

超声波辐射对低品位氧化锌矿氨浸行为的影响

张玉梅, 李 洁, 陈启元, 丁红青

(中南大学 化学化工学院, 长沙 410083)

摘 要: 研究超声波辐射对兰坪低品位氧化锌矿氨浸过程的影响规律。研究表明: 无超声波辐射时, 兰坪低品位氧化锌矿在 $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ 体系中浸出 3 h 后的最高浸出率为 69.4%; 引入超声波辐射后, 显著缩短了浸出时间, 无超声波辐射时 Zn 浸出率达到 61.8% 需要 80 min, 而采用超声波辐射浸出时仅需 20 min; 反应温度、浸出剂浓度和 NH_4Cl 与 NH_4OH 的摩尔浓度比等参数对超声波辐射的强化作用效果显著。当反应温度和浸出剂浓度较低, NH_4Cl 与 NH_4OH 的摩尔浓度比较大时, 超声波辐射的强化作用显著; 超声波辐射可望降低氨浸低品位氧化锌矿的反应温度和浸出所需 NH_4OH 浓度, 大幅缩短浸出时间; 同时, 超声强化氨浸对锌的浸出具有较高选择性。

关键词: 低品位氧化锌矿; 超声波辐射; 氨浸

中图分类号: TB 559; TF 813; TF 803.21

文献标识码: A

Influence of ultrasonic irradiation on ammonia leaching of zinc from low-grade oxide zinc ore

ZHANG Yu-mei, LI Jie, CHEN Qi-yuan, DING Hong-qing

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The influence of ultrasonic irradiation on the ammonia leaching of zinc from low-grade oxide zinc ore from Lanping was studied. The results show that the maximum leaching rate of zinc is 69.4% in $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ solution for 3 h in the absence of ultrasonic. The ultrasonic can shorten the reaction time obviously. The leaching rate of 61.8% is obtained in just 20 min with ultrasonic irradiation while it needs 80 min in leaching process without ultrasonic irradiation. The influence of ultrasonic irradiation on the zinc leaching process is strongly related to the reaction temperature, leaching agent concentration, as well as molar concentration ratio of NH_4Cl to NH_4OH . The influence of ultrasonic irradiation on the zinc leaching process is obvious at lower temperature, lower leaching agent concentration, and higher molar concentration ratio of NH_4Cl to NH_4OH , so it is expected to decrease the reaction temperature, molar concentration of NH_4OH and obviously shorten the reaction time with ultrasonic irradiation. At the same time, the selectivity to zinc leaching is high in ultrasonic intensified ammonia leaching process of low-grade oxide zinc ore.

Key words: low-grade oxide zinc ore; ultrasonic irradiation; ammonia leaching

随着锌精矿逐步消耗殆尽, 人们越来越重视对低品位氧化锌矿的开发和利用。现已探明云南省兰坪锌矿锌金属储量为 1289.8 万 t, 锌平均品位为 5.74%, 其中极难处理的低品位氧化矿和混合矿占总量的

40%, 且矿物中碱性脉石含量高、矿物组成复杂及多金属共生。

传统的酸浸法处理氧化锌矿需消耗大量的酸, 具有固液分离难、浸出液中杂质含量较多、净化困难等

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB613600-1)

收稿日期: 2008-10-20; 修订日期: 2009-03-03

通讯作者: 陈启元, 教授, 博士; 电话: 0731-8877364; E-mail: cqy@mail.csu.edu.cn

缺点。而氨浸法具有较高的选择性, 在铜^[1-2]、镍^[3]、钴^[4]等湿法冶炼领域应用日益广泛, 但采用氨浸法处理氧化锌矿所用的浸出剂浓度较高, 铵盐易析出结疤, 同时氨水浓度较大, 挥发损失造成环境污染, 所以目前还是停留在实验室研究阶段^[5-9]。

超声波可通过声空化^[10-11]作用对反应介质产生机械效应和化学效应, 从而加速或引发化学反应^[12], 因此, 在矿物浸出过程中引入超声波已引起众多科技工作者^[13-16]的重视。孙家寿等^[17]研究表明, FeCl₃ 浸出硫化铜精矿经超声波处理 30 min 后的矿浆, 铜的浸出率可达 80.2%, 比未用超声波处理时提高 5%~10%, 时间缩短 4 h。BEŞE^[18]研究了超声对铜电转炉炉渣强化浸出。在最佳浸出条件下, 引入超声波后炉渣中的 Cu、Zn、Co 和 Fe 浸出率分别提高了 8.87%、3.04%、5.35%和 1.57%。AVVARU 等^[19]研究了在硝酸和硫酸两种不同浸出体系下超声波强化浸出铀, 结果表明超声波在这两种浸出体系中强化作用机理不同而导致的强化作用效果不同。

本文作者针对难处理低品位氧化锌矿, 在 NH₃-NH₄Cl-H₂O 体系的浸出工艺, 引用超声波强化浸出过程, 着重研究超声波辐射对氧化锌矿中锌氨浸出过程影响的基本规律, 为探求超声波辐射强化浸出氧化锌矿新工艺应用提供基础。

1 实验

1.1 实验原料

实验原料来自云南省兰坪氧化锌矿, 原矿经粉碎机粉碎、筛分处理, 实验所用矿的粒度小于 147 μm, 其主要化学成分和物相组成分别如表 1 和 2 所列。

从表 1、2 中原矿的化学成分及物相成分可以看出: 该锌矿中锌的品位较低, 仅为 5.85%, 碱性脉石 (CaO+MgO) 含量约为 14%, 石英含量高达 47.52%, 且多种金属 (Pb、Zn、Cd、Fe、Al、Ca、Mg) 共生。此外, 该锌矿还是混合矿, 深度氧化, 其中氧化锌中的锌占总矿质量的 4.17%, 占锌总质量的 71.23%, 而氨可溶性锌主要是混合矿中的氧化锌矿。

表 1 原矿的主要成分

Table 1 Main compositions of original ore (mass fraction, %)

Pb	Zn	Cd	Fe	S	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
0.99	5.85	0.095	4.36	2.70	3.30	47.52	3.85	13.46	0.52

表 2 原矿的物相分析

Table 2 Phase analysis of original ore

Phase	w(Zn)/%
ZnO	4.17
ZnS	1.48
ZnO·Fe ₂ O ₃	0.20
Total zinc	5.85

1.2 实验仪器

实验所用主要仪器有 DKB-501A 型超级恒温水槽, JJ-1 紧密增力电搅拌器 (3 片叶轮, 其半径为 50 mm), 07HWS-2 恒温磁力搅拌器, JY-92DII 型超声波细胞粉碎仪 (工作频率 20 kHz, 输出功率 150~750 W, 连续可调, 探头直径 25 mm), SHB-III 水循环多用真空泵。

1.3 实验方法

常规浸出实验在 1 000 mL 的不锈钢容器中进行, 用超级恒温水槽水循环维持恒温, 每次称取 30 g (粒度小于 147 μm) 矿放入反应容器中, 以一定液固比加入配制好的 NH₃-NH₄Cl-H₂O 溶液, 机械搅拌 (200 r/min) 浸出。超声波强化浸出实验装置如图 1 所示, 磁力搅拌 (600 r/min) 的同时启动超声波。在浸出过程中, 加入适量冰水控制超声辐射引起的溶液温度升高。在不同条件下浸出至一定时间后, 真空抽滤进行固液分离。滤渣经多次洗涤, 洗涤液成分与浸出剂相同, 体积约

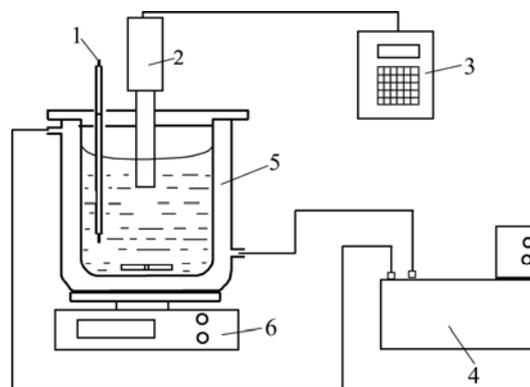


图 1 超声强化浸出实验装置

Fig.1 Experimental apparatus for leaching with ultrasonic: 1—Sample; 2—Ultrasound probe; 3—Ultrasound generator; 4—Programmable thermostated bath; 5—Double-jacketed reactor; 6—Magnetic stirrer

为浸出剂体积的20%。采用EDTA容量法测定浸出液中Zn的含量,再按下式计算Zn的浸出率(R):

$$R = \frac{w(\text{Zn})}{w_0(\text{Zn})} \times 100\%$$

式中 $w(\text{Zn})$ 是浸出液中锌的含量; $w_0(\text{Zn})$ 是原矿中锌的含量。

2 结果与讨论

2.1 无超声波辐射的常规浸出

考虑到氨的挥发性和浸出效率,根据文献[6]以 $c(\text{NH}_4\text{Cl})=5.0 \text{ mol/L}$, $c(\text{NH}_4\text{OH})=2.5 \text{ mol/L}$ 混合溶液为浸出剂,在机械搅拌下浸出氧化锌矿,最大限度地浸出矿中的锌,采用单因素条件实验,分别考察液固比、浸出时间、反应温度对浸出效果的影响,从而确定最佳的浸出工艺条件。各因素对浸出效果的影响如图2~4所示。实验结果表明,在所选取的实验条件范围内,液固比、浸出时间、反应温度对锌的浸出效果均有不同程度的影响。由图2可知,液固比对浸出率的影响较为显著。当液固比小于5:1时,随着液固比的增加,浸出率显著提高,但当液固比大于5:1,浸出率的增长趋于平缓。因此,最佳液固比为5:1。由图3可知,当浸出时间少于3h时,随着时间的增加,浸出率显著提高,但当浸出时间超过3h后,浸出率的增长趋于平缓。因此,最佳浸出时间为3h。由图4可看出,当温度低于30℃时,浸出率随温度的升高而增大,这是由于升高温度,有利于固液间的扩散,提高其传质速率,从而提高浸出率。但当温度高于30℃时,温度的升高会造成 NH_3 的挥发,浸出液中 NH_3

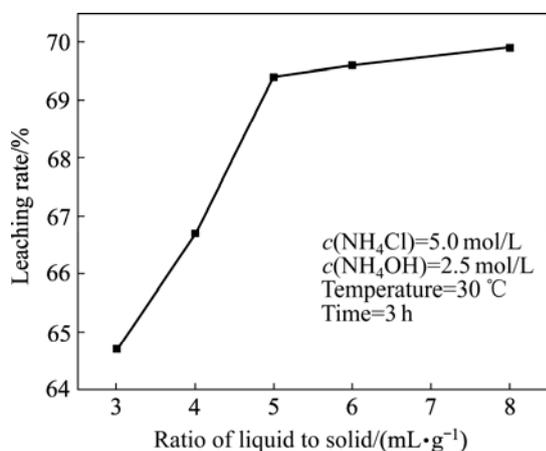


图2 液固比对浸出率的影响

Fig.2 Effect of ratio of liquid to solid on leaching rate

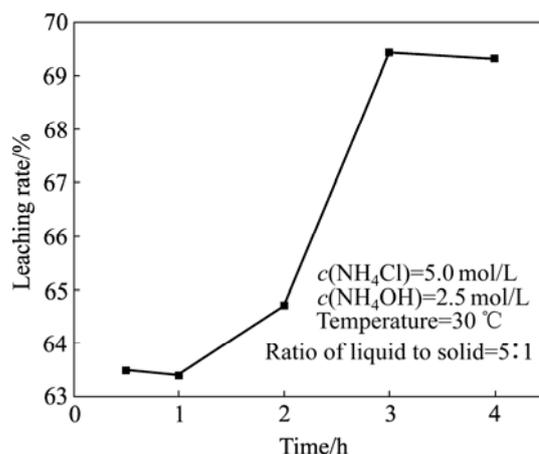


图3 浸出时间对浸出率的影响

Fig.3 Effect of reaction time on leaching rate

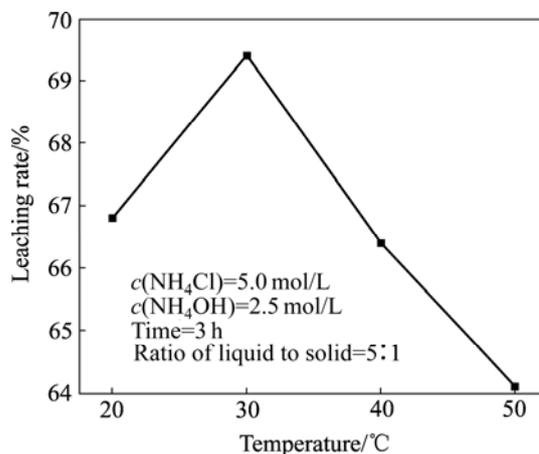


图4 温度对浸出率影响

Fig.4 Effect of temperature on leaching rate

浓度降低,导致锌的浸出率降低。因此,浸出实验温度一般取30℃为宜。

综上所述,对于兰坪低品位氧化锌矿,较好的氨浸工艺条件为: $c(\text{NH}_4\text{Cl})=5.0 \text{ mol/L}$, $c(\text{NH}_4\text{OH})=2.5 \text{ mol/L}$, 液固比5:1, 浸出时间3h, 反应温度30℃, 浸出率69.4%, 即混合矿中氧化锌矿中锌的浸出率为97.4%。

2.2 超声辐射下低品位氧化锌矿的浸出行为

2.2.1 超声辐射时间对浸出率的影响

在常规浸出最佳条件下引入超声波,超声波功率为300W,考察不同超声时间下的浸出效果,结果如图5所示。从图5可以看出,在相同的浸出条件下,超声波强化浸出20min后Zn的浸出率为63.9%,即达到常规浸出80min时Zn的浸出率,可见超声波可以显著提高Zn的浸出速率。随着超声时间的延长,

Zn 的浸出率显著提高, 当超声浸出时间达 80 min, Zn 的浸出率为 69.2%, 基本上达到常规浸出 180 min 后 Zn 的浸出率。而当超声时间大于 80 min, 继续延长超声时间, Zn 的浸出率没有较大的提高。这是由于超声波辐射波产生的搅动增强了固液间的传质, 加快了反应速率; 对固体表面的冲洗、粉碎作用以及超声空化产生的微射流对固体表面的侵蚀作用, 减少了矿物颗

粒的粒度^[20], 降低了扩散层厚度, 有利于增大浸出剂与矿物颗粒的接触面积, 从而加快反应的进行。因此, 超声波辐射显著改变了氧化锌矿浸出的动力学行为, 但对反应平衡态没有影响。

2.2.2 温度对浸出率的影响

浸出剂中 $c(\text{NH}_4\text{Cl})=5.0 \text{ mol/L}$, $c(\text{NH}_4\text{OH})=2.5 \text{ mol/L}$, 液固比为 5:1, 超声波功率为 300 W, 在不同温度下, 锌的浸出率随超声时间的变化关系如图 6 所示。由图 6 可知, 同一温度浸出时, 超声波对浸出率的强化作用效果随着浸出时间的延长而减弱, 在 25 °C, 超声时间从 10 min 增加到 80 min 时, 浸出率由 18% 下降到 5.9%。超声时间相同时, 超声波对浸出率的强化作用效果随着温度的升高而减弱, 超声浸出时间为 10 min 时, 温度从 25 °C 增加到 50 °C, 超声波对浸出率的提高程度由 18% 下降到 5.1%。从图 6 可以看出, 在温度较低时, 超声波对浸出过程强化作用效果随浸出时间的延长快速下降, 而温度较高时, 这种变化趋势变得较为平缓。这是由于随着温度的升高, 超声波辐射所产生的空化作用减弱^[20], 所以由空化作用产生的微射流对固体表面的侵蚀作用减弱, 强

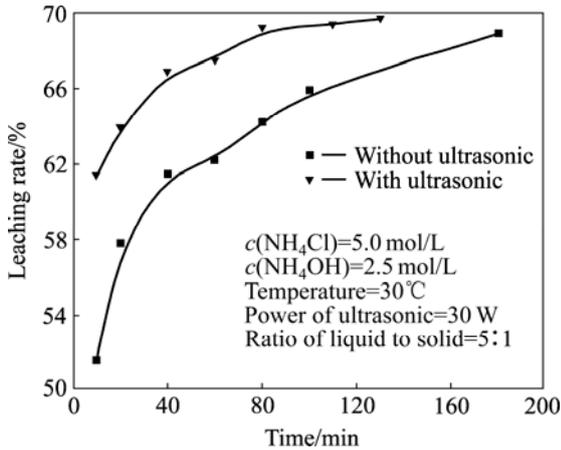


图 5 超声时间对浸出率的影响

Fig.5 Effect of time on leaching rate

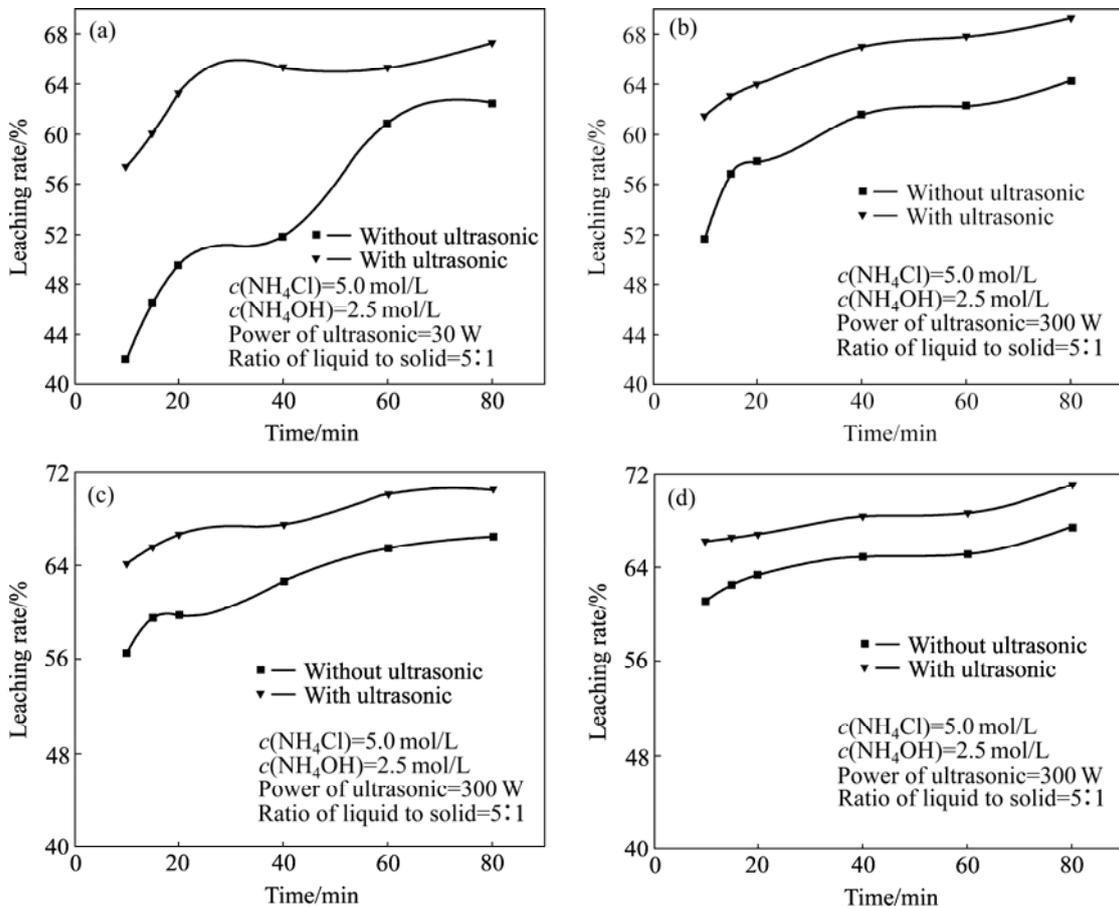


图 6 在不同温度下超声波对浸出率的影响

Fig.6 Effect of ultrasonic on leaching rate at different temperatures: (a) 25 °C; (b) 30 °C; (c) 40 °C; (d) 50 °C

化浸出的效果也随之降低。温度升高, 溶液中分子运动加剧, 固液间扩散系数增大, 矿物中 Zn 与浸出剂接触发生反应速率加快, 反应受传质作用的影响很小, 常规浸出率较高。同时, 较高温度下, 超声波辐射产生的空化作用弱于在低温时溶液中的空化作用, 所以温度较高时超声波强化浸出的效果没有温度较低时明显。

2.2.3 浸出剂浓度对浸出率的影响

浸出剂中 $c(\text{NH}_4\text{Cl})/c(\text{NH}_4\text{OH})=2$, 液固比 5:1, 温度 30 °C, 超声波功率 300 W, 考察浸出剂浓度不同时, 锌的浸出率随超声时间的变化如图 7 所示。由图 7 可以看出: 在超声波作用下, 用这两种浓度的浸出剂浸取锌, 浸出率都得到了提高。在同一浓度, 超声波对浸出率的强化作用效果随着浸出时间的延长而减弱, 当浸出剂 $c(\text{NH}_4\text{Cl})=4 \text{ mol/L}$, 浸出时间从 10 min 增加到 60 min 时, 浸出率由 11.7% 下降到 6.8%。浸出剂浓度不同, 同一浸出时间下, 超声波对浸出率的强化作用效果也不同。随着浸出剂浓度的增大, 超声波对浸

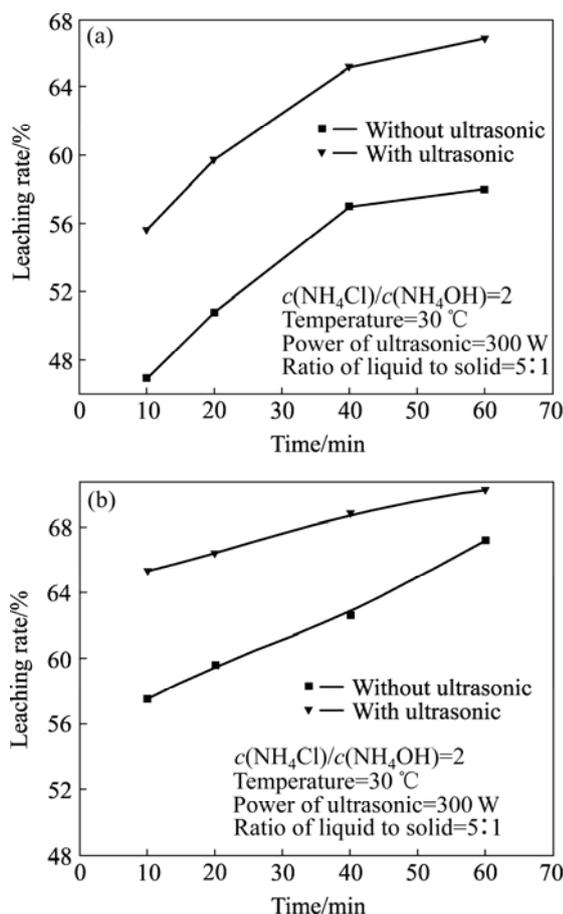


图 7 在不同 NH_4Cl 浓度下超声波对浸出率的影响

Fig.7 Effect of ultrasonic on leaching rate at different concentrations of NH_4Cl : (a) $c(\text{NH}_4\text{Cl})=4 \text{ mol/L}$; (b) $c(\text{NH}_4\text{Cl})=6 \text{ mol/L}$

出率的强化作用效果减弱, 当超声浸出时间为 60 min, $c(\text{NH}_4\text{Cl})$ 从 4 mol/L 增加到 6 mol/L 时, 浸出率由 6.8% 下降到 3.1%。因为用低浓度 NH_4Cl 作浸出剂时, 浸出剂的黏度较小, 容易产生空化泡^[13, 21], 而且在传质过程中能量损失也小, 利于超声波实现空化作用, 在固体颗粒附近空穴的不对称崩溃^[22]促进颗粒内扩散, 增加传质速率从而缩短反应时间。而 NH_4Cl 的浓度较高时, 浸出剂在固体颗粒表面扩散较快, 矿物中 Zn 与浸出剂接触发生反应速率也加快, 常规浸出率较高。同时, 高浓度溶液的表面张力和黏滞系数变大, “空化作用”远弱于在稀溶液中的“空化作用”。因此, 超声波强化浸出的效果没有低浓度时的效果明显。

2.2.4 NH_4Cl 与 NH_4OH 的摩尔浓度比对浸出率的影响

浸出剂中 $c(\text{NH}_4\text{Cl})=5 \text{ mol/L}$, 温度 30 °C, 液固比 5:1, 超声波功率 300 W, 超声时间 60 min, 调节 NH_4Cl 与 NH_4OH 的摩尔浓度比, 研究其比值不同时, 超声波对浸出过程的影响, 结果如图 8 所示。从图 8 中可知, NH_4Cl 与 NH_4OH 的摩尔浓度比对浸出率的影响较为显著。锌的浸出率随 NH_4Cl 与 NH_4OH 的摩尔浓度比值增大而显著降低, 而超声波对浸出过程强化程度随 NH_4Cl 与 NH_4OH 摩尔浓度比增大而增加。当 NH_4Cl 与 NH_4OH 的摩尔浓度比从 1:1 增加到 3:1 时, 浸出率从 0.4% 增加到 5.2%。随着 NH_4Cl 与 NH_4OH 的摩尔浓度比减小, 溶液中 NH_4OH 的浓度增加, 即溶液中可溶性氨气的含量增加, 由于溶解的气体是超声空化泡的形核质点^[21], 所以氨气的含量越高, 空化泡越容易形成, 超声空化作用越强, 即超声波强化浸出的效果越明显。

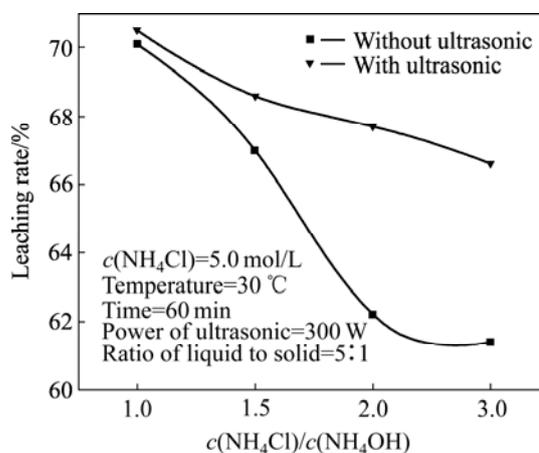


图 8 不同 $c(\text{NH}_4\text{Cl})/c(\text{NH}_4\text{OH})$ 比值下超声波对浸出率的影响

Fig.8 Effect of ultrasonic on leaching rate at different molar concentration ratios of NH_4Cl to NH_4OH

2.3 超声强化氨浸的选择性

当浸出剂中 $c(\text{NH}_4\text{Cl})=5 \text{ mol/L}$ 、 $c(\text{NH}_4\text{OH})=2.5 \text{ mol/L}$ 、温度 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 、液固比 5:1、超声波功率 300 W、浸出时间 60 min 时, 该工艺条件下浸出液的 ICP(等离子体光谱)分析结果如表 3 所列。

表 3 浸出液的成分分析

Table 3 Elemental compositions of leaching liquid

Element	Composition of leaching liquid/(mg·L ⁻¹)	
	Leaching without ultrasonic	Leaching with ultrasonic
Zn	2 125	2 345.8
Pb	1.1	1.2
Cd	25.8	28.3
Mn	0.9	0.9
Mg	1.3	1.1
Al	0.1	0.3
Fe	0.02	0.01
Ni	0.5	0.5
Ca	10.6	11.5
Cu	0.7	0.9

从表 3 中可以看出: 对于该工艺条件下常规浸出和超声强化浸出而言, 浸出液中杂质除 Cd、Ca 的含量相对稍高, 其它金属含量都很低, 所以 $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ 浸出体系对 Zn 具有较高的选择性。超声强化浸出与常规浸出的浸出液相比, 超声强化浸出显著地提高了浸出液中 Zn 的含量, 而其它金属杂质的含量增加很少, 所以超声波对金属锌强化浸出也具有选择性。

3 结论

1) 无超声波辐射时, $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ 体系浸出兰坪低品位氧化锌矿的最佳浸出条件为: $c(\text{NH}_4\text{Cl})=5.0 \text{ mol/L}$, $c(\text{NH}_4\text{OH})=2.5 \text{ mol/L}$, 液固比 5:1, 浸出时间 3 h, 温度 $30 \text{ }^\circ\text{C}$, 最大浸出率为 69.4%。在相同条件下, 超声波辐射显著缩短了浸出时间, 采用无超声波辐射时 Zn 的浸出率达到 61.8%需要 80 min, 而采用超声波辐射浸出时仅需 20 min。

2) 超声波强化氨浸低品位氧化锌矿过程对浸出

剂浓度、反应温度、 NH_4Cl 与 NH_4OH 的摩尔浓度比敏感。当反应温度较低、浸出剂浓度较低, NH_4Cl 与 NH_4OH 的摩尔浓度比较大时, 超声波在短时间内对锌浸出强化作用效果显著。因此, 超声波辐射可望降低氨浸低品位氧化锌矿的反应温度和浸出所需 NH_4OH 浓度, 大幅缩短浸出时间。

3) 超声强化氨浸对锌的浸出具有较高的选择性。

REFERENCES

- [1] 库建刚, 刘殿文, 张文彬. 氧化铜矿氨浸渣的综合回收试验[J]. 中国有色冶金, 2007, 36(4): 30-32.
KU Jian-gang, LIU Dian-wen, ZHANG WEN-bin. Experimental investigation on comprehensive utilization of the residue from oxide copper ores ammoniac leaching[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2007, 36(4): 30-32.
- [2] 方建军, 李艺芬, 鲁相林, 张文彬. 低品位氧化铜矿石常温常压氨浸工艺影响因素研究与工业应用结果[J]. 矿业工程, 2008, 28(3): 81-83.
FANG Jian-jun, LI Yi-fen, LU Xiang-lin, ZHANG Wen-bin. Effects and industry application of ammonia leaching of low copper oxide ore under normal temperature and pressure[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2008, 28(3): 81-83.
- [3] 尹飞, 阮书锋, 江培海, 王成彦, 陈永强. 低品位红土镍矿还原焙砂氨浸试验研究[J]. 矿冶, 2007, 16(3): 29-32.
YIN Fei, RUAN Shu-feng, JIANG Pei-hai, WANG Cheng-yan, CHEN Yong-qiang. Experimental study on roasted ore of poor nickeliferous laterite ore with ammonia leaching technology[J]. Mining and Metallurgy, 2007, 16(3): 29-32.
- [4] 王开毅, 蔡春林, 钱东, 李涛, 陈小毅, 赖德勇. 钴渣氨浸工艺的研究[J]. 稀有金属, 2001, 25(4): 312-314.
WANG Kai-yi, CAI Chun-lin, QIAN Dong, LI Tao, CHEN Xiao-yi, LAI De-yong. Studies on process for ammonia leaching of cobalt dregs[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2001, 25(4): 312-314.
- [5] 杨声海, 李英念, 巨少华, 唐漠堂. 用 NH_4Cl 溶液浸出氧化锌矿石[J]. 湿法冶金, 2006, 25(4): 179-182.
YANG Sheng-hai, LI Ying-nian, JU Shao-hua, TANG Mo-tang. Leaching of zinc oxide ore with ammonium chloride solution[J]. Hydrometallurgy of China, 2006, 25(4): 179-182.
- [6] 杨声海. Zn(II)- $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ 体系制备高纯锌理论及应用[D]. 长沙: 中南大学, 2003.
YANG Sheng-hai. Theory and application studies on preparing high purity zinc in the system of Zn(II)- $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ [D]. Changsha: Central South University, 2003.
- [7] 唐漠堂, 欧阳民. 硫铵法制取等级氧化锌[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(1): 118-121.
TANG Mo-tang, OUYANG Min. Preparation of grade zinc oxide

- by using ammonium sulfate and ammonia complex process[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1998, 8(1): 118–121.
- [8] FENG Lin-yong, YANG Xian-wan, SHEN Qing-feng, XU Ming-li, JIN Bing-jie. Pelletizing and alkaline leaching of powdery low grade zinc oxide ores[J]. *Hydrometallurgy*, 2007, 89(3/4): 305–310.
- [9] ZHAO Y, STANFORTH R. Production of Zn powder by alkaline treatment of smithsonite Zn-Pb ores[J]. *Hydrometallurgy*, 2000, 56(2): 237–249.
- [10] SUSLICK K S, HYEON T, FANG M. Sonochemical synthesis of nanostructured catalysts[J]. *Mater Sci Eng A*, 1995, 204(1/2): 186–192.
- [11] PARAG K, ASHOKKUMAR M, GRIESER F. Sonoluminescence, sonochemistry (H_2O_2 yield) and bubble dynamics: Frequency and power effects[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2008, 15(2): 143–150.
- [12] SAYAN E, BAYRAMOGLU M. Statistical modeling and optimization of ultrasonic-assisted sulfuric acid leaching of TiO_2 from red mud[J]. *Hydrometallurgy*, 2004, 71(3/4): 397–401.
- [13] ÖNCEL M S, İNCE M, BAYRAMOĞLU M. Leaching of silver from solid waste using ultrasound assisted thiourea method[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2005, 12(3): 237–242.
- [14] TEKIN T. Use of ultrasound in the dissolution kinetics of phosphate rock in HCl[J]. *Hydrometallurgy*, 2002, 64(3): 187–192.
- [15] GRÉNMAN H, MURZINA E, RÖNNHOLM M, ERÄNEN K, MIKKOLA J P, LAHTINEN M, SALMI T, MURZI Y D. Enhancement of solid dissolution by ultrasound[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2007, 46(9): 862–869.
- [16] ZHANG Jie, WU Ai-xiang, WANG Yi-ming, CHEN Xue-song. 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.
- [17] 孙家寿, 罗惠华, 齐振龙. 超声波作用下 $FeCl_3$ 浸出硫化铜精矿的研究[J]. *湿法冶金*, 1999, 69(1): 22–24.
- SUN Jia-shou, LUO Hui-hua, QI Zhen-long. Ultrasonic intensified leaching of zinc sulphide concentrate in $FeCl_3$ -HCl solution[J]. *Hydrometallurgy of China*, 1999, 69(1): 22–24.
- [18] BEŞE A V. Effect of ultrasound on the dissolution of copper from copper converter slag by acid leaching[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2007, 14: 790–79.
- [19] AVVARU B, ROY S B, LADOLA Y, CHOWDHURY S, HAREENDRAN K N, PANDIT A B. Sono-chemical leaching of uranium[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2008, 47(12): 2107–2113.
- [20] HAGENSON L C, DORAISWAMY L K. Comparison of the effects of ultrasound and mechanical agitation on a reacting solid-liquid system[J]. *Chemical Engineering Science*, 1998, 53(1): 131–148.
- [21] THOMPSON L H, DORAISWAMY L K. Sonochemistry: Science and engineering[J]. *Ind Eng Chem Res*, 1999, 38(4): 1215–1249.
- [22] BALASUBRAHMANYAM A, ROY S B, CHOWDHURY S, HAREENDRAN K N, PANDIT A B. Enhancement of leaching rate of uranium in presence of ultrasound[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2006, 45(22): 7639–7648.

(编辑 李向群)