超声波强化矿产资源开发及二次资源回收研究进展

毛振兴[1,2],王占昊[1,2],陈　波[1,2,3],包申旭[1,2,3]

(1.武汉理工大学 关键非金属矿产资源绿色利用教育部重点实验室,湖北 武汉　430070;
2.武汉理工大学 资源与环境工程学院,湖北 武汉　430070;
3.矿物资源加工与环境湖北省重点实验室,湖北 武汉　430070)

摘要:矿产资源和二次资源传统提取与加工工艺普遍存在反应速率慢、效率低、能耗高及环境污染等问题,难以满足绿色可持续发展的行业需求。超声波技术作为一种高效的物理场强化手段,凭借其独特的空化效应、机械效应与热效应等协同作用,在资源提取领域具有显著优势。本文系统综述了超声波技术在金属矿的浮选与浸出、非金属矿加工及二次资源回收方面的应用研究进展,重点梳理了其在辅助浮选、强化浸出等方面的应用成效与作用机制。最后,总结了当前超声波强化提取技术面临的瓶颈问题,并对未来研究方向进行展望,以期为超声波技术在矿产资源和二次资源综合利用领域的理论创新与工程应用提供一定参考与借鉴。

关键词:超声波;矿产资源;二次资源;浮选;浸出;强化

中图分类号:TF803.21　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1009-2617(2026)05-0626-11

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.05.002

矿产资源是现代社会发展的物质基石,随着高品位、易处理矿种的日益枯竭,矿产资源开发逐渐向低品位、复杂共伴生资源和二次资源回收方向转型。在此背景下,传统资源提取与加工技术流程冗长、回收率低、传质速率慢、毒性或强腐蚀性试剂依赖度高及能耗高的短板愈发凸显。这些弊端不仅造成资源浪费,更易引发严重的生态环境问题,是制约矿产资源行业绿色转型和升级的关键因素[1]。超声波技术作为一种高效、绿色、可控的物理场强化手段,因具有独特的多效应协同作用,成为了极具应用潜力的矿产资源强化提取技术。超声波通过向体系输入声能,诱发空化气泡的形成、生长与溃灭,进而产生局部高温高压、微射流、冲击波等物理效应,并结合体系的热效应与化学效应,实现矿物包裹结构的破坏、界面传质的强化、药剂的活化增效及矿物表面的改性等功能[2-3]。近年来,超声波技术在金属矿提取、非金属矿加工、二次资源回收等方面已得到广泛研究。当前的研究重点聚焦于绿色低碳工艺的参数优化、超声波作用机制的解析,目的是探索超声波技术在多类型矿产资源和二次资源处理过程中的适应性及其强化作用机制。

本文综述了超声波技术在矿产资源开发和二次资源回收领域中的研究进展,系统梳理了其在金属矿浮选和浸出、非金属矿加工,以及冶金固废、电子废弃物等二次资源回收中的关键研究成果。在此基础上,总结了当前超声波强化提取技术发展面临的主要瓶颈,并展望了未来研究方向及应用前景,以期为超声波技术在矿产资源和二次资源综合利用领域的理论研究与工程实践提供参考与借鉴。

1　超声波在矿产资源开发中的应用

超声波技术在矿产资源开发中的应用主要集中在金属矿的浮选与浸出及非金属矿的加工提纯等方面。通过改善浮选选择性、强化浸出动力学

收稿日期:2026-04-29;**修订日期**:2026-06-08

基金项目:国家自然科学基金(92575201);湖北省自然科学基金(2025AFB060);大学生创新创业训练计划项目(S202610497183);中央高校基本科研业务费专项资金(104972026RSCbs0106)。

第一作者简介:毛振兴(2005—),男,本科,主要研究方向为有色金属湿法冶金。

通信作者简介:包申旭(1979—),男,博士,教授,主要研究方向为战略矿产资源开发与固废资源化利用。E-mail:sxbao@whut.edu.cn。

或提升分选纯度促进有价金属的高效富集与提取，或提高非金属矿产品的品位与附加值。

1.1　金属矿的浮选

浮选是依据矿物表面可浮性差异，通过添加浮选药剂实现矿物分选的方法，是重要的选矿预富集技术。利用超声波对矿物表面或浮选药剂进行预处理，可解决传统浮选工艺中矿物表面氧化、细颗粒团聚、药剂吸附效率低等问题，从而提升精矿的品位与回收率。

超声波可脱除矿物表面不利于浮选分离的成分，从而优化浮选效果。如硫化矿颗粒发生严重氧化后，表面会形成稳定的亲水性氧化层，大幅降低矿物可浮性；脉石矿物在研磨过程中产生的微细粒矿泥吸附在目的矿物表面，同样会对浮选指标产生不利影响。针对上述问题，薛季玮等[4]采用超声波预处理严重氧化的黄铁矿，去除其表面氧化层，结果表明，黄铁矿回收率明显提高，在超声波功率为 100 W 条件下，黄铁矿回收率达 79.72%。贾煜坤等[5]采用 200 W 超声波对含 10%绿泥石的混合矿处理 1 min 后，正浮选体系精矿的铁回收率提升 3.89%，反浮选体系精矿的铁回收率提升 3.67%；扫描电镜结果表明，未经超声波处理的赤铁矿表面覆盖大量片状绿泥石颗粒，而处理后赤铁矿表面清洁，颗粒分散；此外，超声波处理后比表面积由 0.407 m^2/g 增至 0.712 m^2/g。上述现象表明超声波强化作用破坏了绿泥石在赤铁矿表面的吸附，并增大了混合矿的整体比表面积，以及药剂与矿物表面的接触概率，促进了药剂吸附。除脱除矿物颗粒表面的矿物杂质外，超声波还可用于脱除吸附于目的矿物表面的有机杂质。絮凝剂聚丙烯酰胺(PAM)会严重抑制辉钼矿浮选，祁梦瑶等[6]研究发现，超声空化产生的自由基及局部高温高压能有效断裂 PAM 长分子链，从而消除 PAM 对浮选的抑制，经 600 W 超声波处理 9 min 后，5 mg/L PAM 体系中辉钼矿浮选回收率可达 68.63%。对于硅酸盐矿物，超声波辅助碱性预处理有助于强化浮选效果，Guo W. J. 等[7]将超声波引入锂辉石的碱性预处理过程，发现经超声波预处理后，锂辉石浮选回收率达 88%，远高于机械搅拌预处理的 34.7%，其机制在于超声波增强了锂辉石的表面溶解，暴露了更多的表面铝位点供捕收剂吸附，从而显著提升了浮选性能。

超声波可通过空化气泡的破裂产生的振荡，促进浮选药剂的溶解和解离，增加溶液中关键组分离子浓度，从而有效提升药剂的利用效率及浮选效果。针对羟肟酸类捕收剂(OHA)溶解性差、解离度低的问题，王介良等[8]对 OHA 溶液进行超声波预处理，使其解离出更多活性 OHA^-，氟碳铈矿浮选结果表明，相较未经超声波处理的 OHA，超声波处理后浮选回收率提高 20.5%，活化 OHA 强化氟碳铈矿浮选的机制如图 1 所示。赵鑫等[9]研究了超声波预处理氧化钙溶液对黄铜矿浮选的影响，结果表明，适宜的超声波提高了氧化钙溶液中 Ca^{2+}、$Ca(OH)^+$ 等离子含量，减弱了脉石矿物对浮选药剂的消耗，铜回收率较未处理时提高了 9.48%。

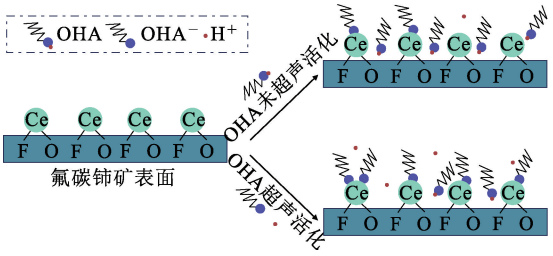


图 1　超声活化 OHA 强化氟碳铈矿浮选的机制[8]

Fig. 1　Mechanism of ultrasonic-activated OHA in enhancing bastnaesite flotation[8]

综上所述，超声波辅助浮选通过表面杂质脱除与药剂活化的作用机制，可有效改善矿物的可浮性，最终提升浮选指标，在金属矿选矿预富集领域具有良好的应用潜力。但需注意的是，过高功率的超声波可能对部分易碎矿物造成过粉碎，或使已抑制的脉石再活化，从而降低浮选选择性，实际应用中须优化超声波处理技术参数。

1.2　金属矿的浸出

湿法冶金是金属矿提取的重要方法之一，浸出工艺作为其核心工序，虽具有工艺成熟、适应性强等优势，但因大量使用强酸和添加剂，仍面临环境负荷大、设备腐蚀及成本较高等挑战。超声波强化浸出技术是通过空化效应、机械效应、热效应促进浸出剂溶出金属离子的过程。空化效应是超声波诱发空化气泡形成、生长与溃灭的核心机制[10]，气泡溃灭瞬间，在局部区域形成高温高压环境，有助于增强化学反应活性[11]；机械效应源于空化气泡溃灭产生的微射流、冲击波和声冲流，可破坏矿物包裹结构、增大固体颗粒碰撞频率、破

坏固体颗粒边界层，进而提高传质效率[12]；热效应则表现为超声波在介质中传播时，诱导颗粒间摩擦，将声能转化为热能，使介质局部与整体温度上升[13]。上述效应的综合作用，可在提升金属浸出率的同时，缩短浸出时间，减少药剂消耗量，从而降低生产成本和缓解环境污染。

基于上述原理，研究者优先将超声波技术引入到湿法提取工艺成熟的锌、铜等有色金属领域。在原生矿石或二次资源中，锌、铜常以硫化物、氧化物或共伴生等多种形式存在，赋存形态复杂，超声波可协同浸出剂促进有价金属的高效溶解。Zhang D. K. 等[14]建立超声波-臭氧氧化系统并用于处理黄铜矿，结果表明，铜浸出率从 21.67%升至 56.02%，浸出体系活化能从 38.72 kJ/mol 降至 15.32 kJ/mol。Liu Q. F.[15]在超声波场和加压场作用下，从复杂多金属次级硫化物精矿中浸出铜和锌，在氧分压 1.0 MPa、超声波功率 360 W、液固体积质量比 10 mL/1 g、木质素磺酸钠与原料质量比 0.2%及反应温度 180 ℃条件下，铜和锌浸出率分别达 99.88%和 99.68%，与非超声波条件相比，分别提高 9.09%和 3.02%。

相较于锌、铜等常见有色金属，稀散、稀有、稀贵及稀土等“四稀金属”因战略价值突出而受到高度关注，其提取与回收的意义日益凸显。目前，超声波强化浸出技术在这些金属资源的提取过程中也得到了广泛研究。在稀散金属方面，锗、铟等关键元素常伴生于锌、铅等冶金渣中，面临品位低、赋存状态复杂等问题。针对上述问题，Rao M. Y. 等[16]采用超声波从锗精矿中强化浸出锗，在最佳条件下，锗浸出率达 96.8%；与传统方法相比，浸出率提高 4.5%，浸出时间缩短至常规方法的 60%；超声波的空化与机械效应使锌精矿颗粒细化、固液接触面积增大，从而促进了锗的高效浸出。

在稀有金属方面，锂和钒的超声波强化浸出也已得到广泛研究。Zhang R. 等[17]利用超声波强化浸出锂云母精矿硫酸化焙烧渣，在最佳参数下，锂浸出率达 95.26%，浸出反应活化能从 15.89 kJ/mol降至 9.33 kJ/mol。Zhao S. X. 等[18]对锂辉石精矿碱性焙烧后的产物进行超声波强化浸出，锂浸出率达 99.9%，较常规浸出提高 27%。此外，Chen B. 等[19]进行了钒页岩的超声波强化酸浸提钒研究，利用超声波破碎含钒云母实现钒的高效提取，结果表明，在超声波功率 900 W 下浸出 30 min，钒浸出率可达 92.93%，而常规浸出 120 min 时，钒浸出率仅为 87.86%，浸出效果得到明显提升。

金、银、铂、钯等稀贵金属在原生矿石中含量低、化学惰性强，且常被脉石矿相包裹，给湿法提取带来巨大挑战[20]。以金的提取为例，传统提金工艺包括氰化法、硫脲法、硫代硫酸盐法等。其中，氰化法技术成熟、适用性广，但面临浸出效率低、试剂消耗量大、环境风险高等问题；非氰化法则存在药剂成本高、浸出动力学慢或稳定性较差等局限。因此，研究人员针对金的超声波强化浸出进行了广泛研究。如 Barbouchi 等[21]针对硫化物包裹型难处理金矿，提出基于过硫酸盐的超声波预氧化方法，反应在 40 kHz 超声波浴中进行，预处理后金的氰化浸出率达 86.4%，明显高于直接氰化法的 62.6%；在非氰化浸出过程中，Gui Q. H. 等[22]采用新型环保浸出剂“金蝉”浸金剂替代氰化物处理云南某地的金矿石，在超声波作用下，金浸出率从 42.21%显著提升至94.72%，浸出时间大幅缩短。

在稀土金属方面，马升峰等[23]针对现有碱法工艺中酸浸碱饼环节存在时间长、温度高、环境差、间歇性操作等问题，采用超声波强化酸浸过程。研究结果表明，超声强化手段在稀土浸出过程中具有明显促进作用，在初始液固体积质量比 1.3 mL/1 g、HCl 浓度 5 mol/L、超声波功率50 W、常温浸出 20 min 条件下，稀土浸出率达 93.89%；在室温条件下引入超声可以替代常规高温加热，缩短反应时间，降低反应能耗。李健飞等[24]研究了超声强化酸浸稀土，结果表明，在超声波功率 70 W、HCl 浓度 7 mol/L、酸浸时间50 min、温度 60 ℃条件下，稀土浸出率可达64.01%，比常规浸出提高 24.40%。

综上所述，超声波强化技术借助空化效应、机械效应和热效应等的协同强化，在金属矿浸出领域具有显著优势，目前已在锌、铜等有色金属和“四稀金属”的提取过程中得到广泛验证，相关工艺参数与浸出结果见表 1。该技术虽已在金属矿浸出领域得到广泛研究，但仍存在一些弊端，如超声波对反应器壁的强烈空蚀作用、高黏度矿浆中能量衰减等，是其实现工业化应用亟待解决的问题[25]。

表 1　不同金属矿的超声波强化浸出技术工艺参数和浸出率

Table 1　Process parameters and leaching rates of ultrasonic-enhanced leaching towards various metal ores

原料	目的金属	浸出体系	主要工艺参数	浸出率/%	文献
黄铜矿	铜	臭氧＋硫酸	300 W，40 ℃，300 min	56.02	[14]
二次硫化物精矿	铜	木质素磺酸钠	360 W，180 ℃，4 h	99.88	[15]
锗精矿	锗	盐酸＋次氯酸钠	13.33 W/cm³，60 ℃，30 min	96.80	[16]
锂云母精矿	锂	去离子水	180 W，55 ℃，60 min	95.26	[17]
锂辉石精矿	锂	硫酸	150 W，25 ℃，60 min	99.90	[18]
钒页岩	钒	硫酸	900 W，95 ℃，30 min	92.93	[19]
金矿石	金	过硫酸盐	40 kHz，80 ℃	86.40	[21]
金矿石	金	“金蝉”浸金剂	180 W，20 ℃，90 min	94.73	[22]
白云鄂博稀土矿	稀土	盐酸	50 W，25 ℃，20 min	93.89	[23]
高品位混合稀土精矿	稀土	盐酸	70 W，60 ℃，50 min	64.01	[24]

1.3　非金属矿的加工

超声波技术在高纯石英、煤炭、高岭土、磷灰石等非金属矿的浮选和化学浸出提纯中也得到了广泛研究，其应用有助于提升产品纯度与分选效果，降低加工成本。

1.3.1　非金属矿的浮选

非金属矿的超声波辅助浮选原理与金属矿基本一致，均通过超声波活化矿物表面、清洁矿泥覆盖层等作用方式，进而提升分选效率。Peng Y. L. 等[26]将超声波探头置于浮选槽的浆液区，对细粒褐煤进行超声波联合浮选，该操作可有效去除褐煤表面的细黏土矿物，并产生大量微泡，从而显著增强褐煤的可浮性。在石英浮选中，Yin W. Z. 等[27]在超声波功率 200 W 条件下预处理 0.5 min，之后进行浮选，石英回收率从38.79%提升至 58.38%；XPS 分析表明，超声波清洁了石英表面的铁质污染膜，使表面 Si—O—Si 结构暴露更充分，活性硅羟基（Si—OH）密度增加，为捕收剂提供了更多氢键作用位点。可见，超声波的机械效应通过清洁石英表面、增加其活性位点，从而提高了石英的可浮性。针对复杂矿物体系浮选选择性差的问题，超声波可通过选择性解吸部分药剂强化浮选。施佳等[28]研究了超声波预处理对水玻璃和油酸钠体系下方解石浮选行为的影响，结果表明，超声波空化促使方解石表面抑制剂水玻璃脱附，空出的吸附位点与捕收剂油酸钠作用，使方解石浮选回收率从 8.5%提升至 82.7%。在石英与菱镁矿浮选分离中，王营等[29]利用超声波破坏了菱镁矿与捕收剂十二胺的静电作用，同时促进了石英表面的药剂吸附，从而扩大了两者的可浮性差异。针对萤石与方解石这类性质接近矿物的分选，Yang Z. H. 等[30]利用超声波预处理选择性地解吸方解石表面的六偏磷酸钠抑制剂，而尽可能保留萤石表面的抑制剂，最终使两者的可浮性差异从 8%扩大至 60%，其操作流程如图 2 所示。

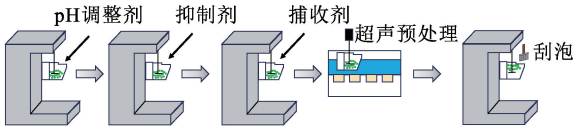


图 2　超声活化六偏磷酸钠对萤石与方解石可浮性的抑制流程[30]

Fig. 2　Inhibition process of fluorite and calcite floatability by ultrasonic activation of sodium hexametaphosphate[30]

1.3.2　非金属矿的化学浸出提纯

除浮选外，超声波在非金属矿的化学浸出提纯方面也具有显著优势。石英砂提纯的核心挑战之一是去除铁、钛、铝等金属杂质。针对传统酸浸法普遍存在时间长、效率低、耗酸量大等问题，李峰等[31]采用超声波辅助酸洗去除石英砂中的铁杂质，在酸洗时间 25 min、温度 45 ℃、液固体积质量比 10 mL/1 g、盐酸浓度 10%、超声波功率 270 W 条件下，铁去除率可达 97.84%。Jiao L. R. 等[32]将高温焙烧—水淬与超声波辅助混酸提纯相结合，其技术流程如图 3 所示，高温焙烧—水淬使石英内部产生大量微裂纹，暴露出包裹体和杂质，随后超声波作用将混合

酸液“泵入”这些微裂隙，将石英砂品位从99.77%提升至99.98%以上。

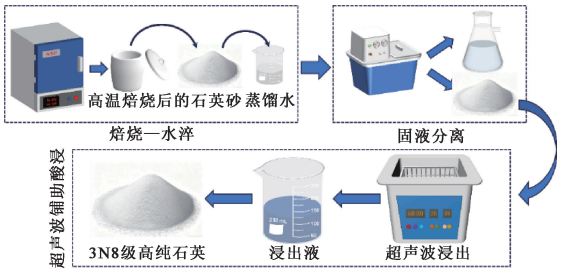


图 3 高纯石英砂的高温焙烧—水淬联合超声波辅助酸浸提纯工艺[32]

Fig. 3 High-temperature roasting—water quenching combined with ultrasonic enhanced acid leaching purification process of high purity quartz sand [32]

综上，超声波技术能够在浮选中实现表面活化与选择性解吸，强化浸出中的传质效率，在非金属矿深加工、降低药剂消耗和生产成本等方面具有一定优势。但非金属矿通常价值相对较低，因此如何平衡生产成本与经济效益，需重点序量。

2 超声波在二次资源回收中的应用

随着全球高品位原生矿产资源的日益枯竭，从二次资源中回收有价金属已成为缓解资源短缺、减轻环境负荷的重要途径。目前，超声波强化金属提取的研究已广泛覆盖冶金渣尘、电子废弃物及工业废弃物等典型二次资源。

2.1 冶金渣尘

冶金渣尘主要包括钢铁和有色冶金过程中产生的烟尘、炉渣、浸出渣、阳极泥等，这类二次资源中常富集锌、铜、铟、锗、银、稀土等有价金属。但上述金属通常以硫化物、铁酸盐等形式存在，且常被硅酸盐、铁氧化物等致密相包裹，常规浸出难以高效解离。引入超声波有助于打开矿物包裹体，显著提高金属浸出率。

含锌二次资源中，锌通常赋存于复杂难溶物相中，导致传统工艺回收率较低。针对上述问题，付光等[33]研究了在超声波作用下，以双氧水和硫酸作为浸出剂浸出高硅氧化锌烟尘，结果表明，超声波的引入有效避免了锌元素因硅胶吸附而形成共沉淀，在最佳条件下，锌浸出率可达98.16%，较常规工艺提高14.66%。Wan Y. Z. W. 等[34]研究了在超声波作用下，以硫酸-抗坏血酸浸出炼钢厂含锌粉尘中的锌。结果表明：在超声波功率600 W、抗坏血酸浓度0.08 mol/L、硫酸浓度2 mol/L、液固体积质量比7 mL/1 g、温度90 ℃条件下浸出30 min，锌浸出率可达98.96%；超声协同抗坏血酸的还原作用促进了铁酸锌的溶解；除锌外，超声波对于被铁酸锌包裹的银也具有剥离作用。Luo G. W. 等[35]研究了采用超声协同氯酸钠从锌浸出渣中浸出银，结果表明，超声波剥离了铁酸锌的包裹，促进银与氯酸钠溶液的反应，银浸出率达85.02%，比传统方法提高36.83%。对于稀散金属，Xin C. F. 等[36]采用超声波强化过硫酸钠氧化浸出锌冶炼烟尘中的铟和锗。研究结果表明：铟和锗浸出率分别达93.41%和93.50%；X射线光电子能谱分析显示，锌冶炼烟尘经超声波浸出后，其中硫化锌相对含量显著下降，证实了超声波协同氧化剂能够对硫化物进行深度氧化，进而促进烟尘中硫化锌晶格中铟、锗的释放。此外，超声波强化技术在含稀土冶金固废提取中也已取得显著进展。Lütke 等[37]从磷石膏中浸出稀土，在超声波振幅77%、脉冲93.6%条件下，磷石膏颗粒粒度显著减小，稀土元素浸出率达84%，较机械搅拌提高16%。Mubula Y. S. F. J. 等[38]采用超声波强化碱浸处理稀土熔盐电解渣，超声波通过破碎颗粒和产生活性氧物种，促进了稀土氟化物在NaOH溶液中的溶解，钕和镨浸出率分别达96.22%和95.21%。Bez Fontana 等[39]利用超声波强化硝酸浸出石油钻井岩屑中的稀土，在HNO_3浓度7 mol/L、超声波频率40 kHz、功率600 W、温度80 ℃、浸出时间60 min条件下，镧和铈浸出率均超过82%。

针对冶金渣尘的超声波浸出研究，已在动力学分析和回收率提升等方面取得了一定进展。但超声波在促进目标金属浸出的同时，尚难以有效抑制杂质金属的共溶，这给后续净化提纯带来了潜在困难。因此，多金属体系的选择性调控已成为复杂冶金渣尘的超声波强化回收过程的重要研究方向。

2.2 电子废弃物

随着电子信息产业的快速发展和产品更新换代加速，废弃电子产品已成为全球增长最快的固体废物之一。其中，废旧锂离子电池和废弃印刷电路板是两类最具代表性的电子废弃物，富含锂、钴、镍、铜、锡、金、银等多种高价值金属，其品位远超原生矿石，被誉为“城市矿山”。

针对废旧锂电池的回收，传统工艺依赖大量强酸、还原剂等以破坏钴酸锂、锰酸锂等正极材料的尖晶石结构，且通常需在高温下反应，存在成本高、潜在环境风险大等问题。因此，超声波强化浸出技术被应用于废旧锂离子电池回收，并在强化酸浸、绿色溶剂浸出及生物浸出等方面取得了显著效果。Jiang F. 等[40]将超声波强化浸出技术应用于废旧钴酸锂电池的回收。结果表明：在超声波作用下，锂和钴浸出率分别接近 98% 和 95%，而无超声波条件下，两者仅为 80% 左右；通过扫描电镜观测发现，超声波处理后，大多数颗粒尺寸从 10 μm 减小至 1 μm 以下，证明超声破坏了正极材料的表面结构，增大了固-液接触面积。Deng H. Y. 等[41]研究了超声波强化草酸浸出废旧锂离子电池的效果，结果表明，浸出速率和选择性均明显受超声波功率影响，在超声波功率120 W、草酸浓度 0.6 mol/L、液固体积质量比50 mL/1 g 条件下，锂浸出率达 98%。Yan S. X. 等[42]以乙酸和抗坏血酸的混合酸为浸出剂、甘蔗渣为还原剂，在超声波强化作用下，从废旧锂离子电池正极材料中浸出有价金属，锂、镍、钴、锰浸出率均超过 95%。值得关注的是，超声波可为绿色溶剂在浸出中的应用提供契机[43]，Ketegenov 等[44]采用聚乙二醇和硫脲组成的低共熔溶剂从废旧锂离子电池中回收锂和钴。研究结果表明：超声波有效强化了传质、提高了金属浸出率；在其他条件相同时，超声波的引入促使废旧钴酸锂电池正极材料中锂和钴浸出率从 22% 提升至 90% 左右。在生物浸出方面，Nazerian 等[45]利用氧化亚铁硫杆菌上清液结合间歇式超声波处理，将浸出时间从 24 h缩短至 12 h，钴、镍、锰、锂浸出率分别可达 19%、34%、50%、67%，较常规生物浸出过程分别提高 6%、9%、8%、10%。该研究展现了超声波与生物浸出协同作用的潜力。

废旧印刷电路板广泛存在于废旧手机、电脑等电子设备中，富含铜、锡等有色金属及金、银等贵金属，但组成复杂，回收难度较大。超声波的引入有助于实现废旧印刷电路板中有价金属的高效分离与回收。Jha 等[46]对废电路板研磨粉末进行超声波预处理，实现了纤维、树脂等有机成分与金属的分离，所得金属粉末中铜质量分数达 87%，有利于后续浸出。Li Y. 等[47]采用超声波强化枸橼酸-抗坏血酸体系浸出废旧印刷电路板，结果表明，超声波作用下，锡浸出率可达 89.03%，较常规浸出提高 15% 以上。Zhang J. 等[48]利用谷胱甘肽、双甘氨肽等小肽温和浸出废旧电路板中的铜，并通过超声波强化反应（装置与原理如图 4 所示），使铜浸出率提高 2.1～3.9 倍。针对废旧电路板研磨后，其中的金常被铜、锡等金属紧密包覆难以提取的问题，Liang Q. 等[49]首先采用硫酸-过氧化氢去除铜、锡，随后通过超声波强化硫脲浸出金，在优化条件下，铜浸出率超过 98%，锡浸出率高于 80%，金浸出率达 91.72%。Ren Z. Y. 等[50]通过超声波优先剥离废旧电路板上的金，并选择性浸出其他金属，获得富金残渣，后续再通过浸出和络合沉淀制备了高纯金纳米颗粒。

超声波处理电子废弃物的可行性已得到广泛验证，但复杂成分中有机毒性物质的控制及废水处理问题，仍亟需在研究层面予以重点关注。

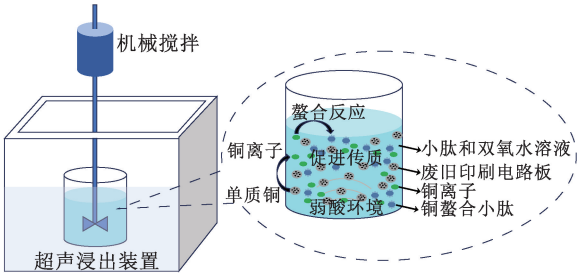


图 4　超声波增强小肽从废旧印刷电路板中回收铜的装置及原理[48]

Fig. 4　Device and principle of ultrasound-enhanced recovery of copper from waste printed circuit boards using small peptides[48]

2.3　工业废弃物

超声波强化浸出技术已应用于铝电解废阴极炭、废催化剂等工业废弃物的回收中。这类废弃物在富含有价金属的同时，还含有氟化物、氰化物或重金属等有害物质，因此被列入危废名录，兼具环境危害与资源回收的双重属性。

废阴极炭是铝电解过程中产生的固体废弃物，其主要成分包括石墨、氟化物、氰化物，以及嵌入其中的锂、铝等有价金属。废阴极炭中的氟、锂等元素常嵌布于碳基体孔隙中，超声波技术在处理这类结构致密、杂质赋存复杂的物料方面具有独特优势。Wang C. C. 等[51]在超声波辅助下，通过先洗涤后浸出工艺回收废阴极炭中的氟化物，氟浸出率达 82.99%；扫描电镜图像显示，超声波

处理后，大颗粒减少，F、Na、Al 等元素含量显著降低，证实空化效应产生的微射流促进了浸出剂的渗透，强化了浸出反应。Zhang H. 等[52]开发了超声波强化盐酸浸出工艺回收废阴极炭中的锂，在盐酸浓度 1 mol/L、温度 40 ℃、超声波功率 20 W、浸出时间 60 min 条件下，锂浸出率超过 95%。Tian J. L. 等[53]以氢氧化钠溶液为浸出剂，采用超声波强化浸出技术提取废阴极炭中的氟和锂，结果表明，超声波强化使氟化物浸出率提升 5.28%，锂浸出率提升 11%，浸出时间从 110 min缩短至 50 min。在废阴极炭的石墨提纯方面，Yuan J. 等[54]通过超声波强化碱浸与酸浸联合工艺，将废阴极炭的碳纯度提升至97.53%，并以此为碳源合成了碳化硅粉体，实现了废阴极炭的高值化利用。Chen X. W. 等[55]将超声波引入废阴极炭中石墨的浮选分离过程，经超声处理 30 min 后，石墨回收率从 86.22%提高至96.24%；X 射线光电子能谱显示，超声处理后亲水的 C—O 键占比提高，有助于增强石墨的可浮性。

废催化剂通常富含钌、铑、钯等贵金属，以及钒、钼、镍等重要有色金属中的一种或多种，因此具有极高的回收价值[56]。在催化剂浸出过程中进行超声波处理，有助于破坏颗粒的团聚体，剥离表面钝化层或包覆层，从而提高其中有价金属浸出率[57]。Wang J. J. 等[58]利用超声波强化硫酸和氯化钠浸出废催化剂中的钯，在超声波功率 200 W、液固体积质量比 5 mL/1 g、浸出时间 1 h、浸出温度 60 ℃、H_2SO_4浓度 60%，并添加0.1 mol NaCl 条件下，钯浸出率达 99%；分析 X 射线衍射图谱和扫描电镜图像可知，超声波打开了氧化铝包覆层，增大了钯金属与 H^+的接触面积，从而加快了浸出剂传质速率。Liu H. L. 等[59]利用超声波促进臭氧-盐酸浸出废催化剂中钯，在优化的超声波浸出条件下，钯浸出率达 93.7%，比传统条件下高 23.7%。Pathak 等[60]利用超声波强化次氮基三乙酸浸出废加氢催化剂，反应2 h内可浸出60.2%的钼、57.7%的钒和 42.3%的镍。除强化废催化剂中有价金属浸出外，超声波技术还可用于废催化剂回收前的预处理过程。Karim 等[61]探讨了超声波预处理对废催化剂中铂族金属生物浸出的影响。通过超声波和硝酸预先去除不利于生物浸出的锌、铜等杂质金属；扫描电镜能谱分析显示，超声波预处理后，催化剂表面形成了大量微裂纹；在超声波功率 80%、硝酸浓度 6 mol/L 条件下预处理 50 min，废催化剂中铂族金属的生物浸出回收率得到大幅提升。

超声波技术在不同类别二次资源回收中的工艺参数及金属浸出率见表 2。

表 2 超声波技术在不同类别二次资源回收中的工艺参数及金属浸出率

Table 2 Process parameters and metal leaching rate of ultrasonic technology in recovery of different types of secondary resources

原料	元素	浸出体系	主要工艺参数	浸出率/%	文献
氧化含锌烟尘	锌	双氧水＋硫酸	300 W，70 ℃，60 min	98.16	[33]
氧化含锌粉尘	锌	抗坏血酸＋硫酸	600 W，90 ℃，30 min	98.96	[34]
锌浸出渣	银	氯酸钠＋盐酸	220 W，70 ℃，90 min	85.02	[35]
锌冶炼烟尘	铟	过硫酸钠＋硫酸	600 W，80 ℃，40 min	93.41	[36]
磷石膏	稀土	油酸钠	200 W，40 ℃，20 min	84.00	[37]
稀土熔盐电解渣	稀土	氢氧化钠	1 440 W，70 min，130 min	96.22	[38]
油气钻屑	稀土	硝酸	600 W，80 ℃，60 min	82.00	[39]
废旧锂离子电池	锂	硫酸＋过氧化氢	360 W，30 ℃，30 min	98.62	[40]
废旧锂离子电池	锂	蔗渣＋乙酸＋抗坏血酸	450 W，50 ℃，40 min	98.00	[42]
废旧印刷电路板	锡	枸橼酸＋抗坏血酸	96 W，60 ℃，100 min	89.03	[47]
废旧印刷电路板	铜	硫酸＋过氧化氢	139 W，30 ℃，3 h	98.00	[49]
铝电解废阴极炭	氟	氢氧化钠-盐酸	480 W，70 ℃，60 min	82.99	[51]
铝电解废阴极炭	锂	盐酸	20 W，40 ℃，60 min	95.22	[52]
铝电解废阴极炭	碳	氢氧化钠-盐酸	碱浸(350 W，70 ℃，50 min) 酸浸(300 W，60 ℃，60 min)	97.53	[54]
废钯/氧化铝催化剂	钯	硫酸＋氯化钠	200 W，60 ℃，1 h	99.00	[58]
废加氢催化剂	钼	次氮基三乙酸	38 kHz，60 ℃，2 h	60.20	[60]
废石油催化剂	铂	荧光假单胞菌	300 W，100 min	38.00	[61]

超声波技术能在二次资源中有价金属的高效回收方面发挥重要作用。但不同类别二次资源原料组成复杂、性质多变，在实际应用中存在原料适配性的挑战，需根据物料特性进行针对性优化超声波工艺参数，才能充分发挥其强化效果。

3　结论与展望

在矿产资源日益贫化、环保要求日趋严格的背景下，超声波强化技术因具有绿色、高效、可控等优势，逐渐在金属矿浮选与浸出、非金属矿加工及二次资源回收中取得显著研究进展。在金属矿提取方面，超声波可有效改善金属矿的可浮性，提升精矿品位与回收率；此外，超声波还能提高金属矿中有价金属的浸出效率。在非金属矿加工方面，超声波通过表面活化和强化传质，在石英提纯、碳酸盐矿物分离等过程中展现出良好效果。在二次资源回收方面，超声波技术已在冶金渣尘、废旧锂离子电池、废弃印刷电路板、铝电解废阴极炭及废催化剂等资源回收中得到研究，实现了锂、钴、银、稀土等金属的高效浸出。超声波技术虽在上述领域已取得了一定成果，但仍面临多重挑战：在机制层面，现有研究多集中于工艺参数优化与动力学分析，尚未从多尺度表征角度深入揭示空化效应的微观作用原理；在工程层面，超声波反应器从实验室规模向工业放大过程中，存在声场分布不均、换能器寿命短，以及设备受空蚀损伤等问题，有待进一步解决；此外，在物料层面，如何针对不同类型的矿产资源和二次资源进行适应性工艺调整，平衡成本与效益，仍需深入探讨。

展望未来，超声波技术有望在矿产资源综合利用领域实现从实验室研究到工业应用的关键跨越，为行业的绿色低碳转型提供坚实的技术支撑。为实现该目标，建议今后的研究与开发聚焦于以下几个方向：

1）综合运用先进表征手段与多尺度数值模拟，建立超声波参数与提取效率之间的定量预测模型，深度解析超声波空化效应强化资源提取的反应机制；

2）针对工业场景设计连续式超声波反应器，结合在线监测与人工智能算法，实现超声波参数的动态优化调控；

3）对不同超声波工艺进行技术经济分析和生命周期评估，明确技术的适用边界与经济效益。

参考文献：

[1] Jia Lipan，Huang Jiangjiang，Ma Zelong，et al. Research and development trends of hydrometallurgy：an overview based on hydrometallurgy literature from 1975 to 2019[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China，2020，30(11)：3147-3160.

[2] 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 Xiangning. Review of advances and perspectives in ultrasound-assisted metal leaching kinetics[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2025，35(7)：2429-2444.

[3] Chen Yuran，Truong V N T，Bu Xiangning，et al. A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation[J]. Ultrasonics Sonochemistry，2020，60：104739.

[4] 薛季玮，刘童，刘启鸿，等. 草酸/超声预处理对氧化黄铁矿浮选的影响[J]. 矿产保护与利用，2024，44(5)：84-92.
Xue Jiwei，Liu Tong，Liu Qihong，et al. Effect of oxalic acid/ultrasonic pretreatment on the flotation of oxidized pyrite[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2024，44(5)：84-92.

[5] 贾煜坤，姚金，印万忠，等. 超声波调控赤铁矿与绿泥石浮选交互影响研究[J]. 金属矿山，2025(9)：107-113.
Jia Yukun，Yao Jin，Yin Wanzhong，et al. Ultrasonic regulation of the interaction mechanism between hematite and chlorite during flotation[J]. Metal Mines，2025(9)：107-113.

[6] 祁梦瑶，沙津汀，罗振恺，等. 超声波处理聚丙烯酰胺对辉钼矿浮选的影响及机理研究[J]. 矿产保护与利用，2025，45(2)：93-101.
Qi Mengyao，Sha Jinting，Luo Zhenkai，et al. Effect and mechanism of ultrasonic treatment of polyacrylamide on molybdenite flotation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2025，45(2)：93-101.

[7] Guo Wenjun，Fang Jinmin，Liu Min，et al. Ultrasound-assisted alkali pretreatment enhances the flotation of spodumene[J]. Colloids and Surfaces：A，2025，716：136685.

[8] 王介良，任浩东，赵增武，等. 辛基羟肟酸超声活化及其强化氟碳铈矿浮选机制研究[J]. 金属矿山，2025(4)：141-147.
Wang Jieliang，Ren Haodong，Zhao Zengwu，et al. Study on ultrasonic activation of octyl hydroxamic acid and its mechanism of strengthening bastnaesite flotation[J]. Metal Mines，2025(4)：141-147.

[9] 赵鑫，彭祥玉，王宇斌，等. 超声波预处理氧化钙对改善黄铜矿浮选效果的机理分析[J]. 矿产保护与利用，2023，43(2)：87-92.
Zhao Xin，Peng Xiangyu，Wang Yubin，et al. Mechanism analysis of ultrasonic pretreatment of calcium oxide to improve chalcopyrite flotation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2023，43(2)：87-92.

[10] Xin Chunfu，Bao Shenxu，Zhang Yimin，et al. Mechanism

of ultrasound-enhanced alkaline selective leaching of zinc from steel waste: experimental and DFT simulation analysis[J]. Green Chemistry, 2025, 27(27): 8188-8202.

[11] Wang Long, Sun Yuan, Wang Shiyang, et al. Leaching mechanism of strategic metals from superalloy scrap under ultrasonic cavitation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(1): 304-314.

[12] Adamou P, Harkou E, Villa A, et al. Ultrasonic reactor set-ups and applications: a review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 107: 106925.

[13] Cogen C, Labouret S, Peczalski R, et al. Theoretical model of ice nucleation induced by acoustic cavitation: Part 1 pressure and temperature profiles around a single bubble [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 29: 447-454.

[14] Zhang Dekun, Fu Likang, Liu Hongliang, et al. High-efficiency leaching of chalcopyrite by ozone with ultrasonic promotion: kinetics and mechanism[J]. Journal of Molecular Liquids, 2024, 401: 124682.

[15] Liu Qingfeng, Liao Yalong, Wu Min, et al. Acid-free ultrasonic-enhanced hydrothermal leaching of copper and zinc from polymetallic sulfide secondary concentrates[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 378(2): 134701.

[16] Rao Mingyuan, Xia Hongying, Xu Yingjie, et al. Study on ultrasonic assisted intensive leaching of germanium from germanium concentrate using HCl/NaOCl[J]. Hydrometallurgy, 2024, 230: 106385.

[17] Zhang Run, Jiang Mingqing, Fu Likang, et al. Ultrasonic-enhanced leaching of lithium from sulfate-roasted slag of lepidolite concentrate: kinetics and mechanism[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2025, 11(2): 1625-1636.

[18] Zhao Shengxuan, Zhu Enpei, Luo Chao, et al. Ultrasonic-enhanced complete lithium extraction from alkaline roasting slag of spodumene: kinetics and mechanism[J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2026, 221: 110699.

[19] Chen Bo, Bao Shenxu, Zhang Yimin, et al. A high-efficiency and sustainable leaching process of vanadium from shale in sulfuric acid systems enhanced by ultrasound[J]. Separation & Purification Technology, 2020, 240: 116624.

[20] Zhang Lei, Liu Zuowei, Guo Xueyi, et al. A systematic review of gold extraction: fundamentals, advancements, and challenges toward alternative lixiviants[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 440: 129778.

[21] Barbiuchi A, Ayadi S, Idouhli R, et al. Highly efficient pretreatment for refractory gold ores using persulfate, catalyst and free radical based advanced oxidation processes to improve cyanidation[J]. Hydrometallurgy, 2025, 235: 106488.

[22] Gui Qihao, Fu Likang, Hu Yuting, et al. Gold extraction using alternatives to cyanide: ultrasonic reinforcement and its leaching kinetics [J]. Minerals Engineering, 2023, 191: 107939.

[23] 马升峰，许延辉，王荣，等. 白云鄂博稀土矿的超声波强化浸出工艺研究[J]. 中国稀土学报，2019，37(1)：49-56.
Ma Shengfeng, Xu Yanhui, Wang Rong, et al. Technique of enhanced leaching of bayan obo ore by ultrasonic technology[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2019, 37(1): 49-56.

[24] 李健飞，李梅，高凯，等. 超声波强化浸出高品位混合稀土精矿[J]. 稀有金属，2017，41(2)：196-202.
Li Jianfei, Li Mei, Gao Kai, et al. Enhanced leaching process of high-grade mixed rare earth concentrate with ultrasonic technology[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2017, 41(2): 196-202.

[25] 崔艳雨，李瑶治，丁清苗，等. ZL101 铸铝合金在不同振幅下的超声空蚀行为[J]. 腐蚀与防护，2024，45(6)：29-35.
Cui Yanyu, Li Yaozhi, Ding Qingmiao, et al. Ultrasonic cavitation behavior of ZL101 cast aluminum alloy at different amplitudes [J]. Corrosion and Protection, 2024, 45(6): 29-35.

[26] Peng Yaoli, Mao Yuqiang, Xia Wencheng, et al. Ultrasonic flotation cleaning of high-ash lignite and its mechanism [J]. Fuel, 2018, 220: 558-566.

[27] Yin Wanzhong, Cai Lizheng, Ma Yingqiang, et al. Mechanism of ultrasonic cavitation to improve the effect of siderite on quartz flotation[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2023, 59(2): 165930.

[28] 施佳，崔瑞，宁江峰，等. 超声空化作用对方解石浮选行为的影响研究[J]. 金属矿山，2022(2)：120-125.
Shi Jia, Cui Rui, Ning Jiangfeng, et al. Effect of ultrasonic cavitation on flotation behavior of calcite[J]. Metal Mine, 2022(2): 120-125.

[29] 王营，印万忠，任森，等. 超声波强化菱镁矿与石英浮选分离及其机理研究[J]. 金属矿山，2023(12)：86-92.
Wang Yin, Yin Wanzhong, Ren Sen, et al. Study on ultrasonic enhanced flotation separation of magnesite and quartz and its mechanism[J]. Metal Mine, 2023(12): 86-92.

[30] Yang Zhehui, Li Maolin, Lin Yingxin, et al. Floatability of fluorite and calcite inhibited by sodium hexametaphosphate via ultrasonic activation[J]. Minerals, 2023, 13(12): 1504.

[31] 李峰，陈飞鹏，乔成芳，等. 超声辅助酸洗去除洛南石英砂中铁杂质[J]. 当代化工，2025，54(11)：2575-2578.
Li Feng, Chen Feipeng, Qiao Chengfang, et al. Removal of iron impurities from Luonan quartz sand by ultrasonic-assisted acid leaching[J]. Contemporary Chemical Industry, 2025, 54 (11): 2575-2578.

[32] Jiao Liran, Huang, Zhang Yingshuang, et al. Preparation of high-purity quartz by roasting-water quenching and ultrasound-assisted acid leaching process[J]. Minerals, 2025, 15(10): 1028.

[33] 付光，韦洁，陆占清，等. 超声协同氧化剂浸出高硅低锗氧化锌烟尘研究[J]. 有色金属(冶炼部分)，2025(2)：116-124.

Fu Guang，Wei Jie，Lu Zhanqing，et al. Study on leaching of zinc oxide dust with high silicon and low germanium by ultrasonic coordination with oxidant[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)，2025(2)：116-124.

[34] Wan Yangzhiwei，Xin Chunfu，Ding Wei，et al. Kinetics and mechanism of ultrasonic-enhanced mixed acid leaching of zinc from zinc-bearing dust[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering，2024，12(5)：113246.

[35] Luo Guowei，Chen Yufeng，Zhu Rong，et al. Mechanism and leaching kinetics of silver recovery from zinc leaching residues by ultrasonic synergism with sodium chlorate[J]. Applied Surface Science，2025，713：164524.

[36] Xin Chunfu，Bao Shenxu，Zhang Yiming，et al. Ultrasonic-persulfate synergetic unlocking the efficient extraction of targeted Zn，In，and Ge in zinc slag：from experimental evaluation to DFT study[J]. ACS Sustainable Chemistry and Engineering，2025，13(28)：10993-11008.

[37] Lütke S F，Pinto D，Brudi L C，et al. Ultrasound-assisted leaching of rare earth elements from phosphogypsum[J]. Chemical Engineering and Processing：Process Intensification，2023，191：109458.

[38] Mubula Yusufujiang，Yu Mingming，Yan Huashan，et al. Recovery of rare earths from rare earth molten salt electrolytic slag using atmospheric pressure alkaline leaching enhanced by ultrasonic[J]. Minerals Engineering，2026，235(1)：109802.

[39] Bez Fontana K，Chaves E S，Gonçalves C，et al. Sustainable ultrasound-assisted extraction and recovery of rare earth elements from oil and gas drill cuttings[J]. ACS Omega，2026，11(4)：6412-6420.

[40] Jiang Feng，Chen Yuqian，Ju Shaohua，et al. Ultrasound-assisted leaching of cobalt and lithium from spent lithium-ion batteries[J]. Ultrasonics Sonochemistry，2018，48：88-95.

[41] Deng Haoyuan，Hong Ruizhi，Wang Ben，et al. Ultrasonic enhanced preferential leaching process of Li from waste lithium-ion batteries using oxalic acid focused on optimization and mechanism[J]. Separation and Purification Technology，2025，364(1)：132327.

[42] Yan Shuxuan，Sun Conghao，Gao Ruichuan，et al. Ultrasonic-assisted leaching of valuable metals from spent lithium-ion batteries using organic additives[J]. Separation & Purification Technology，2021，257：117930.

[43] Jacobson B，Li Shida，Rivera R M，et al. A mechanistic study identifying improved technology critical metal delamination from printed circuit boards at lower power sonications in a deep eutectic solvent[J]. Ultrasonics Sonochemistry，2023，101：106701.

[44] Ketegenov T，Kamunur K，Mussapyrova L，et al. Enhanced recovery of lithium and cobalt from spent lithium-ion batteries using ultrasound-assisted deep eutectic solvent leaching[J]. Metals，2024，14(9)：1052.

[45] Nazerian M，Bahaloo-Horeh N，Mousavi S M. Enhanced bioleaching of valuable metals from spent lithium-ion batteries using ultrasonic treatment[J]. Korean Journal of Chemical Engineering，2023，40(3)：584-593.

[46] Jha R，Rao M D，Singh K K. Copper leaching from ultrasonically treated milled waste printed circuit boards：investigation of parameters optimization and kinetics[J]. Environmental science and pollution research international，2024，31(39)：51401-51414.

[47] Li Yi，Zhang Mingrui，Guo Junwei，et al. An efficient method for tin recovery in waste printed circuit boards：ultrasonic coupled composite organic acid system[J]. Separation and Purification Technology，2025，363(3)：132146.

[48] Zhang Jie，Zhang Xuemei，Wang Ruiqi，et al. Copper recovery from waste printed circuit boards with small peptides enhanced by ultrasound[J]. Separation and Purification Technology，2023，315：123680.

[49] Liang Qian，Wei Yifan，Hu Ling，et al. Gold leaching from waste electronic components using ultrasonic-assisted thiourea[J]. Environmental Technology & Innovation，2025，40：104656.

[50] Ren Zhiyuan，Zhai Mengyu，Guo Feng，et al. Upcycling electronic waste into ultrasmall Au nanoparticles via integrating ultrasound-assisted Au stripping with tetraoctylammonium bromide-mediated phase-separation for CO_2 electroreduction[J]. Chemical Engineering Journal，2026，528：172117.

[51] Wang Chenchen，Mao Song，Li Longjiang. Study on ultrasonic leaching and recovery of fluoride from spent cathode carbon of aluminum electrolysis[J]. RSC Advances，2023，13(24)：16300-16310.

[52] Zhang Heng，Hu Shuxuan，Li Shiwei，et al. Recovery of lithium from spent cathode carbon from aluminium electrolysis based on ultrasound-assisted acid leaching[J]. Canadian Metallurgical Quarterly，2026，65(3)：3303-3320.

[53] Tian Jielin，Chen Bensong，Xia Hongying，et al. Ultrasound-assisted enhanced leaching of lithium and fluoride compounds from waste cathode carbon：comprehensive recovery and leaching mechanism[J]. Separation and Purification Technology，2025，354(7)：129190.

[54] Yuan Jie，Xiao Jin，Li Fachuang，et al. Co-treatment of spent cathode carbon in caustic and acid leaching process under ultrasonic assisted for preparation of SiC[J]. Ultrasonics Sonochemistry，2018，41(1)：608-618.

[55] Chen Xiaowei，Chen Zhengjie，Zhang Yonghang，et al. Study on the recovery of graphite from spent carbon cathode via ultrasound-assisted foam flotation[J]. Journal of Cleaner Production，2024：141149.

[56] Wen Jiawei，Wang Xuxeli，Yu Fengshan，et al. Recovery and value-added utilization of critical metals from spent catalysts for new energy industry[J]. Journal of Cleaner Production，2023，419：138295.

[57] Iodis V A. Activation, regeneration and recycling of spent catalyst using ultrasonic impact[J]. Mine Surveying and Subsurface Use, 2025, 25(3): 61-65.

[58] Wang Jinjiao, Zhu Xiaoping, Fan Jiale, et al. Improved palladium extraction from spent catalyst using ultrasound-assisted leaching and sulfuric acid-sodium chloride system [J]. Separations, 2023, 10(6): 355.

[59] Liu Hongliang, Dong Haigang, Fu Likang, et al. Highly selective separation of palladium from spent catalysts by ozonation with ultrasonic enhancement in a low-acid medium[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 467: 143493.

[60] Pathak A, Al-Sheeha H, Al-Sairafi S, et al. Ultrasonic-assisted leaching of metals from refinery waste catalysts using nitrilotriacetic acid as a leaching agent[J]. The Journal of Solid Waste Technology and Management, 2025, 51(1): 25-33.

[61] Karim S, Ting Y P. Ultrasound-assisted nitric acid pretreatment for enhanced biorecovery of platinum group metals from spent automotive catalyst [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 255: 120199.

Research Progress on Ultrasonic Intensification of Mineral Resource Development and Secondary Resource Recovery

MAO Zhenxing[1,2], WANG Zhanhao[1,2], CHEN Bo[1,2,3], BAO Shenxu[1,2,3]

(1. *Key Laboratory of Green Utilization of Critical Non-metallic Mineral Resources, Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan* 430070, *China*;
2. *School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan* 430070, *China*;
3. *Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment, Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: Conventional processes for extracting and processing both mineral resources and secondary resources are generally plagued by slow reaction rates, low efficiency, high energy consumption, and environmental pollution, making it difficult to meet the industrial demands of green and sustainable development. As an efficient physical field intensification method, ultrasonic technology has demonstrated significant advantages in the field of resource extraction, leveraging the synergistic effects of its unique cavitation, mechanical, and thermal effects. The research progress of ultrasonic technology in the flotation and leaching of metallic ores, the processing of non-metallic ores, and the recycling of secondary resources is systematically reviewed, and the effectiveness and mechanisms of its application in flotation and leaching processes are systematically summarized. Finally, the current bottlenecks of ultrasound-assisted extraction technology are summarized, and future research directions are proposed. This review aims to provide references for theoretical innovation and engineering application of ultrasonic technology in the comprehensive utilization of mineral resources and secondary resources.

Key words: ultrasound; mineral resources; secondary resources; flotation; leaching; intensification