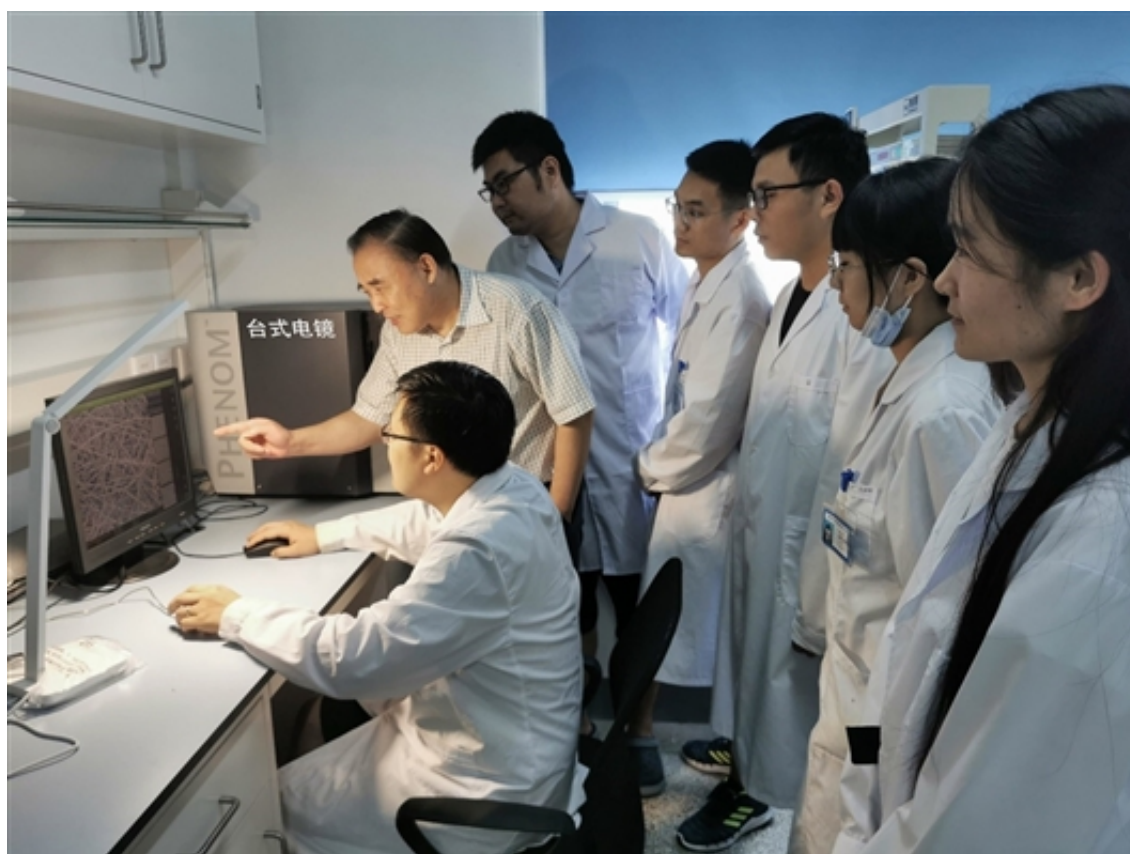

飞丝走线“织就”百万次超折叠导电材料

作者：writer 来源：爱科学

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/16036.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！

飞丝走线“织就”百万次超折叠导电材料。



研究人员捕捉到超折叠碳实时折叠的微观结构变化和应力分散过程（同济大学供图）

近年来，柔性电子尤其是可穿戴器件发展迅速，有望为人们的工作和生活带来翻天覆地的变化。然而，当它们在朝着便携、变形等方向进一步发展的过程中，遭遇了导电材料无法大量无损真折叠的瓶颈问题。

比如，目前热炒的可折叠手机实际上只是利用了一个旋转轴，根本无法进行任意折叠；一些可穿戴电子设备不可避免地要遇到反复折叠的问题，至今也无法解决。若要解决这些问题，超折叠导电材料无疑是关键的一环。

实际上，人们对导电材料的折叠已经进行了大量的探索，可距离超折叠性能仍相差甚远，哪怕千次以上的无损真折叠也无法实现。

近日，来自同济大学、上海师范大学以及大连理工大学的科研人员，在用化学键理论阐明本征导电材料不能经受大量真折叠原理的基础上，应用超材料设计思想和仿生设计思路，使用改进的静电纺丝/梯度碳化技术，首次仿生制备了一种可承受100万次乃至无限次真折叠而无任何损伤的超折叠导电碳材料（SFCMs）。相关研究成果在线发表于《物质》（Matter）。

难啃的超折叠骨头

在日常工作和生活中，人们常常存在一个认识误区，那就是认为导电材料的折叠根本不是事儿。

实则不然。比如，金属材料是由无方向性的金属键组成的，因而具有一定的柔韧性，可以进行弯曲甚至少量折叠。但金属键作为化学键的一种，也是短程力，经不住 180° 真折叠的大幅度的调度，多次折叠带来的损伤积累最终会导致断裂。

导电高分子是由共轭大 π 键组成的，具有双键性质，并且比单键具有更多的刚性，经受不住大的变形，更不必说反复折叠了。

以单层石墨烯、单根碳纳米管和碳纳米纤维为代表的碳材料通常被认为具有很好的柔性，但实际上石墨烯是由 sp^2 杂化的大的共轭 π 键构成的超薄平面结构，其中共轭 π 键具有双键性质，无法承受大量反复的真折叠；碳纳米管其实相当于卷曲的石墨烯，碳纳米纤维中含有大量的石墨化结构，自然经受不住反复的真折叠。

总之，目前的本征导电材料在理论上和实践上都不能承受大量次数的真折叠。如果要实现超折叠性能，需要设计出能够避免化学键直接面对折叠的应力分散结构。

为此，人们进行了大量的探索，通过引入不同的孔结构、调节组装单元间的界面作用、组装不同的立体结构，制备出如金属网格、瓦楞状石墨烯多层膜、竹节状的碳纳米纤维等柔性导电材料，因此它们的柔性得到了有效的提升。原本只能弯一弯的材料变得可以折叠，甚至有的材料在以结构损伤为代价的前提下可以实现千次的折叠。

遗憾的是，由于没有理论的指引，科研人员一直在黑暗中摸索，使得现有材料的折叠性能远远不能满足实际使用的要求，更谈不上超折叠。

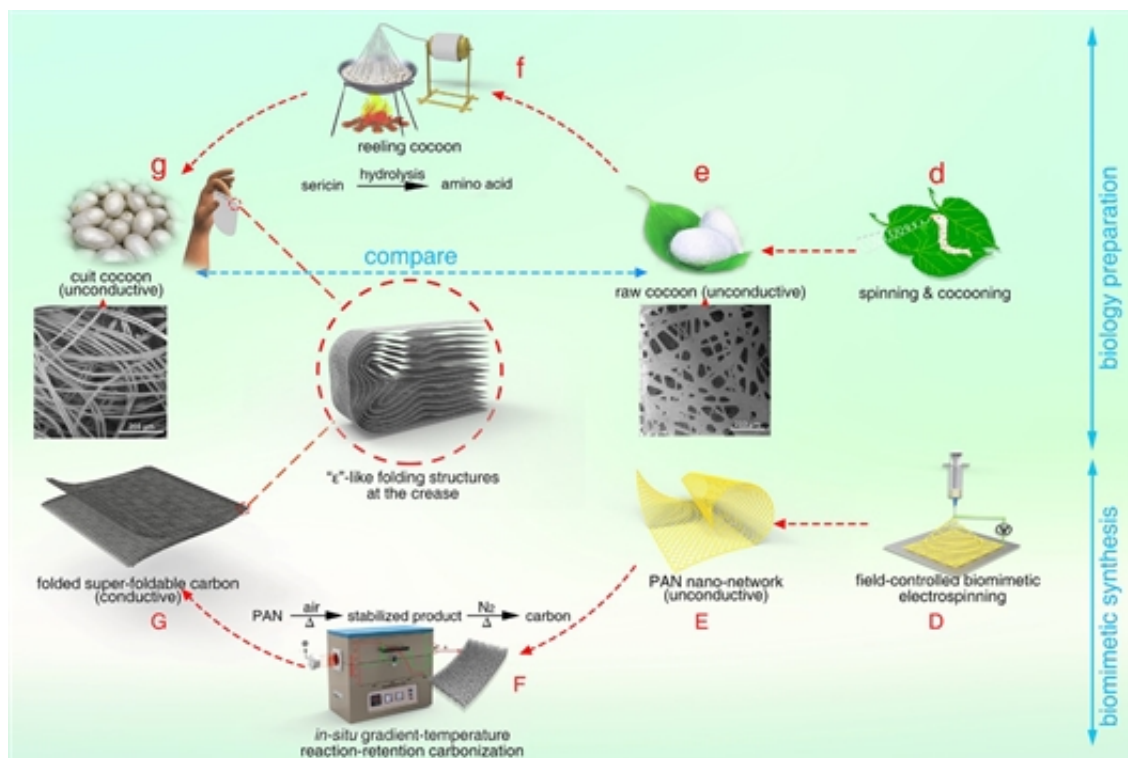
山重水复疑无路，柳暗花明又一村。一次参观蚕厂的机会，让同济大学的科研人员倍受启发，走出了一条实现超折叠结构和性能的仿生之路。

源于喷丝作茧的灵感

人类养蚕抽丝已有数千年的历史，家蚕通过神奇的飞丝走线技艺喷丝作茧，为生产柔软的丝绸提供了优质的原材料。但是这种生蚕茧质地僵硬，不能直接制造纺织品。劳动人民在生产实践中发现，通过简单的碱煮缣丝就能同步实现蚕茧解交联、造孔和膨化等复杂变化，使之由僵硬变得超柔，能够承受大量反复折叠同时产生了 ε 折叠结构。

家蚕吐丝—做茧—缣丝等一系列过程能够获得具有超折叠能力的熟蚕茧及其自然形成的‘ ε ’折叠结构。这些都为超折叠导电材料的制备提供了正确的设计思想与合理的设计路线。此项工作的通讯作者之一、同济大学化学科学与工程学院教授吴庆生告诉《中国科学报》。

如果能够对这个制备过程和最终结构进行模仿，那么超折叠的结构和性能有可能实现。基于这样的想法，吴庆生和同济大学特聘研究员吴彤领衔的研究团队使用仿生的高分子静电纺丝来模仿家蚕的喷丝作茧过程和类似的网络结构；进一步通过梯度升温原位碳化模仿缣丝过程，不仅同时实现了材料的解交联、造孔和膨化，而且赋予材料导电特性。最终，通过过程和功能的联合仿生技术，实现了导电超折叠材料的制备（见图）。



制备超折叠碳材料的仿生设计（同济大学供图）

随后，科研团队对该材料的柔性尤其是折叠性能进行了系统的研究。不仅通过自制的折叠机对它承受反复折叠的能力进行了考察，而且通过自主设计的SEM微观动态观察系统首次实现了折叠过程的实时解析。结果发现，它能够承受超过100万次的反复折叠而没有任何的微结构损伤和导电率变化。而实时折叠观察揭示了这种突破性的无损超折叠能力起源于折叠时形成的 ϵ 结构的全面应力分散作用。

这种导电柔性材料的问世，不仅实现了导电材料在超折叠性能上的突破，还理清了其在折叠过程中的应力分散机制，为其他超折叠导电材料的制备指明了方向。与此同时，该项研究还将解决一系列折叠相关的柔性电子器件的瓶颈问题，乃至为任意变形的电脑/手机一体化超柔设备的制造带来曙光。

创新永不止步

研究结果的取得令人振奋，但过程中的个中滋味却只有亲历者才能体会。在研究过程中，研究人

员也曾遇到很多困难，甚至一度冒出放弃的念头，但最终还是依靠坚强的意志和团队的力量，经过三年多的刻苦攻坚，终于取得了成功。

对于超折叠材料的实现而言，摆在科研团队面前的最大难题是至今无人知道什么样的构造可以实现超折叠。后来由于受到熟蚕茧能够超折叠并且产生 ϵ 结构的启发，明白了其中的构造奥秘，难题便迎刃而解。

如何实现这种构造的制备，是团队亟需解决的第二个难题。家蚕的喷丝作茧过程与常用的高分子静电纺丝工艺非常相似。但是现有的大量静电纺丝工作都没有实现超折叠的结果。这说明生搬硬套老方法是完全行不通的，必须在传统的静电纺丝中闯出一条新路来。于是我们通过大量的仪器改造和技术优化探索，终于迎来了超折叠碳材料的诞生。本研究第一作者、同济大学博士胥广涛告诉《中国科学报》。

在科学探索的道路上，创新永无止境。下一步，我们将会把本工作建立的理论和方法拓展到更多更广的超折叠材料和设备中去。让可折叠手机等柔性电子设备变得收放自如，让可穿戴器件可以自身发电、自由活动、随意洗藏，让折纸式手机/电脑一体化早日实现。吴庆生充满信心地表示。（来源：中国科学报倪伟波）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1016/j.matt.2021.07.021>

版权声明：凡本网注明来源：中国科学报、科学网、科学新闻杂志的所有作品，网站转载，请在正文上方注明来源和作者，且不得对内容作实质性改动；微信公众号、头条号等新媒体平台，转载请联系授权。邮箱：shouquan@stimes.cn。

作者：吴庆生等 来源：《物质》

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