

## Application of ultrasonic intensification in hydrometallurgy leaching process

Jiewen YAN, De'an PAN, Bin LI\*

College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

**Abstract:** In recent years, with the continuous scarcity of primary mineral resources, the decline in mineral levels, and the increase in secondary resources, how to efficiently recover precious metals from raw materials such as primary ore, concentrates or secondary resources is both an environmental issue and an economic issue that needs to be resolved. Hydrometallurgy, as a method of efficiently recovering metals, is leaching raw materials in acidic or alkaline solutions, transferring the metals to the solution in the form of ions, and then using extraction, solid-liquid separation and other means to recover the metals. Among them, leaching, as an important process in hydrometallurgy, has the advantages of high comprehensive recovery rate of valuable metals, higher recovery rate of low-grade ore than pyrometallurgy, and low operation difficulty. It has been widely used in metallurgy. At the same time, the leaching process has the disadvantages of high requirements on the concentration of the leaching solution, long reaction time, and slow reaction rate. To overcome the above disadvantages, it is an effective way to improve the existing metal hydrometallurgical process through various assisted leaching technologies. Among them, by adding ultrasonic to the external field, using ultrasonic cavitation mechanical effects and thermal effects to strengthen the reaction process together, it has the characteristics of improving the solid surface structure, uniform leachate system, and optimizing the reaction history. Compared with the traditional leaching process, the leaching time can be shortened, the leaching rate can be increased, and the amount of reagents can be reduced. The entire leaching process can be performed at room temperature, which greatly reduces the energy consumption. This work summarized the ultrasonic cavitation and its mechanism in the leaching process, highlighted the characteristics and advantages of the ultrasonic enhanced leaching process, put forward the limitations of ultrasonic itself, and prospected its future development in this field.

### Key learning points:

- (1) The mechanism of ultrasonic cavitation and its leaching process was analyzed.
- (2) The characteristics and advantages of ultrasonic enhanced leaching process were mainly introduced.
- (3) The limitations of ultrasonic and its future development trend in this field were proposed.

**Key words:** ultrasonic intensification; leaching; cavitation; hydrometallurgy

收稿: 2019-12-03, 修回: 2020-02-17, 网络发表: 2020-02-27, Received: 2019-12-03, Revised: 2020-02-17, Published online: 2020-02-27

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(编号: 2019B110209001); 北京市自然科学基金资助项目(编号: 2174065)

作者简介: 焉杰文(1995-), 男, 北京市人, 硕士研究生, 材料科学与工程专业, E-mail: yanjiewen@emails.bjut.edu.cn; 李彬, 通讯联系人, E-mail: thlibin@sina.com.

**引用格式:** 焉杰文, 潘德安, 李彬. 超声强化在湿法浸出过程中的应用. 过程工程学报, 2020, 20(11): 1241-1247.

Yan J W, Pan D A, Li B. Application of ultrasonic intensification in hydrometallurgy leaching process (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(11): 1241-1247, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219357.

# 超声强化在湿法浸出过程中的应用

焉杰文, 潘德安, 李彬\*

北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124

**摘要:** 湿法浸出作为湿法冶金的重要过程, 具有金属回收率高、操作难度低、能耗低等优点, 但同时也存在对浸出液浓度要求高、反应时间长、反应速率慢等缺点。因此, 通过多种辅助浸出技术强化现有湿法浸出过程是一种有效途径。其中, 通过外场加入超声的方式, 利用超声的空化作用强化浸出反应过程, 可大幅提升浸出反应速率、缩短反应时间, 超声强化已在湿法浸出过程中取得一定的研究成果和实际应用。本工作综述了超声空化作用及其在湿法浸出过程中的机理, 重点介绍了超声强化浸出工艺特点及其优势, 指出了超声自身的局限性, 并对其未来在本领域的发展进行了展望。

**要 点:**

- (1) 分析了超声空化及其在浸出过程的机理。
- (2) 重点介绍了超声强化浸出工艺特点及其优势。
- (3) 指出了超声自身的局限性及其未来在本领域发展趋势。

**关键词:** 超声强化; 浸出; 空化作用; 湿法冶金

中图分类号: TF111.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2020)11-1241-07

## 1 前言

湿法冶金是将原生矿石、精矿或二次资源等在酸性或碱性溶液中浸出, 将金属以离子形式转移至溶液中, 再运用化学萃取、离子交换及固液分离等手段对浸出液中金属离子进行分离富集, 以金属或合金形式回收<sup>[1,2]</sup>。湿法浸出作为湿法冶金中最重要的一环, 具有有价金属综合回收率高、低品位矿石比火法冶金回收率高、操作温度低、金属直接提取等优点, 在冶金领域得到广泛应用<sup>[3,4]</sup>。然而, 湿法冶金也存在浸出过程中所用浸出液浓度高、反应时间较长、反应速率较慢等缺点。随着现代技术的不断发展和学科间的交叉融合, 外场强化冶金技术逐渐出现在湿法浸出领域, 外场作用强化浸出过程可弥补湿法冶金过程中的不足<sup>[5,6]</sup>。

超声具有空化机械效应及热效应, 近年来不断被应用到湿法浸出领域, 通过在湿法过程中辅助超声条件, 使浸出过程时间更短、浸出率更高、试剂用量更少<sup>[7,8]</sup>。近年来, 研究人员开展了超声辅助湿法过程浸出机理与控制条件的研究, 建立了相应的动力学方程与控制机制, 在金属元素湿法浸出分离过程中取得了一定的研究成果和实际应用<sup>[9-11]</sup>。

目前, 对于超声技术的实际运用已有较深刻的认识, 在超声空化影响因素及参数数值上也有较深入的分析, 特别是在超声空化作用机理及其在湿法浸出过程中

的应用。本工作分析了超声空化及其在浸出过程中的机理, 重点介绍了超声强化浸出工艺的特点及优势, 指出了超声自身的局限性, 为未来本领域研究提供参考。

## 2 超声空化作用机理及在湿法浸出过程中的应用

空化现象是由于涡流或超声波等物理效应在液体中局部形成负压区, 从而导致液体或固液界面破裂, 形成微小的空化气泡。这些在液体中产生的空化气泡处于不稳定状态, 伴随着气泡逐渐从小变大直至随时间崩溃的过程, 该现象称为超声空化<sup>[12]</sup>。如图1所示, 超声作用于液体中时, 空化气泡在声波的作用下震动, 超声场被分为拉伸相和压缩相, 即疏部与密部。空化气泡在疏部被拉伸生长, 密部被压缩闭合, 经过数周期后, 当空化气泡半径与声波频率对应的共振半径相等时, 气泡剧烈爆破, 局部产生高温高压环境。

超声空化现象的产生常伴随着机械效应和热效应, 其特性具有突出的应用价值, 可用于清洁、切割、粉碎物体, 改善材料的表面性能、过程强化、辅助浸出等过程。在浸出过程中引入超声加以辅助, 相较于传统浸出过程, 超声空化作用可促进浸出过程, 使反应时间更短、浸出率更高、反应速度更快、试剂用量更少<sup>[13-17]</sup>。其优势主要源于超声空化作用的机械效应和热效应。

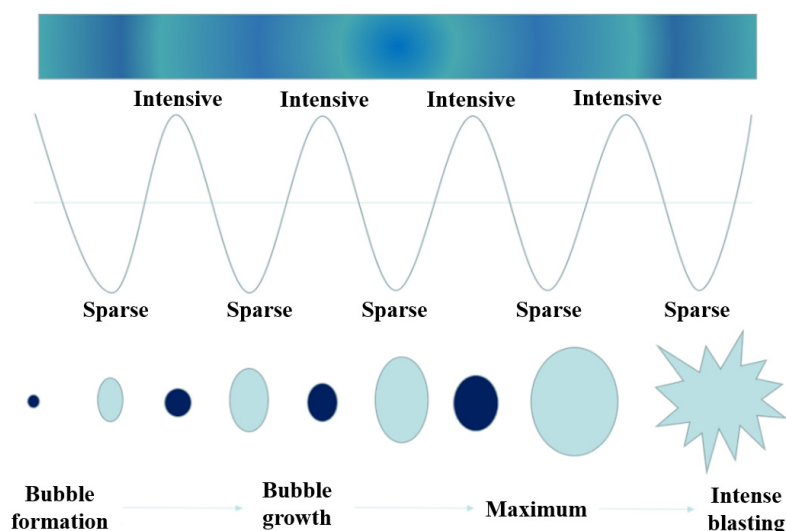


图 1 超声空化过程示意图

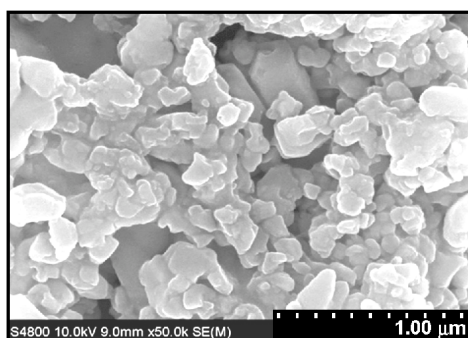
Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic cavitation process

机械效应是超声空化的主要效应,也是最基本的效应。超声波在溶液中传播时,一方面,它可使溶液中的声波传播衰减;另一方面,空化气泡的震动和闭合使颗粒交替压缩和膨胀而形成压力变化,在溶液中形成机械作用<sup>[18]</sup>。在超声波产生的强大压力变化下,溶剂发生强烈震动,有助于降低溶质扩散阻力并提高传质效率。超声波的机械效应可促进液体乳化、凝胶液化和固体分散。

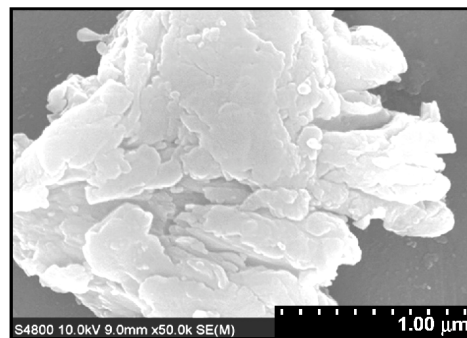
热效应是超声空化作用的另一个关键效应。超声波作用于介质,引起颗粒震动,介质内部发生摩擦,声能被介质吸收并转化为热能,超声空化产生的强微射流形成局部高温。介质吸收能量转换产生的热量和超声空化产生的局部高温称为超声空化热效应<sup>[19]</sup>。

Yang 等<sup>[20]</sup>研究对比了超声辅助条件与常规浸出条件下白钨矿的浸出效果,结果发现超声强化浸出钨的优势体现在对产物层的剥离与消除。Chang 等<sup>[21]</sup>研究了用酸性硫脲从烧结粉尘中浸出银,对比超声强化与常规浸

出的效果,发现在超声强化条件下,微射流破坏了包裹在铅、铁化合物中的银,增加了粉尘渣中微孔数量与尺寸、削弱了边界层、提高了传质反应速率,银的浸出率较常规条件提高 6%。Xiao 等<sup>[22]</sup>在研究中发现,超声辅助浸出法效果优于传统浸出法,且反应时间短,其原因主要为超声机械效应使溶液剧烈震动,空化气泡在破裂时产生瞬时高温高压,在剧烈搅拌和局部高温下,固体反应物发生崩裂,导致溶液中分散度增加,其效果是机械搅拌难以实现的。Li 等<sup>[23]</sup>在研究中发现,在负压阶段,超声空化作用产生大量气泡;在正压阶段,气泡在绝热压缩过程中被压破,气泡破碎时释放出大量能量;在超声辅助处理后浸出渣粒径明显减小。超声不仅促进了对流运动,增加了固液接触面积,加快了浸出率,且提供了大量能量,热效应可使浸出反应在低温、短时间条件下进行。张琛等<sup>[24]</sup>在超声强化废 SCR 催化剂浸出钒和钨的研究中发现,超声强化浸出前焙烧产物成不规则形状且颗粒间熔融相连,如图 2(a)所示;超声强化浸出后,



(a) Roasted product



(b) Leached residue

图 2 焙烧产物和浸出渣的 SEM 图<sup>[24]</sup>Fig.2 SEM images of roasted product and leached residue<sup>[24]</sup>

浸出渣颗粒表面光滑, 其表面的可溶性盐进入浸出液, 如图 2(b)所示。这主要是由于超声空化产生的冲击波和微射流引起固体颗粒高速重装, 降低扩散层厚度, 提高传质速率。

### 3 超声强化浸出技术的优势

#### 3.1 改善固体表面结构

超声在固体表面具有明显的肌肤效应, 覆盖在颗粒表面的杂质可在空化作用下去除, 同时强烈微射流冲击固体表面, 加速裂纹的破裂及颗粒的细化, 形成新的反应界面<sup>[25,26]</sup>。对于一般浸出反应中溶剂接触不到的微区和孔隙内部, 超声辅助条件下可使其充分反应接触, 通过改变固体表面结构和溶剂流动进而获得更有效的溶质转移。

Zhang 等<sup>[27]</sup>研究了超声强化浸出铜尾矿, 发现在超声辅助条件下, 尾矿中铜的浸出率显著提高。由于超声空化形成的冲击波和微射流促进其表面侵蚀并形成新的活性表面, 内部矿物暴露于溶液中, 增加了矿物与溶液的接触面积, 从而提高了尾矿中铜的浸出率。Jiang 等<sup>[28]</sup>采用超声辅助浸出法从废旧锂离子电池中浸出钴和锂, 发现超声辅助浸出后的颗粒粒径明显小于常规浸出后的粒径, 这是由于超声空化瞬时局部高温高压产生空化气泡崩溃时, 破坏了固体表面, 通过机械效应和热

效应防止颗粒结块, 增强液体的微观湍流和固体间的高速碰撞, 从而加强了涡流扩散, 降低了通过产物层的外传质阻力。Ning 等<sup>[29]</sup>研究了超声辅助苹果酸浸出废锂离子电池中的镍、锂、钴, 对比了有无超声条件下浸出渣的形貌, 结果表明由于超声空化形成的局部高温高压对颗粒产生冲击、侵蚀作用, 超声强化条件下颗粒尺寸较无超声条件下减小, 颗粒表面的孔洞增加, 镍、锂、钴的浸出率较常规条件下均提高 20%以上。

Xue 等<sup>[30]</sup>利用超声辅助条件从硫化镍精矿中浸出镍, 发现由于超声机械效应在浸出体系中加速溶液与固体间的碰撞, 同时微射流和冲击波引起微孔介质中的微波扰动, 增强材料在微孔中的扩散, 与常规浸出相比浸出率提高, 反应时间缩短一倍。Li 等<sup>[31]</sup>通过超声辅助从碳化硼废渣(含铁 2.4wt%)中浸出铁的实验中发现, 传统浸出法很难完全去除附着在碳化硼废渣表面及其内部分布的铁颗粒, 经浸出后铁残留量为 0.3wt%, 而在超声辅助条件下铁残留量仅为 0.12%, 表明通过空化效应产生的高温高压微射流, 可将铁颗粒从废渣表面剥离到浸出液中, 使其更容易与硫酸反应。崔维<sup>[32]</sup>在超声浸出铜和金的实验中发现, 超声可以破坏固体颗粒表面的钝化膜, 消除或削弱界面层的阻隔, 产生新的活性表面, 强化传质过程, 显著加快多相体系中的物质交换速度。Xi 等<sup>[33]</sup>利用超声-CuCCL(超声-铜催化化学浸出)辅助浸

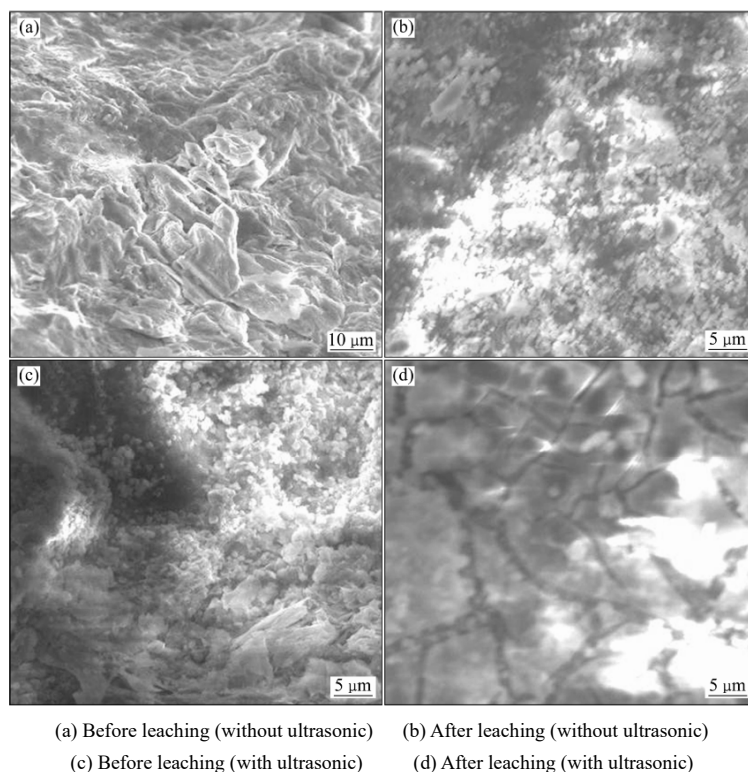


图 3 浸出前后矿石颗粒表面的 SEM 图<sup>[34]</sup>

Fig.3 SEM images of ore particle surface before and after leaching<sup>[34]</sup>

出硅粉, 经过超声-CuCCL 处理后, 得到了多孔结构的蚀刻硅粉, 有利于杂质的去除。经超声-CuCCL 处理后, 硅表面出现大量的腐蚀坑, 放大后可观察到许多微孔层, 该结构可在浸出过程中为杂质与浸出剂提供更多的“反应通道”, 且有利于杂质在快速热处理中从硅内部扩散到表面。王贻明等<sup>[34]</sup>在研究超声强化低品位硫化铜矿中发现, 在无超声强化浸出条件下, 矿物表面呈致密状, 无裂隙, 见图 3(b); 在超声强化条件下矿物内部空隙进一步扩大, 见图 3(d), 比表面积增大, 加快了溶液传质速度, 剥离了矿物表面钝化膜, 形成新的反应界面, 促进矿物浸出, 铜浸出率提高约 14.8%。

### 3.2 均匀浸出液体系

在固液反应体系中, 超声空化对溶剂进行强烈搅拌, 加速固液两相间的跨相扩散转移, 有助于降低溶质扩散的阻力, 使反应溶液更均匀, 提高固液浸出过程的扩散控制和反应速率控制。

Zhang 等<sup>[35]</sup>采用超声辅助回收废弃液晶显示器中铜的研究中发现, 随超声功率增加, 超声搅拌对浸出的强化作用主要表现为能量输入和力学作用的结合, 在声能输入下转化为热能, 使溶液温度由 25℃ 提升至 46℃。此外超声还影响溶液的对流运动, 使  $H^+$  接触到金属粒子, 均匀浸出液体系, 促进溶液扩散, 提高铜的浸出率。Souada 等<sup>[36]</sup>利用超声辅助酸浸法从废弃液晶屏中提取铜、锡, 发现在超声条件下可产生空化现象, 在空化气泡内爆的过程中, 在酸溶液和固体 ITO/玻璃机体间的固液界面产生高速微射流和高压冲击波, 促进固液间的传质作用和固体颗粒的扩散作用, 使浸出液更均匀。张仨栋<sup>[37]</sup>在研究超声辅助酸性硫脲浸出烧结灰中银的工艺中发现, 由于超声空化的机械搅拌效应, 反应溶液中物料颗粒粒径分布更细密均匀, 提高了银的浸出率。Xie 等<sup>[9]</sup>采用超声辅助回收废弃印刷线路板废渣, 基于传统方法难以实现浸出过程中的溶解或沉淀分离,  $Cu(OH)_2$  颗粒到液体的离子运动受到固液扩散转移过程的限制, 且  $Cu(OH)_2$  颗粒表面的某些部分也被不溶性  $Fe(OH)_3$  覆盖; 在超声空化作用下, 可将易碎的固体颗粒扩散到溶液中, 增强从  $Cu(OH)_2$  表面到液相的离子运动, 有利于铜从污泥浸出至溶液中。同时, 超声还可增强  $Fe(OH)_3$  的沉降, 大幅提高铜的浸出率, 降低铁的浸出效率, 提高二者的分离效率。Yin 等<sup>[38]</sup>研究了通过超声强化从风化壳淋溶型稀土矿中浸出稀土元素, 结果发现在超声空化作用下, 稀土总浸出率由 53.6% 提升至 92.2%, 由于空化气泡作用于固体颗粒表面, 产生微射流, 使固体与硫酸镁浸出液接触更加充分。

### 3.3 优化反应历程

超声波是一种方向性好、穿透性强、在水中传播距离长的机械波。超声辅助浸出, 能够破碎固体颗粒, 打开固体杂物, 一般超声处理的颗粒尺寸比未经超声处理的小, 可增加颗粒比表面积, 使更多的电解质暴露在溶液中浸出, 强化固液两相间的化学反应, 加快反应速率, 优化反应历程<sup>[39-41]</sup>。

Xiao 等<sup>[22]</sup>研究了铝电解废阴极炭的超声辅助浸出, 超声热效应提高了溶液温度, 在高温下增加了离子动能, 反应物在局部高温震荡下融化分解; 超声作用下, 固体颗粒比表面积增大, 浸出率大大提高, 优化了溶液反应动力学; 超声辅助过程产生过氧化氢, 溶液中的氰化物可被破坏去除, 浸出液的氰化物含量明显低于传统浸出时的浸出液。

Li 等<sup>[42]</sup>在硫代硫酸钠体系下对比了超声辅助和常规浸出法从废铅锌矿中回收银, 见图 4, 超声辅助条件下 5 min 银的浸出率达 73.88%, 而常规浸出实验 2 h 银的浸出率仅为 72.51%, 超声辅助有效提高了反应效率, 优化了反应历程。Zhang 等<sup>[4]</sup>通过超声辅助盐酸/氯化钠浸出富铅锡氧化渣, 发现超声辅助锡浸出 15 min 与常规浸出 45 min 浸出率相似, 反应时间缩短了 2/3。Souada 等<sup>[36]</sup>通过超声辅助硫酸浸出法从废弃液晶屏中提取铜锡氧化物, 4 min 时未经过超声辅助处理的铜浸出率仅为 13%, 而超声辅助铜浸出率达 82%, 浸出率显著提高。Li 等<sup>[31]</sup>通过超声辅助从碳化硼废渣中浸出铁, 发现常规方法浸出 80 min, 铁的最高浸出率为 87.4%, 而超声辅助浸出 50 min, 铁的最高浸出率为 94.5%。

在超声辅助条件下, 超声空化形成的微射流对固体表面产生影响, 反应历程在局部区域内得到优化, 溶质扩散阻力降低, 传质效率提高, 反应速度加快, 提高浸出率。

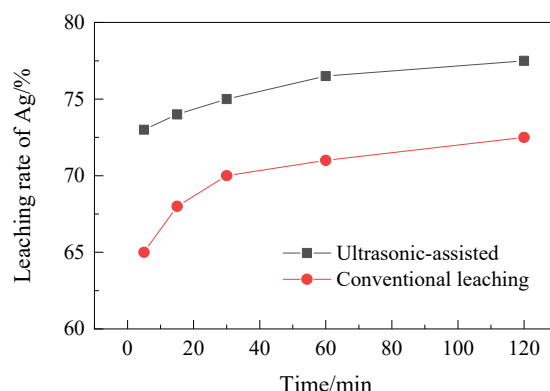


图 4 超声辅助与传统浸出条件下 Ag 浸出率比较<sup>[42]</sup>  
Fig.4 Comparison of leaching rates of Ag under ultrasonic-assisted and conventional leaching conditions<sup>[42]</sup>



## 4 超声强化浸出技术的局限性

由于超声自身物理特性等方面的因素,在适用性及实际应用中也存在局限性。

第一,超声波能量随频率增加而衰减,造成了高频和长距离间的矛盾,声波的非线性也限制了高能长距离传输。因而超声在辅助固液反应过程中,声能更多集中在反应物表面,并在传播过程中衰减,仅适用于表层物质浸出及微粒的浸出环境。

第二,超声空化效应受各种条件的影响。液体中气体含量的增加导致超声空化阈值的降低,空化气泡破裂时形成的冲击波强度的减弱、气泡中温度和总压的降低及空化效应的减弱;在液固比较大的情况下,液体介质吸收能量,超声空化在微区所产生的局部高温将快速扩散至溶液中,能量损耗较多。

第三,超声场是抽象的,难以直接表征和观测超声场的特性及微区反应过程,不利于对超声辅助工艺的在线控制。

第四,湿法浸出过程超声的作用机理仍不完善。研究较多关注超声的应用工艺研究,对空化作用机理及控制技术研究不足。未来进一步深入研究空化效应、空化场与空化气泡的精确控制、空化场测量技术等,扩大超声辅助浸出的利用空间。

第五,由于在工业中超声反应釜存在设备大型化、造价高、噪音大、能耗高等问题,故在实际生产中尚未得到较广泛的推广应用。

## 5 结语与展望

湿法浸出是冶金工业中的重要方法之一,但存在反应速率慢、周期长等缺点。超声辅助作为极其重要的强化手段,通过机械效应和热效应协同清理反应物表面杂质、减小反应物粒径、加速溶液搅拌、提高浸出液温度、降低反应活化能、缩短浸出时间、提高浸出率。目前实验条件下,通过超声强化技术,在原生矿产和二次资源中提取贵金属时,可使贵金属浸出率大幅提高约30%以上。然而,目前技术手段仍有局限,超声波在湿法浸出过程中,具有明显的皮肤效应,且空化效果受多种条件的影响,声场的表征及观测较困难,不利于超声辅助工艺的在线控制。同时由于超声设备存在大型化、造价高、噪音大、能耗高等问题,在实际工业规模化推广应用还有一定的困难。

总之,由于超声强化浸出技术具有改善固体表面结构、均匀浸出液体系、优化反应历程等优点,是一种有效强化湿法浸出的方法。随着超声技术不断被关注及探

索,若能将实验室所得基础结论应用于中试甚至工业领域,合理控制声场,解决能耗及噪音问题,未来超声强化作为外场辅助手段,将在学术和冶金产业乃至固废资源化领域具有广阔的应用前景。

## 参考文献

- [1] Delgado-Povedano M M, Luque de Castro M D. Ultrasound-assisted analytical emulsification-extraction [J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2013, 45: 1–13.
- [2] Behera S S, Panda S K, Mandal D, et al. Ultrasound and microwave assisted leaching of neodymium from waste magnet using organic solvent [J]. *Hydrometallurgy*, 2019, 185: 61–70.
- [3] Yao L, Liu H T, Wang X, et al. Ultrasound-assisted surfactant-enhanced emulsification microextraction using a magnetic ionic liquid coupled with micro-solid phase extraction for the determination of cadmium and lead in edible vegetable oils [J]. *Food Chemistry*, 2018, 56: 212–218.
- [4] Zhang R L, Zhang X F, Tang S Z, et al. Ultrasound-assisted HCl–NaCl leaching of lead-rich and antimony-rich oxidizing slag [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2015, 27: 187–191.
- [5] Xu S Y, Liu J P, Huang X S, et al. Ultrasonic-microwave assisted extraction, characterization and biological activity of pectin from jackfruit peel [J]. *LWT*, 2018, 90: 577–582.
- [6] Bi W, Tian M, Row K H. Ultrasonication-assisted extraction and preconcentration of medicinal products from herb by ionic liquids [J]. *Talanta*, 2011, 85(1): 701–706.
- [7] Elik A. Ultrasonic-assisted leaching of trace metals from sediments as a function of pH [J]. *Talanta*, 2007, 71(2): 790–794.
- [8] Wang S X, Cui W, Zhang G W, et al. Ultra fast ultrasound-assisted decopperization from copper anode slime [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 36: 20–26.
- [9] Xie F C, Li H Y, Ma Y, et al. The ultrasonically assisted metals recovery treatment of printed circuit board waste sludge by leaching separation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 170(1): 430–435.
- [10] Xuan Y, Nastac L. The role of ultrasonic cavitation in refining the microstructure of aluminum based nanocomposites during the solidification process [J]. *Ultrasonics*, 2018, 83: 94–102.
- [11] Zhang Y L, Chen X, Chu W, et al. Removal of vanadium from petroleum coke by microwave and ultrasonic-assisted leaching [J]. *Hydrometallurgy*, 2020, 191: 105168.
- [12] 曹凤国. 超声加工技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2014: 10–13.
- [13] Cao F G. Ultrasonic machining technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014: 10–13.
- [14] Li H, Li S, Peng J, et al. Ultrasound augmented leaching of nickel sulfate in sulfuric acid and hydrogen peroxide media [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 40: 1021–1030.
- [15] Ma J Y, Zhang Y F, Qin Y H, et al. The leaching kinetics of K-feldspar in sulfuric acid with the aid of ultrasound [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 35: 304–312.
- [16] Xin W, Srinivasakannan C, Xin H D, et al. Leaching kinetics of zinc residues augmented with ultrasound [J]. *Separation and Purification Technology*, 2013, 115: 66–72.

- assisted and regular leaching of germanium from by-product of zinc metallurgy [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 31: 143–149.
- [17] Zhang Y F, Ma J Y, Qin Y H, et al. Ultrasound-assisted leaching of potassium from phosphorus-potassium associated ore [J]. *Hydrometallurgy*, 2016, 166: 237–242.
- [18] 马大猷. 现代声学理论基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 26–43.
- Ma D Y. Theoretical basis of modern acoustics [M]. Beijing: Science Press, 2004: 26–43.
- [19] 卢行芳. 超声波热效应的应用研究 [J]. 浙江工贸职业技术学院学报, 2008, (4): 47–51.
- Lu X F. A research on application of ultrasonic heating effect [J]. *Journal of Zhejiang Industry & Trade Vocational College*, 2008, (4): 47–51.
- [20] Yang J H, He L H, Liu X H, et al. Comparative kinetic analysis of conventional and ultrasound-assisted leaching of scheelite by sodium carbonate [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2018, 28(4): 775–782.
- [21] Chang J, Zhang E D, Zhang L B, et al. A comparison of ultrasound-augmented and conventional leaching of silver from sintering dust using acidic thiourea [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 34: 222–231.
- [22] Xiao J, Yuan J, Tian Z L, et al. Comparison of ultrasound-assisted and traditional caustic leaching of spent cathode carbon (SCC) from aluminum electrolysis [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 40: 21–29.
- [23] Li L, Zhai L Y, Zhang X X, et al. Recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries by ultrasonic-assisted leaching process [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 262: 380–385.
- [24] 张琛, 刘建华, 杨晓博, 等. 超声强化废 SCR 催化剂浸出 V 和 W 的研究 [J]. 功能材料, 2015, 46(20): 63–67.
- Zhang C, Liu J H, Yang X B, et al. Ultrasound assisted enhancement in vanadium and tungsten leaching from waste SCR catalyst [J]. *Journal of Functional Materials*, 2015, 46(20): 63–67.
- [25] Doche M, Mandrojan A, Mourad-Mahmoud M, et al. An ultrasonic-assisted process for copper recovery in a des solvent: leaching and re-deposition [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2017, 121: 90–96.
- [26] Şayan E, Bayramoğlu M. Statistical modeling and optimization of ultrasound-assisted sulfuric acid leaching of  $\text{TiO}_2$  from red mud [J]. *Hydrometallurgy*, 2004, 71(3/4): 397–401.
- [27] Zhang J, Wu A X, Wang Y M, et al. Experimental research in leaching of copper-bearing tailings enhanced by ultrasonic treatment [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2008, 18(1): 98–102.
- [28] Jiang F, Chen Y Q, Ju S H, et al. Ultrasound-assisted leaching of cobalt and lithium from spent lithium-ion batteries [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 48: 88–95.
- [29] Ning P G, Meng Q, Dong P, et al. Recycling of cathode material from spent lithium ion batteries using an ultrasound-assisted DL-malic acid leaching system [J]. *Waste Management*, 2020, 103: 52–60.
- [30] Xue J Q, Lu X, Du Y W, et al. Ultrasonic-assisted oxidation leaching of nickel sulfide concentrate [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2010, 18(6): 948–953.
- [31] Li X, Xing P F, Du X H, et al. Influencing factors and kinetics analysis on the leaching of iron from boron carbide waste-scrap with ultrasound-assisted method [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 38: 84–91.
- [32] 崔维. 超声波强化浸出铜和金的研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016: 35–44.
- Cui W. Study on ultrasonic enhanced leaching of Cu and Au [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016: 35–44.
- [33] Xi F S, Cui H Q, Zhang Z, et al. Novel and efficient purification of silicon through ultrasonic-Cu catalyzed chemical leaching [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 56: 474–480.
- [34] 王贻明, 吴爱祥, 艾纯明. 低品位硫化铜矿超声强化浸出实验与机理分析 [J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(7): 2019–2025.
- Wang Y M, Wu A X, Ai C M. Experiment and mechanism analysis on leaching process of low grade copper sulfide intensified by ultrasonic wave [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(7): 2019–2025.
- [35] Zhang K H, Li B, Wu Y F, et al. Recycling of indium from waste LCD: a promising non-crushing leaching with the aid of ultrasonic wave [J]. *Waste Management*, 2017, 64: 236–243.
- [36] Souada M, Louage C, Doisy J, et al. Extraction of indium-tin oxide from end-of-life LCD panels using ultrasound assisted acid leaching [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 40: 929–936.
- [37] 张侗栋. 超声辅助酸性硫脲浸出烧结灰中银的工艺研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016: 38–51.
- Zhang E D. Ultrasonic assisted leaching of silver from sintering ash with acid sulfur vein [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016: 38–51.
- [38] Yin S H, Pei J N, Jiang F, et al. Ultrasound-assisted leaching of rare earths from the weathered crust elution-deposited ore using magnesium sulfate without ammonia-nitrogen pollution [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 41: 156–162.
- [39] Bas A D, Deveci H, Yazici E Y. Treatment of manufacturing scrap TV boards by nitric acid leaching [J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, 130: 151–159.
- [40] Güngör H, Elik A. Comparison of ultrasound-assisted leaching with conventional and acid bomb digestion for determination of metals in sediment samples [J]. *Microchemical Journal*, 2007, 86(1): 65–70.
- [41] Kunaver M, Jasiukaitytė E, Čuk N. Ultrasonically assisted liquefaction of lignocellulosic materials [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 103(1): 360–366.
- [42] Li H Y, Li S W, Srinivasakannan C, et al. Efficient cleaning extraction of silver from spent symbiosis lead-zinc mine assisted by ultrasound in sodium thiosulfate system [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 49: 118–127.