

代表性成果

DAI BAI IO XING CHENG GUO

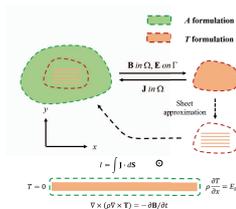
2022

兰州大学

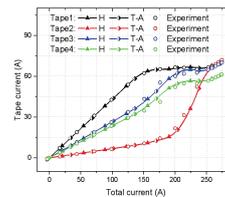


代表性成果

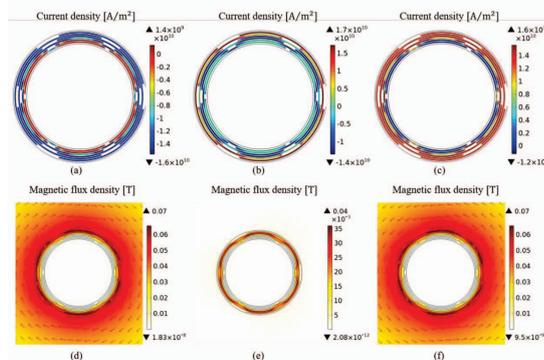
1. 周又和院士团队解决了 T-A 法难以求解超导结构中传输电流自由分配的难题，有效拓展了 T-A 法表征超导电磁场行为的适用范围。高温超导带材 REBCO 具有大宽高比的几何结构特征，通常采用薄带近似的 T-A 法对带材结构进行降维处理。T-A 方法耦合了磁场矢势 A 和电流矢势 T ，具有高的计算效率以及通用性等优点。然而，相比于以磁场强度为状态变量的 H 方法，T-A 方法仍难以求解一些特殊问题。例如：超导电缆中，匝间电流的非均匀分配问题以及闭环线圈中超导电流的衰减问题。上述两类问题的共性是超导带材中的净电流是一个未知变量，使得 T 方程的狄利克莱边界条件难以确切给出。我们利用电磁场的波印亭理论，将边界电磁能流的贡献处理为 T 和 A 公式间新的耦合项，并通过 T 方程的诺伊曼边界表示。数值结果表明，通过补充诺伊曼边界条件的方式，T-A 方法的应用范围得到有效扩展。同时，上述修正方法适用于 T-A 方法的均匀化模型，块体模型以及三维的薄带模型，表明该修正方法的通用性。(S. J. Wang, H. D. Yong, Y. H. Zhou, *Superconductor Science and Technology*, 2022, 35: 065013)



修正 T-A 法的计算流程图

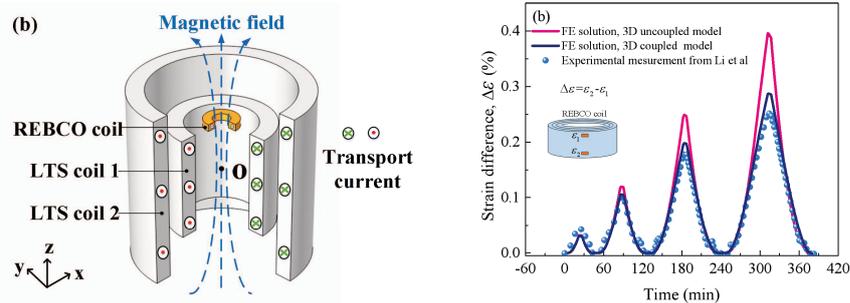


理论与实验结果对比



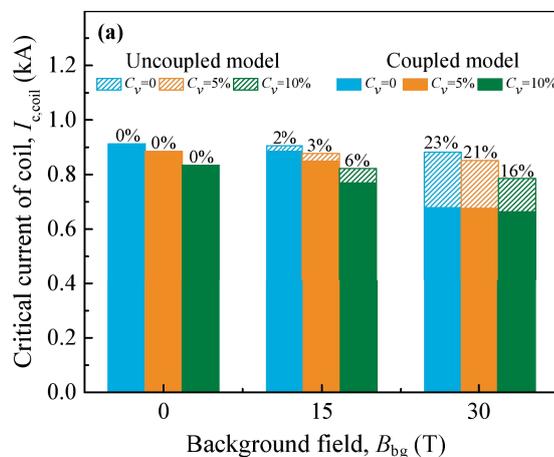
超导结构中的电流密度及磁场分布图

2. 周又和院士团队建立了三维超导线圈的力-电耦合数值模型，预测结果有效表征了实验测试结果。由于超导磁体处于多场相互作用的极端使役环境中，强磁场和大电流产生的结构变形反过来会影响超导结构的无阻载流性能，使得超导磁体在未达目标磁场前而预先发生失超、机械损伤等若干故障。我们基于耦合的超导电磁方程和弹塑性力学方程，建立了屏蔽电流作用下 REBCO 线圈的力-电双向耦合的三维数值模型，所得数值结果有效减小了单向模型与实验结果的误差。进一步考虑了 REBCO 超导带材临界电流沿着长方向分布的不均匀性，给出了励磁加载过程中超导线圈结构变形及电磁响应的变化特征。数值结果表明带材局部临界电流不均匀性对 REBCO 线圈的载流性能具有重要影响。当考虑局部临界电流不均匀性时，线圈临界电流会相对减少。另外，由于高场和屏蔽电流作用产生的高应变同样会导致超导线圈的临界电流衰退。(M.D. Niu, H.D. Yong, Y.H. Zhou, *Superconductor Science and Technology*, 2022, 35: 054009)



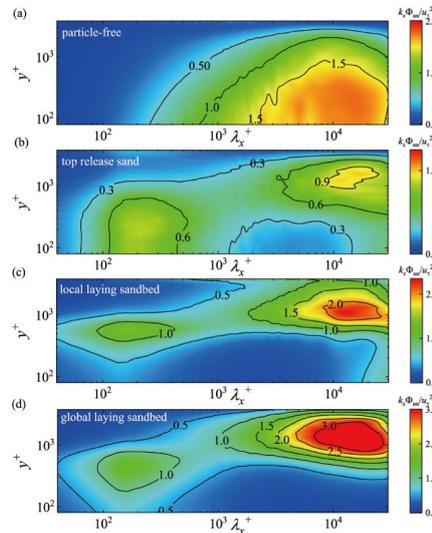
超导线圈模型示意图

理论与实验结果对比



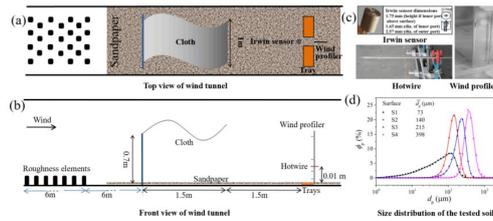
不同外场下临界电流的退化

3. 郑晓静院士团队揭示了颗粒及其近壁运动对湍流统计量和结构特征的影响：颗粒两相流，尤其是含可蚀床面的两相流中，存在显著的颗粒近壁运动，不仅包括颗粒与壁面的碰撞反弹，还包括冲击溅起。因此，湍流除了受颗粒的影响外，还受到颗粒近壁运动的影响。然而，尚未见考虑颗粒在可蚀床面上的近壁运动对两相流影响的研究，更没有细化颗粒的近壁运动中，反弹和溅起分别对湍流产生的影响。为了揭示这种差异，本项目通过大视域 ($6.5 \delta \times 0.8 \delta$) PIV 技术，在摩阻雷诺数 $Re \tau = 3950$ 的相同来流情况下，分别进行单相流、顶部投沙、风洞前端铺沙和整体铺沙实验。通过对比不同情况下的湍流统计量，发现颗粒的碰撞反弹和冲击溅起使流体速度减小，但促进了“上抛-下扫”循环，增强了湍流动能和雷诺剪应力的强度，并使更远离壁面处的超大尺度结构含能更为显著（见图 c 和 d）。这与粒子对湍流的影响不同，即，颗粒在重力沉降过程中使流体加速，抑制“上抛”和“下扫”事件的强度和概率，从而抑制湍流动能和雷诺剪应力，并通过减小结构尺度使动能更多的集中在小尺度湍流运动（见图 a 和 b）。

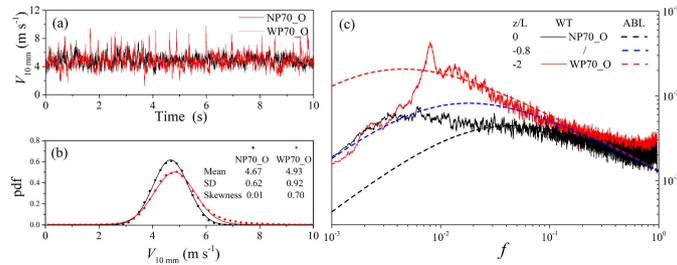


不同工况下流体流向脉动速度的湍流预乘能谱图：
(a)净风，(b)投沙，(c)前端铺沙，(d)整体铺沙

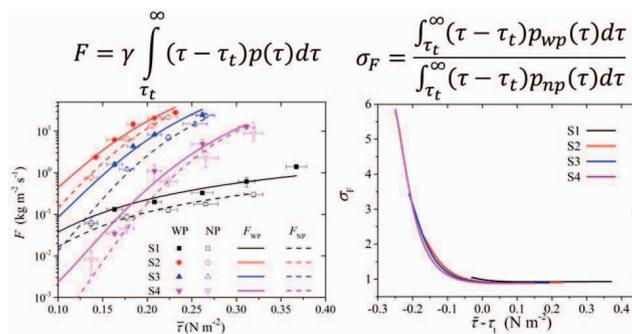
4. 黄宁教授团队基于新的风洞实验技术模拟和测试了人工扰动对边界层流动状态的影响，以及相应条件下地表剪切力分布及地表颗粒流体释放的定量测量与分析。为了验证大涡在颗粒风力夹带中起主要作用的假设，我们进行了风洞实验以测量不同流动条件下地表颗粒的流体夹带率。风洞流动通常是中性分层的，我们提出了一种新的风洞模拟技术，即通过布置一块随机飘动的布来产生类似于对流涡流的边界层流动，在这里称为准对流湍流。结果表明，对于给定的平均流速，与中性流条件相比，准对流湍流增加了地表剪切应力的均值，并改变了其概率分布，从而大大增强了沙尘颗粒的流体夹带。风洞实验证实了我们的假设，也解释了大涡对流体夹带和运输很重要的力学机理。(Atmospheric Chemistry and Physics, 2022, DOI: 10.5194/acp-22-9525-2022)



风洞实验布置

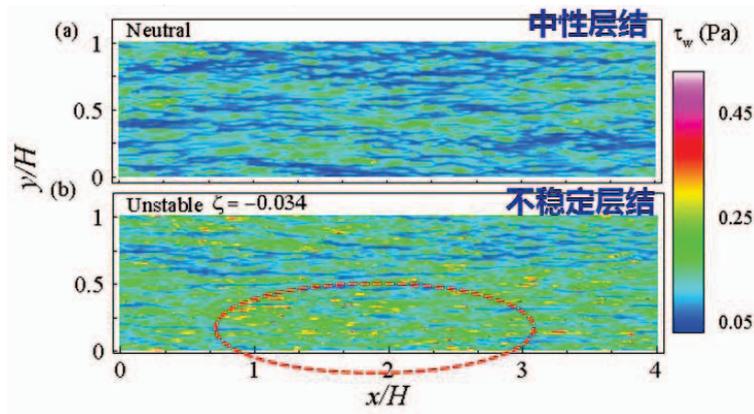


(a) 10mm 处水平风速, (b) 10mm 处水平风速的概率密度, (c) 10mm 处标准化功率谱与大气边界层观测结果的对比

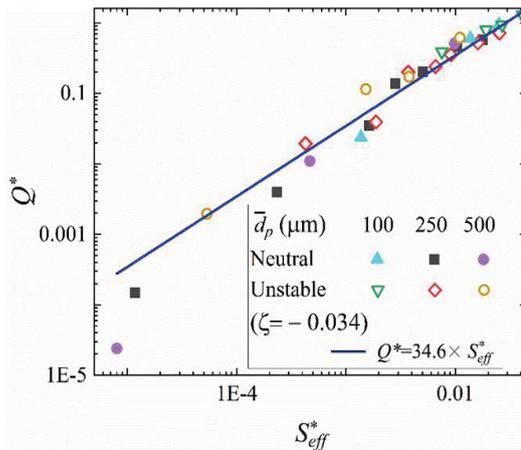


(a) 有无强迫扰动的流体夹带释放量估算 (b) σ_F 与有效地表切应力关系

5. 黄宁教授团队定量表征不稳定大气层结环境下近地颗粒输运规律，给出了不稳定层结作用考量的判定阈值。风沙运动频繁发生在大气层结不稳定的条件下，目前关于大气稳定性对沙尘输运的影响多为定性研究。我们基于 ARPS (Advance Regional Prediction System) 模式的大涡模拟方法，耦合拉格朗日输沙模型与湍流边界层流场，综合考虑粒-床碰撞过程以及颗粒与湍流的耦合作用，建立了风沙流模拟的热-动力学模型。模拟结果表明，忽略不稳定层结的作用，对于输沙率的误差高达一个量级；当 $w^{*2} < 0.79u_{in}^{*2}$ 时，不稳定层结对输沙的作用可以忽略，反之则必须考虑 (Science Bulletin, 2022, DOI: 10.1016/j.scib.2022.05.011)



瞬时地表剪切应力



输沙率与风速的关系

线性律

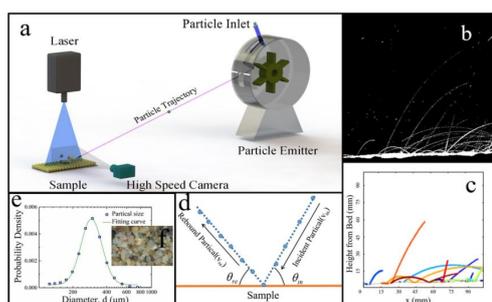
$$Q^* = C * S_{eff}^*$$

$$S_{eff}^* = \tau_{eff} / (\rho_p - \rho) g \bar{d}_p$$

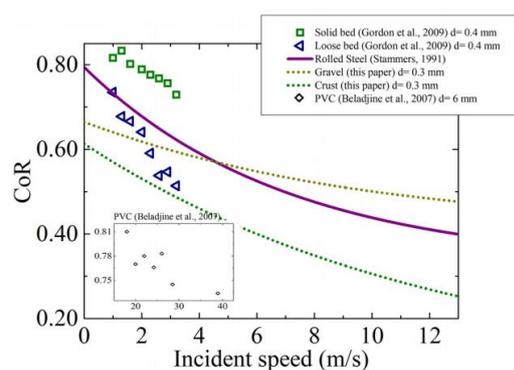
$$\tau_{eff} = \alpha u_{in}^{*2} + \beta w^{*2} + \gamma$$

0.02~0.05

6. 黄宁教授团队基于粒床碰撞实验给出了适用于戈壁地表的击溅函数, 完善了戈壁风沙流研究的基础理论。迄今为止, 对戈壁的风沙运动仍缺乏深入的了解和定量描述, 特别是沙粒与富含砾石和结皮的地表碰撞过程。本研究采用高速摄像机记录了野外采集的天然沙颗粒与戈壁表面样品的碰撞过程, 并采用后处理方法重建了颗粒的统计反弹过程。结果表明, 沙粒与砾石和结皮的恢复碰撞系数服从对数正态分布, 并随入射颗粒速度的增加而减小。此外, 反弹角也服从对数正态分布, 其中入射角是一个关键因素。戈壁表面粒床碰撞过程的反弹性质与松散沙床表面的情况有本质区别。本研究为了解戈壁表面的击溅过程和沙尘暴提供了一个新的视角。(Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2022, DOI: 10.1029/2021JD035766)

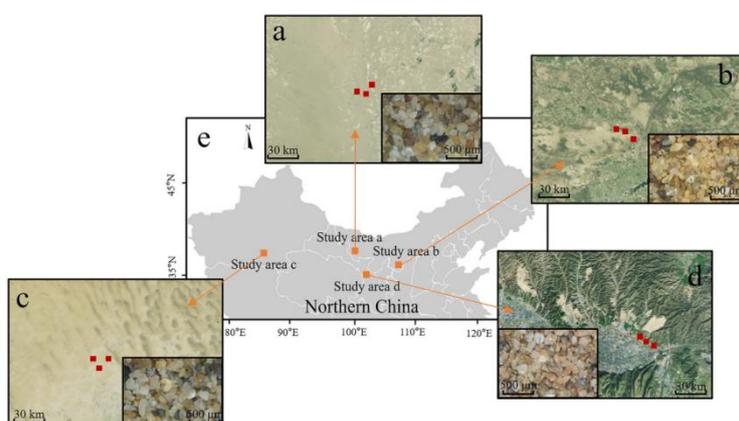


实验设置与图像处理方法

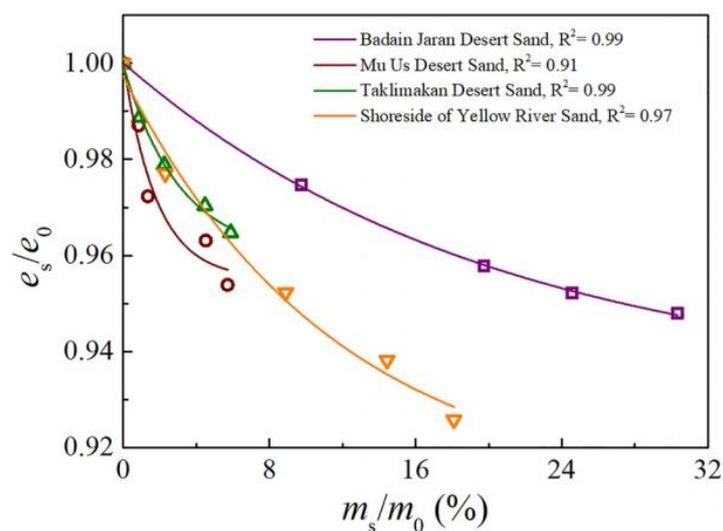


反弹恢复系数随沙粒入射速度的变化

7. 黄宁教授团队基于碰撞实验发现沙粒表面薄层剥落可增大输沙率的新现象，给出了沙粒恢复系数随粒径和覆盖层质量变化的定量关系。类地行星的物理化学环境可以导致沙粒的表面形成一个可剥离的覆盖层，我们基于碰撞实验研究了覆盖层对沙粒碰撞和风沙运输的影响。统计分析了沙粒在不同覆盖层下的运动特性，并给出了恢复系数与覆盖层质量之间的定量公式。将该结果进一步嵌入风沙输运模型，并进一步评价覆盖层对输沙通量的影响。考虑到沙粒覆盖层的普遍性，本研究提出的方法可以更准确地模拟地球、火星等类地行星上的风沙运动。（*Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, DOI: 10.1029/2022JE007267）



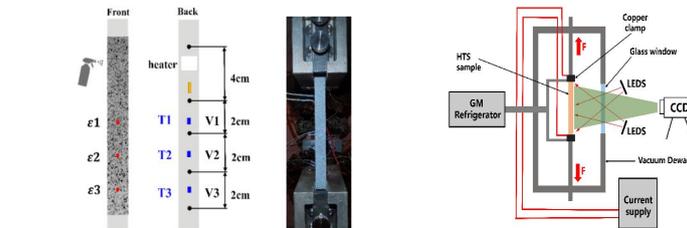
沙粒样本采集区域



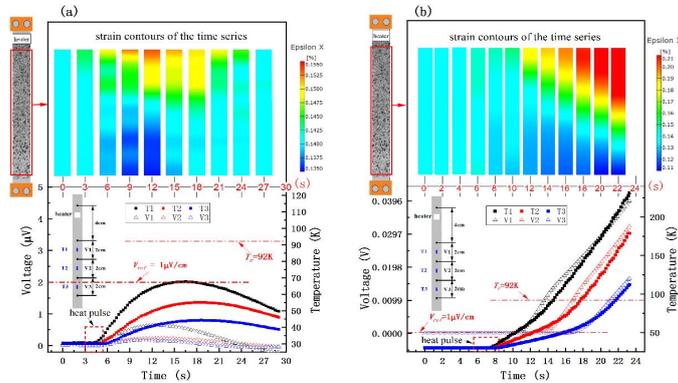
沙粒碰撞恢复系数随覆盖层质量的变化

8. 王省哲教授团队可视化、非接触、全场高温超导材料失超的应变检测新方法。

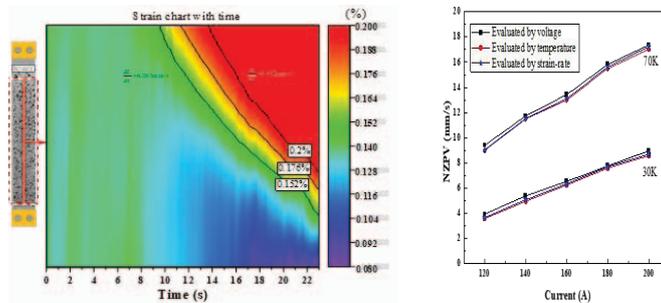
为解决超导体高场极端环境下失超难题，超导力学研究团队基于自主研制的低温可视化多场测试平台，提出了低温下的数字图像相关法（DIC）光学非接触、全场失超检测新方法。首次实现了高温超导带材热应变全场的非接触观测，可视化应变云图直接表征了失超发生及传播全过程，且直观获得了传播速度图。新方法不仅有助于高温超导结构失超机理的科学解释，并为大型磁体失超安全工程检测提供了全场测量解决手段等。该研究成果发表在国际超导技术领域 Top 期刊“Supercond. Sci. Techn.”，审稿人评价为“...是一种有意义的高温超导材料失超检测新方法...”（Wang S, Guan M, Chen J, Wang X, Zhou YH. Supercond. Sci. Techn., 2022, 35(2): 025010.



超导测试样品和低温可视化多场测试平台

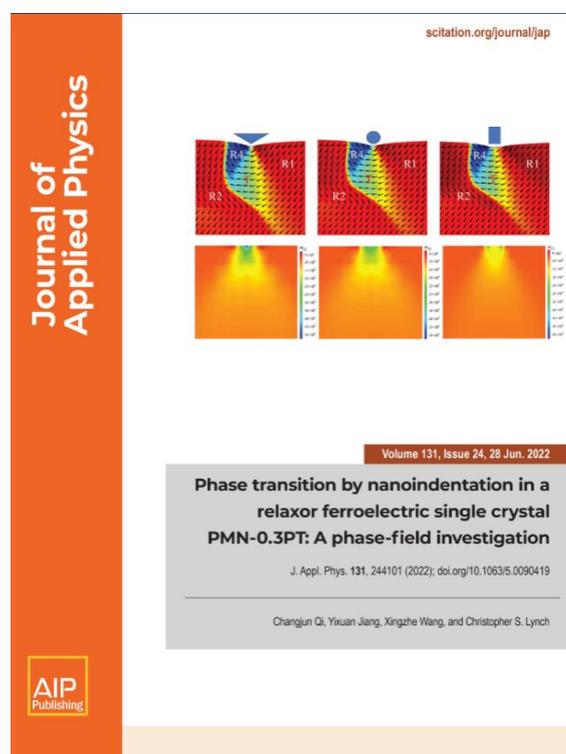


YBCO 超导带材失超稳定性演化：(a)未发生失超过程；(b)失超发生过程



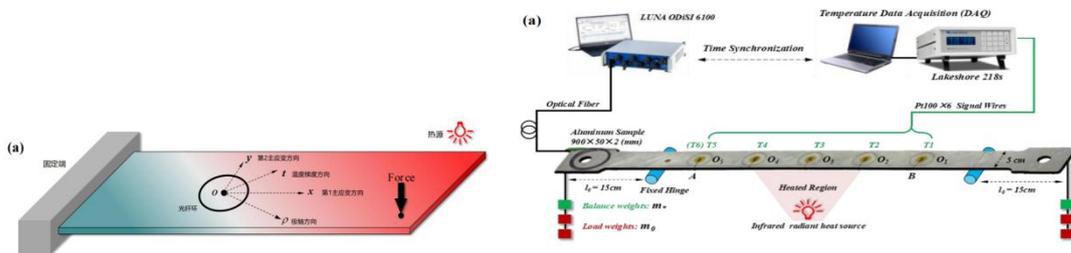
失超传播速度的直观检测和估算

9. 王省哲教授通过相场方法揭示了弛豫铁电 PMN-PT 纳米压痕下 **pop-in** 新现象与力学诱导局部 **R-T** 相变间的内在关联。铁电智能器件的微型化、多功能化涌现出更多新问题和挑战性的课题。对于力学诱导的，特别是局部载荷（如纳米压头）作用下的非均匀力场所诱发的电畴微结构演化以及不同铁电相间转变机理等目前尚缺乏作用机制的揭示。为此，王省哲教授、蒋一萱副教授的电磁固体力学研究组针对弛豫铁电材料纳米压头作用下的局部非均匀载荷情形和 **pop-in** 新现象，建立了表征力诱导电畴翻转和相变演化的相场模型，揭示了相变机制及微结构演化过程。结果表明，压头非均匀加载诱导了铁电材料的局部 **R-T** 相变，呈现出载荷-位移曲线中的 **pop-in** 现象；正应力导致 **T** 相形成，剪切应力促使了电畴翻转。进一步研究揭示了不同压头形状及尺寸下的相变特征以及外电场和力学组合加载实现相变调控等功能。该研究进展发表在应用物理权威期刊“*Journal of Applied Physics*”上，并入选 *Featured Article* 和封面论文（图）（Qi C, Jiang Y, Wang X, et.al., *J. Appl. Phys.*, 2022, 131(24): 244101）。

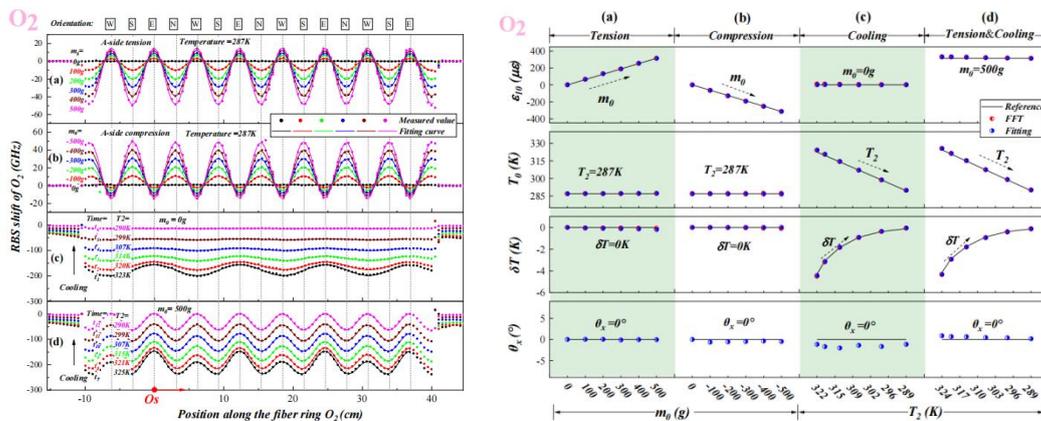


弛豫铁电纳米压痕下 **pop-in** 新现象的微观机制揭示论文
入选 JAP 第 131 卷 24 期封面论文

10. 王省哲教授基于分布式光纤环的非均匀应变场、温度场同步解耦测量新方法。超导磁体在降温、失超、回温等测试过程中涉及大幅变温和热应力叠加的测量工况，OFDR 光纤面临应力和温度的交叉敏感问题，而磁体内部空间紧凑狭小以及强电磁干扰使得传统的解耦或补偿方法严重受限。针对这一难题，王省哲教授团队提出了一种基于分布式光纤圆环构型布线的同步解耦测量新方法，通过对光纤环的混合信号进行谐波分析，可实现单一光纤传感器对温度、应变场共存情形下的大小、梯度以及方向的实时解耦测量，且对非均匀场同样有效（图）。这一测量新方法还可通过光纤环阵列式布线，实现大区域、高梯度场的同步测量，极具潜在应用价值，正在拓展到低温多场环境中的解耦测量中(图)。这一新测试方法发表于国际实验力学权威期刊“Exp. Mech.”，审稿专家一致评价为：“...所提出的光纤测量方法是一极具价值和印象深刻的技术”；“...这一解耦和同步测量非均匀应变和温度场的新方法，新奇地实现了温度和力学共同作用下的解耦测量”（Yang T, Wang X. Exp. Mech., 2022, 62, 1531-1552）。

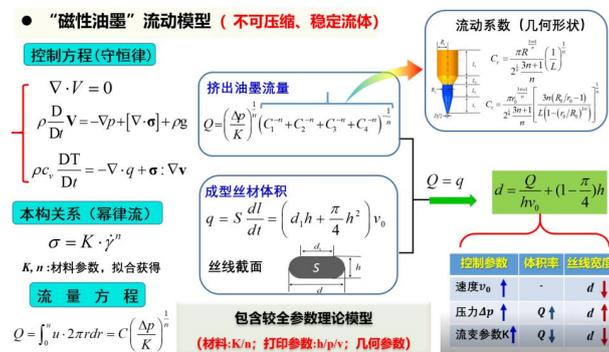


基于分布式光纤环的非均匀温度、应变场同步解耦测量

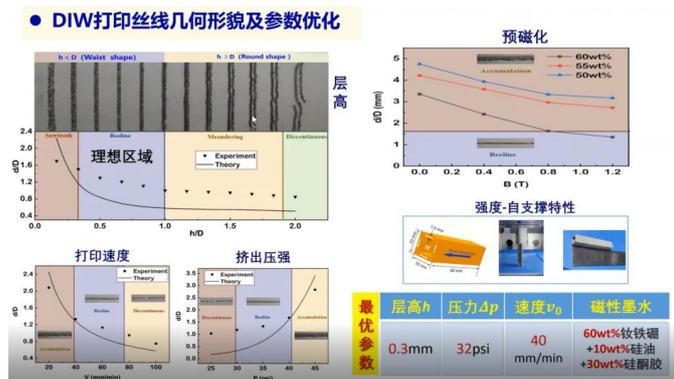


光纤环力热解耦测量实验验证结果

11. 王省哲教授团队实现了“磁畴微元”直写式 3D 打印磁敏软材料结构的可编程序设计、制备及力磁耦合行为分析。王省哲教授团队基于理论分析和实验测试，开展了“磁性油墨”制备关键参数选择与性能分析，以及“直写”磁敏丝材的质量、磁致变形特性的系统研究。结果表明：所制备的“磁性油墨”具有良好流变性、高剩磁特性，可适用于 DIW；建立了包含打印层高和喷嘴尺寸、打印速率等关键参数的一般化流动理论模型（图），预测结果与实验吻合较好，可直接指导打印参数选择，避免了试错法耗时和参数选择的盲目性（图）。基于优化参数，成功制备了几类具有特定微观磁畴排列的磁敏杆状和薄片结构。进一步的理论与实验研究了揭示直写、编程式磁敏结构的非接触远程可控、可逆多模态、大变形等力磁特性。本研究可为深入理解和分析具有特性磁畴分布的磁敏结构打印-结构-性能相关性、个性化优异力磁性能的磁敏结构定制具有指导意义。相关研究结果发表在 *Smart Mater. Struct.* 期刊（Han, et al. *Smart Mater. Struct.* 2022,31, 115015），并在力学大会上做特邀报告（王省哲，中国力学大会，成都，2022 年 11 月 4-10 日）

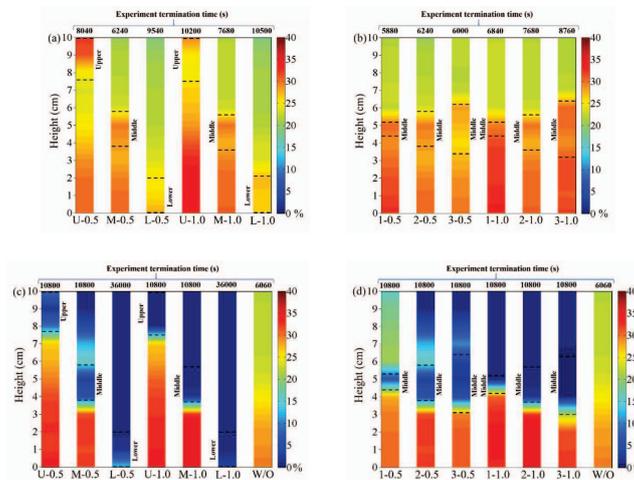


直写式磁敏丝材的理论模型

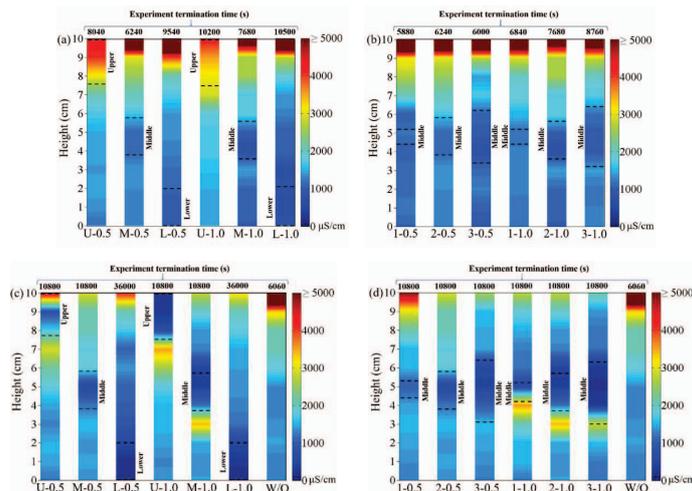


打印参数及材料参数对挤出丝线直径的影响（理论预测与实验结果）及确立最优参数

12. 谌文武教授团队研究多种因素对聚乙烯醇 (PVA) 疏水垫层抑制水盐迁移效果的影响, 提出防治土遗址掏蚀病害的新方法。成果研究了垫层厚度、垫层位置、盐溶液种类、PVA 含量以及处理温度对疏水垫层效果的影响, 讨论 PVA 疏水垫层抑制水盐迁移的有效性, 其有望成为缓解土遗址掏蚀病害发育的有效手段。试验结果表明, 抑制水盐毛细上升作用源于疏水性而不是孔隙尺寸变化, 垫层厚度对水盐毛细上升影响较小, PVA 含量和垫层位置往往起决定性作用 (图)。该研究为 PVA 垫层的铺设提供合理建议, 为未来垫层施工提供技术指导。(Journal of Hydrology, 2022: 127806.)

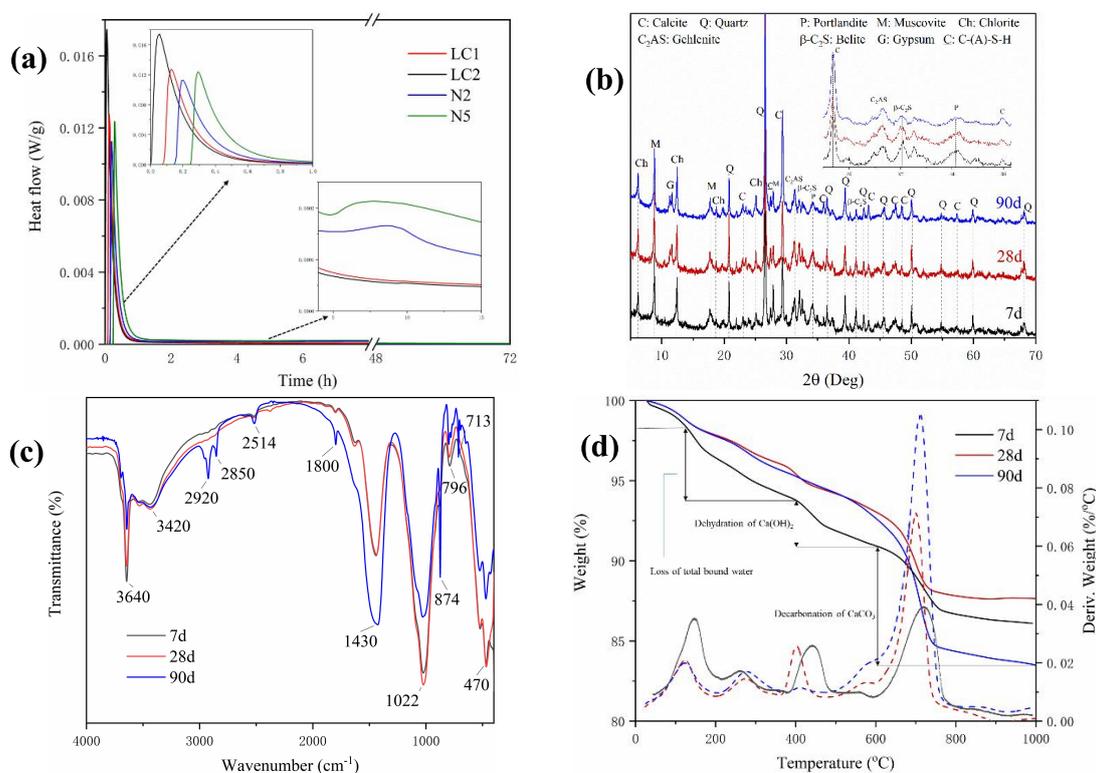


在硫酸钠溶液中试验结束时含水量分布, (a) 位置-100°C, (b) 厚度-100°C, (c) 位置-20°C, (d) 厚度-20°C



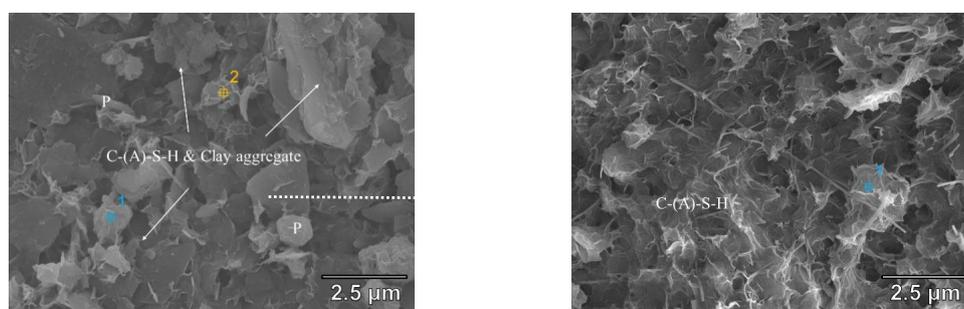
在硫酸钠溶液中试验结束时电导率分布, (a) 位置-100°C, (b) 厚度-100°C, (c) 位置-20°C, (d) 厚度-20°C

13. 谌文武教授团队研究了烧料礅石与欧洲天然水硬性石灰 (NHL) 的强度、水化特性及水合物的微观结构差异。研究成果通过对不同类型的水硬性石灰材料的宏观力学特性测试, 一定水灰比下水化过程中水化热测定, 晶体化学, 热化学表征 (图), 以及生成的水合物的孔隙、形貌的检测 (图), 系统全面的分析了烧料礅石与 NHL 的水化过程, 并解释了产生差异的原因。该研究为水硬性石灰材料在岩土质文物保护修复中的应用提供了科学的理论依据。(Construction and Building Materials, 2022.126606. doi: [https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat))



试样水化过程表征

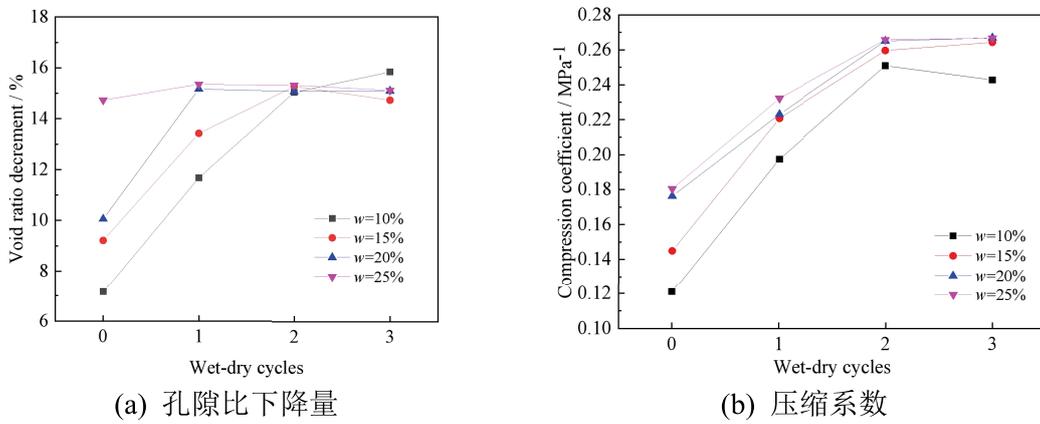
(a) 水化热 (b) 晶体相变化 (c) 化学键及官能团变化 (d) 差热分析



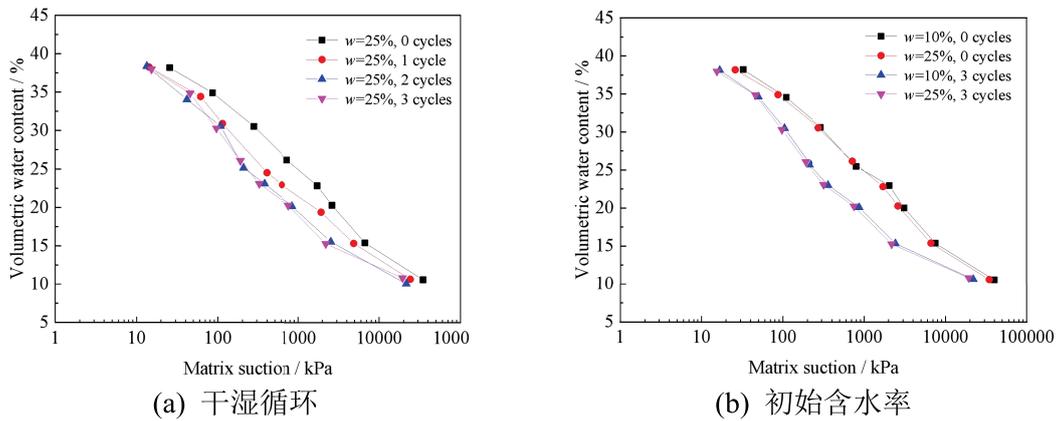
试样的 SEM-EDS 分析

(a) 烧料礅石试样 (b) NHL 试样

14. 张虎元教授团队揭示了干湿循环和初始含水率对原状 Q₂ 黄土的压缩变形和压缩系数的影响。基于宏观层面的结构参数和微观层面的微观形貌和孔径分布特征，阐述了原状 Q₂ 黄土结构性变异机制。成果表明，干湿循环次数和初始含水率与原状 Q₂ 黄土的压缩变形和压缩系数呈正相关关系，但是与结构性参数和持水性能呈负相关关系，在干湿循环下 2 次循环时这些参数都趋于稳定（图）。随着初始含水率的增大，干湿循环对压缩变形、结构性参数和持水性能的敏感度逐渐降低（图）。且干湿循环逐渐增大时，初始含水率对压缩变形、结构性参数和持水性能的敏感度逐渐减小。（Soils and Foundations, 2022, 62: 101165.）

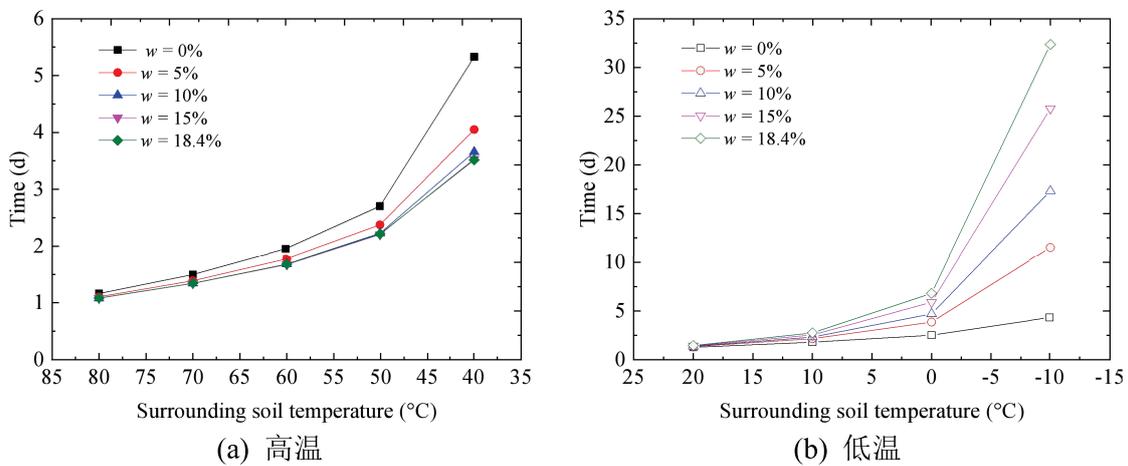


原状 Q₂ 黄土压缩性和干湿循环的关系



原状 Q₂ 黄土土水特征曲线

15. 张虎元教授团队测量了膨胀古土层中隧道的围岩和内墙的温度分布, 利用数值模型比较了施工过程中围岩高、低温的时空分布, 探讨了施工过程中围岩温度的敏感性。结果表明, 在厚古土层中隧道开挖中, 随着含水率的减小, 围岩温度和高温膨胀的持续时间在高温的喷射混凝土的影响下逐渐增大, 但是围岩温度和进入零下冻胀的时间在低温的空气温度的影响下逐渐减小(图)。在分析围岩温度变化到特定数值所需时间中, 当数值为 80 和 0、-10°C 时应优先考虑含水量的影响, 当数值为 60°C 和 70°C 时应优先考虑空气温度的影响(表)。(Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81: 518.)



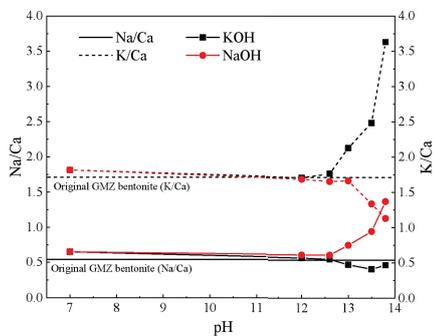
不同含水率围岩温度与时间的关系

围岩温度与各影响因素的相关性分析

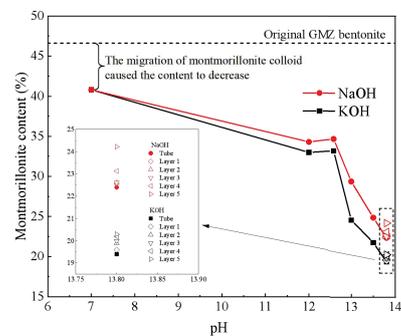
围岩温度 (°C)	偏相关系数		
	含水率	空气温度	喷射混凝土温度
80	-0.903	-	0.782
70	-0.895	0.948	0.938
60	-0.861	0.956	0.953
50	-0.735	0.922	0.935
40	-0.561	0.699	0.869
20	0.202	0.953	0.944
10	0.941	0.966	0.967
0	0.997	0.970	0.956
-10	0.998	-	0.657

注: “-”表示无数值。

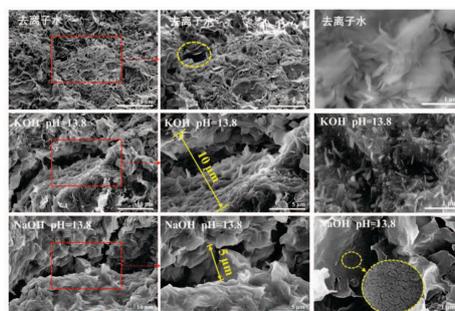
16. 张虎元教授团队模拟碱溶液在高庙子膨润土中的扩散过程,分析蒙脱石的化学溶蚀机理,获得矿物相变的证据。高放废物地下处置库运营过程中,衬砌混凝土在地下水作用下产生的强碱性溶液,会扩散进入膨润土缓冲屏障,长期将使屏障性能发生退化。本研究采用不同 pH 值的 KOH 和 NaOH 溶液模拟衬砌混凝土溶出的碱性溶液,模拟研究强碱性溶液缓慢扩散对高庙子膨润土矿物的影响。XRF 试验结果表明(图),当碱溶液的 $\text{pH}>12.6$ 时,膨润土与碱溶液开始发生离子交换反应,且膨润土中 Si 元素的含量开始减少,即含 Si 矿物蒙脱石、石英、方石英等发生了溶解。XRD 试验结果表明(图),蒙脱石含量随碱溶液 pH 值增大而减少,沿着扩散层方向溶蚀逐渐减缓。SEM 试验结果表明(图),在为期一年的接触扩散试验中, $\text{pH}=13.8$ 的碱溶液扩散深度超过 7.5mm,且与 KOH 溶液反应后,膨润土中产生了许多不规则的细小的伊利石晶体。与 NaOH 溶液反应后并未观察到新矿物的生成,但是在膨润土表面发现许多微小的裂隙,即表明蒙脱石的溶解是从颗粒边缘溶蚀开始的。随着碱溶液对蒙脱石的不断溶蚀,使得膨润土失去完整性,产生的裂隙又成为新的水力通道加速溶蚀进程。(岩土力学, 2022, 43:11)



XRF 试验结果



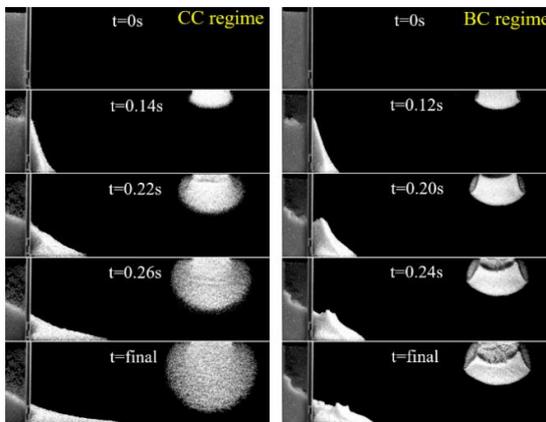
XRD 试验结果



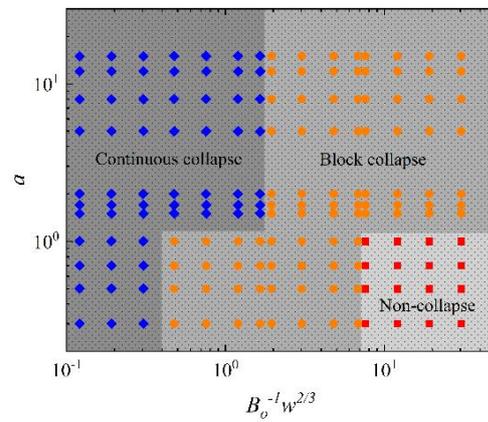
膨润土的扫描电镜照片

17. 王等明教授团队研究了钟摆状态下湿颗粒坍塌后的非通道化流动行为, 通过引入表征间隙液体诱发的系统粘聚效应的无量纲参数, 建立了描述湿颗粒坍塌后沉积形态的广义标度律。间隙液体的存在会明显影响颗粒物质的宏观力学行为, 尤其是其瞬态流动行为, 其中不同量的间隙液体诱发的系统粘聚效应的定量表征是一个关键问题。该成果基于湿颗粒非通道化坍塌流动的实验构型, 发现了不同的颗粒坍塌流动模式, 如图所示, 其本质上是由于颗粒间毛细管力对不同粒径颗粒产生了程度不同的粘聚效应所导致。为此, 我们引入了一个无量纲参数来定量表征湿颗粒系统内的宏观内聚力, 并在包含该参数和柱体纵横比的相空间中给出了湿颗粒坍塌流动模式的状态相图, 如图所示, 在此基础上, 尝试建立了包含这两个相关变量的沉积形态广义标度律。当系统中粘聚效应逐渐弱化时, 该标度律可退化为干颗粒情形下的结果, 这意味着提出的广义标度律可以用来描述更为复杂的密集颗粒流特征。

(Physical Review Fluids, 2022, 7: 084302)

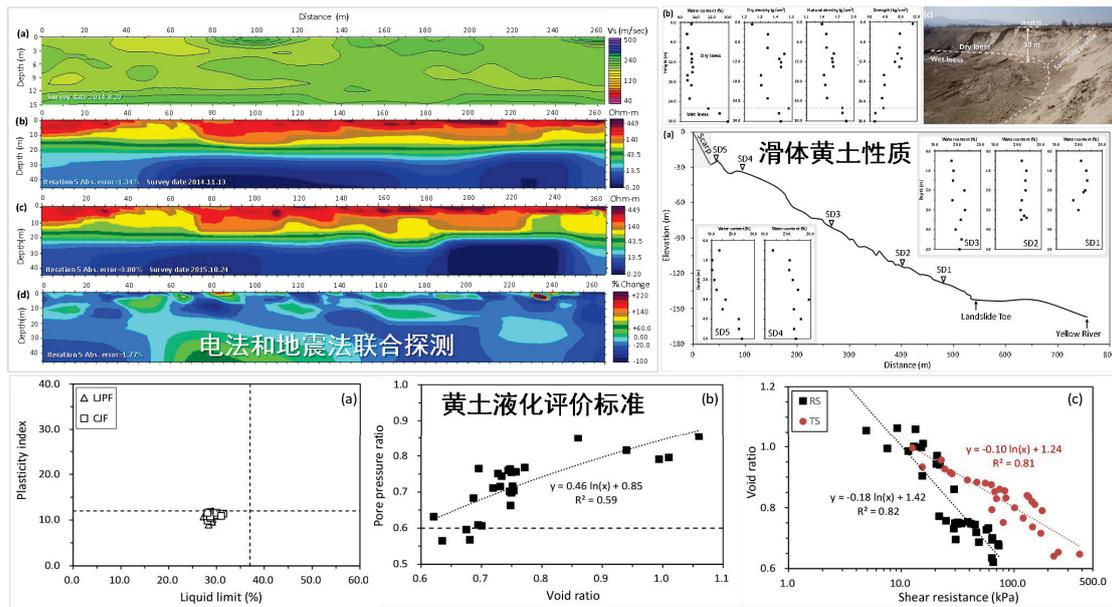


两种典型的湿颗粒坍塌流动模式



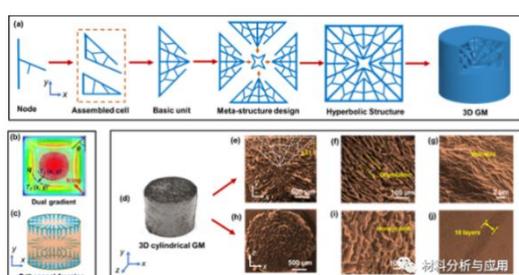
湿颗粒坍塌流动模式的状态相图

18. 张帆宇教授团队研究成果：黑方台被称为中国黄土滑坡博物馆。在黑方台的边缘，灌溉引起的黄土流滑频发，造成了 42 人遇难和重大的经济损失，诱发了重大的生态环境问题，如土壤侵蚀率增加等。然而，这类灌溉引起的黄土流滑频发的原因和流动性尚未确定。本研究以三个典型的黄土流滑案例为对象，基于电阻率层析成像法（ERT）和多道面波法（MASW）进行了联合地球物理探测，并在现场采样测试了黄土基本特性，同时利用不排水环剪仪测试了饱和黄土的剪切特性。地球物理探测结果和现场黄土特性表明，水文地质条件是黄土流滑频发的关键因素；饱和黄土的液化剪切行为控制了黄土流滑破坏后的流动性；液化敏感性的快速评价标准可以更好地理解黄土流滑的动力学机制。本研究为理解细颗粒土远距离流滑的机理以及此类滑坡的防灾减灾提供了参考。（Engineering Geology,2022, 302: 106619）

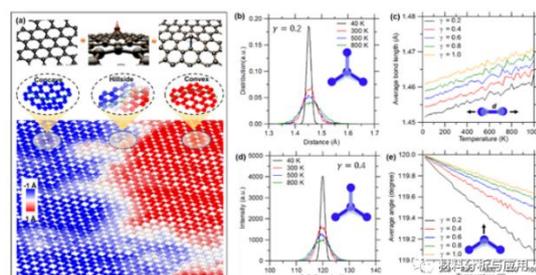


灌溉诱发黄土流滑水文地质条件和黄土液化评价标准

19. **张强强教授团队研究成果：**超构材料通过多尺度人工设计结构设计，来克服物理性质间互斥特性，超越传统以材料组成或化学修饰改性研究思路。针对传统碳多孔材料长期面临的力热性能难以兼具对立矛盾，张强强研究团队提出了一种具有可调负热膨胀（NTE）行为的三维石墨烯超材料（GM），在正交双温度梯度的操纵下，通过双曲线取向的冻结过程来制备 GM。由于固有的微纳褶皱形态和超大的长宽比，2D 石墨烯基元面内恢复力远高于面外。作为构建三维 GM 的基本组装单元，通过分子模拟和原位扫描电子显微镜实验观察，验证了石墨烯薄片的表现热致收缩变形。相关研究成果以题为“Lightweight 3D Graphene Metamaterials with Tunable Negative Thermal Expansion”发表在材料科学领域顶级期刊 *Advanced Materials*, 2022, 2208562. (IF=32.086)。该具有可调控热膨胀特性 3D GM，在保护表皮、热致驱动器、智能切换器和填料等应用方面具有广阔的潜力。

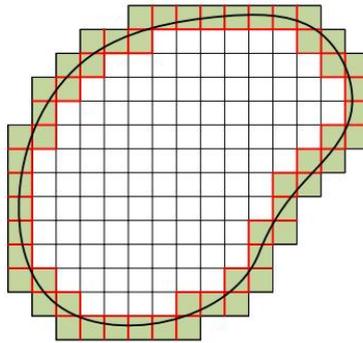


3D GM 的设计和构筑

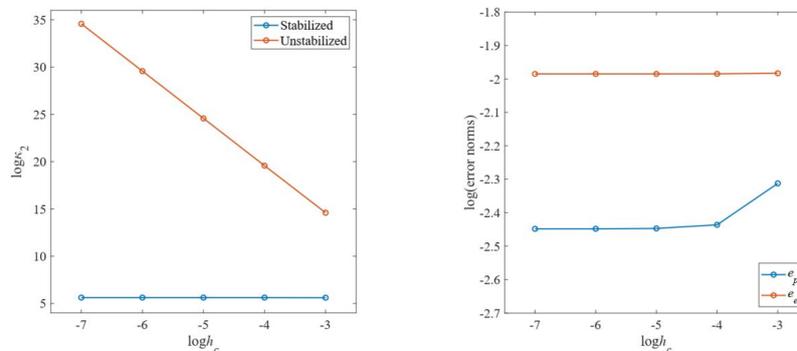


2D 石墨烯热致收缩机理

20. **刘治军研究员研究成果：**传统有限元的网格必须与物理区域相匹配，在实际问题求解中，复杂几何模型给有限元的前处理带来了巨大挑战。在处理复杂模型时，非匹配有限元法将物理域嵌入到一个相对简单的网格中，可以替代标准有限元法。然而，非匹配有限元方法在水力耦合问题中的应用非常少，本项研究围绕这方面展开。我们基于 Nitsche 法建立了一个水力耦合问题的对称弱形式，解决了复杂边界上本质边界条件的施加问题。此外，基于“鬼罚”方法建立了 3 个稳定项，消除了单元切割导致的系数矩阵病态问题。基于上述两个问题的解决，建立了水力耦合问题的非匹配有限元法。随后，采用一系列具有解析解的简单问题和典型岩土工程问题进行测试，计算表明，即使出现极小的切割比例，系数矩阵的条件数依然有界。无论边界如何切割网格，条件数和精度都保持稳定。更重要的是，保持了最优的空间和时间收敛率。这项研究极大促进了复杂区域上水力耦合问题的数值计算。(Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 397 (2022) 115132)

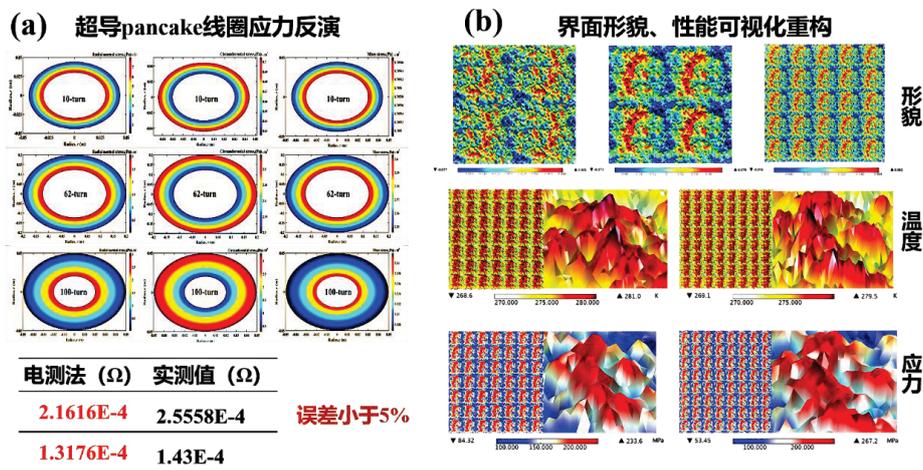


边界切割的单元（绿色）及鬼罚稳定项施加位置（红色边）示意图



单元切割比例与条件数的关系（左图），稳定化后的精度与切割比例的关系（右图）

21. 他吴睿副教授提出通过接触电阻、热阻反演界面性能的方法，实现了对界面性能演化过程的可视化重构，为解决极端环境界面性能难以测量这一问题提供了新思路，拓展了现有界面性能测量方法，推动所提出理论模型走向工程应用。通过对饼式超导线圈受力、导电、传热路径分析，并将所提出测量方法拓展至多匝环形结构接触情形，发展了超导线圈界面性能测量方法，实现了对极低温环境多匝环形结构匝间界面形貌、接触应力、匝间电阻、温度分布特征的测量，测量误差 $< 5\%$ （如下图），为超导结构电磁性能分析提供了参数基础和可靠性评价依据。上述研究成果发表在摩擦学、力学领域权威期刊“Tribology International, 2023,177,107977”和“Composite Structures, 2022. 286,115336”。



(a) 电测法应用于超导线圈内部界面接触应力检测 (b) 热测法重构界面形貌、温度和应力分布特征

22. 刘聪副教授从理论上研究了光栅面内相对小倾角对 CGS 系统的影响，并在理论分析的基础上，提出了相应的误差修正方法，最后在实验上验证了理论推导的正确性。推导后发现当两个光栅的平面保持平行，但面内存在如图中所示的小倾角时，CGS 系统的测量结果为，曲率分量保持不变，但扭率曲率分量中会引入较大误差。在此基础上，提出了误差修正公式。采用标准球面镜作为样品，验证了理论推导和误差修正方法的正确性。结果表明，通过提出的修正方法可成功地对测量结果实现修正，扭率分量测量值的平均绝对误差值可由修正前的 14.1% 降至 0.4%，修正结果如图所示。（*Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 151: 106850.）

