

Murchison 陨石中草莓状磁铁矿的成因及意义

任旭^{1 2 3} 唐红^{1 A} 吴焱学⁵ 李阳^{1 3 A*} 李世杰^{1 A} 李雄耀^{1 A}

1. 中国科学院 地球化学研究所, 月球与行星科学研究中心, 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 澳门科技大学 月球与行星科学国家重点实验室, 澳门 519020; 4. 中国科学院 比较行星学卓越创新中心,
合肥 230026; 5. 广东工业大学 材料与能源学院, 广州 510006

摘要: 碳质小行星富含水和有机物, 被认为是地球水与生命的重要潜在来源, 是当前深空探测的重要目标。通过研究碳质球粒陨石中蚀变矿物的特征, 可有效揭示其母体小行星早期的水活动历史。以 Murchison 碳质球粒陨石 (CM2) 中的草莓状磁铁矿为研究对象, 利用扫描电镜和透射电镜对其微观结构和元素组成进行分析。结果显示, Murchison 陨石中的草莓状磁铁矿具有交代黄铁矿的五角十二面体晶型假象, 其颗粒边缘具有次生环带结构以及颗粒间隙填充有蛇纹石等次生层状硅酸盐矿物。研究表明, 受²⁶Al 等放射性元素衰变生热影响, Murchison 陨石母体小行星早期曾发育有上限为 150~200 °C 的水热蚀变作用, 随着流体由酸性向碱性演变以及溶解氧的形成, 早期形成的草莓状黄铁矿被后期流体交代而形成草莓状磁铁矿。

关键词: 草莓状磁铁矿; Murchison 陨石; 低温交代作用; 水蚀变; B 型小行星

中图分类号: P185.83 文章编号: 1007-2802(2020)04-0836-07 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2020.39.050

The Origin and Significance of Framboidal Magnetite in the Murchison Meteorite

REN Xu^{1 2 3}, TANG Hong^{1 A}, WU Yan-xue⁵, LI Yang^{1 3 A*}, LI Shi-jie^{1 A}, LI Xiong-yao^{1 A}

1. Center of Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;
2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University of Science and Technology, Macau 519020, China; 4. Center of Excellence in Comparative Planetary Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China; 5. School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

Abstract: Carbonaceous asteroids are considered to be important potential sources of water and life on the Earth as they are relatively rich in water and organic matters. Therefore, they have become important targets for the deep space exploration. By studying the characteristics of altered minerals in carbonaceous chondrites, the early water activity history of the parent asteroid can be effectively revealed. In this study, framboidal magnetite in the Murchison carbonaceous chondrite (CM2) was selected as the main research object to carry out detailed study on its microstructure and elemental composition using SEM and TEM. The results show that framboidal magnetite particles in the Murchison meteorite were characterized with pentagonal dodecahedron pseudomorphs of replaced pyrite crystals, with the secondary alteration amorphous thin rims. In addition, there are lots of secondary phyllosilicates minerals such as serpentine filling in interval pores among framboidal magnetite particles. This study suggests that the parent body of the Murchison meteorite could have been hydrothermally altered with an upper limit of 150–200 °C in its early evolution stage due to the influence of heat produced by the decay of radioactive elements including ²⁶Al. With the transformation of acidic fluid to alkaline one and formation of dissolved oxygen, the early formed framboidal pyrite was replaced by framboidal magnetite via the late stage hydrothermal metasomatism.

Key words: framboidal magnetite; Murchison meteorite; low-temperature metasomatism; hydrothermal alteration; B type asteroid

收稿编号: 2020-006 2020-01-16 收到 2020-04-10 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41673071 41931077); 澳门科技大学开放基金资助项目(039/2013/A2); 中国科学院战略性科技先导专项(XDB41000000 XDA15020300); 贵州省科学技术基金资助项目([2008]2224)

第一作者简介: 任旭(1994-) 男, 硕士研究生, 研究方向: 天体化学. E-mail: renxu@mail.gyig.ac.cn.

* 通信作者简介: 李阳(1984-) 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 比较行星学. E-mail: liyang@mail.gyig.ac.cn.

0 引言

碳质小行星(carbonaceous asteroids)是已知数量最多和最为原始的一类小行星(DeMeo and Carry, 2014),它保存和记录了太阳系初始物质组成的信息,被认为是地球早期水和有机物的重要来源(Albarède, 2009; Alexander et al., 2012; Sarafian et al., 2014)。CM2型碳质球粒陨石被认为是来自于B型碳质小行星(DeMeo and Carry, 2014),后者是当前正在开展的日本Hayabusa 2、美国OSIRIS-REX小行星采样计划的探测目标(Tachibana et al., 2014; Lauretta et al., 2015)。已有研究表明,CM型碳质球粒陨石富含氨基酸、核糖等有机物以及不同结合态的水(Kvenvolden et al., 1971; Tyburczy et al., 1986; Meierhenrich et al., 2004; Koga and Naraoka, 2017; Furukawa et al., 2019),而且其基质中还含有大量层状硅酸盐等次生蚀变矿物,表明母体小行星形成的早期曾广泛发育流体蚀变作用(Buseck and Hua, 1993)。因此,分析陨石中蚀变矿物的种类、组合、结构及组成特征,是获取母体小行星早期水环境演化过程的重要途径(Buseck and Hua, 1993)。

磁铁矿是碳质球粒陨石中常见的次生矿物,主要分布于CI、CM、CR、CK、CO和CV陨石中(Herdon et al., 1975; Hyman and Rowe, 1983; Kallemeyn et al., 1994; Hua and Buseck, 1998; Dun et al., 2016)。碳质球粒陨石中的磁铁矿有球形、不规则状和草莓状等形态(Hua and Buseck, 1998),其中草莓状磁铁矿最为特殊,多见于CI、CM及CR等类型陨石中(Hyman et al., 1983, 1985; Kallemeyn et al., 1994; Hua and Buseck, 1998)。磁铁矿多被认为形成于碳质小行星早期的流体作用过程(Choi et al., 1997; Hua and Buseck, 1998),由于CM、CI碳质球粒陨石中含有多种类型的氨基酸,因此有学者提出生物活动也可能是磁铁矿特别是草莓状磁铁矿的形成原因(Miyake et al., 2012)。

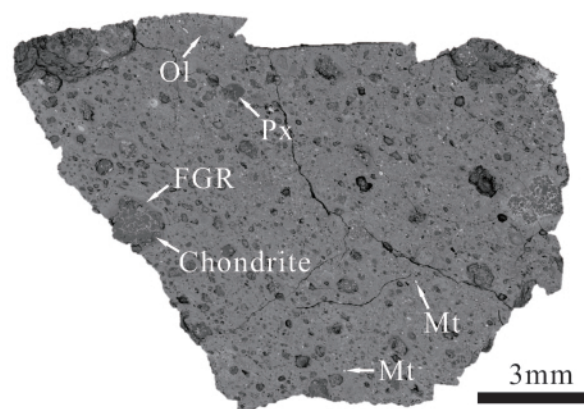
本文选择富含氨基酸等有机物的Murchison(CM2)碳质球粒陨石为研究对象,通过扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)对其中的草莓状磁铁矿的晶体结构、元素组成开展研究,以探讨其成因。

1 样品及实验方法

Murchison CM2型碳质球粒陨石于1969年降落于澳大利亚维多利亚区,被认为来自于一颗B型碳

质小行星。使用金刚石线切割机制备Murchison碳质球粒陨石的薄片,厚度约为2 mm。使用2000目金刚石研磨盘对陨石薄片进行研磨,并使用粒径为1 μm的金刚石抛光液进行最终抛光处理。将研磨抛光处理后的陨石薄片放置于无水乙醇中进行超声波清洗,时间设定为5 min,次数为3次。将超声波清洗后的陨石薄片置于鼓风干燥箱中烘干,温度设定为80 °C,时间为2 h。

Murchison陨石薄片的岩相学观察在中国科学院地球化学研究所完成,所用电镜均为搭配有场发射电子镜筒和场发射离子镜筒的FEI Scios双束扫描电镜。先用背散射电子探头对陨石薄片进行完整的大面积拼图(图1),对样品的组成与结构特征进行整体分析与判断。然后用电镜配置的EDAX Octane Elect Super 70 mm²能谱仪对薄片中的矿物组分进行半定量分析,其工作条件是:加速电压15~30 kV,束流1.6 nA,工作距离7 mm。草莓状磁铁矿颗粒的晶体外形采用二次电子探头进行分析,其工作条件是:加速电压15 kV,工作距离5 mm。



Mt-磁铁矿; Ol-橄榄石; Px-辉石; FGR-细粒边; Chondrite-球粒
图1 Murchison陨石薄片的背散射电子图像拼图

Fig.1 A combined BSE image of the Murchison meteorite

依托FEI Scios双束扫描电镜对团簇状草莓状磁铁矿集合体进行原位超薄切片制备。离子束切割过程的加速电压为30 kV、束流为1~15 nA;离子束抛光过程的加速电压为2~5 kV、束流为50~500 pA,切片的最终厚度小于100 nm。使用FEI Talos F200S场发射透射电镜对草莓状磁铁矿的结构、成分及晶体结构分别进行透射电镜明场像(BFI)、高分辨率成像(HRTEM)、高角环形暗场像(HAADF)、选区电子衍射(SAED)以及能谱(EDS)点分析与面扫描,采用的加速电压为200 kV。以上透射电镜分析在广东工业大学材料与能源学院完成。

2 分析结果

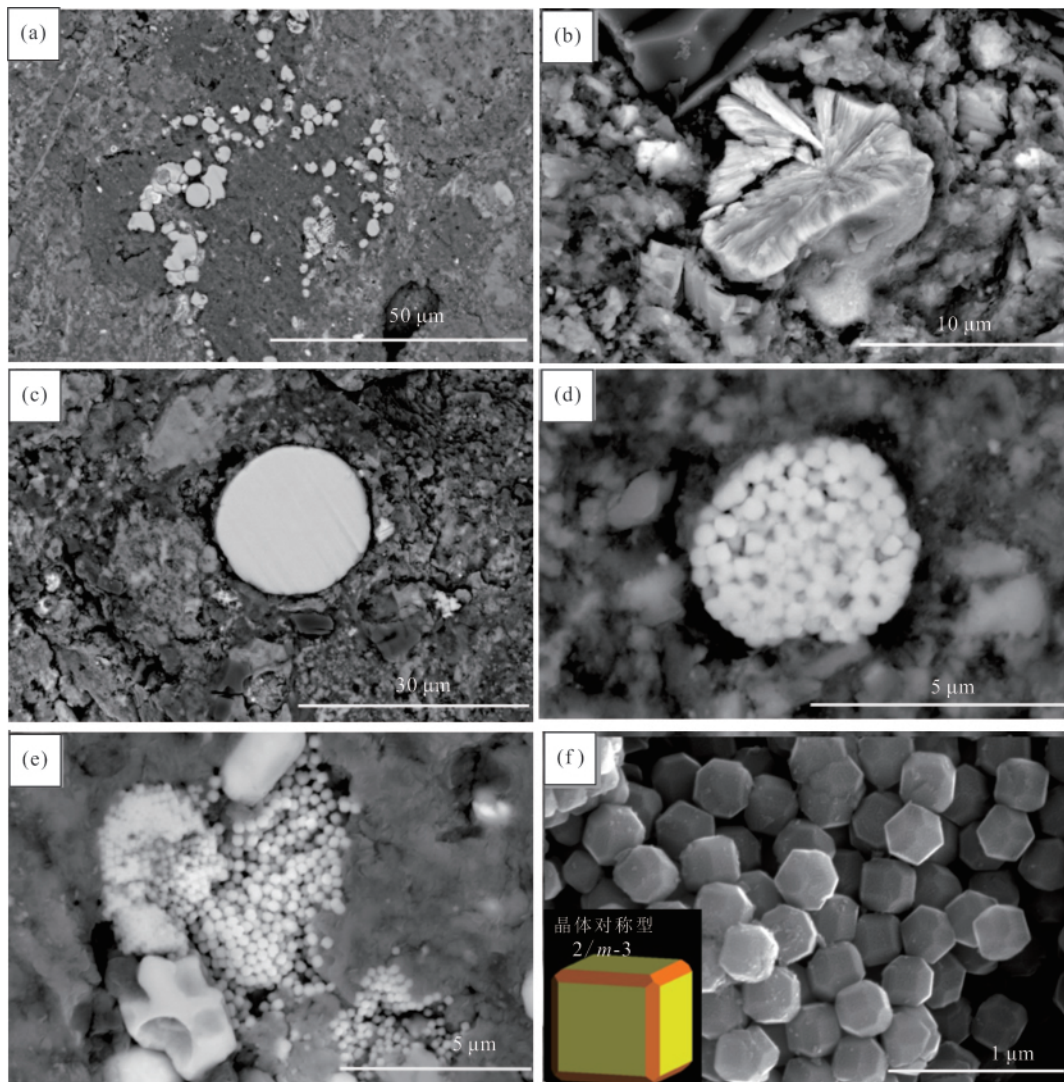
2.1 岩相学特征

通过扫描电镜背散射探头观察及能谱仪的半定量成分测定可知, Murchison 陨石样品主要由球粒和基质组成(图 1)。其中球粒约占 25% (vol.), 球粒直径约为 1 mm, 主要由橄榄石、低钙辉石组成, 含极少量铁镍金属和硫化物。基质含量约占 73.4% (vol.), 主要由层状硅酸盐(蛇纹石、绿泥石)矿物组成。橄榄石、低钙辉石(粒径约 50 μm)矿物碎片在基质中随机分布, 且多有蚀变; 碳酸盐矿物(方解石、白云石)和硫化物(陨硫铁、磁铁矿、镍黄铁矿)主要分布在裂隙中。基质中还发现两种 CM3 类型陨石碎片, 一种碎片粒径约为 1~13 mm, 主要由橄榄石、辉石、斜长石、陨硫铁和硫化物组成; 另一种

碎片粒径不超过 1.2 mm, 主要由自形铁橄榄石、辉石、斜长石和硫化物组成(Fuchs et al., 1970)。

Murchison 陨石中的基质主要有 3 种存在形式: 球粒间基质、细粒边和暗色包体。其中球粒间基质占绝大部分, 是充填于球粒和碎屑之间的细粒物质的总和, 主要由低温矿物和非晶质组成, 被认为是太阳系低温冷凝的产物(王秀娟, 2009)。细粒边主要环绕分布在球粒或较大的矿物碎片边缘, 主要由层状硅酸盐矿物、橄榄石、硫化物等组成, 有些呈现出粒径不同的多层环状形态。暗色包体又称块状基质(Scott et al., 1988), 在样品薄片仅发现一处, 其外形呈不规则状, 主要由蚀变程度较高的层状硅酸盐矿物、橄榄石、辉石、硫化物等组成。

Murchison 陨石中的磁铁矿主要分布在球粒间基质中并呈现多种形态(图 2), 如片状、球状及草莓状。



(a) 球粒间基质中不同类型的磁铁矿; (b) 片状磁铁矿; (c) 球状磁铁矿; (d) (e) 草莓状磁铁矿团簇; (f) 草莓状磁铁矿单颗粒

图 2 Murchison 陨石中不同类型磁铁矿的背散射图像和二次电子图像

Fig.2 BSE images and secondary electronic images of different types of magnetite in the Murchison meteorite

本文所研究的草莓状磁铁矿是一种特殊类型的亚微米级磁铁矿细颗粒的聚集体,呈团簇分布于层状硅酸盐矿物空隙中,因形似草莓而得名。由于草莓状磁铁矿颗粒较小(粒径约0.2~1 μm),因此选用对样品表面信息更为敏感的二次电子探头进行观察,选取的加速电压为30 kV、工作距离为5 mm。高分辨的二次电子图像(图2f)表明,样品中草莓状磁铁矿颗粒并不具有磁铁矿的八面体或菱形十二面体晶型,而是具有黄铁矿的五角十二面体晶型。

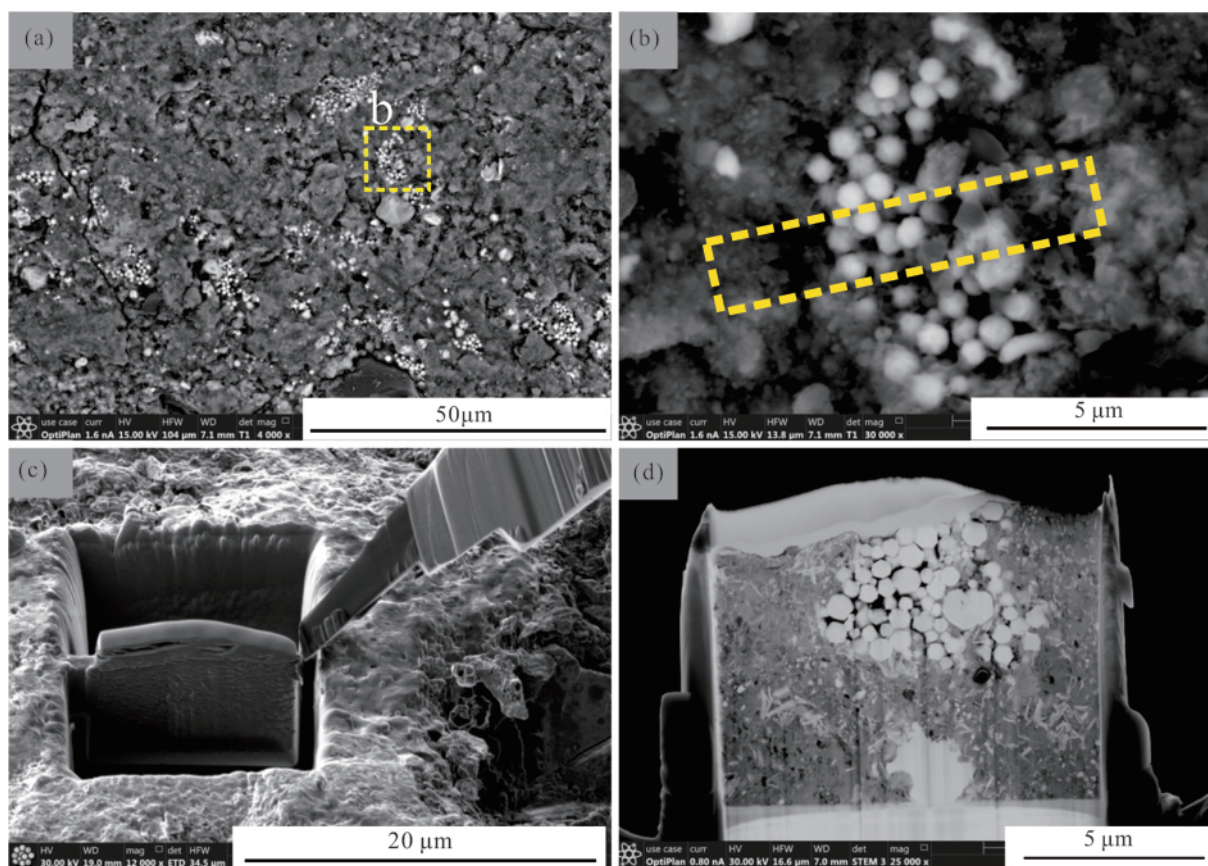
2.2 透射电镜观察

为了进一步确定草莓状磁铁矿及其伴生矿物的成分和晶体结构特征,选取样品中典型草莓状磁铁矿分布区域,使用聚焦离子束进行原位超薄切片制备(图3)。通过对磁铁矿的透射电镜分析发现,部分磁铁矿细颗粒的表面还覆盖有一层厚度约为2~3 nm的非晶质,其成分主要为O、Mg、Si(图4a, 4b, 4h)。高分辨透射电镜图像进行标定,得到(111)与(220)两组晶面,晶面间距分别为0.484 7 nm和0.296 8 nm,两组晶面夹角为35.3°(图4e)。

通过对与草莓状磁铁矿共生的层状硅酸盐矿物的高分辨透射电镜图像进行标定,得到叶蛇纹石的(501)与(221)两组晶面,其晶面间距分别为0.504 3 nm和0.311 9 nm,晶面夹角为67.5°(图4g)。

3 讨论

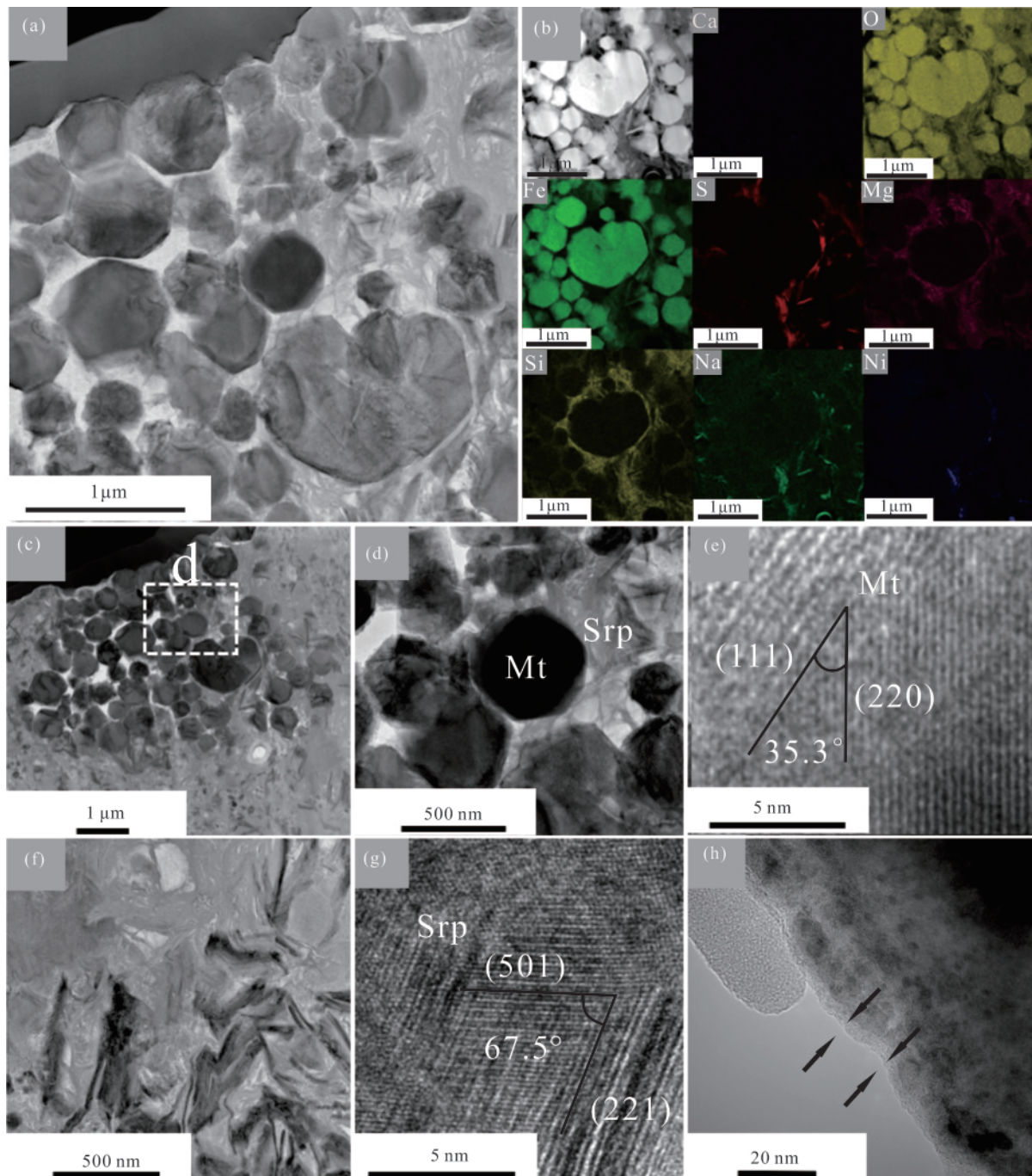
Murchison 陨石中草莓状磁铁矿具有黄铁矿的五角十二面体的晶型,属于典型的交代假象结构,其外形是由草莓状黄铁矿被交代形成。作为前体物质的草莓状黄铁矿的成因主要包括有机和无机两种。有机成因认为黄铁矿是由生物体的硫化反应形成,其特点是在颗粒之间充填着有机物(Maclean et al., 2008),但在本次研究的Murchison 陨石样品中并未发现此现象。而无机成因则认为草莓状黄铁矿是从Fe²⁺和S²⁻的过饱和溶液中结晶形成(Berner and Raiswell, 1983)。Murchison 陨石母体小行星中的橄榄石、辉石、球粒中的金属铁、陨硫铁以及基质中的细粒硅酸盐均会在水蚀变作用下释放出Mg²⁺、Ca²⁺和Fe²⁺等阳离子进入水溶液中



(a) Murchison 陨石中分布的草莓状磁铁矿; (b) 聚焦离子束选取的加工位置; (c) 聚焦离子束挖掘的楔形坑及切片, 使用纳米机械手将切片提出; (d) 离子束减薄、抛光之后的超薄切片, 厚度小于100 nm

图3 Murchison 陨石中的草莓状磁铁矿及聚焦离子束超薄切片制备

Fig.3 Frambooidal magnetite in the Murchison meteorite and the extremely thin section of FIB preparation



(a) (c) Murchison 陨石中草莓状磁铁矿明场图像; (b) 草莓状磁铁矿颗粒能谱分析成分谱图和高角度环形暗场像(HAADF)图像,以及透射电镜能谱元素面分析图像(包括 Ca、Fe、Mg、Na、Ni、O、Si、S 八种元素在该区域的分布情况); (c) 草莓状磁铁矿单体间蛇纹石的明场图像; (e) 磁铁矿颗粒高分辨图像标定结果: 晶格条纹间距 0.484 7 nm 对应(111) 晶面, 0.296 8 nm 对应(220) 晶面, 夹角 35.3°, 对应磁铁矿结构; (f) 蛇纹石明场图像; (g) 蛇纹石高分辨图像及标定结果: 晶格条纹间距 0.504 3 nm 对应(501) 晶面, 0.311 9 nm 对应(221) 晶面, 夹角 67.5°, 对应叶蛇纹石结构; (h) 磁铁矿颗粒边缘非晶层的高分辨图像(黑色箭头处)。Mt-磁铁矿; Srp-蛇纹石

图 4 草莓状磁铁矿和基质矿物的透射电镜图像及能谱面扫结果

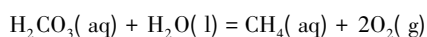
Fig.4 TEM images and EDS mapping results of framboidal magnetite particles and minerals in the matrix

(Kimura et al., 2013) 陨硫铁的溶解会释放出 S^{2-} , 为草莓状黄铁矿的形成提供了稳定的铁和硫源。根据已有研究结果, 草莓状黄铁矿形成于还原环境, 需要酸性-弱碱性的介质条件(Garrels, 1960)。水蚀变早期, Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等的吸附使得溶液偏酸性

(Dixon, 1985) 这为草莓状黄铁矿的形成提供了有利条件。随着水蚀变的演化, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 CO_3^{2-} 从溶液中析出, 水分挥发导致溶液中的 Fe^{2+} 和 S^{2-} 浓度逐渐增大, 当达到过饱和后, 硫化亚铁微晶晶核开始生长形成胶黄铁矿(Fe_3S_4) 并聚集在一起最终转

化为草莓状黄铁矿 (Wilkin and Barnes, 1997)。因此,本研究认为 Murchison 陨石中的草莓状磁铁矿的前体黄铁矿应为无机成因。

酸性-弱碱性环境是黄铁矿的稳定范围,而碱性环境是磁铁矿的稳定范围。随着水蚀变的演化,草莓状黄铁矿的不断形成、溶液中的 CO_3^{2-} 和 S^{2-} 浓度不断减少,磁铁矿稳定范围会不断扩大并覆盖一部分黄铁矿的稳定区,促使磁铁矿交代在水介质中先期结晶的黄铁矿从而形成具有五角十二面体晶型的草莓状磁铁矿 (Garrels, 1960; 徐和聆等, 2000)。此外,适合磁铁矿生长的水介质条件也是草莓状磁铁矿交代黄铁矿的关键因素,而溶解氧对草莓状磁铁矿的形成至关重要 (Wilkin and Barnes, 1996; Butler and Rickard, 2000; Ohfuji and Rickard, 2005)。Murchison 碳质球粒陨石中含有一定量的碳酸盐矿物,在水蚀变早期的酸性环境可能会产生 H_2CO_3 。Crerar 和 Barnes (1976) 通过实验得出如下反应:



该反应在 200 °C 左右的条件下从左往右进行,能够为溶解氧的来源提供解释。此外, Murchison 陨石中有机质的存在表明其经历的温度上限为 150~200 °C (Cathelineau et al., 2007), 也与上述反应所需温度条件相符。

小碳质小行星水蚀变作用所需的热量主要来自撞击生热和 ^{26}Al 等短周期放射性同位素的衰变生热 (Endress et al., 1996; Rubin, 2012)。Murchison 碳质球粒陨石所经受的冲击作用通常较弱 (S1), 冲击生热不足以维持整个蚀变阶段的流体活动 (Hanna et al., 2015)。相比而言,放射生热更加持续和稳定。此外,水蚀变发生的时期与 ^{26}Al 等短周期放射性同位素存在的时期相吻合 (Doyle et al., 2015)。 ^{26}Al 等短周期放射性同位素衰变生热能够给 Murchison 母体小行星提供持续热源,促使其发育广泛的水蚀变作用 (Endress, 1996; Rubin, 2012), 但未使其发生显著的热变质作用 (McCabe et al., 1984; Kent and Miller, 1987)。

4 结论

通过对 Murchison 陨石中具有交代假象特征的草莓状磁铁矿开展扫描电镜、透射电镜等分析,获取了草莓状磁铁矿的外部晶型、化学组成、晶体结构及微观特征等信息。 ^{26}Al 等短周期放射性同位素衰变是母体小行星水热蚀变的主要热源,其温

度上限为 150~200 °C,热源的稳定存在使小行星在形成初期曾广泛发育流体活动,从而产生了大量的蚀变矿物,改变了小行星母体初始的物质组成。早期酸性流体中过饱和的 Fe^{2+} 与 S^{2-} 通过结晶沉淀形成草莓状黄铁矿。溶解氧的形成使草莓状黄铁矿逐渐被氧化成草莓状磁铁矿,但仍保留了黄铁矿的晶形。此后,随着水分的挥发,流体逐渐转变为磁铁矿稳定的碱性环境,这些具有交代假象特征的草莓状磁铁矿最终被保留下来。Murchison 陨石中草莓状磁铁矿的分析为研究 B 型小行星早期流体作用过程提供具体的实例和直接的参考依据。

致谢:感谢中国科学院地球化学研究所李瑞、莫冰工程师在样品制备和分析过程中的帮助。

参考文献 (References):

- Albarède F. 2009. Volatile accretion history of the terrestrial planets and dynamic implications. *Nature*, 461(7268): 1227-1233
- Alexander C M O, Bowden R, Fogel M L, Howard K T, Herd C D K, Nittler L R. 2012. The provenances of asteroids, and their contributions to the volatile inventories of the terrestrial planets. *Science*, 337(6095): 721-723
- Berner R A, Raiswell R. 1983. Burial of organic carbon and pyrite sulfur in sediments over phanerozoic time: A new theory. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47(5): 855-862
- Buseck P R, Hua X. 1993. Matrices of carbonaceous chondrite meteorites. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 21(1): 255-305
- Butler I B, Rickard D. 2000. Framboidal pyrite formation via the oxidation of iron (II) monosulfide by hydrogen sulphide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(15): 2665-2672
- Cathelineau M, Mosser-Ruck R, Rousset D, Guillaume D, Charpentier D, Devineau K, Villieras F, Michau N. Effects of temperature, pH, iron/clay ratio and liquid/clay ratio on the conversion of dioctahedral smectite into iron-rich clays: A review of experimental studies. In: 3rd International Meeting of Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement. 2007. Lille, France. Andra.fr.
- Choi B G, McKeegan K D, Leshin L A, Wasson J T. 1997. Origin of magnetite in oxidized CV chondrites: In situ measurement of oxygen isotope compositions of Allende magnetite and olivine. *Earth and Planetary Science Letters*, 146(1-2): 337-349
- Crerar D A, Barnes H L. 1976. Ore solution chemistry-V. Solubilities of chalcopyrite and chalcocite assemblages in hydrothermal solution at 200-350°C. *Economic Geology*, 71(4): 772-794
- DeMeo F E, Carry B. 2014. Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt. *Nature*, 505(7485): 629-634
- Dixon D R. 1985. Interaction of alkaline-earth-metal ions with magnetite. *Colloids and Surfaces*, 13: 273-286
- Doyle P M, Jogo K, Nagashima K, Krot A N, Wakita S, Ciesla F J, Hutcheon I D. 2015. Early aqueous activity on the ordinary and car-

- bonaceous chondrite parent bodies recorded by fayalite. *Nature Communications*, 6: 7444
- Dunn T L, Gross J, Ivanova M A, Runyon S E, Bruck A M. 2016. Magnetite in the unequilibrated CK chondrites: Implications for metamorphism and new insights into the relationship between the CV and CK chondrites. *Meteoritics & Planetary Science*, 51(9): 1701–1720
- Endress M, Zimmer E, Bischoff A. 1996. Early aqueous activity on primitive meteorite parent bodies. *Nature*, 379(6567): 701–703
- Fuchs L H, Jensen K J, Olsen E. 1970. Mineralogy and composition of the murchison meteorite. *Meteoritics*, 5(4): 198
- Furukawa Y, Chikaraishi Y, Ohkouchi N, Ogawa N O, Glavin D P, Dworkin J P, Abe C, Nakamura T. 2019. Extraterrestrial ribose and other sugars in primitive meteorites. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(49): 24440–24445
- Garrels R M. 1960. Mineral equilibria. *Soil Science*, 90(2): 146
- Hanna R D, Ketcham R A, Zolensky M, Behr W M. 2015. Impact-induced brittle deformation, porosity loss, and aqueous alteration in the Murchison CM chondrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 171: 256–282
- Herndon J M, Rowe M W, Larson E E, Watson D E. 1975. Origin of magnetite and pyrrhotite in carbonaceous chondrites. *Nature*, 253(5492): 516–518
- Hua X, Buseck P R. 1998. Unusual forms of magnetite in the Orgueil carbonaceous chondrite. *Meteoritics & Planetary Science*, 33(S4): A215–A220
- Hyman M, Ledger E B, Rowe M W. 1985. Magnetite morphologies in the Essebi and Haripura CM chondrites. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(S02): C710–C714
- Hyman M, Rowe M W. 1983. Magnetite in CI chondrites. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 88(S02): A736–A740
- Kallemeyn G W, Rubin A E, Wasson J T. 1994. The compositional classification of chondrites: VI. The CR carbonaceous chondrite group. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(13): 2873–2888
- Kent R V, Miller J D. 1987. Red-beds and thermoviscous magnetization theory. *Geophysical Research Letters*, 14(4): 327–330
- Kimura Y, Sato T, Nakamura N, Nozawa J, Nakamura T, Tsukamoto K, Yamamoto K. 2013. Vortex magnetic structure in framboidal magnetite reveals existence of water droplets in an ancient asteroid. *Nature Communications*, 4: 2649
- Koga T, Naraoka H. 2017. A new family of extraterrestrial amino acids in the Murchison meteorite. *Scientific Reports*, 7(1): 636
- Kvenvolden K A, Lawless J G, Ponnampereuma C. 1971. Nonprotein amino acids in the murchison meteorite. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 68(2): 486–490
- Lauretta D D, Bartels A E, Barucci M A, Bierhaus E B, Binzel R P, Bottke W F, Campins H, Chesley S R, Clark B C, Clark B E, Cloutis E A, Connolly H C, Crombie M K, Delbó M, Dworkin J P, Emery J P, Glavin D P, Hamilton V E, Hergenrother C W, Johnson C L, Keller L P, Michel P, Nolan M C, Sandford S A, Scheeres D J, Simon A A, Sutter B M, Vokrouhlický D, Walsh K J. 2015. The OSIRIS-REx target asteroid (101955) Bennu: Constraints on its physical, geological, and dynamical nature from astronomical observations. *Meteoritics & Planetary Science*, 50(4): 834–849
- Maclean L C W, Tyliczszak T, Gilbert P U P A, Zhou D, Pray T J, Onstott T C, Southam G. 2008. A high-resolution chemical and structural study of framboidal pyrite formed within a low-temperature bacterial biofilm. *Geobiology*, 6(5): 471–480
- McCabe C, Van Der Voo R, Ballard M M. 1984. Late Paleozoic remagnetization of the Trenton limestone. *Geophysical Research Letters*, 11(10): 979–982
- Meierhenrich U J, Caro G M M, Bredehöft J H, Jessberger E K, Thiemann W H P. 2004. Identification of diamino acids in the Murchison meteorite. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(25): 9182–9186
- Miyake N, Wallis M K, Wickramasinghe N C. Discovery of framboidal magnetites in the murchison meteorite. *European Planetary Science Congress*. 2012. Madrid, Spain. Copernicus Publications.
- Miyake N. Discovery of Framboidal Magnetites in the Murchison meteorite. *Geobiology*, 2008, 6: 471–480.
- ses of framboids—a review. *Earth-Science Reviews*, 71(3–4): 147–170
- Rubin A E. 2012. Collisional facilitation of aqueous alteration of CM and CV carbonaceous chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 90: 181–194
- Sarafian A R, Nielsen S G, Marschall H R, McCubbin F M, Monteleone B D. 2014. Early accretion of water in the inner solar system from a carbonaceous chondrite-like source. *Science*, 346(6209): 623–626
- Scott E R D, Barber D J, Alexander C M, Hutchinson R, Peck J A. 1988. Primitive material surviving in chondrites–Matrix. In: *Meteorites and the Early Solar System*. Tucson: University of Arizona Press, 718–745
- Tachibana S, Abe M, Arakawa M, Fujimoto M, Iijima Y, Ishiguro M, Kitazato K, Kobayashi N, Namiki N, Okada T, Okazaki R, Sawada H, Sugita S, Takano Y, Tanaka S, Watanabe S, Yoshikawa M, Kuminaka H. 2014. Hayabusa2: Scientific importance of samples returned from C-type near-Earth asteroid (162173) 1999 JU3. *Geochimical Journal*, 48(6): 571–581
- Tyburczy J A, Frisch B, Ahrens T J. 1986. Shock-induced volatile loss from a carbonaceous chondrite: Implications for planetary accretion. *Earth and Planetary Science Letters*, 80(3–4): 201–207
- Wilkin R T, Barnes H L. 1996. Pyrite formation by reactions of iron monosulfides with dissolved inorganic and organic sulfur species. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(21): 4167–4179
- Wilkin R T, Barnes H L. 1997. Formation processes of framboidal pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(2): 323–339
- 王秀娟. 2009. 南极碳质球粒陨石基质岩石矿物学及其成因研究. 硕士学位论文. 桂林: 桂林理工大学
- 徐和聆, 陈克樵, 马醒华, 孙知明. 2000. 磁铁矿与黄铁矿双向交代研究及意义. *地质力学学报*, 6(3): 83–89

(本文责任编辑: 刘莹; 英文审校: 张兴春)