

文章编号:1674-9669(2016)06-0110-05
DOI: 10.13264/j.cnki.ysjskx.2016.06.019

不同因素对黄铜矿、黄铁矿浮选分离动力学影响的研究

方夕辉^{1,2}, 张村¹, 夏艳圆¹

(1. 江西理工大学资源与环境工程学院,江西 赣州 341000;2 江西省矿业工程重点实验室,江西 赣州 341000)

摘要:以动力学参数 K (浮选速率系数) 为依据,来评判黄铜矿、黄铁矿快速浮选分离的可能性。首先,在不同矿浆浓度、浮选粒度及浮选机转速等条件下考察黄铜矿和黄铁矿纯矿物 K 值的变化,在一定程度上阐释了黄铜矿、黄铁矿快速浮选分离的动力学机理及其可能性;同时,为使黄铜矿、黄铁矿快速浮选分离技术在工业上具有适用性,进一步研究黄铜矿与黄铁矿组成的 2 种粒级的混合矿在适当浮选条件下的动力学特性。结果表明,控制适当的浮选条件,可扩大黄铜矿与黄铁矿之间的浮选速率差异,从而实现黄铜矿的快速优先浮选。

关键词:黄铜矿、黄铁矿;纯矿物;混合矿;快速浮选;浮选速率系数

中图分类号:TD952 **文献标志码:**A

Different factors on flotation separation kinetics of chalcopyrite and pyrite

FANG Xihui^{1,2}, ZHANG Cun¹, XIA Yanyuan¹

(1. Faculty of Resource and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. Jiangxi Key Laboratory of Mining Engineering, Ganzhou 341000, China)

Abstract: To judge the possibility of rapid flotation separation on chalcopyrite and pyrite, the dynamics parameter K (flotation rate coefficient) was used as the basis. At first, through investigating the change of K value of chalcopyrite and pyrite pure minerals under the conditions of pulp density, flotation particle size and flotation machine speed, respectively, the dynamics mechanism and possibility of rapid flotation separation on chalcopyrite and pyrite was interpreted to some extent. Meanwhile, to make the technology of rapid flotation separation feasible on chalcopyrite and pyrite applicable in the industry, the dynamics characteristic of two mixed ore in different size fraction that composed by chalcopyrite and pyrite was further investigated. It was proved that flotation rate difference between chalcopyrite and pyrite could be expanded through controlling appropriate flotation conditions and then fulfilled the rapid priority flotation of chalcopyrite

Keywords: chalcopyrite; pyrite; pure mineral; mixed ore; rapid flotation; flotation rate coefficient

黄铜矿与黄铁矿的分选是铜硫分离中的重大课题,同时也是世界铜资源的主要来源之一^[1-2]。黄铜矿、黄铁矿属于典型的硫化矿矿物,目前国内外对其分离方法普遍采用的是泡沫浮选技术^[3-5]。其中,快速浮选工艺通过在尽可能短的时间内将已经单体解离的铜矿物优先快速浮出而进行早收多收,减少其在浮选流程中的循环,能够有效提高精矿品位^[6-7]。

快速浮选工艺虽然历经 30 多年的发展,但目前国内外几乎没有关于不同因素对快速浮选的影响及其动力学机理的研究。浮选动力学是研究在各种影响因素下浮选泡沫产品随时间变化的规律^[8]。由于浮选过程是一个相当复杂的物理化学过程,因而研究浮选动力学对深入研究浮选机理具有重要作用,对于优化浮选工艺参数、模拟与控制浮选设备、改进浮

收稿日期:2016-03-14

基金项目:江西省科技计划资助项目(2011BBG70002-2)

作者简介:方夕辉(1972-),女,副教授,主要从事矿物工程与工艺矿物学及提取冶金与化学工程领域研究工作,E-mail:fangxihui@yeah.net.

选工艺、提高浮选效率、实现浮选自动化等都具有重要意义^[9]。

由于研究浮选动力学对改善浮选指标具有重大意义,同时,不同因素对快速浮选效果的影响也没有可靠的评价方法。因此,文中就黄铜矿、黄铁矿的快速浮选分离进行相关影响因素的动力学机理研究,以期在现场快速浮选工艺提供理论依据,并希望能够对工业生产具有某些指导意义。

1 试样与研究方法

1.1 试样

试验所用黄铜矿、黄铁矿矿样均为天然纯矿物,经测定其纯度分别为 96.03 %和 94.17 %,满足试验要求。黄铜矿、黄铁矿块矿经破碎、拣选、玛瑙研磨后,再筛分取得 0.1~0.15 mm、0.01~0.074 mm、0.045~0.074 mm、0.039~0.045 mm 4 种粒级矿样,预备作为不同粒度试验用样。单矿物试验均取 0.045~0.074 mm 粒级矿样。黄铜矿、黄铁矿 XRD 图谱如图 1、图 2 所示。

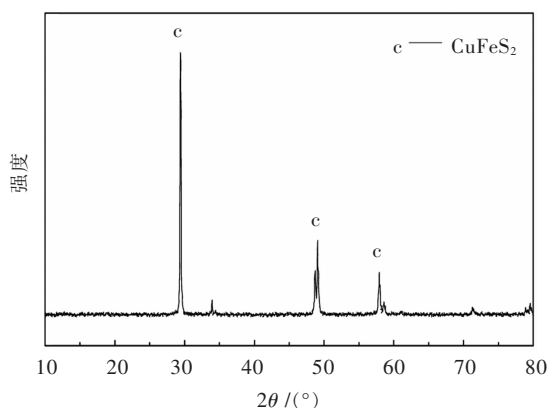


图 1 黄铜矿纯矿物 XRD 谱

Fig. 1 XRD Pattern of chalcopyrite pure minerals

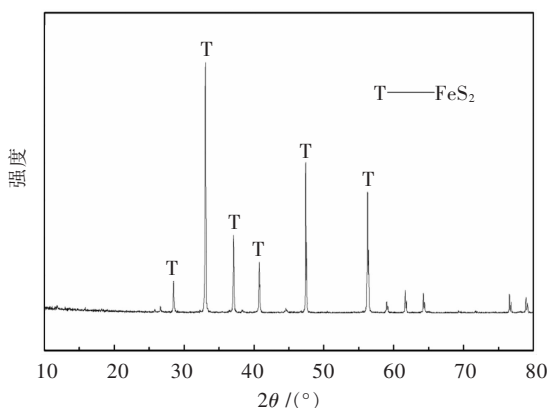


图 2 黄铁矿纯矿物 XRD 谱

Fig. 2 XRD Pattern of pyrite pure minerals

人工混合矿是以不同配比的黄铜矿、黄铁矿纯矿物进行混合作为模拟硫化铜矿样,用以验证纯矿物浮选试验结果。所配混合矿样粒级分别为 0.074~0.1 mm 和 0.045~0.074 mm。

1.2 试验药剂与主要设备

单矿物和人工混合矿试验所用药剂为:氢氧化钠(AR)、BXF 即丁基黄原酸甲酸乙酯(工业级)、2# 油(工业级);单矿物试验用水为去离子水,人工混合矿试验用水为自来水。

试验所用主要检测设备为 X-衍射仪(DX-2700)、傅里叶变换红外光谱仪(Avatar 360)。

1.3 试验方法

纯矿物实验:每次称取 3 g 试样,在挂槽式浮选机上进行分批浮选刮泡试验,刮泡时间依次取 0.2 min、0.4 min、1.0 min、1.4 min、2.0 min、4 min。浮选流程如图 3 所示。

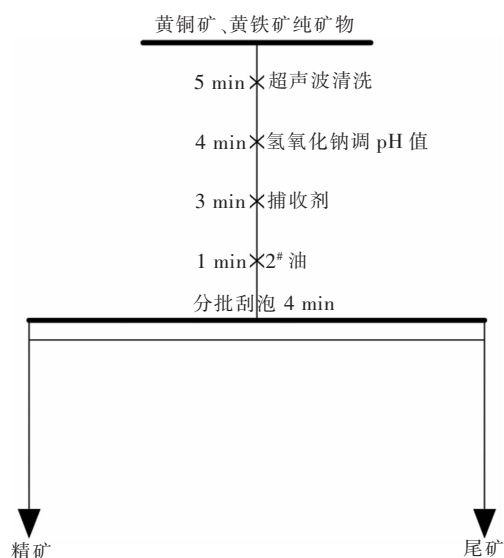


图 3 纯矿物浮选试验流程

Fig. 3 Flotation test flow chart of pure mineral

人工混合矿试验:每次称取试样 10 g,铜精矿分批取样,其时间间隔点依次为 0.2 min、0.4 min、1.0 min、1.4 min、2.0 min、3.0 min。浮选流程见图 4。

2 快速浮选动力学研究方法——浮选速率系数

几乎所有浮选速率过程均遵循下列经验速率方程(1)^[10],并有研究表明^[11]可根据式(1)模拟实验室小型浮选试验中的连续浮选过程。

$$\frac{dR}{dt} = K(R_{\infty} - R)/t \quad (1)$$

$$\text{其积分式为:} \log 1/[R_{\infty} - R] = K \log t + \log A \quad (2)$$

其中: R 为时间 t 时的累计金属回收率; R_{∞} 为 R 的渐

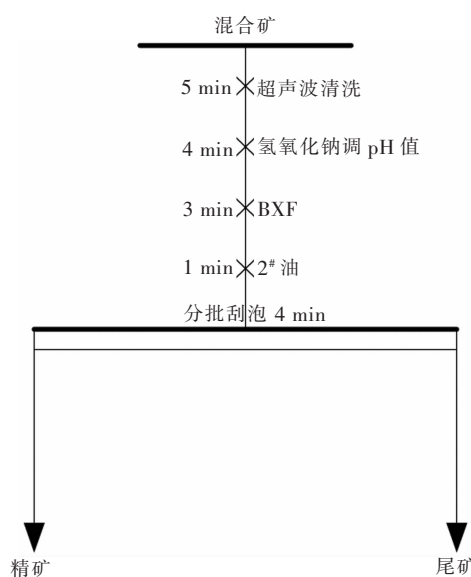


图 4 人工混合矿浮选试验流程

Fig. 4 Flotation test flow chart of artificial mixed ore

近线,表征一未知的相当于可浮矿物最大可获得的回收率之渐近值,也即过程所能达到的理论回收率或极限回收率; K 为浮选速率系数,其物理意义为浮选过程中矿物达到最大回收率的速率,可表示矿物的浮游速度; A 为 $t=1$ 时 $\log\text{-}\log$ 曲线的截距。

求解 R_{∞} 方法为图解试错法,在不同 R_{∞} 值的 $\log\text{-}\log$ 坐标上绘制 $1/(R_{\infty}-R)$ 对 t 的关系曲线。一个正确的 R_{∞} 值图将得出一条直线, K 则为该直线的斜率, K 也可由方程式(1)计算所得。 R_{∞} 、 K 、 A 是研究快速浮选动力学机理的重要参数,文中主要以浮选速率系数 K 值来评价不同因素对黄铜矿、黄铁矿快速浮选分离的动力学效果。

3 黄铜矿、黄铁矿纯矿物快速浮选动力学试验研究

在浮选过程中,目的矿物的浮选动力学特性受到很多因素的影响。本节主要在矿浆浓度、浮选粒度及浮选机转速等条件下考察黄铜矿和黄铁矿纯矿物的浮选动力学行为,来研究其快速浮选分离的动力学机理。

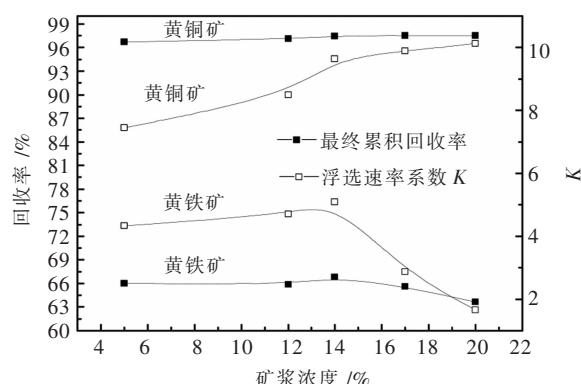
3.1 矿浆浓度对黄铜矿、黄铁矿浮选动力学影响

适当的矿浆浓度在浮选过程中非常重要,其对药剂耗量、矿浆充气及浮选机生产率等都存在不同程度的影响,从而影响矿物的浮选速率^[12-13]。

在矿浆浓度变化试验中,用 NaOH 调节矿浆 pH 值至 9 左右,捕收剂 BXF 浓度为 30 mg/L,黄铜矿、黄铁矿粒度均为 0.045~0.074 mm,浮选机转速

为 2 200 r/min 等条件下进行浮选试验,考察黄铜矿、黄铁矿的浮选动力学行为。

以不同矿浆浓度条件下得到的最终累积回收率数值为基础,可得到图 5 所示黄铜矿、黄铁矿不同矿浆浓度条件下的最终累积回收率及根据前文中动力学研究方法拟合得到的浮选速率系数 K 的关系曲线。

图 5 黄铜矿、黄铁矿不同矿浆浓度条件下的回收率及 K 值Fig. 5 Recovery and value K of chalcopyrite and pyrite under different pulp density conditions

由图 5 可见,黄铜矿的最终累积回收率及浮选速率系数 K 均随着矿浆浓度的增加而增大,黄铁矿的最终累积回收率及 K 值均随着矿浆浓度的增加先是增大而后减小,并且矿浆浓度越高,黄铜矿与黄铁矿之间的浮选回收率及 K 值的差距越大,这是因为在一定范围内,随着矿浆浓度的增加,矿物与药剂变得越容易碰撞接触,在单位时间内矿物上浮速度也就越快。由于 K 的物理意义可表示矿物浮游速度,因此,该试验表明高矿浆浓度有利于黄铜矿、黄铁矿的快速浮选分离,即可通过调整矿浆浓度实现黄铜矿的快速优先浮选。但矿浆浓度过高,又会增加药剂耗量、恶化充气效果等,进而影响矿物浮选速度。所以,综合考虑选矿成本、浮选指标等因素,该试验选择矿浆浓度为 15 % 时,黄铜矿、黄铁矿之间的浮选动力学差异比较明显,黄铜矿、黄铁矿的快速分选效果较好。

3.2 矿物粒度对黄铜矿、黄铁矿浮选动力学影响

诸多研究表明^[14-16],矿物粒度与浮选速率存在一定的关联,对于不同矿物,出现最大浮选速率的粒度不同。因此,矿物粒度对矿物浮选动力学有重要意义。

在矿物粒度变化试验中,调节矿浆 pH 值至 9 左右,捕收剂 BXF 浓度为 30 mg/L,矿浆浓度为 15 %,浮选机转速为 2 200 r/min 等条件下进行浮选试验,考察黄铜矿、黄铁矿的浮选动力学行为。

同理,可得到图 6 所示黄铜矿、黄铁矿不同矿物粒度条件下的最终累积回收率及浮选速率系数 K 的关系曲线。

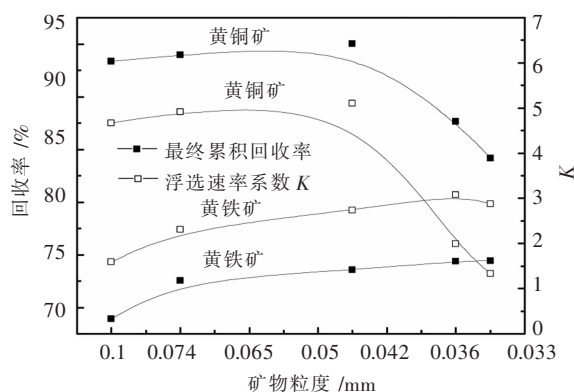


图6 黄铜矿、黄铁矿不同粒级条件下的回收率及K值

Fig. 6 Recovery and value K of chalcopyrite and pyrite under different particle size conditions

由图6可见,随矿物粒度的细化,黄铜矿的最终累积回收率及动力学参数K值均先增加后减小,黄铁矿的最终累积回收率及K值则均一直保持增长,并且矿物粒度越细,黄铜矿与黄铁矿之间的浮选回收率及K值的差距越小,甚至在矿物粒度小于0.039 mm后,黄铁矿的浮选速度超越了黄铜矿。因为细粒矿物质量小、动量低,导致颗粒间碰撞能量小而降低碰撞机率^[17];此外,研究发现矿物颗粒的碰撞概率随粒度的减小而降低^[18],从而影响矿物的浮选速度。因此,该试验说明过细的矿物粒度会恶化黄铜矿、黄铁矿的快速分选效果,综合考虑磨矿成本及磨矿时间等因素,选择较粗的矿物粒度有利于黄铜矿、黄铁矿的快速浮选分离,可在适当条件下实现粗粒铜矿物的早收多收。故本实验选择0.045~0.074 mm的矿物粒级较为合理。

3.3 浮选机转速对黄铜矿、黄铁矿浮选动力学影响

浮选设备是影响浮选效果的重要因素,浮选设备的浮选动力学也是选矿工作者的重要研究内容^[9]。由于浮选机转速决定矿浆的搅拌强度,其对浮选效果的好坏有着重要的影响^[19-20]。因此,研究浮选机转速对研究矿物浮选动力学具有重要作用。

在浮选机转速变化试验中,调节矿浆pH值至9左右,捕收剂BXF浓度为30 mg/L,黄铜矿、黄铁矿粒度均为0.045~0.074 mm,矿浆浓度为15%等条件下进行浮选试验,考察黄铜矿、黄铁矿的浮选动力学行为。

同理,得到图7所示黄铜矿、黄铁矿不同浮选机转速条件下的最终累积回收率及浮选速率系数K的关系曲线。

由图7可见,随着浮选机转速的增大,黄铜矿的最终累积回收率及K值均先增加后减小,黄铁矿的最终累积回收率及K值则一直保持增长,并且浮选

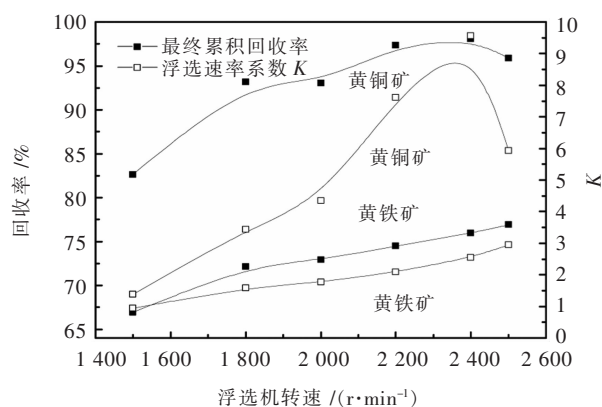


图7 黄铜矿、黄铁矿不同转速条件下的回收率及K值

Fig. 7 Recovery and value K of chalcopyrite and pyrite under different speed conditions

机转速过大时,黄铜矿的浮选速度下降较快,与黄铁矿之间的浮选速度差距则变得越来越小。因为浮选机的转速会影响矿浆的搅拌强度,从而决定浮选槽内矿浆紊流流速大小。在一定转速范围内,增加浮选机转速,可增加充气量并改变矿物颗粒的运动状态,有利于矿物颗粒的有效分散,从而增加矿物与药剂分子的碰撞机率,对矿物浮选速度有贡献;而当浮选机转速过大时,随着矿浆紊流和湍流强度的增大会导致矿化颗粒的脱落,浮选速率将达到饱和值,继续增加转速矿物浮选速度将降低。因此,适宜的浮选机转速对黄铜矿、黄铁矿的快速浮选分离具有重要的动力学意义,过低或过高对矿物快速分选均不利,故本实验选择转速为2200 r/min比较经济合理。

4 黄铜矿、黄铁矿人工混合矿快速浮选分离动力学研究

为验证黄铜矿、黄铁矿纯矿物快速浮选分离的实际可行性,以黄铜矿与黄铁矿组成的人工混合矿为对象,来研究其快速浮选动力学行为。

由上述实验可知,黄铜矿在粗粒条件下的浮选分离效果较好,故选取试样1为黄铜矿(0.074~0.1 mm)与黄铁矿(0.074~0.1 mm)按1:1混合,试样2为黄铜矿(0.045~0.074 mm)与黄铁矿(0.045~0.074 mm)按1:1混合的粒级矿样。调节矿浆pH值至9左右,捕收剂BXF用量为30 mg/L,浮选浓度为15%,浮选机转速为2200 r/min的浮选条件下,对这2种混合矿分别进行分批浮选试验。图8为试样1和试样2的铜精矿、硫精矿的累积回收率随时间变化的关系曲线,图9、图10分别为根据动力学方法拟合得到的试样1和试样2的动力学渐近线。

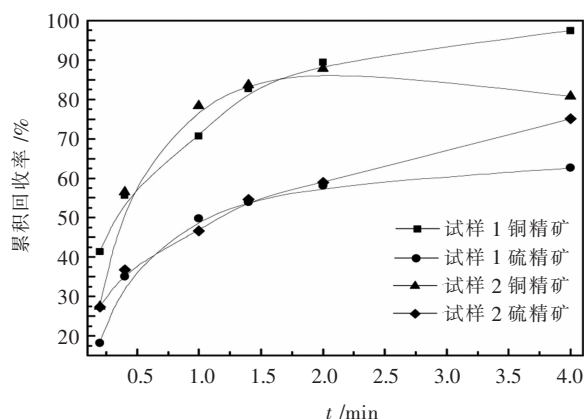


图 8 试样 1、试样 2 铜精矿和硫精矿的累积回收率

Fig. 8 Cumulative recovery of Cu and S concentrate of sample 1 and sample 2

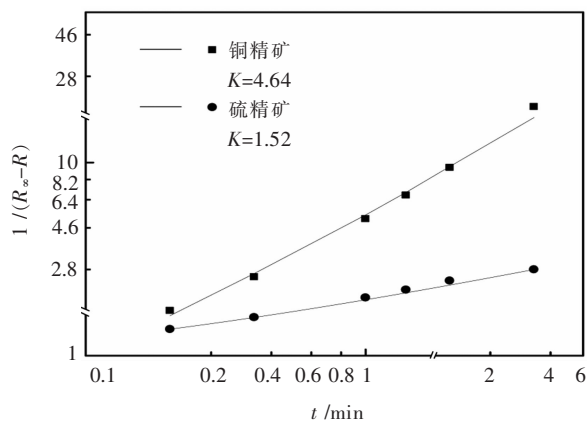


图 9 试样 1 浮选动力学渐近线

Fig. 9 Flotation kinetics asymptote of sample 1

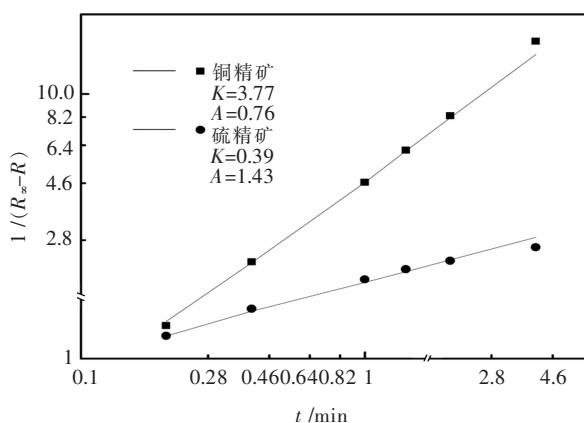


图 10 试样 2 浮选动力学渐近线

Fig. 10 Flotation kinetics asymptote of sample 2

从图 8 中可以看出,随着浮选时间的延长,粗粒级混合矿中黄铜矿与黄铁矿的分离效果越来越好,而细粒级混合矿中黄铜矿与黄铁矿的分离效果则逐步恶化,表明粗粒条件下更有利于黄铜矿、黄铁矿的浮选分离。

由图 9 及图 10 可知,人工混合矿试样 1 和试样 2 中铜精矿、硫精矿的渐近线均为直线,证明其理论回收率 R_{∞} 为正确值,而且对于这 2 种粒度的混合矿,其黄铜矿与黄铁矿之间的 K 值均存在一定的差异,粗粒级条件下黄铜矿与黄铁矿之间的 K 值差为 3.12,细粒级条件下为 3.38。由于 K 值可表示矿物浮选速度,故该人工混合矿试验表明,无论是粗粒混合矿物,还是细粒混合矿物,黄铜矿与黄铁矿的浮选速度是有差别的,虽然与纯矿物试验条件下相比其速度差异并不明显,但仍可证明其快速浮选分离的可能性。

5 结 论

1) 在一定的矿浆浓度范围内,黄铜矿、黄铁矿浮选速率系数 K 值(浮选速度)随矿浆浓度的增加而增大,但当浮选浓度超过 15 % 时,黄铜矿的浮选速度基本不变,而黄铁矿的浮选速度却降低的很快,说明矿浆浓度的适当提高,能够抑制黄铁矿的上浮,从而相对改善黄铜矿的动力学参数,实现黄铜矿的快速浮选。

2) 在一定范围内,随着矿物粒度的减小,黄铜矿、黄铁矿的 K 值(浮选速度)均有所增加,但当矿物粒度为 0.039~0.045 mm 时黄铜矿、黄铁矿的浮选速度均减小,尤其黄铜矿的浮选速度降幅较大。故矿物粒度的适当加大,有利于改善粗颗粒铜矿物的浮选效果;而矿物粒度太细时,在高浓度和高浮选机转速下黄铜矿的浮选效果会变差,说明适宜的矿物粒度条件下才可实现黄铜矿的快速浮选。

3) 在一定范围内,随着浮选机转速的增加,黄铜矿、黄铁矿的 K 值随之增加,但当转速增大至 2 500 r/min 时,黄铜矿的 K 值降低,即浮选速度下降,说明适当加大搅拌速度,有利于改善黄铜矿、黄铁矿的快速分离效果,而浮选机转速过大将不利于黄铜矿的快速浮选。

4) 对于 2 种不同粒度的人工混合矿,通过在 pH、捕收剂用量、矿浆浓度、浮选机转速、矿物粒度等条件下浮选试验的动力学研究,发现其浮选速率系数 K 的大小均为: $K_{\text{黄铜矿}} > K_{\text{黄铁矿}}$, 但粗粒条件下黄铜矿的浮选速度(K 值为 4.64)比细粒条件下黄铜矿的浮选速度(K 值为 3.77)要快,即适宜条件下可实现粗粒铜矿物的快速优先浮选,故该试验验证了黄铜矿、黄铁矿快速浮选分离的可能性。

5) 可通过调控适当的矿浆浓度、矿物粒度、浮选机转速等浮选条件来扩大黄铜矿、黄铁矿在动力学性

(下转第 123 页)

环境保护制度,采矿企业在撤离前必须将生态环境恢复到一定程度,并接受政府的监管。

参考文献:

- [1] 龙精华,张卫,段练,等.矿区废弃地再利用与体育场地建设[J]. 中国矿业,2015,24(7):44-52.
- [2] 汪静.冶山矿区废弃地旅游资源开发条件分析与评价[J]. 金属矿山,2013(10):136-139.
- [3] 杨辉,于冰沁.阜新市高德东山矿山废弃地规划方案[J]. 环境与可持续发展,2015,40(4):181-182.
- [4] 王平.污染土地修复为城市用地开辟新途[J]. 中国土地,2016(3):42-44.
- [5] HARRIS T. Life cycle assessment of sunflower cultivation on abandoned mine land for biodiesel production[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112(1): 182-195.
- [6] 宇德良.废弃采矿用地分类盘活利用探讨——以重庆市为例[J]. 中国土地,2016(2):53-54.
- [7] 董祚继.采矿废弃地如何“由废变宝”?——浙江省德清县废弃地综合利用工作情况调研[J]. 中国土地,2016(3):29-31.
- [8] 鞠丽萍,祝怡斌,李青,等.南方某离子型稀土矿山的土地复垦[J]. 金属矿山,2015(9):161-165.

- [9] 林建平,邓爱珍.赣州:废弃矿山披绿衣[J]. 中国土地,2015(5):55-56.
- [10] 杨慧丽,付梅臣.采矿用地复垦促进机制探讨[J]. 中国土地,2016(2):29-31.
- [11] 陈明,徐慧,蔡忠萍,等.植物改良矿山废弃地的研究进展[J]. 有色金属科学与工程,2014,5(4):77-82.
- [12] 罗仙平,张艳.矿山废弃地分析及植物修复重金属污染土壤技术探讨[J]. 有色金属科学与工程,2013,4(1):62-66.
- [13] 宋雪姣.土地复垦监管影响因素浅析[J]. 中国土地,2014(6):34-35.
- [14] 董祚继.节约集约的关键在于合理高效用地[J]. 中国土地,2014(7):23-24.
- [15] 谭永忠,姜舒寒,吴次芳,等.闲置土地的处置难点与治理路径[J]. 中国土地,2016(2):5-8.
- [16] PARK E. The application of coal combustion by-products in mine site rehabilitation[J]. Journal of cleaner production,2014, 84(12):761-772.
- [17] 郑群英,周生路,任奎,等.土地利用结构优化生态效益考量方法研究——以南京江宁区为例[J]. 资源科学,2009,31(4):634-640.
- [18] 孙红,米锋,苑洪妍,等.矿区废弃地植被恢复中的森林生态效益计量分析[J]. 资源开发与市场,2012,28(8):706-713.
- [19] 李晓雷,魏忠义.红透山铜矿尾矿库复垦适宜性评价研究[J]. 金属矿山,2012(12):111-115.

(上接第 114 页)

质上的差异,提高黄铜矿的浮选速度,进而将黄铜矿优先浮选出来。

参考文献:

- [1] 李崇德,孙传尧.铜硫浮选分离的研究进展[J].国外金属矿选矿,2000,37(8):2-7.
- [2] 汤玉和,汪泰,胡真.铜硫浮选分离药剂的研究现状[J].材料研究与应用,2012,6(2):100-103.
- [3] 孙小俊,顾幅华,李建华,等.捕收剂 CSU31 对黄铜矿和黄铁矿浮选的选择性作用[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(2):406-410.
- [4] 张文翰,李志春.某高硫铜锌多金属矿综合回收试验研究[J].矿冶工程,2015,35(1):64-67.
- [5] 邱廷省,徐其红,匡敬忠,等.某复杂硫化铜矿铜硫分离试验研究[J].矿冶工程,2011,31(2):45-48.
- [6] 沈刚.黄铜矿、黄铁矿快速浮选分离新技术研究[D].长沙:中南大学,2002.
- [7] 叶威.云南某多金属硫化铜矿铅分离的试验研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [8] 陶有俊,路迈西,蔡璋,等.细粒煤浮选动力学特性研究[J].中国矿业大学学报,2003,32(6):694-697.
- [9] 费之奎.新型浮选装置中介质驱动涡轮运动和轴向真空的形成机理及实验研究[D].淮南:安徽理工大学,2014.
- [10] LAI M R W,宣道中.在提取工艺中最大可达到的金属回收率(或

提取率)[J].国外金属选矿,1987(6):15-21.

- [11] 施辉亮.药剂使用方式与浮选速度关系的探讨[J].江西理工大学学报,1990,11(1):18-29.
- [12] 岳涛.微细粒级黑钨矿浮选动力学研究[D].赣州:江西理工大学,2013.
- [13] 何丽萍.铜铅锌硫化矿浮选动力学研究[D].赣州:江西理工大学,2008.
- [14] 邱冠周,胡岳华,王淀佐.颗粒间相互作用与细粒浮选[M].长沙:湖南科学技术出版社,1993.
- [15] CHEN F, GOMEZ CO, FINCH JA. Technical note bubble size measurement in flotation machine[J]. Minerals Engineering, 2001, 14(4): 427-432.
- [16] LEOWENBERG M, DAVIS R H. Flotation rate of fine spherical particle and droplets[J]. Chemical Engineering Science, 1994,49(23):3923-3941.
- [17] BAYAT O, UCURUM M, POOLE C. Effect of size distribution on flotation kinetics of Turkish sphalerite[J]. Mineral Processing & Extractive Metallurgy Imm Transactions, 2004, 113: 53-59.
- [18] AGAR G E, BARRETT J J. The use of flotation rate data to evaluate reagents[J]. Cim Bulletin, 1983, 76(851): 157-162.
- [19] 曹克文.浮选槽内矿浆紊流强度对浮选影响的理论及应用研究[R].长沙:中南大学,2001.
- [20] SHERRELL I M. Development of a flotation rate equation from first principles under turbulent flow conditions[D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.