
引入“微穹顶”，他们让“凝固的烟”弹起来

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/34570.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！

引入“微穹顶”，他们让“凝固的烟”弹起来。

多种类型的微穹顶气凝胶堆叠。浙江大学供图

■ 本报记者 崔雪芹 通讯员 周炜

在浙江大学的一间实验室里，两个不锈钢铁掌之间，几片气凝胶被压缩到薄薄一张纸的厚度，形变达到99%。神奇的是，即便经历这样数万次的压缩，气凝胶每一次都能重新支棱起来，弹回原来的形状。对于传统气凝胶来说，这样的压缩足以让其粉身碎骨，而浙江大学教授高超团队通过改变气凝胶内部的气孔形状，让材料从脆变弹。

这是高超团队10余年来探索的成果。他们成功制备出具有微穹顶结构的高弹气凝胶，其耐热能力突破2000摄氏度（2273开尔文）大关，在反复挤压下依然保持轻盈高弹、性能稳定。

此项突破不仅为气凝胶产业注入了高效、普适的新型制备范式，还打通了极端温度环境应用的全新路径。高超告诉《中国科学报》。

这一颠覆性成果源于一种全新的气凝胶构筑方法——氧化石墨烯基二维通道受限发泡法。这是一种简便并且通用的制备方法。研究团队采用这一路线制备了数百种气凝胶，它们都具有独特的隔热能力和高弹性，有望在深空探测器、超音速飞行器、核聚变装置中提供热防护。相关研究论文7月18日发表于《科学》。

让气凝胶弹起来

气凝胶是世界上最轻的材料之一，素有凝固的烟之称。气凝胶中90%以上都是微纳米级的气孔，通常呈蜂窝或拱形结构，而高超团队则引入了穹顶结构。

传统气凝胶中的孔隙结构大多有棱有角，而我们的孔隙是微米级的穹顶曲面。论文共同第一作者、浙江大学先进技术研究院专职研究员庞凯说，穹顶结构常见于生物体和建筑工程中，以卓越的承载能力和机械稳定性著称。存放鸡蛋的槽孔也是穹顶形状，它能够更好地抵消外部冲击。

高超团队与西安交通大学教授刘益伦团队合作，揭示了穹顶结构不可展曲面特性会形成丰富的可恢复褶皱，这能让材料储存更多的弹性应变能。

计算机仿真模拟显示，微穹顶结构的弹性应变能存储能力至少是传统结构的10倍，从而让气凝胶展现弹性抗压的特性。高超认为，这一结构代表了多孔材料领域全新的曲率设计理念，可启发创制更多新材料。

在夹缝中构筑气泡

微穹顶气泡是用一种全新的制备方法构筑的，灵感来源于大象牙膏实验：过氧化氢在催化剂的作用下加速分解产生氧气，大量气体与发泡剂混合后形成泡沫喷涌而出，仿佛伸出烧杯的大象鼻子。

我们提出了二维通道受限发泡的方法，让产气发泡过程发生在氧化石墨烯夹层之间。高超介绍，二维氧化石墨烯具有丰富的含氧功能基团，能高效捕捉金属离子，防止层间金属离子脱出。常温常压下加入发泡剂后，大量球形气泡在一层层氧化石墨烯之间成核、涌出，留下了微穹顶结构的气孔。

这个过程就像做面包，面包切面上的气孔就是酵母呼吸作用产生的二氧化碳留下的。庞凯说，这种二维通道受限发泡的方法操作简单，整个过程不需要高能耗的冷冻干燥或超临界干燥技术，也不依赖复杂昂贵的设备。

高超团队长期致力于石墨烯气凝胶材料的研究。2013年，团队制备的石墨烯碳气凝胶创造了当时世界最轻材料的纪录。多年来，高超团队一直将制备方法的探索作为重点，他们认为这是气凝胶从实验室走向现实应用的关键。

论文共同通讯作者、浙江大学长聘副教授许震说，二维通道受限发泡的方法具有很大的普适性。石墨烯可与金属、氧化物、碳化物等各种物质组成杂化气凝胶，涵盖121种氧化物、38种碳化物及35种金属体系，大大扩展了气凝胶种类。此外，研究团队实现了高熵材料组分的可控设计，其组分可调至含有多达30种元素的高熵态。

我们希望它能成为一个材料家族的创新平台，从单一组分到高熵组分，从导电金属到绝缘陶瓷，从透明、黑白到彩色等。高超说。

耐热超过2000摄氏度

距离太阳610万公里处，美国帕克太阳探测器创造了史上距离太阳表面最近的纪录。高温是限制其离太阳再近一些的最大障碍，相关资料显示，其现有隔热罩可耐受1650摄氏度的高温。

那么，有没有一种材料能够耐受更高温度呢？

高超团队创造的烯陶气凝胶可能具备这种能力。它一半是陶瓷、一半是石墨烯，是两者在原子层面的二维杂化。它不像普通陶瓷那样易碎，而是柔软、有弹性。实验显示，烯陶气凝胶在宽温域范围具有突出的力学弹性，不仅常温下能被反复压缩，在4.2开尔文（-268.8摄氏度）深冷至2273开尔文（2000摄氏度）超高温环境中仍能保持99%弹性应变。

论文共同通讯作者、浙江大学研究员刘英军解释说，烯陶中的石墨烯显著抑制了二维陶瓷的高温重结晶过程，同时二维陶瓷有效防止了石墨烯片层的超高温滑移。

更令人欣喜的是，研究团队制备的高熵气凝胶在隔热性能上更有优势，室温下导热率仅为13.4毫瓦/米·开尔文，是空气的一半。他们制备的高熵氧化物气凝胶、高熵碳化物烯陶气凝胶在1273开尔文下为53.4毫瓦/米·开尔文，在2273开尔文下为171.1毫瓦/米·开尔文，且在2273开尔文的反复热冲击100次维持结构稳定，为极端温度环境下的热防护提供了新的材料选择。

我们相信二维通道受限发泡法会打开许多未知的多孔材料世界，其中有更多优异性能及应用场景等待我们发现。高超说，未来或许这种如烟却坚韧的新材料，能让探测器更接近太阳；也许有一天，人们穿上它制成的热防护服，能够深入地球内部，探索前所未见的奇异景观。

相关论文信息：

<https://doi.org/10.1126/science.adw5777>

《中国科学报》(2025-07-18 第1版 要闻)

作者：崔雪芹 周炜 来源：中国科学报

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