

中国科大揭示淡水河蚌铰链中可变形硬组织耐疲劳机理

2023-06-25 来源：中国科学技术大学

 【字体：大 中 小】  语音播报

脆性材料作为结构或功能部件被广泛应用于航空航天、电子器件和组织工程等领域。由于人工脆性材料对微裂纹和不易察觉的缺陷较为敏感，在长时间的循环载荷作用下，易累积损伤产生疲劳裂纹，进而存在失效的风险。随着可穿戴设备的发展，对具有高疲劳抗性的可变形功能材料的需求日益凸显。通过模仿典型的生物矿物材料如珍珠母、骨骼等的结构设计可以提升脆性材料疲劳抗性，但依赖于疲劳裂纹扩展过程中增韧行为，而一旦裂纹开始扩展，便会对器件的性能产生不可逆的影响，因此寻找并开发新的耐疲劳结构模型对未来可变形功能材料的设计制备具有重要的科学意义和应用价值。

中国科学技术大学俞书宏院士团队和吴恒安教授团队揭示了双壳纲褶纹冠蚌铰链内的可变形生物矿物硬组织的耐疲劳机制，提出了多尺度结构设计成分固有特性相结合的耐疲劳设计新策略，为未来耐疲劳结构材料的合理创制发展提供了新见解。6月23日，相关研究成果以 *Deformable hard tissue with high fatigue resistance in the hinge of bivalve *Cristaria plicata** 为题，发表在《科学》(Science) 上。

双壳纲动物褶纹冠蚌 (*Cristaria plicata*) 又称鸡冠蚌，是常见的淡水蚌类。为了满足生存需求 (觅食和运动等)，它的外壳在一生中需要进行数十万次的开合运动，而连接两片外壳的铰链部位也会经历反复的受压和变形，表现出优异的耐疲劳性能。本工作揭示了铰链部位中的折扇形矿物硬组织所蕴含的跨尺度耐疲劳设计原理。从计算机断层扫描图 (CT) 和剖面光学照片可以看出，铰链可以分为两个不同的区域——外韧带 (OL) 和折扇形矿物硬组织 (FFR) (图 1A、B)。研究人员观察了这两个区域在双壳开合过程中的运动行为 (图 1D、E)，并结合有限元分析 (FEA)，明晰了不同区域所承担的力学角色。在闭合过程中，OL 发生拉伸，承担主要的周向应力并储存大部分弹性应变能；FFR 区域在周向弯曲变形，并在受限的径向变形下提供强有力的径向支撑用以固定 OL (图 1F-H)。

科研人员对 FFR 在不同尺度上的观察发现，其具有跨尺度多级结构特征。在宏观尺度上，FFR 的扇形外形能使其在 OL 和外壳之间实现有效的载荷传递。进一步的深入观察发现，FFR 由弹性有机基质和嵌入其中的脆性文石纳米线组成。文石纳米线直径约为 100-200 纳米，线的长轴方向在形貌上和扇形的径向方向一致，在晶体学上纳米线沿 002 晶向取向 (图 2A-H)。考虑到文石晶体在 002 晶向的压缩模量大于其他晶向，研究推测这种微观形貌和晶体学取向的一致性意味着 FFR 能有效地为 OL 的拉伸提供支撑 (图 2I、J)。上述成果通过压缩力学和 FEA 模拟进行了进一步验证。此外，FEA 模拟结果显示，这种微米尺度上的软硬复合微观结构在压缩、拉伸、剪切三种受力状态下能够进行协调变形，而在这一过程中有机基质承担了大部分的压缩和剪切应变，减少了材料内部的应力集中，从而避免了文石纳米线侧向断裂，降低了 FFR 发生疲劳损伤的可能性。

研究在 FFR 的横截面观察发现，文石纳米线呈近似六边形。研究通过高分辨透射电子显微镜在纳米线中发现了纳米孪晶结构。考虑到文石纳米线沿 002 方向生长，研究推测这一结构可能与文石晶体 Pmcn 空间群易形成 (110) 孪晶密切相关。这种沿纳米线纵向方向的孪晶结构的存在，在纳米尺度上强化了纳米线抗弯曲断裂的能力 (图 2E、F)。与典型的天然硬质生物矿物材料 (如骨骼、牙釉质) 以及人工材料 (如金属、水凝胶) 等相比，FFR 的特殊之处在于可在承担较大周向变形的同时保持长时间的结构功能的稳定。该研究从宏观到微米尺度上揭示了 FFR 的跨尺度多级结构设计原则 (图 3)。

该研究揭示了含脆性基元的生物矿物材料在较大变形下的耐疲劳设计新机制，推进了国际上含脆性基元的仿生耐疲劳材料设计的研究。该工作提出的整合跨尺度结构特征与功能特性的设计策略，可在不同尺度上发挥每种成分的面固有特性，从而实现材料整体性能的优化。这种兼顾变形性和耐疲劳性的跨尺度设计原则，有望为未来功能材料的仿生设计和创制提供新思路。

审稿人评价称：“这份手稿展示了一个非常有趣的工作”“这是一份令人兴奋的稿件。它集成了诸多表征技术来理解双壳纲铰链组织的显著疲劳抗性”“这无疑激发了对生物复合材料进一步研究，以设计抗疲劳性能增强的新材料”。同期《科学》观点栏目 (Perspectives) 以 *A bendable biological ceramic* 为题发表了评述。评述称“通过整合不同尺度的原理——从铰链的整体结构到单个晶体的原子结构，孟等人揭示了大自然如何主要从脆性成分中创造出抗疲劳、可弯曲、有弹性的结构。这些跨尺度原理要求在最精细的尺度上精确，而软体动物如此精确地沉积壳的细胞和分子机制是一个正在探索的领域”“匹配生物精细控制对于对生物启发材料感兴趣的人类工程师来说是一个特别的挑战，正如开发模仿珍珠母强度和韧性的复合材料所面临的困难所证明的那样”“尽管孟等人研究的力学性能与这种特殊生物体的需求相匹配，这些原理如何在更广泛的系统范围内得到完善，这是令人兴奋的前景”。

研究工作得到国家重点研发计划、新基石科学基金会、国家自然科学基金重点项目和中国科学院青年创新促进会等的支持。

[论文链接](#)

Featured by Science Perspectives

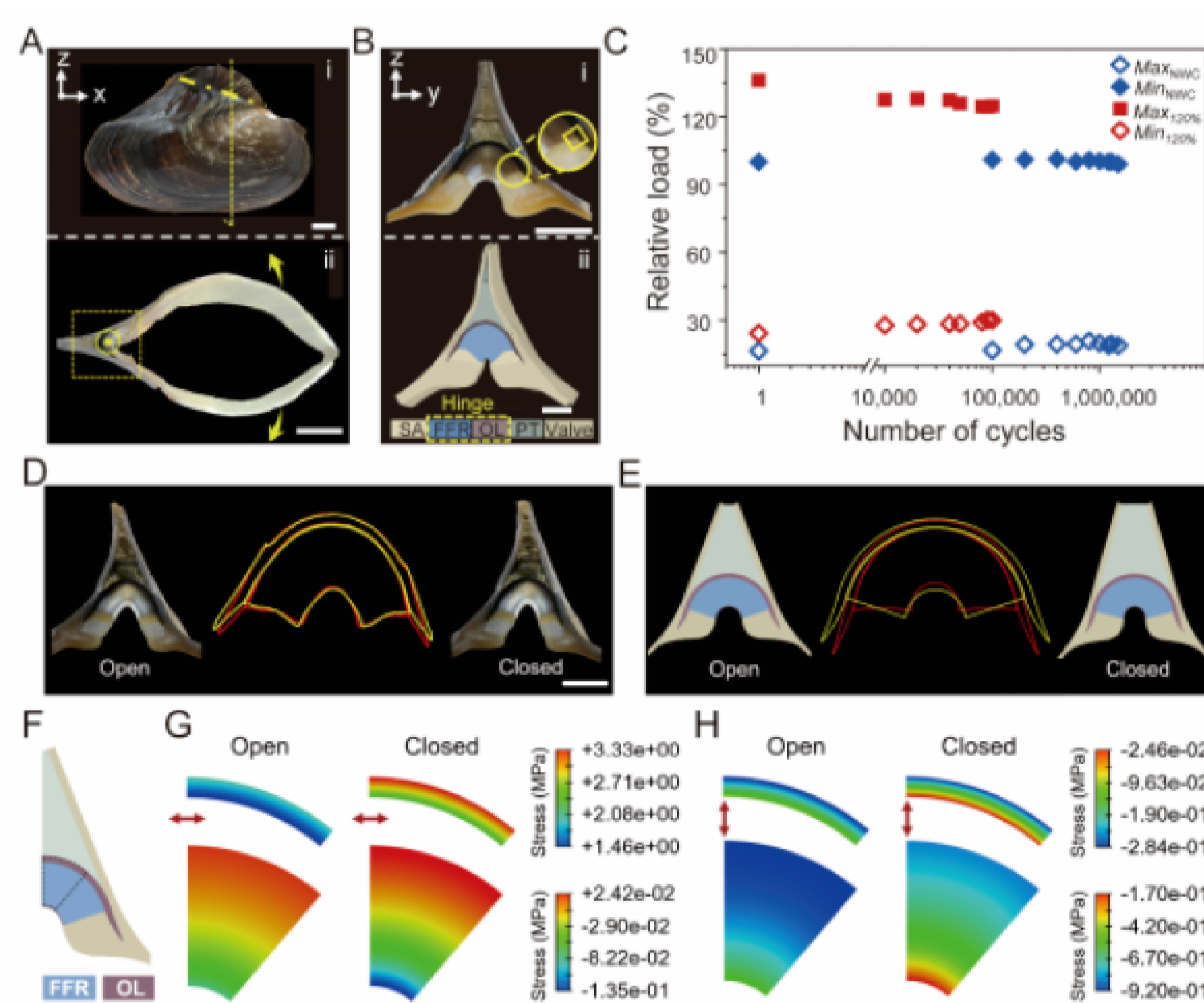


图1. (A) 褶纹冠蚌和截面照片；(B) 铰链切片照片和CT重构图；(C) 在正常开合和过载状态下的疲劳测试结果；(D) 开合前后铰链各区域形状变化及其轮廓图；(E) 有限元模型对应的开合前后的铰链各区域形状变化及其轮廓图；(F) 铰链有限元分析模型示意图；(G) 开合状态下铰链各区域周向应力分布；(H) 开合状态下铰链各区域径向应力分布。

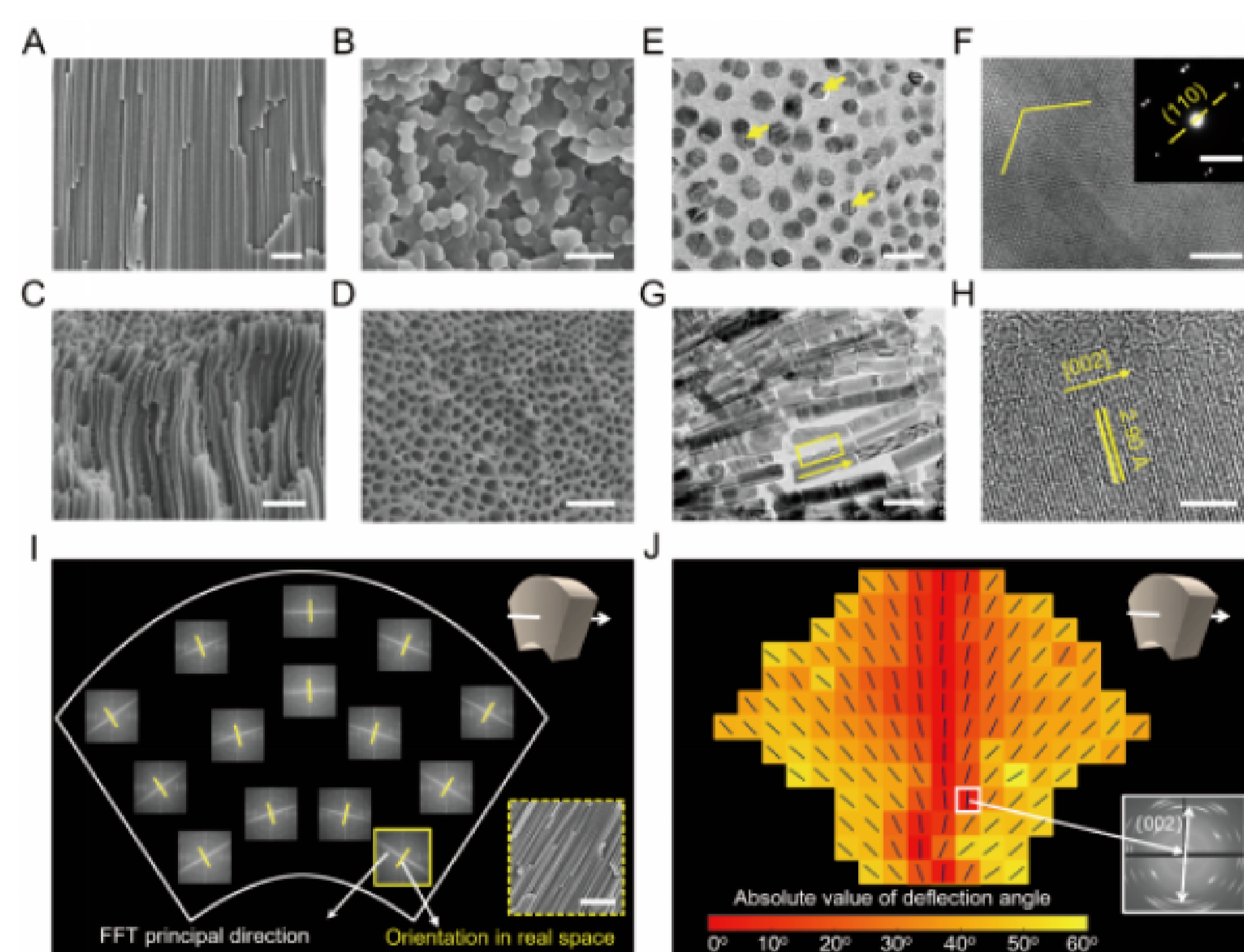


图2. (A) FFR在纵向上的自然断面扫描图；(B) FFR在横向上的自然断面扫描图；(C、D) FFR脱钙处理之后的扫描图；(E、F) 文石纳米线中的孪晶结构透射电子显微照片；(G、H) 文石纳米线沿长度方向上的晶体学特征；(I、J) 整个FFR中纳米线在形貌上和晶体学上的取向分析示意图。

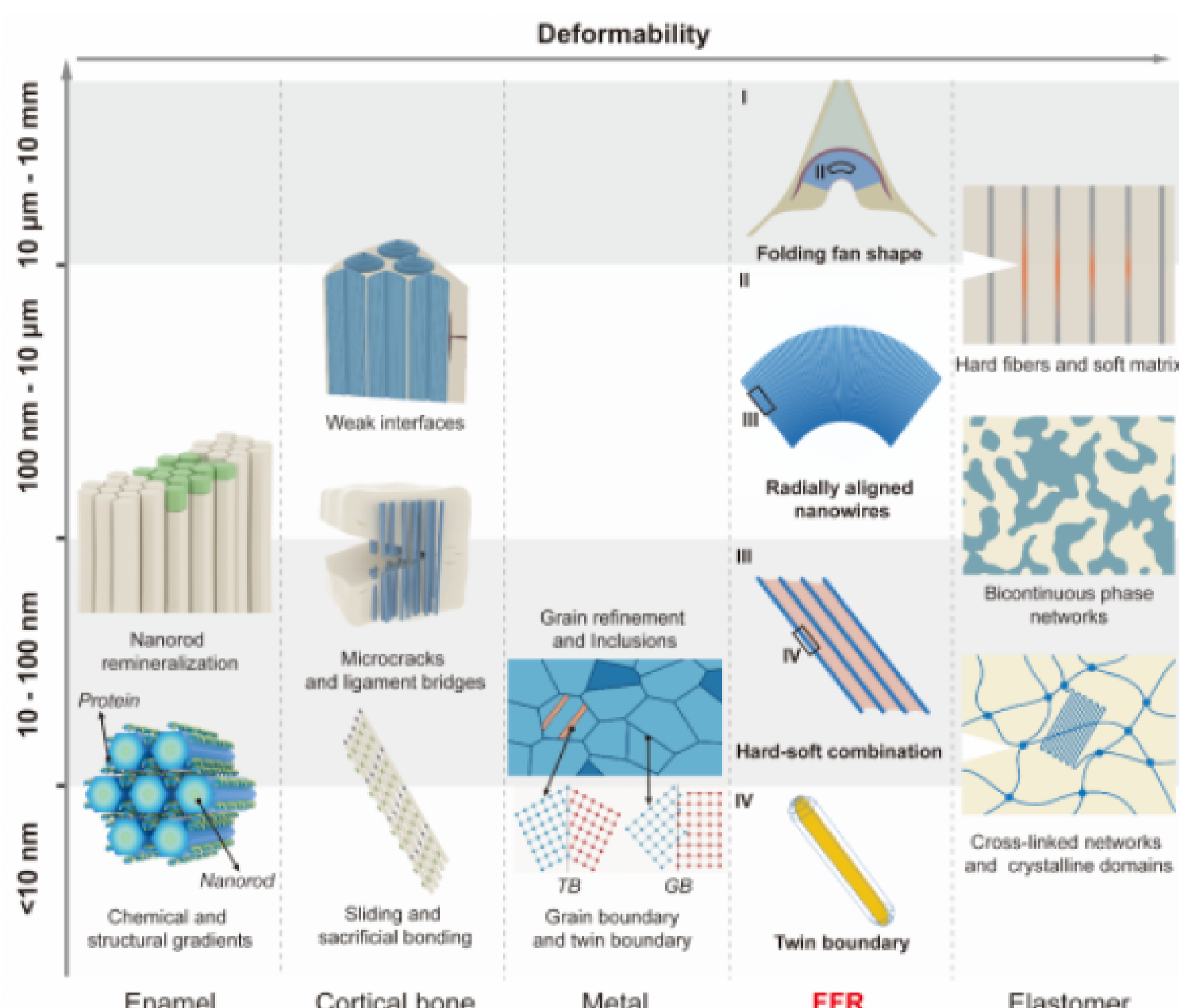


图3. 典型生物和人工结构材料的耐疲劳设计机制。FFR中所具备的跨尺度结构特征使其在可变形能力上明显优于典型的生物矿物如牙釉质和骨骼，与常见的人工弹性体材料相比，FFR也在一定程度上保持了高硬度和刚度。

责任编辑：侯茜   更多分享

[>> 上一篇：生物物理所等绘制出线虫暴食及过饱条件下精准氧化还原图谱](#)
[>> 下一篇：心理所揭示发病年龄调节总抗氧化能力与精神分裂症认知障碍的关系](#)



扫一扫在手机打开当前页