



嫦娥五号月壤的表面特征研究

李琛^{1,2}, 李阳^{2*}, 魏奎先^{1,3*}, 郭壮², 余涵¹, 陈秀敏^{1,3}, 李雄耀², 马文会^{1,3}, 刘建忠^{2*}

1. 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 昆明 650093;

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;

3. 昆明理工大学真空冶金国家工程研究中心, 昆明 650093

*联系人, 李阳, E-mail: liyang@mail.gyig.ac.cn; 魏奎先, E-mail: kxwei2008@hotmail.com; 刘建忠, E-mail: liujianzhong@mail.gyig.ac.cn

收稿日期: 2022-08-22; 接受日期: 2022-10-28; 网络出版日期: 2023-02-21

中国科学院战略性先导科技专项B (编号: XDB 41000000)、国家自然科学基金(编号: 41931077)、云南省中青年学术技术带头人后备人才项目(编号: 2018HB009)、云南省杰出青年科学基金(编号: 202101AV070007)、国防科工局民用航天项目(编号: D020201)、中国科学院青年创新促进会(编号: 2020395)、中国科学院重点部署项目(编号: ZDBS-SSW-JSC007-10)和中国科学院前沿重点基金(编号: QYZDY-SSW-DQC028)资助

摘要 嫦娥五号月壤是迄今为止人类采集返回最年轻的月球样品, 记录了采样区的太空风化改造历史. 研究发现, 嫦娥五号月壤颗粒的表面广泛分布有微撞击坑、矿物解理面、气化沉积物、覆盖的玻璃质等典型的形貌特征, 反映了在以陨石、微陨石轰击为主的太空风化改造过程中, 冲击破碎、熔融溅射、气化沉积等作用对月壤颗粒形貌特征的改造. 该结果梳理了月壤颗粒中太空风化作用的典型形貌改造特征, 从而帮助我们更好地理解月壤的形成与演化过程.

关键词 嫦娥五号, 月壤, 太空风化, 微陨石撞击, 颗粒形貌

PACS: 96.20.-n, 68.37.-d, 96.12.-a

1 引言

由于缺乏浓密的大气层和全球性磁场的保护, 月球表面物质持续遭受陨石与微陨石的撞击, 太阳风、太阳耀斑粒子、银河宇宙射线辐射以及昼夜温差引起的热疲劳等作用的改造, 即太空风化作用. 在太空风化等外动力地质作用的改造下, 月表岩石发生冲击破碎、熔融胶结、气化沉积、翻腾混合等作用形成粒径不等的月壤颗粒, 并在其中形成大量的胶结质玻璃、非晶质环带、单质金属铁、气泡结构、辐射损伤径迹

等太空风化改造特征^[1,2]. 嫦娥五号月壤是迄今为止人类采集返回最年轻的月球样品(约20亿年)^[3], 相比于更为古老的Apollo与Luna月球样品(约30亿年以上), 能够从采样点的经纬度、演化历史以及物质组成等方面帮助我们重新认识月球表面太空风化作用^[4]和月壤的形成与演化历史^[5].

太阳风是来自太阳表面的高速等离子体, 主要由 H^+ 和 He^+ 等离子以及自由电子组成^[6], 速度通常介于250–750 km/s之间^[7], 能够注入到矿物颗粒表层几十至上百纳米. 太阳风粒子对月壤颗粒表面特征的改造包

引用格式: 李琛, 李阳, 魏奎先, 等. 嫦娥五号月壤的表面特征研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 239603

Li C, Li Y, Wei K X, et al. Study on surface characteristics of Chang'E-5 fine grained lunar soil (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2023, 53: 239603, doi: 10.1360/SSPMA-2022-0343

括: 通过与晶格原子的核碰撞以及核外电子碰撞, 使其脱离原有晶格位置形成空位和填隙粒子, 并随着注入剂量的增加造成矿物结构的部分非晶化、完全非晶化和形成气泡结构^[8,9]; 太阳风质子与硅酸盐矿物中的氧结合形成羟基, 这是月球表面太阳风成因水的来源^[10]; 太阳风粒子在大角度倾斜入射到月壤矿物中时, 能够将部分晶格原子碰撞出来, 形成溅射离子(特别是 Na^+ , K^+), 这是月球大气的重要来源。

太阳耀斑粒子和银河宇宙射线能量较高但通量较低, 同样主要由 H^+ 和 He^+ 等离子组成。太阳耀斑粒子的能量范围约数十至数百MeV, 在月壤中的穿透深度约为微米级, 主要在矿物颗粒中形成辐射损伤径迹。银河宇宙射线的能量则通常为GeV以上, 在月壤中的穿透深度可达数米, 主要形成宇宙成因核素(例如 ^{10}Be , ^{26}Al , ^{38}Cl , ^{14}C , ^{21}Ne 等)^[11,12]。整体而言, 太阳风、太阳耀斑粒子以及银河宇宙射线的入射, 主要改造月壤颗粒的微观晶体结构与元素、同位素组成, 对月壤颗粒的形貌特征改变不大。

除了冷热循环以及微弱的热流外, 陨石、微陨石撞击是月球表面主要的热改造事件。陨石的撞击可以改变月表形貌, 将深处的物质挖掘并抛射, 从而影响更大范围的月表地貌特征^[13]。较大规模的撞击可以导致月表物质的搬运与混合, 使采样区域的月壤的来源多样化。嫦娥五号采样区的样品可能由P58区域内的1892个撞击坑(主要贡献为1 km以内的12个撞击坑)和P58以外的四个撞击坑(贡献微弱)的初级溅射物混合本土的月海玄武岩碎屑演化而成^[14]。陨石和微陨石的撞击引起瞬时的高温与高压, 使矿物和岩石原有的结构破坏并形成新的结构^[15-19]。撞击是月球演化后期仅有的同时输出热量和动量的事件, 这意味着陨石与微陨石撞击是改变月壤颗粒表层特征的主要因素。具体的影响包括冲击破碎、熔融溅射、气化沉积等作用, 在月壤中形成大量的矿物碎屑、冲击玻璃、熔融溅射物、胶结质玻璃、微陨石坑以及气化沉积形成的非晶质环带等。其中, 单质金属铁作为太空风化的特征产物广泛存在于胶结质玻璃和非晶质环带之中。单质金属铁是判断月壤成熟度的关键指标, 同时也是影响月壤反射光谱特征的主要因素^[20,21]。此外, 撞击破碎的瞬间也会导致矿物分解从而产生纳米级单质铁^[22]。

综上, 月表经受的多种外动力地质作用的改造显著改变了月壤颗粒的表面特征, 包括微观形貌、元素

组成、晶体结构以及光谱等特性^[23]。根据当前玻璃质含量、粒径分布以及光谱就位探测的研究结果表明, 嫦娥五号月壤中纳米级单质金属铁、气泡结构、胶结质玻璃等太空风化特征产物的含量相对较少, 意味着嫦娥五号月壤的成熟度可能相对较低, 属于形成演化的早期阶段的月壤。但同时也能够保留更多月壤的初始改造特征, 从而为系统研究月球表面的太空风化改造作用提供关键依据。本研究以嫦娥五号月壤颗粒表面的微撞击坑、解理表面、气化沉积物、覆盖的玻璃质等典型表面形貌特征的角度作为切入点, 深入分析其形成机制, 进而推论月壤的形成与演化历史。

2 实验

本研究工作主要基于编号为CE5C0200YJFM-00302嫦娥五号表取月壤, 该样品保存在氩气手套箱中。月壤颗粒的分散制样主要通过两种方式完成: 对于较大的月壤颗粒(粒径约数十微米), 采用导电银胶将其黏附在镀金硅片上, 保证月壤颗粒的原始表面不经任何导电处理; 对于较小的月壤颗粒(粒径约数微米), 使用酒精分散到镀金的硅片上, 酒精干燥后范德华力能够将月壤颗粒吸附在硅片上以供分析。使用双束扫描电子显微镜(SEM/FIB, Scanning Electron Microscope; FIB, Focus Ion Beam)的二次电子模式对样品进行观察, 分析时采用的加速电压为2-10 kV, 电子枪束流为0.2-1.6 nA, 采用较低电压与较小电流保证获得更多的表面形貌信息。使用Factsage 8.0热力学软件的Viscosity模块对月壤成分玻璃进行黏度的计算, 温度范围为800-2000 K。

3 讨论

3.1 微撞击坑

在嫦娥五号细粒月壤的表面广泛分布着纳米-微米级别的微撞击坑。微撞击坑的分布极为广泛, 但含有这些微撞击坑的颗粒表面往往具有其他的复杂现象。然而, 通常尺寸较小的微型撞击坑在电子显微分析过程中需要喷涂的导电层, 也使微撞击坑的形貌难以清晰辨认。嫦娥五号月壤颗粒表面微撞击坑形貌特征说明微陨石的撞击形式是多样化的^[24](如图1所示)。嫦娥五号细粒月壤表面的微撞击坑直径都较小, 难以在更

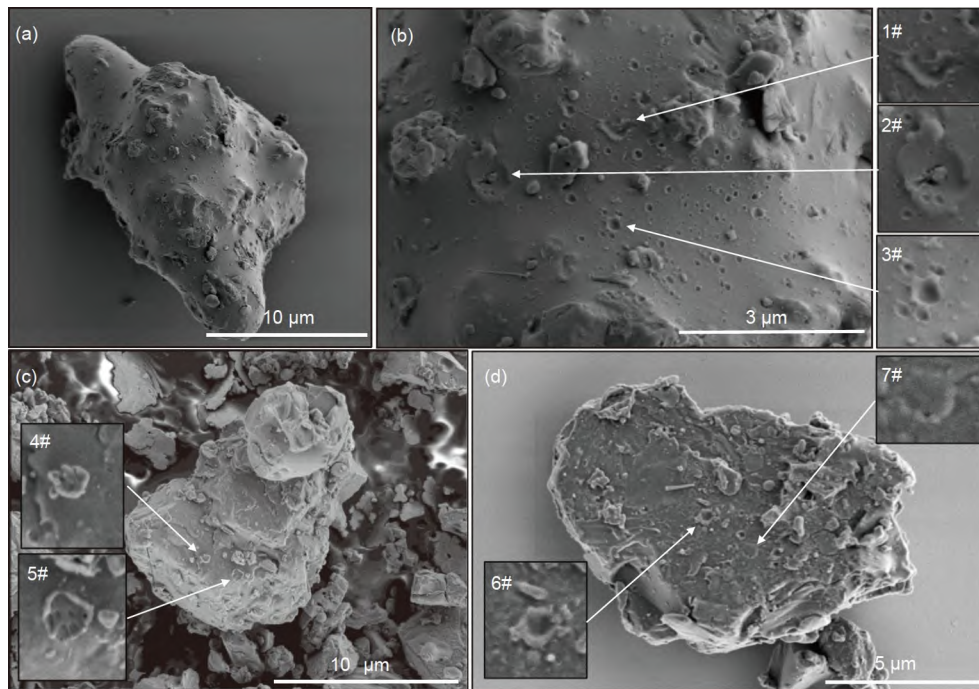


图 1 嫦娥五号月壤颗粒表面微撞击坑形貌特征的扫描电子显微镜二次电子图像. (a) 具有密集微撞击坑的颗粒形貌; (b) 密集微撞击坑的形貌特点: 1#不规则形状的微撞击坑, 2#具有撞击残余物的微撞击坑, 3#具有撞击方向信息的微撞击坑; (c) 具有较浅撞击深度微撞击坑的颗粒: 4#, 5#较浅撞击深度的微撞击坑; (d) 具有溅射趋势的微撞击坑的颗粒形貌, 6#, 7#微撞击坑及其溅射物的形貌

Figure 1 SEM secondary electron image of the morphological features of micro-impact craters on the surface of Chang'E-5 lunar soil particles. (a) Morphology of particles with dense micro-impact craters; (b) morphological features of dense micro-impact craters: 1# irregularly shaped micro-impact craters, 2# micro-impact craters with impact residues, 3# micro-impact craters with impact direction information; (c) particles with shallow impact depth micro-impact craters: 4#, 5# shallow impact depth micro-impact craters; (d) particles with spatter trend micro-impact craters morphology, 6#, 7# micro-impact craters and their spatter.

大型的撞击改造后完好保存下来. 如图1(a)所示, 尽管颗粒表面密集分布微型撞击坑, 但是整个颗粒在宏观视野下与其他颗粒并无较大区别. 图1(b)展示了该颗粒的局部放大图像, 形貌类似的数十个微撞击坑集中在矿物颗粒的表面. 从溅射物的方向可以大致判断, 这些撞击坑应该是在短时间内的密集撞击形成的^[25]. 大多数的微撞击坑都包括如下的结构特征: 中心的撞击凹陷区、四周的微凸起物、呈液滴或者溅射状的抛射物、撞击体残余物等. 大多数的撞击坑是近圆形的(如3#), 而撞击体尺寸、撞击速度、撞击角度等因素的不同也会使少数陨石坑的形貌不规则(如1#). 撞击体残余物在大多数撞击中难以保存. 因此, 得以完好保存的撞击体残留物一般来自较低速度的撞击(如2#). 2#撞击坑的内部仍存在更小的微撞击坑, 这反映了微撞击事件的多层次性. 部分颗粒的表面并未形成典型的撞击坑结构, 但是周围的凹陷表明撞击速率更

低和气化沉积的颗粒形貌类似, 与典型的微撞击坑具有较大区别(3#中心与右下). 图1中展示的撞击坑与次级撞击坑的规律类似, 因为次级撞击是密集分布的, 而且撞击速率也较低(一般 <5 km/s)^[25-27].

图1(c)和(d)中次级撞击体也可能是微小的高温熔融液滴, 而液滴在撞击到矿物表面则优先溅射而难以在撞击靶表面形成深坑(如4#, 5#). 而未完全凝固的撞击体在颗粒表面则会出现多个液滴状的溅射形状(如6#与7#对比)^[28]. 此类型撞击形成的熔融撞击体与溅射物, 可以用惯性力主导的水锤方程描述撞击时的最大动压力:

$$P_{\max} = \rho_{\text{impactor}} v_{\text{impact}} c_{\text{impactor}} \quad (1)$$

其中, P_{\max} (Pa)是撞击过程的最大动压力, ρ_{impactor} (kg/m^3)是撞击体的密度, v_{impact} (m/s)是撞击速度, c_{impactor} 是声音在撞击体内的传导速率常数.

月表的逃逸速度可能是限制二次撞击速率的条件之一, 但是近距离的二次撞击事件不会受此限制. 因此, 在微撞击坑内的物质实际上是瞬时高压反应的产物. 对微撞击坑的细致研究可以为矿物的冲击变质特征、微撞击坑的结构和撞击体来源以及溅射物去向等提供研究样本.

3.2 解理表面

月壤矿物主要由辉石、长石、橄榄石、钛铁矿等构成^[23]. 破碎形成的矿物解理表面可以在月表真空环境下较好地保存, 因此月壤矿物晶体在撞击的作用下, 沿一定的结晶学方向裂开成光滑平面. 在本实验中, 发现辉石颗粒通常具有典型的解理特征.

细粒月壤中的主要解理形式如图2所示, 其中大多数的解理模式为单向解理或者单-双向混合解理, 少部分矿物颗粒呈现三向解理. 其中如图2(a)所示, 三向解理颗粒的角度接近90°, 从是否被玻璃质溅射覆盖, 可以判断这两个界面的风化程度差异, 新鲜解理表面经

历较短的风化历史. 对比可发现, 月壤颗粒表面经历了多期次的溅射、气化沉积等作用. 图2(b)–(d)中均呈现了单层解理的典型特征, 由于矿物的各向异性, 单向解理的表面更为光滑. 双向解理比单向解理分布更为广泛. 不同于静压形成的规则解理面, 陨石撞击的动压往往产生混合的解理^[29–31].

解理表面往往拥有锐利的棱角边缘, 特别是颗粒较小的月尘在工程上对航天员和航天器的安全具有威胁. 矿物的新鲜解理面与风化表面具有不同的暴露历史. 新鲜的解理表面的空间暴露历史一般较短, 经受太阳风的辐照时间也较短. 因此, 矿物的新鲜解理表面与风化表面进行对照分析可以更好地研究太阳风对矿物的改造特征, 包括太阳风成因水的含量以及矿物的空间暴露时间等^[12].

3.3 气化沉积

高速撞击(>10 km/s)往往会在撞击中形成高温的等离子体气柱, 这些等离子体部分超过逃逸速度脱离

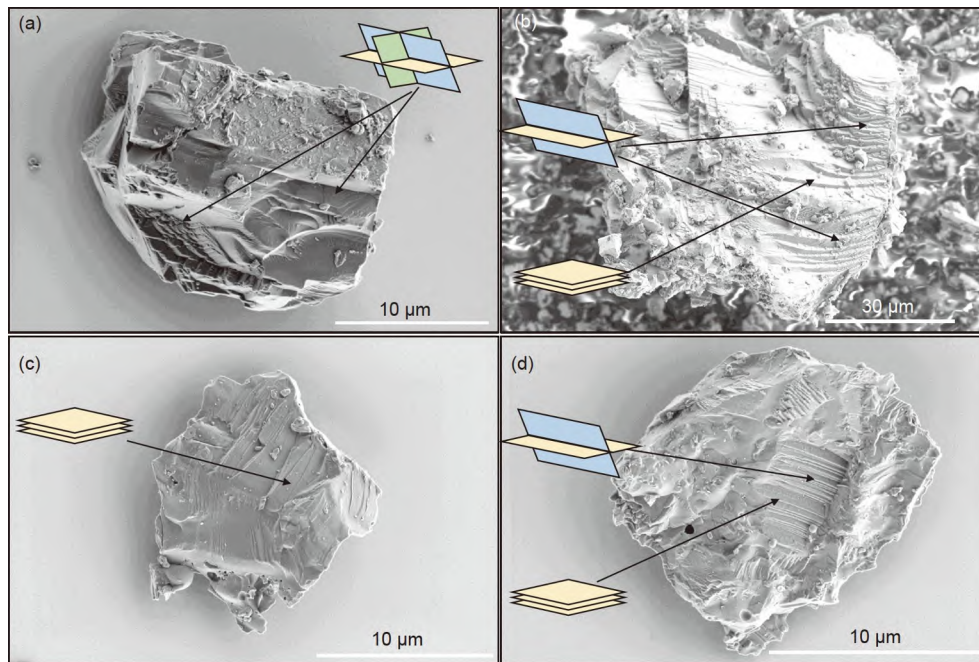


图2 (网络版彩图)嫦娥五号月壤颗粒表面解理形貌特征的扫描电子显微镜二次电子图像. (a) 三解理方向月壤颗粒的形貌特点; (b) 双解理方向为主的单-双混合解理方向月壤颗粒的形貌特点; (c) 单解理方向月壤颗粒的形貌特点; (d) 单解理方向为主的单-双混合解理方向月壤颗粒的形貌特点

Figure 2 (Color online) SEM secondary electron images of the surface cleavage features of the Chang'E-5 lunar soil particles. (a) Morphological characteristics of lunar soil particles in three cleavage directions; (b) morphological characteristics of lunar soil particles in single-double mixed cleavage directions dominated by double cleavage directions; (c) lunar soil particles in single cleavage direction; (d) morphological characteristics of lunar soil grains with single-double mixed cleavage directions dominated by single cleavage directions.

月球表面. 其余部分在温度降低后形成非晶质环带包裹在月壤颗粒表面. 在纳米级单质金属铁的成因中, 气化沉积目前被认为是最主要的形成机制^[1,32]. 真空脉冲激光轰击可以较好地模拟微陨石撞击过程的气化沉积现象, 包括纳米级单质金属铁、非晶质环带等^[21,33]. 气化沉积过程中的高温不仅可以使铁氧化物直接分解, 其他氧化物也呈现出不同的分解规律^[34], 因为铁与氧的亲合力最弱, 因此优先分解.

在嫦娥五号细粒月壤的表面也发现大量气化沉积作用的产物. 在图3(a)和(b)中, 可以发现气化沉积或者溅射沉积的纳米级颗粒分布在玻璃质或矿物的表面. 并且气化沉积的颗粒一般与矿物表面不浸润, 部分气化沉积的颗粒遵循气相生长的方式, 沿着指定的晶体方向生长, 从而具有类似自形的晶面结构^[35,36]. 而且气化沉积的颗粒有类似流场规律, 呈流线状分布, 这可能形成于高温蒸汽或者等离子体掠过矿物表面的过程中. 在图3(c)和(d)中气化沉积产物的分布更为均匀, 其中图3(c)表面气化沉积的颗粒与矿物表面不浸润, 而图3(d)表面的颗粒状隆起与表面浸润. 这表明界面现象主导了气化沉积物的产状. 界面张力除了决定接

触角之外, 还会影响微小颗粒的熔点, Pawlow公式给出了半径与熔点变化的规律如下:

$$1 - \frac{T}{T_0} = \frac{2\sigma}{L\rho_{\text{deposit}} r_{\text{ball}}}, \quad (2)$$

其中 T (K)为纳米气化沉积产物的熔点, T_0 (K)为正常熔点, σ 为沉积产物的表面张力(N/m), L 为沉积产物的融化焓(J/mol), ρ 为沉积物的密度(kg/m^3), r 为半径(m). 由公式给出的规律, 可以说明气化沉积的产物在较低的温度下也可以保持液相从而黏附在矿物颗粒的表面, 如果矿物与沉积产物的界面能较小, 气化沉积的颗粒则会以浸润的形式, 甚至铺展的方式形成薄层覆盖于矿物表面.

3.4 玻璃质覆盖

月壤中存在火山玻璃与撞击玻璃, 火山玻璃是来源于岩浆喷发快速冷却, 撞击玻璃是由撞击过程的温度与压力使矿物熔化并冷却形成的. 嫦娥五号月壤与Apollo月壤最大的区别是玻璃质含量较低^[23]. 嫦娥五号月壤矿物表面较少的玻璃质覆盖可以使我们清晰地认识玻璃质的成因以及月表的风化过程. 在月表能够

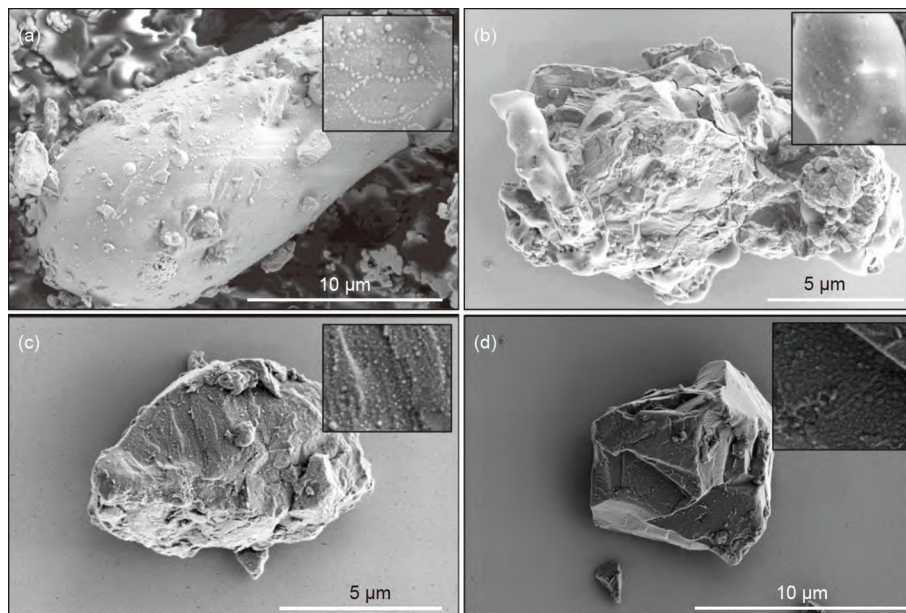


图3 嫦娥五号月壤颗粒表面气化沉积形貌特征的扫描电子显微镜二次电子图像. (a) 玻璃表面气化沉积的颗粒; (b) 胶结质表面的气化沉积颗粒; (c) 结晶矿物表面的气化沉积颗粒; (d) 结晶矿物表面半浸润的气化沉积颗粒

Figure 3 SEM secondary electron images of the morphological characteristics of gasification deposition on the surface of Chang'E-5 lunar soil particles. (a) Gasification deposition particles on the surface of glass; (b) gasification deposition particles on the surface of cementitious substances; (c) gasification deposition particles on the surface of crystalline minerals; (d) semi-wetted gasification deposited particles on the surface of crystalline minerals.

同时输出热能与动能的过程只有陨石或者微陨石的撞击事件. 由图4可知, 无论是较大的颗粒还是较小的颗粒, 玻璃质的覆盖是有方向性的, 是具有一定初始速度的熔体的抛射粘连导致的. 从覆盖玻璃质表面的产状判断覆盖玻璃质的矿物可能是由撞击事件产生的液体溅射物覆盖生成, 即属于撞击玻璃.

图4(a)中是较大月壤颗粒的玻璃质覆盖产状, 可以发现玻璃质覆盖的厚度较薄、面积较大. 玻璃质覆盖的边缘具有丝状以及液滴状的溅射轨迹, 能够反映溅射源的方向. 溅射物冷凝后的玻璃与矿物颗粒表面呈半浸润趋势, 结合较大表面积的产状, 可以判断溅射物的表面张力与黏度较小. 如图4(b)和(c)所示, 颗粒的玻璃质包覆程度较低, 且铺展较差, 可以判断玻璃在覆盖时具有较高的黏度, 导致其流动性差. 颗粒表面的玻璃质黏附着的其他矿物, 表明其在接触过程中仍在软化阶段. 根据着陆区附近撞击坑的分布特征, 嫦娥五号月壤中的玻璃质主要来自撞击小于或等于徐光启坑的撞击溅射物. 而这样的撞击作用在月球表面广泛分布. 图4(d)中的颗粒经过多期次的玻璃质溅射, 形成多方向、多层次覆盖的玻璃质. 从流动性来看, 至少有

两种不同流动性的玻璃质覆盖, 分别是浅绿色箭头方向流动性较差的玻璃质, 以及浅蓝色箭头方向流动性较好的玻璃质.

因此, 黏度是决定玻璃质流动包覆行为最关键的因素, 玻璃的黏度与温度的关系最为密切^[37]. 根据嫦娥五号月壤的平均化学组成^[23,38,39]计算玻璃的黏度与温度之间的关系, 如图5所示. 图5中的月壤玻璃质黏度区间反映了不同流动程度的月壤玻璃质与温度的关系. 在温度达到920–1090 K时, 月壤玻璃质开始表现出软化的趋势, 当温度达到1410–1580 K时, 月壤开始具有流动性, 这也是月壤包覆玻璃质的最低温度.

由此推论, 在撞击过程中出现的高温, 即大于1400 K的温度在月表广泛存在, 并且被溅射的矿物表面也经受了这部分热量的改造. 因此, 陨石撞击为月壤的形成与演化过程提供了热能的主要来源, 极大地改变了月壤颗粒的微观形貌特征.

4 结论

本文对嫦娥五号细粒月壤表面形貌特征, 包括微

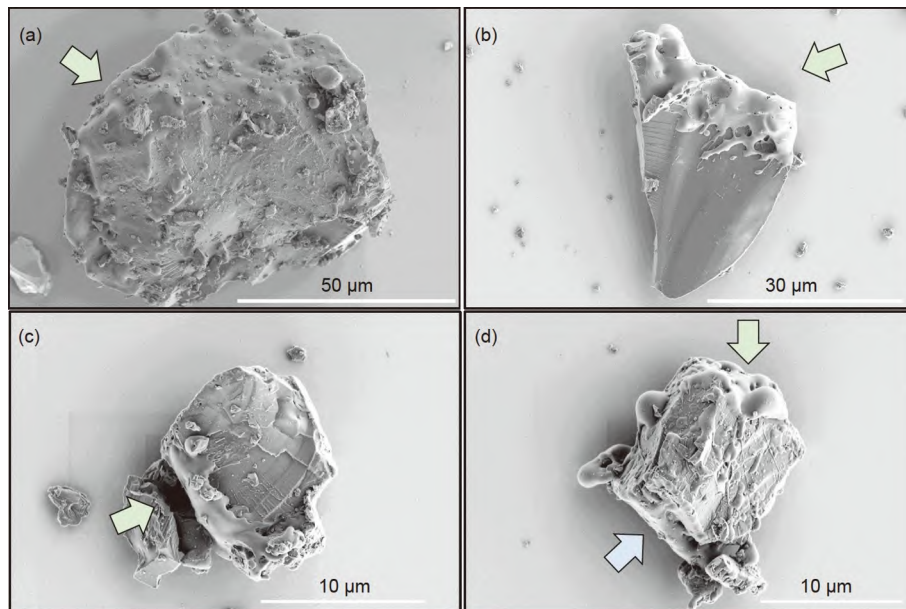


图4 (网络版彩图)嫦娥五号月壤颗粒表面玻璃质覆盖形貌特征的扫描电子显微镜二次电子图像. (a) 玻璃质半浸润覆盖的颗粒(溅射物来自图左上方向); (b) 玻璃质低程度浸润的颗粒(溅射物来自图右上方向); (c) 玻璃质粘连细粒碎屑的颗粒(溅射物来自图左下方向); (d) 多期次玻璃质覆盖溅射的颗粒(溅射物来自图正上方、左下方等)

Figure 4 (Color online) SEM secondary electron images of the morphology of vitreous coverage on the surface of Chang'E-5 lunar soil particles. (a) Semi-wetted glass particles (sputters from the upper left of the figure); (b) low-wetted glass particles (sputters from the upper right direction of the figure); (c) particles of vitreous adhering fine-grained debris (sputters from the lower left direction of the figure); (d) particles of multiple vitreous cover sputtering (sputters from the top, bottom left, etc., of the figure).

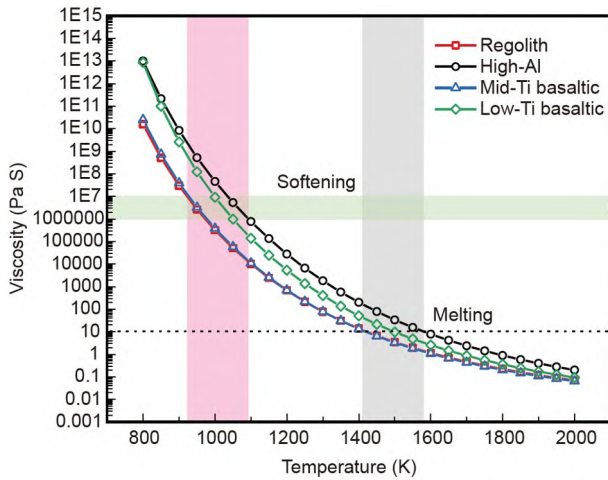


图 5 (网络版彩图)嫦娥五号月壤玻璃质的黏度随温度变化曲线^[23,38,39]

Figure 5 (Color online) Variation curve of viscosity of Chang'E-5 lunar soil glass with temperature [23,38,39].

撞击坑、解理表面、气化沉积物、覆盖的玻璃质,进行了细致的研究,并得到了如下结论:

(1) 微撞击坑大多数是次级撞击导致的,尽管二次

撞击的速率较低,但仍可以产生高压并大范围地改变月壤颗粒的表面形貌特征.

(2) 解理表面说明经受撞击的时间短且速度大,同时新鲜的解理面与风化表面可以为太阳风暴露历史的研究提供天然对照.

(3) 气化沉积物是月壤颗粒经受高温改造作用的证据,颗粒的表面性质决定了气化沉积物的产状,小颗粒沉积物的形成温度偏低.

(4) 覆盖的玻璃质较少是嫦娥五号月壤颗粒的主要形貌特征,根据矿物表面覆盖产状和玻璃质的黏度,计算表明嫦娥五号月壤的玻璃质普遍经受了温度大于 1400 K 的热作用的改造.

根据微撞击坑、矿物解理面、气化沉积物、覆盖的玻璃质等典型形貌特征的分析可知,嫦娥五号月壤普遍经受了陨石和微陨石撞击作用的改造,包括冲击破碎、熔融溅射、气化沉积等.微观形貌特征是研究月球表面的风化改造作用和月壤形成与演化过程的前提.上述研究结果为嫦娥五号月壤更深层次的研究奠定了基础.

致谢 感谢中国科学院地球化学研究所硕士生邵凯瑞、赵斯哲、庞荣华对论文撰写给出的宝贵意见.

参考文献

- Pieters C M, Noble S K. Space weathering on airless bodies. *J Geophys Res Planets*, 2016, 121: 1865–1884
- Hapke B. Space weathering from Mercury to the asteroid belt. *J Geophys Res*, 2001, 106: 10039–10073
- Li Q L, Zhou Q, Liu Y, et al. Two-billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'E-5 basalts. *Nature*, 2021, 600: 54–58
- Qian Y, Xiao L, Wang Q, et al. China's Chang'E-5 landing site: Geology, stratigraphy, and provenance of materials. *Earth Planet Sci Lett*, 2021, 561: 116855
- Hu S, He H, Ji J, et al. A dry lunar mantle reservoir for young mare basalts of Chang'E-5. *Nature*, 2021, 600: 49–53
- Galvin A, Ipavich F, Gloeckler G, et al. Solar wind composition: First results from SOHO and future expectations. In: *Proceedings of the American Astronomical Society Meeting*. 1996
- Mccomas D, Elliott H, Schwadron N, et al. The three-dimensional solar wind around solar maximum. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 1517
- Daly L, Lee M R, Hallis L J, et al. Solar wind contributions to Earth's oceans. *Nat Astron*, 2021, 5: 1275–1285
- Gu L, Chen Y, Xu Y, et al. Space weathering of the Chang'E-5 lunar sample from a mid-high latitude region on the Moon. *Geophys Res Lett*, 2022, 49: e97875
- Zeng X, Tang H, Li X Y, et al. Experimental investigation of OH/H₂O in H⁺-irradiated plagioclase: Implications for the thermal stability of water on the lunar surface. *Earth Planet Sci Lett*, 2021, 560: 116806
- Anchordoqui L, Paul T, Reucroft S, et al. Ultrahigh energy cosmic rays: The state of the art before the Auger observatory. *Int J Mod Phys A*, 2003, 18: 2229–2366, arXiv: [hep-ph/0206072](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0206072)
- Keller L P, Berger E L, Zhang S, et al. Solar energetic particle tracks in lunar samples: A transmission electron microscope calibration and

- implications for lunar space weathering. *Meteorit Planet Sci*, 2021, 56: 1685–1707
- 13 Canup R M. Dynamics of lunar formation. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2004, 42: 441–475
- 14 Jia B, Fa W, Zhang M, et al. On the provenance of the Chang'E-5 lunar samples. *Earth Planet Sci Lett*, 2022, 596: 117791
- 15 Ogliore R, Malaer J, Croat T. Microcraters in disaggregated regolith-breccia meteorites. In: Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands, 2018
- 16 Housley R M, Grant R W, Paton N. Origin and characteristics of excess Fe metal in lunar glass welded aggregates. In: Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference. 1973
- 17 Glass B P. Micrometeorite craters on lunar glass particles: The relationship between radial fracture zones and spall zones. *Meteoritics*, 1972, 7: 47
- 18 Brownlee D E, Rajan R S. Micrometeorite craters discovered on chondrule-like objects from Kapoeta meteorite. *Science*, 1973, 182: 1341–1344
- 19 Hörz F, Hartung J B, Gault D E. Micrometeorite craters on lunar rock surfaces. *J Geophys Res*, 1971, 76: 5770–5798
- 20 Hörz F, Basilevsky A T, Head J W, et al. Erosion of lunar surface rocks by impact processes: A synthesis. *Planet Space Sci*, 2020, 194: 105105
- 21 Sasaki S, Nakamura K, Hamabe Y, et al. Production of iron nanoparticles by laser irradiation in a simulation of lunar-like space weathering. *Nature*, 2001, 410: 555–557
- 22 Guo Z, Li C, Li Y, et al. Nanophase iron particles derived from fayalitic olivine decomposition in Chang'E-5 lunar soil: Implications for thermal effects during impacts. *Geophys Res Lett*, 2022, 49: e2021GL097323
- 23 Li C, Hu H, Yang M F, et al. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission. *Natl Sci Rev*, 2022, 9: nwab188
- 24 Zhang H, Zhang X, Zhang G, et al. Size, morphology, and composition of lunar samples returned by Chang'E-5 mission. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2022, 65: 229511
- 25 Matsumoto T, Hasegawa S, Nakao S, et al. Population characteristics of submicrometer-sized craters on regolith particles from asteroid Itokawa. *Icarus*, 2018, 303: 22–33
- 26 Allison R, McDonnell J. Secondary cratering effects on lunar microterrain—implications for the micrometeoroid flux. In: Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference. Houston, 1982
- 27 Harries D, Yakame S, Karouji Y, et al. Secondary submicrometer impact cratering on the surface of asteroid 25143 Itokawa. *Earth Planet Sci Lett*, 2016, 450: 337–345
- 28 Cheng X, Sun T P, Gordillo L. Drop impact dynamics: Impact force and stress distributions. *Annu Rev Fluid Mech*, 2022, 54: 57–81
- 29 Rickman D, Street K W. Some expected mechanical characteristics of lunar dust: A geological view. In: Proceedings of the International Conference on Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering. Incheon, 2008
- 30 Quaide W, Bunch T, Wrigley R. Impact metamorphism of lunar surface materials. *Science*, 1970, 167: 671–672
- 31 Chao E C T, James O B, Minkin J A, et al. Petrology of unshocked crystalline rocks and shock effects in lunar rocks and minerals. *Science*, 1970, 167: 644–647
- 32 Basu A. Nanophase Fe⁰ in lunar soils. *J Earth Syst Sci*, 2005, 114: 375–380
- 33 Moroz L V, Starukhina L V, Rout S S, et al. Space weathering of silicate regoliths with various FeO contents: New insights from laser irradiation experiments and theoretical spectral simulations. *Icarus*, 2014, 235: 187–206
- 34 Li C, Wei K, Li Y, et al. Theoretical calculation and experimental verification of the vacuum thermal decomposition process of lunar silicon oxide. *Vacuum*, 2022, 202: 111162
- 35 Bradley J P, Brownlee D E, Veblen D R. Pyroxene whiskers and platelets in interplanetary dust: Evidence of vapour phase growth. *Nature*, 1983, 301: 473–477
- 36 Renggli C J, Klemme S. Experimental investigation of Apollo 16 “Rusty Rock” alteration by a lunar fumarolic gas. *J Geophys Res Planets*, 2021, 126: e2020JE006609
- 37 Zheng Q, Mauro J C. Viscosity of glass-forming systems. *J Am Ceram Soc*, 2017, 100: 6–25
- 38 He Q, Li Y, Baziotis I, et al. Detailed petrogenesis of the unsampled oceanus procellarum: The case of the Chang'E-5 mare basalts. *Icarus*, 2022, 383: 115082
- 39 Yang W, Chen Y, Wang H, et al. Geochemistry of impact glasses in the Chang'E-5 regolith: Constraints on impact melting and the petrogenesis of local basalt. *Geochim Cosmochim Acta*, 2022, 335: 183–196

Study on surface characteristics of Chang'E-5 fine grained lunar soil

LI Chen^{1,2}, LI Yang^{2*}, WEI KuiXian^{1,3*}, GUO Zhuang², YU Han¹, CHEN XiuMin^{1,3},
LI XiongYao², MA WenHui^{1,3} & LIU JianZhong^{2*}

¹ Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

² Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

³ National Engineering Research Center of Vacuum Metallurgy, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

Chang'E-5 lunar soil is the youngest lunar soil sample returned by human beings so far, and the shovel samples record the space weathering history of the lunar surface in sampling area. This study found that on the surface of the fine-grained lunar soil particles of Chang'E-5 are widely distributed typical morphological features, such as microcraters, mineral cleavage surfaces, gasification deposition, and covered glass, which reflect that in the space dominated by meteorites and micrometeorites bombardment, the effects of impact fragmentation, melting sputtering, gasification deposition, etc., have transformed the morphology and characteristics of lunar soil particles during weathering transformation. The results reveal the transformation mechanism of the extreme environment of the lunar surface on the mineral morphology, thus helping scholars better understand the weathering process in space.

Chang'E-5, lunar soil, space weathering, micro-meteorite impact, mineral morphology

PACS: 96.20.-n, 68.37.-d, 96.12.-a

doi: [10.1360/SSPMA-2022-0343](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0343)