

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2020.02.004

硫精矿深度精选技术与应用进展

敖顺福¹ 李洪强² 李佳磊³

- (1. 云南驰宏锌锗股份有限公司, 云南 曲靖 655011;
2. 武汉工程大学 兴发矿业学院, 武汉 430073;
3. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093)

摘 要: 综述了硫精矿深度精选技术的难点与重要性, 以及浮选、重选、磁选及选-冶联合工艺在硫精矿深度精选综合回收有用组分、降低砷含量和脉石矿物含量的进展, 重点指出了浮选是硫精矿深度精选提质的最有效方法, 新型高效砷矿物抑制剂是含砷硫精矿浮选降砷的关键, 重选-浮选、磁选-浮选联合工艺可使硫精矿深度精选更加简单易行, 且经济环保, 但复杂难选硫精矿则需要使用选-冶联合工艺。

关键词: 硫精矿; 深度精选; 选矿工艺; 综合利用; 环境保护

中图分类号: TF816 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-7854 (2020) 02-0015-07

Technology and its application progress of deep concentration of sulfur concentrate

AO Shun-fu¹ LI Hong-qiang² LI Jia-lei³

- (1. Yunnan Chihong Zn & Ge Co. Ltd., Qujing 655011, Yunnan, China;
2. School of Xingfa Mining, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China;
3. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The technical difficulties and importance in further concentration of sulfur concentrate were analyzed. The progress of flotation, magnetic separation, chemical beneficiation and combined processes for the comprehensive recovery of useful components and the reduction of arsenic content and gangue mineral content in the further concentration of sulfur concentrate are reviewed. It is pointed out that flotation is the most effective technology for upgrading of sulfur concentrate. The research focus of arsenic-containing sulfur concentrate for arsenic reduction is focused on the use of new depressants of arsenic mineral. Combined processes can make sulfur concentrates more economical, environmentally friendly, and simple to implement. Some refractory sulfur concentrates may require the use of a combined process.

Key words: sulfur concentrate; further concentration; beneficiation process; comprehensive utilization; environmental protection

硫铁矿主要包括黄铁矿、磁黄铁矿及白铁矿, 广泛存在于各类型矿床中, 具有硫资源及铁资源的双重属性。我国硫铁矿资源丰富, 但贫矿多、富矿少, 常伴生于有色金属硫化矿、煤矿和非金属矿

中^[1]。高品位硫铁矿开采后可直接用于制酸, 低品位硫铁矿及伴生硫铁矿经选矿富集得到焙烧制酸的原料硫铁矿精矿 (以下简称“硫精矿”)。硫铁矿的综合利用水平主要取决于硫精矿质量, 硫精矿深度精选可强化除去或降低硫精矿中的脉石矿物及有害杂质, 推动硫精矿质量的改善与提高。

由于硫精矿主要用于制酸, 在制酸过程中硫资源得到了充分利用, 铁和其它伴生有用组分则转入

收稿日期: 2019-04-05

第一作者: 敖顺福, 高级工程师, 主要从事选矿技术、矿产资源综合利用及清洁生产的研究及管理工作。E-mail: aoshunfu1982@126.com

烧渣,但烧渣中相关矿物的理化性能发生了改变,增加了烧渣回收再利用难度,不仅造成铁及其它有用元素的浪费,还给环境增加巨大负担。由于硫精矿的铁含量随着含硫量的提高而升高,烧渣铁品位也随硫精矿含硫量的提高而升高,因此提高硫精矿的硫含量,有利于提高硫精矿烧渣的铁含量,从而高品质的硫精矿制酸后可以直接排出,作为炼铁原料的烧渣。我国铁矿资源贫矿多、富矿少,矿石类型复杂,铁矿石的供应主要依靠进口,随着铁矿石进口量增大及价格攀升,硫精矿制酸烧渣中潜在铁资源的开发利用显得迫切而重要^[2]。相对于烧渣再选回收利用其中的铁资源及其它有用组分,进行硫精矿深度精选利用则更为简单易行。因此,对硫精矿深度精选,回收伴生有用组分及降低有害杂质和脉石矿物,有利于硫酸渣减量化与资源化利用,可提高硫铁矿的开发利用价值,同时具有环境和经济效益。本文对硫精矿深度精选研究进行综述,以期对当前硫铁矿资源的提质增效利用有一定的参考作用。

1 硫精矿深度精选技术难点

硫铁矿经济价值较低,除受重视程度不够外,更受到矿石性质、选矿工艺等因素的影响,导致硫精矿品质普遍不高。进行硫精矿深度精选的技术难点主要表现在:

1) 硫铁矿的矿物晶胞参数、晶体结构和杂质等因成矿温度、压力及环境因素的变化而有较大的区别,从而造成了矿物浮选行为的差异,增加了硫铁矿浮选难度。有色金属硫化矿与硫铁矿的连生嵌布关系密切、相互交错重叠等,加之硫铁矿硬度大、难磨,使得部分有色金属硫化矿与硫铁矿的选别分离困难,影响硫精矿质量^[3-4]。

2) 为降低生产成本,部分硫铁矿选矿采用了较为简单的选矿工艺,导致难以获得高品位的硫精矿。伴生硫铁矿在选矿时,一般侧重于主要有用组分的回收,硫铁矿作为副产品顺带回收或被丢弃于尾矿,选矿工艺不利于硫铁矿的回收,加之原矿中伴生硫铁矿含量普遍不高,导致硫精矿的质量较低。

3) 部分选矿厂为了获得主金属矿物的高品位精矿产品,通常对伴生硫铁矿进行强化抑制,导致被抑制的硫铁矿难以充分活化,以致强化捕收浮选获得的硫精矿品质不高。

4) 毒砂与硫铁矿共生关系密切,且毒砂与黄

铁矿结晶构造和表面特性的相似,二者的可浮性相近,毒砂常被浮选进入硫精矿中,导致硫精矿含砷高,影响精矿品质。

5) 在浮选体系中,矿浆中的难免金属离子对脉石矿物有活化作用,硫铁矿与脉石矿物的可浮性差异变小,在浮选过程中使脉石矿物和硫铁矿一同浮起,影响了硫精矿品质^[5-6]。

2 硫精矿深度精选技术与应用进展

2.1 硫精矿深度精选回收有用组分

部分硫精矿含有铜、铅、锌、锡等伴生元素,这些伴生元素是硫精矿制酸过程中的有害杂质,为获得高品质的硫精矿,应进行深度精选去除,并尽可能地将其综合回收利用,从而变害为利、变废为宝。由于硫精矿的化学组成、矿物种类及含量、嵌布粒度及共生关系不同,采用的选矿工艺也不尽相同,总体来说,常用工艺有单一浮选、磁选—浮选联合、重选—浮选联合、选冶联合等。

2.1.1 单一浮选工艺

相对于天然硫铁矿的浮选,采用预先脱药处理脱除矿浆及矿物表面吸附的药剂可改善浮选效果,而对硫精矿再磨可提高矿物的单体解离度,并使矿物表面吸附的部分浮选药剂脱除,获得矿物更多的新鲜表面,使浮选药剂能够更好的与矿物进行作用。

周怡玫等^[7]针对某硫精矿含有较高铅、锌、金、银等贵金属元素的特点,采用磨矿、硫化钠脱药,同时使用选择性较好的捕收剂 305 和乙硫氮组合捕收的浮选工艺,获得了铅、锌总含量高于 45% 及含银 635 g/t 的高银铅锌混合精矿。

钟国建等^[8]针对大宝山铜矿含铜 0.31% 的硫精矿,采用 DY-1 为铜捕收剂,石灰为黄铁矿抑制剂,松醇油为起泡剂,将硫精矿磨至 -0.045 mm 粒级含量占 83.25%,开路试验获得了平均产率 1.07%、平均铜品位 13.19% 及回收率 45.68% 的铜精矿,平均硫品位 41.20% 及回收率 84.65% 的硫精矿。

吴新义^[9]针对含铜 0.247% 的硫精矿,采用 C330 为铜捕收剂,石灰为黄铁矿抑制剂,松醇油为起泡剂,将硫精矿磨矿至 -0.075 mm 粒级含量占 85%,经 1 次粗选、1 次精选及 1 次扫选的闭路试验,获得了产率 0.82% 及铜品位 17.51%、铜回

收率 59.54% 的铜精矿。

乔吉波等^[10]公开了一种从硫精矿中回收锌的选矿工艺,该工艺通过添加适量石灰调整矿浆 pH 值,同时抑制黄铁矿,再添加硫酸铜活化闪锌矿,最后添加捕收剂苯胺黑药及起泡剂浮选闪锌矿,采用 1 次粗选、2 次扫选、3 次精选(粗选精矿再磨至 -0.043 mm 粒级含量占 90% 以上)的工艺流程,可获得锌品位大于 40%、锌回收率大于 80% 的锌精矿。

大屯选矿厂产出的硫精矿含铜较高,采用硫化钠脱药、石灰抑制黄铁矿和磁黄铁矿、黄药和丁基铵黑药为组合捕收剂,在磨矿细度 -0.074 mm 含量占 95% 的条件下,通过 1 次粗选、1 次扫选及 5 次精选的工艺流程试验,获得铜品位 10.15%、回收率 53.28% 铜精矿。基于试验研究成果,选用了 $\Phi 1\,500 \times 2\,400\text{ mm}$ 球磨机、 $\Phi 300\text{ mm}$ 旋流器、6A 浮选机等设备建设了再选工艺,在生产中获得了铜品位 10.76%、对原矿回收率 5.90% 的铜精矿,投入生产使用 1 年半的时间即创效 390.98 万元^[11]。

云南某大型硫化铅锌矿选矿厂产出含锌 1.6%~2.0% 及铅 0.6% 左右的硫精矿,通过采用 1 次粗选、1 次扫选,粗精矿经立式螺旋搅拌磨机再磨(磨矿细度达到 $-45\text{ }\mu\text{m}$ 含量占 90%)后再 3 次精选,获得了含锌 43%、铅 7.5%,锌回收率 55%、铅回收率 18% 的铅锌混合精矿,每天精矿产量为 16.80 t,取得了较好的经济效益^[12]。

2.1.2 重选—浮选联合工艺

采用传统的单一浮选工艺进行硫精矿深度精选易获得较好的精矿品位及回收率,但选矿药剂成本较高且选矿废水回收利用较困难,因而针对不同矿物间密度差异较大的硫精矿深度精选,尤其是含密度较大的钨、锡矿物等的硫精矿,合理的联合使用技术成熟、成本低及污染小的重选,可使硫精矿深度精选更加经济环保,且简单易行。

谢贤等^[13]针对某选矿厂含锡高的硫精矿,采用新型硫捕收剂 MA 和再磨浮选流程能够较好地分离该硫精矿中的硫和锡,闭路试验可获得锡品位和回收率分别达到 2.87% 和 76.80% 的尾矿和硫品位和回收率分别达到 37.81% 和 92.13% 的硫精矿,对尾矿进一步摇床重选,获得锡品位 31.24%、锡作业回收率 68.14% 的锡精矿。

卡房硫精矿含砷高、含硫低,并含有铜、铋、锡、金、银等有色金属,致使硫精矿长期滞销,在试验研究的基础上,建设了 300 t/d 硫精矿再选综

合回收系统。该系统由入选硫精矿细磨,1 次粗选、2 次精选及 1 次扫选选铜,2 次粗选、2 次精选及 2 次扫选降砷,1 次粗选及 1 次扫选重选选锡铋钨等部分组成,投入生产后的当年即收回了全部投资^[14]。

2.1.3 磁选—浮选联合工艺

不少硫精矿都含有磁黄铁矿,磁黄铁矿易氧化和泥化,且可浮性通常较差,因而含磁黄铁矿的硫精矿采用浮选进行深度精选的难度相对较大,但根据磁黄铁矿的磁性特征,深度精选中常辅以成本低、操作简单且污染小的磁选,有效解决了含磁黄铁矿硫精矿提质的难题。

沈旭^[15]针对某含铜 0.41% 的硫精矿,铜矿物主要为黄铜矿和辉铜矿,硫矿物主要为磁黄铁矿,其次是黄铁矿,脉石矿物为少量蛇纹石、滑石、绿泥石等易泥化矿物,铜矿物与黄铁矿关系密切,基本以较粗的连生体形式存在,而磁黄铁矿基本不含铜,采用“磁选脱硫—脱泥—浮铜”流程回收铜,获得了铜品位 20.26%、铜回收率 73.41% 的铜精矿。

王佩佩等^[16]针对云南某含钨硫精矿进行了综合回收钨的选矿试验,采用磁选脱硫可脱除产率达 44.02% 的磁黄铁矿,获得硫品位 36.68%、硫回收率 58.89% 的硫精矿及 WO_3 品位 2.27%、 WO_3 回收率 98.27% 的非磁性产品。非磁性产品经浮选抑硫选钨后得到钨粗精矿,钨粗精矿经加温精选后可以获得 WO_3 品位 63.17%、 WO_3 回收率 62.82% 的钨精矿。

李俊旺^[17]针对某含锌硫精矿,先采用磁选脱出硫精矿中磁黄铁矿,对磁选后的非磁性产品采用硫化钠+活性炭进行脱药,再用石灰作为黄铁矿抑制剂,以硫酸铜作为闪锌矿活化剂及丁基黄药作为闪锌矿捕收剂,可获得锌品位 43.65%、锌回收率 76.25% 的锌精矿,磁选产品及浮选锌后的尾矿合并为综合硫精矿,其硫品位为 35.97%、硫回收率为 96.76%。

邹坚坚等^[18]公开了一种含磁黄铁矿的高砷硫精矿砷硫分离选矿工艺,该工艺首先对高砷硫精矿进行再磨,将再磨后的矿料预先脱药,将矿物表面残留的药剂脱除,然后采用砷抑制剂进行浮选,得到以黄铁矿为主的硫精矿,尾矿经弱磁选选出磁性较强的磁黄铁矿,最后采用强磁选选出磁性较弱的磁黄铁矿,将其合并为以磁黄铁矿为主的硫精矿,并同时得到砷精矿产品。

2.1.4 选冶联合工艺

对于化学成分及矿物组成复杂的硫精矿,采用单一的选矿工艺不再适合,通过选-冶联合的方式,合理利用选矿及冶炼相联合的协同优势,有效发挥选-冶联合工艺在原料适应性强及综合回收元素种类多等方面的作用,成为了硫精矿深度精选研究及发展的重要方向。

胡真等^[19]针对某含铜 0.76%、含铋 1.77% 的硫精矿,铜主要赋存于黄铜矿中,铋主要以辉铋矿、辉铅铋矿、铋华和自然铋等形式存在;含铜矿物主要以连生体形式存在于粗粒级中,含铋矿物多以微细粒单体形式存在于微细粒级中,以 0.043 mm 为分级粒度进行分级,粗粒级磨细至 -0.074 mm 粒级含量占 81%,以石灰为抑制剂、ZA 为铜捕收剂,经 1 次粗选、2 次精选及 2 次扫选闭路浮选,获得了铜品位 18.29%、铜作业回收率 87.79% 及含铋 0.47% 的铜精矿。细粒级在盐酸浓度 3 mol/L、氯化钠用量 100 kg/t、BJ 用量 150 kg/t、液固比 3 的条件下常温浸出 2.5 h,获得了铋浸出率 95.54%、对硫精矿回收率 90.04%,浸渣铋品位 0.13% 的指标。

邹坚坚等^[20]针对某含铋 0.36%、含银 16.1 g/t 的硫精矿,采用弱磁选—高梯度强磁选除磁黄铁矿,非磁性产品按 0.043 mm 分级, -0.043 mm 粒级在浸出剂 BJ 用量 150 kg/t、盐酸浓度 3 mol/L、氯化钠用量 150 kg/t、液固比 3、浸出时间 2.5 h 条件下常温浸出,获得了铋浸出率 95.67%、银浸出率 88.08%,铋回收率 73.14%、银回收率 66.34%,浸渣铋、银品位分别降至 0.13%、13.70 g/t 的指标。

徐月冰^[21]针对某含铅、锌和铜的硫精矿,通过再磨后采用氢氧化钠作为调整剂,乙硫氮、丁基黄药及丁基铵黑药作为捕收剂,通过混合浮选得到产率为 17.6% 的铅锌铜混合粗精矿,铅、锌和铜的回收率分别达到了 85.3%、82.4% 和 86.5%。在对该混合粗精矿采用再磨后浮选分离效果不理想的情况下,采用全氧化焙烧—硫酸浸出一锌粉置换工艺实现了铅锌铜混合精矿的分离。

2.2 硫精矿深度精选降低砷含量

含砷硫精矿在制酸过程中容易发生设备堵塞、催化剂中毒、砷污染等问题,因此降低硫精矿含量砷一直是选矿研究的重点。硫精矿深度精选脱砷,不仅使硫精矿品质得以改善,还可能使脱除的砷矿物作为砷精矿得以回收利用。但与原矿选矿相比,

硫精矿中的砷矿物和硫铁矿都已不再是新鲜矿物表面,无疑增加了浮选降砷的难度,因此,研究应用新型高效砷矿物抑制剂成为了硫精矿降砷的关键。

李俊旺等^[22]针对某含砷硫精矿进行了降砷研究,通过“磁选—浮选”联合选矿工艺流程,采用磁选回收磁黄铁矿,获得了含硫 33.58%、含砷 0.05% 的磁选硫精矿。磁选尾矿调节矿浆 pH 值为 8.5,采用漂白粉作为毒砂抑制剂、用丁基黄药作为黄铁矿捕收剂,实现了毒砂与黄铁矿的浮选分离,获得了含硫 37.28%、含砷 0.24% 的磁选硫精矿。磁选硫精矿与浮选硫精矿合并获得了含硫 35.06%、含砷 0.13% 的综合硫精矿。

叶小璐等^[23]针对某高砷硫精矿进行了砷硫分离研究,采用硫化钠预先脱药,并配合高效砷抑制剂 HB,以丁基黄药为捕收剂、松醇油为起泡剂,获得了硫品位 47.43%、含砷 0.67%、硫回收率 75.31% 的硫精矿。然后采用磁选实现了磁黄铁矿与毒砂的高效分离,获得了硫品位 33.67%、硫回收率 18.96% 的高铁硫精矿,以及砷品位 37.86%、砷回收率 89.42% 的砷精矿,实现了高砷硫精矿资源化利用。

杨玮等^[24]采用有机抑制剂 MF 进行了硫精矿降砷的浮选试验研究,砷硫精选精矿经 1 次粗选、2 次精选及 1 次扫选,获得硫精矿硫品位 43.85%、砷品位 0.58% 及硫回收率 54.95% 的砷硫分离指标。

董明传^[25]针对广西大厂含硫只有 36% 及含砷 10% 以上的高砷硫精矿,维持原有的选矿工艺流程不变,将原砷硫分离采用的漂白粉和高锰酸钾改为 YSC 无机组合药剂,在生产实践中获得了含硫 40% 以上、含砷 1% 以下的硫精矿,以及含砷 26% 以上的砷精矿,实现了砷硫双资源的综合回收。

2.3 硫精矿深度精选脱除脉石矿物

2.3.1 单一浮选工艺

硫精矿中的脉石矿物多为硅、钙、铁等的氧化物、含氧盐矿物等,而硫精矿中的黄铁矿、磁黄铁矿及白铁矿属于相对易浮的硫化矿物,易被黄药类、黑药类等捕收剂作用浮选,再以适当的调整剂活化硫铁矿或抑制脉石矿物等,进一步扩大硫铁矿与脉石矿物间的可浮性差异,经合适的浮选工艺流程深度精选即可达到降低脉石矿物含量的目的。

刘安平等^[26]针对梅山矿业公司硫品位为 30.53% 的硫精矿,主要金属矿物有黄铁矿(磁黄铁矿)、磁铁矿、赤铁矿、菱铁矿,脉石矿物为白云石、方解石、绿泥石、石英等,采用 WHL-Y1

作为碳酸盐类矿物的抑制剂、乙基黄药作为捕收剂，经1次粗选、1次精选、2次扫选及精选尾矿与扫选精矿混合后1次精选闭路流程，获得产率为76.71%、硫品位为39.62%、杂质MgO含量为0.41%、硫回收率为97.11%的硫精矿。

衣德强^[27]针对某含铁白云石、白云石、方解石、透辉石、透闪石、阳起石等脉石矿物的硫精矿，采用玉米淀粉、氢氧化钠作为脉石抑制剂，乙基黄药作为捕收剂，进行2次开路精选工业试验，得到高硫矿和低硫矿两个产品，其中高硫矿产率39.82%、硫品位37.55%、MgO品位0.582%，低硫矿硫品位28.71%。

洪淦新^[28]针对某硫精矿，硫精矿中的主要金属矿物为黄铁矿和磁黄铁矿，少量白铁矿、黄铜矿等，脉石矿物主要有石英、蛇纹石等，采用硫酸作为矿浆pH值调整剂、水玻璃作为分散剂及异丁基黄药作为捕收剂，经1次粗选、1次精选及1次扫选，硫与铁品位之和达90.92%，提高了8.70%，硫损失率1.19%。

2.3.2 重选—浮选联合工艺

硫铁矿具有硬度高、比重大的特点，通常磨矿选别后部分硫铁矿仍然具有相对较粗的粒度，采用浮选进行选别，粗颗粒硫铁矿容易沉淀、累积在搅拌槽、浮选机等设备设施中，将可能引起沉槽、电机烧毁等，从而影响浮选的稳定高效进行，因此深度精选中，预选采用成本较低且污染少的重选回收粗颗粒硫铁矿，可简化选矿工艺及提高深度精选工艺流程的适用性。

李茂林等^[29]使用旋流器处理浮选得到的粗选精矿，在合适的参数配置下，旋流器沉砂硫品位大于46.5%，成为合格精矿。微细粒的旋流器溢流经过1次粗选、1次精选、2次浮选，也能得到硫品位大于47%的精矿。两种精矿混合，即可得到单一的高品位硫精矿产品。

3 结论与展望

随着矿产资源的日益耗竭及环境保护要求不断提高，硫精矿作为单一的硫资源使用不尽科学合理，硫精矿更应作为生产硫酸、炼铁及综合回收有用组分的综合矿物原料资源进行开发利用。开展硫精矿深度精选，烧渣联产铁精矿具有巨大经济效益和环境效益，可综合提高硫精矿制酸的产业链优势，因此矿山、制酸、钢铁冶炼等企业应进行联合技术攻关，国家有关部门也应当出台

激励性政策。

浮选是硫精矿深度精选提质最有效的工艺，但新型高效砷矿物抑制剂是含砷硫精矿浮选降砷的关键。结合硫精矿性质，合理辅以成本低、污染少的磁选、重选等工艺形成联合流程，可以使硫精矿深度精选提质更加经济环保，且简单易行，而对于复杂难选的硫精矿则需要使用选冶联合工艺。

硫精矿是经过选别之后获得的精矿产物，与原矿相比，其含有的杂质矿物及脉石矿物含量更低、嵌布粒度更细、包裹更复杂，微细粒选矿将是硫精矿深度精选的主导方向。针对硫精矿深度精选进行细磨甚至超细磨及微细粒选别技术与设备的研究与应用，进一步降低入选粒度下限，将是当前和今后面临的重要任务。

参考文献

- [1] 《矿产资源工业要求手册》编委会. 矿产资源工业要求手册[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 330-337.
Handbook for industrial requirements of mineral resources editors. Handbook for industrial requirements of mineral resources [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010: 330-337.
- [2] 孙炳泉. 近年我国复杂难选铁矿石选矿技术进展[J]. 金属矿山, 2006 (3): 11-13.
SUN B Q. Progress in China's complex refractory iron ore beneficiation technology in recent years [J]. Metal mine, 2006 (3): 11-13.
- [3] 敖顺福, 胡彬, 赵华科, 等. 某高硫铅锌矿选矿生产工艺流程考查及改进措施研究[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39 (1): 58-63.
AO S F, HU B, ZHAO H K, et al. Study on the investigation and optimization of processing flowsheet for a high sulfur-lead-zinc ore [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39 (1): 58-63.
- [4] 王丽娟, 王兴荣, 江维, 等. 某铜硫矿选矿工艺流程考查[J]. 现代矿业, 2014, 30 (10): 198-201.
WANG L J, WANG X R, JIANG W, et al. Examination analysis of beneficiation production process for a copper sulfide ore [J]. Modern Mining, 2014, 30 (10): 198-201.
- [5] 黄思捷. 硫精矿降硅工艺及机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
HUANG S J. Study on technology and mechanism of reducing silicone content of sulfur concentration [D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [6] WANG P, QIN W, REN L, et al. Solution chemistry and utilization of alkyl hydroxamic acid in

- flotation of fine cassiterite [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23 (6): 1789-1796.
- [7] 周怡玫, 官长平, 汤小军. 综合回收硫精矿中铅锌银选矿工艺研究[J]. 有色金属 (选矿部分), 2012 (4): 33-36.
ZHOU Y M, GUANG C P, TANG X J. Research on beneficiation technology of comprehensive recovery of lead, zinc and silver minerals from sulphur concentrate [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2012 (4): 33-36.
- [8] 钟国建, 肖骁, 龙渊, 等. 硫精矿立磨再磨再选回收铜试验研究[J]. 矿冶工程, 2016, 36 (1): 52-55.
ZHONG G J, XIAO X, LONG Y, et al. Reclaiming copper minerals from sulfur concentrate after reground with vertical mill [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2016, 36 (1): 52-55.
- [9] 吴新义. 罗河矿业公司硫精矿铜硫分离选矿试验[J]. 现代矿业, 2017 (1): 135-138.
WU X Y. Copper sulfur separation test of sulfur concentrate from Luohe Mining Company [J]. Modern Mining, 2017 (1): 135-138.
- [10] 乔吉波, 刘全军, 梁溢强, 等. 一种从铅硫混合精矿分离尾矿中回收闪锌矿的方法: 106552715A [P]. 2017-4-5.
QIAO J B, LIU Q J, LIANG Y Q, et al. A method of recovering sphalerite from separating tailings from lead-sulphur mixed concentrate; 106552715A [P]. 2017-4-5.
- [11] 王慧, 周忠堂. 从硫精矿中回收铜的浮选工艺试验研究与生产实践[J]. 四川有色金属, 2011 (3): 20-25.
WANG H, ZHOU Z T. The flotation process tests studies and production practice on comprehensive utilization copper from sulphur concentrate [J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2011 (3): 20-25.
- [12] 刘国蓉, 孟玮, 孙小旭. 立磨机在某硫精矿中回收锌的应用[J]. 矿冶, 2019, 28 (1): 67-70.
LIU G R, MENG W, SUN X X. Application of vertical mill in zinc recovering from sulfur concentrate [J]. Mining and Metallurgy, 2019, 28 (1): 67-70.
- [13] 谢贤, 袁威, 张胜东, 等. 滇东硫精矿锡硫分选试验研究[J]. 云南冶金, 2017, 46 (4): 12-15.
XIE X, YUAN W, ZHANG S D, et al. The experimental study on tin and sulfur separation from sulfur concentrate in East Yunnan [J]. Yunnan Metallurgy, 2017, 46 (4): 12-15.
- [14] 袁经中, 李燕华, 乐陶. 卡房高砷低品位硫精矿综合回收利用研究与实践[J]. 现代矿业, 2015 (6): 232-233.
- YUAN J Z, LI Y H, LE T. Research and practice on comprehensive recovery and utilization of Kafang high arsenic and low grade sulfur concentrate [J]. Modern Mining, 2015 (6): 232-233.
- [15] 沈旭. 从某硫精矿中回收铜的试验研究[J]. 有色金属 (选矿部分), 2016 (5): 13-17.
SHEN X. Study on recovery of copper from sulphur concentrate [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2016 (5): 13-17.
- [16] 王佩佩, 任浏伟, 曾锦明. 云南某含钨硫精矿选矿试验研究[J]. 有色金属 (选矿部分), 2016 (1): 43-46.
WANG P P, REN L Y, ZENG J M. Research on mineral processing technology of a tungsten contained sulfur concentrate of Yunnan [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2016 (1): 43-46.
- [17] 李俊旺. 综合回收硫精矿中锌的试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2018 (8): 6-8.
LI J W. Experimental study on comprehensive recovery of zinc from sulphur concentrate [J]. Industrial minerals and processing, 2018 (8): 6-8.
- [18] 邹坚坚, 冉金城, 袁经中, 等. 一种含磁黄铁矿的高砷硫精矿砷硫分离选矿工艺: 107899740A [P]. 2018-4-13.
ZOU J J, RAN J C, YUAN J Z. A separation and beneficiation technology of arsenic and sulphur from high arsenic and sulphur concentrate containing pyrrhotite; 107899740A [P]. 2018-4-13.
- [19] 胡真, 邹坚坚, 李汉文. 从云南某硫精矿中回收铜铋的选矿试验[J]. 金属矿山, 2017 (2): 60-65.
HU Z, ZOU J J, LI H W. Beneficiation on recovery of copper and bismuth from a sulfur concentrate in Yunnan [J]. Metal Mine, 2017 (2): 60-65.
- [20] 邹坚坚, 胡真, 王晨亮. 选冶联合流程回收云南某硫精矿中铋和银[J]. 金属矿山, 2017 (4): 72-76.
ZOU J J, HU Z, WANG C L. Recovery of bismuth and silver from a sulphur concentrate in yunnan province by mineral processing and metallurgy combination process [J]. Metal Mine, 2017 (4): 72-76.
- [21] 徐月冰. 硫精矿中铅锌铜综合回收利用工艺[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2015.
XU Y B. Study on comprehensive recovery of lead, zinc and copper minerals from sulfur concentrate ore [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2015.
- [22] 李俊旺, 曹飞. 硫精矿磁选浮选联合降砷试验研

- 究[J]. 有色金属 (选矿部分), 2018 (6): 67-71.
- LI J W, CAO F. Experimental study to remove arsenic from sulphur concentrate by united magnetic separation-flotation process [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018 (6): 67-71.
- [23] 叶小路, 袁经中. 某高砷硫精矿砷硫分离技术研究[J]. 矿冶工程, 2017, 37 (3): 68-71.
- YE X L, YUAN J Z. Separation of arsenic and sulfur from high arsenic-bearing pyrite concentrate [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37 (3): 68-71.
- [24] 杨玮, 张建文, 覃文庆. 有机抑制剂 MF 对硫精矿降砷的浮选试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2010, 30 (4): 26-29.
- YANG W, ZHANG J W, QIN W Q. Flotation experimentation of reducing arsenic in sulfur concentrate with organic depressor MF [J]. Mining Research and Development, 2010, 30 (4): 26-29.
- [25] 董明传. 广西大厂高砷硫精矿砷硫分离的生产实践[J]. 化工矿物与加工, 2014 (3): 46-48.
- DONG M C. Production practice for arsenopyrite-pyrite separation in dachang mine, guangxi [J]. Industrial Minerals and Processing, 2014 (3): 46-48.
- [26] 刘安平, 张祖刚, 衣德强, 等. 梅山矿业硫精矿再选提纯试验[J]. 金属矿山, 2015 (12): 88-91.
- LIU A P, ZHANG Z G, YI D Q, et al. Study on reconcentration purification of sulfur concentrate in Meishan mine [J]. Metal Mine, 2015 (12): 88-91.
- [27] 衣德强. 硫精矿提硫降杂工业试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2004, 24 (5): 45-47.
- YI D Q. Commercial test study about sulphur concentration and mix reduction [J]. Mining Research and Development, 2004, 24 (5): 45-47.
- [28] 洪淦新. 某铜矿硫精矿再选试验[J]. 现代矿业, 2011, 27 (11): 70-71.
- HONG G X. Study on reconcentration of sulphur concentrate in a copper mine [J]. Modern Mining, 2011, 27 (11): 70-71.
- [29] 李茂林, 颜亚梅. 重浮联合分选高品位硫精矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2014, 34 (2): 31-34.
- LI M L, YAN Y M. Beneficiation of high-grade sulfur concentrate by the combined flowsheet of gravity separation and flotation [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2014, 34 (2): 31-34.

(上接第 4 页)

- [3] 郭延辉. 高应力区陡倾矿体崩落开采岩移规律、变形机理与预测研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- GUO Y H. Study on the regularity, mechanism and deformation forecast of rockmass movement induced by caving mining steep deposit in high stress area [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015.
- [4] 左建平, 陈忠辉, 王怀文, 等. 深部煤矿采动诱发断层活动规律 [J]. 煤炭学报, 2009, 34 (3): 305-309.
- ZUO J P, CHEN Z H, WANG H W, et al. Experimental investigation on fault activation pattern under deep mining [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34 (3): 305-309.
- [5] 林远东, 涂敏, 付宝杰, 等. 断层自锁与活化的力学机理及稳定性控制 [J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36 (5): 898-905.
- LIN Y D, TU M, FU B J, et al. Mechanical mechanisms of fault self-locking and activation and its stability control [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36 (5): 898-905.
- [6] 赵毅鑫, 卢志国, 朱国沛, 等. 考虑主应力偏转的采动诱发断层活化机理 [J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47 (1): 74-80.
- ZHAO Y X, LU Z G, ZHU G P, et al. Fault reactive induced by the principal stress rotation for the underground coal mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47 (1): 74-80.
- [7] 邓聚龙. 灰色系统理论教程 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.
- DENG J L. Grey system theory tutorial [M]. Wuhan: Huazhong University of Technology Press, 1990.
- [8] 蒋刚, 林鲁生, 刘祖德, 等. 边坡变形的灰色预测模型 [J]. 岩土力学, 2000, 21 (3): 243-246.
- JIANG G, LIN L S, LIU Z D, et al. Prediction grey model for slope displacement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21 (3): 243-246.
- [9] 张东明, 陈江, 何洪甫, 等. 动态修正时距权重的不等时距灰色模型及应用 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (6): 1137-1141.
- ZHANG D M, CHEN J, HE H F, et al. Unequal interval grey model based on dynamic correction of time-distance weight [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34 (6): 1137-1141.