

月球玻璃*

赵睿¹ 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)

Lunar glasses

ZHAO Rui¹ WANG Wei-Hua^{1,2,†}

(1 Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, China)

2022-08-30收到

† email: whw@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20221002

摘要 玻璃是月壤的重要组成部分,由月球上火山喷发、陨石撞击和太阳风及宇宙高能射线辐照等一系列非平衡过程产生。玻璃可以在月球严苛的环境中长时间稳定存在,就像一帧帧的摄影快照一样记录着月球亿万年间的重要历史信息,涉及到月球的起源与演化、月球上水和气体的来源与分布、太阳系内的撞击历史和太空风化等重大科学问题。玻璃还能够长期保存各种月球物质,如太阳风注入的³He、反应生成的水和纳米铁等,影响着月球资源的利用和遥感观测。文章通过对嫦娥五号月壤玻璃的研究,阐述了各种月球玻璃的特征和形成机制,以及不同玻璃可能记录的月球历史信息。月球玻璃的研究也将为未来的星际探索提供宝贵的知识,并且帮助人们设计和制备新型的玻璃材料。

关键词 玻璃, 月球玻璃, 嫦娥五号

Abstract Glass is an important component of lunar soil produced by a series of non-equilibrium processes on the Moon, including volcanic eruptions, meteorite impacts, and solar wind and cosmic ray irradiations. Glasses can exist stably for a long geologic time in the Moon's harsh environment. They can therefore act as snapshots of their formation processes to record billions of years of historical information of the Moon, concerning the formation and evolution of the Moon, the source and distribution of lunar water/gases, the impact history of our solar system and the space weathering. Glasses can also preserve various lunar materials for an extremely long time, such as ³He implanted by solar wind, reaction-generated water and nanophase iron particles, which affect the utilization of lunar resources and remote-sensing observations. Based on detailed studies of diverse glasses in Chang'e-5 lunar samples, this paper describes the characteristics and formation mechanisms of various lunar glasses, and the unique role of each kind of glasses in recording the Moon's history. The studies of lunar glasses could also provide valuable insights into future interstellar exploration, as well as the design and preparation of novel glass materials.

Keywords glasses, Lunar glasses, Chang'e-5

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2015CB856800)资助项目, 国家基金委重大项目和基础中心项目(批准号: 11790291, 61888102), 中国科学院战略性先导科技专项(批准号: XDB30000000), 广东省重大基础和应用基础项目(批准号: 2019B030302010)

1 月球玻璃

2020年12月17日,中国嫦娥五号(Chang'e-5,简称CE5)成功采集返回1731 g珍贵的月球土壤,是人类继美国和前苏联探月任务之后40多年来首次获得的月球样品。在所有采回的月球样品中,都发现了丰富的玻璃物质,如图1所示,它们尺寸不一,形态各异,有的直径不到一个微米,有的可以达到几个厘米,有的呈现为张牙舞爪的熔渣状,有的则是圆润的玻璃球,有的还会因为混入不同的氧化物而呈现出绿色、黄色、褐色、红色和黑色等晶莹剔透的颜色^[1-4]。这些玻璃物质已经在月球严酷的环境下存在了亿万年。

玻璃在我们的生活中无处不在,从透明的建筑玻璃,到颜色艳丽的艺术玻璃,再到广泛使用的各种电子玻璃,人们通常认为玻璃是一种精巧的人造产物。因此人们惊叹于这些古老月球玻璃的奇特、稳定和美丽,也好奇月壤中为什么会含有大量玻璃物质。其实,玻璃不仅是重要的人造材料,更是自然界中普遍存在的天然物质^[5]。比如地球上的火山活动、陨石撞击、雷击等过程也可以形成大量的天然玻璃。地球上最古老的天然玻璃可追溯至中生代的撞击玻璃,大部分人工和天然玻璃会在较短的地质时间尺度发生脱玻化,蜕变为粘土和其他类型的矿物。玻璃其实可以由

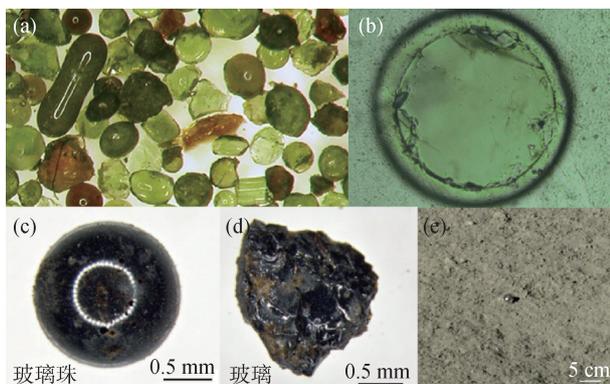


图1 月球上各种各样的玻璃物质 (a) Apollo 15号采集的颜色多样、形状各异的月球火山玻璃和撞击玻璃^[1]; (b) Apollo 16号采集的月球撞击玻璃球^[2]; (c) CE5月壤中的黑色玻璃珠^[3]; (d) CE5月壤中的黑色玻璃碎片^[3]; (e) 玉兔2号月球车在月球背面观察到的透明玻璃球,直径达到2.5 cm^[4]

各种非平衡的物理和化学过程产生,如当液体冷却得足够快的时候,就能够抑制晶化,直接产生结构和液体一样无序的玻璃固体,气相沉积、机械作用和离子辐照等过程也可以产生玻璃物质^[6]。

和生机勃勃的地球相比,月球上的环境非常严酷死寂,由于缺少大气和磁场的保护,月球表面直接暴露在了宇宙太空环境中,火山喷发、陨石撞击、太阳风和宇宙射线辐照等一系列严苛的非平衡过程主宰着月球的演化^[7]。火山喷发会产生大量细小的熔体液滴,抛洒在月球表面,这些液滴快速冷却就会形成结构均匀的玻璃球即火山玻璃^[8]。月球自诞生之日起,就不断遭受太阳系内各种陨石的撞击。月球表面陨石速度通常可达15—25 km/s,产生的高温足以熔化月球上的任何一种矿物甚至产生气化^[7]。由于陨石的尺寸分布极宽(直径从亚微米到上千米),陨石撞击会在不同尺度上造成熔融。较大陨石的撞击会产生大量熔体并使液滴飞溅出去,并在飞行过程中冷却形成玻璃颗粒即撞击玻璃^[9];而较小的撞击则更多的是在小尺度甚至是月壤颗粒的表面产生熔化,将月壤中的多个岩石碎片粘结在一起成为胶结物玻璃,或者产生粘在颗粒表面的粘结玻璃^[7]。太阳风辐照是月面上的重要过程,太阳风主要是由高速的H和He带电粒子组成,这些粒子会注入到月壤颗粒中,形成非晶态的表面损伤层^[10-12]。太阳风离子还会产生溅射作用,和撞击气化产生的气体一样沉积在颗粒的表面,形成包覆在月壤颗粒表面的沉积非晶层^[13-15]。月球上的这些非平衡过程在月球的演化过程中扮演着重要的角色,可以说我们对月球的研究很大程度上就依赖对这些过程的理解,涉及到月球的起源^[16, 17],内部岩浆的演化^[18],撞击历史^[19],水和气体的分布与来源^[20-23],以及太空风化^[24-26]等诸多重要问题。然而这些过程发生在长达数十亿年的时间尺度和月球表面广袤的空间尺度上,对于研究人员是一项重大的挑战。幸运的是,这些过程所产生的各种玻璃物质以其无与伦比的稳定性,几十亿年以来在月球环境中保存了和这些过程相关的岩浆物质、陨石碎片、挥发分(古时月球上的水、气和物质)和太阳风气体等,并相应地记录了玻璃的形成过

程，类似地球上的琥珀。对这些月壤玻璃的研究可以获得从月球内部到表面再到太空环境的重要信息。可以说月球玻璃既是重要的月球资源，也是帮助我们重构月球演化历史的载体。通过解密不同月壤玻璃记录的信息，还能启发我们如何利用月球资源，帮助我们制备超稳定的玻璃材料，用于未来的星际探索和高技术领域。

2 嫦娥五号月壤玻璃

CE5月壤的采样地点在月球“风暴洋”北部吕姆克山脉附近，经纬度为 51.916°W ， 43.058°N ^[3]。图2(a)的月球地图标记了历次月球探测任务采集月壤的地点，以往的采样地点都在月球赤道附近，其连线区域只覆盖月球赤道附近约4.4%的区域^[27]，而CE5月壤采集自月球中高纬度，是迄今为止纬度最高的月壤。初步表征发现，CE5样品已经被充分风化为极细的颗粒，其玻璃含量为11.6%—20.0%，明显低于Apollo样品(25.4%—72.3%)，表明其太空环境与Apollo采样地点存在明显的差异^[3, 27, 28]。由中国科学家领衔的研究团队对CE5月壤样品进行了深入的研究，取得了一系列重大研究成果。Apollo和Luna任务返回的月球样本主要揭示了月球上38—30亿年前的火山活动，而中国科学家使用铀铅定年技术准确测定CE5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^[29, 30]。CE5月壤的研究还发现采样地点的月幔非常干，水含量并不像Apollo月球样品研究给出的那样高，意味着月球内部的水的空间分布非常不均匀^[31]。对月壤的拉曼光谱研究则表明虽然月球内部很干，

但是月壤中却含有较多的水，主要来源是空间风化^[32]。这些研究凸显了CE5月壤在月球研究中的重大价值，对CE5月壤的深入研究将极大地突破我们认识月球的时间和空间边界^[29—33]。

鉴于CE5月壤的独特性，对其中的玻璃物质进行系统而深入的研究能帮助我们认识月球从内部到表面的火山喷发、陨石撞击和太空风化等各种过程。我们对CE5月壤中的玻璃进行了全面的收集、分类和显微研究^[34]，澄清了它们的形成机制，并讨论了不同起源的玻璃物质记录的不同月球活动的信息，比如火山玻璃和撞击玻璃分别记录了月球内部的演化和月球表面撞击作用的历史。研究发现月壤中存在多种形态的玻璃态物质，具有不同的特性和起源。其中的撞击玻璃具有超高的热稳定性和优异的抗辐照性能，是记录月球亿万历史的重要载体^[35]。月壤玻璃还能保存各种月球物质和太阳风物质。比如玻璃物质能够保存重要的战略能源资源³He，总量估计可达26万吨^[36]；火山玻璃还能够保存远古时代月球上的水，使我们认识到月球曾经是有水的。下面我们将分门别类地介绍月壤样品中的各种玻璃物质及其形成机理，并讨论每种玻璃可能记录的特定的月球演化历史信息。

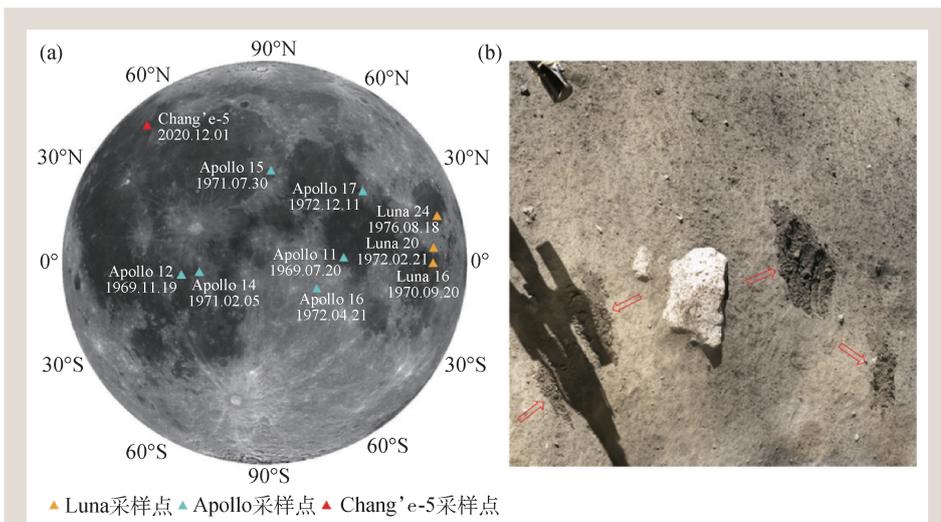


图2 CE5月壤的采样地点 (a) CE5采样地点的位置。以往的月壤采集都集中在赤道附近，纬度 30° 以内的低纬度地区，而CE5采样地点为中高纬度地区，是迄今为止采集到的最高纬度的月壤；(b) CE5与月壤采样地点的全景照片。图片引用自中国月球和行星数据发布系统 <https://moon.bao.ac.cn/>和参考文献[3]

3 月球上的各种玻璃物质

3.1 火山玻璃

月球火山玻璃是由月球火山喷发出来的微小液滴快速冷却形成的玻璃颗粒。月球火山喷发的时候在流淌出大量岩浆的同时,还会由于气体的脱熔剧烈释放,产生熔岩喷泉,将熔化的岩浆分散为大量细小的液珠。这些细小的液珠快速冷却会形成包含有玻璃颗粒的火山碎屑。喷发在月球真空环境中的火山物质可以扩散很远,覆盖广阔的区域,因此火山玻璃在月球上分布非常广泛。这些火山液珠在表面张力的作用下会在飞行过程中倾向于形成球形,最终冷却为大小不一的玻璃颗粒,其尺寸在1 mm以下,且大多小于300 μm ^[4, 37]。火山玻璃和撞击玻璃都是熔化液体快速冷却形成的,都可能形成球状颗粒,因此无法仅从形状判断是火山玻璃还是撞击玻璃。研究人员基于对Apollo月壤样品的研究提出了火山玻璃区别于撞击玻璃的6项特征^[8, 37, 38]: (1)通常没有不均一的包裹体; (2)非挥发性的化学成分分布更加均匀; (3)主要元素的含量具有高度聚类特征; (4)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; (6)表面的挥发分含量更高。作者所在的团队对CE5中大量的玻璃颗粒进行了结构和成分的分析,发现它们大部分都是撞击玻璃,火山玻璃很少^[34]。

月球在距今约40亿至20亿年时间内经历过多次剧烈的火山喷发过程,火山喷发产生的火山玻璃具有和火山活动一样的年龄,记录着月球内部不同时期不同地点的重要信息,涉及到对月球起源和岩浆活动等重大问题的认识。火山玻璃所保存的最关键的信息之一就是各种挥发分,包括 H_2O , C, S和Cl等^[18, 20, 21, 39]。主流的观点认为月球起源于原始地球形成过程中的一次大撞击^[16],因此人们长期认为月球上的水等各种挥发分已经被撞击导致的高温环境耗竭,但是2008年报道了月球火山玻璃中水的发现,颠覆了人们对于一个

干的月球的长期认识^[17, 20],引发了人们对于月球起源和月球内部水的来源的研究。之后人们利用同位素分析的手段,发现月球火山玻璃中的水和地球内部的水具有难以分辨的同位素成分,且都和碳质球粒陨石中水的同位素成分近似,说明月球和地球内部的水可能都来自于宇宙陨石^[21]。近期卫星探测的结果发现月球内部现在仍然在释放大量的碳,释放量远大于陨石撞击、太阳风注入等外部补充的碳含量,意味着月球内部可能含有大量原生的碳物质,而且空间扫描发现年轻的平原地区可能含有更多的碳^[17]。本次采集的CE5月壤恰好是来自这样的地区,是迄今为止人类获得的最年轻的火山岩(20亿年左右)^[29],未来对其中火山玻璃的发掘和成分探测,也许会帮助我们进一步认识月球中水和碳等关键挥发分的分布和起源,甚至揭示地球中水和碳等生命所必需的元素

3.2 撞击玻璃

撞击玻璃是由陨石高速撞击月球表面,熔化物质飞溅出来的熔融液珠在飞行过程中快速冷却形成的玻璃颗粒。Apollo月壤样品中,撞击玻璃大概占据了月壤的3%—5%,在1 g月壤中会有数百个大小不等的撞击玻璃颗粒,其尺寸分布在几十纳米到几个厘米之间,最近我国的玉兔2号月球车还在月球背面发现了透明的撞击玻璃球,直径可达2.5 cm^[4, 7]。撞击玻璃比火山玻璃表现出更大的结构和成分不均匀性,大于1 mm的撞击玻璃通常还会保存有各种月球矿石或陨石的碎片^[9]。撞击玻璃的形状由撞击产生的熔体粘度、熔体表面张力、溅射冲击力和液滴旋转导致的离心力共同决定^[40]。在CE5月壤样品中发现了大量旋转形状的撞击颗粒,涵盖了球形、椭球形、哑铃形和泪滴形等多种形态(图3)。这是因为撞击产生的液滴会在飞溅出来时发生旋转,产生离心力将球状液滴拉长,形成椭球及哑铃形等各种拉伸形状^[41—43]。我们对CE5月壤中的上百个撞击玻璃进行了成分分析,发现其主要成分呈现出明显的聚

类特征，并且和月壤样品的平均成分类似，说明这些撞击玻璃是由陨石撞击到表层月壤上熔化冷却形成的，而非来源于某类特定的月球矿物^[9]。

撞击是月球表面最活跃的地质活动，对于月球的演化具有重要的影响^[7, 9, 44]。这些高能量的撞击塑造了月球现在“千疮百孔”布满撞击坑的表面^[45, 46]。大小各异的陨石持续地破坏着表面的岩石，在不同尺度上不停地破碎、研磨、搅拌、翻腾和熔化岩石，最终创造了可以厚达几米的月壤^[7]。来自太阳系的陨石有时候还会含有H₂O、C和S等挥发分，可能是月球表面水等物质的重要来源^[21, 47]。地球和月球同属于一个引力体系，在远古时期落在月球上的陨石也很可能会落在地球上，给地球带来了H₂O、C和有机物，最终导致了生命的诞生^[21, 39, 48]。地球上存在着持续的地质变迁、生物活动以及水和大气的风化，很多远古的撞击已经无迹可寻^[44]。而月球上相对沉寂的环境则使这些撞击痕迹得以保存，这些保存完好的撞击实际上也是整个太阳系内撞击历史的反映^[19]。因此月球上的撞击不仅对月球研究意义重大，对于重现太阳系内撞击历史和理解地球生命的起源同样十分重要^[9, 44]。

尽管撞击坑是月球上撞击最直接的证据，但是对于撞击环境和历史的深入研究则高度依赖于撞击产生的各种玻璃^[9, 19, 44]。例如，从撞击玻璃的形态、结构和含量出发，我们可以了解月球上不同地区的撞击环境如撞击的频率和强度等^[9]。撞击产生的炙热熔浆还有一定的几率包裹住陨石或者月球矿物的碎片，并形成玻璃，这样撞击玻璃将以无与伦比的超稳定性保存这些远古的物质，成为研究陨石运输的太空物质的绝佳样品。进一步还可以测定撞击玻璃的年龄，大量撞击玻璃的年龄分布就可以帮助粗略重构出月球表面或者说太阳系内撞击通量的时间分布^[9, 19]。如果在某个年代附近撞击玻璃数量明显比较高，就说明这个时期月球表面受到的太阳系内撞击很多。从撞击玻璃给出的太阳系内撞击历史图

像中，可以研究超长时间尺度内太阳系的演化，也可以去关注某个具体时期，比如地球生命起源的时期太阳系内的撞击环境，从而研究陨石撞击和生命起源的潜在联系。现在测定撞击玻璃的年龄通常使用同位素方法，对样品的要求较高，而实际上玻璃本身就表现出对历史的记忆效应，相似条件产生的玻璃物质，在经过不同时间的弛豫(老化)之后，其能量和结构也会发生对应的变化，根据老化时间和结构的对应关系，也有可能在未来发展出一套新的测定玻璃年代的方法^[49-51]。

月球火山和撞击玻璃能够保存远古物质、记录月球信息的先决条件是玻璃能够在月球环境中长期稳定存在。月球上的火山喷发和随机的撞击等过程会产生各种不同成分和结构的玻璃颗粒。松山湖材料实验室的月壤研究团队发现CE5月球玻璃具有超高的稳定性^[35]。CE5月壤中形成于几千万年前的撞击玻璃球在月球表面陨石撞击、冷热循环和太空辐照等恶劣环境下能够稳定存在至今，说明这些玻璃球不仅具备优异的热稳定性，还具有良好的抗太空辐照性能。对月壤的热力学测试和玻璃热力学特征参数的计算^[52]进一步解释了月球玻璃超稳定性的物理起源。月壤中年龄高达几十亿年的超稳定玻璃或许是人类现在所能获得到的最古老的玻璃，这些远古的玻璃不仅对认识月球历史至关重要，也为未来星际探索必要的防太空辐照材料，以及核废料存储玻璃等材料的设计提供了重要参考。

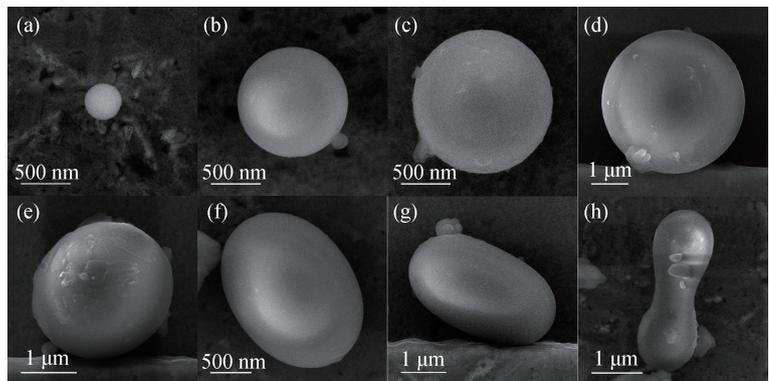


图3 CE5月壤中玻璃颗粒的扫描电镜照片 (a)作者所在团队申请到的CE5月壤样品的照片；(b)–(d)圆润的球形玻璃颗粒；(e)–(h)从球形到椭球再到哑铃状等具有旋转形状的撞击玻璃颗粒

3.3 胶结物玻璃

胶结物玻璃是由撞击产生的熔体粘结着月球岩石碎屑形成熔渣状固体。胶结物是月壤中独特而重要的组成部分，平均可以占到月壤的30%。在Apollo月壤中，其比例最高可达65%^[7, 23]，CE5月壤中含有大约16%的胶结物^[32]。月球表面较小的陨石包括大量小于1 mm的微陨石撞击会在小尺度范围内甚至在岩石碎片的表面产生熔化，这些局部熔化的物质会把周围细小的岩石碎屑粘在一起，最终熔化的物质冷却成为玻璃和粘着的碎屑一起形成胶结物^[7]。与月球上的其他玻璃和矿物颗粒相比，胶结物玻璃具有三个独特的特征^[7]：(1)呈现出多孔的熔渣状；(2)含有大量的纳米铁颗粒；(3)含有大量的太阳风物质，主要是H和He。

图4(a)是一张典型的胶结物的光镜照片^[28]，图4(b)是CE5月壤中胶结物玻璃切片后的扫描电镜照片，显示了其内部的多孔结构。胶结物玻璃的表层附近通常嵌有大量尺寸在3—5 nm的纳米铁颗粒，而在接近内部的玻璃基底内则离散地分布着具有更大直径的纳米铁颗粒，可达30—50 nm。这些大量存在的纳米铁会显著影响物质的光谱特征，小的纳米铁会产生发暗和发红的效果，而较大的纳米铁则主要导致发暗^[24, 26]。胶结物是由微陨石撞击风化的月壤产生，而已经风化的细小的月壤颗粒经过太阳风辐照会被注入太阳风物

质(主要是H和He)，撞击熔化的过程中会释放一部分氢气和氦气，导致在粘稠的熔体中产生气泡^[53, 54]。同时，熔化和升温也会促进注入的H和月壤中的氧化亚铁反应，生成单质纳米铁和水，一部分水会汽化，另一部分则会保存在玻璃中，生成的纳米铁则会嵌入在胶结物玻璃中^[23, 24, 54, 55]。虽然月壤中的所有颗粒都暴露在太阳风中，但是胶结物玻璃中的太阳风物质往往更多^[7]。太阳风中的H也一直被认为会被注入到月壤颗粒中产生OH基和水^[22, 56]，是月球表面水的重要来源，但在各种月壤颗粒中，胶结物被发现含有更多的水，可以达到470 ppm^[23]，这可能是由于撞击熔化过程促进了水的产生以及玻璃物质可以更好地保存水分^[54, 55]。近期的遥感数据和理论分析还表明，来自高纬度地区的胶结物可能含水量更高^[55]，CE5月壤采集地点的纬度比以往的采集地点都要高，其中丰富的胶结物玻璃可以用来深入研究月球表面水的丰度和起源。

胶结物玻璃中存贮有更多的太阳风物质，其中最为宝贵的是³He。³He是一种战略能源资源，被认为是一种近乎完美的核聚变燃料，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。100吨的³He就足够全人类一年的能源消耗。然而³He在地球上的含量极低，只有不到半吨。太阳风是³He的主要来源，月球没有磁场和大气的保护，太阳风可以直接辐照在月球的表面，高速的太阳风离子会注入在月壤物质中，其中钛铁矿被认为是月壤中最能够保存³He的矿物。

早期的研究估计月壤中总的³He含量可能高达上百万吨^[57]，然而保存在钛铁矿中的³He需要400—1500 °C的高温才能完全

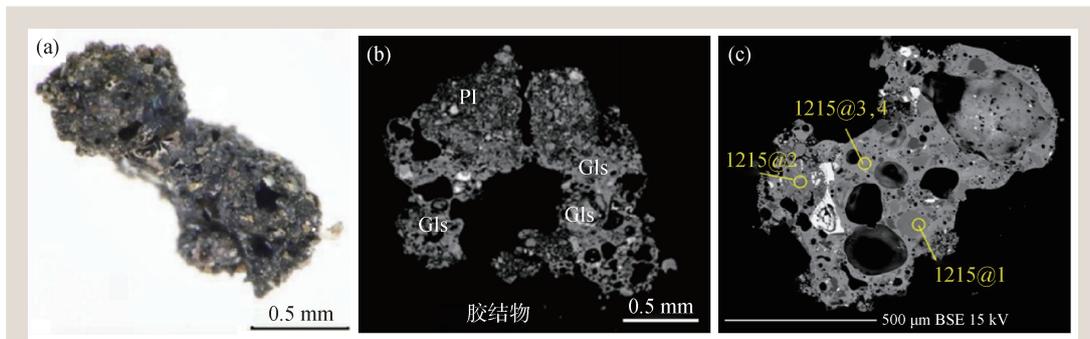


图4 月壤中的胶结物玻璃 (a) CE5月壤中胶结物的光镜照片，呈现熔渣状^[28]；(b) CE5月壤中一个胶结物切片的扫描电镜照片，其内部富含大小不一的孔洞，微区分析显示该胶结物是玻璃(Gls)和长石(PI)碎屑粘在一起的复合物^[3]；(c) Apollo 11号采集月壤中胶结物切片的扫描电镜照片，其探测的水含量最高(1215@4)，达到了175 ppm^[23]

释放出来，大大增加了开采的难度^[36]。我国探月工程的重要任务之一就是月球上的³He进行探测。最近中国科学院宁波材料技术与工程研究所的研究团队通过对CE5月壤中钛铁矿和其他碎片形成的胶结物研究发现，钛铁矿的表面有一层厚度约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浓度最高可达每立方纳米192个(图5)^[36]。粗略估计月壤钛铁矿表面玻璃物质以气泡形式所捕获的³He可能高达26万吨。玻璃中的He气泡可能是捕捉到了钛铁矿晶体释放出来的He气体而形成的。由于沟道效应或者撞击产生的温度升高，原本保存在晶体中的He气会被释放出来扩散到无序密堆的玻璃层中逐渐汇集形成气泡，在高温下玻璃还会发生软化更容易吸收气体产生气泡。这一研究结果说明玻璃物质很可能具有更好的捕获和保存太阳风气体的能力，同时这些保存在玻璃气泡中的³He可以通过机械破碎的方法在低温下即可充分释放出来，更加简便易行。

微陨石撞击导致的局域熔化有时没有产生足够的熔融液体以粘住周围的颗粒，就可能产生附着在月球颗粒表面的各种粘结玻璃^[58]。这些粘结玻璃可能是岩石颗粒自身受到撞击后部分熔化快速冷却形成的玻璃，也可能是熔化的液体飞溅或者流淌到其他岩石颗粒表面凝固形成的玻璃。这些粘结玻璃通常具有明显的熔化和液体流动的特征，比如外型圆润带有气孔的半球形颗粒，或者具有流动特征的一块覆盖物等。粘结玻璃改造了月壤颗粒的表面，在月壤样品中普遍存在。这些丰富的粘结玻璃和胶结物玻璃是月球表面微陨石撞击环境的记录者，也为研究月壤所保存的水和太阳风物质提供了重要样本。

3.4 月壤颗粒表面非晶层：非晶盔甲

月球上的玻璃物质还表现为月壤颗粒表面的非晶层。这种积累在颗粒表面的非晶层的厚度从几个纳米到上百纳米不等，如同是覆盖在岩石颗

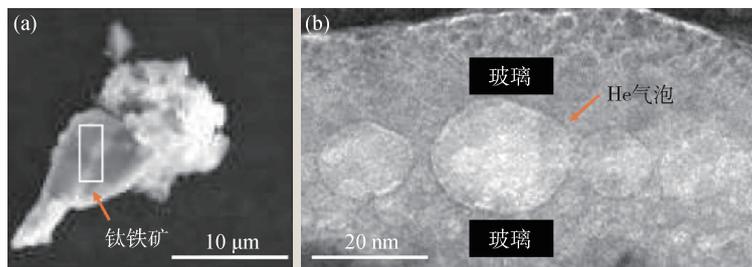


图5 月球玻璃捕捉He气形成He气泡 (a) CE5月壤样品中的胶结物颗粒，由玻璃粘结钛铁矿和其他矿石碎片形成；(b)为(a)中所示长方形区域切片的透射电镜表征，钛铁矿颗粒的表面存在一层约50 nm厚的玻璃物质，玻璃物质中保存了大量He的气泡，包含的He浓度最高达到每立方纳米192个^[36]

粒表面的一层盔甲。它们虽然很薄但却普遍存在，并且通常含有会影响光学性质的纳米铁，在研究月壤保存的太阳风物质和太空风化行为等方面发挥着重要的作用^[15, 24, 59]。前面介绍的几种月球玻璃虽然具体的形成机制不同，但都属于从熔融液体冷却形成的玻璃物质。而月壤颗粒表面的非晶层则由另外两种明显不同的机制产生，分别为太阳风离子注入^[10, 11]和气相沉积，气相沉积又包括撞击导致的热蒸发沉积和太阳风辐照导致的离子溅射沉积^[14, 25]。

太阳风中的高速粒子(主要是H和He)会持续地注入到月壤岩石颗粒中，不断地破坏晶体结构，产生辐照损伤。辐照损伤层随着辐照时间的延长，从结晶良好的晶体到纳米晶，再到非晶和纳米晶复合，直至变成完全非晶的状态^[10, 60, 61]。辐照非晶层的厚度和辐照的时间、岩石的抗辐照程度，以及太阳活动的强度等密切相关。由于辐照非晶层是由固态的晶体物质晶格破坏形成的，因此一般具有和基底的晶体物质类似的化学成分，仅仅会由于太阳风离子的选择性溅射产生微弱的成分偏差^[59]。在对第一批返回地球的月壤样品的表征中，人们就发现大部分的月壤颗粒表面都存在几十到上百纳米厚的非晶层，并且厚度和太阳风离子的穿透深度一致，之后又有研究发现非晶层中含有太阳风物质，确认了辐照非晶层的存在^[10]。辐照非晶层中保存了太阳风物质，注入的H离子还可能会产生OH基和纳米铁(图6)^[56]。

沉积产生的非晶层是另外一种普遍存在的非晶层。首先月球表面的高速撞击尤其是超高速的

微陨石撞击会在瞬间产生高温直接气化月球物质，随后热蒸发的物质便会沉积在周围岩石碎屑的表面^[14, 59]。另外太阳风中的高速带电离子会对月壤颗粒产生溅射作用，溅射出的原子也会沉积在岩石的表面形成非晶层^[15]。由于沉积非晶层是来自于周围物质气化或者溅射产生的气体，因此成分通常和衬底颗粒具有非常明显的区别，甚至含有衬底完全没有的元素，比如在不含铁的矿物表面沉积非晶层中发现纳米铁等。撞击产生的沉积非晶层通常富集容易被蒸发出来的挥发性元素比如Na、K、Si等，而缺乏难以被蒸发的Ca和Al^[14, 26, 59]。溅射产生的沉积非晶层则通常会富含溅射产额更高的元素^[13]。沉积非晶层中通常会含有纳米铁颗粒^[15, 24, 26, 59]，大量的微观结构研究和模拟实验已经证实，在没有太阳风注入的H的参与下，沉积过程自身即足以产生纳米铁^[15, 25]。对沉积非晶层的这一研究改变了人们对太空风化机理和纳米铁产生机制的认识。

4 月球玻璃研究的启示和意义

火山玻璃、撞击玻璃、胶结物玻璃及非晶层等各种起源不同的月球玻璃既是可以长期保存远古物质的容器，也是月球历史信息的记录者，对月球玻璃记录信息的解密将大大加深我们对月球的了解，甚至颠覆了一些传统的认知。月球玻璃记录着月球从内部到表面到太空环境的重要历史信息。利用不同地区的火山玻璃，可以研究岩浆

活动等月球内部活动在时间和空间上的演化，火山玻璃中水的发现还打破了月球内部挥发分耗竭的长期认识^[20]；从各种各样的撞击玻璃中，可以推测从千米到亚微米尺度陨石的撞击环境^[58]，甚至重构出几十亿年间太阳系内的撞击历史^[19]；更为普遍的胶结物玻璃，不仅记录着频繁微陨石撞击的历史，还保留着大量的太阳风物质，能够产生纳米铁，改变月壤的光学特性^[24, 54]，同时也是月球表面水的主要来源^[23]；而对两种非晶层的长期研究则构建了我们对于月壤颗粒表面结构和太空风化机理的基本认识^[15, 59]。

月球玻璃的研究还能帮助我们更好地进行月球资源的开采和利用。比如CE5月壤中的玻璃可以以He气泡的形式更加高效持久地保存He气并且易于开采提取，其储存的³He总量估计可达26万吨，作为核聚变燃料可以满足人类上千年的能源需求^[36]。月球上存在着大量可以形成透明玻璃的矿石，比如长石和二氧化硅^[7]。我国的玉兔2号在月球表面发现了直径2.5 cm的撞击玻璃球，保存着良好的透光性^[6]，结合最近对CE5玻璃抗辐照性能的研究，我们可以在月球表面原位地制造抗太阳风辐照的光学玻璃，用于未来月球基地窗子、太阳能板防护罩以及宇航员面罩等方面。大量的撞击玻璃已经说明月球表面广袤的月壤物质都是潜在的玻璃原料，可以在适当温度下方便地成型为各种形状的物体，甚至可以制成高强度的玻璃纤维用做月球基地的建筑材料^[62]。

对于星际探索而言，月球玻璃研究提供了一个从玻璃的角度去认识和探索太空的新视角。对月球玻璃的研究，启发了我们如何从纷繁复杂的玻璃物质中提取信息和重构历史。比如对月球颗粒表面胶结物和粘结玻璃的研究使我们认识到微陨石撞击活动对无大气行星表面物质具有巨大的改造作用。这些粘结玻璃也成为了研究微陨石撞击的标本，当人们首次从小行星表面采集回土壤时，便从颗粒附着的玻璃物质出发，发现了小行星表面独特的撞击环境^[58]。人们还从月球表面非晶层的研究中获得了太空风化最早

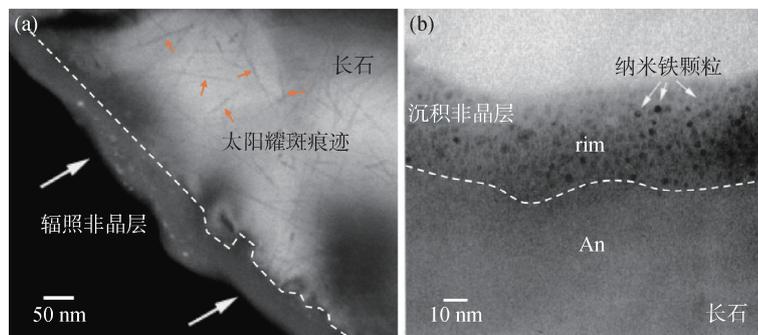


图6 月壤颗粒表面的非晶层 (a)长石颗粒表面太阳风离子注入产生的非晶层的扫描透射电子显微镜暗场相，长石基底中的箭头指示的是太阳风辐照的耀斑痕迹^[60]；(b)长石(An)颗粒表面的沉积非晶层(rim)的透射电子显微镜高分辨图像，非晶层中存在大量直径5 nm左右的纳米铁颗粒^[24]

的知识。月球撞击和太阳风辐照导致的非晶层中经常含有纳米铁，这些细小的纳米铁颗粒会影响近红外光谱，产生发红发暗的效果^[15, 24-26]。行星科学领域曾有一个长期存在的困惑，即地球上的大部分陨石都被认为来自小行星带，但是它们的光谱特征却和现在观测到的小行星不同^[26]。月球玻璃物质的研究给出了一个可能的解释，或许小行星的表面也发生了类似月球的太空风化，光谱随时间发生变化，这一推测最终也被来自小行星的土壤颗粒表面的非晶层和纳米铁证实^[61]。随着星际探索工作的逐步扩展，从登陆月球到火星，再到更遥远的陌生星球时，我们可以参考月球玻璃的研究，对陌生星球的玻璃物质进行发掘和研究，作为我们认知新星球的一条重要途径。

人类长期以来对玻璃物理和玻璃材料的研究使我们可以有效地解码月球玻璃隐藏的秘密，而对月球玻璃的研究同样可能反哺我们对玻璃物理和材料的基础研究。月壤中发现过34亿年的火山玻璃珠^[20]和40亿年的远古撞击玻璃物质^[19]，是人类迄今所能获得的最古老的玻璃物质之一。在玻璃物理的研究中，有一个重要的基础科学问题，那就是理想玻璃是否存在^[63-65]。非平衡过程产生

的玻璃物质的能量比对应的晶体物质一般要更高，处于热力学上的亚稳态，所以玻璃自形成开始，内部便不断地发生趋向于平衡态的弛豫过程^[49-51]。但是人们不知道玻璃弛豫的终点是什么，经过超长时间弛豫的玻璃，究竟会变成晶体，还是会变成一种和晶体能量一样低但是结构仍然无序的理想玻璃呢^[50, 63-65]？而最为古老、弛豫时间极长的月球玻璃恰好为此提供了一个独一无二的研究机遇。此外，在玻璃材料的设计中，稳定性是一个重要的目标。稳定的玻璃材料可以用来超长期储存核废料，可以作为抗辐照的先进光学玻璃，还可以用于超长时间的数据存储。然而结构的无序和成分的复杂使玻璃材料的设计异常复杂，需要消耗大量人力物力进行试错筛选。月球玻璃具有长达亿万年的稳定性和优异的抗辐照能力，是月球严酷的环境自然筛选出来的超稳定玻璃，正好为我们设计超稳玻璃材料提供了重要的参考，我们可以通过研究和仿制月球玻璃来高效地设计、研制和大量生产超稳定玻璃材料。

致谢 感谢中国科学院物理研究所沈来权、常超和张华平对本文的细致修改和建议。

参考文献

- [1] Zellner N E B, Norman M D, Jourdan F. Compositions and Ages of Apollo 15 Lunar Impact and Volcanic Glasses: Next Results. in 44th Annual Lunar and Planetary Science Conference. 2013, 2539
- [2] Delano J W, Zellner N E B, Barra F *et al.* Meteorit. Planet. Sci., 2007, 42: 993
- [3] Li C L, Hu H, Yang M F *et al.* Natl. Sci. Rev., 2022, 9: nwab188
- [4] Xiao Z Y, Yan P, Wu B *et al.* Science Bulletin, 2021, 67: 355
- [5] Wang W H. Progress in Physics, 2013, 33: 177
- [6] Angell C A. Science, 1995, 267: 1924
- [7] Heiken G H, Vaniman D T, French B M. Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon. Cambridge University Press, 1991
- [8] Delano J W, Livi K. Geochim. Cosmochim. Acta, 1981, 45: 2137
- [9] Zellner N E B. J. Geophys. Res.: Planets, 2019, 124: 2686
- [10] Bibring J P, Duraud J P, Durrieu L *et al.* Science, 1972, 175: 753
- [11] Bibring J P, Langevin Y, Maurette M *et al.* Earth Planet. Sci. Lett., 1974, 22: 205
- [12] Nichols R H J, Hohenberg C M, Olinger C T. Geochim. Cosmochim. Acta, 1994, 58: 1031
- [13] Hapke B, Cassidy W, Wells E. The Moon, 1975, 13: 339
- [14] Keller L P, McKay D S. Science, 1993, 261: 1305
- [15] Hapke B. J. Geophys. Res.: Planets, 2001, 106: 10039
- [16] Canup R M, Asphaug E. Nature, 2001, 412: 708
- [17] Yokota S, Terada K, Saito Y *et al.* Sci. Adv., 2020, 6: eaba1050
- [18] Saal A E, Hauri E H. Sci. Adv., 2021, 7: eabe4641
- [19] Culler T S, Becker T A, Muller R A *et al.* Science, 2000, 287: 1785
- [20] Saal A E, Hauri E H, Cascio M L *et al.* Nature, 2008, 454: 192
- [21] Saal A E, Hauri E H, Van Orman J A *et al.* Science, 2013, 340: 1317
- [22] Sunshine J M, Farnham T L, Feaga L M *et al.* Science, 2009, 326: 565
- [23] Liu Y, Guan Y B, Zhang Y X *et al.* Nat. Geosci., 2012, 5: 779
- [24] Pieters C M, Taylor L A, Noble S K *et al.* Meteorit. Planet. Sci., 2000, 35: 1101
- [25] Sasaki S, Nakamura K, Hamabe Y *et al.* Nature, 2001, 410: 555
- [26] Pieters C M, Noble S K. J. Geophys. Res.: Planets, 2016, 121: 1865
- [27] Cao H J, Wang C, Chen J *et al.* Geophys. Res. Lett., 2022, 49: e2022GL099282
- [28] Zhang H, Zhang X, Zhang G *et al.* Sci. China: Phys. Mech. Astron., 2022, 65: 1
- [29] Li Q L, Zhou Q, Liu Y *et al.* Nature, 2021, 600: 54

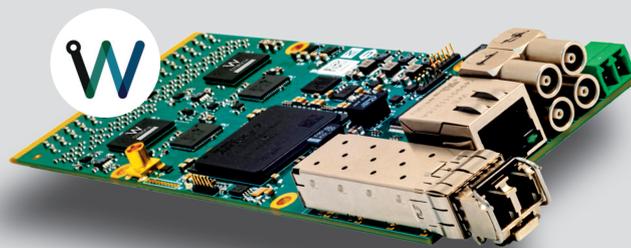
- [30] Che X C, Nemchin A, Liu D Y *et al.* *Science*, 2021, 374:887
- [31] Hu S, He H C, Ji J L *et al.* *Nature*, 2021, 600:49
- [32] Liu J J, Liu B, Ren X *et al.* *Nat. Commun.*, 2022, 13:1
- [33] Tian H C, Wang H, Chen Y *et al.* *Nature*, 2021, 600:59
- [34] Zhao R, Xiao D D, Shen L Q *et al.* *Glasses as a Recorder of the Moon's Mysteries. to be submitted*, 2022
- [35] Zhao Y, Chen Z Q, Zhang B *et al.* *Ultrastable Lunar Glasses. to be submitted*, 2022
- [36] Li A, Chen X, Song L J *et al.* *Materials Futures*, 2022, 1:035101
- [37] Ryder G, Delano J W, Warren P H *et al.* *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1996, 60:693
- [38] Delano J W. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 1986, 91:201
- [39] Wetzel D T, Hauri E H, Saal A E *et al.* *Nat. Geosci.*, 2015, 8:755
- [40] Chapman D R. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1964, 28:841
- [41] Mueller G, Hirsch G W. *Nature*, 1970, 228:254
- [42] Pugh M J. *Nature*, 1972, 237:158
- [43] Bastin J A. *Nature*, 1980, 283:108
- [44] Tartèse R, Anand M, Gattacceca J *et al.* *Space Sci. Rev.*, 2019, 215:1
- [45] Jia M N, Yue Z Y, Di K C *et al.* *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2020, 541:116272
- [46] Hörz F, Brownlee D E, Fechtig H *et al.* *Planet. Space Sci.*, 1975, 23:151
- [47] Yang Y Z, Li S, Zhu M H *et al.* *Nat. Astron.*, 2022, 6:207
- [48] Steele A, McCubbin F M, Fries M *et al.* *Science*, 2010, 329:51
- [49] Zhao Y, Shang B S, Zhang B *et al.* *Sci. Adv.*, 2022, 8:eabn3623
- [50] Ruta B, Pineda E, Evenson Z. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2017, 29:503002
- [51] Zhao J, Simon S L, McKenna G B. *Nat. Commun.*, 2013, 4:1783
- [52] Ito K, Moynihan C T, Angell C A. *Nature*, 1999, 398:492
- [53] Starukhina L V. *Adv. Space Res.*, 2006, 37:50
- [54] Housley R M, Grant R W, Paton N E. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1973, 3:2737
- [55] Li S, Milliken R E. *Sci. Adv.*, 2017, 3:e1701471
- [56] Pieters C M, Goswami J, Clark R *et al.* *Science*, 2009, 326:568
- [57] Wittenberg L J, Santarius J F, Kulcinski G L. *Fusion Technol.*, 1986, 10:167
- [58] Nakamura E, Makishima A, Moriguti T *et al.* *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2012, 109:E624
- [59] Keller L P, McKay D S. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1997, 61:2331
- [60] Zhang S L, Keller L P. *Space Weathering Effects in Lunar Soils: the Roles of Surface Exposure Time and Bulk Chemical Composition. in 42nd Lunar and Planetary Science Conference. 2011*
- [61] Noguchi T, Nakamura T, Kimura M *et al.* *Science*, 2011, 333:1121
- [62] Naser M Z. *Prog. Mater. Sci.*, 2019, 105:100577
- [63] Debenedetti P G, Stillinger F H. *Nature*, 2001, 410:259
- [64] Hecksher T, Nielsen A I, Olsen N B *et al.* *Nat. Phys.*, 2008, 4:737
- [65] Kauzmann W. *Chem. Rev.*, 1948, 43:219

FERS 5200 前端读出系统

模块化且易于扩展的高密度探测器信号采集平台 (SiPM, GEM, 硅微条等)。灵活扩展的特性可集成不同的前端设备, 实现多种测试应用。

A5202

基于Citiroc-1A芯片的64通道SiPM读出单元



64路通道独立控制, 提供内置偏压

官方授权代理商 (中国):
北京中检维康电子技术有限公司

www.phyclover.com
电话: 86-10-88026700
邮箱: info@phyclover.com

www.caen.it
Small details... Great differences