doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.02.011
引用格式：邓力嘉，李鹏，刘浩然，马芳源，谢思莹. 难处理金矿石强化浸出技术研究进展与展望[J]. 矿冶，2026，35(2)：259-265.
DENG Lijia, LI Peng, LIU Haoran, MA Fangyuan, XIE Siying. Research progress and prospects of enhanced leaching technologies for refractory gold ores[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(2): 259-265.

难处理金矿石强化浸出技术研究进展与展望

邓力嘉[1] 李 鹏[2] 刘浩然[1] 马芳源[1] 谢思莹[1]
（1. 辽宁科技大学 矿业工程学院，辽宁 鞍山 114051；
2. 鞍钢股份有限公司能源动力总厂发电分厂，辽宁 鞍山 114000）

摘 要：随着易处理金矿资源的日益消耗，低品位、难处理金矿石已成为黄金工业可持续发展的主要资源。然而，传统浸金工艺存在动力学缓慢、浸出效率低等问题，且剧毒浸金药剂的使用带来严峻的环境挑战，制约了该领域的技术进步。为突破上述瓶颈，多种物理、化学及电化学强化技术被开发应用于金浸出过程，通过改善传质效率、促进矿物解离或调控界面反应等机制，显著提升了金的浸出率。本文系统综述了电化学强化、超声强化、超细磨强化及搅拌强化等四类主要强化浸金技术的原理、研究现状与应用进展，深入剖析了各类技术目前存在的能耗高、设备磨损、副反应控制难等关键问题与局限性。在此基础上，结合“双碳”目标与绿色冶金发展趋势，提出了针对性改进策略与技术优化方向，并对未来高效、低碳、集成化的强化浸金技术发展路径进行了展望。

关键词：难处理金矿石；强化浸出；电化学；超声；超细磨；强力搅拌；绿色冶金
中图分类号：TD953；TF83 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854（2026）02-0259-07

Research progress and prospects of enhanced leaching technologies for refractory gold ores

DENG Lijia[1] LI Peng[2] LIU Haoran[1] MA Fangyuan[1] XIE Siying[1]
(1. School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, Liaoning, China;
2. Power Generation Branch, Energy and Power Plant, Ansteel Co., Ltd., Anshan 114000, Liaoning, China)

Abstract: With the increasing depletion of easily-processed gold ore resources, low-grade refractory gold ores have become the primary resource for the sustainable development of the gold industry. However, traditional gold leaching processes suffer from issues such as slow kinetics and low leaching efficiency. Moreover, the use of highly toxic leaching agents presents severe environmental challenges, which further constrains technological advancement in this field. To overcome these bottlenecks, various physical, chemical, and electrochemical enhancement technologies have been developed and applied to the gold leaching process. By improving mass transfer efficiency, promoting mineral liberation, or regulating interfacial reactions, these technologies have significantly enhanced gold leaching rates. This paper systematically reviews the principles, research status, and application progress of four major enhanced leaching technologies: electrochemical enhancement, ultrasonic enhancement, ultra-fine grinding enhancement, and agitation enhancement. It provides an in-depth analysis of the key challenges and limitations currently faced by these technologies, such as high energy consumption, equipment wear, and difficulties in controlling side reactions. Building on this analysis and in line with the "Dual Carbon" goals and the trend toward green metallurgy, targeted improvement strategies and technical optimization directions are

收稿日期：2025-08-07 **修回日期：**2025-09-17 **录用日期：**2025-09-12
基金项目：辽宁省教育厅高等学校基本科研项目(LJ212510146016)
第一作者：邓力嘉，硕士研究生，研究方向为有色金属选矿和难处理金矿石浸出。E-mail：2784427120@qq.com
通信作者：马芳源，博士，副教授；E-mail：1209468883@qq.com
©Mining and Metallurgy Editorial Department 2026. This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License.

proposed. Furthermore, the development path for future efficient, low-carbon, and integrated enhanced gold leaching technologies is outlined.

Key words: refractory gold ores; enhanced leaching; electrochemistry; ultrasound; ultra-fine grinding; intense agitation; green metallurgy

据我国自然资源部发布的《中国矿产资源报告（2024）》显示，截至2023年底，我国金矿资源储量为3 203.77 t，较2022年增长2.4%。然而，随着易处理金矿资源逐渐消耗，低品位、难处理金矿石的占比持续攀升，已成为未来黄金资源开发的主要对象[1]。当前我国金矿石平均品位约为2.1 $g \cdot t^{-1}$，且仍呈逐年下降趋势[2]。难处理金矿石主要表现为以下三类特征：其一，金与高硫、高碳质矿物紧密结合，或以亚微米级颗粒包裹于黄铁矿、毒砂及碳质矿物中形成固溶体；活性炭或石墨对金-氰络合物（$[Au(CN)_2]^-$）的强烈吸附引发显著“劫金”现象，造成“浸出—再沉淀”循环，严重影响金的浸出效率[3]。其二，约20%~30%的金以显微或亚显微形态嵌布于石英或硅酸盐等脉石矿物晶格内，同时金属硫化物含量较低，导致金暴露不充分，难以与浸出试剂（或浮选药剂）有效接触[4]。其三，金常与多种金属矿物紧密共生，且与硫、砷等元素嵌布关系复杂（其氧化过程消耗浸出药剂及氧气，生成硫酸盐等抑制金溶解），浸出后体系易富集杂质金属盐类（如锑矿物氧化形成的亚锑酸盐薄膜覆盖于金颗粒表面），进一步阻碍金的溶出[5]。据统计，此类难处理金矿石约占金矿石总量的60%~70%，目前全球约30%的黄金产量来源于对其的高效回收处理[5]。

传统浸金工艺（如氰化法、硫脲法等）虽已形成较为完整的工艺体系，却始终面临环境友好性与浸出效率的双重挑战。其环境兼容性不足的问题日益突出：剧毒浸出试剂的生态累积效应显著，氧化剂的非选择性分解导致药剂消耗量增大，加之浸出动力学缓慢造成尾矿中金残留量较高。这些技术瓶颈不仅加剧了二次污染风险，也制约了金矿资源高效、可持续利用的发展需求[6]。因此，以电化学强化、超声强化等为代表的新型辅助浸金技术，成为改善金浸出过程中热力学或动力学限制的关键研究方向，正日益受到学术与工业界的广泛关注。为此，本文重点综述电化学强化、超声强化以及超细磨强化浸金方法的基本原理与研究进展，并针对性提出了改进措施，展望该领域技术的发展前景。

1 电化学强化浸出

传统的湿法浸金工艺通常在常规大气条件下进行，由于药剂在从矿物颗粒中浸出金属时受到热力学的限制，金属的浸出效率较低[7]。相比之下，电化学强化浸出技术通过施加外电场，可实现对电极反应、界面传质及溶液化学环境的主动调控。该技术以促进电子转移动力学为核心机制，从而强化浸金剂对目标金属的溶解作用[8]。此外，该方法可与风能、太阳能等清洁能源发电系统结合，确保其工艺过程的可持续性[9]。通过精准调控电化学参数（如电位、电流密度）与溶液环境，能够系统优化浸出条件，显著提升金的浸出效率。

在电化学强化浸金的研究中，诸多学者已取得阶段性进展。TAMAYO等[10]研究表明，在硫代硫酸盐浓度为0.2 $mol \cdot L^{-1}$的溶液中金溶解效果较优，并通过维持硫代硫酸盐与铵（1∶3）或硫代硫酸盐与铜（4∶1）的适宜比例，实现了金的高溶解率与硫代硫酸盐的低分解率。GALLAGHER等[11]通过电化学测试对比了不同配体与金的络合溶解动力学，得出常见浸金剂与金形成络合物的溶出动力学顺序为：$CN^->SC(NH_2)_2^->SCN^->S_2O_3^{2-}$。LE等[12]在硫氰酸盐浸金体系中发现，砷黄铁矿的存在可进一步增强金的电化学溶解。TANG等[13]采用电化学手段研究了铜—柠檬酸盐—硫代硫酸盐和铜（Ⅱ）-氨-硫代硫酸盐两种体系中黄铁矿的氧化机制，指出高电位及硫代硫酸盐的存在均会促进黄铁矿的氧化，且该过程主要受电荷转移步骤控制。AGAPOVA等[14]利用电化学辅助氯化浸出，证实外电场能有效活化氯离子并加速其向金表面迁移，从而强化金的浸出动力学，最终在5小时内将金回收率提升至39%。NIRONOV等[15]则采用特制硫石墨电极（SGE）作为含硫阴离子源，并以PVC隔膜分隔阴阳极室，在优化条件下获得了93%的金回收率，同时大幅降低了浸金剂消耗。此外，YANG等[16]在某贵金属电化学浸出实验中发现，Na_2S可降低电极表面金属离子的腐蚀电位、活化能及稳定性，而NaOH则能提高腐蚀电流值，从而增

强电极的电化学活性、加速反应进程。

将电化学技术整合于矿物湿法冶金过程，有望在浸出效率、成本控制及环境友好性方面实现突破。尽管电化学浸金体系较为复杂，其浸出机理与完整反应路径尚未完全阐明，但在实际应用方面已取得初步探索成果。目前该技术仍面临若干挑战：杂质离子的存在及其他竞争性电化学反应难以精确控制；高电流密度在强化浸出的同时，可能加剧析氢、电极钝化等副反应，并加速设备腐蚀。未来可通过深入研究电化学反应机制、合理调控工艺参数、实时监测并调控溶液电位与离子浓度，以及开发耐腐蚀电极材料与优化反应器设计等途径，进一步提升电化学强化浸金的综合性能。

2 超声强化浸出

超声波是一种高频弹性机械振动波，具有能量密度高、穿透性强等特点。近几十年来，超声技术已被广泛应用于金属矿石、工业废弃物及废旧锂离子电池等物料中有价金属的强化浸出过程[17]。超声的空化效应、机械效应与热效应能够显著提高金属浸出率、缩短浸出时间，并减少试剂消耗与废物产生[18]。与传统浸出工艺相比，超声强化浸出技术在提升反应动力学方面表现突出。超声强化浸出的核心机制源于其在液体介质中传播时引发的空化现象。当超声波在负压区传播时，液体分子间距超过其保持连续的临界值，导致介质断裂并析出微气泡[19]。这些微泡在正压区迅速坍缩，产生局部高温、高压及强烈冲击波。空化效应通过促进金的氧化、破坏包裹金的矿物层等方式，显著加速金的浸出过程[20]。矿物颗粒表面的钝化层往往阻碍浸出剂向内扩散，而超声波引起的力学效应可诱发并扩展表面微裂纹，从而增强浸出剂与矿物内层的接触[21]。在试验研究方面，李齐[22]采用超声辅助氰化浸金，发现超声的脱气作用减少了游离氰的挥发损失，同时空化作用导致的颗粒破碎与表面粗糙化显著增大了比表面积，提高了固-液传质效率，使黄铁矿与石英的溶解速率分别提升了39.8%与53.7%。GUI等[23]将超声与过硫酸盐、环保型浸金剂氰尿酸钠（$Na_3C_3H_3N_6O_3$）结合处理某难处理金矿石，结果表明：超声与过硫酸盐协同作用可有效细化矿石粒度、氧化表面包裹层，加速氰尿酸钠的浸金过程；同时，超声促进Fe^{3+}催化产生羟基自由基，持续氧化黄铁矿并清除表面钝化层，最终使金浸出率达到86.9%。YIN等[24]进一步指出，超声的机械效应不仅能清洁矿物表面，还可增加表面活性位点数量，从而强化金的浸出。

值得注意的是，超声的强化效果并非随频率升高而单调增强。GUI等[25]研究超声空化对载金黄铁矿氧化的影响时发现，空化前提高NaOH浓度会导致Fe^{2+}浓度下降及氧化铁在金矿表面沉积，阻碍氧化反应；空化后随超声频率增加，溶液中Fe^{2+}浓度呈现先升后降的趋势。这与AMBEDKAR等[26]的研究结论一致：低频（如20 kHz）超声波引起的空化作用更强，能有效破碎矿物颗粒、促进目标组分暴露，从而显著强化浸出；而高频（如58/192 kHz及430 kHz）超声波则主要表现为温和的流动效应，对颗粒破碎的贡献较小，表1汇总了超声强化浸金的主要机制及其影响。

表1 超声强化浸金的主要机制及影响

Table 1 The main mechanisms and effects of ultrasound-enhanced immersion gold

作用机制	物理化学过程	对浸出的影响
空化效应	空化泡崩裂产生高温高压	破坏矿物微观晶体结构，促进包裹金暴露
机械效应	微射流和冲击波	减小颗粒尺寸，增大比表面积
热效应	局部高温和温度梯度	加速化学反应速率
化学效应	自由基生成（·OH和·H）	氧化硫化物，减少钝化层的形成
传质强化	边界层减薄和湍流增强	提高反应物的扩散速率

总体而言，超声辅助浸金技术对各类金矿石均表现出良好的适应性，亦有助于提升活性炭对金的吸附回收效率，具有操作简便、环境友好、潜力突出等优点[27-30]。此外，空化气泡内部为近似真空状态，若能构建富氧气泡环境，有望进一步促进载金黄铁矿的氧化，提升浸出效率，值得深入探索。然而，目前超声空化气泡在浸金体系中的具体影响机制尚不明确，未来研究应聚焦于相关机理的深入阐释，以推动该技术在难处理金矿高效回收中的进一步应用。

3 超细磨强化浸出

难处理金矿石已成为全球黄金生产的重要来源，其贡献约占黄金总产量的30%。在此类矿石中，金常以微细粒形态包裹于硫化物、硅酸盐等脉石矿物中，解离程度极低，严重制约了金的富集与高效浸出[31]。研磨作为一种常规的机械活化方法，可通过物理方式破坏矿物结构、增加反应界面，是提高金暴露率与浸出效率的关键预处理手段[32]。其主要作用体现在：1）破坏含金硫化物的晶体结构，使包裹金得以暴露；2）增加矿物颗粒的比表面积，促进其与浸出剂的接

触；3）去除矿物表面的钝化层，改善界面反应活性。

超细磨技术已广泛应用于难处理金矿石的加工过程。ZHANG等[33]采用卧式搅拌磨对微细粒金矿进行细磨—浸出试验。研究结果表明，经搅拌磨处理后，矿物产品呈现更窄且均匀的粒度分布，细粒级占比、比表面积及总孔容积显著提高。在优化浸出剂浓度、时间和液固比条件下，金的浸出率提升了约20%。郭桂荣等[34]对比了焙烧后金矿的直接氰化浸出与超细磨—氰化浸出效果，发现将焙烧滤饼超细磨至−38 μm粒级占96%后，氰化尾渣金品位由1.72 $g\cdot t^{-1}$降至1.42 $g\cdot t^{-1}$，年综合经济效益增加约815.68万元。陈艳波等[35]针对某微细粒高硫金矿的研究显示，常规磨矿提高细度对金浸出率的改善有限（见表2）；而将矿样超细磨至−10 μm粒级占80%后，金浸出率大幅提高至77.1%，但氰化钠消耗也相应增至32.7 $kg\cdot t^{-1}$，导致生产成本显著上升，影响整体经济可行性。超细磨技术通过实现微细粒包裹金的充分物理解离，为后续高效浸出创造了有利条件，且具有污染小、环境负荷低的优点。然而，该技术在实际应用中仍面临严峻的能耗与效率挑战。根据邦德定律、积可定律等粉碎能耗规律，随着目标粒度的降低，单位质量物料的粉碎能耗呈指数级增长[36]。此外，超细磨范围内设备处理效率下降明显，且伴随研磨介质与衬板的严重磨损、矿浆浓度升高、固液分离困难等问题，制约了其规模化高效运行[37,38]。因此，未来研究应聚焦于高效助磨剂的开发、节能型超细磨设备与工艺的优化创新，以及磨矿—浸出流程的协同设计，从而在满足企业规模化生产、投资效益与环保要求的条件下，推动超细磨强化浸出技术的进一步发展。

表2 常规磨矿—浸出试验结果[35]

Table 2 Results of conventional grinding-leaching tests[35]

磨矿细度（−45μm占比）/%	原矿金品位/（$g\cdot t^{-1}$）	氰渣金品位/（$g\cdot t^{-1}$）	浸出率/%	氰化钠消耗量/（$kg\cdot t^{-1}$）	NaOH消耗量/（$kg\cdot t^{-1}$）
80	14.0	6.7	52.14	2.21	0.5
88	14.0	6.5	53.57	3.86	0.8
98	14.0	6.0	57.14	8.48	3.2

4 浸出罐强力搅拌

浸出罐强力搅拌技术通过强化体系传质效率，促进金的高效浸出。其核心机制在于：一方面，金浸出过程通常需要氧气作为氧化剂，而氧气在水中的溶解度较低，易成为动力学限制环节；另一方面，矿物颗粒在浸出过程中易发生沉降，影响其与浸金药剂的充分接触。强力搅拌能够显著提升气-液-固三相间的混合与传质效率，为金浸出创造更为有利的反应环境（表3）。

表3 浸出罐强力搅拌强化金的浸出机制

Table 3 The leaching mechanism of the leaching tank with strong stirring to strengthen the gold

强化作用	强化机制
加强氧气溶解与分散	1）增加气-液接触面积：将空气或纯氧更有效地分散成细小气泡 2）提高气-液传质系数：增强气泡与溶液之间的湍流，加速氧气从气相溶解到液相 3）延长气泡停留时间：优化搅拌流型可使气泡在矿浆中停留更久，增加溶解机会
加强固-液接触	1）金颗粒与氰化物溶液充分接触 2）溶解的氧气能有效输送到金颗粒表面 3）反应产物（金氰络合物）能及时从金颗粒表面移走，避免钝化层形成
加强液-液混合	使助浸剂及其他强化浸金药剂充分混合

试验研究表明，搅拌条件的优化对金的浸出具有显著促进作用。如LING等[39]在处理某含金物料时发现，采用变速强力搅拌可有效提高浸出液的流动状态，加快金的浸出动力学，从而缩短反应时间。ANTONIO等[40]在微生物浸出体系中探究了强搅拌的强化效果，指出较细的矿物颗粒会改变矿浆的流变特性，而强力搅拌不仅能够缓解细颗粒导致的浆体黏度上升，还可通过改善传质间接提高培养基中细菌的浓度，从而增强生物浸出强度。WU等[41]针对高硫难处理金矿的研究表明，通过优化搅拌罐中的氧化条件，可使硫的氧化率从79.31%提升至83.29%，同时金的回收率从76.54%提高至83.23%。机理分析指出，强力搅拌能够显著强化硫的生物氧化过程，有效剥离包裹金的载体矿物，进而促进金的释放与浸出。

强力搅拌技术对高浓度矿浆体系具有良好适应性，其通过加速氧气溶解、促进矿浆均匀分散，实现了金的快速高效浸出。然而，该技术在实际应用中仍面临若干挑战：搅拌装置在长期运行中易受矿浆磨损与酸性介质腐蚀，对材料耐蚀性及结构强度要求较高；同时，高功率搅拌导致能耗上升，设备维护成本增加。因此，未来应聚焦于搅拌参数的优化（如

叶轮构型、转速、功率配置）与智能过程控制的引入，在保证浸出效率的同时，提升体系的能量利用效率与经济可行性。

5 结论与展望

当前，难处理金矿石直接浸出效率低的现状已难以适应我国矿产资源行业快速发展的需求。随着易处理金矿资源的日益枯竭，低品位、复杂难处理金矿石已成为黄金可持续供应的主要来源。因此，实现该类资源的高效、绿色回收已成为学术界与工业界共同关注的核心课题。电化学强化、超声强化及超细磨强化等辅助浸金技术分别通过不同机制（如调控电化学界面、引入空化效应、实现微细粒解离）能够有效克服传统浸金工艺在动力学、传质及矿物解离方面的限制，显著提升金的浸出率与过程效率，代表了难处理金资源清洁利用的重要发展方向。面向未来，为全面提升难处理金矿石浸出技术的适应性、经济性与环境友好性，推动资源高效循环利用与冶金行业的绿色转型，金浸出体系的优化与技术创新应聚焦于以下几个方向：

1）电化学强化浸出技术：在“双碳”战略目标引领下，应着力推进电化学过程的智能化控制与工程化应用突破。通过精准调控电极电位、电流密度等关键参数，优化界面反应动力学，抑制副反应，从而突破传统浸出的热力学与动力学限制。未来研究需深化电极材料设计、反应器优化及与可再生能源（如太阳能、风能）的耦合集成，为金的高效、低碳浸出提供创新性解决方案。

2）超声强化浸出技术：作为一种绿色高效的物理强化手段，超声技术通过空化、机械及热效应，在加速浸出、清洁矿物表面、提高浸出率方面展现出独特优势。该技术正从实验室研究迈向工业化示范应用。未来应深入研究超声参数（频率、功率、作用方式）与矿物性质、浸出体系的协同机制，明确空化气泡在浸出过程中的具体作用，并开发高效、低能耗的规模化超声装备，以推动湿法冶金行业向更高效、环保的方向转型。

3）超细磨强化浸出技术：该技术是实现微细粒包裹金有效解离的关键预处理方法，但其工业化应用受限于极高的能耗成本与设备磨损问题。未来突破点在于：研发高效节能的超细磨设备与新型耐磨材料；开发选择性助磨剂，以降低能耗并改善矿浆流变性；优化“磨矿—浸出”一体化工艺参数与流程配置，在确保金充分解离的同时，统筹考虑技术经济指标与环保要求，实现过程整体效益最大化。

此外，浸出罐强力搅拌等过程强化技术也应通过优化搅拌器设计、引入智能控制系统等方式，在提升传质效率的同时降低能耗与设备损耗。综上，通过多技术协同创新与系统集成，构建高效、低碳、经济的难处理金矿石提金新体系，是我国黄金工业实现可持续发展的必然路径。

参考文献

[1] POURHOSSEIN F, MOUSAVI S M. A novel rapid and selective microbially thiosulfate bioleaching of precious metals from discarded telecommunication printed circuited boards (TPCBs)[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 187: 106599.

[2] LI J, KOU J, SUN C, et al. A review of environmentally friendly gold lixiviants: fundamentals, applications, and commonalities[J]. Minerals Engineering, 2023, 197: 108074.

[3] 周光浪，周东云. 含碳微细粒难处理复杂金矿中金的回收[J]. 矿冶, 2022, 31(4): 48-55.
ZHOU G L, ZHOU D Y. Carbon-containing fine particles are difficult to handle the recovery of gold in complex gold mines[J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(4): 48-55.

[4] 陈俊南，衷水平，翁威，等. 湿法提金技术进展及机理探讨[J]. 矿冶, 2025, 34(1): 1-11.
CHEN J N, ZHONG S P, WENG W, et al. Progress and mechanism of wet gold extraction[J]. Mining and Metallurgy, 2025, 34(1): 1-11.

[5] 尚鹤. 含砷锑金矿生物堆浸预氧化工艺调控及机理研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2024.
SHANG H. Regulation and mechanism of biological heap leaching pre-oxidation process of arsenic-containing antimony-containing gold mines[D]. Beijing: Beijing General Research Institute of Nonferrous Metals, 2024.

[6] HAN J, DAI S, DENG J, et al. Technology for aiding the cyanide leaching of gold ores[J]. Separations, 2024, 11(8): 228. DOI: 10.3390/SEPARATIONS11080228.

[7] KWON N, KIM M, OH S, et al. Electrochemical performance and behavior of nickel pig iron anodic electrolysis for enhanced sulfuric acid leaching[J]. Electrochemistry Communications, 2025, 177: 107937.

[8] LI S Y, ZHANG Y T, SHAO S L, et al. Strengthening valuable metal recovery from spent lithium-ion batteries by environmentally friendly reductive thermal treatment and electrochemical leaching[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2021, 9(20): 7053-7062.

[9] DIAZ L, CLARK A, LISTER G. Optimization of the

electrochemical extraction and recovery of metals from electronic waste using response surface methodology[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2017, 56(26): 7516-7524.

[10] TAMAYO A J, SÁNCHEZ R C, CALDERÓN A J. Effect of ammoniacal thiosulfate solution composition on the gold dissolution rate: an electrochemical study[J]. Electrochimica Acta, 2025, 510: 145359.

[11] GALLAGHER P N, HENDRIX L J, MILOSAVLJEVIĆ B E, et al. The affinity of carbon for gold complexes: dissolution of finely disseminated gold using a flow electrochemical cell[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2019, 166(9): 2546. DOI: 10.1149/1.2097465.

[12] LE G, LI W, SONG K, et al. Electrochemical dissolution behavior of gold and its main coexistent sulfide minerals in acid thiocyanate solutions[J]. Rare Metals, 2021, 41(1): 1-8.

[13] TANG J, YANG Z, ZI F, et al. New insights into the mechanism of pyrite oxidation in copper (Ⅱ)-ammonia-thiosulfate gold leaching system: an electrochemical, AFM, Raman spectroscopy and XPS investigation[J]. Applied Surface Science, 2024, 655: 159665.

[14] AGAPOVA C V, SHULAKOVA L A, MASLOV G V. Stimulation of chemical and electrochemical leaching of gold from rebellious minerals[J]. Journal of Mining Science, 2021, 56(5): 818-827.

[15] NIRONOV R K, IGONINA L S, ZYKOV A K. Electrochemical recovery of gold from concentrate by using sulfur-graphite electrode as the leaching agent source[J]. Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 2018, 53(3): 556-563.

[16] YANG W, DONG H, DENG S, et al. Electrochemical leaching behavior of tellurium in precious metal tellurides under alkaline systems[J]. JOM, 2025(Prepublish): 1-11. DOI: 10.1007/S11837-025-07418-8.

[17] WU Y H Z, ZHOU K G, WEI C, et al. Chromatographic separation and recovery of Zn (Ⅱ) and Cu (Ⅱ) from high-chlorine raffinate of germanium chlorination distillation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(4): 1336-1350.

[18] XIE H M, XIAO X Y, GUO Z H, et al. One-stage ultrasonic-assisted calcium chloride leaching of lead from zinc leaching residue[J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2022, 176: 108941.

[19] YANG Y, TU J, SHAN M, et al. Acoustic cavitation dynamics of bubble clusters near solid wall: a multiphase lattice Boltzmann approach[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2025, 114: 107261.

[20] RUČIGAJ A, CONNELL J G, DULAR M, et al. Influence of the ultrasound cavitation intensity on reduced graphene oxide functionalization[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 90: 106212.

[21] 卜祥宁. 超声辅助金属浸出动力学研究进展及展望[J]. 中国有色金属学报, 2025, 35(7): 2429-2444.
BU X N. Research progress and prospects of ultrasound-assisted metal leaching kinetics[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2025, 35(7): 2429-2444.

[22] 李齐. 超声波强化氰化浸出和活性炭吸附金的基础研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2023.
LI Q. Basic study on ultrasonic-enhanced cyanide leaching and gold adsorption by activated carbon[D]. Shenyang: Northeastern University, 2023.

[23] GUI Q H, FU L K, HU Y T, et al. Oxidative pretreatment of refractory gold ore using persulfate under ultrasound for efficient leaching of gold by a novel eco-friendly lixiviant: demonstration of the effect of particle size and economic benefits[J]. Hydrometallurgy, 2023, 221: 106227.

[24] YIN W, CAI L, MA Y, et al. Mechanism of ultrasonic cavitation to improve the effect of siderite on quartz flotation[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2023, 59: 165930.

[25] GUI Q H, WEI S X, ZHANG L B. The mechanism of ultrasound oxidation effect on the pyrite for refractory gold ore pretreatment[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2021, 14(4): 103123.

[26] AMBEDKAR B, NAGARAJAN R, JAYANTI S. Ultrasonic coal-wash for de-sulfurization[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(3): 718-726.

[27] BU X N, DANSTAN J K, HASSANZADEH A, et al. Metal extraction from ores and waste materials by ultrasound-assisted leaching-an overview[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2024, 45(1): 28-45.

[28] BAO S N, CHEN B J, ZHANG Y C, et al. A comprehensive review on the ultrasound-enhanced leaching recovery of valuable metals: applications, mechanisms and prospects[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 98: 106525.

[29] RAN J Y, LI Y, WANG X L, et al. Metal recovery from industrial solid waste by ultrasonic-assisted hydrometallurgical leaching: a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2024, 22(4): 2055-2090.

[30] KHAN M I, WANG S X, ULLAH E, et al. Enhanced metal recovery using ultrasound assisted leaching (UAL): an overview[J]. Journal of Molecular Liquids, 2024, 410: 125545.

[31] ARDIAN F, RUDIYANSAH, PUTRA I, et al. The effect of flotation and ultra fine grinding process on gold extraction percentage of Knelson concentrator's tailing[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2025, 1486(1): 012026.

[32] MUHAMMAD B, MAYUMI I, RIKU A, et al. Heterogenous carrier flotation technique for recovering finely ground chalcopyrite particles using coarse pyrite particles as a carrier[J]. Minerals Engineering, 2022, 180: 107530.

[33] ZHANG X, WEI H, HAN Y, et al. Effect of different mills on the fine grinding characteristics and leaching behaviour of gold ore[J]. Minerals Engineering, 2024, 215: 108800.

[34] 郭桂荣，童伟，李建康，等. 艾砂磨机在灵宝黄金某冶炼厂焙烧金矿细磨中的应用[J]. 矿冶工程, 2023, 43(6): 97-99.
GUO G R, TONG W, LI J K, et al. Application of mugwort mill in fine grinding of roasted gold ore in a smelter of Lingbao gold[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(6): 97-99.

[35] 陈艳波，李光胜，朱幸福. 某高硫微细粒金矿选冶试验研究[J]. 贵金属, 2023, 44(2): 75-80, 87.
CHEN Y B, LI G S, ZHU X F. Experimental study on beneficiation and smelting of a high-sulfur fine-grained gold mine[J]. Precious Metals, 2023, 44(2): 75-80, 87.

[36] SOARES S W, MAGALHÃES S D E, GOVENDER N. Enhancing particle breakage and energy utilization in ball mills: an integrated DEM and SPH approach[J]. Mining, 2025, 5(1): 18. DOI: 10.3390/MINING5010018.

[37] EID A M, QABATTY A, KUBAISI R, et al. Optimization of key operating parameters to enhance performance and energy efficiency of a hammer mill for corn grinding[J]. Discover Applied Sciences, 2025, 7(6): 639. DOI: 10.1007/S42452-025-07263-Z.

[38] BAAWUAH E, MENSAH A J, SKINNER W. Pushing the frontiers of ultrafine crushing and the impact on comminution energy and mineral liberation[J]. Minerals Engineering, 2025, 231: 109430.

[39] LING Q, ZHOU S, LI B, et al. Study on the chlorination leaching of gold and copper from high gold-containing material based on variable stirring speed[J]. JOM, 2025, 77(5): 3151-3166.

[40] ANTONIO L R, LUIS M, FAUSTO C, et al. Rheology and hydrodynamics of iron ore mineral pulps during a bioleaching process in a continuous stirred-tank reactor[J]. Chemical Engineering & Technology, 2023, 46(4): 670-680.

[41] WU B, SHANG H, WEN J, et al. Well-controlled stirring tank leaching to improve bio-oxidation efficiency of a high sulfur refractory gold concentrate[J]. Journal of Central South University: Science & Technology of Mining and Metallurgy, 2020, 27(3): 1416-1423.