

代表性成果

1. 郑晓静院士团队刘洪佑青年研究员研究了颗粒和颗粒近壁运动对两相流中的湍流的影响，揭示了颗粒近壁运动对于湍流结构及其自相似性特征的影响。现有研究常将这两者混为一谈，导致难以区分颗粒本身与颗粒近壁运动对湍流的各自作用。此外，颗粒碰撞反弹与击溅对湍流的相干结构影响尚未得到充分细化。因此，本研究团队在水平风洞中开展了单相流与含颗粒流实验，研究了在相同来流速度下，三种不同颗粒近壁运动方式（顶部释放颗粒、局部铺设沙床和整体铺设沙床）对湍流统计特性的影响，同时保持相似的颗粒体积分。实验结果表明：颗粒减弱了高、低速等动量区和发夹涡的强度，但增强了相干结构的长度尺度增加。而碰撞反弹和击溅则破坏了内部等动量区和发夹涡，同时增强了外部等动量区和发夹涡的强度，减小了结构长度尺度。此外，向上运动的颗粒使大尺度结构倾角增大，向下运动的颗粒使大尺度结构倾角减小，线性相干谱分析表明，颗粒本身不改变结构自相似性，但它们的跃移运动破坏了近壁结构的相似性，使倾角随尺度减小，并且所产生的上升颗粒减小了外部区域中流向与垂向的纵横比。（Feng Y.-E., Liu H.-Y., Zheng X.-J.*. The modulation of coherent structures by the near-wall motions of particles, Journal of Fluid Mechanics, 2024, 981: A26）

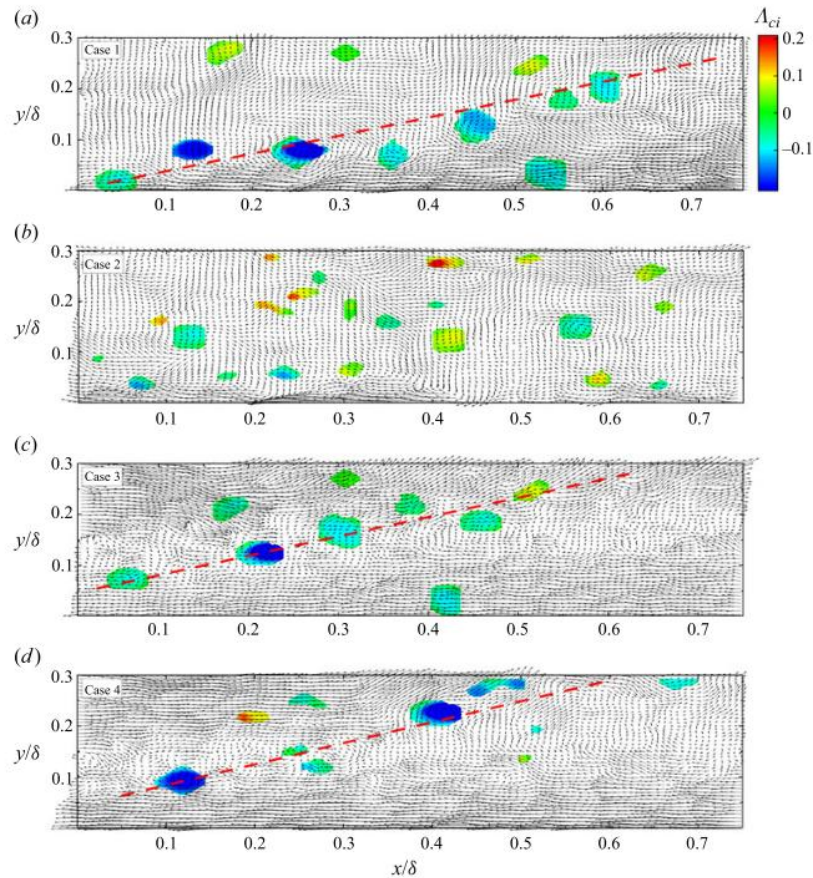


图 四种工况下的瞬时发卡涡图；Case 1 ~ Case 4 分别显示在（a-d）中

2. 郑晓静院士团队张欢教授揭示了带电惯性颗粒对槽道湍流调制的定量规律和物理机制。嵌入湍流中的大量小惯性颗粒已知会改变湍流的统计特性和结构，这一现象被称为湍流调制。尽管颗粒带电现象在含颗粒湍流中普遍存在，并显著影响颗粒行为，但颗粒间静电力对湍流调制的影响及其潜在的物理机制仍不清楚。为了填补这一空白，我们进行了系列点颗粒直接数值模拟，研究摩擦雷诺数约为 540 的槽道湍流，其中装载了无电荷和带电的双分散颗粒。结果表明，与装载无电荷颗粒的流动相比，颗粒间静电力的存在导致了湍流强度和结构的显著变化。特别是，内尺度平均流向流体速度向较低值偏移，表明流体摩擦速度显著增加。湍流强度由于颗粒从流体相中提取动量以及通过颗粒引入额外的湍动能耗散而进一步受到抑制。重要的是，尽管总流体应力的贡献减少，但颗粒应力贡献的间接增强导致整体阻力增加。另一方面，通过同时减少湍流生成和增加颗粒反馈作用，大尺度运动的幅度被削弱。同时，流向-展向平面中的平均条带状流体结构被扩展，而流向-壁法向平面中的倾斜流体结构则变得更平缓。(Cui Y.-K., Zhang H., Zheng X.-J.*. Turbulence modulation by charged inertial particles in channel flow. Journal of Fluid Mechanics, 2024, 990: A2)

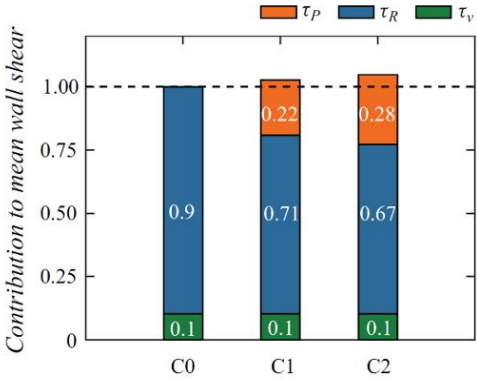


图 1 壁面剪切力

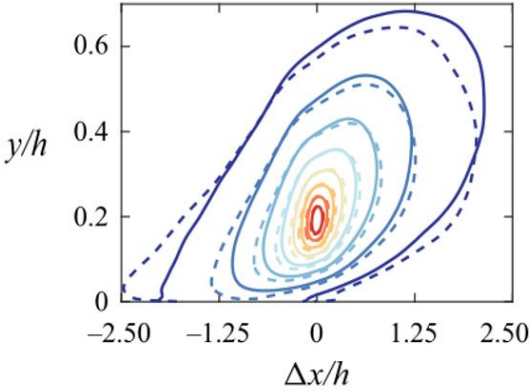


图 2 互相关函数

3. 周又和教授团队刘东辉副教授研究了树脂浸渍高温超导磁体屏蔽电流诱发的损伤及载流退化行为。高场下高温超导磁体屏蔽电流诱发的力学变形、机械损伤和载流退化问题在应用中尤为关键。针对此，我们采用 T-A 方法和内聚力模型，构建了电-磁-力耦合模型，以研究树脂浸渍高温超导磁体的力电退化及失效行为（见图 1）。数值结果与实验数据一致，同时与非耦合模型相比，耦合损伤模型在计算线圈的电流密度、电磁力、损伤及力学变形分布上展现出显著差异（见图 2）。采用剥离和剪切两种破坏模式对比，阐释了屏蔽电流诱导的电磁力对高温超导涂层导体边缘及内部的损伤机制。增加组份结构厚度可有效缓解机械损伤并降低高磁场下的临界电流衰减。此外，模拟结果显示，环氧树脂粘合会导致匝间分层，而采用直接接触方法则可抑制这种损坏和载流衰减。（Superconductor Science and Technology, 2024, 37(9): 095018）

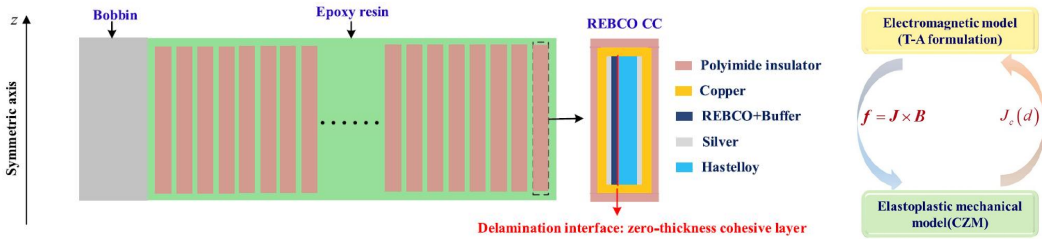


图 1 浸渍超导线圈的二维简化计算模型与引入内聚力本构的电磁-力耦合模型

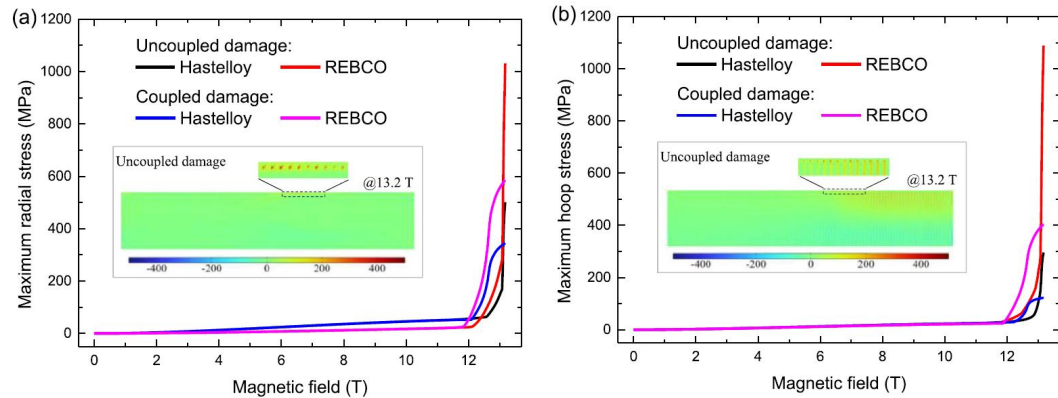


图 2 耦合模型与非耦合模型计算得到的径向及环向应力对比

4. 周又和院士团队他吴睿教授提出界面分布特征重构测量方法，实现了界面形貌、电阻率和接触应力分布特征的动态重构再现，为超导磁体内部界面性能检测评估提供了全新途径。候选人基于计算机视觉识别算法发现了剪切过程界面形貌的演化规律，进而构建“剪切力-形貌”标度率，实现了对界面形貌演化的重构和预测，预测结果与实测形貌相似度达到 90%以上；然后，将已建立“接触力-电阻”模型拓展为“电阻率-应力”分布关联模式，反演获得界面电阻、接触应力分布特征，发现电阻高的位置接触应力低，这与宏观接触力-电阻变化规律一致；最后，进一步考虑载荷作用时间效应，动态重构再现了接触电阻率、接触应力以及接触摩擦行为演化过程，实现了基于接触电阻率对复杂接触应力分布的动态测量。(Applied Physics Letters, 2024, 125(18): 181601.)

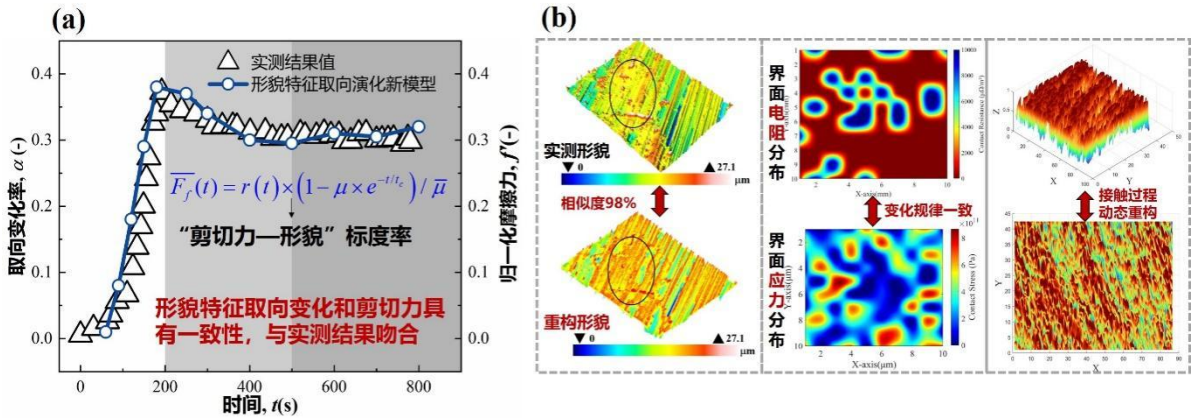


图 (a) 剪切过程形貌特征演化规律, (b) 界面内部接触电阻率、接触应力分布重构测量

5. 王记增教授团队研究了半柔性高分子链在复杂边界纳米管约束下的统计力学性质。生物体和高聚物材料中高分子链之间的缠结和微环境对高分子链的约束通常由纳米管约束下的半柔性链模型来描述。例如，噬菌体 DNA 分子通过蛋白质尾管进入宿主细胞的过程，以及，肌动蛋白纤维束的力与变形关系。半柔性高分子链在复杂边界纳米管约束下的统计力学性质是其中的关键问题。在该研究中，我们通过路径积分对限制在椭圆边界纳米管中的半柔性链的配分函数进行了研究，由相似性分析得到了一个表征子链结构的特征长度。这一子链单元不仅描述了整条链的能量和构象（图 1），也反映了纳米管的几何特征。理论结果由数值模拟进行了验证，结果相一致。此外，我们发现这一特征长度表现出形状无关性，它适用于具有不同几何边界效应的纳米管（图 2）。(Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2024, 193: 1 05862)

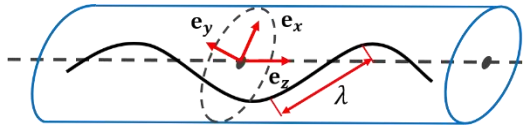


图 1 椭圆边界纳米管约束下半柔性高分子链的特征长度及构象示意图

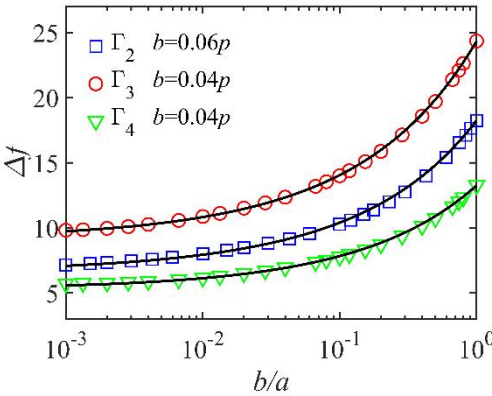


图 2 半柔性高分子链被约束在不同几何边界纳米管下的自由能结果

6. 黄宁教授团队开展了三维（3D）地形降雪空间分布规律的数值模拟研究，揭露了三维地形条件下地表积雪的空间分布特征及其与地形和空气流动的物理关联，为进一步开展复杂地形环境下高空间分辨率积雪水文模型的研究提供了基础。复杂地形上的积雪分布是水文建模的重要输入量。早期的降雪模式数值研究多集中在二维山丘上。三维（3D）地形上模拟结果表明，在二维和三维情况下，山体阻塞效应导致迎风坡上形成积雪区。在相同背景条件下，3D 情况下最大积雪发生在背风趾，而 2D 情况下最大积雪发生在背风趾。造成这些差异的主要原因是，在三维情况下，地形的跨向变化削弱了这种山丘阻塞效应，同时产生了地形尺度的涡，导致空间变化的雪沉积。研究发现，由于马蹄形涡的存在，在 3d 山的背风坡上形成了一个额外的积雪区。被涡度流线包围的低风速区在背风趾形成另一个大的积雪区。虽然这里的结果只适用于山脉链中的小山丘，但它们为水文模型的大尺度雪型参数化提供了必要的信息。（JGR: Atmospheres, 129, e2023JD039898. <https://doi.org/10.1029/2023JD039898>）

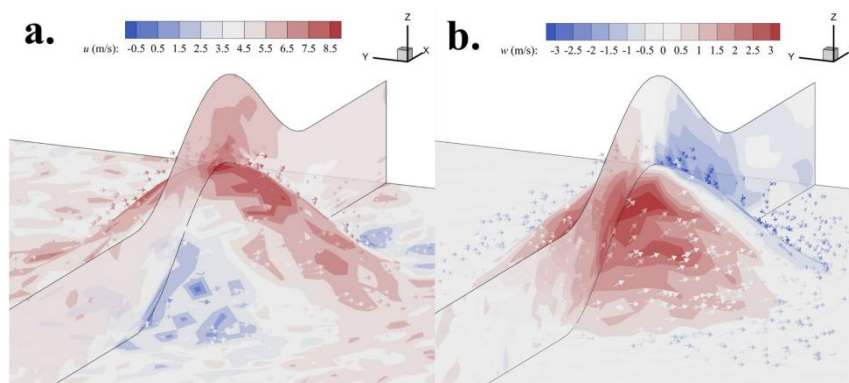


图 三维地形条件下瞬时风和颗粒速度矢量图

7. 王省哲教授团队提出高温超导磁体复合结构的多物理场多尺度数值模型与分析方法。环氧树脂浸渍 REBCO 高温超导磁体具有多层结构特性，带材内部各材料在极低温和强电磁场下的热、机械特性差异显著，这导致传统的数值模型方法无法有效分析超导线圈内部带材内部的多物理场特性。为解决此问题，王省哲教授团队提出了一种多尺度方法，用于分析环氧树脂浸渍复合磁体的多场特性。该方法结合了基于电磁和热弹性均匀化的全局均匀化（GH）方案、用于在宏观尺度上评估超导磁体的电磁和热弹性行为，然后在宏观尺度上识别“危险区域”，并使用局部细化（LR）模型在介观尺度上获取 HTS 复合带材中各材料组分的多物理场行为（如图 1）。结果表明 GH-LR 多尺度方法的结果与传统的全局细化模型吻合良好（如图 2），并且该方法表现出非常高的效率，并且可以保证计算精度（如表 1）。相关研究进展发表在 *Applied Mathematics and Mechanics*。（*Applied Mathematics and Mechanics*, 2024, 45(5): 747-762.）。进一步，高配教授基于双线性内聚力模型（CZM），开发了一种并行多尺度超导线圈失效模型（如图 3），实现高温 超导线圈在极低温、强电磁场极端工况下的界面失效行为的高效、高精度仿真（图 4）。所提出的多尺度方法可以作为评估大规模 HTS 复合磁体失效风险的有价值工具。相关研究进展发表在应用超导领域旗舰期刊 *Superconductor Science and Technology*。（*Superconductor Science and Technology*, 2025, 38(1): 015007）

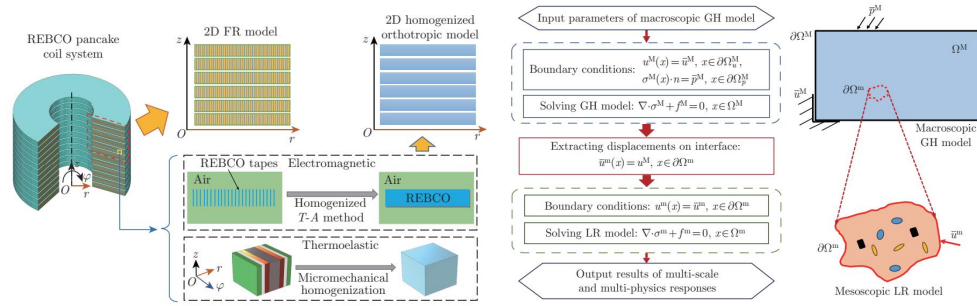


图 1 全局均匀化-局部细化数值模拟方案

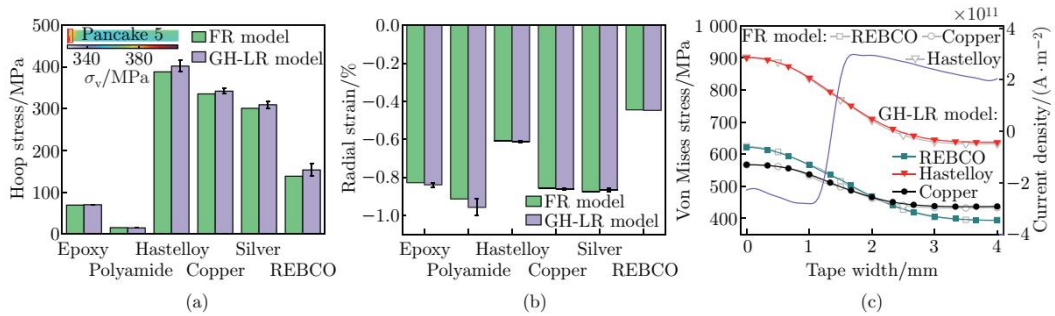


图 2 局部细化结果与全模型对比

表 1 计算效率对比

Calculation quantity*	FR model	GH-LR model	
		Macroscopic GH model	Mesoscale LR model
Degree of freedom	24 479 862	645 942	43 396
Computation time	13 h 10 min 53 s	46 min 50 s	

*CPU is as follows: AMD EPYC 7763 64-Core Processor 2.45 GHz, 256 GB RAM

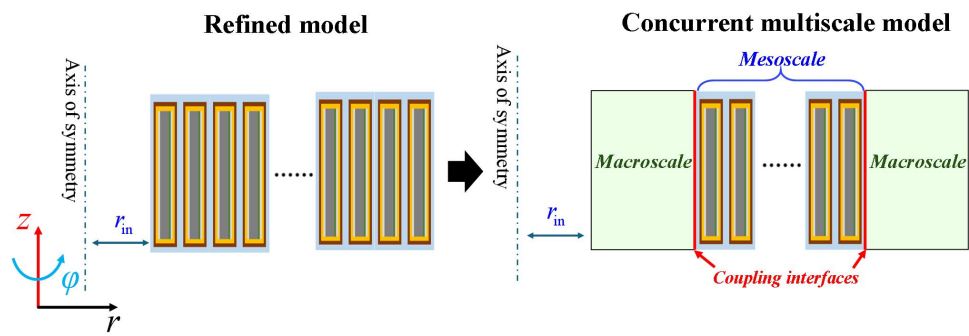


图 3 并行多尺度模型示意图

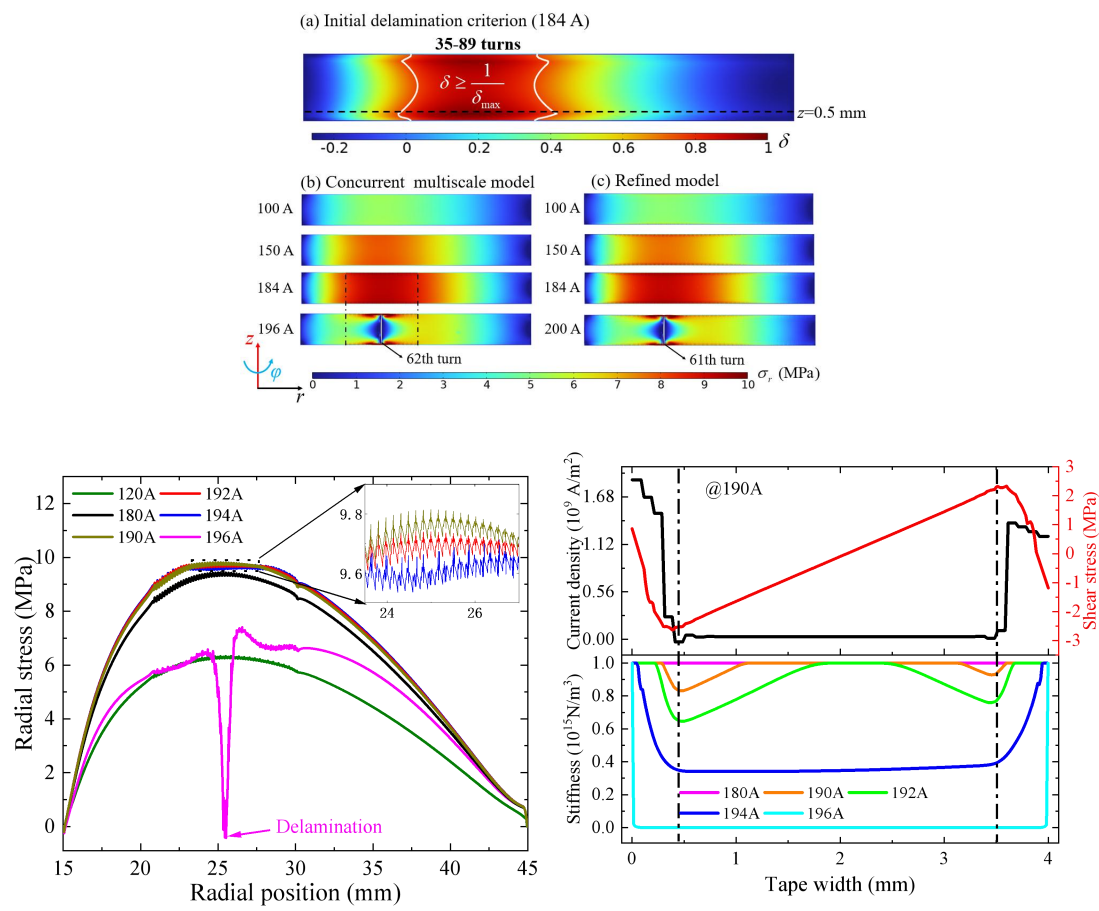


图 4 线圈在励磁过程中的界面分层行为及其应力分布与刚度退化趋势

8. 张兴义教授团队记录得到液氮环境下含缺陷 YBCO 超导带材失超时的气泡分布，并基于 H 法计算得到含损伤带材的全场温度分布。本工作设计了一种经济型观察氮气气泡的装置并有效地通过透视变换矫正了变形的图像，装置图见图 1。然后，建立了 YBCO 超导带材模型，计算得到了含损伤 YBCO 带材温度分布，见图 2。发现靠近 YBCO 层的 Cu 层首先受热，使其最适合观察该表面上的气泡分布。因此，在未来，直接检测铜层表面电流分的变化规律可以用来确定损伤的形状。同时，本研究考虑了氮气气泡对 YBCO 超导带材的加热和冷却速率的影响，并建议至少去除 YBCO 超导带材一个表面的氮气泡。（International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024,223:125283）

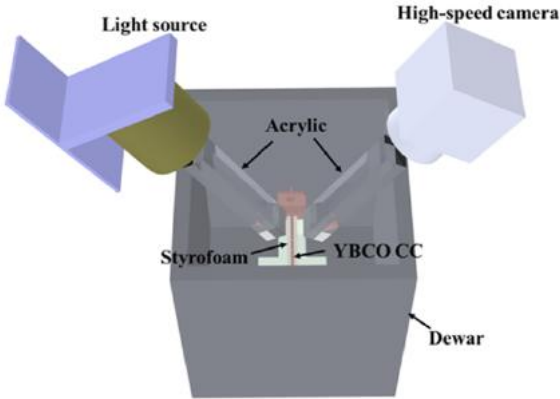


图 1 拍摄装置图

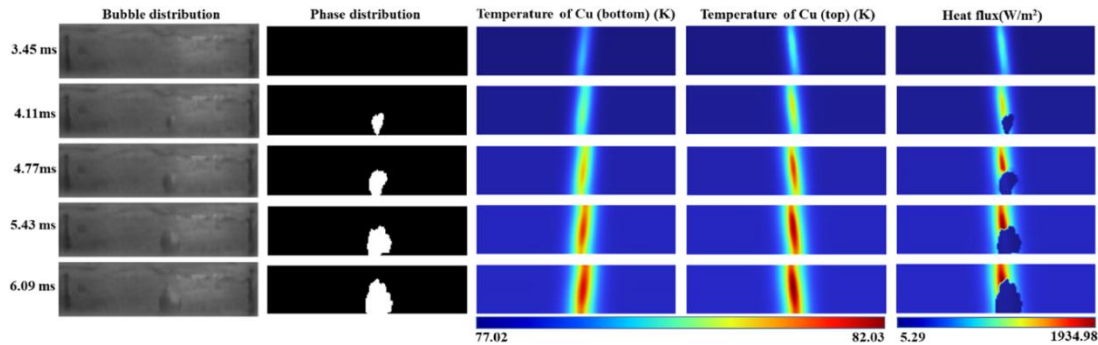


图 2 气泡分布及温度计算结果

9. 张兴义教授团队张亚军副教授开展介观超导材料中热梯度引起的临界电流退化研究。超导材料在实际应用中不可避免地受到局部区域温度突变的影响，伴随而来的热梯度可能对其性能产生不利影响。临界电流密度是影响超导体性能的关键因素。然而，热梯度对临界电流密度的影响尚未确定。基于含时金兹堡朗道方程，结合热传导方程，通过探索涡旋行为，发现热梯度显著改变了涡旋分布，并造成临界电流退化（见图 1）。系统地研究了临界电流密度的热梯度和磁场依赖性，并使其合理化（见图 2）。揭示了热梯度、外磁场、涡旋、磁化强度和临界电流密度之间的基本相互作用，为理解实际应用中介观超导材料的热致失超提供了理论基础。（Superconductor Science and Technology, 2024, 37(11): 115030.）

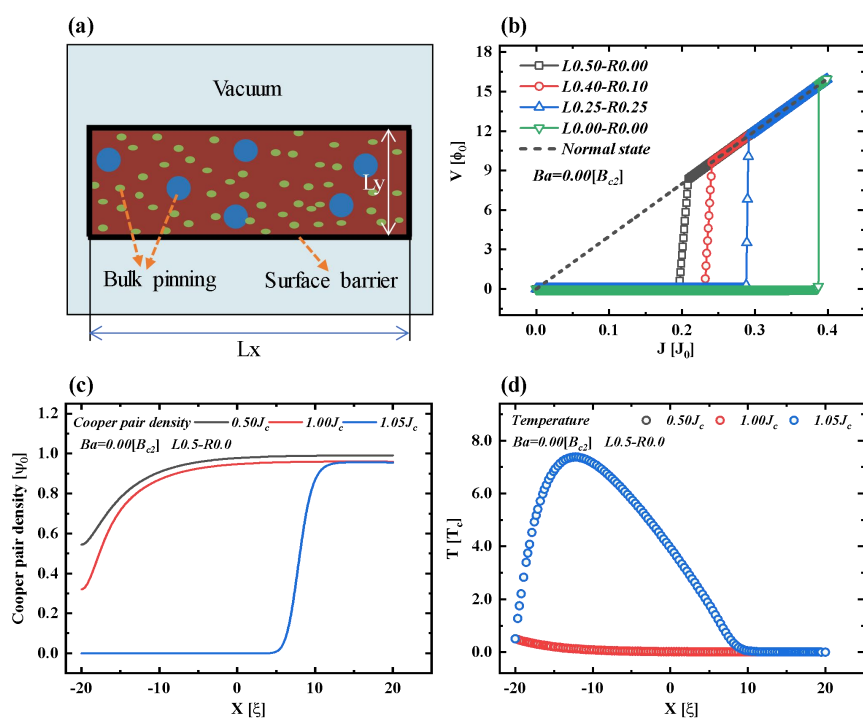


图 1 (a) 超导薄膜中的体钉扎和表面势垒示意图
(b) 不同的热梯度值，电压对电流密度的依赖性
(c) 库珀对密度和 (d) 温度随 x 坐标的变化趋势

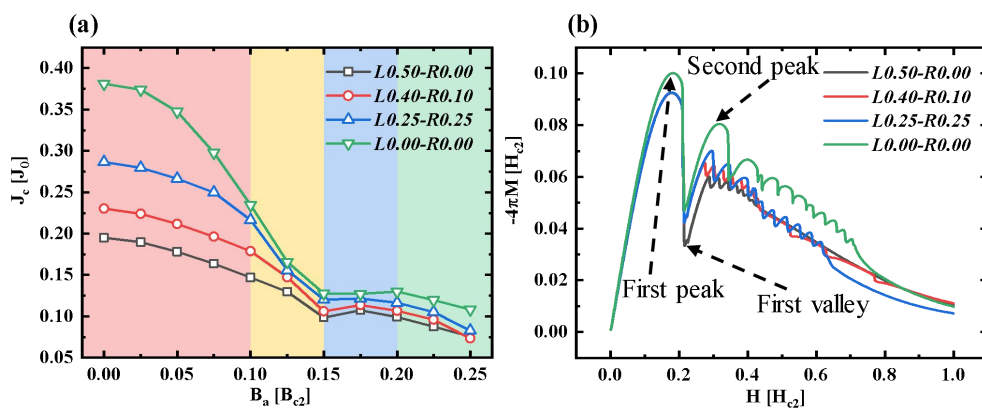


图 2 (a) 对于不同的热梯度值，临界电流密度随磁场的变化
(b) 磁化强度随外加磁场的变化

10. 张虎元教授团队开展混合型全尺寸缓冲砌块性能空间分布特征研究, 为高放废物地质处置缓冲屏障设计提供理论基础。膨润土-石英砂混合型砌块内部密度为 1.96-2.09g/cm³, 差异较小, 满足缓冲屏障设计密度要求。扇形砌块沿半径方向和角度方向的密度分布均匀, 大小无明显差异, 平均值均为 2.06g/cm³。相较于半径方向和角度方向, 扇形砌块沿着高度方向的密度偏小, 其平均值为 2.04g/cm³。砌块密度沿三个方向分布存在的差异性 (图 1), 主要是因为砌块竖向高压制备过程中, 黏土颗粒沿水平方向出现优势排列, 颗粒间孔隙沿竖直方向被压缩程度大于水平方向 (图 2)。砌块混合物料中石英砂颗粒边界创造的优先渗流通道, 决定了砌块的渗透性能, 掩盖了黏土颗粒各向异性排列对砌块渗透性能的影响。(Jianghong Zhu, Zhaoming Wang, Huyuan Zhang, Dongjin He. Density spatial distribution and anisotropy of full-scale bentonite-sand blocks. Construction and Building Materials, 2024, 438: 137230. SCI, 中科院一区 TOP, IF=7.4)

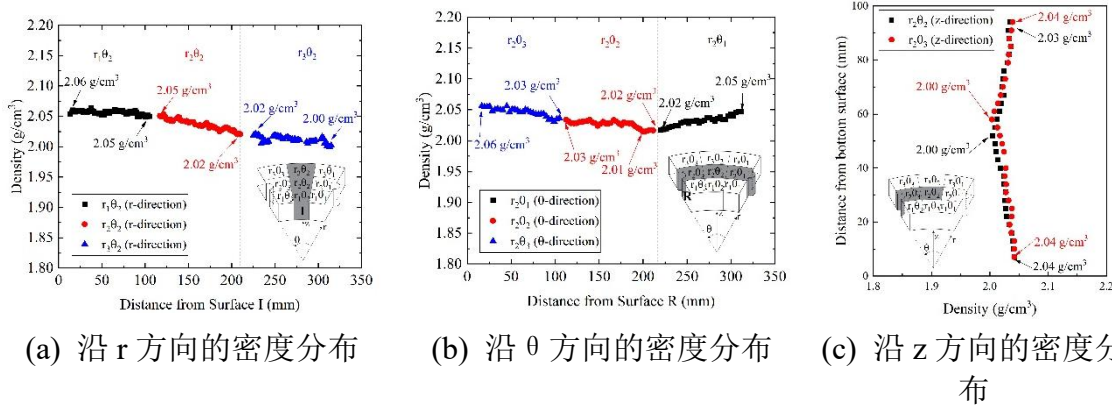


图 1 全尺寸砌块密度沿三个方向的分布

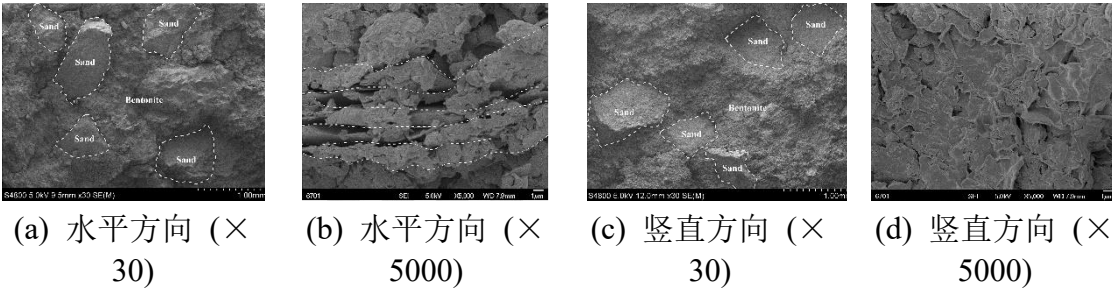


图 2 砌块不同方向扫描电镜图片

11. 谌文武教授团队结合工程地质学和地球化学的相关方法,系统研究库岸水环境化学特征及其对炳灵寺崖壁风化的影响。通过水化学测试、化学平衡计算等方法,从水的类型-时间-空间角度分析,得出窟区近三十年水化学类型与化学演化特征。利用改进的 TOPSIS 法 (EWM-TOPSIS) 和综合指数法综合评价了崖壁的表面风化情况,得出窟区崖壁风化程度特征。通过对钻孔、剖面、裂缝和崖壁的地球化学和矿物学特征分析,得出窟区砂砾岩风化过程中存在方解石、斜长石 (钙长石、钠长石) 和正长石 (钾长石) 的溶解和粘土矿物产生,特别是蒙脱石在碱性环境下的转化过程,揭示了中国西北地区天然碱性环境下矿物的风化机制。崖壁的粘土膨胀破坏、粉化、盐风化等典型的风化模式与受水库调控和地下水系统共同影响的水文季节性变化密切相关。本研究深入剖析了库岸水环境类型、时空特征及其对石窟的影响,加深了对中国西北半干旱、干旱地区库岸环境石质文物风化机制的认识,为石窟的科学保护和有效管理提供了坚实的理论基础 (Engineering Geology, 2024, 343: 107767; CATENA, 2024, 239: 107966)。

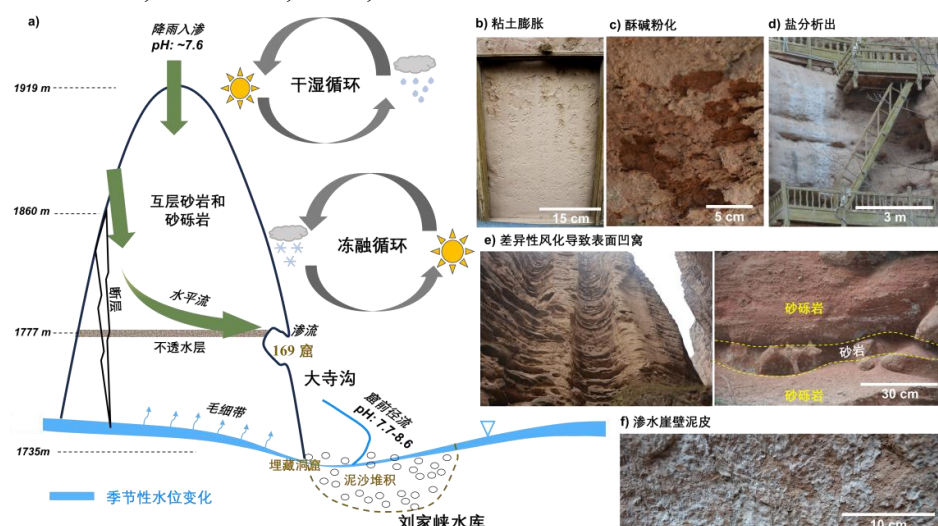


图 1 水环境影响下的石窟寺典型病害

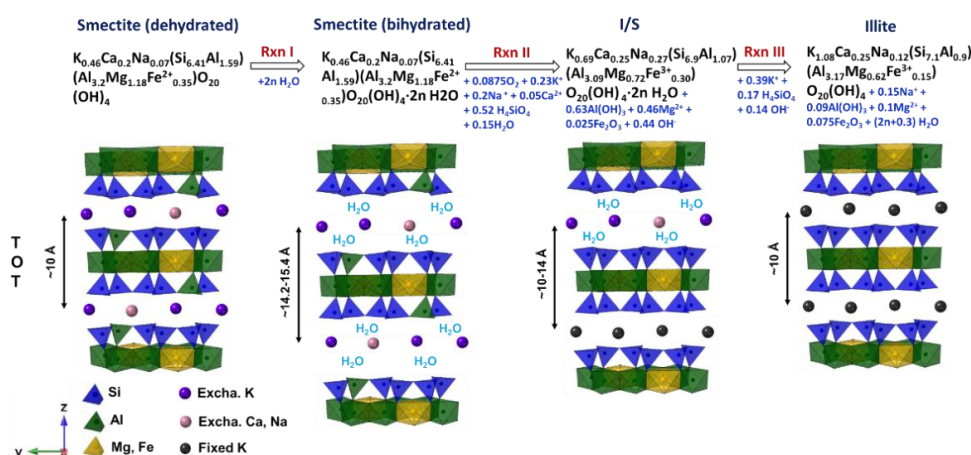


图 2 碱性环境下的蒙脱石转化机制

12. 高原文教授课题组博士生唐泽寰研究了拓扑-非互易主动超材料中静力学到动力学行为的演化。静态非互易在被动超材料中通过非线性已经得以实现，但这种非互易性对输入的幅值和结构的尺寸有着严格的限制。针对于此，我们构建了一种具有两个偏振分量（平移和旋转）的主动超材料，它使用主动控制模块以附加外力的方式打破了水平相互作用的互易性（见图 1）。由于空间对称性的破缺，非互易的水平相互作用在静态系统中直接导致了拓扑非平凡的不对称响应（见图 1），它对输入幅值，结构尺寸，甚至几何不对称性没有任何限制。将这种静力学行为演化到动力学行为后，矢量孤子的不对称传输和单向放大在这个系统中都可以被实现（见图 2）。我们的研究揭示了静态非互易到动态非互易的演化，同时非互易物理学和孤子科学之间架起了一座桥梁。（Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2024, 193, 105865）

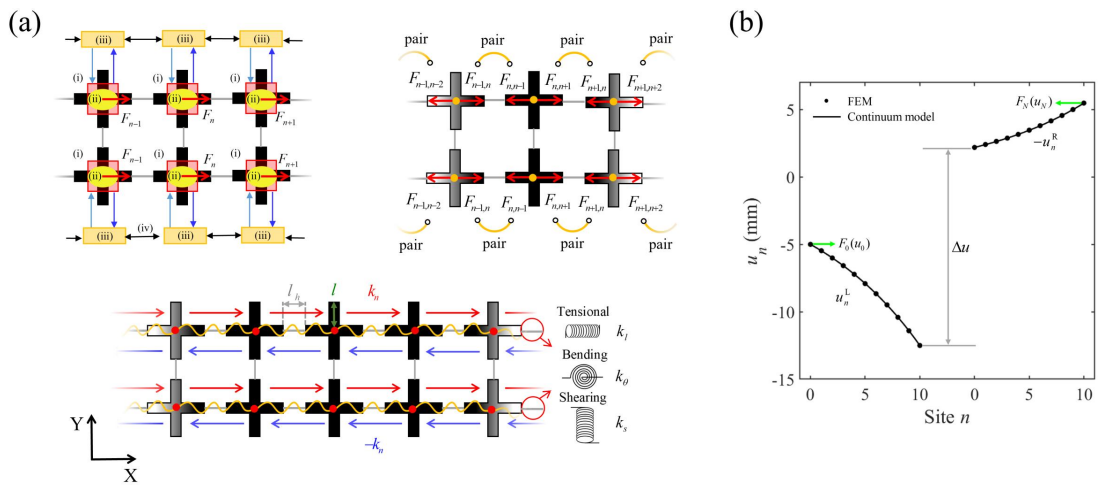


图 1 矢量主动超材料以及它的不对称响应

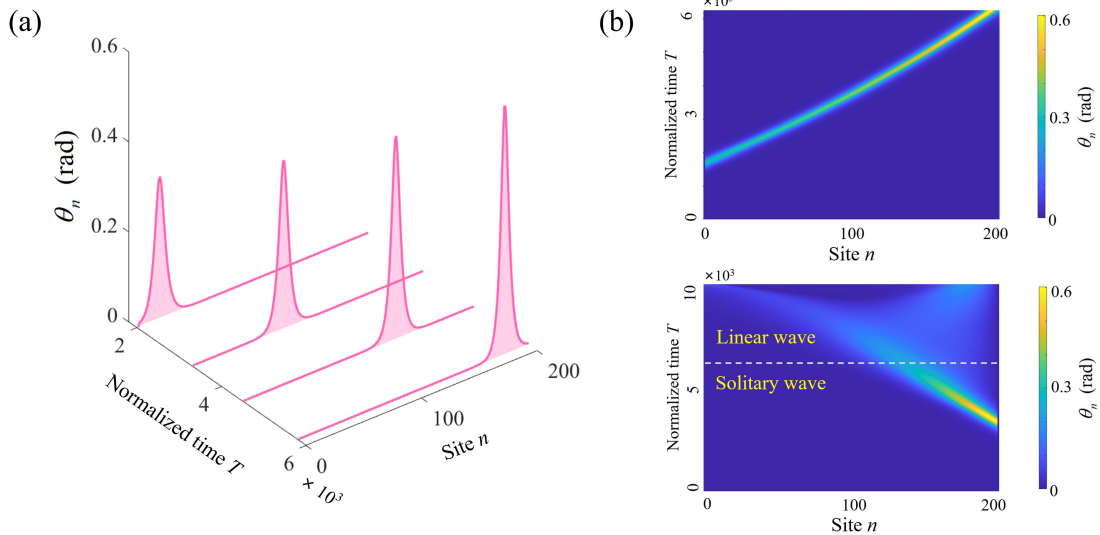


图 2 矢量孤子的单向放大和不对称传输

13. 张强强教授团队受牙釉质仿生微结构启发,提出了一种双组分陶瓷复合材料的同轴 3D 打印方法,解决了传统硅酸盐陶瓷复合材料脆性损伤不可预测、增韧强化困难等难题;这一新方法实现了具有仿生牙釉质仿生微结构硅酸盐-环氧复合材料 (BSEC) 的可控制备 (图 1)。该陶瓷复合材料基于其内部三维增强网络互穿结构 (图 2) 的有效创建,其内应力分布均匀、微裂纹扩展被有效阻断,因此其力学性能得到显著提高,其抗压强度、弯曲强度和弯曲韧性为本征脆性硅酸盐陶瓷的 0.5、2.1 和 47.5 倍 (图 3)。(Journal of Advanced Ceramics, 2024, 13(4): 403-412)

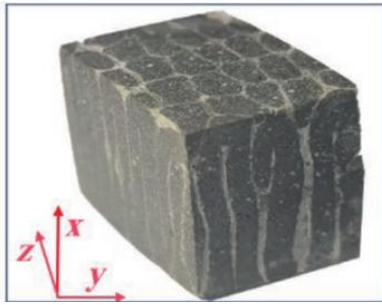


图 1 3D 打印 BSEC 样品的光学照片

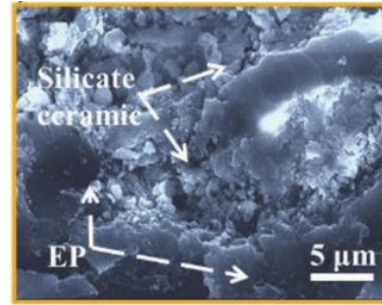


图 2 硅酸盐-环氧树脂界面互穿结构的微观形态

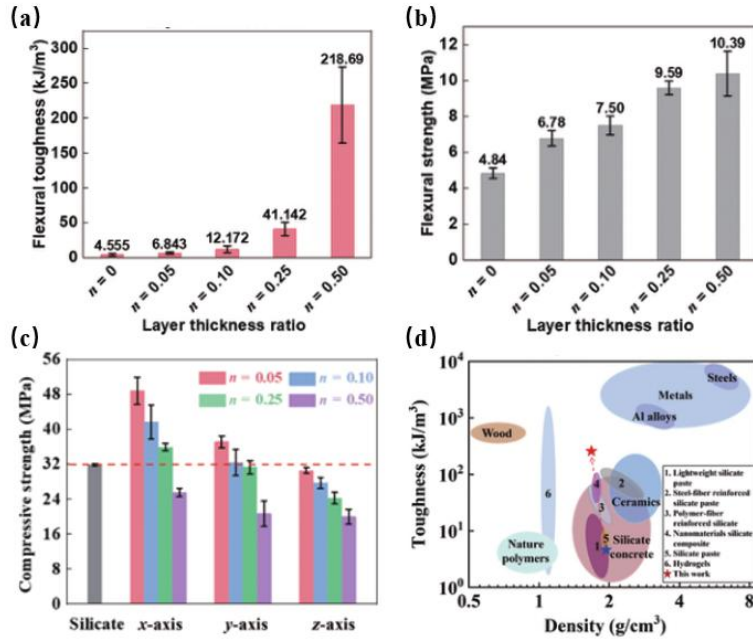
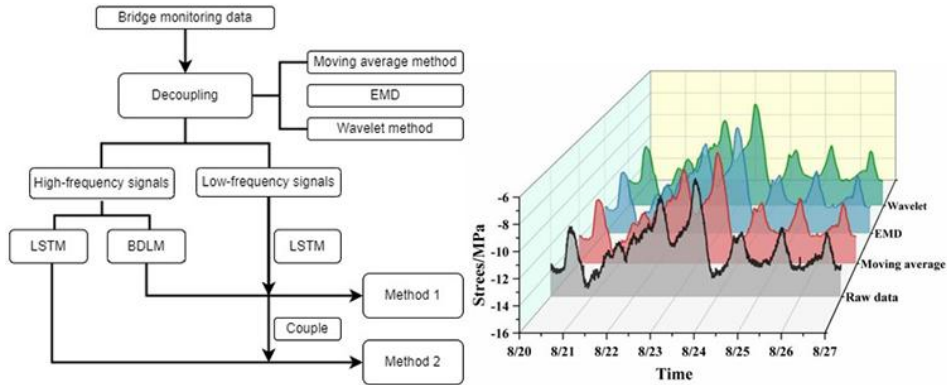


图 3 (a) BSEC 样品的弯曲强度的比较 (b) BSEC 样品的弯曲韧性的比较 (c) BSEC 样品的抗压强度的比较 (d) BSEC 与其他材料的韧性比较

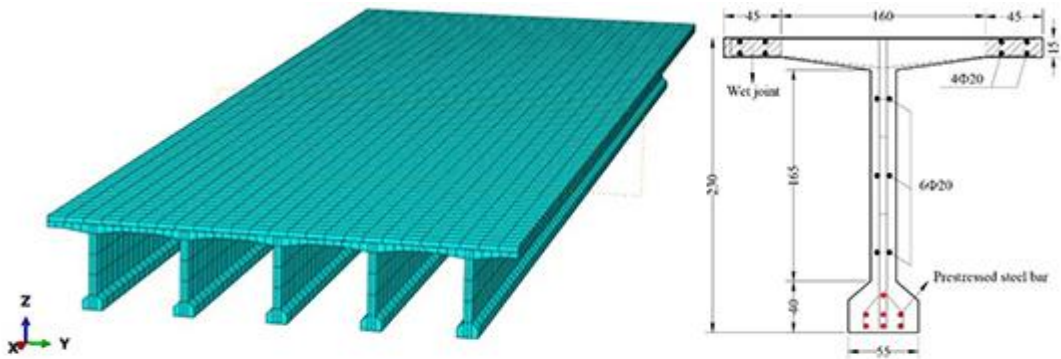
14. 樊学平和刘月飞副教授研究利用信息熵进行了在役桥梁动力响应的动态实时监测和高精度预测，并提出改进的桥梁结构健康管理策略，解决了传统预测方法高精度追踪误差较大的问题。成果应用于在役桥梁数据管理和预防性养护维修决策方面。成果发表于结构专业期刊《Structures》(Structures, 2024, 66:106849.)，被“工程进展”(Advances in Engineering, AIE)遴选为“卓越工程”有显著贡献的科学论文。



Prediction methodology flowchart is firstly proposed!

图 在役桥梁耦合动力响应的高精度监控和预测流程

15. 樊学平和刘月飞副教授考虑在役预应力混凝土梁桥的随机车载流、混凝土收缩、徐变以及结构抗力退化等因素，结合首次超越概率法，建立了兼顾安全性和适用性的在役桥梁时变可靠度分析方法，得到了车载均值参数以及收缩徐变对桥梁可靠度的影响规律。为在役预应力混凝土梁桥的可靠性精细化预测和评估提供了高精度方法，解决了在役桥梁服役信息动态融合的问题。成果发表于结构专业期刊《Structures》(Structures, 2024, 64, 106515.)，被“工程进展”(Advances in Engineering, AIE)遴选为“卓越工程”有显著贡献的科学论文。



Detailed Dynamic serviceability and safety reliability analysis method of aging PC girder bridges considering concrete shrinkage, creep and stochastic vehicle load flows, is proposed!

图 考虑混凝土收缩徐变和随机车载流的老化预应力混凝土梁桥精细化动态适用性和安全性的可靠度分析方法