

实验验证非晶合金超稳定性

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/19916.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！

非晶合金能否长时间保持稳定？非晶材料稳定性的物理机制和根源是什么？这些都是非晶合金材料和物理领域的重要难题。

众所周知，非晶态物质的无序原子排列结构特征，导致其相比晶体材料具有更高的自由能，在能量上处于亚稳态。不同种类的非晶态物质呈现出不同的稳定性，如火山玻璃和琥珀可在恶劣的物理、化学环境中稳定存在数亿年；而非晶合金则表现出相对较差的热稳定性，如第一个被发现的Au-Si非晶合金在室温下3小时后就发生晶化，24小时后样品完全晶化。较差的热稳定性使非晶合金在弛豫或老化过程中物理和力学性能发生恶化，从而限制非晶合金的长时间服役和大规模应用。因此，非晶合金的稳定性和温度密切相关，温度越高稳定性越低。研究非晶合金的长时间稳定性，最有效的手段就是考察其玻璃转变温

度(T_g)

附近的长期稳定性。然而，通常的

非晶合金均具有较高的 T_g

，使得在实验室中长年累月的超长时间高温退火实验变得颇为困难，甚至不可能。若寻找到一种非晶合金材料，其 T_g 在室温附近，就可以利用自然时效（即室温退火，room temperature aging）来探究其长时间的稳定性。

中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心汪卫华团队张博等于2005年开发出Ce-基大块非晶合金（图1），其拥有较低的玻璃化转变温度($T_g \sim$

67 K)，在开水中就可以进行塑性加工，因而Ce-基非晶合金被称为“金属塑料”【Phys. Rev. Lett. 94, 205502

(2005)】。低 T_g 点的特性使Ce-

基金属塑料

成为探究非晶合金超长

时间稳定性的理想材料体系。如图2所示，较低

的 T_g 点使得室温老化效应对Ce-基非晶合金特别显著，室温下对Ce-

基非晶合金的老化相当于其在 $0.85T_g$

下高温退火，这高于其他非晶合金体系在室温下的老化效应，如Zr-

基非晶合金在室温下老化等于其在 $0.45T_g$ 下退火。理论上，Ce-基非晶合金室温下显著的老化效应可以允许其在合适

的退火温度窗口内进行无限长时间的老化实验，这是其他高 T_g 点非晶合金体系不可能获得的。

中科院物理所和松山湖材料实验

室研究了Ce-基金属塑料在 $0.85T_g$

下长达17.7年的超长室温老化样品的

稳定性问题，如此接近 T_g

点的高温长时间老化实验样品在对非晶合金以往的研究中尚未有过。实验发现，超长时间高温老化后的Ce-基非晶合金样品依旧保持完美的非晶态（图3A-B），表现出极强的抗晶化能力，打破了传统对非晶合金

稳定性差的认知。如图3C-

D所示，老化后Ce-基非晶合金的 T_g 点升高了27K，虚化温度 T_f

下降了46K，这说明其动力学稳定性和热力学稳定性同时得到显著提升，长时间老化使其成为一

参数来表征玻璃的能量状态与理想玻璃之间的距离，从而能够评判玻璃热力学稳定性的优劣。如图4A所示，17.7年室温老化后的超稳Ce-基非晶合金的热力学稳定性优于多数通过气相沉积制备的超稳玻璃薄膜，甚至可与上亿年老化后的琥珀相媲美。

Ce-基非晶合金的超稳性如何实现？分析发现，Ce-基超稳非晶合金的获得与它的强脆性特性密切相关，Ce-基非晶合金的动力学脆性值在20-30之间，是典型的强液体玻璃体系。通常，强液体的能量势垒图存在一个大的能谷而弱液体的能量势垒是由多个不同的大能谷组成，这意味着强液体的微观动力学是相对均匀的。如图4B-C所示，强液体特性使得Ce-基非晶合金在老化过程中能够持续快速地通过临近小能谷间的跃迁最终到达较低的能量状态。图4A中脆性有机玻璃IMC（ $m \sim 82.8$ ）和PS（ $m \sim 116$ ）的弛豫速率显著小于强Ce-基非晶合金（ $m \sim 28$ ），验证了强玻璃体系能够有效快速弛豫的推断。

强脆性特征能够保障Ce-基非晶合金的快速弛豫接近理想玻璃态，而超稳性的获得需要高的抗晶化能力能够阻碍弛豫过程中形核、通晶行为的发生。根据经典形核理论，研究比较了Ce-基非晶合金与其他合金体

系的形核率大小，发现强的液体特征和较大的 T_g 值促使Ce-基非晶合金拥有极低的形核率（图5），表现出可以与琥珀媲美的强抗形核能力。此外，通过超稳态Ce-基非晶合金有助于阐述一些经典的玻璃态物理科学问题，例如，通过非对称退火实验发现超稳态Ce-基非晶合金可以到达平衡液态而不结晶，这支持了玻璃只有在弛豫完全结束后才会成核结晶的观点。

相关研究成果以Ultrastable metallic glass by room temperature aging为题，发表在Science Advances

上。研究工作得到广东省基础与应用基础研究重大专项、国家重点研发计划、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、广东省基础与应用基础研究项目的支持。

[论文链接](#)

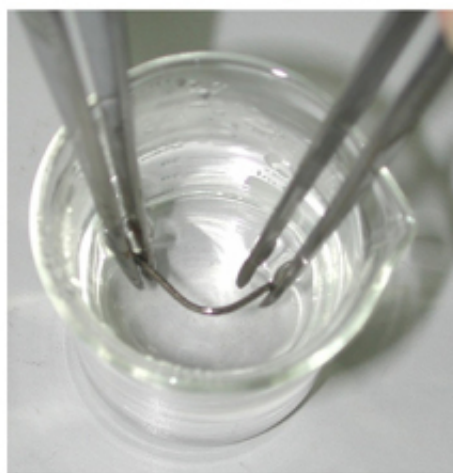
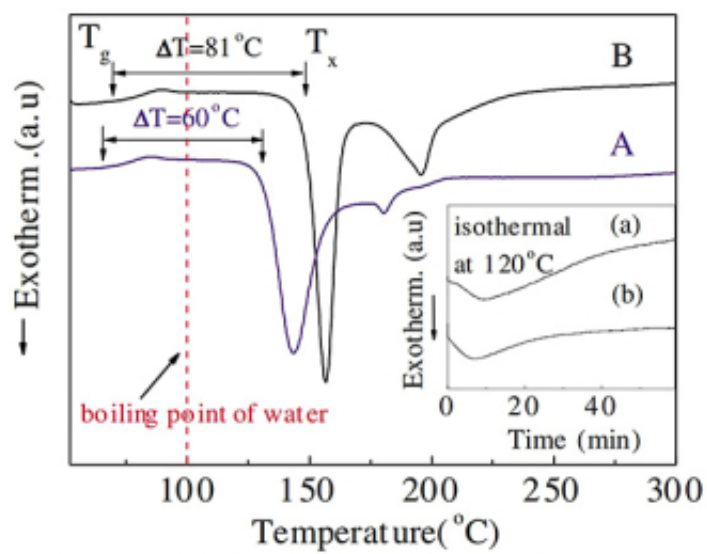


图1.具有低 T_g 点 ($\sim 67^\circ\text{C}$) 的Ce-基非晶合金，在开水中即可进行弯曲变形，被称为“金属塑料”。

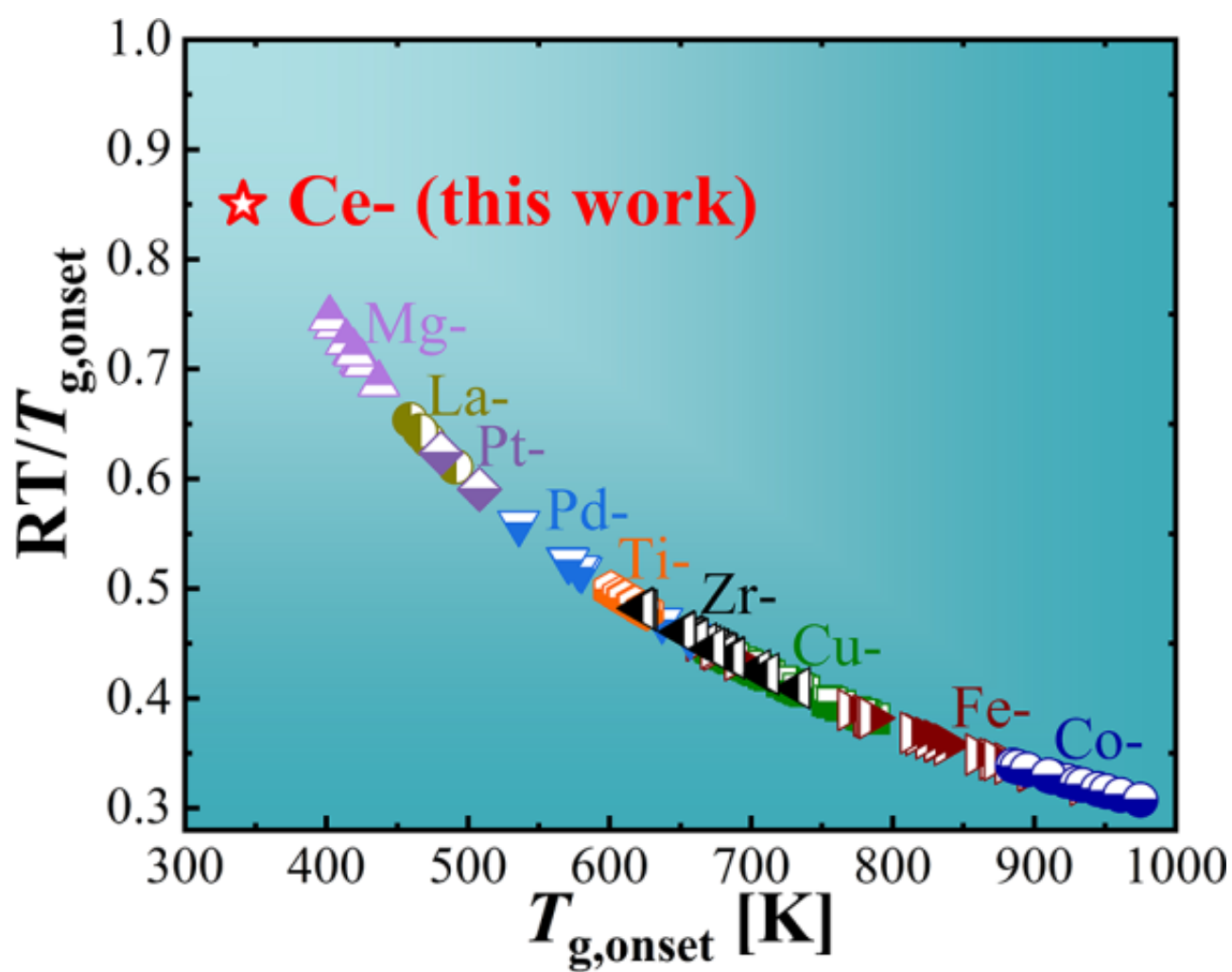


图2.室温下Ce-基非晶合金的老化效应显著强于其他非晶合金体系。

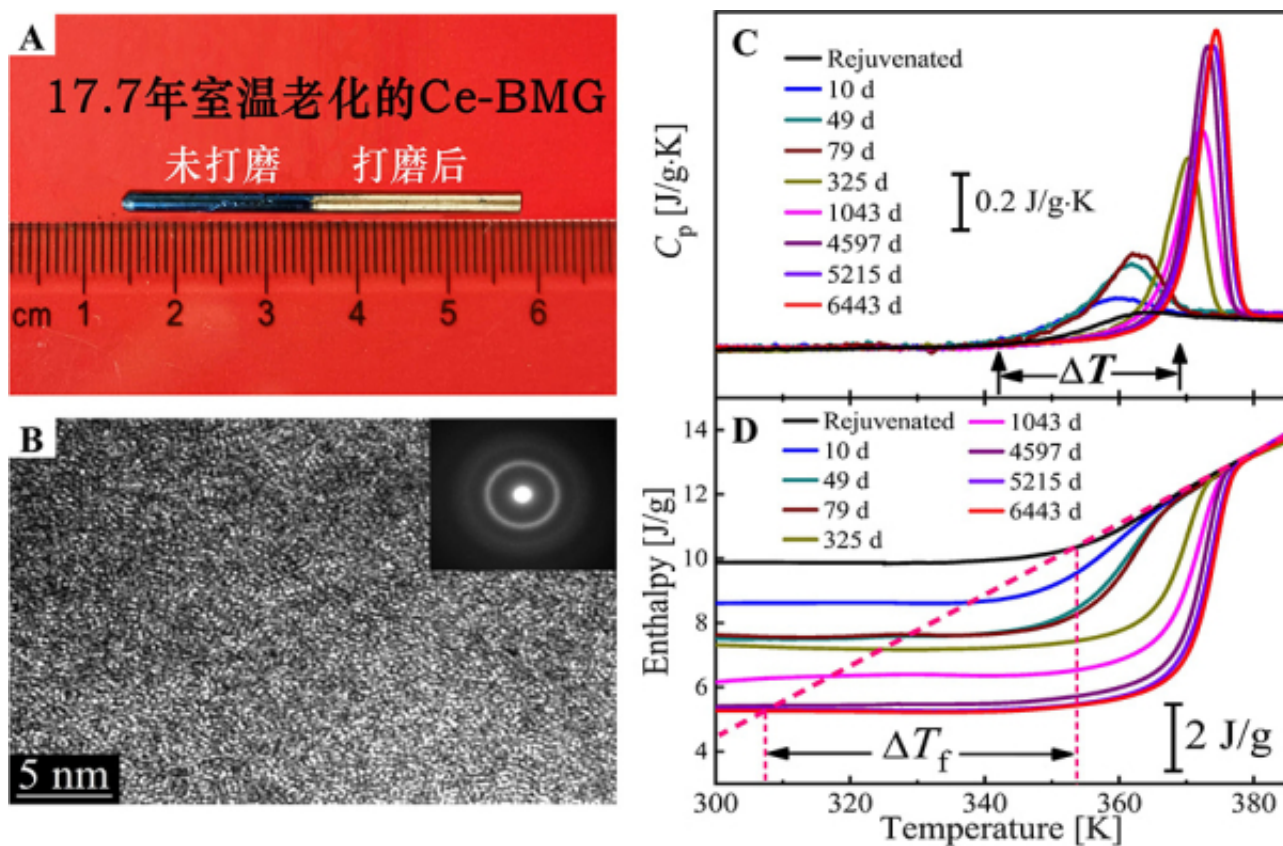


图3. $\text{Ce}_{70}\text{Al}_{10}\text{Cu}_{20}$ 室温 ($0.85T_g$) 下老化17.7年后依然呈现出完美的非晶态，其热力学和动力学稳定性均有显著提升，表现出可以与琥珀媲美的高稳定性。

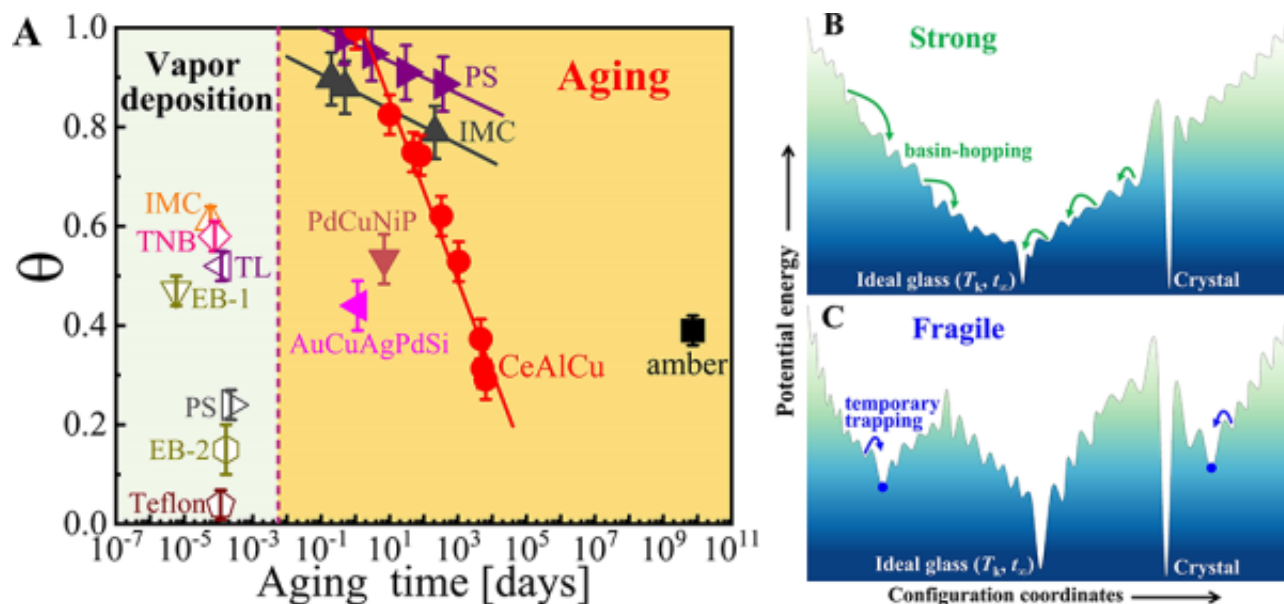


图4. (A) 镀膜或老化得到的超稳态玻璃

。(B) 强液体和 (C) 脆性液体的能垒图比较。 $\text{Ce}_{70}\text{Al}_{10}\text{Cu}_{20}$ 属于强玻璃体系，有助于其持续快速地往超稳态弛豫。的热力学稳定性

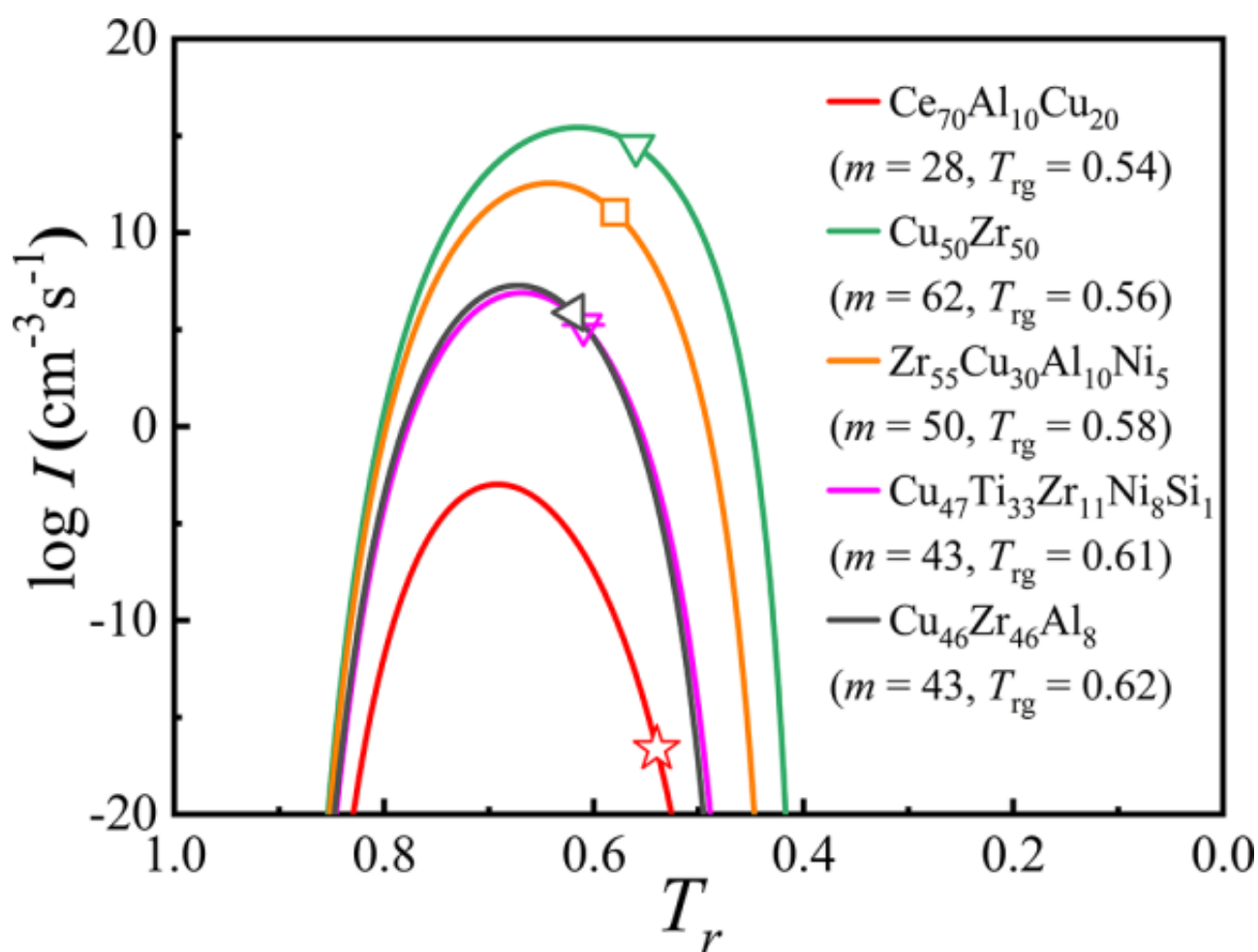


图5. $\text{Ce}_{70}\text{Al}_{10}\text{Cu}_{20}$ 与其它玻璃体系形核率的比较。Ce-基非晶合金的低形核率能够有效阻碍其形核晶化，从而拥有显著的高热稳定性。

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](https://www.iikx.com)转发