编织石墨烯原子氧侵蚀新机制破解！为高超声速热防护材料“量体裁衣”MDPI C — Journal of Carbon Research

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/39720.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！

编织石墨烯原子氧侵蚀新机制破解！为高超声速热防护材料“量体裁衣”MDPI C — Journal of Carbon Research。论文标题：Atomic-Scale Mechanisms of Catalytic Recombination and Ablation in Knitted Graphene Under Hyperthermal Atomic Oxygen Exposure

论文链接：https://www.mdpi.com/2311-5629/11/3/67

期刊名：C — Journal of Carbon Research

期刊主页：https://www.mdpi.com/journal/carbon

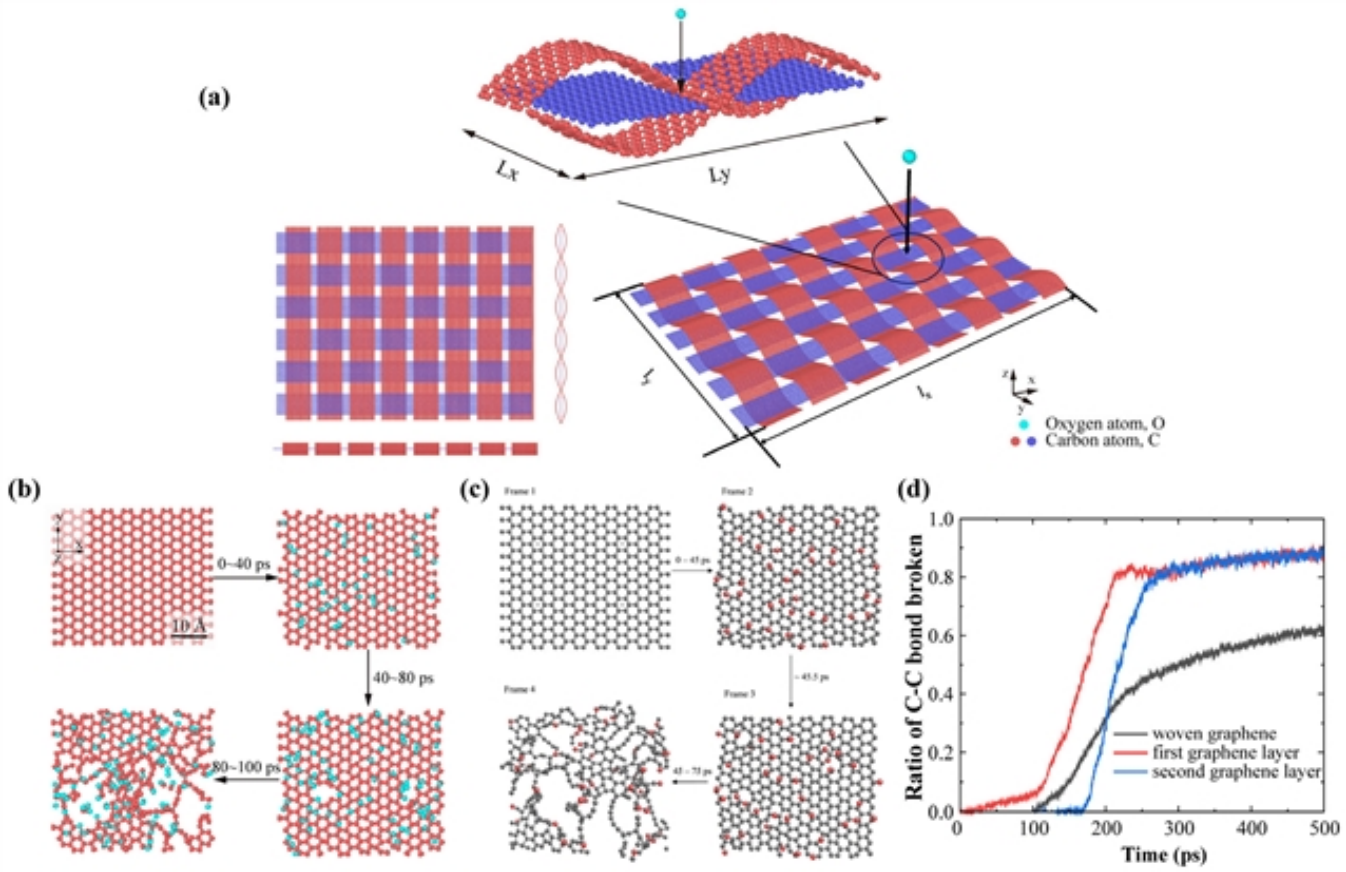
高超声速飞行器在大气层内高速飞行时，表面将面临超高温、强氧化、高能粒子冲刷的极端环境。其中，原子氧的剧烈轰击会同时引发表面氧催化复合放热和材料氧化烧蚀两大关键过程，直接决定热防护系统的安全性与使用寿命。然而，这两种微观反应的竞争规律、能量阈值与结构演变机制，长期以来缺乏原子层面的精准解析。

近日，江南大学魏宁教授团队联合国家纳米科学中心团队在国际碳材料领域期刊 C 上发表重要成果，首次在原子尺度揭示了编织石墨烯在超热原子氧轰击下的催化复合与烧蚀耦合机制，为新一代轻质、耐高温碳基热防护材料设计提供了关键理论支撑。

一、极端环境挑战：热防护材料面临 双重考验

在高超声速极端服役环境中，原子氧具有极高入射动能，撞击碳基材料表面后会引发复杂的气 — 固界面反应。一方面，氧原子在材料表面催化复合生成氧气，伴随剧烈放热，进一步加剧热负荷；另一方面，高能粒子直接打断碳 —
碳键，造成表面刻蚀、孔洞生成、结构坍塌，最终导致材料失效。

传统碳基热防护材料虽耐高温，但在原子氧长期轰击下，催化放热与烧蚀侵蚀难以协同调控。编织石墨烯因其独特的三维交织结构，在结构稳定性、能量耗散和抗氧化潜力上具有独特优势，但其在超热原子氧环境下的动态响应与微观机理仍不清楚，成为制约工程应用的关键瓶颈。



二、原子级新发现：催化与烧蚀存在 能量临界点

团队采用反应分子动力学模拟，系统研究了不同入射能量（0.1 – 8.0 eV）和不同入射角度下，原子氧与编织石墨烯的相互作用过程，追踪化学键断裂、表面吸附、气体产物生成等动态演变。

研究首次发现，催化复合与烧蚀侵蚀存在明确的能量竞争关系：

在低 — 中等能量（≤5.0 eV）条件下，原子氧更容易在石墨烯表面吸附、迁移并发生催化复合，以O?生成为主，烧蚀程度较低；当入射能量超过临界值，高能粒子直接冲击碳原子骨架，C – C 键大量断裂，表面迅速产生缺陷与孔洞，烧蚀产物（CO、CO?）显著增加，反应由 催化主导 转向 烧蚀主导。

同时，研究还证实，入射角度越大，烧蚀越剧烈、复合效率越低。这是因为垂直入射带来更强的冲击能量，更容易破坏碳结构。与平面石墨烯相比，编织石墨烯的交织结构能够有效分散能量、延缓缺陷扩展，表现出更优异的抗烧蚀潜力。

三、工程意义：为新一代热防护材料提供 设计密码

本研究在原子尺度建立了编织石墨烯 — 原子氧相互作用的完整机理图谱，明确了催化复合与烧蚀侵蚀的竞争规律、能量阈值和结构响应，对高超声速热防护系统设计具有重要工程价值。

研究成果可为碳基复合材料、热防护涂层、轻质防热结构提供定量化设计依据：通过调控石墨烯编织结构、缺陷密度与表面状态，可以在一定能量区间内增强催化稳定性、抑制过度烧蚀，实现

耐热 — 抗氧化 — 长寿命 的协同优化。

该研究不仅填补了碳基材料在极端原子氧环境下的机理空白，也为发展轻质、高效、耐极端环境的新一代热防护材料提供了关键理论指导，对提升高超声速飞行器可靠性与安全性具有重要意义。

相关论文信息：

Pan, Y.; Zhu, Y.; Zhang, D.; Wei, N. Atomic-Scale Mechanisms of Catalytic Recombination and Ablation in Knitted Graphene Under Hyperthermal Atomic Oxygen Exposure. C 2025, 11, 67. https://doi.org/10.3390/c11030067

C 期刊介绍

主编：Prof. Dr. Craig E. Banks， Manchester Metropolitan University， UK

期刊全称为 C — Journal of Carbon Research，是聚焦碳材料及碳研究的国际性、开放获取的期刊，研究范围涵盖碳材料与碳同素异形体、碳材料的性质、表征及应用，二氧化碳利用与转化，碳循环、碳捕获与储存，碳骨架等。目前，期刊已被 Scopus、ESCI、DOAJ、CAS 等重要数据库收录。

2024 Impact Factor：2.9, Q3 in Materials Science, Multidisciplinary

2024 CiteScore：3.4, Q2 in Environmental Science (miscellaneous), and Materials Science (miscellaneous)

来源：C — Journal of Carbon Research

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转发