

坦桑尼亚某大鳞片晶质石墨矿工艺矿物学及选矿实验

祁东¹, 张超¹, 彭俊¹, 曹义甲¹, 张唯西²

(1. 河南省第二地质矿产调查院有限公司, 河南 郑州 450001; 2. 河南省地质局矿产资源勘查中心, 河南 郑州 450006)

摘要:以坦桑尼亚某地大鳞片晶质石墨矿为研究对象, 对其进行了工艺矿物学和浮选实验研究。结果表明, 该矿石中有用矿物为鳞片状石墨, 固定碳含量为 5.67%; 原矿在磨矿细度-0.15 mm 47%, 煤油用量 90 g/t, 2#油用量 60 g/t, 粗选时间为 2.5 min 的粗选条件下, 采用“一粗一精一扫的浮选流程获得的粗精矿, 再经六次剥片磨矿、七次精选, 中矿分批集中返回”的工艺流程, 获得固定碳含量为 95.06%, 回收率为 90.16%, +0.15 mm 产品占精矿 72.47% 的产品, 该工艺可以有效保护大鳞片石墨。

关键词:坦桑尼亚; 大鳞片晶质; 石墨矿; 工艺矿物学; 浮选

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2025.01.020

中图分类号: TD913; TD97 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 01-0154-07

引用格式: 祁东, 张超, 彭俊, 等. 坦桑尼亚某大鳞片晶质石墨矿工艺矿物学及选矿实验[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(1): 154-160.

QI Dong, ZHANG Chao, PENG Jun, et al. Process mineralogy and beneficiation test of a large scale crystalline graphite ore in tanzania[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(1): 154-160.

坦桑尼亚石墨矿主要以晶质石墨矿为主, 具有“大鳞片、高品位、易浮选”等特点。目前, 坦桑尼亚石墨储量为 1 800 万 t, 在全球石墨储量中占比 6.00%, 主要分布在马亨盖、纳储、莲都以及莫罗戈罗等地区^[1]。石墨是重要的矿产资源, 具有耐高温性、导电性、导热性、润滑性、化学稳定性、可塑性、抗热震性等特点, 广泛应用于冶金、机械、耐火、电器电子、环保、航空航天、国防等工业领域, 被誉为“21 世纪支撑高新技术发展的战略资源”^[2]。鳞片石墨选矿一般采用粗精矿多磨多选的浮选工艺, 而多次磨矿会对大鳞片石墨造成一定的破坏。因此针对不同的鳞片石墨矿石, 合理选择再磨工艺, 对提高精矿指标格外重要^[3-7]。

坦桑尼亚某矿区大鳞片晶质石墨矿资源丰富, 为了后期开发和合理利用, 本实验以该矿区片麻岩型大鳞片石墨矿为主要研究对象, 开展矿石的工艺矿物学和浮选实验研究, 为此石墨矿的开发利用提供重要的实验依据^[8]。

1 工艺矿物学研究

1.1 矿石主要化学成分分析

矿石类型以石墨片麻岩为主, 近矿围岩主要为大理岩和黑云斜长片麻岩。原矿主要化学成分分析结果见表 1。由表 1 结果可知, 原矿中固定碳含量为 5.67%, SiO₂ 含量较高, 达到 62.32%, Al₂O₃ 含量为 10.12%, 其他成分含量均小于 10%。

表 1 矿石主要化学成分分析结果/%

Table 1 Results of main chemical composition analysis of the ore

固定碳	灰分	挥发分	V ₂ O ₅	S	P	K ₂ O	水分	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	FeO	MgO	TiO ₂
5.67	88.12	6.21	0.15	1.91	0.002	2.34	0.55	2.47	10.12	62.32	2.50	2.98	2.31	0.88

收稿日期: 2022-03-15

基金项目: 河南省地质矿产勘查开发局 2020 年度局管科研项目 (豫地矿 [2020]02 号)

作者简介: 祁东 (1990-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事固体矿产勘查与开发工作。

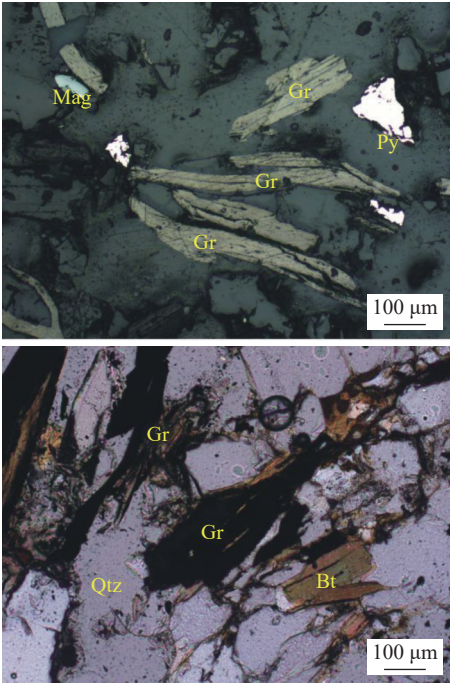
1.2 矿物组成及特征

原矿显微镜下特征见图1。从图1中可以看出，原矿中石墨为自形-半自形的鳞片状，多数已经单体解离，少数未解离的石墨常与石英、黄铁矿、黑云母关系密切，常常与黑云母、黄铁矿等共同嵌布在石英的裂隙中或者石英的颗粒之间。原矿主要矿物组成及含量见表2。由表2可知，原矿中 有用矿物为石墨，脉石矿物石英含量较高，达到61%，其他矿物含量均小于10%。

根据石墨的颗粒大小，在显微镜下共统计了344个石墨鳞片的粒径，并对其进行了分级统计，其结果见表3。由表3可知，-0.15 mm 4.8%；0.15~0.175 mm 4.4%；0.175~0.287 mm 14.9%；0.287~0.490 mm 70.7%；+0.490 mm 5.2%。

1.3 粒度组成分析

通过显微镜下观察，发现该矿石石墨鳞片自形程度较高，解理明显，多为鳞片状、薄片状等晶形，部分石墨有揉皱变形的特征。镜下石墨鳞片多在0.490~0.075 mm，且有少量+0.490 mm的大鳞片。为保护大鳞片石墨不被破坏，实验室将原矿破碎至-2 mm，采用0.71 mm网筛预先分级的方式检测其粒度分布情况。粒度分布测试结果分别见表4。从表4可以看出，原生矿中粗粒级产率 较大，且固定碳主要分布在粗粒级。



(Gr-石墨；Mag-磁铁矿；Py-黄铁矿；Qtz-石英；Bt-黑云母)

图1 原矿显微镜下特征

Fig.1 Microscopic characteristics of the raw ore

表2 矿石主要矿物组成及含量

Table 2 Main mineral composition and content of the ore						
矿物名称	石墨	黄铁矿	磁铁矿	磁黄铁矿	石英	角闪石
含量/%	6.0	2.5	0.3	0.2	61.0	9.0
矿物名称	黑云母	白云母	长石	白云石	蚀变矿物	
含量/%	6.0	4.0	4.0	2.0	5.0	

表3 石墨分级统计结果

Table 3 Statistical results of graphite classification

粒级/μm	+490	-490+287	-287+175	-175+150	-150+100	-100+75	-75+40
占有率/%	5.2	70.7	14.9	4.4	2.3	2.1	0.4

表4 原矿粒度筛析分析

Table 4 Analysis of particle size of the raw ore

粒度/mm	产率/%	累计产率/%	固定碳含量/%	固定碳分布率/%
+0.490	46.93	46.93	4.94	41.61
-0.490+0.287	12.74	59.67	9.55	21.84
-0.287+0.175	13.47	73.14	8.80	21.28
-0.175+0.150	4.74	77.88	6.18	5.26
-0.150+0.100	6.87	84.75	3.87	4.77
-0.100	15.25	100.00	1.91	5.24
合计	100.00	—	5.57	100.00

2 选矿实验

2.1 粗选条件实验

通过磨矿细度实验、浮选药剂用量实验、粗

选时间实验确定较优的粗选条件实验流程，实验流程见图2。

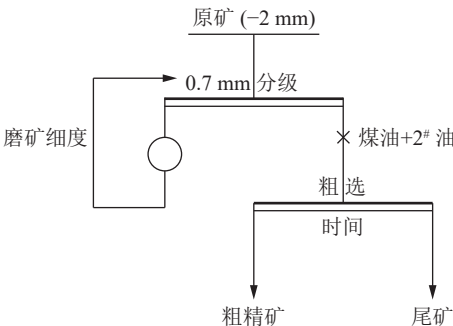


图2 粗选条件实验流程

Fig.2 Flow of the roughing condition test

2.1.1 粗选磨矿细度实验

采用球磨的磨矿方式,在浮选药剂煤油+2[#]油用量为(90+60) g/t,粗选时间为2.5 min的条件下,进行磨矿细度实验,实验流程见图2,实验结果见图3。从图3中可以看出,随着磨矿细度的增加,粗精矿的产率及回收率随之下降,粗精矿的品位升高,当磨矿细度为-0.150 mm 47%时,可获得产率为10.26%,固定碳含量为49.72%的粗精矿,固定碳的回收率为89.82%。继续增加磨矿细度粗精矿的产率、品位及回收率变化不大。另外,增加磨矿细度会严重破坏石墨晶体结构,不利于保护精矿中的大鳞片。综合考虑磨矿细度为-0.150 mm 47%。

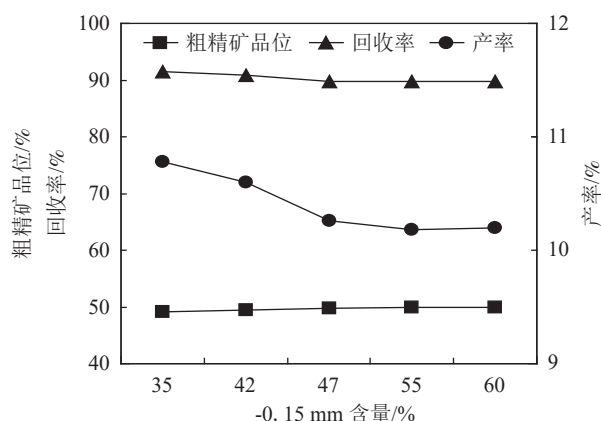


图3 粗选磨矿细度实验结果

Fig.3 Results of coarse grinding fineness test

2.1.2 浮选药剂用量实验

石墨表面具有疏水性,天然石墨具有良好的可浮性。磨矿细度为-0.15 mm 47%,粗选时间为2.5 min的条件下,考查较佳的捕收剂和起泡剂药剂用量对浮选流程的影响,根据图2实验流程进行实验。实验结果见图4。

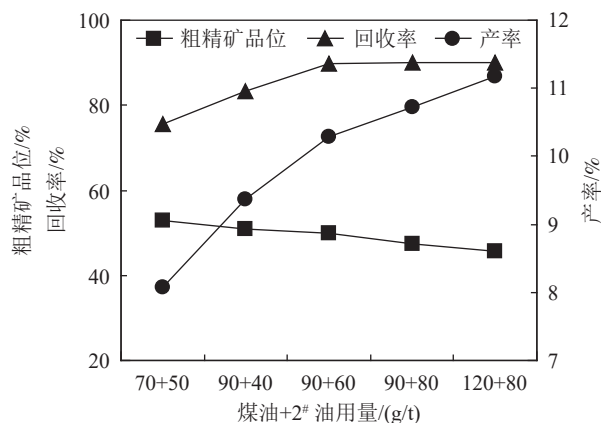


图4 浮选药剂用量实验结果

Fig.4 Results of flotation reagent dosage test

从浮选药剂条件实验结果可以看出,随着捕收剂和起泡剂用量的增加,粗精矿的产率及回收率随之增加,粗精矿的品位降低,当煤油+2[#]油用量为(120+80) g/t时,粗精矿的产率及回收率与煤油+2[#]油用量为(90+60) g/t时相差不大。当确定煤油为90 g/t,2[#]油用量变化,增加2[#]油用量,粗精矿的产率及回收率随之增加,粗精矿的品位降低。综合考虑选用煤油90 g/t,2[#]油60 g/t。

2.1.3 粗选时间实验

粗选时间也是影响浮选效果的一个重要因素,粗选时间的长短对粗精矿固定碳品位的高低,固定碳回收率的大小都有重要影响。在磨矿细度为-0.15 mm 47%,煤油+2[#]油用量为(90+60) g/t的条件下根据图2进行粗选时间实验,实验结果见图5。

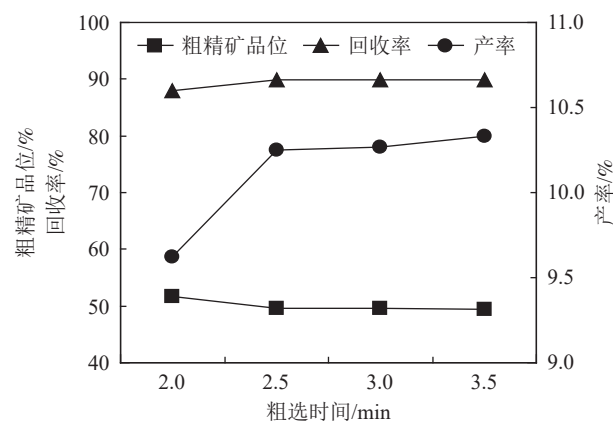


图5 粗选时间实验结果

Fig.5 Results of thoroughing time test

从图5可以看出,随着粗选时间的延长,粗精矿固定碳含量有所降低,粗精矿的产率和固定碳回收率增加,当粗选时间达到2.5 min后粗精矿的固定碳回收率趋于稳定。综合考虑,本次实验粗选时间选择2.5 min。

2.2 粗精矿再磨实验

2.2.1 粗精矿制样实验

粗精矿制样实验流程和实验条件见图6,实验结果见表5。从实验结果可知,粗精矿产率为8.55%,固定碳含量为58.86%,固定碳回收率为89.29%。镜下观察石墨粗精矿中石墨颗粒粗大,多为自形的鳞片状晶形,晶形较为完整。部分石墨与脉石矿物关系密切,多与脉石矿物构成连生体,少数颗粒细小的石墨包裹在脉石矿物中或者嵌布在脉石矿物的裂隙中。

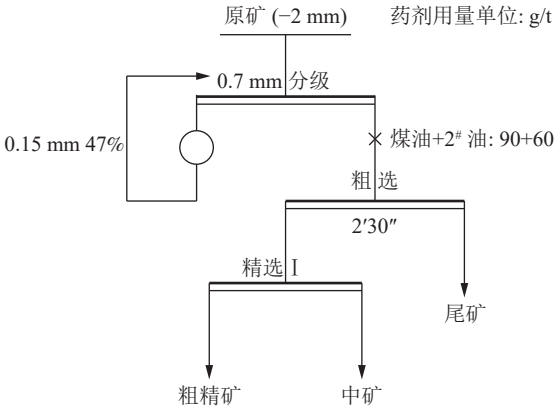


图 6 粗精矿制样实验流程

Fig.6 Flow of the sample preparation of the coarse concentrate

表 5 粗精矿制样实验结果

Table 5 Sample preparation test results of the coarse concentrate

产品名称	产率/%	固定碳含量/%	固定碳回收率/%
粗精矿	8.55	58.86	89.29
中矿	1.70	1.72	0.52
尾矿	89.75	0.64	10.19
合计	100.00	5.64	100.00

表 6 粗精矿再磨精选实验结果

Table 6 Results of regrinding and cleaning test of the coarse concentrate

粗精矿再磨精选次数	产品名称	产率/%	固定碳含量/%	固定碳回收率/%
1次剥片磨矿、1次精选	精矿	6.73	74.21	88.58
2次剥片磨矿、2次精选	精矿	5.94	84.20	87.70
3次剥片磨矿、3次精选	精矿	5.63	87.5	87.35
4次剥片磨矿、4次精选	精矿	5.44	90.41	86.93
4次剥片磨矿、5次精选	精矿	5.31	90.68	85.16
5次剥片磨矿、5次精选	精矿	5.26	92.98	86.17
5次剥片磨矿、6次精选	精矿	5.13	93.37	85.04
6次剥片磨矿、6次精选	精矿	5.14	94.07	85.09
6次剥片磨矿、7次精选	精矿	5.05	95.15	84.53

2.3 开路实验

根据上述实验结果进行开路实验，开路实验流程见图 7，开路实验结果见表 7。从开路实验结果可以看出，原矿球磨后经一粗一精一扫的浮选流程获得的粗精矿，再经六次剥片磨矿、七次精选，可获得产率为 5.05%，固定碳含量为 95.15% 的精矿，固定碳的回收率为 84.53%。

2.4 闭路实验

由表 7 开路实验结果可知，中矿 3 至中矿 9 的品位均小于 30%，在开路流程基础上，可集中返回。本次实验确定了中矿 3 至中矿 9 集中返回

2.2.2 粗精矿再磨次数实验

粗精矿再磨（剥片磨矿）实验室采用立式搅拌磨，充填介质为铅球，铅球直径为 3 mm，充填率 30%，磨矿 2 min。磨矿后通过浮选开路实验流程，增加粗精矿剥片磨矿次数，分别考查获得精矿的固定碳品位，确定粗精矿剥片磨矿次数的合理性^[9]，实验结果见表 6。

由表 6 可以看出，当粗精矿四次剥片一次精选作业后，精矿固定碳品位已经达到了 90.41%。从四次剥片磨矿和五次剥片磨矿后分别进行两次精选作业，获得的精矿固定碳含量分别为 90.68% 和 93.37%，均未达到高纯石墨品质。而从六次剥片磨矿的结果可以看出，六次剥片磨矿再精选获得的精矿固定碳含量为 94.07%，符合高碳石墨的要求，因此确定浮选流程剥片磨矿次数为 6 次。而在此基础上再增加一次精选，精矿固定碳的品位从 94.07% 提高到 95.15%，保证了精矿的品质。即推荐的精矿剥片磨矿合理次数为六次剥片磨矿、七次精选。

至粗选，中矿 1 和中矿 2 循序返回至精选 I 的闭路流程。闭路实验流程见图 8，实验结果见表 8。从闭路实验结果可以看出，原矿经 0.71 mm 分级后筛上产品球磨，磨矿细度为 -0.15 mm 47%，再经一粗一精一扫的浮选流程获得的粗精矿，再经六次剥片磨矿、七次精选，中矿分批集中返回的工艺流程。可获得产率为 5.38%，固定碳含量为 95.06% 的精矿，固定碳的回收率为 90.16%。

对浮选精矿进行筛分分析，其结果见表 9。由表 9 结果可知，浮选精矿中 +0.15 mm 精矿产率为 72.47%，回收率为 72.89%。原矿中 +0.15 mm 石墨

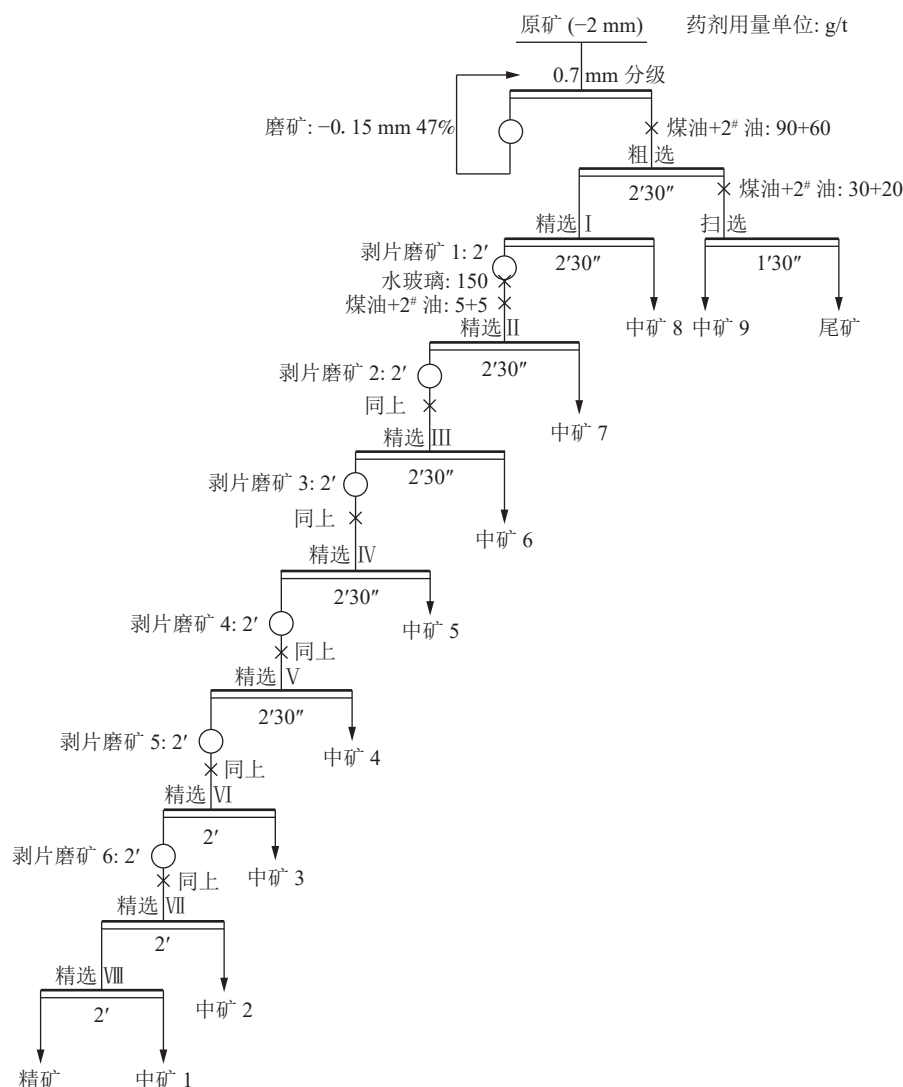


图 7 开路流程实验

Fig.7 Flowsheet of open-circuit process tests

表 7 开路流程实验结果

Table 7 Results of open-circuit process tests

产品名称	产率/%	固定碳含量/%	固定碳回收率/%
精矿	5.05	95.15	84.53
中矿 1	0.11	68.92	1.33
中矿 2	0.10	57.23	1.01
中矿 3	0.15	27.84	0.73
中矿 4	0.21	12.00	0.44
中矿 5	0.27	4.07	0.19
中矿 6	0.84	3.81	0.56
中矿 7	1.84	1.52	0.49
中矿 8	1.71	3.33	1.00
中矿 9	1.66	7.76	2.28
尾矿	88.06	0.48	7.44
合计	100.00	5.68	100.00

分布率 89.99%，精矿的+0.15 mm 石墨保护率为 81.00%。

3 结 论

(1) 该石墨矿石中 useful 矿物为鳞片状石墨，杂质矿物主要是脉石矿物为石英、角闪石、黑云母、斜长石、白云母、白云石以及蚀变矿物等。原矿中可回收固定碳含量为 5.67%。

(2) 为了保护大鳞片，经过详细的条件实验，原矿适宜粗选条件为：磨矿细度-0.15 mm 47%，煤油用量 90 g/t，2#油用量 60 g/t，粗选时间为 2.5 min。

(3) 原矿球磨后经一粗一精一扫的浮选流程获得的粗精矿，再经六次剥片磨矿、七次精选，

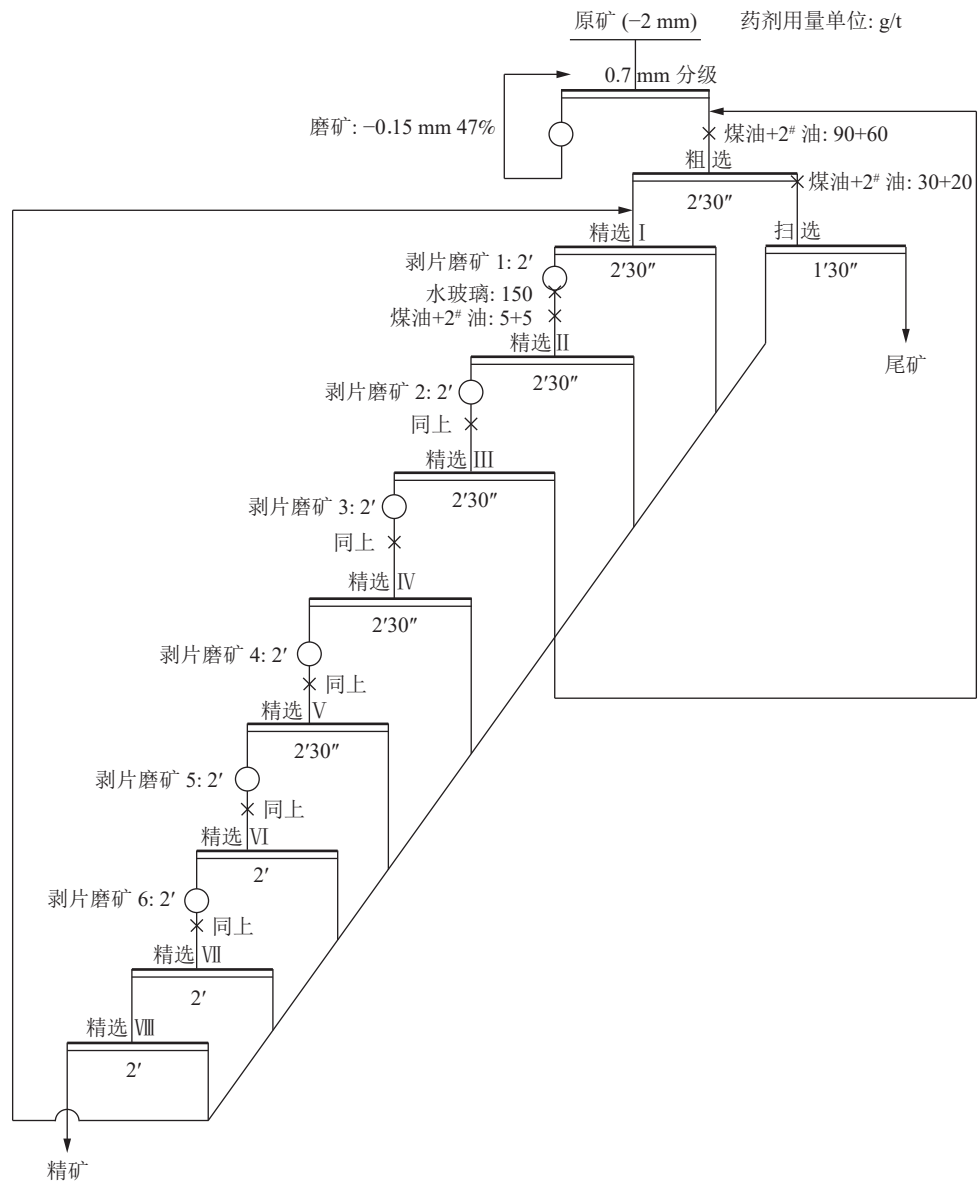


图 8 闭路实验流程
Fig.8 Flowsheet of closed-circuit process tests

表 8 闭路实验结果 Table 8 Results of closed-circuit tests			
产品名称	产率/%	固定碳含量/%	固定碳回收率/%
精矿	5.38	95.06	90.16
尾矿	94.62	0.59	9.84
合计	100.00	5.67	100.00

中矿分批集中返回的工艺流程，浮选精矿固定碳含量为 95.06%，产率为 5.38%，固定碳回收率为 90.16%，属易选矿石；浮选精矿中+0.15 mm 产品占精矿的 72.47%。原矿中+0.15 mm 石墨分布率为 89.99%，浮选精矿+0.15 mm 产品固定碳回收率为 72.89%，大鳞片石墨的保护率为 81.00%。

表 9 精矿筛析分析结果 Table 9 Results of concentrate sieve analysis				
粒度/mm	产率/%	累计产率/%	固定碳含量/%	固定碳回收率/%
+0.490	1.94	1.94	94.16	1.92
-0.490+0.287	20.37	22.31	96.49	20.67
-0.287+0.175	38.95	61.26	95.44	39.10
-0.175+0.150	11.21	72.47	95.01	11.20
-0.150+0.100	13.52	85.99	94.46	13.44
-0.100	14.01	100.00	92.74	13.67
合计	100.00	—	95.06	100.00

参考文献：
[1] 周起忠, 闫卫东, 尹丽文, 等. 世界石墨资源概况及需求分

析[J]. 国土资源情报, 2019(6):28-32.

ZHOU Q Z, YAN W D, YIN L W, et al. Overview and demand analysis of global graphite resource[J]. Land and Resources Information, 2019(6):28-32.

[2] 刘艳飞, 陈正国, 颜玲亚, 等. 全球石墨资源现状、生产、消费及贸易格局[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2019(S1):13-17.

LIU Y F, CHEN Z G, YAN L Y, et al. Global resources status, production, consumption and trade patterns of graphite[J]. China Non-metallic Mining Industry Herald, 2019(S1):13-17.

[3] 程飞飞, 张韬, 于阳辉, 等. 马达加斯加某大鳞片石墨矿选矿试验研究[J]. 非金属矿, 2017, 40(6):76-78.

CHENG F F, ZHANG T, YU Y H, et al. Experimental research on beneficiation of large flake graphite ore in Madagascar[J]. Non-Metallic Mines, 2017, 40(6):76-78.

[4] 程亮, 马志军, 高野, 等. 黑龙江某细鳞片石墨矿选矿试验研究[J]. 非金属矿, 2021, 44(1):74-77.

CHENG L, MA Z J, GAO Y, et al. Experimental study on beneficiation of a fine flake graphite ore in Heilongjiang[J]. Non-Metallic Mines, 2021, 44(1):74-77.

[5] 张帅, 李亚, 牛艳萍, 等. 某片麻岩鳞片石墨矿浮选实验研究[J/OL]. 矿产综合利用: 1-7[2021-02-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20200622.0954.046.html>.

ZHANG S, LI Y, NIU Y P, et al. Flotation test of a gneiss scale graphite ore [J/OL]. Multipurpose Utilization of Mineral

Resources: 1-7[2021-02-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20200622.0954.046.html>.

[6] 赵越, 刘敬党, 赵京禹. 内蒙古某石墨矿工艺矿物学及选矿试验研究[J]. 非金属矿, 2019, 42(2):63-65.

ZHAO Y, LIU J D, ZHAO J Y. Process mineralogy and experimental research on mineral processing of the Inner Mongolia graphite ore[J]. Non-Metallic Mines, 2019, 42(2):63-65.

[7] 李亚, 王英凯, 张旭, 等. 某大理岩型石墨矿选矿工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(3):104-109.

LI Y, WANG Y K, ZHANG X, et al. Study on mineral processing technology of a marble graphite ore[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2021(3):104-109.

[8] 邱杨率, 余永富, 管俊芳, 等. 非洲三个地区石墨矿矿石特征及可选性研究[J]. 矿产保护与利用, 2018(5):45-50.

QIU Y L, YU Y F, GUAN J F, et al. Study on ore characteristics and washability of graphite ores in three regions of Africa[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018(5):45-50.

[9] 牛敏, 郭珍旭, 刘磊. 鳞片石墨选矿工艺进展[J]. 矿产保护与利用, 2018(5):32-39.

NIU M, GUO Z X, LIU L. Progress of flake graphite beneficiation process[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018(5):32-39.

Process Mineralogy and Beneficiation Test of a Large Scale Crystalline Graphite Ore in Tanzania

QI Dong¹, ZHANG Chao¹, PENG Jun¹, CAO Yijia¹, ZHANG Weixi²

(1.Henan No.2 Institute of Geology and Mineral Resources Survey Co., Ltd., Zhengzhou 450001, Henan, China; 2.Mineral Resources Exploration Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450006, Henan, China)

Abstract: The process mineralogy and flotation tests of a large scale crystalline graphite ore in Tanzania were carried out. The results show that the useful mineral in the ore is flake graphite with a fixed carbon content of 5.67%. At the conditions of grinding fineness of -0.15 mm, content of 47%, kerosene dosage of 90 g/t, 2[#] oil dosage of 60 g/t and roughing time of 2.5 min, the roughing concentrate was obtained by the flotation process of "one roughing, one cleaning and one scavenging" was processed by six times of strip grinding, seven times of cleaning, and middling returned in batches. The fixed carbon content was 95.06% and the recovery was 90.16%, +0.15 mm products accounting for 72.47% of the concentrate. This process can effectively protect large flake graphite.

Keywords: Tanzania; Large scale crystalline; Graphite ores; Process mineralogy; Flotation