

超声对萝北石墨浮选不同段数浮选效果的影响

康文泽¹, 卢万里¹, 张宝成²

(1. 黑龙江科技大学矿业工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022; 2. 鹤岗煤炭和石墨烯检测实验室, 黑龙江 鹤岗 154103)

摘要: 这是一篇矿物加工工程领域的论文。为了探讨超声预处理对石墨浮选不同段数浮选效果的影响, 进行了不同超声时间对石墨粗选、精选的影响实验。研究结果表明: 当矿石中含有易泥化矿物时, 超声预处理不能提高石墨粗选效果。超声预处理精选2段、4段、6段的浮选效果与常规精选相比, 随着超声预处理时间的增加, 石墨精选效果逐渐提高, 当超声预处理2.5 min时, 石墨精选效果较好。在逐段超声精选实验中, 超声预处理0.5 min时, 对精选1~4段作用效果不明显, 对精选5段、精选6段有一定效果; 超声预处理2.5 min时, 对每一精选段均有明显效果, 超声预处理精选效果的排序是超精5>超精6>超精4>超精3>超精2>超精1。研究证明, 在石墨精选的后段进行超声预处理的浮选效果优于前段。

关键词: 矿物加工工程; 超声预处理; 粗选; 精选; 回收率

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.03.007

中图分类号: TD97 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 03-0043-07

引用格式: 康文泽, 卢万里, 张宝成. 超声对萝北石墨浮选不同段数浮选效果的影响[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(3): 43-49.

KANG Wenzhe, LU Wanli, ZHANG Baocheng. Effect of ultrasound on graphite flotation of different stages of Luobei[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(3): 43-49.

石墨是碳的一种结晶形态, 具有六方晶格, 呈层状排列, 同层晶面上碳原子间是共价键结合, 层与层间是分子键结合, 基于其特殊的结构, 石墨可作为保温、阻燃、密封、导电等材料使用^[1-2], 还广泛应用于国防军工、航空航天等领域^[3]。2004年, 英国曼彻斯特大学的安德烈·盖姆和康斯坦丁·诺沃肖洛夫^[4]用微机械剥离法成功分离出稳定的单层石墨烯, 由于石墨烯具有优异的特性, 使石墨烯在传感器、半导体、显示及储能、快充技术领域显示出独特的优势^[5-6]。高纯石墨是制备石墨烯的主要原料, 石墨烯产业的快速发展, 加大了市场对高纯度石墨的需求。

随着对高纯度天然石墨需求的增加, 对石墨提纯技术提出了更高的要求。人们探索各种方法去除石墨中的杂质, 如浮选法、碱熔酸浸法、氢

氟酸法、混酸法、氯化焙烧法、高温法等方法^[7-8]。为了节约成本, 氯化焙烧法、酸碱法、氢氟酸法等提纯方法通常需要石墨碳含量高于90%, 这样提纯才有经济效益。将石墨从低品位矿石提高到碳含量90%精矿, 较经济和有效的方法是浮选法^[9]。为了提高石墨浮选的效果, 人们尝试使用新方法强化石墨的浮选, 如超声波强化法。C·勒特马瑟等^[10]研究了石墨的浮选过程, 并报道了超声波处理对其浮选效果的影响, 超声波处理使药剂在悬浮液中分布更均匀, 提高试剂的作用。Santosh D.^[11]研究了低频超声增强低品位石墨矿中片状石墨粉化性的可行性, 研究显示超声波可以提高精矿的纯度并降低精矿的灰分含量。笔者^[12]曾研究了超声预处理对石墨精选后期浮选效果的影响, 与常规浮选相比, 超声预处理后浮选

收稿日期: 2022-08-10

基金项目: 黑龙江省人保厅领军人才梯队资助项目

作者简介: 康文泽 (1964-), 男, 教授, 主要从事煤炭及石墨的加工利用研究工作。

精矿的碳含量、回收率分别提高了 3.22%、9.15%。超声预处理是一种理想的强化浮选手段，本文重点研究超声预处理对石墨浮选不同段数浮选效果的影响。

1 试样及实验条件

1.1 矿样的来源及矿物组成分析

矿样采自黑龙江萝北某石墨选矿厂，矿石粒度较大，对矿石进行粗碎、中碎和细碎，然后用 0.6 mm 的圆筛手筛，筛下为实验用样。样品平均碳含量为 16.52%。可能是由于石墨解离效果较好，碳含量升高。

对样品进行 ICP 元素分析、X-射线衍射分析，矿石矿物组成以石英、白云母、长石、透闪石为主，其次为少量的磁黄铁矿、斜黝帘石、方解石、绿泥石等。矿物相对含量见表 1。

表 1 矿石的矿物组成及相对含量			
Table 1 Mineral composition and relative content of ores			
矿物名称	相对含量/%	矿物名称	相对含量/%
石墨	16.69	石英	21.58
磁黄铁矿	3.98	长石	12.02
黄铁矿	0.99	白云母	13.54
钛铁矿	0.41	透闪石	14.02
磷灰石	0.24	斜黝帘石	7.18
楣石	0.75	方解石	4.01
黑云母	1.91	绿泥石	1.95
其余矿物	0.73	总计	100.00

注: 本数据在矿冶科技集团有限公司国家重点实验室完成

1.2 浮选实验及超声预处理实验

使用 1.0LXFD 型挂槽式浮选机，转速为 2000 r/min，充气量为 90 L/h。捕收剂为柴油、煤油，起泡剂为仲辛醇，粗选矿浆浓度为 17%。

超声预处理实验，超声波设备的型号 FB-1200DT，频率 25 KHz，功率 1200 W，预处理槽尺寸 370 mm×160 mm×100 mm。将 250 mL 水和 250 g 矿石样混合，进行磨矿，然后矿浆装入长方形容器，容器置于预处理槽中进行超声预处理，冷却到室温后再进行浮选。

2 鳞片石墨常规浮选

2.1 粗选实验

在粗选条件实验中，分别进行磨矿时间实

验、捕收剂选择及用量实验、起泡剂用量实验，最终确定的粗选参数是磨矿时间 8 min，捕收剂为煤油和柴油混合用药，煤油用量 16 g/t，柴油用量 48 g/t，起泡剂仲辛醇用量 6 g/t。按照以上参数进行粗选实验，结果见表 2。

表 2 粗选实验结果			
Table 2 Test results of roughing			
产品名称	产率/%	碳含量/%	回收率/%
精矿	31.65	43.11	84.96
尾矿	68.35	3.54	15.04
原矿	100.00	16.06	100.00

2.2 精选实验

首先进行精选再磨时间、再磨段数、精选段数实验，要求最终精矿的碳含量大于 90%，同时较大限度地提高石墨的回收率。经过大量实验确定精选流程为五次精磨，每次磨矿时间为 5 min，六次精选，开路流程见图 1，实验结果见表 3。

3 石墨超声预处理浮选实验研究

3.1 超声预处理对石墨粗选的影响

按照以上石墨粗选实验条件，首先对矿石进行粗磨，然后进行超声预处理，待矿浆冷却至室温后进行粗选实验，超声预处理时间与粗选精矿产率、碳含量、回收率的关系曲线见图 2。

从图 2 可以看出，与未超声处理相比，随着超声预处理时间的增加，粗选精矿的产率波动上升，而精矿的碳含量和回收率一直下降。石墨的工艺矿物学研究可知，矿石中含绿泥石，绿泥石是一种特殊的 2:1 型含水层状铝硅酸盐矿物，绿泥石较易泥化，超声预处理加速了其泥化，使矿浆粘度增大，恶化了石墨粗选效果。另外泥化后的细泥“罩盖”在石墨表面，导致粗选精矿碳含量降低。实验操作中发现，超声预处理后泥化的细泥几乎是“镶嵌”在容器底面，用尖锐的利器才能剥离；粗选后的尾矿真空过滤难度增大，其真空过滤时间是未处理粗选尾矿的 3~4 倍，粗选精矿真空过滤时间也明显变长。主要原因是矿石与水的液固比仅为 1:1，矿石沉在容器的底部，在超声波的振动作用下，细泥颗粒密实地聚集在一起；细泥颗粒在过滤过程中“粘”在滤纸上，增大了过滤的阻力，使过滤时间延长。以上研究显示，超声预处理不能提高石墨粗选效果。

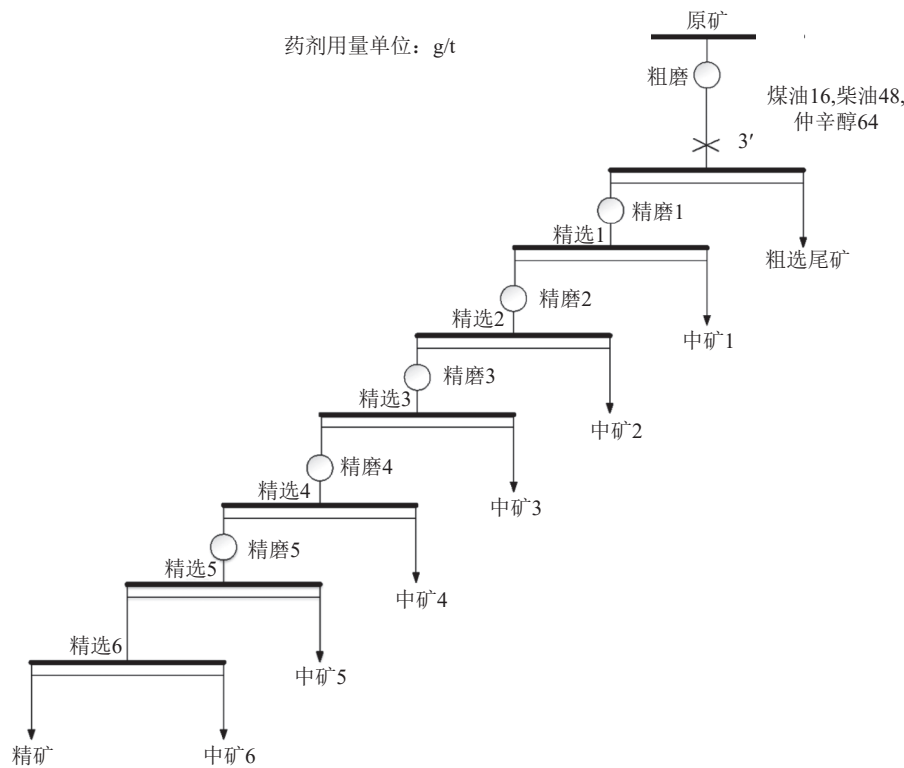


图 1 石墨浮选开路流程

Fig.1 Graphite flotation open circuit process

表 3 开路流程实验结果

Table 3 Test results of open circuit process

指标	原矿	粗精	粗尾	精1	中矿1	精2	中矿2	精3	中矿3	精4	中矿4	精5	中矿5	精矿	中矿6
产率/%	100.00	32.74	67.26	21.55	11.19	16.17	5.38	13.34	2.83	11.23	2.11	8.60	2.63	6.32	2.28
品位/%	16.42	42.65	3.65	61.60	6.15	76.69	16.25	84.71	38.85	88.85	62.70	91.34	80.70	91.75	90.20
本级回收率/%	100.00	85.05	14.95	95.07	4.93	93.41	6.59	91.12	8.88	88.30	11.70	78.74	21.26	73.81	26.19

注：本级回收率为某段精矿中有用矿物占本段入料中有用矿物的百分率。

3.2 超声预处理对石墨精选的影响

3.2.1 不同超声时间对石墨精选段数的影响

在探究不同超声时间对石墨精选段数的影响中，其中精选 2 段、精选 4 段和精选 6 段前进行超声预处理，冷却至室温后浮选，其他段数为常规精选。不同超声预处理时间获得最终精矿的产率、碳含量及回收率见图 3。

图 3 表明，与未超声处理相比，超声预处理后的精矿产率、碳含量和回收率均有明显提高，超声预处理大于 1 min 的碳含量均超过了 94%，随着超声预处理时间的增加，精矿产率和回收率逐渐增大，在超声预处理 2.5 min 时达到较大值，此时精矿的碳含量为 94.48%，回收率为 46.14%。

按照石墨精选流程各段的精矿和中矿，可以计算不同精选段的本级回收率。超声预处理的是

精选 2、精选 4 和精选 6，超声预处理时间与各精选段数本级回收率的关系曲线见图 4。

从图 4 可知，随着超声预处理时间的增加，精选 2 段、精选 4 段、精选 6 段的本级回收率逐渐提高，超声预处理 3 min 时，精选 2 段的本级回收率达到较大值，超声预处理 2.5 min 时，精选 4 段和精选 6 段的本级回收率达到较大值。由此看出精选段数小的初期，需要更长的超声预处理时间，精选 4 段以后超声预处理时间并不是越长越好。如果把精选 2 段、精选 4 段、精选 6 段各点模拟成一个直线，在 origin 中可计算出模拟直线的斜率。精选 2 段、精选 4 段、精选 6 段的斜率分别为 0.66、2.25、3.09，由此看出，精选 6 段斜率较大，其次是精选 4 段和精选 2 段，在本图中斜率反映超声预处理时间对本级回收率提高的程

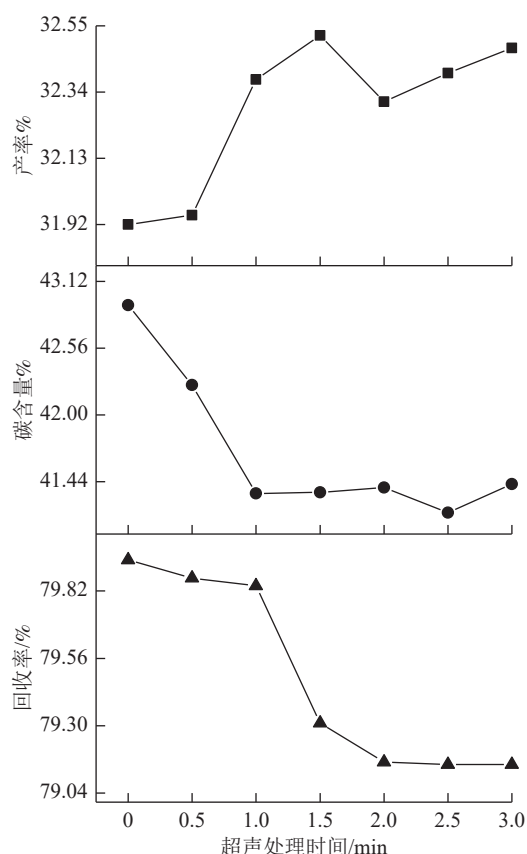


图2 超声预处理时间与粗选效果关系

Fig.2 Relationship between ultrasonic pretreatment time and rough selection effect

度,斜率越大,超声预处理后本级回收率提高的幅度越大,超声预处理的效果越好,由此看出超声预处理精选效果的排序是精选6段>精选4段>精选2段。由此看出超声预处理的时间一样,处理的段数不同精选效果不同,为了研究超声预处理对不同精选段数的影响,逐段进行了超声预处理的精选实验。

3.2.2 逐段超声预处理对石墨精选的影响

实验结果表明,超声预处理的较佳时间为2.5 min,而最小超声预处理0.5 min也有一定效果。

1) 逐段超声预处理0.5 min

取6个独立的实验样本进行不同段数的超声精选实验,超声预处理时间均为0.5 min。样本1在精选1段进行超声预处理后精选,其他段数为正常的精选,依次类推,分别进行了6个独立样本的开路实验。各精选段的本级回收率见表4。

从表4可知,在精选1~4段的本级回收率中,超声预处理0.5 min的样本所在精选段的本级回收率并不比常规精选高,在超声预处理的精选

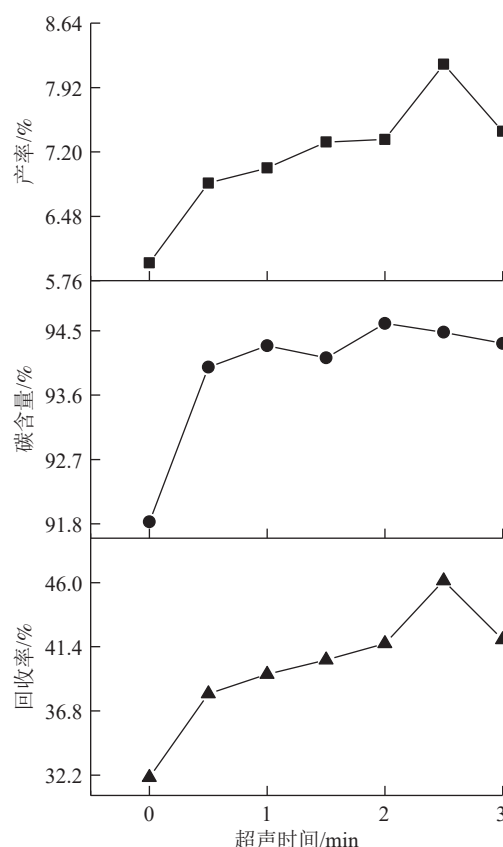


图3 不同超声预处理时间石墨精选效果

Fig.3 Graphite cleaning effect of different ultrasonic pretreatment time

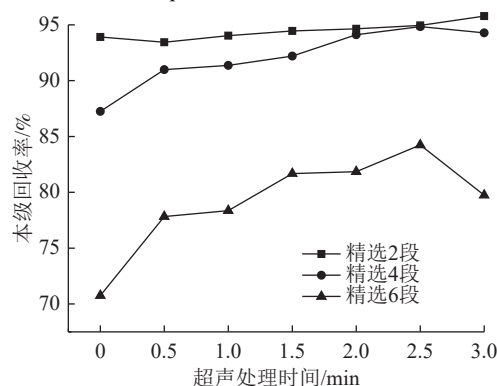


图4 超声预处理时间对本级回收率影响

Fig.4 Effect of ultrasonic pretreatment time on the recovery rate of this grade

5段、精选6段的本级回收率比常规精选高,说明超声预处理0.5 min时,对精选1~4段作用效果不明显,对精选5段、精选6段有一定效果。可能是由于精选1~4段的石墨碳含量不高,矿物杂质含量大、硬度大,超声预处理0.5 min时间较短,超声预处理的效果不明显;精选后期精矿产物的碳含量较高,杂质含量及硬度降低,超声预处理0.5 min也有一定效果。

表4 超声预处理 0.5 min 石墨精选各段的
本级回收率/%

Table 4 Recovery rate of each stage of graphite cleaning by
ultrasonic pretreatment for 0.5 min

精选段数	未超声	样本1	样本2	样本3	样本4	样本5	样本6
精选1段	94.71	94.64	94.76	95.42	94.63	94.80	94.68
精选2段	93.58	94.02	94.28	94.31	94.41	93.87	94.22
精选3段	93.59	93.36	93.20	93.36	92.20	93.04	93.35
精选4段	90.57	89.51	88.63	91.74	89.18	91.19	90.51
精选5段	82.26	80.35	79.67	78.85	84.55	84.96	84.09
精选6段	77.94	76.87	72.14	75.85	74.39	80.03	83.22

以上进行了6个独立样本超声预处理0.5 min不同段数精选的开路实验，表4只列出了不同精选段数的本级回收率，为了判断超声预处理对那个精选段效果最好，这里我们用开路实验的最终精矿指标来评价，并与未超声预处理的开路实验结果作为对照。将样本1的超声预处理精选1段简称超精1，样本2的超声预处理精选2段简称超精2，其他依次类推，未进行超声预处理的样本记做未超声，以未超声、超精1、超精2、超精3、超精4、超精5、超精6为横轴，开路流程获得的最终精矿的产率、碳含量和回收率为纵轴，绘制不同条件下最终精矿指标变化曲线，见图5。

从图5看出，与未超声相比，超精1至超精4的产率波动上升，碳含量、回收率低于未超声，超精5、超精6的产率、回收率明显高于未超声，碳含量也逐渐高于未超声。综合最终精矿回收率和碳含量，超声预处理精选6段的浮选效果较好，其次是超声预处理精选5段，而超声精选4段、精选3段、精选2段和精选1段的精选效果并不明显。分析原因可能与不同精选段数产物的碳含量有关，按照表3中的数据可计算出不同精选段数精矿的碳含量，精矿5、精矿4、精矿3、精矿2、精矿1碳含量的计算结果分别为91.34%、88.85%、84.71%、76.69%和61.60%。从以上数据看出，随着精选段数的增加，精矿碳含量逐渐增大，精选1~4段的碳含量不高，矿石的硬度大，超声预处理0.5 min时，由于输入的能量较小，不足以提高石墨精选效果，精选5、6段的碳含量均超过了90%，碳含量较高，超声预处理0.5 min也产生了一定效果。

2) 逐段超声预处理 2.5 min

取6个独立的实验样本，进行超声预处理时间均为2.5 min不同段数的精选实验，实验设计与

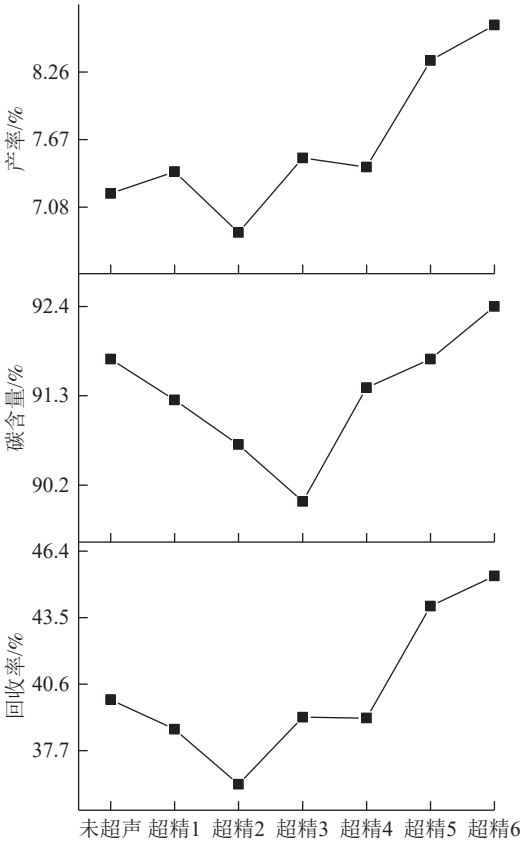


图5 超声预处理 0.5 min 最终精矿指标变化曲线

Fig.5 Change curve of final concentrate index after ultrasonic
pretreatment for 0.5 min

0.5 min的一致，分别进行了6个独立样本的开路实验。各精选段的本级回收率见表5（图中字体加粗部分为超声预处理后的精选结果）。

表5 超声预处理 2.5 min 精选各段的本级回收率/%
Table 5 Recovery rate of each stage selected by ultrasonic
pretreatment for 2.5 min

本级回收率	未超声	样本1	样本2	样本3	样本4	样本5	样本6
精选1段	94.71	95.28	94.93	94.80	94.60	94.59	94.91
精选2段	93.58	93.48	94.52	94.31	93.81	94.08	94.27
精选3段	93.59	93.23	93.43	95.82	93.66	94.16	94.32
精选4段	90.57	92.22	92.99	93.18	93.67	90.60	90.71
精选5段	82.26	82.26	83.47	83.85	83.68	88.89	83.98
精选6段	77.94	78.43	79.53	79.80	80.29	79.51	84.53

从表5看出，与超声预处理0.5 min的效果不同，在超声预处理2.5 min时，样本所在精选段的本级回收率均比常规精选高，超声预处理时间增长后，每个精选段的本级回收率都得到了明显提高。有研究显示^[13]，在石墨精选阶段超声预处理不仅能清除石墨表面的杂质，还能提高了石墨的疏水性。当超声预处理2.5 min时，超声波作用于

矿浆的能量足够大,即便精选前期入料的碳含量低、杂质含量大、硬度大,超声预处理也有明显效果。

与逐段超声预处理 0.5 min 的设计相同,进行了超声预处理时间为 2.5 min 开路实验,比较了最终精矿指标,以未超声、超精 1、超精 2、超精 3、超精 4、超精 5、超精 6 为横轴,开路流程获得的最终精矿的产率、碳含量和回收率为纵轴,绘制不同条件下最终精矿指标变化曲线,见图 6。

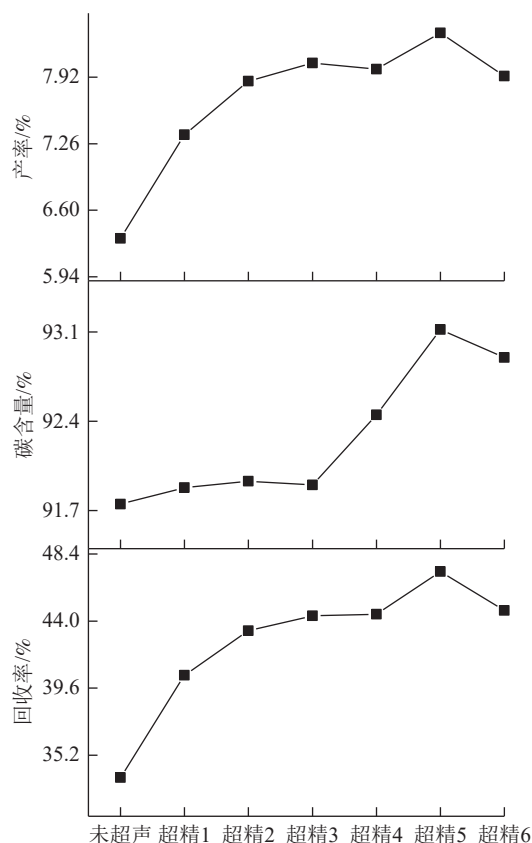


图6 超声预处理时间为 2.5 min 最终精矿指标变化
Fig.6 Change of final concentrate index after ultrasonic pretreatment for 2.5 min

从图 6 看出,随着超声预处理段数的增加,精矿产率逐渐增大,在超声预处理精选 5 段时达到了较大值;精矿碳含量在超声预处理精选 1~3 段缓慢增大,在超声预处理精选 3 段以后精矿的碳含量有了较大幅度的提高,而回收率是在超声预处理精选 1 段以后有了较大幅度的提高,碳含量和回收率也都在超声预处理精选 5 段达到较大值,综合最终精矿回收率和碳含量,超声预处理精选 5 段的浮选效果较好,其次是超声预处理精选 6 段、精选 4 段、精选 3 段、精选 2 段、

精选 1 段。与超声 2.5 min 不同,超声 0.5 min 时,精选 6 段的效果较好。这可能是由于超声 0.5 min 时输入矿浆的能量较小,对碳含量高,硬度小,作用效果好。

以上研究显示,超声 0.5 min 时,精选 1~4 段的精选效果并没有发生显著的变化,精选 5 段、精选 6 段有一定效果;而超声 2.5 min 时,对每一段精选效果都有明显改善。超声预处理 2.5 min 时,综合逐段开路实验最终精矿指标,超声预处理精选效果的排序是超精 5>超精 6>超精 4>超精 3>超精 2>超精 1。

4 结 论

(1) 在不同超声时间的石墨粗选实验中,与常规粗选相比,随着超声预处理时间的增加,粗选精矿的产率波动上升,而精矿的碳含量和回收率下降,研究证明,当矿石中含有易泥化矿物时,超声预处理不能提高石墨粗选效果。

(2) 在超声预处理精选 2 段、4 段、6 段的实验中,与常规精选相比,随着超声预处理时间的增加,最终精矿的产率、碳含量和回收率逐渐增大;当超声预处理时间为 2.5 min 时,精矿的产率、回收率达到较大值。超声预处理 2.5 min 石墨精选的效果较好。

(3) 在逐段超声对石墨精选的影响实验中,超声预处理 0.5 min 时,对精选 1~4 段作用效果不明显,对精选 5 段、精选 6 段有一定效果;超声预处理 2.5 min 时,对每一精选段均有明显效果,超声预处理精选效果的排序是超精 5>超精 6>超精 4>超精 3>超精 2>超精 1。

参考文献:

- [1] 时虎. 石墨的开发及其应用[J]. 化工科技市场, 2001(12):24-27.
- [2] SHI H. Development and application of graphite[J]. Chemical Technology Market, 2001(12):24-27.
- [3] 李飞, 高伦, 彭成龙, 等. 小鳞片膨胀石墨的制备及电化学性能[J]. 矿产综合利用, 2022(2):154-157.
- [4] LI F, GAO L, PENG C L, et al. Preparation and electrochemical properties of small flake expanded graphite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(2):154-157.
- [5] 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 J, ZHANG P, HE S, et al. A review on the utilization of natural graphite and graphite-based materials[J]. *Sci Sin Tech*, 2017, 47(1):13-31.

[4] K S Novoselov, A K Geim, S V Morozov, et al. Elctetric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, 306(5696):666-669.

[5] 冯涛, 陈文革, 栗雯琦, 等. 石墨烯的组织性能、改性处理及应用前景[J]. *功能材料*, 2020, 51(4):4028-4039.

FENG T, CHEN W G, LI W Q, et al. Microstructure properties, modification treatments and application prospects of grapheme[J]. *Journal of Functional Materials*, 2020, 51(4):4028-4039.

[6] 黄毅, 陈永胜. 石墨烯的功能化及其相关应用[J]. *中国科学 (B 辑: 化学)*, 2009, 39(9):887-896.

HUANG Y, CHEN Y S. Functionalization of graphene and their applications[J]. *Science in China(Part B: Chemistry)*, 2009, 39(9):887-896.

[7] 李亚, 初静波, 王英凯, 等. 黑龙江某晶质石墨风化样分选实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(3):39-42.

LI Y, CHU J B, WANG Y K, et al. Experimental study on separation of weathering flake graphite ore in Heilongjiang province[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(3):39-42.

[8] 罗立群, 谭旭升, 田金星. 石墨提纯工艺研究进展[J]. *化工进展*, 2014, 33(8):2110-2116.

LUO L Q, TAN X S, TIAN J X. Research progress of graphite purification[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2014, 33(8):2110-2116.

[9] 仝忠蕴, 刘磊, 袁致涛. 鸡西地区晶质石墨保护大鳞片新工艺技术研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(6):53-58.

GONG Z Y, LIU L, YUAN Z T. Study on new technology of crystalline graphite to protect large flake in Jixi Area[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(6):53-58.

[10] C·勒特马瑟, 崔洪山, 肖力子. 应用超声波强化泡沫浮选[J]. *国外金属矿选矿*, 2002(10):21-25.

C·LETMATHE, CUI H S, XIAO L Z. Application of ultrasonic wave to enhance foam flotation[J]. *Metallic Ore Dressing Abroad*, 2002(10):21-25.

[11] S D Barma, P K Baskey, D S Rao, et al. Ultrasonic-assisted flotation for enhancing the recovery of flaky graphite from low-grade graphite ore[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019(56): 386-396.

[12] 康文泽, 李会建. 超声预处理对石墨精选效果的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(6):1193-1198.

KANG W Z, LI H J. Effect of ultrasonic pretreatment on cleaner flotation of graphite[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(6):1193-1198.

[13] Kang Wenze, Li Huijian. Enhancement of flaky graphite cleaning by ultrasonic treatment[J]. *Royal Society Open Science*, 2019, 6:191160.

Effect of Ultrasound on Graphite Flotation of Different Stages of Luobei

KANG Wenze¹, LU Wanli¹, ZHANG Baocheng²

(1. Institute of Mining Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, Heilongjiang, China; 2. Coal and Graphene Testing Laboratory of Hegang, Hegang 154103, Heilongjiang, China)

Abstract: This is an article in the field of mineral processing engineering. In order to explore the influence of ultrasonic pretreatment on the graphite flotation process of different stages, tests on the effects of different ultrasonic time on the roughing and cleaning of graphite were carried out. The research results show that when the ore contains muddy minerals, ultrasonic pretreatment can't improve the effect of graphite roughing. Compared with the conventional flotation, the flotation effect of ultrasonic pretreatment for ultrasonic treatment cleaning stage 2, 4 and 6 is gradually improved with the increase of the ultrasonic pretreatment time. When the ultrasonic pretreatment time is 2.5 min, the graphite selection effect is the best. In the test of stage by stage ultrasonic cleaning, the effect of ultrasonic pretreatment for 0.5 min on 1~4 stages is not obvious, but it has a certain effect on 5 and 6 stages. When the ultrasonic pretreatment time is 2.5 min, the effect of each fine section is obvious. The order of the cleaning effect of ultrasonic pretreatment is ultrasonic treatment cleaning stage 5>stage 6>stage 4>stage 3>stage 2>stage 1. The research shows that the flotation effect of ultrasonic pretreatment in the rear section of graphite cleaning is better than that in the front one.

Keywords: Mineral processing engineering; Ultrasonic pretreatment; Roughing; Cleaning; Recovery rate