“做梦都在推导公式”！90后研究员破解百年难题

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/32647.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！

“做梦都在推导公式”！90后研究员破解百年难题。文《中国科学报》记者 王昊昊 通讯员 杨煜昕

“最烧脑时根本睡不着，要吃褪黑素助眠，做梦都在推导公式。”90后国防科技大学研究员方鑫，最近终于不用靠褪黑素入睡了。他用6年时间解出了一个世界难题。

现有的工程材料无法兼顾高强度和高韧性。要么很硬易断（韧性低），比如陶瓷、金属等，“太刚易折”；要么很软易变（强度低），如橡胶。这是一个百年未解的世界性难题。

相同量的棉麻材料，为什么捻成绳子后比捻之前更结实？绳子打结后，为什么能更紧更牢固？方鑫从拧麻绳的手艺中找到解决上述问题的灵感。

通过用扭曲变形替代弯曲变形，研究者设计出新的手性超结构，打破了材料与结构的力学性能禁区，尝试近30种建模解析思路，建立了优美的“手性扭曲理论”。日前，这一成果发表于Nature，国防科技大学为论文第一单位，方鑫是第一作者兼共同通讯作者，中国科学院外籍院士高华健等为通讯作者。



研究者构建的全新手性超结构 受访者供图

盘碗拧绳得灵感

方鑫有个习惯，日常工作和生活中，总爱“盘玩”一些他认为能发掘出力学研究潜力的材料和结构设计方法。

几乎所有工程结构和装备机体都追求轻质、高刚度、高强度、高韧性的材料，兼顾这些属性意味着结构具备高弹性能（机械能）储能密度、高承载能力以及优异的抗冲击、轻量化、小型化和运动灵敏度。

此前方鑫已在机械超结构的强非线性波动、智能调节、高强高能设计等方面取得系列成果。他曾提出一种原创性的智能超材料设计方法，实现了金属基材料刚度和形状的大范围、连续、快速调节。相关成果2023年在Nature
Materials以封面文章发表后，被Nature评为当年6月的全球重要科技进展。



方鑫介绍其相关研究工作 王昊昊/摄

本次科研成果的一个重要灵感，正是源于前述的Nature Materials研究。

那是2019年，方鑫正在做抗冲击相关研究。他想搞清楚柔性材料在受到挤压后会如何形变，便通过3D打印制作了一个带编织结构的柔性碗。

“原本设想的是，挤压这个柔性的碗会让它瘪下去，但事实上并没有。”方鑫发现编织的碗在挤压后会呈现扭曲状，类似打结的绳子。

这个意外收获让方鑫来了兴趣。“我觉得很神奇。”他脑子里充满疑问，为什么碗会转起来呈现扭曲状？他随之联想到绳子，碗的扭曲和绳子打结极为相似。

软绳拧一下会变得又紧又坚固。绳子在扭转过程中发生了什么变化？为什么简单的扭曲形变会让其刚度大增？带着这些问题，方鑫进行了深入研究。他发现，这是近现代力学领域一直没有解决的问题，即结构扭曲问题。

最烧脑时靠褪黑素入眠

紧接着，方鑫发现不只是材料难以实现强度与韧性兼得，结构也符合这种规律。“现在的工程材料和结构有成千上万种构型。我查阅了大量文献后发现，这些构型的构造模型，全部基于弯曲和屈曲，材料的抗压能力都基于这些理论。”方鑫表示。

能否通过对变形模式的控制，来破解材料和结构无法兼顾高强度和高韧性的问题？这让方鑫立即联系到他在碗和绳子中获得的灵感：“绳子打结后会更紧更坚固。如果把绳子打结的过程引入材

料和结构变形的过程，能不能改变材料和结构的强度、韧性？”

绳子的打结过程可以轻松完成，但如果让钢筋“打结”进而增加其强度，不依靠工具没法轻易完成，为此方鑫还设想加装一个结构让打结的过程自动完成。

基于这些设想，研究者提出一个新原理，即用压缩扭转屈曲结构替代压缩弯曲屈曲结构作为桁架结构的基元，构造可自由扭转的手性胞元来诱发所需的扭曲模式，据此创造出新的手性超结构，跳出基材本身强度与韧性的制约，用扭曲变形替代弯曲变形来设计新结构。

大量理论分析与实验测试表明，相比现有非手性轻质结构，在未优化情况下，这种手性结构也能实现高刚度、承受大变形，将承载屈曲强度提升5至20倍，将弹性应变能密度提升5至160倍以上，打破了材料与结构的力学性能禁区。

虽然成功构建了性能优越的手性超结构，但这种结构为什么能显著提升材料和结构的性能，背后的科学原理是什么，没有人知道。方鑫发现，挖掘其科学原理比构建出结构更困难。

方鑫带着这个问题与力学领域的权威学者高华健院士开展了深入研讨。高华健说：“扭转屈曲是结构力学中极具挑战性的经典难题。长期以来，研究者们一直试图寻找大变形条件下扭转屈曲的解析解，但始终未能成功，导致这一研究方向逐渐被冷落。另有学者尝试通过数值模拟来研究这一变形过程，但却无法揭示完整的力学演化机制。”

听了高老师的解释，方鑫下决心用数学方程把它表示出来。

但这并不容易。“尝试了很多种建模方法，依然没法准确解析扭曲的科学原理。那段时间很沮丧，不知道问题出在哪里，最烧脑时晚上根本睡不着觉，要吃褪黑素才能入睡。”方鑫说。

为何揭示力学原理面临更大的科学挑战？原因在于杆件结构的“压缩扭转屈曲”是一个复杂的三维强非线性变形模式，难以在3D几何空间刻画，建立其三维变形的几何表述、载荷平衡关系、变形相容关系、变形与结构强度关系的数学方程。直到尝试了近30种建模方法后，方鑫才找到了手性扭曲问题的解析答案。

四个“工人”协同“作战”

那么，材料和结构扭曲过程中究竟发生了什么，使得其性能大增？

方鑫发现，扭曲的过程是为由四类变形组合而成。如果将这四类变形组合比喻成工人，那扭曲的过程就是四个“工人”在协同“作战”。



方鑫在实验室中 王昊昊/摄

这四个“工人”都负责哪些工作？方鑫介绍，它们各司其职、同时工作。弯曲发生的过程有两个“工人”，一个负责接受压力、一个负责让材料变弯。扭曲过程中则多了两个“工人”，它们带来了材料性能的极大增量。除了弯曲中的两个“工人”，还有一个负责扭转、一个负责产生交叉方向的弯曲从而扩大变形空间。四者同步协作，使材料在强度和弹性（极限变形能力）上实现飞跃。

基于此，研究团队最终找到了手性扭曲问题的解析最优解，建立了优美的“手性扭曲理论”，将这类问题的研究向前推进了一大步。

据介绍，该团队所建立的手性解析模型能在20%变形范围内准确计算结构变形。研究发现，压缩扭曲包含了多种变形模式，可以在几乎不增加基杆应力的前提下通过扭转和面外变形额外存储一倍以上的能量，从而在相同材料强度约束下大幅提升整体超结构力学性能。

“Ground breaking！”高华健认为，手性扭曲理论揭示了材料和结构高强高能特性的产生机理，将为航空、航天、船舶、高铁、汽车等工业系统提供重要解决方案。

审稿时“ 自找苦吃 ”

此次成果从向Nature投稿到正式发表，共经历了三次修改。让方鑫印象最深刻的是一审。

其实，一审的审稿人仅提出完善一些细节并无需大改，这对很多论文投稿者来说是好消息，意味着成果能尽快发表。但方鑫在一审后却提出再加一部分审稿人未提及的内容。

当时，方鑫已经想通了扭曲的过程中有四个“ 工人 ”在协同“ 作战 ”。“ 我的手性扭曲理论也已经很准确了，但是描述过程中一些数学问题的阐述还不够严谨，审稿人可能没有关注到这些问题，即使不修改论文也能够发表。 ”方鑫说。

他始终觉得理论的数学方程还不够完美，可以再完善一下。“ 不甘心如此。如果我搞不好这个研究，以后可能很多年里都不会有人去关注和解决这个问题，别人在应用这个理论时可能也会有这样那样的疑问。而且完善手性扭曲理论，是推进力学研究的根本问题，更要奠定好基础。 ”

没想到，这个“ 自找苦吃 ”的做法，让方鑫经历了他研究生涯最煎熬的一个月。

那段时间，方鑫推掉了很多重要会议。他的很多朋友和同事诧异，方鑫怎么不来开会了。他基本都泡在实验室，甚至连晚上做梦都在推导数学公式。有时候白天想问题入迷，同事跟他打招呼都没注意到。

过了两周多后，方鑫还是没有获得任何新进展。“ 有人劝我以后再找机会解决这个问题，又不影响论文发表。 ”方鑫也觉得太煎熬了，身体根本吃不消，便给自己定了一个为期30天的“ Deadline ”。

直到接到一审修改意见的20多天后，方鑫才找到最优解，“ 虽然耽搁了一些时日，用了三个多月完成修改，但最终熬出了好结果，没有缺陷、没留遗憾 ”。

Nature审稿人评价说，这是一个很棒的研究。“ 通过平衡结构能量密度、刚度、强度和可恢复应变，解决了工程中的一个基本挑战，为非线性材料力学和具有不同应用的高焓材料提供了新的见解。 ”

现在，方鑫团队围绕构建的手性超结构和手性扭曲理论，在相关领域开展应用研究，“ 期待它们发挥出更优性能 ”。

相关论文信息：

https://www.nature.com/articles/s41586-025-08658-z

作者：王昊昊，杨煜昕 来源：科学网微信公众号

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