

超声波技术在贵金属冶金及材料制备中的应用

陈宇乾¹, 刘 揆², 常 军^{1*}, 周俊文¹, 张利波¹

(1. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 非常规冶金教育部重点实验室, 昆明 650093;

2. 昆明联诚科技股份有限公司, 昆明 650093)

摘 要: 综述了近年来超声波技术在贵金属的提取冶金及材料制备方面的应用和研究进展。超声波在界面上产生强烈的冲击和空化作用可加快浸出速度, 提高浸出效率, 强化浸出贵金属; 在材料制备过程中, 超声波产生的微射流可使生成的贵金属粉粒径减小、分布均匀, 应用于制备铂电极中可提高电极性能。

关键词: 超声波; 贵金属; 浸出; 纳米材料; 电极材料

中图分类号: TF83, G146.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2017)01-0087-07

The Application of Ultrasound Technology in the Field of Precious Metal Metallurgy and Preparation of Materials

CHEN Yuqian¹, LIU Kui², CHANG Jun^{1*}, ZHOU Junwen¹, ZHANG Libo¹

(1. Faculty of Metallurgy and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Faculty of Metallurgical and Energy Engineering for Ministry of Education, Kunming 650093, China;

2. Kunming Unionscience Technology Co. Ltd., Kunming 650093, China)

Abstract: Application and research progress of ultrasonic technology in the leaching of precious metals and material preparation were reviewed. Ultrasonic waves generate strong impact which could increase the leaching speed, improve the leaching efficiency and strengthen the leaching of precious metals. During the process of material preparation, the micro jet of ultrasonic waves would reduce the particle size of precious metal powders and distribute them equally. And ultrasonic could improve the electrode performance when applied to prepare the platinum electrode.

Key words: ultrasonic; precious metals; leaching; nanomaterials; electrode materials

超声波能够在界面上产生强烈的冲击和空化作用, 温度可达 5000 K, 压力达 101.3 MPa, 温度时间变化率达 10^9 K/s, 强度比普通声波大得多, 可以对介质质点产生显著的声压作用。利用超声冲击波引起体系的宏观湍动和固体颗粒的高速冲撞使边界层变薄, 传质速率增大, 强化金属的浸出; 同时, 利用超声波的能量特性, 其作用于固液表面, 对固体表面的形态、组成、结构以及化学反应活性产生影响, 在材料制备领域有广泛的研究。因此, 超声波可用于矿石的浸出或者制备纳米材料。

徐盛明等^[1]已系统地介绍了声化学的原理及其发展概况。近年来, 超声波技术在贵金属冶金及材料制备中已有应用。本文对超声波在贵金属冶金及材料制备领域中的应用进行归纳、总结。

1 超声波在贵金属提取中的应用

1.1 超声波在银提取中的应用

银的资源主要集中于有色多金属矿石(金矿、铅锌矿等)、工业废料, 银的浸出回收方法主要有氰化

收稿日期: 2016-05-05

第一作者: 陈宇乾, 男, 硕士研究生, 研究方向: 金属二次资源回收。E-mail: cyq179761052@qq.com

*通讯作者: 常 军, 男, 博士, 讲师, 研究方向: 金属资源的利用及回收。E-mail: 873994182@qq.com

法、硫脲法、硫代硫酸盐法、多硫化物法等。在含银量很高的金矿石浸出时,银只是当做一种副产品顺带浸出,浸出率明显低于金,而含银矿物的回收比例和浮选回收率也比较低^[2-5]。因此,提高银的浸出率是一个重要的课题。

Pollet 等^[6]为了研究超声波对电化学浸出银的影响,研究了传质测量。为了找出声电化学效应的最佳位置,改变了超声波横纵向角尖的位置和使用圆柱电极来测试不同条件对极限电流的影响。同时研究了超声波强度、电极角距离和角度定位所分配的极限电流。实验结果表明,圆柱电极放置在相对于超声波角度呈 45°的位置,由于正向角面的扩散层与反向角面相比大约少了 50%,会导致两角面的声处理面积不同。因此正向面的极限电流会增加 50%,从而在相同功率的条件下,呈 45°放置超声波可增强浸出效率。

赵文煊^[7]的研究证明超声波可强化氰化浸出法处理银精矿,浸出时间仅是常规浸出时间的三分之一,氰化钠单耗约节省 10 kg/t 矿。

赖茂名^[8]提出硫脲浸出银的主要问题是金属的钝化。实现固液相快速分离是硫脲浸出法的关键问题。用超声波的高频振动可以除去金属颗粒的化学变异产物包裹,使金属颗粒暴露于硫脲溶液中,加速银的浸出,钝化情况得到改善。同时,超声波振荡后形成的超细颗粒的结头作用可缩短过滤时间。

李越湘等^[9]用 250 W 高压汞灯照射 30 min 进行光催化沉淀回收银。将反应后分离的催化剂用蒸馏水洗涤,放入烧杯中就蒸馏水超声波洗涤器震荡 10 min,洗涤催化剂,光催化剂表面上的金属银回收率可达 80%。

袁明亮等^[10]研究了细粒嵌布锰银矿浸取中的超声强化作用。一段浸出以黄铁矿为还原剂浸出分解包裹银的锰矿物,暴露出新鲜的银矿物,锰分解率为 96%。二段浸锰渣采用超声强化氰化法提银,银的浸出率可达 95%,比锰银矿直接氰化法高 28%。

Oncel 等^[11]研究了超声波辅助硫脲浸出土耳其氰浸工厂中的固体废料中的银。通过对酸度、温度、硫脲浓度、超声波功率、矿浆浓度、气体流量、颗粒大小和浸出时间共 8 个变量因子进行统计评估。在最佳工艺条件下(超声波能量为 80 W/L),银浸出率为 98.6%。

Pollet 等^[12]研究了超声波对从摄影冲洗液中回收银的影响。超声波对不锈钢圆柱电极对混合溶液中银的沉积速率有影响。无超声波的情况下,阴极

电势大小是银沉积的主要因素。在 20 kHz 的超声波作用下,随着超声波强度的增加,沉积速度加快,阴极效率提高,最佳阴极电势为 500 mV,银回收效率可提高 18~25 倍。研究还发现超声波探头相对旋转圆柱电极的位置有影响,正向面(探头与电极平行)比侧向面(探头垂直于电极)产生更高的速率常数,单独使用正向面或侧向面的速率常数分别低了 1500 和 2000 r/min。

De La Calle 等^[13]发现杯角状声呐反应器作为超声装置可加速混合酸(HCl、HF 和 HNO₃)和硫脲与稀释 H₂SO₄ 混合物对金、银的浸出。可用于分析检测样品处理。

1.2 超声波在金提取中的应用

难处理金矿资源丰富,有效处理可带来很好的经济效益。2004 年我国大约有 76% 的矿山采用氰化法提金^[14],由于氰化法浸出速度较慢、氰化物有剧毒,对难处理矿的浸出效果很差,对非氰提金技术进行了大量研究,如超声强化原位电氯化法、ZLT 氯化提金法、改性石硫合剂法(ML)等浸出技术,焙烧氧化法、热压氧化技术、生物氧化法等预处理技术。浸金反应动力学受扩散控制,而超声波可降低扩散电阻促进扩散^[14],对金的浸出率有显著影响,此方面也有不少研究。

赵文煊^[7]在氰化浸出金中发现金颗粒被氧的显微层覆盖,除去这些氧可将浸出时间减少到 6 h 以内,矿石经过超声波处理能显著吸收氧,增加回收率,减少浸出时间。作者所研制的超声波强化反应釜能起到强化浸出的作用:对易浸矿石,强化浸出 0.5 h 与常规浸出 22 h 的浸出率相当(93%~95%);对难浸金矿,强化浸出 0.5 h 的金浸出率较常规浸出 22 h 金的浸出率提高 21%~24%,强化浸出 1 h 能使金浸出率提高 38%,达到 98%。超声波强化浸出法的研究成功为我国黄金增产开创了新途径。

念保义等^[15]研究了用超声波强化硫脲提金的浸出工艺。结果发现,用超声波辅助浸出降低了反应中的表观活化能,比常规浸出减少了浸出时间和溶剂消耗,提高了浸出率。试验中发现,超声波单独作用于浸出过程,只能部分的提高浸出率,如果通过与电动搅拌或者磁力搅拌相结合,则可提高金的浸出率。

王仕兴等^[16]考察了超声波强化氰化法浸金过程中的主要影响因素。结果表明,超声强化手段在浸出过程具有明显作用。采用超声强化浸出 5 h 后最高浸出率为 80.5%。功率适当时超声波促进了金

的浸出, 但过大的超声功率反而降低金的浸出率。

许世伟等^[17]对泉山金矿氰化尾矿进行了焙烧预处理-超声波强化硫脲浸金试验研究。结果表明, 超声波可促进硫脲浸金过程。经超声波处理过的尾矿样比未经超声波处理的尾矿样硫脲浸出时间减少 90%、金浸出率上升 10%。

袁明亮等^[18]进行了砷金矿与锰银矿同时浸出中的超声强化作用实验。结果表明, 在锰银矿:金矿=1:1.3, 反应温度 95℃, 反应时间 10 h, 硫酸浓度 0.57 mol/L, 使用功率为 500 W 的高频超声波辅助浸出, 金的浸出率随一段浸渣中毒砂含量的降低而升高, 一段浸出中毒砂分解率为 84.9%时, 金浸出率达 89%。在二段浸出中氰化液以锌置换, 金的置换率为 99.5%, 金的总回收率为 93%。

朱萍等^[19]发现超声波强化能够显著提高原位电氯化法浸取难处理金矿中金的浸出率、缩短浸取反应时间。其原因在于超声波能钝化阻力膜和破坏或溶解矿物表面的单质硫, 加快矿物的氧化浸出过程, 清洁电极表面, 提高电极表面的传质效率。对比浸出前后矿渣的 XRD 图谱证实了这一判断: 缺少超声强化作用的电氯化浸取后矿渣表面能检测出硫元素, 而有超声作用的矿渣表面则没有检测出硫。在没有超声波条件下采用原位电氯化法浸取 6 h, 金的浸出率为 54.84%; 在超声波作用下, 金的浸出率可达 90.68%。

随着易浸金矿资源的日益减少, 含砷金矿的开发也日益显出其重要性。从含砷金矿中提取金的方法一般有焙烧氧化、细菌氧化、浮选分离和非氰浸出等。超声波对改性石硫合剂浸出含砷难处理金矿具有强化作用, 不仅能加快金的浸出速度, 而且超声波空化作用产生的具有高能量的冲击波可以震破化学反应钝化层, 使被包裹的金暴露出来, 可提高金的表观浸出速率和浸出率。

张卿^[20]将超声强化作用于硝酸催化氧化过程, 并与硫代硫酸盐浸金相结合, 提出一种含砷难处理金矿湿法浸金新工艺, 金浸出率由常规氰化的 13.94%提高到 85.6%。

Majidi 等^[21]使用超声波辅助低温引导聚合微萃取分离和检测盐酸溶液中的金。离子液体中的 Au(III)可被 NaPF₆ 定量萃取, 超声波功率是影响 Au(III)萃取效率的主要因素之一。周崇松等^[22]在无氰化物的乙醇蒸馏解析体系中研究超声波辅助解析金。在 70℃以下, 超声波促进解吸液产生自由基, 而乙醇和碱则能通过初级自由基产生次级自由基溶

解氧, 增强体系的还原氛围来显著提升超声波解吸金的作用。

1.3 超声波在铂族金属提取中的应用

我国铂族金属资源贫乏而需求量大, 现有提取回收技术, 包括高温悬浮氯气浸出贱金属富集贵金属法、自变介质性质氧压浸出、优先氧化蒸馏技术、连续萃取分离技术等^[23]。

徐志刚^[24]发明了一种从含铂族金属矿石中提取铂族金属的工艺。这种工艺是用超声波的超声空化作用以及大功率微波装置提取并回收高纯度的铂族元素。此发明的工艺对任何一种含有铂族金属的矿石和废渣或者二次资源, 都能顺利地把其中的铂族元素封闭而且循环的提取出来, 而且超声空化作用产生的物质间巨大传质效应和化学反应等都能大幅度提高铂族金属的回收率。这种工艺在整个冶炼铂族金属的过程中都不会产生环境污染。

魏国良等^[25]介绍了利用超声波回收氧化锆氧传感器中铂族贵金属的方法。用 59 khz 的超声波振荡预处理后的氧传感器元件 30~40 min, 铂族贵金属回收率可达到 98%。

Molaakbari 等^[26]研究了在原子吸收光谱法测定之前用超声波辅助离子液体液-液分离微萃取方法富集微量的铈。Li 等^[27]研究了在 NiS 火法富集和 Te 共沉淀从地质样本中用电感耦合等离子质谱(ICP-MS)测定铂族元素, 用超声波辅助从 Te 沉淀中浸提取铂族元素。

超声波在辅助浸出方面具有出色表现, 极大提高了贵金属的浸出效率, 但只有一小部分声功率参与了空化作用, 未能完全利用超声波的能量, 而且在温度过高时, 超声波难以继续辅助浸出。因此, 超声波在浸出方面仍需要研究发展。

2 超声波在贵金属材料制备中的应用

纳米材料因其量子效应、小尺寸效应和表面效应而呈现出特有的物化性质, 成为了诸多学科研究的前沿领域。贵金属纳米材料因其特殊的性能, 在诸多领域有重要的应用^[28]。超声波的空化作用和产生的微射流能强化纳米材料的制备, 使其得到更小粒径和分布均匀的纳米材料, 在贵金属材料制备得到应用。

2.1 超声波在银纳米材料制备中的应用

宋永辉等^[29]的研究结果表明, 超声波的空化作用及产生的微射流可强化超细银粉的还原制备过

程,使生成的银粉粒径减小、分布均匀。利用超声场进行过程强化,在高浓度的硝酸银溶液中,用化学保护还原法可制备平均粒径 150 nm 的超细银粉。

Gautam 等^[30]利用超声波辅助合成 BSA 共轭银纳米材料,纳米颗粒的球形直径范围可控制在 8~140 nm。研究发现纳米颗粒的成长和大小是由超声波辅助奥斯特瓦熟化控制的。

Socol 等^[31]发现在超声化学中悬浮电极形成脉冲合成纳米银的过程中,除了破碎沉积过程外,超声波形成的悬浮电极对粒子属性也有很大的影响。

Wani 等^[32]用声化学法还原合成银纳米颗粒。结果表明,使用还原性较强的硼氢化钠生成为直径 10 nm 的球形银纳米颗粒,而使用还原性较弱的柠檬酸钠则生成直径大约为 3 nm 的银纳米颗粒。

Elsupikhe 等^[33]研究了超声波辐射时间对在 κ -卡拉胶中控制银纳米颗粒大小的影响。在延长超声波辐射时间的条件下,银纳米颗粒会越来越倾向于球形,半径约为 5 nm。

Byeon 等^[34]研究了超声波辐射多元醇合成胶态银纳米颗粒。结果表明,无超声辐射时,银纳米颗粒包含着形状各异的颗粒,而加入超声波辐射可获得细而均匀的银纳米颗粒。

2.2 超声波在金纳米材料制备中的应用

Okitsu 等^[35]研究了声化学合成纳米颗粒中超声波频率对还原率的影响。发现在含 1-丙醇的水溶液中制备金纳米颗粒的效率很大程度上取决于超声波频率的大小。超声频率在 20~1062 kHz 范围内,213 kHz 空化引导的金还原率是最高的,金纳米颗粒的大小与金离子的声化学还原率紧密相关。金的还原率和大小分布都只受空化所引起的化学效应的影响,与其产生的物理效应关系不大。

曹辉等^[36]应用超声辅助电解法制备金纳米粉末。由于超声波的空化效应,在阴极形成的金聚集体被分散到电解液中。通过控制电流密度、超声波脉冲的周期和幅度可以获得直径约为 50 nm 左右的面心立方结构(fcc)的金纳米粉末。

Ahn 等^[37]对基于激光超声波技术的共振进行了研究,探索低密度纳米多孔金泡沫的特征,发现超声技术可控制低密度纳米结构的机械特征。

Pienpinijtham 等^[38]使用超声波辅助循环电流置换合金银和 AuCl_4^- 中的金离子的反应,制造纳米多孔金微片。通过电置换反应使合金银表面的 AuCl_4^- 减少,银表面的金薄膜的外延生长被电置换伴生

AgCl 沉淀所干扰, AgCl 沉淀和电生金纳米结构导致合金银板表面上形成 Au/AgCl 纳米复合材料薄膜。超声波辐射可以沿着 AgCl/Ag 界面自动分离产生薄膜。电置换反应和自动分离过程会循环不断发生,直到银全部消耗。用 NH_3 处理移除 AgCl 后会得到珊瑚状多孔金纳米材料。通过链状金结构分离得到的分层的纳米多孔结构有 0.15~0.3 μm 和 30~60 nm 的微孔和纳米孔。液体在这种复杂的多孔结构中可轻松流动。这种性质可应用于高效催化剂、超级电容、电化学传感器和表面增强拉曼散射(SERS)基材。

Lee 等^[39]进行了大气条件下在超声波清洗槽中合成球形金纳米颗粒的实验,研究超声波能量对金纳米颗粒大小和形态的影响。在无额外加热和磁力搅拌的情况下,用柠檬酸钠还原法制备得到高分散的球形金纳米颗粒。超声波能量是调节球形金纳米颗粒直径(20~50 nm)大小的关键参量。

Park 等^[40]研究了稳定剂十二烷基硫酸钠(SDS)浓度和超声波辐射能量对合成纳米金颗粒影响。发现金纳米颗粒的形状和大小会受到 Au(III)/SDS 比率和超声波辐射能量的影响。

2.3 超声波在铂电极材料制备中的应用

肖秀峰等^[41]研究了超声波对钛镀铂黑电极性能的影响。与无超声波辅助相比,采用超声波振荡电沉积可以使钛镀铂电极的电极性能提高约 2 倍,电极表面粗糙多孔、粗糙度大,不易脱落,在电解 24 h 后电极性能衰减 10%,此后衰减很少,化学稳定性好。

钛基镀铂电极现已有广泛应用。不锈钢是一种具有高强度抗腐蚀性质且价格低廉的金属材料,施晶莹等^[42]筛选出电沉积的最佳电流密度组合,制备出与基底粘结牢固,析氢电催化性能高的不锈钢镀铂电极,得出不锈钢镀铂电极表面粗糙度增加可改善其电极活性的结论。

传统的植入式电刺激微电极表面积较小,电极/组织的界面阻抗较高,而且电荷存储容量(CSC)也比较小,这些都会增加植入式系统的功耗并且影响电刺激的效果。Rui 等^[43]在超声波浴下使用脉冲电流电镀的方法,可以极大地增加微电极的有效面积(ESA),形成纳米结构的铂黑镀层。相较于普通铂电极,界面阻抗降低 1/16、CSC 扩大 13 倍,在 5 min 室温下超声波衰减实验中,阴极电荷的存储容量仅减小 20%。

3 结语

在贵金属提取冶金中, 利用超声波在界面上产生强烈的冲击和空化作用, 在贵金属物料的湿法浸出中, 可以加快浸出速度, 提高浸出效率, 在银矿、难处理金矿和铂族金属材料回收中有着良好的应用前景。

在贵金属材料制备领域, 利用超声波的空化特性, 在金、银纳米材料制备中可以发挥特殊的作用, 可用于控制纳米颗粒的尺寸及分布, 应用于铂电极材料制备中, 可以提高电极性能。

从实际应用的角度看, 现在的超声波设备普遍存在功率小、防腐蚀能力不足, 温度过高时, 超声波设备会受到高温保护而停止工作, 逐步解决这些设备技术问题后, 超声波技术将在贵金属领域发挥更明显的作用。

参考文献:

- [1] 徐盛明, 张传福, 吴延军, 等. 超声波在有色冶金中的应用研究新进展[J]. 稀有金属与硬质合金, 1995(6): 47-51.
XU S M, ZHANG C F, WU Y J, et al. New advances in ultrasonic applied research for non-ferrous metallurgy[J]. Rare metals and cemented carbides, 1995(6): 47-51.
- [2] 何剑, 童雄, 崔毅琦. 银浸出技术的研究现状[J]. 云南冶金, 2004, 33(5): 6-15.
HE J, TONG X, CUI Y Q. Current situation of silver leaching technology research[J]. Yunnan metallurgy, 2004, 33(5): 6-15.
- [3] 马永涛. 湿法炼锌综合回收银的现状与发展趋势[J]. 中国有色冶金, 2014, 2(1): 52-55.
MA Y T. Status and development trend of comprehensive recovery of silver in zinc hydrometallurgy [J]. China nonferrous metallurgy, 2014, 2(1): 52-55.
- [4] 王成刚, 赵西成, 彭济时, 等. 银及银基材料的应用现状及发展趋势[J]. 有色金属, 2002, 54(7): 98-100.
WANG C G, ZHAO X C, PENG J S, et al. Application and developing trends of silver alloy[J]. Nonferrous metals, 2002, 54(7): 98-100.
- [5] 徐乃娟. 银回收技术现状[J]. 黄金, 1984, 5(2): 54-59.
XU N J. Current status of silver recovery technology[J]. Gold, 1984, 5(2): 54-59.
- [6] POLLET B G, LORIMER J P, PHULL S S, et al. A novel angular geometry for the sonochemical silver recovery process at cylinder electrodes[J]. Ultrasonics sonochemistry, 2003, 10(4/5): 217-222.
- [7] 赵文焕. 超声波强化浸出(PLU 法)银精矿中金银的研究[J]. 矿冶, 1995, 3(9): 60-66.
ZHAO W H. Study on process of ultrasonic-aided leaching of gold and silver from silver concentrates[J]. Mining & metallurgy, 1995, 3(9): 60-66.
- [8] 赖茂名. 超声波在金银矿石浸出过程中的应用[J]. 国外黄金参考, 2005, 4(9): 17-19.
LAI M M. The application of ultrasound leaching process in gold and silver ore[J]. Gold abroad reference, 2005, 4(9): 17-19.
- [9] 李越湘, 徐玉欣, 彭绍琴. 空心玻璃微球负载 TiO₂ 光催化回收银[J]. 分子催化, 2003, 17(5): 376-379.
LI Y X, XU Y X, PENG S Q. Immobilization of TiO₂ on hollow glass microbeads and photocatalytic recovery of silver[J]. Journal of molecular catalysis (China), 2003, 17(5): 376-379.
- [10] 袁明亮, 邱冠周, 王淀佐. 细粒嵌布锰银矿浸取中的超声强化作用[J]. 过程工程学报, 2002, 2(1): 21-25.
YUAN M L, QIU G Z, WANG D Z. Effect of ultrasonic wave on leaching manganese-containing silver ore with the binary ore leaching process[J]. The Chinese journal of process engineering, 2002, 2(1): 21-25.
- [11] ONCEL M S, INCE M, BAYRAMOGLU M. Leaching of silver from solid waste using ultrasound assisted thiourea method[J]. Ultrasonics sonochemistry, 2005, 12(3): 237.
- [12] POLLET B, LORIMER J P, PHULL S S, et al. Sono-electrochemical recovery of silver from photographic processing solutions[J]. Ultrasonics sonochemistry, 2000, 7(2): 69-76.
- [13] DE LA CALLE I, CABALEIRO N, COSTAS M, et al. Ultrasound-assisted extraction of gold and silver from environmental samples using different extractants followed by electrothermal-atomic absorption spectrometry[J]. Microchemical journal, 2011, 97: 93-100.
- [14] 谭田. 试论氰化法提金工艺及其在我国的应用[J]. 科海故事博览·科教创新, 2008, 9(18): 235-239.
TAN T. Try to talk about the application of cyanidation leaching gold in our country[J]. Science and education innovation, 2008, 9(18): 235-239.
- [15] 念保义, 郑炳云. 超声波强化硫脲提金的研究[J]. 化学工程师, 2001(2): 11-13.
NIAN B Y, ZHENG B Y. Study on gold leaching process with sulfourea intensified by ultrasonic wave[J].

- Chemical engineer, 2001(2): 11-13.
- [16] 王仕兴, 彭金辉, 张立波, 等. 超声波强化氰化法浸金的研究[J]. 贵金属, 2014, 35(s1): 19-22.
- WANG S X, PENG J H, ZHANG L B, et al. Ultrasonic enhancing cyanidation method for leaching of gold[J]. Precious metals, 2014, 35(s1): 19-22.
- [17] 许世伟, 王建英, 郑升, 等. 泉山金矿氰化尾矿焙烧-超声波强化硫脲提金试验研究[J]. 黄金, 2013, 34(5): 49-51.
- XU S W, WANG J Y, ZHENG S, et al. Experimental study on cyanide tailings roasting-ultrasonic wave enhanced gold extraction using thiourea in Quanshan gold mine[J]. Gold, 2013, 34(5): 49-51.
- [18] 袁明亮, 赵国魂, 邱冠周. 砷金矿与锰银矿同时浸出中的超声强化作用[J]. 过程工程学报, 2003, 3(5): 409-412.
- YUAN M L, ZHAO G H, QIU G Z. Effect of ultrasonic wave on simultaneous leaching of Mn-containing silver ore and As-containing gold ore[J]. The Chinese journal of process engineering, 2003, 3(5): 409-412.
- [19] 朱萍, 李坤芳, 周鸣, 等. 超声强化原位电氯化法浸取难处理金矿[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(6): 1091-1095.
- ZHU P, LI K F, ZHOU M, et al. Study of in situ leaching gold from refractory gold ores with method of ultrasonic-aided electro-chlorination[J]. Rare metal materials and engineering, 2009, 38(6): 1091-1095.
- [20] 张卿. 某含砷难处理金矿超声强化浸金试验研究[J]. 矿产综合利用, 2010(4): 12-14.
- ZHANG Q. The effect of ultrasonic intensifying processing on leaching on leaching of a refractory gold ore containing arsenic[J]. Multipurpose utilization of mineral resources, 2010(4): 12-14.
- [21] MAJIDI B, SHEMIRANI F. Separation and determination of trace level of gold from hydrochloric acid solutions using ultrasound-assisted cold-induced aggregation microextraction[J]. Analytical methods, 2012, 4(4): 1072-1077.
- [22] 周崇松, 范必威, 彭娟. 超声波从载金炭上解吸金的作用研究[J]. 贵金属, 2015, 36(3): 32-36.
- ZHOU C S, FAN B W, PENG J. Study on the effect of ultrasonic for elution of gold from gold-loaded carbon[J]. Precious metal, 2015, 36(3): 32-36.
- [23] 刘时杰. 中国铂族金属提取冶金技术的发展[C]//中国有色金属学会. 第三届学术会议论文集. 昆明, 1997: 387-390.
- LIU S J. The development of china platinum group metal extraction and metallurgical technology[C]//The Nonferrous Metals Society of China. The third academic conference proceedings. Kunming, 1997: 287-390.
- [24] 徐致刚. 从含铂族金属矿石中提取铂族金属的工艺: CN1304612C[P]. 2006-03-22.
- XU Z G. The technology of extract platinum group metal from platinum group metal mineral: China: CN 1304612C[P]. 2006-03-22.
- [25] 魏国良, 向蓝翔, 周欣燕. 超声波在回收氧化锆氧传感器中铂族贵金属的应用[J]. 材料开发与应用, 2013, 2(4): 26-28.
- WEI G L, XIANG L X, ZHOU X Y. Application of ultrasonic wave on platinum group metals recovery from zirconia oxygen sensor[J]. Development and application of materials, 2013, 2(4): 26-28.
- [26] MOLAARBARI E, MOSTAFAVI A, AFZALI D. Ionic liquid ultrasound assisted dispersive liquid-liquid microextraction method for preconcentration of trace amounts of rhodium prior to flame atomic absorption spectrometry determination.[J]. Journal of hazardous materials, 2011, 185(2/3): 647-652.
- [27] LI Z X, FENG Y H. Determination of the platinum group elements in geological samples by ICP-MS after NiS fire assay and Te coprecipitation: ultrasound-assisted extraction of PGEs from Te precipitate[J]. Journal of analytical atomic spectrometry, 2006, 21(1): 90-93.
- [28] 李明利, 徐颖, 柏文超, 等. 贵金属纳米材料及其应用[J]. 中国材料进展, 2004, 23(3): 10-13.
- LI M L, XU Y, BAI W C, et al. The application of precious metal nanometer materials[J]. Materials China, 2004, 23(3): 10-13.
- [29] 宋永辉, 兰新哲, 张秋丽. 超声波强化制备超细银粉[J]. 稀有金属, 2005, 29(4): 502-504.
- SONG Y H, LAN X Z, ZHANG Q L. Preparation of superfine silver powder by ultrasonic wave intensification [J]. Chinese journal of rare metals, 2005, 29(4): 502-504.
- [30] GAUTAM S, DUBEY P, GUPTA M N. A facile and green ultrasonic-assisted synthesis of BSA conjugated silver nanoparticles[J]. Colloids & surfaces B: Biointerfaces, 2013, 10(102C): 879-883.
- [31] SOCOL Y, ABRAMSON O, GEDANKEN A, et al. Suspensive electrode formation in pulsed sonoelectrochemical synthesis of silver nanoparticles[J]. Langmuir,

- 2002, 18(12): 4736-4740.
- [32] ANI I A, GANGULY A, AHMED J, et al. Silver nanoparticles: Ultrasonic wave assisted synthesis, optical characterization and surface area studies[J]. Materials letters, 2011, 65(3): 520-522.
- [33] ELSUPIKHE R F, SHAMELI K, AHMAD M B. Effect of ultrasonic radiation's times to the control size of silver nanoparticles in κ -carrageenan[J]. Research on chemical intermediates, 2015, 41(11): 8829-8838.
- [34] BYEON J H, KIM Y W. A novel polyol method to synthesize colloidal silver nanoparticles by ultrasonic irradiation[J]. Ultrasonics sonochemistry, 2012, 19(1): 209-215.
- [35] OKITSU K, ASHOKKUMAR M, GRIESER F. Sonochemical synthesis of gold nanoparticles: effects of ultrasound frequency[J]. Journal of physical chemistry B, 2005, 109(44): 20673-20675.
- [36] 曹辉, 曾勇. 金纳米粉末的制备与特性[J]. 工业应用, 2007, 28(3): 4-6.
- CAO H, ZENG Y. Synthesis and characterization of gold nanoparticles[J]. Gold, 2007, 28(3): 4-6.
- [37] AHN P, BALOGUN O. Elastic characterization of nanoporous gold foams using laser based ultrasonics[J]. Ultrasonics, 2014, 54(3): 795-800.
- [38] PIENPINIJTHAM P, SORNPRASIT P, WONGRAVEE K, et al. Gold microspheres having nano/micro porous structures fabricated by ultrasonic-assisted cyclic galvanic replacement[J]. The royal society of chemistry, 2015, 5(95): 78315-78323.
- [39] LEE J H, CHOI S U S, JANG S P, et al. Production of aqueous spherical gold nanoparticles using conventional ultrasonic bath[J]. Nanoscale research letters, 2012, 7(1): 1-8.
- [40] PARK J E, ATOBE M, FUCHIGAMI T. Synthesis of multiple shapes of gold nanoparticles with controlled sizes in aqueous solution using ultrasound[J]. Ultrasonics sonochemistry, 2006, 13(3): 237-41.
- [41] 肖秀峰, 刘榕芳, 朱则善. 超声波对钛镀铂黑电极性能的影响[J]. 化学研究与应用, 2000, 12(5): 563-565.
- XIAO X F, LIU R F, ZHU Z S. The ultrasonic effect on the activity of platinum black plated titanium-electrode[J]. Chemical research and application, 2000, 12(5): 563-565.
- [42] 施晶莹, 肖秀峰, 朱则善. 不锈钢上电沉积活性铂[J]. 电镀与精饰, 2000, 22(2): 9-11.
- SHI J Y, XIAO X F, ZHU Z S. Electrodeposition of active platinum on stainless steel[J]. Plating and finishing, 2000, 22(2): 9-11.
- [43] RUI Y F, LIU J Q, YANG C S. Implantable Pt-black coated microelectrode for electrical stimulation[J]. Nanotechnology and precision engineering, 2012, 10(2): 103-107.

《贵金属》(Precious Metals) 期刊简介

《贵金属》创刊于 1980 年, 为中国有色金属学会和昆明贵金属研究所共同主办的、国内外公开发行的学术季刊。其学风严谨, 视野远阔, 是中国乃至全球唯一的全面报道贵金属 8 个元素科技研究成果的学术刊物。

《贵金属》期刊主要报道内容包括贵金属 (Pt、Pd、Rh、Ir、Os、Ru、Au、Ag) 在冶金、材料、化学、分析测试等科技领域的研究论文、综合评述。

《贵金属》期刊被中国知网、万方、维普等主要检索数据库全文收录, 是美国化学文摘 (CA)、英金属学会金属文摘 (MA)、美国剑桥科技文摘 (CSA) 等的文献源期刊。

《贵金属》为**中文核心期刊(PKU)**、**中国科技核心期刊(ISTIC)**、**中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊**。

《贵金属》影响因子一直位于国内同类期刊前列 (见附表), 是国内外贵金属科技人员的重要参考资料来源。

附表: 2010-2015 年《贵金属》期刊主要评价指标

评价年份	总被引频次	影响因子	影响因子排名	他引率	基金论文比
2015	313	0.608	10	0.66	0.73
2014	352	0.872	3	0.69	0.59
2013	360	0.508	8	0.71	0.65
2012	315	0.420	10	0.59	0.61
2011	317	0.762	3	0.75	0.57
2010	296	0.681	6	0.79	0.55

[数据来源: 中国科学技术信息研究所 《中国科技期刊引证报告(核心版)》2011~2016 年版]

[影响因子排名: 在材料科学类/金属材料类期刊中的排名]