17**, 382-391. <https://doi.org/10.1002/elsc.201600124>
- [22] 周吉奎, 邱冠周, 钮因健, 等. 干燥保存对氧化亚铁硫杆菌(Fe^{2+})氧化活性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2004(1): 39-42.
- [23] 张燕飞, 何环, 师舞阳, 等. 正交法优化嗜酸氧化亚铁硫杆菌冷冻干燥保护剂[J]. 现代生物医学进展, 2006(5): 5-7, 10.
- [24] Wu, X., Hu, Q., Hou, D., Xin, X., Miao, B., Wang, Y., et al. (2013) Preservation Efficiency of New Cryoprotectant Used for *Acidithiobacillus ferrooxidans* in Liquid Nitrogen. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **23**, 818-823. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(13\)62534-0](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(13)62534-0)
- [25] 杨宇, 张燕飞, 黄菊芳, 等. 嗜酸氧化亚铁硫杆菌的保藏方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006(3): 472-475.
- [26] 衷水平, 杜涛, 翁威, 等. 锌浸出渣水浸预处理-分段硫化浮选回收银试验研究[J]. 有色金属: 选矿部分, 2023(2): 54-62.
- [27] Evans, W.J., Davis, B.L., Champagne, T.M. and Ziller, J.W. (2006) C-H Bond Activation through Steric Crowding of Normally Inert Ligands in the Sterically Crowded Gadolinium and Yttrium (C_5Me_5)₃ M Complexes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **103**, 12678-12683. <https://doi.org/10.1073/pnas.0602672103>
- [28] 祝怡斌, 陈国梁, 赵学付, 等. 离子型稀土矿山原地浸矿水体污染特征与控制对策[J]. 有色金属(矿山部分), 2025, 77(2): 213-218.
- [29] 张启燕, 史维鑫, 刘晓, 等. 高光谱扫描在碳酸盐岩矿物组成分析中的应用[J]. 岩矿测试, 2022, 41(5): 815-825.
- [30] 颜琳琳, 汪海兰, 肖春桥, 等. 稀土钇生物浸出研究进展[J]. 生物学杂志, 2024, 41(3): 61-68.
- [31] 高旭, 赵爱春, 王晔, 等. 生物浸出技术在粉煤灰综合利用中的应用[J]. 有色金属科学与工程, 2024, 15(5): 684-689.
- [32] 傅建华, 邱冠周, 胡岳华, 等. 氧化亚铁硫杆菌胞外多聚物在生物浸出中的作用[J]. 激光生物学报, 2004, 13(1): 62-66.
- [33] Sand, W. and Gehrke, T. (2006) Extracellular Polymeric Substances Mediate Bioleaching/Biocorrosion via Interfacial Processes Involving Iron(III) Ions and Acidophilic Bacteria. *Research in Microbiology*, **157**, 49-56. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2005.07.012>
- [34] Bahaloo-Horeh, N., Mousavi, S.M. and Baniasadi, M. (2018) Use of Adapted Metal Tolerant *Aspergillus Niger* to Enhance Bioleaching Efficiency of Valuable Metals from Spent Lithium-Ion Mobile Phone Batteries. *Journal of Cleaner Production*, **197**, 1546-1557. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.299>
- [35] Ghassa, S., Farzanegan, A., Gharabaghi, M. and Abdollahi, H. (2020) Novel Bioleaching of Waste Lithium Ion Batteries

- by Mixed Moderate Thermophilic Microorganisms, Using Iron Scrap as Energy Source and Reducing Agent. *Hydrometallurgy*, **197**, Article ID: 105465. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105465>
- [36] Fathollahzadeh, H., Eksteen, J.J., Kaksonen, A.H. and Watkin, E.L.J. (2018) Role of Microorganisms in Bioleaching of Rare Earth Elements from Primary and Secondary Resources. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **103**, 1043-1057. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9526-z>
- [37] Silva, J.G., da Silva, M.T., Dias, R.M., Cardoso, V.L. and de Resende, M.M. (2023) Biolixiviation of Metals from Computer Printed Circuit Boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and Bioremoval of Metals by Mixed Culture Subjected to a Magnetic Field. *Current Microbiology*, **80**, Article No. 197. <https://doi.org/10.1007/s00284-023-03307-y>
- [38] Pourhossein, F. and Mousavi, S.M. (2018) Enhancement of Copper, Nickel, and Gallium Recovery from LED Waste by Adaptation of *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Waste Management*, **79**, 98-108. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.07.010>
- [39] Priya, A. and Hait, S. (2020) Biometallurgical Recovery of Metals from Waste Printed Circuit Boards Using Pure and Mixed Strains of *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidiphilium acidophilum*. *Process Safety and Environmental Protection*, **143**, 262-272. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.06.042>
- [40] Issayeva, A., Syzdykova, M., Akhmet, A., Bakhov, Z., Ospanova, Z., Chingisbayev, B., et al. (2023) Use of *Acidithiobacillus ferrooxidans* for Decontamination of Explosive Waste from Oil Refineries. *Journal of Ecological Engineering*, **24**, 19-24. <https://doi.org/10.12911/22998993/163250>
- [41] An, J. (2021) Characteristics of Metals Leached from Waste Printed Circuit Boards Using *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Minerals*, **11**, Article 224. <https://doi.org/10.3390/min11020224>
- [42] Auerbach, R., Ratering, S., Bokelmann, K., Gellermann, C., Brämer, T., Baumann, R., et al. (2019) Bioleaching of Valuable and Hazardous Metals from Dry Discharged Incineration Slag. An Approach for Metal Recycling and Pollutant Elimination. *Journal of Environmental Management*, **232**, 428-437. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.028>
- [43] Kamizela, T., Grobelak, A. and Worwag, M. (2021) Use of *Acidithiobacillus thiooxidans* and *Acidithiobacillus ferrooxidans* in the Recovery of Heavy Metals from Landfill Leachates. *Energies*, **14**, Article 3336. <https://doi.org/10.3390/en14113336>
- [44] Nie, H., Zhu, N., Cao, Y., Xu, Z. and Wu, P. (2015) Immobilization of *Acidithiobacillus ferrooxidans* on Cotton Gauze for the Bioleaching of Waste Printed Circuit Boards. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, **177**, 675-688. <https://doi.org/10.1007/s12010-015-1772-2>
- [45] 王玉建, 李红玉. PVA-Ca(NO₃)₂ 法包埋固定氧化亚铁硫杆菌研究[J]. 微生物学报, 2006(3): 460-463.
- [46] Cheng, R., Zhou, W., Lin, L., Xie, T. and Zhang, Y. (2012) Removal of High Concentrations of H₂S from Simulated Natural Gas by *Acidithiobacillus ferrooxidans* Immobilized on Polyurethane Foam. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, **88**, 975-978. <https://doi.org/10.1002/jctb.3854>
- [47] 陶清芳. 高效氧化亚铁硫杆菌脱除燃煤烟气中二氧化硫的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉纺织大学, 2012.
- [48] Kamde, K., Pandey, R.A., Thul, S. and Bansiwala, A. (2018) Removal of Arsenic by *Acidithiobacillus ferrooxidans* Bacteria in Bench Scale Fixed-Bed Bioreactor System. *Chemistry and Ecology*, **34**, 818-838. <https://doi.org/10.1080/02757540.2018.1504927>
- [49] 孙乔, 等. 嗜酸性氧化亚铁硫杆菌固定化技术发展应用[J]. 应用化工, 2023, 52(5): 1473-1477.
- [50] 李志章, 李俊全. 生物脱硫中氧化亚铁硫杆菌固定化技术的研究[J]. 微生物学通报, 2006(6): 57-61.
- [51] 李飞洋, 李茹. 氧化亚铁硫杆菌固定化实验研究[J]. 当代化工, 2018, 47(6): 1112-1114, 1118.
- [52] 王传凯, 李雨, 张永奎, 等. 喷淋塔中固定化 *Acidithiobacillus ferrooxidans* 对 Fe²⁺ 的生物氧化特性研究[J]. 矿产综合利用, 2018(2): 130-134.
- [53] 廖泽君, 等. 海藻酸钠-聚丙烯酰胺固定化亚铁硫杆菌技术的研究[J]. 中国矿业, 2016, 25(3): 150-153, 157.