

## 莫桑比克某含钒石墨矿工艺矿物学研究

张莉莉, 洪秋阳, 李波, 李美荣, 梁冬云, 刘建国

(广东省资源综合利用研究所, 稀有金属分离与综合利用国家重点实验室, 广东省矿产资源开发和综合利用重点实验室, 广东 广州 510650)

**摘要:** 采用化学分析、显微镜分析和 MLA 矿物自动定量检测技术等测试手段对莫桑比克某含钒石墨矿进行了详细的工艺矿物学研究。结果表明, 原矿石中固定碳含量 23.8%,  $V_2O_5$  含量 0.64%, 主要含碳矿物为石墨, 主要含钒矿物为含钒粒状褐铁矿、含钒胶状褐铁矿和含钒黏土等, 建议采用优先选石墨 - 选石墨尾矿再选钒的工艺回收石墨和钒。选石墨尾矿样品中  $V_2O_5$  含量 0.71%, 钒主要赋存于褐铁矿、黏土和氧化钛矿物中。从选石墨尾矿的铁钛矿物和黏土中回收钒,  $V_2O_5$  理论品位 4.08%, 理论回收率 95%。若不回收黏土  $V_2O_5$  理论品位 8.64%, 理论回收率 68%。

**关键词:** 石墨; 含钒褐铁矿; 工艺矿物学; MLA; 赋存状态

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2020.05.016

中图分类号: TD912 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2020) 05-0110-06

石墨作为战略资源, 具有耐高温、导电导热、抗热震、润滑、化学性质稳定、可塑等优异的物理特性, 被广泛应用在机械、冶金、石油化工、轻工、电子、电器、军工、国防、航天等国民经济的多个领域<sup>[1-3]</sup>。随着对其结构性能的进一步研究, 近年来石墨又作为新兴环保材料、热交换材料、储能材料、导电材料、二次锂离子电子材料、球化石墨超级电容材料、石墨烯及新型超级电容器材料, 应用在高新技术领域和新能源领域, 新一轮的石墨矿开发热潮被激发<sup>[4-6]</sup>。含钒石墨矿石是高碳含钒石煤部分碳质在动力变质和热液活动作用下变质成石墨而形成的, 其  $V_2O_5$  品位一般为 0.4% ~ 0.7%, 也是一种新型的钒资源<sup>[7-8]</sup>。本文针对莫桑比克某含钒石墨矿样品进行了详细的工艺矿物学研究, 目的是为该矿石高效开发石墨和钒

提供技术指导<sup>[9-10]</sup>。

## 1 样品制备和测试方法

试验样品来自于莫桑比克某含钒石墨矿。从原矿样中拣取具代表性的块矿样制成矿石光片, 其余样品经破碎至 -2 mm, 再混匀缩分制得试验样品。MLA 测试用样品需研磨分级后制成树脂光片; 多元素化学分析样品需缩分研磨至 -0.074 mm。对单矿物的制取, 是将 -0.045 mm 的矿样进行分离富集、提纯。

多元素分析是采用化学分析法, 石墨固定碳含量根据国标 GB/T 3521-2008 分析测定。目前常见的石墨矿矿物组成定量是根据化学分析, 显微镜下分析和 XRD 分析的结果计算得出, 但这只能得出简单的矿物组成和大致的含量<sup>[11-12]</sup>。本文采

收稿日期: 2020-04-30

基金项目: 广州市科技计划项目 (201804010423); 广东省科学院建设国内一流研究机构行动专项资金项目 (2019GDASYL-0105053); 广东省科学院研究所绩效考核引导专项 (2019GDASYL-0302010)

作者简介: 张莉莉 (1983-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事工艺矿物学研究。

用 MLA 矿物自动定量检测技术测定石墨矿物的矿物组成和含量，检测时间大幅度减少，检测精度大大提高，值得注意的是样品制备时需要通过巴西蜡来包埋。MLA 650 系统是由 FEI Quanta 650 扫描电镜、Bruker XFlash5010 能谱仪和 MLA 软件 3.1 版本组成，工作条件为加速电压 20 kV、工作距离 10 mm、高真空模式，时间常数 6.4 (amp

time)，并用扫描电镜观察主要有用矿物的嵌布形式，用能谱仪半定量分析主要有用矿物的化学成分。用 Leica DMRXP 偏光显微镜测定矿石中主要有用矿物的嵌布粒度，并观察其嵌布形式。

## 2 原矿物质成分

样品多元素分析结果见表 1。

表 1 原矿多元素分析结果 /%

Table 1 Analysis results of multi-elements of the raw ore

固定碳	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe	S	Co	Ni	Cu	Pb	Zn	SiO <sub>2</sub>
23.8	0.64	2.29	0.012	< 0.005	0.022	0.014	< 0.01	0.062	64.77
Na	CaO	MgO	K	MnO	TiO <sub>2</sub>	Cr	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
0.14	0.016	0.07	0.15	< 0.005	0.23	0.024	0.088	4.08	

由表 1 可知，该原矿样品中固定碳含量 23.8%，V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量 0.64%，具有利用价值；主要杂质是 SiO<sub>2</sub>，含量达 64.77%；其次含 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 4.08%，Fe 2.29%，还含有少量的 TiO<sub>2</sub>，Na，K 等。原矿矿物组成定量测定结果见表 2。

表 2 原矿矿物组成定量测定结果

Table 2 Results of quantitative determination of mineral composition of the raw ore

矿物	含量 /%	矿物	含量 /%	矿物	含量 /%
石墨	23.797	含钒电气石	0.003	蛇纹石	0.015
含钒粒状褐铁矿	1.469	钒云母	0.491	蓝晶石	0.014
含钒胶状褐铁矿	2.178	含钒伊利石	4.913	方解石	0.029
钒钛矿	0.008	含钒高岭土	8.640	磷钒铝石	0.474
含钒假金红石	0.099	石英	56.807	锆石	0.011
含钒白钛石	0.426	长石	0.432	其他	0.179
钙钒榴石	0.001	透辉石	0.014	合计	100.000

结果表明，该矿石主要含碳矿物为石墨。钒矿物种类较多，主要含钒矿物为含钒粒状褐铁矿、含钒胶状褐铁矿、含钒黏土——高岭土和伊利石，少量的钒云母、含钒白钛石、含钒假金红石，极少量的钒钛矿、钒电气石、钙钒榴石等。脉石矿物主要为石英和极少量的长石等。

## 3 主要矿物的嵌布特征

### 3.1 石墨

通过偏光显微镜和扫描电镜分析发现，该矿石中的石墨为结晶状，多呈六方片状、鳞片状嵌布于石英晶粒或裂隙之间，并有些微细片状石墨包含于石英晶粒中，并常见揉皱状石墨与碎裂石英共生。

通过偏光显微镜测定石墨的嵌布粒度（长径）分布，结果见表 3。

表 3 石墨嵌布粒度分布

Table 3 Particle size distribution of graphite

粒径 /mm	嵌布粒度分布 /%
+2.56	3.87
-2.56+1.28	23.85
-1.28+0.64	27.39
-0.64+0.32	21.60
-0.32+0.16	14.27
-0.16+0.08	6.53
-0.08+0.04	2.26
-0.04+0.02	0.20
-0.02+0.01	0.02
-0.01	0.01
合计	100.00

可以看出，该石墨粒度粗，鳞片大，主要集中在 -2.56+0.16mm，粒级分布率 87.11%。

### 3.2 含钒褐铁矿

该矿石中有两种含钒褐铁矿：(1) 粒状褐铁矿：

颗粒较规则，磨光面反射率较高。通过偏光显微镜和扫描电镜分析发现，其粒度主要分布于 0.005 ~ 0.08 mm，多嵌布于石墨、石英粒间或缝隙中，也见与钒云母连生，有的粒状褐铁矿具明显的溶蚀孔洞；（2）胶状褐铁矿：具明显的胶体物特征或呈胶状渲染于黏土中。通过偏光显微镜和扫描电镜分析发现，该胶状褐铁矿 -0.01 mm 粒级分布率约为 51%，质软易碎，呈土状、皮壳状，多与黏土矿物混杂。

化学成分能谱分析表明该褐铁矿普遍含钒，且含钒量变化较大，粒状褐铁矿含  $V_2O_5$  8.16% ~ 28.39%，平均质量分数为 15.60%，胶状褐铁矿含  $V_2O_5$  2.97% ~ 23.29%，平均质量分数为 11.42%。除钒外，褐铁矿中还含多种杂质，包括钛、锰、铜、镍、锌、钙、硅、铝、磷、硫等，胶状褐铁矿因与黏土混杂，比粒状褐铁矿含更高的硅、铝。X 射线衍射分析结果表明粒状褐铁矿含石英杂质，胶状褐铁矿含高岭土、伊利石等杂质。两种褐铁矿单矿物化学分析结果分别为  $V_2O_5$  9.07% 和 6.85%。能谱未能检测  $H_2O$ ，故能谱分析结果高于化学分析结果。

采用 MLA 的元素特征 X 射线面扫描分析粒状和胶状褐铁矿中钒、铁、钛、铝分布特点，结果表明粒状褐铁矿中钒与铁、钛的分布基本一致；在胶状褐铁矿中，钒、铁、铝的分布不均匀，具胶态凝聚特点，钒和铁的分布与铝的分布呈现互为消长关系。由此表明，粒状褐铁矿中的钒可能为原生铁矿物中的钒，由磁铁矿氧化生成，而胶状褐铁矿中可能为钒与氢氧化铁呈胶体迁移，共沉积凝聚生成。

### 3.3 含钒黏土矿物

该矿石中含有大量的含钒黏土矿物，主要为高岭土和伊利石。通过偏光显微镜和扫描电镜分析发现，该黏土矿物被含钒胶状褐铁矿渲染，并密切共生，高岭土和伊利石的粒度较细，-0.01 mm 粒级占有率分别约为 43% 和 60%。化学成分能谱分析

表明该高岭土和伊利石中均含有数量不等的钒，平均质量分数分别为  $V_2O_5$  2.36% 和 1.56%。该含钒黏土矿物单矿物化学分析结果为  $V_2O_5$  1.75%。

### 3.4 含钒氧化钛矿物

该矿石中的含钒氧化钛矿物有少量的含钒假金红石和含钒白钛石，微量的钒钛矿。

含钒假金红石：为钛铁矿蚀变产物，化学成分能谱分析表明该假金红石中的铁、钛含量变化较大，富含钒， $V_2O_5$  含量 8.75% ~ 23.63%，平均质量分数为 15.96%，并含少量铀、镍、铜、锌、钙、铝、硅、磷、硫等杂质。

含钒白钛石：亦为钛铁矿蚀变产物，白钛石没有固定的化学组成和晶体结构，而是由氧化钛、氧化铁、二氧化硅、氧化铝等组成的多相微粒集合体。化学成分能谱分析表明该白钛石化学成分较复杂，也富含钒， $V_2O_5$  含量 7.60% ~ 18.21%，平均质量分数为 11.98%。还含较高的硅、铝以及磷、硫等杂质，但与假金红石相比钛高铁低，表明白钛石比假金红石蚀变程度更深。

通过偏光显微镜和扫描电镜分析发现，该含钒假金红石和含钒白钛石的粒度主要分布于 0.005 ~ 0.08 mm，矿石中可见钒钛矿、含钒假金红石、含钒白钛石三者共生，原生的钒钛矿被假金红石充填交代，呈残晶状，假金红石又被白钛石交代，并常见假金红石与白钛石呈交代渐变关系，也有白钛石与褐铁矿共生。

## 4 选石墨尾矿物质成分

根据该矿石的性质，建议采用优先选石墨 - 石墨尾矿再选钒的工艺回收石墨和钒。选矿试验采用阶段磨矿一粗一扫四精顺次闭路工艺选石墨，获得固定碳品位 92.3%、回收率 91.9% 的石墨精矿。

石墨尾矿产率 74.51%，其多元素分析结果见表 4。

表4 尾矿多元素分析结果 /%  
Table 4 Analysis results of multi-elements of tailings

固定碳	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe	S	Co	Ni	Cu	Pb	Zn	SiO <sub>2</sub>
2.8	0.71	2.64	0.015	< 0.005	0.022	0.016	< 0.01	0.066	81.83
Na	CaO	MgO	K	MnO	TiO <sub>2</sub>	Cr	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
0.18	0.036	0.077	0.19	< 0.005	0.18	0.024	0.11	3.95	

结果表明该选石墨尾矿样品中固定碳含量2.8%，V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量0.71%，可见钒在选石墨尾矿中得到富集。选石墨尾矿矿物组成定量测定结果见表5。

表5 尾矿矿物组成定量测定结果  
Table 5 Results of quantitative determination of mineral composition of the raw ore

矿物	含量 /%	矿物	含量 /%	矿物	含量 /%
石墨	2.800	含钒电气石	0.015	铁白云石	0.019
含钒粒状褐铁矿	2.028	钒云母	0.282	磷钒铝石	0.813
含钒胶状褐铁矿	3.239	含钒伊利石	2.718	锆石	0.017
钒钛矿	<0.001	含钒高岭土	9.532	其他	0.120
含钒假金红石	0.410	石英	76.792	合计	100.000
含钒白钛石	0.572	长石	0.630		
钙钒榴石	<0.001	钙铁榴石	0.013		

与原矿相比，选石墨尾矿中石墨含量大幅减少，其他矿物含量相对增加。

## 5 选石墨尾矿中钒的赋存状态

根据选石墨尾矿的矿物含量和各矿物含V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>量，计算出钒的平衡分配见表6。

表6 钒在尾矿各矿物中的平衡分配  
Table 6 Equilibrium distribution of vanadium in tailing minerals

矿物	矿物含量 /%	矿物 V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 含量 /%	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 分布率 %
钒云母	0.282	6.09	2.18
含钒钙镁电气石	0.015	13.22	0.25
含钒假金红石	0.410	15.96	8.30
含钒白钛石	0.572	11.98	8.69
含钒粒状褐铁矿	2.028	9.07*	23.33
含钒胶状褐铁矿	3.239	6.85*	28.14
含钒黏土	12.25	1.75*	27.19
石墨	2.8	0.15*	0.53
石英等脉石	78.275	0.014*	1.39
其他	0.120	/	/
合计	100.000	0.79	100.00

\* 为单矿物分析数据。

从表中可见，选石墨尾矿样品中的钒主要赋存于褐铁矿、黏土和氧化钛矿物中。从铁钛矿物和黏土中回收钒，V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>理论品位4.08%，理论回收率95%。若不回收黏土，V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>理论品位8.64%，理论回收率68%。

## 6 结论

(1) 莫桑比克某含钒石墨矿原矿样品中固定碳含量23.8%，V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量0.64%，具有利用价值。该矿主要含碳矿物为石墨，钒矿物种类较多，主要含钒矿物为含钒粒状褐铁矿、含钒胶状褐铁矿、含钒黏土——高岭土和伊利石，少量的钒云母、含钒白钛石、含钒假金红石，极少量的钒钛矿、钒电气石、钙钒榴石等。脉石矿物主要为石英和极少量的长石等。

(2) 该石墨为结晶状，多呈六方片状、鳞片状嵌布于石英晶粒或裂隙之间，并有些微细片状石墨包含于石英晶粒中，并常见揉皱状石墨与碎裂石英共生。该石墨粒度粗，鳞片大，-2.56+0.16 mm粒级分布率为87.11%，磨矿过程易于单体解离。

(3) 该矿石中有两种含钒褐铁矿：粒状褐铁矿粒度主要分布于0.005~0.08 mm，多嵌布于石墨、石英粒间或缝隙中，也见与钒云母连生，有的具明显的溶蚀孔洞；胶状褐铁矿-0.01 mm粒级占有率约为51%，质软易碎，呈土状、皮壳状，多与黏土矿物混杂。两种褐铁矿中普遍含钒，且含钒量变化较大，单矿物化学分析结果分别为V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 9.07%和6.85%。

(4) 根据该矿石的性质，建议采用优先选石墨-选石墨尾矿再选钒的工艺回收石墨和钒。选石

墨尾矿样品中固定碳含量 2.8%，V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量 0.71%，可见钒在选石墨尾矿中得到富集。与原矿相比较，选石墨尾矿中石墨含量大幅减少，其他矿物含量相对增加。

(5) 选石墨尾矿样品中的钒主要赋存于褐铁矿、黏土和氧化钛矿物中。从铁钛矿物和黏土中回收钒，V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 理论品位 4.08%，理论回收率 95%。若不回收黏土，V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 理论品位 8.64%，理论回收率 68%。

### 参考文献：

- [1] 程飞飞, 张韬, 于阳辉, 等. 高黏土石墨矿的工艺矿物学及选矿试验研究 [J]. 中国矿业, 2018, 27(1): 132-136.  
Cheng F F, Zhang T, Yu Y H, et al. Technological mineralogy and Experimental study on mineral processing of high clay graphite [J]. China Mining, 2018, 27(1): 132-136.
- [2] 马林霄, 陈德稳, 李庆哲, 等. 东北某晶质石墨矿可选性初步研究 [J]. 现代矿业, 2019, 35(3): 118-123.  
Ma L X, Chen D W, Li Q Z, et al. A preliminary study on the selectivity of a crystalline graphite deposit in northeast China [J]. Modern mining, 2019, 35(3): 118-123.
- [3] 张立, 贺爱平, 尤大海, 等. 湖北随县微细粒石墨矿工艺矿物学研究 [J]. 矿冶, 2018, 27(4): 114-119.  
Zhang L, He A P, You D H, et al. Study on mineralogy of fine graphite ore process in Suixian county, Hubei province [J]. Mining & Metallurgy, 2018, 27(4): 114-119.
- [4] 胡锐, 程飞飞, 岑对对, 等. 矿物功能材料的发展现状、问题及趋势 [J]. 矿产综合利用, 2019(3): 1-6.  
Hu R, Cheng F F, Cen D D, et al. Development status, Problems and trends of mineral functional materials [J]. Mineral Comprehensive Utilization, 2019(3): 1-6.
- [5] 万贵龙, 张春林, 袁建江. 内蒙古阿拉善左旗某地晶质石墨矿特征分析 [J]. 世界有色金属, 2017(18): 114-116.  
Wan G L, Zhang C L, Yuan J J. Characteristics analysis of a certain crystalline graphite deposit in Alashan Left Banner, Inner Mongolia [J]. World Nonferrous Metals, 2017(18): 114-116.
- [6] 传秀云. 石墨资源状况和产业发展前景 [J]. 高科技与产业化, 2014(02): 50-55.  
Chuan X Y. Status of graphite resources and industrial development prospects [J]. High Technology and Industrialization, 2014(2): 50-55.
- [7] 李美荣, 梁冬云, 何晓娟, 等. 含钒褐铁矿氧化焙烧过程中钒的赋存状态及浸出机理研究 [J]. 矿产保护与利用, 2018(2): 74-79.  
Li M R, Liang D Y, He X J, et al. Study on the occurrence state and leaching mechanism of vanadium during oxidizing roasting of vanadium containing limonite [J]. Mineral Protection and Utilization, 2018(2): 74-79.
- [8] 刘建国, 张军, 汤玉和. 浮选富集某石墨尾矿中的钒云母 [J]. 现代矿业, 2015, 31(8): 61-62.  
Liu J G, Zhang J, Tang Y H. Vanadium mica in a graphite tailings enriched by flotation [J]. Modern mining, 2015, 31(8): 61-62.
- [9] 陈智杰, 喻福涛, 高惠民, 等. 陕西某石墨矿工艺矿物学与选矿研究 [J]. 矿产综合利用, 2019(1): 66-69.  
Chen Z J, Yu F T, Gao H M, et al. Study on mineralogy and mineral processing of a graphite ore in Shaanxi province [J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2019(1): 66-69.
- [10] 张大海. 山西左权石墨矿矿物组成及选矿试验研究 [J]. 矿产勘查, 2019, 10(2): 253-256.  
Zhang D H. Experimental study on mineral composition and mineral dressing of zuoquan graphite deposit in Shanxi Province [J]. Mineral exploration, 2019, 10(2): 253-256.
- [11] 何富超, 张凌燕, 邱杨率, 等. 莫桑比克东部地区大鳞片石墨选矿试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(12): 4205-4210, 4216.  
He F C, Zhang L Y, Qiu Y L, et al. Experimental study on large scale graphite mineral processing in eastern mozambique [J]. China silicate bulletin, 2017, 36(12): 4205-4210+4216.
- [12] 焦玄, 邱杨率, 张凌燕, 等. 莫桑比克 Nicanda Hill 地区石墨矿选矿试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(6): 1940-1945, 1957.  
Jiao X, Qiu Y L, Zhang L Y, et al. Experimental study on graphite ore dressing in Nicanda Hill region, mozambique [J]. Bulletin of silicates, 2016, 35(6): 1940-1945, 1957.

(下转 26 页)

### Sensor-driven Intelligent Mineral Processing: Past, Present and Future

Wu Xishun<sup>1,2</sup>, Deng Jie<sup>3</sup>, Jiang Huanqin<sup>2,4</sup>, Zhang Wei<sup>1,2</sup>, Yao Xiang<sup>4</sup>, Tian Qianning<sup>1,2</sup>

(1 Documentation Center, China Geological Survey, China National Geological Library, Beijing, China; 2 International Research Center, CGS, Beijing, China; 3. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Chengdu, Sichuan, China; 4. China Mining News, GCS, Beijing, China; 5. Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou, Guangdong, China)

**Abstract:** Sensor-driven intelligent mineral processing is essentially data-driven. The automation of beneficiation started earlier, but intelligence lags behind other industries. Intelligent beneficiation based on sensors, big data and AI is an important part of building a modern wisdom mine. Decades of application experience and development trends show that its level of intelligence continues to increase, and it is gradually integrating a large class of intelligent sensing expertise. Disruptive technology innovation bulk sorting technology is reshaping new mining processes; high-throughput particle sorting benefits from the development of diverse light sources such as XRF, Laser, NIR, Color and XRT; neutron activation analysis (PGNAA), magnetic resonance (MR) and other sensor technology advancements have created block picking as an emerging field; advanced process control (APC) and other digital management technologies have shown their skills in the field of grinding and flotation; CPR recovery has promoted downstream tailings management innovation and comprehensive utilization. The international Lighthouse Project provides practical cases and valuable experience for the development of intelligent mineral processing.

**Keywords:** Intelligent Mineral processing; Sensors; Bulk Sorting; Coarse Particle Recovery; Disruptive Innovation



(上接 114 页)

### Processing Mineralogy of a Vanadium-bearing Graphite Ore from Mozambique

Zhang Lili, Hong Qiuyang, Li Bo, Li Meirong, Liang Dongyun, Liu Jianguo

(Guangdong Institute of Resources Comprehensive Utilization State Key Laboratory of Rare Metals Separation and Comprehensive Utilization, Guangdong Provincial Key Laboratory of Development & Comprehensive Utilization of Mineral Resources, Guangzhou, Guangdong, China)

**Abstract:** The process mineralogy of a vanadium-bearing graphite ore from Mozambique is studied in detail by chemical analysis, microscope, and MLA mineral automatic quantitative technology, etc. The results indicate that the fixed carbon and V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> content in the raw ore respectively are 23.8% and 0.64%. The main carbon minerals are graphite, and main vanadium minerals are vanadium-bearing granulated limonite, colloidal limonite and clay, etc. It is suggested to recycle graphite and vanadium using the process of preferential graphite - graphite tailings to recycle vanadium. The V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> content in graphite tailings is 0.71%, and vanadium mainly exist in limonite, clay and titanium oxide minerals. Recycling vanadium from iron-titanium minerals and clay in graphite tailings, the V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> theoretical grade is 4.08% and the theoretical recovery rate is 95%. If the clay is not recovered, the V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> theoretical grade is 8.64% and the theoretical recovery is 68%.

**Keywords:** Graphite; Vanadium-bearing limonite; Processing mineralogy; MLA; Occurrence state