黑龙江某石墨尾矿的再选试验研究*

胡晨曦[1,2],刘淑贤[1,2],刘悦[1,2],刘佳倪[1,2],高志刚[3],张相国[3],王玲[1,2],聂轶苗[1,2]

(1.华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山市 063210;
2.河北省矿业开发与安全技术重点实验室, 河北 唐山市 063210;
3.黑龙江龙兴国际资源开发集团有限公司, 黑龙江 哈尔滨 163711)

摘要:针对石墨尾矿中赋存的石墨未得到充分回收的现状,对黑龙江某地固定碳含量为3.40%的石墨尾矿进行了回收石墨的试验。运用化学多元素分析、XRD分析和光学显微镜分析方法研究了石墨尾矿的性质,在此基础上进行了石墨尾矿粗选条件试验、阶段磨矿阶段选别试验。结果表明:该尾矿中的石墨多以包裹体或与其他矿物毗邻共生的形式赋存,石墨颗粒大小不一,多存在于+0.09 mm粒级的尾矿中,为使尾矿中石墨得到充分解离,且避免泥化,应采用多段磨矿、多段选别的工艺流程;当磨矿细度为-200目含量占29.52%、浮选质量浓度为20%、煤油用量为300 g/t、2号油用量为50 g/t时,获得了固定碳含量为15.62%、回收率为72.88%的石墨粗精矿;采用"四段磨矿、一次粗选、五次精选、中矿合一返回"工艺流程对该石墨尾矿进行了闭路浮选试验,试验获得了固定碳含量为81.33%、回收率为61.51%的石墨精矿。

关键词:石墨尾矿;浮选流程;磨矿细度;药剂用量;固定碳含量;回收率

中图分类号:TD926.4;TD923 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)04-0257-08

Experimental Study on Reconcentration of a Graphite Tailings in Heilongjiang

HU Chenxi[1,2], *LIU Shuxian*[1,2], *LIU Yue*[1,2], *LIU Jiani*[1,2], *GAO Zhigang*[3], *ZHANG Xiangguo*[3], *WANG Ling*[1,2], *NIE Yimiao*[1,2]

(1.College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China;
2.Hebei Key Laboratory of Mining Development and Safety Technology, Tangshan, Hebei 063210, China;
3.Heilongjiang Longxing International Resource Development Group Co., Ltd., Harbin, Heilongjiang 163711, China)

Abstract: In view of the situation that the graphite contained in graphite tailings is not fully recovered, experiments on graphite recovery were carried out on graphite tailings from a certain area in Heilongjiang with a fixed carbon content of 3.40%. The properties of graphite tailings were investigated by chemical multi-element analysis, XRD analysis and optical microscopy analysis methods. On this basis, roughing condition experiments and stage grinding-stage separation experiments of graphite tailings were carried out. The results indicate that graphite in the tailings mostly occurs in the form of inclusions or paragenesis adjacent to other minerals. Graphite particles vary in size and are mostly distributed in the +0.09 mm size fraction of the tailings. To fully liberate graphite from the tailings and avoid argillization, a multi-stage grinding and multi-stage separation flowsheet should be adopted. When the grinding fineness of the -200 mesh content is 29.52%, the flotation mass concentration is 20%, the kerosene dosage is 300 g/t, and the No.2 oil dosage is 50 g/t, graphite rough concentrate with a fixed carbon content of 15.62% and a recovery rate of 72.88% is obtained. A closed-circuit flotation test was carried out on the graphite tailings by adopting the process of four-stage grinding, one roughing, five cleaning, and combined middlings returning. Graphite concentrate with a fixed carbon content of 81.33% and a recovery rate of 61.51% is obtained.

Key words: Graphite tailings, Flotation flowsheet, Grinding fineness, Reagent dosage, Fixed carbon content, Recovery rate

* **收稿日期**:2025-04-15
基金项目:黑龙江"揭榜挂帅"项目(2023ZXJ05A02)
作者简介:胡晨曦(2001—),女,河北衡水人,硕士研究生,主要研究方向为矿产资源综合利用。E-mail:1185985884@qq.com
通信作者:刘淑贤(1970—),女,河北唐山人,博士,教授,主要研究方向为矿产资源综合利用。E-mail:964464345@qq.com

0 引言

由于早期的石墨浮选工艺技术水平有限,使得石墨尾矿中仍赋存有一定量的石墨资源[1-4],年代久远的尾矿中石墨品位达到2%~6%,甚至更高[5-6],因此回收尾矿中残存的石墨成为亟待解决的问题[7]。孟凡娜等[8]以萝北某固定碳含量为2.21%的石墨尾矿为对象,采用粉碎、超声剥离、重力沉降等方法提取石墨尾矿中石墨微纳米片,获得了石墨微纳米碳含量最高达9.72%、石墨回收率达80.01%的技术指标。葛阳阳等[9]针对固定碳含量为4.82%的某晶质石墨矿,进行了多段闭路流程试验,对粗精矿进行五次再磨与九次精选,对粗选尾矿进行二次扫选,通过三段预选实现粒度分级,最终获得品位为91.68%、回收率为93.47%的高品位石墨精矿。海韵等[10]研究了固定碳含量为2.5%的萝北地区石墨尾矿的性质,经筛析分析,200目筛下尾矿的石墨含量为4%,可用水力旋流器回收。李凤[11]对固定碳含量为4.76%的石墨尾矿进行浮选试验,得到石墨碳含量为85.65%、回收率为66.21%的石墨精矿。吴鹏飞等[12]对固定碳含量为1.02%的低品位石墨尾矿进行浮选工艺研究,经过一次粗选、六次阶段精选、中矿合并后返回至第二段精选,最终得到石墨品位为81.45%、回收率为72.49%的石墨精矿。

黑龙江石墨选厂较多,由于采取的磨选工艺不同,尾矿中石墨含量和细度均不同,本文以黑龙江某地石墨尾矿为研究对象,在充分分析石墨尾矿性质的基础上,探索了回收石墨的浮选工艺条件和流程,为该地区石墨尾矿回收石墨提供了参考。

1 石墨尾矿的性质

1.1 化学多元素分析

石墨尾矿化学多元素分析结果见表1,石墨尾矿的主要成分是硅、铝、钙、钾和碳,含有少量的铁、钛、锰、钠等,其中固定碳含量为3.40%。

表1 石墨尾矿的化学成分

Table 1 Chemical components of graphite tailings

%

SiO_2	TiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	SO_3	P_2O_5
41.22	0.41	6.76	3.85	15.15	2.47	0.08
MnO	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3	C	其他	
0.15	2.64	0.55	6.96	3.40	16.36	

1.2 石墨尾矿XRD分析

对石墨尾矿进行XRD分析,检测结果如图1所示。

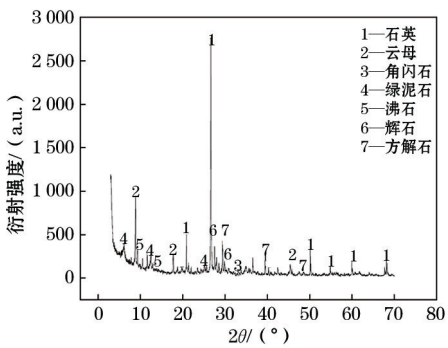


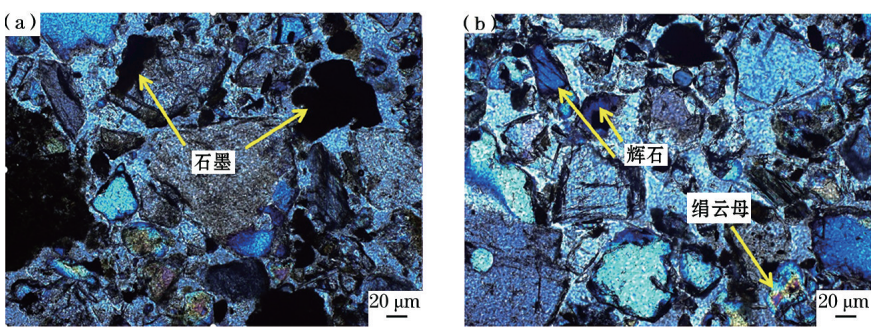
图1 石墨尾矿XRD分析结果

Fig.1 XRD analysis results of graphite tailings

石墨尾矿主要矿物组成为石英、云母、长石和绿泥石,样品中还含有少量角闪石、磁黄铁矿。云母包括白云母、绢云母、金云母和少量黑云母,长石包括正长石、斜长石等,绿泥石、辉石、角闪石含量都较低,还含有极少量高岭土等黏土矿物。由于石墨含量低于5%,所以未见明显石墨特征峰。

1.3 石墨尾矿光学显微镜分析

从石墨尾矿中选取有代表性样品,制成标准厚度薄片,利用光学显微镜进行显微结构观察与矿物组成鉴定[13],显微镜照片如图2所示。



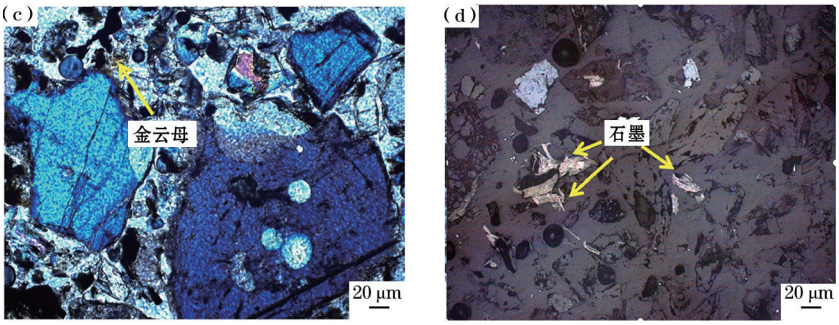


图 2 石墨尾矿显微镜照片(正交,透光,×100)

Fig.2 Microscopic photograph of graphite tailings (orthogonal, transparent, ×100)

石墨尾矿中的石墨颗粒长度为 0.06～0.1 mm,大多与其他非金属矿物或金属矿物规则毗邻共生,部分石墨颗粒内部含有其他矿物,尾矿中的石墨[14]与脉石矿物未达到单体解离,因此需磨矿后浮选回收石墨。石墨尾矿含有绿泥石、辉石等易泥化矿物,因此不宜过磨,需注意磨矿细度对石墨回收的影响[15],选矿过程中应采取多段磨矿的工艺以免影响浮选效果。

1.4 石墨尾矿粒度分布

为了查明石墨和绢云母在石墨尾矿不同粒级中的分布情况,用套筛将石墨尾矿筛分为+0.090 mm、−0.090～+0.075 mm、−0.075～+0.052 mm、−0.052～+0.043 mm、−0.043～+0.038 mm、−0.038 mm 六个粒级,石墨尾矿粒度分布见表 2。

表 2 石墨尾矿粒度分布

Table 2 Particle size distribution of graphite tailings

粒级/mm	产率/%	固定碳含量/%
+0.090	72.05	3.82
−0.090～+0.075	14.23	2.21
−0.075～+0.052	6.12	1.96
−0.052～+0.043	2.30	3.21
−0.043～+0.038	2.66	3.03
−0.038	2.64	2.24
合计	100.00	3.40

由表 2 可知,石墨尾矿中+0.090 mm 粒级占 72.05%,固定碳含量在+0.090 mm 粒级中较高,为 3.82%,说明石墨大多赋存在+0.090 mm 粒级范围内,没有单体解离,需粉磨后进行浮选。石墨尾矿中−0.052～+0.043 mm 和−0.043～+0.038 mm 粒级范围内,固定碳含量也较高,分别为 3.21% 和 3.03%。该尾矿的筛析粒度分布特征与其工艺矿物学特征相符。

2 石墨尾矿再选试验

2.1 粗选条件试验

2.1.1 磨矿细度试验

取石墨尾矿 5 份,采用 XMQ-Φ240×90 型号锥型球磨机进行湿法研磨,在矿浆质量浓度为 50% 的条件下,磨矿时间为 5 s、25 s、45 s、65 s、85 s,其磨矿粒度−200 目含量分别为 18.32%、24.51%、27.18%、29.52%、35.13%。取不同粒度石墨尾矿分别进行石墨粗选试验[15],试验结果如图 3 所示。

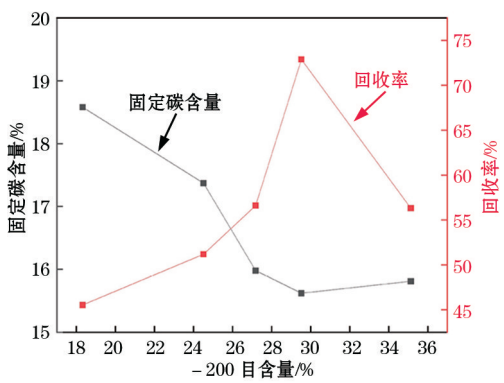


图 3 不同磨矿细度下的浮选试验结果

Fig.3 Results of flotation test under different grinding fineness

从图 3 可以看出,当石墨尾矿粒度逐渐减小时,精矿中固定碳含量先逐步减小后小幅回升,而回收率则先提升到最高值后显著降低。在−200 目含量为 29.52%时,精矿的固定碳含量为 15.62%。回收率增加较大,达到了 72.88%。而当磨矿细度继续增加,达到−200 目占 35.13%时,固定碳含量虽增加为 15.81%,但石墨回收率却降低为 56.31%。粗选时要保证较高的回收率,综合考虑固定碳含量和回收率[16],确定一段磨矿细度为−200 目占 29.52%。

2.1.2 浮选质量浓度试验

试验条件为:磨矿细度为-200目含量占29.52%,捕收剂煤油用量为300 g/t,起泡剂2号油用量为50 g/t,矿浆质量浓度分别为10%、15%、20%、25%、30%。试验结果如图4所示。

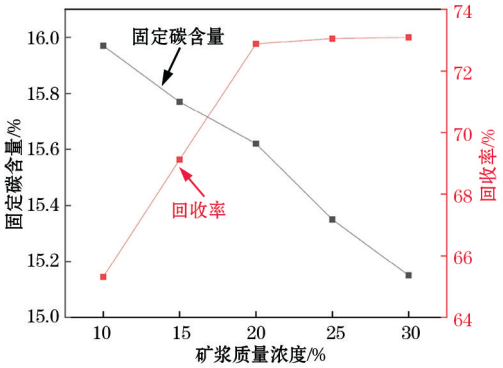


图4 不同矿浆质量浓度下的浮选试验结果

Fig.4 Results of flotation test under different pulp mass concentrations

由图4可知,固定碳含量随着矿浆质量浓度的增加逐渐降低;石墨回收率随矿浆质量浓度的增加显著增大,在矿浆质量浓度达到20%之后趋于平稳,此时固定碳含量为15.62%,回收率为72.88%,综合考虑石墨固定碳含量和回收率,确定粗选矿浆质量浓度为20%。

2.1.3 捕收剂用量试验

以煤油为石墨浮选捕收剂。试验条件为:磨矿细度-200目占29.52%,浮选质量浓度为20%,2号油用量为50 g/t,煤油用量分别为120 g/t、180 g/t、240 g/t、300 g/t、360 g/t。试验结果如图5所示。

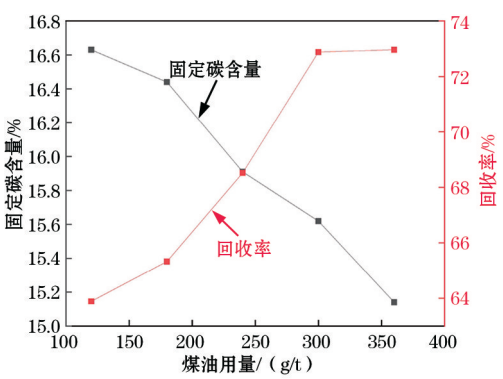


图5 不同捕收剂用量下的浮选试验结果

Fig.5 Results of flotation test under different collector dosage

由图5可知,随着捕收剂煤油[17]用量的增加,石墨的回收率逐渐升高,固定碳含量呈现降低态势。在煤油用量为300 g/t时,固定碳含量为15.62%,回收率为72.88%。当煤油用量达到300 g/t后,固定碳含量降低幅度较大,回收率增长幅度明显减缓并趋于稳定,故确定石墨粗选捕收剂煤油用量为300 g/t。

2.1.4 起泡剂用量试验

以2号油为石墨浮选起泡剂[18],在磨矿细度为-200目含量占29.52%、浮选质量浓度为20%,煤油用量为300 g/t的条件下,通过浮选试验探究了2号油用量对石墨浮选精矿指标的影响,试验结果如图6所示。

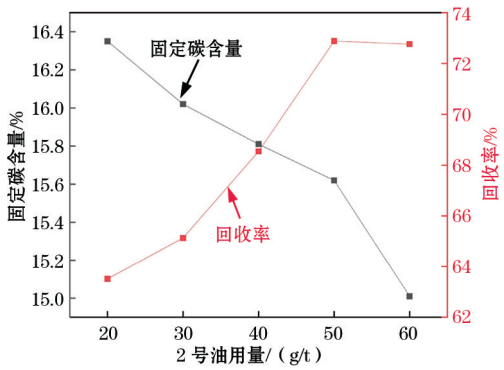


图6 不同起泡剂2号油用量下的浮选试验结果

Fig.6 Results of flotation test under different foaming agent No.2 oil dosage

由图6可知,随着起泡剂2号油用量的增加,石墨回收率呈现持续上升趋势,而固定碳含量则相应降低。当2号油用量为50 g/t时,回收率达到最大值72.88%,固定碳含量为15.62%。当起泡剂2号油用量超过50 g/t时,回收率出现小幅回落,而固定碳含量显著下降,因此确定粗选2号油用量定为50 g/t。

通过上述条件试验,确定粗选的优化条件为:磨矿细度为-200目含量占29.52%,矿浆质量浓度为20%,捕收剂煤油用量为300 g/t,起泡剂2号油用量为50 g/t。在此条件下,粗选作业可得到固定碳含量为15.62%、回收率为72.88%、产率为15.86%的石墨粗精矿。

2.2 石墨精选试验

2.2.1 二段精选磨矿条件对浮选指标的影响

由于粗精矿固定碳含量仅为15.62%,需要对粗精矿进行再磨再选,磨矿时间分别为60 s、120 s、180 s、240 s、300 s,磨矿细度结果见表3。

表 3 不同二段磨矿时间下的磨矿细度

Table 3 Grinding fineness under different second-stage grinding time

磨矿时间/s	-200 目含量/%
60	46.31
120	52.33
180	57.14
240	63.11
300	71.19

在煤油用量为 150 g/t、2 号油用量为 30 g/t 的条件下,对-200 目含量为 46.31%、52.33%、57.14%、63.11%、71.19%的磨矿产品进行浮选试验,浮选试验结果如图 7 所示。

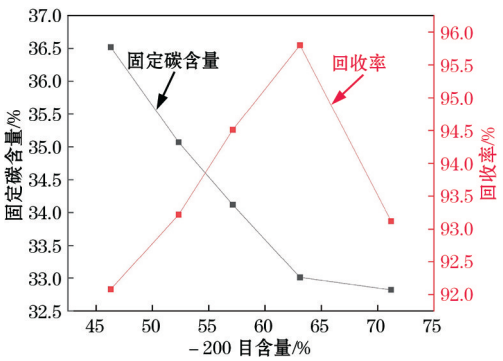


图 7 二段磨矿粒度对浮选指标的影响

Fig.7 Effect of second-stage grinding particle size on flotation indexes

从图 7 中可以看出,随着-200 目含量的增加,固定碳含量逐渐降低后趋于平稳,回收率先增加后降低,当-200 目含量为 63.11%时,固定碳含量为 33.01%,回收率为 95.80%,回收率最高,因此二段磨矿细度取-200 目含量为 63.11%为最佳。

对磨矿细度达到-200 目含量为 63.11%的粗精矿进行了精选次数试验,试验结果见表 4。

表 4 粗精矿二磨精选次数试验

Table 4 Test results of cleaning times of coarse concentrate after second-stage grinding

精选次数	产品名称	作业产率/%	固定碳含量/%	作业回收率/%
一次精选	一次精选精矿	45.33	33.01	95.80
	一次精选尾矿	54.67	1.20	4.20
	合计	100.00	15.62	100.00
二次精选	二次精选精矿	30.46	47.90	93.40
	二次精选尾矿	14.87	2.52	2.40
	一次精选尾矿	54.67	1.20	4.20
	合计	100.00	15.62	100.00
三次精选	三次精选精矿	30.34	47.95	93.12
	三次精选尾矿	0.12	35.57	0.28
	二次精选尾矿	14.87	2.52	2.40
	一次精选尾矿	54.67	1.20	4.20
	合计	100.00	15.62	100.00

由表 4 可知,三次精选的精矿其固定碳含量有所升高,但上升幅度不大,且作业回收率有所降低,综合考虑石墨固定碳含量和回收率,最终选择进行两次精选,石墨两次精选精矿的固定碳含量为 47.90%,作业回收率为 93.40%。

2.2.2 三段精选磨矿条件对浮选指标的影响

二段磨矿后精选的精矿品质未达到石墨精矿标准,需再磨再选,磨矿时间设为 60 s、180 s、300 s、420 s、540 s,磨矿细度结果见表 5。

表 5 不同三段磨矿时间下的磨矿细度

Table 5 Grinding fineness under different third-stage grinding time

磨矿时间/s	-200 目含量/%
60	69.85
180	76.51
300	83.06
420	85.71
540	89.66

当煤油用量为 100 g/t、2 号油用量为 20 g/t 时,对-200 目含量占 69.85%、76.51%、83.06%、85.71%、89.66%的磨矿产品进行浮选试验。石墨尾砂三段磨矿粒度对浮选指标影响的试验结果如图 8 所示。

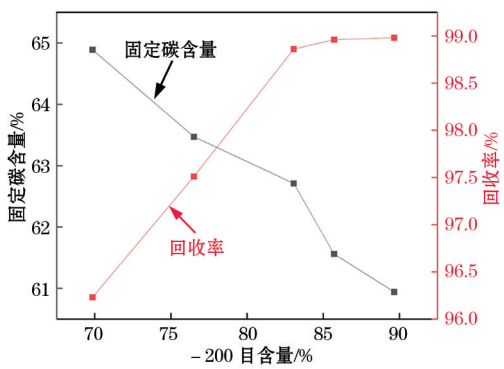


图 8 三段磨矿粒度对浮选指标的影响

Fig.8 Effect of three-stage grinding particle size on flotation indexes

从图 8 可以看出,随着-200 目含量的提高,精

矿中固定碳含量呈现递减趋势,而回收率则先上升后趋于稳定。当-200 目含量达到 83.06%时,石墨精矿的固定碳含量为 62.71%,作业回收率为 98.86%。综合考虑石墨固定碳含量和回收率,选择三段磨矿的细度为-200 目含量占 83.06%。

将磨矿细度达到-200 目含量为 83.06%的精矿进行了精选次数试验,试验结果见表 6。

表 6 粗精矿三磨精选次数试验结果

Table 6 Test results of cleaning times of coarse concentrate after three-stage grinding

精选次数	产品名称	作业产率/%	固定碳含量/%	作业回收率/%
一次精选	一次精选精矿	75.51	62.71	98.86
	一次精选尾矿	24.49	2.23	1.14
	合计	100.00	47.90	100.00
二次精选	二次精选精矿	62.10	72.96	94.60
	二次精选尾矿	13.41	15.22	4.26
	一次精选尾矿	24.49	2.23	1.14
	合计	100.00	47.90	100.00
三次精选	三次精选精矿	62.00	73.01	94.52
	三次精选尾矿	0.10	40.33	0.08
	二次精选尾矿	13.41	15.22	4.26
	一次精选尾矿	24.49	2.23	1.14
	合计	100.00	47.90	100.00

由表 6 可知,对-200 目含量为 83.06%的磨矿产品经过三次精选,固定碳含量达到 73.01%,作业回收率达到 94.52%。相较于二次精选,三次精选后精矿的固定碳含量增加幅度较小,而回收率有所下降,最终选择进行两次精选,经两次精选后的精矿固定碳含量为 72.96%,作业回收率为 94.60%。

2.2.3 四段精选磨矿条件对浮选指标的影响

三段磨矿三次精选的精矿固定碳含量仅为 72.96%,需再磨再选,当磨矿时间分别为 60 s、120 s、180 s、240 s、300 s 时,磨矿细度结果见表 7。

表 7 不同四段磨矿时间下的磨矿细度

Table 7 Grinding fineness under different four-stage grinding time

磨矿时间/s	-200 目含量/%
60	84.52
120	86.07
180	87.94
240	88.87
300	89.51

在煤油用量为 50 g/t、2 号油用量为 10 g/t 的条件下,对-200 目含量占 84.52%、86.07%、87.94%、88.87%、89.51%的磨矿产品进行浮选试验。四段磨矿粒度对石墨尾砂浮选指标的影响如图 9 所示。

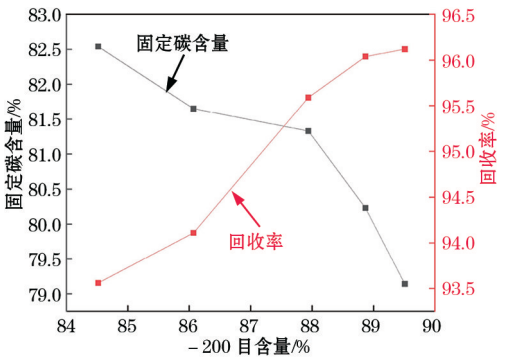


图 9 四段磨矿粒度对浮选指标的影响

Fig.9 Effect of four-stage grinding particle size on flotation indexes

从图 9 可以看出,随着-200 目含量的增加,固定碳含量逐渐降低,而回收率持续升高后趋于平稳;当-200 目含量为 87.94%时,固定碳含量为 81.33%,作业回收率为 95.59%,-200 目含量升高到 88.87%时,回收率相比于-200 目占 87.94%时略有增加,但固定碳含量显著降低,因此确定四段磨矿粒度为-200目含量占 87.94%。

将磨矿细度达到-200 目含量为 87.94%的精矿进行了精选次数试验,试验结果见表 8。

表 8 粗精矿四磨精选次数试验结果

Table 8 Test results of cleaning times of coarse concentrate after four-stage grinding

精选次数	产品名称	作业产率/%	固定碳含量/%	作业回收率/%
一次精选	一次精选精矿	85.75	81.33	95.59
	一次精选尾矿	14.25	22.58	4.41
	合计	100.00	72.96	100.00
二次精选	二次精选精矿	85.64	81.37	95.52
	二次精选尾矿	0.11	48.68	0.07
	一次精选尾矿	14.25	22.58	4.41
	合计	100.00	72.96	100.00

对-200 目含量为 87.94%的精选精矿经过一次精选后,所得精矿的固定碳含量为 81.33%,作业回收率为 95.59%。二次精选精矿的固定碳含量为 81.37%,作业回收率为 95.52%。二次精选相比较一次精选的精矿固定碳含量增加幅度较小,而作业回收率有所下降,因此最终确定对四段磨矿后粗精矿进行一次精选。

2.3 石墨浮选综合流程及选矿指标

石墨精选尾矿中固定碳含量较高,可合一返回粗选形成闭路。石墨尾矿的闭路浮选试验流程如图 10 所示,试验结果见表 9。

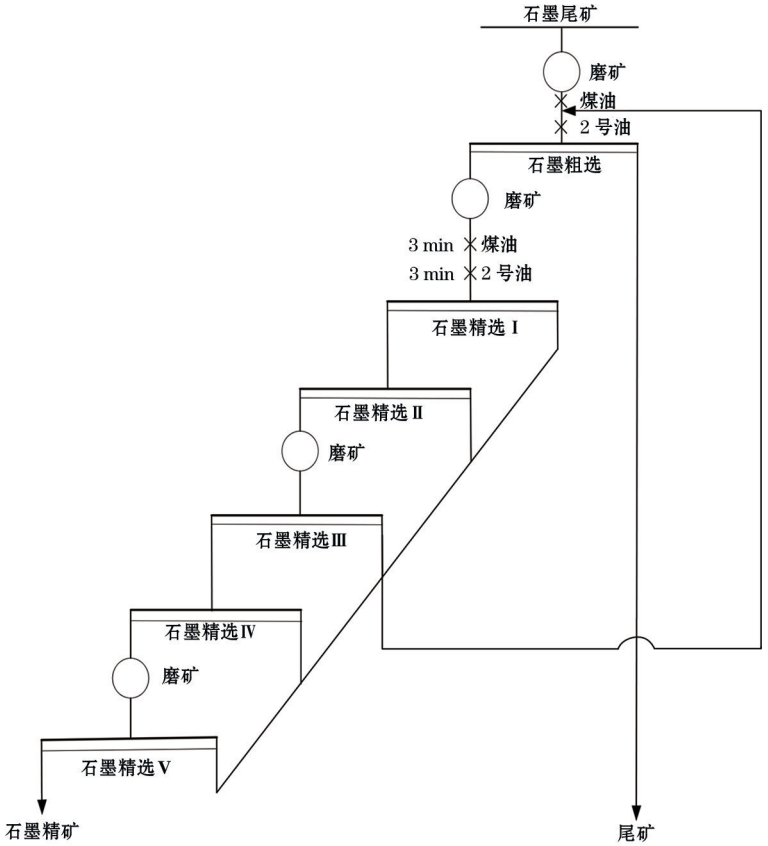


图 10 石墨尾矿浮选闭路流程

Fig.10 Closed-circuit test process of graphite tailings flotation

表 9 石墨尾矿闭路浮选试验结果

Table 9 Results of closed-circuit flotation test of graphite tailings

产品名称	产率/%	固定碳含量/%	回收率/%
精矿	2.57	81.33	61.51
尾矿	97.43	1.34	38.49
合计	100.00	3.40	100.00

通过采用“四段磨矿、一次粗选、五次精选、中矿合一返回”的工艺流程,试验获得了固定碳含量为81.33%、回收率为61.51%的石墨精矿,精矿品质达到了中碳石墨的标准[19]。

3 结论

采用化学多元素分析、XRD分析和光学显微镜分析方法研究了黑龙江某石墨尾矿的性质,在此基础上进行了石墨粗选试验和多段磨矿多段选别试验。试验得出了如下的主要结论。

(1) 某石墨尾矿中的石墨大多与脉石矿物毗邻共生,部分石墨呈包裹状态,部分石墨以单独颗粒形式存在,石墨多存在于+0.090 mm粒级的尾矿中。由于尾矿中还含有绿泥石、辉石等易泥化矿物,为了避免泥化,须采取阶段磨矿、阶段选别的工艺流程。

(2) 在磨矿细度为-200目含量29.52%、矿浆质量浓度为20%、捕收剂煤油用量为300 g/t、起泡剂2号油用量为50 g/t的石墨尾矿粗选条件下,得到了固定碳含量为15.62%、回收率为72.88%的石墨粗精矿。

(3) 经过“四段磨矿、一次粗选,五次精选、中矿合一返回”的石墨尾矿浮选闭路流程试验,获得了固定碳含量为81.33%、回收率为61.51%的石墨精矿,精矿品质达到了中碳石墨的标准。

(4) 某石墨尾矿中含有绢云母等有用矿物,在浮选选出石墨后,可进行绢云母的浮选回收。

参考文献(References):

[1] 丁会敏,唐诗洋,杨光,等.石墨尾矿综合利用现状[J].化学工程师,2024,38(1):57-60.
DING Huimin, TANG Shiyang, YANG Guang, et al. Current situation of comprehensive utilization of graphite tailings[J]. Chemical Engineer,2024,38(1):57-60.

[2] 王涛,韩士斌,鞠成.石墨尾矿资源化利用现状[J].矿产综合利用,2024,45(2):111-117.

WANG Tao, HAN Shibin, JU Cheng. Research status of resource utilization of graphite tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2024,45(2):111-117.

[3] 王允威,曹慕岚,张召述.石墨尾矿资源化利用现状[J].攀枝花学院学报,2011,28(6):1-3.
WANG Yunwei, CAO Mulan, ZAHNG Zhaoshu. Present situation of status of resource utilization of graphite tailings [J]. Journal of Panzhihua University,2011,28(6):1-3.

[4] 吕国诚,陈宝海,海韵,等.萝北云山石墨尾矿综合利用研究[C]//中国循环经济协会,尾矿综合利用产业技术创新战略联盟,中国硅酸盐学会工艺岩石学分会,中国矿物岩石地球化学学会矿物岩石材料专业委员会.第五届尾矿与冶金渣综合利用技术研讨会论文集.北京:中国地质大学(北京) 材料科学与工程学院,2014:72-79.
LYU Guocheng, CHEN Baohai, HAI Yun, et al. Comprehensive utilization study on graphite tailings from Yunshan, Luobei[C]// Technological Innovation Strategic Alliance of Tailings Comprehensive Utilization Industry of China Circular Economy Association, Technical Petrology Branch of Chinese Ceramic Society, Mineral and Rock Materials Professional Committee of China Society for Mineralogy Petrology and Geochemistry. Proceedings of the 5th Symposium on Comprehensive Utilization Technology of Tailings and Metallurgical Slag. Beijing:School of Materials Science and Technology, China University of Geosciences Beijing,2014:72-79.

[5] 李洪君,王立平.利用石墨选矿尾矿砂生产白炭黑的研究[J].非金属矿,1996(4):34+33.
LI Hongjun, WANG Liping. Study on the production of silica from graphite tailings[J]. Non-Metallic Mines,1996 (4):34+33.

[6] 杨德修.新疆低品位石墨选矿及其尾矿综合利用研究[J].非金属矿,1991(6):19-21.
YANG Dexiu. Study on beneficiation of low-grade graphite and comprehensive utilization ofthe tailings in Xinjiang[J]. Non-Metallic Mines,1991(6):19-21.

[7] 昂志,杨德修,王宝娴.江西某地石墨矿的综合回收初步研究[J].矿产综合利用,1982(1):25-32.
ANG Zhi, YANG Dexiu, WANG Baoxian. Preliminary study on comprehensive recovery of graphite ore form a certain area of Jiangxi Province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,1982(1):25-32.

[8] 孟凡娜,张海军,张晓臣,等.萝北某石墨尾矿提取石墨制备石墨烯实验研究[J].矿产保护与利用,2025,45(1):70-76.
MENG Fanna, ZHANG Haijun, ZHANG Xiaochen, et al. Experimentstudy on preparation of graphene by extracting graphite from graphite tailings in Luobei[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2025,45(1):70-76.

[9] 葛阳阳,张凯熙,曹月明,等.某晶质石墨矿回收石墨和硫铁矿试验研究[J].非金属矿,2021,44(5):56-60.
GE Yangyang, ZHANG Kaixi, CAO Yueming, et al. Experimental study on recovering graphite and pyrite from a crystalline graphiteore[J]. Non-Metallic Mines, 2021, 44 (5):56-60.

[10] 海韵,廖立兵,吕国诚,等.黑龙江萝北石墨尾矿的工艺矿物学研究[J].人工晶体学报,2015,44(3):621-626.
HAI Yun, LIAO Libing, LYU Guocheng, et al. Mineralogical study on graphite tailings from Luobei, Heilongjiang Province[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2015,44(3):621-626.

[11] 李凤.石墨尾矿中回收石墨和绢云母的选矿工艺研究[D].北京:北京有色金属研究总院,2014.
LI Feng. Beneficiation process study on recycling graphite and sericite from the graphite tailings[D]. Beijng: General Research Institute for Nonferrous Metals,2014.

[12] 吴鹏飞,冯曲曲,项晓洁,等.新疆某石墨尾矿再选试验[J].金属矿山,2017(2):193-196.
WU Pengfei, FENG Ququ, XU Xiaojie, et al. Recleaning experiment on graphite tailings from Xinjiang[J]. Metal Mine,2017(2):193-196

[13] 韩秀丽,刘丽娜.印度矿粉对烧结矿矿相结构的影响[J].钢铁研究,2008(4):12-15+28.
HAN Xiuli, LIU Lina. Influence of Indian ore fines on microstructure of sinter[J].Research on Iron and Steel,2008 (4):12-15+28.

[14] 张莉莉,洪秋阳,李波,等.莫桑比克某含钒石墨矿工艺矿物学研究[J].矿产综合利用,2020(5):110-114+26.
ZHANG Lili, HONG Qiuyang, LI Bo, et al. Processing mineralogy of a vanadium-bearing graphite ore from Mozambique[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2020(5):110-114+26.

[15] 王庆文,吕良.青海妥拉海河石墨矿选矿试验研究[J].中国非金属矿工业导刊,2023(4):43-47.
WANG Qingwen, LYU Liang. Experimental study on mineral processing of graphite ore in Tola Haihe, Qinghai [J]. China Nonmetallic Ore Industry Guide,2023(4):43-47.

[16] 于长波,邱杨率,张凌燕,等.萝北某细鳞片石墨矿选矿试验研究[J].非金属矿,2025,48(2):68-72.
YU Changbo, QIU Yangshuai, ZHANG Lingyan, et al. Experimental research on the mineral processing of a fine flake graphite in Luobei[J]. Non-Metallic Mines, 2025, 48 (2):68-72.

[17] 任武军.不同特征石墨的浮选行为研究[D].包头:内蒙古科技大学,2021.
REN Wujun. Study on flotation behavior of graphite with different characteristics [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology,2021.

[18] 姚维军,刘峰,张洋洋,等.江苏某低品位石墨矿选矿试验研究[J].中国非金属矿工业导刊,2024(2):69-72.
YAO Weijun, LIU Feng, ZHANG Yangyang, et al. Experimental study on mineral processing of a low grade graphite mine in Jiangsu Province[J]. China Non-metallic Minerals Industry,2024(2):69-72.

[19] 樊子玉,贾晓东,杨永军.坦桑尼亚石墨资源利用探索[J].生物化工,2020,6(2):94-96.
FAN Ziyu, JIA Xiaodong, YANG Yongjun. Exploration on utilization of graphite resources in Tanzania[J]. Biological Chemical Engineering,2020,6(2):94-96.