

采用赤铁矿去除高铁闪锌矿浸出液中的铁

杨凡, 邓志敢, 魏昶, 李存兄, 李兴彬

(昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 昆明 650093)

摘要: 研究从高铁闪锌矿溶液中沉淀赤铁矿的过程。考察温度、晶种用量、时间、氧分压对除铁及杂质元素行为的影响。结果表明: 除铁率和渣中铁含量随温度、时间、晶种用量的增加而升高, 与氧分压关系不大。升高温度和延长反应时间可以提高赤铁矿的纯度。在反应温度 190 °C、晶种用量 20 g/L、反应时间 3 h 和氧分压 0.3 MPa 的条件下除铁率达到 95% 以上, 除铁后溶液 Fe 含量低于 2.5 g/L, 赤铁矿渣的 Fe 含量高于 50%。K 和 Ca 的入渣率高于 95%, Na、F 和 Ni 的入渣率为 50%~60%, Zn、Mg、Mn 和 Cl 的入渣率低于 1%。

关键词: 高铁闪锌矿; 赤铁矿; 除铁; 湿法炼锌

中图分类号: TF813

文献标志码: A

Iron-removal by hematite from leaching liquor of high iron sphalerite

YANG Fan, DENG Zhi-gan, WEI Chang, LI Cun-xiong, LI Xing-bin

(Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The precipitation process of hematite from the leaching liquor of high iron sphalerite was studied. The effects of temperature, seed addition, time and oxygen partial pressure on the iron precipitation and the behavior of impurities during the process were investigated. The results show that the iron removal rate and iron content of the residue increase with the increase of temperature, time and seed addition, and are independent of oxygen partial pressure. Increasing temperature and prolonging time can improve the purity of hematite. The iron removal rate is larger than 95% at temperature of 190 °C, seed addition of 20 g/L, time of 3 h and oxygen partial pressure of 0.3 MPa. Iron content of precipitate is larger than 50% and purified solution contains Fe below 2.5 g/L. More than 95% of K and Ca and 50%~60% of Na, F and Ni co-precipitate with hematite, less than 1% of Zn, Mg, Mn and Cl remain in the residue.

Key words: high iron sphalerite; hematite; iron removal; zinc hydrometallurgy

随着锌矿资源的不断开发和利用, 高品质锌矿资源逐渐枯竭。高铁闪锌矿的开发利用引起人们的广泛关注。如何从浸出渣里提取更多有价金属, 综合利用稀散金属镉以及高铁闪锌矿中的铁已成为当今湿法炼锌的重要课题。在采用传统湿法炼锌工艺处理高铁闪锌精矿时, 中性浸出阶段锌的浸出率低于 80%^[1-2], 为提高锌的总回收率, 开发了热酸浸出工艺。采用中和水解法处理高铁溶液时会产生大量氢氧化铁胶体, 无法浓缩与过滤, 造成铁资源的流失, 同时胶体将吸附有价金属离子, 造成浪费。为除去热酸浸出液中的铁, 衍生出了黄钾铁矾法、针铁矿法和赤铁矿法等生产工艺。

常规铁矾法存在渣量大、渣中铁含量低的问题,

且渣中含有大量的 Pb、Cd、As 和 Zn 等有害元素, 易造成环境污染^[3-4]。针铁矿法适合处理铁含量较低的原料, 在处理高铁闪锌矿浸出液时产生的渣量也较大。相比之下, 赤铁矿法虽然存在设备成本昂贵, 维修费用较高的问题, 但该方法在处理高铁闪锌矿时可以将浸出液中的 Zn 和 Fe 有效分离和回收利用, 得到的铁渣稳定性强、铁量含量高、锌量含低、渣量少, 能有效解决渣的堆放问题。且在回收有价金属 In、Cu 等方面存在着巨大的优势及可行性, 因此, 赤铁矿法在环保问题日益凸显的今天尤为有发展前景^[5-6]。

赤铁矿渣的诸多优点使其具有极大的潜力作为副产品销售给炼钢、水泥制造以及涂料行业。因此, 研

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2014CB643404); 国家自然科学基金资助项目(51364022)

收稿日期: 2014-01-02; **修订日期:** 2014-03-15

通信作者: 魏昶, 教授, 博士; 电话: 0871-65188819; E-mail: weichang502@sina.cn

究赤铁矿法处理高铁闪锌矿浸出液得到铁含量高的赤铁矿渣,具有保护生态环境和提高资源综合利用率的双重意义。

1 实验

1.1 实验原料

实验所用高铁闪锌矿取自云南,高铁闪锌矿溶液分别回收 In、Cu 后作为除铁原料,其主要化学成分如表 1 所列。原料存在 Fe 含量高,金属离子 Na、K 含量高,有价金属 Cu、In 等含量低等特点。

表 1 浸出液主要化学成分

Table 1 Chemical composition of leach liquor (mass concentration, g/L)

Fe	Zn	Cu	In	As
37.4	80.8	1.04×10^{-3}	8.4×10^{-3}	0.002
Mg	F	K	Na	Cl
15.2	0.05	0.45	1.21	0.31
Ni	Co	Si	Mn	Ca
3.87×10^{-3}	3.03×10^{-3}	0.04	3.01	0.1

1.2 实验步骤

采用 0.5L-GSH 型高压釜(材质为 1Cr18Ni9Ti-TA2)作为反应容器。将 0.2 L 高铁溶液加入高压釜内,添加晶种(分析纯 Fe_2O_3),连接供气设备后检查气密性。调节氧分压大小,加热电压 200 V,搅拌转速 600 r/min,维持反应温度的变化范围在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。达到反应时间后快速降温,用旋片型真空泵(型号为 2XZ-4)取出矿浆抽滤过滤,滤液量后保存,取等滤液体积的去离子水洗渣。滤渣在 101-I 型电热鼓风干燥箱内烘干 48 h(干燥温度 55°C)。

1.3 分析与检测

采用 X 射线衍射仪(型号为 D/max-2200)对赤铁矿渣的晶体结构进行表征。采用扫描电子显微镜(型号为 VEGA 3 SBH)对赤铁矿渣的形貌进行表征。取赤铁矿渣和滤液送云南省分析测试中心测定相关元素的含量,对除铁率进行计算及元素含量进行分析。除铁率计算式为

$$\eta = [1 - (C_2 V_2 / C_1 V_1)] \times 100\% \quad (1)$$

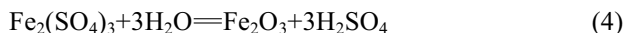
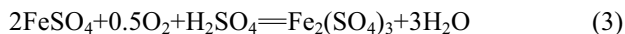
式中: η 为除铁率,%; C_1 为浸出液中铁离子浓度, g/L; C_2 为滤液中铁离子浓度, g/L; V_1 为浸出液体积, L; V_2 为滤液体积, L。

1.4 实验原理

赤铁矿法除铁的化学反应为



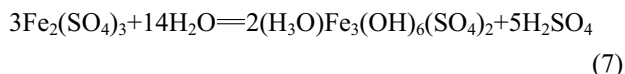
式(2)主要由两部分组成



式(2)进行的条件是氧气的溶解和硫酸亚铁结晶的返溶



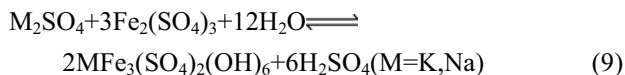
溶液体系中 H^+ 浓度决定水解产物的类型,低酸浓度下的水解产物是 Fe_2O_3 ,中等酸浓度下存在如下反应:



高酸浓度下存在如下反应:



当溶液中有 Na、K 离子时存在如下反应:



式(7)~(9)以及硫酸根的不可逆吸附^[7]是渣相中 S 含量的主要来源,高温时式(9)可按照收缩核模型^[8]逆向进行。

硫酸锌是铁离子沉淀时最重要的共存硫酸盐,可以降低体系中 H^+ 的活度并扩大 Fe_2O_3 稳定存在的范围^[9],铜盐和镁盐与锌盐有相同的效果。影响赤铁矿沉淀的动力学因素有 $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 的返溶速率、 Fe^{2+} 的氧化速率和 Fe^{3+} 的水解速率,溶液中的 Cu^{2+} 对 Fe^{2+} 的氧化有促进作用^[10]。

2 结果与讨论

2.1 除铁条件实验

采用单因素试验方法,考察温度、晶种用量、时间和氧分压 4 个条件对高铁溶液除铁的影响。

2.1.1 温度的影响

实验条件如下:反应时间 3 h、氧分压 0.4 MPa、晶种用量 10 g/L、搅拌速度 600 r/min、初始溶液 pH 值 3.4,改变反应温度,考察温度对除铁的影响。实验结果如表 2 所列。

表 2 反应温度对除铁的影响

Table 2 Effect of reaction temperature on iron removal

Temperature/°C	Final solution H ⁺ concentration/(mol·L ⁻¹)	Fe concentration in final solution/(g·L ⁻¹)	Fe content in precipitate/%	S content in precipitate/%	Precipitation rate of Fe/%
160	0.32	3.65	43.9	8.41	89.93
170	0.40	3.5	45.28	8.02	90.14
180	0.45	3.3	49.16	7.66	90.37
190	0.52	2.2	49.52	6.89	92.94
200	0.56	2.1	49.91	6.47	93.31

由表 2 可见,除铁后溶液中的 H⁺浓度随温度升高而增加,说明更多的铁被沉淀出来,升高温度可以有效地提高亚铁离子氧化水解的速率。当温度由 160 ℃升高至 200 ℃时,渣中铁含量显著升高,杂质硫的含量明显降低,渣的颜色变为深红。170、180 和 190 ℃下产物的 XRD 谱如图 1 所示。

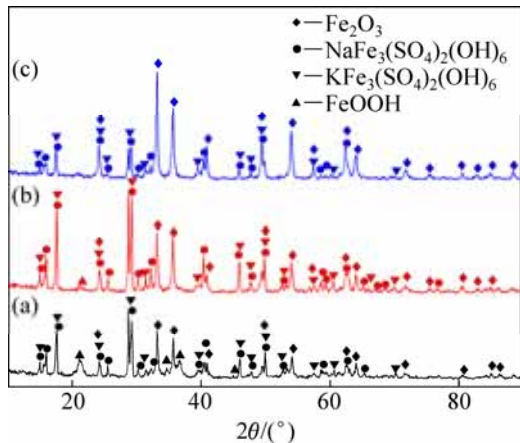


图 1 不同温度下得到的赤铁矿渣的 XRD 谱

Fig. 1 XRD patterns of hematite residues produced at various temperatures: (a) 170 ℃; (b) 180 ℃; (c) 190 ℃

由图 1 可知,温度对渣型有显著影响,当温度低于 180 ℃时产物以赤铁矿、铁矾和针铁矿为主,当温度高于 180 ℃时铁矾和针铁矿的衍射峰强度明显减弱,产物以赤铁矿为主。随着温度的升高赤铁矿衍射峰变窄,说明升高温度有助于提高赤铁矿的结晶度,这与 RUIZ 等^[6]采用 5 g/L 的纯溶液沉淀赤铁矿时得出的结论一致。在处理高铁溶液时,升高温度可以破坏部分铁矾和针铁矿的晶格,产出更纯净的赤铁矿渣。但是随着反应温度的升高,会带来经济成本的增加。日本秋田市饭岛冶炼厂的实际运行情况表明:反应温度由 195 ℃降低至 185 ℃时可以减少蒸汽耗量,提高处理能力^[11]。因此,选择反应温度为 190 ℃。

2.1.2 晶种用量的影响

实验条件如下:反应温度 190 ℃、反应时间 3 h、

氧分压 0.4 MPa、搅拌速度 600 r/min、初始溶液 pH 值 3.4。改变晶种的加入量,考察晶种用量对除铁的影响,结果如图 2 所示。

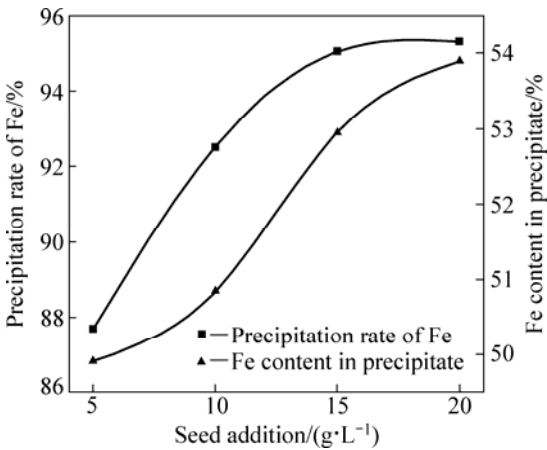


图 2 晶种用量对除铁率和渣中铁含量的影响

Fig. 2 Effects of seed addition on precipitation rate of Fe and iron content in precipitate

由图 2 可见,晶种用量低于 15 g/L 时,增加晶种用量可以有效提高除铁率,说明赤铁矿颗粒的形核长大机理与晶种的存在密切相关。当 Fe³⁺的饱和度低于均相成核的临界饱和度时,赤铁矿在晶种表面的增长速率占主导地位^[12-13],增加晶种用量可以为赤铁矿的生长提供更多的面积。当 Fe³⁺的饱和度大于均相成核的临界饱和度时,继续增加晶种用量将不会对除铁率产生显著影响,此时亚稳态相如铁矾和针铁矿将会生成,亚稳态相的生成需要更长的反应时间转化为赤铁矿,从而影响到渣中的铁含量。DUTRIZAC^[14]在研究铁矾渣向赤铁矿转化时发现:当晶种用量超过赤铁矿渣量的 100%后继续增加晶种用量的作用甚微。考虑到渣中的铁矾通过均相成核形成,颗粒较小、含量较低,因此,选择最佳晶种用量为 20 g/L。

2.1.3 反应时间的影响

实验条件如下:氧分压 0.4 MPa、晶种用量 20 g/L、搅拌速度 600 r/min、初始溶液 pH 值 3.4。在不同温度

下改变反应时间, 考察反应时间对除铁率的影响, 结果如图 3 所示。

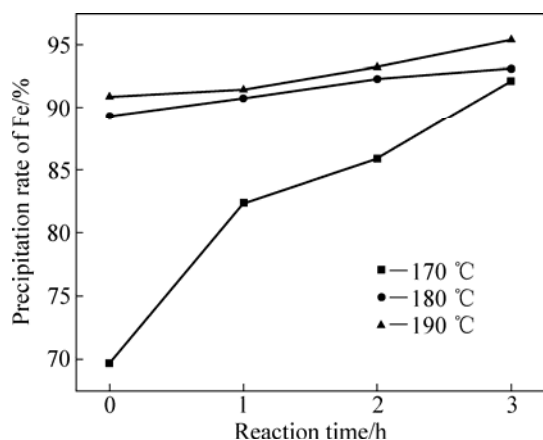


图 3 反应时间对除铁率的影响

Fig. 3 Effect of reaction time on precipitation rate of Fe

由图 3 可见, 当温度高于 180 °C 后除铁率随时间的变化不明显。190 °C 时反应时间由 1 h 延长至 3 h 时, 除铁率由 91.48% 升高至 95.44%, 渣中铁含量由 47.01% 升高至 52.12%, 渣中硫含量由 7.21% 降低至 4.62%。190 °C 时反应时间为 0、1、2 和 3 h 下产物的 XRD 谱见图 4。

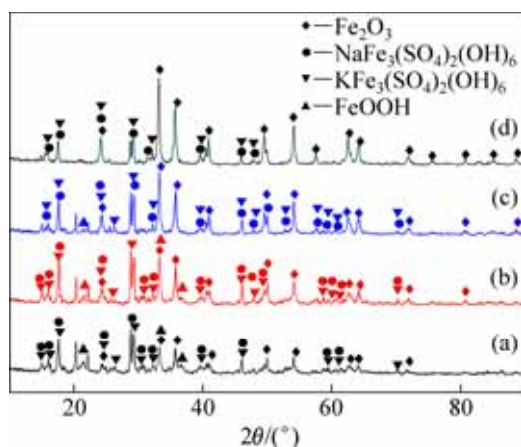


图 4 不同反应时间得到赤铁矿渣的 XRD 谱

Fig. 4 XRD patterns of hematite residues produced at various times: (a) 0 h; (b) 1 h; (c) 2 h; (d) 3 h

由图 4 可见, 延长反应时间可以得到更纯净的赤铁矿渣。当溶液中有钾、钠离子时, 渣相中不可避免地会有铁矾渣的生成。铁矾渣主要形成于加热阶段, 反应进行 1 h 后开始转化, 反应 3 h 后渣中的铁矾含量明显降低。

190 °C 下不同反应时刻产物中的钾、钠离子的含量见图 5。

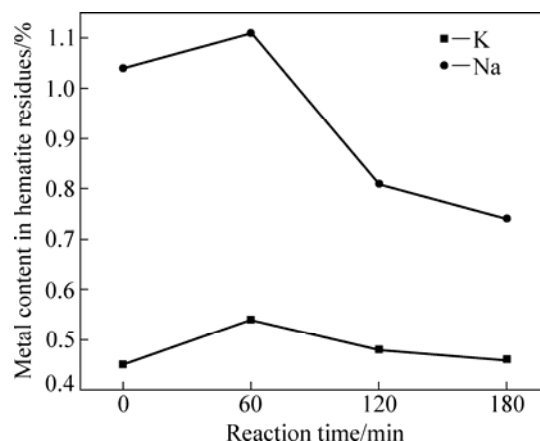


图 5 反应时间对赤铁矿渣中 K 和 Na 含量的影响

Fig. 5 Effect of reaction time on contents of K and Na in hematite residues

由图 5 可见, 从开始计时至反应 3 h 后, K 在渣中的含量稳定为 0.45%, K 的入渣率在 95% 左右。Na 含量由 1.04% 降低至 0.74%, Na 的入渣率由 66.2% 降低至 47.1%。说明钾铁矾较钠铁矾稳定^[15]。190 °C 下反应 3 h 可以转化大部分的钠铁矾, 实验证实了高温下对铁矾渣转化的可能性。LIU 等^[16]采用赤铁矿法处理铁离子浓度为 25 g/L 的物料时, 在 180 °C 下反应 15 min 后获得了较高的除铁率, 说明处理复杂物料时反应时间会对渣型产生显著影响。为得到更纯净的赤铁矿渣、获得较高除铁率的同时减少设备负荷及能耗, 确定反应时间为 3 h。

2.1.4 氧分压的影响

实验条件如下: 反应温度 190 °C、反应时间 3 h、晶种用量 20 g/L、搅拌速度 600 r/min、初始溶液 pH 值 3.4。改变氧分压大小, 考察氧分压对除铁的影响, 结果如图 6 所示。

由图 6 可见, 当氧分压高于 0.2 MPa 后, 除铁率基本保持在 95% 以上, 除铁后溶液 Fe 含量在 2.1 g/L 左右。反应(2)属于典型的气-液界面反应, 氧气在电解质中的溶解度可能影响氧化反应的进行。TROMANS^[17]对纯净水中氧气的溶解度进行了研究, 结果表明: 溶解度随氧分压的升高而增加, 其关系式见式(10)。已有的研究表明: 电解质对氧气的溶解度会产生负面影响。

$$c_{O_2}^* = \frac{p_{O_2}}{101325} \exp\{[0.046T^2 + 203.357T \ln(T/298) - (299.379 + 0.092T)(T - 298) - 20591]/(RT)\} \quad (10)$$

式中: $c_{O_2}^*$ 为氧气的溶解度, mol/L; p_{O_2} 为氧气分压,

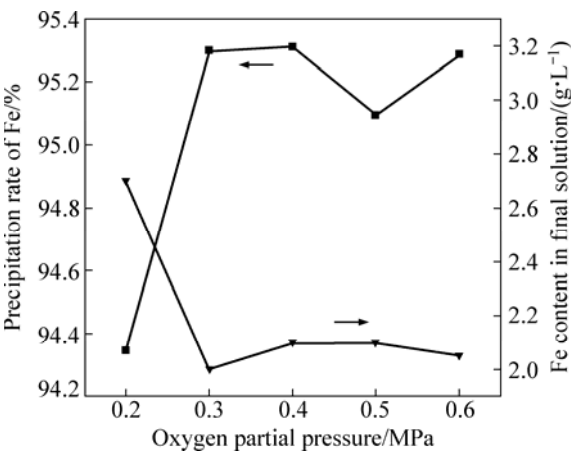


图 6 氧分压对除铁的影响

Fig. 6 Effect of oxygen partial pressure on iron precipitation

Pa; T 为热力学温度, K。

实际溶液中氧的溶解度低于式(10)的值。随着溶液中氧溶解度的增大, 除铁率没有明显提高, 当氧分压低于 0.3 MPa 时, 滤液中铁离子浓度相对偏高, 不足以制约除铁反应的进行, 说明氧的溶解度不会影响亚铁离子氧化水解的速率。氧分压由 0.2、0.3、0.4 和 0.5 MPa 升高至 0.6 MPa 时, 渣中铁含量分别为 51.17%、52.3%、52.4%、52.48%和 52.43%。说明氧的溶解度不会影响铁离子氧化水解产物的特征。CHENG^[10]研究了 200 ℃下氧化水解硫酸亚铁时氧分压的影响, 结果表明: 氧分压由 0.1 MPa 升高至 0.4 MPa 时, 除铁溶液及赤铁矿渣均未发生明显变化。因此, 选择氧分压为 0.3 MPa。

2.2 最佳除铁条件

根据单因素条件实验结果, 得出最佳除铁条件如下: 反应温度 190 ℃、晶种用量 20 g/L、反应时间 3 h、氧分压 0.3 MPa。为检验各最佳参数的实际效果, 取 1 L 浸出液采用上述实验条件在 2L-GSH 型高压釜(材质为 1Cr18Ni9Ti-TA2)内进行 3 组综合验证实验, 结果如表 3 所列。由表 3 可知: 在最优条件下, 除铁率可达 95%以上, 渣中铁含量高于 50%, 除铁后溶液铁含量低于 2.5 g/L。

2.3 赤铁矿渣的 SEM 像

在溶液初始 pH 值 3.4、温度 190 ℃、晶种用量 20 g/L、氧分压 0.3 MPa、搅拌速度 600 r/min 的条件下反应 3 h 得到的赤铁矿渣呈深砖红色, 对其进行 SEM 分析, 结果如图 7 所示。

由图 7 可见, 赤铁矿渣的形貌由球状颗粒(左侧)

表 3 优化条件下综合验证实验结果

Table 3 Confirmatory experiment results under optimum conditions

Experiment No.	Precipitation rate of Fe/%	Fe content in hematite residue/%	Fe content in final solution Fe/(g·L ⁻¹)
1	95.28	51.89	2.4
2	95.46	52.47	2.2
3	95.27	52.35	2.3
Average	95.33	52.24	2.3

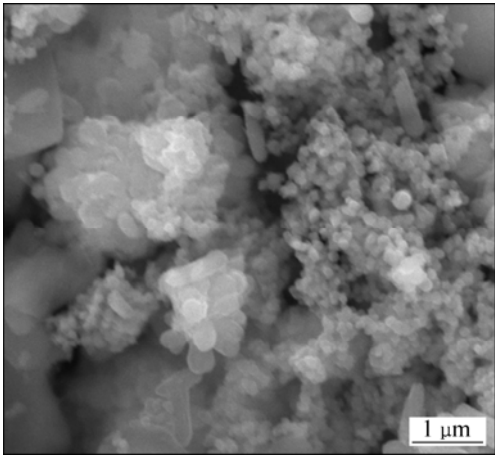


图 7 赤铁矿渣的 SEM 像

Fig. 7 SEM image of hematite residue

和亚微米尺寸的聚合物(右侧)构成。球状颗粒直径为 1~2 μm, 其表面分布的纺锤状晶体可能是在晶种上长大的赤铁矿, 亚微米尺寸的聚合物可能是通过均相成核得到的晶体。

2.4 主要化学元素分析

为进一步了解除铁前后元素的分布情况, 对综合验证实验 3 号赤铁矿渣进行化学元素分析, 结果如表 4 所列。

产渣量 94 g/L(包括晶种), 由表 4 可见, 元素 Zn 的入渣率低于 1%, In 的入渣率在 37%左右, Mg 的入渣率低于 0.1%, F 的入渣率 66%, Cl 的入渣率低于

表 4 赤铁矿渣主要化学元素分析

Table 4 Chemical compositions of hematite residue (mass fraction,%)

Fe	Zn	Cu	In	As	Mg	F	K
52.3	0.54	<0.001	33 ¹⁾	<0.01	0.015	0.035	0.47
Na	Cl	Ni	Co	Mn	S	Ca	
0.65	<0.001	0.002	0.002	0.005	4.82	0.101	

1) g/t.

1%, Mn 的入渣率低于 0.2%, Ni 的入渣率约为 50%, K、Ca 的入渣率高于 95%, Na 的入渣率约 50%, 假设渣中的 K、Na 全部以铁矾的形式存在, 则渣中 50% 左右的 S 以铁矾的形式存在。

3 结论

1) 采用赤铁矿法处理高铁闪锌矿浸出液的最佳条件如下: 反应温度 190 °C、反应时间 3 h、氧分压 0.3 MPa、晶种用量 20 g/L。在此条件下, 可以达到 95% 以上的除铁率, 渣中铁含量高于 50%, 渣含硫中硫含量低于 5%, 除铁后溶液 Fe 含量低于 2.5 g/L。

2) Na 和 K 的存在导致铁矾渣的生成, 通过提高反应温度、延长反应时间可以实现部分铁矾渣的转化, 得到更纯净的赤铁矿渣。

3) 有价金属 In、Cu 在除铁之前已经回收, 杂质 As 的含量低于 0.01%, 不会污染赤铁矿渣。大部分 Ca 进入渣相, Zn、Mg、Mn 和 Cl 基本不进入渣相。一部分 Ni 和 F 进入渣中, 如何实现赤铁矿除铁过程中部分 F 的去除有待进一步研究。

REFERENCES

- [1] 王吉坤, 李存兄, 李 勇, 张红耀, 黄 卉, 阎江峰, 刘 露, 魏 昶. 高铁闪锌矿高压酸浸过程中 ZnS-FeS-H₂O 系的电位-pH 图[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2006(2): 2-5.
WANG Ji-kun, LI Cun-xiong, LI Yong, ZHANG Hong-yao, HUANG Hui, YAN Jiang-feng, LIU Lu, WEI Chang. The ϵ -pH figure of ZnS-FeS-H₂O system during acid leaching under pressure of high iron sphalerite[J]. Nonferrous Metal: Extractive Metallurgy, 2006(2): 2-5.
- [2] 王纪明, 彭 兵, 柴立元, 李 密, 彭 宁. 锌浸渣还原焙烧-磁选回收铁[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(5): 1455-1461.
WANG Ji-ming, PENG Bing, CHAI Li-yuan, LI Mi, PENG Ning. Recovery iron from zinc leaching residues by reduction roasting and magnetic separation process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(5): 1455-1461.
- [3] JU Shao-hua, ZHANG Yi-fei, ZHANG Yi, WANG Yi-hui. Clean hydrometallurgical route to recover zinc, silver, lead, copper, cadmium and iron from hazardous jarosite residues produced during zinc hydrometallurgy[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192(2): 554-558.
- [4] 何 静, 罗 超, 唐谟堂, 鲁君乐, 王小能, 王 涛. 采用铅黄铁矾去除硫酸体系中的铁[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(10): 2890-2895.
HE Jing, LUO Chao, TANG Mo-tang, LU Jun-yue, WANG Xiao-neng, WANG Tao. Technique of ferrum-removal by lead jarosite from sulfuric acid solution[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(10): 2890-2895.
- [5] 岳 明, 孙宁磊, 邹 兴, 邵建春, 刘金山, 王魁挺, 陆业大. 锌浸出液三价铁直接水解赤铁矿法除铁的探讨[J]. 中国有色冶金, 2012, 41(4): 80-85.
YUE Ming, SUN Ning-lei, ZOU Xing, SHAO Jian-chun, LIU Jin-shan, WANG Kui-ting, LU Ye-da. The discussion on hydrolysis precipitation of ferric oxide directly from ferric-ion rich zinc leachate[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2012, 41(4): 80-85.
- [6] RUIZ M C, ZAPATA J, PADILLA R. Effect of variables on the quality of hematite precipitated from sulfate solutions[J]. Hydrometallurgy, 2007, 89(2): 32-39.
- [7] TURNER L J, KRAMER J R. Sulphate ion binding on goethite and hematite[J]. Soil Science, 1991, 152(3): 226-230.
- [8] 陈家镛, 余淑秋, 伍志春. 湿法冶金中铁的分离与利用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991.
CHEN Jia-yong, YU Shu-qiu, WU Zhi-chun. Separation and utilization of iron in hydrometallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1991.
- [9] UMETSU V, TOZAWA K, SASAKI K. The hydrolysis of ferric sulphate solutions at elevated temperatures[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1977, 16(1): 111-117.
- [10] CHENG T C M. Production of hematite in acidic zinc sulphate media[D]. Montreal: McGill University, 2002: 246-252.
- [11] ARIMA H, AICHI T, KUDO Y, SARUTA K, KANNO M, TOGASHI R. Recent improvement in the hematite precipitation process at the Akita Zinc Company[C]// DUTRZAC J E, RIVEROS P A. Iron Control Technologies. Montreal: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2006: 123-134.
- [12] CHENG T C M, DEMOPOULOS G P. Analysis of the hematite precipitation process from a crystallization point of view[C]// MISHRI B. Proceedings of EPD Congress. Warrendale: TMS, 1997: 599-617.
- [13] CLAASSEN J O, SANDENBERGH R F. Particle growth parameters in the precipitation of metastable iron phases from zinc-rich solutions[J]. Hydrometallurgy, 2006, 84(3): 165-174.
- [14] DUTRIZAC J E. Converting jarosite residues into compact hematite products[J]. JOM, 1990, 42(1): 36-39.
- [15] 邹学功. 黄钾铁矾除铁理论分析[J]. 冶金丛刊, 1998(6): 18-20.
ZOU Xue-gong. Theoretical analysis of jarosite method[J]. Metallurgical Collections, 1998(6): 18-20.
- [16] LIU Chen, HE Hang-jun, LIANG Duo-qiang, SU Peng, LUO Chao-wei, LI Ting, LIU Ze. Removal of iron in hot acid leach liquor by hematite process[J]. Advanced Materials Research, 2012, 581: 731-734.
- [17] TROMANS D. Temperature and pressure dependent solubility of oxygen in water: A thermodynamic analysis[J]. Hydrometallurgy, 1998, 48(3): 327-342.

(编辑 陈卫萍)