

地质地球所揭示嫦娥五号月壤中镍黄铁矿成因

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/24682.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！

硫化物是月岩和月壤的重要副矿物，蕴含丰富的结构、化学和同位素信息，是研究月球岩浆活动和陨石撞击的重要材料。作为重

要的硫化物，镍黄铁矿（ $(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$ ）常与陨硫铁共生。已有研究发现，在Apollo 14号角砾岩中，镍黄铁矿穿插于陨硫铁内部形成陨硫铁-

镍黄铁矿集合体；在Apollo 17号角砾岩中，镍黄铁矿仅赋存于陨硫铁表面；而对Luna 24号月球玄武岩研究则发现，镍黄铁矿以包裹体形式赋存于陨硫铁内部。基于这些早期成果，科研人员提出了三种镍黄铁矿的可能成因：S与FeNi金属、钛铁矿发生化学反应形成；Ni与陨硫铁反应形成；岩石冷却过程中从富Ni的陨硫铁中出溶形成。然而，由于缺乏矿物显微学和晶体学信息，以上认识无法准确厘定镍黄铁矿的成因机制。因此，从微纳尺度到原子水平开展镍黄铁矿及其母体的精细结构研究，是探讨不同类型月岩中镍黄铁矿的分布及其成因的关键，进而有助于制约月球硫化物及其母岩的演化历史。

中国科学院地质与地球物理研究所电子显微镜实验室唐旭工程师、研究员李金华与合作者，综合利用聚焦离子束-扫描电镜-透射电镜技术（FIB-SEM-TEM），对嫦娥五号返回月壤样品（CE-5）的玄武岩和角砾岩颗粒中的硫化物开展精细结构研究，并获得如下新认识。（1）CE-5月壤玄武岩岩屑中镍黄铁矿以包裹体形式赋存于陨硫铁内部【陨硫铁成分（wt.%）：~61.8-62.4%

Fe，~35.4-37.1% S，0.02-0.06% Ni】，组成了陨硫铁-镍黄铁矿集合体。而在研究所分析的月壤角砾岩中，镍黄铁矿多以片状晶和静脉包裹体的形式赋存于陨硫铁的内部和边部【陨硫铁成分（wt.%）：~59.6-61.7% Fe，~34.7-35.4% S，0.51-2.78% Ni】，并在镍黄铁矿内部发现了赋存的Fe-Ni金属，三者组成了陨硫铁-镍黄铁矿-FeNi金属集合体（图1）。（2）透射电镜晶体学分析表明，玄武岩中的镍黄铁矿和寄主矿物陨硫铁具有共格的生长关系，二者的晶体取向关系为 $[0001]_{\text{Tro}} //$

$(404)_{\text{Pn}}$ ， $d(03-30)_{\text{Tro}} \approx d(04-4)_{\text{Pn}}$ ， $d(30-30)_{\text{Tro}} \approx d(440)_{\text{Pn}}$ ， $d(3-300)_{\text{Tro}} \approx d(440)_{\text{Pn}}$ （图2d-f）。在角砾岩中，镍黄铁矿和寄主陨硫铁具有 $[-12-10]_{\text{Tro}} // [-112]_{\text{Pn}}$ ， $(0002)_{\text{Tro}} // (1-11)_{\text{Pn}}$ ， $(30-30)_{\text{Tro}} // (440)_{\text{Pn}}$ ， $d(0002)_{\text{Tro}} \approx d(1-11)_{\text{Pn}}$ ， $d(30-30)_{\text{Tro}} \approx d(440)_{\text{Pn}}$ 的晶体学拓扑关系（图2j-l），同样表明镍黄铁矿与陨硫铁具有共格生长关系。此外，透射电镜分析还证实包裹体Fe-

Ni金属（镍纹石）取向于镍黄铁矿生长，二者的晶体取向关系为 $[01-1]_{\text{Ta}} // [-112]_{\text{Pn}}$ ， $(200)_{\text{Ta}} // (440)_{\text{Pn}}$ （图2m-o）。这些晶体学特征指示，镍黄铁矿从寄主陨硫铁中出溶形成，镍纹石从寄主镍黄铁矿中出溶形成。（3）基于原子迁移模型，该研究进一步在物理机制上阐释了矿物陨硫铁→镍黄铁矿和镍黄铁矿→镍纹石出溶转变的可行性（图3）。陨硫铁为六方结构， $[10-10]$ 方向呈ABAB...堆垛顺序，Ni原子通过扩散和原子重排，并取代部分Fe原子，形成ABCABC...堆垛顺序，即面心立方镍黄铁矿结构。对于镍黄铁矿→镍纹石转变，以 $[001]$ 方向镍黄铁矿的L1和L2层原子示例，L1层的S原子和空位以及L2层的空位被Fe/Ni原子取代，并沿 $\{00n\}$ 生长，最终形成镍纹石结构

。

综上，该研究揭示了月球玄武岩和角砾岩中的镍黄铁矿均是从陨硫铁中出溶形成，既不是迁移的S与FeNi金属等反应，也不是迁移的Ni和陨硫铁反应形成。结合角砾岩中陨硫铁的Ni含量及其赋存的FeNi金属包裹体，该研究推测角砾岩中镍黄铁矿的形成可能与外来的陨石撞击有关联（图4）。上述成果为探索月球硫化物的起源和地质演化提供了新的限定，并为其他地外样品（如小行星、彗星等）的矿物演化研究提供了新方法。

相关研究成果发表在Lithos上

。研究工作得到国家自然科学基金、地质地球所重点部署项目和地质地球所实验技术创新基金项目支持。

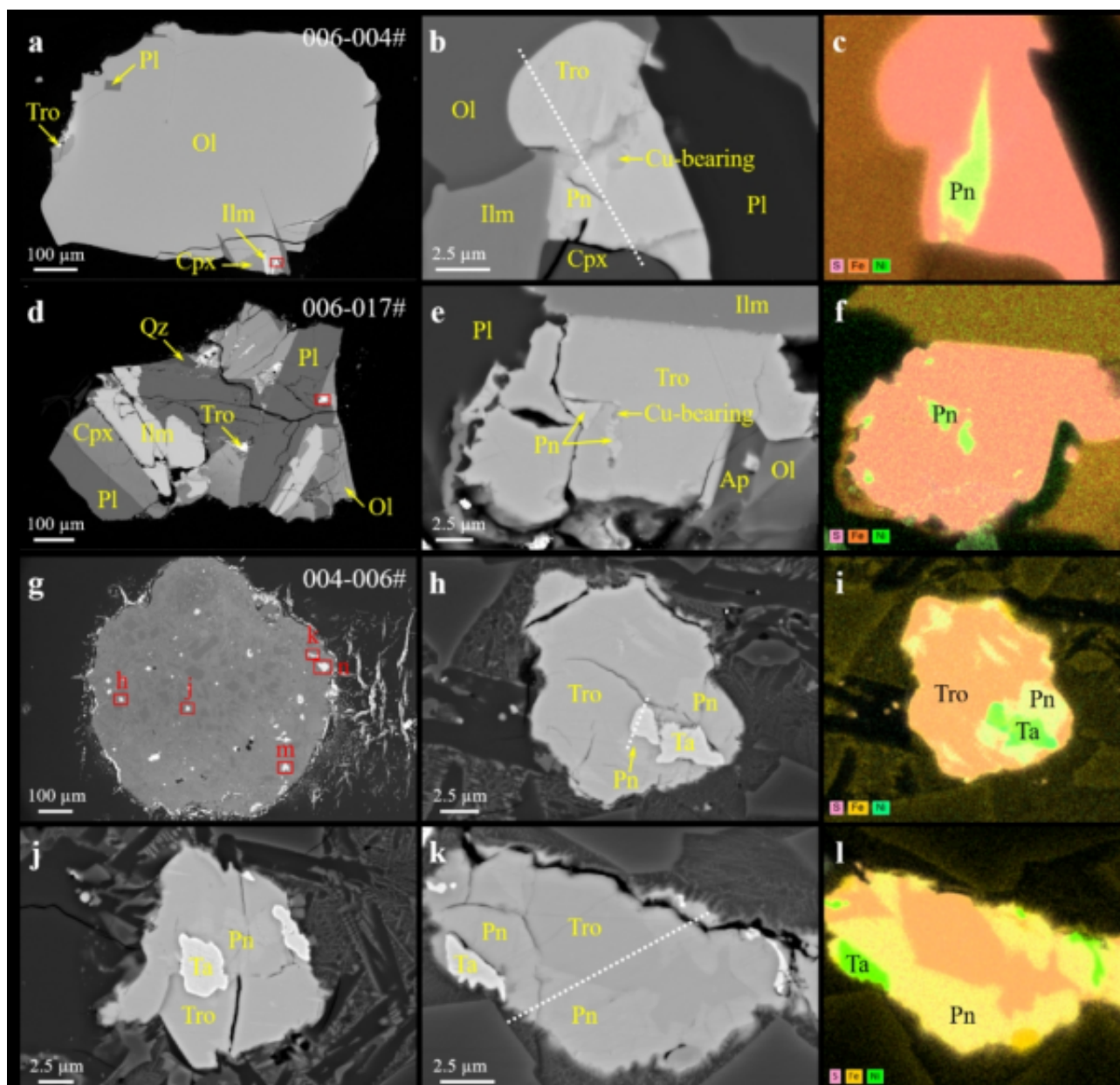


图1. （a-f）玄武岩岩屑的背散射图像和硫化物的成分叠加图；（g-l）角砾岩岩屑的背散射图像和硫化物的成分叠加图。

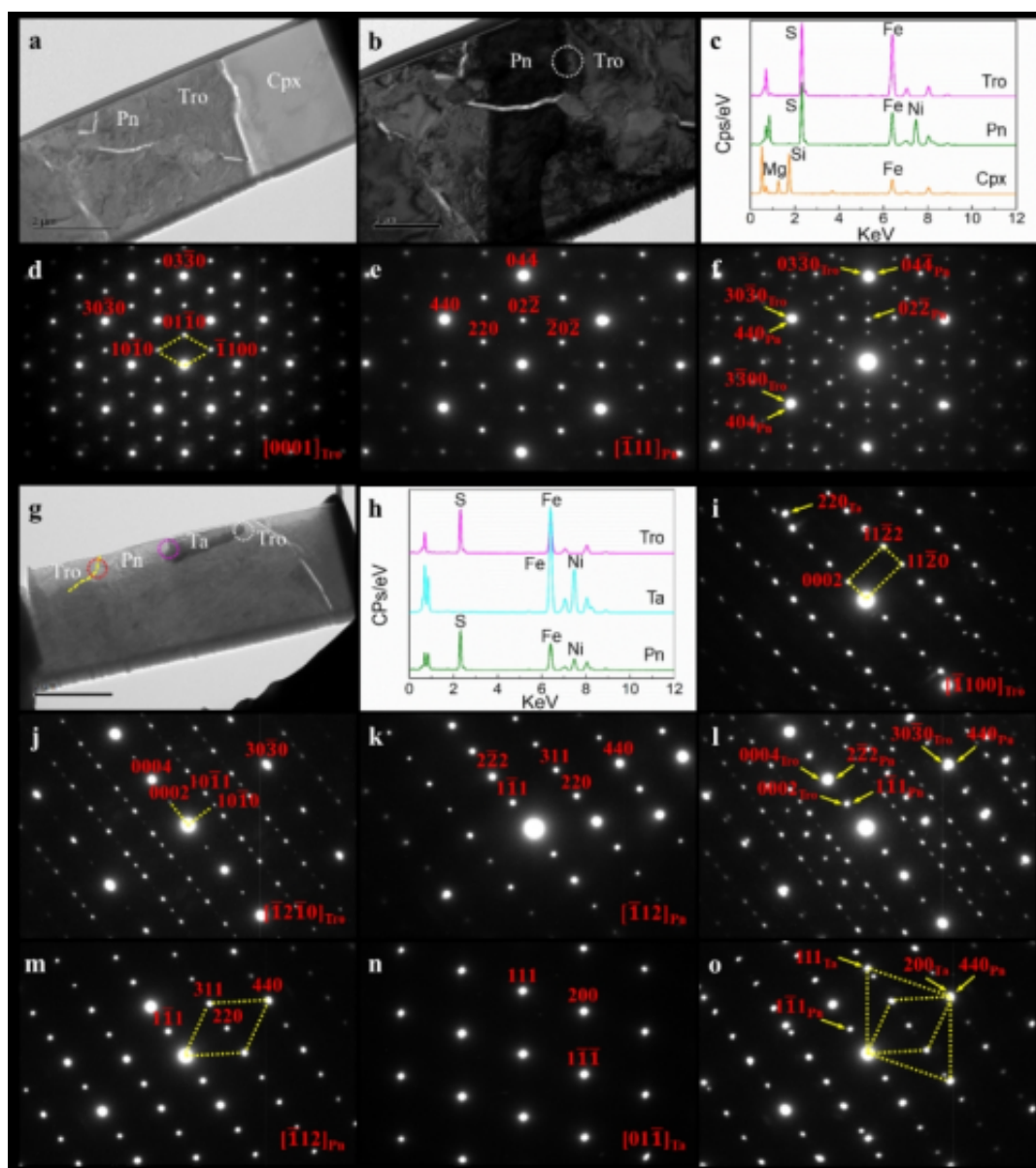


图2. (a-f) 月球玄武岩中镍黄铁矿和陨硫铁的透射电镜成分和结构分析；(g-o) 角砾岩中镍黄铁矿、镍纹石和陨硫铁的透射电镜分析。

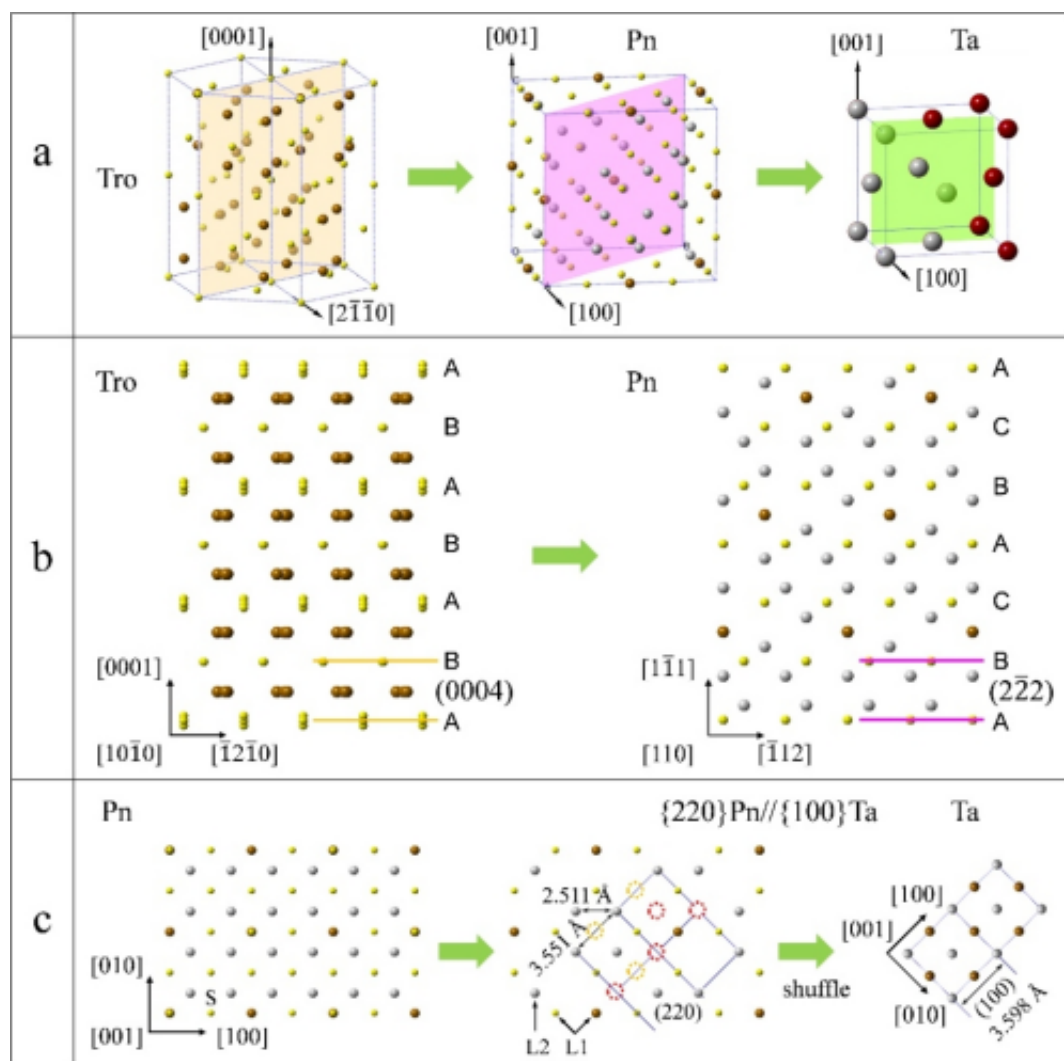


图3.
陨硫铁 (Tro) → 镍黄铁矿 (Pn) 和 镍黄铁矿 (Pn) → 镍纹石 (Ta) 出溶转变的原子迁移模型

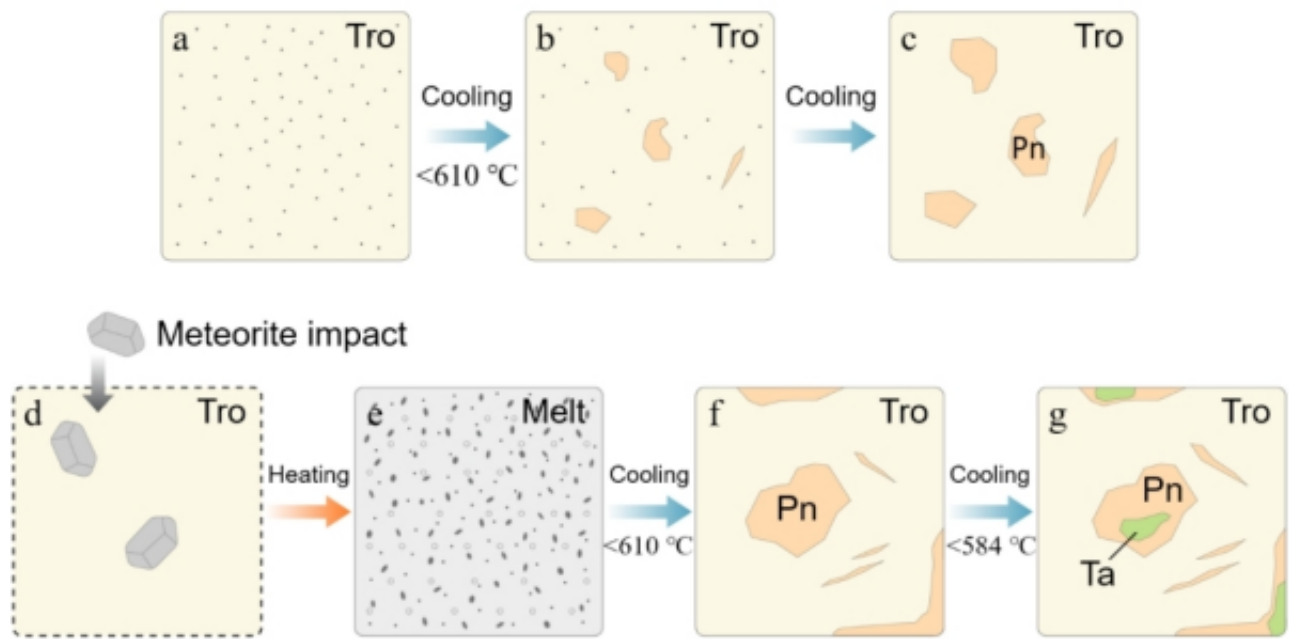


图4. 玄武岩 (a-c) 和角砾岩 (d-g) 中镍黄铁矿和镍纹石的形成模式

研究团队单位：地质与地球物理研究所

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