

高铁富金铜硫多金属矿选矿实验研究

高起方¹, 邹坚坚^{2*}

(1. 云南黄金矿业集团股份有限公司, 昆明 650200;

2. 广东省资源综合利用研究所 稀有金属分离与综合利用国家重点实验室, 广州 510650)

摘要: 某高铁富金铜硫多金属矿铁品位为 31.81%, 金品位为 1.37 g/t, 铜品位为 0.70%, 硫品位为 6.52%, 矿石中 71.83% 的金赋存于铜矿物、黄铁矿、磁铁矿等矿物, 而铜矿物、黄铁矿、磁铁矿的嵌布粒度均较粗, 普遍在 +0.04 mm。采用“优先浮选铜-活化浮选硫-硫尾磁选回收铁”联合工艺处理该矿石, 并采用 ZA 作铜捕收剂, 全流程实验获得金品位 27.80 g/t, 铜品位 20.60%, 金回收率 59.05%, 铜回收率 83.29% 的铜精矿; 金品位 2.16 g/t, 硫品位 45.07%, 金回收率 20.24%, 硫回收率 86.25% 的硫精矿; 金品位 0.80 g/t, 铁品位 60.83%, 金回收率 14.25%, 铁回收率 45.90% 的铁精矿。实现了矿石中金铜铁及载体矿物的高效回收。

关键词: 选矿; 黄铜矿; 黄铁矿; 磁铁矿; 综合回收

中图分类号: TD923 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2019)04-0047-07

Study on the Mineral Processing Experiment of a High Fe Rich Au-Cu-S Polymetallic Ore

GAO Qifang¹, ZOU Jianjian^{2*}

(1. Yunnan Gold Mining Group Co. Ltd., Kunming 650224, China; 2. State Key Laboratory of Separation and Comprehensive Utilization of Rare Metals, Guangdong Institute of Resource Comprehensive utilization, Guangzhou 510650, China)

Abstract: A high Fe rich Au-Cu-S polymetallic ore consists of 31.81% of Fe, 1.37 g/t of Au, 0.70% of Cu and 6.52% of S. 71.83% of gold in the mineral is deposited in copper minerals, pyrite and magnetite. The grains of copper minerals, pyrite and magnetite are relatively coarse, with a grain size of >0.04 mm. The ore sample was treated by a combined process of “selective flotation of copper - activated sulfur - sulfur tailing magnetic iron”, and ZA was used as copper collector. The resulted copper concentrate consisted of 27.80 g/t of Au and 20.60% of Cu, and the recovery was 59.05% and 83.29% for Cu and Au, respectively. The resulted sulfur concentrate grade was composed of 2.16 g/t of Au and 45.07% of S, and the recovery was 20.24% and 86.25% for Au and S, respectively. The iron concentrate included 0.80 g/t of Au and 60.83% of Fe., and the recovery was 14.25% and 45.90% for Au and Fe, respectively. The proposed method has high recovery for gold, copper, iron and sulfur in ores.

Key words: beneficiation; chalcopyrite; pyrite; magnetite; high efficient recovery

金是人类最早发现和使用的金属资源, 作为贵金属, 至今仍作为国际货币结算手段和货币信用的基础, 随着科学技术的发展, 黄金在电子、电气、宇航和国防尖端领域得到广泛的应用^[1]。金具有较强的亲硫、亲铜、亲铁等性质^[2], 因此, 在自然界中金多与硫化铜、黄铁矿、磁铁矿等矿物共生在一

起, 形成金铜铁硫复杂多金属矿床。在这类矿床中金多以硫化铜、硫铁矿、磁铁矿等作为载体矿物, 根据金的赋存状态, 通过回收载体矿物的形式从而达到实现金的回收, 是实现这类矿石资源高效利用的关键所在^[3-7]。

本文对云南某高铁富金铜硫多金属矿进行了实

收稿日期: 2019-03-25

基金项目: 云南省科技计划项目(2018IB028)

第一作者: 高起方, 男, 高级工程师, 研究方向: 选矿管理。E-mail: 2936162449@qq.com

*通讯作者: 邹坚坚, 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 选矿工艺研究。E-mail: zou19876557@126.com

验研究,最终确定了从矿石中合理回收了金铜铁硫的选矿工艺流程和药剂制度,获得了富金铜精矿、含金硫精矿和含金铁精矿等产品,实现了金铜铁的回收,同时有效回收了其中的硫,对于此类资源的高效分离及综合利用提供了参考与借鉴。

1 实验部分

1.1 试样性质

高铁富金铜硫多金属矿为云南某大型金矿的深部原生硫化矿石,铜化学物相分析结果、化学多元素分析结果、矿物定量检测结果、金平衡分布结果、主要矿物的嵌布粒度结果见表1至表5。

由表1可知,试样中铜主要以原生硫化铜和次生硫化铜形式存在,占有率分别为54.05%和31.72%;表2可知,试样可供选矿回收的主要组分是金、铜、铁和硫,含量分别为1.37 g/t, 0.70%, 31.81%和6.52%;表3可知,有价铜矿物主要为黄铜矿、铜蓝、辉铜矿,硫矿物主要为黄铁矿,铁矿物主要为磁铁矿;表4可知,金主要以铜矿物为载体,分布率为39.58%,游离金占21.75%,赋存于黄铁矿中的金占18.97%,赋存于磁铁矿中的金占13.28%。表5可知,铜矿物、黄铁矿、磁铁矿的嵌布粒度均较粗,普遍处于+0.04 mm。

表1 试样铜物相分析结果

铜物相	含量	分布率
自由氧化铜	0.03	4.27
结合氧化铜	0.07	9.96
次生硫化铜	0.22	31.72
原生硫化铜	0.38	54.05
总铜	0.703	100.00

表2 试样化学多元素分析结果

元素	Cu/%	Au/(g/t)	Fe/%	Ag/(g/t)	Pb/%	Zn%
含量/%	0.70	1.37	31.81	25.17	0.04	0.02
元素	S	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	
含量/%	6.52	40.87	5.51	2.67	2.74	

表3 试样矿物定量分析结果

Tab.3 The results of Mineral quantitative test

矿物	含量%	矿物	含量%	矿物	含量%
金	微量	菱铁矿	15.47	黑云母	7.97
磁铁矿	20.32	石英	20.50	钙铁榴石	2.46
褐铁矿	1.79	长石	9.02	高岭土	2.14
黄铜矿	1.11	磁黄铁矿	0.16	方解石	0.92
辉铜矿	0.10	闪锌矿	0.36	铁白云石	0.82
铜蓝	0.22	毒砂	0.18	其他	1.41
孔雀石	0.11	方铅矿	0.16	方解石	0.82
水胆矾	0.06	黄铁矿	11.66	合计	100.00
硅孔雀石	0.15	绢云母	2.10		

表4 金的平衡分布结果

Tab.4 The results of gold equilibrium distribution

矿物	矿物含量/%	金含量/(g/t)	分配率/%
游离金	微量	—	21.75
铜矿物(黄铜矿、铜蓝、辉铜矿)	1.75	26.63	39.58
黄铁矿	11.66	1.93	18.97
磁铁矿	20.32	1.10	13.28
脉石	66.27	0.12	6.42
合计	100.00	1.31	100.00

表5 主要矿物的嵌布粒度

Tab.5 The results of main minerals dissemination particle sizes

粒级/mm	粒度分布/%		
	铜矿物(黄铜矿、辉铜矿、铜蓝等)	黄铁矿	磁铁矿
-2.56+1.28			6.62
-1.28+0.64	7.12	10.16	16.92
-0.64+0.32	14.26	13.32	15.27
-0.32+0.16	22.16	22.16	11.04
-0.16+0.08	28.15	28.26	16.14
-0.08+0.04	14.21	13.20	16.44
-0.04+0.02	7.16	6.38	12.91
-0.02+0.01	5.82	5.26	4.36
-0.01	1.12	1.26	0.31
合计	100.00	100.00	100.00

1.2 实验方案的确定

本矿石中只有 21.751%的金以游离金存在，而 71.83%的金赋载于铜矿物、黄铁矿及磁铁矿。因此有效地选别铜矿物、黄铁矿、磁铁矿是提高金回收率的关键。此外，由于金在铜精矿中的冶炼回收率高于硫精矿中的冶炼回收率，选矿过程中应尽量将金富集到铜精矿中。因此，要获得高品质的铜精矿产品，并使金最大限度地富集到铜精矿中，有效地实现黄铜矿与硫铁矿的分离是关键。矿石中铜矿物、黄铁矿、磁铁矿的嵌布粒度均较粗，普遍分布在 +0.04 mm，矿物之间具有良好的解离性。另外，矿石中铜矿物、黄铁矿、磁铁矿的矿物量均较大，适宜采用逐步选别的优先流程。根据矿石性质，采用“优先浮选铜-活化浮选硫-硫尾磁选回收铁”实现金铜铁及硫的综合回收。实验方案见图 1。

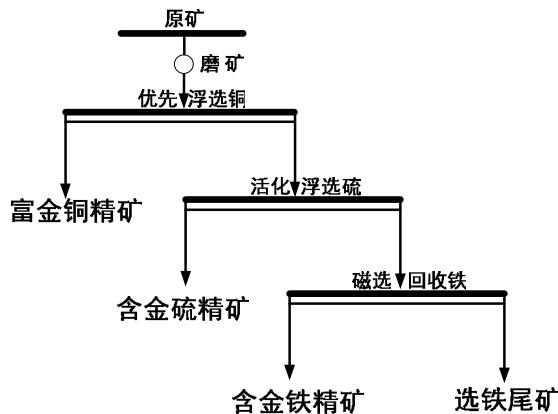


图 1 实验方案

Fig.1 The flow chart of testing program

1.3 仪器设备及试剂

仪器设备主要有 XFD 浮选机、滚筒弱磁选机、XMQ240*90 实验室球磨机、实验室烘箱等；试剂主要有工业级石灰、酯类捕收剂 ZA、丁黄药、乙黄药、丁铵黑药、2#油等。

2 实验结果与讨论

2.1 优先浮选铜

2.1.1 细度的影响

根据矿石中有价矿物嵌布粒度较粗，易解离的特点，可以在较粗的磨矿细度下实现有价矿物相互分离，为优先浮选创造了良好的条件。实验条件为石灰用量 3 kg/t，加入磨机，捕收剂为 ZA^[8]（以酯类为主的合成药剂，兼有起泡性能），粗选用量 50 g/t，扫选用量 10 g/t。粗精矿实验结果见图 2。

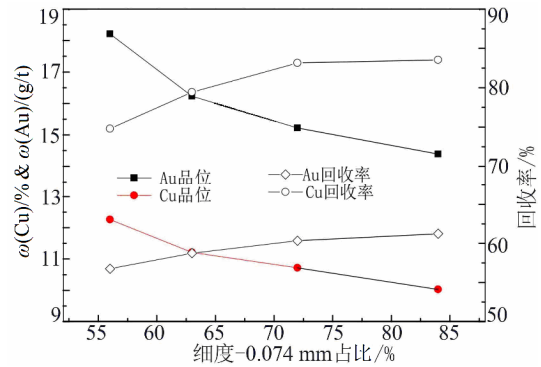


图 2 细度实验结果

Fig.2 Test result of fineness

从图 2 可以看出，细度增加后，铜和金的回收率均得到提高，但在细度达到-0.074 mm 占 73%后趋于稳定。因此，选择磨矿细度为-0.074 mm 占 73%。

2.1.2 石灰用量的影响

矿石中含有大量的黄铁矿，有效抑制黄铁矿，是实现优先浮选铜的关键所在，石灰是最为常用黄铁矿的有效抑制剂，因此，针对石灰进行用量实验研究。实验条件为磨矿细度-0.074 mm 占 73%，捕收剂为 ZA，粗选用量 50 g/t，扫选用量 10 g/t。粗精矿实验结果见图 3。

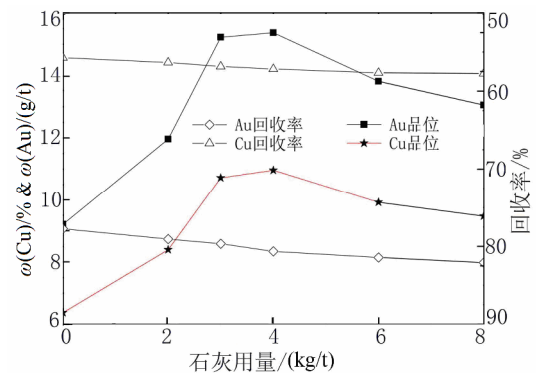


图 3 石灰用量实验结果

Fig.3 Test results of lime

从图 3 可以看出，加入石灰后，铜与金的品位均得到明显的提高，而回收率并没有明显下降，但在石灰用量超过 4 kg/t 后，铜与金的品位反而降低。综合考虑，选择适宜的石灰用量为 3 kg/t。

2.1.3 捕收剂的影响

矿石中的有价元素除铜外，还含有金，因此，在捕收剂的选择上，不仅要求对铜具有良好的高选择性捕收能力，同时也要对金具有优良的捕收能力。乙黄药、丁铵黑药、Z200 均具有对铜矿物选择性捕

收能力强,对硫铁矿捕收能力弱的特点,相对来说Z200及其组合药剂可以在相对较低的石灰用量,较低的碱度下实现铜矿物的捕收,强化金的回收。在此,针对乙黄药、丁铵黑药、Z200和ZA等4种药

剂进行对比实验研究。实验条件为磨矿细度-0.074 mm占73%,石灰用量3 kg/t,捕收剂实验结果如图4所示。

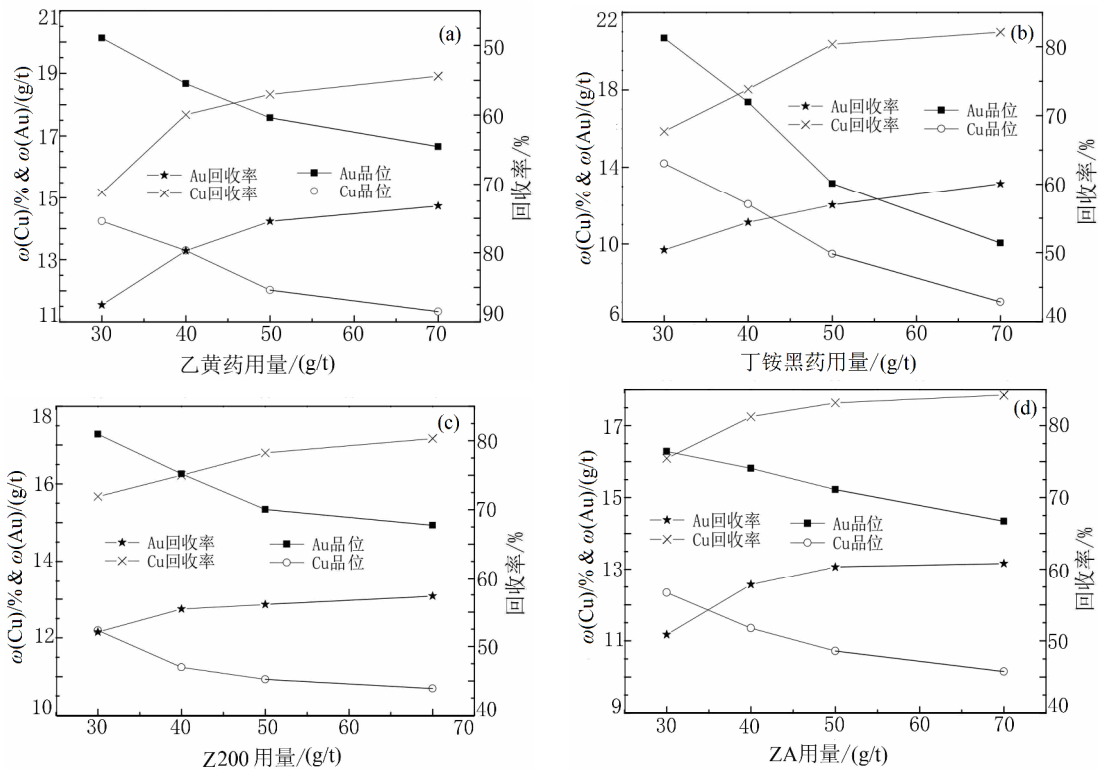


图4 捕收剂实验结果 Fig.4 Test results of collector

从图4可以看出,4种捕收剂中,同等药剂用量条件下,ZA对铜和金具有最好的选择性捕收效果(图4(d)),获得的粗精矿品位和回收率均最高,其次是Z200(图4(c)),而乙黄药(图4(a))的捕收能力较差,丁铵黑药(图4(b))的选择性较差。因此,选择ZA作捕收剂,用量为50 g/t。

在优先浮选铜矿物过程中,采用了3 kg/t的石灰,黄铁矿受到了抑制,根据金的赋存状态特点,18.97%的金赋存于黄铁矿中,为回收赋存于黄铁矿中的金,同时回收硫,须对黄铁矿进行活化实验研究。实验条件为,给矿为浮铜尾矿,捕收剂为丁黄药,粗选用量200 g/t,扫选用量60 g/t,起泡剂为2#油:粗选用量40 g/t,扫选用量10 g/t,硫活化剂实验结果见图5。

2.2 活化浮选硫

2.2.1 活化剂的影响

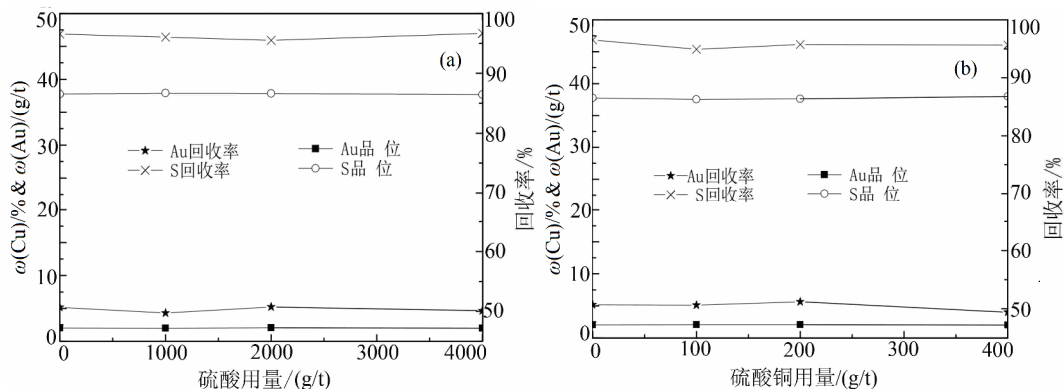


图5 硫活化剂实验结果 Fig.5 Test results of sulfur activator

从图 5 可以看出，添加硫酸或者硫酸铜后，粗精矿的金品位及硫品位基本一致，金和硫的回收率也基本一致，这说明矿石中的黄铁矿具有良好的可浮性，不需添加活化剂，采用丁黄药与 2#油就能加以回收，基于实验研究结果，不添加活化剂。

2.2.2 捕收剂的影响

浮选黄铁矿通常以丁黄药作为捕收剂，在此，对丁黄药用量进行实验研究，实验条件为给矿为浮铜尾矿，起泡剂为 2#油，粗选用量 40 g/t，扫选用量 10 g/t。丁黄药实验结果见图 6。从图 6 可以看出，适宜的丁黄药用量为 200 g/t 左右。

2.3 硫尾磁选回收铁

2.3.1 粗选磁场强度

矿石中 13.28% 的金赋存于磁铁矿中，磁选回收磁铁矿的同时，也可以实现这部分金的富集回收，根据磁铁矿具有强磁性的特点，采用弱磁选进行实验研究，实验结果列于图 7。从图 7 可以看出，磁场强度增加，粗选磁精矿含金没有明显变化，但是铁品位在不断下降，而铁和金的回收率均得到提高，说明增加磁场有利于铁和金的回收，但在磁场强度超过 0.15 T 后，不再有明显的变化，因此，选择粗选磁场强度为 0.15 T。

2.3.2 精选磁场强度

从图 7 可以看出，粗选获得的精矿铁品位难以达到 60% 以上，不符合磁铁矿精矿的要求。对磁粗精矿进行精选的实验结果列于图 8。从图 8 可以看出，通过磁精选后，铁精矿铁品位普遍达到 60% 以上，且随着磁场强度的增加，铁和金的回收率也得到提高，说明磁场强度增加后，磁铁矿的回收得到强化，与此同时，赋存于其中的金也得到强化回收。在保证铁精矿铁品位达到 60% 的情况下，应尽量实现铁和金的回收，因此，选择精选磁场强度为 0.15 T。

2.4 全工艺流程实验研究

在浮选与磁选实验研究基础之上，进行全工艺实验，流程见图 9，结果列于表 6。

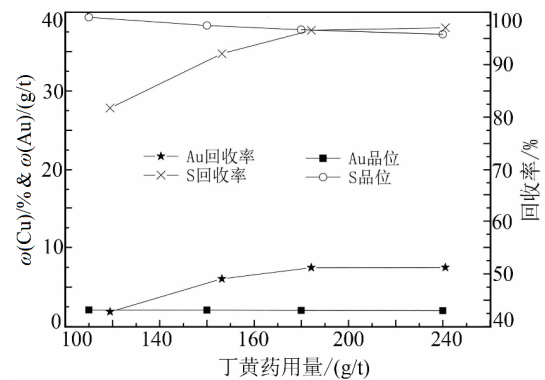


图 6 丁黄药实验结果

Fig.6 Test results of butyl xanthate

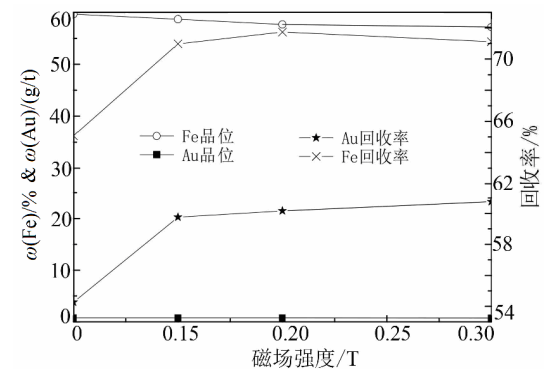


图 7 粗选磁场实验结果

Fig.7 Test results of roughing magnetic field intensity

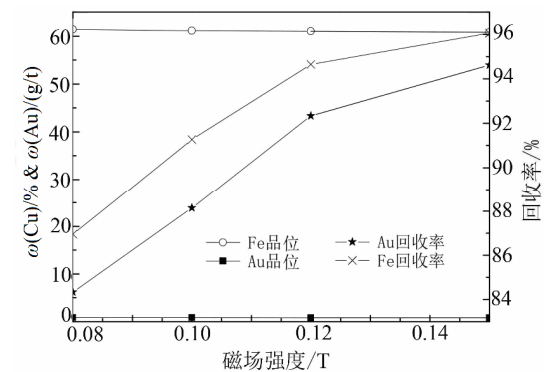


图 8 精选磁场实验结果

Fig.8 Test results of cleaning magnetic field intensity

表 6 全流程实验结果

Tab.6 The results of whole process test

产品名称	产率/%	品位				回收率/%			
		Au/(g/t)	Cu/%	Fe/%	S/%	Au	Cu	Fe	S
富金铜精矿	2.86	27.80	20.60	22.63	24.01	59.05	83.29	2.04	10.41
含金硫精矿	12.62	2.16	0.20	42.98	45.07	20.24	3.57	17.06	86.25
含金铁精矿	23.99	0.80	0.05	60.83	0.21	14.25	1.70	45.90	0.76
选铁尾矿	60.53	0.13	0.13	18.39	0.28	6.46	11.44	35.00	1.84
原矿	100.00	1.35	0.71	31.80	6.59	100.00	100.00	100.00	100.00

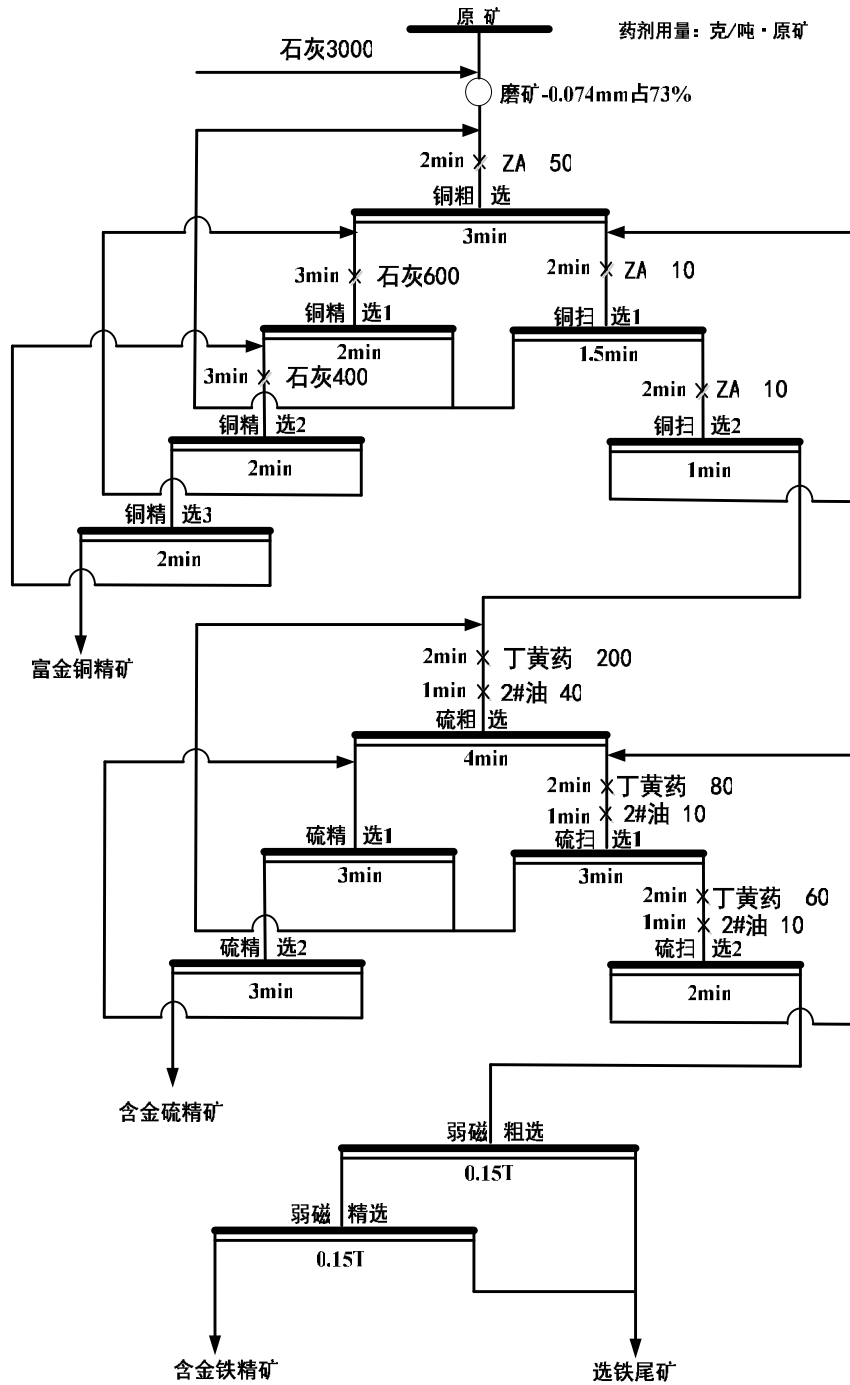


图 9 全流程实验流程图

Fig.9 The flow chart of whole process test

由表 6 可见，全流程实验可获得金品位 27.80 g/t，铜品位 20.60%，金回收率 59.05%，铜回收率 83.29%的富金铜精矿；金品位 2.16 g/t，硫品位 45.07%，金回收率 20.24%，硫回收率 86.25%的含金硫精矿；金品位 0.80 g/t，铁品位 60.83%，金回收率 14.25%，铁回收率 45.90%的含金铁精矿。

3 结论

某高铁富金铜硫多金属矿金是以铜矿物、黄铁矿、磁铁矿等矿物为载金矿物，而铜铁硫等有价值矿物的嵌布粒度均较粗，普遍分布在+0.04 mm，采用

“优先浮选铜-活化浮选硫-硫尾磁选回收铁”联合的工艺流程处理该矿石，自主研发的 ZA 作铜捕收剂，全流程实验获得了富金铜精矿、含金硫精矿和含金铁精矿等产品，全面实现了矿石中金铜铁硫的高效回收。

参考文献：

[1] 吴良士, 白鸽, 袁忠信. 矿物与岩石[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
WU L S, BAI G, YUAN Z X. Minerals and rocks[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.

[2] 《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, 2012.
Editorial Board of the Mineral Resources Industry Requirements Manual. Mineral resources industry requirements manual[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012.

[3] 罗晓华. 提高武山铜矿伴生金银回收率选矿试验研究[J]. 矿业快报, 2006(5): 17-20.
LUO X H. Experimental study on improving the recovery rate of associated gold and silver in Wushan copper mine[J]. Express information of mining industry, 2006(5): 17-20.

[4] 荣成林, 赵荣江. 珲春金铜矿矿石选矿生产实践[J]. 黄

金, 1993, 14(8): 47-51.
RONG C L, ZHAO R J. Practice of ore dressing production in Hunchun gold and copper ore [J]. Gold, 1993, 14(8): 47-51.

[5] 张岳. 某金铜矿选矿工艺优化研究[J]. 金属矿山, 2009(4): 56-59.
ZHANG Y. Study on optimization of beneficiation process of a gold and copper mine[J]. Metal mine, 2009(4): 56-59.

[6] 樊晓鹏, 王玉珍, 李绍英. 某斑岩型金铜矿选矿试验研究[J]. 现代矿业, 2009, 25(6): 42-44.
FAN X P, WANG Y Z, LI S Y. Experimental study on beneficiation of a porphyry gold-copper ore[J]. Modern mining, 2009, 25(6): 42-44.

[7] 宋宝旭, 邱显扬, 胡真, 等. 某金铁氧化矿中矿泥对氰化浸出影响的研究[J]. 贵金属, 2017, 38(1): 53-59.
SONG B X, QIU X Y, HU Z, et al. Study on Influence of clay minerals in a gold-iron oxides ore on gold cyanidation[J]. Precious metals, 2017, 38(1): 53-59.

[8] 邹坚坚, 胡真, 李汉文. 高效捕收剂 ZA 在铜硫分离浮选中的应用[J]. 金属矿山, 2015(6): 87-91.
ZOU J J, HU Z, LI H W. Application of high-efficiency collector ZA in copper-sulfur separation flotation[J]. Metal mine, 2015(6): 87-91.

本刊声明

《贵金属》已加入科技期刊学术不端文献检测系统 (AMLC)，根据严重疑似学术不端文献 (ALM) 的判定标准：

(1) 本文与发表在前的且本文未注明引用的其他文献的文字重合度大于 40%。

(2) 一稿多发稿件中第一次发表以后重复发表的稿件，包括同一作者改动已经发表的文献再次投稿发表的文章，其改动部分少于 10%。

经系统检测，对存在严重抄袭的稿件，本刊将予退稿处理。

凡本刊登载的文章，将同时被中国知网、万方数据-数字化期刊群、维普中文科技期刊数据库和超星期刊域出版平台等全文收录，并供本刊授权和合作媒体使用，本刊支付的稿酬已包含作者著作使用费。作者向本刊投稿，即视为同意将文章编入以上数据库。

投稿文稿需通过所在单位保密审查，相关手续由作者自行办理。本刊不承担技术秘密被公开的责任。

《贵金属》编辑部
2019 年 11 月