

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2022.11.009

湿法炼锌净化钴渣氧化沉淀法分离回收钴镍

白鹏辉, 张旭, 刘锦, 肖祥, 刘梦宇, 张云彭

(昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 昆明 650093)

摘要:针对湿法炼锌产生的多金属钴渣,采用一段硫酸浸出—二段高钴渣中和进行处理,所得含钴较高的浸出液依次采用过氧化氢氧化除铁、锌粉置换除镉、除镍试剂除镍、过硫酸钠选择性氧化除锰、过硫酸钠氧化沉钴处理,实现渣中镉、钴、镍、锌的分离回收。结果表明:在硫酸浓度150 g/L、温度80℃、浸出时间120 min的最佳酸浸条件下,浸出液中镉、镍均可除至0.1 mg/L以下,镉渣中镉含量高达57.61%,镍渣含镍10.74%,过硫酸钠沉钴率达到99.98%,钴渣含钴49.75%,沉钴后液返回湿法炼锌生产系统可回收金属锌,实现渣中金属资源的分离回收。

关键词:湿法炼锌;高钴渣;氧化沉淀;钴;镍;回收

中图分类号:TF813

文献标志码:A

文章编号:2095-1744(2022)11-0060-07

Recovery of Cobalt and Nickel from Zinc Hydrometallurgy Purified Cobalt Residue by Oxidation Precipitation Method

BAI Penghui, ZHANG Xu, LIU Jin, XIAO Xiang, LIU Mengyu, ZHANG Yunpeng

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

Abstract: The multi metal cobalt residue produced by zinc hydrometallurgy is treated by primary sulfuric acid leaching and secondary high cobalt residue neutralization. The leachate with high cobalt content is successively treated by hydrogen peroxide oxidation to remove iron, zinc powder replacement to remove cadmium, nickel removal reagent to remove nickel, sodium persulfate selective oxidation to remove manganese, and sodium persulfate oxidation to deposit cobalt, to realize the separation and recovery of cadmium, cobalt, nickel and zinc in the residue. The results show that under the optimal acid leaching conditions of sulfuric acid concentration of 150 g/L, temperature of 80℃, leaching time of 120 min, cadmium and nickel in the leaching solution can be removed to less than 0.1 mg/L, the content of cadmium in the cadmium residue is as high as 57.61%, the content of nickel in the nickel residue is 10.74%, the rate of cobalt precipitation by sodium persulfate is 99.98%, and the content of cobalt in the cobalt residue is 49.75%. The liquid after cobalt precipitation can be returned to the zinc hydrometallurgy production system to recover metal zinc and realize the separation and recovery of metal resources in the residue.

Key words: zinc hydrometallurgy; high cobalt slag; oxidation precipitation; cobalt; nickel; recovery

收稿日期:2022-04-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52064031)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(52064031)

作者简介:白鹏辉(1996—),男,硕士研究生,研究方向为湿法冶金。

通信作者:张旭(1961—),男,副教授,研究方向为湿法冶金及冶金分析。

引用格式:白鹏辉,张旭,刘锦,等.湿法炼锌净化钴渣氧化沉淀法分离回收钴镍[J].有色金属工程,2022,12(11):60-66.

BAI Penghui, ZHANG Xu, LIU Jin, et al. Recovery of Cobalt and Nickel from Zinc Hydrometallurgy Purified Cobalt Residue by Oxidation Precipitation Method[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(11): 60-66.

钴、镍是重要的战略金属,在工业中占居重要地位,但我国钴资源比较匮乏,我国的钴主要从 Ni^{2+} 回收系统中回收,从锌精矿及废旧金属物料也可回收少量钴^[1-3],其余钴及钴产品都是从进口原料和含钴物料中提取,充分利用我国的钴资源具有重要意义。

在湿法炼锌过程中,加入锌粉和铈盐置换的钴渣一般含锌 60%~70%,含钴 0.9%~12%,同时含有氧化锌、硫酸锌、硫酸镍、少量的铁、锰、镉,经过控制 pH 值溶出锌后成为高镍钴渣^[4],这种高镍钴渣在工业上很难用湿法处理,通常进入回转窑只回收其中的锌,造成钴资源的浪费^[5]。目前,对于高钴原料中钴的回收方法主要有氧化沉淀法、选择性酸浸法、氨-铵盐浸出法和溶剂萃取法等^[6-9]。张红菊等^[10]从镍钴渣中回收钴和锰的研究表明,镍钴渣经中浸、酸浸、除铁之后,加入钴锰量 1.75 倍的高锰酸钾,在 80~85 ℃反应 2 h,中和 pH 值为 4.5~5.0,所得产物中的钴含量相较于镍钴渣中的钴提高了 25~35 倍。李强等^[11]采用 P204 为萃取剂,磺化煤油为稀释剂,研究发现在 P204 体积分数为 10%,按

相比 1/1 与 pH 值为 3.5 的净化钴渣二次酸浸液进行混合,经过四级错流萃取,可将钴渣中 97% 以上的锌、镉、铁去除,而钴损失率低于 5%。韩桂洪等^[12]认为,选择性酸浸法钴镍分离较差,需其他工艺进一步回收钴;氨-铵盐浸出法浸出时间长、操作环境差且对设备腐蚀性较大;溶剂萃取法除杂效果较好但有机溶剂成本较高、流程比较复杂且油水分分离不彻底。随着新能源产业的快速发展,钴的需求越来越多,对湿法炼锌净化钴渣进行经济环保利用显得尤为迫切。本文以某湿法炼锌厂副流程回收系统产出的高钴渣为原料,用稀硫酸溶液将高钴渣中的锌、钴、镍、铁、锰、镉等金属浸出至溶液,对浸出液中的金属离子进行分离回收,探索使用方便、分离效果好的工艺流程。

1 试验

1.1 原料

试验用高钴渣为某厂湿法炼锌过程中产出的高钴净化渣,含水率 42.16%,经过干燥后所得干渣中主要金属的质量分数(金属含量)见表 1。

表 1 高钴渣的主要金属元素含量

Elements	Zn	Pb	Cu	Co	Ni	Fe	Cd	Mn
Contents	38.59	18.18	11.12	10.9	1.02	3.96	0.98	0.45

1.2 分析方法

用 Titrand809 自动电位滴定仪滴定分析 Fe^{2+} 含量,用 UV-1601 紫外可见分光光度计测定高浓度 Co^{2+} 和 Ni^{2+} 含量,用 AA-6300 原子吸收分光光谱仪测定 Mn^{2+} 含量,用微分脉冲伏安极谱仪测定低浓度 Co^{2+} 和 Ni^{2+} 含量。用 Titrand809 自动电位滴定仪测定 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 含量。高浓度 Co^{2+} 和 Ni^{2+} 具体检测方法参照《分光光度法和光度滴定法联合测定湿法炼锌流程中钴渣浸出液中锌钴镍》^[13]。

2 结果与讨论

2.1 酸性浸出

浸出包括一段酸性浸出和二段中和浸出,通过单因素条件控制试验考察硫酸浓度、反应温度、反应时间对浸出率的影响,探索最优酸浸条件。

2.1.1 硫酸浓度对钴浸出率的影响

确定浸出温度为 85 ℃、浸出时间为 120 min,在液固比为 1:1 试验条件下,分别制备 100、110、

120、125、130、150、200 g/L 浓度的硫酸做浸出剂,考察硫酸浓度对钴浸出效果的影响。钴浸出率(渣计浸出率,下同)与硫酸浓度的关系如图 1 所示。

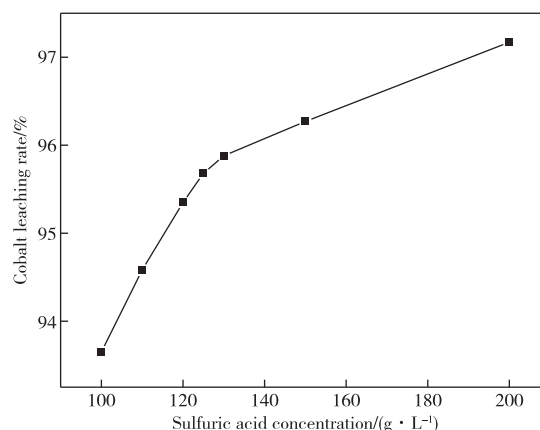


图 1 硫酸浓度对钴浸出率的影响

Fig. 1 Effect of sulfuric acid concentration on cobalt leaching rate

由图 1 可看出,当硫酸浓度为 100 g/L 时,渣中钴的浸出率为 92.65%,硫酸浓度增大至 150 g/L

时,钴浸出率达到 96.27%,继续增大硫酸浓度,钴浸出率曲线上升缓慢。当硫酸浓度达到 200 g/L 时,浸出率达到 97.17%。考虑到硫酸浓度高时浸出液中残余酸量太多,后续处理复杂,选择适宜的硫酸浓度为 150 g/L。

2.1.2 浸出时间对钴浸出率的影响

确定硫酸浓度 150 g/L、反应温度 85 ℃、液固比 10:1 的条件下,考察浸出时间对钴浸出效果的影响,结果如图 2 所示。

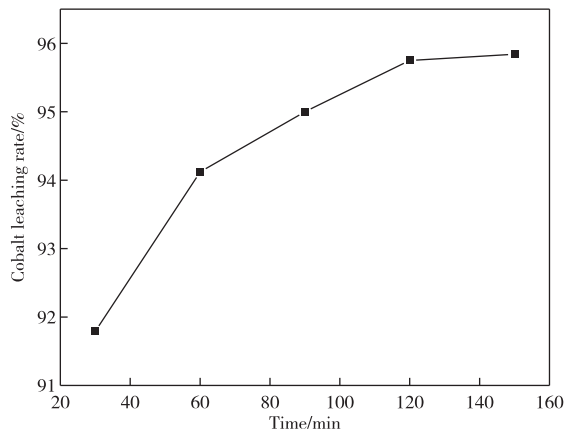


图2 浸出时间对钴浸出率的影响

Fig. 2 Effect of leaching time on cobalt leaching rate

由图 2 可知,当浸出时间在 30 min 时,钴的浸出率仅达到 91.47%,说明反应时间短,不利于钴的浸出。随着反应时间的延长,钴浸出率与时间曲线呈先上升后趋于平缓趋势,当浸出时间达到 120 min 时,钴的浸出率已达到 95.75%,继续延长浸出时间至 150 min 时,钴浸出率为 95.84%,浸出率升高不明显。因此,控制适宜的浸出时间为 120 min。

表 2 一段酸性浸出渣的成分

Table 2 Element compositions of primary acid leaching residue						/%
Elements	Pb	Cu	S	Sb	Co	
Contents	54.51	22.53	15.53	6.19	0.94	

由表 2 可知,浸出渣主要成分为 Pb 和 Cu,由于 Pb 和 Cu 无法被硫酸溶液浸出,可采用氧化浸出分离回收铜。

考虑到溶液中硫酸浓度较高会影响后续金属分

2.1.3 浸出温度对钴浸出率的影响

确定硫酸浓度 150 g/L、浸出时间 120 min、液固比 10:1 的试验条件,考察浸出温度对钴浸出效果的影响,结果如图 3 所示。

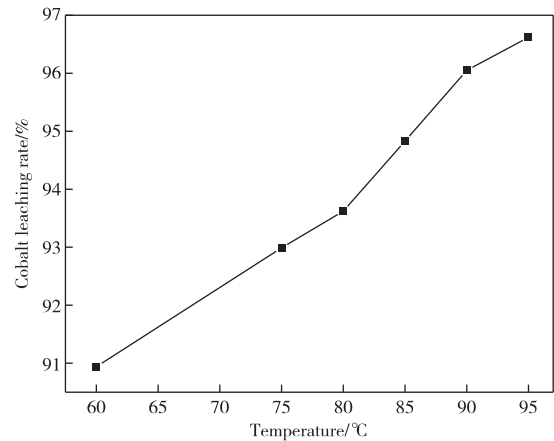


图3 温度对钴浸出率的影响

Fig. 3 Effect of leaching temperature on cobalt leaching rate

由图 3 可知,随着浸出温度的上升,钴浸出率呈逐渐上升趋势,在低温段(60~80 ℃)浸出率较低,高温段(80~95 ℃)刚开始钴浸出率上升较快后趋于上升缓慢趋势,当温度达到 90 ℃时,钴浸出率为 96.05%,升高浸出温度至 95 ℃时,钴浸出率升到 96.62%,钴浸出率上升幅度较低,考虑到能耗等因素,选择适宜的浸出温度为 90 ℃。

2.1.4 浸出综合条件试验

在硫酸浓度 150 g/L、浸出温度 90 ℃、浸出时间 120 min 时,钴的浸出率到为 96.36%, Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cd^{2+} 几乎全部进入溶液,浸出渣主要成分见表 2。

表 3 原料中和液的成分

Table 3 Compositions of raw material neutralization solution							/(g · L ⁻¹)
Elements	Zn	Co	Mn	Fe	Ni	Cd	
Contents	32.76	6.702	0.263	0.633	0.683	0.596	

离,试验以酸性浸出液为二段中性浸出底液,在浸出温度 85 ℃、浸出时间 120 min 的条件下,缓慢加入原料渣,直至溶液 pH 值达到 4.0~4.5。反应完成后,过滤得中性浸出液,中性浸出液化学分析见表 3。

由表 3 可知,高钴渣中的锌、钴、镍、铁、锰、镉等金属均可进入溶液,Zn 和 Co 都得到富集,为后续各元素的分离回收提供基础。

2.2 过氧化氢除 Fe^{2+}

试验用中性浸出液作为除 Fe^{2+} 底液,在单因素条件下,重点研究了过氧化氢的加入量、氧化温度、氧化时间对 Fe^{2+} 沉淀率的影响。发现在过

氧化氢用量为 Fe^{2+} 完全被氧化沉淀所需的理论量,反应温度为 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下反应 150 min ,中性浸出液中的 Fe^{2+} 几乎完全沉淀。在此条件下进行氧化除铁,反应完成后加入 CaCO_3 调节溶液 pH 值为 $4.0\sim 4.5$, Fe^{2+} 的沉淀率大于 99.99% 。氧化沉铁后液及浸出渣的主要成分分别见表 4、表 5。

表 4 氧化沉铁后液的主要成分

Table 4 Main components of iron precipitation solution after oxidation

$/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$

Elements	Zn	Co	Mn	Ni	Cd
Contents	67.86	21.57	0.81	2.13	1.007

表 5 铁渣的主要成分

Table 5 Main components of iron residue

$\%$

Elements	Ca	Fe	S
Contents	44.67	25.57	25.35

2.3 锌粉置换除镉

沉铁后液 Cd^{2+} 的初始浓度为 1.007 g/L ,取一定量沉铁后液采用 $-74\text{ }\mu\text{m}$ 的锌粉,在 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、锌粉加入量为与镉的质量比 $1:1$ 、反应时间 30 min 的条件下进行置换除镉。采用微分脉冲伏安极谱仪测

定溶液中残余 Cd^{2+} 浓度,结果表明, Cd^{2+} 浓度由初始的 1.0017 g/L 降至 0.1 mg/L 以下,已达到回收的目的,且对后续除镍不构成干扰。得到除镉后液主要成分见表 6,镉渣含镉 57.61% ,可作为镉精矿回收镉。

表 6 除镉后液的主要成分

Table 6 Main components of liquid after cadmium removal

$/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$

Elements	Zn	Co	Mn	Ni
Contents	59.63	18.61	0.68	1.82

2.4 除镍试剂除镍

在朱玉平^[14]研究的基础上,使用除镍试剂去除溶液中的 Ni^{2+} ,得出最优除镍条件为:控制除镍反应温度为 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、试剂加入量为溶液中 Ni^{2+} 质量的 6.7 倍、反应时间为 60 min ,在此最佳试验条件下,可将溶液中的 Ni^{2+} 由起始的 1.82 g/L 除至 0.1 mg/L 及以下,且在此条件下,溶液中的 Co^{2+} 沉淀率为 0.16% ,基本实现了镍、钴分离。

2.5 过硫酸钠氧化沉 Mn^{2+}

在控制 Co^{2+} 不发生沉淀的情况下,通过过硫酸钠氧化使溶液中的 Mn^{2+} 尽可能多地沉淀出来,而钴留在除锰后液中。考虑到过硫酸钠在常温会分解

的特性,试验所用过硫酸钠的有效含量为 92.4% ,通过试验考察氧化剂用量、氧化时间和氧化温度对锰氧化沉淀的影响。

分析得到氧化沉 Mn^{2+} 最优条件为:起始硫酸浓度 3 g/L 、过硫酸钠用量为 Mn^{2+} 全部沉淀理论量的 2.0 倍、氧化温度 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、氧化时间 60 min 。在最优条件下进行试验,研究结果发现, Mn^{2+} 由起始的 0.69 g/L 降至 0.15 mg/L ,沉淀率高于 99.98% ,而 Co^{2+} 的沉淀率仅为 0.15% ,沉锰后液及锰渣主要成分如表 7、表 8。锰渣中含 Co 为 0.22% ,Zn 为 0.04% ,基本实现了 Mn 与 Co、Zn 的分离,锰渣可送锰回收系统回收锰。

表 7 沉锰后液的主要成分

Table 7 Main components of manganese precipitation solution

$/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$

Elements	Zn	Co	Mn	$\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$	H_2SO_4
Contents	57.32	18.55	0.000 15	2.17	4.83

表 8 锰渣的主要成分

Table 8 Main components of manganese residue

$\%$

Elements	Zn	Mn	Co
Contents	0.04	64.23	0.22

2.6 过硫酸钠氧化沉淀回收钴

沉锰后液 Co^{2+} 浓度为 18.55 g/L, 采用沉锰后液进行单因素探索试验, 考查过硫酸钠用量、反应温度、氧化时间对钴沉淀率的影响, 考虑到沉锰后液有残余 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$, 本试验在扣除残余 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 后加入过硫酸钠。

2.6.1 过硫酸钠用量对钴沉淀率的影响

在氧化温度 85 $^{\circ}\text{C}$ 、反应时间 120 min、加入絮凝剂 0.8 mg/L 条件下, 考察不同过硫酸钠用量对钴离子沉淀率的影响。过硫酸钠用量分别为溶液中 Co^{2+} 被完全氧化所需理论量的 1.8、2.0、2.1、2.2、2.5 倍, 结果如图 4 所示。

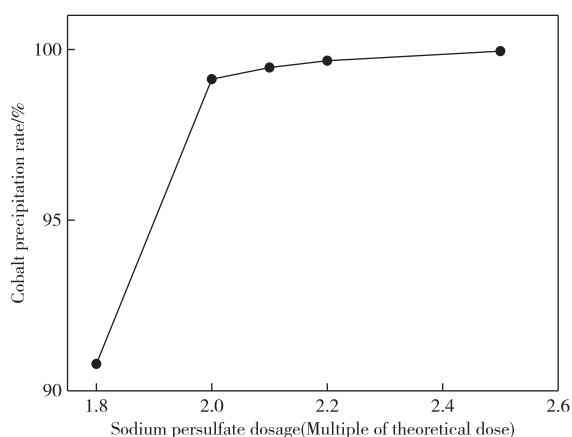


图4 过硫酸钠用量对钴离子沉淀率的影响

Fig. 4 Effects of sodium persulfate dosage on cobalt ion precipitation rate

从图 4 可以看出, 当过硫酸钠加入量为理论量的 1.8 倍时, 钴离子沉淀率达到 90.79%, 随着过硫酸钠用量的增加, 钴离子沉淀率呈先上升后趋于平缓的趋势, 当过硫酸钠用量达到 2.2 倍时, 沉淀率已达到 99.63%, 继续增加过硫酸钠用量对沉钴率无明显变化。考虑到药品的经济性, 过硫酸钠加入量确定为过硫酸钠理论用量的 2.2 倍。

2.6.2 反应温度对钴沉淀率的影响

在过硫酸钠加入量为理论量的 2.2 倍、氧化时间为 120 min、絮凝剂加入量为 0.8 mg/L、反应温度分别为 75、80、85、90 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下, 考察不同反应温度对钴离子沉淀率的影响, 结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 反应温度高有利于 Co^{2+} 的氧化沉淀, 当反应温度为 70 $^{\circ}\text{C}$ 时, 钴离子沉淀率仅为 47.36%, 随着反应温度的升高, 钴离子沉淀率明显上升, 当反应温度为 85 $^{\circ}\text{C}$ 时, 沉淀率已达到

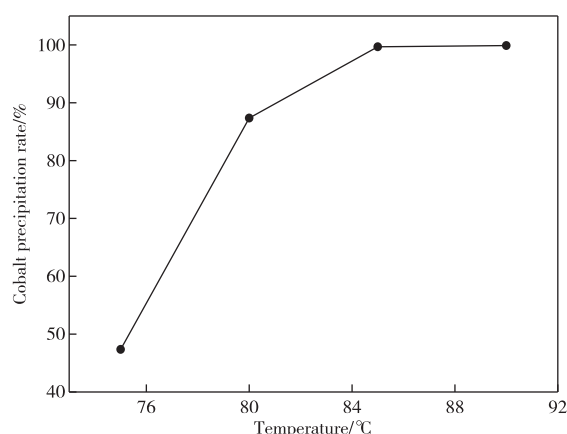


图5 反应温度对钴离子沉淀率的影响

Fig. 5 Effects of reaction temperature on precipitation rate of cobalt ion

99.67%, 当温度达到 90 $^{\circ}\text{C}$ 时, 沉淀率达到 99.88%, 较 85 $^{\circ}\text{C}$ 时的沉淀率仅提升 0.21 个百分点, 增加不明显。考虑到能耗问题及金属回收率, 确定过硫酸钠氧化沉淀 Co^{2+} 的最优反应温度为 85 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.6.3 反应时间对钴沉淀率的影响

在过硫酸钠加入量为理论量的 2.2 倍、反应温度为 85 $^{\circ}\text{C}$ 、絮凝剂加入量为 0.8 mg/L 的条件下, 考察不同氧化时间对 Co^{2+} 沉淀率的影响。氧化总时间为 150 min, 每 15 min 取样, 氧化时间与 Co^{2+} 沉淀率关系如图 6 所示。

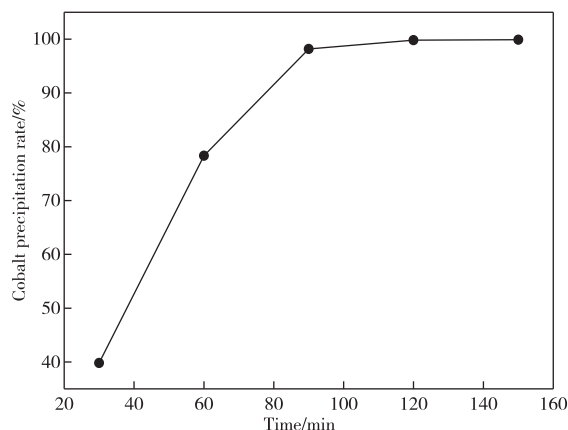


图6 反应时间对钴离子沉淀率的影响

Fig. 6 Effect of reaction time on precipitation rate of cobalt ion

从图 6 可以看出, 延长反应时间有利于 Co^{2+} 的氧化沉淀。当反应进行到 30 min 时, Co^{2+} 的沉淀率仅为 39.82%, 随着反应时间的延长, Co^{2+} 沉淀率不断增高, 当反应进行 90 min 时, Co^{2+} 沉淀率达到

98.18%,当反应进行到 120 min 时,钴离子沉淀率达到 99.81%,继续延长时间到 150 min 时, Co^{2+} 的沉淀率已无明显提升。为此,确定过硫酸钠氧化沉钴的最优氧化时间为 120 min。

过硫酸钠氧化沉钴的最佳工艺条件为:温度 85 ℃、过硫酸钠加入量为理论用量的 2.2 倍、絮凝剂加入 0.8 mg/L、反应时间为 120 min。氧化沉钴过程会产生酸,采用加氧化锌控制溶液 pH 值,按上述最佳工艺条件进行沉钴研究, Co^{2+} 由起始的 18.55 g/L 降至 33.65 mg/L,钴的沉淀率达到 99.82%。氧化沉钴后液含 Zn 50.01 g/L、Co 0.033 65 g/L,钴渣含 Zn 23.15%、Co 49.75%。沉钴后液可返回湿法炼锌生产系统中回收金属锌,钴渣可作为钴精矿出售。

3 结论

1)采用一段硫酸浸出—二段高钴渣中和处理湿法炼锌产出的多金属钴渣,所得含钴较高的浸出液依次采用过氧化氢氧化除铁、锌粉置换除镉、除镍试剂除镍、过硫酸钠选择性氧化除锰、过硫酸钠氧化沉钴处理,可实现渣中镉、钴、镍、锌的分离回收,且分离效果较好,均达到 99% 以上的分离率。所得最终产物氧化钴渣含钴较高,可作为钴精矿出售,但含锌较高,工艺控制条件尚需优化。最后得到的沉钴后液可返回湿法炼锌生产系统回收金属锌,可实现高钴渣中金属资源的回收处理,避免危废对环境的污染。

2)通过置换法得出的高钴渣经过两段浸出后,锌、钴、镍、铁、锰、镉等金属几乎全部进入溶液,具有良好的浸出性能。

3)过硫酸钠氧化沉钴的最佳工艺条件为:温度 85 ℃、过硫酸钠加入量为理论用量的 2.2 倍、每 L 溶液絮凝剂加入比例 0.8 mg、反应时间 120 min,在此条件下进行处理,沉钴渣中 Co 含量达到 49.75%。

参考文献:

- [1] 蓝德均. 高锰酸钾氧化沉钴的研究及应用[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005.
LAN Dejun. Reserch and application on oxidizing removal of cobalt with potassium permanganate[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2005.
- [2] 丰成友, 张德全, 党兴彦. 中国钴资源及其开发利用概况[J]. 矿床地质, 2004(1): 93-100.
FENG Chengyou, ZHANG Dequan, DANG Xingyan. Cobalt resources of China and their exploitation and utilization[J]. Mineral Deposits, 2004(1): 93-100.
- [3] EDWARD A B, SARAH H, SUSAN P J. On the distribution of copper, nickel, and cadmium in the surface waters of the north atlantic [J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86(9): 8048-8066.
- [4] 蓝碧波, 丁文涛, 申开榜, 等. 从湿法炼锌钴渣中回收锌富集钴试验研究[J]. 湿法冶金, 2018, 37(6): 457-460.
LAN Bibo, DING Wentao, SHEN Kaibang, et al. Recovery of zinc and beneficiation of cobalt from cobalt residue in Zinc Hydrometallurgy[J]. Hydrometallurgy of China, 2018, 37(6): 457-460.
- [5] 刘锦. 湿法炼锌高钴渣处理工艺研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
LIU Jin. Study on treatment process of high cobalt slag from Zinc Hydrometallurgy [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [6] 张建军, 陈为亮, 李照刚. 从钴渣中回收钴的研究进展[J]. 矿产综合利用, 2017(4): 11-15.
ZHANG Jianjun, CHEN Weiliang, LI Zhaogang. Research progress of recovering cobalt from cobalt residues [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017(4): 11-15.
- [7] 刘玉芹. 过硫酸铵氧化沉淀法富集净化钴渣中钴的试验研究[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(1): 24-27.
LIU Yuqin. Experimental study on cobalt enrichment of purification cobalt residue by ammonium persulfate oxidation precipitation method [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(1): 24-27.
- [8] 李倩, 申文前. 过硫酸钠氧化-水解法脱除硫酸锌溶液中的锰和铁[J]. 有色金属工程, 2014, 4(5): 40-43.
LI Qian, SHEN Wenqian. Removal of manganese and iron from zinc sulfate solution by sodium persulfate oxidation hydrolysis method [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2014, 4(5): 40-43.
- [9] TIAN Q H, XIN Y T, WANG H L, et al. Potential-controlled selective recovery of manganese and cobalt from cobalt slag leaching solution[J]. Hydrometallurgy, 2017, 169: 201-206.
- [10] 张红菊, 王有臣, 杜宁. 镍钴渣回收工艺改进试验研究[J]. 中国有色冶金, 2020, 49(5): 42-45.
ZHANG Hongju, WANG Youchen, DU Ning. Experimental research on improvement of cobalt

- recovery process for nickel cobalt slag [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2020, 49(5): 42-45.
- [11] 李强, 杨皓迪, 李奇勇, 等. 湿法炼锌净化钴渣酸浸液萃取除杂试验研究[J]. 湿法冶金, 2020, 39(2): 151-155.
- LI Qiang, YANG Haodi, LI Qiyong, et al. Purification of acidic leaching solution of cobalt residue in zinc hydrometallurgy by solvent extraction [J]. Hydrometallurgy of China, 2020, 39(2): 151-155.
- [12] 韩桂洪, 王静雯, 刘兵兵, 等. 湿法炼锌净化钴渣回收钴技术进展及展望[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2022, 39(2): 1-6.
- HAN Guihong, WANG Jingwen, LIU Bingbing, et al. Progress and prospect of cobalt recovery from cobalt slag produced by Zinc Hydrometallurgy[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2022, 39(2): 1-6.
- [13] 刘锦, 张旭, 沈庆峰, 等. 分光光度法和光度滴定法联合测定湿法炼锌流程中钴渣浸出液中锌钴镍[J]. 冶金分析, 2019, 39(5): 25-31.
- LIU Jin, ZHANG Xu, SHEN Qingfeng, et al. Determination of zinc, cobalt and nickel in cobalt residue leaching solution in zinc hydrometallurgy by spectrophotometry and photometric titration [J]. Metallurgical Analysis, 2019, 39(5): 25-31.
- [14] 朱玉平. 湿法炼锌贫镉液 K 试剂除钴新方法的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- ZHU Yuping. Study on a new method of cobalt removal with K reagent from cadmium poor solution of zinc hydrometallurgy [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.

(编辑 王爱平)