

## 中国科大设计出超弹性耐疲劳宏观尺度碳纳米组装体材料

近日，中国科学技术大学教授俞书宏课题组与吴恒安课题组合作，在超弹性耐疲劳碳纳米组装体材料的仿生设计制备研究方面取得新进展。研究成果发表在9月27日的《自然-通讯》（Nature Communications）上。

轻质低密度和可压缩型耐疲劳结构材料具有极其重要的应用价值。可压缩性、回弹性和抗疲劳性能是决定这类材料性能和应用的主要因素。为了提高这些性能指标，研究人员一直致力于探索各种新策略，主要包括设计特殊的多孔结构，或采用柔性而强健的结构组分。目前，尽管材料的可压缩性已经达到较高水平，但是如何实现其在高应变压缩循环过程中的快速回弹以及较小的能量损失，并保持其结构与性能的稳定却一直面临着巨大挑战。通常，可压缩性、回弹性及抗疲劳性能很难在一种材料中同时达到较优水平。这是因为在反复的高应变压缩过程中，其内部微结构往往由于不能有效地适应较大的应力和应变，会不可避免地发生永久性受损或断裂，而这些结构破坏必将导致较大能量损耗，并造成材料的永久性塑性形变和压缩强度的显著降低。因此，合理的微结构设计对解决这一难题具有重要意义。

俞书宏课题组的研究人员受人类足弓等常见宏观弹性拱结构的启发，通过巧妙的实验设计，成功制备了一种具有微观层状连拱结构的宏观尺度碳纳米组装体材料。该材料由脆性易碎的组分（无定型碳-石墨烯复合物）构筑而成，但其同时展现出高度可压缩性（垂直层方向压缩90%形变后完全恢复原状，与国际现有水平相当）、超弹性（580 mm/s的回弹速度，远高于国际已报道材料170 mm/s的最高水平；能量耗散因子约0.2，明显低于国际上已报道材料0.3~0.8的平均水平）、超强抗疲劳性能（20%应变循环压缩106次，优于国际已报道15%应变循环压缩 $0.5 \times 10^6$ 次和6%应变循环压缩106次的水平）。

为了实现这一特殊结构，研究人员首先设计了一种新型的双向冷冻技术，将壳聚糖-氧化石墨烯（CS-GO）混合溶液取向冷冻并干燥，从而获得具有层状结构的CS-GO宏观组装体；然后再将其通过高温碳化处理，依靠碳化过程中CS和GO收缩程度的不同，使原本较为平坦的薄层结构皱缩成所需的层状连拱结构。上述两步过程的巧妙结合对实现这一特殊多级结构是必不可少的，例如，通过双向冷冻获得的取向一致的层状结构保证了最终材料中所有微拱单元的取向一致性，从而保证所有微拱单元在材料整体受压变形时同时发挥弹性功能。

俞书宏课题组与吴恒安课题组密切合作，通过进一步构建力学模型，对这一材料的超常性能进行了系统的分析。结果表明，构成该材料的微拱结构单元和宏观薄壳型拱结构一致，可以发生可逆的面外大尺度弹性变形，同时保持其面内所受的应力和应变极小。因此，由取向一致的微拱单元相互堆垛构成的材料整体，即使其构筑组本身是脆性的，也可以适应高达90%的压缩形变而完全恢复原状并免遭结果破坏，同时表现出如弹簧般的超弹性和抗疲劳性能。其次，力学模型分析进一步揭示，该材料压缩循环过程的超低能量损耗主要来自于微拱单元之间的摩擦耗散，而非微结构的永久性破坏。研究结果表明，这一超弹性碳材料明显区别于国际已报到的其他低密度、可压缩型结构材料。

此类具有层状微拱结构的碳纳米组装体材料因其优越的超弹性耐疲劳性能及其耐高低温能力，有望在特种条件下的力学传感和探测等领域获得应用。该研究还表明，现有成熟的宏观结构设计对于设计材料的微观结构同样具有指导意义。

该工作得到了国家自然科学基金委创新研究群体、国家自然科学基金重点基金、国家重大科学研究计划、中科院重点部署项目、中科院前沿科学重点研究项目、苏州纳米科技协同创新中心、中科院纳米科学卓越中心、合肥大科学中心卓越用户基金的资助。

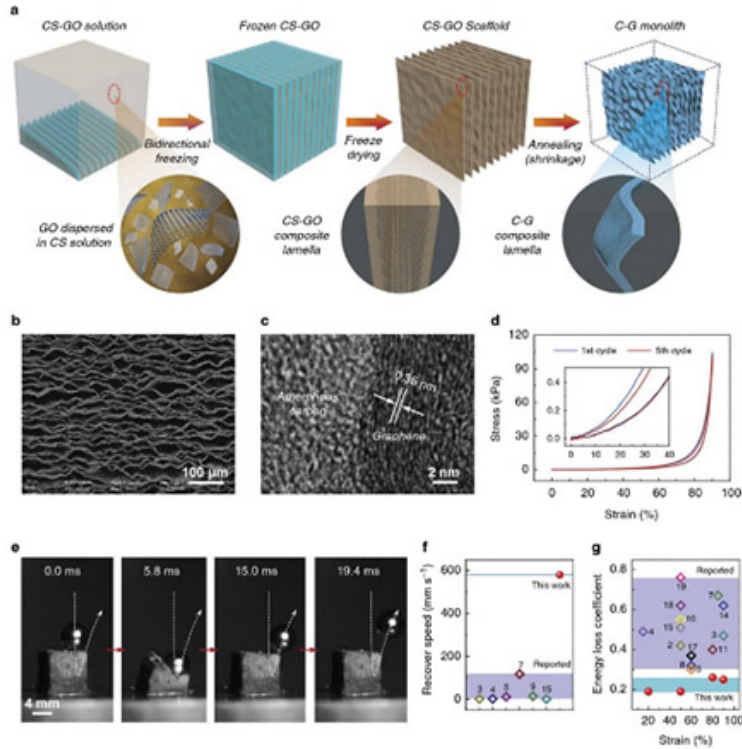


图1. 通过双向冷冻联合热处理过程获得碳-石墨烯 (C-G) 宏观弹性体材料。(a) 材料制备过程示意图；(b) 材料的微观层状连拱结构；(c) 材料的无定型碳-石墨烯复合组分；(d) 材料在高应变条件下的压缩应力应变曲线；(e) 高速相机捕捉的该材料快速弹起金属球的过程；(f, g) 材料的回弹速度(f)和压缩循环中能量损耗(g)同其他相关材料的比较。

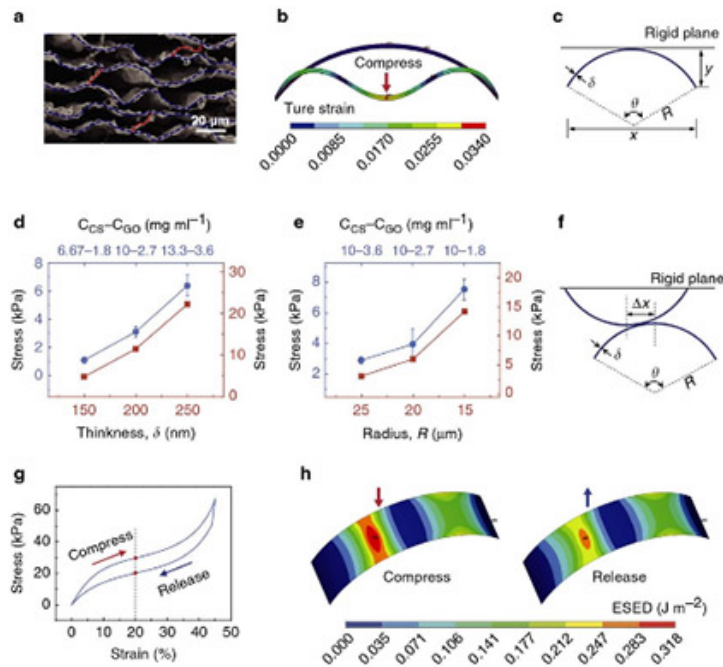


图2. 材料的机械性能分析及理论模拟。(a) C-弹性体薄层之间的连接细节；(b) 理论模拟显示该材料的结构单位模型薄壳结构在发生大变形时其内部具有很小应变；(c) 分析该结构单元弹性性能的结构模型；(d) 具有不同层厚的C-弹性体 (蓝色) 及薄壳模型 (红色) 的压缩应力；(e) 有不同收缩程度的C-弹性体 (蓝色) 及不同半径的薄壳模型 (红色) 的压缩应力；(f) 分析相邻拱单元之间摩擦情况的结构模型；(g) 理论模拟得到的交错的拱单元之间相互挤压时的应力应变曲线；(h) 理论模拟得到的对应 (g) 中20%应变时模型的能量分布情况。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/99422.html>