

代表性成果

- 郑晓静院士团队刘洪佑教授等在《Journal of Fluid Mechanics》上发表论文，揭示了湍流和颗粒两相结构在沙尘暴全过程中的演化规律。研究基于青土湖观测阵列（QLOA）的高频多点多物理场同步观测数据，首次系统揭示了沙尘暴全过程中湍流与沙尘浓度两相结构的演化规律。沙尘暴过程可分为风速上升、平稳和下降三个阶段。研究发现，沙尘暴中存在与湍流结构类似的大尺度沙尘浓度结构；两者在平稳阶段表现出自相似性，而在非平稳阶段则不具备该特性。湍流结构在沙尘暴初期即已存在，随风速增强与剪切作用加剧，其尺度逐渐减小并趋于稳定。相比之下，沙尘结构在初始阶段几乎不显现，随沙尘暴发展而逐渐形成，其尺度和倾角在平稳阶段达到峰值，且在近地面大于湍流结构；至消亡阶段，沙尘结构衰减更为迅速。研究进一步表明，湍流结构尺度随高度增加而增大，而沙尘结构尺度则随高度增加而减小，这是由于高处沙尘浓度较低，难以维持大尺度结构的相干性所致。此外，沙尘颗粒对湍流的跟随能力随粒径减小而增强，导致两相结构在高处的差异相应减小。该研究深化了对沙尘暴微观湍流机制与宏观天气现象间关联的认识，为构建更精确的沙尘暴数值模型提供了重要依据。(Yanxiong Shi, Hongyou Liu*, Xiaojing Zheng. Evolution of two-phase structures during the entire sandstorm process. Journal of Fluid Mechanics, 2025, 1007: A16.)

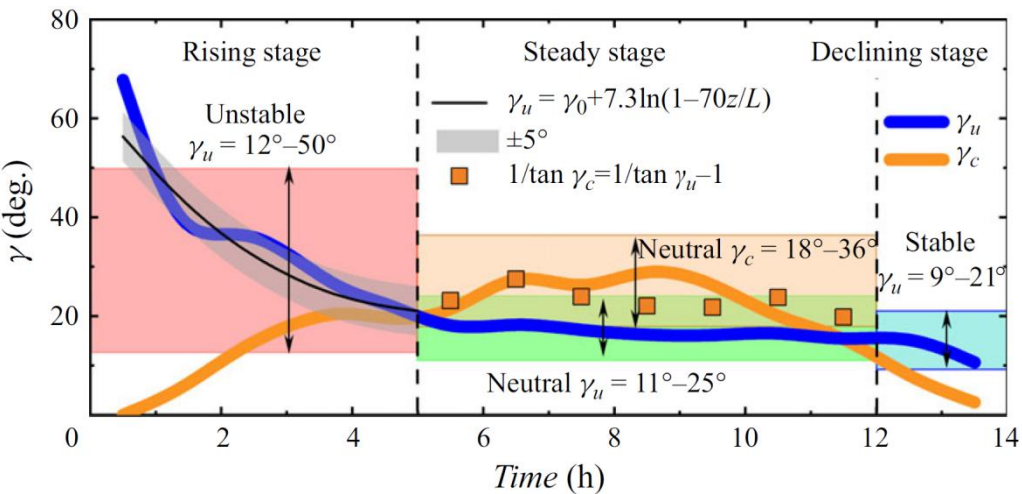


图 沙尘暴过程中湍流结构及沙尘暴结构的倾斜角度随时间的演化规律

● 郑晓静院士团队刘洪佑教授等在《Journal of Fluid Mechanics》上发表论文，在同时考虑调制时间差及其尺度效应的前提下建立了大气表面层风场预测模型。研究对近壁湍流预测模型中的非线性调制项进行了系统性改进，重点解决了现有模型在极高雷诺数下未能同步考虑幅值调制多尺度效应与时间偏移的问题。基于青土湖观测阵列（QLOA）在大气表面层获取的高雷诺数高质量流场数据，对经典 MMH 模型及其后续改进版本开展了深入分析与优化。研究表明，非线性项在提取普适信号与预测高阶统计量中具有关键作用，其准确性直接决定了模型能否有效再现湍流能量的时间分布与幅值调制效应。通过分析不同“足迹”事件下普适信号的条件统计特性发现，若不能准确识别参与调制的主导尺度并考虑调制过程中的时间异步性，所提取的普适信号将残留大尺度信息，从而导致预测偏差。为此，本文提出一种双重耦合改进方案，在量化幅值调制系数及解调过程中，同步引入多尺度筛选与时间偏移修正。结果表明，改进后的幅值调制系数显著高于传统方法，尤其在对数区上部发现了强度较大的振幅调制“重启”现象，揭示了该区域以往被忽视的显著尺度间相互作用。改进模型能够更精确地提取普适信号，其非线性项参数（最优截止波长与时间偏移）与基于幅值调制系数分析所得参数高度一致，为该模型拓展至其他复杂流动奠定了基础。经验证，该改进模型在能谱重构与高达五阶矩的统计量预测中均表现优异，显著提升了在极高雷诺数条件下的预测精度与可靠性。该研究为深入理解壁湍流中的尺度相互作用及发展高精度预测模型提供了重要依据。（Wansong Xiao, Hongyou Liu*, Refinements in the nonlinear term of a turbulence predictive model based on atmospheric surface layer observations, Journal of Fluid Mechanics, 2025, 1011: A25.）

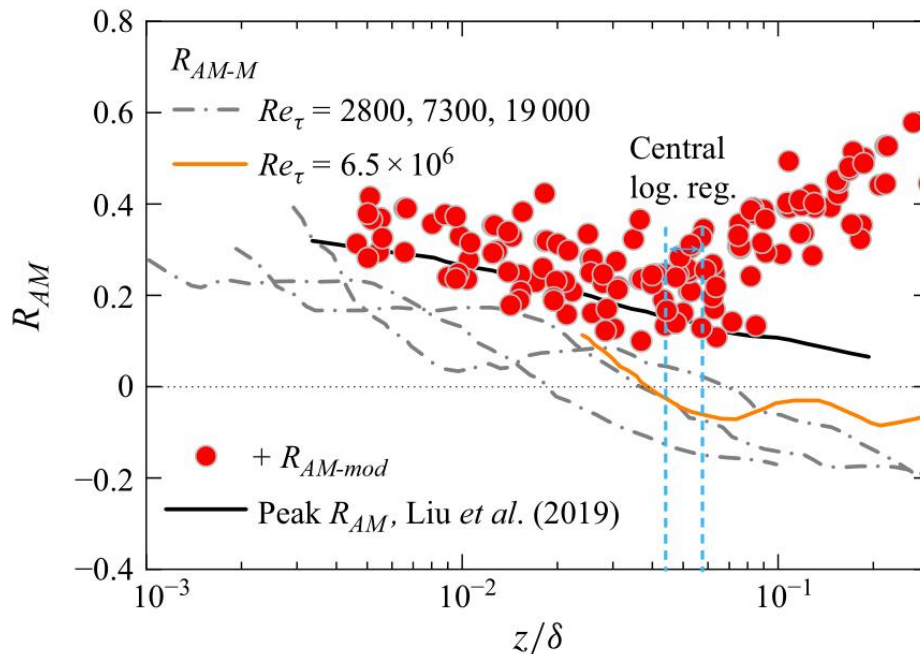
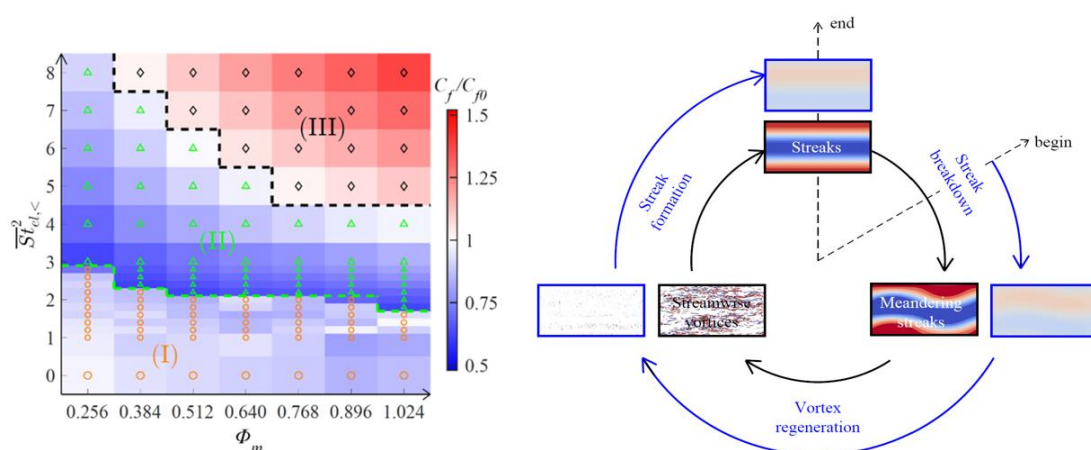


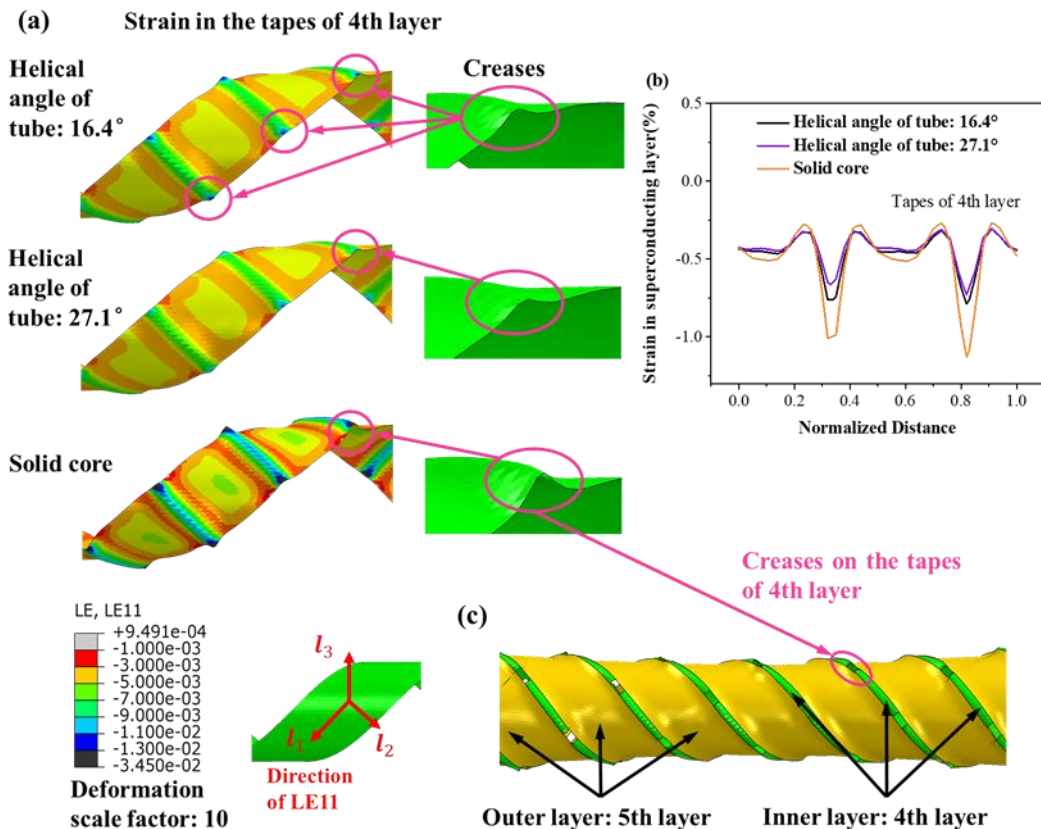
图. 同时考虑时间偏移和尺度效应得到的最大幅值调制系数随高度的变化

● 郑晓静院士团队张欢教授揭示带电颗粒槽道流的三种流态，再层流化源于自 streak breakdown 开始的自维持循环依次破坏，阻力非单调源于雷诺和颗粒应力相反趋势。通过对 119 组含颗粒槽道湍流的直接数值模拟，我们揭示了电效应能够触发湍流再层流化，并显著改变壁面阻力的突出能力。研究发现，湍流向层流的转变伴随着流体相与颗粒相统计特性的剧烈突变。随着电效应增强，平均流向速度和局部颗粒质量负载的壁法向分布在湍流与层流状态中呈现相反趋势，这源于湍泳效应与静电漂移之间的竞争。我们识别出由电效应诱导的三类不同流动状态：阻力降低的湍流态、阻力降低的层流态，以及阻力增强的层流态。再层流化被证明源于近壁自维持循环中条带崩解过程的完全抑制，并进一步抑制循环中的其他子过程。在湍流状态中，增强的电效应会使雷诺应力与颗粒应力对总阻力产生方向相反的贡献，从而导致阻力随电效应呈现非单调变化。而在层流状态下，由于雷诺应力消失，颗粒诱导应力占据主导地位，使得阻力系数随电效应单调增加。(Cui, Y., Tan, X., Zhang, H.*, & Zheng, X. (2025). Electrically driven relaminarisation of particle-laden turbulent channel flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 1025, A53.)

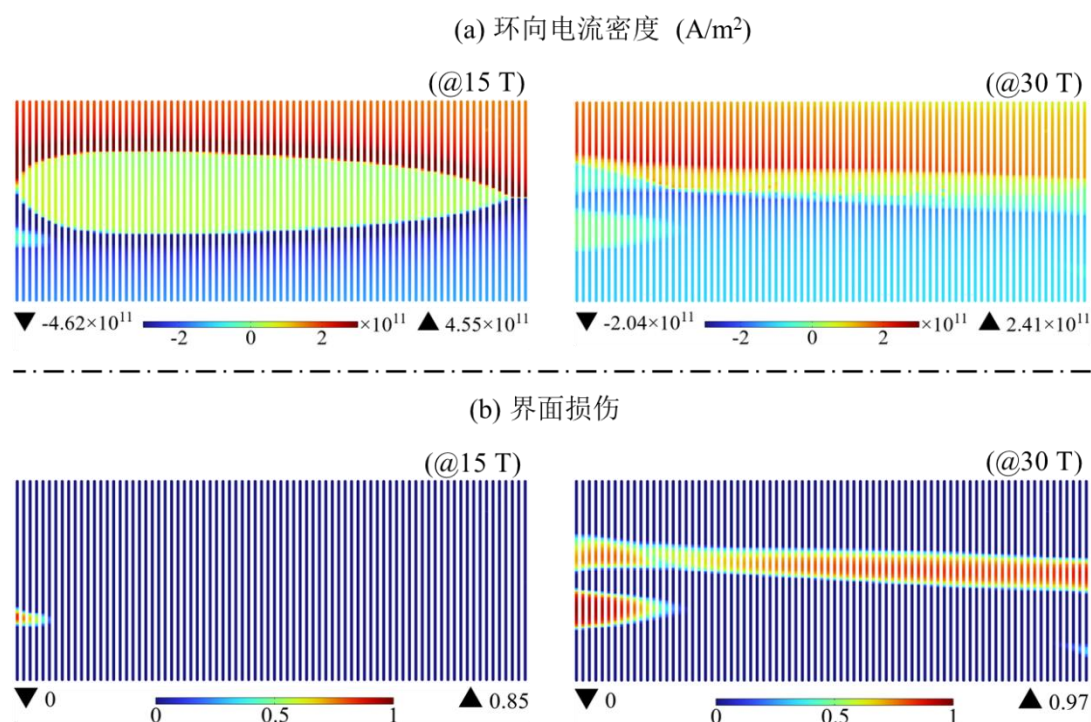


随颗粒体积分数和电 Stokes 数变化的含颗粒槽道流相图（左）和电效应引起的再层流化机制示意图（右）

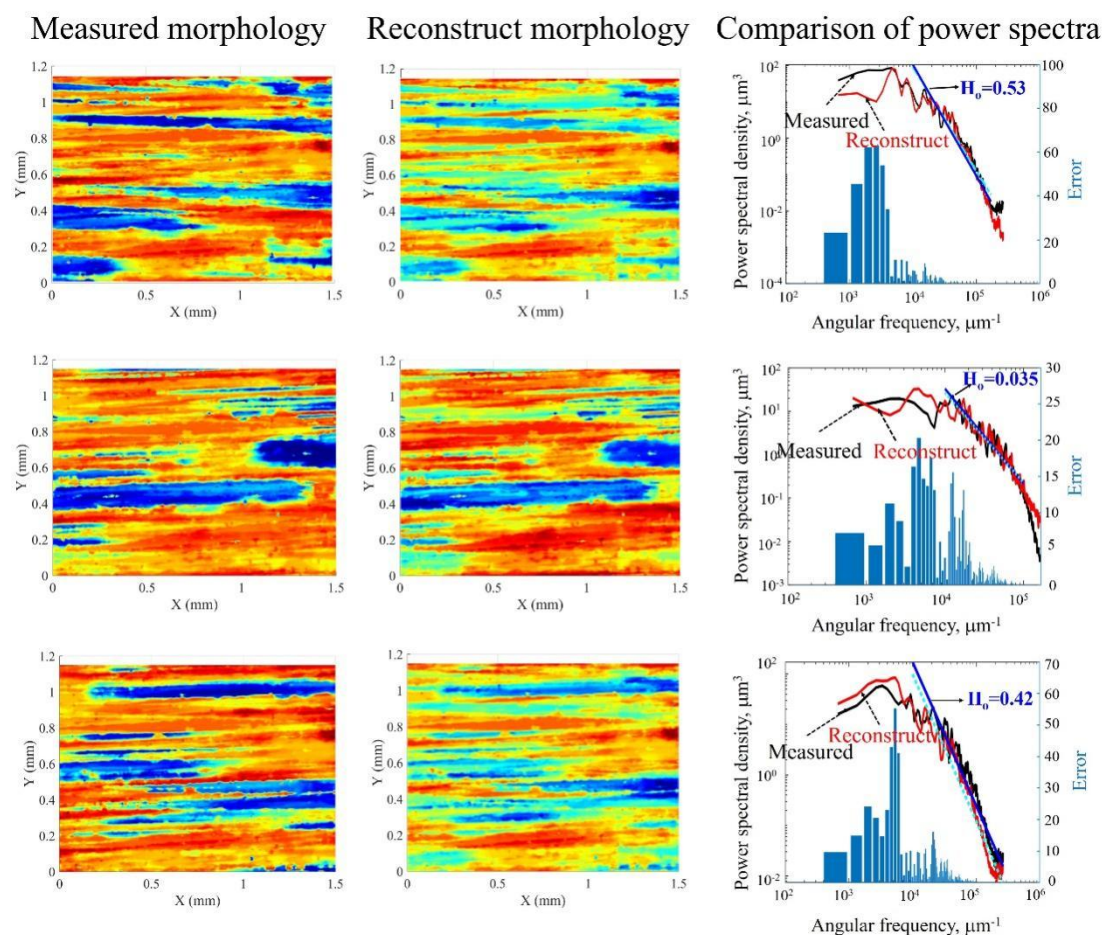
● 周又和院士团队雍华东教授研究了含螺旋缆芯高温超导 CORC 电缆的力学特性, 揭示了缆芯结构对超导带材变形模式及变形程度的影响。由 REBCO 带材经螺旋缠绕工艺制成的 CORC 电缆 (Conductor on round core), 凭借优异的力学性能与载流特性, 在高场磁体制备领域具有广阔的应用前景。近年来, 为进一步提高电缆的柔韧性, 研究人员开发出一种新型 HFRC (Highly flexible REBCO cable) 电缆。该电缆采用螺旋管结构替代传统实心缆芯, 超导带材沿螺旋管表面逐层缠绕成型。相较于实心缆芯, 螺旋管在承受外部载荷时更易产生复杂变形, 导致超导带材的力学行为难以预测。针对这一问题, 本研究团队首先构建螺旋管在扭转与伸载荷作用下的简化理论模型, 提出了计算缆芯半径变化的理论公式。通过深入分析螺旋管与带材间的几何关系, 实现了对带材变形趋势的有效预测。其次, 本团队分别建立了 HFRC 电缆与传统 CORC 电缆的有限元模型, 并通过实验验证了模型的可靠性。基于模拟计算结果, 进一步分析了超导带材的应变分布及局部褶皱现象随缆芯设计参数的变化规律。研究表明, 在扭转载荷作用下, 缆芯半径的改变对带材褶皱与拉应变的影响呈现相反趋势; 而在拉伸载荷下, 增大缆芯螺旋角可显著减小带材的拉应变。(Tang S. Y., Peng E. Z., Li Y. H., et al. Mechanical behavior of HTS tapes in highly flexible REBCO cable under torsional and tensile loads. Superconductor Science and Technology, 2025, 38(2): 025015.)



● 周又和院士团队刘东辉副教授研究了极高场下高温超导线圈中屏蔽电流对其结构弹塑性变形的影响，揭示了超导带材层间剪切破坏导致线圈力电退化及失效的机理。在高温超导磁体中屏蔽电流不仅会造成其磁场的测试值低于设计值，而且也会造成结构变形引起力电性能的退化及失效。目前，屏蔽电流相关联的力学难题已成为了限制极高场高温超导磁体发展的瓶颈问题。本研究团队建立了极高场高温超导内插线圈精细化的电磁力耦合模型。数值模型得到了实验数据的验证，发现了屏蔽电流造成线圈的弯曲变形，进而导致线圈中间区域发生损伤，并且高温超导带材层间剪切应力主导了线圈的界面破坏。在高背景磁场下，高温超导线圈载流性能的退化主要是由损伤引起的。尽管超导层和哈氏合金基底的最大环向应力超过了 1GPa，但是铜稳定层和银包裹层的最大环向应力均低于 400MPa，这些结果无法通过其他团队采用的均匀化模型所捕获。结果也表明塑性变形主要发生在线圈的上部分和中间部分，这是由于这些区域受到较大的环向应力和轴向应力。此外，该研究也揭示了先前工作减少线圈内带材和不锈钢之间接触数量的简化模型会低估线圈的结构变形和损伤程度。数值结果也建议增加共绕不锈钢带的厚度能有效抑制极高场下高温超导内插线圈的结构变形。（Liu D. H.*, Zhang Z. H., Chang Z. X., et al. Elastoplastic deformation and damage of REBCO insert coils induced by screening currents in ultra-high fields. *Superconductor Science and Technology*, 2025, 38(12): 125017.）



● 周又和院士团队他吴睿教授研究了不透明粗糙界面在摩擦过程中的形貌预测重构，揭示了摩擦力演化与粗糙表面形貌取向演变之间的关联机制。现有研究针对不透明粗糙界面在摩擦过程中的形貌难以实时观测。因此，本研究团队开展了不锈钢与铸铁粗糙界面的摩擦实验，采用形貌特征取向这一统计量表征了动界面形貌演化过程，并结合计算机视觉识别算法揭示出摩擦过程界面形貌特征取向的变化规律，进而提出动界面形貌演化重构的内插因子时变函数，实现了不透明界面微观形貌特征量的在线提取。在此基础上，构建了摩擦力-形貌取向模型并结合弹簧-质量块动力学模型，给出了基于摩擦力变化重构、预测任意时刻界面形貌分布特征方法，而不受限于是否可对形貌进行直接观测的条件限制。演化重构结果被实验验证有效，重构界面与实测界面形貌相似度 $> 95\%$ ，为界面性能有效评估预测提供了新方法。（Zhao H., Huang D.-F., Ta W.-R., Zhou Y.-H.. Reconstruction and prediction of opaque rough surface morphology based on friction force evolution, Tribology International, 2025, 206: 110599）



● 王省哲教授团队基于分布式光纤测量方法，建立了极低温（77K）下 ReBCO 高温超导带材的高周疲劳测试新方法。针对极端低温环境下超导结构疲劳特性测试方法稀缺，以及常规胶粘光纤容易失效的问题，提出了面向 ReBCO 高温超导带材的高周疲劳测试新方法。该方法采用直接焊接工艺将研制的铜覆层增强型光纤集成于带材表面，有效避免了传统使用低温胶粘接方式导致的热失配和界面开裂，实现光纤在超过 5 万次循环载荷下的稳定存活和可靠测量。并且分布式光纤信号可实时表征疲劳损伤程度及断裂位置，为超导带材剩余寿命预测提供高空间分辨率的全场基础数据。此外，采用焊接方法能够缩短光纤集成时间，提高生产效率，特别适合长线化超导线材或卷材的工业生产，对后续解决 ReBCO 高温超导材料失超、力学损伤检测等瓶颈性问题及工程化保护和大规模应用光纤具有重要的科学意义与应用前景。（Zhang P, Wang X, Guan M, et al. Monitoring fatigue failure in REBCO coated conductors at cryogenic temperatures using advanced optical fiber sensors[J]. Superconductor Science and Technology, 2025, 38(1):015028.）

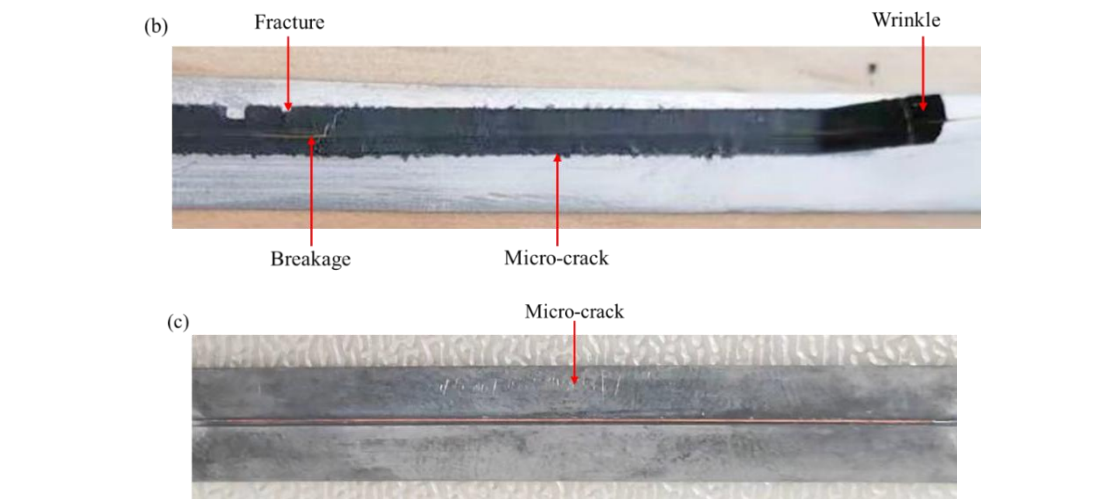


图. 低温下（77K）胶粘和焊接 DOFS 疲劳测试结果对比：（a）胶粘、焊接 DOFS 测量频率漂移信号；（b）10000 次循环后胶粘 DOFS 实物图；（c）30000 次循环后焊接 DOFS 的实物图

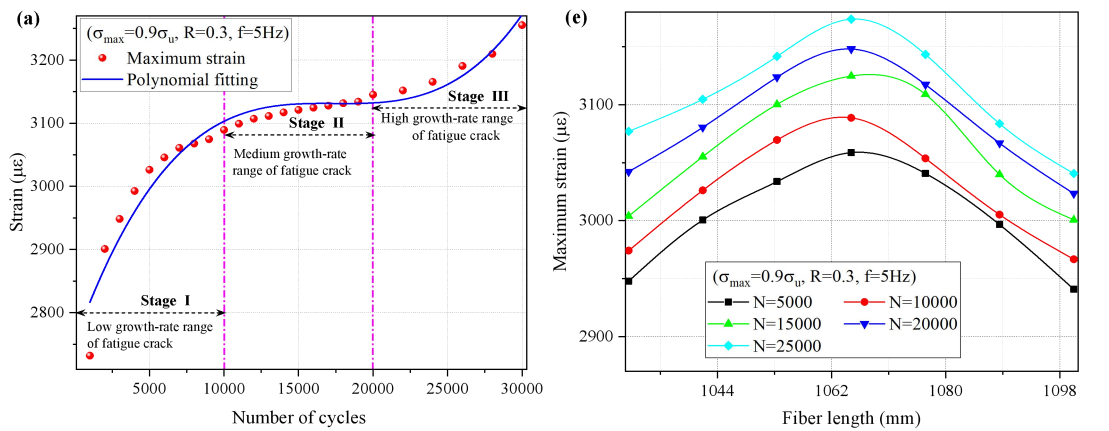
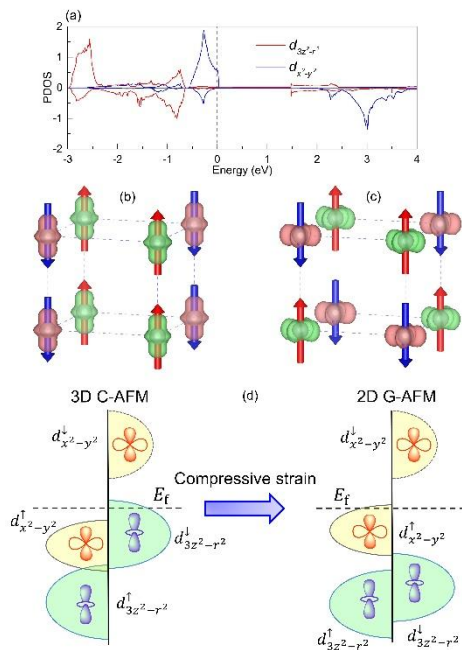
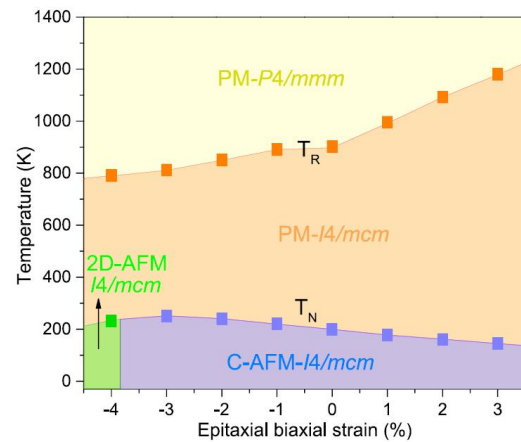


图. ReBCO 超导带材疲劳测试结果：（a）最大应力幅 $0.9\sigma_u$ 下 DOFS 所测最大应变与循环次数间关系；（e）最大应力 $0.9\sigma_u$ 下沿长度方向的最大应变；

● 张兴义教授团队张亚君副教授系统研究了应变工程对镍基超导材料电子结构和磁性的调控机制，揭示了压应变诱导磁性从三维向二维类铜酸盐特征的转变，并阐明了其中的调控规律与微观机理。镍基超导材料是极具潜力的新型超导体系，但其固有的三维磁序和不同于铜酸盐超导体的电子结构，被认为是限制其超导性能提升的关键因素。因此，如何通过外部调控使镍基材料具备类似铜酸盐的二维磁性与电子特征，是本领域的重要科学问题。本团队通过第一性原理计算与多尺度模拟，系统阐明了双轴应变对镍基材料中晶格、电子与磁序的协同调控规律。研究发现，双轴压应变能够有效重构费米面附近的电子结构，促使电子态从不利于超导的、以层间耦合为主导的轨道构型，转变为与铜酸盐高度相似的、以面内电子态为主导的构型。同时，应变显著抑制了层间磁耦合，使材料从三维反铁磁态转变为二维反铁磁态，其磁性维度和关联特性均与铜酸盐超导体高度相似。该工作首次建立了镍基超导的完整应变-温度-磁序相图，不仅从理论上揭示了应变工程诱导类铜酸盐超导态的物理机制，也为实验上通过薄膜应变工程优化镍基超导性能提供了理论指导。（Zhang Y.-J., He X., Yong H.-D., Wang J., Zhang X.-Y., Ghosez P. Electronic and magnetic transitions in infinite-layer nickelates by strain-orbital engineering. *Physical Review B*, 2025, 111: 045133）

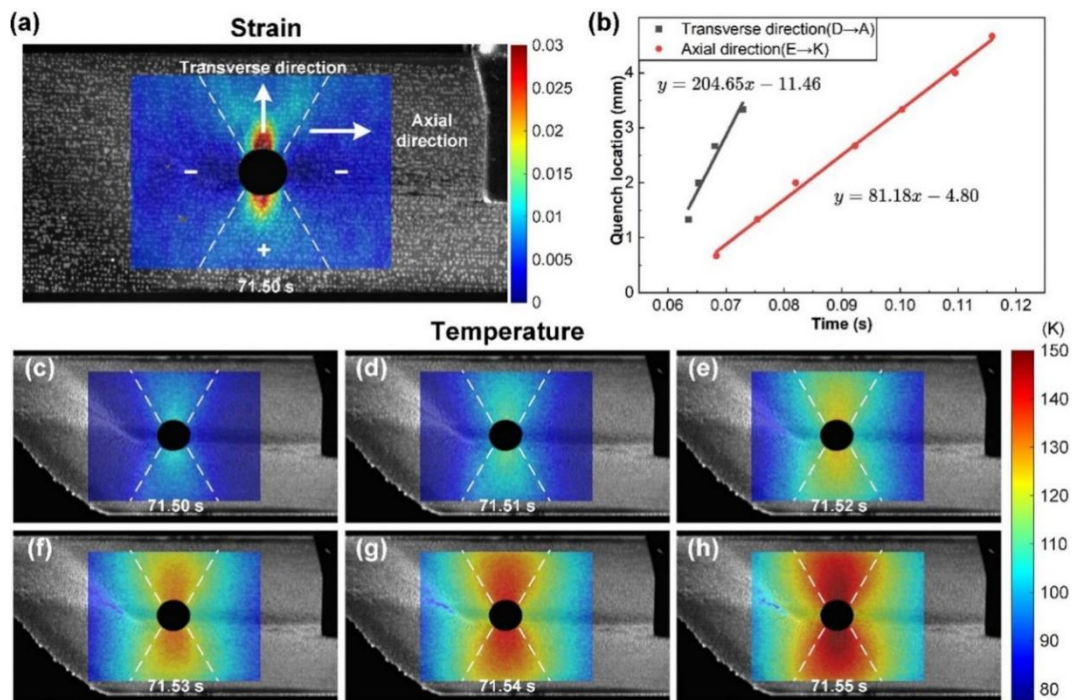


应变工程对磁序和电子结构的调控

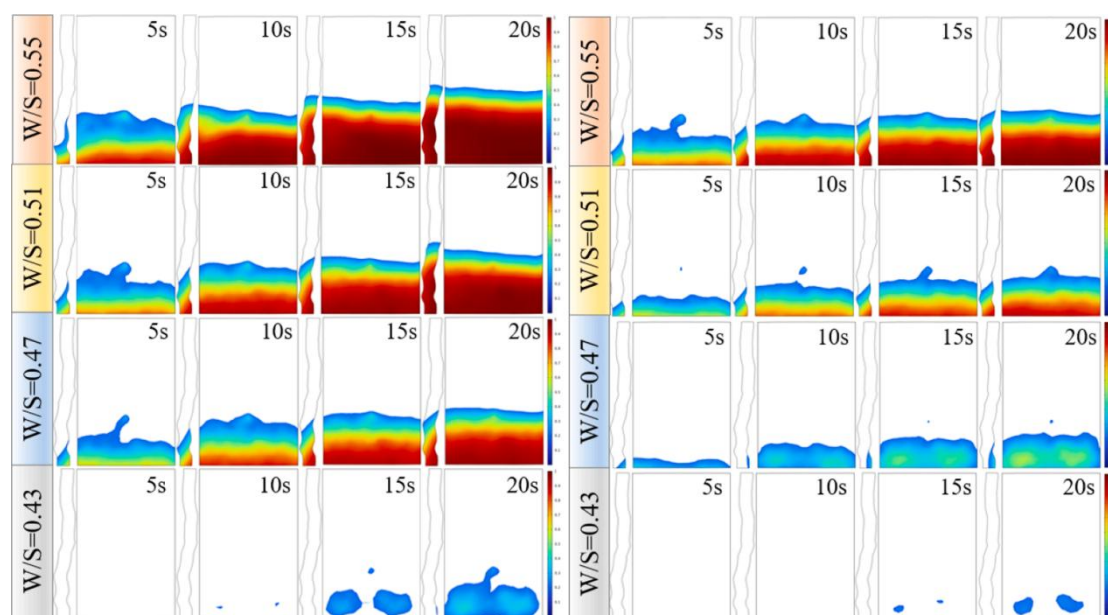


应变-温度-磁序相图

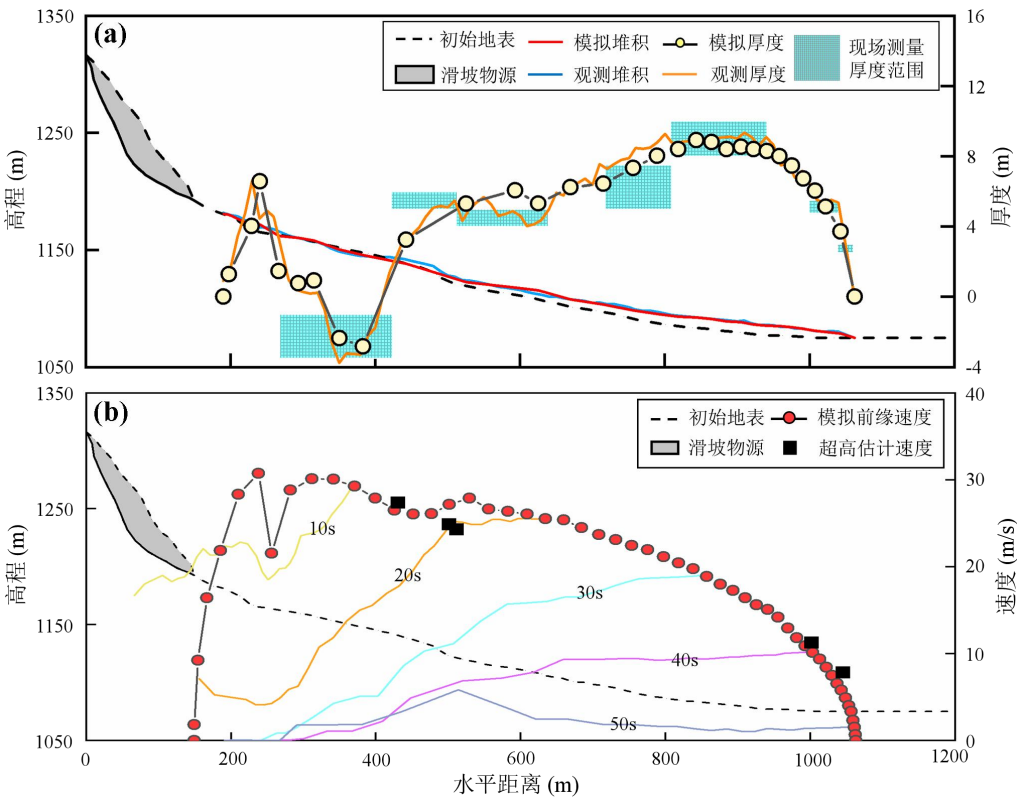
● 张兴义教授团队李毅豪博士后研究了二代高温超导带材载流拉伸失超传播过程中的力-热同步演化规律。针对超导材料极端服役环境下的多场测量难题，提出采用单个彩色相机的不同通道实现变形场与温度场同步测量新原理，发展了一种数字图像相关辅助的荧光测温（DIC-aided FT）方法，不仅可以在极低温下实现非接触全场测温，还可以显著降低传统荧光测温法中普遍存在的由被测物体变形所引起的误差。给出了超导带材在 77 K 载流条件下的单轴拉伸导致失超全过程的全场变形-温度分布特征，缺陷附近的应变集中会降低材料载流能力，导致该区域产生初始温升，进而在力-电-磁-热多场耦合效应作用下诱发失超传播；失超传播路径与局部应变分布密切相关——其优先发生于高应变区域，且传播速度显著高于低应变区域（加速可达 2.5 倍）。该发现揭示了局部应变对失超传播的诱导和加速作用，为超导应用中的基础失超行为机制提供了关键实验依据。（Li Y.-H., Deng J.-H., Mu N.-N., Zhou J., Zhang X.-Y.*. In-Situ Synchronous Measurement of Deformation and Temperature During Quenching of HTS CC Via Digital Image Correlation-Aided Fluorescent Thermometry. *Superconductor Science and Technology*, 2025, 38: 035018）



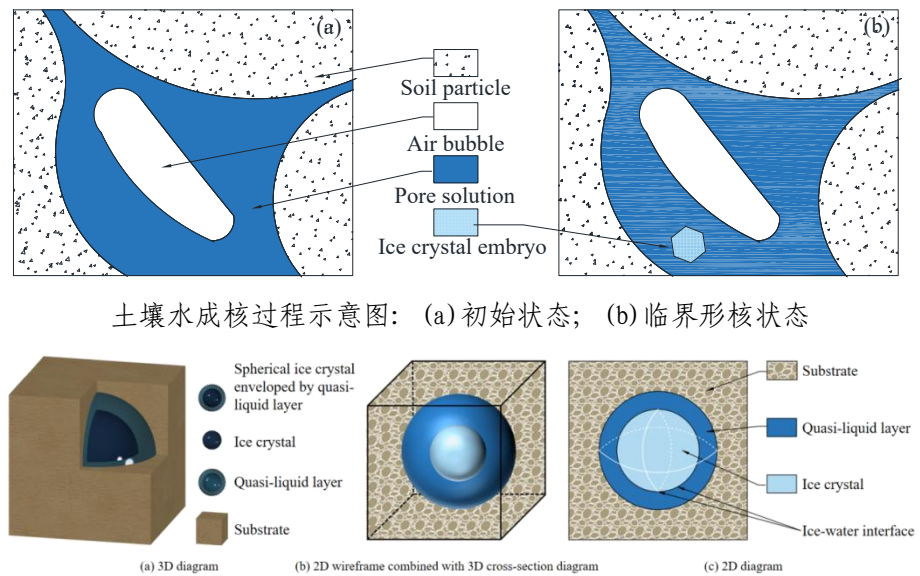
● 张景科教授团队李威昊博士系统性研究了注入土遗址裂隙的浆液随时间变化的粘度特性，揭示了瞬态粘性行为对注浆性能和效率的重大影响。现有土遗址注浆研究主要聚焦于浆液特性的表征，对浆液在现实条件下的工作性能关注较少。针对遗址土体快速吸水导致浆液快速失水严重影响浆液流动度和注入效率，系统研究了不同配比土遗址裂隙注浆浆液随时间变化的粘度特性、流动性和流变性质，设计了一个遗址土体-浆液作用物理实验模型以捕捉短期水分流失行为，并推导出了时间依赖的粘度函数，最后应用 COMSOL 两相流模型模拟了土遗址裂隙注浆过程。结果显示，遗址土迅速从浆液中吸收水分，导致粘度在接触 0.5 秒内呈指数级增长至 $30 - 35 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，几乎消除了其自由流动性。构建的粘度函数能够预测在定义边界条件下的粘度变化和流动性。(Li W.-H, Zhang J.-K.*, Zhang L.-X, et al. Experimental study on the time-dependent viscosity characteristics of slurry for crack restoration of earthen sites, Construction and Building Materials, 2025, 493: 143182)



● 张帆宇教授团队基于材料特征等效、力学行为差异、性质参数继承的思路，发展了一个输入参数可测试、输出结果可评价的地球物理流灾害滑块混合物模型。地球物理流不但是地球和行星上重要的表面过程与景观类型，还是地球上最频繁和最危险的自然灾害。围绕地球物理流具有材料组成多相与行为动态多变的特点，从而存在材料异质性、行为差异性、性质继承性的分层界面。本研究通过发展的连续介质力学的滑块混合物模型，基于材料特征等效、力学行为差异、性质参数继承的思路，耦合变形、孔压、夹带等效应对滑移特征的影响，验证了溃坝水流解析解，铝棒颗粒崩塌与饱和固液两相流物理模型试验，应用到一个黄土流滑夹带事件中。模拟结果显示，发展模型很好地再现了强不连续水流的运动、连续无粘聚力颗粒崩塌的堆积、饱和固液两相流沿沟槽运动的过程、流动型黄土滑坡夹带放大的滑移，实现了堆积厚度、运动距离、运动速度、达到时间与位置等移动特征参数的准确捕获。发展模型准确性高、稳定性强，实现了对发生与潜在地质灾害事件的反演分析与正演预测，图形用户界面软件为滑坡等地球物理流的动力过程分析与灾害风险评价提供有用工具。（Zhang, F. *, Peng, J., Zhao, Y., Chen, K., He, Q., 2025. A homogenized sliding-block model for landslide motion analysis. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 17, 7832-7847）



● 王冲副教授团队基于成核与预融理论，开展了盐渍土冻融相变临界温度的量化研究，揭示了土壤表面电荷、溶质浓度与水活度等因素对冻融温度阈值的影响机制。现有模型常未明确区分冻结与融化过程的不同物理机制，且往往忽略库仑场能、冻结潜热及氢键作用在相变过程中的影响。为此，本研究综合上述能量项，提出球形冰晶理论框架，建立了能够明确区分冻结成核温度与预融起始温度的相变阈值预测模型。通过开展三种土类（砂土、粉土、粉质黏土）在不同含盐量与水活度条件下的控温冻融循环实验，验证了模型的有效性。研究进一步阐明：砂土因孔隙大、自由能高，冻融温度变化最为显著，而结构均匀的粉土与粉质黏土则表现出更强的冻融稳定性；表面电荷密度在低溶质浓度下显著增强融化过程的过冷度，但在高浓度下因静电屏蔽效应而减弱；盐度增加通过降低水活度与提高成核活化能，显著抑制冻结成核温度并增强过冷效应。此外，融化过程中当准液态层厚度低于临界值时，其失稳主要由色散力主导，且最大过冷度常出现于预融层较薄的情况。该研究为寒区盐渍土热力学行为模拟与工程防护提供了理论依据与预测工具。（Tian, J., Wu, Z., Wu, Y., Li, S., Lai, Y., & Wang, C. Quantification of phase transition critical temperature for saline soils based on nucleation and premelting theory. *Acta Geotechnica*, 2025.）



土壤水成核过程示意图：(a) 初始状态；(b) 临界形核状态

球型冰晶预融模型示意图