

专题26: 月球的形成和演化——基于嫦娥工程的新认识

基于FIB-TEM技术的月壤样品研究

文愿运, 李阳*, 莫冰, 李瑞

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 550002

嫦娥四号已成功于月背软着陆, 顺利开展一系列科学研究项目, 完成既定目标。按照“绕、落、会回”的发展思路, 第三期探月工程即将在 2019 年年底前后实施, 届时嫦娥五号探测器将完成月面岩石取样并返回地球。嫦娥五号采集样品主要以月壤为主, 通过对着陆点月壤样品的化学成分和微观结构特征进行分析与研究, 将对月球的起源与演化、太空风化效应等方面有进一步的认识。

月壤是月表岩石在太空风化作用下发生分裂破碎、熔合、聚变等变化后形成的细小颗粒。太空风化是指无大气天体表面物质在太空环境中发生一系列自然变化的过程, 主要包括陨石和微陨石的撞击、太阳风的注入和溅射、宇宙射线的轰击以及月表周期性的热效应, 太空风化的持续作用使得月球表面物质的物理性质、化学成分、矿物特性和光谱特征等都发生了巨大变化。其中陨石的撞击主要引起月表岩石的分裂破碎、气化蒸发、熔融等, 导致月表形貌的改变; 微陨石的粒径一般小于 1mm, 主要造成小范围内月壤颗粒的变化, 改变月壤颗粒表层晶体结构、化学组成等特征。太阳风粒子注入时, 能量较低的离子撞击月壤晶格中的原子, 产生空位, 引起月壤颗粒结构的非晶质化; 太阳风的溅射对月壤颗粒表层的矿物化学成分起到了主要改造作用。宇宙射线粒子主要为 H、He 元素, 其注入作用不是引起月壤颗粒非晶质化的主要因素。太空风化作用使得月壤颗粒的微观结构和化学成分、矿物组成变得极为复杂。因此, 月壤样品的微观结构分析对分析技术的空间分辨水平有较高要求, 同时其稀缺性也要求目前的实验研究需要尽量满足无损、超微量的要求。

微区分析技术在减少样品损耗的同时可以得到更多的在化学组成、晶体结构等方面的地球化学信息, 已在行星科学研究方向得到广泛应用。从 20 世纪 60 年代起, 离子质谱仪(SIMS)、扫描电子显微镜(SEM)、扫描质子探针(SPM)、透射电子显微镜(TEM)等微区分析技术已经被用于分析微米到纳米尺度的物质微观结构和元素组成。FIB 技术利用聚焦离子束可精确定位铣削出几十个纳米的微结构试样, 与 TEM 技术结合可进一步满足行星样品的高分辨率无损分析测试, 对 FIB-TEM 技术的进一步探究预研可为嫦娥五号月壤样品的分析研究做好充分准备。

FIB 技术的原理主要是利用电透镜将离子束聚焦成具有 5~50kV 的聚焦离子束, 通过高能离子轰击材料表面, 离子束与材料的原子核和电子相互作用, 实现材料的剥蚀、沉积、注入和改性。目前 FIB 系统的离子源主要是液态金属离子源, 包括 Ga、In、Al 等金属的单质离子源, 以及合金液态离子源。其中 Ga 元素因为低熔点、低蒸气压、强抗氧化等优点, 是使用最广泛的液态金属离子源。

TEM 技术主要是利用高能电子束轰击矿物晶体中的原子发生相互作用, 从而对样品进行高分辨的形貌分析、成分分析和结构测定。

为了对嫦娥五号月壤样品的分析方法进行预研, 我们首先利用 FIB-TEM 技术对阿波罗

第一作者简介: 文愿运(1992-), 女, 助理工程师, 研究方向: 月球/行星空间作用过程. E-mail: wenyuanyun@mail.gyig.ac.cn
*通信作者简介: 李阳(1986-), 男, 副研究员, 研究方向: 太空风化、微区分析技术. E-mail: liyang@mail.gyig.ac.cn

月壤样品和月球陨石进行研究。具体方法是用 SIB-SEM 双束系统的扫描电镜对样品颗粒进行微观结构分析,以扫描电镜为监测影像,使用聚焦离子束对单颗粒进行切割减薄,制备 100nm 左右厚度的薄片样品,在透射电镜下进行观察分析。目前我们已得到了角砾岩、尖晶石、橄长岩月球陨石样品的扫描电镜电子图像,对其微观结构进行了初步研究和观察,透射电镜分析将在下一步进行。