

---

# 科学家制备仿心脏瓣膜的柔软抗疲劳水凝胶

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/31133.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！**

科学家制备仿心脏瓣膜的柔软抗疲劳水凝胶。水凝胶具有高含水量和良好的生物相容性，其中抗疲劳性能的优劣是决定水凝胶应用的关键。近年来，研究人员提出了多种抗疲劳水凝胶的设计策略，其中一类是通过添加纤维来实现高疲劳性能，然而纤维往往会导致较高的弹性模量，失去与生物组织匹配的柔顺性。

近日，西安交通大学唐敬达教授团队仿照心脏瓣膜组织的软基质-弯曲胶原纤维的复合结构，制备了针织纤维-PVA复合水凝胶，同时实现了高疲劳门槛值与低模量，并将该复合水凝胶制成了心脏瓣膜假体，具有2500万次的超高疲劳寿命。论文以A soft and fatigue-resistant material that mimics heart valves为题发表在《Matter》上。

生物组织，如肌肉、声带和心脏瓣膜等，往往通过变形发挥功能，具有良好的抗疲劳性能(图1A、B)。例心脏瓣膜作为控制血液流向的阀门，在人的一生中开合30亿次。这种组织需要满足两个基本力学性能要求：低模量与高疲劳门槛值。生物组织通过柔软的基质和卷曲的高强胶原纤维来满足这两个要求(图1C)。小载荷下，卷曲胶原纤维未被拉直，从而使组织具有较低的模量；大载荷下，拉直的胶原纤维在裂纹尖端，通过纤维长程传力来分散裂尖应力集中，使生物组织具有较高的疲劳门槛值。受此启发，研究人员运用针织织物增强水凝胶，该复合水凝胶在弹性模量-断裂韧性-疲劳门槛值等方面可以媲美牛心包组织(图1D，1E)，而且具有2500万次极高的疲劳寿命，比水凝胶基体高2个数量级。

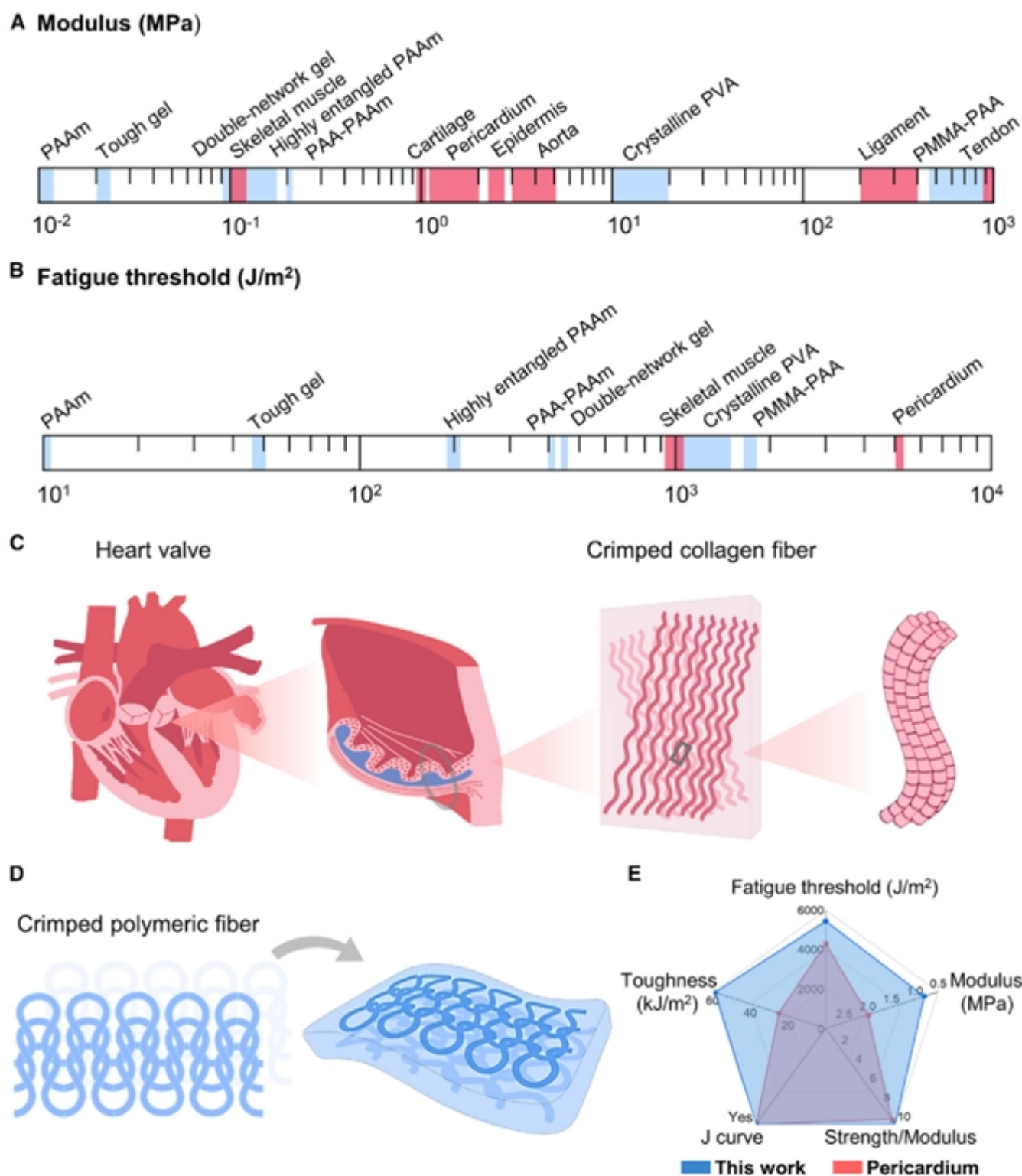


图1. 软材料的模量与疲劳阈值

研究人员使用尼龙纤维编织成的针织织物和PVA水凝胶作为软基体来展示该策略。尼龙针织物具有周期性弯曲纤维结构（图2A），有两个主方向：经线和纬线方向。该针织物具有良好的亲水性（图2B），使得水凝胶前驱体能够有效渗透到织物间隙中；SEM图像显示针织物可以被水凝胶基体良好地覆盖，纤维束之间填充有水凝胶基体（图2C）。尼龙纤维可以和PVA水凝胶形成较

---

强的氢键（图2D），研究人员进一步通过分子动力学模拟来揭示这一过程（图2E），尼龙和PVA之间的氢键数量随着干燥过程得到提高，即使后续发生溶胀，其氢键数量仍能维持较高水平，优于未处理的界面（图2F、G和H）。

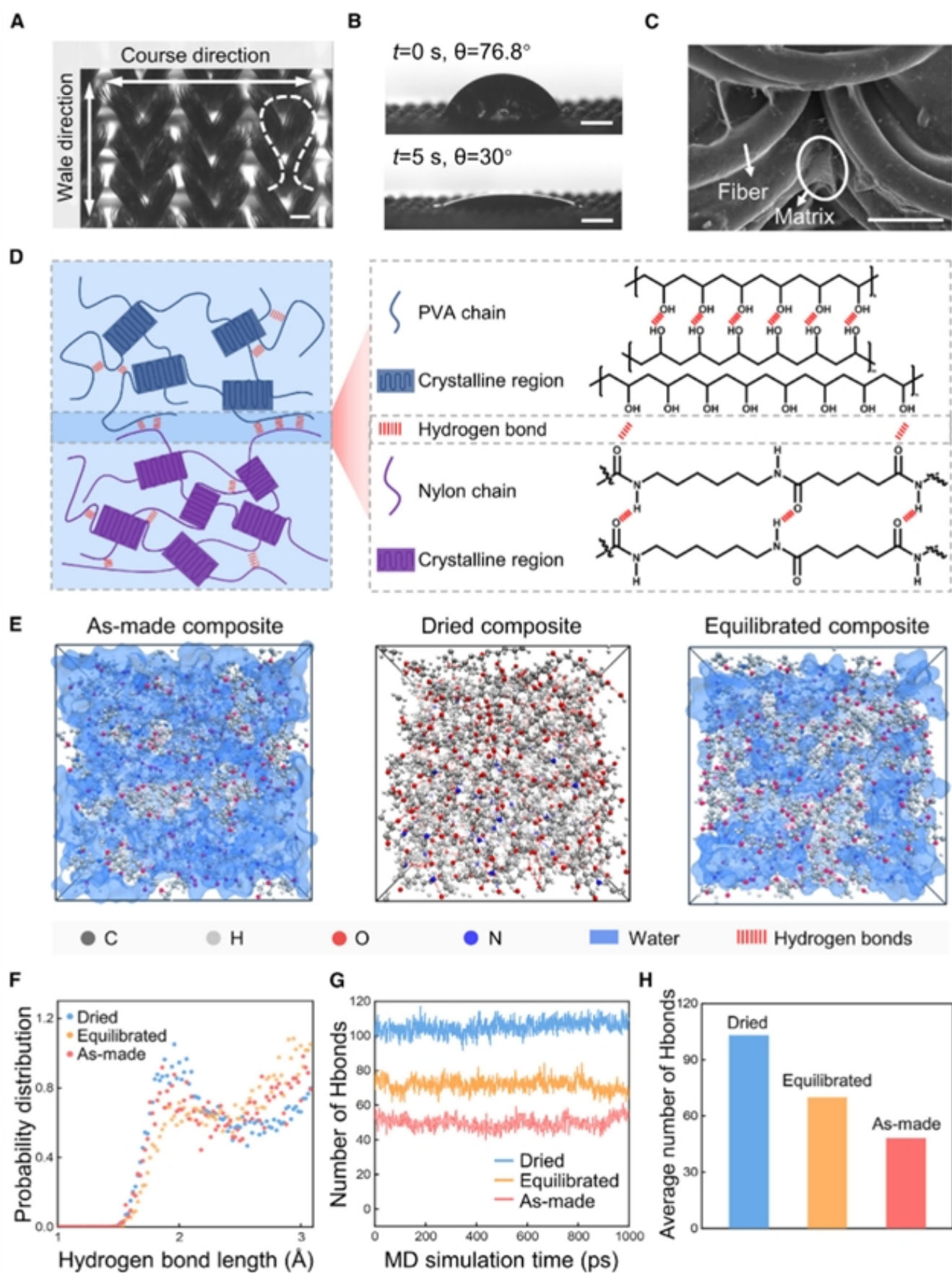


图2. 复合水凝胶的制备和界面调控

研究人员深入研究了单层纤维复合水凝胶的疲劳裂纹扩展模式。当裂纹沿着纬线方向扩展时，裂纹面上的纤维逐渐被抽出，直到形成桥接区，纤维才能有效抵抗疲劳裂纹扩展（图3A、B）。当裂纹沿着经线方向扩展时，复合材料快速形成纤维桥接区抵抗疲劳裂纹扩展（图3C）。这类复合材料具有两个特征的能量释放率： $G_a$ 和 $G_b$ 。当 $G < G_a$ 时，裂纹不扩展；当 $G_a < G < G_b$ 时，裂纹扩展后停止；当 $G > G_b$ 时，裂纹稳态扩展（图3D）。为了进一步解释两个方向裂纹扩展规律的差异，研究人员通过有限元模拟了纤维结构的演变，发现两个方向的纤维间摩擦差异巨大，当裂纹沿着纬线方向扩展时，纤维间摩擦相比另外一个方向低了2个数量级，正是由于低摩擦力导致纬线方向纤维容易被拉出（图3F）。

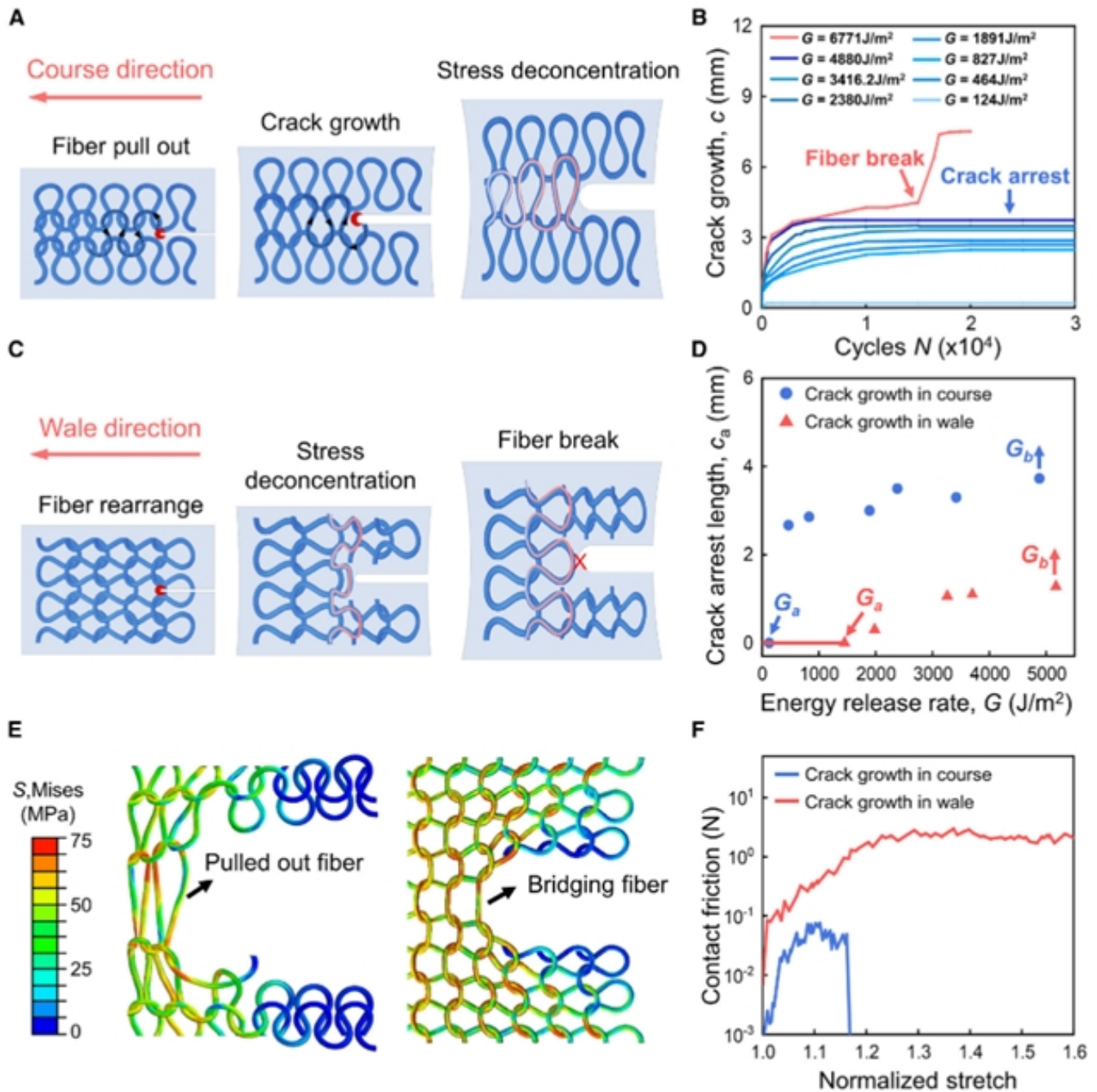


图3. 复合水凝胶疲劳裂纹扩展

事实上，生物组织往往具有多层排布的纤维，可以抵抗多方向的疲劳裂纹扩展。受这种多层结构的启发，研究人员制备了多层纤维增强的复合水凝胶（图4A）。在相同的循环加载下，单层复合水凝胶中发生了明显的裂纹扩展，但多层复合水凝胶中裂纹几乎不扩展（图4B,C）。多层复合水凝胶的疲劳门槛值 $G_b$ 可达5,440J/m<sup>2</sup>，与牛心包相当（图4D-F）。

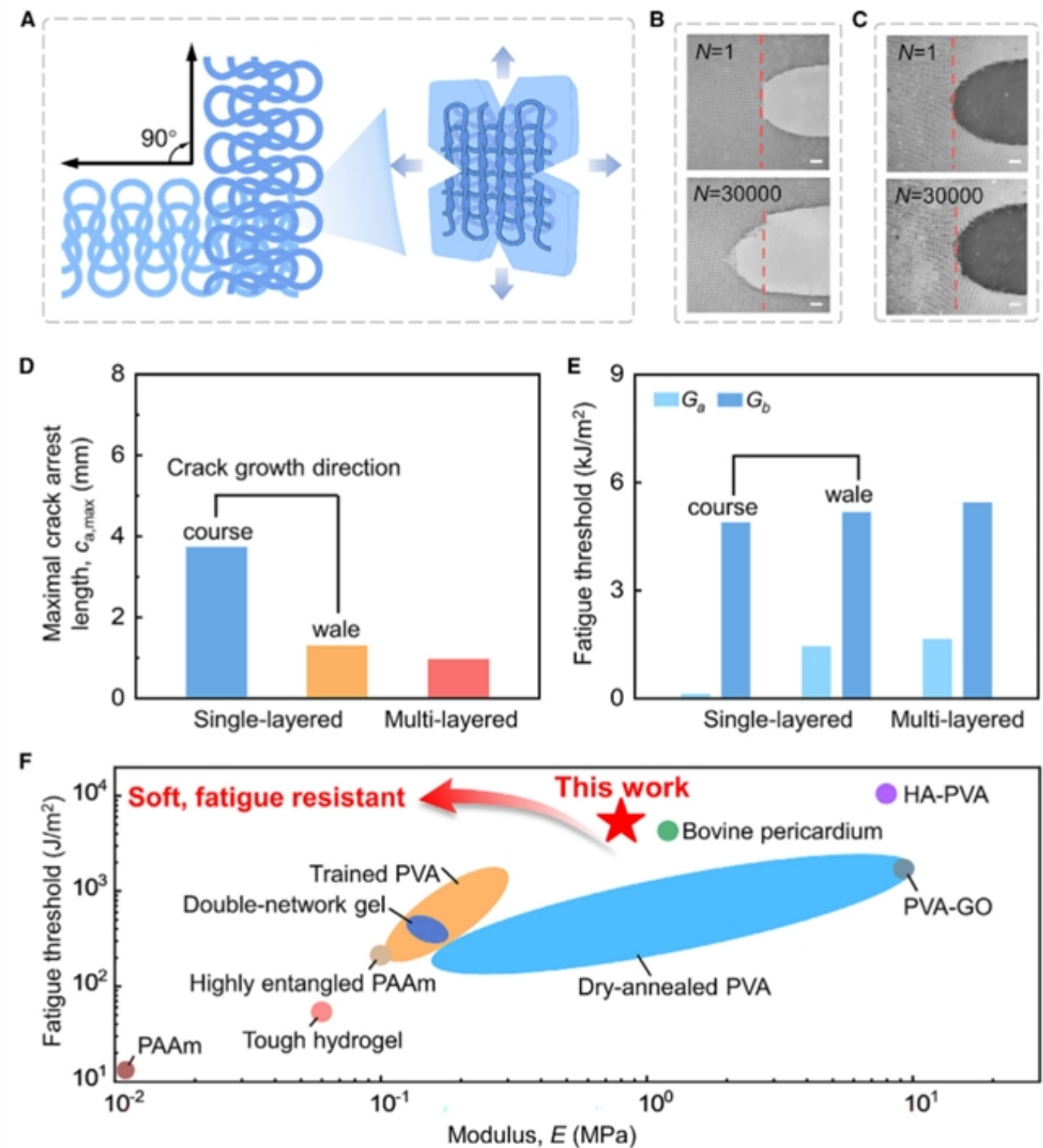


图4. 多层复合水凝胶的疲劳裂纹扩展

为了验证复合水凝胶优异的抗疲劳性能，研究人员将其剪裁成瓣叶缝合到金属支架上，制成了心脏瓣膜仿体（图5A）。开展了超高周加速疲劳测试，模拟体液环境，用15HZ的高频脉动流冲刷瓣叶（图5B和5C）。纯PVA水凝胶在 20万次循环后就发生破坏，而复合水凝胶即使在2500万次循环后仍保持完好（图5D-F）。研究人员对2500万次疲劳实验后的复合水凝胶进行SEM观察，没有发现任何裂纹。

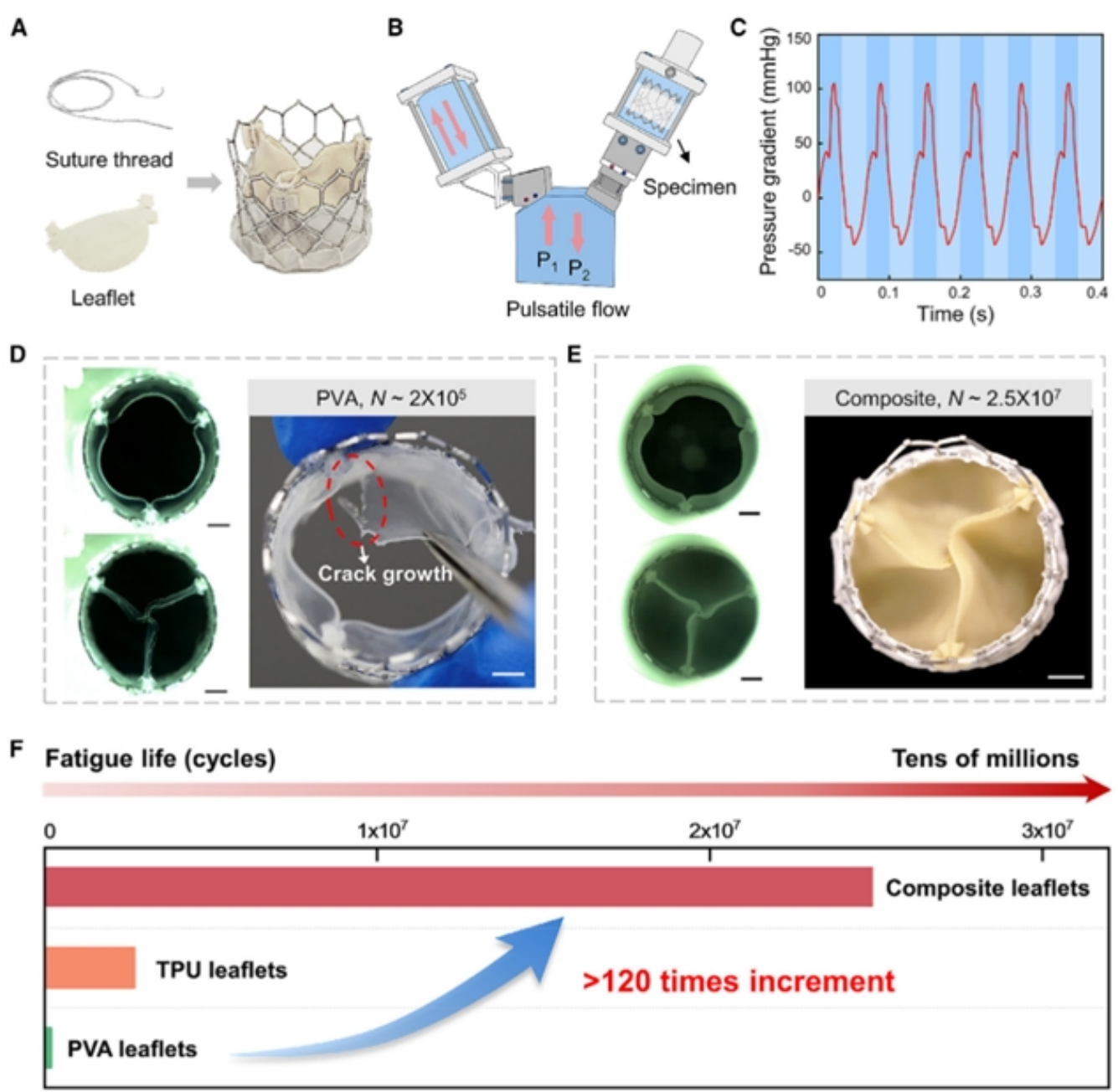


图5. 超高周疲劳测试

研究人员受到心脏瓣膜组织中多层胶原纤维结构的启发，提出了针织织物增强水凝胶的策略，在保证低模量的同时，提高了水凝胶的抗疲劳性能。该复合水凝胶具有2500万次的高疲劳寿命，有望拓宽水凝胶的应用前景。

---

论文第一作者为西安交通大学博士生陈曦，通讯作者为西安交通大学唐敬达教授，合作作者包括哈佛大学锁志刚院士、上海纽脉医疗科技公司虞奇峰博士等。（来源：科学网）

论文链接：<https://doi.org/10.1016/j.matt.2024.11.020>

作者：唐敬达等 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