

# 嫦娥五号月壤中钛铁矿的工艺矿物学研究

刘浩<sup>1,2</sup>, 刘建忠<sup>2\*</sup>, 缪秉魁<sup>1</sup>, 曾小家<sup>2</sup>, 朱凯<sup>2</sup>, 夏志鹏<sup>1</sup>, 陈国柱<sup>1</sup>

1. 桂林理工大学 陨石与行星物质研究中心, 行星地质演化广西高校重点实验室, 广西隐伏矿产勘查重点实验室, 桂林 541006; 2. 中国科学院 地球化学研究所 月球与行星科学研究中心, 贵阳 550081

**摘要:** 嫦娥五号任务采样点位于月球风暴洋的月海玄武岩单元, 其中钛铁矿含量为5%~10%(体积分数, 下同)。本文从资源利用的角度开展了钛铁矿的工艺矿物学研究, 以为月球资源的采、选、冶等提供基础参数。本研究利用扫描电镜、电子探针等实验方法, 对嫦娥五号月壤样品的矿物组成, 以及样品中钛铁矿的粒度特征、颗粒形状、化学成分和解离度等进行了分析研究。结果表明, 嫦娥五号玄武岩中的钛铁矿以细粒为主, 其中粒度为7.5~200  $\mu\text{m}$ 的钛铁矿数量占97%; 钛铁矿颗粒呈粒状、针状、柱状和不规则状, 数量较多的是粒状与不规则状; 钛铁矿中 $\text{TiO}_2$ 含量为50.78%(质量分数),  $\text{FeO}$ 含量为47.35%, 其中粒状、不规则状钛铁矿 $\text{TiO}_2$ 含量变化范围相较于针状、柱状变化范围更大; 含钛铁矿的矿物颗粒整体的粒径越小, 钛铁矿的单体解离度越大, 更容易解离为单体。

**关键词:** 嫦娥五号样品; 钛铁矿; 工艺矿物学; 月球资源

中图分类号: P575 文章编号: 1007-2802(2024)05-1037-12 doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20240105

## A study on process mineralogy of ilmenite in the Chang'e-5 lunar soil

LIU Hao<sup>1,2</sup>, LIU Jian-zhong<sup>2\*</sup>, MIAO Bing-kui<sup>1</sup>, ZENG Xiao-jia<sup>2</sup>, ZHU Kai<sup>2</sup>, XIA Zhi-peng<sup>1</sup>, CHEN Guo-zhu<sup>1</sup>

1. *Institution of Meteorites and Planetary Materials Research, Key Laboratory of Planetary Geological Evolution, Guangxi Key Laboratory of Exploration for Hidden Metallic Ore Deposits, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi 541006, China;*  
2. *Center for Lunar and Planetary Science, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China*

**Abstract:** The Chang'e-5 mission sampling site is located in the lunar mare basalt unit of the Oceanus Procellarum. The sample contains 5% to 10% ilmenite. In this paper, the process mineralogy of ilmenite has been studied from the perspective of resource utilization, in order to provide basic parameters for mining, processing and smelting of mineral resources of the Moon. By using scanning electron microscopy and electron probe, we have studied mineral composition of the Chang'e-5 sample and its contained ilmenite properties including the particle size characteristics, particle shapes, chemical compositions and dissociation degrees of ilmenites in the sample. The results show that ilmenites in the Chang'e-5 basalt are mainly fine grained, with sizes of 97% ilmenites varying from 7.5 to 200  $\mu\text{m}$ . Ilmenite particles are granular, acicular, columnar and irregular shaped. Most of them are granular and irregular shaped. The average contents of  $\text{TiO}_2$  and  $\text{FeO}$  in ilmenites are 50.78% and 47.35% respectively. Especially, the variation ranges of  $\text{TiO}_2$  contents in granular and irregular ilmenites are larger than those of the acicular and columnar ilmenites. The smaller the overall size of the mineral particles containing ilmenite, the greater the degree of monomer dissociation of ilmenite, ilmenite more easily dissociated into monomer.

**Key words:** Chang'e-5 sample; ilmenite; process mineralogy; lunar resource

收稿编号: 2024-0080, 2024-4-29 收到, 2024-5-29 改回

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF0503100); 中国科学院战略性先导科技专项(B类)项目(XDB41000000); 中国科学院重点部署科研专项(KGFZD-145-23-15); 广西科技基地与人才建设专项课题(桂科AD23026084, AD1850007)

第一作者简介: 刘浩(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 天体化学与行星科学。E-mail: 2321976542@qq.com.

\*通信作者简介: 刘建忠(1968—), 男, 研究员, 研究方向: 月球与行星地质。E-mail: liujianzhong@mail.gyig.ac.cn.

引用此文:

刘浩, 刘建忠, 缪秉魁, 曾小家, 朱凯, 夏志鹏, 陈国柱. 2024. 嫦娥五号月壤中钛铁矿的工艺矿物学研究. 矿物岩石地球化学通报, 43(5): 1037–1048.

doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20240105

Liu H, Liu J Z, Miao B K, Zeng X J, Zhu K, Xia Z P, Chen G Z. 2024. A study on process mineralogy of ilmenite in the Chang'e-5 lunar soil. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 43(5): 1037–1048. doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20240105

## 0 引言

近年来,世界各国月球探测的主要目标逐渐从认识月球转变为利用月球。中国的探月工程已经完成了嫦娥一号到五号“绕落回”的无人探测任务,即将开展载人月球探测计划,建立月球科研站,月球资源的原位综合利用是未来月球探测的一个重要内容(刘建忠等,2022)。月球资源包括钛铁矿、稀土、 $^3\text{He}$ 等,其中钛铁矿是月海玄武岩中丰度最大的氧化物矿物,钛铁矿总资源量约为150万亿吨(刘剑等,2006)。月球钛铁矿对月球资源原位利用有重要的作用,其中高钛玄武岩月壤是将来资源原位利用的重要对象,不仅可以用于关键金属的冶炼,还可以利用月壤中的钛铁矿进行水和氧气的制备(刘建忠等,2022)。

目前,国内外研究者都对地球上的钛铁矿(Pownceby et al.,2008;刘超等,2021)以及其他多种矿物(庞建涛等,2016;智慧等,2021)的工艺矿物学进行了较多的研究,技术方法较为成熟(Abdollahi et al.,2020;谢志诚等,2020;Zhai et al.,2020;Mehdilo and Iran-najad,2021)。例如,四川会理竹箐钒钛磁铁矿(李俊翰,2015),有关矿石的物质组分、结构构造、产出形态、化学成分、工业类型及磁选分离已经有了详细研究;辽西钒钛磁铁矿(许承宝,2018),其矿石矿物组成和化学成分特征、有价元素赋存状态、选铁工艺流程等已开展过研究;西藏甲玛难处理混合铜矿(李尧,2019),根据矿石的工艺矿物学特征的选矿工艺流程已拟定出;重庆城口高燕锰矿(尹鑫,2020),有关锰矿的工艺矿物学特征已有较详细研究,已确定出相关的选矿方法。同时,国外有乌克兰盆地钛铁矿(Pownceby I et al.,2008)、尼日利亚钛铁矿(BABA et al.,2013)、伊朗南部及西北部钛铁矿(Mehdilo et al.,2015)等也已有较多研究。此外,诸多研究工作如对月球资源利用的途径、内容及方案等也相继开展(刘剑等,2006;李志杰,果琳丽,2017;李琛等,2020;高楠等,2022;Li et al.,2021;杨蔚等,2023)。但是,上述研究工作对于月球钛铁矿的工艺矿物学研究还未见有系统的报道。

开展月球钛铁矿的工艺矿物学研究不仅对工艺矿物学的学科发展有较大的意义,而且也可作为月球钛铁矿资源的采-选-冶等提供基础参数(刘建忠等,2022)。嫦娥五号任务返回的月壤中富含钛铁矿,为开展月球样品中钛铁矿的工艺矿物学研究提供了契机。本文对样品的矿物组成,以及钛铁矿的粒度特征、颗粒形状特征、化学成分和解离度等进行研究,以获取嫦娥五号玄武岩中钛铁矿的工艺矿物学参数。

## 1 样品和实验方法

本研究所用的嫦娥五号样品为铲取的表层月壤(CE5C0600YJFM00304与CE5C0800YJFM001GP01)。随机挑选出月壤中粒度大于 $30\ \mu\text{m}$ 的岩屑颗粒,将其置于直径为1英寸的镶嵌容器中,利用配好的环氧树脂进行样品的镶嵌,随后放入真空干燥箱,在约 $75\ ^\circ\text{C}$ 条件下干燥8 h左右。再利用金刚石线切割机将圆柱体环氧树脂切出一个厚度约5 mm的切片。对切片进行粗磨、细磨、抛光,制成光片。最后将样品进行喷碳处理后进行原位分析。

分析样品的图像拍摄在中国科学院地球化学研究所完成,所用仪器为FEI Scios聚焦离子束/扫描电子显微镜(FIB/SEM)。样品背散射电子(BSE)图像获取的条件为电压20 kV、束流1.6 nA。样品的矿物化学成分分析在桂林理工大学完成,所用仪器为JXA 8230电子探针(EPMA),该仪器的使用分析条件为加速电压15 kV、电子束电流20 nA。单矿物分析采用聚焦方法测定,束斑直径为 $1\ \mu\text{m}$ 。分析使用标样为天然硅酸盐矿物和氧化物,标样及元素最低检测限( $\times 10^{-6}$ )为:Na(钠长石,97),Mg(橄榄石,69),Al(钠长石,88),Si(橄榄石,69),K(金云母,77),Ca(硅灰石,155),Ti(金红石,153),Cr(金属铬,83),Mn(氧化锰,171),Fe(橄榄石,91),Ni(金属镍,201)。分析结果采用自然矿物标准和合成矿物标准,并基于ZAF程序进行基体校正(陈宏毅等,2015)。对于测试岩屑颗粒的选取,则在样品BSE图像中选择2~4颗含不同形状钛铁矿颗粒的岩屑开展(包括柱状、针状、粒状和不规则状),并且选出的岩屑颗粒中包含所要研究的各个钛铁矿粒度范围。本次研究共选出13个岩屑颗粒,分别进行拍照和成分分析,分析时间为15 h。

本次研究采用Coreldraw软件中的标尺对钛铁矿的粒度进行统计,采用Photoshop中的像素功能研究钛铁矿的矿物组成特征,采用电子探针微量分析仪测定钛铁矿的化学组成,采用Photoshop中的网格功能研究钛铁矿的解离度。

## 2 实验结果

### 2.1 钛铁矿的粒度特征

分析目标矿物的粒度特征与分布特点可以分析并预测矿物达到最佳解离程度所需的磨矿粒度范围,对制定合理的选矿工艺流程具有一定的指导意义(王恩德,2021)。本次工作对挑选出的嫦娥五号岩屑颗粒样品中钛铁矿的粒度进行了统计分析,利用样品的BSE图像(图1)统计了213个钛铁矿颗粒,其粒度分布情况(图2、3,表1)如下:挑选出的样品中钛铁矿颗粒

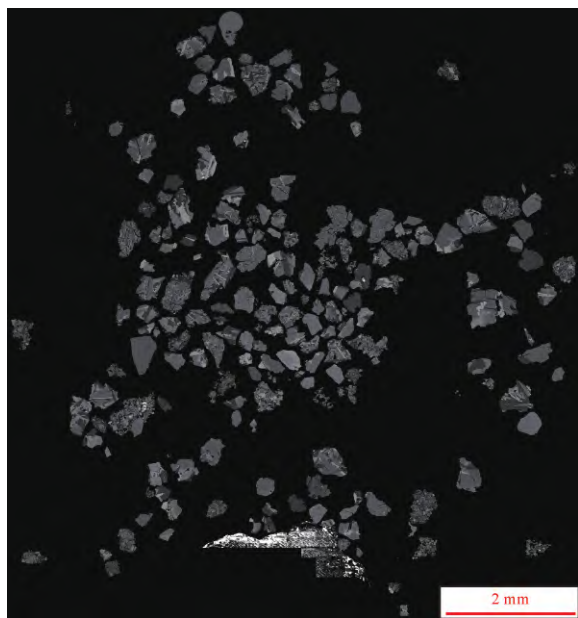


图1 嫦娥五号样品岩屑颗粒光片BSE图像

Fig.1 BSE image of rock debris grains of the Chang'e-5 sample

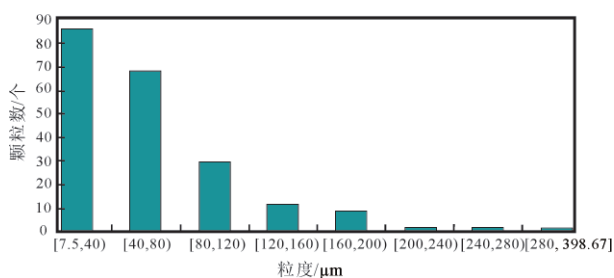


图2 嫦娥五号样品钛铁矿粒度分布

Fig.2 Size distribution of ilmenite grains in the Chang'e-5 sample

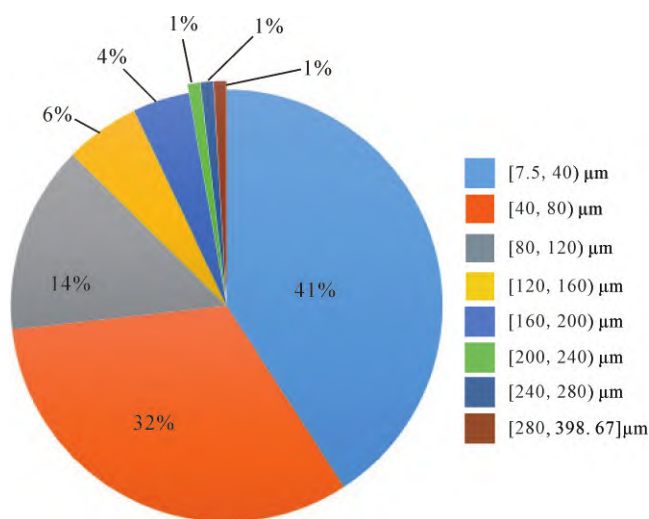


图3 嫦娥五号样品钛铁矿不同粒度数量占比

Fig.3 Different particle size proportions of ilmenites in the Chang'e-5 sample

表1 嫦娥五号样品钛铁矿粒度分布

Table 1 Size distribution of ilmenites in the Chang'e-5 sample

粒度范围/ $\mu\text{m}$	颗粒数	分布率/%	累计分布率/%
[7.5,40)	87	41	41
[40,80)	69	32	73
[80,120)	30	14	87
[120,160)	12	6	93
[160,200)	9	4	97
[200,240)	2	1	98
[240,280)	2	1	99
[280,398.67]	2	1	100

的最小粒度为7.50  $\mu\text{m}$ ,最大粒度为398.67  $\mu\text{m}$ 。其中粒径在 [7.5,40)  $\mu\text{m}$ 的颗粒有87颗,占总体数量的41%;粒径在 [40,80)  $\mu\text{m}$ 的颗粒有69颗,占总体数量的32%;粒径在 [80,120)  $\mu\text{m}$ 的颗粒有30颗,占总体数量的14%;粒径在 [120,160)  $\mu\text{m}$ 的颗粒有12颗,占总体数量的6%;粒径在 [160,200)  $\mu\text{m}$ 的颗粒有9颗,占总体数量的4%;粒径在 [200,240)  $\mu\text{m}$ 的颗粒2颗,占总体数量的1%;粒径在 [240,280)  $\mu\text{m}$ 的颗粒2颗,占总体数量的1%;粒径在 [280,398.67]  $\mu\text{m}$ 的颗粒有2颗,占总体数量的1%。综上所述,嫦娥五号样品的钛铁矿以细粒为主,其中粒径为 [7.5,120)  $\mu\text{m}$ 的颗粒占到了87%。

### 2.2 样品矿物组成与钛铁矿颗粒形状特征

对矿石组成矿物的分析是工艺矿物学研究的重要工作,目的是查明矿石样品中主要有用矿物的种类和数量,确定可供选矿回收的主要有用矿物(李俊翰,2015)。嫦娥五号样品中主要矿物有辉石、斜长石、橄榄石和钛铁矿等,采用挑选样品的BSE图像,利用Photoshop的像素功能计算得出这几种主要矿物的模式丰度(体积分数)分别为48.62%、26.06%、18.26%和7.05%。

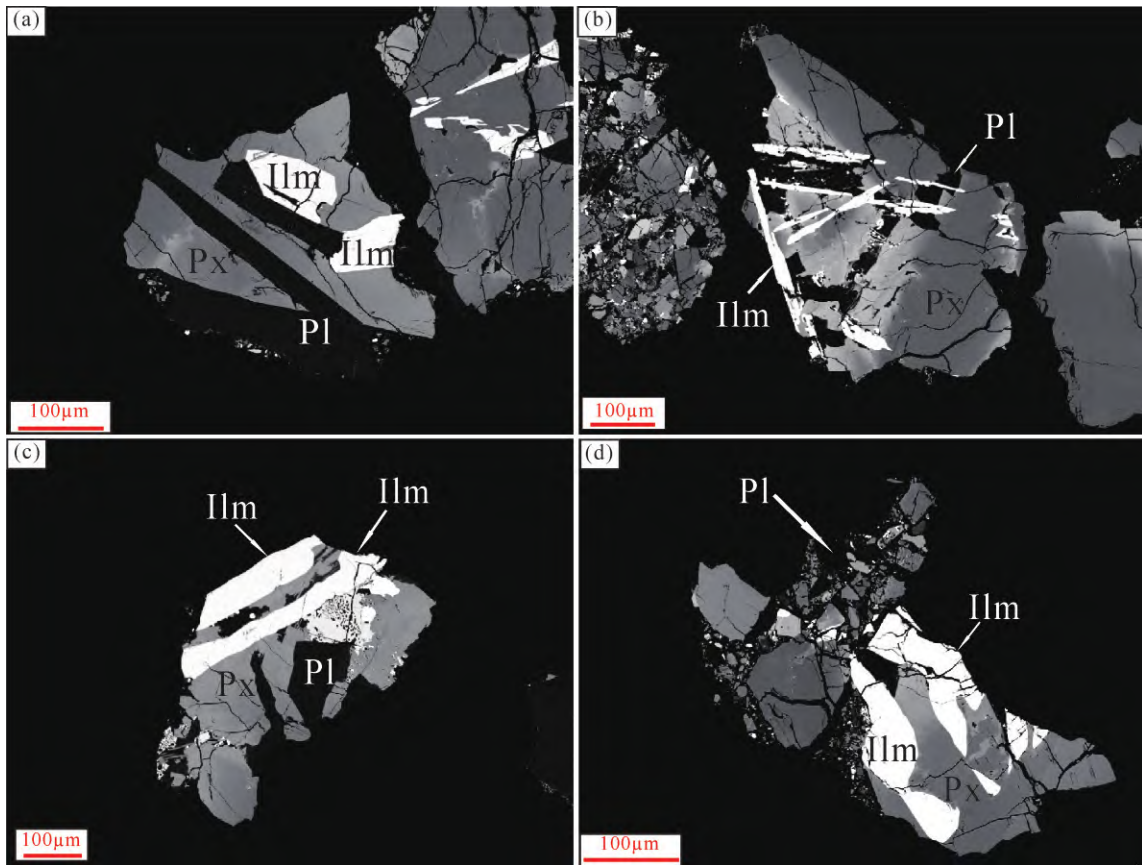
观察可见,嫦娥五号样品钛铁矿颗粒形状可分为粒状、针状、柱状和不规则状(图4),所研究的213颗钛铁矿颗粒中,粒状82个,占38.50%;针状34个,占15.96%;柱状26个,占12.21%;不规则状71个,占33.33%(图5)。

### 2.3 钛铁矿的化学组成

研究矿石的化学组成主要是明确矿石中所含元素的种类与含量,以确定可供选矿回收的有用成分(李俊翰,2015)。本次研究主要为确定嫦娥五号样品中Ti和Fe的含量,而Ti和Fe主要赋存与钛铁矿中,所以主要测定元素在钛铁矿中的含量。选取样品中不同形状的钛铁矿使用电子探针测定化学成分,结果列于表2~5。

分析结果显示,针状钛铁矿中 $\text{TiO}_2$ 的质量分数为





(a)粒状钛铁矿；(b)针状钛铁矿；(c)柱状钛铁矿；(d)不规则状钛铁矿Ilm—钛铁矿；Px—辉石；Pl—斜长石

图4 嫦娥五号样品四种不同形状的钛铁矿

Fig.4 Four different shaped ilmenites in the Chang'e-5 sample

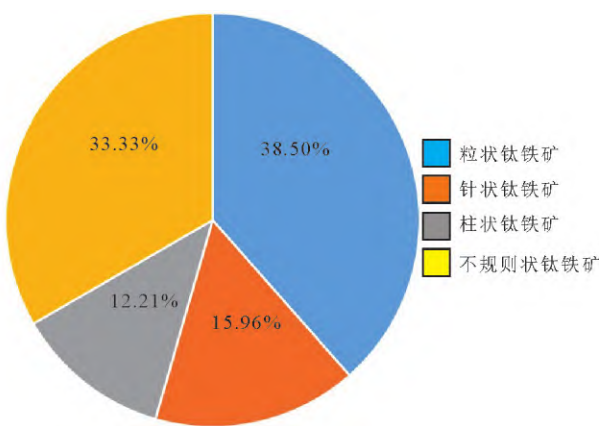


图5 不同形状钛铁矿占比

Fig.5 Proportion of ilmenites with different shapes

49.49%~52.06%，均值为50.64%；FeO为47.17%~48.54%，均值为47.96%。柱状钛铁矿中，TiO<sub>2</sub>的质量分数为50.23%~52.21%，均值为51.18%；FeO为46.32%~48.61%，均值为47.41%。粒状钛铁矿中，TiO<sub>2</sub>的质量分数为46.95%~53.87%，均值为51.14%；FeO为45.85%~47.91%，均值为46.84%。不规则状钛铁矿中，TiO<sub>2</sub>的质量分数为45.65%~52.37%，均值为50.52%；FeO的含量为43.66%~

48.71%，均值为46.74%。上述数据表明，柱状和粒状钛铁矿的TiO<sub>2</sub>含量大于针状和不规则状钛铁矿的TiO<sub>2</sub>含量，而针状和柱状钛铁矿的FeO含量大于粒状和不规则状钛铁矿的FeO含量。整体上看，几种钛铁矿的TiO<sub>2</sub>质量分数为45.65%~53.87%，均值50.78%；FeO的质量分数为43.66%~48.71%，均值为47.35%。

### 2.4 钛铁矿解离度特征

2.4.1 钛铁矿连生类型 矿石经粉碎后，只含有一种矿物的颗粒成为单体颗粒或单矿物颗粒，两种或以上矿物组成的颗粒成为连生体颗粒(王恩德, 2021)。连生体颗粒可根据矿物共生类型分为以下4种(图6)：

毗邻型：两种矿物连生边界平直、舒缓、边界线呈线状弯曲型；

细脉型：一种矿物呈细脉穿插在另一种矿物中。

壳层型：在连生颗粒中，含量较低矿物以薄厚不均的似壳层状环绕在主体矿物外周边，局部被外壳矿物覆盖。

包裹型：一种矿物(有用矿物)以微包体形式镶嵌在另一种矿物(载体)中，包体粒径在5 µm以下，有用矿物含量不及总量的1/20。

表2 针状钛铁矿化学成分表

Table 2 Chemical compositions of acicular ilmenites

(%)

序号	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	NiO	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CoO	合计
1	0.02	0.06	0.10	0.16	51.61	0.39	48.41	0.00	0.00	0.19	0.41	0.00	0.07	101.42
2	0.00	0.10	0.08	0.10	49.99	0.38	47.47	0.03	0.00	0.09	0.40	0.01	0.06	98.70
3	0.00	0.05	0.13	0.16	49.73	0.43	47.42	0.00	0.00	0.21	0.43	0.03	0.07	98.66
4	0.00	0.11	0.10	0.15	51.02	0.42	47.83	0.04	0.00	0.07	0.49	0.03	0.09	100.34
5	0.02	0.12	0.08	0.08	50.43	0.44	47.86	0.02	0.00	0.10	0.53	0.00	0.06	99.73
6	0.03	0.43	0.10	0.51	49.49	0.27	48.04	0.01	0.00	1.01	0.46	0.06	0.04	100.47
7	0.00	0.11	0.11	0.16	50.75	0.41	47.90	0.02	0.00	0.07	0.48	0.06	0.10	100.16
8	0.02	0.06	0.11	0.10	49.78	0.35	47.91	0.00	0.00	0.10	0.54	0.05	0.05	99.06
9	0.02	0.17	0.13	0.21	49.97	0.43	47.17	0.00	0.00	0.15	0.46	0.05	0.08	98.83
10	0.00	0.09	0.10	0.04	50.06	0.38	47.76	0.00	0.00	0.06	0.47	0.05	0.04	99.04
11	0.00	0.05	0.11	0.01	50.46	0.37	47.49	0.10	0.00	0.06	0.57	0.05	0.13	99.40
12	0.00	0.10	0.11	0.11	50.71	0.32	48.00	0.00	0.00	0.05	0.54	0.05	0.11	100.09
13	0.00	0.15	0.09	0.11	51.71	0.38	48.41	0.00	0.00	0.07	0.51	0.01	0.13	101.56
14	0.00	0.08	0.10	0.11	51.96	0.40	48.42	0.00	0.00	0.07	0.62	0.01	0.02	101.79
15	0.01	0.18	0.10	0.03	52.06	0.36	48.01	0.00	0.00	0.09	0.50	0.03	0.06	101.42
16	0.02	0.18	0.07	0.08	50.53	0.33	48.42	0.00	0.00	0.05	0.57	0.04	0.10	100.40
17	0.00	0.36	0.07	0.09	50.67	0.36	48.03	0.08	0.00	0.02	0.56	0.04	0.05	100.32
18	0.01	0.28	0.04	0.13	51.81	0.36	48.54	0.00	0.00	0.04	0.56	0.07	0.07	101.90
19	0.00	0.24	0.08	0.02	51.41	0.42	47.95	0.00	0.01	0.05	0.55	0.07	0.06	100.86
20	0.00	0.29	0.06	0.12	49.68	0.33	48.04	0.01	0.00	0.04	0.44	0.02	0.06	99.09
21	0.00	0.16	0.06	0.12	49.71	0.42	47.97	0.00	0.00	0.08	0.45	0.03	0.09	99.09
平均值	0.01	0.16	0.09	0.12	50.64	0.38	47.96	0.01	0.00	0.13	0.50	0.04	0.07	100.11

表3 柱状钛铁矿化学成分表

Table 3 Chemical compositions of columnar ilmenites

(%)

序号	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	NiO	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CoO	合计
1	0.00	0.14	0.08	0.04	51.27	0.47	48.00	0.00	0.01	0.08	0.56	0.03	0.11	100.79
2	0.07	0.15	0.12	0.00	51.53	0.49	48.61	0.00	0.01	0.03	0.53	0.01	0.08	101.63
3	0.07	0.15	0.12	0.00	51.02	0.49	48.60	0.00	0.01	0.03	0.53	0.01	0.08	101.11
4	0.02	1.05	0.08	0.06	52.21	0.45	46.32	0.00	0.00	0.03	0.60	0.02	0.07	100.92
5	0.03	0.78	0.10	0.03	52.04	0.44	47.06	0.00	0.00	0.05	0.59	0.06	0.03	101.20
6	0.00	0.07	0.04	0.00	50.59	0.26	46.55	0.09	0.00	0.21	0.40	0.00	0.14	98.34
7	0.03	0.04	0.03	0.00	50.58	0.33	47.11	0.00	0.00	0.07	0.39	0.01	0.09	98.67
8	0.00	0.17	0.03	0.00	50.23	0.28	47.03	0.00	0.00	0.04	0.44	0.00	0.09	98.29
平均值	0.03	0.32	0.08	0.02	51.18	0.40	47.41	0.01	0.00	0.07	0.51	0.02	0.09	100.12

本次研究的嫦娥五号样品中钛铁矿的连生体占比情况为:毗邻型35%,细脉型28%,壳层型16%,包裹型21%。

2.4.2 钛铁矿与其他矿物的连生情况 样品中由两种或两种以上矿物组成的颗粒成为连生体颗粒。通过样品的BSE图像统计了嫦娥五号样品中钛铁矿的连生体颗粒。结果发现,与钛铁矿连生的主要矿物有辉石、

斜长石,橄榄石少量;钛铁矿的连生体主要有钛铁矿-辉石连生体(占15.96%)、钛铁矿-斜长石连生体(占13.83%)、钛铁矿-辉石-斜长石连生体(占钛铁矿连生体总数的68.08%)、钛铁矿-辉石-斜长石-橄榄石连生体(占2.13%)。

2.4.3 钛铁矿解离度计算 矿物解离度是有用矿物从矿石或选矿产品中解离成单体的程度。解离度的测

表4 粒状钛铁矿化学成分表

Table 4 Chemical compositions of granular ilmenites (%)

序号	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	NiO	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CoO	合计
1	0.03	0.27	0.10	0.02	50.91	0.32	47.91	0.01	0.00	0.05	0.47	0.03	0.11	100.25
2	0.01	0.37	0.11	0.14	51.33	0.47	46.90	0.01	0.00	0.04	0.54	0.08	0.11	100.10
3	0.03	0.75	0.10	0.03	52.23	0.43	46.97	0.00	0.00	0.04	0.59	0.05	0.09	101.31
4	0.00	0.47	0.09	0.02	51.44	0.31	47.21	0.02	0.00	0.02	0.54	0.05	0.09	100.24
5	0.06	0.70	0.10	0.01	50.73	0.45	47.26	0.05	0.00	0.04	0.55	0.08	0.09	100.09
6	0.01	0.34	0.74	0.60	46.95	0.37	46.13	0.04	0.00	2.87	0.52	0.01	0.02	98.58
7	0.00	2.16	0.12	0.06	52.82	0.52	45.85	0.00	0.00	0.06	0.57	0.12	0.08	102.35
8	0.00	0.31	0.06	0.11	49.97	0.32	46.67	0.00	0.00	0.07	0.50	0.03	0.06	98.09
9	0.00	0.31	0.06	0.11	53.87	0.32	46.67	0.00	0.00	0.07	0.50	0.03	0.06	101.99
平均值	0.02	0.63	0.16	0.12	51.14	0.39	46.84	0.01	0.00	0.36	0.53	0.05	0.08	100.33

表5 不规则状钛铁矿化学成分表

Table 5 Chemical compositions of irregular ilmenites (%)

序号	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	NiO	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CoO	合计
1	0.01	0.13	0.11	0.06	50.76	0.29	48.71	0.05	0.00	0.05	0.47	0.00	0.09	100.73
2	0.02	1.45	0.07	0.00	51.42	0.42	45.33	0.00	0.00	0.06	0.50	0.14	0.09	99.50
3	0.00	1.47	0.04	0.00	51.94	0.38	45.33	0.00	0.00	0.00	0.50	0.09	0.08	99.83
4	0.00	0.18	0.11	0.18	49.99	0.43	47.25	0.00	0.00	0.08	0.48	0.00	0.10	98.79
5	0.00	0.33	0.09	0.04	50.09	0.43	46.96	0.00	0.00	0.06	0.57	0.10	0.06	98.71
6	0.00	0.40	0.10	0.00	52.37	0.41	47.86	0.00	0.00	0.05	0.60	0.05	0.05	101.90
7	0.00	0.35	0.10	0.04	51.91	0.53	47.52	0.00	0.00	0.06	0.61	0.05	0.09	101.25
8	0.01	0.51	0.13	0.04	52.09	0.45	46.81	0.00	0.00	0.04	0.56	0.04	0.09	100.77
9	0.00	0.42	0.09	0.02	51.54	0.40	47.64	0.02	0.00	0.06	0.59	0.05	0.09	100.91
10	0.02	0.12	0.37	0.38	47.22	0.46	45.69	0.03	0.02	4.24	0.48	0.01	0.08	99.11
11	0.00	0.18	0.10	0.14	50.89	0.40	47.72	0.00	0.00	0.06	0.47	0.00	0.11	100.07
12	0.00	0.95	0.11	0.00	51.15	0.40	46.38	0.00	0.00	0.05	0.53	0.10	0.09	99.76
13	0.00	0.27	0.03	0.06	50.27	0.30	47.45	0.04	0.00	0.08	0.37	0.01	0.04	98.91
14	0.07	0.55	0.45	1.41	45.65	0.21	43.66	0.03	0.00	6.62	0.35	0.00	0.09	99.09
平均值	0.01	0.52	0.14	0.17	50.52	0.39	46.74	0.01	0.00	0.82	0.51	0.05	0.08	99.95

定结果可为选矿提供破碎/磨矿界限的基本参数(王恩德, 2021)。本次工作对嫦娥五号样品中钛铁矿解离度的计算使用的样品是CE5C0800YJFM001GP01制作的圆形光片(图7),统计样品中钛铁矿单体与连生体颗粒数的方法包括自动识别统计与人工统计。在整个样品光片中选取3个大小约为4mm×4mm的方形区域(图7中蓝色方框)进行自动识别统计,选取1个大小约为4mm×4mm的方形区域(图7中红色方框)进行人工统计,分别统计钛铁矿单体( $N_0$ )、1/4连生体( $N_1$ )、2/4连生体( $N_2$ )和3/4连生体的数量( $N_3$ )的数量,根据公式如下公式计算解离度( $L$ ):

$$L=N_0/(N_0+0.25N_1+0.5N_2+0.75N_3)\times 100\%$$

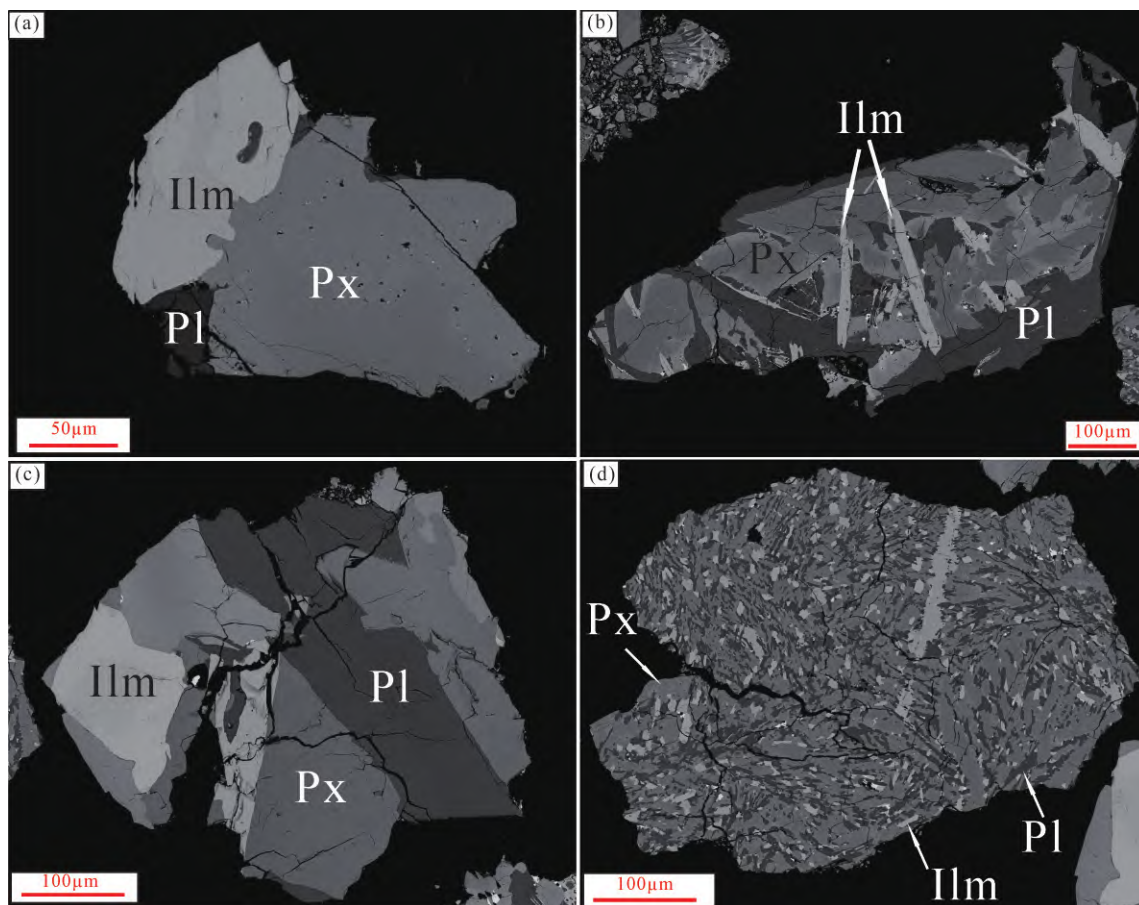
通过计算得到样品中,粒径为(0, 20] μm的颗粒

钛铁矿的解离度为88.83%, (20, 40] μm的颗粒钛铁矿的解离度为30.45%, (40, 60] μm的颗粒钛铁矿的解离度为27.45%。

为便于计算钛铁矿的解离度,在整体样品光片中选取3个区域对钛铁矿进行自动识别统计,用红色标志标出每个区域内的钛铁矿单体(图8a、9a、10a),用绿色标志标出连生体(图8b、9b、10b),另外选取一个区域对钛铁矿进行人工识别统计,用红色标志标出区域13的钛铁矿单体(图11a),用绿色标志标出连生体(图11b)。

自动统计结果表明,在(0, 20] μm的颗粒粒径范围内,区域6的1453个矿物颗粒中钛铁矿单体颗粒有14个,连生体有3个;区域12的1816个矿物颗粒中钛铁

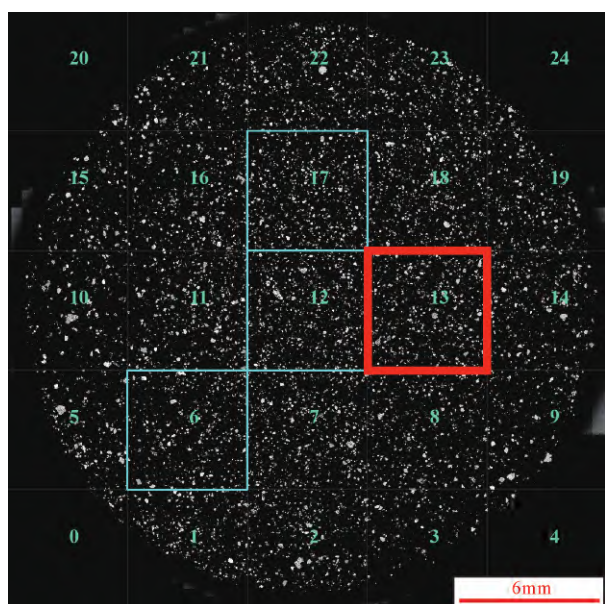




(a)毗邻型;(b)细脉型;(c)壳层型;(d)包裹型Ilm—钛铁矿;Px—辉石;Pl—斜长石

图6 嫦娥五号样品钛铁矿4种连生类型

Fig.6 Four types of intergrown ilmenites in the Chang'e-5 sample



蓝色框为自动识别区域,红色框为人工统计区域

图7 解离度计算选取的4个区域

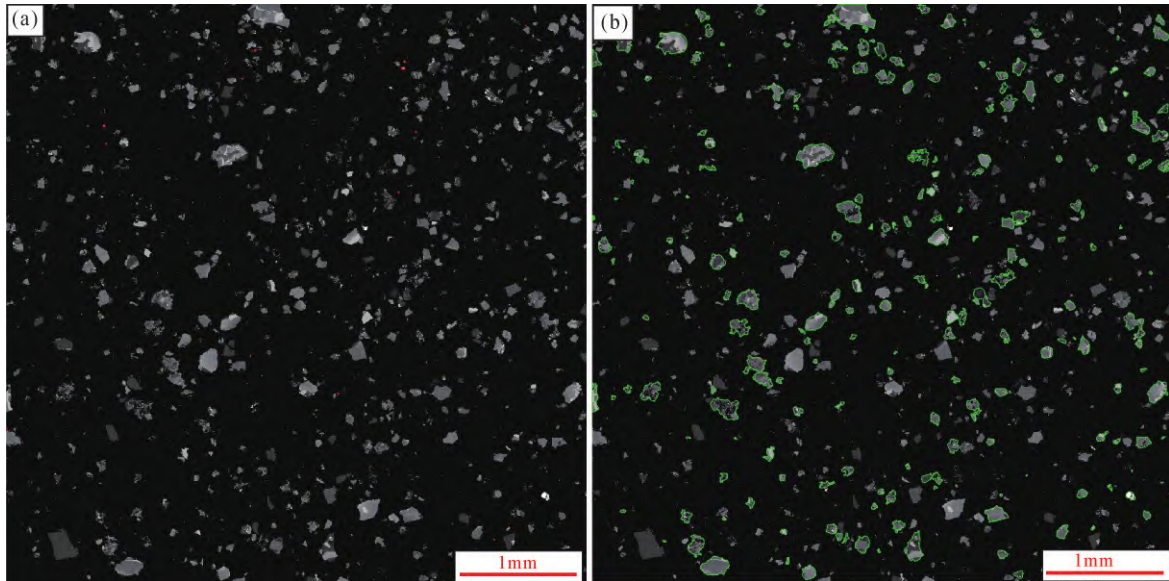
Fig.7 The four regions selected for the dissociation calculation

矿单体颗粒有11个,连生体有5个;区域17的1680个矿物颗粒中钛铁矿单体颗粒有10个,连生体有3个。在(20,40]µm的颗粒粒径范围内,区域6的钛铁矿单体颗粒有2个,连生体有15个;区域12的钛铁矿单体颗粒有2个,连生体有22个;区域17的钛铁矿单体颗粒有3个,连生体有27个。在大于40µm的颗粒粒径范围内,区域6的钛铁矿单体颗粒有0个,连生体有189个;区域12的钛铁矿单体颗粒有0个,连生体有257个;区域17的钛铁矿单体颗粒有0个,连生体有247个,具体颗粒数与钛铁矿面积列于表6。

由于在大于40µm的颗粒粒径范围内未见钛铁矿单体颗粒,即 $N_0=0$ ,所以在自动识别统计方法钛铁矿计算中,在大于40µm的颗粒粒径范围内,钛铁矿的单体解离度为0。

人工统计结果(表7)表明,在选取的区域4中,在(0,20]µm的颗粒粒径范围内,区域13的1060个矿物颗粒中有钛铁矿单体颗粒40个,连生体11个;在(20,40]µm的颗粒粒径范围内,区域13中有钛铁矿单体颗粒13个,连生体48个;在(40,60]µm的颗粒粒径范围

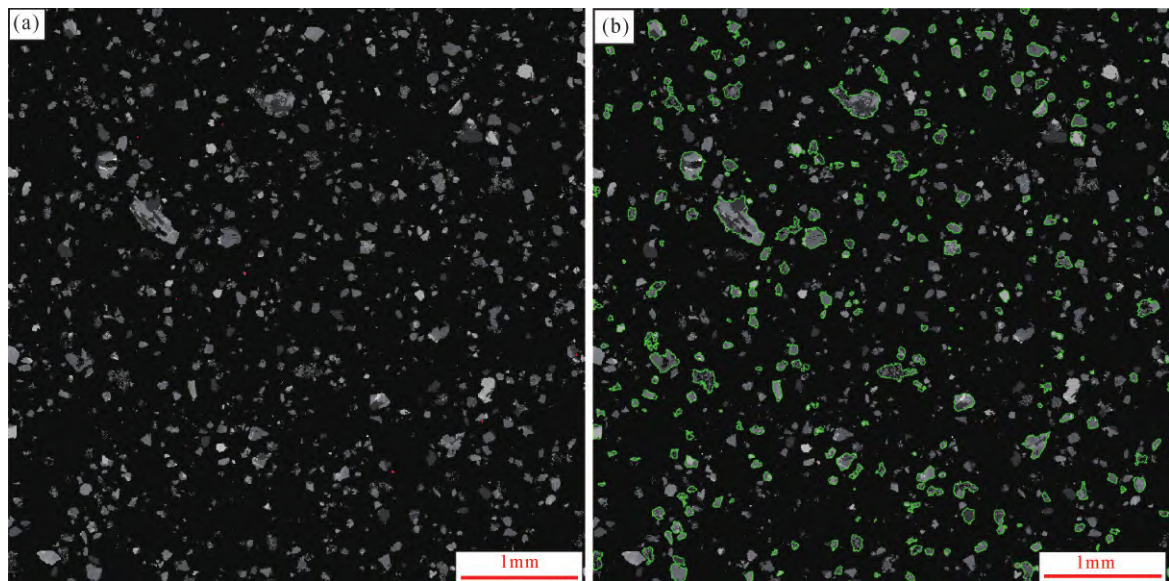




(a)区域内钛铁矿单体颗粒(红色点标出);(b)区域内钛铁矿连生体颗粒(绿色线圈出)

图8 自动识别区域6

Fig.8 Automatic identification area 6



(a)区域内钛铁矿单体颗粒(红色点标出);(b)区域内钛铁矿连生体颗粒(绿色线圈出)

图9 自动识别区域12

Fig.9 Automatic identification area 12

内,区域13中有钛铁矿单体颗粒有7个,连生体44个;在大于60  $\mu\text{m}$ 的颗粒粒径范围内,区域4中的钛铁矿单体颗粒有0个,连生体有70个。

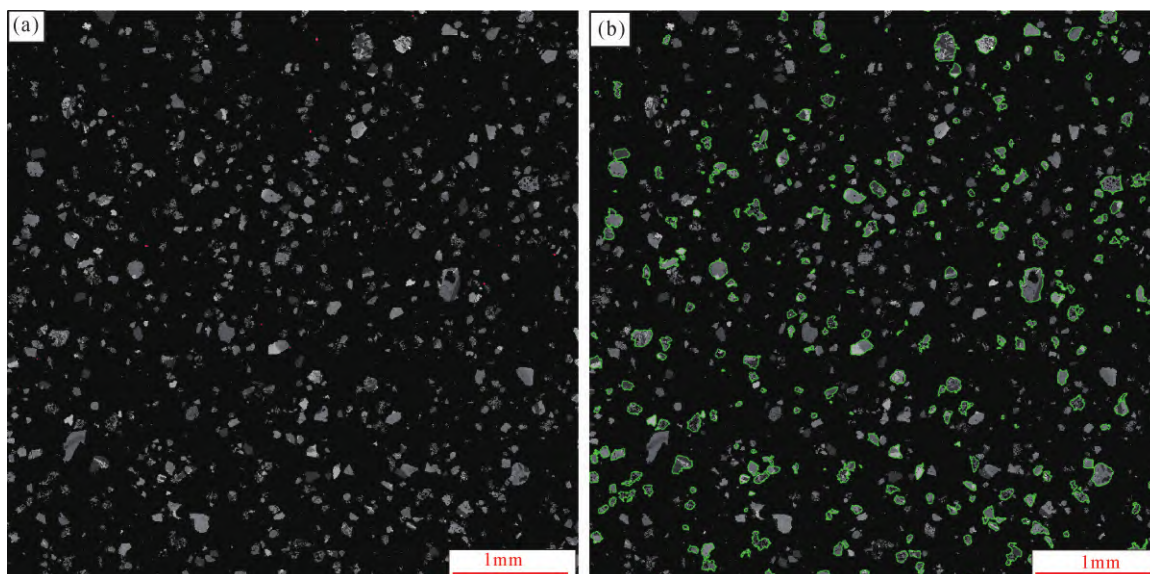
由于在大于60  $\mu\text{m}$ 的颗粒粒径范围内未见钛铁矿单体颗粒,即 $N_0=0$ ,所以在人工统计方法钛铁矿计算中,在大于60  $\mu\text{m}$ 的颗粒粒径范围内,钛铁矿的单体解离度为0。

用自动识别统计方法得出了钛铁矿单体/总颗粒数、钛铁矿单体颗粒数/(钛铁矿单体颗粒数+连生体颗

粒数)、钛铁矿单体面积/所有钛铁矿面积等与钛铁矿解离度计算相关的参数如表8所示,其中在颗粒粒径(0, 20]  $\mu\text{m}$ 范围内,钛铁矿单体解离度为88.83%;在颗粒粒径为(20, 40]  $\mu\text{m}$ 为钛铁矿单体解离度为30.45%;当颗粒粒径大于40  $\mu\text{m}$ 时,钛铁矿单体解离度为0%。

使用人工统计方法计算钛铁矿单体解离度得出的解离度及相关参数如表9所示,其中在颗粒粒径(0, 20]  $\mu\text{m}$ 范围内,钛铁矿单体解离度为88.89%;在

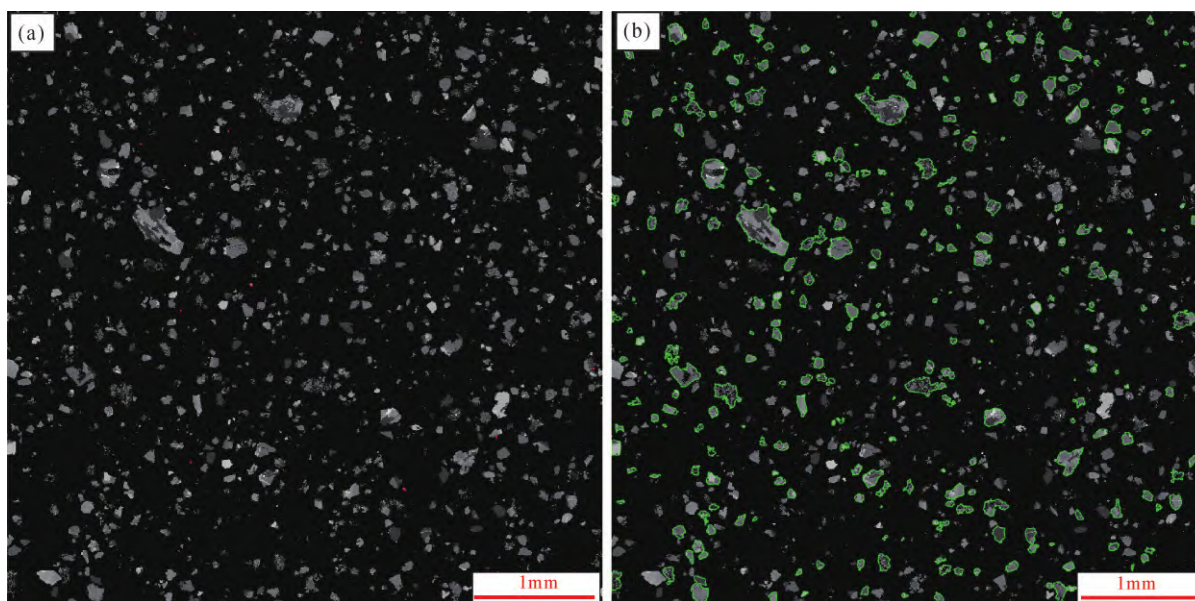




(a)区域内钛铁矿单体颗粒(红色点标出);(b)区域内钛铁矿连生体颗粒(绿色线圈出)

图10 自动识别区域17

Fig.10 Automatic identification area 17



(a)域内钛铁矿单体颗粒(红色点标出);(b)域内钛铁矿连生体颗粒(绿色线圈出)

图11 人工统计区域13

Fig.11 Manual statistical area 13

颗粒粒径(20,40] μm范围内,钛铁矿单体解离度为36.28%;在颗粒粒径(40,60] μm范围内,钛铁矿单体解离度为27.45%;颗粒粒径大于60 μm时,钛铁矿单体解离度为0%。

### 3 讨论

#### 3.1 不同颗粒粒径范围钛铁矿解离度的变化

如上所述,两种方法得出的钛铁矿解离度计算结

果是相近的,尤其是颗粒粒径为(0,20] μm,计算结果几乎一致。颗粒粒径为(20,40] μm,两种方法计算得出的钛铁矿解离度有所差异,可能是因为利用灰度识别钛铁矿产生误差,人工识别与自动识别对矿物的颜色有所区别,容易把其他与钛铁矿颜色相近的矿物识别为钛铁矿;另外矿物颗粒的数量较多,人工统计时存在遗漏,也会导致计算结果有差异。

通过对比两种方法计算得出的钛铁矿单体解离

**表 6** 自动识别统计的3个区域中不同粒径范围的钛铁矿颗粒数与面积

**Table 6** The number and area of ilmenite particles in different particle size ranges in the 3 regions automatically identified

粒径范围/ $\mu\text{m}$	统计项目	区域6	区域12	区域17
(0, 20]	钛铁矿单体颗粒数	14	11	10
	钛铁矿连生体颗粒数	3	5	3
	含钛铁矿颗粒数	17	16	13
	钛铁矿单体面积/ $\mu\text{m}^2$	1208	690	755
	钛铁矿总面积/ $\mu\text{m}^2$	1343	988	911
(20, 40]	钛铁矿单体颗粒数	2	2	3
	钛铁矿连生体颗粒数	15	22	27
	含钛铁矿颗粒数	17	24	30
	钛铁矿单体面积/ $\mu\text{m}^2$	746	703	691
	钛铁矿总面积/ $\mu\text{m}^2$	1952	2098	3330
(40, + $\infty$ )	钛铁矿单体颗粒数	0	0	0
	钛铁矿连生体颗粒数	189	257	247
	含钛铁矿颗粒数	189	257	247
	钛铁矿单体面积/ $\mu\text{m}^2$	0	0	0

**表 7** 人工统计的1个区域中不同粒径范围的钛铁矿颗粒数

**Table 7** The number of ilmenite particles in different particle size ranges in the Manual statistical area

粒径范围/ $\mu\text{m}$	(0,20]	(20,40]	(40,60]	(60,+ $\infty$ )	总颗粒数
钛铁矿单体颗粒数	40	13	7	0	1060
钛铁矿连生体颗粒数	11	48	44	70	

**表 8** 自动识别统计钛铁矿解离度及相关参数

**Table 8** Automatic identification of ilmenite dissociation degree and related parameters

颗粒粒径范围/ $\mu\text{m}$	(0, 20]	(20, 40]	(40, + $\infty$ )
钛铁矿单体颗粒数/总颗粒数	2.05%	0.74%	0
钛铁矿单体颗粒数/(钛铁矿单体颗粒数+连生体颗粒数)	76.09%	9.86%	0
钛铁矿单体面积/所有钛铁矿	81.85%	8.31%	0

**表 9** 人工统计钛铁矿解离度及相关参数

**Table 9** Manual statistical of ilmenite dissociation degree and related parameters

颗粒粒径范围/ $\mu\text{m}$	(0, 20]	(20, 40]	(40, 60]	(60, + $\infty$ )
钛铁矿单体颗粒数/总颗粒数	3.77%	1.23%	0.66%	0%
钛铁矿单体颗粒数/(钛铁矿单体颗粒数+连生体颗粒数)	78.43%	21.31%	13.73%	0%

度,计算得出每个粒径范围的钛铁矿单体解离度的加权平均值:在颗粒粒径(0, 20]  $\mu\text{m}$ 范围内,人工统计的含钛铁矿颗粒有51个,自动识别统计的颗粒有46个,钛

铁矿单体解离度为88.87%;在颗粒粒径(20, 40]  $\mu\text{m}$ 范围内,人工统计的含钛铁矿颗粒有61个,自动识别统计的颗粒有71个,钛铁矿单体解离度为32.94%;在颗粒粒径(40, 60]  $\mu\text{m}$ 范围内,人工统计的含钛铁矿颗粒有51个,自动识别统计的颗粒有0个,钛铁矿单体解离度为27.45%;颗粒粒径大于60  $\mu\text{m}$ 时,钛铁矿单体解离度为0%。

综上所述,钛铁矿单体解离度与整体矿物颗粒的粒径有关,矿物整体的颗粒粒径越小,钛铁矿的单体解离度就越大,钛铁矿解离为单体的程度越大。

### 3.2 月壤选矿的建议

上文通过计算得出了嫦娥五号月壤中不同颗粒粒径的钛铁矿单体解离度,得到了矿物整体颗粒的粒径范围越小钛铁矿单体解离度越大,其中在颗粒粒径(0, 20]  $\mu\text{m}$ 范围内,钛铁矿单体解离度达到了88.87%,在此粒径范围内的颗粒,也就是磨矿粒径在(0, 20]  $\mu\text{m}$ 时,钛铁矿可较为充分地解离为钛铁矿单体。所以如果使用月壤进行钛铁矿矿物的分选时,将粒径较大的月壤颗粒研磨破碎至20  $\mu\text{m}$ 以下,就会有88.87%的含钛铁矿的颗粒解离成为钛铁矿单体矿物,有利于对钛铁矿的回收与利用。

## 4 结论

(1)嫦娥五号样品中颗粒粒径为【7.5, 40】 $\mu\text{m}$ 时的钛铁矿数量占41%,【40, 80】 $\mu\text{m}$ 占32%,【80, 120】 $\mu\text{m}$ 占14%,【120, 160】 $\mu\text{m}$ 占6%,【160, 200】 $\mu\text{m}$ 占4%,【200, 240】 $\mu\text{m}$ 占1%,【240, 280】 $\mu\text{m}$ 占1%,【280, 398.67】 $\mu\text{m}$ 占1%,嫦娥五号样品中钛铁矿以细粒为主;

(2)嫦娥五号样品中的主要矿物及质量分数分别为:辉石48.62%,斜长石26.06%,橄榄石18.26%,钛铁矿7.05%。其中钛铁矿颗粒粒状占比35%,针状占18%,柱状占12%,不规则状占35%;

(3)嫦娥五号样品钛铁矿中 $\text{TiO}_2$ 的质量分数为45.65%~53.87%,平均值为50.78%; $\text{FeO}$ 为43.66%~48.71%,平均值为47.35%;

(4)嫦娥五号样品中钛铁矿的解离度加权平均值为:在颗粒粒径为(0, 20]  $\mu\text{m}$ 范围内,钛铁矿单体解离度为88.87%;在颗粒粒径(20, 40]  $\mu\text{m}$ 范围内,钛铁矿单体解离度为32.94%;在颗粒粒径(40, 60]  $\mu\text{m}$ 范围内,钛铁矿单体解离度为27.45%;颗粒粒径大于60  $\mu\text{m}$ 时,钛铁矿单体解离度为0%。

(5)对月壤样品选矿工艺的建议:使用月壤进行钛铁矿矿物的分选时,将粒径较大的月壤颗粒研磨破碎至20  $\mu\text{m}$ 以下,就会有88.87%的含钛铁矿的颗粒解离成为

钛铁矿单体矿物,有利于对钛铁矿的回收与利用。

**作者贡献声明:** 刘浩,实验思路构思、方法设计、数据分析、初稿撰写;刘建忠,实验方法核实,初稿审阅与修改;缪秉魁,初稿审阅与修改;曾小家,实验方法设计与初稿修改;朱凯,初稿修改;夏志鹏,实验方法设计;陈国柱,实验方法设计。

**利益冲突声明:** 作者保证本文无利益冲突。

**致谢:** 感谢中国科学院地球化学研究所雷丹泓老师、于雯老师和桂林理工大学刘奕志老师、谢兰芳老师的支持与帮助,在此表示衷心感谢。

### 参考文献 (References):

- Abdollahi M, Bahrami A, Mirmohammadi M S, Kazemi F, Danesh A, Ghorbani Y. 2020. A process mineralogy approach to optimize molybdenite flotation in copper-molybdenum processing plants. *Minerals Engineering*, 157: 106557
- Baba A A, Swaroopa S, Ghosh M K, Adekola F A. 2013. Mineralogical characterization and leaching behavior of Nigerian ilmenite ore. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(9): 2743–2750
- 陈宏毅, 缪秉魁, 谢兰芳, 夏志鹏. 2015. 南极月球陨石MIL05035矿物学、岩石学及演化历史. *岩石学报*, 31(4): 1171–1182 [Chen H Y, Miao B K, Xie L F, Xia Z P. 2015. Mineralogy, petrology and evolution history of Lunar meteorite MIL05035 from Antarctica. *Acta Petrologica Sinica*, 31(4): 1171–1182 (in Chinese with English abstract)]
- 高楠, 许英奎, 罗泰义, 凌宗成, 朱丹, 李阳, 李雄耀, 刘建忠. 2022. 月球矿产资源勘查进展及展望. *矿物学报*, 42(2): 222–230 [Gao N, Xu Y K, Luo T Y, Ling Z C, Zhu D, Li Y, Li X Y, Liu J Z. 2022. Recent advance and prospect of the lunar mineral resources exploration. *Acta Mineralogica Sinica*, 42(2): 222–230 (in Chinese with English abstract)]
- Li C L, Hu H, Yang M F, Pei Z Y, Zhou Q, Ren X, Liu B, Liu D W, Zeng X G, Zhang G L, Zhang H B, Liu J J, Wang Q, Deng X J, Xiao C J, Yao Y G, Xue D S, Zuo W, Su Y, Wen W B, Ouyang Z Y. 2021. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission. *National Science Review*, 9(2): nwab188
- 李琛, 魏奎先, 李阳, 马文会, 赵斯哲. 2020. 月球表面矿产资源原位利用研究进展. *中南大学学报(自然科学版)*, 51(12): 3289–3299 [Li C, Wei K X, Li Y, Ma W H, Zhao S Z. 2020. Research progress on *in situ* resources utilization of Lunar surface minerals. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 51(12): 3289–3299 (in Chinese with English abstract)]
- 李俊翰. 2015. 四川会理竹箐钒钛磁铁矿工艺矿物学研究(博士学位论文). 成都: 成都理工大学. [Li J H. 2015. Study on the Process Mineralogy of Huili-Zhuqing Vanadium Titanio-Magnetite Deposits in Sichuan Province (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).]
- 李尧. 2019. 西藏甲玛难处理混合铜矿工艺矿物学特性及硫化浮选试验研究(硕士学位论文). 昆明: 昆明理工大学. [Li Y. 2019. Experimental Study on Mineralogical Characteristics and Sulfide Flotation of Refractory Mixed Copper Ore in Jiama, Tibet (Dissertation). Kunming University of Science and Technology, Kunming (in Chinese with English abstract).]

- 李志杰, 果琳丽. 2017. 月球原位资源利用技术研究. *国际太空*, (3): 44–50 [Li Z J, Guo L L. 2017. Research on the technology of lunar *in situ* resource utilization. *Space International*, (3): 44–50 (in Chinese with English abstract)]
- 刘超, 洪秋阳, 陈志强, 刘勇, 刘牡丹, 吕昊子. 2021. 国外某钒钛铁矿工艺矿物学与磁选回收技术研究. *矿物学报*, 41(3): 277–286 [Liu C, Hong Q Y, Chen Z Q, Liu Y, Liu M D, Lyu H Z. 2021. A study on process mineralogy and magnetic recovery technology of ores from an oversea V-Ti iron deposit. *Acta Mineralogica Sinica*, 41(3): 277–286 (in Chinese with English abstract)]
- 刘建忠, 李雄耀, 朱凯, 许英奎, 杨溢, 张敬宜, 雷丹泓, 罗泰义, 凌宗成, 王功. 2022. 月球原位资源利用及关键科学与技术问题. *中国科学基金*, 36(6): 907–918 [Liu J Z, Li X Y, Zhu K, Xu Y K, Yang Y, Zhang J Y, Lei D H, Luo T Y, Ling Z C, Wang G. 2022. Key science and technology issues of lunar *in situ* resource utilization. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 36(6): 907–918 (in Chinese with English abstract)]
- 刘剑, 欧阳自远, 李春来, 邹永廖. 2006. 月球表面钛的研究进展. *地球与环境*, 34(2): 47–51 [Liu J, Ouyang Z Y, Li C L, Zou Y L. 2006. Advances in research on Ti on the lunar surface. *Earth and Environment*, 34(2): 47–51 (in Chinese with English abstract)]
- Pownceby M I, Sparrow G J, Fisher-White M J. 2008. Mineralogical characterisation of Eucla Basin ilmenite concentrates—First results from a new global resource. *Minerals Engineering*, 21(8): 587–597
- Mehdilo A, Irannajad M, Rezai B. 2015. Chemical and mineralogical composition of ilmenite: Effects on physical and surface properties. *Minerals Engineering*, 70: 64–76
- Mehdilo A, Irannajad M. 2021. Surface modification of ilmenite and its accompanied gangue minerals by thermal pretreatment: Application in flotation process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(9): 2836–2851
- 庞建涛, 肖岳, 杨稳权, 王灿霞. 2016. 磷块岩结构构造与其矿物解离关系的探讨. *化工矿物与加工*, 45(12): 6–7 [Pang J T, Xiao Z, Yang W Q, Wang C X. 2016. Discussion on relationship between structure of phosphate rock and its mineral dissociation. *Industrial Minerals & Processing*, 45(12): 6–7 (in Chinese with English abstract)]
- Pownceby M I, Sparrow G J, Fisher-White M J. 2008. Mineralogical characterisation of Eucla Basin ilmenite concentrates—First results from a new global resource. *Minerals Engineering*, 21(8): 587–597
- 王恩德. 2021. 金属矿床工艺矿物学. 北京: 冶金工业出版社 [Wang E D. 2021. Process Mineralogy of Metal Deposits. Beijing: Metallurgical Industry Press (in Chinese with English abstract)]
- 谢志诚, 胡兵, 胡佩伟. 2020. 钒钛磁铁矿高效综合利用新工艺研究. *钢铁钒钛*, 41(5): 14–21 [Xie Z C, Hu B, Hu P W. 2020. Research on new technology of high-efficiency comprehensive utilization of vanadium-titanium magnetite. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 41(5): 14–21 (in Chinese with English abstract)]
- 许承宝. 2018. 辽西钒钛磁铁矿工艺矿物学及选矿预富集工艺研究(硕士学位论文). 武汉: 武汉科技大学. [Xu C B. 2018. Study on process mineralogy and beneficiation preconcentration technology of vanadium-titanium magnetite in western Liaoning Province(Dissertation). Wuhan University of Science and Technology, Wuhan (in Chinese with English abstract).]



杨蔚, 田恒次, 陈意, 胡森, 苏斌, 林杨挺, 李献华. 2023. 嫦娥五号玄武岩岩石地球化学特征及成因讨论. 矿物岩石地球化学通报, 42(3): 442–461, 430 [Yang W, Tian H C, Chen Y, Hu S, Su B, Lin Y T, Li X H. 2023. Petrological and geochemical characteristics of Chang'E-5 basalt and discussions on its origin. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 42(3): 442–461, 430 (in Chinese with English abstract)]

尹鑫. 2020. 重庆城口高燕锰矿床锰的赋存状态及工艺矿物学研究(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学. [Yin X. 2020. Study on the Occurrence State and Process Mineralogy of Gaoyan Manganese Deposits in Chengkou, Chongqing(Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).]

Zhai J H, Chen P, Sun W, Chen W, Wan S. 2020. A review of mineral processing of ilmenite by flotation. Minerals Engineering, 157: 106558

智慧, 董振海, 胡振涛, 杨晓峰, 付亚峰. 2021. 陕西某钒钛磁铁矿尾矿工艺矿物学研究. 现代矿业, 37(8): 154–156, 178 [Zhi H, Dong Z H, Hu Z T, Yang X F, Fu Y F. 2021. Process mineralogy of a vanadium titanium magnetite tailings in Shaanxi Province. Modern Mining, 37(8): 154–156, 178 (in Chinese with English abstract)]

(本文责任编辑: 刘莹; 英文审校: 张兴春)

## ·亮点速读·

### 碳酸盐初始熔融驱动地幔中金属和硫的迁移

亲硫、亲铁元素的富集和迁移取决于硫元素的地球化学行为。其中,前人工作已经对硫的溶解度、饱和度、化学种型,以及亲硫、亲铁元素在原始熔体中的分配行为开展了研究。到目前为止,大多数研究都集中在玄武质成分上,它们代表了地幔源区相对较高的部分熔融程度(12%~15%),而硫和金属在初始熔体存在下的行为(<5%,部分熔融)仍然知之甚少。然而,这些初始熔体可能会在高达300°C 的温度范围内持续存在,然后才会发生硅酸盐的大规模熔融。

为了认识在初始熔融条件下硫元素的地球化学行为,澳大利亚麦考瑞大学的研究者们开展了实验岩石学研究,创造了产生初始碳酸质熔体对应的温压条件(~90 km深度,750~1050°C)。实验初始物质是来自乌干达的云母辉石岩,以及来自喀麦隆的尖晶石二辉橄榄岩。初始物质中加入了少量水(1.5%和1%),二氧化碳(3%和2.5%),硫(0.8%和0.5%),以及铂族元素( $800 \times 10^{-6}$ 和 $500 \times 10^{-6}$ )。

除了750°C的实验,其余实验产物中均发现了碳酸质熔体。通过对实验产物进行扫描电镜和透射电镜的表征,研究人员仔细观察了与初始碳酸质熔体共存的矿物组合:辉石岩成分的实验对应的产物有金云母、榴石、单斜辉石和橄榄石;辉石岩成分的实验对应的产物有橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、尖晶石和斜镁石。在固相线温度附近,辉石岩和橄榄岩初始物质的实验均对应着碳酸质成分的熔体(1.91%~2.30% SiO<sub>2</sub>, 32.33%~42.61% CaO)。碳酸质熔体和硫化物熔体在硅酸盐矿物的颗粒边界聚集。其中,硫化物熔体并未联通,并往往被碳酸质熔体包围。X射线吸收近边结构分析表明,碳酸质熔体中的硫元素主要以硫酸盐的化学种型形式存在。

基于高温高压实验结果,作者认为这些初始碳酸质熔体可以隔离氧化形式的硫酸盐以及地幔橄榄岩和辉石岩中还还原形式的硫化物所携带的金属。他们提出,这些富含硫的碳酸质熔体可能比以前认为的更为广泛,并且它们可能在岩石圈局部区域的成矿过程中发挥重要作用。这些初始熔体可以充当有效的介质,在地幔中溶解、重新分配和聚集金属。在这些区域中,动态的物理化学过程可以导致不同地壳深度的金属矿床的形成。

研究成果发表在国际著名科学期刊*Science Advances*上。Ezad et al. (2024) Incipient carbonate melting drives metal and sulfur mobilization in the mantle. *Science Advances* 10, eadk5979.

(夏群科 编译)