

山东某含金硫铁矿强化浮选回收试验研究

孙晓妍¹, 周永星¹, 宋宝旭^{1*}, 董鸿良²

(1. 辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114001; 2. 山东烟台鑫泰黄金矿业有限责任公司, 山东 烟台 265147)

摘要: 山东某含金硫铁矿原矿金品位为 3.06 g/t、含硫量为 2.65%。工艺矿物学研究表明, 金主要以自然金等独立金矿物形式存在, 其次以黄铁矿为载体, 少量以磁黄铁矿为载体。采用快速浮选和常规浮选组合的工艺流程, 以硫酸铜做活化剂, MA-1 做捕收剂, HX-609 做起泡剂, 分别获得了金品位为 34 g/t、32 g/t 的快速浮选精矿和常规浮选精矿, 金总回收率达到 90% 以上。

关键词: 含金硫铁矿; 强化浮选; 磨矿细度; 浮选药剂; 快速浮选

中图分类号: TD952 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2022)03-0050-06

Experimental study on enhanced flotation recovery of an gold-bearing pyrite in Shandong Province

SUN Xiao-yan¹, ZHOU Yong-xing¹, SONG Bao-xu^{1*}, DONG Hong-liang²

(1. School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114001, Liaoning, China;

2. Shandong Yantai Xintai Gold Mining Industry Co. Ltd., Yantai 265147, Shandong, China)

Abstract: The gold grade of a gold-bearing pyrite ore in Shandong is 3.06 g/t, and the sulfur content is 2.65%. Process mineralogy research showed that gold mainly existed in the form of natural and other independent gold minerals with pyrite as the primary carrier and pyrrhotite as the secondary carrier. The combination process of rapid flotation and routine floatation was adopted, with copper sulfate as the activator, MA-1 as the collector, and HX-609 as the foaming agent. The gold grade of the obtained rapid flotation concentrate and routine flotation concentrate were 34 g/t and 32 g/t, respectively, and the total recovery rate of gold reached more than 90%.

Key words: Au-bearing pyrite; enhanced flotation; grinding fineness; flotation reagents; instant flotation

金具有良好的金属延展性和化学稳定性, 且导电导热性优异^[1], 近年来在工业、信息电子科技、航天、新能源、新材料等方面应用广泛。山东省金矿资源十分丰富, 是我国黄金生产的重要基地^[2], 不论其储量或产量都在全国占重要地位^[3]。在众多类型的黄金矿山中, 以含金硫铁矿为主的岩金矿床是重要的金矿产资源, 该类矿床不仅含有独立金矿物, 同时也含有大量以黄铁矿为载体的金矿物。对于该类矿床, 主要采用浮选法回收金^[4], 药剂制度也相

对简单。但随着开采深度的不断增加^[5], 不仅矿床中的独立金矿物越来越少, 而且大量磁黄铁矿的混入也对金浮选回收提出了新难题^[6], 如何不断优化浮选工艺参数和流程结构, 使金得到最大程度的综合回收已成为该类矿床开发过程中的挑战^[7]。

本文对山东某含金硫铁矿分别进行工艺矿物学研究和选矿试验^[8-9], 重点进行金的强化浮选回收研究, 实现金的高效综合利用, 为国内外同类金属硫化矿提供借鉴。

收稿日期: 2022-01-22

基金项目: 辽宁科技大学青年基金项目(2019QN04)

第一作者: 孙晓妍, 女, 硕士研究生。研究方向: 稀有及贵金属矿产资源综合利用。E-mail: 706729677@qq.com

*通讯作者: 宋宝旭, 男, 博士, 副教授。研究方向: 稀有及贵金属矿产资源综合利用。E-mail: songbaoxu@ustl.edu.cn

1 实验

1.1 样品、试剂和设备

实验样品取自于山东烟台鑫泰黄金矿业有限责任公司实际生产用矿石。

活化剂为硫酸铜，捕收剂分别为丁基黄药、丁铵黑药、以戊基黄药为主的 MA-1，起泡剂分别为 2 号油和进口的 HX-609。其中硫酸铜、丁基黄药、丁铵黑药为网上购买的分析纯试剂，MA-1 和 HX-609 分别取自现场工业原料。实验用水为自来水。

磨矿设备为实验室用 XMQ240 X 90 锥形球磨机，浮选设备主要采用实验室用 XFG 系列挂槽浮选机。

1.2 浮选试验

称取 500 g 原矿样，加入锥形球磨机，加入 500 mL 水，控制磨矿浓度为 50%。经过一定的磨矿时间后，将磨矿产品倒入 1.5 L 浮选槽中，补加水使矿浆浓度达到约 33%。搅拌速率设置为 1700 r/min，充气量设置为 22 L/min，随后每隔 2 min 分别加入活化剂、捕收剂、起泡剂，进行浮选试验。取出浮选获得的浮选泡沫和浮选槽底物，送至检测中心化验金、铅、铜等主要元素的品位(ω)，并计算选矿回收率(R)。

2 结果与讨论

2.1 矿石工艺矿物学分析

原矿主要成分、矿物类型组成和金赋存状态等工艺矿物学分析数据分列于表 1~表 3。

表 1 结果表明，矿石中金品位为 3.06 g/t，已经达到了国家金矿床的开采标准，硫品位达到了 2.65%，属于含金硫化矿床。

表 2 结果表明，矿石中金主要为自然金、金银矿等独立金矿物，硫化矿主要为黄铁矿和磁黄铁矿，脉石矿物主要为石英等，整体属于含金硫化铁矿床。

表 3 结果表明，以独立金矿物形式存在的金达到了 57.41%，以黄铁矿为载体的金达到了 32.61%，两者回收的优劣直接决定了金的整体回收水平。以磁黄铁矿为载体的金为 3.30%，含金量也达到了 10.31 g/t，这部分磁黄铁矿的回收也需要重点关注，有助于金回收率的进一步提高。

2.2 原则流程的确定

根据矿石性质研究结果，独立金矿物、以黄铁

表 1 原矿主要成分分析结果

Tab.1 Analysis results of main composition of raw ore

元素	Au*	S	Cu	Pb	Zn	Fe
含量/%	3.06	2.65	0.008	0.021	0.026	5.03
元素	As	C	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
含量/%	0.04	3.74	12.74	7.51	50.89	7.66

*注：金含量单位为 g/t，本文下同

表 2 原矿矿物组成测定结果

Tab.2 Determination results of mineral composition of raw ore

矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%
黄铁矿	3.94	正长石	11.96	伊利石	2.82
磁黄铁矿	0.98	石英	25.69	绿泥石	1.55
自然金	微量	钠长石	12.57	白云石	5.68
金银矿	微量	斜绿泥石	4.07	钙铁辉石	1.50
方铅矿	0.15	绿帘石	1.34	镁橄榄石	0.28
闪锌矿	0.01	富铁辉石	0.07	钙铝榴石	0.05
钛铁矿	0.12	榍石	0.45	透辉石	0.36
方解石	7.14	橄榄石	0.25	铁阳起石	0.03

表 3 金赋存状态分布查定结果

Tab.3 Determination results of gold occurrence state distribution

矿物种类	矿物含量/%	含金量/(g/t)	金分配率/%
独立金矿物 (自然金、金银矿等)	/	/	57.41
黄铁矿载体金	3.94	25.33	32.61
磁黄铁矿载体金	0.98	10.31	3.30
氧化铁矿载体金	0.43	0.05	0.01
脉石(方解石等碳酸盐)	7.14	0.65	1.52
其它脉石	87.51	0.18	5.15
合计	100	3.06	100

矿为载体的金矿物和以磁黄铁矿为载体的金矿物是本次研究的重点回收对象，由于前两种矿物可浮性较好，金分配率也较高，因此主要采用浮选法回收。

对于独立金矿物，天然可浮性最好，上浮速率也最快，如何在整个流程中实现这部分独立金矿物的高效回收是前提。对于以黄铁矿为载体的金矿物，金的回收优劣主要取决于黄铁矿的回收优劣。因此浮选药剂制度在保证独立金矿物回收的同时，如何尽可能满足黄铁矿的上浮条件是关键。对于以磁黄铁矿为载体的金矿物，由于磁黄铁矿的可浮性变化差异较大，因此能否在浮选过程中实现这部分磁黄铁矿的回收是难点^[10-11]。

2.3 浮选影响因素考察

2.3.1 磨矿细度的影响

采用一粗、一扫(扫选药剂用量是粗选用量的 25%, 本文下同), 药剂制度为捕收剂丁基黄药用量为 120 g/t, 起泡剂 2 号油用量为 40 g/t, 结果如图 1 所示。图 1 结果表明, 随着磨矿细度的增加, 金回收率逐步增加。当磨矿细度达到-0.074 mm 占 80% 时, 金在粗选精矿中的回收率可以稳定在 85% 左右; 进一步增加磨矿细度, 金品位和回收率均明显降低。

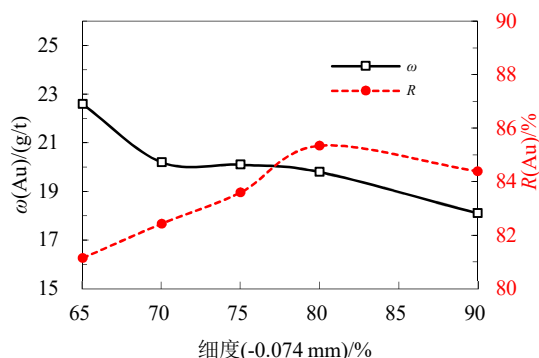


图 1 磨矿细度试验结果

Fig.1 Test results of grinding fineness

为了进一步考查该磨矿细度是否合理, 对该细度下的主要矿物进行了单体解离度测定, 结果列于表 4。表 4 结果表明, 在磨矿细度为-0.074 mm 占 80% 时, 黄铁矿、磁黄铁矿的单体解离度分别达到 83%、75%, 解离情况较好, 因此确定磨矿细度为-0.074 mm 占 80%。

表 4 主要矿物单体解离度测定结果(-0.074 mm 占 80%)

Tab.4 Determination results of main mineral monomer dissociation degree (-0.074 mm 80%)

矿物名称	黄铁矿	磁黄铁矿	石英	方解石
平均解离度/%	83.60	75.77	75.02	64.97

2.3.2 活化剂用量

黄铁矿和磁黄铁矿均属硫铁矿物。过往研究表明, 硫酸铜是硫铁矿物较好的活化剂^[12]。为了考查硫酸铜对本矿石中硫铁矿物的活化效果, 进行了硫酸铜用量试验。采用一粗、一扫, 磨矿细度为-0.074 mm 占 80%, 活化剂硫酸铜用量为变量, 丁基黄药用量为 120 g/t, 2 号油用量为 40 g/t, 结果如图 2 所示。图 2 结果表明, 添加硫酸铜做活化剂后, 金回收率明显增加, 表明硫酸铜可以有效活化矿石中的硫铁矿物^[13]。硫酸铜用量为 400 g/t 时, 金回收率可

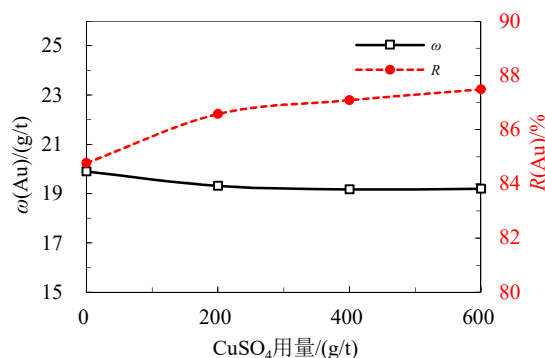


图 2 硫酸铜用量试验结果

Fig. 2 Test results of copper sulfate dosage

以稳定在 87% 左右。综合考虑, 选择硫酸铜做活化剂, 用量为 400 g/t。

2.3.3 捕收剂种类与用量

对于含金硫化矿石, 捕收剂的选择至关重要。选择丁基黄药、丁基黄药+丁铵黑药(2:1)、以戊基黄药为主要成分的 MA-1 共 3 种药剂做捕收剂, 分别进行了浮选用量对比试验。采用一粗、一扫, 磨矿细度为-0.074 mm 占 80%, 活化剂硫酸铜用量 400 g/t, 2 号油用量为 40 g/t, 改变不同捕收剂及其用量, 结果如图 3 所示。图 3 结果表明, 上述 3 种捕收剂适宜的用量均为 120 g/t。当采用丁基黄药、丁基黄药+丁铵黑药做捕收剂时, 金回收率可以稳定在 85%; 而采用 MA-1 做捕收剂时, 金回收率可以稳定在 87%, 明显高于另外两种捕收剂。这主要是由于以戊基黄药为主的 MA-1 不仅捕收性能优, 而且复配的药剂对黄铁矿、磁黄铁矿也具有较好的选择性。综合考虑选择 MA-1 做捕收剂, 用量 120 g/t。

2.3.4 起泡剂种类与用量

由于捕收剂选择了以黄药类为主的 MA-1, 因此需要添加起泡剂配合使用, 分别选择 2 号油和国外进口起泡剂 HX-609 进行了对比试验, 采用一粗、一扫, 磨矿细度为-0.074 mm 占 80%, 浮选药剂为硫酸铜用量 400 g/t, MA-1 用量 120 g/t, 加入不同量的起泡剂, 浮选结果如图 4 所示。图 4 表明, 与 2 号油相比, 在相同药剂用量 40 g/t 时, 进口起泡剂 HX-609 的金总回收率可以稳定在 87% 左右, 综合考虑, 选择进口起泡剂 HX-609, 用量为 40 g/t。

2.3.5 浮选时间及快速浮选

矿石中金主要以自然金、金银矿等独立金矿物形式存在, 可浮性明显优于黄铁矿、磁黄铁矿, 应能浮早浮、能收尽收。基于此, 进行了浮选时间试验, 磨矿细度为-0.074 mm 占 80%, 药剂制度为硫酸铜用量 400 g/t, MA-1 用量 120 g/t, HX-609 用量

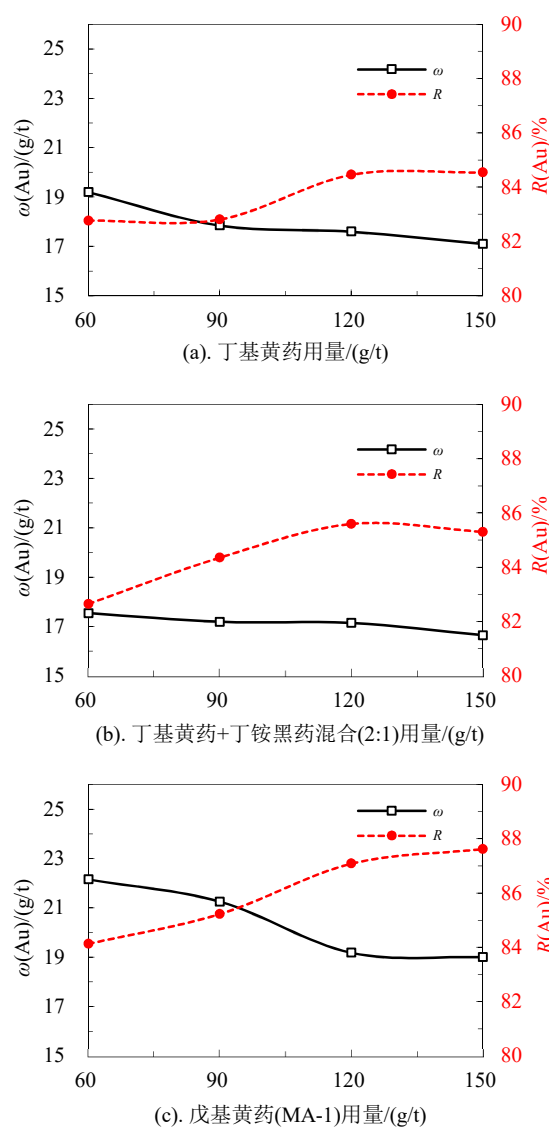


图3 捕收剂种类与用量试验结果

Fig. 3 The comparison test results of the type selection and dosage of collectors

40 g/t, 结果如图5所示。图5结果表明, 在浮选的前1 min内, 金上浮效率最快, 金品位也可以达到34 g/t, 可采用快速浮选工艺优先回收这部分可浮性较好的含金矿物。

2.4 闭路浮选试验

在上述试验基础上确定的工艺流程如图6所示, 包括快速浮选和常规浮选两部分, 其中常规浮选采用一粗、两扫、两精, 全流程闭路浮选试验结果列于表5。表5数据显示, 快速浮选精矿金品位为34.2 g/t、回收率53%, 常规浮选精矿金品位32 g/t、回收率37%, 金总回收率达到了90%以上。

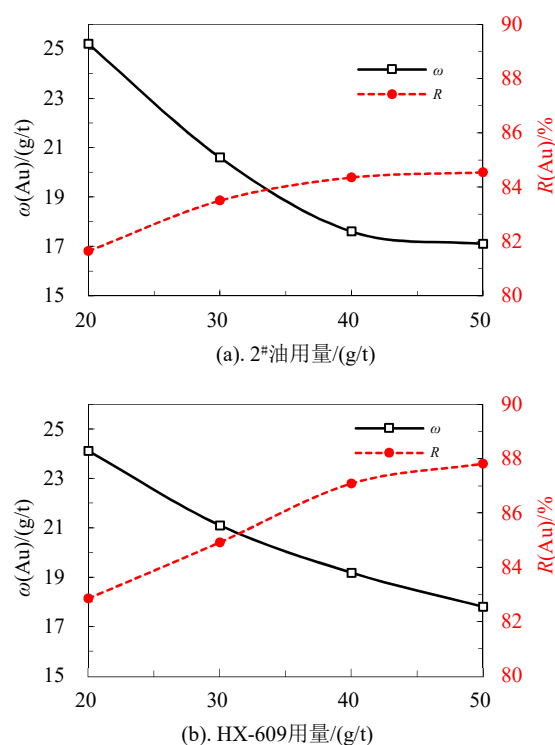


图4 起泡剂种类与用量试验结果

Fig.4 Comparison test results of selection and dosage of foaming agent

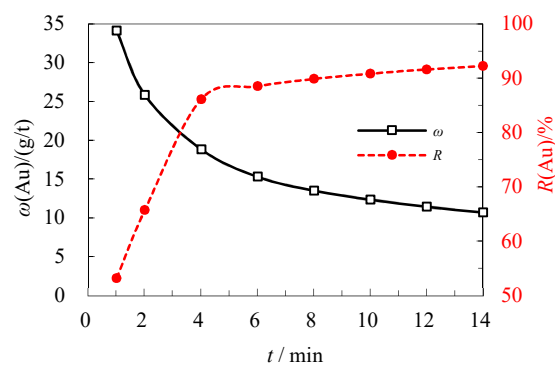


图5 浮选时间的影响试验结果

Fig. 5 Effect of flotation time on test results

表5 全流程综合试验指标

Tab.5 Comprehensive test index of whole process

产物名称	产率/%	金品位/(g/t)	金回收率/%
快速浮选精矿	4.8	34.2	53.1
常规浮选精矿	3.6	32.2	37.3
尾矿	91.7	0.3	9.6
原矿	100	3.06	100

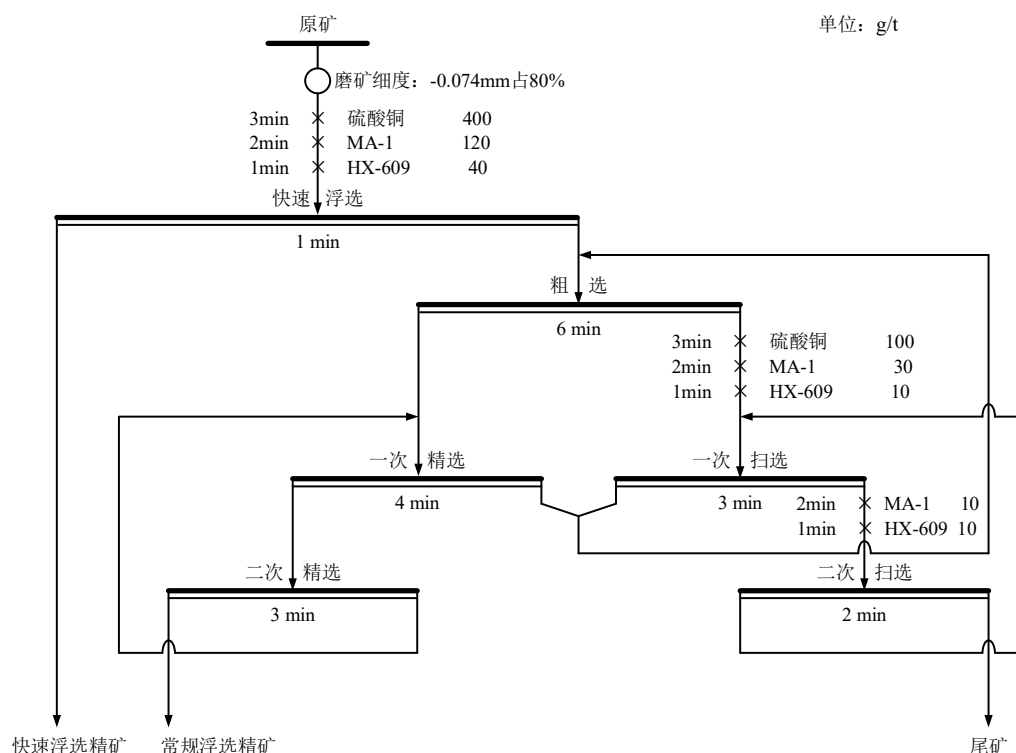


图 6 全工艺流程图

Fig. 6 The whole process flow chart

3 结论

1) 工艺矿物学研究结果表明, 原矿金品位为 3.06 g/t, 硫品位为 2.65%, 金矿物主要为自然金、金银矿等独立金矿物, 其次为以黄铁矿为载体的金矿物, 并含有少量以磁黄铁矿为载体的金矿物, 为典型的含金硫铁矿石。

2) 磨矿细度试验结果表明, 适宜的磨矿细度为 -0.074 mm 占 80%, 做为主要载金矿物, 黄铁矿和磁黄铁矿的单体解离度可以达到 75%以上, 为浮选强化回收金创造了有利条件。

3) 浮选药剂对比试验结果表明, 活化剂: 加入硫酸铜可以有效活化硫铁矿物, 特别是活化磁黄铁矿, 解决了部分磁黄铁矿浮选困难的问题; 捕收剂: 与丁基黄药、丁铵黑药相比, 以戊基黄药为主要成分的 MA-1 对黄铁矿和磁黄铁矿更好的选择性, 更适合回收以两者为载体的金矿物; 起泡剂: 相对于传统的 2 号油, 进口起泡剂 HX-609 对独立金矿物的选择性更好, 可以获得金品位和回收率更高的泡沫产品。

4) 浮选工艺试验结果表明, 先采用快速浮选回收部分可浮性较好的独立金矿物, 后采用常规浮选

强化回收以黄铁矿、磁黄铁矿为载体的金矿物, 分别获得了金品位 34 g/t、32 g/t 的快速浮选精矿和常规浮选精矿, 金总回收率达到了 90%以上, 实现了该矿石中金的高效强化回收。

参考文献:

- [1] 张平顺. 黄金矿山采矿技术现状及展望[J]. 中国金属通报, 2021(8): 1-2.
- [2] 李洪奎, 杨锋杰. 山东金矿类型划分及其主要特征[J]. 上海地质, 2006(4): 64-67.
LI H K, YANG F J. Type division of Shangdong gold mine & its main features[J]. Shanghai Geology, 2006(4): 64-67.
- [3] 赵贤先, 门忠义. 山东黄金矿石主要工业类型及其选矿实践[J]. 有色矿山, 1983(5): 32-39.
ZHAO X X, MEN Z Y. Main industrial types of Shandong gold ores and its beneficiation practices[J]. Nonferrous Mines, 1983(5): 32-39.
- [4] 纪婉颖, 魏转花, 徐其红, 等. 某微细粒含金硫化矿石选矿试验研究[J]. 黄金, 2021, 42(7): 73-77.
JI W Y, WEI Z H, XU Q H, et al. Experimental research on the beneficiation of a microfine grain gold-bearing sulfide ore[J]. Gold, 2021, 42(7): 73-77.

- [5] 黄发波. 某含金矿石浮选工艺优化试验[J]. 现代矿业, 2019, 35(1): 106-110.
HUANG F B. Optimization experiment on the flotation process of a containing gold ore[J]. Modern Mining, 2019, 35(1): 106-110.
- [6] 刘晓菲, 马英强, 邹元辉, 等. 磁黄铁矿浮选分离研究进展[J]. 世界有色金属, 2017(8): 241-242.
LIU X F, MA Y Q, ZOU Y H, et al. Research progress on flotation separation of pyrrhotite[J]. World Nonferrous Metals, 2017(8): 241-242.
- [7] 冉金城, 刘全军, 邱显扬, 等. 铜铅多金属硫化矿中伴生金的强化回收实验研究[J]. 贵金属, 2017, 38(2): 47-51.
RAN J C, LIU Q J, QIU X Y, et al. Experimental research on enhanced recovery of associated gold from a copper-lead multi-metal sulfide ore[J]. Precious Metals, 2017, 38(2): 47-51.
- [8] 朱幸福, 张文平. 山东某含金矿石的工艺矿物学研究[J]. 山东化工, 2020, 49(22): 128-129.
ZHU X F, ZHANG W P. Technological mineralogy of a gold-bearing ore in Shandong[J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(22): 128-129.
- [9] 王蓓, 罗兴. 工艺矿物学在选矿工艺研究中的作用及影响[J]. 矿物学报, 2011, 31(S1): 730-732.
WANG B, LUO X. The role and influence of process mineralogy in beneficiation research research[D]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, 31(S1): 730-732.
- [10] 李沛原, 杨凌凌, 伍红强, 等. 冬瓜山铜矿含铜磁黄铁矿选矿试验研究[J]. 现代矿业, 2021, 37(10): 124-126.
LI P Y, YANG L L, WU H Q, et al. Experimental research on mineral processing of copper - bearing pyrrhotite in Dongguashan copper mine[J]. Modern Mining, 2021, 37(10): 124-126.
- [11] 曾维能, 任润祯, 曹雨琪, 等. 黄铜矿与磁黄铁矿浮选分离行为及机理研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(6): 30-35.
ZENG W N, REN L Y, CAO Y Q, et al. Study on mechanism of action of xanthate in flotation separation of chalcopyrite and pyrrhotite[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020 (6): 30-35.
- [12] 王李鹏, 叶雪均, 江皇义. 被石灰抑制的黄铁矿活化浮选技术进展[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(4): 67-70.
WANG L P, YE X J, JIANG H Y. Activation flotation technology advances of lime-suppressed pyrite[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2011, 2(4): 67-70.
- [13] 冉银华, 张志明, 李强. 滇西某尾矿回收硫铁矿物的试验研究[J]. 矿产综合利用, 2019(1): 119-122.
RAN Y H, ZHANG Z M, LI Q. Experimental study on recovery of pyrite from Tailings in Western Yunnan[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(1): 119-122.

《贵金属》简介

《贵金属》(Precious Metals)季刊创办于1980年,为昆明贵金属研究所和中国有色金属学会共同主办、国内外公开发行的学术期刊。主要报道8个贵金属元素(Au、Ag、Pt、Pd、Rh、Ir、Os、Ru)在冶金、材料、化学、分析测试等科技领域的研究论文、综合评述。

《贵金属》为中国科技核心期刊,并编入《中文核心期刊要目总览》(2020年版)。期刊被中国知网、万方、维普和超星等全文数据库收录,是美国化学文摘(CA)、英美金属学会金属文摘(MA)、美国剑桥科技文摘(CSA)等的文献源期刊。《贵金属》影响因子一直位于国内同类期刊前列(见附表数据),是国内外贵金属科技人员的重要参考资料来源。

附表: 2016~2020年《贵金属》期刊主要评价指标

评价年份	总被引频次	影响因子	影响因子排名	他引率	基金论文比
2020	407	0.699	11	0.66	0.51
2019	305	0.468	13	0.66	0.73
2018	299	0.435	13	0.68	0.65
2017	282	0.466	15	0.67	0.62
2016	344	0.659	8	0.71	0.69

[数据来源:中国科学技术信息研究所《中国科技期刊引证报告(核心版)》2017~2021年版,影响因子排名为在金属材料类期刊中的排名]。

《贵金属》投稿联系方式:

E-mail: bjba@ipm.com.cn

电话: 0871-68328632