

代表性成果

1. 郑晓静院士团队基于对高雷诺数 ($Re_\tau \sim O(10^6)$) 近中性大气表层风沙长期测量获得的不同质量分数的观测数据, 研究了颗粒对幅值调制的影响。在含沙流动和净风流动中, 除了对数区域自上而下的调制行为外, 还发现存在于某些特定运动的单点幅值调制效应。能量最强的湍流运动表现出最强的调制效应, 并且调制信号不会随着被调制的小尺度运动而改变。在含沙流动中, 能量最强的结构尺度几乎不变, 因此调制信号和载波信号的尺度几乎不受颗粒的影响 (见图 1a)。然而, 颗粒的加入会改变多尺度湍流运动之间的能量分布。大尺度分量的动能在颗粒的作用下比总湍动能增强得少。这导致大尺度分量的能量比例减少, 而小尺度分量的能量比例增加 (见图 1b)。此外, 颗粒对幅值调制程度上有阻碍作用, 并使调制信号和载波信号对应的层间调制最强的位置下移, 但由于质量负荷的减小, 阻碍作用随高度的增加而减弱。这项研究可为多尺度湍流运动之间的调制机制以及湍流对湍流的影响提供更普适的见解。 (<https://doi.org/10.1017/jfm.2022.1092>)

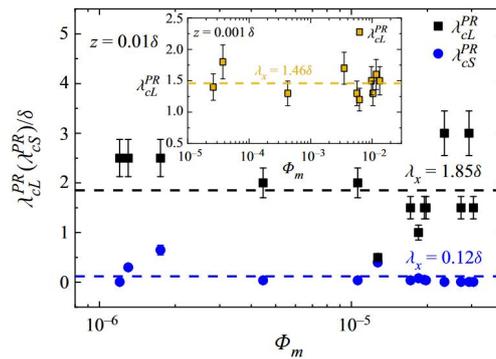


图 1a 在不同壁面法线位置 $z \approx 0.001\delta$ 和 0.01δ 处峰值调制系数 RAM 对应的大尺度和小尺度截断波长 (λ_{cL} 以及 λ_{cS}) 随质量分数 Φ_m 的变化。

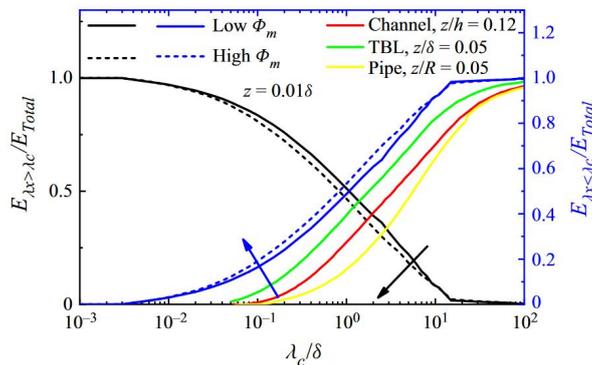


图 1b 在 $z \approx 0.01\delta$ 位置处波长大于截断波长 λ_c (左-下轴, 以黑色表示) 和小于 λ_c (右-上轴, 以蓝色表示) 的累积流向湍动分数。实线是低质量分数 $\Phi_m (< 1.33 \times 10^{-5})$ 的平均结果, 虚线是高质量分数 $\Phi_m (> 1.5 \times 10^{-4})$ 的平均结果。红线、绿线和黄线分别是 Balakumar and Adrian (2007) 以及 Guala et al. (2006) 的单相流动结果。

2. 郑晓静院士团队基于在青土湖观测阵列站点同步获取的湍流速度和颗粒物浓度数据，研究了湍流结构和颗粒物浓度结构之间的空间关系。除了观测到高雷诺数大气表面层中不仅包含具有大尺度相干性和显著能量的粉尘浓度结构外，还发现与颗粒物浓度相干性最强的湍流运动尺度与局地高度和大气表面层厚度遵循 $1/2$ 幂次标度规律。此外，大尺度湍流速度脉动对颗粒物浓度脉动有显著的幅值调制作用，但对小悬移粉尘颗粒和大跃移颗粒的调制影响不同。在相间幅值调制的基础上，发现存在一个随高度变化的颗粒-湍流结构相位差，这进一步使得颗粒浓度结构倾角大于湍流的结构倾角。在这种情况下，提出了一个反映两者关系的概念模型（见图 2），并进一步推导出一个定量公式，结果发现与野外观测结果十分吻合。（<https://doi.org/10.1017/jfm.2023.886>）

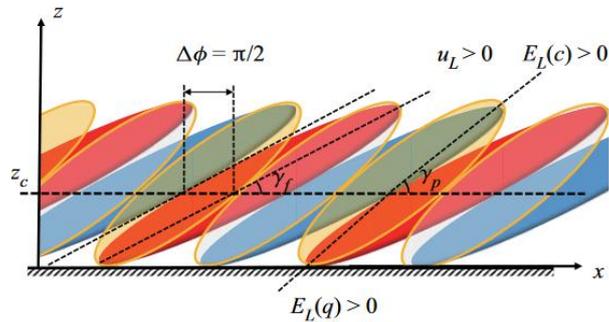


图 2 湍流速度于颗粒浓度相对位置关系示意图

3. 郑晓静院士团队首次提出壁湍流的广义附着涡理论。Townsend 提出的附着涡理论成功地将壁湍流相干结构与统计规律联系起来，预测出湍流脉动强度满足对数律等。但是经典的附着涡理论仅适用于规范壁湍流，比如零压力梯度边界层、槽道流和管道流。本成果首次将经典附着涡理论推广到具有任意分形维数的广义附着涡，推导出广义附着涡的雷诺应力标度律，并在逆压梯度边界层和机翼边界层中成功得到验证。此外，本成果还澄清了人们对附着涡相关概念的理解，得到了广义附着涡概率密度、数密度、体积占比等特性所满足幂律指数之间的关系。（Physical Review Fluids, 2023: 044603）

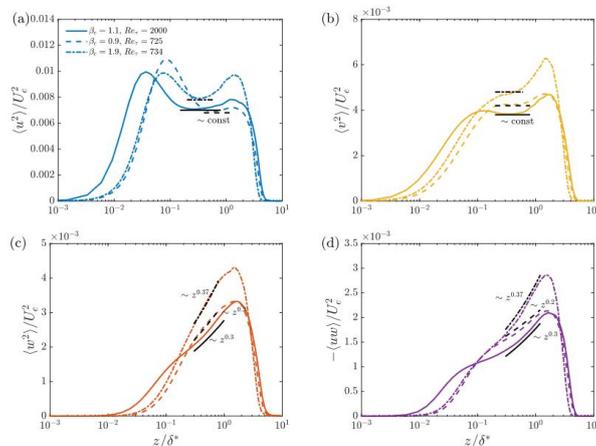


图 3 广义附着涡雷诺应力标度律在逆压梯度边界层中的验证

4. 周又和院士团队结合沙尘暴多物理量同步野外观测数据，创建了多物理场的方差级串新理论和间歇性数据分析新框架，进而为揭示沙尘暴的普适特征及机理提供了有效手段。基于兰州大学青土湖野外观测站多物理场观测数据，采用补偿能谱分析，揭示了在低沙尘质量分数时，风速、粉尘浓度、电场强度的功率谱在中波数范围（惯性区）内表现出普适的多物理场-5/3 幂律的新现象。为了解释中波数区的普适幂律，提出了粉尘浓度和空间电荷密度的“尺度不变”和“局部作用性”基本假设，由此构建了“粉尘浓度和空间电荷密度方差级串”的新理论，通过量纲分析得到了粉尘浓度在中波数区的-5/3 幂律和空间电荷密度的 1/3 幂律，进一步根据空间电荷密度和电场能谱的-2 次幂律关系最终得到电场的-5/3 幂律 (Nature Communications, 2023, 14, 408)。

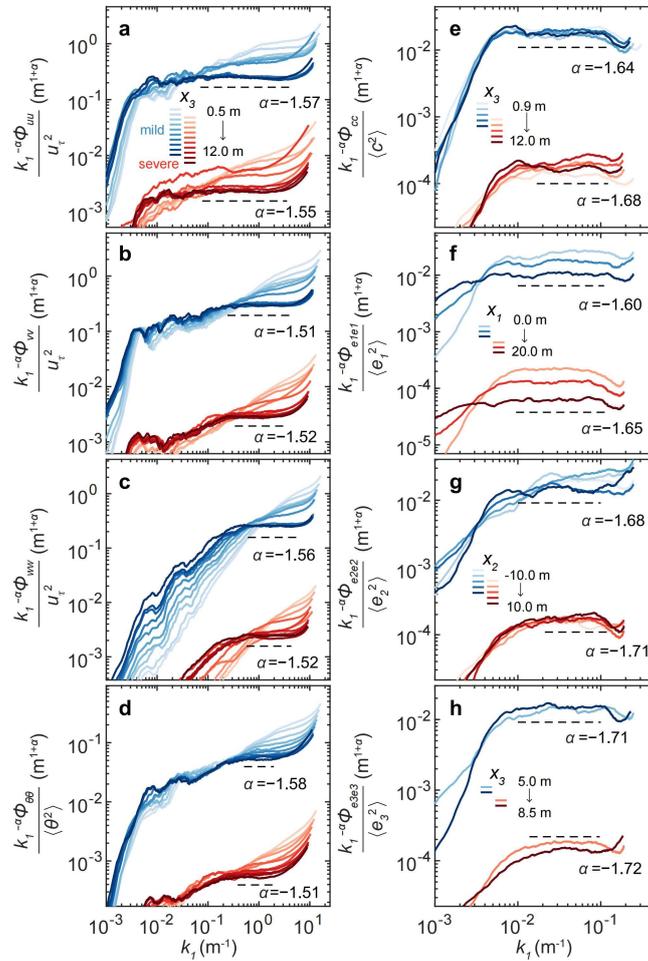


图 4 沙尘暴多物理场的补偿功率谱

5. 周又和院士超导力学研究团队基于已成功自主研制的极端全背景场超导材料性能测试装置，提出准分布式布拉格光纤测量技术的超导材料低温多场下的失超演化高精度测量方法。首次提出了失超新判据一应变二阶导为常数；对于含预应变的超导带材，提出了失超预警一应变一阶导为零，可在失超发生前 1-2s 实现预警；相对于温度、电压的局部失超检测方法，本项目方法是目前唯一的全局失超检测新方法，在远离失超区也可实现应变响应信号检测（图 5a）。此外，相对于目前工程常用电压判据存在的较大风险，新方法对于低、高温超导材料的失超检测均适用（如表 5）。构建的新失超检测方法和判据对于高温超导结构的失超监测这一瓶颈问题提供了可行途径。最新进展发表在国际超导科学与技术领域的 Top 期刊 Supercond. Sci. Technol., 所有审稿专家予以肯定评价“…该工作提升了 FBG 在失超检测中的应用，展示的数值模拟和实验结果清晰…”；“…论文开展了很好的实验和数值模拟，且对其解释清晰”；“…很欣赏该文解决失超的预警问题，论文模型和数值模拟增强了其科学贡献”（ Supercond. Sci. Technol. 2023,36: 015013）

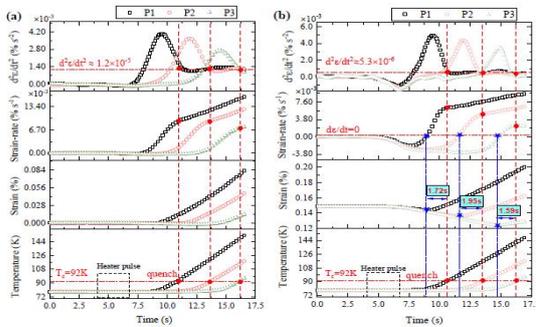


图 5a 基于应变一阶、二阶导数的失超新判据及其失超预警

失超特征	HTS (高温)	LTS (低温)
温度	持续上升(无突变)	持续上升(无突变)
电压	0.1~1000 μV/cm(需经验)	1 μV/cm(经验得出)
应变	快速上升	快速上升
应变一阶导	斜率突变 [存在预应变, ε = 0 失超预警]	最大峰值(ε = 0) [预应变, 第一个ε = 0失超预警]
应变二阶导	≡ 常数(ε = const)	等于零(ε = 0)

表 5 基于应变的高、低温超导材料失超判据与预警

进一步，基于光频域反射仪（OFDR）分布式光纤测量技术，实时连续监测了超导带材的失超演变过程。成功地解耦了应变-温度交叉敏感性的光谱信号，提取了温度和热弹性应变曲线，捕捉从失超起点到段落完全转变为常态的失超演变细节（图 5b），为进一步探索失超机制奠定了坚实的基础。研究成果发表在国际超导科学与技术领域的 Top 期刊 Supercond. Sci. Technol., 审稿人评价为“这是一个精心设计的实验”。（ Supercond. Sci. Technol., 2023, 36: 125007）

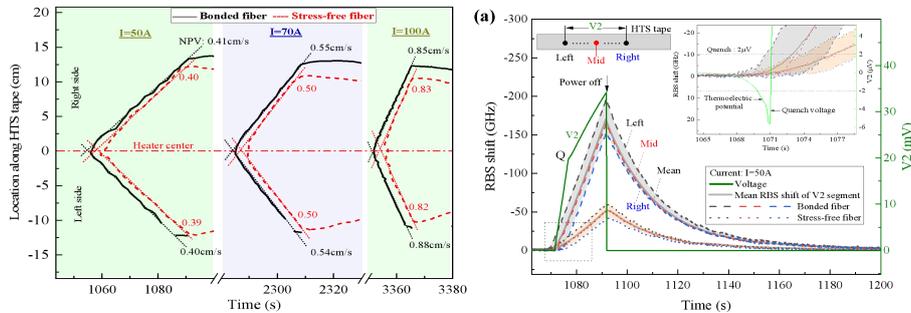


图 5b 基于 OFDR 分布式光纤失超传播速度监测与传统方法的对比

6. 黄宁教授团队基于湍流直接数值模拟方法,研究了稳定分层大气湍流混合层动力学特性与标量输运的统计规律。发现垂向温度梯度(高温气流位于低温气流之上)形成稳定分层,在重力波作用下大气湍流剪切速率减小,最终导致湍流对流与标量输运速率减小,进而导致稳定大气层结(见图 6a-d);发现稳定分层大气湍流中拟序结构、剪切速率分布与近壁湍流高度相似,揭示了稳定大气层结与近壁湍流动力学关联机制(图 6e);基于标量输运方程和湍动能输运方程,建立了标量耗散率与湍动能耗散率的数学描述(图 6f),可为大气模式中大气边界层动量、标量输运的模式构建提供理论支撑。(Physics of Fluids, 2023, 35(10))

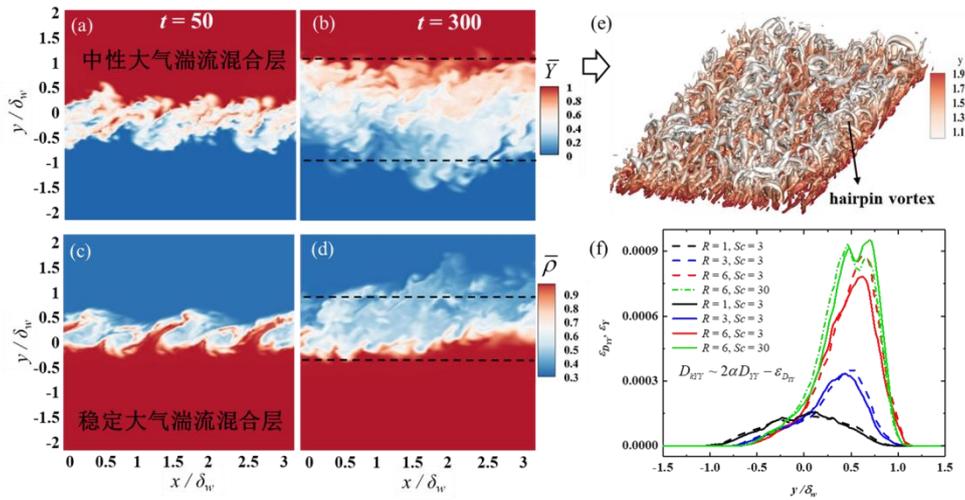


图 6 中性 (a b) 和稳定分层 (c d) 大气湍流混合层中标量与密度分布;稳定分层湍流中拟序发夹涡结构 (e);标量耗散率与湍动能耗散率的定量关系 (f)

7. 黄宁教授团队通过风洞控制实验，定量分析了雪檐形成的一般规律以及环境因素对其的影响。明确了充足的可供侵蚀雪源是雪檐形成的必要条件，风场对雪檐形成和生长的影响最大。雪檐是风吹雪中雪粒沉积和侵蚀共同作用的结果，当风速小于地表临界起动风速时，由于空中缺乏足够的水平输雪通量从而无法形成雪檐；风速超过约 2 倍临界起动风速时，悬崖处的风蚀效应会强于沉积效应从而无法形成雪檐；风速约为临界起动风速值 1.4 倍时，悬崖处沉积量和侵蚀量的差值达到最大，雪檐长度生长最快，如图 7 所示。基于实验研究结果，本文建立了可以预测野外雪檐生长的概念模型，并通过比较模型预测值和野外观测值，验证了模型的可靠性。(The Cryosphere, 2023, 17(2), 639-651.)

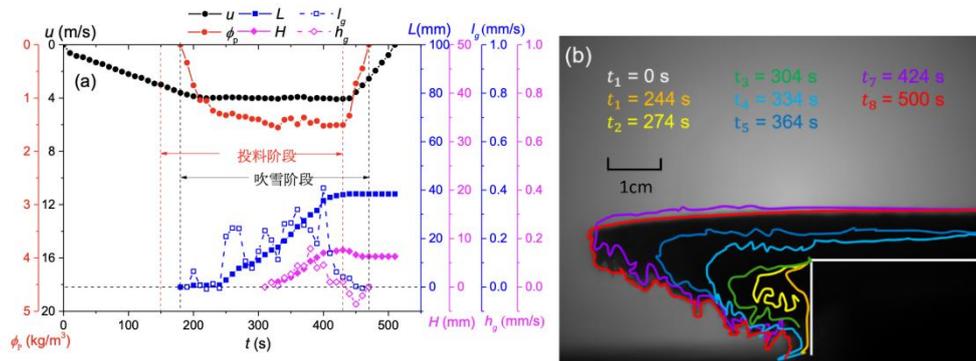


图 7. 雪檐长度（蓝色方块）、厚度（粉色方块）、长度生长率（空心蓝色方块）、厚度生长率（粉色空心方块）、风速（黑色圆圈）和颗粒质量浓度（红色圆圈）（a）和雪檐轮廓线变化过程（b）

8. 王省哲教授团队基于 HA-J 方法的大尺度高场高温超导磁体结构高效电磁模型。大尺度高场高温超导磁体结构涉及的带材数量可成千上万，导致计算资源耗费巨大且数值求解困难。对于大多数电磁模型而言，针对其电磁行为的模拟仍然是一个具有挑战性的问题。在当前高温超导体电磁模型中，H 和 T-A 模型是最为常见的。针对这些问题，发展了无需解算导体外空气域的 J 方法，该方法仅包含一个状态变量电流密度 J ，相较于传统的有限元模型（H 和 T-A 模型），表现出卓越的计算效率。然而，J 模型在大尺度磁体的应用中计算资源消耗较大，为解决该问题并提升计算效率，王省哲教授团队提出了 J 模型与均匀化等效方法相结合的高效高精度数值计算方法，构建了一种均匀各向异性 J 模型 (HA J-model) (图 8)。针对大尺度高温超导磁体的电磁模拟，在保持足够计算精度的同时，HA J-model 能够显著降低计算资源消耗并极大提高计算效率，相较于传统的有限元分析模型在计算效率上具有更高的优势 (表 8)。相关研究成果发表在国际超导科学与技术领域的 Top 期刊 Supercond. Sci. Technol.，并在第三届超导与磁技术国际学术研讨会宣讲，荣获“优秀学生报告奖二等奖” (Supercond. Sci. Technol. 2023,36: 035011)。

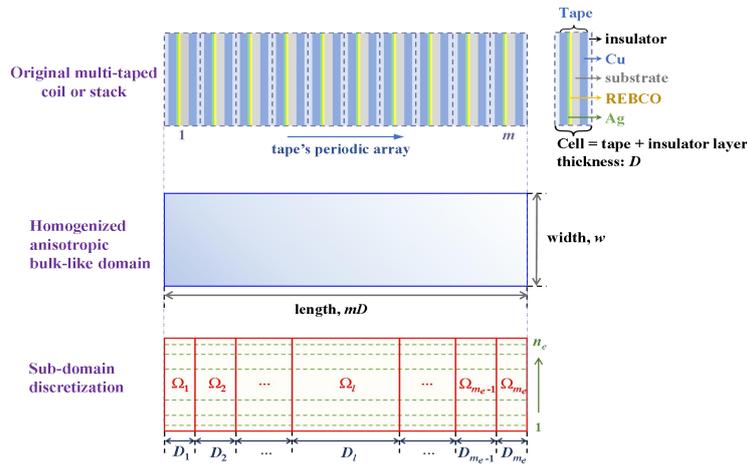


图 8 改进 J 模型的均匀各项异性处理过程

表 8 不同电磁模型计算的交流损耗对比

	HA J-model ¹ ($m_e=25$)	HA J-model ¹ ($m_e=50$)	Traditional J-model ²	T-A model ³	H model ⁴ (reference)
Loss (W/m)	933.766	933.495	930.73	931.71	933.99
Relative error	0.024%	0.053%	0.349%	0.244%	-
Time (h)	0.0583	0.216	0.58	2.56	52

Computing platform: ¹AMD R9-3900X, 3.79 GHz, RAM 32GB; ²Intel i7-6700HQ, 2.60 GHz, RAM 16GB; ³Intel i7-4790, 3.60 GHz, RAM 24GB; ⁴Intel i7-3770, 3.40 GHz, RAM 16GB.

9. 王省哲教授团队开展了高温超导复合结构拉-弯复合变形下力电退化研究。在极低温环境运行的高场磁体中 REBCO 带材上不仅会产生线圈绕制过程的弯曲变形还会产生环向强电磁力引起的轴向拉伸变形。在这种拉伸-弯曲组合变形下 REBCO 带材的临界电流会有发生不可逆退化的风险。针对这一超导材料与绕制的关键问题,高配峰青年研究员建立三维弹塑性有限元模型分析 REBCO 带材制备-冷却过程中累积在带材上的热残余应力/应变,以及 77 K 轴向拉伸变形、弯曲变形和拉伸-弯曲组合变形下 REBCO 带材的力学行为,并基于 Ekin 幂次函数和 Weibull 分布函数发展了以超导层内应变为自变量的临界电流唯象理论模型分析 77 K 轴向拉伸变形、弯曲变形和拉伸-弯曲组合变形下 REBCO 带材的力-电特性。轴向拉伸变形、弯曲变形和拉伸-弯曲组合变形下,本文建立的基于超导层内应变的临界电流唯象理论模型可以有效地预测 REBCO 带材拉伸、弯曲以及拉伸-弯曲复合变形下的力-电特性(图 9)。该研究成果发表在超导领域权威期刊 Supercond. Sci. Technol., 目前被引用 17 次(他引 16 次)。(Supercond. Sci. Technol. 2023,36:045006)

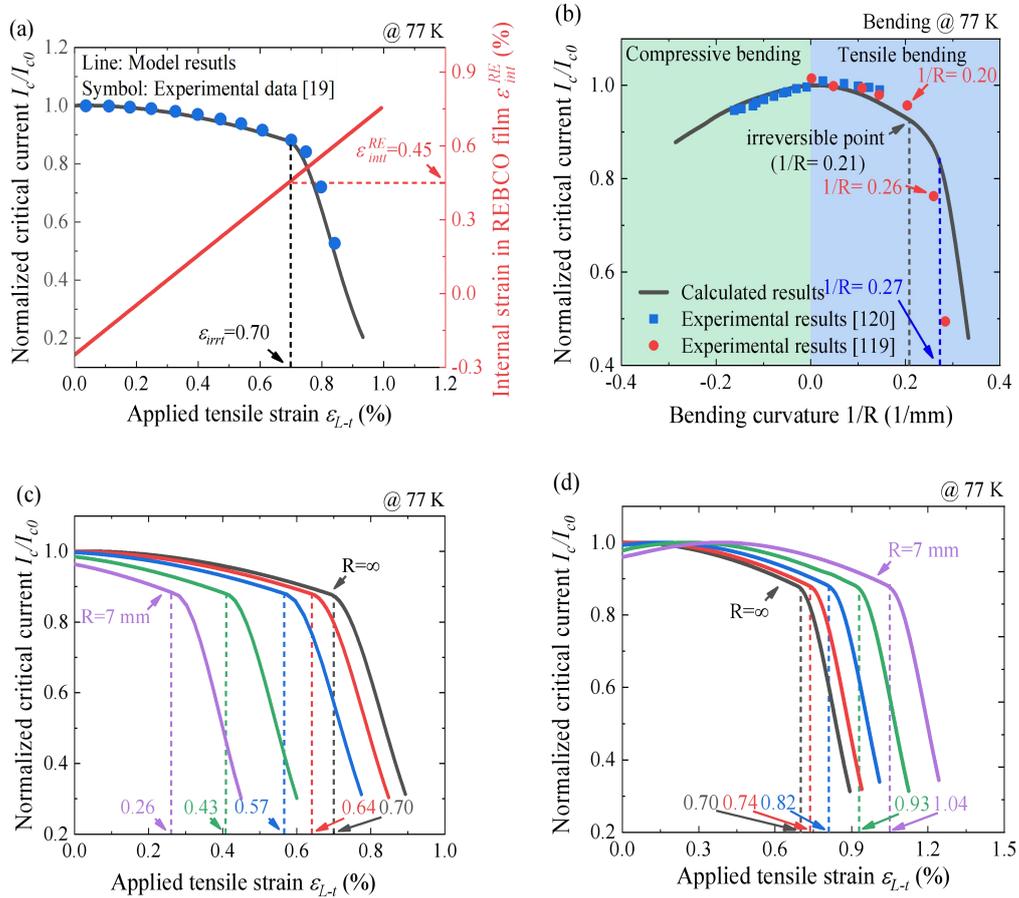


图 9 REBCO 带材拉伸、弯曲以及拉伸-弯曲复合变形下的力-电特性的模型预测结果: (a) 单轴拉伸; (b) 弯曲; (c) 拉伸-弯曲复合变形。

10. 张虎元教授团队确定初始地温场及运营条件下黄土高原的地铁系统与初始地温场的相互作用规律,为今后黄土高原地铁运营过程中暖通空调的优化和能源效率的提高提供可靠的参考。结果表明:在初始地温场中,地铁的年变温层位于地表至埋深 12m 处(图 10a)。年变温层的地温的年变化近似呈正弦状分布,存在相位滞后的现象,初始地温的振幅随埋深的增大呈指数减小(图 10b)。年恒温层位于埋深 12m 以下,温度为 15.2° C 左右。另外,隧道内空气温度对空气与围岩之间的热交换影响最大,大于围岩含水率的影响,隧道形状的影响最小(图 10c)。在热交换中,热流密度与低饱和度时的含水率、热交换时间呈负相关关系,与隧道空气温度呈正相关关系。但是,隧道形状、高饱和度时的含水率对热流密度影响小。(Zhu, J.H., Zhang, H.Y., Ma, G., Tan, Y., Wang, Y., 2023. Ground temperature distribution and evolution of Lanzhou subway in the Chinese Loess Plateau. Case Studies in Thermal Engineering, 43, 102803. SCI, 中科院二区 TOP, IF=6.8)

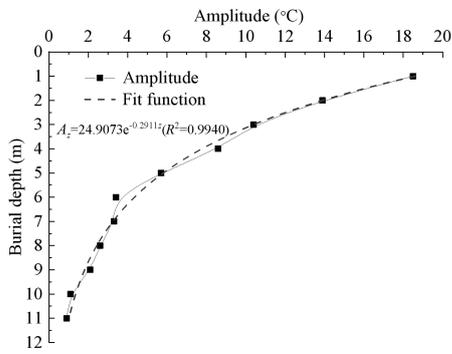


图 10a 变温层中地温振幅和埋深的关系

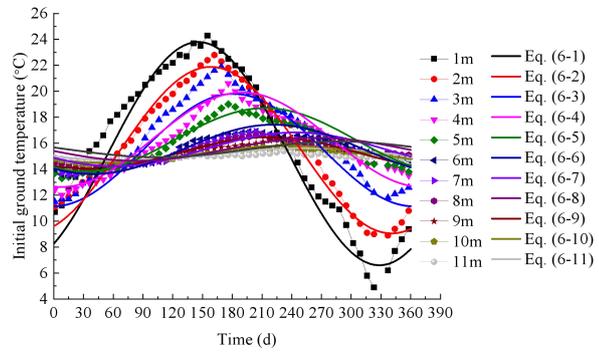
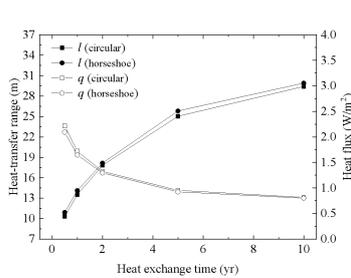
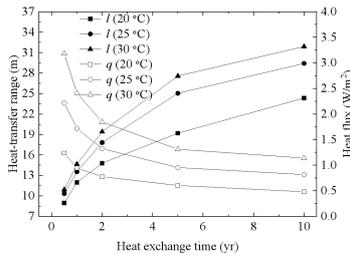


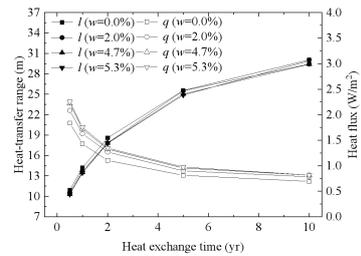
图 10b 年变温层不同埋深地温随时间的变化



(a) 隧道形状



(b) 空气温度



(c) 围岩含水率

图 10c 传热范围和热流密度随热交换时间的变化

11. 张虎元教授团队研究了高庙子膨润土的改性和提纯方法。采用氯化钠、碳酸钠、焦磷酸钠和六偏磷酸钠四种无机盐对我国预选缓冲回填材料高庙子膨润土钠化改性，改性完成后使用自然沉降法提纯，通过比较改性提纯后膨润土的膨胀性能、吸附性能和矿物组成探索最佳改性提纯工艺。图 11 所示为膨润土改性提纯反应过程示意图。无机盐中的钠离子进入蒙脱石晶层使其分散能力增强，膨润土中大部分杂质矿物包括石英和长石被去除。改性提纯后，膨润土的膨胀性能和吸附性能显著提升，蒙脱石含量从初始的 46.6% 提升至约 90%。使用氯化钠改性膨润土得到最佳的改性条件为 $t=3\text{h}$, $T=60^\circ\text{C}$ 。不同无机盐的改性效果和作用机理各不相同，碳酸钠在添加量为 2% 时就能完成高庙子膨润土的改性，其他三种无机盐改性效果随无机盐用量增加而提高。相比直接使用去离子水提纯，通过先改性后提纯的方法膨润土的产率提升了约 23%。（Tong, Y.M., Zhang, H.Y., Li, X.Y., Jia, Q.Q., 2023. Experimental study on sodium modification and purification of GMZ bentonite. *Construction and Building Materials*, 367, 130060. SCI, 中科院一区 TOP, IF=7.4）

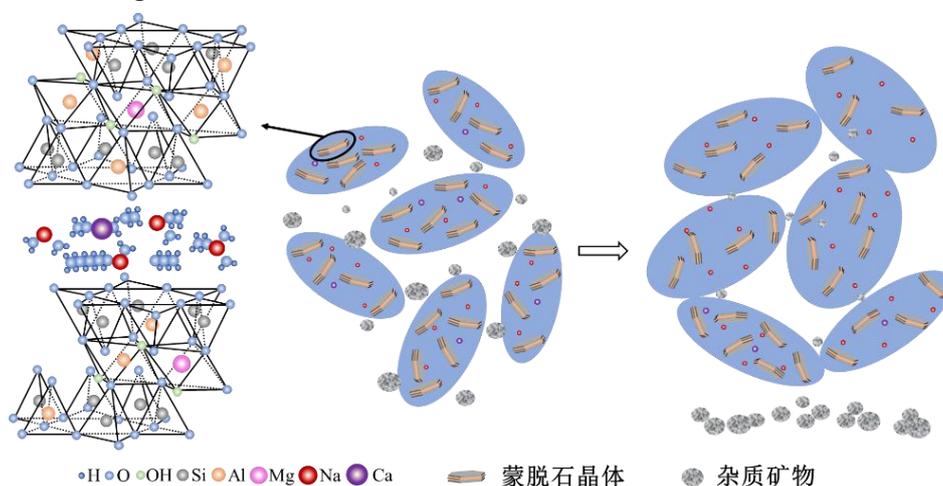


图 11 膨润土改性提纯反应过程示意图

12. 谌文武教授研究了西北地区石窟寺壁画地仗层（见图 12a）的干燥收缩及开裂特性，阐释了古人制作地仗所使用材料和工艺的科学性。对澄板土、石英砂、麦秸秆和麻纤维制成的模拟古代地仗进行了收缩和开裂测试（见图 12b）。发现掺入砂和植物纤维可显著提高澄板土的缩限，抑制其体积收缩（见图 12c）。植物纤维对抑制地仗表面开裂具有重要作用。沙子通过在土体中形成骨架并减少初裂缝的形成来抑制收缩。纤维通过克服土颗粒之间的吸力并阻止初（次）裂缝的形成来抑制土壤收缩。采用粗泥层-细泥层的地仗工艺在抑制收缩的同时也很好地消除了表面裂隙的形成。（*Engineering Geology*,2023,318: 107096）

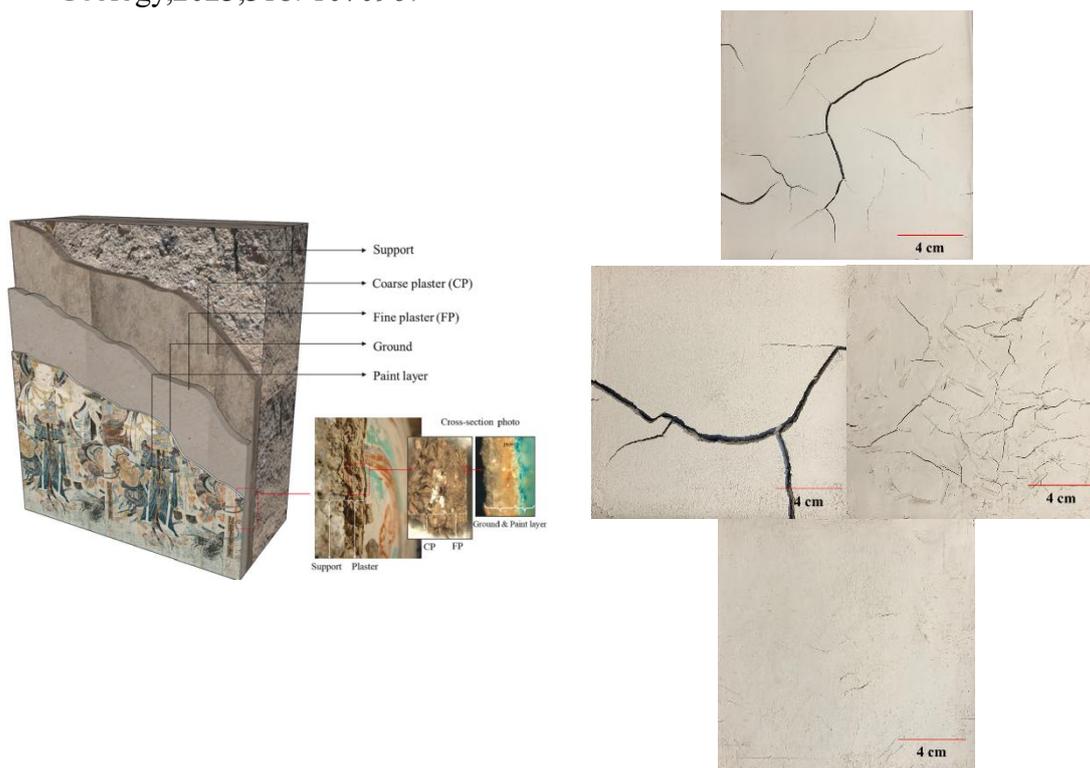


图 12a 石窟壁画结构示意图 图 12b 地仗表面开裂形貌

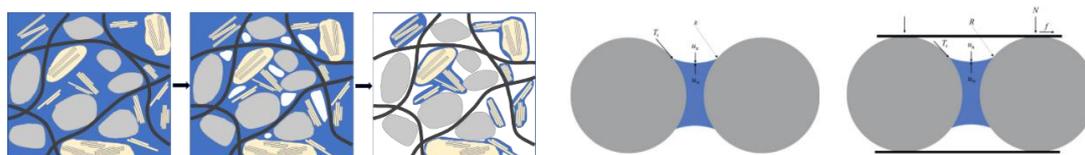


图 12c 地仗的微观收缩机制

13. 谌文武教授研究基于毛细屏障理论，通过调控修复材料的粒径组成以减缓土遗址底部掏蚀修复区的次生盐渍劣化（见图 13a）。首先结合 Arya-Paris 模型和 Fredlund-Xing 模型，将遗址土及修复材料的粒径分布曲线（Particle Size Distribution Curves, PSDC）转化为土水特征曲线（Soil-Water Characteristic Curves, SWCC），以初步判断不同土体结构的毛细屏障潜能（见图 13b）；并开展水盐迁移试验和压汞测试来验证预测结果（见图 13c）。在土遗址保护工程实践中，基于本研究提出的通过调控修复材料的粒组来减缓土遗址修复区次生盐害的方法，不仅可以有效避免对遗址造成次生损害，还可减缓在后续的遗址露天保存过程中的盐害。（Construction and Building Materials,2023,366: 130168）

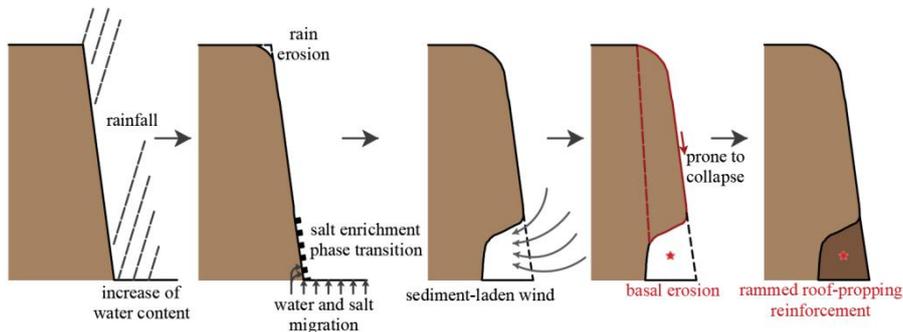


图 13a 土遗址底部掏蚀修复区示意图

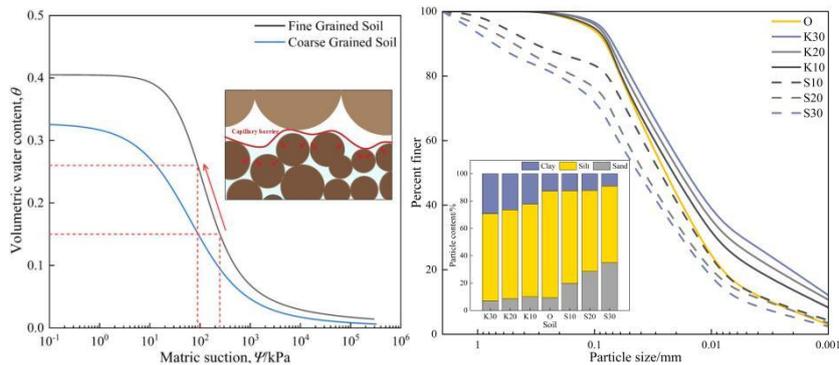


图 13b 毛细屏障效应示意图

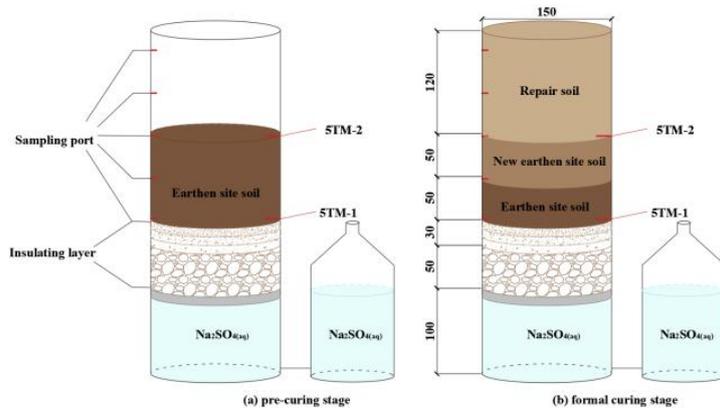


图 13c 水盐迁移试验示意图

14. 高原文教授开发了计算多晶 Nb₃Sn 材料损伤与断裂行为的分析模型和计算模块，定量分析了不同温度下具有随机取向和择优取向多晶 Nb₃Sn 的杨氏模量，讨论了多晶 Nb₃Sn 杨氏模量与自发四方相变的关系。得到了多晶 Nb₃Sn 在微观结构水平上不均匀的应力和应变场。随后，基于此模型，计算了多晶 Nb₃Sn 的晶间断裂行为，给出了温度、相变、预裂纹对多晶 Nb₃Sn 的断裂性能的影响，该模型与实验结果具有较好的一致性。在此基础上，研究了多晶复合材料的 PIT 和 BR 超导纤维束的断裂行为，数值再现了这两类 Nb₃Sn 纤维在轴向外载作用下的应力分布以及断裂损伤演化过程，为后续提升 Nb₃Sn 材料力学、电学性能提供和建议和相关策略。（Supercond Sci Tech 2023, 36, 095001）

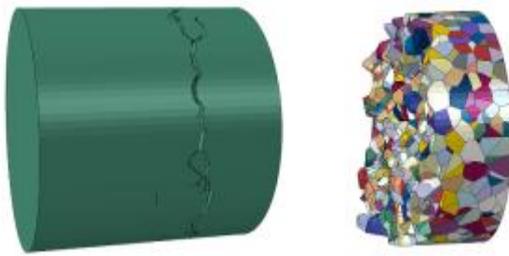


图 14a Nb₃Sn 的晶间断裂模型

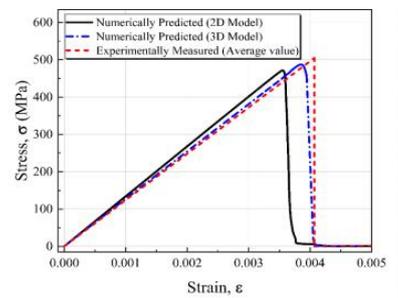


图 14b 多晶模型预测的断裂应变曲线

15. 张兴义教授团队发现了外加电介质对二聚体诱导的微波等离子体和聚焦热点的抑制效应。工业生产中微波能量的精准控制仍存在挑战，即有效抑制微波放电或局部热点，已成为提高加热均匀性的长期瓶颈。然而，由于内部温度测量的困难，不同外加介质中高介电二聚体微波热点的演化过程和潜在机理尚不清楚。基于此，本研究提出了一种光学间接观测的方法来表征外加电介质内部的热分布。原位实验发现随着外加电介质相对介电常数的增加，微波等离子体的启动被阻止，聚焦热点的形成被抑制（见图 15a）。有限元模拟验证了外加电介质对二聚体微波协同共振的弱化效应，倏逝波特性和解释了实验现象（见图 15b）。计算结果揭示了相对介电常数实部和虚部对增强电场的弱化效应及加热均匀性的提高作用（见图 15c）。这些发现可直接用于抑制微波处理过程中二聚体甚至多颗粒系统中微波热点的出现，也为 Mie 共振的协同作用提供了更好的理解。（*Applied Physics Letters*,2023,122）

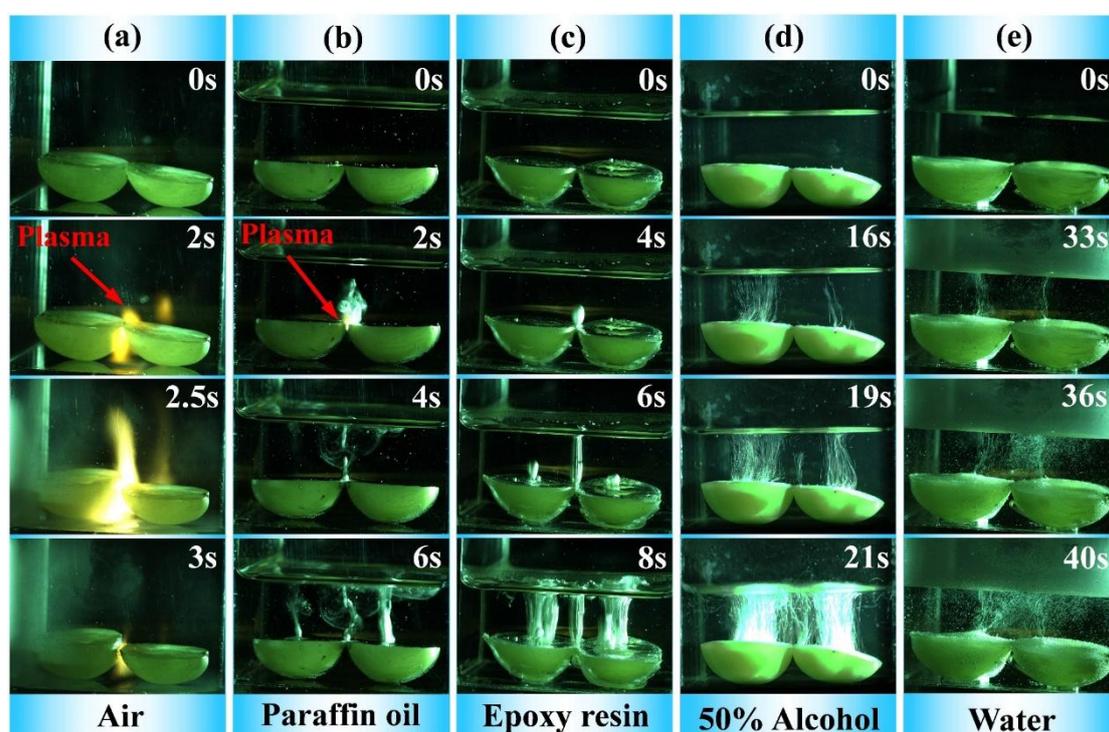


图 15a 微波等离子体或聚焦热点在(a)空气(b)石蜡油(c)环氧树脂(d) 50%酒精和(e)水中的演化

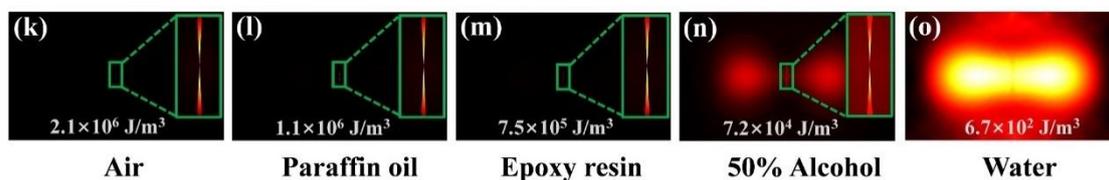


图 15b 二聚体在不同外加电介质中的电磁能量密度分布

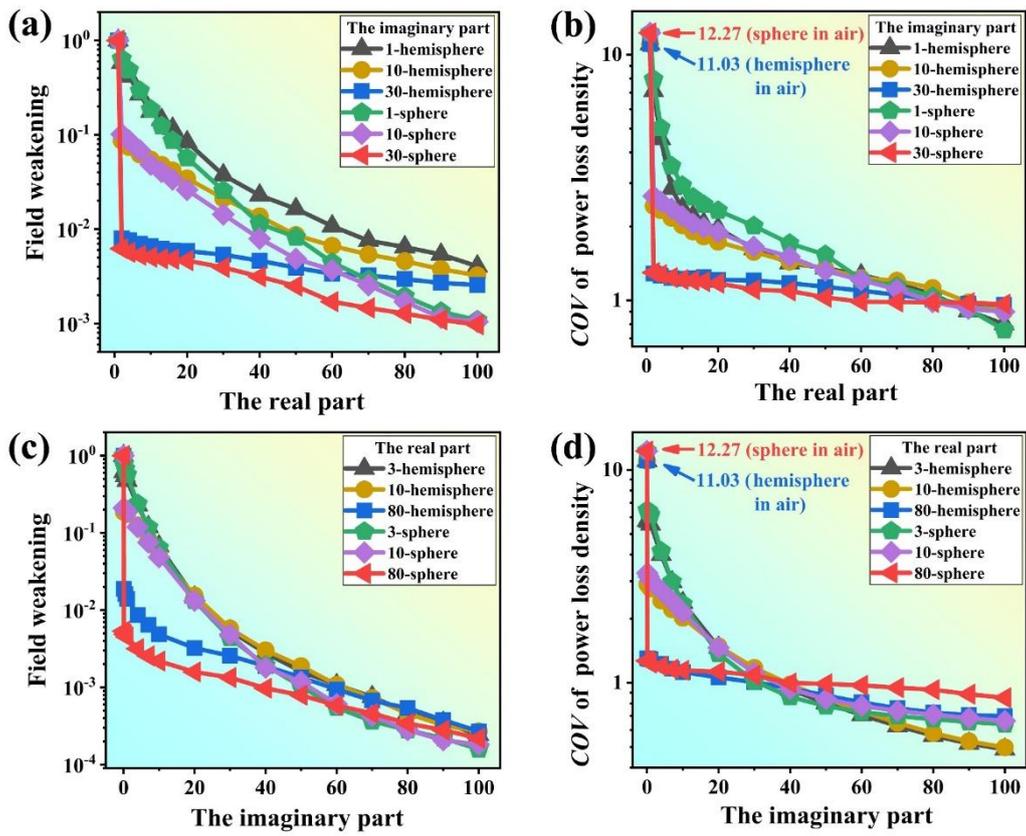


图 15c 二聚体的增强电场和加热均匀性随外加电介质的相对介电常数实部与虚部的变化

16. 张兴义教授团队研究了 CORC 缆缠绕及弯曲过程中的变形特征，揭示了 CORC 缆不均匀变形规律及内部损伤原因。本研究建立了 CORC 缆螺旋缠绕的理论模型，阐述了泊松效应引起的变形特征，将带材缠绕的接触模式分为单线接触、双线接触、面接触，得到 CORC 缆螺旋缠绕不均匀变形的解析解（见图 16a）。针对带材边缘计算误差和圆柱体边缘测量难题，发展了 SA-stereo-DIC 并采用扫描的方式扩充了测量视场，实现了大变形、高倍率的环绕精确测量（见图 16b）。通过有限元模拟和 DIC 实验验证了理论模型的准确性和可靠性。结果表明，该模型可以预测缠绕过程中超导带材多层结构内部损伤裂纹的分布特征，并通过磁光(MOI)实验进行了验证（见图 16c）。揭示了 CORC 缆缠绕及弯曲过程中不均匀变形特征及损伤原因，为后续 CORC 缆应用过程中的优化设计奠定了基础。（Engineering Fracture Mechanics, 2023. 292: 109625. Experimental Mechanics, 2023. 63: 813 - 822. 第三届损伤与断裂力学及其工程应用研讨会优秀报告特等奖）

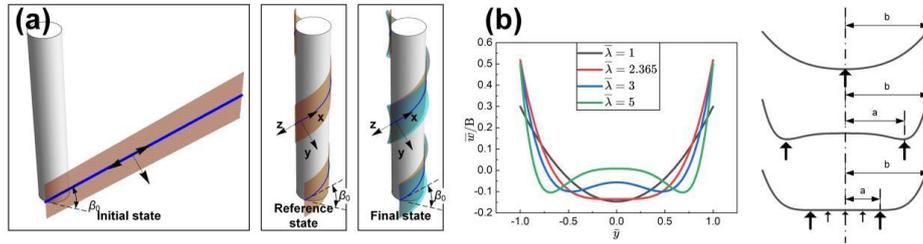


图 16a CORC 缆螺旋缠绕的(a)理论模型，(b)接触类型分析。

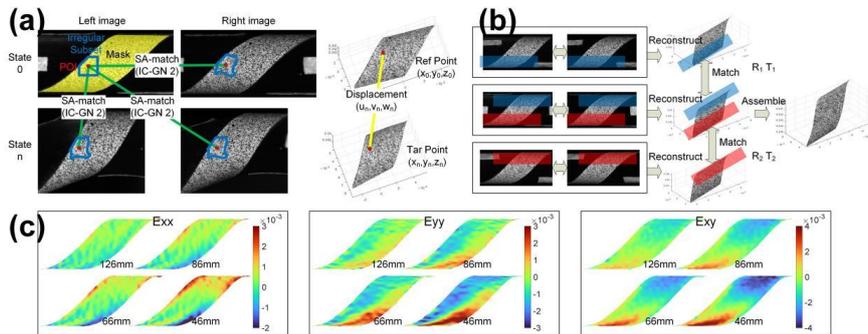


图 16b (a) SA-stereo-DIC 计算策略，(b) 环绕扫描拍摄拼接方案，(c) CORC 缆弯曲全场应变云图。

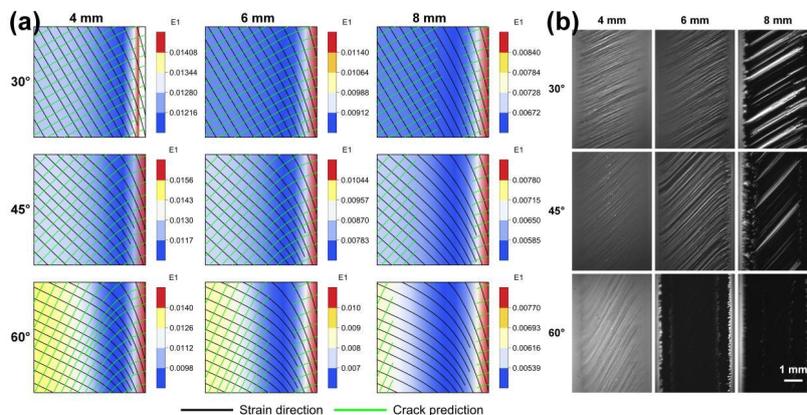


图 16c CORC 缆在不同缠绕条件下(a) 基于理论模型的超导层应变和裂纹预测，(b)磁光实验结果。

17. 张兴义教授团队基于结构仿生的思路开展 3D 打印 YBCO 超导材料的强韧化研究，实现了高强、高韧性、超轻 YBCO 复合材料的制备。成果首先通过三维低温冷铸方式对 3D 打印 YBCO 块材结构进行调控，获得均匀有序片层骨架结构（见图 17a）；提出了真空辅助浸渍技术，获得了环氧树脂与 YBCO 超导块材双相复合的片层互锁双网络构造（见图 17b）；此研究在超导性能保持不变的前提下，通过材料的进一步改进实现了 YBCO 超导块材的超轻质、强韧化和可靠性的显著提升。即相比传统超导材料强度和断裂韧性分别提升 1.94 倍和 14.8 倍，并在 10000 次载荷循环后没有发生破坏，而传统样品仅 25 次就发生破坏（见图 17c）。在 3D 打印超导体的基础上，通过直接掺杂和结构化设计实现了 3 打印 YBCO 超导材料的热导率提升。通过在前驱体浆料中掺杂具有高导热性的 Al₂O₃ 纳米颗粒，实现了高质量的纳米掺杂。结果表明，超导材料的热导率提高了 2 倍（见图 17d）；理论分析后得到的高导热微结构，通过 3D 打印技术实现了宏观样品，结果表明，结构设计有效提高了导热系数，最优结果的导热系数提高了 1.5 倍（见图 17e）。（National Science Review, 2023,10,nwad030 International Journal of Extreme Manufacturing, 2023, 015001, 10pp）

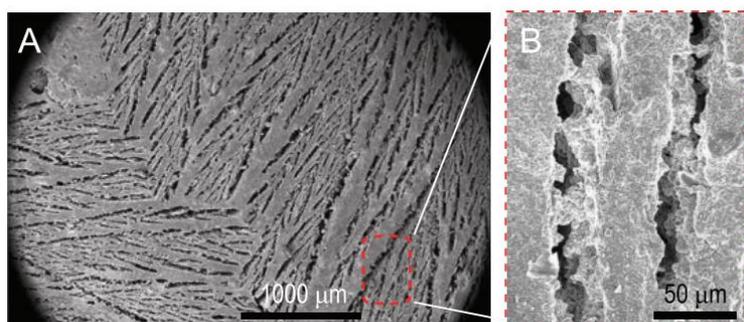


图 17a 3D 打印超导体在三维冷铸之后的 SEM 图像

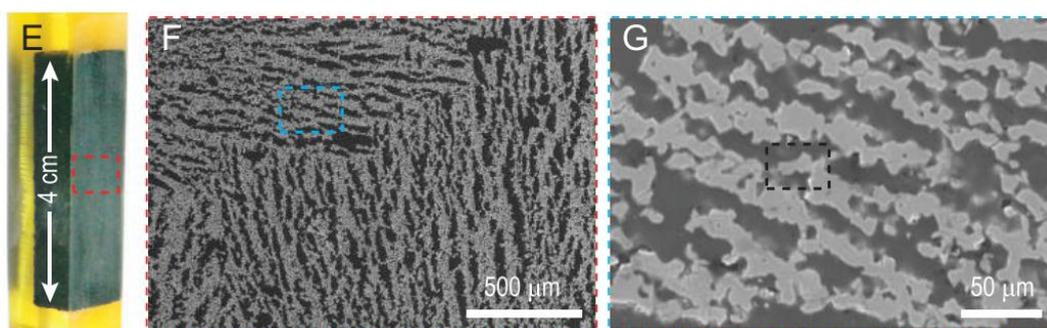


图 17b 环氧树脂-3D 打印超导体复合材料

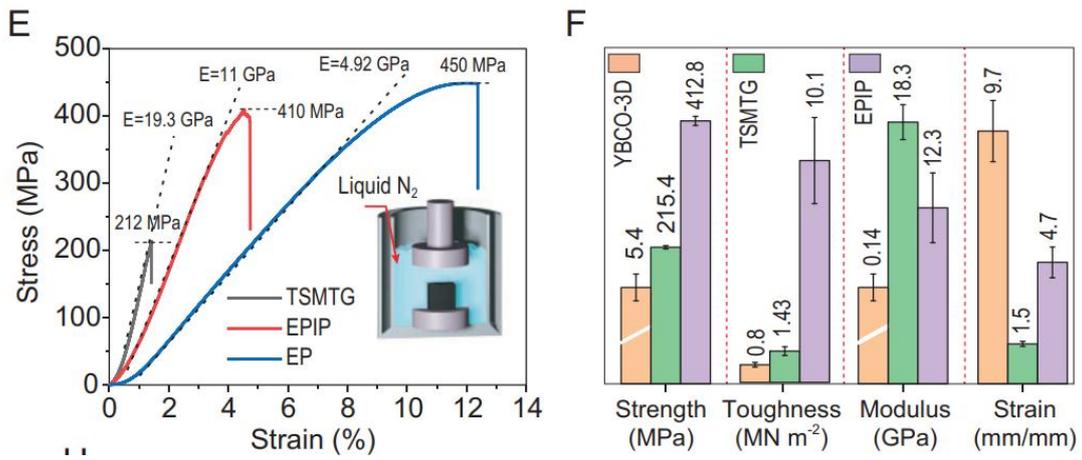


图 17c 复合材料的力学特性

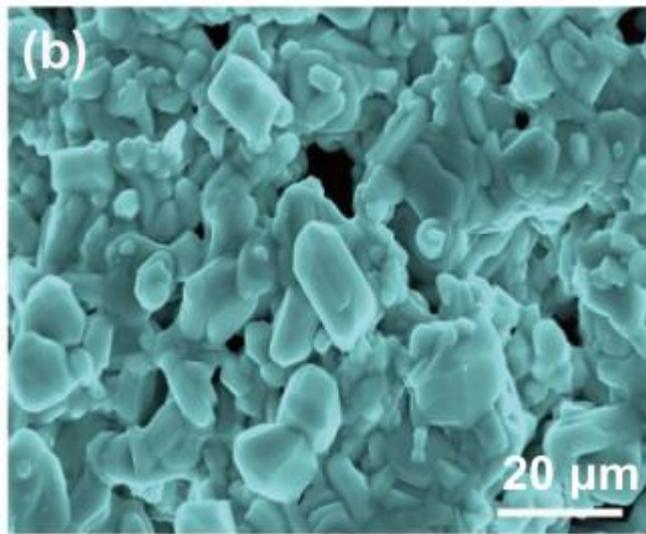


图 17d Al₂O₃ 纳米颗粒掺杂后的 3D 打印 YBCO 超导材料

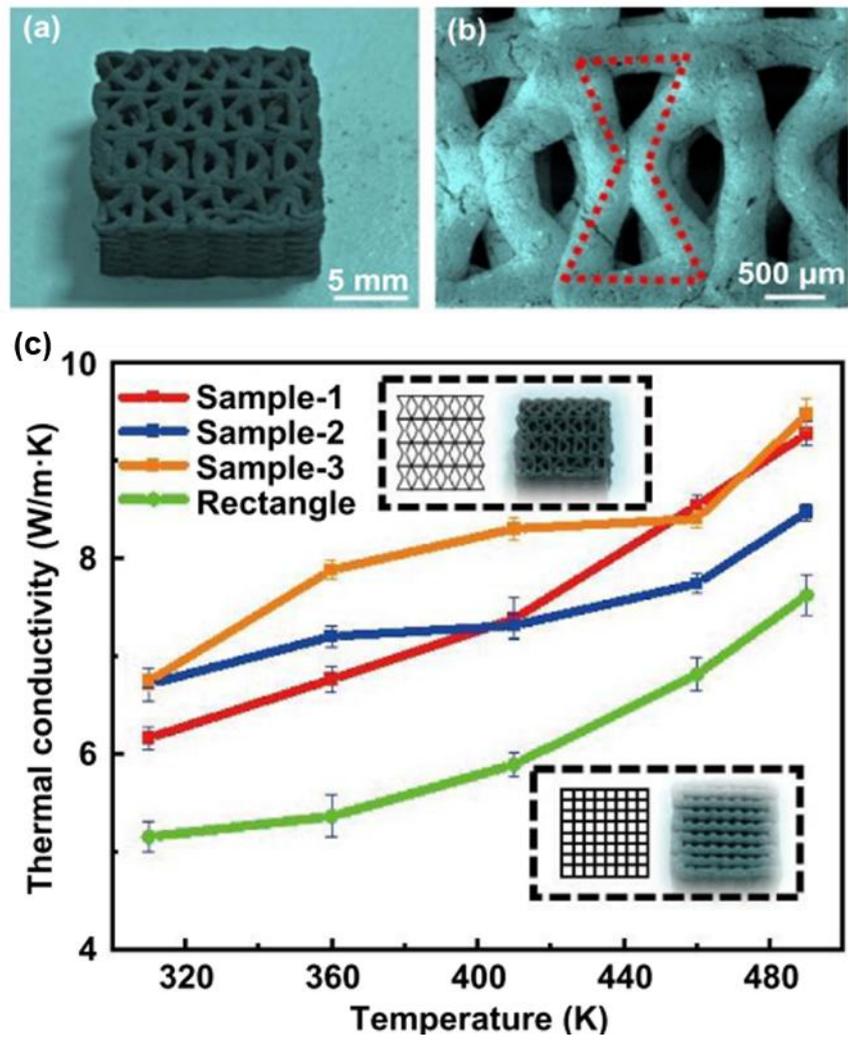


图 17e 微观结构优化后的样品(a, b)及导热系数(c)

18. 雍华东教授团队提出了基于不连续拉格朗日单元的 **J-A 法**。超导电磁场数值计算的一大挑战源自超导本构的强非线性。为了克服这一困难，超导界发展新的适用于超导体的电磁场数值计算方法，并为超导体电磁行为分析提供有力支撑。由此可见，发展超导电磁场数值计算方法尤为关键。项目组进一步开发了基于 **J-A 法** 的有限元模型，并提高了其精确性和通用性。在 **J-A 公式** 中采用了非连续拉格朗日形函数来稳定数值结果。同时，将拉格朗日乘子法应用于施加传输电流情形。结果表明 **J-A 法** 能够有效模拟超导薄膜及块体的电磁响应。此外，将均匀化及多尺度策略引入 **J-A 法**，简化了模型并减少计算量，从而有效提升了模拟大规模超导器件的计算效率。(S. J. Wang, H. D. Yong, Y. H. Zhou, *Superconductor Science and Technology*, 2023, 36: 115020)

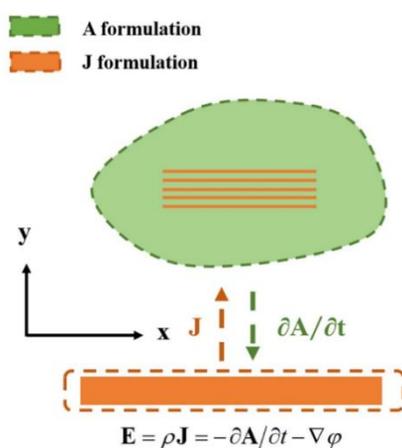


图 18a J-A 法计算流程

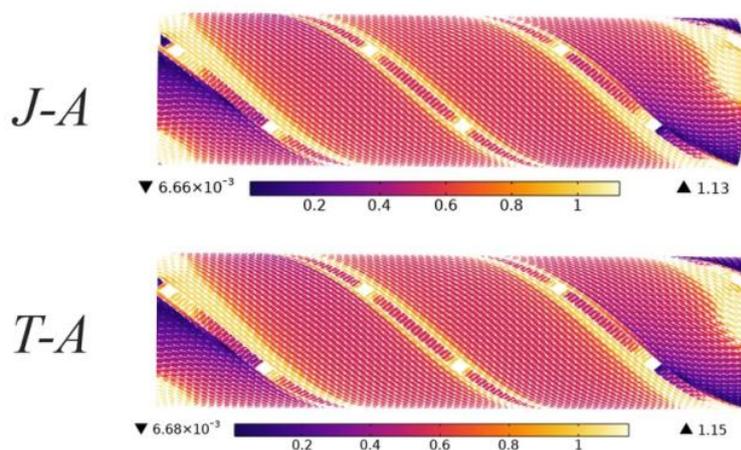


图 18b 计算结果对比验证

19. 雍华东教授团队开展了高温超导跑道线圈的三维电磁-力学耦合行为分析研究。目前, REBCO 带材绕制的高温超导跑道线圈在工程实践中被广泛应用, 如高温超导电机、高场加速器磁体和高速磁悬浮列车等。然而, 随着近几十年来高温超导磁体技术的发展, 高温超导线圈的力学行为已成为关注的重要问题之一。在 REBCO 高场磁体的运行过程中通常产生较大的电磁力, 在电磁力的作用下 REBCO 线圈中会出现应力应变集中的现象。在这种局部的高应力或应变作用下, REBCO 线圈的临界电流会发生退化进而导致整个磁体性能的衰退, 严重者甚至可能引起 REBCO 带材的损伤、剥离和屈曲。基于三维耦合电磁-力学模型, 同时考虑了线圈变形对磁场分布的影响和超导带材临界电流的应变依赖性, 分析了高温超导跑道线圈的电磁-力学行为。通过将数值结果与文献中的实验数据进行对比, 验证了三维耦合模型的有效性。基于该耦合模型对三维高温超导跑道型线圈在外部电磁场作用下的形变进行了数值模拟。结果表明, 线圈结构的形变会减小屏蔽电流的穿透深度, 并且在直线部分到圆形部分的过渡区域会有环向应力和应变集中现象产生。此外, 环向峰值应力和应变不会随着 REBCO 带材表面垂直磁场的增加而单调增加。(L. Y. Yu, M. D. Niu, H. D. Yong, Y. H. Zhou, Superconductor Science and Technology, 2023, 36: 115008)

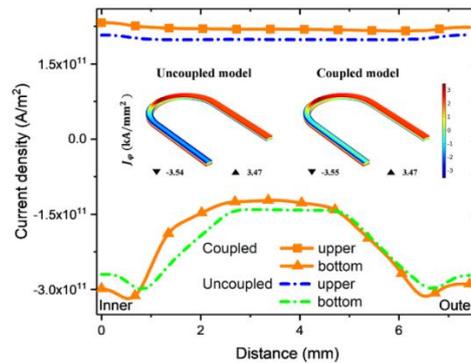


图 19a 跑道线圈中的电流密度分布

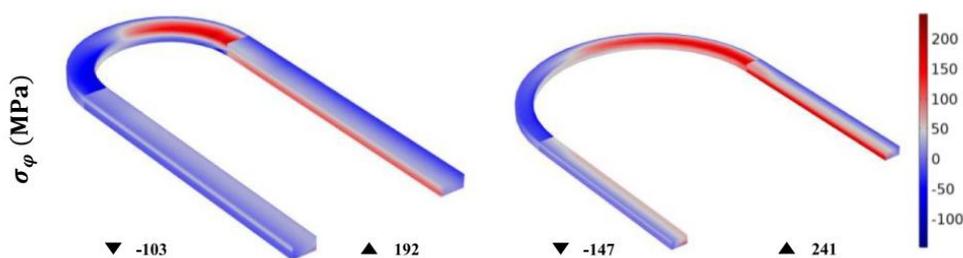


图 19b 高场下跑道线圈中的环向应力分布

20. 张帆宇教授针对平山造地工程的分布规律和潜在灾害影响范围,提出了风险防控建议。黄土高原有限的可利用土地资源和独特的地貌特征制约了城市化发展,催生了大规模的平山造地工程项目。本研究以兰州市为研究对象采用遥感、统计方法和数值模型分析了平山造地工程的分布规律和潜在灾害影响范围,提出了风险防控建议。研究表明,93个平山造地工程可分为削平山顶型、单侧拓宽型和双侧拓宽型三种类型,平山造地工程的面积与挖方规模间存在一个很好的指数关系。由于大量的平山造地工程区域是分布在黄河两岸,存在发生溃决泥石流的潜在风险,特别是在核心城市地区,因此采用改进的 LAHARZ 模型模拟不同规模溃决泥石流的影响范围。与世界上尾矿坝、滑坡等灾害类型的预测结果进行对比验证表明,修正模型模拟的结果是可靠的,符合灾害提交规模与风险影响范围的幂律函数关系。灾害风险分析表明,平山造地的潜在危害是可以预防的是可控的,但需要关注长期的潜在风险。(Catena,2023, 221: 106771)

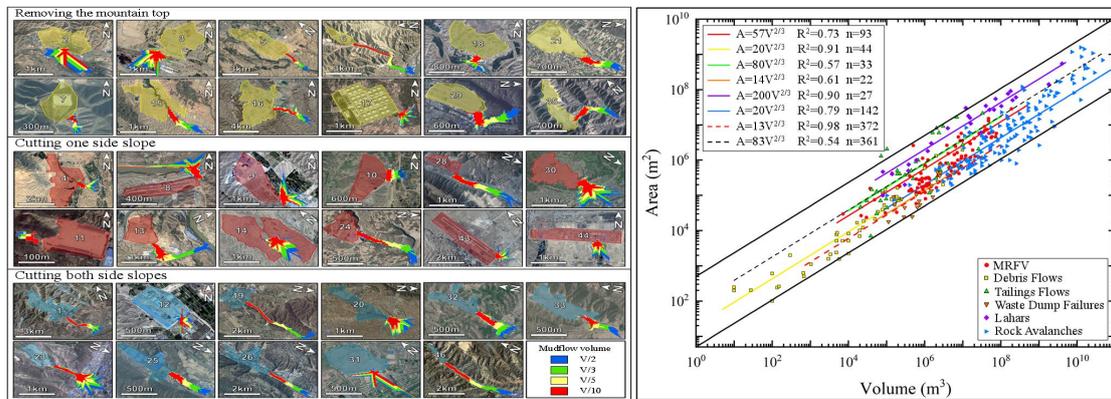


图 20 填方体溃决泥石流潜在风险的模拟评价结果和经验预测模型

21. 王萍教授采用基于浸没边界法的颗粒解析直接数值模拟 (PR-DNS) 方法, 对槽道湍流中可侵蚀床面上的颗粒两相流进行了数值模拟。对颗粒表面摩擦和压强积分获得总水动力。通过将已有的经典阻力模型与 PR-DNS 的结果进行比较发现, 对于跃移颗粒, 传统的升力和阻力模型不能准确地估计沿跃移轨迹的颗粒受力。通过理论分析和 DNS 数据拟合, 基于颗粒的垂向速度与颗粒雷诺数, 提出了一个新的跃移颗粒阻力模型。新的阻力模型可以合理地预测 DNS 沿粒子轨迹获得的平均阻力。

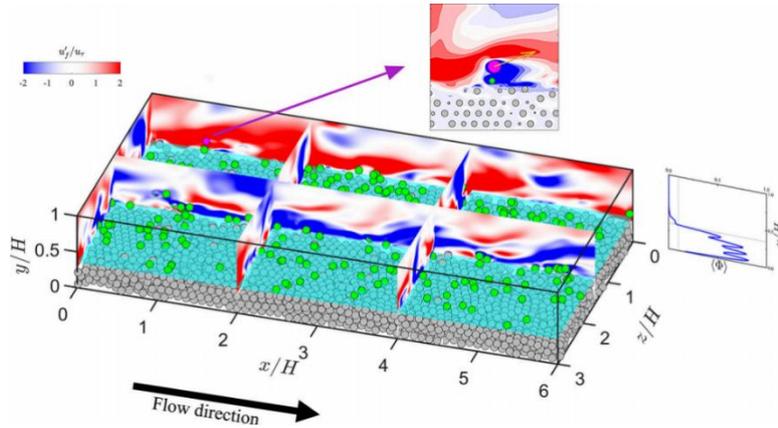


图 21a 可侵蚀槽道壁湍流的瞬时流体速度脉动云图

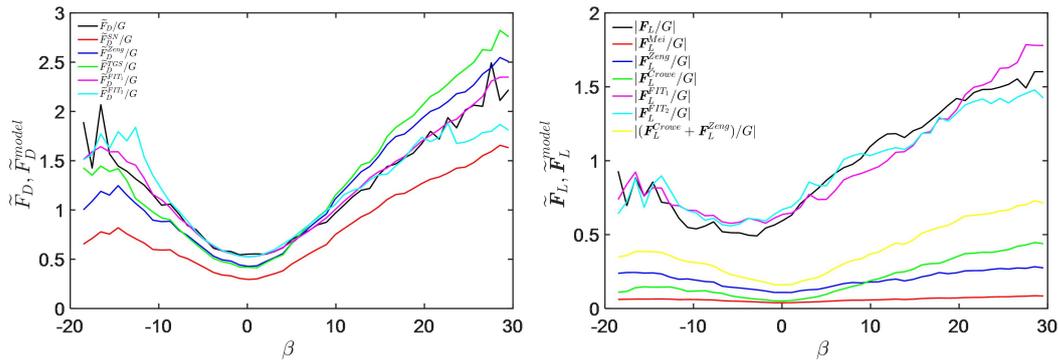


图 21b 新阻力和升力模型沿颗粒轨迹预测平均拖曳力与 PRDNS 模拟结果以及其他模型的对比

22. 张强强教授研究团队通过系统研究 2D 构筑基元热变形本征特性, 结合多尺度超结构设计、化学组装定量调控和正交双温度梯度场冷铸, 首次研制了可调负热膨胀特性超轻质 3D 石墨烯无机气凝胶超材料。发现了 2D 石墨烯基元碳原子热激出平面失稳收缩变形现象, 阐明了 2D 石墨烯基元热致变形微观周期性时空演化规律, 建立了 2D 石墨烯基元 3D 定向构筑双向温度梯度理论模型, 研制了具有双曲蝶形内凹角微观构型的三维石墨烯超材料, 提出了温度场诱导微元收缩调制力热耦合应力释放方法, 实现了超轻质三维石墨烯超材料热致变形可控调变 (图 22)。相关研究成果在材料科学领域顶级刊物 *Advanced Materials* (IF=29.4) 期刊发表。

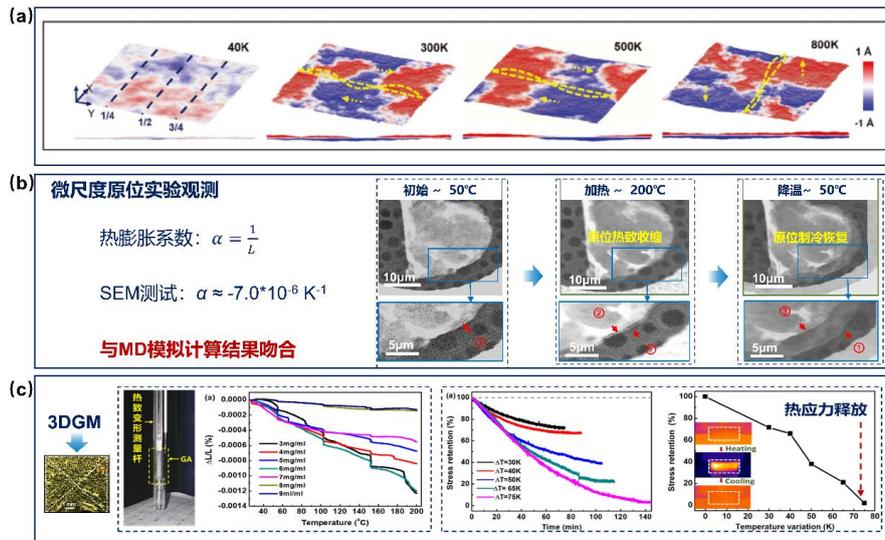


图 22 (a)石墨烯微基元热变形分子动力学模拟分析, (b)石墨烯微基元热变形原位测试分析, (c)3D GM 负热膨胀性能测试与应用分析。

23. 他吴睿教授团队提出了一种随机接触过程体积概率表征方法（见图 23a），实现了对界面随机接触过程的定量表征，并在此基础上，建立了界面力-热-电接触模型。这一模型与实验结果吻合较好，且与分形模型和 G-W 模型一致；提出的模型揭示了循环载荷对界面接触刚度、接触热阻和接触电阻的影响，表明随着循环加载次数的增加，界面的接触刚度增加、热阻减小、电阻增加（见图 23b）；并进一步提出界面性能变化的根本原因是残余变形和冷作硬化的累积，表明界面的接触刚度、隔热能力和导电性能与循环载荷密切相关。该研究结果为有效预测界面可靠性、导热和导电性能提供了理论基础，并揭示了循环载荷对接触刚度、接触热阻和接触电阻的影响机制及规律。成果被作为 AMS 英文版封面文章（见图 1）。（Acta Mech. Sin., 2023:39,123212.）

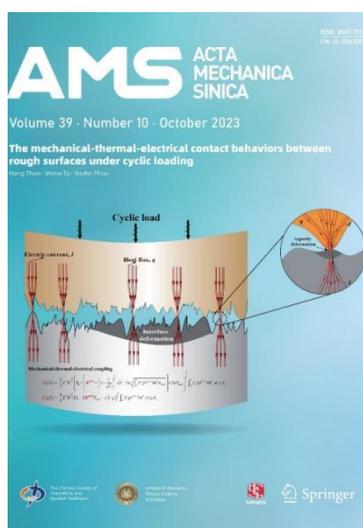


图 23a AMS 封面文章

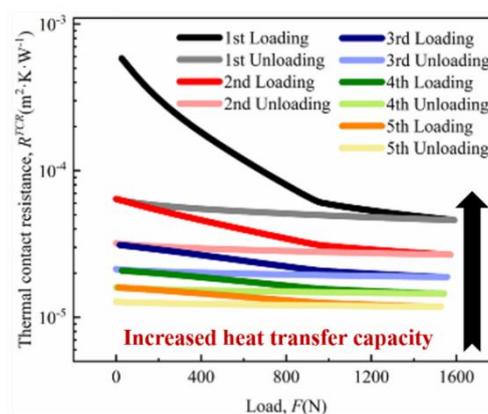


图 23b 循环载荷对接触电阻的影响

24. 刘聪青年教授研究了 YBCO 涂层导体横向脱层强度标准化方法适用性问题，国内循环比对实验验证了其可靠性。YBCO 高温超导涂层导体已成为制备高场超导磁体不可或缺的超导线材之一。然而，该导体应用过程中承受电磁力和热应力作用下会导致脱层。由于涂层导体是层状结构，横向脱层强度是评估涂层导体力学性质的一个关键参数。因此，提出一套标准的确定涂层导体的脱层强度的测试方法具有重要意义。在本研究中，我们报告了兰州大学、等离子体物理研究所和上海超导科技有限公司分别在室温和 77K 下进行的 YBCO 高温超导带材的脱层强度循环比对实验结果，通过标准化程序测定 YBCO 高温超导带材横向脱层强度。在室温和 77 K 下的脱层强度数据均显示出良好的一致性，相对标准不确定性分别为 2.22% 和 2.35%，这说明所建立的标准化程序是可靠的，可作为工程带材制造和应用磁体设计的参考。（Physica Scripta, 2023, 98: 085949）

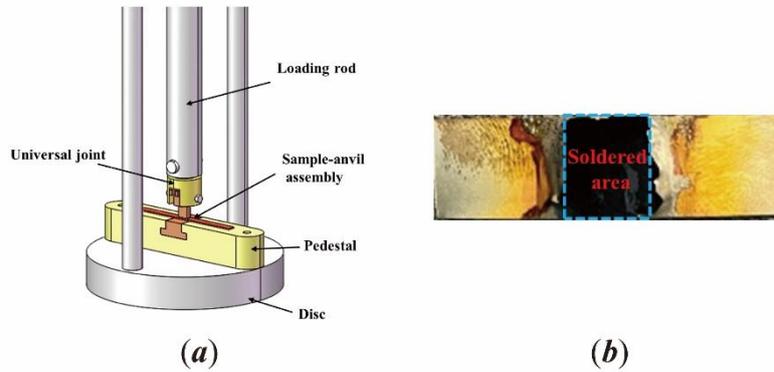


图 24a (a) YBCO 涂层导体脱层强度测试装置，(b) 涂层导体脱层后的界面。

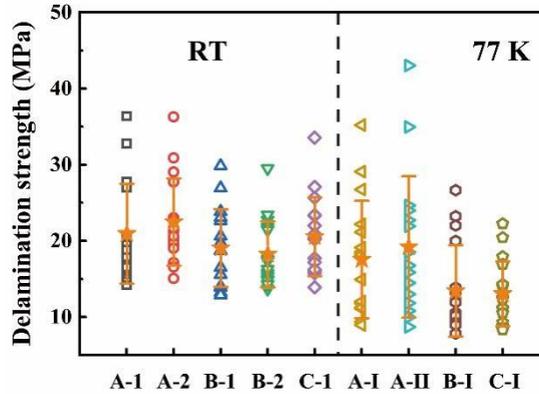


图 24b 由兰州大学标号 A，等离子体物理研究所标号 B，上海超导标号 C 测试 YBCO 涂层导体脱层强度的原始结果。

表 24 采用 99%可靠度判据获得的循环比对实验结果

温度	组	$R_c=99\%$ 对应脱层强度 (MPa)	σ_{AVG} (MPa) 均值	σ_{SU} (MPa) 不确定度	σ_{RSU} 相对标准不确定度
室温	A-1	13.91	13.51	0.30	2.22%
	A-2	14.33			
	B-1	12.54			

	B-2	13.49			
	C-1	13.30			
77 K	A- I	8.55	8.08	0.19	2.35%
	A- II	8.04			
	B- I	7.63			
	C- I	8.08			

25. 周俊副教授采用 2D/3D 混合模型以及 3D 均化数值计算模型，通过引入层间应力对热传导系数的影响机制，系统的研究了高温超导 YBCO/REBCO 磁体线圈的最小失超能 MQE、横向失超传播速度(NZPV)、环向失超传播速度受层间接触压力的影响规律。两种数值模型的计算结果均表明，层间压力可显著影响 MQE 数值以及横向失超传播速度(Transverse NZPV)，如图 25(a)、(b) 所示。这表明在高温超导磁体线圈中，MQE、横向 NZPV 沿半径方向存在明显变化。例如，工作温度为 45K 情况下，因为磁体工作电流相对较高，层间接触应力沿半径方向梯度较大（如图 25(c)所示），横向 NZPV 在 10 层 YBCO/REBCO 厚度范围内可存在明显变化，即，层间应力梯度可能对横向的失超传播产生显著影响。相对而言，环向失超传播速度对层间压力较为不敏感，如图 25(d)所示。该研究发表在 SCI 学术期刊 IEEE Trans. Applied Superconductivity (Vol.33, No.4, 2023)。

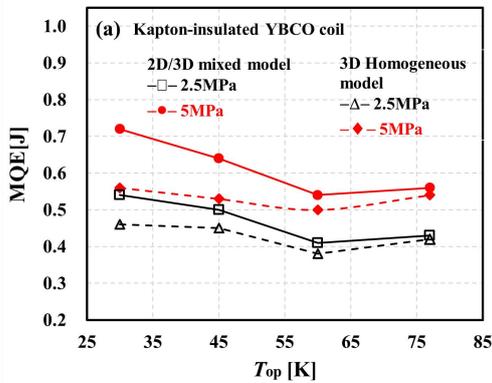


图 25(a) MQE 随层间压力的变化规律。

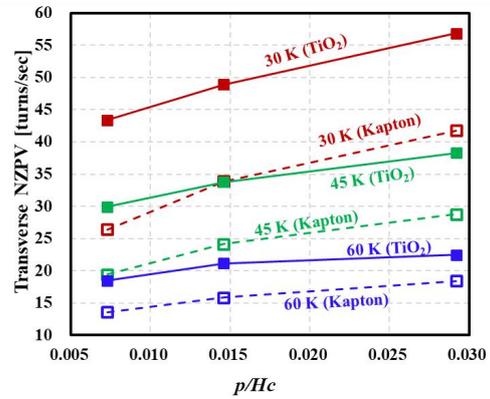


图 25(b) 横向 NZPV 随层间压力的变化规律，其中 p 为层间压力，Hc 为材料硬度。

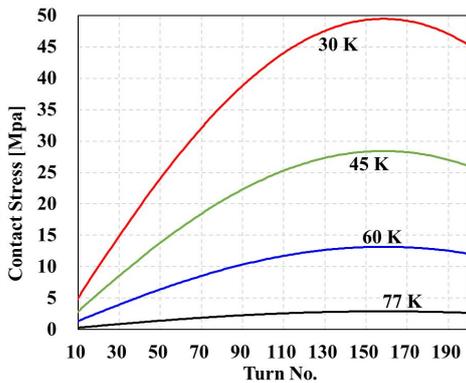


图 25(c) 不同工作温度（30-77K）情况下的层间压力分布。

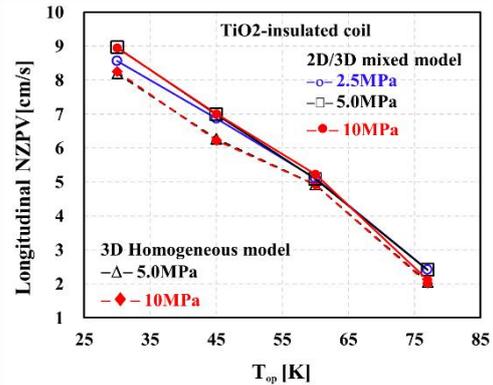


图 25(d) 环向 NZPV 随层间应力的变化。

26. 张彤炜副教授研究了凝灰岩基高性能建筑材料的制备方法。凝灰岩是一种天然岩石，主要由细小的火山碎屑组成，利用凝灰岩生产粗颗粒集料和砂子时，通常会产生 20 wt% 的粉末固体废物。本研究尝试凝灰岩基粘结剂（TBB）和基于凝灰岩和磨细高炉矿渣（GGBS）的粘结剂（T-GGBS）。TBB 最大的最大抗压强度、抗弯强度、杨氏模量和密度分别为 71.3、17.0、2100 MPa 和 1892 kg/m³，T-GGBS 分别为 73.3、15.8 和 1980 MPa 以及 1880 kg/m³（图 26a）。为了揭示其高性能的机理，我们对原材料和最终粘结剂进行了一系列微观结构表征。对于 TBB，凝灰岩粉末中不规则角状结晶成分的表面被部分溶解和活化、而未溶解的部分则作为骨架起着关键作用（图 26b）。随着 NaOH 浓度的增加，N-A-S-H 增加。对于 T-GGBS，无定形 GGBS 成分被完全溶解，因此主要产物从 N-A-S-H 凝胶变成了 N/C-A-S-H 交联凝胶等（图 26c）。然而，GGBS 的过量使用会消耗掉大部分 NaOH，但留给凝灰岩颗粒反应的 OH⁻ 却很少。因此，大部分凝灰岩颗粒只是充当惰性填料，而不是最终粘结剂中的反应物。（Cement and Concrete Composites, 2023, 139:105030）

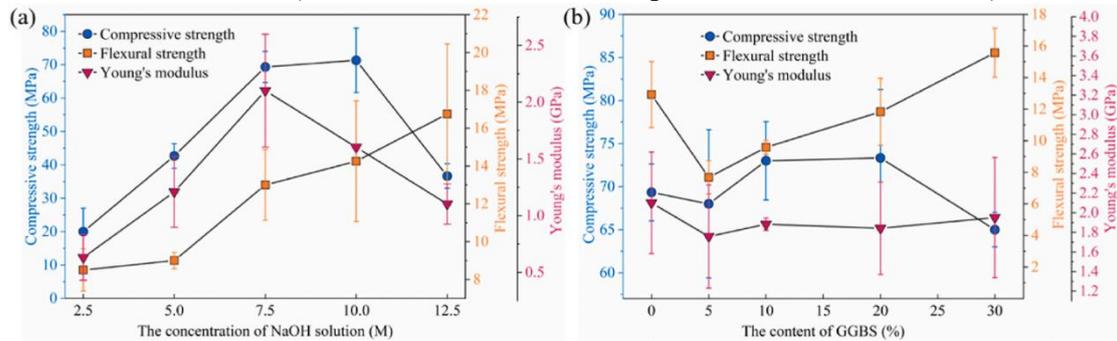


图 26a 凝灰岩基粘结剂的抗压强度、抗弯强度和杨氏模量：(a) TBB；(b) T-GGBS。

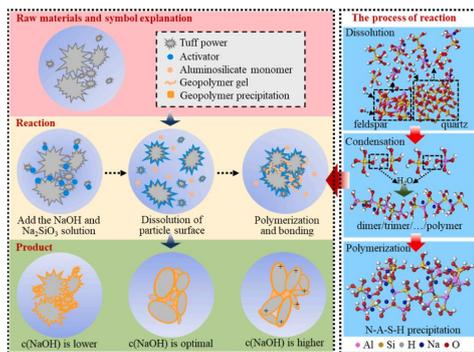


图 26b NaOH 浓度对 TBB 溶解和聚合的影响机理。

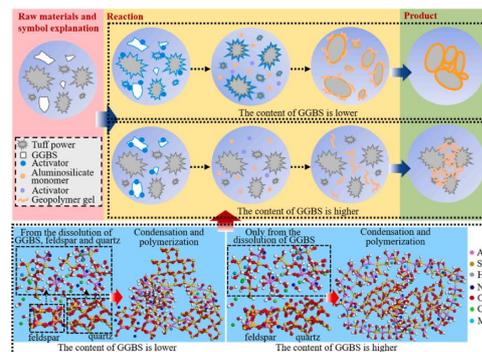


图 26c T-GGBS 中的反应过程以及 GGBS 含量对产物的影响。