云南某风化胶磷矿选矿工艺研究

李向益[1,2]，李海兵[3]，李江丽[3]，杜令攀[3]，郭永杰[3]，陈赐云[3]，徐　帅[3]

（1. 自然资源部三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室，云南 昆明　650051；2. 云南省三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室（筹），云南 昆明　650051；3. 云南磷化集团有限公司，云南 昆明　650113）

［**摘　要**］针对云南某风化胶磷矿泥含量高导致浮选泡沫发黏、精矿沉降困难的问题，开展了脱泥预处理–正浮选工艺实验研究。通过粒度筛析明确≤0.030 8 mm粒级具有低P_2O_5、高倍半氧化物特征，采用筛分法脱除该粒级矿泥后，进行一粗一扫正浮选实验。结果表明：脱泥后入选原矿品位$w(P_2O_5)$由22.67%提升至23.91%，w(倍半氧化物）降低0.5百分点；在磨矿细度≤0.074 mm的颗粒占比70%条件下，获得的精矿$w(P_2O_5)$ 28.21%，达到下游湿法磷酸要求，较未脱泥直接浮选精矿，$w(Fe_2O_3)$降低0.33百分点、$w(Al_2O_3)$降低0.51百分点；沉降实验显示，脱泥精矿沉降速度达44.34 m/h，较现场反浮选脱镁精矿提升1.68倍，有效解决了精矿浓密难题。该工艺可实现风化胶磷矿高效富集与后续加工性能优化，为同类资源利用提供了技术参考。

［**关键词**］风化胶磷矿；脱泥预处理；正浮选；倍半氧化物；沉降性能

［**中图分类号**］TD971　　［**文献标志码**］A　　［**文章编号**］2097–4566（2026）07–0028–05

Study on flotation process of a weathered collophanite in Yunnan province

LI Xiangyi[1,2], LI Haibing[3], LI Jiangli[3], DU Lingpan[3], GUO Yongjie[3], CHEN Ciyun[3], XU Shuai[3]

(1. *Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization*, *MNR*, *Kunming* 650051, *China*;
2. *Yunnan Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization*, *Kunming* 650051, *China*;
3. *Yunnan Phosphate Group Co.*, *Ltd.*, *Kunming* 650113, *China*)

Abstract: In view of the problem that the high mud content of a weathered collophanite in Yunnan causes the flotation foam to become sticky and the concentrate to settle difficultly, an experimental study on the desliming pretreatment-positive flotation process is carried out. Through particle size screening analysis, the ≤0.030 8 mm particle size has the characteristics of low P_2O_5 and high magnification semioxides. After removing the slurry of this particle size using screening method, a comparative experiment is conducted using a one coarse sweep positive flotation process. The results show that after desliming, the P_2O_5 grade of the selected raw ore is increased from 22.67% to 23.91%, and the total amount of sesquioxides is decreased by 0.5 percentage points; Under the condition of grinding fineness of ≤0.074 mm accounting for 70%, the obtained concentrate has a $w(P_2O_5)$ of 28.21% , meeting downstream requirements. Compared with the untreated flotation concentrate, the Fe_2O_3 content is reduced by 0.33 percentage points and the Al_2O_3 content is reduced by 0.51 percentage points; The settling test show that the settling speed of the desliming concentrate reaches 44.34 m/h, which is 1.68 times higher than the on-site reverse flotation magnesium concentrate, effectively solving the problem of concentrate thickening. This process can achieve efficient enrichment and subsequent processing performance optimization of weathered collophanite, providing technical reference for the utilization of similar resources.

Key words: weathered collophanite; desliming pretreatment; direct flotation; sesquioxide; settlement performance

0　引言

云南是我国磷矿资源大省，探明磷矿资源总量超过全国的1/5[1]，其中风化磷矿占其总储量的20%～30%[2]，主要分布在滇池周边。风化胶磷矿

收稿日期：2024–12–26；　**修回日期**：2026–01–02

作者简介：李向益（1987—　），男，云南宣威人，高级工程师，主要从事选矿及矿产综合利用研究。

通信作者：李海兵（1986—　），男，湖北荆州人，高级工程师，主要从事磷矿选矿技术的研究与开发。

基金项目：自然资源部三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室和云南省三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室（筹）开放课题（SJ-SYS2024–02）

磷块岩矿床，多为顺向坡地形，有利于地表水体的垂直渗透及地下水体运移。在风化及水体渗溶的作用下，碳酸盐类矿物被溶解而流失，留下难溶的磷酸盐、硅质及泥质物，矿石中的磷便相对有所富集。风化胶磷矿石相对原生磷矿石化学组分发生了变化，其中P_2O_5、Al_2O_3、Fe_2O_3等成分富集，MgO、CO_2等含量相对有所下降，CaO的含量变化较小[3]。此外由于风化淋漓及后期充填作用，使风化型磷矿石大多含有一定量的泥质物（黏土矿物）[4]。风化后的磷块岩孔隙增加、结构松散，利于破磨；但样品中较多的鲕（假鲕）状结构（碳氟磷灰石风化后中心被溶蚀成皮壳状），增加了碳氟磷灰石的解离难度[5-6]，在选矿加工过程中存在药剂消耗量增大、选矿回收率降低、精矿沉降困难，以及后序湿法磷酸生产起泡严重等问题，影响了风化矿的有效加工利用。因此，对风化型磷矿石的选矿富集重点是实现磷矿物和硅质物的浮选分离，同时排除矿泥对浮选的干扰[7]。

已有初步研究结果显示，脱泥后再进行选矿加工的方案有望解决此问题。钟晋等[8]在原矿品位$w(P_2O_5)$为24.66%、磨矿细度为≤0.074 mm占比75%的条件下，采用标准筛预先脱除粒径≤30.8 μm的矿泥再进行一粗一扫反浮选工艺，获得了精矿$w(P_2O_5)$为31.97%、尾矿$w(P_2O_5)$为6.80%的选矿指标。陈赐云等[9]在原矿品位$w(P_2O_5)$为24.74%、磨矿细度为≤0.074 mm占比90%的条件下，采用水力旋流器脱除粒径≤10 μm矿泥后进行单一正浮选工艺，获得了精矿$w(P_2O_5)$为29.86%、回收率为95.32%的选矿指标。程仁举等[10]在原矿$w(P_2O_5)$为19.86%、磨矿细度为≤0.074 mm质量分数92.3%的条件下，采用一粗一精一扫中矿再选正浮选和一粗一精反浮选（未脱泥）工艺，获得了精矿$w(P_2O_5)$为30.73%、回收率为78.76%的选矿指标。李海兵等[11]在原矿$w(P_2O_5)$为22.46%、磨矿细度为粒径≤0.074 mm占比82.83%的条件下，采用旋流粒度分析仪脱除≤8.3 μm矿泥再进行正浮选工艺，获得了精矿$w(P_2O_5)$为29.42%、精矿产率为60.45%、回收率为79.39%的选矿指标。目前，风化胶磷矿的选矿技术还不成熟，产业化生产的目标仍未实现，对该工艺的深入研究将有助于进一步提高风化胶磷矿的选矿指标，解决精矿沉降、下游湿法磷酸生产起泡严重等问题。

本研究的基本思路是浮选前对原矿进行脱泥预处理，以脱除倍半氧化物含量高、P_2O_5含量相对较低的粒级；再进行浮选实验及精矿沉降对比实验，考察风化胶磷矿浮选前脱泥预处理工艺对解决风化胶磷矿浮选泡沫发黏、精矿倍半氧化物含量高且沉降困难的实用性意义，为风化胶磷矿的利用提供新思路。

1　实验部分

1.1　实验原料

实验矿样取自云南某矿产堆存的低镁风化胶磷矿，每隔10 m左右取20 kg矿样，共取5个，然后从5个矿样中分别取10 kg作实验用样。经工艺矿相研究，原料中各矿物含量见表1。

表1　风化矿中各矿物的含量

Table 1　Content of each mineral in the weathered ore

矿物	体积密度/(g·cm^{-3})	质量分数/%
胶磷矿	2.95	57.95
碳酸盐矿物	2.70	1.48
石英质矿物	2.65	30.59
黏土类、长石类矿物	2.60	5.28
铁碳质矿物	4.00	4.70

由表1可知，原料中磷矿石矿物主要为胶磷矿，脉石矿物主要为石英、玉髓、云母和黏土，其次为少量的白云石和褐铁矿。在原矿石中胶磷矿占57.95%，碳酸盐矿物占1.48%，石英质矿物占30.59%，黏土、长石类矿物占5.28%，铁碳质矿物占4.70%。

原矿多元素分析结果见表2。

表2　原矿多元素分析结果

Table 2　Multi-element analysis results of raw ore

矿样名称	$w(P_2O_5)$/%	$w(Fe_2O_3)$/%	$w(Al_2O_3)$/%	$w(SiO_2)$/%	$w(MgO)$/%	$w(CaO)$/%
1#	22.30	1.72	2.14	36.50	0.16	30.90
2#	23.57	1.39	1.24	34.15	0.32	32.50
3#	22.99	2.84	2.55	34.83	0.24	31.48
4#	23.06	1.76	1.73	34.71	0.30	31.97
5#	22.74	1.94	2.29	35.31	0.18	31.25
综合样	22.85	1.61	1.68	35.47	0.13	31.54

从表2原矿多元素分析结果可以看出，该矿石$w(P_2O_5)$为22.85%，$w(SiO_2)$为35.47%，$w(MgO)$为0.13%，属于低镁高硅的中低品位风化矿。倍半氧化物（R_2O_3）质量分数为3.29%，$w(CaO)/w(P_2O_5)$为1.38，根据DZ/T 0209—2002《磷矿地质勘查规范》标准，该矿样属于高风化型硅质及硅酸盐型磷块岩矿石，需通过脱除大部分硅质及硅酸盐矿物富集磷矿物。

1.2　实验药剂

捕收剂，工业用正浮选捕收剂，原液配成质量分数 5%使用；抑制剂，工业水玻璃，其模数为 3.2，原液配成质量分数 5%使用；调整剂，工业纯碱，配成质量分数 10%的溶液，用于调节浮选环境的 pH。

2　结果与讨论

2.1　常规正浮选实验

实验将原矿破碎到粒径≤1 mm，不经过脱泥处理，磨矿后直接进入浮选作业，工艺流程见图 1，磨矿细度实验结果见图 2。

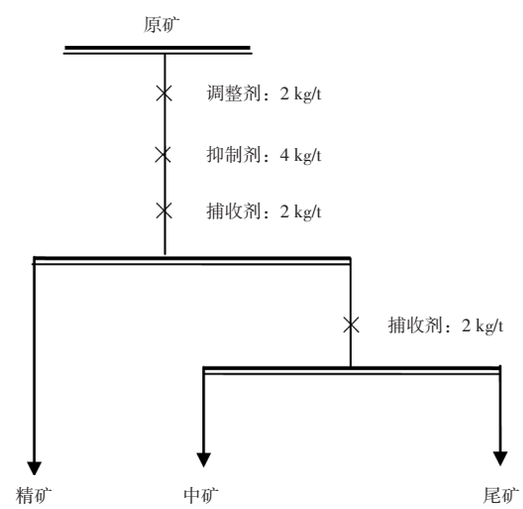


图 1　不脱泥原矿直接正浮选工艺流程

Fig. 1　Direct flotation process of raw ore without desliming

由图 2 中可知，随着磨矿细度的增加，精矿中 $w(P_2O_5)$ 逐渐升高，但 P_2O_5 回收率却呈先升高后降低的趋势，在磨矿细度为≤0.074 mm 占比 59.23%时达到峰值，此时精矿 $w(P_2O_5)$ 为 28.35%，P_2O_5 回收率为 85.27%。因此，在磨矿细度为≤0.074 mm 占比 59.23%的条件下开展一粗一扫正浮选实验，其工艺流程和药剂制度如图 1 所示，实验结果见表 3。

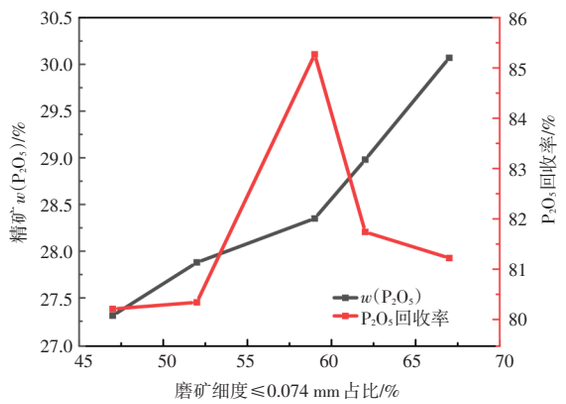


图 2　不脱泥原矿磨矿细度实验结果

Fig. 2　Results of fineness test of non-desliming raw ore grinding

表 3　不脱泥直接正浮选的实验结果

Table 3　Test results of direct flotation without desliming

项目	产率/%	$w(P_2O_5)$/%	$w(SiO_2)$/%	$w(Fe_2O_3)$/%	$w(Al_2O_3)$/%	P_2O_5回收率/%
精矿	68.67	28.35	23.25	1.31	1.48	85.27
中矿	14.46	14.07	54.59	2.37	2.52	8.91
尾矿	16.87	7.88	69.92	2.24	3.07	5.82
合计	100.00	22.83	35.65	1.62	1.90	100.00

由表 3 数据可以看出，未经脱泥的原矿，在较粗粒度条件下，通过一粗一扫正浮选工艺流程虽可以获得 $w(P_2O_5)$ 为 28.35%的合格磷精矿，但浮选精矿中 $w(Fe_2O_3)$ 为 1.31%，$w(Al_2O_3)$ 为 1.48%，含量较高，后续浓密作业难以进行，并且浮选过程中泡沫发黏、难消。

2.2　脱泥后正浮选实验

2.2.1　脱泥实验

由于本次实验矿样为高度风化的中低品位胶磷矿，原矿中的泥含量较大，矿泥必将成为影响分选指标的关键因素。因此，浮选作业前拟通过粒度筛析分析各元素的粒度分布情况（见表 4），再筛除相对应的粒级，达到脱泥的效果。

由表 4 可以看出，≤0.030 8 mm 粒级 $w(P_2O_5)$ 为

表 4　原料粒度筛析结果

Table 4　Sieve analysis results of raw material size

粒度/mm	产率/%	正累积/%	负累积/%	$w(P_2O_5)$/%	$w(Fe_2O_3)$/%	$w(Al_2O_3)$/%	$w(SiO_2)$/%
> 2.5	26.29	26.29	100.00	25.34	1.29	1.87	31.34
> 1.0 ~ 2.5	9.71	36.01	73.71	25.01	1.65	2.47	30.79
> 0.15 ~ 1.0	25.41	61.42	63.99	22.16	1.29	1.68	39.11
> 0.074 ~ 0.15	15.38	76.80	38.58	23.51	1.00	1.25	37.04
> 0.045 ~ 0.074	2.97	79.77	23.20	27.35	1.36	1.76	26.60
> 0.038 ~ 0.045	2.17	81.93	20.23	26.37	1.42	1.95	28.72
> 0.030 8 ~ 0.038	1.24	83.18	18.07	24.22	1.62	2.28	31.99
≤0.030 8	16.82	100.00	16.82	16.58	3.52	6.01	37.23

16.58%，低于其他粒级的P_2O_5品位；而$w(Al_2O_3)$为6.01%，$w(Fe_2O_3)$为3.52%，$w(SiO_2)$为37.23%，均高于其他粒级。因此，考虑提前抛弃此粒级作为尾矿处理，减少其对后续浮选作业的干扰。

通过筛分脱除≤0.030 8 mm的粒级，获得脱泥后的原矿，并对脱泥后的原矿与矿泥进行多元素分析，随后与未脱泥原矿的多元素分析结果相比较（见表5），以考察脱泥流程的可行性。

表5　未脱泥原矿与脱泥后原矿、矿泥的多元素分析结果

Table 5　Multi-element analysis results of ore without desliming and desliming ore and slime

项目	产率/%	$w(P_2O_5)$/%	P_2O_5回收率/%	$w(MgO)$/%	MgO回收率/%	$w(SiO_2)$/%	SiO_2回收率/%	$w(Fe_2O_3)$/%	Fe_2O_3回收率/%	$w(Al_2O_3)$/%	Al_2O_3回收率/%
未脱泥原矿	100.00	22.67	100.00	0.14	100.00	34.84	100.00	1.61	100.00	1.85	100.00
脱泥后原矿	83.18	23.91	87.73	0.16	95.06	34.36	82.03	1.23	63.23	1.73	77.45
矿泥(≤0.030 8 mm)	16.82	16.58	12.27	0.05	4.94	37.23	17.97	3.52	36.77	2.51	22.55

表5数据表明，经脱泥工序后磷矿物得到了一定程度富集，脱除矿泥后原矿$w(P_2O_5)$为23.91%，相比脱泥前提高1.24百分点，倍半氧化物质量分数为2.96%，相比原矿降低0.5百分点，脱除的矿泥产率为16.82%，$w(P_2O_5)$为16.58%，倍半氧化物质量分数为6.03%，这部分矿泥可以与浮选尾矿混合作为最终尾矿，达到脱除部分倍半氧化物的效果，大大降低细粒级对后续浮选作业的影响。

2.2.2　脱泥后正浮选实验

将原矿破碎到≤1 mm，脱除≤0.030 8 mm粒级的矿泥，磨矿后直接进入浮选作业，采用正浮选一粗一扫工艺流程（见图1，其中扫选捕收剂用量为1 kg/t），磨矿细度实验结果如图3所示。

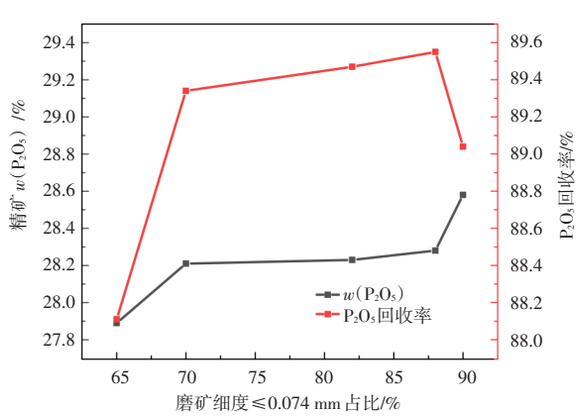


图3　原矿脱泥后磨矿细度对浮选效果的影响

Fig. 3　The influence of grinding fineness after desliming of raw ore on flotation efficiency

图3中数据表明，随着磨矿细度的提高，精矿中P_2O_5的品位逐渐上升，回收率先上升后降低。在磨矿细度为≤0.074 mm占比为88%时，P_2O_5回收率为89.55%达到峰值，$w(P_2O_5)$为28.21%；而在较粗磨矿细度，即≤0.074 mm占比为70%时，P_2O_5回收率为89.34%，$w(P_2O_5)$为28.21%，与磨矿细度为88%时相当。考虑能耗越低越好，因此确定脱泥后正浮选的磨矿细度为≤0.074 mm占比70%。在该细度下开展一粗一扫正浮选实验，结果见表6。

表6　原矿脱泥后正浮选实验结果

Table 6　Positive flotation test results of raw ore after desliming　　%

项目	产率	$w(P_2O_5)$	$w(Fe_2O_3)$	$w(Al_2O_3)$	$w(SiO_2)$	P_2O_5回收率
精矿	63.41	28.21	0.98	0.97	18.71	78.42
中矿	12.00	14.33	2.89	1.99	89.38	7.54
≤0.030 8 mm泥矿	16.82	16.58	3.52	6.01	37.23	12.23
尾矿	7.77	1.28	1.98	6.01	78.34	1.82
合计	100.00	22.81	1.66	2.02	34.94	100.00

由表6可知，精矿$w(P_2O_5)$达到28.21%，达到下游湿法磷酸的要求，$w(Fe_2O_3)$为0.98%，$w(Al_2O_3)$为0.97%。相对于未脱泥直接浮选的精矿，$w(Fe_2O_3)$降低了0.33百分点，$w(Al_2O_3)$降低了0.51百分点，倍半氧化物含量明显降低。从实验现象看，脱泥后浮选现象较好，泡沫流动性好。

2.3　沉降实验

为验证精矿沉降困难的问题是否得到解决，实验针对浮选精矿进行了沉降实验。本次实验所用絮凝剂为生产现场配制，质量分数为0.1%。

将脱泥后单一正浮选的精矿与目前浮选厂生产反浮选脱镁精矿进行沉降效果比较，其结果见图4。由图4可知，沉降曲线有临界压缩点。临界压缩点K，在图上用折线H_0KL代替H_0L曲线，则H_0K为自由沉降过程线，KL为压缩过程线，K为临界压缩点。

实验物料集合沉降速度：

$$u=\frac{\Delta H}{t_k}。\tag{1}$$

式中　u——物料集合沉降速度，m/h；

ΔH——量筒中矿浆的高度，m；

t_k——由沉降开始到临界压缩点的时间，h。

现场精矿沉降时间为1.73 min，沉降高度为

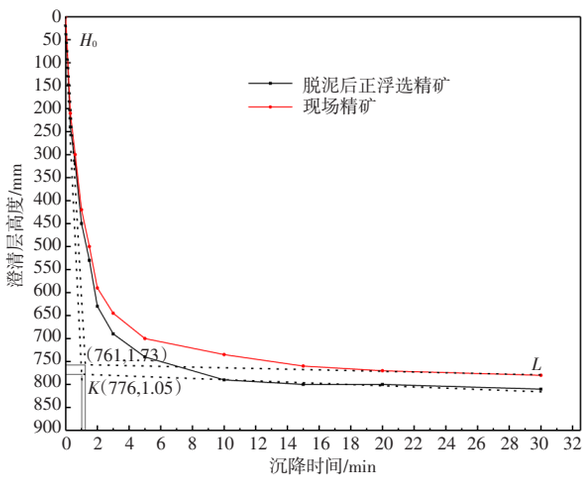


图4 精矿沉降实验结果

Fig. 4 Settling test results of concentrate

761 mm，则沉降速度：

$$u_1=\frac{\Delta H}{t_k}=\frac{0.761\ \text{m}}{0.028\ 8\ \text{h}}=26.42\ \text{m/h}。$$

脱泥后浮选精矿沉降时间为1.05 min，沉降高度为776 mm，则沉降速度：

$$u_2=\frac{\Delta H}{t_k}=\frac{0.776\ \text{m}}{0.017\ 5\ \text{h}}=44.34\ \text{m/h}。$$

根据计算结果，经过脱除细粒级矿泥再进行浮选所获得的精矿沉降速率是现在单一反浮选脱镁精矿的1.68倍，也就是说生产中精矿沉降将不会存在问题[12]。

3 结论

（1）风化胶磷矿不脱泥直接正浮选，浮选精矿中倍半氧化物含量较高，后续浓密作业难以进行，并且泡沫发黏，难消。

（2）风化胶磷矿≤0.030 8 mm的粒级P_2O_5含量低，倍半氧化物含量高。通过脱泥作业抛弃该粒级，可以达到提高入选P_2O_5品位、降低倍半氧化物含量的目的。

（3）风化胶磷矿通过脱泥后一粗一扫正浮选工艺，精矿$w(P_2O_5)$达到30.75%，回收率达到84.47%，$w(Fe_2O_3)$为0.98%，$w(Al_2O_3)$为0.97%。相对于未脱泥直接浮选的精矿，$w(Fe_2O_3)$降低了0.17百分点，$w(Al_2O_3)$降低了0.51百分点，倍半氧化物含量明显降低。泡沫现象更好，且精矿较生产现场的浮选精矿更好沉降，因此该工艺是可行的。

[参考文献]

[1] 熊明金，李建明，刘江林.云南某中低品位风化胶磷矿浮选试验研究[J].云南冶金，2013,42(6):9-12.
Xiong Mingjin, Li Jianming, Liu Jianglin. Study on Flotation of Middle Low Grade Weathered Collophanite in Yunnan [J]. Yunnan Metallurgy, 2013,42(6):9-12.

[2] 古永红，杨晓勤，张祥勤.云南某风化磷矿选矿工艺初步研究[J].化工矿物与加工，2018,47(6):5-7.
Gu Yonghong, Yang Xiaoqin, Zhang Xiangqin. Preliminary study on beneficiation of a weathered phosphate ore in Yunnan [J]. Industrial Minerals & Processing, 2018,47(6):5-7.

[3] 张积寿.滇池地区风化磷块岩的矿石特性[J].云南冶金，1991(1):21-26.

[4] 杜令攀，钟晋，郭永杰.云南风化低镁胶磷矿选矿试验研究[J].化工矿物与加工，2014,43(2):5-7.
Du Lingpan, Zhong Jin, Guo Yongjie. Beneficiation test research on weathered low magnesium collophane from Yunnan [J]. Industrial Minerals & Processing, 2014,43(2):5-7.

[5] 王灿霞，庞建涛，杨稳权，等.云南某风化状磷块岩工艺矿物学研究[J].化工矿物与加工，2016,45(2):27-29.
Wang Canxia, Pang Jiantao, Yang Wenquan, et al. Study on process mineralogy of weathered phosphate rocks in Yunnan [J]. Industrial Minerals & Processing, 2016,45(2):27-29.

[6] 彭操，王国栋，刘江林，等.某低镁风化胶磷矿工艺矿物学研究[J].云南化工，2015,42(6):1-5,10.
Peng Cao, Wang Guodong, Liu Jianglin, et al. Study on Process Mineralogy of a Low Magnesium Weathered Phosphate Rock [J]. Yunnan Chemical Technology, 2015,42(6):1-5,10.

[7] 彭丽群，罗昆义，刘丽芬，等.云南某硅质胶磷矿浮选试验研究[J].化工矿物与加工，2021,50(4):18-21.
Peng Liqun, Luo Kunyi, Liu Lifen, et al. The flotation tests on the siliceous phosphate rock in Yunnan [J]. Industrial Minerals & Processing, 2021,50(4):18-21.

[8] 钟晋，郭永杰，杜令攀，等.云南风化胶磷矿浮选脱硅试验研究[J].化工矿物与加工，2014,43(5):7-8,25.
Zhong Jin, Guo Yongjie, Du Lingpan, et al. Experimental study of weathered phosphate desiliconizing in Yunnan [J]. Industrial Minerals & Processing, 2014,43(5):7-8,25.

[9] 陈赐云，钟晋，杜令攀，等.云南某中低品位风化胶磷矿选矿试验研究[J].化工矿物与加工，2015,44(12):1-3.
Chen Ciyun, Zhong Jin, Du Lingpan, et al. Experimental study on a low-grade weathered collophanite ore in Yunnan [J]. Industrial Minerals & Processing, 2015,44(12):1-3.

[10] 程仁举，李成秀，刘星，等.四川某低品位风化胶磷矿正反浮选试验研究[J]. 化工矿物与加工，2017,46(9):1-4.
Cheng Renju, Li Chengxiu, Liu Xing, et al. Experimental research on direct-reverse flotation process for a low grade weathered collophanite in Sichuan [J]. Industrial Minerals & Processing, 2017,46(9):1-4.

[11] 李海兵，张华.云南某中低品位风化胶磷矿脱泥-浮选工艺研究[J].化工矿物与加工，2019,48(4):42-44,47.
Li Haibing, Zhang Hua. Study on desliming and flotation process of middle and low grade weathered collophanite in Yunnan [J]. Industrial Minerals & Processing, 2019,48(4):42-44,47.

[12] 周兴龙，张文彬，王文潜.量筒内进行矿浆沉降试验的方法[J].有色金属(选矿部分)，2005(5):30-32.
Zhou Xinglong, Zhang Wenbin, Wang Wenqian. Methods for settlement experiment of slurry in the measuring cylinder [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2005(5):30-32.