

# 南科大任富增、李江宇团队合作发现铁电氧化物微柱抗疲劳超弹性

2021年06月28日 科研新闻 浏览量 1746



近日，南方科技大学材料科学与工程系副教授任富增、讲席教授李江宇与广东省信息功能氧化物材料与器件重点实验室访问学者、武汉大学副教授李应卫，浙江大学教授王杰，北京大学研究员高鹏，香港科技大学教授孙庆平，美国宾州州立大学教授陈龙庆等团队合作，在美国科学院院刊PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America)发表了题目为“Superelastic oxide micropillars enabled by surface tension-modulated 90° domain switching with excellent fatigue resistance”的研究论文，报道了基于表面张力调控的可逆90°畴变，在铁电氧化物微柱中实现了抗疲劳的超弹性行为。

返回

人物

首页

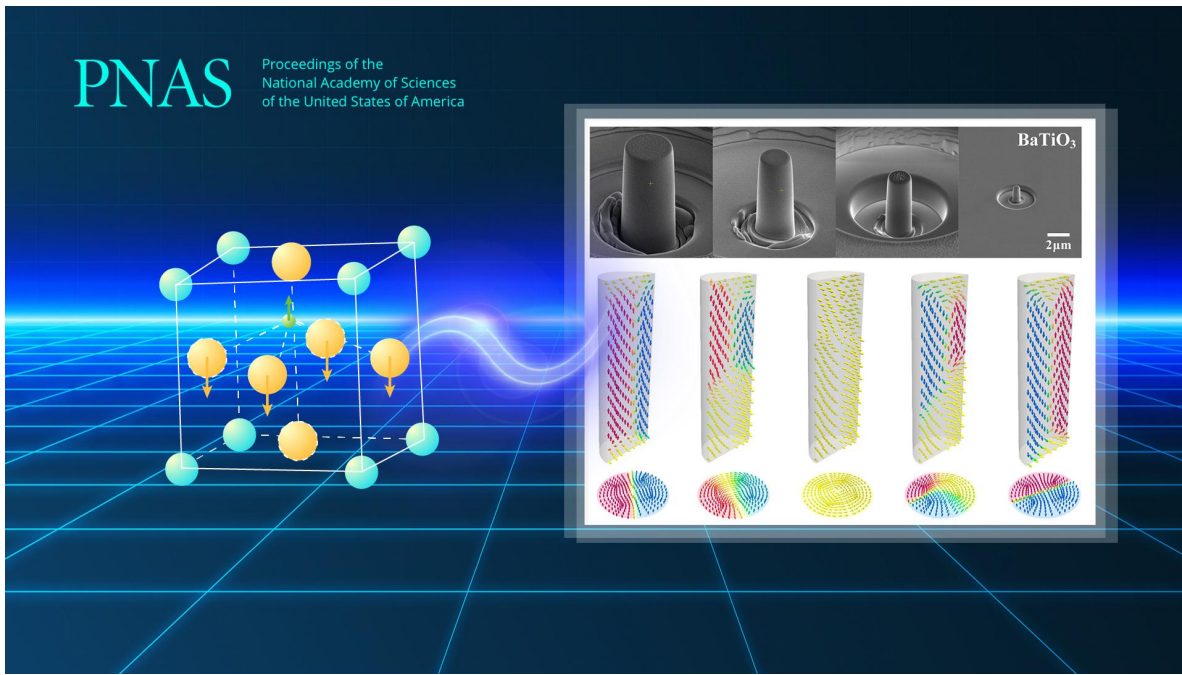
新闻

视觉

讲堂

新知

党建



超弹性材料因其独特的力学性能，在可变性结构、机器人、微机电系统(MEMS)等领域具有广泛应用。传统的形状记忆合金(SMA)和近年来发现相变陶瓷是两类典型的超弹性材料：SMA在循环加载时位错逐渐积累会引起残余变形；相变陶瓷(如 $ZrO_2$ )虽强度高，但其相变临界应力过大(1~2 GPa，接近其破坏强度)、内在脆性使其循环加载下易发生断裂、疲劳寿命短。因此，如何在氧化物中实现抗疲劳的超弹性是功能陶瓷领域高度关注的重要科学问题，也是其应用于微纳器件亟待解决的关键技术挑战。铁电材料是一种具有力电耦合效应的智能材料。在外力作用下，铁电材料微观结构发生演化，并影响其宏观力学性能，从而产生非线性的应力—应变特性。因此，铁电材料也可以作为一种潜在的超弹性材料，用于MEMS阻尼器。受微纳尺度铁电材料响应行为研究的启发，在对铁电材料电畴翻转行为、微裂纹萌生及扩展机制的深入理解基础上，研究团队提出了一种全新的铁电材料超弹性行为的机理。当材料直径小于其特定临界尺寸时，在表面张力作用下，材料内部电畴的极化方向倾向于沿其轴向；如沿轴向施加循环应力，在外加载荷和表面张力的协同作用下，可实现可逆 $90^\circ$ 铁电畴变，进而使铁电材料整体表现出超弹性行为。

在该研究中，团队利用聚焦离子束(FIB)刻蚀技术，在钛酸钡(BTO)单晶中制备了一系列不同直径( $\Phi$ )的微纳米柱，并利用纳米压痕平压头技术测试了循环载荷下微纳米柱的应力-应变曲线(图1)。测试结果发现，当 $\Phi = 5 \mu\text{m}$ 时，材料的响应行为与宏观块体试件类似；当 $\Phi$ 降低至 $1 \mu\text{m}$ 时，材料表现出超弹性行为；当进一步降低 $\Phi$ 至 $0.5 \mu\text{m}$ 时，在加载时难以区分线性加载段、平台段以及之后的线性段，在卸载时，加载阶段产生的1.0%的应变基本可完全恢复，剩余应变仅为0.06%；第二次循环时，材料的应力-应变曲线与第一次循环基本重合，该行为与块体截然不同，呈现明显的尺寸效应。

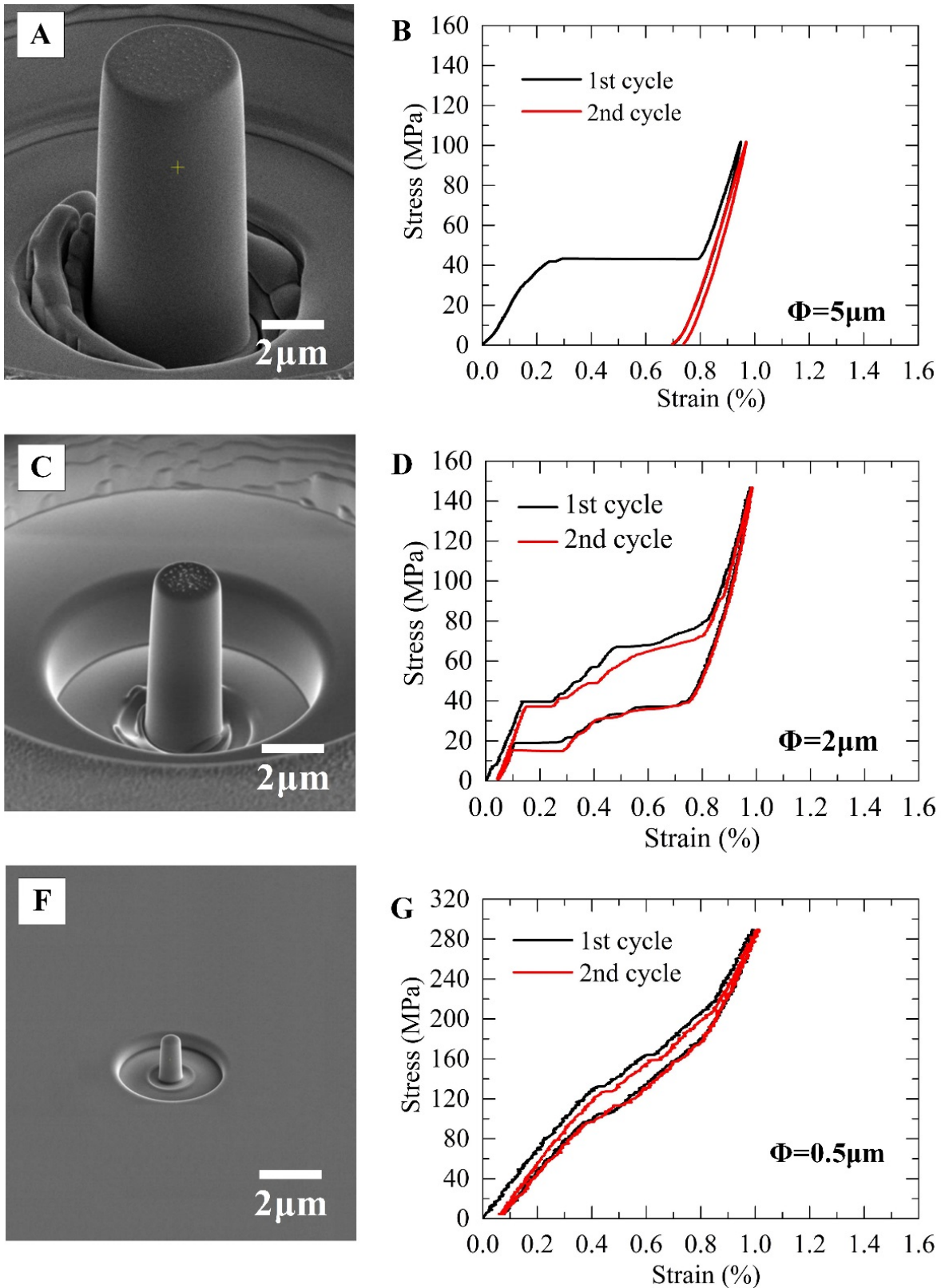


图1. 不同直径的BTO单晶微纳米柱SEM形貌与应力-应变响应曲线

为理解小尺寸下BTO微柱如此之大的可恢复应变，研究团队利用压电力显微镜(PFM)面扫和畴变实验，确认了微柱具有可切换极化的铁电效应，而且利用原位透射电镜(TEM)观察到了应力作用下 $90^\circ$ 畴变过程。然而，仅该畴变机理不足以解释小尺寸BTO微柱的大应变超弹性回复行为。对具有同样长径比的微柱，退极化场又与尺寸无关，考虑到微柱表面张力和 $\Phi$ 成反比，



研究团队推断在小尺寸下表面张力可能起到重要作用。为验证表面张力的影响，研究团队进行了热力学分析和相场模拟(图2)，揭示了表面张力调控的可逆90°畴变是导致铁电微柱超弹性的根本原因。在轴向压力作用下，轴向极化变得不稳定，逐渐转变为面内极化，从而发生90°的铁电畴变。在卸载过程中，直径较大微柱的表面张力大小不足以使面内极化恢复到轴向极化，从而存在较大的残余应变。然而，随着铁电微柱直径的逐渐减少，表面张力随之不断增加，从而使面内极化逐渐恢复到轴向极化，实现了可恢复的90°畴变和超弹性行为。

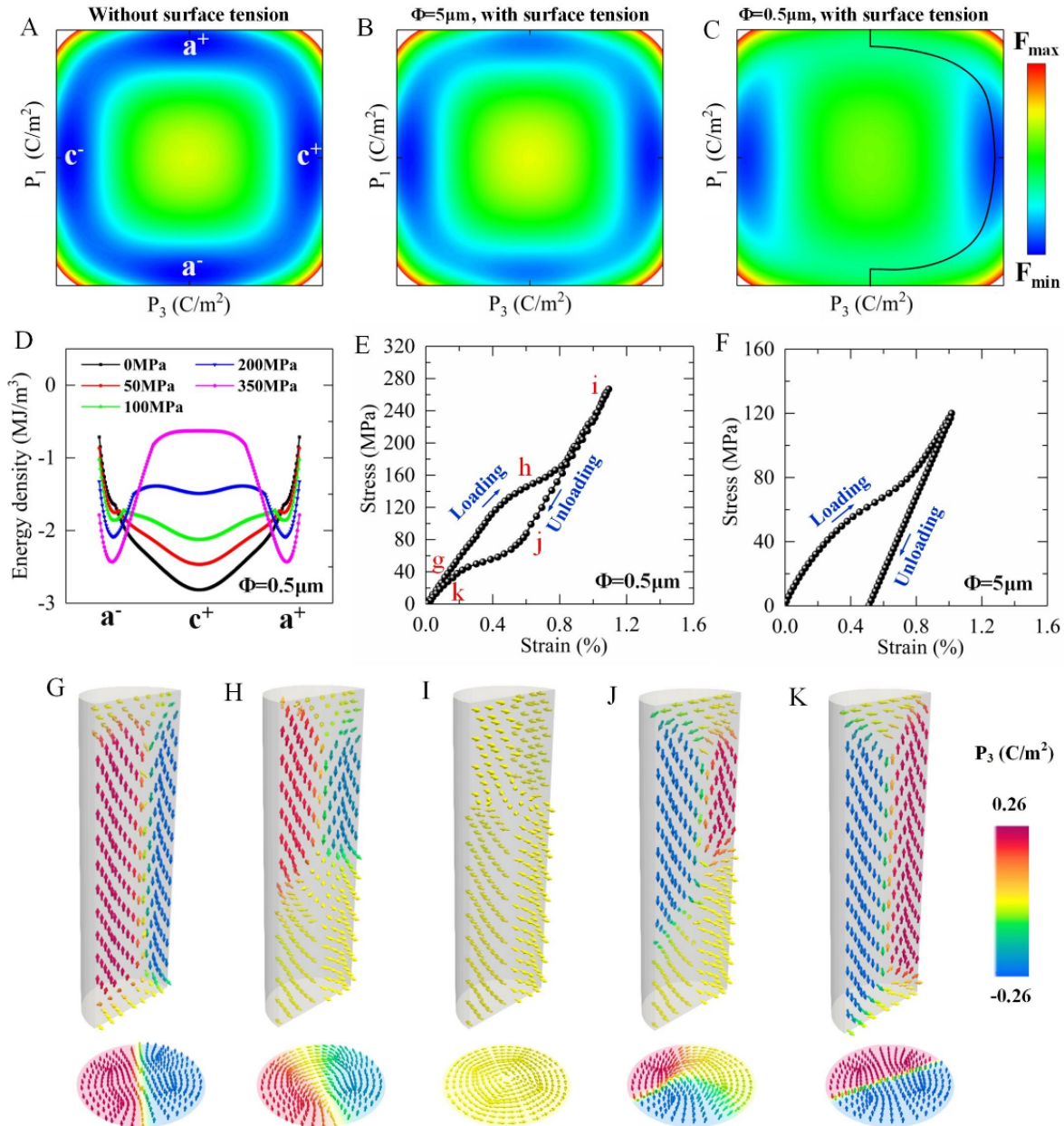


图2. 朗道-德文希尔理论分析和相场模拟结果。

疲劳寿命短是超弹性氧化物面临的主要问题。比如， $\text{ZrO}_2$ 微柱经过几十次循环后，即发生疲劳破坏。为此，研究团队测试了BTO微纳柱的疲劳响应和力学强度。在对 $\Phi = 0.58 \mu\text{m}$ 的BTO单晶微柱的疲劳测试结果(图3A)发现，在203 MPa应力加载循环一百万次后，材料仍无任

何疲劳衰减，可稳定输出高达1.0%的超弹性变形。除第一次循环周期内材料出现的0.08%的残余变形之外，第二次循环与后面百万次的循环周期应力-应变曲线基本重合(图3A)。当 $\Phi \leq 2 \mu\text{m}$ 时，微柱呈现相似的疲劳特性。疲劳测试前(图3B)和百万次循环测试之后(图3C)，BTO微柱形貌基本保持不变，没有显示百万次循环加载诱发的任何破坏或缺陷，证明了BTO微柱优异的抗疲劳性能，而且BTO微柱( $\Phi = 0.5 \mu\text{m}$ )强度高达5.3 GPa(图3D)，接近其理论极限(7 GPa)，比BTO块体单晶的强度高约两个量级。

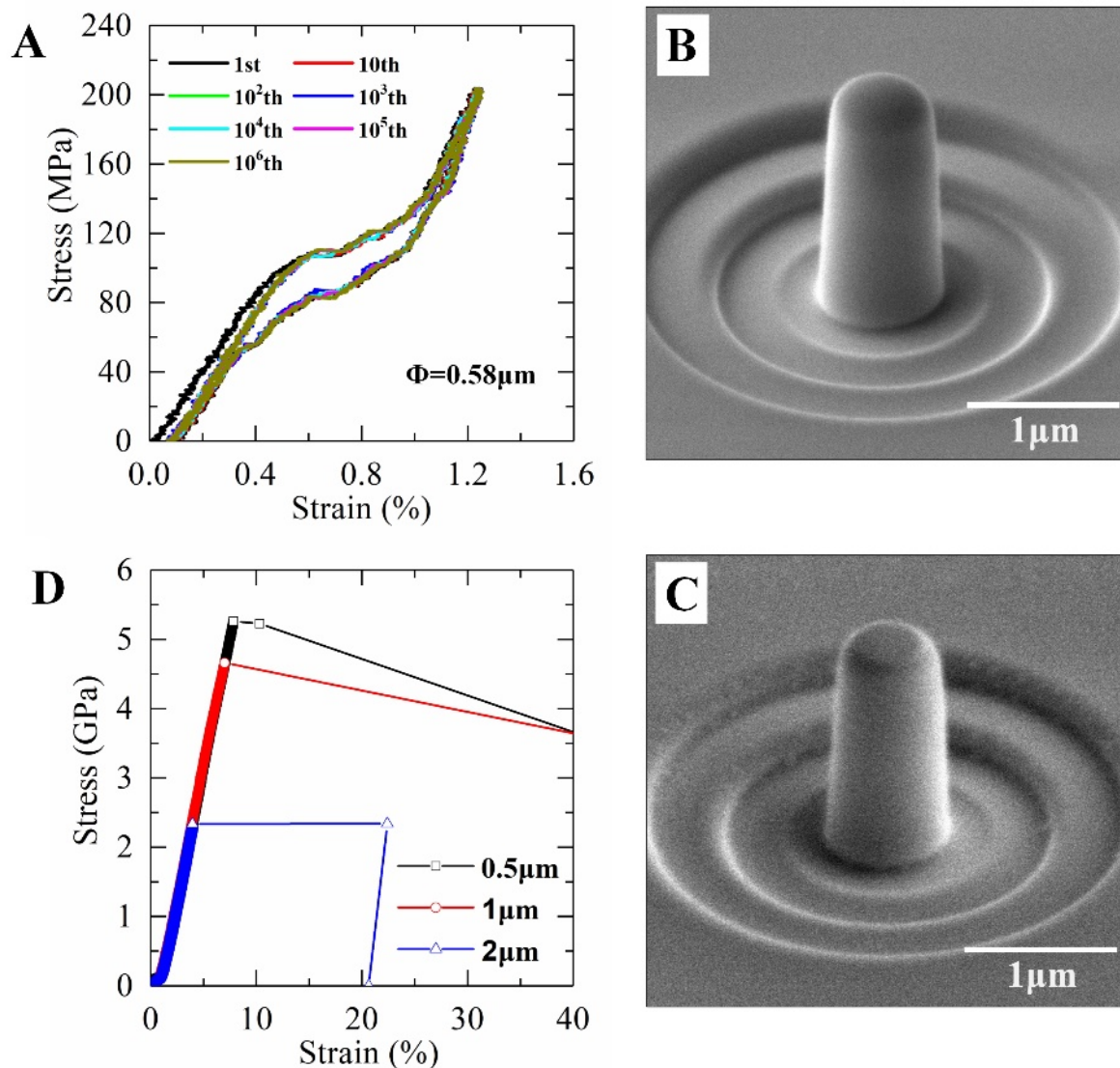


图3. (A) BTO微柱( $\Phi = 0.58 \mu\text{m}$ )的疲劳测试结果; (B)和(C)微柱疲劳测试前后的形貌对比; (D)不同直径BTO的强度测试结果。

研究团队对比了BTO单晶微纳米柱与其他超弹性材料的疲劳寿命、强度以及超弹性响应行为稳定性。BTO微柱的疲劳寿命要远大于 $\text{ZrO}_2$ 微柱，可以与SMA和橡胶相媲美(图4A)，其强度要远大于其他材料(图4B)。另外，BTO单晶微纳米柱超弹性行为的稳定性要优于SMA(图4C和4D)，随着循环加载次数的增加，SMA耗散的能量逐渐降低，卸载后测得的残余变形逐渐增

加，而对BTO微纳米柱，除了第一次循环加载时能观察到能量耗散的降低和一定的残余变形，在后面的加载过程中，材料性能基本保持不变。

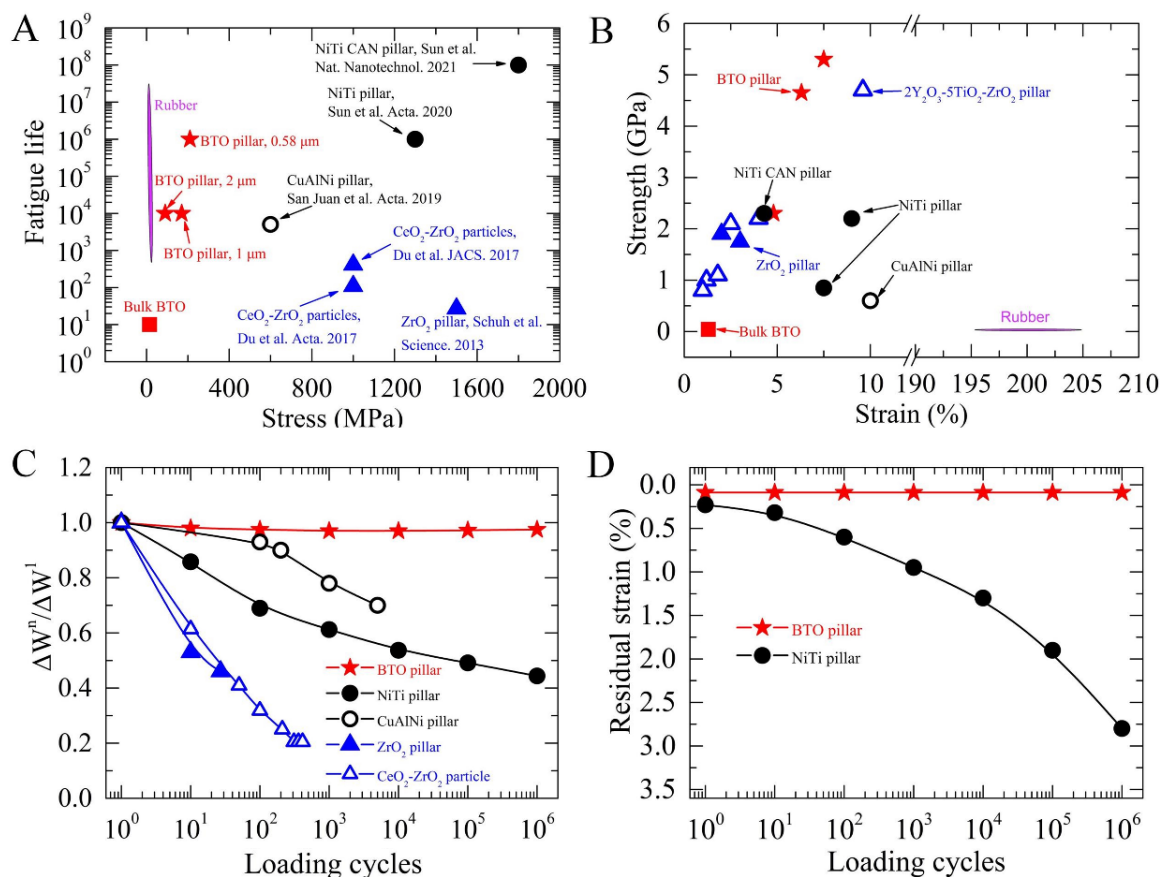


图4. BTO单晶微纳米柱与其他超弹性材料性能对比。(A)疲劳寿命；(B)强度；(C)循环加载过程中能量损耗情况；(D)残余变形。

该研究首次发现了尺寸效应关联的表面张力能够作为畴变的回复力实现优异的超弹性行为和抗疲劳特性。研究团队认为，本研究在BTO微柱中首次发现的表面张力调控的可逆 $90^\circ$ 畴变机理实现铁电材料超弹性、抗疲劳特性的机理与传统相变机理相比更具优势，亦和BTO铁电薄膜机理完全不同，并预测很可能在其它铁电氧化物(如 $\text{PbTiO}_3$ )中实现更大的超弹性应变，为微纳阻尼器件设计提供了新的材料选择方案，从而解决微纳阻尼器件的疲劳问题。

李应卫，南科大2012级本科生储康杰(现香港科技大学在读博士生)、浙江大学博士生刘畅(现西南交通大学助理教授)、中科院先进技术研究院博士生姜鹏为本论文的共同第一作者。李应卫、王杰、任富增、李江宇为本文的共同通讯作者。该研究得到了国家重点研发计划、国家自然科学基金、广东省信息功能氧化物材料与器件重点实验室、深圳市基础研究学科布局项目等资助。

论文链接：

<https://doi.org/10.1073/pnas.2025255118>



供稿：材料科学与工程系

通讯员：周斌

主图设计：丘妍

编辑：朱增光

## 最新动态

王伟中书记到南方科技大学讲思想政治理论课 【红色基因与时代使命】重温延安历史 感悟我校召开2021年延安精神

10月22日，广东省委副书记、深圳市委书记王伟 2021年10月21日下午，我校《红色基因与时代使命》特色思政课第六讲开讲。 10月20日下午，20中到南方科技大学，结合党史学习教育，围绕“...命》在办公楼209会议室实现中华民族伟大复兴为己任，在鹏城大地用奋斗

南科大姬生健课题组持续在RNA修饰调控神经发育和功能领域取得重要进展 南科大杨河教授连续在重要刊物发表研究文章 南科学子在2021年得佳绩

近日，南方科技大学生命科学学院副教授姬生健课题组在学术期刊Advanced Science上在线发表题为“The m<sup>6</sup>A Readers YTHDF1 and YTHDF2”学学报》等国内重要刊物发表研究文章。 近日，南方科技大学人文科学中心特聘教授杨河连 10月15-17日，202队共获

## 热点阅读

南科大李闯创课题组在Chemical Society Reviews发表综述文章 逐梦南科，扬帆起航 南科大2021级本科新生 南方科生来校报到

近日，南方科技大学化学系教授李闯创课题组应邀 2021年8月22日，南方科技大学2021级本科新生 2021年发表题为“Synthesis of natural products” 在国际顶级综述期刊Chemical Society Reviews... 塘朗山下这座拥有九山一水的校园，在这里扬帆起

2022泰晤士世界大学排名公布 南科大首次 南科大国际研究团队在《自然》杂志上发布 明德求是 日新月异  
进入世界200强 观测到原子手性超流的重大研究成果 校训

2021年9月2日，泰晤士世界大学排名网发布了最新“2022泰晤士高等教育世界大学排名”，南科大首次进入世界排名200强。

在实验室中首次观测到类六角氮化硼光晶格上由相明德树人、求是治学  
相互作用诱导的具有拓扑准粒子激发的全局原子手...  
超流。

FOLLOW US @SOCIAL MEDIA

## 关注社交媒体上的我们

