

焙烧方式对含砷金精矿中金、银浸出率的影响^①

胡杨甲, 赵志强, 罗思岗, 赵杰, 王国强

(矿冶科技集团有限公司 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 100160)

摘要: 某含砷金精矿中金矿物嵌布粒度较细, 金主要以硫化物(黄铁矿、毒砂)包裹金形式存在。采用焙烧预处理-氰化浸出工艺, 研究了一段焙烧、两段焙烧和添加剂焙烧对氰化浸出的影响。结果表明, 采用常规一段、两段焙烧方式, 金浸出率均未达到90%, 银浸出率低于50%; 添加剂焙烧效果显著, 在焙烧温度650℃、时间1.0 h、添加剂用量NaXY 100 kg/t+YC-1 20 kg/t的条件下, 金浸出率达到93.56%, 银浸出率达62.45%。

关键词: 含砷金精矿; 焙烧; 添加剂; 氰化浸出; 金; 银; 砷

中图分类号: TF832

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2020.04.022

文章编号: 0253-6099(2020)04-0088-04

Effect of Roasting Method on Leaching Rate of Gold and Silver from Arsenic-Containing Gold Concentrates

HU Yang-jia, ZHAO Zhi-qiang, LUO Si-gang, ZHAO Jie, WANG Guo-qiang

(State Key Laboratory of Mineral Processing Science and Technology, Mining and Metallurgy Technology Group Co Ltd, Beijing 100160, China)

Abstract: The arsenic-containing gold concentrates used in the experimental study have a fine dissemination of gold minerals, with gold predominately wrapped in the sulphide minerals, such as pyrite and arsenopyrite. A process consisting of pretreatment with roasting and cyanidation leaching was adopted in the experiment and the effects of one-stage roasting, two-stage roasting and the roasting with additives on the following cyanidation leaching results were investigated in the experiments. It is found that the traditional one-stage roasting and two-stage roasting process just lead to the gold leaching rate less than 90% and silver leaching rate less than 50%. However, the roasting with additives can bring in a remarkable effect, showing that gold leaching rate is up to 93.56% and silver leaching rate reaches 62.45% after an one hour roasting process at 650℃ with additives of NaXY 100 kg/t and YC-1 20 kg/t.

Key words: arsenic-containing gold concentrate; roasting; additives; cyanidation leaching; gold; silver; arsenic

随着我国禀赋较好的金矿资源逐渐枯竭, 国内各黄金冶炼企业将面临越来越多的难处理金矿石。目前难处理金矿石高效提金已成为黄金提取领域的研究热点。微细粒含砷金精矿作为典型的难处理矿石, 其中大部分金以微细粒或次显微金形式被包裹, 或赋存于黄铁矿和毒砂的晶格中^[1-4], 同时由于精矿中存在大量毒砂, 会降低氰化钠溶液的活性, 采用常规细磨-氰化浸出的方法难以获得较高的浸出率。因此, 这类矿石在氰化浸出前必须经过预处理, 将黄铁矿、毒砂氧化, 使包裹其中的金、银暴露出来, 并脱除有害元素砷。目前焙烧是最为成熟的预处理工艺, 采用合适的焙烧

方式和工艺参数能够获得较高的金、银回收率^[5-8]。本文采用焙烧预处理-氰化浸出工艺处理某含砷金精矿, 研究了不同焙烧方式对金、银浸出率的影响。

1 实验

1.1 实验原料

实验所用矿样为浮选得到的含砷金精矿, 其中金属矿物主要为黄铁矿、毒砂以及少量的黄铜矿、方铅矿, 脉石矿物主要有石英、白云石、绢云母。该金精矿化学成分分析结果见表1, 金化学物相分析结果见表2, 粒度分析结果见表3。

① 收稿日期: 2020-02-20

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAB13B02); 北京矿冶科技集团有限公司基金项目(JTKJ1820)

作者简介: 胡杨甲(1984-), 男, 安徽安庆人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为有色金属选冶工艺。

表1 金精矿主要化学成分分析结果(质量分数)/%

| Au ¹⁾ | Ag ¹⁾ | Cu | Pb | Zn | S | Fe |
|------------------|------------------|------------------|--------------------------------|------|-------|------------------|
| 45.31 | 28.41 | 0.036 | 0.095 | 0.20 | 18.46 | 16.22 |
| As | Sb | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | MgO | K ₂ O |
| 3.05 | 0.015 | 41.12 | 9.16 | 2.05 | 1.86 | 3.70 |

1) 单位为 g/t。

表2 金化学物相分析结果

| 相别 | 金含量/(g·t ⁻¹) | 金分布率/% |
|----------|--------------------------|--------|
| 裸露金 | 18.08 | 39.90 |
| 硫化物包裹金 | 26.71 | 58.94 |
| 硅酸盐矿物包裹金 | 0.52 | 1.16 |
| 合计 | 45.31 | 100.00 |

表3 金精矿粒度分析结果

| 粒度/mm | 金含量/(g·t ⁻¹) | 金分布率/% |
|--------------|--------------------------|--------|
| +0.074 | 17.50 | 11.75 |
| -0.074+0.038 | 30.20 | 10.72 |
| -0.038+0.020 | 50.00 | 16.59 |
| -0.020 | 72.40 | 60.94 |
| 合计 | 45.41 | 100.00 |

结果表明,金精矿含砷 3.05%,金主要以硫化物(黄铁矿、毒砂)包裹金形式存在,且大部分金分布在细粒级矿物中。

1.2 实验方法及设备

1.2.1 焙烧实验

一段焙烧实验:称取 200.0 g 金精矿置于瓷舟中(添加剂焙烧实验中按一定比例加入添加剂混匀),放入升至设定温度的 SX-12-10 箱式电阻炉中,恒温焙烧至设定时间后取出瓷舟,冷却至室温后得到焙砂。

两段焙烧实验:称取 200.0 g 金精矿置于瓷舟中,放入升至设定温度的 SX-12-10 箱式电阻炉中,恒温焙烧至设定时间,完成第一阶段焙烧;继续升温 20 min 至设定温度,恒温焙烧至设定时间,完成第二阶段焙烧;取出瓷舟,冷却至室温后得到焙砂。

1.2.2 氰化浸出实验

称取一定质量的焙砂洗涤后置于烧杯中,调节矿浆浓度为 33%,添加石灰调节矿浆 pH 值至 11.5 左右,按 4.0 kg/t_{焙砂} 加入氰化钠,采用 IKA-P4 型搅拌机机械搅拌浸出 24 h,浸出完成后过滤,滤渣经多次洗涤后烘干制样,采用高温灼烧-王水溶样-活性炭吸附-解吸-火焰原子吸收光谱法测定滤渣中的金、银含量。

2 实验结果与讨论

2.1 焙烧预处理-氰化浸出实验

2.1.1 一段焙烧条件实验

一段焙烧条件实验结果见图 1。由图 1 可知金、

银浸出率随温度升高呈先升高后降低趋势。在 650 °C 下焙烧 1.0 h,金浸出率相对较高;焙烧温度 650 °C、700 °C 条件下,延长焙烧时间金浸出率略有下降。500~550 °C 温度范围内,延长焙烧时间有利于银的浸出;继续升高温度至 600 °C 后,延长焙烧时间银浸出率呈下降趋势。实验结果表明,一段焙烧适宜的焙烧温度为 650 °C,焙烧时间为 1.0 h。

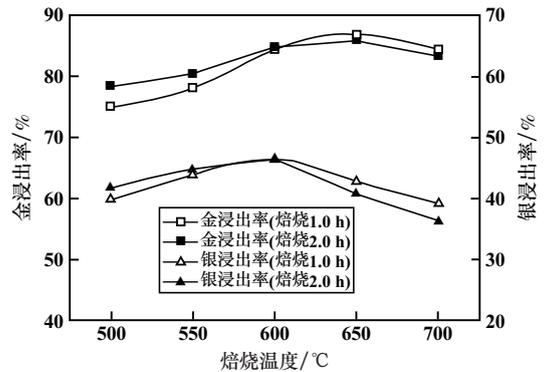


图1 焙烧温度和焙烧时间对金、银浸出率的影响

2.1.2 两段焙烧条件实验

为了进一步提高金、银回收率,进行两段焙烧实验,固定第二阶段焙烧温度为 650 °C、焙烧时间为 1.0 h,考察第一阶段焙烧温度及焙烧时间对金、银浸出的影响,结果见图 2。

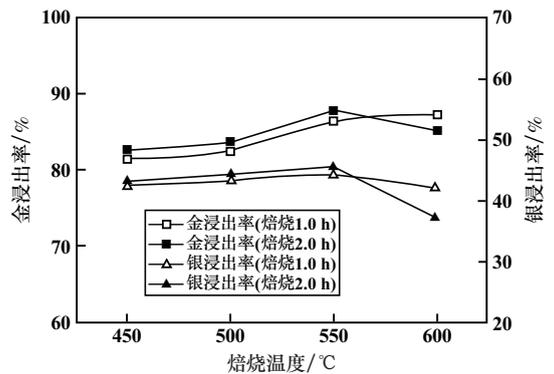


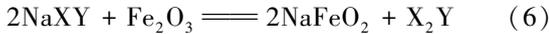
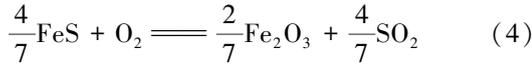
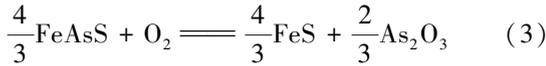
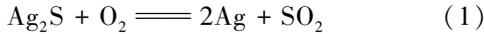
图2 第一阶段焙烧温度和焙烧时间对金、银浸出率的影响

由图 2 可知,焙砂中金、银浸出率随第一阶段焙烧温度上升呈先升高后降低趋势。焙烧温度低于 550 °C 时,延长焙烧时间,金、银浸出率升高;焙烧温度 600 °C 时,延长焙烧时间,金、银浸出率反而下降。因此,选择第一阶段焙烧温度为 550 °C、焙烧时间为 2.0 h。

2.1.3 添加剂条件实验

焙烧过程参数控制非常重要,焙烧温度过低,硫化物氧化反应不彻底,金、银不能完全暴露出来;焙烧温度过高,物料温度不易控制,会导致硅氧化物、铁氧化物二次包裹金、银,出现“过烧”现象,影响金、银浸

出^[9-10]。为进一步提高金、银回收率,进行添加剂(NaXY + YC-1)焙烧实验,焙烧过程主要化学反应有^[11-12]:



对以上化学反应进行了热力学分析,通过计算其 ΔG^\ominus - T 关系式^[11-12],得到吉布斯自由能和温度的关系图如图3所示。

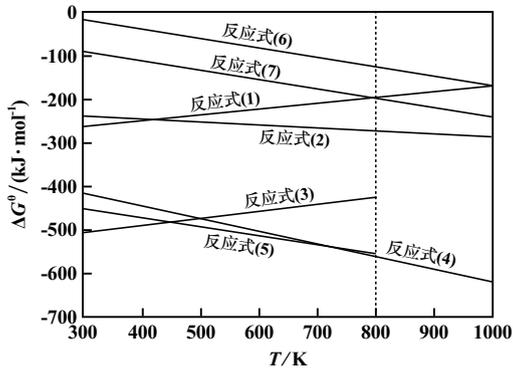


图3 添加剂焙烧过程主要化学反应的 ΔG^\ominus - T 图

分析图3可知,从热力学角度分析焙烧过程中以上反应均可进行。通过添加NaXY(一种碱性盐),可消耗焙烧过程中产生的活性硅氧化物和铁氧化物等酸性物质,避免由于局部温度过高引起的硅氧化物和铁氧化物包裹。另外添加剂YC-1(一种氧化剂)有助于硫化物的氧化,这些都有利于减少二次包裹金、银的生成,提高金、银浸出率。同时由于添加剂焙烧后生成 Na_3AsO_4 ,可通过水洗脱除种。

添加剂焙烧实验采用一段焙烧工艺,固定焙烧温度 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 、焙烧时间 1.0 h ,考察NaXY和YC-1用量对金、银氰化浸出率的影响。

添加剂YC-1用量为 20 kg/t 时,NaXY用量实验结果如图4所示。由图4可见,采用添加剂焙烧后,银浸出率大幅度提高,金浸出率也逐步提高,NaXY用量大于 100 kg/t 时,金、银浸出率变化趋缓。综合考虑,适宜的添加剂NaXY用量为 100 kg/t ,此时金和银浸出率分别达到 93.56% 和 62.45% 。

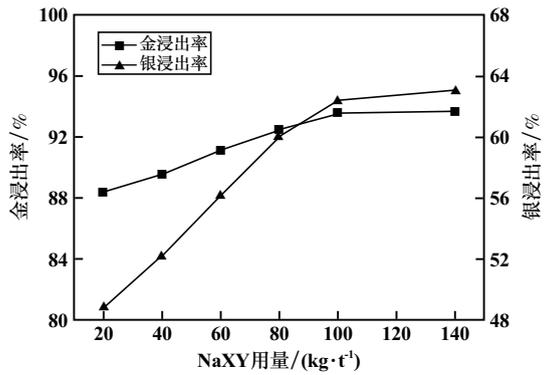


图4 添加剂NaXY用量对金、银浸出率的影响

添加剂NaXY用量为 100 kg/t 时,YC-1用量实验结果如图5所示。由图5可见,随着YC-1添加剂用量增加,金、银浸出率呈先上升后下降趋势,YC-1用量从 20 kg/t 增加至 30 kg/t 时,金浸出率变化不大,银浸出率反而呈下降趋势。综合考虑,适宜的YC-1添加剂用量为 20 kg/t 。

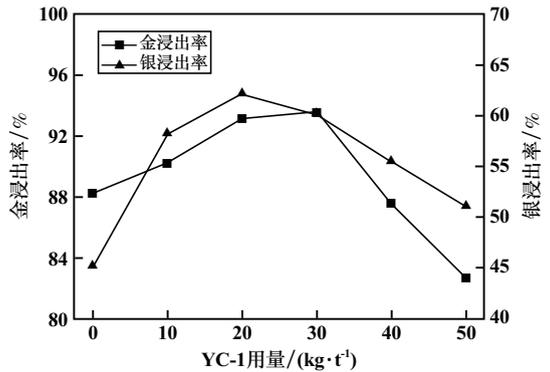


图5 添加剂YC-1用量对金、银浸出率的影响

2.2 焙烧方式对比分析

不同焙烧方式的优化条件实验结果对比见表4。由表4可知,采用添加剂焙烧后,金、银浸出率得到明显提升,分别达到 93.56% 和 62.45% 。

表4 不同焙烧方式的优化条件实验结果对比

| 焙烧方式 | 脱除率/% | | 浸出率/% | |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| | S | As | Au | Ag |
| 一段焙烧 | 96.53 | 78.16 | 86.87 | 42.77 |
| 两段焙烧 | 96.62 | 85.86 | 88.89 | 45.56 |
| 添加剂焙烧 | 97.12 | 89.69 | 93.56 | 62.45 |

实验结果表明,3种焙烧方式处理后硫脱除率都达到 95% 以上,一段焙烧和两段焙烧对砷的脱除率相对较差,采用添加剂焙烧优势明显。采用添加剂焙烧-氰化浸出工艺,As、S大部分进入烟气中,部分进入洗水中,洗水可通过化学方法除As、S后回用。氰化浸

出渣中还含有少量的 Au、Ag、Fe 等金属,回收经济价值不大。

3 结 论

1) 金精矿中金主要以硫化物(黄铁矿、毒砂)包裹金形式存在,采用常规细磨-氰化浸出工艺,金浸出率较低。

2) 采用常规焙烧方式,金浸出率均未达到 90%,银浸出率低于 50%。采用添加剂(NaXY 100 kg/t + YC-1 20 kg/t)焙烧,在 650 °C 条件下焙烧 1.0 h,金浸出率达到 93.56%,银浸出率达 62.45%。

3) 添加 YC-1 可加快硫化物氧化反应速率,添加 NaXY 可消耗焙烧过程中生成的活性硅氧化物和铁氧化物,降低二次包裹金、银的生成,因此银浸出率大幅提高,金浸出率也有所提高。此外添加 NaXY 焙烧后生成 Na_3AsO_4 ,有利于砷的脱除。

参考文献:

[1] 杨永斌,刘晓亮,李 骞,等. 某高砷高硫金精矿焙砂浸金特性的研究[J]. 矿冶工程, 2014, 34(3): 65-68.
 [2] 李 婕. 含砷、硫金精矿焙烧-氰化浸出工艺研究[J]. 湖南有色金属, 2009, 25(4): 32-33.

[3] 郑可利,华 杰. 某含砷金精矿的焙烧氧化浸出工艺研究[J]. 金属矿山, 2003(3): 26-27.
 [4] 刘秀儒,袁玉蝶,姚玉田. 含砷金矿碱焙烧法提金研究[J]. 黄金, 1991, 12(12): 37-38.
 [5] 易 雷,钟 义,朱超英. 某极微细粒难选金矿选冶工艺研究[J]. 矿冶工程, 2012(6): 58-59.
 [6] 江国红,欧阳伦熬,张艳敏. 含砷硫高碳卡淋型金矿石焙烧-氰化浸金工艺实验研究[J]. 湿法冶金, 2003, 22(9): 129-130.
 [7] 胡杨甲,贺 政,赵志强,等. 高砷难处理硫精矿氰化浸出提银实验研究[J]. 贵金属, 2015, 36(3): 14-15.
 [8] 李建政,王军强. 中亚某难处理金矿选冶工艺研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(5): 53-55.
 [9] Zhong Shuiping. Study and Application of Additive in Roasting Process for Silver Bearing Refractory Gold Concentrates[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2016(1): 27-29.
 [10] Tang D W, Gao P, Chen L, et al. The influence of desulfurization on gold leaching in the process of roasting pretreatment[J]. Precious metals, 2016, 37(4): 63-65.
 [11] Zhang Yan, Li Qian, Liu Xiaoliang, et al. A Thermodynamic Analysis on the Roasting of Pyrite[J]. Minerals, 2019(9): 220-223.
 [12] He Dongsheng, Feng Qiming, Zhang Guofan, et al. Thermodynamic analysis on oxidizing roasting process of stone coal[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2010(11): 50-53.

引用本文: 胡杨甲, 赵志强, 罗思岗, 等. 焙烧方式对含砷金精矿中金、银浸出率的影响[J]. 矿冶工程, 2020, 40(4): 88-91.

(上接第 87 页)

[3] Min Gan, Xiaohui Fan, Wei Lv, et al. Fuel pre-granulation for reducing NO_x emissions from the iron ore sintering process[J]. Powder Technology, 2016, 301: 478-485.
 [4] 刘瑞鹏. 铁矿石烧结过程中的氮氧化物排放规律及其影响因素试验研究[D]. 杭州: 浙江大学热能工程学院, 2015.
 [5] 吴胜利, 阙志刚, 苏 博, 等. 铁矿烧结工艺料层内脱硝技术的研究进展[J]. 工程研究, 2017, 9(1): 61-67.
 [6] 苏玉栋. 烧结主要工艺参数对烟气中 NO_x 排放的影响研究[D]. 上海: 上海交通大学环境科学与工程学院, 2014.
 [7] 何木光, 胡 鹏, 崔庆爽, 等. 烧结混合料增湿点火烧结试验[J]. 矿业工程, 2018, 16(4): 31-33.
 [8] 何木光, 蒋大军, 宋 剑, 等. 空气加湿对烧结性能指标的影响[J]. 钢铁钒钛, 2015, 36(3): 62-66.
 [9] Prasad A. Application effect of steam injection humidifier for sintering machine bed[J]. Modern Metallurgy, 2014(1): 7-10.
 [10] 裴元东, 欧书海, 马怀营, 等. 烧结料面喷吹蒸汽对烧结矿质量和 CO 排放影响研究[J]. 烧结球团, 2018, 43(1): 35-39.
 [11] 张 硕, 郝晓倩, 伯飞虎. 烧结过程中氮氧化物排放的研究[J]. 钢铁研究, 2017, 46(6): 110-115.
 [12] 苏玉栋, 李咸伟, 范晓慧. 烧结过程中 NO_x 减排技术研究进展[J]. 烧结球团, 2013, 38(6): 41-44.
 [13] 任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 等. 烧结过程 NO_x 和 SO_2 形成规律及烧结料组成对 NO_x 排放的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(10): 3669-3673.
 [14] 赵 凯, 李 杰, 张玉柱, 等. 邢钢烧结原料基础特性及优化配矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2016, 36(4): 88-92.

[15] 裴元东, 史凤奎, 吴胜利, 等. 烧结料面喷吹蒸汽提高燃料燃烧效率研究[J]. 烧结球团, 2016, 41(6): 16-20.
 [16] Xuling Chen, Yunsong Huang, Min Gan, et al. Effect of $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ content in circulating flue gas on iron ore sintering with flue gas recirculation[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2015, 22(12): 1107-1112.
 [17] Nobuyuki OYAMA, Yuji IWAMI, Tetsuya YAMAMOTO, et al. Development of secondary-fuel injection technology for energy reduction in the iron ore sintering process[J]. ISIJ International, 2011, 51(6): 913-921.
 [18] Ryu H J, Lim N Y, Bae D H, et al. Carbon deposition characteristics and regenerative ability of oxygen carrier particles for chemical-looping combustion[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2003, 20(1): 157-162.
 [19] 高正阳, 杨维结, 阎维平, 等. 煤焦催化 HCN 还原 NO 的反应机理[J]. 燃料化学学报, 2017, 45(9): 1043-1048.
 [20] 韩云龙, 李迎根, 郑 昭, 等. 铁矿石尾矿粉催化还原 NO 的实验研究[J]. 过程工程学报, 2018, 18(2): 350-355.
 [21] 孙志君, 苏 胜, 宁 星, 等. 煤焦 O_2/CO_2 燃烧方式下 NO_x 生成与异相还原特性[J]. 燃烧科学与技术, 2014, 20(6): 517-522.
 [22] 郝 丹, 汪 洋, 刘建忠, 等. 加湿燃烧研究现状[J]. 热能与动力工程, 2014, 29(1): 1-6.
 [23] 苟 湘, 周俊虎, 周志军, 等. 水蒸气对煤粉燃烧生成 NO 的影响[J]. 热力发电, 2007(10): 4-8.

引用本文: 易正明, 覃佳卓, 邓植丹, 等. 烧结加湿燃烧对 NO_x 排放影响的研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(4): 84-87.