

湿法冶金过程中除铁工艺研究进展

申亚芳¹, 张文², 郝百川¹, 王乐¹, 李慧¹

(1. 华北理工大学 现代冶金技术教育部重点实验室, 河北 唐山 063210
2. 采埃孚伦福德汽车系统(沈阳)有限公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 除铁是湿法冶金过程的关键工序。铁杂质的去除, 不仅可以提高产物的品位, 而且有利于实现铁元素的回收利用。文章综述了湿法冶金中几种典型的湿法除铁的工艺, 并将其分为浸出法(直接浸出、焙烧-浸出)、沉淀法(氧化沉淀、磷酸盐沉淀、水热水解赤铁矿、FeSx-CuS 共沉淀法)、萃取法和离子交换法四大类, 分析了不同工艺的原理、过程及优缺点, 提出了湿法沉铁的发展方向。

关键词: 湿法冶金; 除铁; 离子树脂; 研究进展

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2021.03.018

中图分类号: TF11 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2021)03-0114-07

铁是地壳中含量最高的元素之一, 也是矿物中的主要杂质之一^[1], 在矿体内始终与金属共存, 主要以赤铁矿、磁铁矿和白云母的形式存在于颗粒表面或晶体内部包裹体中^[2]。铁杂质的存在会降低矿物的品位, 且生产的产品中易出现白斑, 影响其白度指数、介电性能和化学稳定性^[3], 严重限制了超白玻璃和电子材料等对 Fe 含量有严格限制的领域的应用^[4]。因此除铁是湿法冶金过程的关键工序, 同时高效除铁是湿法冶炼过程中需要面对的最现实也最具挑战性的课题之一。而传统沉铁工艺操作复杂、有价金属损失大, 除铁深度不够, 且沉淀渣堆积易造成二次污染。因此, 寻找一种高效, 环保的除铁方法具有重要意义。

1 浸出法

1.1 直接酸浸法

酸洗主要利用 H⁺ 与矿相反应。低柠檬酸是一种可生物降解的有机溶剂, 对环境友好且价格廉。

T Masnahifa^[5] 等以柠檬酸为浸出剂从金矿尾矿中除铁, 发现铁的回收率随温度和试剂浓度增加而增加, 但固体负荷率的增大不利于铁浸出。

成兰兴^[6] 等改变了传统钼精矿多段酸浸多段水洗工艺, 在低温常压下采用一段酸浸一段水洗除去钼精矿 (MoS₂ 90% 左右) 中的铁, 在 100 g 钼精矿中加入 8 g 助溶剂 Co-NC 和 200 mL 30% 的盐酸, 在 75℃ 恒温下浸出 2 h 后过滤, 滤饼用去离子水反复洗至中性, 干燥后所得产品 Fe 含量仅为 0.069%。助溶剂由于在酸性环境下有着比不溶于酸的矿物 (如黄铁矿) 有更高的标准氧化电位, 在一定条件下可使其转相成为褐铁矿而除去, 从而达到深度除铁的目的。

相较于单一类型酸, 混酸能够产生协同效应, 铁去除率更高。刘加威^[7] 等采用磁选-混酸酸洗工艺对石英砂除杂, 研究了粒径范围、混酸配比和酸浓度对石英砂除铁效果的影响。实验表明,

收稿日期: 2020-02-01

基金项目: 河北省教育厅华北理工大学省属高校基本科研业务费项目 (JQN2019001) 资助。

作者简介: 申亚芳 (1998-), 女, 学生, 从事方向为资源能源综合利用。

通讯作者: 王乐 (1985-), 男, 讲师, 华北理工大学冶金与能源学院, 讲师, E-mail:wangl@ncst.edu.cn

铁去除率随粒径的减小而增加,当粒径为150~180 μm、混酸配比 $V_{\text{HCl}}:V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{HF}}=3:3:1$ 、混酸浓度 $V_{\text{酸}}:V_{\text{水}}=1:1$ 时,除铁效果较佳,铁含量降为24.76 μg/g。采用磁选等辅助手段可以抑制产物层形成或加速产物层流动,从而降低反应的活化能,提高酸洗效率。

1.2 焙烧-酸浸法

与常规酸浸法相比,在酸浸之前进行焙烧预处理,可以改变矿相的晶格结构,提高浸出效率,有利于铁杂质的去除。

白佳星^[8]等首先对石英砂进行焙烧预处理,在900℃下保温2h,然后按5:1的液固比在质量分数为10%的盐酸溶液中搅拌、浸出8h,最后用去离子水洗至中性,烘干后铁的去除率可达41%。较未经焙烧预处理而直接酸浸,铁的去除率可提高9%,可见焙烧有助于石英砂内部的包裹体爆裂,可强化酸浸过程对石英砂内部的含铁矿物杂质的去除效果。

刘加威^[9]等将安徽凤阳石英砂矿进行破碎、磁选、烘干处理后,在900℃的高温下焙烧180min,然后置于90℃的混酸溶液($V_{\text{HCl}}:V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{HF}}=3:3:1$ 且 $V_{\text{酸}}:V_{\text{水}}=1:1$)中酸洗6h,铁杂质含量降为34.61 μg/g,除铁率高达88.3%。发现,高温焙烧处理会改变石英砂的晶格结构,杂质相暴露充分,溶液的对流导致产物层无法有效包裹颗粒,不仅会提高酸洗反应速率,而且增大了的除铁率,同时降低了反应的活化能。

直接酸浸法除铁具有流程简单、能耗低、成本低的优点;焙烧-酸浸法在酸浸的基础上,强化了铁杂质的去除效果,具有较好的工业应用前景。未来的发展趋势是寻找一种有效分离铁杂质的方法,实现产业化生产。

2 沉淀法

化学沉淀法是目前从浸出液中除铁的主要方

法之一,几种典型的沉淀法为:氧化沉淀、磷酸盐沉淀、水热水解赤铁矿和FeSx-CuS共沉淀法等。

2.1 氧化沉淀法

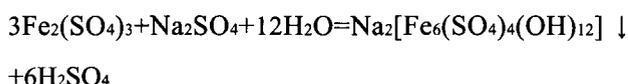
氧化沉淀法是利用氧化剂将溶解状态的 Fe^{2+} 氧化为不溶的 Fe^{3+} 而从水中沉淀出来的一种方法,常用氧化剂为 H_2O_2 、 NaClO_4 和 MnO_2 。

郭秋松^[10]等以过氧化氢为氧化剂实现了含钴浸出液深度除铁目标,首先用5 mol/L的NaOH溶液中和含钴浸出液pH值至2,在60℃下水浴加热后加入质量分数为25%的过氧化氢溶液,搅拌2h后过滤。实验过程中用 Na_2CO_3 溶液控制溶液pH值,当pH值为3.5时,铁的去除率可达99.42%,钴损失率仅为0.08%。实验过程中发现, Fe^{2+} 在低酸体系下生成类似胶态的无定形氢氧化铁,而为提高氢氧化铁的过滤性能,需适当提高溶液温度及陈化作用。吴玉春^[11]等以过氧化氢为氧化剂除铁,解决了低温下过滤性能欠佳,氧化效率低的问题,但也发现实验过程中过氧化氢极易分解,试剂消耗量大,氧化过程难以控制,且工业双氧水在运输、存储和操作过程中存在安全隐患。

钕铁硼材料中含有60%~65%的铁。卢阶主等^[12]采用二氧化锰氧化法对钕铁硼盐酸优溶液实现了简单、高效、稳定的深度除铁,将钕铁硼回收料粉碎、氧化焙烧、冷却、研磨后加入盐酸制备料液,在90℃的恒温条件下加入氧化剂二氧化锰,3h后加入NaOH回调pH值至4,生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀,Fe含量降至100 mg/L。江泽佐^[13]等在钕铁硼回收料盐酸优溶液二氧化锰氧化法除铁的基础上,以氯酸钠为氧化剂,氧化率可达99.99%,碱液回调pH值后,Fe含量降至1 mg/L。

陈欢^[14]等以氯酸钠为氧化剂,采用倒序加料法除去硫酸镍钴锰溶液99.49%的铁,首先向料液中加入氯酸钠固体氧化 Fe^{2+} ,然后以硫酸钠溶液为底液在恒温条件下滴加料液,搅拌、静置、过滤后,

洗铁矾渣以 4 mL/g 的液固体积质量比进行 2 次酸洗 (pH=3) 和一次水洗。实验发现, 当加料速度过快时, Fe^{3+} 的浓度增大速度低于 Fe^{3+} 水解速度, 从而导致铁矾渣晶型变差, 过滤性能降低。沉淀过程的主要方程式为:



2.2 磷酸盐沉淀法

磷酸盐沉铁工艺主要分为沉铁和磷回收两部分, 适用于 PO_4^{3-} 酸性体系下除铁, 与现有沉淀法除铁相比, 具有反应快、效率高、易过滤和有价金属损耗小的优点, 工业前景广, 但磷酸盐成本较高, 需考虑磷的回收利用, 工序相对复杂^[15]。

孙常永^[16]等取深海粘土硫酸浸出液在 30℃ 下恒温水浴, 加入磷酸使 PO_4^{3-} 量为理论量的 1.2 倍, 缓慢加入中和剂 Na_2CO_3 溶液, 当 pH 值为 2 时, 磷酸铁基本反应完成。肖超^[17]等在硫酸盐样液中加入 8.21 mol/L 的磷酸钠溶液, 在 35℃ 下搅拌 1.0 h 后过滤, 铁与锌、铜和镍等金属实现较好分离, 当 Fe^{3+} 残留量为 0.56 g/L、pH 值为 2.0 时, 有利于减少磷的残留, 磷的损耗约 3.2%。

2.3 水热水解赤铁矿法

赤铁矿法除铁是在 pH 值为 2.0 ~ 4.5、高温、氧压的条件下, 使溶液中的 Fe^{2+} 氧化并以赤铁矿的形式沉淀, 主要分为 Fe^{3+} 的还原和 Fe^{2+} 的氧化水解两个步骤。

黄钾铁矾法和针铁矿法应用范围广, 但沉铁渣中铁含量较低, 杂质元素含量较高, 不具有潜在的应用价值, 产生的危废铁矾渣处理成本较高且不符合高效综合利用的要求。相比之下赤铁矿法沉铁工艺虽设备昂贵、维修费用高, 但较好的解决了上述问题, 所得赤铁矿铁含量和稳定性均较高, 可以实现金属铈和铜离子的综合回收和铁渣的资源化利用, 获得友好型赤铁矿法沉铁渣。

宋宇轩等^[18]以高铁闪锌矿为原料, 研究了 $\text{FeSO}_4\text{-ZnSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系 Fe^{2+} 氧化水热水解赤铁矿法沉铁工艺, 研究表明温度是影响沉铁率的关键因素, 温度的升高有利于亚稳态铁矾物相的热力学稳定性降低并转变为赤铁矿。

2.4 FeSx-CuS 共沉淀法 (硫化物沉淀法)

FeSx-CuS 共沉淀法也称硫化物沉淀法, 原理为: 重金属离子与 S^{2-} 反应生成较稳定的沉淀硫化物, 生成的固体微粒经沉淀、过滤等操作将硫化物沉淀分离, 达到 Fe、Cu、Pb 和 Gr 等金属离子的分离。但硫化物沉淀法存在沉淀周期较长的问题, 通常需搭配助凝剂使用。

刘汇东等^[19]采用 FeSx-CuS 共沉淀法对碱法处理后的粉煤灰脱硅液进行深度除铁处理, 首先将样液加热至 65 ~ 70℃, 以 Na_2S 饱和溶液为絮凝剂, 5 min 后降温至 45℃, 加入五水硫酸铜固体助凝 (摩尔质量为 Na_2S 的 2/3), 静置 24 h 后, 铁、铜和铬等金属离子得到较好的脱除。实验表明, Cu^{2+} 与 S^{2-} 生成的 CuS 沉淀不仅生成速度快、生成量多, 且较为稳定, 与 FeS 发生共沉淀作用, 对悬浮态微细硫化铁产生吸附、助凝效果。

沉淀法未来的发展趋势是针对不同成分的沉淀物, 选取合适的方法使沉淀物分离并回收, 减少因铁渣堆积而造成的环境污染。

3 萃取法

溶剂萃取法通常又叫液-液萃取法, 是一种从溶液中分离、富集和提取有用物质的有效方法, 它利用溶质在两种不相混溶的液相之间的不同分配来达到分离和富集的目的^[20]。溶剂萃取的典型步骤包括萃取, 杂质洗涤, 目标汽提和溶剂再生。

Xiaoxue Sun 等^[21]以 P204、N235 和磺化煤油为协同萃取剂, 研究了不同比例的萃取剂和不同相比对 Fe^{3+} 去除和剥离程度的影响, 当 P204、N235 和磺化煤油体积比为 3:3:4, O/A 比为 1 时,

Fe去除率可达97%以上,以H₂SO₄为剥离剂,Fe剥离度大于99%。

杨明华等^[22]将含铁浓度为4.58 g/L的P204有机相和3 mol/L氟化铵按2:1的比例混合,用氨水调节pH值有红色沉淀生成,铁含量低至0.08 g/L,除铁率可达98%以上。反铁剂氟化铵可循环利用。反应原理如下:



成宝海等^[23]研究了以P204-N235为萃取剂,与硫酸锌浸出液(初始pH值为2.0~2.1)按不同比例混合后振荡,实验表明随有机相的增多,铁的萃取率不断提高,当相比为2时,除铁率可达99.3%以上。

F.J. Alguacil等^[24]以Cyanex 272为萃取剂,与Cr³⁺钝化液按1:1的O/A比混合进行萃取,然后用硫酸对铁进行汽提,铁提取率随温度的升高而升高,铁的萃取率和汽提率均超过95%。

Zhifeng Qin等^[25]采用35%的N235溶液和65%磺化煤油为萃取剂从钒渣浸出液中提取Ti、V和Fe,较佳工艺参数:O/A比为2:1,分离时长4 min,温度298.15 K。实验表明,采用三级逆流萃取最为合理,Ti、V和Fe的萃取率分别可达97%、7%和18%,用1.25 mol/L硫酸铵洗涤可除去负载的有机相中的81% V和86% Fe。

溶剂萃取法平衡速度快、处理能力强、成本低、操作灵活、金属回收率高且易实现自动控制,但易引起乳化,影响槽体流通,导致萃取剂的损失和电解质的污染,严重时导致停产。未来的发展趋势是选取合适的萃取剂体系从复杂溶液中分离目标元素,同时降低乳化现象对萃取剂的影响,实现溶剂再生。

4 离子交换法

离子交换法是通过离子交换剂上的离子和溶

液中的离子相互交换,从而分离溶液中含金属离子的方法^[26]。离子树脂交换的主要流程为预选、预处理、装柱、树脂交换、树脂洗脱和树脂再生六个步骤。常见吸附铁的离子交换树脂为磺化单磷酸树脂,磺化二磷酸树脂,氨基磷酸树脂等。

Guangxin Wang等^[27]利用Monophos树脂(一种磺化单磷酸树脂)有效去除了硫酸钴溶液中的痕量铁,首先对树脂进行预处理,用pH值为2的硫酸冲洗使树脂转化为氢型,然后研究了树脂交换过程中pH值、进料与树脂的体积比、加载温度和时间对铁吸附率的影响,分别采用6 mol/L的HCl溶液和0.5 mol/L的HEDPA对树脂进行洗脱,发现树脂再生后重复加载时,用6 mol/L的HCl汽提的树脂显示出更好的Fe吸附能力。

黄鑫等^[28]利用阳离子交换树脂连续去除磷酸盐生产中的铁离子,发现在60℃以下,温度升高有利于Fe吸附的进行,但低温下磷酸盐结晶后覆盖在树脂表面,影响除铁效果;60℃以上,料液蒸发并在树脂表面析出,降低Fe吸附率,铁去除率可达95%以上,可实现树脂的再生利用,但每次再生后除铁效果下降5%。

Yahui Zhang等^[29]研究了利用离子交换树脂从合成铜浸出液吸附铁的工艺,发现羟基肟螯合树脂对浸出铜溶液中的铁具有极强的选择性吸附行为,草酸可有效地从负载的树脂中剥离Fe,稀硫酸溶液可以将铜从树脂Z-Fe中完全去除,铜回收率达100%,铁吸附率可达89.83%。

离子交换法操作简单,经济性好,设备投入成本低,使用寿命长,可实现废液的重复利用,有工业化应用前景,较好的体现了环保处理和循环经济,被广泛应用于水的净化、废水优化处理、环境保护、食品行业、金属的集中与分离、催化和医药等方面^[30]。未来的发展趋势是解决由于基团和三价铁离子之间的牢固键合,而难以进行铁

的汽提这一难题。

5 结 语

(1) 除铁是湿法冶金过程中的关键工序, 本文讨论了湿法冶金中酸浸法、沉淀法、萃取法和离子交换法除铁的工艺路线及原理。每种工艺都有各自的优点, 但均不可避免的存在一定缺陷。例如, 沉淀法操作简单, 成本低, 但后续需实现铁与其他金属杂质的分离与收集, 操作繁琐; 萃取法萃取法处理能力大、金属回收率高且易实现自动控制, 但易发生乳化, 导致萃取剂的损失和电解质的污染, 难以实现工业化。离子交换法设备投入成本低, 使用寿命长, 可实现废液的重复利用, 有工业化应用前景, 应引起人们进一步的探讨和研究。

(2) 在湿法冶金发展中, 我们应当致力于寻找一种环境友好型工艺, 建立效率更高、能耗和废弃物排放量更少的工业化生产路线, 实现湿法中 Fe 的高效去除。

参考文献:

- [1] WANG K, LI J, MCDONALD R G, et al. Iron, aluminium and chromium co-removal from atmospheric nickel laterite leach solutions[J]. *Minerals Engineering*, 2018, 116: 35-45.
- [2] LIU H L, CHEN J J, PAN H L. Study on the removal of iron impurities in methanesulfonic acid tin plating bath[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 128(1): 012190.
- [3] 刘延红, 王宝冬, 郭昭华, 等. 铁含量控制研究进展 [J]. *矿产综合利用*, 2017 (6): 24-30.
- LIU Y H, WANG B D, GUO Z H, et al. Research progress of iron content control [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2017 (6): 24-30.
- [4] CAO Z F, QIU P, WANG S, et al. Benzohydroxamic acid to improve iron removal from potash feldspar ores[J]. *Journal of Central South University*, 2018, 25(9): 2190-2198.
- [5] MASHIFANA T, MAVIMBELA N, SITHOLE N. Kinetic Study on the Removal of Iron from Gold Mine Tailings by Citric Acid[J]. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2018, 120(1): 12-25.
- [6] 成兰兴, 霍二福, 程伟琴, 等. 高纯二硫化钼深度除铁新工艺研究 [J]. *无机盐工业*, 2017, 49(11): 46-48.
- CHENG L X, HUO E F, CHENG W Q, et al. Research on new technology of deep iron removal by high purity molybdenum disulfide [J]. *INORGANIC CHEMICALS INDUSTRY*, 2017, 49(11): 46-48.
- [7] 刘加威, 李京伟, 白泉龙, 等. 石英砂磁选-酸洗除铁机理研究 [J]. *有色金属 (选矿部分)*, 2017 (4): 64-70.
- LIU J W, LI J W, BAI X L, et al. Study on iron removal mechanism of quartz sand by magnetic separation and acid pickling [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing)*, 2017 (4): 64-70.
- [8] 白佳星, 李素芹, 杨昌桥, 等. 焙烧对石英砂酸浸除铁效果影响的试验研究 [J]. *化工矿物与加工*, 2017, 46(3): 17-19.
- BAI J X, LI S Q, YANG C Q, et al. Experimental study on the effect of roasting on iron removal by acid leaching of quartz sand [J]. *Chemical Minerals and Processing*, 2017, 46(3): 17-19.
- [9] 刘加威, 李京伟, 白泉龙, 等. 石英砂高温焙烧-酸洗除铁动力学研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(10): 3385-3391.
- LIU J W, LI J W, BAI Xi L, et al. Kinetics of iron removal by high-temperature roasting-pickling of quartz sand [J]. *Chinese Journal of Ceramics*, 2017, 36(10): 3385-3391.
- [10] 郭秋松, 刘志强, 戴子林, 等. 氧化铜钴矿酸浸液深度除铁工艺的研究 [J]. *材料研究与应用*, 2016, 10(4): 251-254.
- GUO Q S, LIU Z Q, DAI Z L, et al. Study on the deep iron removal process of acid leaching solution of copper-cobalt oxide ore [J]. *Materials Research and Application*, 2016, 10(4): 251-254.
- [11] 吴玉春, 黄招辉, 钟琦, 等. 钴镍浸出液过氧化氢低温氧化除铁试验研究 [J]. *山西冶金*, 2017, 40(6): 11-13.
- WU Y C, HUANG Z H, ZHONG Q, et al. Experimental study on iron removal from cobalt nickel leaching solution by hydrogen peroxide at low temperature [J]. *Shanxi Metallurgy*, 2017, 40(6): 11-13.
- [12] 卢阶主, 羊多彦. 钹铁硼回收料盐酸优溶液氧化法除铁 [J]. *湖南有色金属*, 2019, 35(2): 33-35.
- LU J Z, YANG D Y. Removal of iron by hydrochloric acid solution oxidation of NdFeB recovery material [J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2019, 35(2): 33-35.
- [13] 江泽佐, 钟春兰, 卢阶主, 等. 钹铁硼回收料盐酸优溶液氯酸钠氧化法除铁 [J]. *化工技术与开发*, 2018, 47(8): 55-57.
- JIANG Z Z, ZHONG C L, LU J Z, et al. Removed iron by

sodium chlorate oxidation with hydrochloric acid solution of NdFeB recovery material [J]. *Chemical Technology and Development*, 2018, 47(8): 55-57.

[14] 陈欢, 张银亮, 谭群英, 等. 废旧电池回收过程中硫酸镍钴锰溶液除铁铝工艺研究 [J]. *湿法冶金*, 2018, 37(6): 55-59.

CHEN H, ZHANG Y L, TAN Q Y, et al. Study on Fe-Al removal process of NiCoMn sulfate solution in the recycling process of waste battery [J]. *Hydrometallurgy*, 2018, 37(6): 55-59.

[15] GAROLE D J, GAROLE V J, DALAL D S. Recovery of metal value from electroplating sludge [J]. *Research Journal of Chemical Sciences*, 2012, 2(03): 61-63.

[16] 孙常永, 张魁芳, 曹洪杨, 等. 深海粘土硫酸浸出液中除铁实验 [J]. *有色金属 (冶炼部分)*, 2017(10): 19-22.

SUN C Y, ZHANG K F, CAO H Y, et al. Experimental study on iron removal from sulfuric acid leaching solution of deep-sea clay [J]. *Nonferrous Metals (Smelting Section)*, 2017(10): 19-22

[17] 肖超, 曾理, 李义兵, 等. 磷酸盐沉淀法除铁过程热力学分析 [J]. *中国有色金属学报*, 2018, 28(3): 637-643.

XIAO C, ZENG L, LI Y B, et al. Thermodynamic analysis of iron removal process by phosphate precipitation [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018, 28(3): 637-643.

[18] 宋宇轩. FeSO₄-ZnSO₄-H₂O 体系中水热赤铁矿法沉铁研究 [J]. *昆明理工大学学报 (自然科学版)*, 2018, 43(1): 7-14.

SONG Y X. Study on iron deposition by hydrothermal hematite in FeSO₄-ZnSO₄-H₂O system [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 43(1): 7-14.

[19] 刘汇东, 孙琦, 赵利军, 等. 粉煤灰脱硅液 FeS_x-CuS 共沉淀法深度除铁实验 [J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(33): 375-379.

LIU H D, SUN Q, ZHAO L J, et al. Experimental study on deep iron removal by FeS_x-CuS co-precipitation method in fly ash desilication liquid [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(33): 375-379.

[20] 沈庆峰. 从低品位氧化锌矿浸出渣中回收锌的工艺研究及其产业化 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.

SHEN Q F. Study on the process of recovering zinc from the leaching residue of low grade zinc oxide ore and its industrialization [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2007.

[21] SUN X, SUN Y, YU J. Removal of ferric ions from

aluminum solutions by solvent extraction, part I: Iron removal [J]. *Separation and Purification Technology*, 2015, 159: 18-22.

[22] 杨明华, 詹有北, 柯兆华. 用氟化铵除 P204 有机相中铁的实验研究 [J]. *湖南有色金属*, 2017, 33(6): 34-36.

YANG M H, ZHAN Y B, KE Z H. Experimental study on iron removal from P204 organic phase by ammonium fluoride [J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2017, 33(6): 34-36.

[23] 成宝海, 胡运梅. P204+N235 体系从硫酸锌浸出液萃取除铁 [J]. *长春师范大学学报*, 2017, 36(08): 70-72.

CHENG B H, HU Y M. Extraction of iron from zinc sulfate leaching solution by P204+N235 system [J]. *Journal of Changchun Normal University*, 2017, 36(08): 70-72.

[24] ALGUACIL F J, DIBAN A, URTIAGA A. Zinc and iron removal from chromium (III) passivation baths by solvent extraction with Cyanex 272 [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2018, 133: 252-256.

[25] QIN Z, ZHANG G, LUO D, et al. Separation of titanium from vanadium and iron in leach solutions of vanadium slag by solvent extraction with trioctyl tertiary amine (N235) [J]. *Hydrometallurgy*, 2019, 188: 216-221.

[26] SAG Y, KUTSAL T. Determination of the biosorption heats of heavy metal ions on *Zoogloea ramigera* and *Rhizopus arrhizus* [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2000, 6(2): 145-151.

[27] WANG G, ZHAO Y, YANG B, et al. Removal of trace iron from cobalt electro-refining electrolytes using Monophos resin [J]. *Hydrometallurgy*, 2018, 176: 69-72.

[28] 黄鑫, 张阳飞, 陈静, 等. 离子树脂去除磷酸盐生产中铁离子的研究 [J]. *杭州化工*, 2013, 43(4): 23-24+28.

HUANG X, ZHANG Y F, CHEN J, et al. Study on removal of iron ions from phosphate production by ionic resin [J]. *Hangzhou Chemical Industry*, 2013, 43(4): 23-24+28.

[29] ZHANG Y, LIU Q, LI L. Removal of iron from synthetic copper leach solution using a hydroxy-oxime chelating resin [J]. *Hydrometallurgy*, 2016, 164: 154-158.

[30] 蔡澄璐. 离子交换树脂脱除混酸废液中铁离子的研究 [D]. 武汉: 武汉工程大学, 2017.

CAI C L. Study on removal of iron ions from mixed acid waste liquid by ion exchange resin [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.

(下转至 92 页)

Experimental Study on Flotation Desilication of a Low-grade Bauxite in Guxian, Shanxi

Zhang Zhanyun¹; Zhang Jianqiang¹, Yao Jie¹, Li Guosheng²

(1. Zhengzhou Non-ferrous Metals Research Institute Co., Ltd. of CHALCO, National Aluminum Smelting Engineering Technology Research Center, Zhengzhou, Henan, China; 2. Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan, China)

Abstract: The research and analysis of the properties of the raw ore and the performance of the flotation desilicization were carried out on a low-grade bauxite in Guxian, Shanxi. The tests investigated the influence of grinding fineness, dosage of chemicals on flotation indexes, and appropriate process parameters were determined. The content of Al_2O_3 is 58.47%, and the SiO_2 content is 19.75% in the low-grade bauxite with A/S of 2.96. The aluminum concentrate with the yield of 60.64%, A/S of 6.11, Al_2O_3 recovery of 69.52%, and a tailings A/S of 1.41 were obtained through the flotation desilication process of “one roughing two cleaning one scavenging” closed-circuit flotation.

Keywords: Low grade; Bauxite; Flotation desilication

////////////////////////////////////
(上接 119 页)

Research Progress in Chemical Removal of Iron in Hydrometallurgy

Shen Yafang¹, Zhang Wen², Hao Baichuan¹, Wang Le¹, Li Hui¹

(1. Key Laboratory of Modern Metallurgical Technology, Ministry of Education, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei, China; 2. ZF Lemforder Automotive Systems (Shenyang) Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, China)

Abstract: Iron removal is a key process in hydrometallurgical processes. The removal of iron impurities can not only improve the quality of the product, but also facilitate the recycling of iron. This article reviews several typical wet iron removal processes in hydrometallurgy, and divides them into leaching (direct leaching, roasting-leaching), precipitation (oxidative precipitation, phosphate precipitation, hydrothermal hydrolysis of hematite, The sulfide precipitation method), extraction method and ion exchange method are analyzed. The principles, processes, advantages and disadvantages of different processes are analyzed, and the development direction of wet iron sinking is proposed.

Keywords: Hydrometallurgy; Iron removal; Ionic resin; Research progress