

基于 Apollo15 月壤和普通球粒与碳质球粒陨石模拟实验的太空风化特征产物成因分析

郇凯瑞^{1,2)}, 郭壮^{2,3)}, 李阳^{2,4,5)}, 刘燊¹⁾, 张鹏飞⁶⁾, 赵斯哲^{2,7)}, 李琛^{2,8)}, 唐红^{2,4)}, 庞荣华^{2,3)}

1) 西北大学地质学系, 陕西西安, 710069;

2) 中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心, 贵州贵阳, 550081;

3) 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京, 100049;

4) 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 安徽合肥, 230026;

5) 中国科学院地质与地球物理研究所地球与行星物理重点实验室, 北京, 100029;

6) 澳门科技大学月球与行星科学国家重点实验室, 澳门, 519020;

7) 桂林理工大学地球科学学院, 广西桂林, 541006;

8) 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南昆明, 650093

内容提要:月球、小行星等无大气行星体具有独特的反射光谱太空风化改造特征,其成因主要被归结于纳米级—亚微米级不透明颗粒等太空风化特征产物。本研究结合 Apollo 返回月壤样品、普通球粒和碳质球粒陨石样品的模拟实验结果,综合分析了太空风化特征产物的来源和成因,并讨论了其可能的光谱效应。研究表明, np-Fe⁰ (纳米级单质金属铁) 是铁镁硅酸盐等矿物经过微陨石轰击引起的气化沉积作用和原位还原作用形成。 np-FeNi (纳米级铁镍金属) 的成因主要包括 FeNi 金属和陨硫铁的气化沉积与冲击分散成因。 np-FeNiS (纳米级铁镍金属的硫化物) 和 sm-FeNiS (亚微米级铁镍金属的硫化物) 主要形成于陨硫铁的冲击分散过程。上述不透明颗粒是形成月球与 S 型小行星紫外—近红外波段光谱反射率降低、特征吸收峰减弱和连续统红移等特征的主要原因。气泡结构主要形成于层状硅酸盐等矿物在微陨石轰击过程中的挥发分逃逸,推测是含水量较高的小行星(如 Bennu) 紫外—近红外波段光谱反射率增加和连续统蓝移等特征的主要成因。实验结果预期对月球与小行星返回样品分析及反射光谱的太空风化改造特征的解释提供一定的参考。

关键词:月壤;小行星;太空风化;纳米级单质金属铁;反射光谱

太空风化(Space weathering)是指无大气行星体在空间环境作用下,其表面物质发生物理和化学的改变,主要包括陨石、微陨石撞击引起的物质破碎、熔融、胶结、气化和沉积,以及太阳风、太阳耀斑和宇宙射线等空间辐射作用引起的矿物非晶化和太阳辐射引起的热效应(Pieters et al., 2016)。研究表明,太空风化作用能够显著改造无大气行星体表面光谱特征,主要造成紫外—近红外波段光谱反

射率、斜率变化以及特征吸收深度减弱等效应(Hapke, 2001)。其中,纳米—亚微米级金属颗粒的形成以及硅酸盐矿物的非晶化被认为是造成光谱改造的主要因素(Keller et al., 1997; Pieters et al., 2016)。由于月球、小行星等无大气行星体的物质组成和所处的空间环境存在差异,各天体上发生的太空风化作用机制和光谱效应也存在不同。因此,研究无大气行星体的太空风化特征产物并探究其形成

注:本文为国家自然科学基金重点项目(编号 41931077),面上项目(编号 41673071);中国科学院青年创新促进会(编号 2020395);国家国防科技工业局民用航天技术预先研究课题(编号 D020201);中国科学院太空制造技术重点实验室开放基金(编号 CAS-SMT-202001);中国科学院地球与行星物理重点实验室开放课题等资助成果。

收稿日期:2021-05-07;改回日期:2021-07-19;网络发表日期:2021-08-11;责任编辑:蔡志慧。

作者简介:郇凯瑞,女,1997年生。在读硕士研究生,主要从事无大气行星体太空风化作用研究。E-mail:taikairui@mail.gyig.ac.cn。

通讯作者:李阳,男,1984年生。博士,主要从事月球与行星科学研究。E-mail:liyong@mail.gyig.ac.cn。

引用本文:郇凯瑞,郭壮,李阳,刘燊,张鹏飞,赵斯哲,李琛,唐红,庞荣华. 2021. 基于 Apollo15 月壤和普通球粒与碳质球粒陨石模拟实验的太空风化特征产物成因分析. 地质学报, 95(9): 2857~2865, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021285.

Tai Kairui, Guo Zhuang, Li Yang, Liu Shen, Zhang Pengfei, Zhao Sizhe, Li Chen, Tang Hong, Pang Ronghua. 2021. Formation mechanisms of space weathering products: Apollo lunar soil and simulation experimental study by ordinary and carbonaceous chondrites. Acta Geologica Sinica, 95(9): 2857~2865.

机理,对研究其表面物质演化规律具有重要意义,并能够为遥感光谱数据的准确解译提供参考依据。

目前对于太空风化作用的认识,主要基于月球和S型小行星(Eros, Itokawa等)的研究结果。月船一号等探测器在月球上观测到成熟月壤与撞击坑新鲜抛射物相比,具有紫外-近红外波段光谱反射率明显降低,吸收峰减弱和连续统红移的特征(Hapke, 2001; Pieter et al., 2016)。Rendezvous-Shoemaker探测器对433 Eros(爱神星,S型)的探测结果也表明S型小行星具有类似的太空风化反射光谱改造特征,因此被统称为“月球模式”(Chapman et al., 2004; Hiroi et al., 2006)。相比之下,碳质小行星的太空风化反射光谱改造特征更为复杂,具体表现为:随着空间暴露年龄的增加,较为干燥的碳质小行星(如 Ryugu)表层物质的紫外-近红外波段反射光谱呈现连续统红移的特征(Kitazato et al., 2019),而挥发分含量较高的碳质小行星(如 Bennu)表层物质则呈现连续统蓝移的特征(Hamilton et al., 2019; Lauretta et al., 2019)。由于缺少返回样品的研究结果,目前碳质小行星表层物质中太空风化特征产物的种类以及反射光谱改造特征的成因尚未有明确的结论。

根据 Apollo 月壤和 Itokawa 返回样品的研究结果,太空风化成因的纳米级单质金属铁颗粒(np-Fe⁰, Nanophase iron particles)以及纳米-亚微米级 FeNi 金属和硫化物等不透明矿物颗粒(np-FeNi, np-FeNiS 和 sm-FeNiS)分别是引起月球和 S 型小行星太空风化反射光谱改造特征的主要原因(Keller et al., 1997; Noguchi et al., 2011)。大量的返回样品、陨石和地面模拟实验的研究结果表明,在微陨石轰击过程中,橄榄石、辉石等铁镁硅酸盐矿物的气化沉积以及原位还原分解过程是形成 np-Fe⁰的主要机制(Keller et al., 1997; Noble et al., 2007; Wang Kun et al., 2012; Guo Zhuang et al., 2020)。而铁纹石、镍纹石及陨硫铁等在微陨石轰击过程中的分散、气化、沉积等过程是形成 np-FeNi(纳米级铁镍金属颗粒)、np-FeNiS(纳米级铁镍金属硫化物颗粒)和 sm-FeNiS(亚微米级铁镍金属硫化物颗粒)的主要原因。与月球和 S 型小行星显著不同,碳质小行星的主要组成矿物为层状硅酸盐、碳酸盐和磁铁矿等水成矿物以及少量的有机物(Hamilton et al., 2019; Lauretta et al., 2019; Kaplan et al., 2020; Simon et al., 2020),因此不能通过传统的太空风化“月球模式”对碳质小行星的

光谱改造特征进行解释。

目前,大量研究结果证明地面模拟实验是认识无大气行星体太空风化作用过程的有效途径,包括依托脉冲激光器模拟微陨石轰击作用(Sasaki et al., 2001; Matsuoka et al., 2015, 2020; Loeffler et al., 2016; Thompson et al., 2019, 2020; Prince et al., 2020; Weber et al., 2020; Alemanno et al., 2020; King et al., 2021),依托离子注入机模拟太阳风辐射作用(Yamada et al., 1999; Fulvio et al., 2012; Fu Xiaohui et al., 2012; Brunetto et al., 2005; Marchi et al., 2005; Strazzulla et al., 2005; Loeffler et al., 2009; Li Yang et al., 2013; Zeng Xiandi et al., 2021)以及依托周期循环温差实验模拟热疲劳作用等(Delbo et al., 2014)。本研究在 Apollo 月壤样品分析基础上,结合普通球粒陨石和碳质球粒陨石的微陨石轰击模拟实验结果,系统分析了月球、S型和碳质小行星的太空风化特征产物形成机制的差异。

1 样品与实验方法

本次研究中,月壤样品选用 Apollo 15005.14 月壤钻孔颗粒样品,采用单颗粒超薄切片技术(Xu Yuchen et al., 2018)制备成厚度小于 100 nm 的超薄切片用于透射电镜分析。S型以及碳质小行星样品的研究分别选用对应的普通球粒陨石 Huaxi(H5, W0)以及碳质球粒陨石 Murchison(CM2, W0)。为排除地球环境污染的干扰,所选样品均为降落型陨石。样品前处理采用金刚石线切割及 2000 目金刚石研磨抛光。

太空风化模拟实验在中国科学院地球化学研究所搭建的地面模拟实验平台完成。该平台包括脉冲激光器和超高真空表面分析系统。实验选用激光波长 532 nm,脉冲时间 6 ns,单次脉冲能量 30 mJ,激光束斑直径 1 mm,实验真空度 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ Pa。陨石样品轰击前后的形貌与成分分析以及聚焦离子束制样依托中国科学院地球化学研究所 FEI Scios 双束扫描电镜(FIB/SEM, Dual Beam Scanning Electron Microscope)完成,该设备配置热场扫描电镜、Ga 离子枪、二次电子探头、背散射探头以及 EDAX ELECT SUPER 70 mm²能谱仪。电子束分析选用加速电压 15 kV,束流 0.8 nA,工作距离 7 mm;Ga 离子束切割、减薄、抛光分别选用加速电压 30 kV、5 kV、2 kV,对应离子束流 7 nA、48 pA、43 pA,最终减薄至厚度约为 100 nm。月壤单颗粒超

薄切片加工依托中国科学院地球化学研究所 Power Tome XL 超薄切片机完成。月壤颗粒和陨石的显微结构与成分分析在中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所的 FEI Talos F200X 场发射透射电镜 (Transmission Electron Microscope, TEM) 完成。实验采用分析电压 200 kV, 工作内容包括高分辨率透射成像 (High Resolution Transmission Electron Microscopy, HRTEM)、高角环形暗场成像 (High Angle Annular Dark Field, HAADF)、选区电子衍射成像 (Selected Area Electron Diffraction, SAED) 以及能谱面扫描 (Mapping, Energy Dispersive Spectrometer Mapping, EDS) 分析。

2 实验结果

2.1 Apollo 15005. 14 月壤颗粒

Apollo 15 采样点位于雨海盆地 (3. 85 Ga) 东缘, 基底玄武岩年龄约为 3. 3 Ga。Apollo 15 钻孔总深度为 242 cm, 其中 15005. 14 取样深度约为 75 ~ 80 cm, 该深度月壤中胶结质玻璃含量约为 30%, 成熟度指标 $I_s/FeO \approx 33$ (Heiken et al., 1976), 为亚成熟型月海月壤。根据 Heiken et al. (1976) 分析结果, Apollo 15005 钻孔样品中熔融胶结物的含量介于 24% ~ 34%, 辉石 (单斜辉石 + 斜方辉石) 含量为 26. 6% ~ 40%, 斜长石含量为 8% ~ 10%, 另有极少量橄榄石颗粒 (Heiken et al., 1976)。本研究中通过 Apollo 15005. 14 月壤钻孔样品的单颗粒超薄切片制备和透射电镜观察, 共识别出橄榄石、斜长石和熔融玻璃各 1 颗, 其中分布有不同粒径和形态的 np-Fe⁰ (图 1)。

Apollo 15005. 14 月壤样品中橄榄石颗粒母体为结晶质, 而颗粒边缘为非晶质, 并含有 np-Fe⁰, 其平均粒径约为 5 nm 且颗粒形态较为不规则 (图 1 a ~ c)。胶结质玻璃的内部与边缘均分布有 np-Fe⁰, 平均粒径 > 10 nm 且颗粒形态为较规则圆形 (图 1 d ~ f)。斜长石颗粒母体为结晶质, 颗粒边缘为非晶质, 同样分布有 np-Fe⁰, 粒径范围 5 ~ 10 nm 且颗粒形态较为不规则 (图 1 g ~ i)。

2.2 普通球粒陨石与碳质球粒陨石太空风化地面模拟实验结果

Huaxi (花溪) 陨石为 H5 型普通球粒陨石, 2010 年降落于贵州省贵阳市花溪区。该陨石主要组成矿物包括: 橄榄石 (Fa_{19.6})、低钙辉石 (WoEnFs_{17.0})、高钙辉石 (WoEnFs)、铁纹石、镍纹石以及陨硫铁, 此外含有少量铬铁矿与磷灰石 (Li Shijie et al.,

2017)。Huaxi 陨石中的铁纹石、镍纹石以及陨硫铁为亚微米-微米粒径, 最大粒径可达 200 μm (Li Shijie et al., 2017), 这几种矿物在激光轰击过程中发生熔融溅射形成 FeNi 和 FeS 微粒。图 2a、b 中展示了 Huaxi 普通球粒陨石表面冲击分散的纳米-亚微米级的 FeNi 和 FeS 颗粒以及熔融物中分布的 np-Fe⁰。图 2c、d 则清楚地展示了原位还原与气化沉积成因单质金属铁, 图 2c 中 np-Fe⁰ 主要分布于橄榄石颗粒表层熔融层的底部, 斜长石表层熔融层中则没有 np-Fe⁰ 分布; 图 2d 和图 3 中 np-Fe⁰ 分为两层, 上部厚度约为 5 ~ 15 nm 的 np-Fe⁰ 分布于低钙辉石与斜长石颗粒表层熔融层中, 下部厚度约为 40 nm 的 np-Fe⁰ 只分布于低钙辉石表层熔融层的底部; 图 2e 中 np-Fe⁰ 主要分布于低钙辉石表层熔融层的底部。

Murchison 为 CM2 型碳质球粒陨石, 于 1969 年降落在澳大利亚维多利亚州。其主要组成物质包括: 以蛇纹石等层状硅酸盐为主的基质 73. 4%、水 12. 0%、橄榄石、低钙辉石、高钙辉石和少量金属和硫化物, 与 B 型小行星 (如 Bennu) 主要组成物质相似 (Hamilton et al., 2019; Laurretta et al., 2019; Fendrich et al., 2021)。与 Apollo 15005. 14 月壤和 Huaxi 普通球粒陨石不同, Murchison 碳质球粒陨石在经受脉冲激光轰击之后, 表面形成了熔融层、密集的气泡和一定量的 np-Fe⁰ 与 np-FeNi。图 2f、g 中 Murchison 碳质球粒陨石在经受轰击之后, 表面形成熔融层, 挥发分逃逸导致出现大量微米尺度的破裂气泡, 并且有 sm-FeNiS 溅射分布在样品表面。图 2h、i 为基质非晶层的聚焦离子束切片, 可见表面溅射分布的 FeNiS 颗粒、np-FeNi 和气泡结构, 图 2j 中橄榄石的聚焦离子束切片的非晶层中有大量粒径约 10 nm 的 np-Fe⁰。

3 讨论

Apollo15005. 14 月壤样品和激光轰击后的 Huaxi 普通球粒陨石及 Murchison 碳质球粒陨石中的太空风化特征产物主要包括 np-Fe⁰、np-FeNi、np-FeNiS、sm-FeNiS 和气泡结构。

np-Fe⁰ 分布于 Apollo15005. 14 月壤样品和 Huaxi 普通球粒陨石样品中的表面熔融层环带及胶结质中, 并在铁镁硅酸盐矿物表面的非晶层中形成明显的分层结构。粒径较小的 np-Fe⁰ 分布于矿物 (橄榄石, 辉石, 斜长石) 表面非晶层的上部 (图 2 和图 3), 往往被认为形成于 Fe²⁺ 在高温气化条件下,

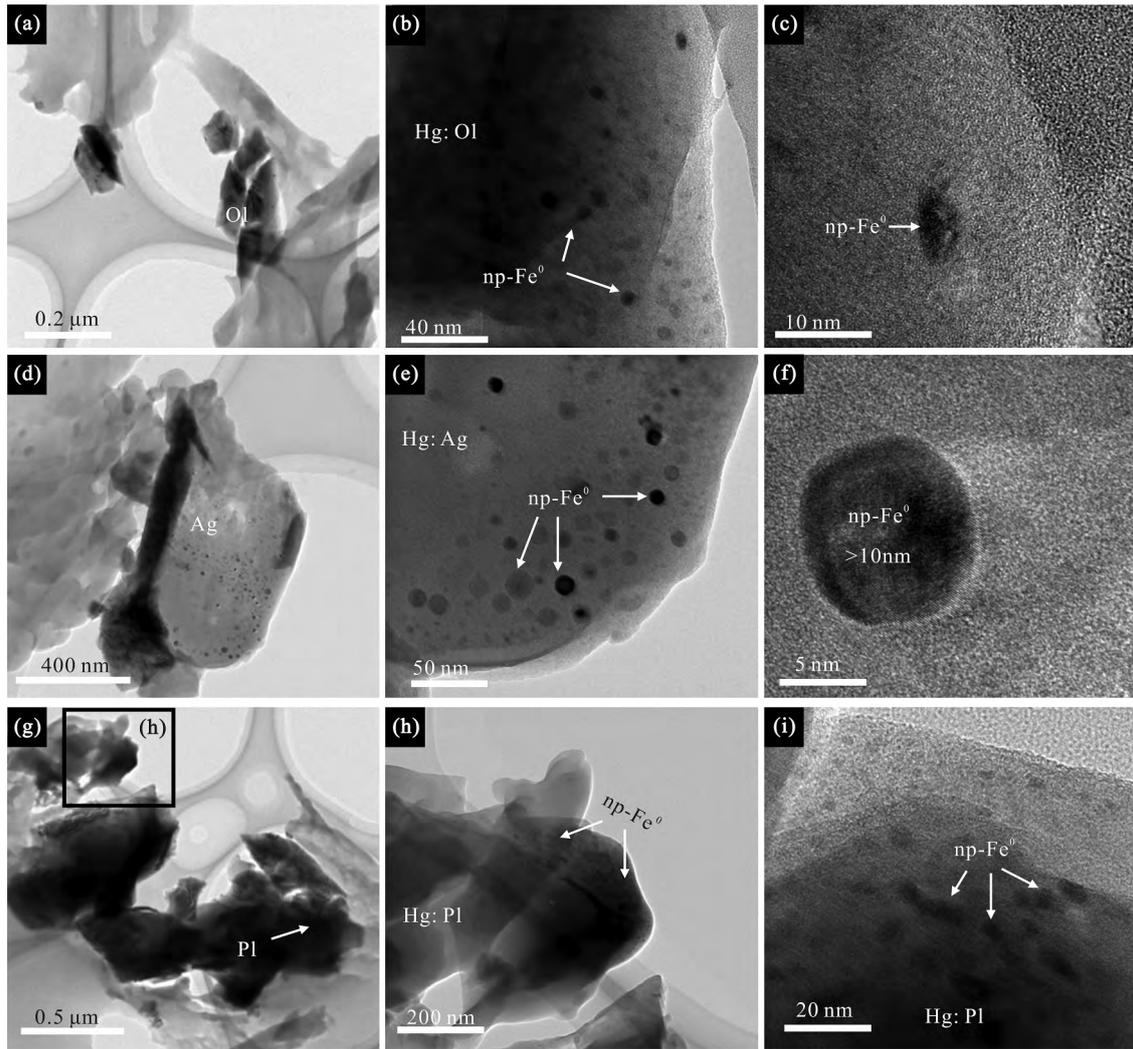


图1 Apollo 15005, 14月壤颗粒超薄切片的透射电镜图像

Fig. 1 TEM images of Apollo 15005, 14 lunar drill soil grains prepared by diamond ultramicrotome

(a)~(c)—Apollo 15005, 14月壤中橄榄石颗粒及太空风化成因 np-Fe⁰的透射电镜成像, np-Fe⁰主要分布于橄榄石颗粒的表层, 平均粒径<5 nm, 形状较为不规则; (d)~(f)—月壤中胶结质玻璃颗粒及其中 np-Fe⁰的透射电镜成像, np-Fe⁰分布于胶结玻璃颗粒的表层及内部, 平均粒径约 10 nm, 为较规则的圆形; (g)~(i)—月壤中斜长石颗粒及其中的 np-Fe⁰的透射电镜成像, np-Fe⁰主要分布于斜长石颗粒的表层, 平均粒径<5 nm, 形状较为不规则; Hg—主体颗粒; Ol—橄榄石; Ag—胶结质玻璃; np-Fe⁰—纳米级金属铁颗粒; Pl—斜长石

(a)~(c)—np-Fe⁰ embedded in the top surface amorphous layer of olivine grains and with irregular grain shape, average particle diameter < 5 nm; (d)~(f)—np-Fe⁰ embedded in the agglutinitic glass particle and with regular grain shape, average particle diameter ≈ 10 nm; (g)~(i)—np-Fe⁰ distributed in the top surface amorphous layer of plagioclase grains with irregular particle shape, average particle diameter < 5 nm; Hg—host grain; Ol—olivine; Ag—agglutinitic glass; np-Fe⁰—nanophase iron particles; Pl—plagioclase

被自由电子还原成单质铁而进一步聚集, 具有气化沉积的成因特征 (Anand et al., 2004; Wang Kun et al., 2012)。粒径较大的 np-Fe⁰ 普遍位于非晶层下部及胶结质中, 且仅分布于铁镁硅酸盐矿物上部 (图 1, 图 2 和图 3), 指示其形成于微陨石轰击过程中引起的铁镁硅酸盐矿物的原位熔融还原

(Moortèle et al., 2007; Guo Zhuang et al., 2020)。

除 np-Fe⁰ 之外, 激光轰击后的 Huaxi 普通球粒陨石及 Murchison 碳质球粒陨石中相同的太空风化特征产物包括 np-FeNi, np-FeNiS 和 sm-FeNiS。np-FeNi 的成因机制被认为是来自于母岩中原有的

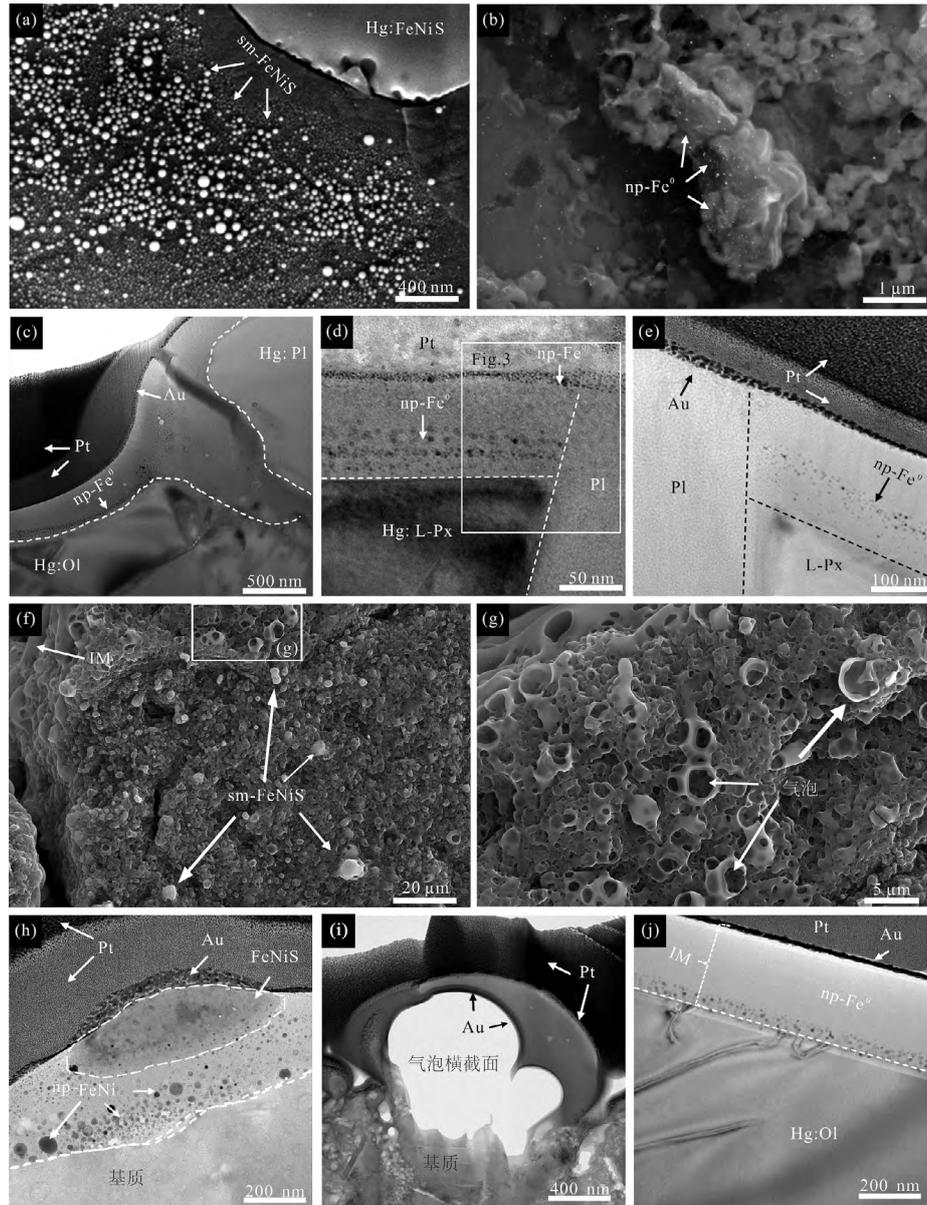


图 2 Huaxi 普通球粒陨石 (H5) 和 Murchison 碳质球粒陨石 (CM2) 经受脉冲激光模拟微陨石轰击后的扫描电镜背散射图像 (Backscatter Electron Image, BSE) 以及聚焦离子束 (Focus Ion Beam, FIB) 切片的透射电镜分析结果

Fig. 2 Back-scattered Electron (BSE) images of ordinary chondrite (Huaxi, H5), carbonaceous chondrite (Murchison, CM2) irradiated by nano-second pulse laser as well as the TEM and HRTEM observation results of the ultra-thin films prepared by FIB

(a)、(b) — 普通球粒陨石 Huaxi 表面分布的冲击分散成因纳米-亚微米级的 FeNi 和 FeS 颗粒以及熔融物中分布的还原成因 np-Fe⁰; (c)、(e) — Huaxi 普通球粒陨石表层原位还原和蒸发沉积成因的 np-Fe⁰; (f)、(g) — Murchison 碳质球粒陨石表面熔融物的二次电子成像 (Secondary Electron Image, SEI), 可见分布 sm-FeNiS 和亚微米级粒径的气泡结构; (h) — Murchison 碳质球粒陨石基质表面溅射的 np-FeNi 和 FeNiS 颗粒; (i) — Murchison 的基质表层分布有熔融层与气泡结构; (j) — Murchison 陨石中的橄榄石颗粒表层分布有熔融层及还原成因 np-Fe⁰; Hg — 主体颗粒; sm-FeNiS — 亚微米级 FeNiS 颗粒; np-Fe⁰ — 纳米级单质金属铁颗粒; Pt — 沉积的铂; Au — 溅射的金; Pl — 斜长石; Ol — 橄榄石; L-Px — 低钙辉石; IM — 冲击熔融

(a), (b) — Sputtered sm-FeNiS on the surface of Huaxi ordinary chondrite (H5) and np-Fe⁰ reduced during the formation of impact melts; (c)~(e) — np-Fe⁰ discovered in the surface melt layer of olivine and low-calcium pyroxene grain; (f), (g) — impact melts, bubbles and sputtered sm-FeNiS on the surface of Murchison carbonaceous chondrite (CM2); (h) — sputtered np-FeNi and FeNiS on the surface layer of matrix of Murchison carbonaceous chondrite; (i) — cross section of bubble made by evaporation of volatiles during the irradiation of nanosecond pulse laser of Murchison; (j) — np-Fe⁰ discovered on the bottom of melt layer on the top surface of olivine of Murchison; Hg — host grain; sm-FeNiS — sub-micron FeNiS particles; np-Fe⁰ — nanophase iron particles; Pt — deposited platinum; Au — sputtered gold; Pl — plagioclase; Ol — olivine; L-Px — low calcium pyroxene; IM — impact melt

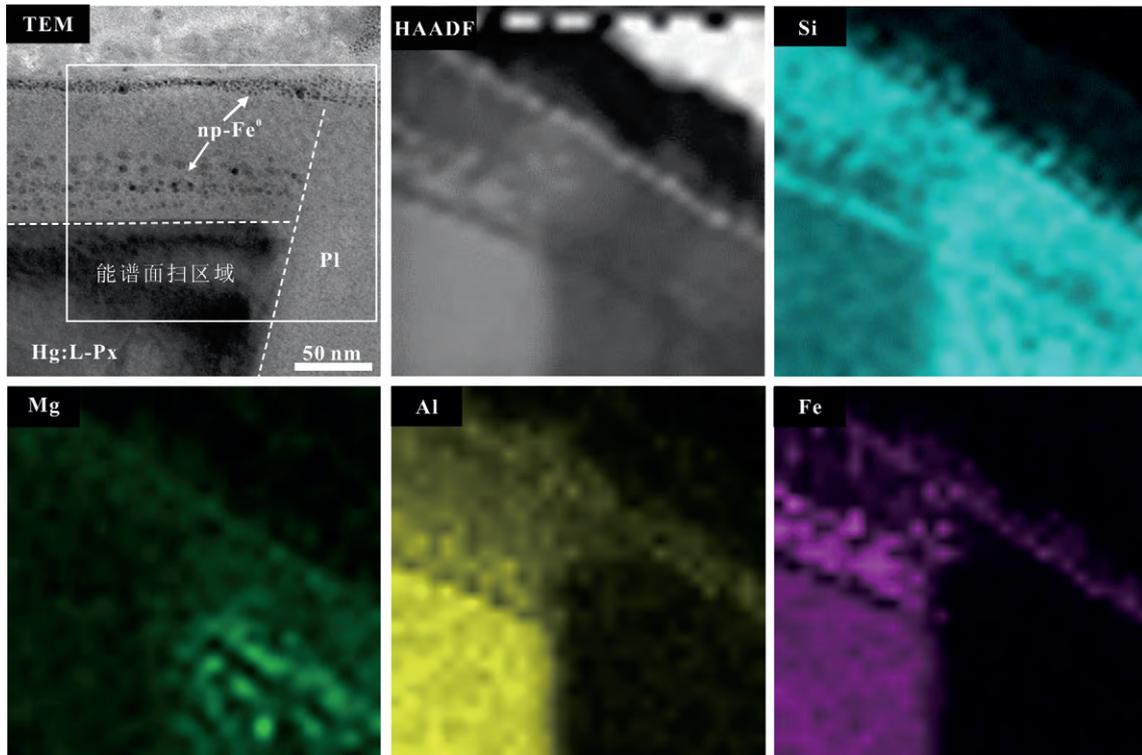


图3 Huaxi普通球粒陨石的透射电镜的能谱面扫描结果(对应区域顺时针旋转 30°)

Fig. 3 TEM and EDS mapping analysis results of Huaxi ordinary chondrite (the corresponding region with 30° clockwise rotation)

结合透射电镜图和能谱图中的信息,可以清楚地看到低钙辉石与斜长石颗粒表面熔融层中分布两层 $np\text{-Fe}^0$,包括上层的蒸发沉积成因的 $np\text{-Fe}^0$ 和下层的原位还原形成的 $np\text{-Fe}^0$;Hg—主体颗粒;L-Px—低钙辉石;Pl—斜长石; $np\text{-Fe}^0$ —纳米级金属铁颗粒
The TEM and EDS mapping images clearly show two layers of $np\text{-Fe}^0$ in the melting layer on the surface of low calcium pyroxene and plagioclase particles, including the top layer of $np\text{-Fe}^0$ caused by evaporation deposition and the bottom layer of $np\text{-Fe}^0$ formed by in-situ reduction of ferric ions in L-Px; Hg—host grain; L-Px—low calcium pyroxene; Pl—plagioclase; $np\text{-Fe}^0$ —nanophase iron particles

FeNi 金属的冲击分散和 FeNiS 中硫元素的蒸发逃逸(Fendrich et al., 2021)。 $np\text{-FeNiS}$ 和 $sm\text{-FeNiS}$ 主要形成于微陨石轰击过程中陨硫铁等硫化物的冲击分散作用。

前人研究表明,不透明颗粒($np\text{-Fe}^0$ 、 $np\text{-FeNi}$ 、 $np\text{-FeNiS}$ 和 $sm\text{-FeNiS}$)的粒径是影响月球和 S 型小行星紫外-近红外波段反射光谱特征的主要因素。其中,较小粒径(1~15 nm)的不透明颗粒是引起反射率降低和连续统红移的主要因素,较大粒径(>40 nm)的不透明颗粒是引起反射率降低的主要因素,与月球和 S 型小行星实际光谱遥感和返回样品分析的结果相符(Britt et al., 1994; Binzel et al., 1996; Keller et al., 1998; Noble et al., 2007; Noguchi et al., 2011; Fu Xiaohui et al., 2012; Pieters et al., 2016)。

气泡结构仅出现在模拟微陨石轰击后的 Murchison 碳质球粒陨石表面,本研究认为气泡结

构的形成与 Murchison 陨石中挥发分的富集有关。气泡的形成过程是激光轰击导致陨石表面物质形成熔融层,次表层中层状硅酸盐等矿物的挥发分受热形成气体,在真空环境的逃逸过程中聚集在熔融层中形成气泡。在高温条件下,Murchison 陨石中逸出的挥发分会影响体系的温度和还原环境,进而抑制了 $np\text{-Fe}^0$ 的形成。

实际探测结果表明,挥发分含量较高的碳质小行星(如 Benu, Ceres 等)表层物质具有紫外-近红外波段光谱反射率增加和连续统蓝移的太空风化改造特征(Hamilton et al., 2019; Lauretta et al., 2019)。基于本研究发现,推测微陨石轰击模拟后的 Murchison 陨石中独有的气泡结构可能是导致含水量较高的小行星光谱反射率增加和连续统蓝移的主要原因。本研究中的实验结果也证明,Murchison 碳质球粒陨石中水蚀变残留的橄榄石能够在太空风化改造过程中形成 $np\text{-Fe}^0$ 。因此,在水含量较低的

碳质小行星表面(如 Ryugu 等),太空风化作用过程依然可以形成一定量的 $np\text{-Fe}^0$,这可能是水含量较低的碳质小行星呈现光谱红移特征的主要原因。

当前,我国嫦娥五号任务已完成月球样品采样返回,小行星探测也已列入计划中。本研究对我国嫦娥五号月壤样品,以及后续小行星返回样品的分析和反射光谱太空风化改造特征的解译具有一定的参考价值。

4 结论

本研究综合了 Apollo 15005.14 月壤钻孔样品、脉冲激光模拟微陨石改造后的 Huaxi 普通球粒陨石(H5)和 Murchison 碳质球粒陨石(CM2)的微区分析结果,重点分析了 $np\text{-Fe}^0$ 、 $np\text{-FeNi}$ 、 $np\text{-FeNiS}$ 、 $sm\text{-FeNiS}$ 以及气泡结构等太空风化特征产物的形成机理以及不同类型陨石样品之间的差别,结论如下:

(1) $np\text{-Fe}^0$ 是铁镁硅酸盐等矿物经过微陨石轰击引起的气化沉积作用和原位还原作用形成。 $np\text{-FeNi}$ 的成因主要包括 FeNi 金属和陨硫铁的气化沉积与冲击分散。 $np\text{-FeNiS}$ 和 $sm\text{-FeNiS}$ 形成于陨硫铁的冲击分散过程。

(2)气泡结构主要形成于层状硅酸盐等矿物在微陨石轰击过程中的挥发分逃逸,推测是含水量较高的小行星(如 Bennu)紫外-近红外波段光谱反射率增加和连续统蓝移等特征的主要成因。此外,未蚀变的橄榄石等铁镁硅酸盐矿物在太空风化作用下形成一定量的 $np\text{-Fe}^0$,这可能是引起含水量较低的碳质小行星(如 Ryugu)紫外-近红外波段连续统红移的原因。

致谢:Apollo 15005.14 月壤样品由中国科学院地质与地球物理研究所林杨挺研究员提供。感谢中国科学院地球化学研究所李瑞、文愿运、莫冰工程师在电镜分析、制样以及模拟实验过程中提供的帮助。

References

Alemanno G, Maturilli A, Helbert J, D'Amore M. 2020. Laboratory studies on the $3\ \mu\text{m}$ spectral features of Mg-rich phyllosilicates with temperature variations in support of the interpretation of small asteroid surface spectra. *Earth and Planetary Science Letters*, 546: 116424.

Anand M, Taylor L A, Nazarov M A, Shu J, Mao H K, Hemley R J. 2004. Space weathering on airless planetary bodies: clues from the lunar mineral hapkeite. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(18): 6847~6851.

Binzel R P, Bus S J, Burbine T H, Sunshine J M. 1996. Spectral properties of Near-Earth Asteroids: evidence for sources of ordinary chondrite meteorites. *Science*, 273: 946~948.

Britt D T, Pieters C M. 1994. Darkening in black and gas-rich ordinary chondrites: the spectral effects of opaque morphology and distribution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(18): 3905~3919.

Brunetto R, Strazzulla G. 2005. Elastic collisions in ion irradiation experiments: a mechanism for space weathering of silicates. *Icarus*, 179(1): 265~273.

Chapman C R. 2004. Space weathering of asteroid surfaces. *Annual Review of Earth & Planetary Science*, 32: 539~567.

Delbo M, Libourel G, Wilkerson J, Murdoch N, Michel P, Ramesh K T, Ganino C, Verati C, Marchi S. 2014. Thermal fatigue as the origin of regolith on small asteroids. *Nature*, 508 (7495): 233~236.

Fendrich K V, Ebel D S. 2021. Comparison of the Murchison CM2 and Allende CV3 chondrites. *Meteoritics & Planetary Science*, 56(1): 77~95.

Fu Xiaohui, Zou Yongliao, Zheng Yongchun, Ouyang Ziyuan. 2012. Effects of space weathering on diagnostic spectral features: results from He^+ irradiation experiments. *Icarus*, 219 (2): 630~640.

Fulvio D, Brunetto R, Vernazza P, Strazzulla G. 2012. Space weathering of Vesta and V-type asteroids: new irradiation experiments on HED meteorites. *Astronomy & Astrophysics*, 537: L11.

Guo Zhuang, Li Yang, Liu Shen, Xu Huifang, Xie Zhidong, Li Shijie, Li Xiongyao, Lin Yangting, Ian M C, Zhang Mingming. 2020. Discovery of nanophase iron particles and high pressure clinoenstatite in a heavily shocked ordinary chondrite: implications for the decomposition of pyroxene. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 272: 276~286.

Hamilton V E, Simon A A, Christensen P R, Reuter D C, Clark B E, Barucci M A, Bowles N E, Boynton W V, Brucato J R, Cloutis E A, Connolly H C Jr., Hanna K L D, Emery J P, Enos H L, Fornasier S, Haberle C W, Hanna R D, Howell E S, Kaplan H H, Keller L P, Lantz C, Li J Y, Lim L F, McCoy T J, Merlin F, Nolan M C, Praet A, Rozitis B, Sandford S A, Schrader D L, Thomas C A, Zou X D, Lauretta D S, OSIRIS-REx Team. 2019. Evidence for widespread hydrated minerals on asteroid (101955) Bennu. *Nature Astronomy*, 3(4): 332~340.

Hapke B. 2001. Space weathering from Mercury to the asteroid belt. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106 (E5): 10039~10073.

Heiken G H, Morris R V, McKay D S, et al. 1976. Petrographic and ferromagnetic resonance studies of the Apollo 15 deep drill core. *Lunar and planetary science conference proceedings*, 7: 93~111.

Hiroi T, Abe M, Kitazato K, Abe S, Clark B E, Sasaki S, Ishiguro M, BarnouinJha O S. 2006. Developing space weathering on the asteroid 25143 Itokawa. *Nature*, 443(7107): 56~58.

Kaplan H H, Lauretta D S, Simon A A, Hamilton V E, DellaGiustina, Golish D R, Reuter D C, Bennett C A, Burke K N, Campins H, Connolly Jr. H C, Dworkin J P, Emery J P, Glavin D P, Glotch T D, Hanna R, Ishimaru K, Jawin E R, McCoy T J, Porter N, Sandford S A, Ferrone S, Clark B E, Li J Y, Zou X D, Daly M G, Barnouin O S, Seabrook J A, Enos H L. 2020. Bright carbonate veins on asteroid (101955) Bennu: implications for aqueous alteration history. *Science*, 370 (6517): eabc3557.

Keller L P, McKay D S. 1997. The nature and origin of rims on lunar soil grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(11): 2331~2341.

Keller L, Wentworth S, McKay D S. 1998. Space weathering: Reflectance spectroscopy and TEM analysis of individual lunar soil grains. *Lunar and Planetary Science Conference*, 1762.

King A J, Schofield P F, Russell S S. 2021. Thermal alteration of CM carbonaceous chondrites: mineralogical changes and metamorphic temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 298: 167~190.

- Kitazato K. 2019. The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa2 near-infrared spectroscopy. *Science*, 364(6437): 272~275.
- Lauretta D S, DellaGiustina D N, Bennett C A, Golish D R, Becker K J, Balram-Knutson S S, Barnouin O S, Becker T L, Bottke W F, Boynton W V, Campins H, Clark B E, Connolly H C, Jr., Drouot d'Aubigny C Y, Dworkin J P, Emery J P, Enos H L, Hamilton V E, Hergenrother C W, Howell E S, Izawa M R M, Kaplan H H, Nolan M C, Rizk B, Roper H L, Scheeres D J, Smith P H, Walsh K J, Wolner C W V, OSIRIS-REx Team. 2019. The unexpected surface of asteroid (101955) Bennu. *Nature*, 568 (7750): 55~60.
- Li Shijie, Wang Shijie, Ingo L, Li Yang, Li Xiongyao, Thoms S. 2017. Petrology, mineralogy, porosity, and cosmic-ray exposure history of Huaxi ordinary chondrite. *Meteoritics & Planetary Science*, 52: 937~948.
- Li Yang, Li Xiongyao, Wang Shijie, Li Shijie, Tang Hong, Ian M C. 2013. Crystal orientation results in different amorphization of olivine during solar wind implantation. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118: 1974~1982.
- Loeffler M J, Dukes C A, Baragiola R A. 2009. Irradiation of olivine by 4 keV He⁺: Simulation of space weathering by the solar wind. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 114: E03003.
- Loeffler M J, Dukes C A, Christoffersen R, Baragiola R A. 2016. Space weathering of silicates simulated by successive laser irradiation: in situ reflectance measurements of Fo₉₀, Fo₉₉₊, and SiO₂. *Meteoritics & Planetary Science*, 51(2): 261~275.
- Marchi S, Brunetto R, Magrin S, Lazzain M, Gandolfi D. 2005. Space weathering of near-Earth and main belt silicate-rich asteroids: observations and ion irradiation experiments. *Astronomy & Astrophysics*, 443(3): 769~775.
- Matsuoka M, Nakamura T, Hiroi T, Okumura S, Sasaki S. 2020. Space weathering simulation with low-energy laser irradiation of Murchison CM chondrite for reproducing micrometeoroid bombardments on C-type asteroids. *The Astrophysical Journal*, 890(2): L23.
- Matsuoka M, Nakamura T, Kimura Y, Hiroi T, Nakamura R, Okumura S, Sasaki S. 2015. Pulse-laser irradiation experiments of Murchison CM2 chondrite for reproducing space weathering on C-type asteroids. *Icarus*, 254: 135~143.
- Moortèle B V, Reynard B, Rochette P, Jackson M, Beck P, Gillet P, McMillan P F, McCammon C A. 2007. Shock-induced metallic iron nanoparticles in olivine-rich Martian meteorites. *Earth and Planetary Science Letters*, 262: 37~49.
- Noble S K, Pieters C M, Keller L P. 2007. An experimental approach to understanding the optical effects of space weathering. *Icarus*, 192(2): 629~642.
- 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. Incipient space weathering observed on the surface of Itokawa dust particles. *Science*, 333 (6046): 1121~1125.
- Pieters C M, Noble S K. 2016. Space weathering on airless bodies. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 121 (10): 1865~1884.
- Prince B S, Magnuson M P, Chaves L C, Thompson M S, Loeffler M J. 2020. Space weathering of FeS induced via pulsed laser irradiation. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125 (5): e2019JE006242.
- Sasaki S, Nakamura K, Hamabe Y, Kurahashi E, Hiroi T. 2001. Production of iron nanoparticles by laser irradiation in a simulation of lunar-like space weathering. *Nature*, 410 (6828): 555~557.
- Simon A A, Kaplan H H, Hamilton V E, Lauretta D S, Campins H, Emery J P, Barucci M A, DellaGiustina D N, Reuter D C, Sandford S A, Golish D R, Lim L F, Ryan A, Rozitis B and Bennett C A. 2020. Widespread carbon-bearing materials on near-earth asteroid (101955) Bennu. *Science*, 370 (6517).
- Strazzulla G, Dotto E, Binzel R, Brunetto R, Barucci M A, Blanco A, Orfino V. 2005. Spectral alteration of the meteorite Epinal (H5) induced by heavy ion irradiation: a simulation of space weathering effects on near-Earth asteroids. *Icarus*, 174(1): 31~35.
- Thompson M S, Loeffler M J, Morris R V, Keller L P, Christoffersen R. 2019. Spectral and chemical effects of simulated space weathering of the Murchison CM2 carbonaceous chondrite. *Icarus*, 319: 499~511.
- Thompson M S, Morris R V, Clemett S J, Loeffler M J, Trang D, Keller L P, Christoffersen R, Agresti D G. 2020. The effect of progressive space weathering on the organic and inorganic components of a carbonaceous chondrite. *Icarus*, 346: 113775.
- Wang Kun, Frederic M, Frank A P, Julien F. 2012. An iron isotope perspective on the origin of the nanophase metallic iron in lunar regolith. *Earth and Planetary Science Letters*, 337: 17~24.
- 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. Space weathering by simulated micrometeorite bombardment on natural olivine and pyroxene: a coordinated IR and TEM study. *Earth and Planetary Science Letters*, 530: 115884.
- Xu Yuchen, Gu Lixin, Li Yang, Mo Bing, Lin Yangting. 2018. Combination of focused ion beam (FIB) and microtome by ultrathin slice preparation for transmission electron microscopy (TEM) observation. *Earth, Planets & Space*, 70: 150.
- Yamada M, Sasaki S, Nagahara H, Fujiwara A, Hasegawa S, Yano H, Hiroi T, Ohashi H, Otake H. 1999. Simulation of space weathering of planet-forming material: Nanosecond pulse laser irradiation and proton implantation on olivine and pyroxene samples. *Earth Planets & Space*, 51: 1255~1265.
- Zeng Xiandi, Tang Hong, Li Xiongyao, Zeng Xiaojia, Yu Wen, Liu Jianzhong, Wang Shijie, Zou Yongliao. 2021. Experimental investigation of OH/H₂O in H⁺-irradiated plagioclase: implications for the thermal stability of water on the lunar surface. *Earth and Planetary Science Letters*, 560: 116806.

Formation mechanisms of space weathering products: Apollo lunar soil and simulation experimental study by ordinary and carbonaceous chondrites

TAI Kairui^{1,2)}, GUO Zhuang^{2,3)}, LI Yang^{*2,4,5)}, LIU Shen¹⁾, ZHANG Pengfei⁶⁾,
ZHAO Sizhe^{2,7)}, LI Chen^{2,8)}, TANG Hong^{2,4)}, PANG Ronghua^{2,3)}

1) *Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shanxi 710069, China;*

2) *Lunar and Planetary Sciences Research Center, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550081, China;*

3) *College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

4) *Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230026, China;*

5) *Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*

6) *State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University of Science and Technology, Macau 519020, China;*

7) *College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China;*

8) *School of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China*

** Corresponding author: liyang@mail.gyig.ac.cn*

Abstract

Space weathering products, such as nano-to submicron sized opaque particles, are the main reason for the unique reflectance spectra characteristics of weathered particles on airless planetary bodies (e. g., the Moon and asteroids). In this study, the source, formation mechanisms, and distribution of space weathering products were discussed on the basis of Apollo 15 soil samples and the irradiated results of ordinary chondrites and carbonaceous chondrites. Our experiments indicate that np-FeO (nanophase iron particles) should be formed by the vapor deposition and in-situ reduction of iron-magnesium silicate and other minerals caused by the bombardment of micrometeorites. np-FeNi (nanophase FeNi particles) are formed by the vapor deposition and shock dispersion of FeNi and troilite. np-FeNiS (nanophase FeNiS particles) and sm-FeNiS (submicron FeNiS particles) are mainly formed by the impact dispersion of troilite. These opaque particles are the main reason for the change of spectral characteristics of the Moon and S-type asteroids in the ultraviolet-near infrared reflectance (UV-NIR) band, including reduced reflectance, weaker absorption bands, and the redshift of the continuum. The bubble structure can be attributed to the escape of volatiles in phyllosilicates during micrometeorite bombardment, which is speculated to be the main reason for the increased spectral reflectance and blueshift of the continuum in the UV-NIR band of asteroids with high water content (such as Bennu). The experimental results could provide a reference for the analysis of returned lunar samples, future asteroid samples, and the interpretation of space weathering characteristics of the reflectance spectrum.

Key words: lunar soil; asteroid; space weathering; nanophase iron particles; reflectance spectrum