新疆某地区磷灰石矿浮选试验研究

李　帆[1]，郭　云[1]，王　涛[1]，杨稳权[1,2]，李　宁[1]

（1. 云南磷化集团有限公司，云南 昆明　650600；2. 国家磷资源开发利用工程技术研究中心，云南 昆明　650600）

［摘　要］根据新疆某地区磷灰石性质，采用单反浮选试验流程确定磨矿细度，调整剂、抑制剂、捕收剂用量，浮选时间等试验条件，并在所得到的试验条件基础上设计开路和闭路工艺流程。试验结果表明：在磨矿细度＜0.074 mm的颗粒占比为48.97%，粗选一调整剂碳酸钠用量为1 500 g/t、组合抑制剂水玻璃+CMC用量为800 g/t＋200 g/t、捕收剂用量为1 000 g/t、粗选时间2 min，粗选二水玻璃+CMC用量为200 g/t＋50 g/t、捕收剂用量为400 g/t、起泡剂用量为20 g/t、粗选时间为1 min的试验条件下进行两次粗选两次精选闭路试验，可获得精矿产率为14.60%、$w(P_2O_5)$为31.87%，P_2O_5回收率为96.63%的选别指标。对该法选矿成本进行估算，并与云南省选矿成本及外购成本进行比较。

［关键词］新疆；磷灰石；浮选；成本

［中图分类号］TD923　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2024）08-0021-05

Experimental study on mineral processing of apatite rock in a certain area of Xinjiang

LI Fan[1], GUO Yun[1], WANG Tao[1], YANG Wenquan[1,2], LI Ning[1]

（1. *Yunnan Phosphate Group Co., Ltd., Kunming* 650600, *China*; 2. *National Engineering and Technology Research Center for Development & Utilization of Phosphorous Resources, Kunming* 650600, *China*）

Abstract: Based on the properties of apatite rock in a certain area of Xinjiang, a single reverse flotation test process is adopted to determine the grinding fineness, dosage of adjusting agent, inhibitor, collector, flotation time and other experimental conditions. Based on the obtained experimental conditions, open circuit and closed circuit process flows are designed. The experimental results show that under the experimental conditions of grinding fineness ＜0.074 mm particle proportion of 48.97%, sodium carbonate dosage of 1 500 g/t, combination inhibitor sodium silicate+CMC dosage of 800 g/t+200 g/t, collector dosage of 1 000 g/t, coarse selection time of 2 minutes in first coarse selection process, sodium silicate+CMC dosage of 200 g/t+50 g/t, collector dosage of 400 g/t, foaming agent dosage of 20 g/t, and coarse selection time of 1 minute in second coarse selection process, two coarse selection and two closed circuit experiments can be carried out, resulting in a concentrate yield of 14.60%, $w(P_2O_5)$ of 31.87%, and a recovery rate of 96.63%. The flotation cost of this method is estimated and compared with the flotation cost in Yunnan province and procurement costs.

Key words: Xinjiang; apatite rock; flotation; cost

0　引言

全球磷矿资源分布不均匀，主要集中在摩洛哥、中国、埃及等国家，其中摩洛哥储量为500亿t（占比约为70%），我国磷矿储量居全球第二，储量为36.9亿t（占比为5%）[1]。根据磷矿石中所含脉石矿物的种类与含量而划分为硅质、钙质和硅钙质磷矿石，其中硅钙质磷矿占我国磷矿总储量的85%以上[2-4]。

我国新疆地区拥有丰富的磷灰石资源，但大部分为低品位矿石，需要进行有效的选矿处理才能实现经济价值最大化。浮选是一种常用的选矿方法[5-6]，我国选矿学者从选矿工艺、选矿试剂等方面做了大量硅质磷矿石浮选研究工作[7-11]。

本研究对新疆尉犁县某地区硅钙质磷灰石进行浮选工艺条件的试验，在此基础上开展开路和闭路工艺路线的试验研究，对比两种生产工艺路线所得到的指标，从而为后续的生产工艺选择提供参考。

1　试验样品采集

试验样品为新疆尉犁县某地区磷灰石，为墨绿色块矿和粉矿的混合样，共计2 000 kg左右。

1.1　试验样品制备

由于该样品由块样和粉样混合组成，因此样品预先筛分出粒径＜2 mm粉样，筛上块样经颚式破碎产品机、对辊破碎机破碎至粒径＜2 mm，与预

［收稿日期］2024-01-26

［作者简介］李　帆（1988-），男，云南开远人，选矿工程师，主要从事选矿技术研究。E-mail：46703036@qq.com

先筛分出的粉样混合均匀后缩分取样、化验分析。

1.2　原矿的化学多项分析

通过对原矿进行化学分析，查明矿石中所含主要化学成分的种类及含量，分析结果见表 1。

表 1　原矿化学分析结果

Table 1　Results of chemical analysis of raw ore　%

$w(P_2O_5)$	$w(SiO_2)$	$w(CaO)$	$w(Al_2O_3)$	$w(Fe_2O_3)$	$w(Na_2O)$
4.77	41.32	21.33	4.43	7.06	0.7
$w(K_2O)$	$w(TiO_2)$	$w(MnO)$	$w(V_2O_5)$	$w(MgO)$	
1.64	0.94	0.084	0.017	14.54	

1.3　主要矿物组成成分、粒度分布特征

为了研究矿石中主要矿物的粒度分布特征，对磨矿细度 < 0.075 mm 的颗粒占比为 53.74%的样品进行了 MLA（矿物解离度分析）分析。矿物主要成分分析结果见表 2，粒度分析结果见表 3，单体解离度分析结果见表 4。

从表 2 分析结果可以看出，样品中磷灰石含量较高，是主要有用矿物。脉石矿物以透辉石和黑云母为主，其他含量较低。

表 2　矿石中主要矿物的质量分数

Table 2　Mass fraction of the main minerals in the ore　%

w(磷灰石)	w(透辉石)	w(黑云母)	w(榍石)	w(方解石)	w(钠长石)	w(石膏)	w(重晶石)	w(磁铁矿)	w(石榴子石)	w(氟碳铈矿)
11.77	63.99	20.6	0.59	0.92	0.15	0.17	0.15	0.07	0.4	0.02
w(石英)	w(钾长石)	w(高岭石)	w(蛇纹石)	w(钛铁矿)	w(白云石)	w(绿泥石)	w(金红石)	w(斜长石)	w(其他)	
0.14	0.35	0.04	0.06	0.03	0.01	0.13	0.01	0.14	0.26	

表 3　主要矿物粒度分布特征

Table 3　Characteristics of particle size distribution of main minerals

粒度/mm	w(黑云母)/%	w(透辉石)/%	w(磷灰石)/%
1.000 ~ 2.000	2.63	4.14	0
0.500 ~ <1.000	9.48	25.41	3.35
0.300 ~ <0.500	17.24	29.18	11.62
0.150 ~ <0.300	29.25	23.79	34.58
0.075 ~ <0.150	23.85	12.06	34.64
0.038 ~ <0.075	9.78	3.54	10.84
0.020 ~ <0.038	4.59	1.25	3.25
0.010 ~ <0.020	2.41	0.50	1.21
<0.010	0.77	0.13	0.51

表 4　主要矿物单体解离度

Table 4　Dissociation degree of main mineral monomer

矿物名称	<30%连体	30%~60%连体	60%~90%连体	单体
黑云母	4.91	3.79	5.99	85.31
透辉石	0.53	2.06	9.84	87.57
磷灰石	11.27	6.49	8.10	74.15

从表 3、表 4 矿物分析结果可以看出，磷灰石、黑云母和透辉石粒度极粗，且多已经单体解离；未解离的黑云母和透辉石以富连体为主，未解离的磷灰石以贫连体为主，有利于其选矿富集。

2　试验条件探索

按照单一变量的试验方法分别对磨矿细度、调整剂用量、抑制剂组合用量、捕收剂用量和浮选时间等试验条件进行了研究，确定了最佳浮选条件。

2.1　磨矿细度试验

浮选工艺流程见图 1。磨矿细度决定了有用矿物的单体解离度，对选别指标影响较大。在 Na_2CO_3 用量 1 500 g/t、水玻璃用量 800 g/t、CMC 用量 200 g/t、PA–2 捕收剂用量 1 000 g/t 条件下考察磨矿细度对浮选效果的影响，试验结果列于表 5。

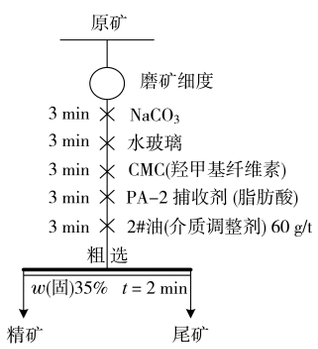

图 1　浮选试验工艺流程

Fig.1　Process flow of flotation test

表 5　磨矿细度试验结果

Table 5　Results of grmding fineness test

粒径 < 0.074 mm 的颗粒占比/%	产品	产率/%	w(P2O5)/%	P2O5回收率/%
26.03	精矿	12.01	14.45	37.06
	尾矿	87.99	3.35	62.94
	原矿	100.00	4.68	100
33.00	精矿	18.47	16.41	64.68
	尾矿	81.53	2.03	35.32
	原矿	100.00	4.69	100
36.8	精矿	22.39	14.85	70.88
	尾矿	77.61	1.76	29.12
	原矿	100.00	4.69	100
48.97	精矿	19.54	22.69	95.33
	尾矿	80.46	0.27	4.67
	原矿	100.00	4.65	100
56.87	精矿	24.26	16.53	86.03
	尾矿	75.74	0.86	13.97
	原矿	100.00	4.66	100

从表 5 的结果可以看出，综合考虑工艺矿物学的分析，选择磨矿细度为 < 0.074 mm 的颗粒占 48.97%进行后续试验。

2.2　调整剂碳酸钠用量试验

捕收剂 PA–2（脂肪酸）一般在弱碱性条件下使用，因此需要用碳酸钠作为调整剂，在磨矿细度 < 0.074 mm 的颗粒占 48.97%、水玻璃用量 800 g/t、CMC 用量 200 g/t、PA–2 用量 1 000 g/t 条件下进行碳酸钠用量试验，试验结果见表 6。

表 6　碳酸钠用量试验结果

Table 6　Test results of sodium carbonate dosage

碳酸钠用量/(g·t^{-1})	对应 pH	产品	产率/%	$w(P_2O_5)$/%	P_2O_5回收率/%
500	7.5	精矿	17.44	7.01	27.12
		尾矿	82.56	3.98	72.88
		原矿	100.00	4.51	100.00
1 000	8.0	精矿	14.49	8.93	29.36
		尾矿	85.51	3.64	70.64
		原矿	100.00	4.41	100.00
1 500	8.5	精矿	19.54	22.69	95.33
		尾矿	80.46	0.27	4.67
		原矿	100.00	4.65	100.00
2 000	9.0	精矿	19.48	14.54	61.10
		尾矿	80.52	2.24	38.90
		原矿	100.00	4.64	100.00

从表 6 的结果可以看出，当 pH 为 8.5 左右时，即 $NaCO_3$用量为 1 500 g/t 时浮选指标较好，确定调整剂碳酸钠用量为 1 500 g/t 进行后续试验。

2.3　抑制剂用量试验

根据原矿性质分析结果，探索试验结果及查阅相关文献，确定采用水玻璃+CMC 组合作为抑制剂，在磨矿细度 < 0.074 mm 的颗粒占比 48.97%、碳酸钠用量 1 500 g/t、PA–2 捕收剂用量 1 000 g/t 条件下进行抑制剂用量试验，结果见表 7。

表 7　组合抑制剂用量试验结果

Table 7　Test results of combination nihibitor dosage

组合抑制剂用量/(g·t^{-1})		产品	产率/%	$w(P_2O_5)$/%	P_2O_5回收率/%
水玻璃	CMC				
0	0	精矿	52.18	5.26	57.30
		尾矿	47.82	4.28	42.70
		原矿	100.00	4.79	100.00
200	50	精矿	43.92	5.42	50.43
		尾矿	56.08	4.18	49.57
		原矿	100.00	4.72	100.00
400	100	精矿	34.70	12.66	97.82
		尾矿	65.30	0.15	2.18
		原矿	100.00	4.49	100.00
800	200	精矿	19.54	22.69	95.33
		尾矿	80.46	0.27	4.67
		原矿	100.00	4.65	100.00

从表 7 结果可见，确定组合抑制剂水玻璃用量 800 g/t、CMC 用量 200 g/t 条件下进行后续试验。

2.4　捕收剂用量试验

PA–2 是中蓝连海设计研究院研制的磷灰石高效捕收剂，并具有较好的起泡性，故本研究未进行起泡剂用量试验，根据试验现象适当添加一定量的起泡剂，在磨矿细度 < 0.074 mm 的颗粒占比 48.97%、碳酸钠用量 1 500 g/t、水玻璃用量 800 g/t、CMC 用量 200 g/t 条件下，捕收剂用量试验结果见表 8。

表 8　捕收剂用量试验结果

Table 8　Test results of collector dosage

捕收剂用量/(g·t^{-1})	产品	产率/%	$w(P_2O_5)$/%	P_2O_5回收率/%
500	精矿	17.98	23.73	89.97
	尾矿	82.02	0.58	10.03
	原矿	100.00	4.74	100.00
1 000	精矿	19.54	22.69	95.33
	尾矿	80.46	0.27	4.67
	原矿	100.00	4.65	100.00
1 500	精矿	27.14	16.99	96.87
	尾矿	72.86	0.20	3.13
	原矿	100.00	4.76	100.00
2 000	精矿	30.32	14.67	96.48
	尾矿	69.68	0.23	3.52
	原矿	100.00	4.61	100.00
2 500	精矿	32.74	13.59	96.31
	尾矿	67.26	0.26	3.69
	原矿	100.00	4.62	100.00

从表 8 试验结果，可以看出，当捕收剂用量为 1 000 g/t 时浮选指标较好。因此，确定捕收剂用量为 1 000 g/t 进行后续试验。

2.5　浮选时间试验

浮选时间试验结果见表 9，试验流程如图 2 所示。

表 9　浮选时间试验结果

Table 9　Test results of flotation time

浮选时间/min	产品	产率/%	累计产率/%	$w(P_2O_5)$/%	P_2O_5累计品位/%	P_2O_5回收率/%	P_2O_5累计回收率/%
0~1	精矿	20.32	20.32	21.08	21.08	91.92	91.92
1~2	精矿	2.92	23.24	2.42	18.74	1.52	93.44
2~3	精矿	2.82	26.06	3.80	17.12	2.30	95.74
3~4	精矿	1.28	27.34	0.81	16.35	0.22	95.96
	尾矿	72.66		0.26	4.66	4.04	
	原矿	100.00		4.66		100.00	

分析表 9 可知，3 ~ 4 min 精矿的品位和回收率均较低，故确定粗选一时间为 2 min，粗选二时间为 1 min，水玻璃+CMC 为 200 g/t+50 g/t，捕收剂用

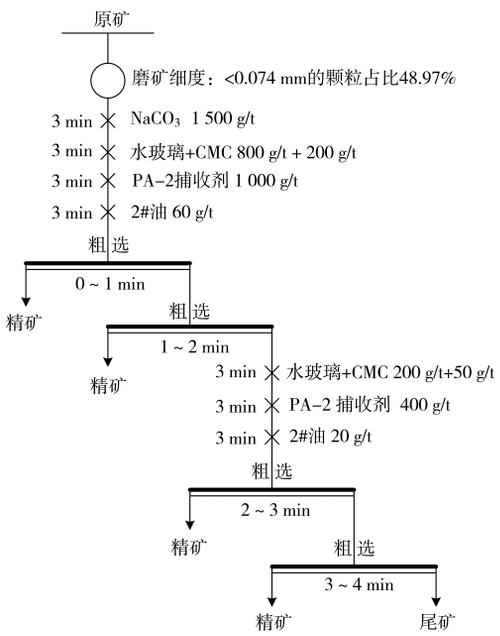

图 2　浮选时间试验流程

Fig.2　Test flow of flotation

量为 400 g/t，起泡剂用量为 20 g/t。

2.6　浮选条件试验小结

通过浮选试验确定试验条件为：磨矿细度为 <0.074 mm 的颗粒占比 48.97%，调整剂碳酸钠用量为 1 500 g/t，组合抑制剂水玻璃+CMC 用量为 800 g/t+200 g/t，捕收剂 PA-2 用量为 1 000 g/t，起泡剂用量为 60 g/t，粗选一时间为 2 min，粗选二时间为 1 min，水玻璃+CMC 为 200 g/t+50 g/t，捕收剂用量为 400 g/t，起泡剂用量为 20 g/t。

3　浮选流程试验

3.1　全流程开路试验

在确定的粗选一及粗选二的试验条件，基础上适当调整，进行磨矿-浮选全流程开路试验，试验结果见表 10，试验流程如图 3 所示。

表 10　磨矿-浮选全流程开路试验结果

Table 10　Test results of open-circuit of grinding and flotation process

产品	产率/%	$w(P_2O_5)$/%	P_2O_5回收率/%
精矿	13.36	32.66	89.55
中矿 1	11.34	1.02	2.37
中矿 2	3.98	2.72	2.22
尾矿	71.32	0.40	5.85
原矿	100.00	4.87	100.00

从表 10 中可以看出，根据上述单一变量试验所得到的试验条件，并按照如图 3 所示的工艺流程进行浮选可得到 $w(P_2O_5)$ 32.66%的磷精矿，P_2O_5回收率达到 89.55%。

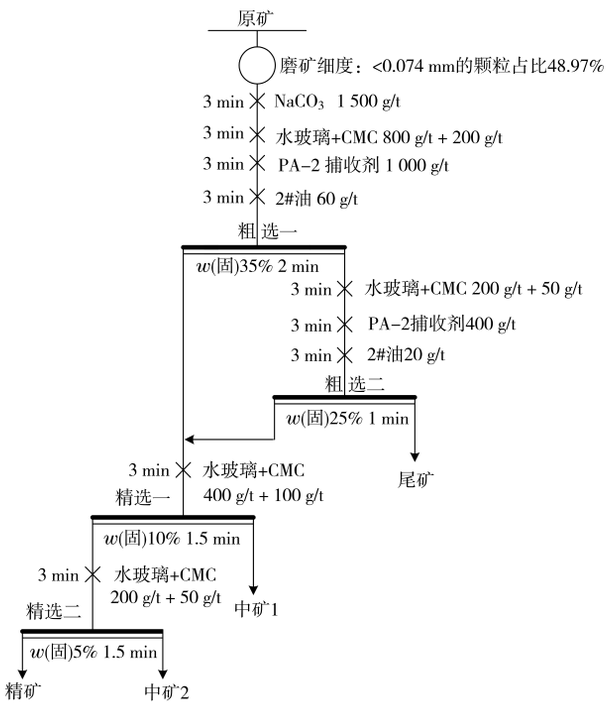

图 3　磨矿-浮选全流程开路试验

Fig.3　Open-circuit test of grinding and flotation process

3.2　全流程闭路试验

在全流程开路试验的基础上进行了闭路试验。闭路试验中矿返回的原则一般为中矿返回至与其品位、细度相似的作业段，综合考虑，本研究的闭路流程采用两次粗选两次精选，中矿 1 和中矿 2 合并后返回至二次粗选。试验结果列于表 11。

表 11　磨矿-浮选闭路试验结果

Table 11　Test results of closed circuit of grinding and flotation

产品	产率/%	$w(P_2O_5)$/%	P_2O_5回收率/%	$w(MgO)$/%
精矿	14.60	31.87	96.63	0.99
尾矿	85.40	0.19	3.37	0
原矿	100.00	4.82	100.00	14.52

从表 11 中可以看出，经过闭路流程可得到 $w(P_2O_5)$ 31.87%的磷精矿，P_2O_5回收率达到 96.63%，闭路流程虽然降低了磷精矿品位，但 P_2O_5回收率相比开路流程更高。

3.3　选矿药剂成本计算

根据闭路试验所用到的浮选试剂及其用量，结合各类试剂市场价格和产率对原矿试剂成本和精矿试剂成本进行测算，该试验浮选试剂成本情况如表 12 所示。

目前，新疆从省外采购的高品位磷矿石成本较高（$w(P_2O_5)$ 磷矿成本 1 500 元/t），主要指矿石采

表12　浮选试剂成本情况

Table 12　Cost situation of flotation reagent

项目	用量/(kg·t)	价格/(元·t)	成本/(元·原矿)	成本/(元·精矿)
Na_2CO_3	1.5	3 500	5.25	36.21
Na_2SiO_3	1.6	1 000	1.6	11.03
CMC	0.4	18 000	7.2	49.66
2#油	0.08	6 000	0.48	3.31
PA-2	1.5	8 000	12	82.76
合计			26.53	182.97

购费用和运输费用，而在新疆本省就地取材，利用低品位磷灰石进行浮选（$w(P_2O_5)$ 32%磷矿浮选成本350元/t），虽然相比其他省的浮选成本（云南省$w(P_2O_5)$ 32%磷矿浮选成本350元/t）相对较高，但相比于从外省采购，其成本费用较低。

4　结论

（1）该磷矿原矿分析结果表明矿石中主要有用矿物为磷灰石，质量分数为11.77%，原矿$w(P_2O_5)$为4.77%。主要脉石矿物透辉石和黑云母质量分数分别为63.99%和20.60%；同时，工艺矿物学研究表明，矿石中磷灰石粒度粗，易解离，有利于其选矿富集。

（2）“磨矿-浮选”流程开路试验在试验条件为：磨矿细度为<0.074 mm的颗粒占比48.97%，调整剂碳酸钠用量为1 500 g/t，组合抑制剂水玻璃+CMC用量为800 g/t+200 g/t，捕收剂PA-2用量为1 000 g/t，起泡剂用量为60 g/t，粗选一时间为2 min，粗选二时间为1 min，水玻璃+CMC为200 g/t+50 g/t，捕收剂用量为400 g/t，起泡剂用量为20 g/t的情况下，可获得产率为13.36%、$w(P_2O_5)$为32.66%、P_2O_5回收率为89.55%的精矿产品。

（3）“磨矿-浮选”流程闭路试验在试验条件为：磨矿细度为<0.074 mm占48.97%，调整剂碳酸钠用量为1 500 g/t，组合抑制剂水玻璃+CMC用量为800 g/t+200 g/t，捕收剂PA-2用量为1 000 g/t，起泡剂用量为60 g/t，粗选一时间为2 min，粗选二时间为1 min，水玻璃+CMC为200 g/t+50 g/t，捕收剂用量为400 g/t，起泡剂用量为20 g/t的情况下，可获得产率为14.60%，$w(P_2O_5)$为31.87%，P_2O_5回收率为96.63%的精矿产品。

综上所述，根据企业生产需要，在精矿品质满足$w(P_2O_5)$ ≥30.0%的情况下，“磨矿-浮选”流程闭路试验相比开路试验能够回收更多的磷精矿。

[参考文献]

[1] 胡敏.我国磷矿产业现状与发展趋势[J].磷肥与复肥,2023,38(11):1-5.
HU M. Current status and development trends of phosphate rock industry in China[J]. Phosphate & Compound Fertilizers,2023,38(11):1-5.

[2] 王建国,周丽君,李宏建.湖北某磷矿选矿实验研究[J].矿产综合利用,2023(5):160-165.
WANG J G,ZHOU L J,LI H J. Research on beneficiation of a phosphate ore in Hubei province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources 2023(5):160-165.

[3] 王涛,付磊,李宁.某硅钙质胶磷矿正反浮选试验[J].矿产综合利用,2020(2):91-95.
WANG T, FU L, LI N. Study on direct-reverse flotation of a silica calcinate phosphate ore [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2020(2):91-95.

[4] 马一嘉,武俊杰,倪天阳.我国磷矿资源的开发利用现状及进展[J].矿冶,2018,27(2):53-56.
MA Y J,WU J J,NI T Y. Current situation and development of the exploitation and utilization of phosphate ore resources in China[J]. Mining and Metallurgy,2018,27(2):53-56.

[5] 杜令攀,陈赐云,钟晋,等.浅析磷矿选矿技术进展与问题对策[J].化工矿物与加工,2016,45(1):57-61.
DU L P, CHEN C Y, ZHONG J, et al. Brief analysis of phosphate beneficiation progress and problem countermeasures [J]. Industrial Minerals & Processing,2016,45(1):57-61.

[6] 陈启如,曾茂青,李向益,等.高镁低硅型中低品位胶磷矿反浮选工业试验[J].矿产综合利用,2015(2):26-28.
CHEN Q R,ZENG M Q,LI X Y,et al. The industrial test of reverse flotation of mid-low grade collophanife ore with high content of magnestium and low silicon [J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources,2015(2):26-28.

[7] 汤家焰,张静茹,王志芳,等.OP表面活性剂在磷矿浮选脱硅中的增效作用[J].中国矿业,2021,30(1):121-126.
TANG J Y,ZHANG J R,WANG Z F,et al. Synergistic effect of OP surfactants on phosphate ore flotation desilication[J]. China Mining Magazine,2021,30(1):121-126.

[8] 李耀基,周琼波,赵凤婷,等.表面活性剂在硅质及硅酸盐型胶磷矿浮选中的应用研究[J].化工矿物与加工,2016,45(7):1-2.
Li Y J,ZHOU Q B,ZHAO F T,et al. Research on application of surfactants in flotation of siliceous and silicate collophanite[J]. Industrial Minerals and Processing,2016(7):1-3.

[9] 赵凤婷,张路莉,张华,等.化学法脱除某胶磷矿中硅质脉石矿物的研究[J].磷肥与复肥,2020,35(6):26-27.
ZHAO F T,ZHANG L L,ZHANG H,et al. Study on removal of siliceous gangue minerals from collophane by chemical method [J]. Phosphate & Compound Fertilizer,2020,35(6):26-27.

[10] 高尚,刘志红,张覃.氧化硫硫杆菌对中品位磷矿浸出试验研究[J].矿业研究与开发,2019,39(3):109-112.
GAO S, LIU Z H, ZHANG Q. Study on leaching of a medium-grade phosphate rock by thiobacillus thiooxidans [J]. Mining Research and Development,2019,39(3):109-112.

[11] 刘丽芬,罗廉明,赵凤婷,等.高硅低品位磷矿选矿试验研究[J].化工矿物与加工,2009,38(10):1-3.
LIU,L F,Luo L M,ZHAO F T,et al. Study of beneficiation test on high silicon and low grade phosphate ores [J]. Industrial Minerals & Processing,2009(10):1-3.