
地化所在嫦娥五号月壤中首次发现撞击成因的亚微米级磁铁矿

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/21011.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

地化所在嫦娥五号月壤中首次发现 撞击成因的亚微米级磁铁矿

。磁铁矿通常涉及古磁场以及地外生命等重大科学问题，因而在行星科学领域备受关注。月球表面极端的还原环境使得月壤中的铁元素以二价铁离子(Fe^{2+})和零价铁(Fe^0)为主。阿波罗时代仅有少量的三价铁离子(Fe^{3+})及其赋存矿物被直接探测到。随着样品分析与遥感探测技术的提升，大量数据指示了月表 Fe^{3+} 的分布，同时，对阿波罗月球样品的进一步分析也确认了月表存在磁铁矿和玻璃质等含 Fe^{3+} 的物质，而这些 Fe^{3+} 通常被解释为诸如碳质球粒陨石、彗星以及地球风等外源C-H-O流体的氧化作用，尤其对于月球原生磁铁矿的形成机制以及分布特征尚不明确。

中国科学院地球化学研究所李阳研究团队针对嫦娥五号表取月壤粉末中的硫化物颗粒开展深入细致的原位微区分析，首次证实了月壤中存在撞击成因亚微米级磁铁矿的存在。研究证据表明，月球表面的硫化物在撞击过程中会发生复杂的气液反应，使得溶解进入硫化物的 FeO 通过共析反应生成亚微米级的磁铁矿以及单质金属铁。撞击成因亚微米级磁铁矿的发现与证实，为学术界关于月壤中可能广泛存在原生磁铁矿的猜测提供了直接证据，并可为月球表面磁异常等重大科学问题的研究提供实验验证与理论支撑。

铁元素是记录太阳系氧化还原环境的重要元素。月球普遍被认为是极度还原的，当前关于月球样品中铁元素的还原行为研究颇为深入，月壤中广泛分布的太空风化成因纳米金属铁是对月表极端还原条件的证明(Pieters and Noble, 2016)。近年来，随着分析技术的提升，有学者在月球样品中陆续观察到含 Fe^{3+} 的物质(如磁铁矿以及玻璃质等)，同时，“月船一号”搭载的M3光谱数据也显示月球的高纬度地区广泛存在赤铁矿(Fe_2O_3)，月球物质中这些氧化态铁的分布使得科学家重新审视月表的氧化环境(Joy et al., 2015; Li et al., 2022a; Li et al., 2020)。

磁铁矿是重要的 Fe^{3+} 载体矿物，但在月球样品中较少被报道。在阿波罗时代，有学者根据电子自旋共振和穆斯堡尔谱的研究成果推断出，阿波罗月壤中可能广泛存在亚微米级的磁铁矿，但没有得到原位矿物学数据的支持(Forester, 1973; Griscom et al., 1973)。Joy等(2015)通过细致的矿物学分析在Apollo月岩样品中确定了微米级磁铁矿晶体的存在，并认为它们与外源性的碳质球粒陨石或彗星等撞击体密切相关，而这只是月球样品中的个例，并不能支撑月壤中亚微米磁铁矿的广泛分布(Joy et al., 2015)。因此，磁铁矿在细粒月壤的分布与形成机制尚不清楚。

嫦娥五号任务从年轻的月海玄武岩单元(Em4/P58, ~20亿年)带回了1.731 kg的月壤物质。尽管样品的分析表明，几乎所有的嫦娥五号月壤都是来自当地物质，但有少部分的月壤颗粒(<5%)来自

大型撞击坑的溅射物(Jia et al., 2021; Li et al., 2022b)。考虑到嫦娥五号玄武岩具有年轻的形成年龄, 以及该地区月壤受到的后期改造过程较为有限, 因此, 嫦娥五号月壤或保留了月表撞击过程的初始反应信息。

中国科学院地球化学研究所李阳研究团队针对嫦娥五号表取月壤粉末(CE5C0400YJFM00505和CE5C0200YJFM00302)中的硫化物颗粒开展了深入研究, 首次发现了撞击诱导成因的亚微米级磁铁矿存在的可靠证据。研究团队通过扫描电镜和透射电镜观察, 在嫦娥五号细粒月壤中发现了约2微米直径的球形铁硫化物颗粒。该颗粒具有独特的形貌特征, 具体表现为纯金属铁的触须以几乎相等的间隔从整个球形铁硫化物颗粒表面突出。嫦娥五号球形铁硫化物颗粒内部普遍具有溶氧的特征, 且含有大量的亚微米级磁铁矿和纯金属铁颗粒(图1)。铁硫化物内部的亚微米级磁铁矿晶体(~ 100 nm)进一步通过化学和结构的综合分析得到确认。透射电镜能谱面扫描和线扫描的结果显示, 球形铁硫化物颗粒内含有富氧和富铁的铁氧化物相(图1、2)。此外, 电子能量损失谱的结果指示, 该铁氧化物颗粒的FeL_{2,3}谱介于Fe²⁺和Fe³⁺标样之间, 表明球形铁硫化物颗粒内部的铁氧化物同时含有Fe²⁺和Fe³⁺, 比例约为1:2, 这与磁铁矿的化学成分一致(图2c)。研究通过球差校正透射电镜获取到的高分辨原子像以及高分辨透射电镜图像, 确认了该氧化物颗粒与磁铁矿的晶体结构一致(图2d-e)。嵌入在球形铁硫化物颗粒中的铁氧化物颗粒被确定为亚微米级的磁铁矿晶体。

研究显示, 结合嫦娥五号月壤中球形铁硫化物颗粒内部的复杂矿物关系, 通过热力学计算, 得到该溶氧铁硫化物内部的磁铁矿与金属铁的共存是FeO共析反应的结果($4\text{FeO} = \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}$)。研究基于此类独特的铁硫化物颗粒的形貌特征以及化学特征, 推测该颗粒可能经历了含氧硅酸盐气体与铁硫化物熔融液滴的气-液相反应过程。硅酸盐的气化、氧的溶解以及磁铁矿与金属铁颗粒相的平衡析出等典型特征, 暗示了嫦娥五号月壤中溶氧铁硫化物颗粒是月表的大型撞击事件的产物。

自阿波罗时代以来, 月表磁异常是月球研究的重要科学问题之一, 其成因仍在争论。基于前人研究, 月表磁异常的产生取决于月球外部磁场的强度以及月表物质中铁磁性矿物的含量。除了月核发动机的存在(39亿年前), 撞击过程已被证明是月壳中产生外部磁场的关键途径之一(Crawford and Schultz, 1988)。然而, 关于月表铁磁性矿物的形成和分布尚不清楚, 相对于地球物质而言, 月球内生的火成岩物质通常表现为较弱的磁学特性, 因此较难将已知的月球内生火成岩与月表磁异常联系起来。

Wieczorek等通过对月球南极艾肯盆地的撞击事件进行数值模拟发现, 来自大型撞击的球粒陨石物质(铁镍金属)可以为月表提供高含量的铁磁性矿物, 且这些铁磁性矿物的加入可以用来解释艾肯盆地边缘观察到的磁异常现象(图3)(Wieczorek et al., 2012)。此外, 来自“月球勘探者”号的磁力计数据表明, 月表磁异常的出现与月球撞击盆地的形成密切相关。因此, 与撞击相关的物质可能是月表磁异常的最合理载体(Halekas et al., 2001)。大型撞击事件涉及的极端高温和高压条件必然伴随有强烈的物质转化, 而除了撞击体直接加入的铁磁性物质(如铁镍金属)外, 在大撞击过程中新形成的铁磁性矿物尚未被考虑过。科研人员对嫦娥五号月壤的研究结果表明, 铁硫化物在月球撞击过程中会发生复杂的化学过程, 其通过共析反应形成的高铁磁性矿物(亚微米级磁铁矿和金属铁)可能是月表铁磁性矿物的重要贡献之一。考虑到铁硫化物是球粒陨石的重要组成矿物, 这种反应可能发生在月表的大型撞击事件中, 同时, 由于磁铁矿和金属铁具有很高的磁化率, 无论这些铁磁性矿物是直接由撞击体带入还是通过铁硫化物的反应间接形成, 撞击过程都会降低月表磁异常对月壤厚度的要求。

嫦娥五号着陆区表现出相对较弱的磁场强度, 估计最大磁场强度仅为1.18 nT。尽管如此, 本研究对于剖析月表磁异常成因具有重要意义: 自阿波罗时代以来, 人们对于月球上的铁磁性矿物的认

识以金属铁为主，我们在前人研究的基础上提供了月表另一重要的铁磁性矿物-磁铁矿;(2)以往研究只建立了大型撞击溅射物与月表磁异常之间相关性，而未关注撞击过程中物质的转化，我们的研究有效的建立了铁磁性矿物的形成与撞击事件之间的关联。

相关研究成果发表在《自然-通讯》(Nature Communications)上。研究工作得到国家航天局月球样品CE5C0400YJFM00505和CE5C0200YJFM00302的支持，并获得中科院战略性先导科技专项、国家自然科学基金、中科院青年创新促进会、民用航天技术预先研究项目和中科院前沿科学重点研究计划等的资助。

[论文链接](#)

图1.嫦娥五号月壤中含磁铁矿的球形陨硫铁颗粒

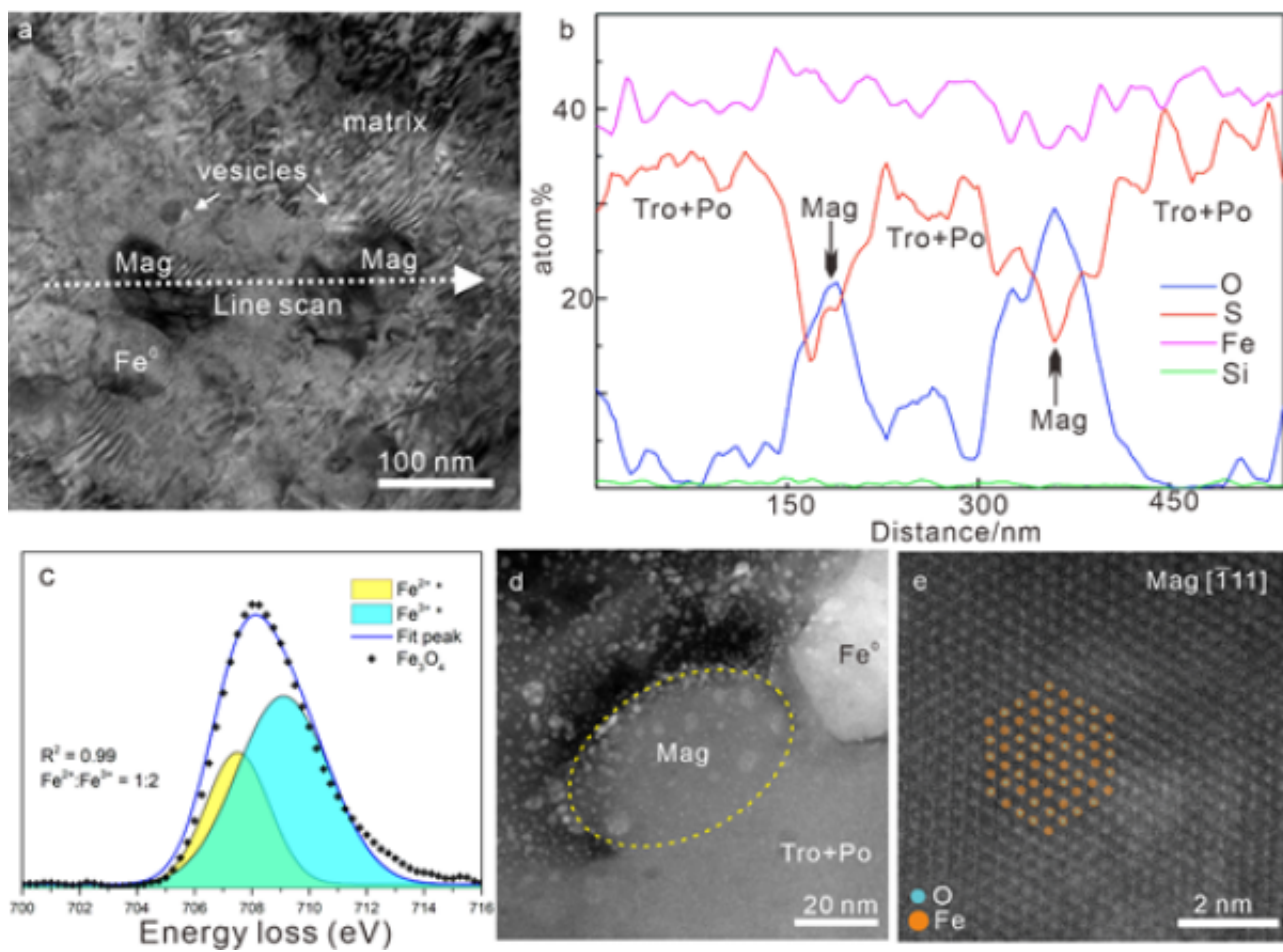


图2.嫦娥五号球形铁硫化物颗粒中磁铁矿的成分及结构证据

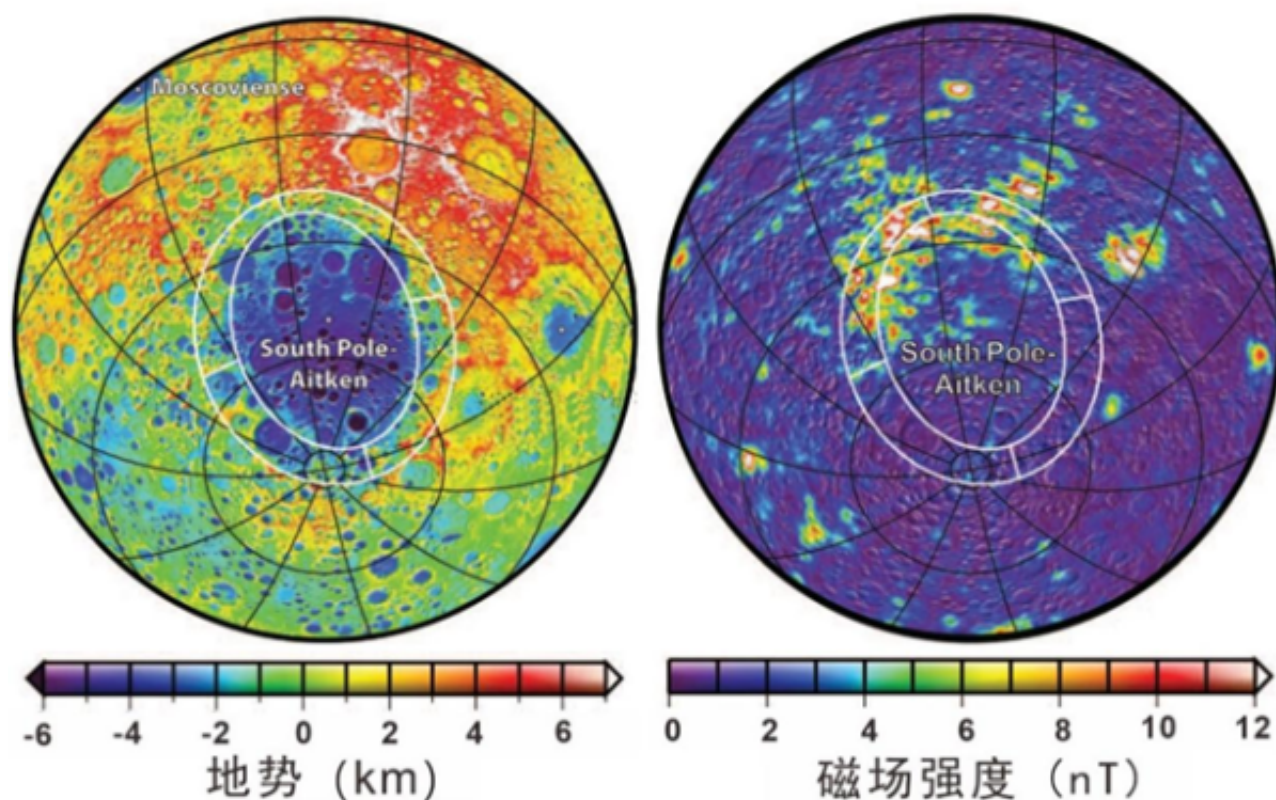


图3.南极艾肯盆地边缘的磁异常分布特征(图片修改自Wieczorek et al., 2012)

研究团队单位：地球化学研究所

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发