《物理学报》创刊 90 周年

月球玻璃*

赵睿[1)] 沈来权[1)] 常超[1)] 白海洋[1)2)] 汪卫华[1)2)†]

1) (中国科学院物理研究所, 北京 100190)

2) (松山湖材料实验室, 东莞 523808)

(2023 年 7 月 31 日收到; 2023 年 8 月 22 日收到修改稿)

由火山喷发、陨石撞击和太阳风及宇宙射线辐照等非平衡过程产生的玻璃物质是月壤的重要组成部分, 这些不同成因的玻璃物质记录了月球起源和演化的重要历史信息. 本文主要综述了嫦娥 5 号 (CE-5) 取回的月壤中月球玻璃的研究进展, 包括其基本物性、微观结构、具体的形成机制以及它们在月球研究中的作用等. 研究发现月球玻璃可以像天然照相机一样记录下不同年代月球内部和表面的演化信息, 涉及月球的起源、岩浆活动、撞击环境、太空风化和水的来源等; 月球玻璃稳定的无序结构还能够长期保存月球资源, 据估计其存储的 ^{3}He 有 26 万吨, 存储的水高达 2700 亿吨; 月球玻璃类似月球上的时钟, 能够作为火山活动和撞击事件的时间标尺, 为研究月球水和磁场等的演化以及重构几十亿年的撞击历史提供重要支撑.

关键词: 玻璃, 月球玻璃, 嫦娥五号

PACS: 61.43.–j, 61.43.Fs **DOI:** 10.7498/aps.72.20231238

1 引 言

月球是地球唯一的天然卫星, 举头可见的皓月自上古时期开始就不断地引人遐想, 孕育出华美的诗词和奇妙的神话传说, 也激发了中华民族几千年的飞天梦想. 20 世纪 70 年代, 周总理在和基辛格的一次对话中曾笑言: “早在五千多年前, 我们就有一位嫦娥飞上了月亮, 在月亮上建起了广寒宫住下了, 不信, 我们还要派人去看她呢! ”如今五十多年过去, 弹指一挥间, 我国已经成功实施了三期探月工程, 不仅对月宫进行了详细卫星遥感探测, 还向月宫派驻了“玉兔”号月球车. 2020 年 12 月 17 日, 我国的嫦娥五号 (Chang'e-5, CE-5) 探月任务更是将月宫的土特产带回了地球, 共计采集返回 1731 g 珍贵的月球土壤. 来自月宫的月壤点燃了人类月球研究的最新热潮. 在这批珍贵的月球返回样品中, 研究者们发现了丰富的玻璃物质. 这些玻璃物质尺寸不一, 形状各异, 大的可达厘米级, 小的只有几十个纳米, 有圆润的玻璃珠, 张牙舞爪的胶结物玻璃, 还有直径仅为头发丝千分之一的玻璃纤维[1–4]. 各种各样的玻璃物质在 CE-5 月壤占比达 11.6%—20%, 这些玻璃是研究月球起源与演化、月球资源原位开发利用的重要材料[1,2]. 两年多来, 关于 CE-5 月壤玻璃物质的研究已经产出了多项重要成果, 初步研究发现这些稳定存在了亿万年的玻璃物质记录了采样地点的陨石撞击环境[1,2]、月球表面复杂的太空风化过程[5–9], 以及月球 20 亿年来的撞击历史[10] 等, 同时它们所捕捉的 ^{3}He 可能高达 26 万吨, 占月球 ^{3}He 总储量的约 20%[11], 所存储的水高达 2700 亿吨[12].

玻璃在日常生活中无处不在, 从透明的窗户玻璃, 到美丽的玻璃制品, 再到广泛使用的手机屏幕、光纤和镜头等. 实际上, 玻璃不仅是重要的人

* 国家基金委重大项目和基础中心项目 (批准号: 52192600, 61888102)、中国科学院战略性先导科技专项 (批准号: XDB30000000) 和广东省重大基础和应用基础项目 (批准号: 2019B030302010) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: whw@iphy.ac.cn

© 2023 中国物理学会 Chinese Physical Society

造材料, 更是自然界中普遍存在的天然物质, 比如地球上火山喷发形成的黑曜石玻璃、陨石撞击产生的陨石玻璃和某些植物分泌的脂类凝固形成的琥珀玻璃等[13]. 从材料科学的角度来讲, 玻璃是一种原子结构长程无序、短程有序的非晶态物质.

形成玻璃的一个最典型的途径就是液体的快速冷却. 如图 1 所示, 一般情况下, 液体在冷却的过程中会发生晶化, 形成原子排列有序的晶体结构; 而冷却速度足够快时, 液体中的原子就来不及进行重排结晶, 这时液体就会直接变成原子排列像液体一样无序的固体, 这种固体就被称为玻璃或者非晶态物质[14]. 从结构来看, 玻璃可以被认为是一种冻结了的液体, 从能量和热力学的角度看, 玻璃处在一种亚稳的状态, 其内部不断发生着能量趋近于平衡状态的弛豫行为[15]. 除了液体快速冷却之外, 各种非平衡的过程都可能产生亚稳态的玻璃物质, 比如快速撞击、气相沉积、离子辐照和化学反应等[16].

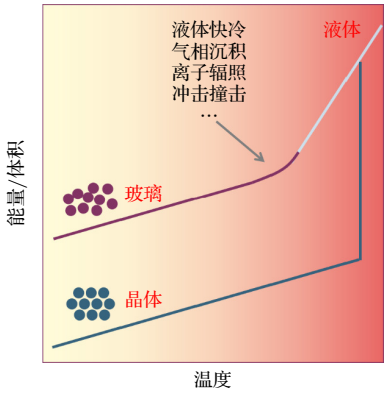

图 1 液体冷却过程发生晶化和玻璃转变两种情形的示意图, 液体快冷、气相沉积和离子辐照等各种非平衡过程都可以产生结构无序的玻璃物质

Fig. 1. Schematic diagram of the liquid cooling process showing crystallization and glass transition. Various non-equilibrium processes such as rapid cooling of liquids, vapor deposition, and ion irradiation can produce glassy materials with disordered atomic structure.

那么月球上为什么会有如此丰富的玻璃物质? 在月球的内部和表面发生着一系列剧烈的非平衡过程. 除了内部的火山喷发和地质运动外, 月球还由于缺少大气和磁场的保护, 表面不断遭受着陨石撞击、太阳风辐照、宇宙射线辐射等空间活动作用[1] (图 2). 火山喷发将月球内部的熔融岩浆带到月球表面, 期间喷发出来的大量细小液滴会迅速冷却成为玻璃珠. 月球表面的陨石速度一般为 15—25 km/s, 撞击产生的能量足以熔化乃至气化月球矿物, 并在随后的快冷凝固过程中产生玻璃物质[17]. 月球表面还长期遭受到太阳风的辐照轰击, 太阳风是一种高速等离子体, 主要由电子以及氢离子和氦离子等组成, 长期的离子辐照作用能够直接破坏矿物的晶格结构形成非晶态物质[18–20]. 这些剧烈的活动自月球诞生之日起, 就不断地塑造和改变月球的环境, 主宰着月球的演化, 我们对月球的研究很大程度上就依赖于对这些过程的解读[1]. 然而这些活动分布在长达数十亿年的时间尺度和数千千米的空间尺度上, 对于研究者具有重大的挑战. 幸运的是, 就像地球上的琥珀玻璃可以定格古老年代的生物活动瞬间以记录物种的演化一样, 各种月球玻璃以其独特的形态、结构以及保存的岩浆物质、陨石碎片、挥发分和太阳风物质等, 记录了产生和改造玻璃的各种月球活动[1,21–24], 为研究月球的起源[25]、内部岩浆的演化[23,26,27]、撞击历史[28]、月球水和气体的分布与来源[23,29–32] 以及太空风化等[33–36] 许多重要问题提供关键信息.

图 2 月球表面严酷空间环境的示意图[1]. 月球表面存在着陨石撞击、太阳风辐照和宇宙射线辐射等一系列剧烈的非平衡过程

Fig. 2. Schematic diagram of the harsh space environment on the lunar surface[1]. The lunar surface undergoes a series of intense non-equilibrium processes, including meteoroid impacts, solar wind irradiation, and cosmic ray radiation.

此次我国嫦娥五号返回的月壤样品和之前历次采集的月壤相比, 具有很大的差别[2,37–40]. 从空间区域来看, 之前历次采样地点都在赤道附近, 而 CE-5 月壤采集自月球“风暴洋”北部吕姆克山脉附近, 经纬度为 51.916°W, 43.058°N, 是迄今采样位置纬度最高的月壤返回样本. 初步的成分和结构表征发现 CE-5 样品为已经暴露了几亿年的充分风化的月壤, 颗粒尺寸很小, 其玻璃含量则为 11.6%—20.0%, 明显低于 Apollo 样品 (25.4%—72.3%), 表明其太空环境与 Apollo 月壤采样地点有明显的不同[2,8,41,42]. 同时, CE-5 月壤还是历次采样中铁含量

最高的样品, 可能会导致不同的太空风化效应[8]. 中国科学家使用同位素定年的方法准确测定 CE-5 样品中火山玄武岩的年龄为 20 亿年, 是最年轻的月球玄武岩样品, 将以往研究限定的岩浆活动延长了近 10 亿年[38,40]. 这些独特的特征显示出 CE-5 月壤在月球研究中的重大价值, 对 CE-5 月壤中玻璃物质的深入研究将极大地突破我们对月球的时间和空间的认知边界. 由于月球上的玻璃物质具有不同的起源, 不同成因的玻璃物质记录着月球从内部到表面的火山喷发、陨石撞击和太空风化等不同过程的信息[1]. 我们将首先描述 CE-5 月壤中玻璃物质的形态、成分、微观结构和形成机制, 以构建月球玻璃的分类目录[1]. 之后, 我们将总结 CE-5 月球玻璃在揭示月球起源与演化[1]、月球表面陨石撞击历史[10]、太空风化机理[5–9]、月球内部和表面水的来源[12,37,43–45] 和月壤中 ^{3}He 含量[11] 等方面的最新研究进展, 并讨论月球玻璃的研究意义.

2 CE-5 月球玻璃

根据 CE-5 月壤的 X 射线衍射 (XRD) 数据, 初步估计其包含的玻璃物质为 11.6%—20.0%[2,42], 结合多种物质科学的研究手段, 通过分析这些玻璃物质的形态、成分和微观结构, 确定了 CE-5 月球玻璃的种类和形成机制[1], 下文将从形态特征和形成机制的角度对 CE-5 月壤中的玻璃物质分别进行介绍.

2.1 玻璃珠

图 3 是在 CE-5 月壤中发现的一系列不同形状和尺寸的玻璃珠. 这些玻璃珠具有规则圆滑的外形, 呈现出旋转形状的特征, 如图中所示的球状、扁球状、椭球状、哑铃状和泪滴状等. 玻璃珠的断裂或破裂可形成破碎的玻璃颗粒或不规则的玻璃碎片[2,22]. 玻璃珠规则和圆滑的外形说明他们是喷射的熔融液体在飞行过程中快速冷却形成的[46,47]. 在月球上, 火山活动和陨石撞击是产生熔融液体的主要来源[17]. 月球火山喷发在流出大量岩浆形成玄武岩的同时, 还会由于气体发生剧烈释放, 产生熔岩喷泉, 喷出大量细小的液滴, 随后冷却形成的玻璃珠即被称为火山玻璃. 月球表面高速陨石撞击产生的高温足以熔化任何月球矿物, 产生飞溅液滴在飞行过程中冷却成玻璃珠即为撞击玻璃. 由于液体的表面张力作用和月球的低重力环境, 这两种情况都会产生球形的玻璃珠, 因此很难从球形玻璃珠的形态来区分他们的成因[46]. 但是陨石的高速撞击会给液体带来剧烈的溅射效果, 使得液体在飞出的时候同时产生旋转, 旋转产生的离心力便会将液体拉长直至液体冷却至黏度足以和离心力相抗衡 (图 3(q)), 最终导致拉长至不同阶段的液体被固定保存了下来[46–49].

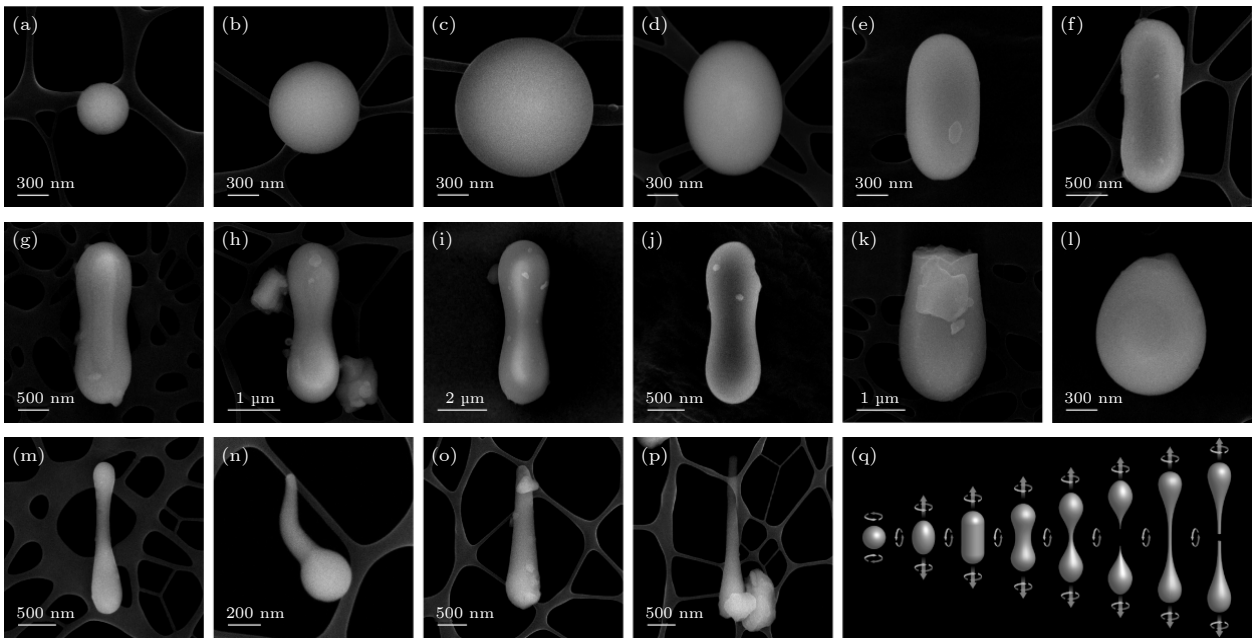

图 3 CE-5 月壤中形态各异的玻璃珠[1] (a)—(p) 玻璃珠的 SEM 照片; (q) 形成旋转形状颗粒的液体旋转机制示意图

Fig. 3. Diverse glass beads in CE-5 lunar soils[1]: (a)–(p) SEM images of glass beads; (q) schematic diagram of the rotation mechanism leading to the formation of glass beads with rotational shapes.

除了形态之外, 根据 Apollo 月壤的研究和对两种机制的理解, 人们总结出区别火山玻璃和撞击玻璃的 6 项特征[22,50,51]: 1) 火山玻璃由熔融的岩浆冷却形成, 因此通常没有不均一的包裹体; 2) 火山玻璃非挥发性的化学成分分布更加均匀; 3) 火山玻璃主要元素的含量具有高度聚类特征; 4) 火山玻璃具有更高的 Mg/Al 比值; 5) 不同火山玻璃都有着较为均一的 Ni 含量, 而撞击玻璃则有可能混入了陨石中的 Ni 等物质, 具有明显高的 Ni 含量; 6) 火山玻璃表面的挥发成分含量更高. 我们进而对玻璃颗粒的成分进行统计分析, 发现大部分玻璃颗粒都具有较低的 Mg/Al 比值, 符合撞击玻璃的特征. 在一些玻璃的内部, 还存在着 Fe-Ni 包含物, 是陨石撞击成因的直接证据[4]. 大部分撞击玻璃的成分与采样地点月壤的平均成分是一致的, 这说明这些玻璃是由陨石撞击到表层已经充分风化均匀混合的月壤上熔化冷却形成的, 而非源于特定的月球矿物. 此外, 有一些撞击玻璃的成分和采样地点月壤具有明显的区别, 这意味着它们可能产生自其他区域的较大撞击, 并被抛射传输到了采样地点[22]. 同时, 有一小部分玻璃颗粒的 Mg/Al 比值和报道的 Apollo 月壤中火山玻璃的比值相符, 然而他们究竟是否是火山玻璃, 仍需进一步研究确认. 近期, 关于 CE-5 月壤中玻璃珠的多方面研究也都表明, 迄今发现的 CE-5 玻璃珠几乎全部都是撞击玻璃, 火山玻璃的发掘仍然在进行中[3,4,10].

2.2 玻璃纤维

在 CE-5 月壤中除了玻璃珠, 我们还发现了一种独特的天然玻璃纤维, 这种月球玻璃纤维在以往的月壤样品中未曾报道过[17,52], 其直径最细可达到几十纳米, 是头发丝直径的千分之一. 为了排除实验室的污染, 确定所发现的玻璃纤维来自月壤本身, 我们对多个玻璃纤维进行了微观结构和成分表征. 玻璃纤维的高分辨透射电子显微镜 (TEM) 和高角环形暗场 (HAADF) 像 (图 4(h) 的插图) 都显示纤维具有明显的表面非晶层和纳米铁颗粒, 这两者都是月球太空风化的独特产物[33–35], 证实了玻璃纤维是来自于月球而非实验室中的污染物. 同时, 玻璃纤维和撞击玻璃珠的化学成分类似, 进一步说明它们很可能是撞击成因的. 如图 4(a), (b) 所示, 在两个撞击形成的胶结物颗粒的一端, 存在比较短的纤维状玻璃, 这些纤维物质明显是被撞击时的作用力从形成胶结物的熔融物质上向外拉拔形成的. 热拉拔是生产二氧化硅纤维、玄武岩纤维和金属玻璃纤维等各种玻璃纤维的常见方法, 当过冷液体达到合适的黏度时, 就可以在外力作用下发生均匀的超塑性变形, 然后经快速冷却形成玻璃纤维[53]. 在实验室中, 研究者已经在尝试将模拟月壤制备成连续的微米级玻璃纤维[54,55]. 月壤玻璃纤维可以和月壤颗粒进行复合作为增强增韧的月球基地建筑材料; 纤维材料还可以用于纺织、气体和水的净化、蔬菜种植和宇宙射线防护等, 可为月球上的人类活动提供保障[54,55]. 此次 CE-5 月壤中玻璃纤维的发现直接证明了玻璃纤维可以在月球上原位生成, 也为研究月球表面高真空低重力下制备的玻璃纤维的性能提供了宝贵机会, 这将为未来月球

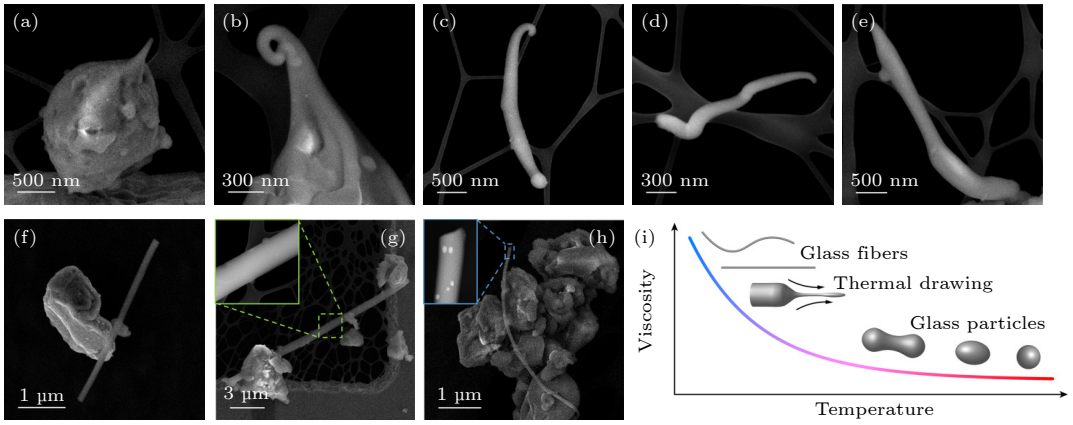

图 4 CE-5 月壤中独特的玻璃纤维[1] (a)—(h) 不同玻璃纤维的 SEM 照片; (i) 撞击产生的熔融液体的黏度温度关系的示意图, 低速度撞击产生的熔体温度低黏度大, 容易在撞击过程中被热拉拔形成细长的玻璃纤维

Fig. 4. Unique glass fibers in CE-5 lunar soils[1]: (a)–(h) SEM images of different glass fibers; (i) schematic diagram showing the viscosity-temperature relationship of impact-generated melt, the impact with lower speed results in melt with lower temperature and higher viscosity, making it easier to be thermally drawn into uniform thin glass fibers.

基地建设所需的玻璃纤维材料的太空制造奠定前期基础.

此外, 独特的玻璃纤维的发现还可以反映 CE-5 着陆地区的微陨石撞击环境. 在 Apollo 月壤中, 也存在着由于旋转机制等导致的拉长的玻璃颗粒和玻璃棒等, 但是拉伸度 (颗粒长度和直径的比值) 都小于 10, 通常为 1—3[17,52]. 然而, CE-5 月壤中最新发现的玻璃纤维的拉伸度则可以超过 50 (图 4(g) 和 4(h)). 这一显著的区别反映了产生这两种玻璃的微陨石撞击的不同. 在月球近真空环境下, 液体冷却形成的玻璃的最终形态不仅受到表面张力和旋转离心的影响, 还受到液体的流变性质的控制. 如图 4(i) 所示, 黏度随温度的变化决定了过冷液体的可塑性. 通过研究玻璃的形态, 可以推断出撞击产生的熔融液体的黏度和初始温度, 进而推测撞击的强度. 月球表面速度为 15—25 km/s的陨石将在撞击中心产生超过 100 GPa 的压力, 导致几千摄氏度的高温, 可以完全熔化任何类型的月球岩石[17], 产生的高温熔体具有较低的黏度, 会被溅射开来形成具有足够高流动性的液体, 然后在飞行中形成球形珠. 随着撞击速度的降低, 熔体的黏度急剧增大, 直到表面张力无法克服黏度, 从而保持旋转拉伸形状[46]. 随着撞击速度的进一步降低, 熔融液体的黏度升高到能够经历连续的热塑性流动. 在这种情况下, 通过撞击产生的作用力进行热拉拔, 可以产生超长的玻璃纤维. 这就像是石头扔到水中溅出大量的水滴, 而扔到黏稠的糖浆中会溅出拉长的细丝一样.

2.3 胶结物和粘结玻璃

较大陨石的撞击通常会产生大量的熔融液体并将其抛射出去, 这些飞溅的液滴容易在飞行过程中冷却形成上述各种形态的玻璃颗粒. 而月球表面遭受到的更频繁的撞击是较小陨石包括大量直径小于 1 mm 的微陨石的撞击[17]. 这些微小陨石的撞击会在更小的尺度或者岩石的表面导致熔化, 产生的液体可以将多个月壤颗粒粘在一起, 形成玻璃和矿物颗粒复合的熔渣状固体即胶结物[30]; 还有些液体会飞溅粘附在周围月壤颗粒的表面形成玻璃, 这些粘附的玻璃以及月壤颗粒自身遭受撞击部分熔化冷却形成在表面的玻璃在本文中被统称为粘结玻璃[1]. 胶结物玻璃和粘结玻璃都是月壤表面微陨石撞击的产物, 是月壤不同于地球土壤的独特组成部分, 记录着月球表面频繁的微撞击事件[17].

胶结物通常呈现出熔渣状的外观, 并且内部呈现出多孔的结构[2,30,42]. 胶结物是玻璃将细小的月壤碎屑粘结在一起形成的物质, 而这些细小的碎屑是太空风化的产物, 一般都含有较多的太阳风物质, 比如太阳风离子注入的 H 和 He 等[17]. 在撞击熔融的过程中, 一部分太阳风气体会释放出, 在熔融的液体中产生气泡, 导致最终的多孔结构; 还有一部分会和月壤中铁的氧化物发生氧化还原反应产生纳米铁和水[33,56], 纳米铁会保存在胶结物中影响月壤的光谱特性[33,34], 产生的水一部分会汽化流失, 另一部分则能够留存在胶结物玻璃中. 有研究报道 Apollo 月壤胶结物玻璃中保存的水高达 470 ppm (1 ppm $=10^{-6}$), 并且具有和太阳风一致的 H 同位素比例, 展示出玻璃物质在保存水方面的出色性能[30].

CE-5 月壤颗粒的表面经常附着有粘结玻璃, 这些玻璃的尺寸从几微米到亚微米不等, 且大都呈现出熔化和流动特征的形态. 粘结玻璃可以包裹部分或者整个颗粒, 比如图 5(b) 中的辉石颗粒就被多孔的玻璃物质包裹. 粘结玻璃也经常表现为各种泼溅形态的附着物, 如图 5(c) 和图 5(d) 所示, 这些玻璃的形态就像是粘稠的液体被迅速泼到了月壤颗粒上, 导致一部分液体在边缘聚集, 剩下的继续在表面流淌, 形成流体和液滴的痕迹. 成分分析显示这些泼溅形态的粘结玻璃和颗粒的成分具有显著区别, 证明它们是外来的液体. 单独的或者聚集的液滴状的粘附玻璃也经常出现在月壤颗粒的表面. 图 5(e) 展示了一个钛铁矿表面圆润的扁平玻璃液滴. 图 5(f) 和图 5(g) 中则可以看到, 一个橄榄石表面布满了密密麻麻的液滴状玻璃, 就像是密集的雨点落在了岩石的表面一样. 在 CE-5 月壤的各种粘结玻璃中, 都存在和胶结物中类似的孔洞, 这是撞击熔化将保存在月壤颗粒中的太阳风物质释放的结果. 大量的粘结玻璃、胶结物及其多孔的特征表明, 微陨石撞击和太阳风辐照在 CE-5 月壤的风化演化过程都起到了重要的作用[3,42,57].

频繁的微陨石撞击除了产生胶结物和粘结玻璃, 还有更加直接的产物, 即月壤颗粒表面的微陨石坑. 微陨石坑也包含很多玻璃物质, 图 5(h) 为微陨石坑的放大图, 其中陨石坑的内衬一般是玻璃态的, 同时撞击产生液体还会堆积在坑口, 形成一个玻璃环[58,59]. 微陨石坑的尺寸、形态和分布是约束

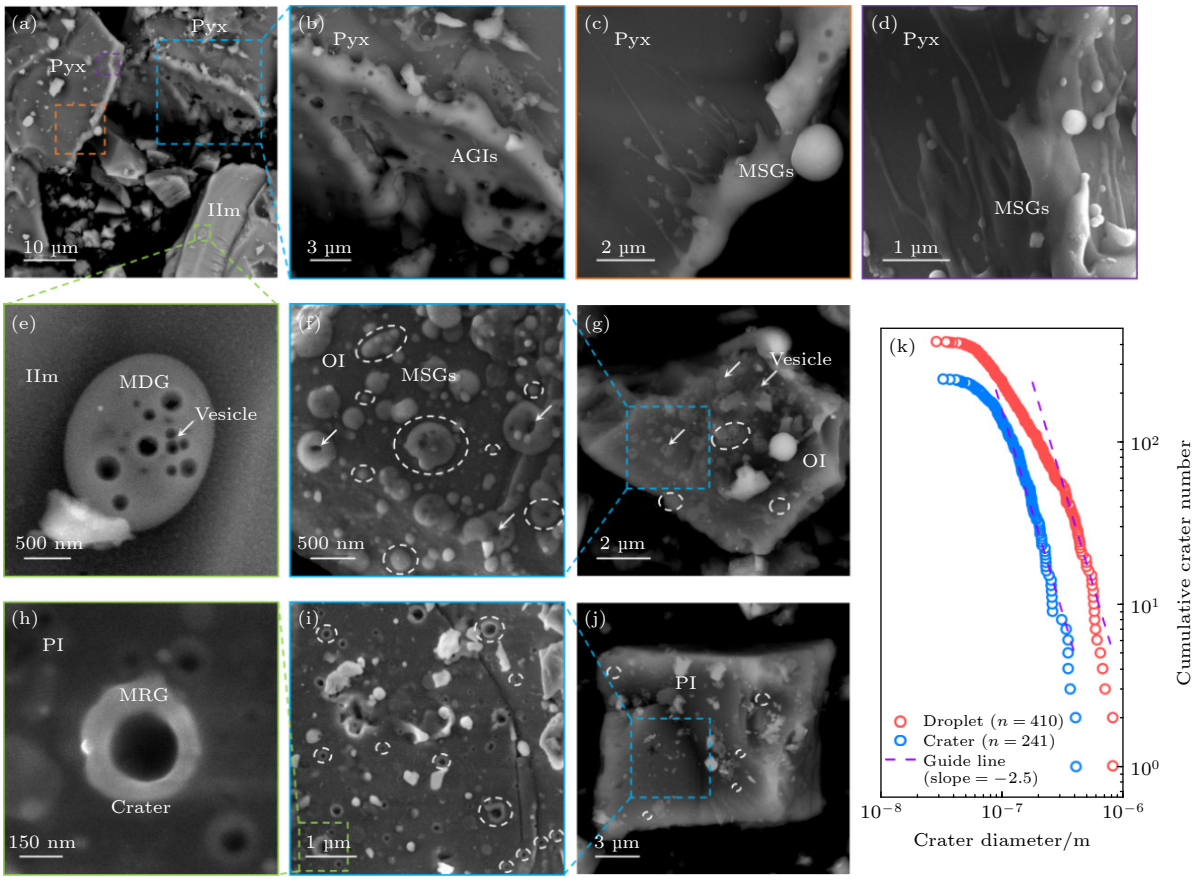

图 5 CE-5 月壤中微陨石撞击产生的各种粘结在月壤颗粒表面的玻璃物质[1] (a), (b) 颗粒表面胶结物玻璃的 SEM 照片; (c), (d) 颗粒表面泼溅状粘结玻璃的 SEM 照片; (e) 颗粒表面单独的液滴状玻璃的 SEM 照片; (f), (g) 颗粒表面密集的液体状玻璃的 SEM 照片; (h), (i), (j) 颗粒表面密集分布的微陨石撞击坑的 SEM 照片, 撞击坑的内衬和上部的环为玻璃物质; (k) 图 (g) 中液体状玻璃和图 (j) 中微陨石撞击坑的尺寸分布统计

Fig. 5. Various glass materials formed by micro-meteoroid impacts and adhering to CE-5 soil particles[1]: (a), (b) SEM images of agglutinate-like glasses on particle surfaces; (c), (d) SEM images of molten splash-like glasses on particle surfaces; (e) SEM image of isolated droplets of glass on particle surfaces; (f), (g) SEM images of densely distributed droplets of glass on particle surfaces; (h), (i), (j) SEM images of densely distributed microcraters on particle surfaces, the microcrater interiors and upper rims are composed of glassy material; (k) size distribution statistics of glass droplets in image (g) and microcraters in image (j).

微陨石撞击环境的重要依据. 不同于 Apollo 月壤中发现的具有破碎区域和飞溅玻璃物质的微撞击坑, CE-5 月壤颗粒表面微撞击坑具有比较光滑的玻璃环且都聚集在坑口附近, 意味着其对应的撞击速度可能更低. 类似的微撞击坑形态也曾在小行星样品中发现过, 而小行星表面的撞击速度一般仅为月球上的一半[7,57,60]. 除了一些单独和离散的微撞击坑, CE-5 月壤颗粒表面还存在一些特别的具有明显聚集特征的撞击坑. 图 5(j) 中, 一个长石颗粒的断面上密集地分布着直径 30—400 nm 的微小撞击坑, 这些撞击坑都具有类似的形态, 说明它们很可能由同一撞击事件产生. 高度的空间聚集和相似的形态是月球上二次撞击的特征, 说明很可能是一个外来的陨石撞击到了月球颗粒产生了大量的碎屑, 这些碎屑又作为撞击物二次撞击了周围的颗粒, 产生了聚集的微撞击坑[3,7,57,61].

2.4 月壤颗粒表面的非晶层

月球玻璃还包括月壤颗粒表面的非晶层, 其厚度从几纳米到上百纳米不等. 表面非晶层虽然很薄, 但是却非常普遍, 在大量 CE-5 月壤颗粒的表面都发现了非晶层. 表面非晶层通常还含有太阳风注入产生的水和纳米铁, 在研究月球水的起源和太空风化行为方面发挥着重要作用. 前文介绍的几种玻璃物质本质上都是由液体快速冷却形成的, 而表面非晶层则由另外两种不同的机制产生: 一种是气相沉积机制, 将气体直接转变成非晶物质, 气相沉积又包括微陨石撞击导致的热蒸发沉积和太阳风

离子溅射导致的溅射沉积[34,62–64]; 另一种是太阳风离子辐照注入机制, 将晶态固体转变成非晶固体, 太阳风中的高速离子 (主要是 H 和 He) 持续地注入到月球颗粒中, 不断地产生辐照损伤和各种缺陷, 最终完全破坏其晶格结构, 将其转化为非晶态[18,19,36,62]. 通过对 CE-5 月壤颗粒表面非晶层微观结构和成分的细致分析, 明确区别出了 CE-5 月壤中的沉积非晶层和辐照非晶层.

图 6 展示了 CE-5 月壤颗粒表面典型的沉积非晶层. 高分辨 TEM 和 HAADF 图像都清晰显示, 在多个颗粒的表面都存在着一层紧密包裹颗粒的非晶层. 这一非晶层和月壤颗粒具有非常光滑的界面, 意味着是外来气体包裹颗粒的过程, 而非具有方向性的离子注入过程. 成分分析更加明确地判定, 这些非晶层是气相沉积产生的. X 射线能谱 (EDS) 测试显示, 和颗粒相比沉积层明显缺失了 Fe, Mg, Al 和 Ca 等较难以蒸发的元素, 而几乎仅仅由 Si和 O 组成. 这一成分上的差异并不随颗粒的成分变化而变化, 多个不同月壤颗粒表面的此类非晶层都仅由 Si 和 O 组成, 这是沉积非晶层的典型特征. 在热蒸发过程中, Si 比 Fe, Mg, Al 和 Ca 等更容易蒸发, 所以会导致 Si 的富集[62,64,65].

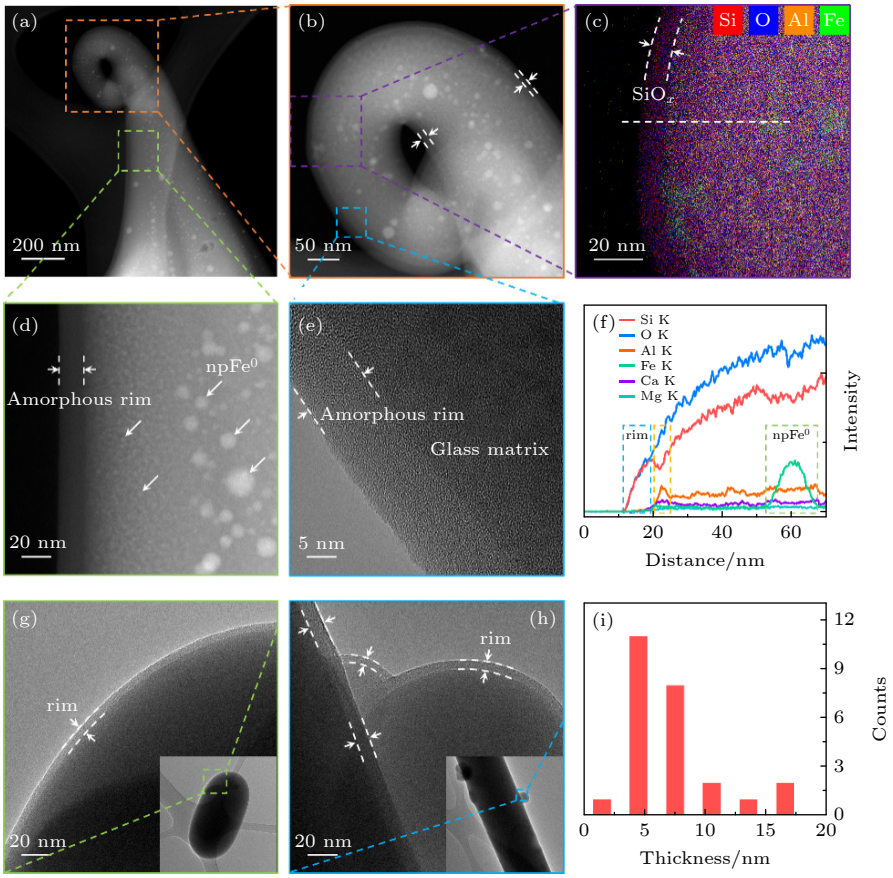

图 6 CE-5 月壤颗粒表面的沉积非晶层[1] (a) 一个玻璃颗粒边缘的扫描透射电子显微镜 (STEM) 的高角环形暗场像 (HAADF); (b)—(d) 标记区域放大的 HAADF 照片; (e) 标记区域放大的高分辨 TEM 照片, 可以看到颗粒最外层存在一个厚几个纳米的非晶层, 非晶层中不含有纳米铁, 而非晶层之下的颗粒内部含有大小不一的纳米铁颗粒; (g), (h) 其他颗粒表面的高分辨 TEM 照片, 同样可以观察到清晰的表面非晶层; (c), (f) 对应区域的 EDS 面扫和线扫结果, 显示表面非晶层和内部颗粒的成分明显不同, 仅有 Si 和 O 组成, 证明它们是沉积作用产生的; (i) CE-5 月壤颗粒表面沉积非晶层厚度的统计图

Fig. 6. Vapor deposited amorphous rims on CE-5 soil particles[1]: (a) High-angle annular dark-field image (HAADF) of a glass particle; (b)–(d) enlarged HAADF images of the marked regions; (e) high-resolution transmission electron microscope (TEM) image of the marked region, it can be observed that the outermost layer of the particle contains a few nanometers thick amorphous layer, which does not contain nanophase iron particles (npFe^0), while the interior of the particle below the amorphous layer contains npFe^0 of varying sizes; (g), (h) high-resolution TEM images of other particle surfaces, clearly visible surface amorphous layers can also be observed; (c), (f) energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) elemental mapping and line scan results of the corresponding regions, showing distinct composition differences between the surface amorphous rims and the interior particles, consisting mainly of Si and O, indicating that they are formed by deposition processes; (i) statistics of the thickness of the vapor deposited rims on CE-5 soil particles.

然而, 值得注意的是, Apollo 月壤颗粒表面的沉积非晶层虽然也富含 Si, 但仍然含有一定的金属元素, 而 CE-5 月壤颗粒表面的沉积非晶层仅由 Si 和 O 组成, 说明 CE-5 采样地点的微陨石撞击速度可能更低, 导致产生的热量仅足以将 Si 和 O 蒸发出来[62,64,65].

CE-5 月壤沉积非晶层还具有另外两个不同于 Apollo 月壤沉积非晶层的特征. 第一个特征是 CE-5 月壤的沉积非晶层厚度明显比 Apollo 月壤沉积非晶层的厚度更薄. 如图 6(i) 所示, CE-5 月壤的沉积非晶层厚度分布在一个较窄的区间, 2.8—16.3 nm 范围内, 平均约为 7 nm, 而 Apollo 月壤中的沉积非晶层厚度则分布在 10—200 nm 范围内, 平均在 50—60 nm[62,64]. 明显更薄的沉积非晶层可能是由于上文推测的 CE-5 月壤所遭受的微陨石撞击速度较低, 单次撞击时间产生的气体更少, 也有可能是因为 CE-5 月壤暴露时间更短, 遭受到的撞击次数更少. 值得注意的是, 最新研究表明, 虽然 CE-5 月壤的玄武岩矿物的年龄为 20 亿年, 比以往采样样品都要年轻, 但是其暴露年龄达到了几亿年, 是相当成熟的月壤[8]; 同时 Apollo 月壤的研究还发现沉积层的厚度和暴露年龄并没有明显的相关性, 推测沉积非晶层大多数是由随机的单次撞击产生的, 而非反复撞击的积累[1]. CE-5 月壤沉积非晶层的第二个特征是不含有纳米铁颗粒. Apollo月壤中曾广泛报道了沉积非晶层中的纳米铁颗粒[33,35,66], 而且气相沉积过程也被理论和模拟实验认为是产生纳米铁颗粒的主要机制之一[6,34,63]. 然而从图 6 中可以看到, 虽然玻璃珠和玻璃纤维中存在一些纳米铁颗粒, 最外层的沉积非晶层中却不含有纳米铁颗粒. 这一特征和 CE-5 沉积非晶层的成分特征是一致的, 是因为产生的蒸气的温度不够高, 不足以将 Fe 元素蒸发出来. 该发现也和最近脉冲激光模拟微陨石撞击的实验一致, 实验中高能量的激光轰击会产生纳米铁颗粒, 低能量的轰击则不能产生[67].

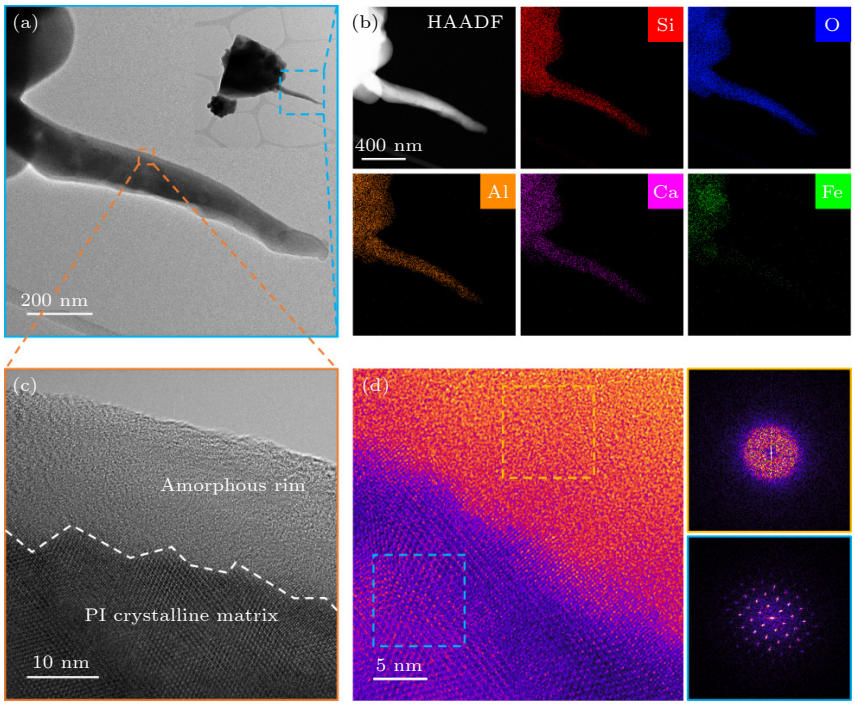

图 7 CE-5 月壤颗粒表面的辐照非晶层[1] (a) 一个斜长石颗粒的 TEM 照片; (b) 颗粒的 HAADF 图像和 EDS 成分测试结果; (c) 颗粒边缘标记处的 TEM 照片, 可以清晰看到晶体颗粒的表面具有一层非晶层, 非晶和晶体的界面呈现锐利的锯齿状; (d) 非晶-晶体界面附近的高分辨 TEM 照片, 对应区域的快速傅里叶变换证实了两个区域的非晶和晶体结构

Fig. 7. Solar wind irradiation-induced amorphous rims[1]: (a) TEM images of a filament of the inserted plagioclase grain; (b) HAADF images and EDS maps of the filament; (c) HRTEM images of the edge of the filament marked in (a), there exists a clear amorphous rim non-uniformly coating on the surface of the grain. Distinct from the vapor deposited amorphous rims, the rim in (c) does not have chemical differences with the host grain and the interface between the rim and the matrix is sharply serrated rim (marked by the dashed line), indicating its origin of ion implantation by solar wind irradiation; (d) HRTEM images of the interface between the amorphous rim and the crystalline matrix, fast Fourier transform of the marked rim and matrix regions in (d), confirming their amorphous (top right) and crystalline (bottom right) nature accordingly.

图 7 展示了 CE-5 月壤中的另外一种表面非晶层——辐照非晶层的典型结构. 图 7(a) 中的颗粒为一长石颗粒并且具有便于 TEM 直接观察的细丝结构. 在长石的表面, TEM 高分辨图像显示颗粒的内部为规则有序的晶格, 外部则存在一个厚度约为 20 nm 的非晶层. 和沉积非晶层平滑地包裹住月壤颗粒不同, 辐照非晶层和颗粒具有明显的锯齿状边界 (图 7(c)). 同时辐照非晶层的成分和颗粒的成分基本一致, 一般只会有太阳风注入时选择性溅射导致的轻微成分差异. 在长期的太阳风辐照过程中, 高速的太阳风离子会持续地注入到月壤岩石颗粒中, 不断地产生缺陷和辐照损伤. 辐照损伤随时间不断积累, 最终颗粒表面从结晶良好的晶体变成纳米晶, 再到非晶和纳米晶的复合, 直至完全非晶态. 因此, 月壤表面辐照非晶层的厚度和辐照时间以及太阳风离子的穿透深度密切相关, 而且表现出从外到内的梯度特征. 此外, 辐照非晶层和月壤颗粒的矿物组成密切相关, 如图 7 中展示的长石颗粒是最容易被辐照损伤为非晶态的, 橄榄石表面则通常会出现非晶-纳米晶复合的情形, 而钛铁矿则几乎不能被辐照损伤为非晶态[62]. 研究者们在对第一批返回地球的月壤样品的研究中, 就发现了普遍存在的辐照非晶层, 其厚度和太阳风的穿透深度一致, 并且含有较多的太阳风物质[18,62]. 辐照非晶层记录了长期的太阳风辐照历史, 并且保存了丰富的太阳风物质, 是研究月球表面水的来源和太空风化效应机理的关键[56,68].

本节总结了月球表面存在的固、液、气多种玻璃转变路径, 明确了 CE-5 月壤中玻璃物质的不同起源, 包括陨石、微陨石撞击和太阳风辐照等, 这些研究初步构建了月壤玻璃/非晶相的分类目录, 为进一步解读不同种玻璃记录的月球不同的时空演化信息、认识月球物质组成和月球资源开发利用奠定了基础.

3 月球玻璃研究意义

在我国的传统神话故事中, 经常会想象在月球上有一座美丽清冷的月宫, CE-5 月壤中来自月球的玻璃物质不仅为月宫的传说增添了更多的浪漫色彩, 同时也将为我们认识月宫提供宝贵的知识, 甚至有可能成为未来建造一座真正月宫的材料. 可以说月球玻璃就像是月宫中的照相机一样, 为月球亿万年间表面和内部的演化拍摄下一帧帧宝贵的照片; 月球玻璃又是月宫中保存重要资源的容器, 为未来的月球基地提供丰富的水和能源; 月球玻璃还是月宫中的时钟, 可以为月球上的火山喷发和陨石撞击事件提供可靠的时间标尺. 本节就从这三个角度介绍月球玻璃在月球研究中的重要作用, 特别是 CE-5 月球玻璃研究为月球研究带来的最新进展.

3.1 月球玻璃是记录月球表面和内部演化历史信息的照相机

3.1.1 月球玻璃记录月球表面的撞击环境

撞击是月球表面最活跃的活动, 深刻影响着月球的演化[17,21,22]. 大的陨石撞击塑造了月球现在“千疮百孔”布满撞击坑的表面[17,69], 而较小的陨石则在不同尺度上不停地破碎、研磨、搅拌、翻腾和熔化月球表面矿物, 最终创造了可以厚达几米的月壤[17]. 陨石撞击还可能给月球带来了水、碳和硫等各种挥发性成分[29,70,71], 甚至会改变月球的磁场[72]. 月壤中的大部分玻璃物质都是由陨石撞击产生的, 这些撞击成因的玻璃物质记录着月球表面从数千米到纳米的多尺度撞击事件, 它们在月壤中的含量、自身的成分、形态和微观结构都是反演月球表面撞击环境的重要依据. 在 CE-5 月壤中的撞击成因玻璃物质中, 我们发现了一些明显不同于 Apollo 月壤的特征, 并由此推测 CE-5 采样地点的陨石和微陨石撞击可能更温和. 首先, 我们在 CE-5 月壤中发现了此前未曾报道过的月球玻璃纤维. 玻璃纤维的伸长率可大于 50, 远大于 Apollo 和 Luna 月壤颗粒 (伸长率通常为 1—3)[17,52]. 撞击玻璃的伸长率与熔体的流动性也即撞击产生的温度负相关, 粗略估计, 月球表面产生连续均匀纤维需要的温度为 1000—1500 ℃, 对应撞击速度相对更低, 约 5 km/s, 远低于月球上陨石的一般速度 (15—25 km/s), 反而接近小行星表面陨石撞击的平均速度[7,55,57,60]. 其次, 微陨石撞击产生的沉积非晶层的特征也符合更加温和的撞击环境. 一方面, CE-5 月壤颗粒表面的沉积非晶层厚度 (平均约为 7 nm) 远比 Apollo 样品非晶层的厚度 (平均 50—60 nm) 薄得多[62,64]. 超薄的沉积非晶层表明微陨石的撞击速度更低, 每次撞击产生的蒸气更少. 另一方面, CE-5 月壤颗粒表面的沉积非晶层仅由 Si 和 O 组成, 而 Apollo 月

壤沉积层通常还含有 Mg, Al 和 Ca. 这是因为 Si 比 Mg, Al, Ca 更容易气化, 而能量较低的微陨石撞击仅足以产生 SiO_x 蒸气[62,64,65]. 这也导致了 CE-5 沉积非晶层并不含有在 Apollo 样品沉积非晶层中经常观察到的纳米金属铁颗粒. 这些不同撞击成因玻璃物质共同反映了 CE-5 采样地区以微陨石撞击为主的且相对温和的撞击环境. 这一独特的撞击环境解释了为什么 CE-5 月壤是经过几亿年长时间暴露的高度成熟的月壤, 但却具有较低的玻璃含量[2,8,41]. 在较为温和的撞击环境下, 破碎和翻耕等机械角砾化的作用比熔化和蒸发的效应更强, 因此重复的微陨石撞击更多的是将月球岩石变成细小的颗粒而非产生玻璃珠和胶结物等玻璃物质. 这样的撞击环境也还有可能影响月球表面的太空风化效应, 因为太空风化效应主要是纳米金属铁导致的, 而较为温和的撞击则难以在沉积非晶层中产生纳米金属铁, 使得撞击对纳米铁金属铁的贡献相对减弱[5].

3.1.2 月球玻璃记录月球表面的太空风化行为

在 CE-5 月壤的多种玻璃物质中, 如玻璃纤维、胶结物和辐照非晶层中都发现了大量的纳米尺度的金属铁颗粒, 这些纳米铁会改变月球的光学特性, 导致所谓的太空风化效应. 人们对太空风化效应的最早认识就来自于对月壤的研究, 研究者发现月壤的反射光谱和月球矿物的反射光谱具有显著的区别[33–35,73]. 随后人们认识到太空风化效应是月球、水星和小行星等无大气天体表面普遍存在的现象[33–35,73]. 在缺乏大气保护的情况下, 天体表面不断受到陨石撞击、太阳风和宇宙射线的辐照, 积累了不同尺度的纳米铁, 导致光谱特性随时间发生改变[35,73]. 不同尺寸的纳米铁对光谱具有不同的改造

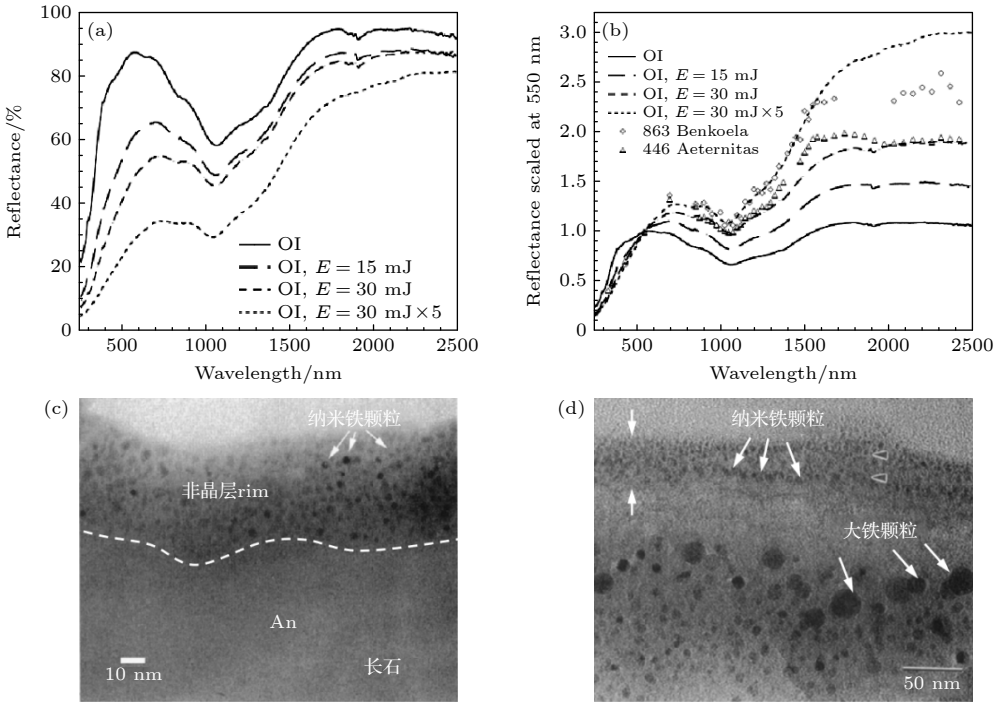

图 8 月球表面的太空风化效应, 陨石撞击等太空风化作用在月壤中产生纳米铁颗粒, 不同尺寸的纳米铁颗粒产生了发红和发暗的效果 (a) 脉冲激光轰击前后的反射光谱, 用于模拟微陨石撞击导致的太空风化过程[63]; (b) 图 (a) 中的反射光谱在 550 nm 处归一化, 可以看到风化后反射率降低 (即发暗), 可见光波段降低的程度比近红外波段更大 (即发红)[63]; (c) Apollo 月壤长石颗粒表面沉积非晶层中的小尺寸纳米铁[33]; (d) Apollo 月壤胶结物玻璃中的小尺寸和大尺寸纳米铁[33]

Fig. 8. Space weathering effects on the lunar surface. Space weathering processes such as meteoroid impacts lead to the formation of $npFe^0$ in lunar soils, resulting in reddening and darkening effects: (a) Reflectance spectra before and after pulsed laser irradiation, used to simulate space weathering processes caused by micro-meteoroid impacts[63]; (b) normalized reflectance spectra at 550 nm from the data in image (a), it can be observed that the reflectance decreases after weathering, resulting in darkening; the visible wavelength range experiences a larger decrease than the near-infrared wavelength range, leading to reddening[63]; (c) small-sized $npFe^0$ in the depositional amorphous layer on the surface of Apollo lunar soil feldspar particles[33]; (d) small-sized and large-sized nano-scale iron particles in the agglutinates in Apollo lunar soils[33].

作用, 一般认为较大的纳米铁主要是产生发暗的效果, 即图 8(a) 所示的反射率下降; 小尺寸的纳米铁则同时产生发暗和发红的效果. 发红指的是可见近红外光谱斜率变陡, 更直观的表达是图 8(b) 所示的在 550 nm 归一化后的光谱近红外光波段反射率增强 [34,35,63,74]. 理解不同尺寸纳米铁的成因是研究太空风化行为的关键, 因为这决定了不同环境下太空风化发生的程度和快慢, 对于预测月球不同区域和不同天体上的太空风化效应以及遥感探测光谱数据的精确解读至关重要 [36,60,75–77].

纳米铁颗粒主要存在于月球玻璃物质中, 这些玻璃物质的年龄、成因、形态和微观结构将为认识纳米铁的形成和太空风化的机理提供关键的信息. 最早人们在 Apollo 月壤中的胶结物玻璃和颗粒表面辐照非晶层中发现了大量的纳米铁颗粒, 由此提出了太阳风注入氢还原的观点, 认为氢离子注入到月壤颗粒表面并伴随着晶格破坏产生表面非晶层, 随后在撞击产生的高温作用下, 注入的氢和铁的氧化物发生还原反应, 产生单质纳米铁颗粒 [36,56]. 后续的大量研究认为, 纳米铁更普遍地存在于 Apollo 月壤颗粒表面的沉积非晶层中, 又提出撞击导致的热沉积过程和太阳风离子溅射过程是产生纳米铁的主要过程 [33,34,63,64]. 由于胶结物一般是熔融液体粘结风化的月壤颗粒形成的, 而这些月壤颗粒表面通常已经积累了大量小纳米铁颗粒, 在加热和熔化过程中, 小纳米铁就会汇聚成大的纳米铁颗粒, 导致胶结物中含有更多的大纳米铁颗粒 [33,35]. CE-5 月壤采集自更高纬度的地区, 处于和以往采样地点不同的撞击和辐照环境中, 且具有更高的 FeO 的含量, 为进一步探索太空风化机理提供了绝佳机会. 和 Apollo 月壤样品不同的是, CE-5 月壤颗粒表面的沉积非晶层中并没有纳米铁, 而是在颗粒的内部含有纳米铁. 进一步, 我们挑选具有明确撞击成因的纺锤形撞击玻璃, 使用聚焦离子束从撞击玻璃上提取出一个薄片以观察内部的纳米铁颗粒. 如图 9(b) 所示, 撞击玻璃内部离散地分布着一些直径几十纳米的大纳米铁颗粒, 对铁颗粒的晶格的高分辨表征证实这些颗粒是 α-Fe. 这些纳米铁存在于非常内部的区域, 距离表面可以超过 1 μm, 排除了气相沉积和太阳风辐照的成因. 此外这些大纳米铁的分布非常离散和独立, 并不像图 8(d) 中胶结物玻璃中大纳米铁颗粒周围还分布着尺寸不一的较小纳米铁, 说明这些大纳米铁颗粒似乎也不是由之前存在的小纳米铁在撞击熔化过程中合并产生的. 更重要的是, 我们利用 TEM 中高分辨的电子能量损失谱分析了纳米铁及其周围铁元素的价态, 发现纳米铁周围含有明显的三价铁. 月壤中的铁通常都是二价的, 单质金属铁、三价铁和二价铁的共存意味着在撞击过程中发生了歧化反应, 在撞击产生的高温高压环境下, 二价铁反应同时产生了三价铁和零价铁 [78–80], 零价铁在液体中迅速形核长大为纳米铁颗粒, 并随着液体冷却被迅速凝固在了玻璃中, 避免了和三价铁再次发生归中反应. 此外, CE-5 月壤的胶结物玻璃和微陨石坑表面残留玻璃中都发现了歧化反应, 说明撞击导致的歧化反应可能是高纬度高 FeO 含量地区产生纳米铁的一个普遍途经 [7,9].

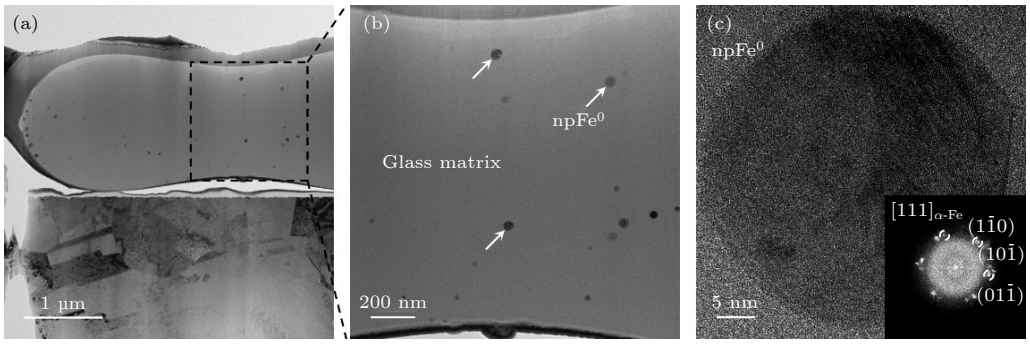

图 9 CE-5 月壤撞击玻璃珠内部的纳米铁颗粒 (a) 聚焦离子束切出来的玻璃珠截面的高分辨 TEM 照片; (b) (a) 中标记区域的高倍高分辨 TEM 照片, 内部箭头指示的黑色颗粒为纳米金属铁颗粒; (c) 纳米铁颗粒的高分辨 TEM 照片, 插图为对应的快速傅里叶变换

Fig. 9. npFe^0 inside impact glass beads CE-5 lunar soils: (a) TEM image of a cross-section of a glass bead cut by focused ion beam; (b) TEM image of the marked region in (a), the black particles indicated by internal arrows are npFe^0; (c) TEM image of the npFe^0, the inset shows the corresponding fast Fourier transform.

3.1.3 月球玻璃记录月球内部的演化

月球玻璃从月球活动的角度可以归因为两类, 一类由月球表面的活动产生, 即前文所述的陨石撞击和太阳风辐照所产生的玻璃, 另一类由月球内部的活动产生, 主要是火山玻璃. 火山喷发产生的火山玻璃具有和火山活动一样的年龄, 将月球深部的信息带到了表面, 使我们得以窥见月球内部在不同历史时期的演化状态. 火山玻璃所保存的最关键信息之一是水及其他挥发成分. 天体内部的水在地质运动和天体演化过程中扮演着重要角色, 水能够影响岩浆的结晶过程[81,82]、改变岩浆的黏度[83]、降低岩浆的熔点[84]和延长火山活动的寿命等. 而月球内部水的信息还涉及月球的起源以及地月系统水的来源等重大科学问题[85].

主流的观点认为月球起源于一个火星大小的天体对地球的一次大撞击[25,85], 产生的高温使得月球上的 Al, Ca 和 Ti 等难熔元素明显比地球上要高, 而水和其他极易挥发的成分则几乎全部逃逸到了太空中, 因此研究者们长期以来都认为月球内部是无水的[85]. 2008 年, Saal 等[23]采用更先进的微区离子探针技术在月球火山玻璃中探测到了明显的氢离子的信号. 研究发现氢离子可以存在于玻璃珠内部上百微米处并且呈现内多外少的特征, 证明这些氢离子是火山玻璃原生的, 而非在其形成之后通过其他过程注入的. 根据氢离子的测试结果和火山玻璃的年龄, 估计出早期月球岩浆中的含水量高达 745 ppm, 已经和地球内部的水含量相当了. 这一发现使人们认识到月球在形成的早期可能是有水的, 颠覆了人们的传统认知, 引发了后续对于月球起源和月球内部水的来源的研究. 之后人们进一步分析了月球火山玻璃中水的 H 同位素特征, 发现和地球内部的水难以区分, 并且都和碳质球粒陨石中水的 H 同位素成分相似[29]. 这说明月球和地球内部的水可能具有共同的起源, 一种观点认为是在大撞击发生之后地球仍然保留了大量的水, 同时地月之间维持了一段时间的挥发分扩散, 导致地球上的水输送到了月球[23,29], 还有观点认为在大撞击后的短暂时间内, 小行星陨石撞击同时为地月系统带来了大量的水资源[71]. 时至今日, 关于月球内部水的含量和来源仍然争论不断. 得到 CE-5 月壤后, 我国科学家也第一时间对这一问题展开了研究, 实验测定采样地点月幔中的水含量仅为 1—5 ppm, 和之前的报道相比是相当干的, 这可能是因为采样地点更长时间的火山岩浆活动 (距今约 20 亿年才停止, 而以往采样地区火山活动在 40—28 亿年前停止) 挥发掉了内部的水, 也可能存在新的机制[37]. 遗憾的是目前尚未明确发现 CE-5 月壤中的火山玻璃, 对火山玻璃的搜寻和深入研究将为探索月球 28—20 亿年间的内部演化提供宝贵的信息.

3.2 月球玻璃是保存月球资源的重要容器

月球玻璃还是保存宝贵月球资源物质的永久容器. 对月球玻璃的研究, 一方面为认识月球的起源和演化提供了关键的信息, 另一方面也将推动月球资源的原位开发和利用. 月壤中含有丰富的矿产资源, 包括铁、铝、钛、稀土元素和贵金属元素等, 据估计表面 5 cm 厚的月壤含有的铁就高达上亿吨 (1 t = 1000 kg)[17]. 除了矿产资源, 月壤中还含有大量宝贵的 ^{3}He. ^{3}He 可以和 ^{4}He 混合后以稀释制冷的方法将温度降低到 mK 级别, 是目前实现极低温环境的关键物质资源. 最吸引人的是, ^{3}He 是一种近乎完美的核聚变燃料, 它在进行核聚变反应的时候不会产生难以约束的中子, 因而非常安全高效. 据估计, 100 t 的 ^{3}He 核聚变产生的电力就足够全人类一年的能源消耗. 然而 ^{3}He 在地球上的含量很低, 只有不到半吨. 恒星核聚变过程能够产生较高丰度的 ^{3}He, 是 ^{3}He 的主要来源. 太阳产生的 ^{3}He 会随着太阳风被传播出去. 地球由于磁场和大气的保护, 几乎不会接收到太阳风. 而无磁场和大气的月球则是一个巨大的太阳风接收器, 高速的太阳风离子会注入并保存在月壤物质中[86,87]. 我国探月工程的重要任务之一就是对月球上 ^{3}He 的分布和含量进行探测, 嫦娥一号的微波遥感探测数据显示, 月球上的 ^{3}He 总量为 100—130 万吨. 一般认为钛铁矿是月壤中最能保存 ^{3}He 的矿物, 而保存在钛铁矿中的 ^{3}He 通常需要 700 ℃ 的高温才能完全释放, 大大增加了开采的难度[11]. 最近中国科学院宁波材料技术与工程研究所的研究团队进一步发现, 玻璃物质在 ^{3}He 的捕获和存储中发挥了重要的作用. 如图 10 所示, 他们发现多个不同的钛铁矿表面都有一层厚度约 50 nm 的玻璃物质, 这些玻璃中存在一些直径 5—25 nm 的 He 气泡, 气泡中 He 浓度最高可达 192 个/nm^3 [11]. 研究者认为钛铁矿中保存的 ^{3}He 会由于沟道扩散效应或撞击产生的升温而释放出来, 而表层结构无序的玻璃物质则会进

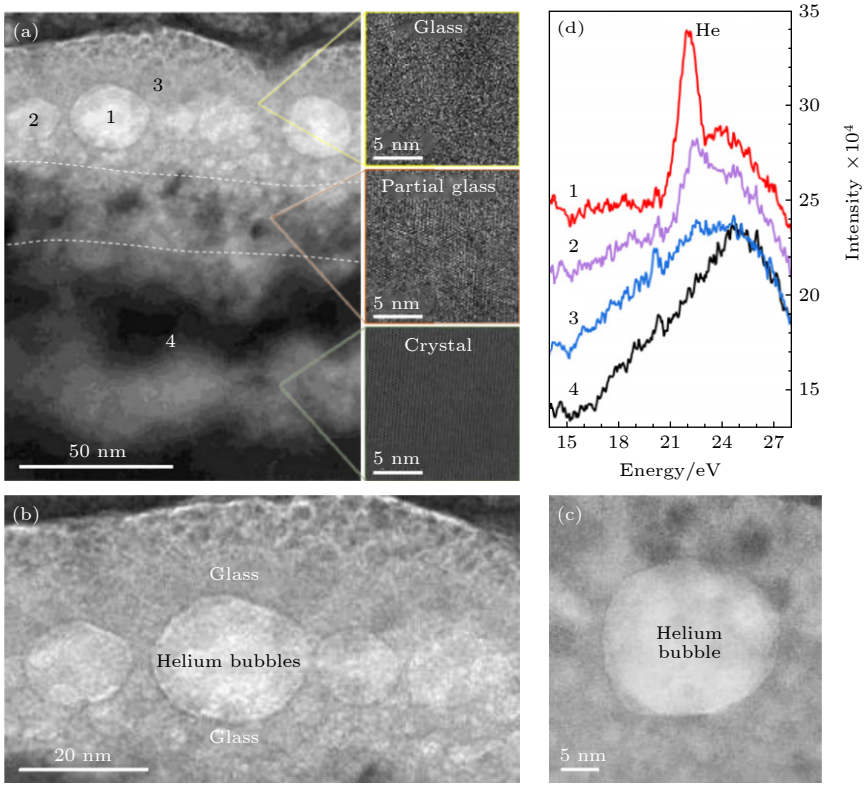

图 10 CE-5 月壤钛铁矿颗粒表面玻璃物质捕捉的 He[11] (a) 聚焦离子束切出来的颗粒截面的高分辨 TEM 照片; (b), (c) 表面玻璃物质和 He 气泡的高倍高分辨 TEM 照片; (d) 图 (a) 中不同位置的电子能量损失谱

Fig. 10. Helium trapped by glassy material on ilmenite particles in CE-5 lunar soils[11]: (a) TEM image of a cross-section of a particle cut by focused ion beam; (b), (c) TEM images of the surface glassy material and helium bubbles; (d) electron energy loss spectra from different positions in image (a).

一步捕捉释放的 ^{3}He 并且汇集形成气泡. 初步估计, 月壤钛铁矿表面玻璃物质以气泡形式所捕获的 ^{3}He 可能高达 26 万吨, 显示出玻璃在长期保存 ^{3}He 方面的重要作用. 同时, 这些保存在玻璃气泡中的 ^{3}He 还有可能通过机械破碎的方法在低温下即可充分释放出来, 更加节省能源.

月球玻璃还是保存月球表面水资源的重要容器. 长期以来, 研究者们都认为月球上是相当干燥的, 无论是月球内部还是表面都没有任何的水. 如前文所述, Apollo 月壤火山玻璃中水的发现使人们认识到月球内部是含有水的, 早期的月球可能含有和地球地幔一样丰富的水, 为研究月球的起源和演化带来了新认识[85,88]. 同时, Lucey 等[88–91] 还通过卫星遥感探测技术发现, 如今的月球表面可能也存在着水资源. 遥感光谱明确探测到了 2.8—3.0 μm 波段处的 OH/水的吸收峰, 进一步分析发现, 几乎在整个月球的表面都存在 OH/水的分布, 含量达到了 10—1000 ppm[89], 在一些常年温度很低的永久阴影区内甚至存在大量的冰, 质量比高达 5%[92]. 月球表面水的分布具有明显的纬度和温度依赖, 赤道附近温度高的地区含水量较低, 而高纬度地区和极地含水量较高, 同时含水量在一天之内周期性变化, 早晚时水量较高, 中午时水量较低[32,91,93]. 这一独特的分布特征使研究者们意识到, 太阳风中的 H 离子可能是表面水的重要来源, 白天太阳风中 H 离子注入到月壤颗粒中补充 OH/水, 同时在温度的作用下 OH/水会发生扩散, 导致释放和迁移, 最终产生了空间和时间上的独特分布. 那么太阳风中的 H 离子究竟是如何产生 OH/水, 这些水又是如何保存下来的呢? 最近, 关于 CE-5 月壤的研究发现, 颗粒表面的辐照损伤非晶层和玻璃珠是产生和保存这些水的关键. 研究者在多种矿物表面都发现了厚度几百纳米的辐照损伤层, 辐照损伤层的晶格被严重破坏, 产生了大量的缺陷和不同程度的非晶化, 这些损伤层中含有大量的水, 而且非晶化程度更高的损伤层含有更多的水[44,45]. 研究发现, 最表面辐照损伤层中的水含量可高达上万 ppm, 随后在辐照层的深度内迅速衰减, 仅有很少一部分能够保存在晶体中[44,45]. 这些研究说明非晶在产生和保存水中扮演着重要角色, 注入的 H 离子通常并

不能和结晶良好的晶体物质稳定结合而是很容易释放出去, 而缺陷和非晶区域则提供大量可以和 H 稳定结合的位点, 以更好地产生和保存 OH/水[68,94]. 更重要的是, 研究者发现月球玻璃珠远比矿物颗粒更能保存水资源, 堪称月球上的“水库”[12]. 如图 11(b) 所示, 不同于 Saal 等[23] 发现的火山玻璃水分内多外少的特征, CE-5 撞击玻璃球中的水表现出外多内少的特征, 并且具有和太阳风中一致的 H 同位素比例, 这说明它们含有的水主要是来自于太阳风辐照而非月球内部. 这些太阳风注入产生的水并不只是保存在最表面数百纳米的损伤层内[44,45], 而是向内伸了几十微米, 这说明相较于晶体, 水在玻璃珠中更容易扩散和保存在内部. 计算模拟显示, 表面的水在 1—15 年的短暂时间内就可以扩散到玻璃珠的内部, 并且可以在温度变化时迅速地释放和吸收, 在月球表面水循环中起到了重要作用. 据估计, 撞击玻璃珠的整体含水量为 132—1570 ppm, 而整个月球表面玻璃珠含水总量高达 2.7×10^{14} kg!

3.3 月球玻璃是月球的时钟

定年是研究月球起源和演化的关键. 定年可以确定月球的年龄, 月球上现在最古老的矿物给出的年龄是 46 亿年左右[17]. 其他任何方面演化的研究, 包括火山活动、水含量、磁场和陨石撞击等, 都需要可靠的时间标尺. 火山玻璃可以标定月球火山活动的时间, 对确定年龄的火山玻璃和矿物中的水含量进行探测则可以给出月球内部水含量的演化过程[23,37]. 撞击玻璃的年龄则对应于 46 亿年前至今超宽时间尺度上月球表面撞击事件的事件标尺. 对已知年龄的撞击玻璃的结构、成分和包含物等进行分析也就相应获得了月球当时大气、水和磁场等各种信息. 特别地, 月球没有类似地球的生物活动以及水和大气的风化, 使得从古至今的大量撞击痕迹得以以近乎原始的形态完好保存下来, 对撞击产

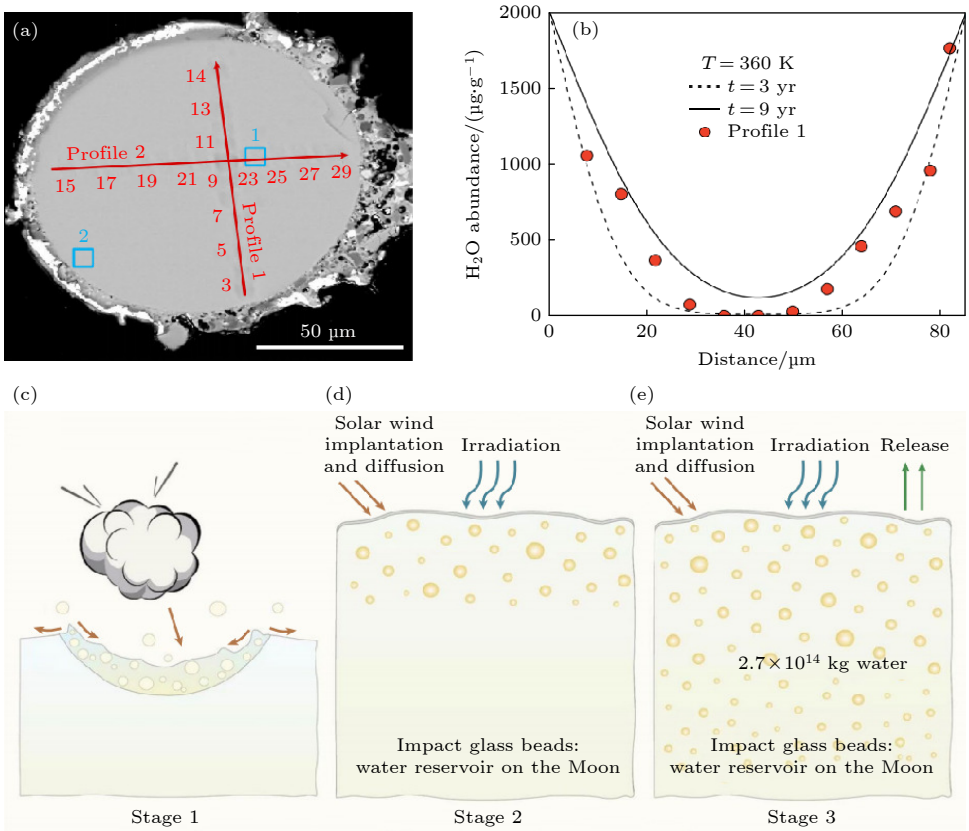

图 11 CE-5 月壤中撞击玻璃珠保存大量的水[12] (a) 撞击玻璃截面的 SEM 照片; (b) 撞击玻璃沿 (a) 中 Profile 1 路径不同位置的水含量, 呈现出表面水含量高内部水含量低的特征; (c)—(e) 撞击玻璃保存和释放太阳风 H 离子注入产生的水的示意图, 据估计, 月壤中撞击玻璃珠保存的水的总含量高达 2.7×10^{14} kg

Fig. 11. Abundance of water preserved in impact glass beads of CE-5 lunar soils: (a) SEM image of a cross-section of an impact glass bead; (b) water content at different positions along profile 1 of the impact glass as shown in (a), revealing higher surface water content compared to the interior; (c)–(e) schematic of the retention and release of water in the impact glass, it is estimated that the total water content preserved in impact glass beads in lunar soils can reach up to 2.7×10^{14} kg.

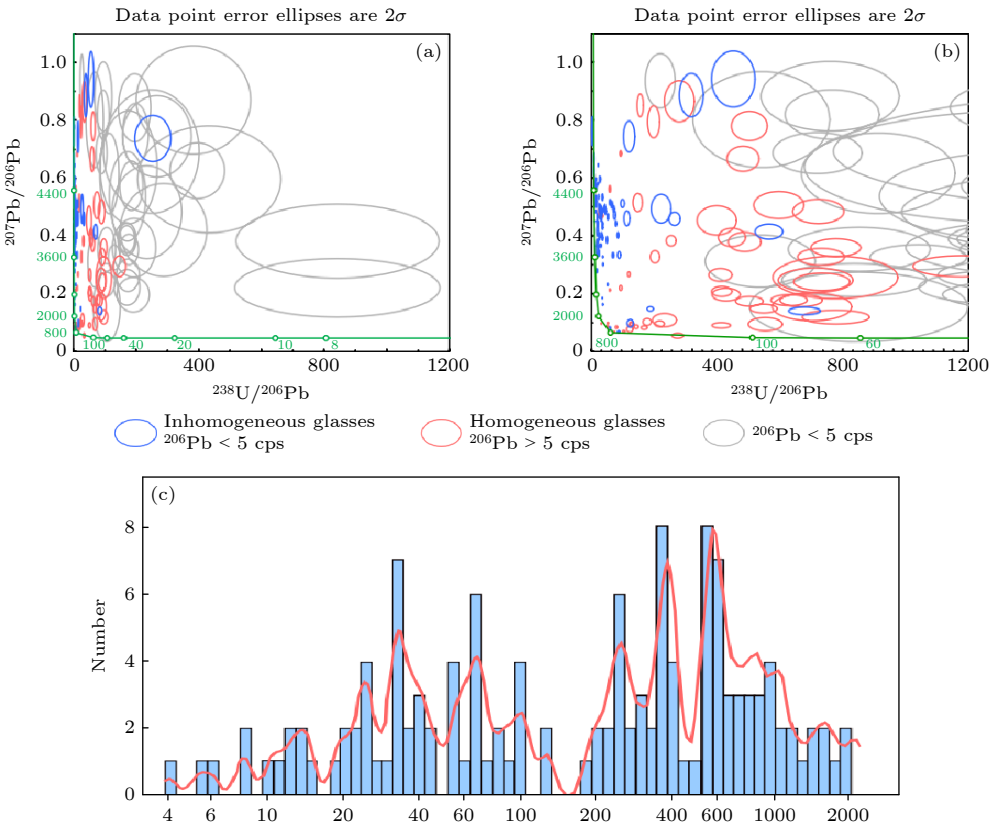

图 12 U-Pb 同位素定年方法测定 CE-5 撞击玻璃的年龄来重构 20 亿年来的撞击历史[10]

Fig. 12. U-Pb isotope dating method used to determine the age of impact glass in CE-5 soils to reconstruct the impact history over 2 billion years[10].

生的玻璃进行定年和统计就能够反映月球表面、整个地月系统甚至是太阳系内早期的撞击历史[28]. 因此, 月球玻璃可以说就像是月球上的时钟, 能够精确地为月球上的事件提供时间标尺.

目前, 物质定年使用的最常用的方法是放射性同位素定年. 当含有放射性同位素 (母体) 的物质形成之后, 母体的含量随时间以指数形式衰减, 衰变成稳定的同位素 (子体) 并积累在物质中. 每一种放射性同位素具有固定不变的衰变常数, 不受温度、压力和化学状态等的影响, 因此对于和外界环境没有母体和子体交换的封闭物质系统, 测定此时物质中母体和子体含量的比值就可以计算出物质形成的年代. 长期的研究发现, 最好的就是铀 (U) 衰变为铅 (Pb) 的体系. 中国科学院地质与地球物理研究所[38]和中国地质科学院地质研究所[40]的研究团队就分别采用 U-Pb 同位素体系定年的方法测定出 CE-5 月壤中玄武岩的年龄为 20 亿年, 将以往认识的月球上火山活动延长了 8 亿年. 中国地质科学院地质研究所的研究者[10]还采用 U-Pb 同位素体系定年的方法测定了 CE-5 月壤中 215 个撞击玻璃珠的年龄, 这些玻璃珠的年龄统计分布给出了采样地点 20 亿年前至今的陨石撞击历史 (图 12). 可以看出, 20 亿年来的陨石撞击并不是单调递减的, 而是出现了数个明显的峰值, 意味着当时陨石撞击频率的激增. 这些激增的陨石撞击和小行星带内多组撞击时间年龄相同, 有助于理解撞击对地月系统的改造作用, 比如一个有趣的发现是, 其中一个陨石撞击激增和恐龙灭绝的年代接近.

玻璃的放射性同位素定年利用的是玻璃形成时包含的放射性同位素含量的衰变减少, 而玻璃本身的亚稳态的本质也具有类似的衰变过程, 即结构弛豫或物理老化的过程[15,95]. 如图 13 所示, 由液体快速冷却形成的玻璃物质能量上处于亚稳定的高能量状态, 从能垒图的观点上来看, 此时玻璃被暂时冻结在某一能量较高的能谷中. 随后在特定的温度下, 玻璃内部的原子不断地朝着平衡状态发生结构弛豫, 导致体系不断地越过能谷的势垒并向更低的能谷弛豫, 导致体系能量不断降低并伴随着一系列物理性质的改变[95,96]. 松山湖材料实验室的研究团队[15]发现月球玻璃具有强的脆度和超高的稳定

性, 这意味着月球玻璃体系的能垒图是图 13(a) 中所示比较单调的, 月球玻璃可以在亿万年的时间尺度内稳定地朝着低能量状态弛豫, 最终有可能弛豫成为结构仍然无序但是能量和晶体一样低的理想玻璃状态. 大量研究表明, 玻璃的结构弛豫过程符合一个图 13(b) 中所示的扩展的指数关系 (KWW 方程), 在特定温度下, 体系的能量以及密度、等效黏度和模量等随时间的变化都可以用 KWW 方程来拟合[95]. 基于此, 未来有可能首先使用一些已知年龄的月球玻璃或模拟月壤制备的月球玻璃构造出一条月球玻璃长时间弛豫的主曲线, 之后对采集的月球玻璃进行物性测试, 并和主曲线比对, 就有可能估计出玻璃的年龄. 这样的方法简便易行而且便于使用透射电镜和微纳力学测试等成熟的实验手段进行微区分析, 值得进行进一步研究探索.

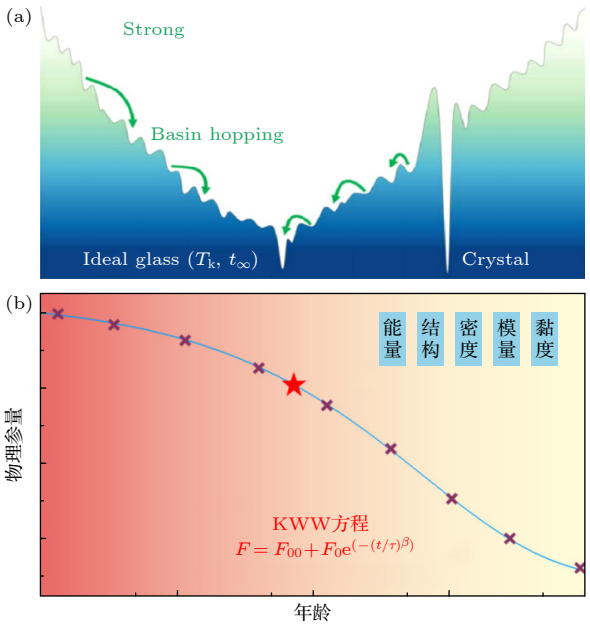

图 13 基于玻璃结构弛豫进行定年的构想图 (a) 玻璃能垒图示意图[15]; (b) 玻璃的能量、结构、密度和模量等随时间弛豫的示意图

Fig. 13. Schematic diagram of dating based on structural relaxation of glasses: (a) Illustration of the energy barrier diagram for strong glasses[15]; (b) schematic of the change of energy, structure, density, and modulus of glass over time.

参考文献

[1] Zhao R, Shen L Q, Xiao D D, Chang C, Huang Y, Yu J H, Zhang H P, Liu M, Zhao S F, Yao W, Lu Z, Sun B A, Bai H Y, Zou Z G, Yang M F, Wang W H 2023 *Natl. Sci. Rev.* nwad079

[2] 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 2022 *Natl. Sci. Rev.* **9** nwab188

[3] Yan P, Xiao Z Y, Wu Y H, Yang W, Li J H, Gu L X, Liao S Y, Yin Z J, Wang H, Tian H C, Zhang C, Wu S P, Ma H X, Tang X, Wu S T, Hui H J, Xu Y C, Hsu W B, Li Q L, Luo F L, Liu Y, Li X H 2022 *J. Geophys. Res. Planets* **127** e2022JE007260

[4] Yang W, Chen Y, Wang H, Tian H C, Hui H, Xiao Z Y, Wu S T, Zhang D, Zhou Q, Ma H X, Zhang C, Hu S, Li Q L, Lin Y T, Li X H, Wu F Y 2022 *Geochim. Cosmochim. Acta* **335** 183

[5] Gu L X, Chen Y J, Xu Y C, Tang X, Lin Y T, Noguchi T, Li J H 2022 *Geophys. Res. Lett.* **49** e2022GL097875

[6] Guo Z, Li C, Li Y, Wen Y Y, Tai K R, Li X Y, Liu J Z, Ouyang Z Y 2022 *Geophys. Res. Lett.* **49** e2021GL097323

[7] Li C, Guo Z, Li Y, Tai K R, Wei K X, Li X Y, Liu J Z, Ma W H 2022 *Nat. Astron.* **6** 1156

[8] Lu X J, Chen J, Ling Z, Liu C Q, Fu X H, Qiao L, Zhang J, Cao H J, Liu J Z, He Z P, Xu R 2022 *Nat. Astron.* **7** 142

[9] Xian H Y, Zhu J X, Yang Y P, Li S, Lin X J, Xi J X, Xing J Q, Wu X, Yang H M, Zhou Q, Tsuchiyama A, He H P, Xu Y G 2023 *Nat. Astron.* **7** 280

[10] Long T, Qian Y Q, Norman M D, Miljkovic K, Crow C, Head J W, Che X C, Tartèse R, Zellner N, Yu X F, Xie S W, Whitehouse M, Joy K H, Neal C R, Snape J F, Zhou G S, Liu S J, Yang C, Yang Z Q, Wang C, Xiao L, Liu D Y, Nemchin A 2022 *Sci. Adv.* **8** eabq2542

[11] Li A, Chen X, Song L J, Chen G X, Xu W, Huo J T, Gao M, Li M, Zhang L, Yao B N, Ji M, Zhang Y, Zhao S F, Yao W, Liu Y H, Wang J Q, Bai H Y, Zou Z G, Yang M F, Wang W H 2022 *Mater. Futures.* **1** 035101

[12] He H C, Ji J L, Zhang Y, Hu S, Lin Y T, Hui H J, Hao J L, Li R Y, Yang W, Tian H C, Zhang C, Anand M, Tartèse R, Gu L X, Li J H, Zhang D, Mao Q, Jia L H, Li X G, Chen Y, Zhang L, Ni H W, Wu S T, Wang H, Li Q L, He H Y, Li X H, Wu F Y 2023 *Nat. Geosci.* **16** 294

[13] Wang W H 2013 *Prog. Phys.* **33** 177 (in Chinese) [汪卫华 2013 物理学进展 **33** 177]

[14] Debenedetti P G, Stillinger F H 2001 *Nature* **410** 259

[15] Zhao Y, Shang B S, Zhang B, Tong X, Ke H B, Bai H Y, Wang W H 2022 *Sci. Adv.* **8** eabn3623

[16] Angell C A 1995 *Science* **267** 1924

[17] Heiken G H, Vaniman D T, French B M 1991 *Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon* (Cambridge: Cambridge University Press) pp1–721

[18] Bibring J P, Duraud J P, Durrieu L, Jouret C, Maurette M, Meunier R 1972 *Science* **175** 753

[19] Bibring J P, Langevin Y, Maurette M, Meunier R, Jouffrey B, Jouret C 1974 *Earth Planet. Sci. Lett.* **22** 205

[20] Nichols R H J, Hohenberg C M, Olinger C T 1994 *Geochim. Cosmochim. Acta* **58** 1031

[21] Tartèse R, Anand M, Gattacceca J, Joy K H, Mortimer J I, Pernet-Fisher J F, Russell S, Snape J F, Weiss B P 2019 *Space Sci. Rev.* **215** 54

[22] Zellner N E B 2019 *J. Geophys. Res. Planets* **124** 2686

[23] Saal A E, Hauri E H, Cascio M L, Van Orman J A, Rutherford M C, Cooper R F 2008 *Nature* **454** 192

[24] Delano J W, Livi K 1981 *Geochim. Cosmochim. Acta* **45** 2137

[25] Canup R M, Asphaug E 2001 *Nature* **412** 708

[26] Wetzel D T, Hauri E H, Saal A E, Rutherford M J 2015 *Nat. Geosci.* **8** 755

[27] Saal A E, Hauri E H 2021 *Sci. Adv.* **7** eabe4641

[28] Culler T S, Becker T A, Muller R A, Renne P R 2000 *Science*

287 1785
[29] Saal A E, Hauri E H, Van Orman J A, Rutherford M J 2013 *Science* **340** 1317
[30] Liu Y, Guan Y B, Zhang Y X, Rossman G R, Eiler J M, Taylor L A 2012 *Nat. Geosci.* **5** 779
[31] Bradley J P, Ishii H A, Gillis-Davis J J, Ciston J, Nielsen M H, Bechtel H A, Martin M C 2014 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **111** 1732
[32] Li S, Milliken R E 2017 *Sci. Adv.* **3** e1701471
[33] Pieters C M, Taylor L A, Noble S K, Keller L P, Hapke B, Morris R V, Allen C C, McKAY D S, Wentworth S 2000 *Meteorit. Planet. Sci.* **35** 1101
[34] Hapke B 2001 *J. Geophys. Res. Planets* **106** 10039
[35] Pieters C M, Noble S K 2016 *J. Geophys. Res. Planets* **121** 1865
[36] Noguchi T, Nakamura T, Kimura M, Zolensky M E, Tanaka M, Hashimoto T, Konno M, Nakato A, Ogami T, Fujimura A, Abe M, Yada T, Mukai T, Ueno M, Okada T, Shirai K, Ishibashi Y, Okazaki R 2011 *Science* **333** 1121
[37] Hu S, He H C, Ji J L, Lin Y T, Hui H J, Anand M, Tartèse R, Yan Y H, Hao J L, Li R Y, Gu L X, Guo Q, He H Y, Ouyang Z Y 2021 *Nature* **600** 49
[38] Li Q L, Zhou Q, Liu Y, Xiao Z Y, Lin Y T, Li J H, Ma H X, Tang G Q, Guo S, Tang X, Yuan J Y, Li J, Wu F Y, Ouyang Z Y, Li C L, Li X H 2021 *Nature* **600** 54
[39] Tian H C, Wang H, Chen Y, Yang W, Zhou Q, Zhang C, Lin H L, Huang C, Wu S T, Jia L H, Xu L, Zhang D, Li X G, Chang R, Yang Y H, Xie L W, Zhang D P, Zhang G L, Yang S H, Wu F Y 2021 *Nature* **600** 59
[40] Che X C, Nemchin A, Liu D Y, Long T, Wang C, Norman M D, Joy K H, Tartese R, Head J, Jolliff B, Snape J F, Neal C R, Whitehouse M J, Crow C, Benedix G, Jourdan F, Yang Z Q, Yang C, Liu J H, Xie S W, Bao Z M, Fan R L, Li D P, Li Z S, Webb S G 2021 *Science* **374** 887
[41] Cao H J, Wang C, Chen J, Che X C, Fu X H, Shi Y R, Liu D Y, Ling Z C, Qiao L, Lu X J, Qi X B, Yin C X, Liu P, Liu C Q, Xin Y Q, Liu J Z 2022 *Geophys. Res. Lett.* **49** e2022GL099282
[42] Zhang H, Zhang X, Zhang G, Dong K Q, Deng X J, Gao X S, Yang Y D, Xiao Y, Bai X, Liang K X, Liu Y W, Ma W B, Zhao S F, Zhang C, Zhang X J, Song J, Yao W, Chen H, Wang W H, Zou Z G, Yang M F 2022 *Sci. China: Phys., Mech. Astron.* **65** 229511
[43] Liu J J, Liu B, Ren X, Li C L, Shu R, Guo L, Yu S Z, Zhou Q, Liu D W, Zeng X G, Gao X Y, Zhang G L, Yan W, Zhang H B, Jia L H, Jin S F, Xu C H, Deng X J, Xie J F, Yang J F, Huang C N, Zuo W, Su Y, Wen W B, Ouyang Z Y 2022 *Nat. Commun.* **13** 3119
[44] Zhou C J, Tang H, Li X Y, Zeng X J, Mo B, Yu W, Wu Y X, Zeng X D, Liu J Z, Wen Y Y 2022 *Nat. Commun.* **13** 5336
[45] Xu Y C, Tian H C, Zhang C, Chaussidon M, Lin Y T, Hao J L, Li R Y, Gu L X, Yang W, Huang L Y, Du J, Yang Y Z, Liu Y, He H Y, Zou Y L, Li X H, Wu F Y 2022 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **119** e2214395119
[46] Mueller G, Hinsch G W 1970 *Nature* **228** 254
[47] Chernyak Y B, Nussinov M D 1976 *Nature* **261** 664
[48] Pugh M J 1972 *Nature* **237** 158
[49] Bastin J A 1980 *Nature* **283** 108
[50] Delano J W 1986 *J. Geophys. Res. Solid Earth* **91** 201
[51] Zeigler R A, Korotev R L, Jolliff B L, Haskin L A, Floss C 2006 *Geochim. Cosmochim. Acta* **70** 6050
[52] Tsuchiyama A, Sakurama T, Nakano T, Uesugi K, Ohtake M, Matsushima T, Terakado K, Galimov E M 2022 *Earth Planets Space* **74** 172
[53] Yan W, Richard I, Kurtuldu G, James N D, Schiavone G, Squair J W, Nguyen - Dang T, Das Gupta T, Qu Y, Cao J D, Ignatans R, Lacour S P, Tileli V, Courtine G, Löffler J F, Sorin F 2020 *Nat. Nanotechnol.* **15** 875
[54] Naser M Z 2019 *Prog. Mater. Sci.* **105** 100577
[55] Guo Z S, Xing D, Xi X Y, Yue X, Liang C G, Hao B, Zheng Q B, Gutnikov S I, Lazoryak B I, Ma P C 2022 *Adv. Fiber. Mater.* **4** 923
[56] Housley R M, Grant R W, Paton N E 1973 *Geochim. Cosmoschim. Acta* **3** 2737
[57] Nakamura E, Makishima A, Moriguti T, Kobayashi K, Tanaka R, Kunihiro T, Tsujimori T, Sakaguchi C, Kitagawa H, Ota T, Yachi Y, Yada T, Abe M, Fujimura A, Ueno M, Mukai T, Yoshikawa M, Kawaguchi J I 2012 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **109** E624
[58] Hörz F, Brownlee D E, Fechtig H, Hartung J B, Morrison D A, Neukum G, Schneider E, Vedder J F, Gault D E 1975 *Planet. Space Sci.* **23** 151
[59] Morrison D A, Clanton U S 1979 *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* **10** 1649
[60] Pieters C M, Ammannito E, Blewett D T, Denevi B W, De Sanctis M C, Gaffey M J, Le Corre L, Li J Y, Marchi S, McCord T B, McFadden L A, Mittlefehldt D W, Nathues A, Palmer E, Reddy V, Raymond C A, Russell C T 2012 *Nature* **491** 79
[61] Matsumoto T, Hasegawa S, Nakao S, Sakai M, Yurimoto H 2018 *Icarus* **303** 22
[62] Keller L P, McKay D S 1997 *Geochim. Cosmochim. Acta* **61** 2331
[63] Sasaki S, Nakamura K, Hamabe Y, Kurahashi E, Hiroi T 2001 *Nature* **410** 555
[64] Keller L P, McKay D S 1993 *Science* **261** 1305
[65] Hapke B, Cassidy W, Wells E 1975 *The Moon* **13** 339
[66] Taylor L A, Pieters C, Keller L P, Morris R V, McKAY D S, Patchen A, Wentworth S 2001 *Meteorit. Planet. Sci.* **36** 285
[67] Weber I, Stojic A N, Morlok A, Reitze M P, Markus K, Hiesinger H, Pavlov S G, Wirth R, Schreiber A, Sohn M, Hübers H W, Helbert J 2020 *Earth Planet. Sci. Lett.* **530** 115884
[68] McCord T B, Taylor L A, Combe J P, Kramer G, Pieters C M, Sunshine J M, Clark R N 2011 *J. Geophys. Res. Planets* **116** E00G05
[69] Jia M N, Yue Z Y, Di K C, Liu B, Liu J Z, Michael G 2020 *Earth Planet. Sci. Lett.* **541** 116272
[70] Yang Y Z, Li S, Zhu M H, Liu Y, Wu B, Du J, Fa W Z, Xu R, He Z P, Wang C, Xue B, Yang J F, Zou Y L 2022 *Nat. Astron.* **6** 207
[71] Barnes J J, Kring D A, Tartese R, Franchi I A, Anand M, Russell S S 2016 *Nat. Commun.* **7** 11684
[72] Le Bars M, Wieczorek M A, Karatekin Ö, Cébron D, Laneuville M 2011 *Nature* **479** 215
[73] Chapman C R 2004 *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **32** 539
[74] Lucey P G, Riner M A 2011 *Icarus* **212** 451
[75] Hiroi T, Abe M, Kitazato K, Abe S, Clark B E, Sasaki S, Ishiguro M, Barnouin-Jha O S 2006 *Nature* **443** 56
[76] Vernazza P, Binzel R P, Rossi A, Fulchignoni M, Birlan M 2009 *Nature* **458** 993
[77] Tai Udovicic C J, Costello E S, Ghent R R, Edwards C S 2021 *Geophys. Res. Lett.* **48** e2020GL092198
[78] Bindi L, Shim S H, Sharp T G, Xie X D 2020 *Sci. Adv.* **6** eaay7893
[79] Guo Z, Li Y, Liu S, Xu H F, Xie Z D, Li S J, Li X Y, Lin Y

T, Coulson I M, Zhang M M 2020 *Geochim. Cosmochim. Acta* **272** 276
[80] Guo Z, Li Y, Chen H Y, Zhang M M, Wu Y X, Hui B, Liu S, Coulson I M, Li S J, Li X Y, Liu J Z, Ouyang Z Y 2021 *J. Geophys. Res. Planets* **126** e2020JE006816
[81] Asimow P D, Langmuir C H 2003 *Nature* **421** 815
[82] Lin Y H, Tronche E J, Steenstra E S, van Westrenen W 2017 *Nat. Geosci.* **10** 14
[83] Hirth G, Kohlstedt D L 1996 *Earth Planet. Sci. Lett.* **144** 93
[84] Gaetani G A, Grove T L 1998 *Contrib. Mineral. Petr.* **131** 323
[85] Chaussidon M 2008 *Nature* **454** 171
[86] Wittenberg L J, Santarius J F, Kulcinski G L 1986 *Fusion Technol.* **10** 167
[87] Starukhina L V 2006 *Adv. Space Res.* **37** 50
[88] Lucey P G 2009 *Science* **326** 531
[89] Clark R N 2009 *Science* **326** 562
[90] Pieters C M, Goswami J N, Clark R N, et al. 2009 *Science* **326** 568
[91] Sunshine J M, Farnham T L, Feaga L M, Groussin O, Merlin F, Milliken R E, A'Hearn M F 2009 *Science* **326** 565
[92] Colaprete A, Schultz P, Heldmann J, et al. 2010 *Science* **330** 463
[93] Woehler C, Grumpe A, Berezhnoy A A, Shevchenko V V 2017 *Sci. Adv.* **3** e1701286
[94] Farrell W M, Hurley D M, Zimmerman M I 2015 *Icarus* **255** 116
[95] Wang W H 2019 *Prog. Mater. Sci.* **106** 100561
[96] Zhao J, Simon S L, McKenna G B 2013 *Nat. Commun.* **4** 1783

The 90th Anniversary of *Acta Physica Sinica*

Lunar glass*

Zhao Rui [1)] Shen Lai-Quan [1)] Chang Chao [1)]
Bai Hai-Yang [1)2)] Wang Wei-Hua [1)2)†]

1) (*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*)
2) (*Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan* 523808, *China*)

(Received 31 July 2023; revised manuscript received 22 August 2023)

Abstract

Lunar glass, a significant component of lunar soil, is produced by non-equilibrium processes on the moon, such as volcanic eruptions, meteorite impacts, solar wind, and cosmic radiation. Lunar glass of different origins has ability to record historical information of the formation and evolution of the moon. This article presents a comprehensive review of the research progress of lunar glasses found within the CE-5 lunar soil. Delving into their fundamental physical properties and microstructure, we explore the specific mechanisms behind the formation of lunar glasses. Furthermore, this article focuses on the various roles that lunar glasses play in studies of lunar evolution, such as acting as a "natural camera" that captures the moon's internal and surface changes over different epochs, encompassing lunar origin, magma activity, impact events, space weathering, and the origin of water. The ultra-stable lunar glass with disordered atomic structure can sustainably preserve lunar resources. It is estimated that lunar glasses have reserved approximately 260000 tons of ^{3}He, and 27 billion tons of water. Moreover, lunar glasses serve as an invaluable lunar chronometer, providing a reliable temporal framework to data volcanic activity and impact events. This temporal framework, in turn, serves as a vital tool for investigating the evolution of lunar water, magnetic fields and reconstructing the extensive billion-year history of lunar impacts.

Keywords: glasses, lunar glasses, China's Chang'E-5 (CE-5) mission

PACS: 61.43.–j, 61.43.Fs **DOI:** 10.7498/aps.72.20231238

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52192600, 61888102), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB30000000), and the Major Project of Basic and Applied Basic Research of Guangdong Province, China (Grant No. 2019B030302010).

† Corresponding author. E-mail: whw@iphy.ac.cn

物理学报 Acta Physica Sinica
Chinese Physical Society
Institute of Physics, CAS

月球玻璃

赵睿 沈来权 常超 白海洋 汪卫华

Lunar glass

Zhao Rui Shen Lai-Quan Chang Chao Bai Hai-Yang Wang Wei-Hua

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 72, 236101 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20231238
在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.72.20231238
当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

“嫦娥5号”登陆候选地Mons R ü mker的光照与温度特征分析
Illumination and temperature analysis for CE-5 candidate landing site Mons R ü mker
物理学报. 2020, 69(11): 119601 https://doi.org/10.7498/aps.69.20200114

月尘被动防护技术的最新研究进展
State-of-the-art passive protection technologies of lunar dust
物理学报. 2021, 70(6): 060501 https://doi.org/10.7498/aps.70.20201517

S取代Se对$Ge_{11.5}As_{24}Se_{64.5x}S_x$玻璃结构及光学性质的影响
Effect of substitution of S for Se on structure and physical properties in $Ge_{11.5}As_{24}Se_{64.5x}S_x$ glass
物理学报. 2021, 70(16): 167101 https://doi.org/10.7498/aps.70.20210536

氧化物玻璃中的类分子结构单元
Molecule-like structural units in silicate-glass-forming oxides
物理学报. 2020, 69(13): 136101 https://doi.org/10.7498/aps.69.20191892

2 μm波段硫系玻璃微球激光器的制备和表征
Fabrication and characterization of chalcogenide glass microsphere lasers operating at 2 μm
物理学报. 2019, 68(6): 064209 https://doi.org/10.7498/aps.68.20181817

高激光损伤阈值Ge-As-S硫系玻璃光纤及中红外超连续谱产生
Ge-As-S chalcogenide glass fiber with high laser damage threshold and mid-infrared supercontinuum generation
物理学报. 2021, 70(4): 047801 https://doi.org/10.7498/aps.70.20201324