超声波辅助工艺对细鳞片石墨浮选的影响*

王守彬[1]，钱玉鹏[1,2,3]，杨兹栋[1]

（1.武汉理工大学 资源与环境工程学院， 湖北 武汉 430070；
2.矿物资源加工与环境湖北省重点实验室， 湖北 武汉 430070；
3.关键非金属矿产资源绿色利用教育部重点实验室， 湖北 武汉 430070）

摘要：以黑龙江萝北某石墨矿为研究对象，为提高石墨浮选精矿固定碳含量，通过纯矿物浮选试验，分析典型脉石石英进入石墨精矿的机制，探索超声时间和超声功率对石墨和石英人工混合矿浮选的影响，并采用超声波辅助工艺进行实际矿石浮选试验，评价超声波预处理对石墨精矿固定碳含量的影响。纯矿物浮选试验结果表明，石墨在疏水作用下形成絮团，使得细粒石英通过夹带、夹杂作用进入精矿，超声波预处理可以强化颗粒分散，降低水回收率，减少石英上浮。实际矿石浮选试验表明，采用“五磨六浮”的开路浮选流程，在再选三至再选六浮选前进行超声预处理3 min，可获得固定碳含量为94.61%、回收率为81.66%的石墨精矿，精矿的固定碳含量较无超声处理提高了3.10个百分点。研究结果为超声波辅助工艺提高再磨再选阶段石墨精矿的固定碳含量提供了参考。

关键词：石墨浮选；超声波辅助工艺；再磨再选；固定碳含量

中图分类号：TD985；TD923 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)01-0273-08

Effect of Ultrasonic Assisted Process on Flotation of Fine Flake Graphite

WANG Shoubin[1], *QIAN Yupeng*[1,2,3], *YANG Zidong*[1]

(1.School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;
2.Hubei Province Key Laboratory of Processing of Mineral Resources and Environment, Wuhan, Hubei 430070, China;
3.Key Laboratory of Green Utilization of Critical Non-metallic Mineral Resources of Ministry of Education, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: Taking a graphite ore in Luobei, Heilongjiang Province as the research object, in order to improve the fixed carbon content of graphite flotation concentrate, through pure mineral flotation test, the mechanism of typical gangue quartz entering graphite concentrate was analyzed, and the effects of ultrasonic time and ultrasonic power on the flotation of graphite and quartz artificial mixed ore were explored. The actual ore flotation test was carried out by ultrasonic assisted process to evaluate the effect of ultrasonic pretreatment on the fixed carbon content of graphite concentrate. The results of pure mineral flotation tests show that graphite forms flocs under hydrophobic interaction, causing fine-grained quartz to enter the concentrate through entrainment and inclusion. Ultrasonic pretreatment can strengthen particle dispersion, reduce water recovery and reduce quartz floating. The actual ore flotation test show that the graphite concentrate with fixed carbon content of 94.61% and recovery rate of 81.66% is obtained by using the open-circuit flotation process of “five grindings and six flotations” and ultrasonic pretreatment for 3 min before the third re-election to the sixth re-election flotations. The fixed carbon content of the concentrate is 3.10 percentage points higher than that without ultrasonic treatment. The research results provide a reference for improving the fixed carbon content of graphite concentrate in the re-grinding and re-flotation stage by ultrasonic assisted process.

Key words: Graphite flotation, Ultrasonic assisted process, Re-grinding and re-flotation, Fixed carbon content

* **收稿日期**：2024-11-26
基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFC2902901)
作者简介：王守彬(2000—)，男，辽宁大连人，硕士研究生，主要从事石墨浮选研究。E-mail：2239327960@qq.com
通信作者：钱玉鹏(1984—)，男，湖北武汉人，博士，副教授，主要从事非金属矿选矿与深加工研究。E-mail：qianyupeng@whut.edu.cn

0 引言

石墨是一种性能优良的非金属矿物材料,因具有耐高温、耐腐蚀、导热导电、润滑性、抗热振性等诸多优良性质[1-3],被誉为21世纪支撑高新技术发展的战略资源,广泛应用于战略性新兴产业领域[4]。

浮选是实现鳞片石墨富集的主要手段之一[5]。在实际生产中,常采用阶段磨浮流程,逐步脱除脉石杂质,以提高精矿固定碳含量[6-7]。胡小春等[8]采用"一段粗磨一次粗选、二次扫选、粗精矿六段剥片再磨七次精选,中矿顺序返回"的闭路流程,获得固定碳品位为98.01%、回收率为99.22%的石墨精矿。崔伟勇等[9]采用"一粗一扫四精"的闭路流程,获得品位为96.53%、回收率为22.74%的大鳞片石墨。众多学者对脉石进入精矿的机制进行了系统研究,李鲁笑等[10]发现,增加磨矿细度可促进石墨单体与脉石的有效分离,显著减少杂质脉石进入粗精矿。SMITH和WARREN[11]指出,部分薄膜水和矿物颗粒因泡沫抬升作用而进入泡沫层,且随着泡沫层的升高,被夹带的矿物颗粒也随之上升。ZHENG等[12]认为,当夹带因子大于1时,硅质脉石主要通过夹杂方式进入精矿。由此可见,强化石墨单体解离、减少硅质脉石夹杂是提高石墨精矿品位的重要途径。

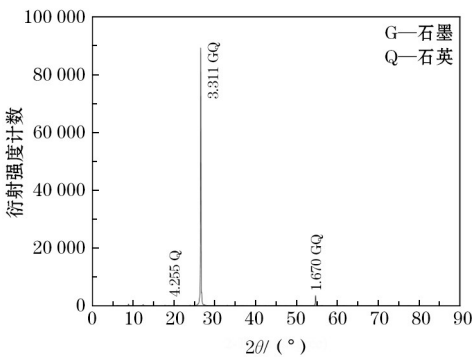
超声波预处理是通过声波在水中连续压缩和膨胀水分子产生空化效应,空化气泡破裂形成高速射流,扰乱胶体悬浮体系,有利于颗粒分散并增加颗粒间的碰撞[13-14]。SAHINOGLU和USLU[15]发现,较高的超声波功率和较长的处理时间会导致煤粒减少,并且超声波对不同粒径的煤颗粒具有选择性破碎能力。GHADYANI等[16]认为,超声波对高灰分煤颗粒具有物理破碎作用,会产生大量细小煤粒,特别是<53 μm的煤粒,超声波处理后粉末的粒径变化比常规处理后更为显著。ZHOU等[17]发现,喇叭形超声不仅能清洁矿物表面,还能借助其强大的空化效应释放嵌入石墨层间的脉石颗粒。丁大发[18]采用超声辅助工艺取代再磨Ⅱ,发现精矿产率提高0.02%、固定碳含量降低0.21%,精矿指标总体相近。由此可见,超声波可通过强化粉碎、促进单体解离来提高浮选效果,但在石墨浮选过程中,仅依靠超声波破碎难以有效提高石墨精矿指标,而且超声波对脉石的作用机制尚不明确。

为此,本文从超声波强化分散、降低脉石夹带的角度出发,通过纯矿物试验研究超声功率与时间对石墨浮选中典型石英脉石夹带行为的影响,并开展实际矿浮选试验,探索超声预处理对黑龙江萝北典型细鳞片石墨矿浮选的影响,以期为优化石墨浮选工艺流程,提高石墨精矿指标提供理论依据。

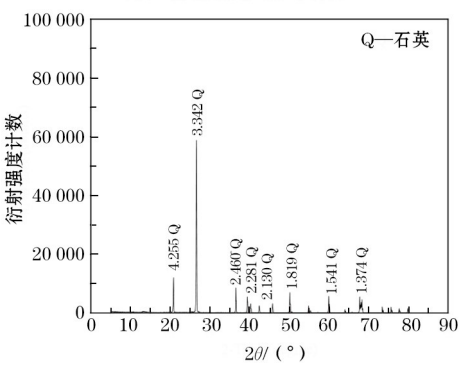
1 试验方案

1.1 试验原料

试验所用石墨纯矿物和实际矿样均取自黑龙江萝北某细鳞片石墨矿,石英纯矿物取自江西,石墨和石英纯矿物经手选、粗碎、粗磨、筛分后,取粒度为0.038~0.075 mm的物料用作试验备样。图1(a)为石墨单矿物的XRD图谱,图1(b)为石英纯矿物的XRD图谱。经测定,石墨单矿物样品的固定碳含量为95.49%,石英为纯矿物,样品均满足纯矿物浮选试验要求。



(a) 石墨纯矿物



(b) 石英纯矿物

图1 石墨和石英纯矿物XRD图谱

Fig.1 XRD patterns of pure graphite and quartz

图2为原矿XRD图谱。原矿试样的主要化学成分为SiO_2(44.80%),Al_2O_3(13.31%),CaO(7.62%),Fe_2O_3(6.68%),MgO(4.55%),K_2O

(3.96%),S(2.66%),并含有少量的 TiO_2、Na_2O、P_2O_5、MnO、V_2O_5、BaO、Cr_2O_3,表明主要脉石矿物为石英、云母、长石、绿泥石、黄铁矿。原矿的固定碳含量为 8.36%,属于低品位石墨矿。

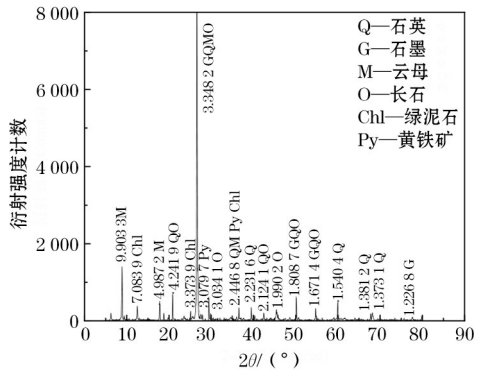


图 2 原矿 XRD 图谱

Fig.2 XRD pattern of raw ore

1.2 试剂与仪器设备

所用药剂包括:柴油、2# 油(均为工业级,取自矿山);生石灰(分析纯);试验用水为自来水。所用设备包括:XMQ-Φ150×50 型锥形球磨机、XFD-IV 型单槽浮选机、WH-Ⅱ湿式振动筛、SRJX-4-13 高温箱式电阻炉、KQ3200DE 型数控超声波发生器。

1.3 试验研究方法

1.3.1 纯矿物浮选试验

纯矿物浮选试验在 XFG 挂槽式浮选机里进行,每次试验称取矿样 10 g(其中人工混合矿的石墨与石英质量之比为 3∶1)。将单矿物或混合矿样置于装有 120 mL 去离子水的浮选槽中,搅拌 3 min 后,依次添加捕收剂和起泡剂进行浮选。在超声波预处理试验中,添加捕收剂后进行超声预处理,之后继续搅拌 3 min,再添加起泡剂进行浮选。刮泡时间为 4 min,浮选结束后,将泡沫产品过滤、烘干、称重,并计算回收率。

1.3.2 Warren 法测量真浮选及脉石夹带的量

通过测定浮选过程中的水回收率,并拟合出水回收率与矿物回收率的回归直线[19],以该直线的斜率为夹带率,截距表示真浮选回收率。水回收率按式(1)计算,脉石矿物的总回收率按式(2)计算。浮选刮泡过程按时间划分为 7 个阶段:0~0.25 min、0.25~0.5 min、0.5~1 min、1~1.5 min、1.5~2 min、2~3 min、3~4 min。

$$R_w=\frac{M_1-M_2}{M_w} \tag{1}$$

式中:R_w 为水回收率,%;M_1 为泡沫产品湿重,g;M_2 为泡沫产品干重,g;M_w 为实际消耗的水的质量,g。

在一定时间内,通过阶段水回收率和阶段脉石矿物回收率计算阶段夹带因子 $e(t)$ 及累计夹带因子 $e^c(t)$,计算公式分别见式(2)和式(3)。

$$e(t)=\frac{R_g(t)}{R_w(t)} \tag{2}$$

式中,$R_g(t)$、$R_w(t)$ 分别为阶段时间内脉石矿物回收率、水回收率。

$$e^c(t)=\frac{R_g^c(t)}{R_w^c(t)} \tag{3}$$

式中,$R_g^c(t)$、$R_w^c(t)$、$e^c(t)$ 分别为累计阶段时间内的脉石矿物回收率、水回收率、夹带因子。

1.3.3 实际矿浮选试验

对黑龙江萝北某细鳞片石墨矿进行“五磨六浮”开路浮选试验,超声波预处理是在常规流程的再选三至再选六作业前,增加 6 min 超声波预处理,其他浮选条件不变。试验所得精矿、中矿和尾矿经过滤、烘干后,进行取样、化验,并计算产品的产率、品位和回收率。

2 结果与讨论

2.1 纯矿物浮选试验

2.1.1 捕收剂用量对石墨和石英浮选的影响

控制柴油用量为 20 mg/L,甲基异丁基甲醇(Methgl Isobutyl Carbinol, MIBC)用量为 20 mg/L,分别对 45~75 μm 石墨和 45~75 μm 石英单矿物及人工混合矿进行浮选试验。混合矿中石墨与石英的质量比为 3∶1,通过计算浮选回收率来分析分选效果,试验结果见图 3。

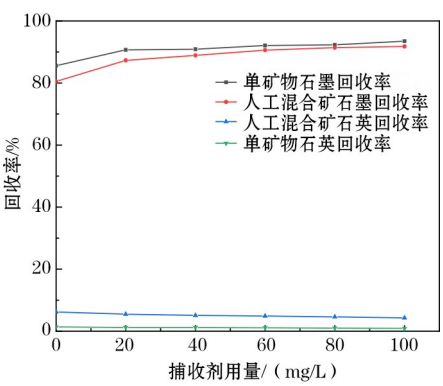


图 3 捕收剂用量对矿物回收率的影响

Fig.3 Effect of collector dosage on recovery rate of minerals

由图 3 可知,石墨单矿物浮选的回收率可达 93.5%,而石英单矿物浮选的回收率仅为0.9%,这说明石墨和石英可浮性差异大,柴油对石墨具有良好的捕收性能[20]。对比人工混合矿试验,石墨回收率从 93.5%降至 91.8%,而石英回收率从0.9%增至 4.3%,石英回收率明显增加,说明在混合矿浮选过程中,石英易通过夹带和夹杂作用随石墨进入浮选精矿,相关机制尚待进一步研究。

2.1.2 粒级对石墨和石英浮选的影响

为探索石英进入精矿的作用机制,对不同粒级石英和石墨人工混合矿进行浮选试验。控制柴油用量为 20 mg/L,MIBC 用量为 20 mg/L,分别对以下 3 组混合矿样进行试验:45～75 μm 石墨与 45～75 μm 石英、38～45 μm 石墨与 38～45 μm 石英、－38 μm 石墨与－38 μm 石英。混合矿中石墨与石英的质量比为 3∶1。通过计算浮选回收率来分析分选效果,试验结果见图 4。

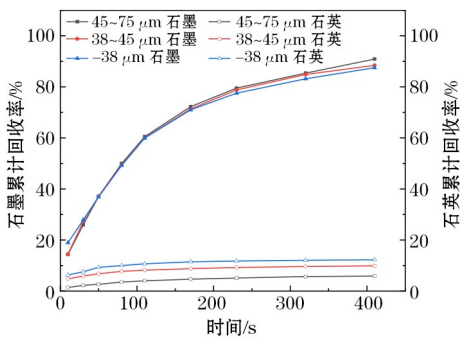


图 4 粒级对石墨和石英人工混合矿回收率的影响

Fig.4 Effect of particle size on the recovery rate of artificially mixed graphite and quartz ore

由图 4 可知,对于 45～75 μm 石墨和 45～75 μm 石英的人工混合矿来说,石墨累计回收率为 90.90%,石英累计回收率为 5.88%。随着石墨和石英颗粒粒度减小,石墨累计回收率基本不变,石英累计回收率从 5.88%增加至 12.27%。这主要是由于粒度越小的脉石矿物更易通过夹带作用进入浮选泡沫层。对－38 μm 石墨和－38 μm 石英人工混合矿浮选泡沫进行显微镜观察(见图 5)发现,石墨颗粒因疏水作用发生了明显絮团,石英颗粒被絮团包裹,这说明石英可以通过泡沫夹带和矿物夹杂的方式进入浮选精矿中,从而导致石墨精矿品质下降[21]。

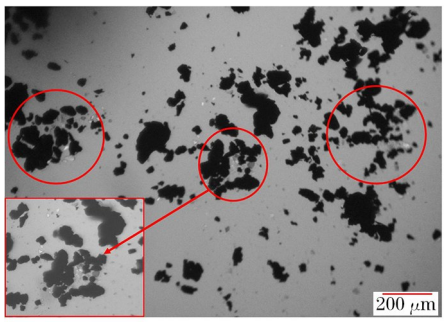


图 5 未超声波处理时石英被石墨絮团包裹

Fig.5 Quartz encapsulated by graphite flocs without ultrasonication

2.1.3 超声波处理对石墨和石英浮选的影响

以－38 μm 石墨和－38 μm 石英为试验材料,控制柴油用量为 20 mg/L,MIBC 用量为 20 mg/L,加药后采用超声波对矿浆预处理 3 min,然后进行充气浮选,研究超声时间和超声功率对石墨和石英人工混合矿浮选的影响,结果见图 6 和图 7。

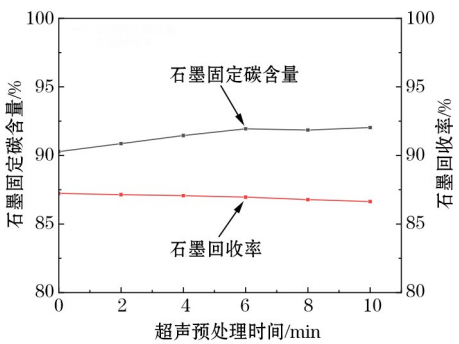


图 6 超声时间对石墨固定碳含量和回收率的影响

Fig.6 Effect of ultrasonic time on fixed carbon content and recovery rate of graphite

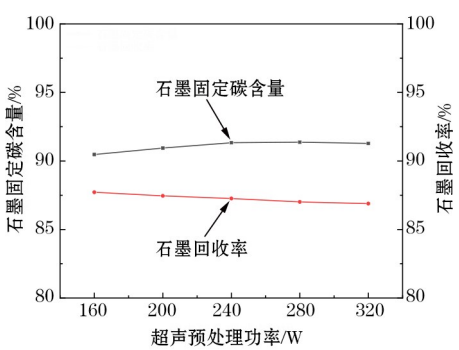


图 7 超声功率对石墨固定碳含量和回收率的影响

Fig.7 Effect of ultrasonic power on fixed carbon content and recovery rate of graphite

由图 6 可知,随着超声波预处理时间的延长,石墨的固定碳含量从 90.28%增加到 92.03%,回收率

则基本保持稳定。这主要是由于超声空化产生的界面效应随处理时间的延长而增强,促使石墨絮团逐渐分散,其中夹杂的石英颗粒随之脱落,避免石英随泡沫进入精矿;同时,超声波还可促进细鳞片石墨的层间解离,并使柴油在矿物表面分布更为均匀,从而提升了石墨的浮选品位。

由图 7 可知,随着超声波预处理功率的增加,石墨的固定碳含量从 90.47%增加到 91.28%,回收率基本保持稳定。但过大的超时功率和过长的超声时间会降低石墨粒度,对浮选过程产生不利影响。因此,超声波预处理的最佳功率确定为 240 W,超声时间为 6 min;在此条件下,人工混合矿浮选精矿的固定碳含量为 91.33%,回收率为 87.26%。采用 Warren 法对未经超声波处理及经上述超声波预处理的石墨和石英人工混合矿浮选结果进行夹带因子分析和计算,计算结果见表 1。

表 1 超声波预处理对水和石英回收率及夹带因子的影响

Table 1 Effect of ultrasonic pretreatment on recovery rates and entrainment factor of slime and quartz

浮选时间/min	无超声处理				有超声处理			
	$R_w^c(t)$/%	$R_g^c(t)$/%	$e(t)$	$e^c(t)$	$R_w^c(t)$/%	$R_g^c(t)$/%	$e(t)$	$e^c(t)$
0～0.25	6.47	4.63	0.72	0.72	6.87	3.17	0.46	0.46
0.25～0.5	10.57	6.92	0.65	0.56	10.50	4.26	0.41	0.30
0.5～1	14.46	8.18	0.57	0.32	13.25	4.97	0.37	0.26
1～1.5	17.78	9.22	0.52	0.31	15.01	5.36	0.36	0.22
1.5～2	20.77	10.09	0.49	0.29	16.68	5.70	0.34	0.20
2～3	23.01	10.71	0.47	0.28	19.03	6.09	0.32	0.17
3～4	26.16	11.14	0.43	0.14	22.08	6.48	0.29	0.13

由表 1 可知,无超声处理时,水回收率随着浮选的进行逐渐升高,最终为 26.16%;有超声处理时,水回收率下降到 22.08%。这是由于超声波预处理破坏了石墨的絮团结构,使原本夹在石墨颗粒间的水难以随石墨颗粒一起进入精矿。对于夹带因子而言,未超声处理时,0～0.25 min 阶段的夹带因子为 0.72,夹带因子＜1,这说明石英主要是通过夹带的方式进入浮选精矿[12]。随着浮选时间的增加,阶段夹带因子从 0.72 降至0.43。经过超声处理时,各阶段夹带因子均出现下降,0～0.25 min 阶段降幅最为明显,从 0.72 降至 0.46。这表明超声波预处理可以有效降低石英通过夹带方式进入精矿的量,并且在浮选前期更为显著。

为了进一步明确超声波作用下石英在石墨浮选过程中的夹带及真浮选行为,采用 Warren 法对脉石矿物的夹带及真浮选量进行测定。由于水和矿物的回收主要发生在 1.5 min 内,浮选后期的脉石矿物夹带因子相对较小,因此选择 0～1.5 min 的时间段作为拟合时间。将水的累计回收率 $R_w^c(t)$和脉石矿物的累计回收率 $R_g^c(t)$进行拟合,计算脉石矿物的真浮选量,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,有、无超声波处理情形的超声前后拟合直线的斜率分别为 0.13 和 0.55,即两种情形的石英的夹带率分别为 0.13 和 0.55,这说明超声可以减少石英通过夹带进入精矿。有、无超声波处理情形的拟合直线的截距分别为 1.36 和 2.31,即两种情形的石英真浮选回收率分别是 1.36%和 2.31%,而两种情形的石英累计回收率分别为 6.58%和 11.14%,表明石英主要通过夹带的方式进入石墨精矿。无超声处理时,人工混合矿浮选过程中 8.83%的石英通过夹带的方式进入精矿;超声处理后,人工混合矿浮选过程中 5.22%的石英通过夹带的方式进入精矿,比没有进行超声处理的情形降低了 3.61 个百分点,这说明超声波预处理能强化颗粒分散,降低水回收率,从而减少石英通过夹带方式进入石墨精矿。

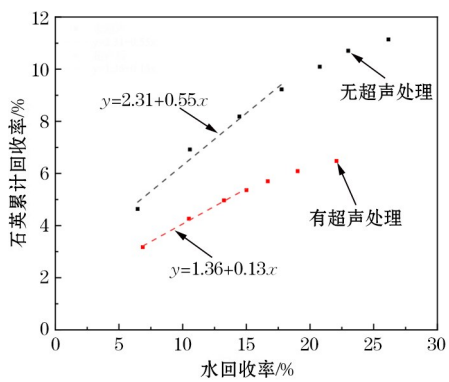


图 8 Warren 法测定的石英真浮选量及夹带率

Fig.8 The true flotation quantity and entrainment rate of quartz determined by Warren method

2.2 实际矿石开路浮选试验

以黑龙江萝北典型细鳞片石墨矿为研究对象,将粗磨粒度控制为－0.074 mm 含量占 85%,进行

“五磨六浮”开路流程试验,超声波辅助工艺用于再选三至再选六阶段,即在相应浮选试验前对浮选矿浆进行 3 min 超声预处理,随后再进行浮选,具体工艺流程见图 9,浮选结果见表 2。



图 9 细鳞片石墨“五磨六浮”开路流程对比

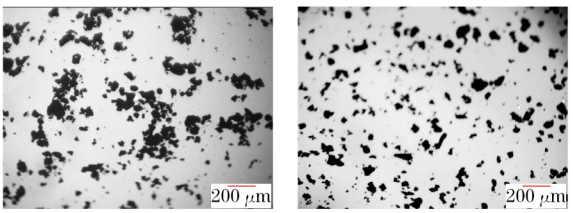
Fig.9 Comparison of open-circuit flowsheets of “five grindings and six flotations” for fine flake graphite

表 2 开路试验结果

Table 2 Results of open-circuit test

产物	无超声预处理			有超声预处理		
	产率/%	品位/%	回收率/%	产率/%	品位/%	回收率/%
精矿	5.43	91.51	83.77	4.61	94.61	81.66
中矿 1	6.51	2.64	2.90	6.65	2.15	2.68
中矿 2	2.20	6.71	2.49	1.88	6.39	2.24
中矿 3	1.14	10.70	2.05	0.52	10.47	1.03
中矿 4	0.53	20.06	1.79	0.24	19.52	0.86
中矿 5	0.22	25.59	0.94	0.18	20.25	0.68
中矿 6	0.08	58.51	0.79	0.05	71.83	0.65
尾矿	83.89	0.37	5.27	85.87	0.63	10.20
原矿	100.00	5.76	100.00	100.00	5.80	100.00

由表 2 可知,黑龙江萝北细鳞片石墨经无超声预处理的常规“五磨六浮”开路流程处理后,可获得品位为 91.51%、回收率为 83.77%的石墨精矿。在该浮选流程中,随着阶段磨选的进行,石墨精矿品位逐渐提高,但提升幅度呈下降趋势。进一步分析发现,再选二到再选三时精矿品位从 56.75%增加到 71.66%,增幅明显减缓。对再选三的粗精矿进行体式显微镜观察(结果见图 10),可见细鳞片石墨已基本单体解离,未见明显脉石连生体,但石墨颗粒间存在明显絮团,少量石英和云母颗粒被石墨絮团包裹,通过夹带和夹杂的方式进入精矿,影响石墨与脉石矿物有效分离。为此,在再选三阶段引入超声波辅助工艺。经超声处理后,再选五矿浆的石墨固定碳含量可达 91.62%,此时回收率为 82.98%,与无超声预处理的“五磨六浮”最终精矿指标较为接近。对比两种浮选开路流程,在超声波辅助条件下,通过“五磨六浮”的浮选流程,最终可获得固定碳品位为 94.61%、回收率为81.66%的精矿,精矿的固定碳含量较无超声预处理的情形提高了 3.10 个百分点。



（a）无超声处理　（b）有超声处理

图 10　有、无超声处理的再选三精矿显微镜图

Fig.10　Microscopic images of the third concentrate with and without ultrasonication in re-cleaning process

综上所述，在石墨阶段磨浮流程后段，随着磨矿作用的增强，石墨粒度进一步细化。细粒石墨易发生絮团，使更多脉石因夹带进入精矿。超声波技术则能有效改善这一状况：其空化效应可在矿浆中产生大量的微泡，微泡破裂时释放的冲击波和剪切力能够打破细粒石墨絮团，增强矿物颗粒的分散，从而降低浮选水回收率与石英等脉石的夹带。同时，超声波的机械效应能够产生高频振动和强烈的冲击力，有助于促进细粒石墨的进一步解离，为提升精矿品位创造有利条件。此外，超声波的热效应会引起矿浆局部区域温度升高，该变化有助于捕收剂柴油的乳化与分散，进而提高选矿效率。正是由于超声波的空化效应、机械效应和热效应的协同作用，使得超声波辅助工艺在缩短石墨磨浮流程、提高石墨精矿品位等方面表现出显著优势，具有广阔的应用前景。

3　结论

（1）纯矿物浮选试验表明，石墨颗粒在疏水作用力下会形成稳定的絮团结构。石英脉石会以夹带或夹杂的方式进入精矿，且颗粒粒度越细，石英累计回收率越高。在－38 μm 石墨和－38 μm 石英组成的人工混合矿浮选中，石英累计回收率可达 12.27%。

（2）超声波辅助工艺可通过降低水回收率、分散紧密聚集的石墨絮团并释放其中夹杂的脉石这两种方式，有效减少通过夹带或夹杂进入精矿的石英，从而提高精矿固定碳含量。试验确定了人工混合矿的最佳超声预处理条件为超声功率 240 W、超声时间 6 min，该条件下人工混合矿浮选精矿固定碳含量为 91.33%，回收率为 87.26%。

（3）采用“五磨六浮”的开路浮选流程，并在再选三至再选六浮选前进行超声预处理 3 min，可获得固定碳含量为 94.61%、回收率为 81.66%的石墨精矿，精矿的固定碳含量较无超声处理提高了 3.10 个百分点。结果表明，超声波辅助工艺有助于简化浮选流程，提高石墨精矿品位，具有较好的应用前景。

参考文献(References)：

[1]　中华人民共和国自然资源部.2022 年中国矿产资源报告[R].2023.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2022 China Mineral Resources Report[R]. 2023.

[2]　刘谦.国内石墨产业的延展与思考[J].科技与创新，2020(19)：33-35.
LIU Qian. Extension and thinking of the domestic graphiteindustry[J]. Science and Technology & Innovation，2020(19)：33-35.

[3]　饶娟，张盼，何帅，等.天然石墨利用现状及石墨制品综述[J].中国科学：技术科学，2017，47(1)：13-31.
RAO Juan，ZHANG Pan，HE Shuai，et al. A review on the utilization of natural graphite and graphite-based materials[J]. Scientia Sinica (Technologica)，2017，47(1)：13-31.

[4]　刘超，赵汀，刘胜前，等.2025—2035 中国天然石墨资源需求预测[J].中国矿业，2024，33(7)：78-88.
LIU Chao，ZHAO Ting，LIU Shengqian，et al. Demand prediction of natural graphite resources in China from 2025 to 2035[J]. China Mining Magazine，2024，33(7)：78-88.

[5]　任衍增，高惠民，任子杰，等.不同嵌布粒度的鳞片石墨浮选速率研究[J].中国矿业，2017，26(7)：116-120.
REN Yanzeng，GAO Huimin，REN Zijie，et al. Study on the flotation rate of flake graphite with different dissemination size[J]. China Mining Magazine，2017，26(7)：116-120

[6]　尤大海，贺爱平，李国栋.石墨浮选技术研究进展[J].现代矿业 2020，36(8)：130-134＋142.
YOU Dahai，HE Aiping，LI Guodong. Research progress of graphite flotation technology[J]. Modern Mining，2020，36(8)：130-134＋142.

[7]　梁文博，张凌燕，邱杨率，等.缅甸某地大鳞片石墨矿选矿试验研究.[J].非金属矿，2022，45(6)：74-79.
LIANG Wenbo，ZHANG Lingyan，QIU Yangshuai，et al. Experimental research on beneficiation of large flake graphite ore in a certain place in Myanmar[J]. Non-Metallic Mines，2022，45(6)：74-79.

[8]　胡小春，周立波，吕良，等.敖包山晶质石墨矿工艺矿物学及选矿实验研究.[J].矿产保护与利用，2024，44(5)：107-113.
HU Xiaochun，ZHOU Libo，LYU Liang，et al. Study on process mineralogy and purification of Aobao mountain graphite ore from Jiuquan，Gansu Province[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2024，44(5)：107-113.

[9]　崔伟勇，张灵，李永利，等.非洲某鳞片石墨矿梯级回收工艺研究.[J].矿冶工程，2024，44(3)：44-47＋52.

CUI Weiyong, ZHANG Ling, LI Yongli, et al. Beneficiation of flake graphite ore from Africa for staged recovery[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2024,44(3):44-47+52.

[10] 李鲁笑,刘政,钱玉鹏,等.鳞片石墨粗磨粗选阶段杂质分布规律研究.[J].非金属矿,2024,47(2):19-23.
LI Luxiao, LIU Zheng, QIAN Yupeng, et al. Study on migration rule of impurities during coarse grinding and roughing of flake graphite[J]. Non-Metallic Mines,2024,47(2):19-23.

[11] SMITH P G, WARREN L J. Entrainment of particles into flotation froths [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review,1989,5(1):123-145.

[12] ZHENG X, JOHNSON N W, FRANZIDIS J P. Modelling of entrainment in industrial flotation cells: water recovery and degree of entrainment[J]. Mineral Engineering, 2006(11):1191-1203.

[13] GUO Wenyu, PENG Bo. Ultrasonic oscillations induced property development of water-bentonite suspension containing sulfonated wood coal[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2021, 11(5): 2179-2190.

[14] ZHAO Yue, MENG Liang, SHEN Xiaoning. Study on ultrasonic-electrochemical treatment for difficult-to-settle slime water [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 64:104978.

[15] SAHINOGLU E, UALU T. Effects of various parameters on ultrasonic comminution of coal in water media[J]. Fuel Processing Technology,2015,137:48-54.

[16] GHADYANI A, NOAPARAST M, SHAFAEI TONKABONI S Z. A study on the effects of ultrasonic irradiation as pretreatment method on high-ash coal flotation and kinetics[J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization,2018,38(7):374-391.

[17] ZHOU Zhaoqi, TONG Zheng, DONG Lisha. A comparative study on the influence of single and combined ultrasounds assisted flake graphite flotation [J]. Ultrasonics Sonochemistry,2023,99:106551.

[18] 丁大发.坦桑尼亚大鳞片石墨浮选试验研究[D].武汉:武汉理工大学,2022.
DING Dafa. Experimental study on flotation of large flake graphite from Tanzania[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2022.

[19] 邱杨率.鳞片石墨浮选行为及新工艺研究[D].武汉:武汉理工大学,2016.
QIU Yangshuai. Study on flotation behavior and new technology of flake graphite[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2016.

[20] 刘淑贤,徐平安,苏严.河北某地细粒石墨矿工艺矿物学及选矿工艺研究.[J].矿产综合利用,2021,2(1):157-165.
LIU Shuxian, XU Ping'an, SU Yan, et al. Study on process mineralogy and concentrating of the graphite ore in Hebei [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2021,2(1):157-165.

[21] ZHOU Shaoqi, WANG Xuexia, BU Xiangning. Effects of emulsified kerosene nanodroplets on the entrainment of gangue materials and selectivity index in aphanitic graphite flotation[J]. Minerals Engineering,2020,158:106592.