

文章编号: 1001-8166(2011)05-0507-09

月壤中纳米金属铁的太空风化成因及模拟方法分析^{*}

唐 红^{1, 2}, 李雄耀^{1*}, 王世杰¹, 李 阳^{1, 2}

(1. 中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心, 贵州 贵阳 550002

2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要:月壤中普遍存在着大量由太空风化作用产生的纳米金属铁, 这些纳米金属铁在一定程度上改变了月球表面的物理、化学和光学特征。纳米金属铁在月壤中主要赋存于胶结质玻璃相中和月壤颗粒的表面, 胶结质玻璃相的纳米金属铁起源于微陨石轰击富含太阳风氢粒子的月壤产生的高温熔融还原作用, 颗粒表面的纳米金属铁来自微陨石轰击引起的蒸发沉积作用和太阳风、宇宙射线粒子的溅射沉积作用的共同作用。根据月壤中纳米金属铁的成因和特征, 分析了采用微波加热技术和磁控溅射技术分别模拟胶结质玻璃相中和颗粒表面纳米金属铁的可行性研究, 初步的模拟实验表明这两种方法模拟生产的样品中纳米金属铁的特征和真实月壤的相近, 模拟样品对于月球遥感光谱解译、月球科学研究和月球探测工程都具有重要的意义。

关 键 词:月球; 月壤; 太空风化; 纳米金属铁; 模拟方法

中图分类号: P184 **文献标志码:** A

1 引 言

由于没有像地球一样的浓密大气层和全球性磁场的保护, 陨石、太阳风、银河宇宙射线等来自宇宙空间的各种物质长期持续作用于裸露的月球表面, 使月球表面物质的结构和成分特征发生改变的过程称为太空风化作用(图 1)。太空风化作用的主要动力包括陨石特别是微陨石($< 1 \text{ mm}$)的轰击作用和太阳风、太阳耀斑、宇宙银河射线的注入作用^[1~5]。陨石和微陨石以极高的速度(与月球之间的相对运行速度平均约为 20 km/s)^[6]撞击月球表面, 对月表物质产生挖掘、埋藏、粉碎、熔融、气化等作用。微陨石长时间频繁轰击产生的高能量使岩石破碎变成细小的碎片, 同时在毫米级的局部范围使得物质发生完全熔融^[6~9]。熔融的物质和岩石碎片、矿物等物

质胶结在一起形成了所谓的粘合集块岩^[4]。由于陨石和微陨石的撞击, 月壤在形成过程中一直受控于 2 种相对的作用: ①粉碎作用, 即微陨石的轰击作用将岩石和矿物分解成更小的颗粒; ②胶结作用, 即岩石和矿物碎片被因轰击产生的熔体胶结在一起而形成玻璃集合体。粉碎作用和胶结作用此消彼长, 分别减小和增加月壤颗粒的大小。随着作用时间延续, 指示月壤暴露时间的月壤成熟度随之增加, 岩石碎片的数目不断减少, 单体解离的矿物颗粒数量不断增加, 直到增加到某个值后开始下降。岩石和矿物数量发生变化的同时, 由岩石矿物碎片和玻璃胶结在一起的粘合集块岩也不断形成; 并且其中胶结质玻璃的丰度将随着颗粒大小的减少即月壤成熟度的增加而明显增加, 较成熟月壤中胶结质玻璃的模式丰度普遍在 40% 以上, 在月壤最细粒部分其模式

① 收稿日期: 2010-09-02 修回日期: 2010-12-08

* 基金项目: 国家高技术研究发展计划项目“月表物质微波传输特性及月壤厚度反演技术与模型研究”(编号: 2009AA122204); 国家自然科学基金项目“太空风化作用形成的单质铁对 UV-VIS-NIR 光谱特征的影响”(编号: 40803019)和“利用绕月探测工程的亮度温度数据反演月壤厚度的模式研究”(编号: 40873055); 中国科学院地球化学研究所前沿领域项目“月壤矿物显微结构与空间风化过程研究”资助。

作者简介: 唐红(1984-), 女, 四川内江人, 博士研究生, 主要从事月球与行星科学研究, E-mail: dongtianzhixing@163.com

* 通讯作者: 李雄耀(1978-), 男, 广西南宁人, 副研究员, 主要从事月球与行星科学研究, E-mail: lixiongyao@vip.sjkg.cn

丰度可达 80%^[10-13]。此外,月表物质还受到太阳风、太阳耀斑和宇宙银河射线各种能量粒子的注入作用。低能量高流量的太阳风粒子注入月表颗粒深度仅仅为几十个纳米,但是却扮演着重要的角色,对月表颗粒产生溅射作用,并参与撞击熔融过程的化学还原反应,同时还将太阳风中的稀有气体注入到月壤颗粒中,使月壤中储存了大量的稀有气体^[14-15]。高能量低流量的太阳耀斑和银河宇宙射线注入月表深度可达厘米甚至米级,与月壤物质发生一系列核反应,在月壤颗粒中留下辐射径迹^[14-16-17]。太空风化作用过程除了改变月壤的结构特征,保留太阳风注入粒子,改变其化学成分之外,还伴随太空风化作用过程的熔融还原、蒸发沉积、溅射沉积等作用在月壤中产生大量不同特征的纳米金属铁,这些纳米金属铁将改变月壤的整体物理、化学和光学性质,影响月球遥感探测结果和解译,对月球探测和月球科学研究均具有重要意义^[18]。由于月球样品的稀缺和珍贵,对月壤纳米金属铁的深入研究很大程度依赖于其形成过程的地面模拟。本文针对月壤特性研究的发展需求和月球遥感探测工程实施需要,围绕月壤纳米金属铁的特征,对其成因和模拟方法进行概括总结和分析探讨。

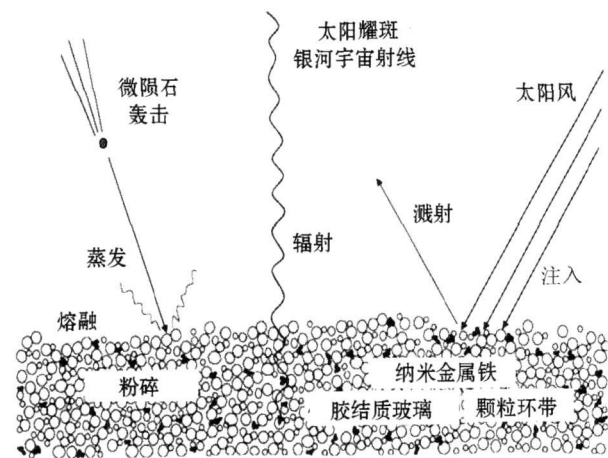


图 1 太空风化作用示意图^[3]

Fig 1 Space weathering process^[3]

2 纳米金属铁的分布特征

通过分析 Apollo 和 Luna 采回的月球样品可知,月球特殊的环境使月壤中含有与地球完全不同的一种独特组分,那就是月壤中普遍存在着大量太空风化作用产生的纳米金属铁,它们不仅存在于胶结质玻璃中,还存在于月壤颗粒表面(图 2)^[19-20]。由于纳米金属铁的存在,月壤相对于相同 Apollo 采样点

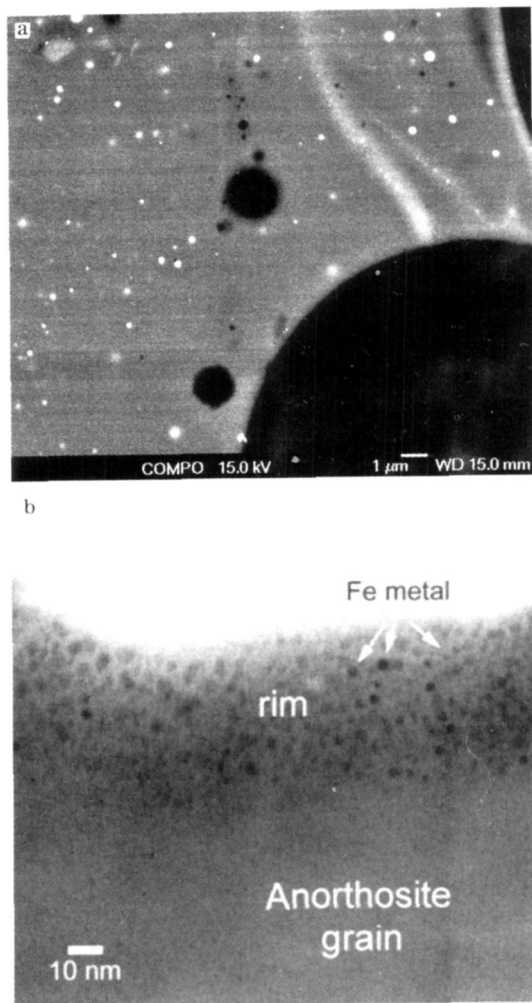


图 2 a 月壤样品胶结质玻璃中的纳米金属铁,白色小亮点为纳米金属铁^[19]; b 月壤样品钙长石颗粒表面非晶质环带中的纳米金属铁^[20]

Fig 2 a Nanophase iron in agglutinatic glass in lunar soil sample and these white spots point to nanophase iron particles^[19]; b Nanophase iron in the amorphous rim around anorthosite grain surface in lunar soil sample^[20]

粉碎后的月岩在物理、化学和光学特征上都发生了一定程度的改变^[21]。

纳米金属铁在月壤中存在 2 种赋存状态: ①以不混溶体形式存在于微陨石轰击产生的胶结质玻璃相中; ②以包裹体形式存在于蒸发沉积作用和溅射沉积作用形成的月壤颗粒表面的薄层非晶质环带中^[5-22-23]。月壤中纳米金属铁的含量与太空风化作用的程度即月壤的成熟度密切相关,研究表明高地成熟月壤中纳米金属铁的含量最高可达 0.7%,而月海成熟月壤中最高可达 1%^[24-25]。早期对月壤中纳米金属铁特征的研究表明,胶结质玻璃相中纳米金属铁的主要粒径为 3~33 nm,平均约为 7 nm。近

期对月壤中金属铁的 BSE-SEM 研究表明,胶结质玻璃中的金属铁颗粒最大可达 $1\ \mu\text{m}$ 平均大小为 $100\ \text{nm}$ 以上,整体分布比较均匀^[19, 26, 27]。分析表明纳米金属铁为 $\alpha\text{-Fe}$ 其纯度非常高,仅仅含有非常少量的 Ni ^[28, 29]。除了胶结质玻璃相中的纳米金属铁外,研究还发现在月壤中特别是成熟月壤中大多数颗粒表面都存在厚 $50\sim 200\ \text{nm}$ 的非晶质环带,纳米金属铁以包裹体形式存在于该环带中。月壤颗粒表面的纳米金属铁颗粒要比胶结质玻璃相中的金属铁小得多,一般只有几个纳米到十几个纳米,平均直径约为 $3\ \text{nm}$ 呈层状或随机分布在颗粒表面的非晶质环带中^[19, 30]。

3 纳米金属铁的成因分析

月壤中普遍存在着大量的纳米金属铁,其含量至少比月岩中的金属铁含量高 10 倍,而来自陨石中的金属铁混染到月壤中的数量微乎其微^[10],因此月壤中的金属铁主要是通过其他作用形成的。研究证实月壤中的纳米金属铁是太空风化作用的产物,其赋存状态与不同的形成过程有关^[24, 31]。胶结质玻璃相中和月壤颗粒表面的纳米金属铁的特征差异主要是由其形成过程不同所决定的。月球在漫长的月质历史时期中不断遭受陨石特别是微陨石的轰击作用,微陨石轰击产生的高温高压使得月壤颗粒发生部分熔融,在月球还原环境中,产生的含 FeO 的硅酸盐熔体在高温下可将部分金属铁还原出来,而月壤中注入的丰富的太阳风 H 质子促进了金属铁的还原,随后熔体快速淬火冷却后形成了含有纳米金属铁的胶结质玻璃^[23, 28, 31, 32]。相对较大的金属铁仅出现在胶结质玻璃中,这可能是由于微陨石的频繁轰击造成熔体中已经存在的小的金属铁发生流动并凝结在一起,从而生长形成了较大的金属铁^[18, 19]。但是由于硅酸盐熔体的体积很小,并且很快淬火形成胶结质玻璃,因此重新凝结的不混溶金属铁的大小限制在一定的范围内。在月壤样品中,分散在整个胶结质玻璃相中的金属铁含量相对较高,颗粒直径较小、金属铁的纯度非常高,这些特征都表明其最可能的成因是月壤中含铁物质的还原作用。另外在月壤玻璃相中普遍存在的小泡构造意味着太阳风注入的气体在金属铁的还原过程中起到了重要的促进作用。

月壤颗粒表面非晶质中纳米金属铁大小和分布特征反映了其来源于气相沉积的过程^[22]。早期研究一致认为非晶质环带是由低能量的太阳风和宇宙

射线粒子溅射到暴露的月壤颗粒表面,对其产生辐射侵蚀而形成的,在这一过程中铁从含铁矿物中被溅射出来并随后沉积到矿物颗粒表面从而形成了非晶质环带中的纳米金属铁^[33]。这和实验室中利用模拟太阳风作用于暴露矿物颗粒产生的现象相似,而且非晶质环带的厚度和太阳风粒子的注入深度相近^[34]。对颗粒表面环带的研究发现溅射沉积作用主要发生在钛铁矿、斜长石、方石英和斜方辉石颗粒表面,环带厚度一般为 $20\sim 100\ \text{nm}$,纳米金属铁分布于颗粒表面的环带中,环带和原生矿物之间的界面特征变化很大,另外颗粒表面非晶质环带的化学成分和原生矿物的成分相近,但是比例不同,存在着不同程度的阳离子亏损和氧元素的超化学计量现象^[35, 36]。Hapke 等^[21]在早期预测了微陨石轰击产生蒸发沉积作用的存在,但是直到近期 Keller 等^[29]对月壤颗粒表面的非晶质环带及其原生矿物进行的详细研究才证实该作用的存在,认为许多但并不是全部的非晶质环带主要是由于微陨石轰击产生的蒸发沉积作用产生的,即微陨石轰击产生的高温(可高达 $3\ 000\ ^\circ\text{C}$ 以上)使月壤物质发生了气化作用,在气化过程中发生了一系列复杂的化学反应,并产生了大量的气相金属铁,随着温度的下降,这些纳米金属铁小球发生凝结并沉积到月壤颗粒的表面^[20, 30]。在月壤多数颗粒中,无论富铁矿物(钛铁矿、橄榄石和斜长石)还是贫铁矿物(长石和石英)表面都普遍具有厚 $40\sim 200\ \text{nm}$ 的非晶质环带,环带与原生矿物之间的界面平滑,环带中分布的纳米金属铁比例相近,但是颗粒表面环带的化学成分和原生矿物的化学成分差异很大,不存在氧元素的超化学计量,这些发现都为蒸发沉积作用提供了强有力的支持^[37~39]。虽然,关于蒸发沉积作用是造成月壤颗粒表面非晶质环带及其分布的纳米金属铁的一个重要原因的观点已经得到了广泛的认可^[35, 40~43],但是,月壤颗粒表面的非晶质环带及其中的纳米金属铁更可能是蒸发沉积作用和溅射沉积作用共同作用的结果,而不是任何一种过程单独作用所致。

尽管目前普遍认为胶结质玻璃相中纳米金属铁起源于微陨石轰击产生的高温熔融还原作用,而颗粒表面的纳米金属铁起源于蒸发沉积作用和溅射沉积作用,但是对于这些形成作用的具体机制还不清楚,并且由于各种作用同时长期作用于暴露的月壤物质,从而增加了其中纳米金属铁的成因和特征复杂化,关于纳米金属铁的起源及其相关过程尚待进一步研究。

4 纳米金属铁对月壤性质的影响

月壤中的纳米金属铁对月壤的物理、化学和光学特征都产生了重要的影响。由于纳米金属铁的存在使月壤相对于月岩具有很强的磁化系数,特别是在月壤细粒部分 ($< 45 \mu\text{m}$)^[44~47]。纳米金属铁的相对含量可以用 $I_s/F\text{eO}$ 值来确定,其中 I_s 代表着铁磁共振 (EMR) 测试的 $m\text{Fe}^0$ 的信号。 $I_s/F\text{eO}$ 值作为月壤成熟度的常用指标, 0~30 代表着不成熟月壤, 30~60 代表着亚成熟月壤, > 60 为成熟月壤。随着月壤颗粒的减小, $I_s/F\text{eO}$ 值不断增加, 意味着太空风化产物纳米金属铁的不断增多^[12 49 50]。特别是在月壤最细粒部分 ($< 10 \mu\text{m}$), $I_s/F\text{eO}$ 的增加量远远大于胶结质玻璃的增加量, 这反映了蒸发沉积作用和溅射沉积作用产生的纳米金属铁对 $I_s/F\text{eO}$ 的贡献要大于胶结质玻璃中纳米金属铁的贡献。月壤矿物的显微观察也表明这部分月壤中几乎每个颗粒表面都含有纳米金属铁的沉积环带^[51]。纳米金属铁作为月壤中重要的独特组成, 其形成反映了多样而复杂的化学过程, 包含了一系列关于微陨石轰击产生的高温熔融作用、蒸发作用、凝结作用、分馏作用以及太阳风和宇宙射线的辐射作用、化学作用、溅射沉积作用等。此外, 纳米金属铁被认为是改变月表光学特征的主因, 纳米金属铁对光学特征的影响直接关系到月球以及太阳系其他无大气石质天体的遥感数据解译和成分的确定, 研究证实相对于相同 Apollo 采样点粉碎后的月岩, 月壤反射光谱的改变主要体现在 3 个方面: ①整体反射率的减少; ②特征吸收波段的减弱; ③连续统的变红, 即斜率的增加^[24 52~55]。纳米金属铁对月表光学的影响程度随着纳米金属铁的增加而增大, 其中月壤 $< 45 \mu\text{m}$ 部分和整体月壤的光学特征最为相似, 因为这部分月壤含有更多的纳米金属铁, 并且纳米金属铁的不同赋存状态、大小和含量对月表光学特征的影响有所不同^[56~58]。在月壤细粒部分, 月壤颗粒表面由蒸发沉积作用产生纳米金属铁可能比胶结质玻璃相中的纳米金属铁对光谱的影响要大^[59 60]。月壤中小颗粒的金属铁使光谱变红, 而大颗粒的金属铁使光谱变暗; 质量百分含量仅为 0.05% 的纳米金属铁就可以改变整体光谱特征, 随着纳米金属铁含量的增加, 反射光谱整体变暗变红, 特征吸收波段逐渐消失^[61 62]。目前对于纳米金属铁对月壤物理、化学和光学特征影响的认识仅仅停留在定性到半定量的基础上, 并且由于月壤本身性质和各种作用过程复杂,

因此在很多重要问题上还存在着不少争议, 还需要基于样品的实际分析进行更加深入的研究。由于样品的珍贵和稀缺, 如何制备具有相似性质样品成为这一研究领域的瓶颈。

5 纳米金属铁模拟方法探讨

由于真实月壤样品非常稀少珍贵, 成分性质复杂, 很难将纳米金属铁的影响分离出来, 因此实验室模拟含纳米金属铁的样品是当前月壤性质研究中必不可少的一部分。

目前国外不少学者对含纳米金属铁的样品进行了模拟实验和相关研究, 主要采用了 3 种方法来模拟含纳米金属铁的样品。第一种方法是利用溶胶凝胶法来获得含有纳米金属铁的玻璃相, 使用含有纳米孔洞的溶胶作为载体, 将硝酸铁溶液浸泡其中, 使铁离子进入溶胶孔洞中, 干燥后在还原气氛中通过高温加热产生含有纳米金属铁的 SiO_2 玻璃^[24 61 63]。由于玻璃中仅仅为 SiO_2 和真实月壤复杂的玻璃相差很大, 近期 Liu 等^[64] 对该方法进行了改进, 从而获得含有纳米金属铁的 SiO_2 -FeO 二元成分和 SiO_2 - Al_2O_3 -MgO-CaO-FeO 五元成分的玻璃相, 利用溶胶凝胶法能够获得 100 nm 以内玻璃相中的金属铁, 但是难以控制纳米金属铁的含量。另外, 这种玻璃相中纳米金属铁的形成过程还不能代表真实月壤中胶结质玻璃中纳米金属铁的形成过程。第二种方法是直接在氢气中将橄榄石、辉石、斜长石和玻璃加热到 1 100 °C, 随后在氢气流中快速冷却^[65]。所有样品经过加热还原后都产生了一定含量的金属铁, 大小为几百个纳米到几个微米, 其平均直径要比月壤胶结质玻璃相中的大得多。另外利用这种方法加热的时间相对较长, 可达 3~4 小时。第三种方法是用脉冲周期 $6 \times 10^{-9} \sim 8 \times 10^{-9}$ s Nd:YAG (钕铝石榴石激光器) 脉冲激光来辐射橄榄石和辉石, 辐射后的橄榄石表面出现了含有纳米金属铁的非晶质薄层, 但辐射后的辉石表面并没有出现非晶质薄层, 产生的纳米金属铁是出现在非晶质的辉石集合体内^[66~71]。这种方法类似于微陨石轰击所产生的蒸发沉积作用, 但是纳米金属铁只出现在橄榄石颗粒表面, 而且利用这种方法来生产含有纳米金属铁样品的效率很低, 难以生产出可用数量的模拟物。因此模拟含有纳米金属铁样品的实验还需要进行更加深入的研究, 这需要结合月壤中纳米金属铁的成因和特征, 采取合适的实验方法, 模拟出和月壤样品纳米金属铁相似特征的产物, 使之既能满足月球的基础

本理论研究,又具有实际应用的意义。

目前国内已经研制出 CIRS 模拟月壤,但是该系列的模拟月壤中还没有考虑纳米金属铁^[72]。Tan 等^[73]首先采用微波加热技术和磁控溅射技术分别成功模拟出了胶结质玻璃相中和颗粒表面纳米金属铁的样品,初步结果表明模拟样品中纳米金属铁的大小分布特征和真实月壤中的相近。该模拟实验充分考虑了纳米金属铁的成因和特征。太空风化作用产生的纳米金属铁不仅存在于月壤胶结质玻璃相中,还存在于月壤颗粒表面。月壤样品中胶结质玻璃中的纳米金属铁主要是由于高温熔融还原作用而形成的,在这一过程中,钛铁矿由于其较低的熔点和较强的活性,相对硅酸盐矿物会较早发生熔融和反应,使 Fe^{2+} 还原成金属铁,随后在非常短时间内淬火,金属铁作为不混溶物广泛分布于胶结质玻璃相中。根据胶结玻璃中的纳米金属铁的形成过程,采取在还原条件下对钛铁矿和含少量橄榄石、辉石的样品进行微波加热使其完全熔融,然后淬火得到含有纳米金属铁的胶结质玻璃样品,通过控制实验条件来调节金属铁的大小。微波加热技术是一种新发展的技术,相对于传统加热技术具有很多独特的优势。由于微波能深入物质内部而不是依靠物质本身的热传导来加热的,因此微波能快速将物质加热至高温,微波的这一特征更接近微陨石轰击产生的瞬间高温条件。微波还具有选择性加热的特点,能很好地和吸波特性良好的物质发生耦合作用^[10 74]。钛铁矿作为微波加热的优先实验对象,主要有以下几个方面的原因:钛铁矿为月壤中最重要、含量最多的金属氧化物,是 Fe-Ti 元素主要赋存的矿物,这也很可能是月壤中纳米金属铁的一个重要来源;钛铁矿具有较高的介电损耗,在微波场中具有较高的活性,在还原的条件下可以很快将其加热至高温,并很容易将其中的铁还原出来^[74 75]。月壤样品中颗粒表面的纳米金属铁是由于蒸发沉积作用和溅射沉积作用而形成的,生成气态的 Fe^0 随着温度的下降发生凝结,并在重力的作用下沉积到邻近的月壤颗粒表面。磁控溅射技术作为一种物理气相沉积技术,其基本原理是利用高能粒子轰击靶材,使靶材表面的原子逸出并沉积在基体表面,这和月壤颗粒表面纳米金属铁的沉积过程相似^[76]。由此可见,微波加热技术和磁控溅射技术可以分别作为模拟胶结质玻璃相中和颗粒表面纳米金属铁合适方法,初步的实验结果也证实了其可行性,其模拟产物可以用作月球基础科学研究和月球探测工程试验。

6 展 望

纳米金属铁作为太空风化作用的产物,广泛存在于月壤的胶结质玻璃相中和颗粒表面,并在一定程度上改变了月壤的物理、化学和光学特征。由于真实月壤样品的珍贵稀少,因此需要在实验室模拟出与真实月壤相似的含有纳米金属铁样品来进行各种相关研究。月壤胶结质玻璃相中的纳米金属铁是由于微陨石轰击富含太阳风氢粒子的月壤而产生的快速高温熔融还原而成的,结合微波加热技术的独特优势和钛铁矿良好的吸波特征,本文提出利用微波加热钛铁矿来模拟生产胶结质玻璃相中纳米金属铁的样品;月壤颗粒表面的纳米金属铁主要形成于蒸发作用和溅射作用的气相沉积过程,磁控溅射技术作为一种物理气相沉积方法,可以用来模拟生产颗粒表面纳米金属铁的样品。采用微波加热技术和磁控溅射技术的初步实验分别模拟出了胶结质玻璃相中的纳米金属铁和颗粒表面的纳米金属铁样品,模拟样品中纳米金属铁的特征和真实月壤中的相近。含有纳米金属铁的模拟样品对于认识和定量研究纳米金属铁的各种特征对月壤物理、化学及光学特性的影响具有重要的意义,同时对于月球探测工程及未来月球基地建设所涉及到的各种试验也具有重要的应用价值。

参考文献 (References)

- [1] Housley R M, Cirijn E H, Paton N E, et al. Solarwind and micrometeorite alteration of the lunar regolith [C] // Proceedings of the Fifth Lunar Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1974.
- [2] Peters C M. Constraints on our view of the Moon II. Space weathering [C] // Abstracts of Workshop on New Views of the Moon. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1998.
- [3] Noble S K. Space weathering on asteroids [C] // Abstracts of XV Gen. in Asteroids and Meteorites. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2005.
- [4] Ouyang Ziyuan. Introduction to Lunar Science [M]. Beijing: China Astronautics Publishing House, 2005. [欧阳自远. 月球科学概论 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.]
- [5] Keller L P. Microstructural studies of space weathering effects in lunar materials [C] // Abstracts of Solar System Remote Sensing Symposium. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2002.
- [6] Gault D E. Effects of micrometeorite on the lunar surface [C] // Proceedings of the Third Lunar Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1972.
- [7] Grieve R A F, Plant A G, Dence M R. Characteristics of impact melts in the lunar highlands [C] // Abstracts of the Lunar and

- Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1974.
- [8] McKay D S, Furland R M, Heiken G H. Grain size and the evolution of lunar soils. *J. Proceedings of the Fifth Lunar Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1974.
- [9] Cintala J M. Impact induced thermal effects in the lunar and mercurian regoliths. *J. Journal of Geophysical Research*, 1992, 97 (E1): 947-973.
- [10] Taylor L A, Meeker T T. Microwave sintering of lunar soil: Properties, theory and practice. *J. Journal of Aerospace Engineering*, 2005, 18(3): 188-196.
- [11] Mendell W W, McKay D S. A lunar soil evolution model. *J. The Moon*, 1975, 13: 285-292.
- [12] Basu A, McKay D S, Morris R V, et al. Anatomy of individual agglutinates from a lunar highland soil. *J. Meteoritics and Planetary Science*, 1996, 31: 777-782.
- [13] Basu A, Wang C. Exposure age and agglutinate content of lunar soils. *J. Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1977.
- [14] Bibring J P, Borg J, Burlingame A L, et al. Solar wind and solar flare maturation of the lunar regolith. *J. Proceedings of the Sixth Lunar Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1975.
- [15] Basu A. Agglutinates and carbon accumulation in Apollo 17 lunar soils. *J. Proceedings of the Seventh Lunar Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1976.
- [16] Reames D V, Tytko A J, Ng C K. Solar energetic particles and space weathering. *J. AP Conference Proceedings*. New York: American Institute of Physics, 2001.
- [17] Goswami J N, Lal D. Cosmic ray irradiation pattern at the Apollo 17 site: Implications to lunar regolith dynamics. *J. Proceedings of the Fifth Lunar Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1974.
- [18] Basu A, McKay D S, Wenworth S J. A critical examination of relative concentrations of volume correlated and surface correlated submicron globules of pure Fe₀ in lunar soils. *J. Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2003.
- [19] Basu A. Nanophase Fe₀ in lunar soils. *J. Journal of Earth System Science*, 2005, 114(3): 375-380.
- [20] Martel L. New mineral proves an old idea about space weathering. [EB/OL]. <http://www.usrd.hawaii.edu/ju04/newmineral.html>, 2004.
- [21] Hapke B, Cassidy W, Wells W. Effects of vapor phase deposition processes on the optical, chemical, and magnetic properties of the lunar regolith. *J. The Moon*, 1975, 13: 339-353.
- [22] Keller L P, Clement S J. Formation of nanophase iron in the lunar regolith. *J. Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2001.
- [23] Peters C M, Taylor L A, Noble S K, et al. Space weathering on airless bodies: Resolving a mystery with lunar samples. *J. Meteoritics and Planetary Science*, 2000, 35: 1101-1107.
- [24] Morris R V. Origins and size distribution of metallic iron particles in the lunar regolith. *J. Proceedings of the eleventh Lunar and Planetary Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1980.
- [25] Morris R V. Origins and size distribution of metallic iron in the lunar regolith. *J. Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1980.
- [26] James C L, Leisinger S L, Basu A, et al. Nanophase iron globules in lunar soil. *J. Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2003.
- [27] James C, Leisinger S, Basu A, et al. Size distribution of Fe₀ globules in lunar agglutinative glasses. *J. Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2002.
- [28] Housley R M, Grant R W, Paton N E. Origin and characteristics of excess Fe metal in lunar glass welded aggregates. *J. Proceedings of the Fourth Lunar Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1973.
- [29] Housley R M, Grant R W, Abdel Gawad M. Study of excess Fe metal in the lunar fines by magnetic separation Mossbauer spectroscopy and microscopic examination. *J. Proceedings of the Third Lunar Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1972.
- [30] Keller L P, McKay D S. Discovery of vapor deposits in the lunar regolith. *J. Science*, 1993, 261(5127): 1305-1307.
- [31] Allen C C, Morris R V, McKay D S. An experimental analog to maturing lunar soil. *J. Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1996.
- [32] Taylor L A. Origin of surface correlated and agglutinative nanophase Fe₀: A bedtime story for Bruce. *J. Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2002.
- [33] Hapke B W, Cohen A J, Cassidy W A, et al. Solar radiation effects on the optical properties of Apollo 11 samples. *J. Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1970.
- [34] Parso D, Cassidy W, Hapke B. An experimental investigation of fractionation by sputter deposition. *J. Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1978.
- [35] Keller L P, McKay D S. Micrometer sized glass spheres in Apollo 16 soil 61184: Implications for inpace volatilization and condensation. *J. Proceedings of Lunar and Planetary Science*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1992.
- [36] Christoffersen B, McKay D S. Grain rims on ironite in the lunar regolith: Comparison to vapor deposits on regolith silicates. *J. Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1994.
- [37] Anand M, Taylor L A, Nazarov M A, et al. Space weathering on airless planetary bodies: Clues from the lunar mineral hapkeite. *J. PNAS*, 2004, 101(18): 6847-6851.

- [38] Taylor L A, Patchen A, Taylor D S, et al. X-ray diffraction imaging petrography of lunar mare soils: Modal analyses of minerals and glasses [J]. *Earth* 1996, 124: 500-512.
- [39] Keller L P, McKay D S. The nature and origin of rims on lunar soil grains [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1997, 61 (11): 2331-2341.
- [40] Keller L P, McKay D S. Impact glasses and vapor condensates in Apollo 11 soil 10084 [C] // Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference, Houston: Lunar and Planetary Institute, 1992.
- [41] Christoffersen R, Keller L P, McKay D S. Microstructure, chemistry and origin of grain rims on ilmenite from the lunar soil finest fraction [J]. *Meteoritics and Planetary Science* 1996, 31: 835-848.
- [42] Wenworth S J, Keller L P, McKay D S, et al. Space weathering on the Moon: Patina on Apollo 17 samples 75075 and 76015 [J]. *Meteoritics and Planetary Science* 1999, 34: 593-603.
- [43] Keller L P, Wenworth S J, McKay D S. Surface correlated nanophase iron metal in lunar soils: Petrography and space weathering effects [C] // Abstracts of Workshop on New Views of the Moon, Houston: Lunar and Planetary Institute, 1998.
- [44] Fallick A E, Pillinger C T, Stephenson A. Concerning the size distribution of ultrafine iron in lunar soil [C] // Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference, Houston: Lunar and Planetary Institute, 1983.
- [45] Nagata T, Ishikawa Y, Kinoshita H, et al. Magnetic properties and natural remanent magnetization of lunar materials [C] // Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference, Houston: Lunar and Planetary Institute, 1970.
- [46] Gromme C S, Doell R R. Magnetic properties of Apollo 12 lunar samples 12052 and 12065 [C] // Proceedings of the Second Lunar Science Conference, Houston: Lunar and Planetary Institute, 1971.
- [47] Bentley M S, Ball A J, Dyar M D, et al. Space weathering: Laboratory analyses and in situ instrumentation [C] // Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference, Houston: Lunar and Planetary Institute, 2005.
- [48] Rochette P, Gattacceca J, Ivanov A V, et al. Magnetic properties of lunar materials: Meteorites, luna and Apollo returned samples [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2010, 292: 383-391.
- [49] Tsay F, Chan S I, Manatt S L. Ferromagnetic resonance of lunar samples [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1971, 35: 865-875.
- [50] Lucey P G, Blewett D T, Taylor G J, et al. Imaging of lunar surface maturity [J]. *Journal of Geophysical Research* 2000, 105 (E8): 20377-20386.
- [51] Taylor L A, Pieters C M, Keller L P, et al. The effects of space weathering on Apollo 17 mare soils: Petrographic and chemical characterization [J]. *Meteoritics and Planetary Science* 2001, 36: 285-299.
- [52] Gold T, Bilson E, Barron R L. Chemical and optical properties at the Apollo 15 and 16 sites [C] // Proceedings of the Eighth Lunar Science Conference, Houston: Lunar and Planetary Institute, 1977.
- [53] Fischer E M, Pieters C M. Remote determination of exposure degree and iron concentration of lunar soils using VIS-NIR spectroscopic methods [J]. *Earth* 1994, 111: 475-488.
- [54] Haik e B. Space weathering from Mercury to the asteroid belt [J]. *Journal of Geophysical Research* 2001, 106 (E5): 10039-10073.
- [55] Taylor L A, Pieters C, Keller L P, et al. Space weathering of lunar mare soils: New understanding of the effects on reflectance spectroscopy [C] // Proceedings of Space Johnson ASEC, 2000.
- [56] Pieters C M, Fischer E M, Rode O D, et al. Optical effects of space weathering on lunar soils and the role of the finest fraction [C] // Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference, Houston: Lunar and Planetary Institute, 1993.
- [57] Noble S K, Pieters C M, Taylor L A, et al. Optical properties of the finest fraction of lunar soil: Implications for space weathering environments [C] // Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference, Houston: Lunar and Planetary Institute, 2000.
- [58] Noble S K, Pieters C M, Taylor L A, et al. The optical properties of the finest fraction of lunar soil: Implications for space weathering [J]. *Meteoritics and Planetary Science* 2001, 36: 31-42.
- [59] Taylor L A, Morris R V, Keller L P, et al. Major contributions to spectral reflectance opacity by non-agglutinitic surface correlated nanophase iron [C] // Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference, Houston: Lunar and Planetary Institute, 2000.
- [60] Taylor L A, Pieters C M, Keller L P, et al. Lunar mare soils: Space weathering and the major effects of surface correlated nanophase Fe [J]. *Journal of Geophysical Research* 2001, 106 (E11): 27985-27999.
- [61] Noble S K, Pieters C M, Keller L P. An experimental approach to understanding the optical effects of space weathering [J]. *Earth* 2007, 119: 629-642.
- [62] Lucey P G. Modeling the spectral effects of microscopic iron metal on glass and minerals [C] // Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference, Houston: Lunar and Planetary Institute, 1995.
- [63] Noble S K, Pieters C M, Keller L P. The optical properties of nanophase iron: Investigation of a space weathering analog [C] // Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference, Houston: Lunar and Planetary Institute, 2003.
- [64] Liu Y, Taylor L A, Thompson J R, et al. Unique properties of lunar impact glass: Nanophase metallic Fe synthesis [J]. *American Mineralogist* 2007, 92 (8/9): 1420-1427.
- [65] Allen C C, Morris R V, Lauer H V, et al. Microscopic iron metal on glass and minerals a tool for studying regolith maturity [J]. *Earth* 1993, 104: 291-300.
- [66] Kurahashi E, Yamanaoka C, Nakamura K, et al. Laboratory sim-

- ulation of space weathering: ESR measurements of nanophase metallic iron in laser irradiated materials. *J. Earth Planets Space* 2002, 54, 5-9.
- [67] Sasaki S, Kurohashi E, Nakamura K, et al. Laboratory simulation of space weathering: TEM and ESR confirmation of nanophase iron particles and change of optical properties of regolith. *Q. // Proceedings of Asteroids*. Netherlands: ESA, 2002.
- [68] Sasaki S, Kurohashi E, Yamanaka C, et al. Laboratory simulation of space weathering: Changes of optical properties and TEM/ESR confirmation of nanophase metallic iron. *J. Advance in Space Research* 2003, 31(12), 2537-2542.
- [69] Sasaki S, Nakamura K, Hamabe Y, et al. Production of iron nanoparticles by laser irradiation in a simulation of lunar like space weathering. *J. Nature* 2001, 410, 555-557.
- [70] Yamada M, Sasaki S, Nagahara H, et al. Simulation of space weathering of planet forming materials: Nanosecond pulse laser irradiation and proton implantation on olivine and pyroxene samples. *J. Earth Planets Space* 1999, 51, 1255-1265.
- [71] Sasaki S, Hiroi T, Nakamura K, et al. Simulation of space weathering by nanosecond pulse laser heating: Dependence on mineral composition, weathering trend of asteroids and discovery of nanophase iron particles. *J. Advance in Space Research* 2002, 29(5), 783-788.
- [72] Zheng Yongchun. Development of Lunar Soil Simulants and Characteristics of Microwave Radiation of Lunar Regolith. [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, 2005. [郑永春. 模拟月壤研制与月壤的微波辐射特性研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2005.]
- [73] Tang H, Wang S, J, Li X, Y. Experimental simulation of nanophase iron production in lunar space weathering. *Q. // Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2010.
- [74] Kelly RM, Rowson NA. Microwave reduction of oxidised ilmenite concentrates. *J. Minerals Engineering* 1995, 8(11), 1427-1438.
- [75] Huison LM. Notes on lunar ilmenite. *J. NASA Space Engineering Research Center for Utilization of Local Planetary Resources* 1989, N91-25203, 17-25.
- [76] Kelly P, J, Amell R D. Magnetron sputtering: A review of recent developments and applications. *J. Vacuum* 2000, 56, 159-172.

The Origin and Simulation of Nanophase Iron in Lunar Soil

Tang Hong², Li Xingyao¹, Wang Shijie¹, Li Yang²

(1. Lunar and Planetary Science Research Center, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Unprotected by atmosphere and magnetosphere, exposed lunar surface has been subjected to several harsh space processes. Among them, meteoroids and energetic charged particles are the dominant forces that shape the lunar surface. Collectively, these processes are known as "space weathering". Nanophase iron (np-Fe⁰) particles produced by space weathering have been widely observed in the lunar soil, which could have important effects on the physical, chemical and optical properties of lunar soil. In studies of lunar samples, it is found that np-Fe⁰ occurs in two main petrographic settings in lunar soil: as inclusions within agglutinitic glass and as inclusions in thin amorphous rims surrounding soil grains. Meteorites bombardment, especially micrometeorites bombardments, could locally melt the lunar surface materials which saturate with hydrogen implanted from solar wind, and then reduce the ferrous minerals to metallic iron in agglutinitic glass. In previous studies, the size of np-Fe⁰ particles was found to be about 3~33 nm. But recent studies show that the np-Fe⁰ particles in agglutinitic glass are much larger, and most of them are about 50~200 nm in size and finely dispersed. Vapor deposition from micrometeorites bombardments and sputtering deposition from solar wind and cosmic rays produce np-Fe⁰ particles in the amorphous rims around the lunar grains surfaces. The size of np-Fe⁰ particles in the rim is ranged from several nanometers to tens of nanometers. Most of them are about 10 nm. To investigate the relationship between np-Fe⁰ and various properties of lunar soil, simulation of the production process of np-Fe⁰ by space weathering is necessary because of the scarcity of lunar samples for research purpose and the complexity of the lunar soil. At present, there are three main methods to simulate the lunar soil analogs with the np-Fe⁰ particles. Laboratory simulation of np-Fe⁰ production in lunar space weathering deserves a more realistic approach to model the production process of np-Fe⁰ in lunar soil. Combining

the formation and characteristics of np-Fe⁰ in lunar soil we discuss the feasibility of two new experimental methods which use microwave heating and magnetron sputtering to simulate np-Fe⁰ in the glass and on the grains surfaces respectively. Microwave heating can heat materials such as ilmenite which have a large dielectric loss to high temperature at a very fast heating rate which might be a good method to simulate the production of np-Fe⁰ in the glass phase by reducing ferrous materials to metallic iron. Magnetron sputtering technique is a physical vapor deposition technique which is similar to the deposition process of vapor deposition and sputtering deposition in lunar space weathering. The primary results of these two experimental simulations show that the characteristics of np-Fe⁰ produced in the simulations are in consistent with those of lunar samples documented in literature. Simulation of np-Fe⁰ is very important to remote sensing lunar science and lunar exploration.

Key words: Moon; Lunar soil; Space weathering; Nanophase iron; Simulation

研究发现北极海岸线每年后退数米

由于气候变化的影响,北极海岸线以每年 2 m 或更长的距离减退,部分地区的海岸线以每年 30 m 的速率消失。

一项由来自 10 个国家 30 多位科学家发表的新报告指出,快速的海岸线退化给区域群落和生态系统带来了严重威胁。专家认为,温度的升高导致了海岸防护冰带的融化,使它们更多地暴露于高温之下。

《2010 北极海岸现状》(State of the Arctic Coast 2010)报告指出:10 年平均海岸减退速率“一般在 1~2 m,但部分地区还可增至 10~30 m”。其中海岸线减退最大区域出现在波弗特海、东西伯利亚海及拉普捷夫海区域。

该项研究由来自德国研究中心亥姆霍茨协会(Helmholtz Association of German Research Centres)和国际北极科学委员会(International Arctic Science Committee IASC)的专家领导,相关研究成果已发表在《河口和海岸》(Estuaries and Coasts)期刊上。该研究收集了北极海岸 100 000 km 的信息。科学家强调,沿海区域是北极生物群落的主要栖息地,养育着大量鱼类、鸟类及约 5 亿的海鸟。

(赵 红 编译)

原文题目: Arctic Coastlines Recede by Several Metres a Year

来源: <http://www.independent.co.uk/environment/climate-change/arctic-coastlines-recede-by-several-metres-a-year2269232.html>