#### CONSERVATION AND UTILIZATION OF MINERAL RESOURCES

# 非洲三个地区石墨矿矿石特征及可选性研究

#### 邱杨率,余永富,管俊芳,张凌燕

(武汉理工大学资源与环境工程学院,湖北武汉430070)

摘 要:以马达加斯加 Anbahita、莫桑比克 Ancuaba 及坦桑尼亚 Chilalo 三个地区鳞片石墨矿石为研究对象, 系统研究了这三个地区石墨矿石中矿石特征及石墨的嵌布粒度。结果表明:Anbahita、Ancuaba、Chilalo 三个 地区石墨矿中矿物组成相似,且均为优质大鳞片石墨资源,矿石中石墨鳞片 +0.18 mm 粒级累积分布率分别 为92.62%、98.33%、98.87%,石墨鳞片 +0.85 mm 粒级累积分布率分别为13.13%、52.70%、61.79%,其中 Chilalo 地区石墨矿中石墨鳞片粒径最大,此三个地区的矿石中石墨鳞片 +0.15 mm 粒级含量远高于国内相 同类型石墨矿。三个矿样可选性均较好,其中 Ancuaba 精矿鳞片最大,Anbahita 精矿鳞片最细。研究结果为 该地区石墨矿石选矿及深加工提供了重要参考依据。

关键词:鳞片石墨;大鳞片;非洲;嵌布粒度;马达加斯加;莫桑比克;坦桑尼亚

中图分类号:T975<sup>+</sup>.2 文献标识码:A 文章编号:1001-0076(2018)05-0045-06 DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2018.05.005

#### Study on Ore Characteristics and Beneficiability of Three Flaky Graphite Mines in Africa

*QIU Yangshuai*, *YU Yongfu*, *GUAN Junfang*, *ZHANG Lingyan* (School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract**: Three flaky graphite mines in the regions of Madagascar Anbahita, Mozambique Ancuaba, and Tanzania Chilalo, were used to study the ore characteristics and grain size. The results show that the graphite mines of these three areas are high quality and large – flaky graphite resource with similar minerals components. Cumulative distribution rates of +0.18mm size fraction of graphite particles in Anbahita, Ancuaba and Chilalo are 92.62%, 98.33% and 98.87%, respectively. Cumulative distribution rates of +0.85 mm size fraction of graphite particles in Anbahita, Ancuaba and Chilalo are 92.62%, 98.33% and 98.87%, respectively. Cumulative distribution rates of +0.85 mm size fraction of graphite particles in Anbahita, Ancuaba and Chilalo are 13.13%, 52.70% and 61.79%, respectively. The graphite flake of Chilalo is the largest in these three areas. The +0.15 mm size fractions of graphite in these three regions are much higher than the same type of graphite ore in China. The beneficiability of these three samples are all relatively favourable. Among them, the flaky size of Ancuaba concentrate is the largest, the flaky size of Anbahita concentrate is the finest. These research results provide a significant reference for the beneficiation and down – stream processing of graphite resource in these areas.

**Key words**: flaky graphite; large flake; Africa; dissemination size; Madagascar; Mozambique; Tanzania

天然石墨是一种用途极广的非金属矿,按晶体 结构天然石墨可分为晶质石墨(结晶尺寸 >1 µm) 和微晶石墨(结晶尺寸 <1 µm),其中晶质石墨按结晶形态又可分为鳞片石墨和致密块状石墨(又称脉

<sup>\*</sup> 收稿日期:2018-03-07 作者简介:邱杨率(1987-),男,博士,主要从事非金属矿选矿理论与工艺研究。

石墨)<sup>[1,2]</sup>。工业上按石墨中石墨鳞片的大小将天 然鳞片石墨分为大鳞片(+0.15 mm)和细鳞片 (-0.15 mm)石墨,全球天然石墨每年的产量约为 110万t<sup>[3,4]</sup>,而大鳞片石墨的产率不足10%,但大 鳞片石墨却是柔性石墨、石墨坩埚等行业必需的原 料,其较细鳞片石墨具有更高的经济价值,且石墨鳞 片在选矿及提纯过程中极易被破坏,因此,保护大鳞 片一直是石墨洗矿研究的热点。

非洲地区蕴藏着丰富的天然石墨资源,且品质 优良,其特点为鳞片大、原矿固定碳含量高、易磨易 选,具有较高的经济价值,目前开发程度相对较深的 国家主要为莫桑比克、坦桑尼亚及马达加斯加这三 个地区,本文以马达加斯加 Anbahita、莫桑比克 Ancuaba 及坦桑尼亚 Chilalo 三个地区鳞片石墨矿石为 研究对象,系统研究了这三个地区石墨矿石中矿石 特征及石墨的嵌布粒度,为该地区的石墨资源开发 提供理论依据,具有较重要的实际意义。

### 1 矿样和测试仪器

矿样分别来自马达加斯加 Anbahita、莫桑比克 Ancuaba 及坦桑尼亚 Chilalo 三个地区,依次编号为 MA、MO 及 TA。

测试仪器:D8Advance 型 X 射线衍射仪器,德国 布鲁克公司;Axios Advance 型 X 射线荧光光谱仪, 荷兰 Panalytical B. V. Leica 公司;DMLP 透/反两用 偏光显微镜,德国莱卡公司。

### 2 矿石特征

#### 2.1 矿石矿物组成

综合矿石化学成分、XRD 物相及显微镜下特征,MO样、MA样及TA样的矿物组成见表1。

表1 矿样矿物组成及含量 Table 1 Mineral composition and content of samples

含量/%					矿	物				
矿样	石墨	石英	长石类	云母	金红石	赤褐铁矿	黄铁矿	高岭石	夕线石	其他
MO	5	60	16	8	< 1	$1 \sim 2$	< 1	-	_	<7
MA	7	50	-	8	-	2 ~ 3	2	23	5	< 3
TA	15	55	5	14	1	2	4	1	1	< 2

由表1可以看出,三个矿样中矿物组成种类差 别不大,主要矿物有石墨、石英、云母、长石类矿物, 以及高岭石、金红石等,还含有少量的赤褐铁矿和黄 铁矿,其主要差异为组成矿物含量不同,其中 TA 样 石墨含量最高达15%,MO 石墨含量最低为5%。

#### 2.2 显微镜下矿物特征

此三个矿样都属于区域变质片麻岩,因此矿物 组成相差不大,在显微镜下观察矿物特征如下:

石墨(G)

根据矿样中石墨片径的大小和其他矿物的嵌布 关系。石墨可以分为三类:

(1)大鳞片石墨,石墨片径大于150 μm,片厚大于 5 μm(图 1)。

(2)大的鳞片石墨连生体,石墨片径大于 150
 μm,片厚小于 5 μm,多和黑云母、石英"平行"连生
 (图 2)。

(3)呈包裹体状分布的石墨(图3),这类石墨 多分布在长石、石英、或石榴石、矽线石颗粒内,一般 小于74 μm。



 $119 \sim 823 \ \mu m$ ,  $\times 100$  (Reflector)



图 2 鳞片状石墨(G)与脉石平行共生, 厚度 1 µm,×100(反光)

Fig. 2 Parallel symbiosis of flaky graphite and gauge minerals. Graphite thickness 1  $\mu$ m,  $\times 100$  (Reflector)



图 3 包裹体状的石墨(G),片径 20~111 μm,×100(反光) Fig. 3 Encapsulated graphite (G). flake diameter 20~111 μm,×100 (Reflector)

三个矿样以第(1)、(2)类石墨为主,占石墨总 量的97%左右,只有3%左右的石墨呈包裹体状分 布,其中第二类石墨最多,石墨的片径大,但石墨片 和黑云母、石英相嵌紧密,即石墨片层间夹有片状的 黑云母或粒状的石英或黄铁矿,石墨与脉石矿物不 易解离,进行磨矿时要充分考虑磨矿的方式,在单体 解离的前提下尽量减少对石墨大鳞片的破坏。

石英(Q)

无色,半自形~他形粒状。矿石中可见石英的 透镜状、条带状的分布的石英(图4)。石英单体最 大3 mm,最小10~15 μm,一般100~500 μm。石 英颗粒表面干净,少数大颗粒内含有长石、石墨、黑 云母矿物包裹体。



图 4 石墨(G)和石英(Q),"平行"连生, 石英大小 14~390 µm,×100(-)

Fig. 4 Parallel symbiosis of graphite (G) and quartz (Q). Quartz diameter 14  $\sim 390~\mu m$  ,  $~\times 100$  (Reflector)

#### 云母(M)

矿石中含黑云母和白云母两种,以黑云母为主。 黑云母为片状,在不同矿样中大小不一,黑云母片最 大1.12 mm,最小10 μm,一般片径75~200 μm。 部分黑云母由于矿石强烈蚀变多绿泥石化。根据褐 色黑云母蚀变和石墨的相嵌关系等,可以分为两类: (1)片状的黑云母和片状的石墨"平行"连生(图 5),黑云母和石墨片的片厚在1~5 μm。(2)强烈 绿泥石化的黑云母。矿石中第一类黑云母占整个黑 云母的 60%, 蚀变的占 40% 左右, 黑云母的蚀变对 磨矿有影响, 矿石容易泥化。



图 5 黑云母(Bi)和石墨(G)"平行"连生,一般片径 56~301 µm,片厚 12~106 µm,×100(-) Fig.5 Parallel symbiosis of Biotite (Bi) and graphite (G). Flake

diameter 56  $\sim$  301  $\mu$ m, thickness 12  $\sim$  106  $\mu$ m,  $\times$  100 (Reflector)

### 长石(F)

矿石中的长石为钠长石和钾长石,钾长石和钠 长石蚀变为高岭石或绢云母(图6),长石在各样分 布不均匀,最大1.6 mm,最小100 μm,一般150~ 400 μm。



图 6 长石的绢云母化(P),大小 3.6 mm,×50(-) Fig. 6 Sericitization of feldspar (P). dimensions 3.6 mm, ×50 (Reflector)

## 3 石墨的嵌布粒度特征

根据线测法,对光片中石墨鳞片的长径进行了 统计,得到石墨的嵌布特征(表2)。

由表2可知,总体来说,三个矿样中石墨的鳞片 均较大,其中 TA 样石墨鳞片最大,MO 样次之,MA 样最细。试样中+850 μm 和+180 μm 粒级的累积 分布率,TA 样分别为61.79%和98.87%,MO 样分 别为52.70%和98.33%,MA 样分别为13.13%和 91.67%,结合各粒级的累积分布率变化趋势可知, TA 样与 MO 样中石墨的粒度相差不大,石墨粒度分 布非常接近,而 MA 样则较其他两个矿样细。按颗 粒数统计,三个矿样中颗粒主要分布于-500+180 μm 及 - 150 + 75 μm 这两个粒级,累积分布率均达 60% 左右,说明石墨主要分布于此粒级范围。对于 MA样,当磨矿细度达到-0.300 mm时,石墨单体 解离度 67.86%, 当磨矿细度达到 - 0.180 mm, 石墨

单体解离度 94.89%; 对于 MO 样和 TA 样, 当磨矿 细度达到-0.500 mm 时,石墨单体解离度分别为 83.72% 和 83.31%, 当磨矿细度达到 -0.300 mm, 石墨单体解离度分别为93.50%和93.99%。

Table 2     Characteristics of graphite particle size										
粒级/μm -	颗粒数百分比/%			分布率/%			累积分布率/%			
	MA	MO	TA	MA	MO	TA	MA	MO	TA	
+ 850	0.59	4.99	13.17	13.13	52.70	61.79	13.13	52.70	61.79	
-850 + 600	1.31	6.31	6.54	14.61	16.15	15.33	27.74	68.85	77.13	
-600 + 500	1.77	11.63	5.27	9.84	14.87	6.18	37.58	83.72	83.31	
-500 + 300	10.90	15.28	18.22	30.28	9.77	10.68	67.86	93.50	93.99	
-300 + 230	11.20	8.64	11.08	15.55	2.76	3.25	83.41	96.26	97.24	
-230 + 180	11.90	12.96	11.16	8.26	2.07	1.64	91.67	98.33	98.87	
-180 + 150	9.29	6.64	6.88	3.23	0.53	0.50	94.89	98.86	99.38	
- 150 + 75	32.47	23.26	18.86	4.40	0.93	0.55	99.29	99.79	99.93	
-75+45	12.19	4.01	6.21	0.53	0.08	0.06	99.82	99.87	99.91	
- 45	8.32	6.29	2.61	0.18	0.13	0.01	100.00	100.00	100.00	

表2 石墨的嵌布特征

将此3个矿样石墨嵌布粒度与国内部分典型石

墨矿进行比较,国内石墨矿中石墨嵌布粒度见表3。

表3 国内部分典型石墨矿石墨嵌布粒度<sup>[5,6]</sup>

Table 3 Disseminated size of typical graphite mines in China									
河南淅川		四	川南江	吉木	林岫岩	黑龙江萝北			
粒级/μm	累积分布率/%	粒级/μm	累积分布率/%	粒级/μm	累积分布率/%	粒级/μm	累积分布率/%		
+ 38	47.69	+ 150	15.99	+ 300	28.77	+ 300	23.02		
-38 + 10	97.00	-150 + 74	49.30	-300 + 150	48.86	-300 + 150	53.25		
- 10	100.00	-74 + 37	85.61	-150 + 74	64.00	-150 + 74	80.80		
		- 37	100.00	-74 + 37	78.12	- 74 + 37	94.54		
				- 37	100.00	- 37	100.00		

由表3可知,表中国内石墨矿中石墨鳞片偏细, 其中吉林岫岩和黑龙江萝北石墨矿的+300 μm 粒 级石墨鳞片含量较高,但仍不及 MA 样、MO 样、TA 样+300 μm 粒级含量的一半,由此可见,相比国内 石墨矿,这三个非洲石墨矿具有更高的经济价值。

#### 可选性试验 4

根据这三个地区石墨矿石的特点进行了选矿试 验,确定了较优的工艺流程,三个矿样的选矿工艺流 程分别见图7、图8和图9,各流程药剂制度见表4, 精矿指标见表5。

由表5可知,三个石墨矿样矿石可选性均较好, 经过多段再磨再浮,最终精矿固定碳含量均达94% 以上,且开路流程的回收率均高于 85%,其中,MO 矿样的可选性最好,仅经过一段粗磨粗选一次再磨 两次精选,精矿固定碳含量可达97.09%,回收率高

表4 各流程药剂制度

Table 4 Reagent regime of each process								
用量/	T	A	М	0	MA			
(g·t <sup>-1</sup> ) 作业	煤油	2#油	煤油	2#油	煤油	2#油		
粗选	264	120	176	148	350	220		
精选 I	132	40	88	74	88	36		
精选Ⅱ	44	40	_	—	88	36		
精选Ⅲ	44	40	_	—	88	36		
精选Ⅳ	44	40	_	—	88	36		
精选V	44	40	_	—	88	36		
精选Ⅵ		—	_	—	88	36		
精选₩		—	_	—	88	36		
精选Ⅷ	—	—	—	—	88	36		
扫选	44	40	132	111	_	_		

达95.87%。比较各矿样精矿粒度组成,其中 MO 精矿的鳞片最大,+300 μm(+50 目)和+150 μm (+100 目)含量分别高达 29.34% 和 89.07%,远高

表 5

Table 5 Flotation concentrate indexes of the samples 指标 MA MO TA 固定碳含量/% 94.96 97.09 94.94 回收率/% 90.91 95.87 85.07 +850 µm 1.07 1.61 4.30 -850 + 500 µm 0.29 9.21  $-500 + 300 \ \mu m$ 精矿粒度组成/% 15.98 19.06 17.20 $-300 + 180 \mu m$ 29.55 53.87 36.02 -180 +150 μm 16.81 4.84 5.87 –150 µm 37.37 10.93 36.03

三个地区石墨矿石浮选精矿指标

于其他两个矿样。MO 与 TA 矿样中石墨嵌布粒度 相近,但脉石矿物组成不同,且不同矿石中石墨矿物 可浮性存在差别,MO 矿样通过较短的流程就能获 得较高固定碳含量的精矿,而 TA 需要通过较长的 再磨再浮流程才能获得合格固定碳含量的精矿,在 再磨再浮的过程中,部分石墨鳞片被破坏,因此造成 了 TA 精矿中石墨的鳞片较 MO 细。MA 精矿鳞片 最细,这与原矿中石墨嵌布特征分析结果一致。







图 8 MO 样选矿工艺流程图

Fig. 8 Beneficiation flowsheet of MO sample





### 5 结论

(1)马达加斯加 Anbahita、莫桑比克 Ancuaba 及 坦桑尼亚 Chilalo 三个地区鳞片石墨矿矿物组成相 似,主要矿物组成为石墨、石英、云母及长石等,还含 有少量赤褐铁矿和黄铁矿。

(2) 三个矿样中石墨主要为大的鳞片石墨连生体,石墨的片径大于 150 µm,片厚小于 5 µm,多和 黑云母、石英"平行"连生。

(3) 三个矿样中石墨鳞片均较大,其中 TA 样石
墨鳞片最大,MO 样次之,MA 样最细。试样中+850
μm 和+180 μm 粒级的累积分布率,TA 样分别为
61. 79% 和 98. 87%, MO 样分别为 52. 70% 和

98.33%, MA 样分别为 13.13% 和 91.67%。

(4) 三个石墨矿样矿石可选性均较好, 开路流 程精矿固定碳含量和回收率均高于94%和85%。
其中 MO 精矿的鳞片最大, +300 μm(+50 目)和+150 μm(+100 目)含量分别高达29.34%和89.07%; MA 精矿鳞片最细, +300 μm(+50 目)和+150 μm(+100 目)含量分别为16.27%和62.63%。

马达加斯加 Anbahita、莫桑比克 Ancuaba 及坦 桑尼亚 Chilalo 三个地区矿样中石墨鳞片大于国内 大部分石墨矿,具有较高的经济价值和较大的开发 潜力。

#### 参考文献:

- Inagaki M, Toyoda M, Kang F Y, et al. Pore structure of exfoliated graphite——a report on a joint research project under the scientific cooperation program between NSFC and JSPS [J]. New carbon mater, 2003, 18:241 – 249.
- [2] Crossley P. Graphite high tech supply sharpens up [J]. Ind. miner, 1999, 386:31 - 47.
- [3] 陈婷芳. 石墨矿产市场分析[D]. 北京:中国地质大学(北 京),2016.
- [4] 郭佳欢. 石墨开发利用现状研究与供需展望[D]. 北京:中国 地质大学(北京),2016.
- [5] 欧阳志军,管俊芳,张凌燕,等.河南淅川石墨矿工艺矿物学研究[J].中国矿业,2016,25(4):137-140.
- [6] 张凌燕,王浩,管俊芳,等.四川南江石墨工艺矿物学研究
   [J].矿冶,2013,22(1):95-100,110.

引用格式: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 Yangshuai, YU Yongfu, GUAN Junfang, et al. Study on ore characteristics and beneficiability of three flaky graphite mines in Africa[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2018(5):45-50.

投稿网址:http://kcbh.cbpt.cnki.net

E – mail:kcbh@ chinajournal. net. cn

(上接第44页)

- [4] 杨培奇,刘敬党,张艳飞,等.黑龙江佳木斯地块典型石墨矿 床含矿岩石地球化学特征及成矿时代[J].中国地质,2017, 44(2):301-315.
- [5] 李哲.鳞片石墨浮选特性及工艺研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2010.
- [6] 康文泽,李会建,张启梁,等. 萝北鳞片石墨选矿工艺流程试验研究[J].选煤技术,2015(5):11-15.
- [7] 柳溪. 萝北某鳞片石墨矿选别高碳石墨新工艺研究[D]. 武 汉:武汉理工大学,2014.
- [8] 林海.风化型石墨矿选矿试验研究[J].矿产保护与利用, 1996(4):15-17.
- [9] 黑龙江省地质矿产局. 黑龙江区域地质志[M]. 北京:地质 出版社,1989:16-19.
- [10] 李寒滨,张冰.黑龙江云山石墨矿床变质作用及其意义[J]. 中国非金属矿工业导刊,2014(1):45-46.
- [11] 房俊伟,李晓军,刘彦林. 萝北县四方山林场东部大鳞片石 墨矿地质特征[J]. 建筑建材装饰,2009,10(3)43-44,53.
- [12] 陈蔚然.关于石墨化度计算公式[J].炭素技术,1983(6): 28-32.

- [13] Nikonova R M, Larionova N S, Ladyanov V I, et al. Changes of the structure of fullerite and graphite during their mechanical activation[J]. Journal of alloys & compounds, 2016, 682:61 -69.
- [14] 吴娟霞,徐华,张锦. 拉曼光谱在石墨烯结构表征中的应用 [J]. 化学学报,2014,72(3):301-318.
- [15] Das A, Chakraborty B, Sood A K. Raman spectroscopy of graphene on different substrates and influence of defects[J]. Bulletin of materials science, 2008, 31(3):579 – 584.
- [16] Ferrari A C, Robertson J. Raman spectroscopy in carbons: From nanotubes to diamond [J]. Philosophical transactions of the royal society a mathematical physical & engineering sciences, 2004, 362(1824).
- [17] Li B, Zhou L, Wu D, et al. Photochemical chlorination of graphene[J]. Acs nano, 2011, 5(7):5957-5961.
- [18] 杨序钢,吴琪琳. 拉曼光谱的分析与应用[M]. 北京:国防工 业出版社,2001.
- [19] 孙红娟,彭同江.石墨氧化一还原法制备石墨烯材料[M]. 北京:科学出版社,2015.

引用格式:马彩凤,彭同江,孙红娟,等. 萝北云山石墨矿床风化带中石墨矿石的矿物学特征[J]. 矿产保护与利用,2018(5):40-44,50. MA Caifeng, PENG Tongjiang, SUN Hongjuan, et al. Study on mineralogy characteristics of graphite in weathering zone of Yunshan graphite deposit in Luobei[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2018(5):40-44,50.

投稿网址:http://kcbh.cbpt.cnki.net

E - mail:kcbh@chinajournal.net.cn