
月球玻璃地质时间尺度的超凡抗老化效应研究获进展

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/24926.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！

玻璃被认为是气、液、固之外的第四态物质，对社会发展和科技进步起着重要作用。玻璃是热力学不平衡状态物质，在玻璃化转变温度以下会不可避免地朝平衡态转变，即发生物理老化（以下简称老化），导致其结构和性能随着时间的推移而转变，直接影响玻璃的稳定性。因此，老化是玻璃研究领域的前沿热点。尤其是玻璃的长期抗老化效应，关系到玻璃的能态下限以及相应的结构和性能极限，备受关注。2022年，中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心报道了Ce基金属玻璃经过近18年室温时效，仍保持玻璃态结构的独特超稳定特性。然而，由于实验时间的有限性以及经历长时间老化玻璃试样的稀缺性，玻璃的长期老化机制尚不明晰。

月球玻璃是月球风化层的常见成分，主要来源于陨石撞击。

月球玻璃经历了极长时间（数百万至数十亿年）的老化，仍保持着完好的玻璃结构，故可以作为评价玻璃长期抗老化效应的理想材料。同时，这类超凡抗老化的月球玻璃是潜在的优质空间服役材料。月球风化会形成玻璃，其含量（主要包括玻璃颗粒和胶结物）随着其成熟度的增高而增大。在一些高度成熟的阿波罗月球风化层中，玻璃的体积分数可达60-70%。这表明玻璃（玻璃态）可能是空间环境中最适合和最稳定的材料（或结构状态）。同时，玻璃存在于许多其他行星风化层，如火星、水星、金星和大型小行星等。因此，玻璃材料在未来空间探索、地外生存颇具应用潜力；月球风化层为空间探索用玻璃材料的制备提供了经济、便捷的在地原材料。研究认识月球玻璃的老化和抗老化效应，可为未来月球和行星际探索的材料选择、成份设计和性能调控提供指导。

得益于中国科学院院士、物理所研究员汪卫华，中国科学院院士、南京大学教授邹志刚，以及中国科学院院士、中国空间技术研究院研究员杨孟飞组织的嫦娥五号月壤试样研究项目和团队，松山湖材料实验室联合物理所、钱学森实验室和南京大学，探究了月球玻璃地质时间尺度的老化效应和抗老化机制。该研究克服了嫦娥五号月壤试样中玻璃含量较少（15-16 wt.%），玻璃颗粒非常细小，难以从月壤混合物中分离出足够的纯玻璃试样用于传统较为便捷的热分析法，难以还原初始态比照样品等一系列困难；通过精细的FIB微纳制样及纳米压痕力学测试，并结合高分辨球差透射电镜表征，探索了嫦娥五号月球玻璃的地质时间老化效应。

该研究测定了月球玻璃试样的玻璃转变温度（ T_g ）和晶化温度（ T_x ）等关键热力学参数，为后续玻璃颗粒的回复处理提供了依据。研究在嫦娥五号月壤试样中选出若干尺寸相对较大、年龄均超过2百万年的典型玻璃颗粒（图1），进行相应的微纳制样、力学测

试与结构表征。由于原始的（fresh）月球玻璃颗粒是通过撞击形成的，具有极快的冷却速率（每秒数百至数千开尔文），而现有的实验方法较难得到该原始状态的月球玻璃。科研人员巧妙地利用玻璃加热到其过冷液态可以消除其老化效应的原理，将超老化玻璃颗粒（即经历过长时间老化的返回玻璃颗粒）加热至其过冷液体区（ T_g 和 T_x 之间），进一步以相对较低的冷却速率冷却至室温得到回复态试样，并以此作为参考试样用以评估月球玻璃的老化效应。此外，该工作还对某些玻璃状颗粒采用了较高的冷却速度（240 K/s）以确保玻璃样品被高度回复接近原始态。

研究表明，月球玻璃的长期老化效应均非常显著。保守评估这些月球玻璃颗粒老化所致杨氏模量的增量高达几十个百分点（其中最大增量高达73.5%，图2），在其他玻璃体系中尚未报道过如此严重的老化效应。透射电镜分析结果表明（图3），月球玻璃杨氏模量的大幅升高是由老化引起玻璃试样的巨大体积收缩和成份均匀化所致（其中体积收缩为主要原因）。玻璃颗粒超老化试样相较于回复试样体积收缩可达10.8-12.5%。这些经历百万年以上老化的玻璃，仍保持玻璃的特征和特性以及优异的力学性能。研究发现，在这些月球玻璃颗粒中观察到不同程度的杨氏模量和硬度之间的解耦现象，即老化虽然导致杨氏模量显著增加，其硬度变化却相对较小（图2）。通过对比回复研究证明这些月壤玻璃老化前后塑性变形方式发生了转变，得以保持其硬度变化不大。通过对比各种玻璃体系在不同时间尺度下的老化效应（图4），揭示月球玻璃的超凡抗老化效应主要归因于在特殊的月球环境下自然选择的复杂成分（高熵效应）。高熵和复杂的成分可以大幅提升淬火玻璃的能量状态和结构非均匀性，从而延长玻璃的寿命，呈现出超凡的抗老化效应。上述研究证明了通过多组分混合、熵调控和适当微量元素的掺入，可以有效增强玻璃抵抗老化的能力，进而增强其抗老化效应和性能调控以及服役范围。这一成果为面向辐射防护和空间应用的高性能玻璃材料的研发和性能调控提供了指导和帮助。

11月8日，相关研究成果以Geological timescales aging effects of lunar glasses为题，发表在《科学进展》（Science Advances

）上。本工作中的微纳制样、力学测试和电镜表征等实验得到了松山湖材料实验室公共测试平台和大湾区电镜中心的支持。研究工作获得国家重点研发计划、广东省基础与应用基础研究重大项目、国家自然科学基金、中国空间技术研究院钱学森实验室空间探索项目、松山湖材料实验室松湖青年学者项目的支持。

[论文链接](#)

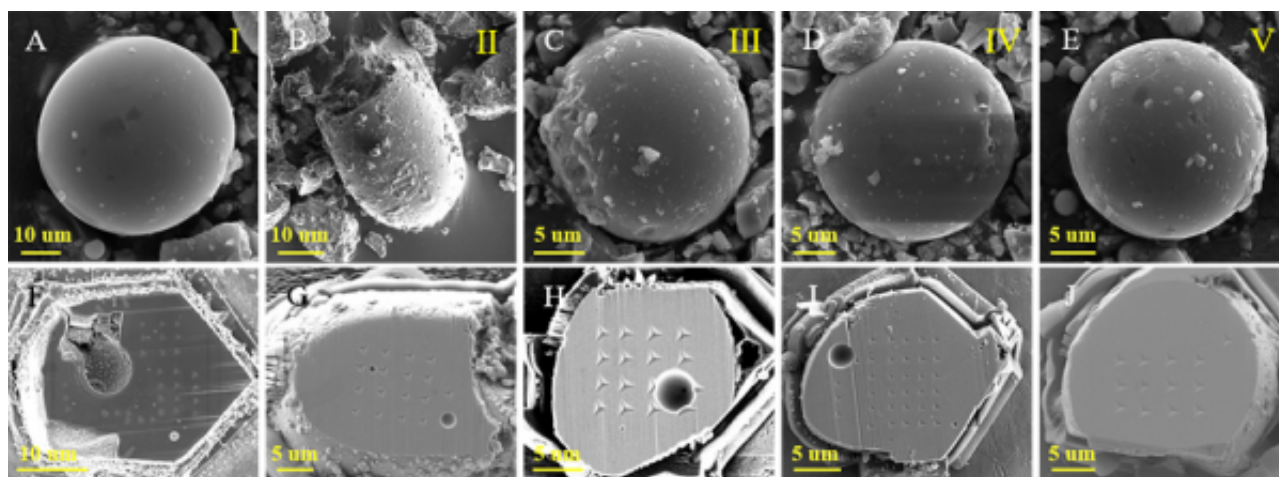


图1. 典型月球玻璃颗粒及其压痕形貌

图2. 月球玻璃颗粒 (-) 超老化态试样与回复态试样之间的杨氏模量和硬度比较 (H-A、L-R和M-R分别指代超老化、轻度回复和高度回复试样)

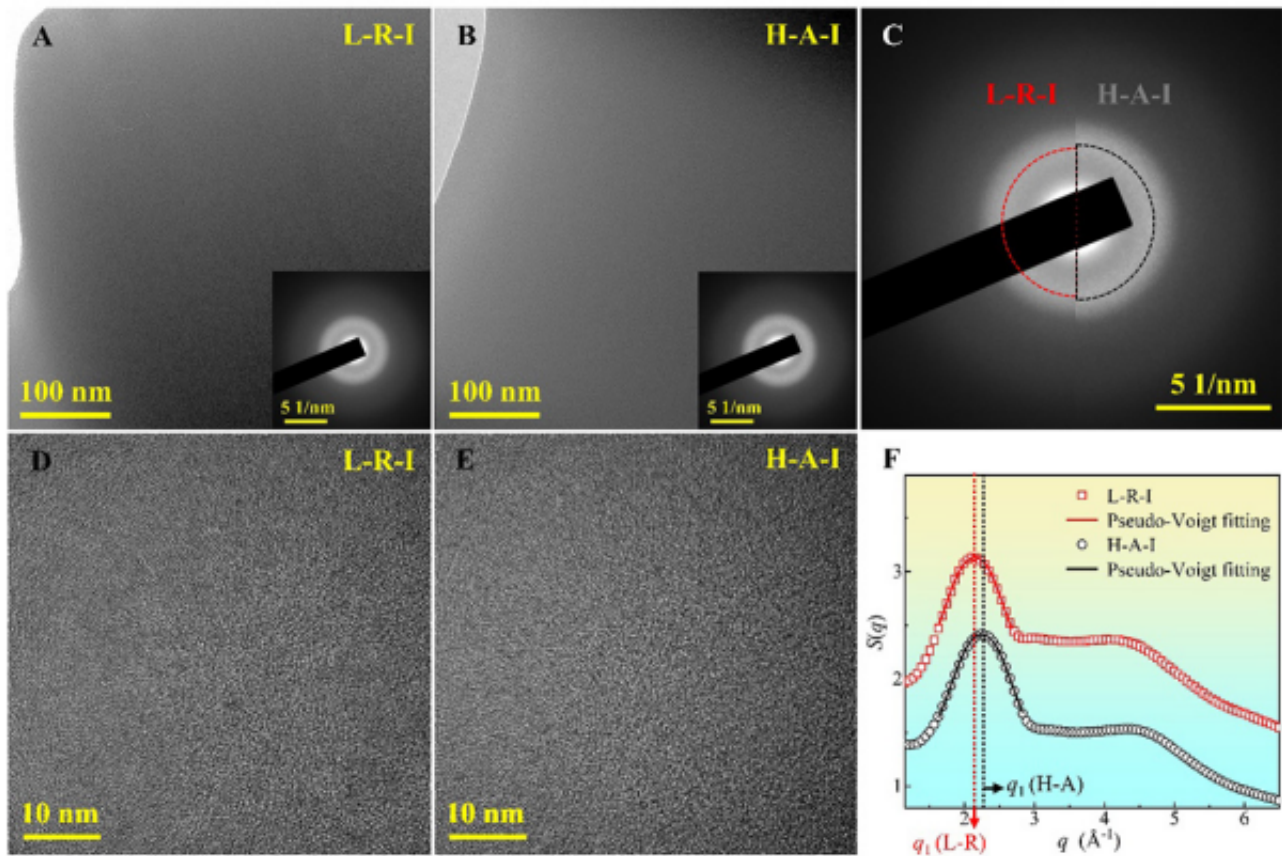


图3. 月球玻璃颗粒 轻度回复试样和超老化试样的结构特征

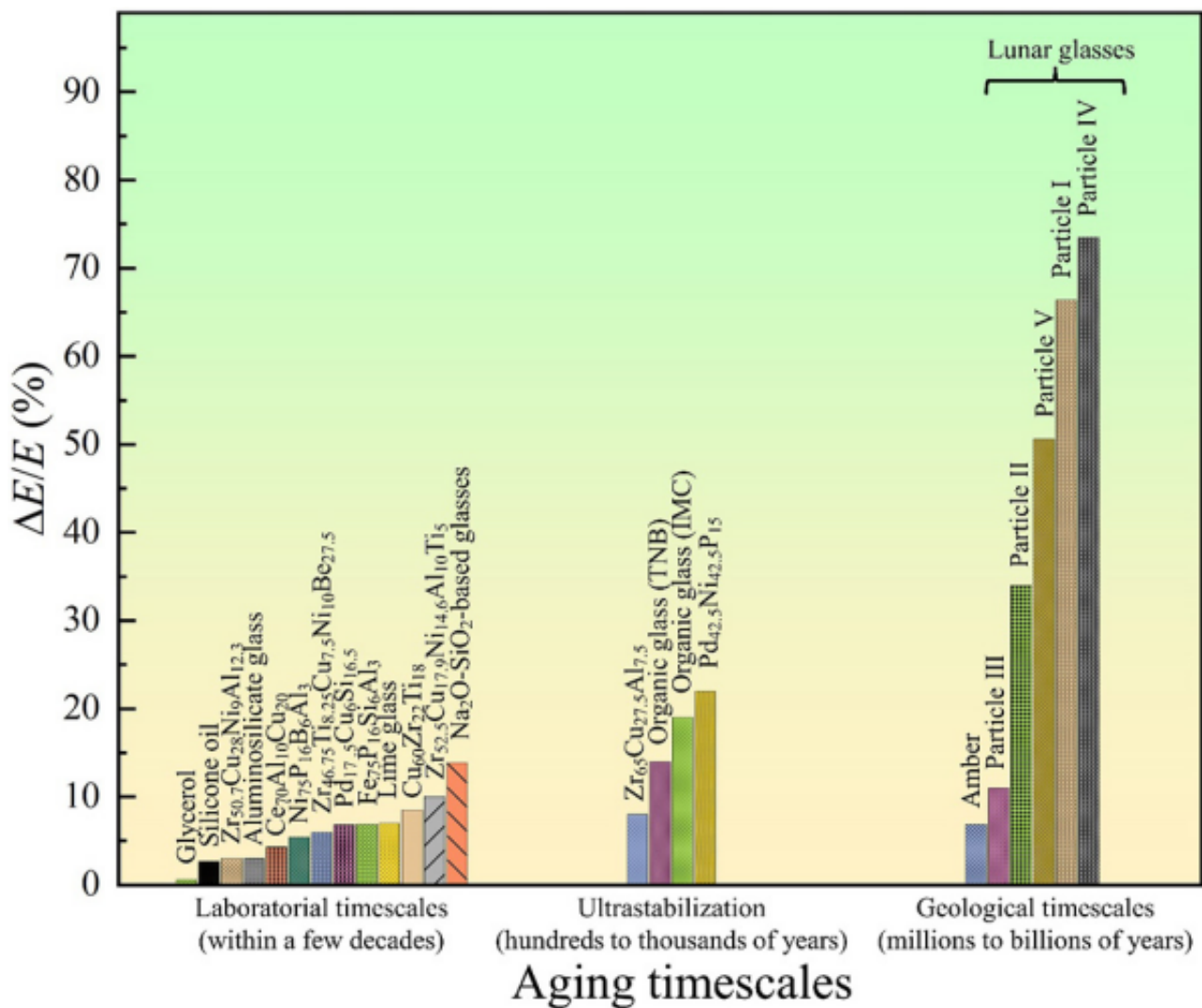


图4. 月球玻璃（lunar glasses）与其他各种玻璃体系经历不同时间尺度老化后杨氏模量变化对比

研究团队单位：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](http://www.iikx.com)转发