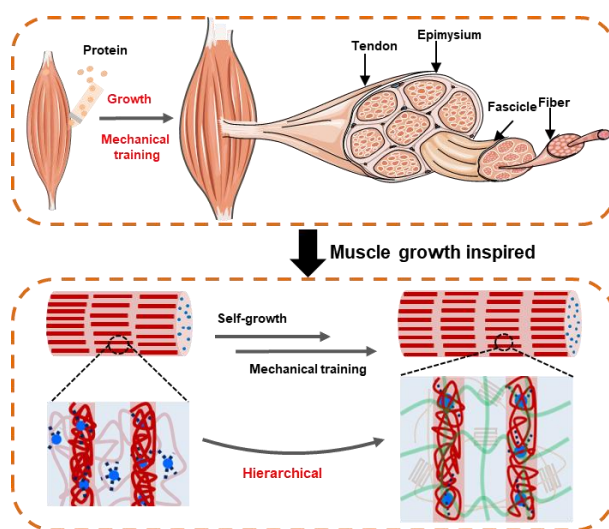


化生学院青年教师周小状在 Adv. Mater.发表
研究论文：肌肉生长过程启示的各向异性自生长水凝胶

肌肉组织是人体最坚韧的各向异性组织之一；其优异的力学性能来源于其独特的多层次纤维结构。这些多层次纤维结构的形成包含了两个基本的生命过程：i) 外界营养成分的摄取、转换；ii) 机械训练将摄取的外界营养物质转换为纤维结构，从而增强增韧肌肉组织。此外，肌肉组织生长过程中，纤维结构会先损失、断裂；在吸收外界营养及训练之后变粗、重构，使得肌肉变大变粗，增强其承重能力。受此生长过程启发，研究人员已经开发了机械训练诱导的纤维结构原位生成的水凝胶及力诱导的自生长水凝胶。这些水凝胶在经过机械训练后，力学性能都能够增强；但是在这些水凝胶中，力的作用主要是在各项同性水凝胶中原位生成纤维结构（机械训练诱导结构转变）、或者是用于诱导聚合反应（模仿肌肉的基质生长）；目前仿肌肉生长的策略仍然难以完美复制肌肉的生长过程，即基质生长和机械训练诱导结构转变。



受此启发，武汉理工大学化生学院周小状研究员联合电子科技大学崔家喜教授团队合作开发了一种机械训练耦合的自生长策略，从而完美地模拟了肌肉的生长过程，同时实现了各向异性水凝胶尺寸变大和力学性能的增强。相关工作近日以“Muscle-Inspired Self-Growing Anisotropic Hydrogels with Mechanical Training-Promoting Mechanical Properties”为题发表于学术期刊《*Advanced Materials*》。武汉理工大学材料学院硕士研究生夏雨龙为论文的第一作者，武汉理工大学化学化工与生命科学学院周小状研究员、电子科技大学崔家喜教授为论文的共同通讯作者。

Muscle-Inspired Self-Growing Anisotropic Hydrogels with Mechanical Training-Promoting Mechanical Properties

Yulong Xia, Xiaozhuang Zhou ✉, Zhenzhen Wang, Luzhi Zhang, Xinhong Xiong, Yubo Cui, Ruizhi Zhang, Jian Zhang, Guoqiang Luo, Qiang Shen, Jiayi Cui ✉

First published: 17 March 2025 | <https://doi.org/10.1002/adma.202416744>

具体而言, 本文利用一种机械训练耦合的自生长策略, 制备了具有多层级结构的高强韧各向异性水凝胶。以聚乙烯醇 (PVA) /单宁酸 (TA) 制备的各向异性超分子水凝胶为例来进行说明 (图 1), 对其进行基质生长和机械训练 (一个生长周期)。基质生长包括四个步骤: 营养物 (聚乙二醇二丙烯酸酯 (PEGDA)、光引发剂以及二甲基亚砜 (DMSO) 中的混合溶液) 的溶胀、PEGDA 的聚合、水交换和 PVA/TA 超分子网络的重构。在生长过程中, 各向异性 An-PVA/TA 水凝胶中的纤维结构被分解, 形成各向同性水凝胶。随后的机械训练对诱导聚合物网络重排, 生成具有各向异性结构的水凝胶, 完成结构的转变。完成一个生长周期之后, 可进行下一个生长周期, 如此往复, 可增加材料的尺寸 (约 2 倍)、增强水凝胶的机械性能 (杨氏模量: 从 2.4 MPa 到 2.85 MPa; 极限抗拉强度: 从 8.2 MPa 到 14.1 MPa; 韧性: 从 335 MJ/m³ 到 465 MJ/m³)

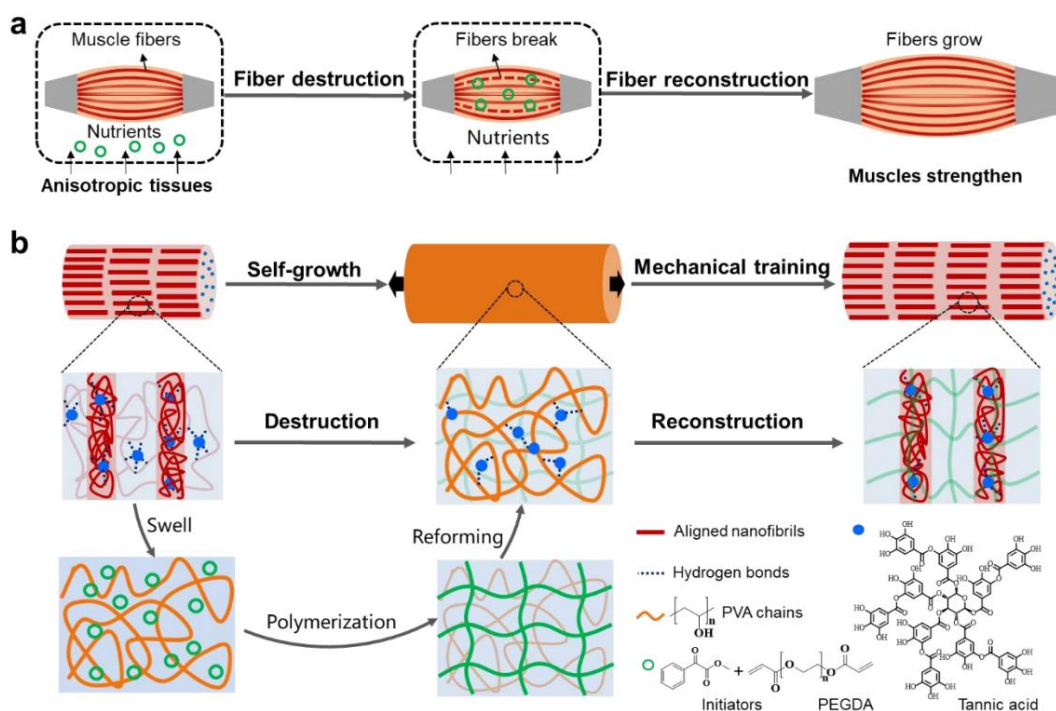


图 1.各向异性坚韧水凝胶的机械训练相关生长设计。图片来源: *Adv. Mater.*

随后, 对各向异性水凝胶基质生长过程中尺寸、微观结构及组分进行了系统研究 (图 2)。并且利用扫描显微镜 (SEM) 和小角 SAXS 对机械诱导的结构转变进行了系统研究。研究表明: 各向异性水凝胶 (An-PVA/TA) 在基质生长和机械诱导结构转变之后, 尺寸增加的同时

可保持各向异性结构。但是生长训练后水凝胶 (An-PVA-PEGDA) 的纤维结构和 An-PVA/TA 又有所不同。

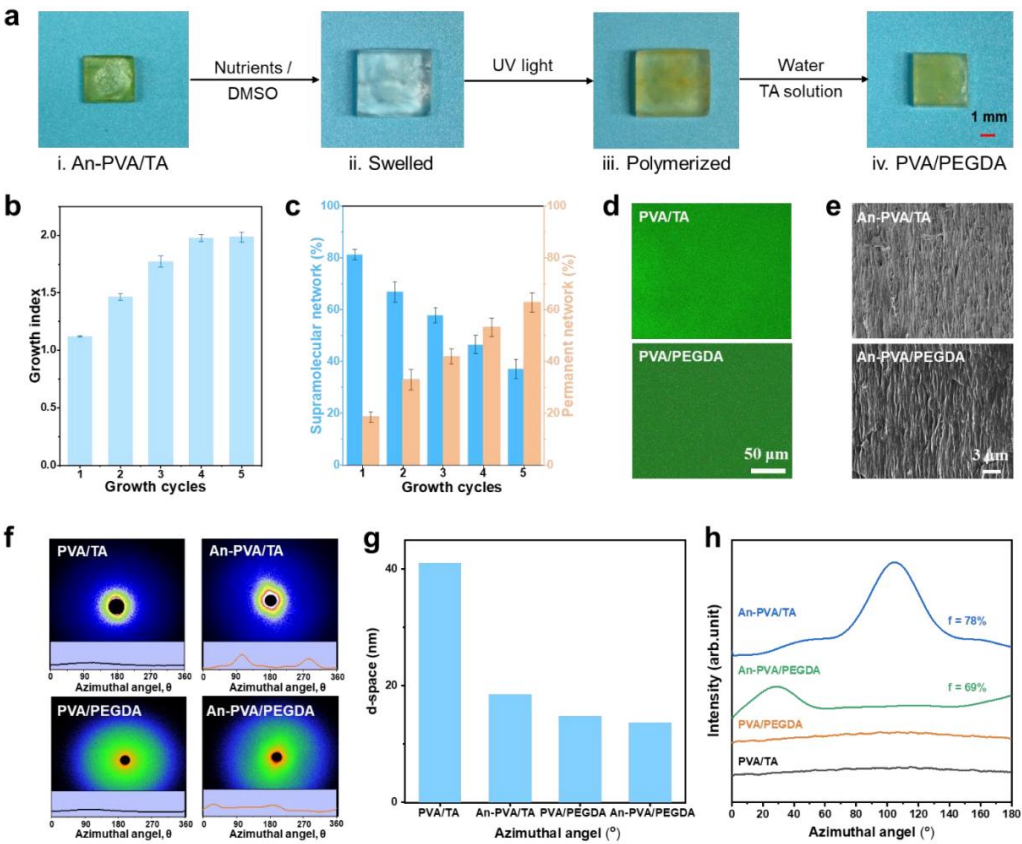


图 2.自生长各向异性水凝胶。图片来源: *Adv. Mater.*

接着本文进一步探讨了机械训练诱导结构转变的机制, 追踪了不同训练次数下水凝胶的微观结构。SAXS 结果表明, 水凝胶内部的取向结构随着训练次数的增加而变得更加显著 (图 3)。随后, 本论文进一步的研究了生长过程和机械训练过程对 An-PVA/TA 水凝胶的聚集状态及力学性能的研究, 并讨论了其影响机制 (图 3)。建立了水凝胶微观结构、韧性以及断裂韧性的相关关系 (图 4), 对比了本论文制备的 An-PVA/PEGDA 水凝胶与当前的韧性水凝胶 (例如双网络、微相分离水凝胶及定向铸造及盐析水凝胶) 的最大抗拉强度、断裂韧性。

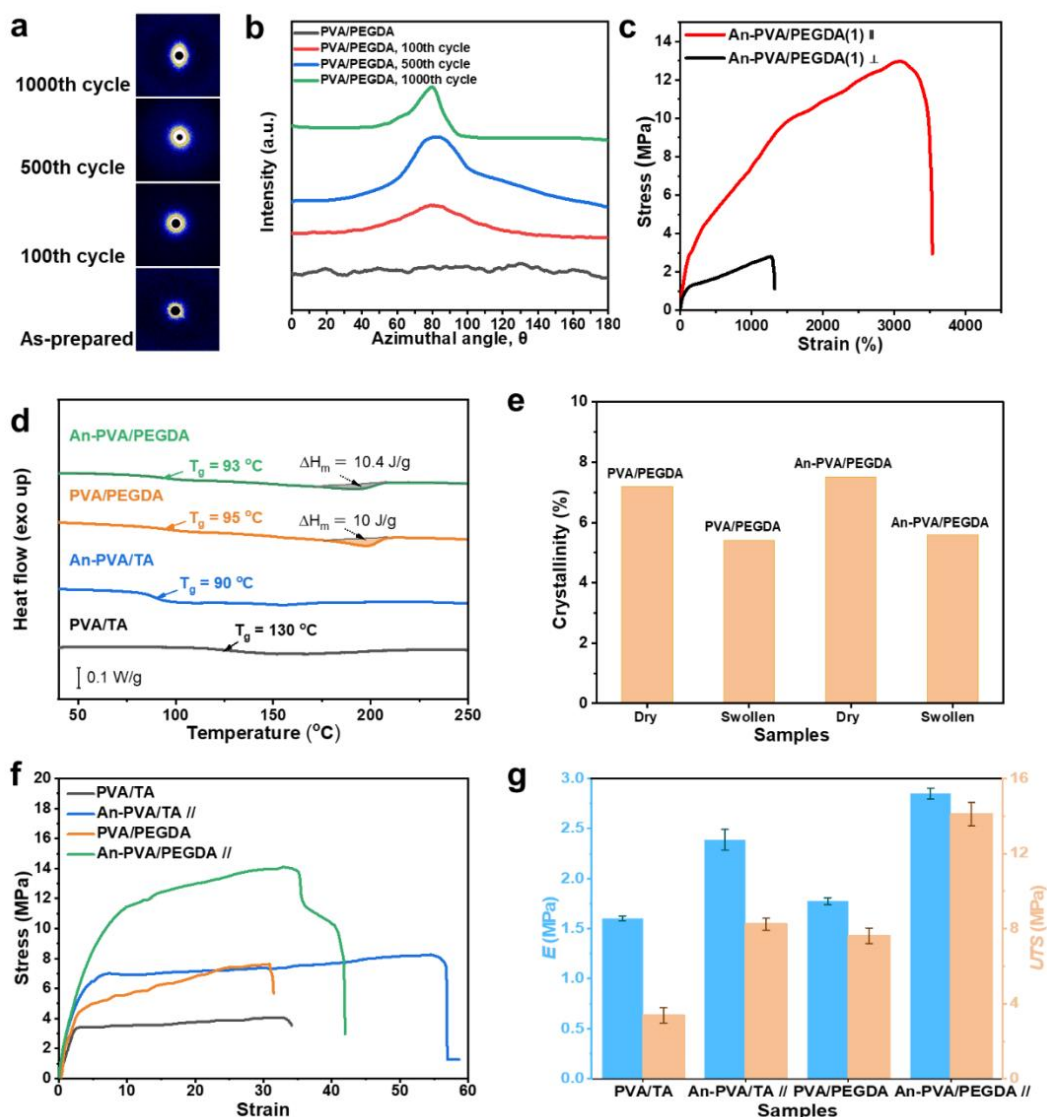


图 3.自生长各向异性水凝胶的结构演化和力学性能。图片来源: *Adv. Mater.*

最后评估了水凝胶的能量耗散能力及其在冲击防护中的应用。结果表明: 机械训练后的水凝胶在低应变条件下的能量耗散效率可达 90%。由于其良好的能量耗散效率, 水凝胶可有效抵抗静态力以及动态力的冲击。将水凝胶粘贴在充气气球表面做防护材料时, 气球在受到尖锐针头冲击时, 仍可保持充气状态而不破损 (图 4)。这也验证了水凝胶在防护材料中的潜在应用, 显示出良好的抗冲击能力。

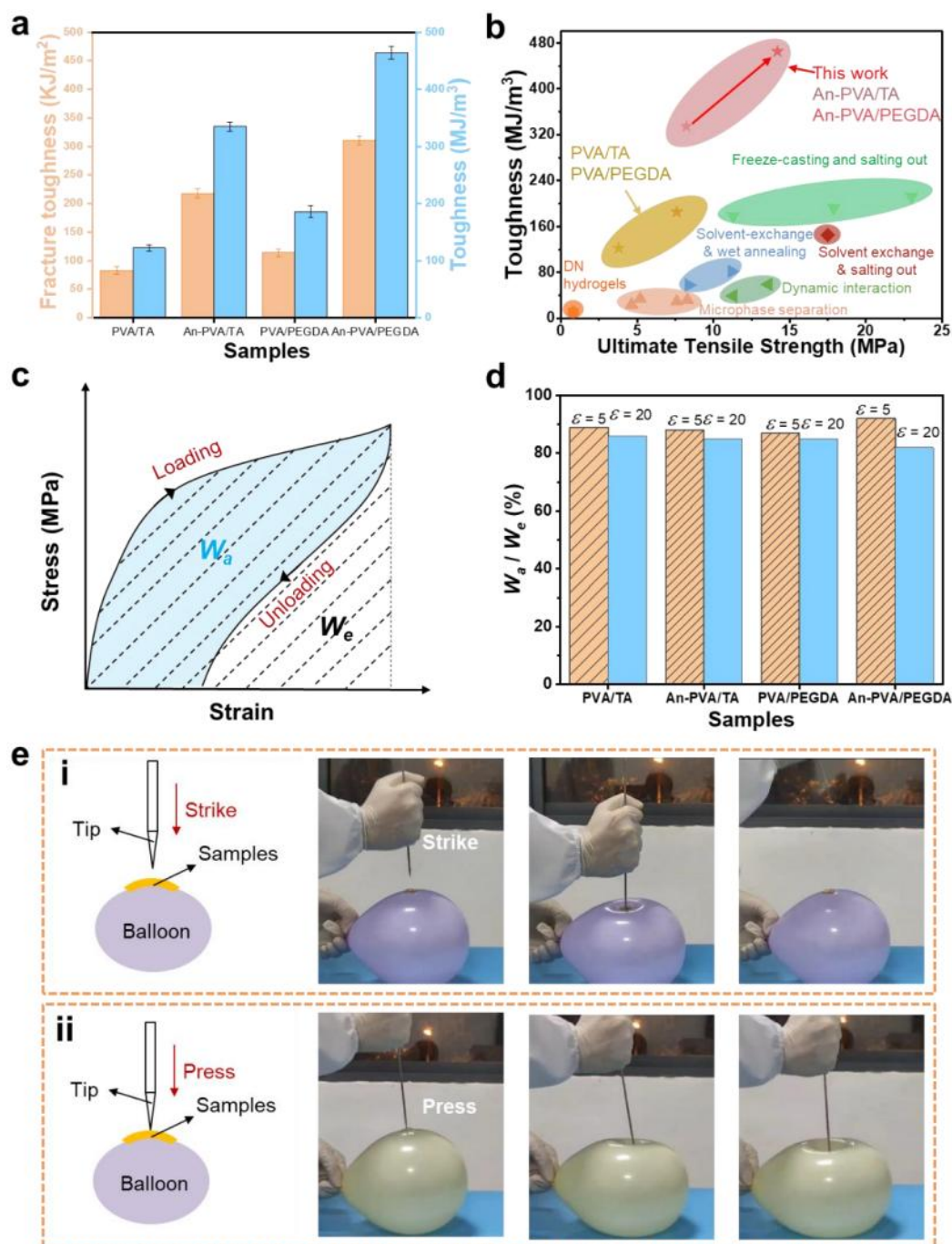


图 4.水凝胶的超高耗能能力的评价和应用示范。图片来源: *Adv. Mater.*

该工作受到了国家重点研究计划 (2021YFB3802300)、广东省基础与应用基础研究重大项目 (2021B0301030001)、联合基金 (8091B022108)以及国家自然科学基金 (52403153, 55203169, 52171045)的支持。

论文相关链接: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.202416744>

周小状博士简介：



武汉理工大学化生学院特设研究员。2020 年博士毕业于德国萨尔大学，先后在哈勒-维滕贝格大学、美国俄亥俄州立大学、电子科技大学长三角研究院（湖州）国内外知名高校或科研机构从事功能高分子材料方面的研究工作，2024 年 12 月加入武汉理工大学化学化工与生命科学学院。主要从事有机-无机复合材料、仿生复合材料的研究；共发表论文 27 篇，其中，近五年以第一作者/通讯作者在国际知名期刊发表 SCI 发表论文 14 篇，包括 *Nature Communications* (2 篇)、*Advanced Materials* (1 篇)、*Advanced Functional Materials* (2 篇)；申请中国专利 8 项，其中授权 2 项。