

山东某含金磁黄铁矿浮选尾矿磁选回收试验研究

董鸿良^{1,2}, 孙晓妍³, 李文博², 王海龙¹, 宋宝旭^{3*}

(1. 山东烟台鑫泰黄金矿业有限责任公司, 山东 烟台 265147; 2. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110000;
3. 辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114001)

摘要: 山东某含金磁黄铁矿原矿金品位 1.60 g/t, 硫品位 1.86%, 属含金硫铁矿。矿石性质研究结果表明, 部分以磁黄铁矿为载体的金, 矿物含量为 0.96%, 金品位 8.25 g/t, 原矿金分配率 5.25%。生产流程对以磁黄铁矿为载体的金矿物的回收水平仍有提高空间。为了解决这一问题, 开展了从生产原矿和生产尾矿中回收以磁黄铁矿为载体的金的对比试验, 结果表明, 磁选不宜用于原矿、重选不宜用于尾矿中载金磁黄铁矿的回收; 尾矿磁选流程可以实现含金磁黄铁矿的有效富集, 最终选择全粒级磁选工艺流程, 获得了金品位 1.52 g/t, 硫品位 2.87%的含金磁黄铁矿。尾矿金、硫回收率分别为 52.09%、62.93%, 对原矿回收率分别为 12.27%、18.56%, 实现了以磁黄铁矿为载体的金矿物的综合利用。

关键词: 磁黄铁矿; 含金硫铁矿; 全粒级磁选; 强化回收

中图分类号: TD952 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2023)03-0022-09

Experimental study on the recovery of a gold-bearing pyrrhotite flotation tailings in Shandong by using magnetic separation technique

DONG Hongliang^{1,2}, SUN Xiaoyan³, LI Wenbo², WANG Hailong¹, SONG Baoxu^{3*}

(1. Shandong Yantai Xintai Gold Mining Industry Co. Ltd., Yantai 265147, Shandong, China;

2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110000, China;

3. School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114001, Liaoning, China)

Abstract: A gold-bearing pyrrhotite ore in Shandong contains 1.60 g Au/t and 1.86% sulfur, belonging to gold-bearing pyrite. The research results of ore properties show that in some part of the ore gold is trapped in pyrrhotite as the carrier with a mineral content of 0.96%, a gold grade of 8.25 g/t, and a gold distribution rate of 5.25%. The production process still has room for improvement in the recovery of gold minerals with pyrrhotite as the carrier. Therefore, a comparative test of recovering gold in pyrrhotite from raw ore and tailings was carried out. The results show that magnetic separation is not suitable for raw ore while gravity separation is not suitable for the recovery of gold-loaded pyrrhotite in tailings. However, for gold-bearing pyrrhotite, effective enrichment can be realized by using the magnetic separation process. Based on the results, the full-size magnetic separation process was selected and tested, producing a gold-bearing pyrrhotite with a gold grade of 1.52 g/t and a sulfur grade of 2.87%. The recovery rates of gold and sulfur were 52.09% and 62.93% from the tailings, respectively, and were 12.27% and 18.56% from the raw ore, suggesting the full-size magnetic separation is an effective process for comprehensive utilization of gold minerals with pyrrhotite as carrier.

Key words: pyrrhotite; gold-bearing pyrite; full-grade magnetic separation; enhanced recovery

收稿日期: 2022-08-30

基金项目: 辽宁省教育厅面上项目(LJKMZ20220650)

第一作者: 董鸿良, 男, 硕士研究生; 研究方向: 贵金属矿产资源综合利用; E-mail: 864862347@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

金是重要的贵金属，具有良好的金属延展性和化学稳定性，且导电导热性优异，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^[1]。我国山东省金矿资源十分丰富，是我国黄金生产的重要基地，不论其储量或产量都在全国占重要地位^[2-3]。

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资源^[4]，该类矿床中金主要以独立金矿物形式存在^[5]，其次为以黄铁矿为载体的金矿物。对于该类矿床，随着开采深度的不断增加，不仅矿床中的独立金矿物越来越少^[6]，在选别过程中也会混入大量的磁黄铁矿^[7]，且部分磁黄铁矿也是金的载体矿物，但因其可浮性和磁性变化差异较大^[8]，对这部分磁黄铁矿的回收成为新的挑战 and 难题。因此，如何加强这部分以磁黄铁矿为载体的金矿物的回收是十分重要的。

山东某含金磁黄铁矿石中主要金属矿物为黄铁矿和磁黄铁矿^[9]，但 51% 左右属于 -0.020 mm 的微细粒级嵌布，属难选磁黄铁矿。针对混合并矿区，围绕以磁黄铁矿为载体的金矿物，本文在矿石性质研究的基础上，选矿试验分别从原矿和尾矿入手，开展含金磁黄铁矿强化回收试验，为国内外同类金属硫化矿提供借鉴。

1 矿石性质

试验用矿石取自于山东烟台鑫泰黄金矿业有限责任公司的实际生产矿石，选厂主要采用浮选法回收金，药剂制度采用 MA-1 做捕收剂，HX-609 做起泡剂。为了考察上述生产流程中金的回收情况和磁黄铁矿的走向，首先对生产原矿和生产尾矿进行了主要元素分析，结果列于表 1；为了进一步查明矿石中主要矿物的走向，对生产原矿和生产尾矿进行了矿物组成测定，结果见表 2；对原矿中黄铁矿、磁黄铁矿的嵌布粒度进行了测定，结果如表 3 所列；为了进一步查明原矿中金赋存状态，对金在各矿物中的分配率进行了测定和计算，结果见表 4。

由表 1 可知，原矿金品位 1.60 g/t，硫品位 1.86%，属含金硫铁矿。尾矿金、硫品位分别为 0.39 g/t、0.61%，相较于国内同类矿山，综合回收利用水平仍有提高空间。

由表 2 可知，矿石中主要的金属矿物为黄铁矿(FeS₂)、磁黄铁矿(Fe_{1-x}S)，主要脉石矿物为石英等。原矿中磁黄铁矿含量为 0.96%，而尾矿中磁黄铁矿含量高于原矿为 1.51%，加强尾矿中磁黄铁矿的回

表 1 矿石主要元素分析结果(质量分数) /%

Tab.1 Analysis results of main elements of the ores (mass fraction)

成分		Au*	S	Cu	Pb	Zn	As
含量	原矿	1.60	1.86	0.07	0.02	1.60	0.01
	尾矿	0.39	0.61	0.03	0.02	0.39	0.01
成分		CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe	
含量	原矿	12.74	7.51	31.25	10.26	5.03	
	尾矿	14.74	9.51	33.17	12.26	6.03	

*注：Au 的含量单位为 g/t，本文下同。

表 2 矿石矿物组成测定结果(质量分数)

Tab.2 Determination results of mineral composition of the ores (mass fraction) /%

样品	黄铁矿	磁黄铁矿	磁铁矿	钠长石	白云石	石英
原矿	2.40	0.96	0.38	11.27	8.98	17.46
尾矿	0.20	1.51	0.39	12.12	5.68	26.38
样品	正长石	钙铁辉石	方解石	斜绿泥石	拉长石	其它
原矿	8.20	3.04	12.19	4.68	5.08	25.36
尾矿	13.52	2.00	7.18	4.60	3.86	22.56

表 3 原矿主要矿物嵌布粒度

Tab.3 Particle size distribution of main minerals in the raw ore

粒级/mm	黄铁矿/%			磁黄铁矿/%		
	个别	正累积	负累积	个别	正累积	负累积
+0.25	/	/	/	/	/	/
-0.25+0.15	/	/	/	/	/	/
-0.15+0.10	4.24	/	100	/	/	/
-0.10+0.074	14.82	19.06	95.76	4.64	/	100
-0.074+0.043	19.51	38.57	80.94	18.09	22.73	95.36
-0.043+0.020	25.79	64.36	61.43	25.31	48.04	77.27
-0.020+0.010	17.83	82.19	35.64	27.15	75.19	51.96
-0.010	17.81	100	/	24.81	100	/

收，有助于提高金回收率。

由表 3 可知，黄铁矿和磁黄铁矿嵌布粒度主要集中在 -0.074+0.010 mm 粒级，其中黄铁矿略粗于磁黄铁矿。值得注意的是，以 -0.020 mm 粒级嵌布的磁黄铁矿占有率达到 51% 左右，这部分极微细粒嵌布的磁黄铁矿回收将是难题，如何实现这部分磁黄铁矿的高效回收将会直接影响金的回收效率。

由表 4 可知，金主要以自然金和金银矿等独立金矿物形式存在，金分配率为 46.44%，其次为以黄铁矿为载体的金矿物。与此同时，磁黄铁矿也是金的主要载体矿物，虽然金分配率仅为 5.25%，但金

表4 原矿金赋存状态查定结果

Tab.4 Determination results of gold occurrence state distribution in the raw ore

矿物种类	矿物含量/%	矿物含 Au 量/(g/t)	金分配率/%
独立金矿物 (自然金、金银矿等)	/	/	46.44
铜铅锌硫化矿载体金	0.23	45.12	6.88
黄铁矿载体金	2.40	19.25	30.65
磁黄铁矿载体金	0.96	8.25	5.25
氧化铁矿载体金	0.38	0.03	0.01
脉石(方解石等碳酸盐)	12.19	0.85	6.87
其它脉石	83.84	0.07	3.89
合计	100	1.51	100

品位高达 8.25 g/t, 若能实现这部分磁黄铁矿的回收, 将有助于金回收率的进一步提高。

2 试验部分

2.1 试验方案

根据矿石性质研究结果, 矿石属含金硫铁矿, 原矿中磁黄铁矿含量达到了 0.96%, 并且 51%左右的磁黄铁矿属于-0.020 mm 的微细粒级嵌布。对于含金硫铁矿, 因其天然可浮性较好, 选厂主要采用浮选法回收金^[10], 但大量磁黄铁矿的混入对金浮选回收产生很多干扰, 使得大量磁黄铁矿损失在尾矿中, 因此浮选法回收金的难度较大。

磁黄铁矿成分通式为 $Fe_{1-x}S$, x 值介于 0 与 0.233 之间, 构成缺位固溶体, 磁黄铁矿具有六方、单斜、斜方三种同质多象变体和多种类型的超结构^[11-12]。由于化学组成的不确定性, 导致矿物性质也会发生变化^[13], 不同晶系的磁黄铁矿在可浮性和磁性上有时甚至会有截然相反的表现^[14], 基于此, 主要考察从生产原矿和生产尾矿中回收磁黄铁矿的可能性, 重点考查磁选、浮选回收磁黄铁矿的可能性, 具体如下: 针对原矿, 进行了磁选和浮选回收磁黄铁矿的试验研究, 其中磁选重点考查了弱磁选和强磁选预先回收磁黄铁矿的可能性^[15], 浮选重点考查加入活化剂强化回收磁黄铁矿的可能性。针对尾矿, 进行了重选和磁选回收磁黄铁矿的试验研究, 其中重选重点考查了实验室用摇床回收磁黄铁矿的可能性, 磁选重点考查了全粒级磁选和分级磁选回收磁黄铁矿的可能性, 并对磁选介质进行了条件试验。

2.2 试验设备和方法

用 XMQ240×90 锥形球磨机磨矿, XFG 系列挂

槽浮选机浮选。试验过程活化剂分别为硫酸铜和硫酸, 捕收剂为戊基黄药, 起泡剂为 2 号油, 试验用水为自来水。单元试样重 500 g, 磨矿浓度 50%, 矿浆浓度约 33%, 粗选浮选槽 1.5 L, 取浮选获得的浮选泡沫和浮选槽底物产品。强磁选采用我校长沙矿冶研究院的电磁夹板式强磁选机 (CRIMM DCJB70-200)、分选箱强磁选介质选择为 $\phi 2$ mm, 弱磁选采用湿式滚筒弱磁选机, 背景场强为 0.15 T。重选采用实验室用摇床。试验完毕后, 对其产品分别过滤、烘干后称重, 送化验分析, 计算出产率(P); 由产率、品位计算出各产品回收率(R)。

3 结果与讨论

3.1 磨矿细度对选矿回收率的影响

磨矿作业考虑到黄铁矿和磁黄铁矿的解离^[16], 适宜的磨矿细度可以使黄铁矿和磁黄铁矿有效解离, 其中黄铁矿主要体现在浮选作业, 磁黄铁矿除了浮选作业以外, 也需考虑磁选作业。基于此, 磨矿细度试验包括浮选和磁选两部分。浮选采用一粗、一扫流程, 药剂制度为捕收剂戊基黄药用量为 120 g/t, 起泡剂 2 号油用量为 40 g/t; 磁选采用一次粗选流程, 采用长沙矿冶研究院的电磁夹板式强磁选机 (CRIMM DCJB70-200) 作为磁选设备, 磁感应强度为 0.40 T, 磁选介质为 2 mm, 试验结果见图 1。

图 1 结果表明, 对于浮选作业, 随着磨矿细度的增加, 金、硫品位均逐渐减低, 当磨矿细度达到 -0.074 mm 占 80% 时, 金、硫品位已经达到了稳定值。因此, 对于浮选作业, 适宜的磨矿细度为 -0.074 mm 占 80%, 但现场由于设备配置的原因, 目前的磨矿细度为 -0.074 mm 占 67%, 因此后续在原矿回收磁黄铁矿时, 也将密切考查上述两个细度下的磁黄铁矿回收情况。

对于磁选作业, 金、硫品位均随着磨矿细度的增加而呈现逐渐下降的趋势, 但下降幅度并不明显, 在磨矿细度为 -0.074 mm 占 67% 的生产细度时, 也可以较好的回收磁性矿物。综合考虑, 在从尾矿回收磁黄铁矿时, 无需再磨, 仍然沿用原矿磨矿细度为 -0.074 mm 占 67% 即可。

3.2 原矿中磁黄铁矿的强化回收

为了考查从原矿中回收磁黄铁矿的可能性, 首先进行了原矿强化回收磁黄铁矿的试验研究, 由于磁黄铁矿具有一定的磁性, 考虑能否利用这个磁性在原矿预先回收磁黄铁矿, 分别采用磁选和浮选两种方案进行试验。

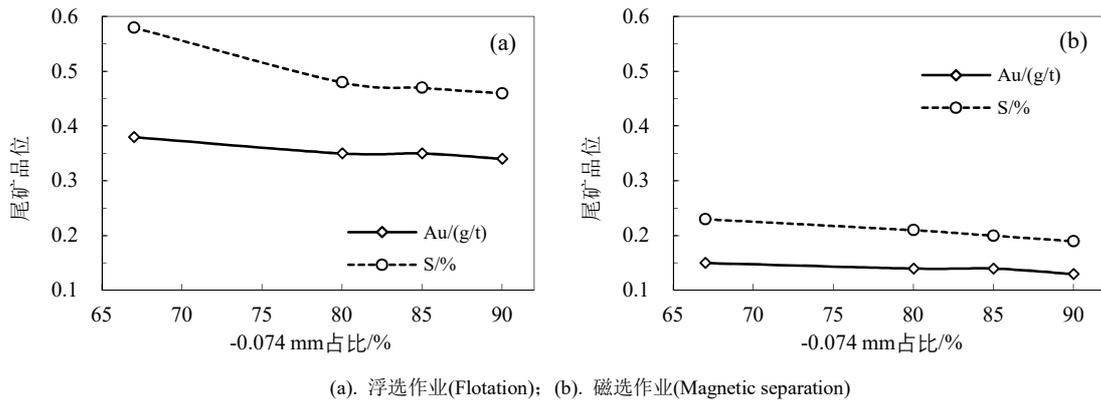


图 1 磨矿细度的影响试验结果

Fig.1 Experimental results on the influence of grinding fineness

3.2.1 原矿磁选试验

在磨矿细度为-0.074mm 占 67%和 80%条件下，对原矿进行磁感应强度对含金磁黄铁矿影响的磁选试验，分别进行了磁感应强度(B)为 0.15、0.20、0.40、0.60、0.80 和 1.00 T 条件下的磁选试验。结果列于表 5。

表 5 结果表明，无论在何种细度条件下，金在磁性矿物中的分布都很分散，这主要是由于独立金矿物会随磁选过程无规律的进入到磁性产品中，导

致非磁性矿物金品位高于原矿及磁选矿物品位，且金回收率不足 70%。综合考虑，由于原矿中金主要为自然金和金银矿等独立金矿物，占有率高达 46.44%，即独立金矿物是矿石中价值最高的含金矿物，而磁选会使这部分独立金矿物分散地进入到磁性矿物中，不利于后续的集中回收。综合考虑，若以牺牲价值更高的独立金矿物为代价，去回收价值较低的含金磁黄铁矿，得不偿失，基于此，不建议采用原矿磁选方案。

表 5 原矿磁选试验结果

Tab.5 Magnetic separation test results of the raw ore

B/T	产品	-0.074 mm 占 67%					-0.074 mm 占 80%				
		产率/%	$\omega_{Au}/(g/t)$	$\omega_S/\%$	$R_{Au}/\%$	$R_S/\%$	产率/%	$\omega_{Au}/(g/t)$	$\omega_S/\%$	$R_{Au}/\%$	$R_S/\%$
0.15	磁性矿物 1	8.55	1.15	1.23	6.15	5.66	7.48	1.05	1.35	4.91	5.43
0.20	磁性矿物 2	9.35	1.65	2.10	9.64	10.55	8.81	1.55	2.05	8.53	9.71
0.40	磁性矿物 3	8.81	1.02	1.20	5.62	5.68	8.40	1.23	1.10	6.46	4.97
0.60	磁性矿物 4	8.45	1.21	1.30	6.39	5.90	8.19	1.07	1.20	5.48	5.28
0.80	磁性矿物 5	8.19	1.30	1.01	6.65	4.45	7.53	1.35	1.05	6.35	4.25
1.00	磁性矿物 6	3.38	1.15	0.99	2.43	1.80	3.76	1.26	0.83	2.96	1.68
	非磁性矿物	53.27	1.90	2.30	63.13	65.96	55.83	1.87	2.29	65.31	68.68
	原矿	100	1.60	1.86	100	100	100	1.60	1.86	100	100

3.2.2 原矿浮选试验

对于磁黄铁矿，可以考虑加入 Cu^{2+} 活化剂或在酸性介质条件浮选下进行强化回收^[9]。基于此，为考察活化剂对矿石中硫化矿物浮选效果的影响，分别选择硫酸铜和硫酸做活化剂，进行了浮选用量对比试验，采用一粗、一扫流程，磨矿细度为-0.074 mm 占 80%，浮选药剂为：加入硫酸铜和硫酸，戊基黄

药用量为 120 g/t，2 号油用量为 40 g/t，扫选用量是粗选用量的 1/3，试验结果见图 2。图 2 结果表明，无论是硫酸铜还是硫酸做活化剂，浮选尾矿中的金、硫品位并未有明显降低，对整体的收率影响不大，这也从侧面表明矿石中的磁黄铁矿属难浮磁黄铁矿，综合考虑，不建议采用浮选回收原矿中的含金磁黄铁矿。

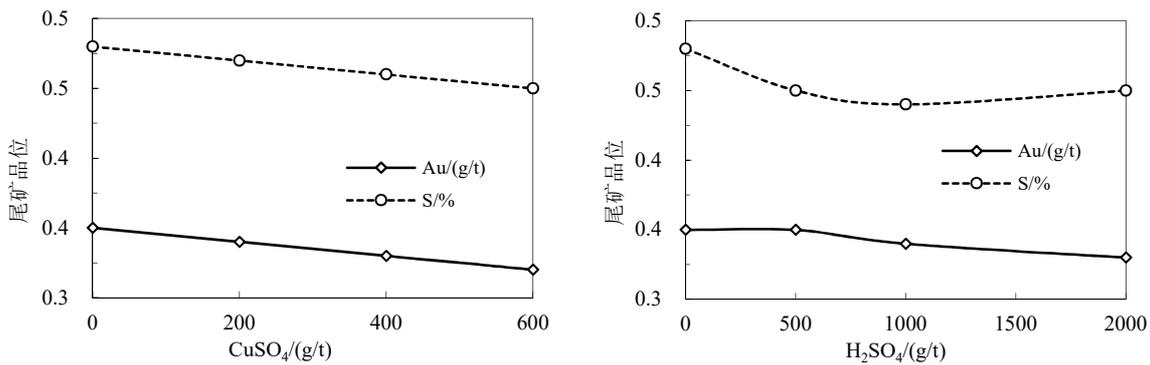


图2 活化剂种类及用量试验结果

Fig.2 Test results of the activator type and dosage

3.3 尾矿重选试验

为了考查从尾矿中回收磁黄铁矿的可能性,以现场浮选尾矿作为给矿,进行了尾矿强化回收磁黄铁矿的试验研究。同时用采用重选作为对比试验方案。根据矿石性质研究结果,脉石矿物主要为石英等轻比重矿物,平均密度在2~3左右,而磁黄铁矿密度一般为4.5左右,两者在密度方面具有差异性。基于此,以现场浮选尾矿作为给矿,采用实验室用摇床进行了重选探索试验,结果见表6。

表6 重选探索试验结果

Tab.6 Reselect exploration test results

产品名称	P/%	ω_{Au} /(g/t)	ω_S /%	R_{Au} /%	R_S /%
重矿物1	2.14	0.86	1.22	4.71	4.36
重矿物2	8.04	0.65	1.05	13.39	14.06
中矿	17.05	0.55	0.95	24.05	27.00
尾矿	72.77	0.31	0.45	57.84	54.58
给矿	100	0.39	0.60	100	100

结果表明,重矿物1、2的金品位仅为0.86 g/t、0.65 g/t,富集效果并不明显,结合矿石性质,主要是由于大量的磁黄铁矿嵌布粒度在-0.020 mm粒级,对于这部分极微细粒的磁黄铁矿,已经超过了重选回收的粒度下限。基于此,不建议采用重选回收尾矿中的含金磁黄铁矿。

3.4 尾矿磁选试验

为了考查从尾矿中回收磁黄铁矿的可能性,以现场浮选尾矿作为给矿,进行了尾矿强化回收磁黄铁矿的试验研究。

3.4.1 全粒级磁选与分级磁选试验

矿石性质研究结果表明,矿石以-0.020 mm微细粒级嵌布形式存在的磁黄铁矿含量高达51%左

右,为了考查从尾矿回收这部分微细粒级磁黄铁矿的磁选效果,进行了全粒级磁选与分级磁选的对比试验,其中弱磁选采用湿式滚筒弱磁选机,背景场强为0.15 T,强磁选采用长沙矿冶研究院的电磁夹板式强磁选机(CRIMM DCJB70-200),分选箱强磁选介质选择为 $\phi 2$ mm,全粒级和分粒级磁选试验结果分别如表7、表8所列。

表7 全粒级磁选试验结果

Tab.7 Full-grade magnetic separation test results

B/T	产品名称	P/%	ω_{Au} /(g/t)	ω_S /%	R_{Au} /%	R_S /%
0.15	磁性矿物1	2.14	0.45	0.71	2.47	2.49
0.20	磁性矿物2	15.76	1.35	2.36	54.49	61.02
0.40	磁性矿物3	9.50	0.27	0.37	6.58	5.76
0.60	磁性矿物4	9.45	0.20	0.35	4.85	5.42
0.80	磁性矿物5	6.91	0.18	0.24	3.19	2.72
1.00	磁性矿物6	4.02	0.16	0.31	1.65	2.04
-	非磁性矿物	52.21	0.20	0.24	26.78	20.54

表7结果表明,对于全粒级磁选,金、硫磁性矿物2中具有较为明显的富集趋势,金、硫品位分别为1.35 g/t、2.36%,金回收率为54%,对含金磁黄铁矿的回收效果好。

表8数据显示,对于分级磁选,金、硫在各粒级的磁性矿物2中具有较为明显的富集趋势。分粒级看,在+0.020 mm的选矿适宜回收粒级,在-0.074+0.043 mm粒级获得的金、硫品位最高,从回收率角度看,+0.074 mm和-0.043+0.020 mm粒级对给矿的回收率最高;对于-0.020 mm的选矿难回收粒级,磁性矿物2中的金品位明显高于+0.020 mm粒级,但对给矿的回收率仅为4.96%和2.71%。

表8 分级磁选试验结果

Tab.8 Classification-magnetic separation test results

粒级/mm	B/T	产品名称	产率/%		品位		作业回收率/%		对给矿回收率/%	
			$P_{\text{作业}}$	$P_{\text{给矿}}$	$\omega_{\text{Au}}(\text{g/t})$	$\omega_{\text{S}}/\%$	R_{Au}	R_{S}	R'_{Au}	R'_{S}
+0.074	0.15	磁性矿物 1	3.19	1.08	0.20	0.43	2.13	3.27	0.56	0.75
	0.20	磁性矿物 2	17.66	5.98	1.18	1.34	69.51	56.88	18.26	13.10
	0.40	磁性矿物 3	3.70	1.25	0.15	0.55	1.85	4.89	0.49	1.13
	0.60	磁性矿物 4	8.30	2.81	0.12	0.23	3.32	4.66	0.87	1.07
	0.80	磁性矿物 5	6.14	2.08	0.12	0.21	2.46	3.04	0.65	0.70
	1.00	磁性矿物 6	4.02	1.36	0.13	0.29	1.74	2.79	0.46	0.64
	-	非磁性矿物	56.98	19.29	0.10	0.18	18.99	24.47	4.99	5.64
	-	给矿	100	33.85	0.30	0.42	100	100	26.27	23.04
-0.074	0.15	磁性矿物 1	3.42	0.54	0.65	0.97	6.17	4.95	0.91	0.86
	0.20	磁性矿物 2	11.14	1.76	2.06	3.72	63.85	61.63	9.40	10.73
	0.40	磁性矿物 3	8.44	1.33	0.20	0.69	4.69	8.61	0.69	1.50
	0.60	磁性矿物 4	11.75	1.86	0.18	0.43	5.88	7.44	0.87	1.29
	+0.043	磁性矿物 5	7.45	1.18	0.15	0.25	3.10	2.74	0.46	0.48
	1.00	磁性矿物 6	4.68	0.74	0.12	0.23	1.56	1.62	0.23	0.28
	-	非磁性矿物	53.13	8.40	0.10	0.16	14.76	13.01	2.17	2.27
	-	给矿	100	15.81	0.36	0.67	100	100	14.73	17.41
-0.043	0.15	磁性矿物 1	3.35	0.54	0.45	0.92	2.56	2.01	0.63	0.81
	0.20	磁性矿物 2	33.17	5.34	1.43	4.00	80.16	86.40	19.71	35.03
	0.40	磁性矿物 3	7.68	1.24	0.27	0.74	3.51	3.70	0.86	1.50
	0.60	磁性矿物 4	8.79	1.42	0.25	0.43	3.72	2.43	0.92	0.99
	+0.020	磁性矿物 5	7.28	1.17	0.19	0.29	2.34	1.36	0.58	0.55
	1.00	磁性矿物 6	4.36	0.70	0.15	0.22	1.11	0.62	0.27	0.25
	-	非磁性矿物	35.38	5.70	0.11	0.15	6.60	3.47	1.62	1.41
	-	给矿	100	16.11	0.59	1.54	100	100	24.59	40.55
-0.020	0.15	磁性矿物 1	0.43	0.08	0.72	0.69	0.74	0.98	0.15	0.09
	0.20	磁性矿物 2	2.35	0.44	4.33	2.81	24.22	21.91	4.96	2.04
	0.40	磁性矿物 3	4.13	0.78	0.50	0.78	4.91	10.69	1.01	1.00
	0.60	磁性矿物 4	5.36	1.01	0.25	0.38	3.19	6.82	0.65	0.64
	+0.010	磁性矿物 5	4.27	0.80	0.21	0.30	2.13	4.27	0.44	0.40
	1.00	磁性矿物 6	4.07	0.77	0.25	0.36	2.42	4.81	0.50	0.45
	-	非磁性矿物	79.40	14.97	0.33	0.19	62.38	50.53	12.78	4.71
	-	给矿	100	18.85	0.42	0.30	100	100	20.48	9.32
-0.010	0.15	磁性矿物 1	0.28	0.04	1.35	0.96	1.08	0.70	0.15	0.07
	0.20	磁性矿物 2	1.16	0.18	5.88	3.18	19.47	9.61	2.71	0.93
	0.40	磁性矿物 3	2.70	0.42	0.25	0.69	1.93	4.83	0.27	0.47
	0.60	磁性矿物 4	3.51	0.54	0.22	0.37	2.21	3.39	0.31	0.33
	0.80	磁性矿物 5	3.44	0.53	0.23	0.29	2.26	2.58	0.31	0.25
	1.00	磁性矿物 6	2.70	0.42	0.21	0.27	1.62	1.93	0.23	0.19
	-	非磁性矿物	86.20	13.26	0.29	0.34	71.42	76.97	9.95	7.45
	-	给矿	100	15.38	0.35	0.38	100	100	13.93	9.68

续表8 (Tab.8 continued)

粒级/mm	B/T	产品名称	产率/%		品位		作业回收率/%		对给矿回收率/%	
			$P_{\text{作业}}$	$P_{\text{给矿}}$	$\omega_{\text{Au}}/(\text{g/t})$	$\omega_{\text{S}}/\%$	R_{Au}	R_{S}	R'_{Au}	R'_{S}
	-	+0.074	/	33.85	0.30	0.42	/	/	26.27	23.04
	-	-0.074+0.043	/	15.81	0.36	0.67	/	/	14.73	17.41
分级	-	-0.043+0.020	/	16.11	0.59	1.54	/	/	24.59	40.55
合计	-	-0.020+0.010	/	18.85	0.42	0.30	/	/	20.48	9.32
	-	-0.010	/	15.38	0.35	0.38	/	/	13.93	9.68
	-	给矿	/	100	0.39	0.61	/	/	100	100
	0.15	磁性矿物 1	/	2.28	0.41	0.69	/	/	2.40	2.59
	0.20	磁性矿物 2	/	13.70	1.55	2.75	/	/	55.05	61.84
	0.40	磁性矿物 3	/	5.02	0.26	0.68	/	/	3.32	5.59
磁选	0.60	磁性矿物 4	/	7.63	0.18	0.35	/	/	3.61	4.32
合计	0.80	磁性矿物 5	/	5.76	0.16	0.25	/	/	2.43	2.38
	1.00	磁性矿物 6	/	3.99	0.16	0.28	/	/	1.68	1.81
	-	非磁性矿物	/	61.61	0.20	0.21	/	/	31.51	21.47
	-	给矿	/	100	0.39	0.61	/	/	100	100

综上所述,磁选可以实现尾矿中含金磁黄铁矿的有效富集,两种磁选方案均能获得金品位 1.5 g/t 左右的磁性矿物,金对给矿回收率为 55%左右,适宜的磁选强度为 0.2 T。对比两种方案,虽然分级磁选获得金品位、金对给矿回收率更高,但从尾矿综合利用角度考虑,分级磁选比全粒级磁选所需的设备较多,工艺流程也相对复杂,收率也没有提高很多。因此,建议采用全粒级磁选方案。

3.4.2 磁选介质试验

在磁选试验基础上,为了考查进一步提高磁性产物金品位的可能性,进行了磁选介质条件试验,分别选择 $\phi 1.5$ 、2、3 mm 的分选箱强磁选介质,试验采用全粒级磁选方案,两次粗选的流程结构,结果列于表 9。结果表明,随着磁选介质直径的逐步增加,磁性矿物 2 中的金品位逐步降低,综合对比各磁选介质,适宜的磁选棒介质直径为 $\phi 1.5$ mm。

表9 磁选介质的影响试验结果

Tab.9 Effect of magnetic separation medium on test results

磁选介质	产品名称	作业产率/%	$\omega_{\text{Au}}/(\text{g/t})$	$\omega_{\text{S}}/\%$	$R_{\text{Au}}/\%$	$R_{\text{S}}/\%$
$\phi 1.5$ mm	磁性矿物 1	2.08	0.45	0.71	2.40	2.42
	磁性矿物 2	13.38	1.52	2.87	52.07	62.93
	非磁性矿物	84.54	0.21	0.25	45.52	34.65
	给矿	100	0.39	0.61	100	100
$\phi 2$ mm	磁性矿物 1	2.08	0.45	0.71	2.40	2.42
	磁性矿物 2	15.35	1.35	2.64	53.14	66.45
	非磁性矿物	82.56	0.21	0.23	44.46	31.13
	给矿	100	0.39	0.61	100	100
$\phi 3$ mm	磁性矿物 1	2.08	0.45	0.71	2.40	2.42
	磁性矿物 2	15.65	1.33	2.59	53.30	66.55
	非磁性矿物	82.27	0.21	0.23	44.30	31.02
	给矿	100	0.39	0.61	100	100

3.5 综合试验指标

在上述条件试验基础上，确定的全工艺流程如

图 3 所示，试验结果见表 10。

表 10 全工艺流程综合试验指标

Tab.10 Comprehensive test indexes of the whole process

产品名称	产率/%		品位		作业回收率/%		对原矿回收率/%	
	对作业	对原矿	Au/g/t	S	Au	S	Au	S
含金磁选产品	13.38	12.93	1.52	2.87	52.07	62.93	12.27	18.56
1500 磁(A)	2.08	2.01	0.45	0.71	2.40	2.42	0.57	0.72
非磁(B)	84.54	81.73	0.21	0.25	45.52	34.65	10.73	10.22
尾矿(A+B)	86.63	83.74	0.22	0.26	47.93	37.07	11.29	10.94
给矿	100	96.67	0.39	0.61	100	100	23.56	29.50

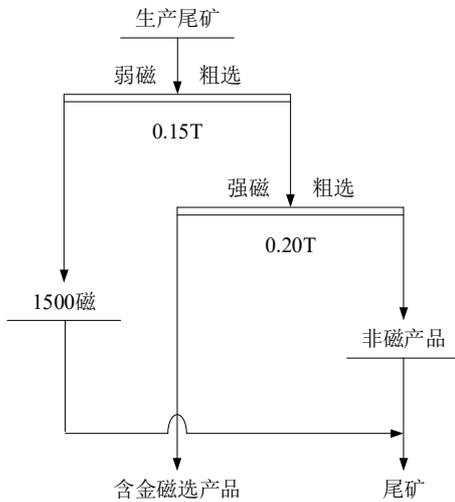


图 3 全工艺流程

Fig.3 Whole process flow

结果表明，采用全粒级磁选工艺流程，可以获得金品位 1.52 g/t，硫品位 2.87%的含金磁黄铁矿。金、硫回收率分别为 52.09%、62.93%，对原矿总回收率分别为 12.27%、18.56%，实现了该难选含金磁黄铁矿中金的高效强化回收。

4 结论

1) 矿石性质研究结果表明，山东某金矿原矿金品位 1.60 g/t，硫品位 1.86%，属含金硫铁矿，金除独立金矿物以外，主要以黄铁矿为载体，部分以磁黄铁矿为载体(矿物含量 0.96，金品位 8.25 g/t，原矿金分配率 5.25%)，生产流程未考虑以磁黄铁矿为载体的金的回收，导致尾矿金、硫品位为 0.39 g/t、0.60%，实现这部分磁黄铁矿中负载金的有效回收

是提高金回收率的重要因素。

2) 原矿强化回收磁黄铁矿试验结果表明，无论是硫酸铜还是硫酸做活化剂，浮选尾矿中的金、硫品位并未有明显降低，这也从侧面表明矿石中的磁黄铁矿属难浮磁黄铁矿，不宜采用浮选回收原矿中的含金磁黄铁矿。进一步试验表明，由于尾矿中 -0.020 mm 粒级产率高达 33%，这些微细粒矿物使含金磁黄铁矿和含金脉石矿物本就相近的比重，在摇床面上更加难以区别，金富集效果并不明显，尾矿重选同样不宜用于回收含金磁黄铁矿。

3) 尾矿强化回收磁黄铁矿试验结果表明，采用尾矿磁选流程可以实现含金磁黄铁矿的有效富集，全粒级磁选和分级磁选均能获得较为理想的选别指标，其中最优磁选条件为磁场强度 0.2 T，但考虑到尾矿综合利用，分级磁选相对来说，工艺流程复杂，所需成本较高，最终选择全粒级磁选回收尾矿中的磁黄铁矿，磁选介质采用直径为 $\phi 1.5$ mm 的磁选棒介质。

4) 在上述条件试验基础上，全工艺流程闭路试验获得了金品位 1.52 g/t，硫品位 2.87%的含金磁黄铁矿。尾矿金、硫回收率分别为 52.09%、62.93%，对原矿回收率分别为 12.27%、18.56%，实现了该矿石中以磁黄铁矿为载体的金的高效强化回收。

参考文献:

[1] 倪曦, 白海铃. 中国金矿资源特征及成矿规律概要[J]. 世界有色金属, 2021(19): 60-61.
 NI X, BAI H L. Characteristics of gold resources and metallogenic regularity in China[J]. World Nonferrous Metals, 2021(19): 60-61.

- [2] 于学峰, 宋明春, 李大鹏, 等. 山东金矿找矿突破进展与前景[J]. 地质学报, 2016, 90(10): 2847-2862.
YU X F, SONG M C, LI D P, et al. Prospecting breakthroughs and prospect of gold deposits in Shandong province[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(10): 2847-2862.
- [3] 宋波. 山东乳山金矿带金矿床成因与找矿标志分析[J]. 世界有色金属, 2019(17): 82.
SONG B. The Genesis and prospecting marks of the gold deposits in Shandong's Dashan gold belt[J]. World Nonferrous Metals, 2019(17): 82.
- [4] 王佳新, 聂凤军, 张雪旎. 全球金矿床类型划分[J]. 地质通报, 2015, 34(6): 1239-1254.
WANG J X, NIE F J, ZHANG X N. The scheme for classification of gold deposits: Mineralogy and geology[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(6): 1239-1254.
- [5] 吴凯, 米文杰, 毕凤琳, 等. 河北某石英脉型金矿石选矿试验研究[J]. 贵金属, 2022, 43(2): 58-62.
WU K, MI W J, BI F L, et al. Beneficiation study on a gold-bearing quartz vein-type gold ore from Hebei[J]. Precious Metals, 2022, 43(2): 58-62.
- [6] 邱显扬, 梁冬云, 洪秋阳, 等. 难处理金矿石的工艺矿物学及可选冶特性分析[J]. 贵金属, 2020, 41(2): 36-44.
QIU X Y, LIANG D Y, HONG Q Y, et al. Process mineralogy and process improvement analysis of a refractory gold ore[J]. Precious Metals, 2020, 41(2): 36-44.
- [7] 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.
- [8] 白丽梅, 李萌, 张茹, 等. 黄铜矿与磁黄铁矿的浮选分离研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2015(6): 71-77.
BAI L M, LI M, ZHANG R, et al. Research status of flotation separation of chalcopyrite from pyrrhotite[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2015(6): 71-77.
- [9] 孙晓妍, 周永星, 宋宝旭, 等. 山东某含金硫铁矿强化浮选回收试验研究[J]. 贵金属, 2022, 43(3): 50-55.
SUN X Y, ZHOU Y X, SONG B X, et al. Experimental study on enhanced flotation recovery of a gold-bearing pyrite in Shandong province[J]. Precious Metals, 2022, 43(3): 50-55.
- [10] 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.
- [11] 崔毅琦, 童雄, 周庆华, 等. 国内外磁黄铁矿浮选的研究概况[J]. 金属矿山, 2005(5): 24-26.
CUI Y Q, TONG X, ZHOU Q H, et al. Survey of research on pyrrhotite flotation both at home and abroad[J]. Metal Mine, 2005(5): 24-26.
- [12] 曾维能, 任浏祎, 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 (Mieral Processing Section), 2020(6): 30-35.
- [13] 陆英, 程芳琴. 超声波强化氧化磁黄铁矿浮选的机理研究[J]. 金属矿山, 2019(4): 88-92.
LU Y, CHENG F Q. Research on the mechanism of the oxidized pyrrhotite flotation improvement by ultrasonic[J]. Metal Mine, 2019(4): 88-92.
- [14] 王周和. 安徽某黄铁矿与磁黄铁矿分步回收试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(6): 64-70.
WANG Z H. The experimental research on pyrite and pyrrhotite step recovery in Anhui[J]. Nonferrous Metals (Mieral Processing Section), 2020(6): 64-70.
- [15] 付广钦, 周晓彤, 邓丽红, 等. 某含磁黄铁矿铜硫矿的磁选试验研究[J]. 材料研究与应用, 2017, 11(4): 278-282.
FU G Q, ZHOU X T, DENG L H, et al. Magnetic separation research on copper sulfur ore containing high-content of pyrrhotine[J]. Materials Research and Application, 2017, 11(4): 278-282.
- [16] 宋宝旭, 邱显扬, 胡佛明, 等. 云南某含银铜矿伴生银矿物强化回收实验研究[J]. 贵金属, 2018, 39(3): 47-50.
SONG B X, QIU X Y, HU F M, et al. Strengthening the recovery research on associated silver of a silver-bearing copper ore in Yunnan[J]. Precious Metals, 2018, 39(3): 47-50.