

轻质超柔韧、高热稳定性及高温超隔热的陶瓷气凝胶

作者：writer 来源：爱科学

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/18996.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！

轻质超柔韧、高热稳定性及高温超隔热的陶瓷气凝胶。2022年6月29日，哈尔滨工业大学徐翔教授和李惠教授团队与美国加州大学洛杉矶分校段镶锋教授团队在国际顶尖学术期刊Nature上在线发表了题为Hypocrystalline ceramic aerogels for thermal insulation at extreme conditions的研究成果。

该工作历经3年持续努力，通过多尺度超结构设计，采用半晶质（hypocrystalline）陶瓷材料设计结合zig-zag宏观结构设计，赋予陶瓷气凝胶近零泊松比（ 3.3×10^{-4} ）和近零热膨胀（ $1.2 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ）的双零反常规物理性质，从而获得了轻质超柔韧、高热稳定性及高温超隔热等特性。同时，研究团队创新性地提出了一种气体湍流辅助静电纺丝直接制备三维纳米纤维陶瓷气凝胶的方法，拓展了传统静电纺丝制备二维膜材料的束缚，为实现材料的多尺度超结构设计、高性能、大规模及低成本制备提供了新思路和新方法。

论文通讯作者是徐翔教授、李惠教授、段镶锋教授；第一作者是郭靖然博士、付树彬博士、邓远芃博士；哈尔滨工业大学为第一单位和通讯单位。

极端条件（例如深空和深地等环境中复杂机械载荷和剧烈温度变化）下的热控制，要求隔热材料具备优异的热—力学特性和隔热性能。传统陶瓷气凝胶超隔热材料存在困扰其近百年的力热互斥瓶颈难题，例如陶瓷无定形态增韧的同时引发高温析晶粉化，低热膨胀效应受困于结构几何构型和力学特性，力热协同增强的同时牺牲隔热性能，以及低密度降低声子传热的同时无法有效阻隔高温热辐射等，难以满足实际极端环境热控制需求。

该陶瓷气凝胶材料由半晶质陶瓷纳米纤维网状孔结构组成，结合zig-zag宏观组装设计，赋予材料近零泊松比（ 3.3×10^{-4} ）以及近零热膨胀（ $1.2 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ）反常规物理特性，使得材料弹性可恢复压缩应变高达95%，兼具优异的拉伸（断裂应变 $>40\%$ ）和弯曲（弯曲应变 $>90\%$ ）变形能力；1万次高频剧烈热震（约200 $^\circ\text{C}/\text{s}$ ）以及长期高温（ $>1000^\circ\text{C}$ ）有氧暴露下强度损失及体积收缩几乎为零；此外，半晶质陶瓷对碳展现了更强的包覆能力，提高了碳材料的高温抗氧化性能，从而有效阻隔了高温热辐射，实现了低密度陶瓷气凝胶目前最低高温导热系数（20 $\text{mW}/\text{m}^2\text{K}$ 、1000 $^\circ\text{C}$ 下小于100 $\text{mW}/\text{m}^2\text{K}$ ），弥补了轻质气凝胶材料在高温隔热领域的短板。该材料同时具备电容式自感知特性，可实时监测隔热材料的结构损伤，进一步增强了热控制系统的安全可靠性。

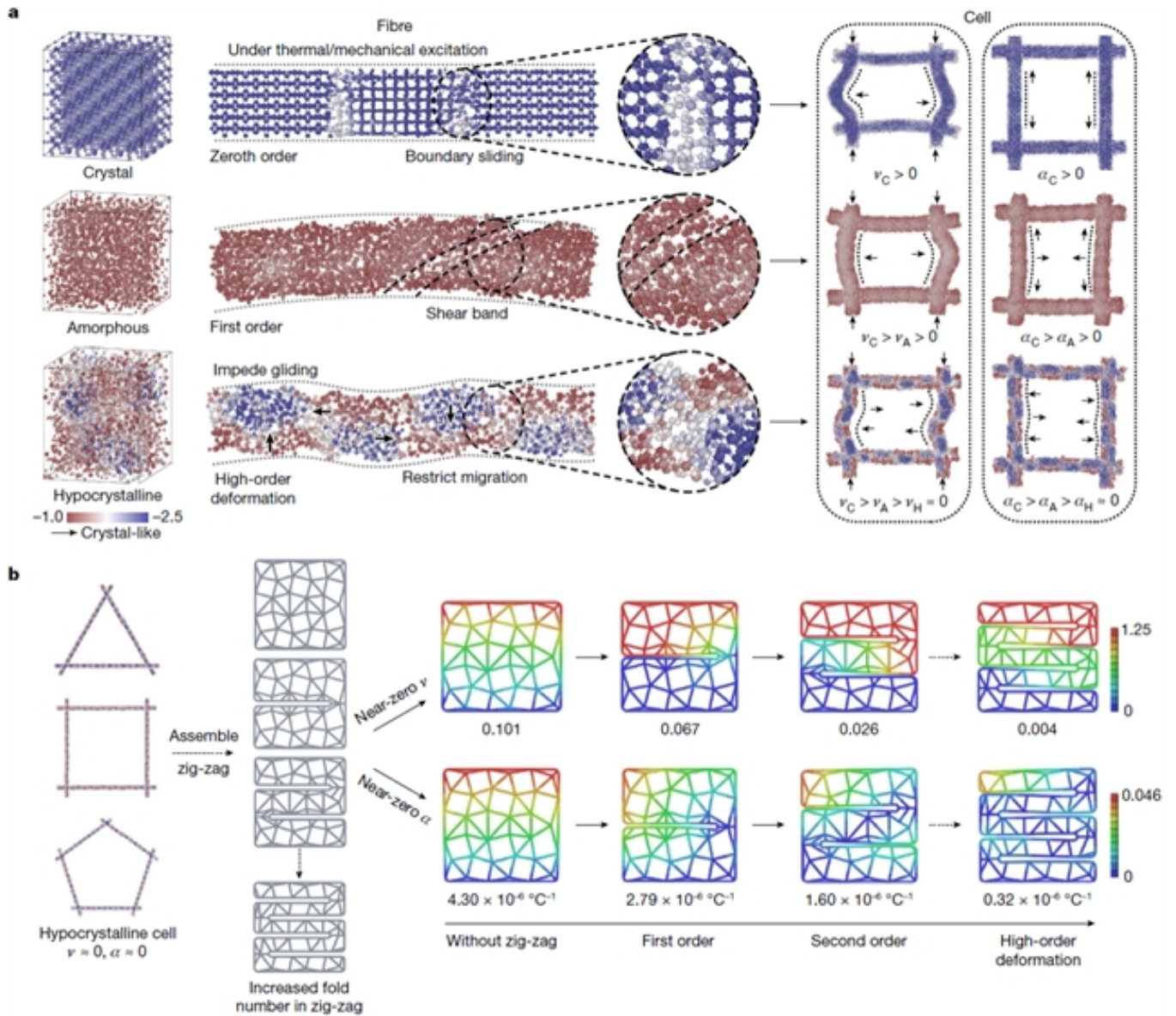


图1：半晶质纳米纤维陶瓷气凝胶多尺度超结构设计

该研究首先多尺度设计了具有zig-zag宏观结构的半晶质ZAGs。通过将纳米晶体嵌入非晶基体，以非晶基体作为晶界来阻止纳米晶畴的滑动；同时利用纳米晶畴来限制非晶基体在高温下的迁移，以晶体和非晶的相互钉扎作用实现优异的热机械性能。在这种半晶材料设计下，陶瓷纤维在机械和热应力激发下的变形将以高阶屈曲模式进行，从而提供额外的变形自由度以激发高阶变形模式，从而降低了材料泊松比和热膨胀系数，使其趋近于零。为将这一双零结构单元扩展到整体，以三角形、正方形和五边形作为单元组装zig-zag宏观结构纤维气凝胶，使得双零特性在宏观尺度下得以表达。

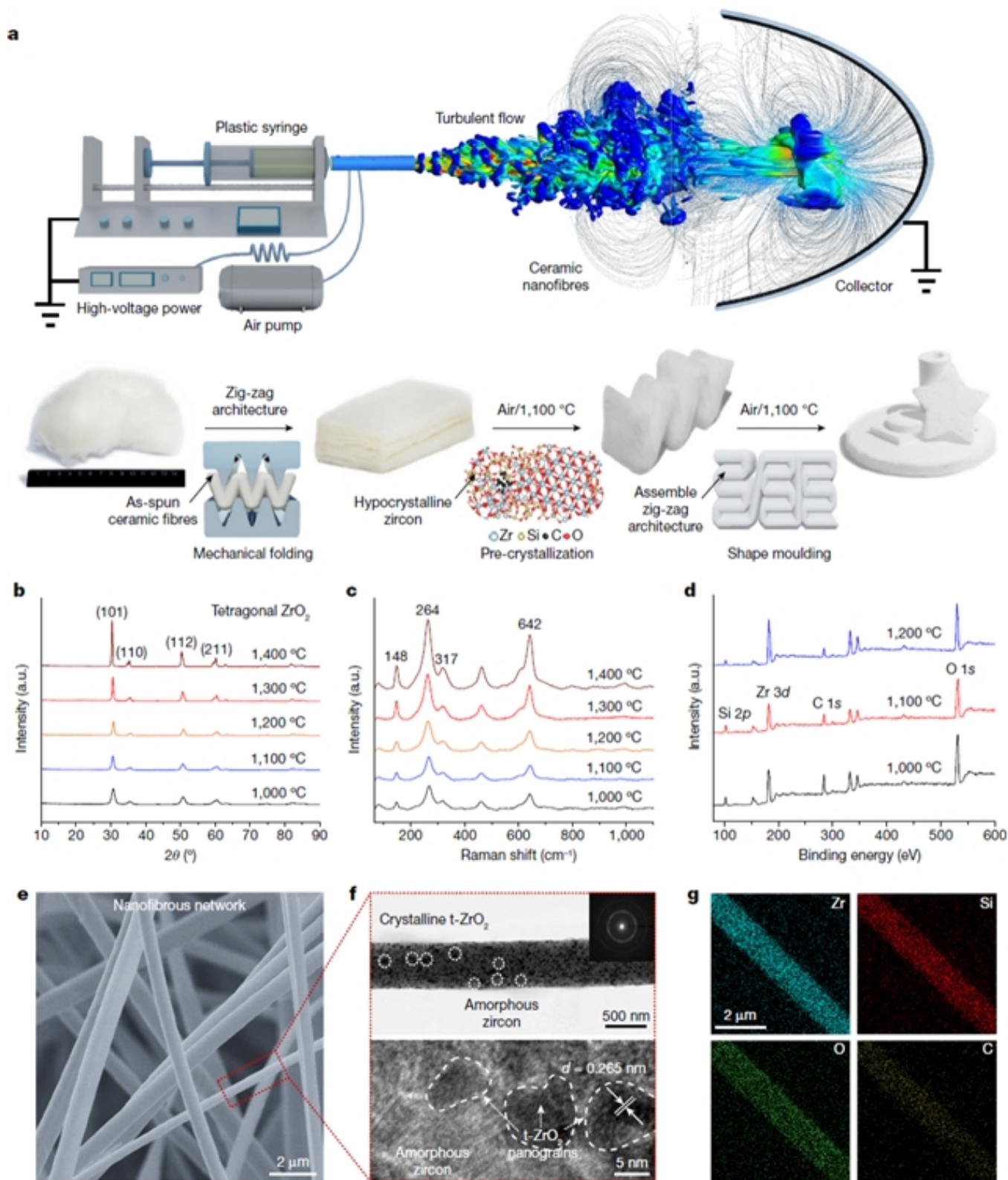


图2：气体湍流辅助-静电纺丝制备工艺及材料元素、结构表征

为了实验制备这种双零超构气凝胶材料，研究团队在常规静电纺丝装置中引入了同轴气动装置，从外轴孔道吹出的高速空气首先形成射流，在电纺泰勒锥后变形为湍流，从而形成复杂的3D湍流场。这种湍流场可以高效使得纳米纤维以复杂的轨迹移动并相互缠绕，最终形成随机缠绕的纤

维气凝结构。随后，通过进一步使用自动机械折叠工艺在初步生成的纤维气凝胶中形成zig-zag宏观结构，再结合简单的空气1,100 °C热退火处理，制备了半晶质纳米纤维陶瓷气凝胶材料。这种湍流辅助静电纺丝制备方法，拓展了传统静电纺丝只能制备2D膜材料的束缚，可以实现材料的高性能、大规模、低成本商业生产。

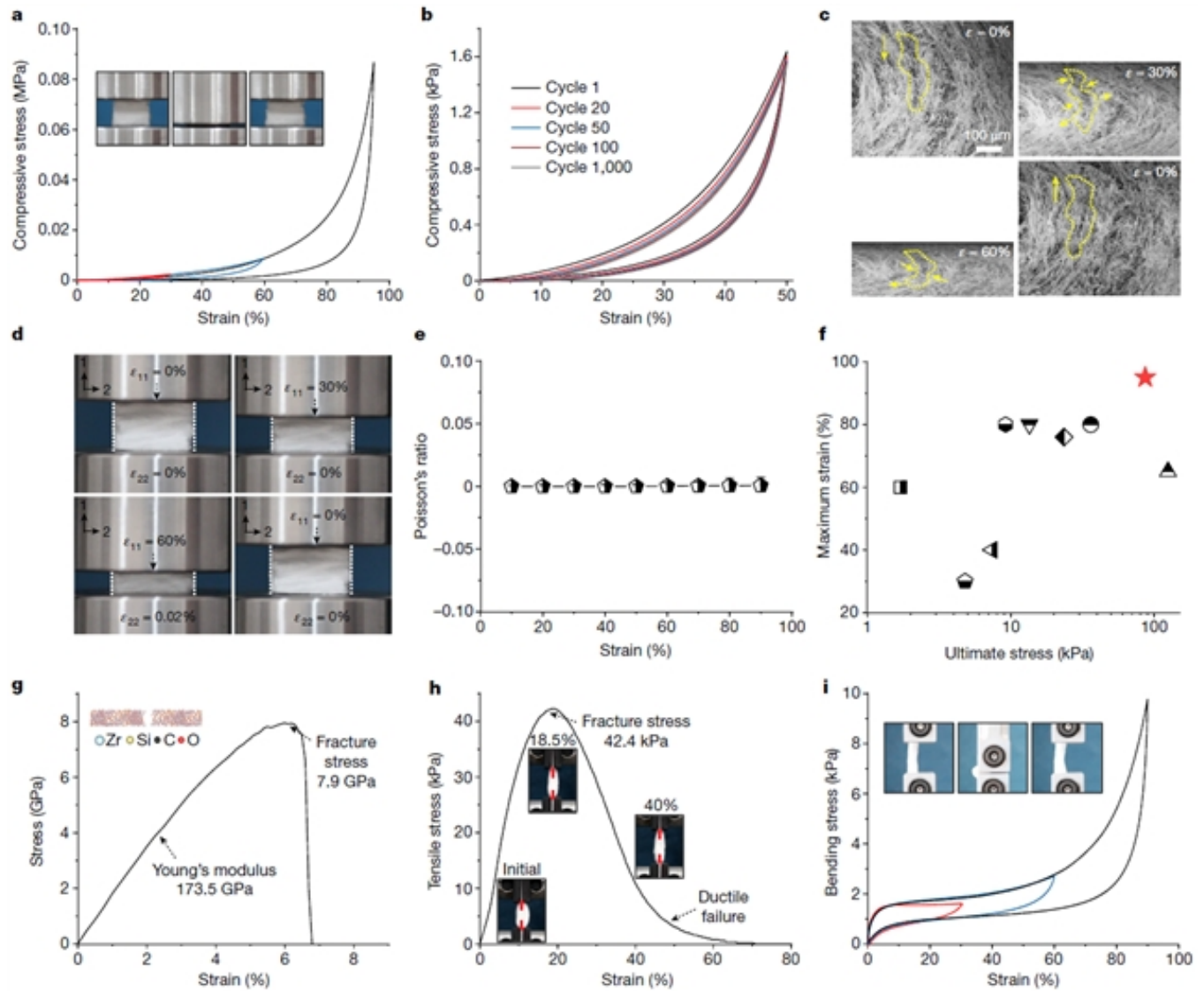


图3：材料力学性能研究

为了研究ZAGs的力学性能，该研究对ZAGs进行了单轴准静态压缩、拉伸、弯曲和扭转测试。在压缩测试中，样品可以从10毫米压缩到0.5毫米，应变为95%（迄今为止已知最大值），并在压力释放后完全恢复原状；在50%的应变下，重复循环压缩1,000次，几乎没有应力退化（小于7%），具有优异的抗疲劳性；ZAGs还表现出优异的柔韧性，拉伸断裂应变高达40%，弯曲应变高达90%，扭转角度高达360°。

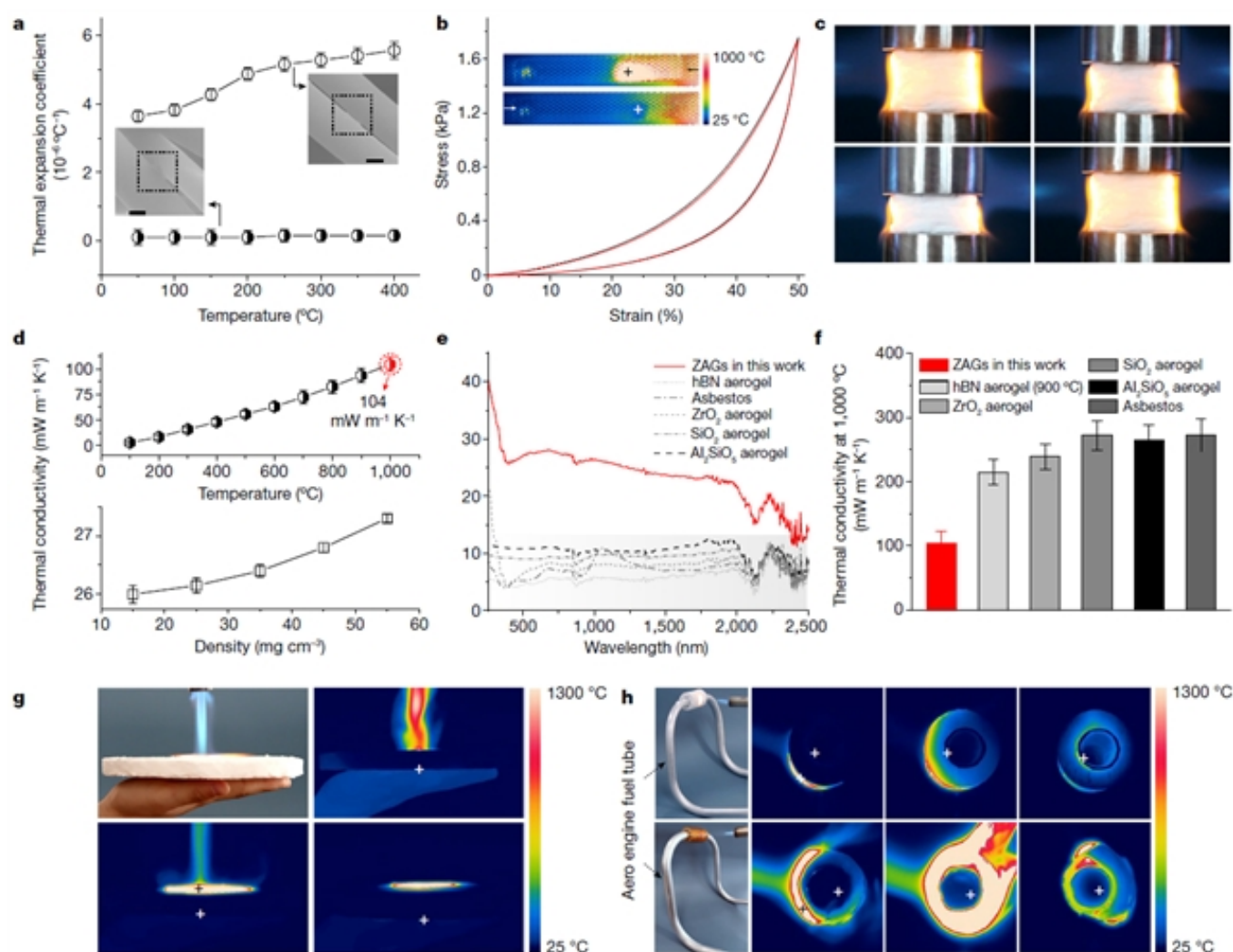


图4：材料热学性能研究

对于材料热学性能研究，考虑到半晶质zircon固有的高抗氧化性和热稳定形，该研究聚焦于材料热膨胀效应上。结果表明，ZAGs的热膨胀系数在200 $^\circ\text{C}$ 以下为 $1.2 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ，温度升高至400 $^\circ\text{C}$ 仍只有 $1.6 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ 。材料近零的热膨胀系数可以极大程度减少纤维之间的热应变失配，并阻止交联纤维的解离。同时，样品在1万次高频剧烈热震（约200 /s）以及长期高温（>1000 $^\circ\text{C}$ ）有氧暴露下强度损失及体积收缩几乎为零，表现出优异的结构稳定性。此外，半晶质陶瓷对碳展现了更强的包覆能力，提高了碳材料的高温抗氧化性能，从而有效阻隔了高温热辐射，实现了低密度陶瓷气凝胶目前最低高温导热系数（20 mg/cm^3 、1000 $^\circ\text{C}$ 下小于100 mW/m K ），弥补了轻质气凝胶材料在高温隔热领域的短板。通过航空发动机燃油管热控制测试，验证了材料优异的防火保温性能，成果对于满足我国航天等领域在极端、复杂服役条件下的隔热保温、减重增容、节能降耗、系统安全和性能稳定，具有重要的科学意义和实用价值。（来源：科学网）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41586-022-04784-0>

作者：徐翔等 来源：《自然》

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