

代表性成果

- 建立了垂直线源灌溉累积入渗量的简化入渗模型，开展垂直微润灌土壤湿润体特性数值模拟研究。垂直线源灌是一种适宜于深根系植物的灌溉方法，它可以减少土面蒸发，提高水分利用效率。为探索土壤质地、初始含水率、线源埋深、长度和直径对垂直线源灌土壤入渗特性的影响。本课题采用 HYDRUS-2D 软件，模拟了土壤质地、初始含水率、线源埋深、长度、直径条件下的土壤入渗过程，根据模拟结果分析了垂直线源灌土壤入渗特性及影响因素，结果表明：垂直线源灌土壤入渗主要受土壤质地、线源长度及线源直径的影响，初始含水率及线源埋深对其影响微弱。在此基础上，模拟了不同土壤质地、线源长度、线源直径组合下的土壤入渗过程，获得累积入渗量，并利用 Philip 入渗模型进行拟合，求得稳渗率和吸渗率值，分析发现不同土壤质地条件下，稳渗率、吸渗率与线源渗水面积呈线性关系，据此，提出了包含线源渗水面积在内的垂直线源灌累积入渗量计算模型，并开展一系列数值模拟工作，研究可为不同土壤质地条件下垂直线源灌水技术发展提供参考。（*Water*, 2018,10, 89; *Water*, 2018,10, 601 ）

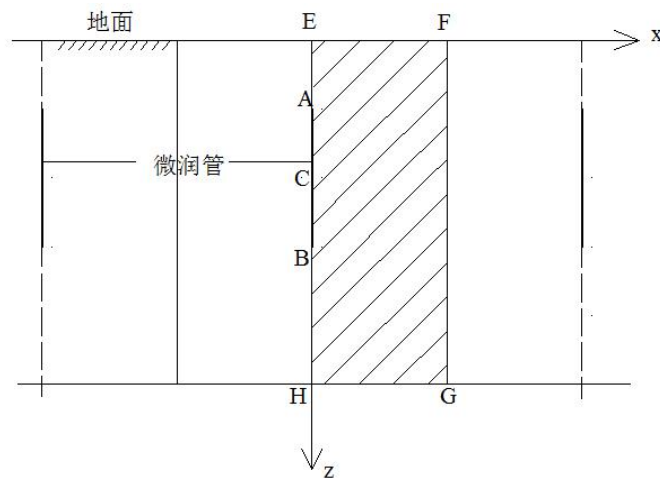


图 1. 垂直微润灌求解区域示意图

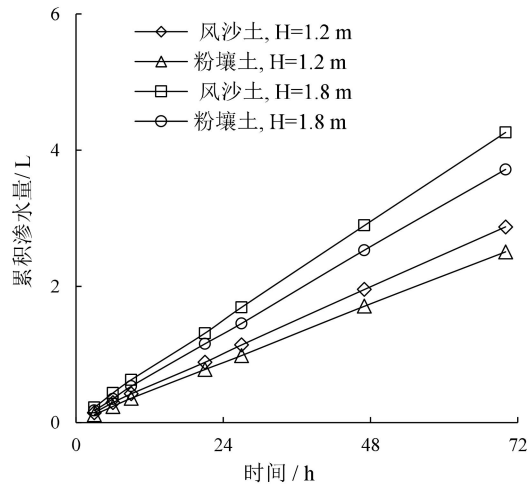


图 2. 土壤中垂直微润灌渗水量与时间的关系曲线

- 应用 Fluent 动网格方法分别计算了基于刚体的单颗、双颗旋转椭球形沙粒跃移运动微观过程。对沙粒的形状和旋转两个参数的影响进行了研究，归纳出了参数化方案，并整合进可计算完整风沙宏观运动的模拟程序中。动网格方法针对小计算域，将沙粒视为刚体，可以计算不规则沙粒边界上每个网格内受到的气动压力，再积分从而得到沙粒受到的总的气动力，在此基础上可计算沙粒的运动。风沙宏观运动的模拟程序采用对数风场，沙粒视为质点，基于拉格朗日颗粒轨道模型计算器运动规律。（2018，Journal of Geophysical Research Atmospheres 123(3)）

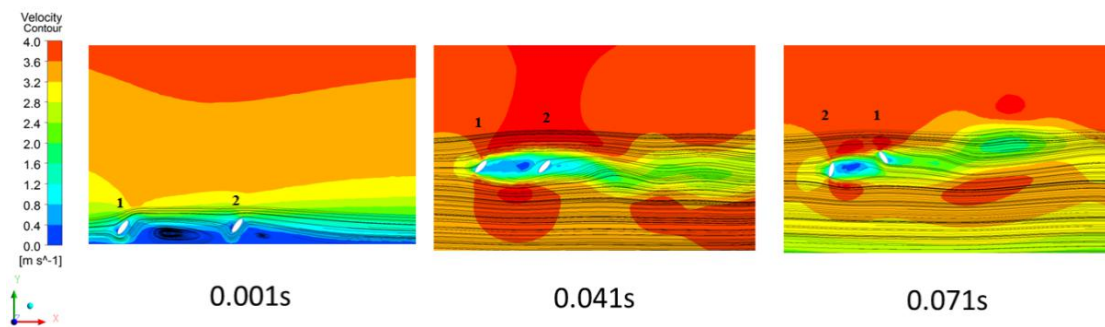


图 1. 两颗椭球形沙粒有初始角速度跃移情况下的速度云图

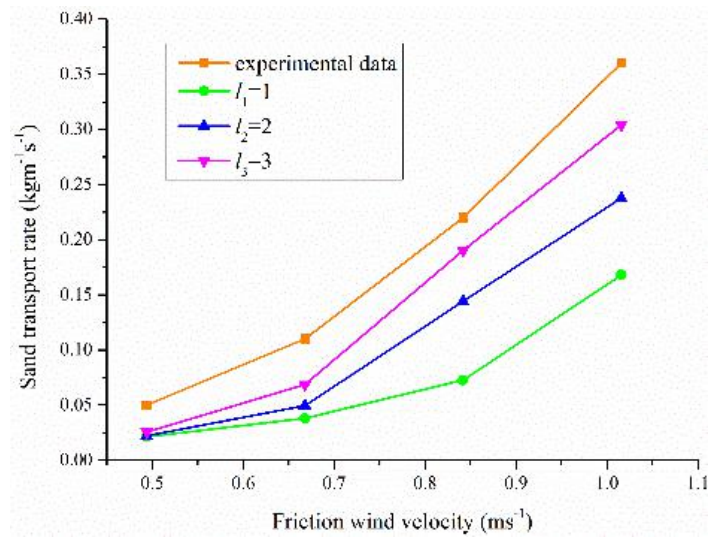
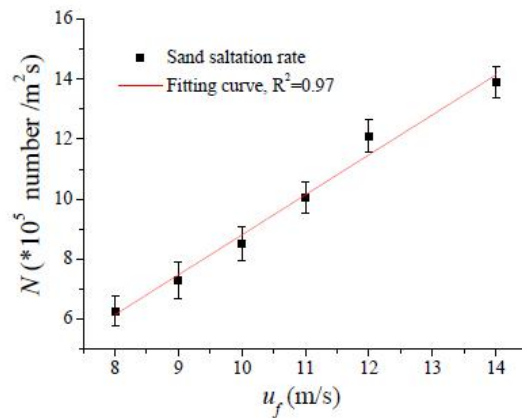
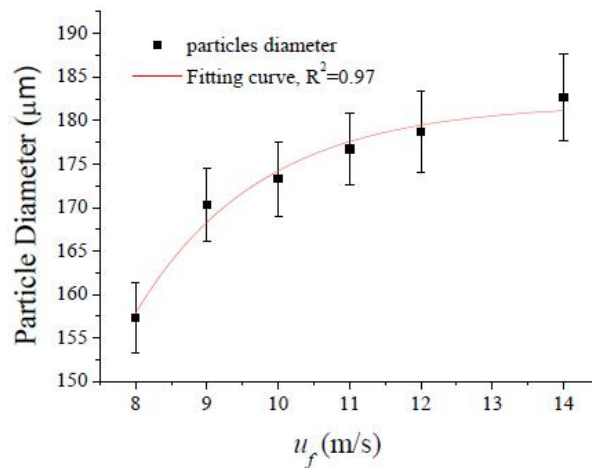


图 2. 不同形状沙粒输运过程中输沙率随摩阻风速的变化

- 利用 PIV 设备针对坡面地表的背风坡区域进行研究。通过分析背风坡区域空间沙粒速度随高度和来流风速的变化规律，以及不同高度区间空中沙粒平均粒径分布规律，我们得到背风坡区域沙粒起沙率与来流风速呈线性关系，背风坡起跃沙粒平均粒径随来流风速呈现指数关系。（2018, *Geomorphology*, 317 (SEP. 15) :157-169.）



图一 起沙率与来流风速的关系



图二 起跃沙粒平均粒径与来流风速的关系

- 应用 OpenFoam 拉格朗日追踪法计算了位于独立沙丘背风侧回流区内部桥梁建筑物周边的风沙运动的宏观过程。对风速和输沙率两个参数的影响进行了研究，归纳出了桥梁不同位置侧风强度和输沙强度的分布情况，并整合进桥面防风沙措施的建议。同时，通过对沙丘表面地表剪切力变化的评估，可以计算不同桥梁所在位置对沙丘表面的风蚀程度预测，进而推测沙丘运动模式的变化情况。风沙宏观运动的模拟程序采用大气边界层入口条件，沙粒与地表的相互作用采用击溅函数，基于雷诺平均法处理湍流信息。（2018, The European Physical Journal E 41(8)）

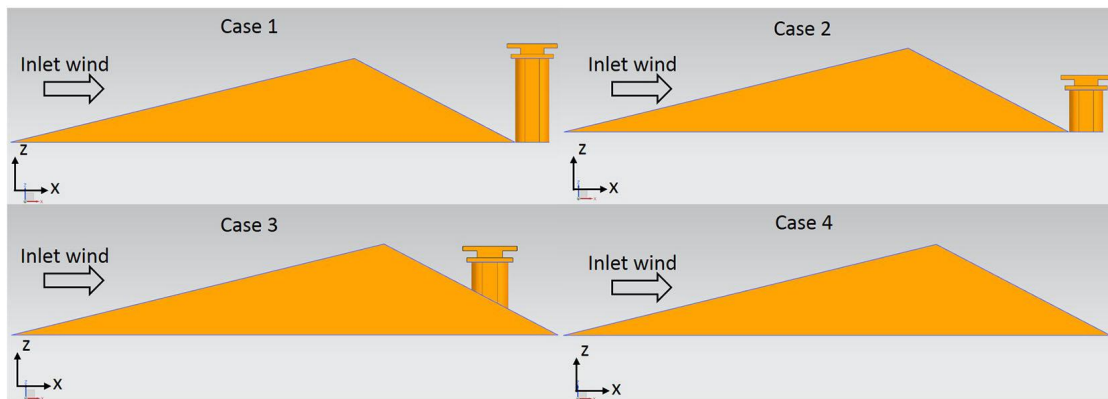


图 1 计算模型：沙丘及桥梁

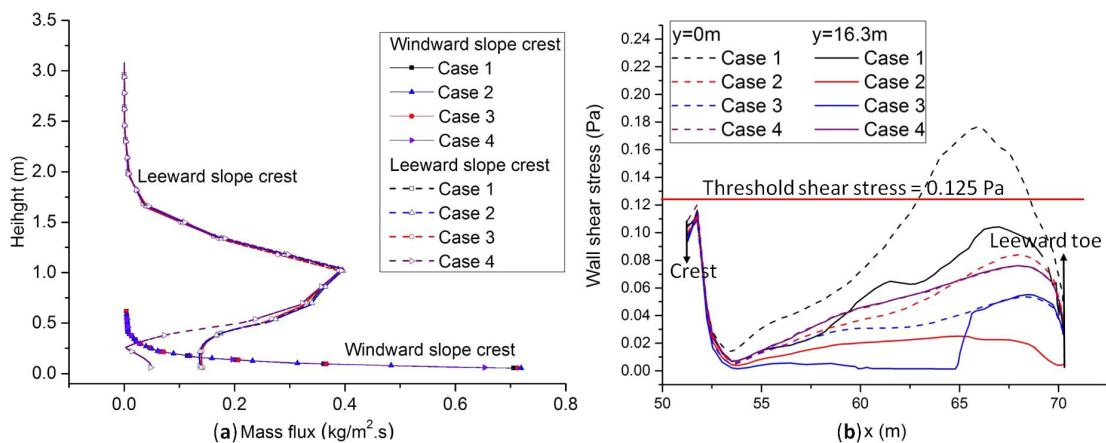


图 2 不同位置的输沙通量

- 探索了沙尘暴中粉尘颗粒的带电特性及其定量表征。小波相干谱分析主要用于分析两个非平稳时间序列在时间和频率空间上的相关性。小波相干谱的取值范围为 0 到 1，其表示两个时间序列在时间和频率空间上的局部线性相关系数。在 2017 年的 QLOA 观测实验中，我们成功观测到 10 场完整的沙尘天气。通过小波相干谱分析我们发现，在沙尘暴的不同阶段，空间电荷密度 r 和粉尘质量浓度 M_{10} 在小尺度（即 <1 min）上相关性较弱，而在 10 min 以上的大尺度呈现完全相关（小波相干谱为 1），如图 1 所示。因为 r 和 M_{10} 的比值表征了粉尘的平均荷质比 m ，所以它们在 10 min 尺度以上的完全相关表明平均荷质比 m 在该尺度及以上不随粉尘浓度 M_{10} 的变化而改变，我们称这种现象为沙尘暴粉尘颗粒的大尺度带电平衡现象。虽然粉尘平均荷质比 m

不随粉尘浓度 M10 变化，但是其受到环境温湿度的显著影响。基于 10 场沙尘天气的观测数据，我们采用多元线性回归的方法给出了平均荷质比 m 对环境温湿度的定量依赖关系，如图 2 所示。(Atmospheric Chemistry and Physics, 18: 17087-17097)

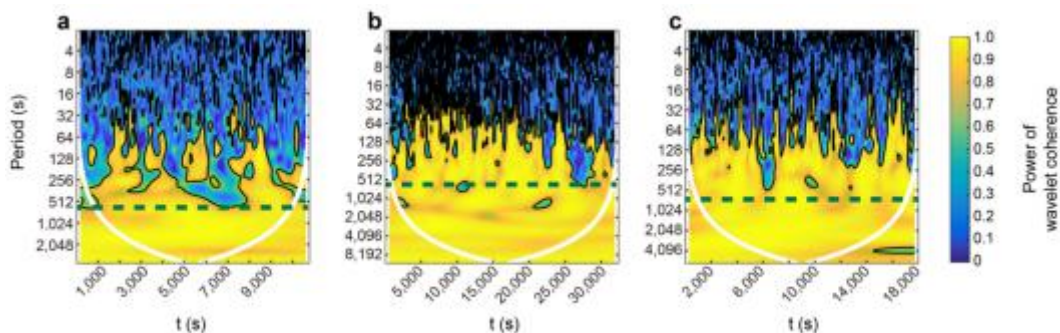


图 1. a-c 分别为三场不同沙尘暴（4 月 17 日，4 月 20 日和 4 月 22 日）的空间电荷密度 r 和粉尘质量浓度 M10 之间的小波相干谱。其中水平虚线对应的时间尺度为 10 min，白色实线为小波分析的置信域。

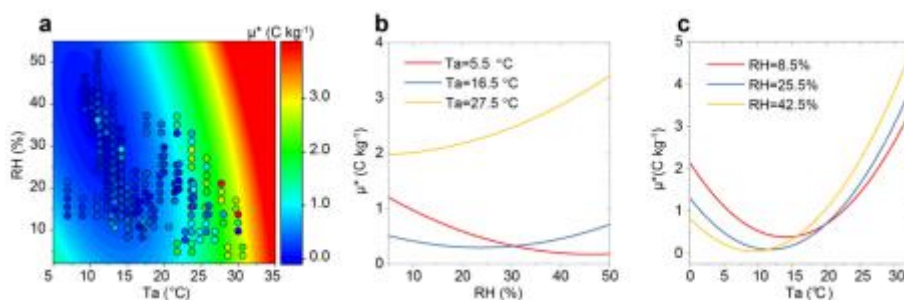


图 2. 粉尘平均荷质比 m 随环境温湿度的变化规律。a 为多元回归模型 m^* 和实验数据（点）的对比。b 和 c 分别为回归模型预测的平均荷质比 m^* 和环境湿度和温度之间的关系。

- **研究了 3D 打印石墨烯多尺度结构调控。** 结合原位化学反应促进石墨烯片稳定组装和“3D 立体光刻”高精度复杂结构成型的物-化协调优点，发展了基于立体光刻可烧蚀超薄高分子支架模板的间接三维石墨烯结构成型方法。该 3D 打印方法实现了微纳尺度上石墨烯宏观体的孔结构和空间取向的有效控制。该 3D 打印石墨烯功能体表现出更加优良的力学、电学、吸附等性能，可广泛用于环境除污、隔热材料等领域。(ACS Nano, 2018, 12(2), 1096–1106.)

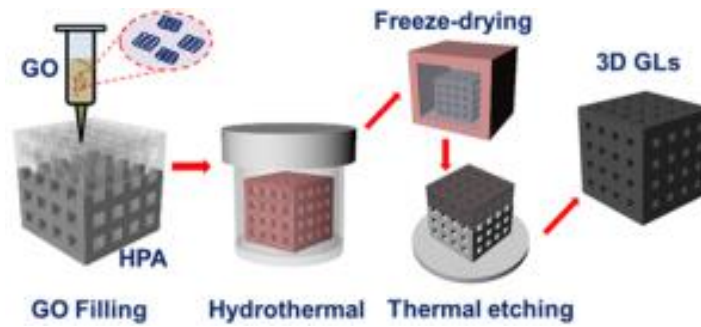


图 1. 3D 打印石墨烯宏观功能体可控构筑

- **研究了三维石墨烯多级结构强化设计。**基于微观纳米片阵列增强机制，通过 FEM 数值模拟分析和微波增强等离子气相沉积（MPCVD）方法，在多尺度上构建和设计了具备“纳米片-微米孔-宏观体”多级复合结构的三维石墨烯电极。通过该材料多级结构协同作用，既实现了力学性能显著强韧化和结构稳定性增强，解决了微观石墨烯片的变形屈曲或电解液中收缩坍塌问题。

(Carbon, 2018, 127: 449-458.)

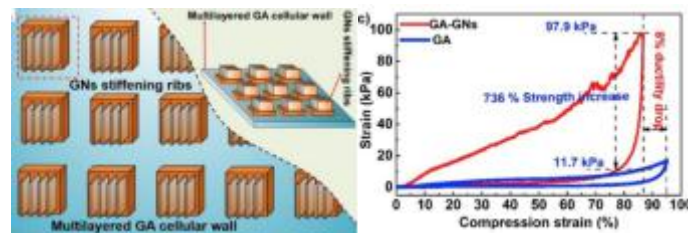


图 1. 三维石墨烯多级结构强化设计

- **研究了沙粒形状与旋转对跃移运动的影响。**风沙运输是一种典型的气固两相流动过程，其中跃移沙粒占输沙总量的 75%。多数风沙运动模型中都将沙粒视为是球体并由此计算作用在沙粒上的气动力。实际上自然环境中的沙粒大多是非球形的，在空气中跃移时多发生旋转，以往的方法难以体现由沙粒不规则的形状和旋转引起的复杂的气固湍流流动。采用动态网格法模拟了旋转椭球沙粒在空中的微观运动，研究了气流与沙粒之间的相互作用。结果表明旋转椭球沙粒的跃移高度和距离比球形沙粒显著增加，旋转椭球沙粒的气动力随时间周期性波动，再现了双沙粒系统跃变过程中的分离、碰撞和翻滚行为。进一步改进了基于欧拉-拉格朗日方法的风沙运动宏观模型，提出了一种计算沙粒气动力的参数化方案。(Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, doi: 10.1029/2017JD027905)

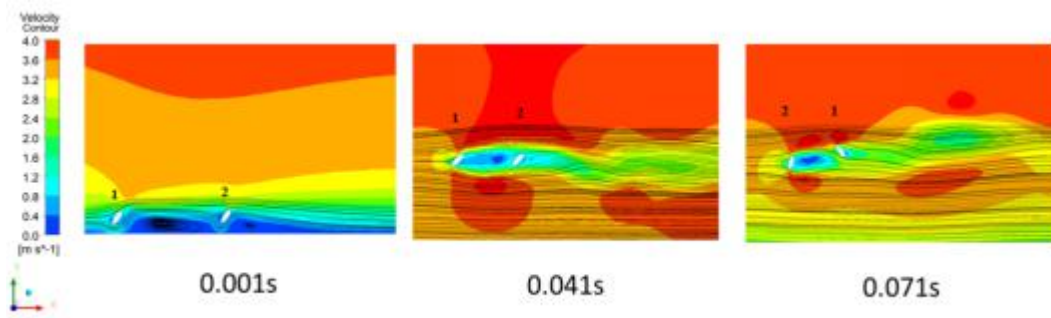


图 1. 双沙粒系统的超越行为，云图为流场速度分布，黑线为气流流线

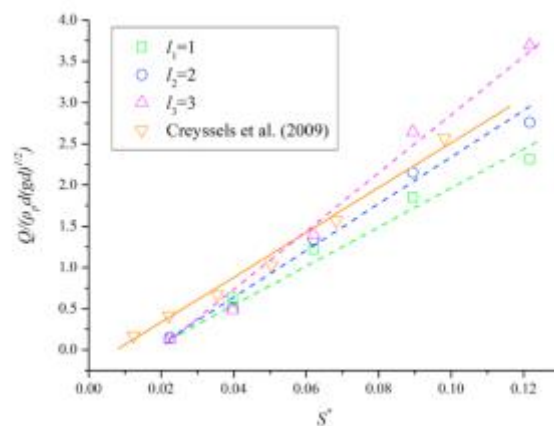


图 2. 颗粒形状对输沙率的影响，横轴为 Shields 数，纵轴为无量纲的输沙率， l 为椭球形沙粒的长轴与短轴之比

- **建立了基于降雪和风吹雪动力学过程的山区积雪分布模型。**山区积雪分布时空演化对于高山流域水文模拟具有重要的意义，然而目前很少有考虑地形对风吹雪过程影响的研究工作。通过数值模拟结合理论分析，开发山区风吹雪参数化方案，并将之耦合进改进的包含拉格朗日粒子运动的中尺度气象模式 ARPS 中，建立了基于降雪和风吹雪动力学过程的山区积雪分布模型。对祁连山区 2014 年 2 月 14 日一场降雪时间进行模拟，并和野外实测结果进行比对，结果表明：该模型能很好地吻合野外观测值，比不考虑坡面影响的风吹雪模型要更精确。(Journal of Geophysical Research – Atmospheres, 2018, 123: 7193-7203)

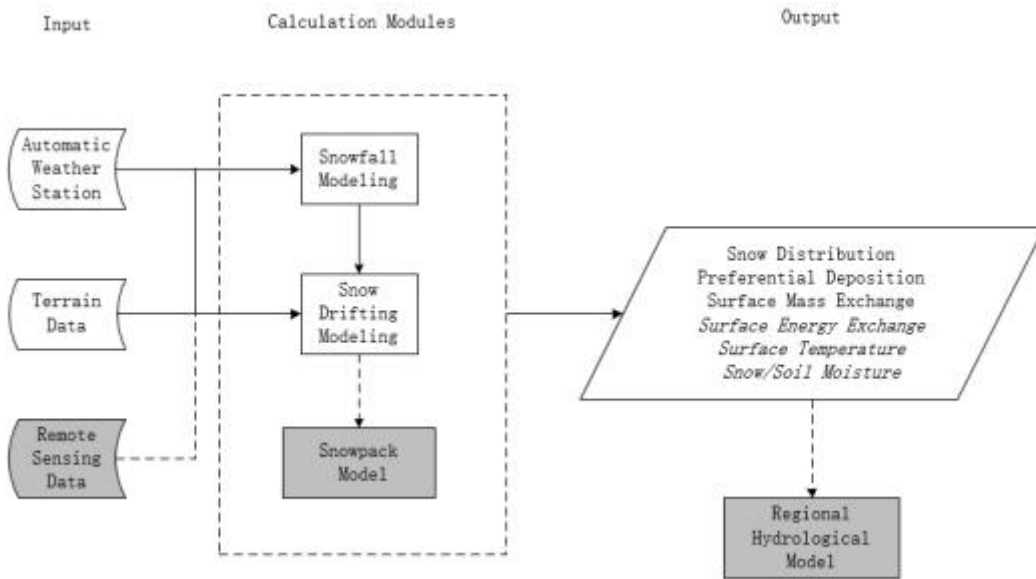


图1. 山区积雪分布模型示意图

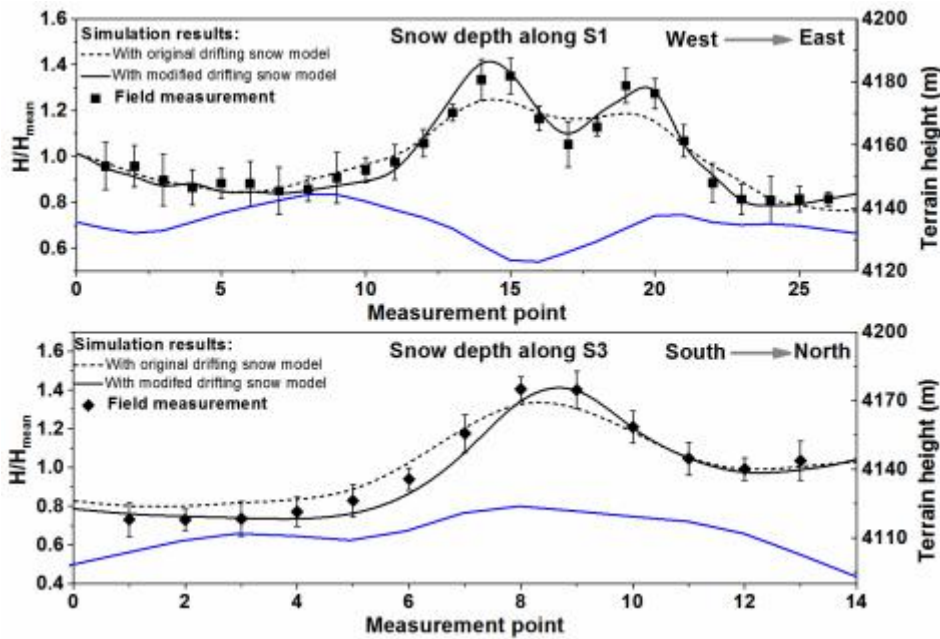


图2. 祁连山区降雪事件模拟和实测结果，蓝线表示海拔高度

- **研制成功国际首台极低温-电-磁全背景场超导材料力学性能测控大型装置。** 依托于周又和教授、王省哲教授领衔的国家自然科学基金重大仪器研制专项，攻克了连续变温与加载、多场耦合加载和多场信号自动采集等技术难题，提出了集成化设计，成功自主研发出国际上首台极低温-电-磁-力全背景场超导材料物理和力学的可调全测控装置，实现了超导线/带材力学性能和材料参数随温度、磁场、载流、力学加载等变化的多场测控。拥有完全自主知

识产权，其中的核心子系统和部件可实现 100%国产化。顺利通过了国家自然科学基金委的第三方专家仪器测试验收以及重大科研仪器研制专项结题验收。测试装置在设计理念、功能及性能指标等具有先进性，包含极低温、背景磁场、强电流加载和控制、力学加载与控制等 6 个子系统，满足于越来越多的服役于复杂极端环境场下的电磁功能材料与结构的多场性能测试与基础实验研究。主要性能指标：极低温及连续变温（4.2-300K）、高载流（0-1000A）、强磁场（0-5T）可控复杂极端多场环境，多变形模式下力学自动加载和测量以及低温-电-磁多物理场表征。相关的系统设计原理、技术参数以及结构构成，并对各个子模块的结构特征和工作原理及各子模块间关系，变温，多物理场加载过程超导材料应变以及临界电流等基于该测试系统的实验结果等在国际科学仪器评论权威期刊发表。(X. Wang, Y.H. Zhou, M. Guan, C. Xin, Review of Scientific Instruments, 2018, 89: 085117)

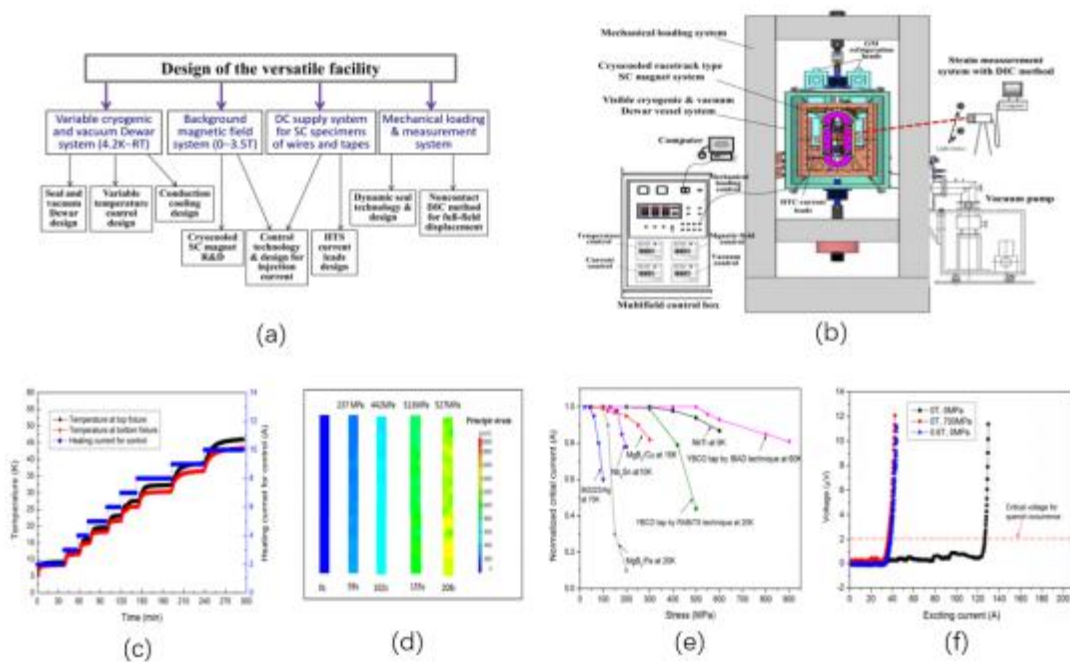


图 1. 极低温-电-磁多环境场超导材料力学性能测试系统：(a) 设计原理；(b) 主要子系统示意图；(c) 变温实验结果；(d) DIC 全场应变测试结果；(e) 力-临界电流测试结果；(f) 磁场、荷载作用下 REBCO 超导带材失超伏安测试曲线

- 建立了涂层高温超导带材 3D/2D 混合维度多尺度剥离失效的有限元模型。针

对涂层高温超导带材层数多、厚度比达（最大可达 100 倍）的几何建模困难，传统 3D 有限元建模往往出现网格奇异性与计算收敛困难，以及结构剥离失效复杂的棘手问题，研究小组在内聚力模型（cohesive zone model）基础上，通过构建虚拟内聚力有限单元，建立了 3D/2D 混合维度超导复合带材的界面间剥离失效有限元模型，成功应用到 REBCO 高温超导带材的剥离分析，计算精度高、耗时少，并能够给出各层间的主要力学特性与差异等，对已有实验现象给出了合理解释。此外，研究组还给出带材缺陷、加载尺寸以及剥离发生所在界面不同情形下横向拉伸剥离的模拟和讨论，为二代复合超导带材的设计与工程应用提供了理论指导。（P. Gao, W. K. Chan, X. Wang, et al., Supercond. Sci. Technol. 2018, 31: 074004）

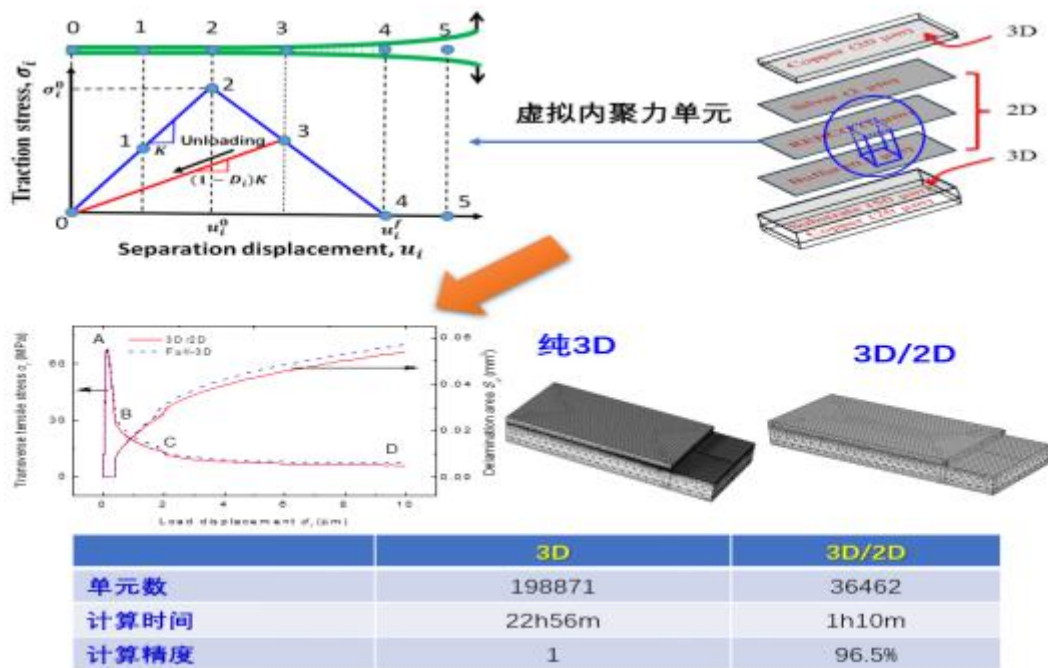


图2 超导复合带材 3D/2D 混合维度剥离失效模型及模拟结果

- 研究了砌块接缝区膨胀应力的发展过程及砌块接缝膨胀愈合的基本机制。试验利用恒体积法(刚性压力室)对砌块接缝膨胀应力进行测定，结果表明：含接缝膨润土砌块的膨胀力发展呈现典型的空间各向异性，接缝区膨胀应力增长速率高于砌块轴向膨胀应力增长速率，顶部膨胀应力受水分迁移以及侧壁摩擦力影响，增长速率滞后于底部区域。随着水化进程的持续，接缝在砌块径向和轴向膨胀应力的双重箍束作用下被挤压密实，砌块区最终干密度下

降，接缝区干密度增加。通过压汞试验和扫描电镜试验对土体集合体进行微观结构分析，发现土体集合体内孔隙数目从砌块中心区域至接缝区域逐渐减少，而大孔以及连通孔隙数目逐渐增多，土体结构由紧实状态逐渐过渡到疏松状态，形成一定宽度范围的过渡带。（岩石力学与工程学报. 2018. 37(9):2200-2208. ）

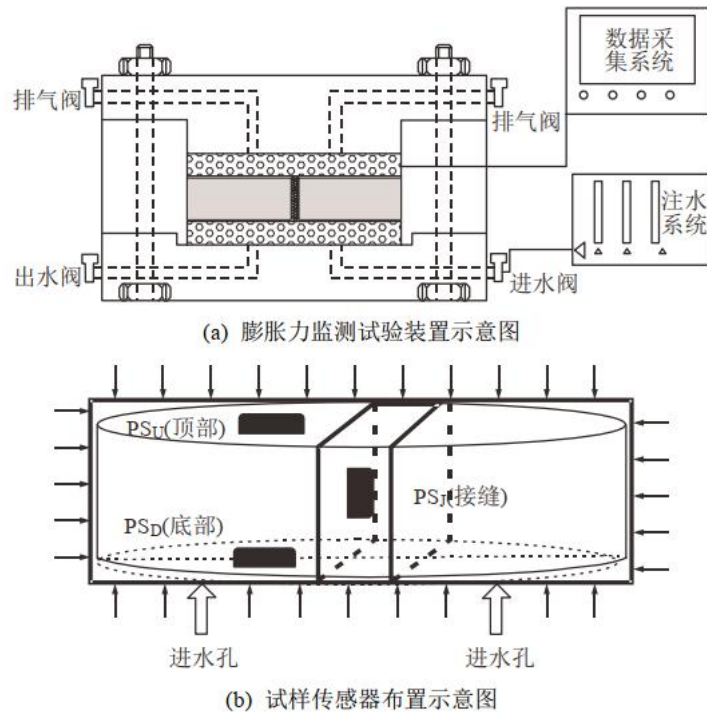


图 1. 膨胀力监测试验系统示意图

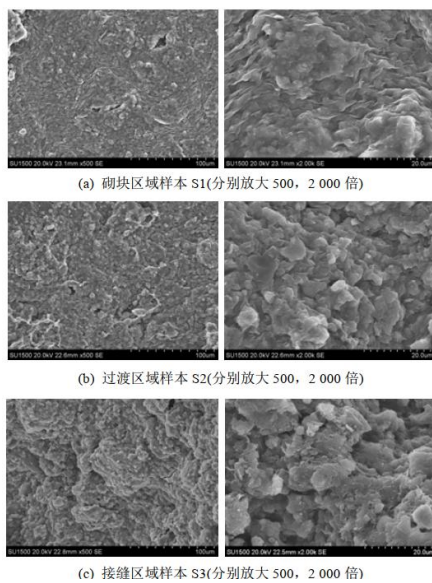


图 2. 垂直于接缝断面样本的 SEM 照片

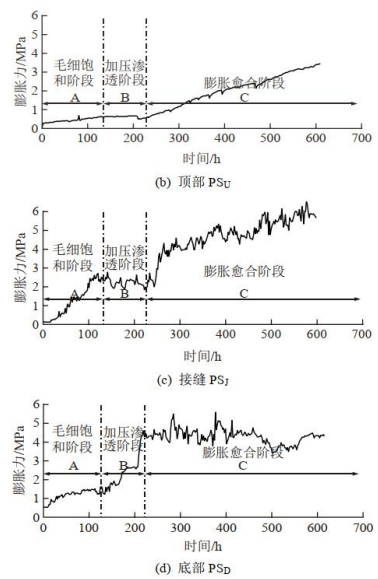


图 3. 膨胀力随时间的变化过程

- 研究了重塑黄土从非饱和状态到饱和状态的湿陷特性，描述了重塑黄土在崩塌前后的微观结构变化。对不同干密度重塑黄土进行分级湿陷试验，研究其湿陷行为。通过扫描电镜（SEM）、激光衍射（LD）和压汞测定（MIP）实验，建立了重塑黄土微结构演化与湿陷行为的相关性。结果表明，湿陷临界饱和度随初始干密度的增加而增大，而随着垂直压力的增大而减小。在湿陷过程中，不同初始干密度的重塑黄土孔隙比随饱和程度的增加呈指数下降趋势。重塑黄土的湿陷性主要是由于其团聚体内部孔隙大小，以及在加载和湿化时骨料间孔隙尺寸的减小。重塑黄土中只有干密度较低的重塑黄土才存在丰富的团聚体内部孔隙，间接表明黄土土中团聚体内部孔隙不稳定，易塌陷。(Engineering Geology. 2018. 233(31):11-22.)

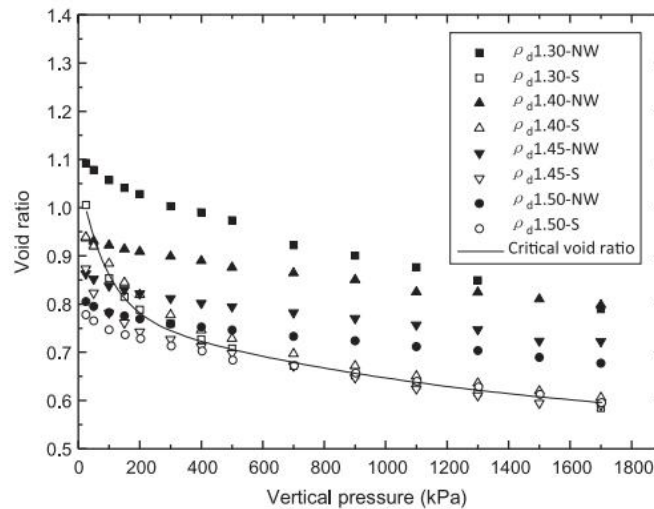


图 1. 非湿润和饱和条件下试样的孔隙比与垂直压力的关系

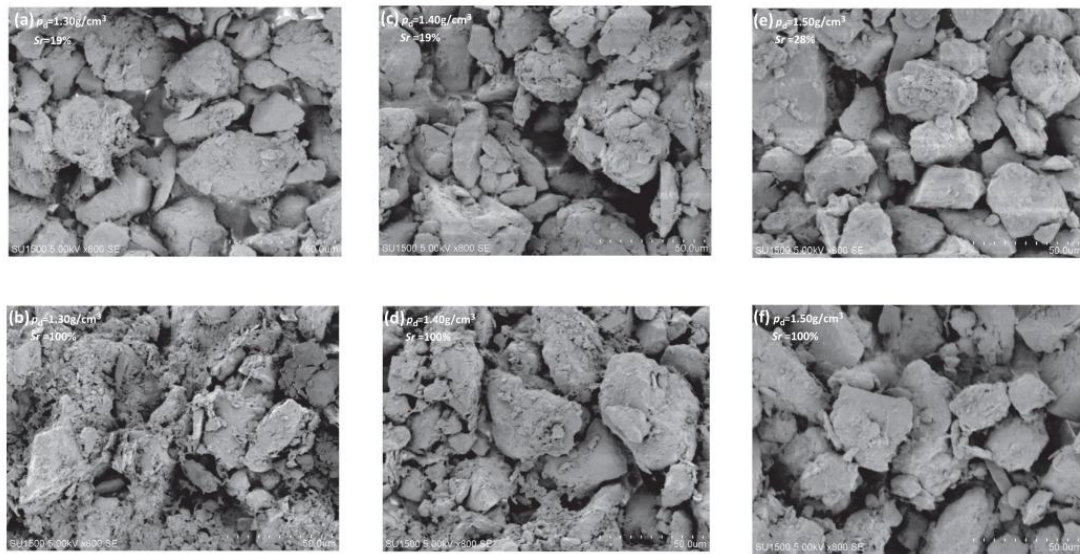


图 2. 垂直压力为 900 kPa 时，不同干密度试样在非湿润条件和饱和条件下的扫描电镜图像

- **研究了污泥的酸缓冲能力及其对重金属的再活化作用。**利用滴定试验探究污泥的酸缓冲能力，发现污泥的酸缓冲能力随固液比和厌氧培养时间的增加而增加，这主要是由于有机质含量丰富，碳酸盐负荷增加所致。添加的重金属（锌、铅、铜）在厌氧培养阶段得到很好的固定化，但在酸化过程中，特别是当 pH 降至 6.0 以下时，由于碳酸盐的溶解和粘土矿物的阳离子交换，重金属被大量释放出来。简化模型的计算结果表明，由于压实污泥屏障具有较高的酸缓冲能力，在典型的管理时间内，重金属的再活化水平并不高。结果表明，污泥是处理尾矿中酸性矿山排水系统的一种合适的底衬材料。(Archives of Environmental Protection. 2018. 44(2):62-72.)

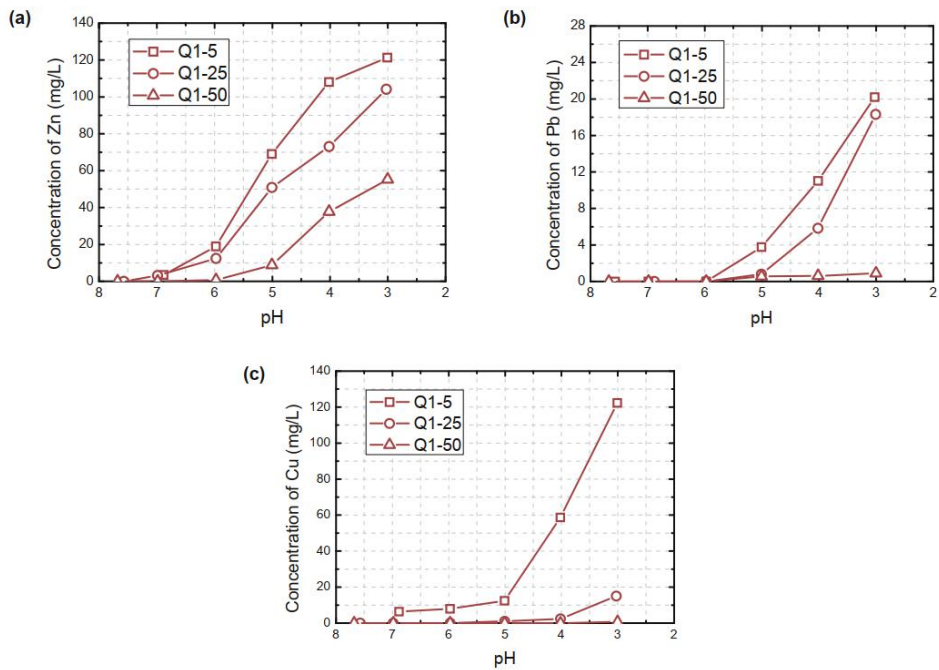


图 1. 不同培养时间滴定试验中重金属的释放与 pH 值的关系: (a) Zn; (b) Pb; (c) Cu

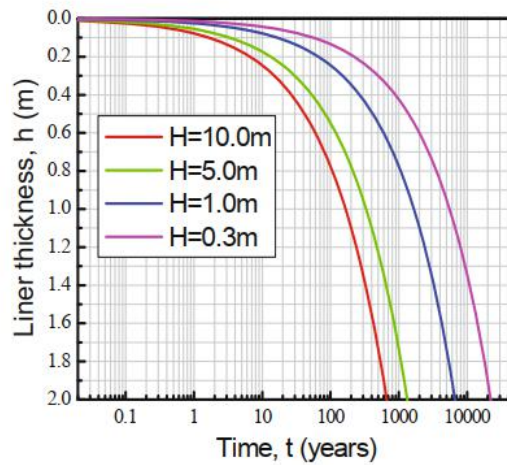


图 2. 污泥屏障有效酸缓冲能力的消耗时间与其厚度和酸性矿井排水水头的关系

- 研究了各因素对土工膜缺陷中心裂缝渗漏率的影响。利用柔性渗透仪对土工膜缺陷渗漏进行了室内试验，用刀片切开试样的裂纹，结果表明，裂纹宽度相同，长度不同。进行了一系列室内渗透仪试验以确定各种因素对土工膜中心裂缝渗漏率的影响。各种因素包括以下：(i) 围压对土工膜的影响；(ii) 施加在土工膜顶部的水压；(iii) 缺陷长度。结果表明，在不同条件下，缺陷尺寸受围压和水压的影响，缺陷尺寸对流量有影响。此外，流速随围压的

增大而减小。结果还表明，随着土工膜中缺陷长度的增加，流体流速也随之增大。(Environmental Engineering & Management Journal. 2018. 17(3):705-710.)

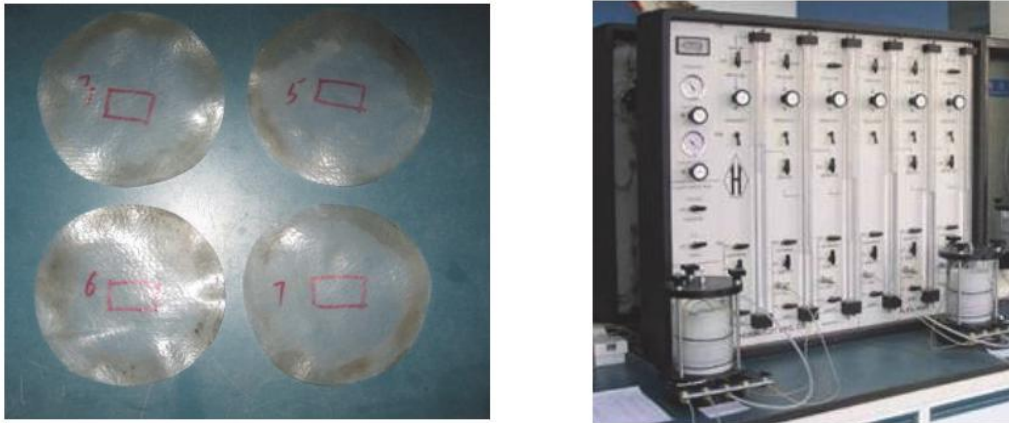


图 1. 土工膜及柔性壁渗透率仪

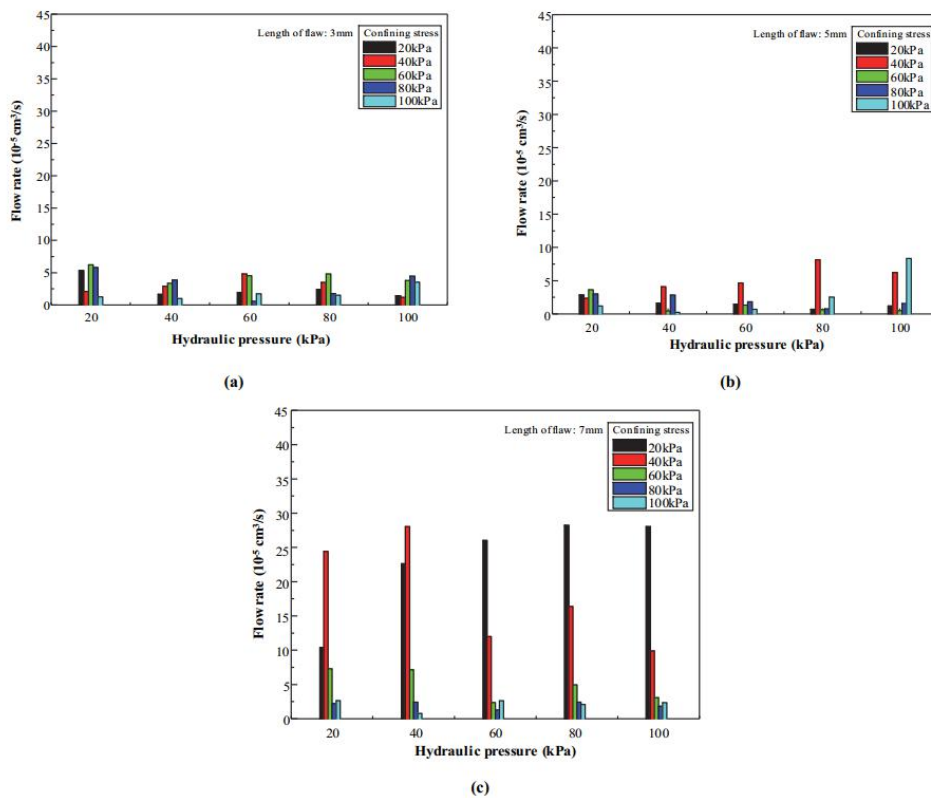


图 2. 在不同围压下，流速随不同裂纹长度地膜压差的变化

- 研究了麦秸秆、稻草、黄麻和聚丙烯纤维加筋石灰固化盐渍土的力学性能。通过纤维加筋土的无侧限抗压强度试验，确定最适宜的质量加筋率和纤维长度；以四种纤维加筋石灰土的三轴压缩试验，研究纤维加筋固化土的抗剪强度及应力应变的发展规律。结果证实：纤维加筋土适宜的质量加筋率为

0.2%~0.25%，纤维长度为 19 mm~25 mm；纤维的加筋作用主要体现在提高土的粘聚力，对内摩擦角的影响很小；聚丙烯纤维加筋石灰土的粘聚力增幅最大，麦秸秆加筋石灰土的粘聚力增幅最小；纤维加筋石灰土的应力-应变曲线呈应变软化型，随围压的增大，应力-应变逐渐向应变硬化型过渡；在土中产生最大剪应力的区域布筋，无法形成贯通的破裂面，能充分发挥纤维的加筋作用。四种纤维与石灰加筋固化盐渍土，均可提高土的强度与抗变形性能，满足工程需求。(Construction and Building Materials. 2018. 172:300-308)

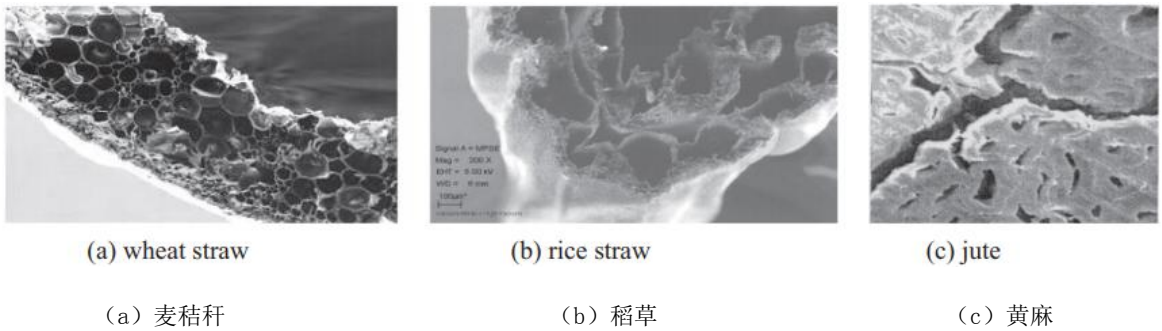


图 1. 植物纤维横断面的 SEM 照片

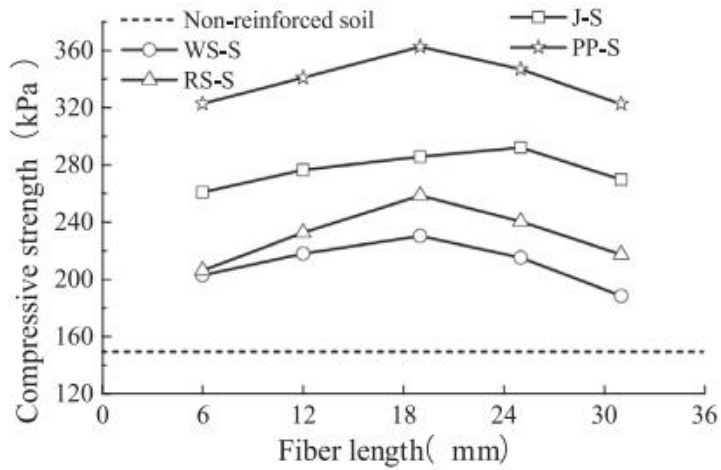


图 2. 纤维加筋土抗压强度随纤维长度变化曲线

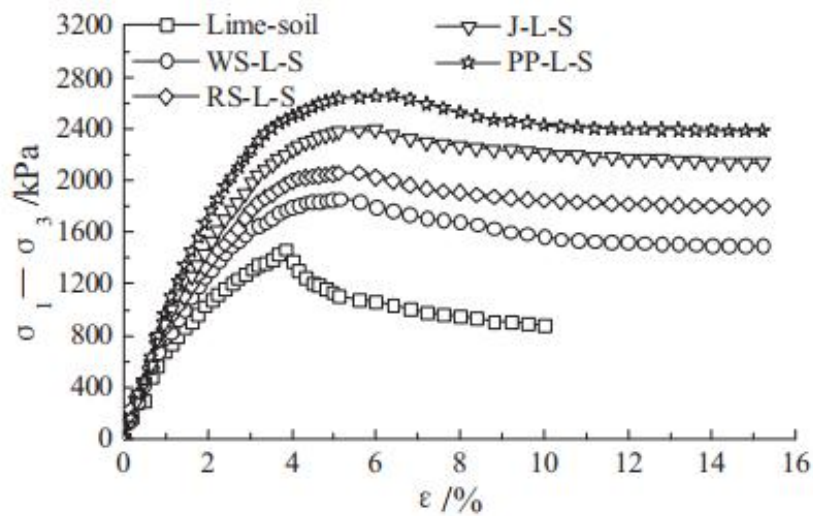
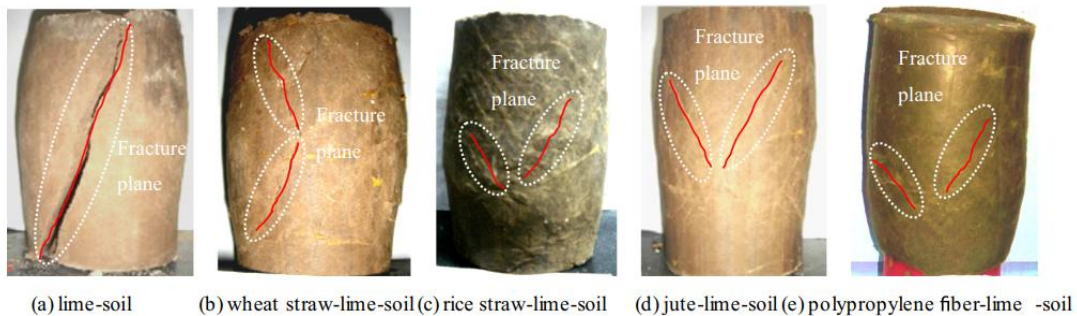


图 3. 石灰土与纤维加筋石灰土的偏应力应变曲线



(a) 石灰土 (b) 麦秸秆加筋石灰土 (c) 稻草加筋石灰土
(d) 黄麻加筋石灰土 (e) 聚丙烯纤维加筋石灰土

图 4. 石灰土与纤维加筋石灰土的破坏形态

- **研究了复合材料对土遗址的加固效果。**单一材料对土遗址进行加固目前未能达到理想的效果。将硅酸乙酯和纳米石灰按不同次序加固遗址土体，并与单一材料进行比较。土体取自中国甘肃省永昌的长城遗址。采用纳米石灰、硅酸乙酯以及这两种加固剂的不同顺序的组合对室内重塑试样进行加固，并设置乙醇和空白对照组，评价这六种处理对试样的颜色、质量、力学性能、和水理性质的影响，借助扫描电镜和能谱研究不同加固材料对试样的微观结构和元素的改变。试验结果表明，有机材料首先渗透到土壤中，然后使用无机材料封护，与其他材料相比具有一定的优势。有机材料和无机材料的使用顺序在复合材料的研究中至关重要。合理设置复合材料的加固顺序，可以改善土壤的性质。(Construction and Building Materials, 2018, 187: 730-737)

试样组	加固过程
微米石灰(BM)	滴加微米石灰 33.28 ml
硅酸乙酯(BE)	滴加硅酸乙酯 33.28 ml
微米石灰+硅酸乙酯 (BM+BE)	先加 16.64 ml 微米石灰, 再加 16.64 ml 硅酸乙酯
硅酸乙酯+微米石灰 (BE+BM)	先加 16.64 ml 硅酸乙酯, 再加 16.64 ml 微米石灰
乙醇对照组(Et)	滴加乙醇 33.28 ml
空白对照组(Ut)	未做任何处理



图 1. 试样编号(左)及加固 28 天后的试样图(右)

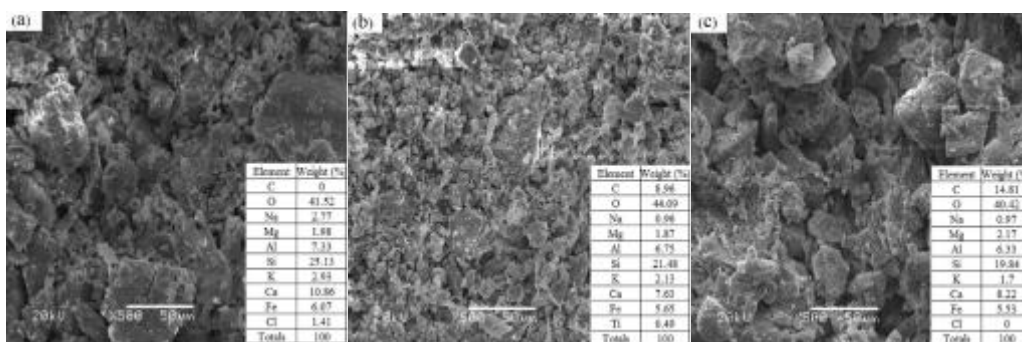


图 2. SEM-EDS 图, 500:

(a) BE+BM 处理后试样的表面图; (b) BE+BM 处理后试样的内部图; (c) 未经任何处理的试样图

- **Evaluation of Long-Term Stability of Mogao Grottoes Caves under Enhanced Loading Conditions of Tourists.** 莫高窟作为世界佛教艺术圣地, 吸引着世界各国游客争相参观, 特别是“一带一路”倡议的实施, 游客数量急剧增加, 对洞窟群稳定性产生一定的威胁。通过对客流量的监测, 选取三种工况, 采用数值模拟方法计算了游客对洞窟群位移和应力的影响。结果显示, 在自重和游客作用下, 洞窟群顶部拉应力集中, 但不会产生拉裂破坏; 洞窟密集分布区位移较大, 但“两侧集中式”的游客站位方式能够有效降低游客对洞窟群位移的影响; 总之, 游客静荷载对洞窟群稳定性影响有限。(Journal of Performance of Constructed acilities,2018,32(4): 04018048)

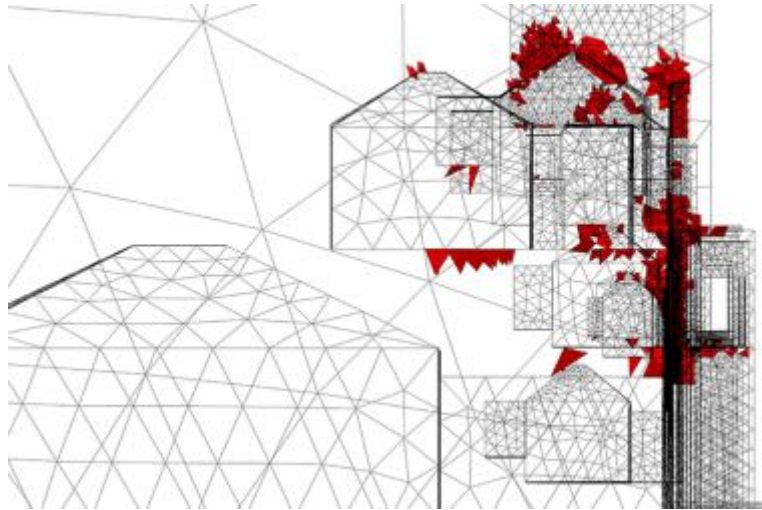


图1. 洞窟密集分布区及窟顶拉应力集中

- 渗透剪切作用下黄土的力学特征。**黄土高原地区黄土在灌溉作用下，逐渐达到饱和状态，饱和中，陡坡类黄土坡体自重增加引起下滑力增加。该过程持续进行后，坡体内部同时发生渗流和剪切过程，导致坡体的变形不断增大，直至破坏后形成滑坡。本文选取黑方台 4.29 滑坡为研究对象，在现场调查的基础上，利用滑坡后壁原状黄土试样，基于三轴试验设置 10 组共 60 个原状样对饱和黄土的渗透剪切行为进行模拟。试验中设置了 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, $0.1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $0.05 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 三个不同的加载速率对黄土试样进行剪切，为比较分析，对 $0.1 \text{ mm}/\text{min}$ 剪切速率试样设置了 0 m, 1 m, 2 m 和 5 m 几个不同水头进行了试验。试验结果表明：饱和黄土在渗流与剪切耦合作用下，表现出应变硬化特征，渗透作用明显降低了黄土的强度，尤其是黄土黏聚力降低，其降幅达 $5.24\% \sim 63.35\%$ 。对已有强度指标拟合后获得黄土在渗透剪切工况下的强度修正公式。(工程科学学报, 2018, 40 (5) : 639-648)

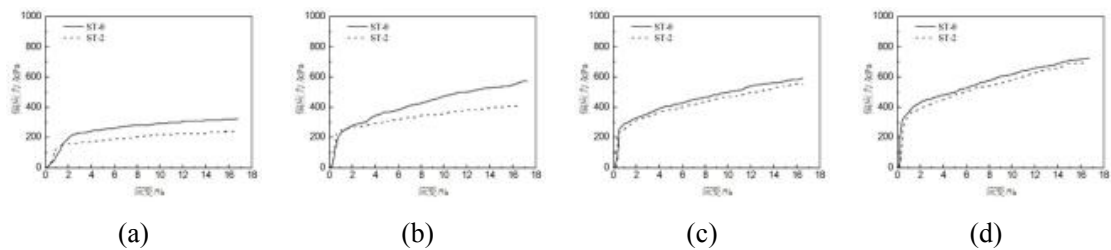


图1. 不同围压条件下，剪切速率 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时应力应变关系.
 (a) 100 kPa; (b) 200 kPa; (c) 300 kPa; (d) 400 kPa

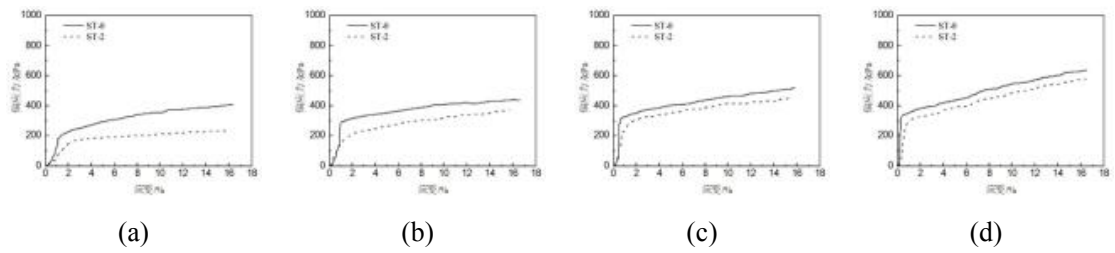


图 2. 不同围压条件下, 剪切速率 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 应力应变关系.

(a) 100 kPa; (b) 200 kPa; (c) 300 kPa; (d) 400 kPa

- **甘肃黑方台灌溉诱发土地密实化对流动型黄土滑坡运动特征的影响。** 在中国甘肃黑方台农业灌区, 长期的人类工程灌溉活动导致黄土台塬发生了大范围沉降, 同时还频繁地诱发了大量流动型黄土滑坡, 这类滑坡已经造成了超过 40 人遇难、大量土地资源损失, 已成为黄河泥沙补给的重要方式。本研究重点关注了灌溉沉降产生土地密实化与流动型黄土滑坡运动的互馈关系。环形不排水剪切试验的结果表明, 相对密实的饱和黄土具有更高的不排水峰值强度和稳态强度, 这仅延长了流动型黄土滑坡再次复发的时间, 而没有改变这类滑坡高速远程运动的行为, 反而增加了启动后运动行为的复杂性。这主要表现为轻微的密实化导致强度提升使脆性指数降低, 能一定程度缓解运动的能力; 然而强烈的密实化在提升强度的同时也导致了脆性指数增加, 反而使黄土滑坡启动后具有更强的流动性。(Engineering Geology, 2018 236, 111-118)

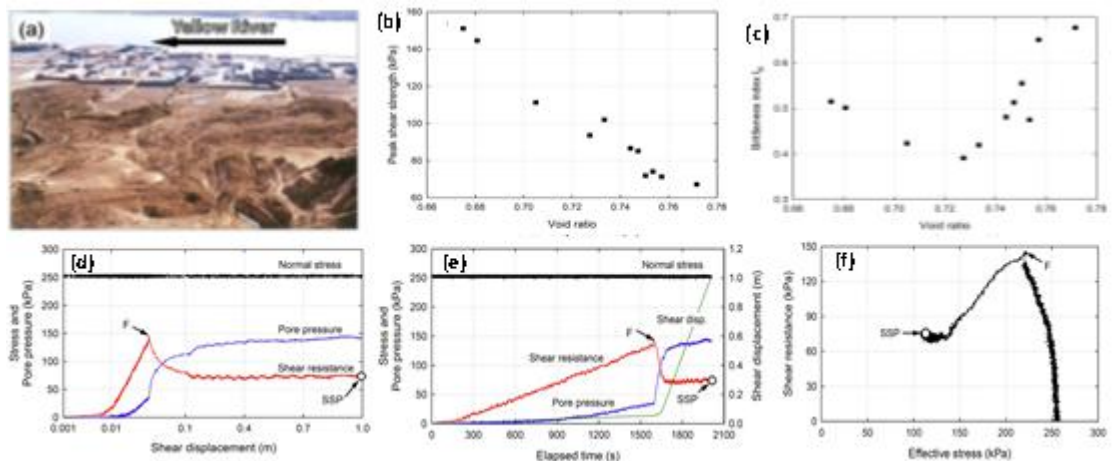


图 1. 密实化饱和黄土的灾难性流动和液化特性

- **中国致命性滑坡的时空分布和发展趋势。** 滑坡是中国发生最频繁的地质灾害之一, 而致命性滑坡每年造成了严重的人员伤亡和巨大的经济损失, 给当地社会经济发展和城镇化建设带来了严重的影响和危害。本研究基于 2004 年

-2016 年统计数据的分析表明，全国 527 起致命性滑坡造成了 5151 人死亡，经济损失达 67 亿元，且随着灾害信息记录的日益完善，更多的致命性滑坡得以记录；同时，受差异性地质环境和降雨条件的影响，滑坡在空间上集中分布在西南和中南地区，而时间上则集中分布在一年的雨季期。四川、贵州、湖南、广东、广西和福建等省滑坡密度值较高，滑坡相对发生较广；而甘肃拥有着最高的死亡人数密度值，主要因为特大型致命性滑坡灾害的发生。研究通过致命性滑坡发展趋势分析还发现，中国政府“以民为本，群策群防”减灾国策对我国滑坡地质灾害风险缓解做出了重要的贡献。(2018, Landslides, 15:1663-1674)

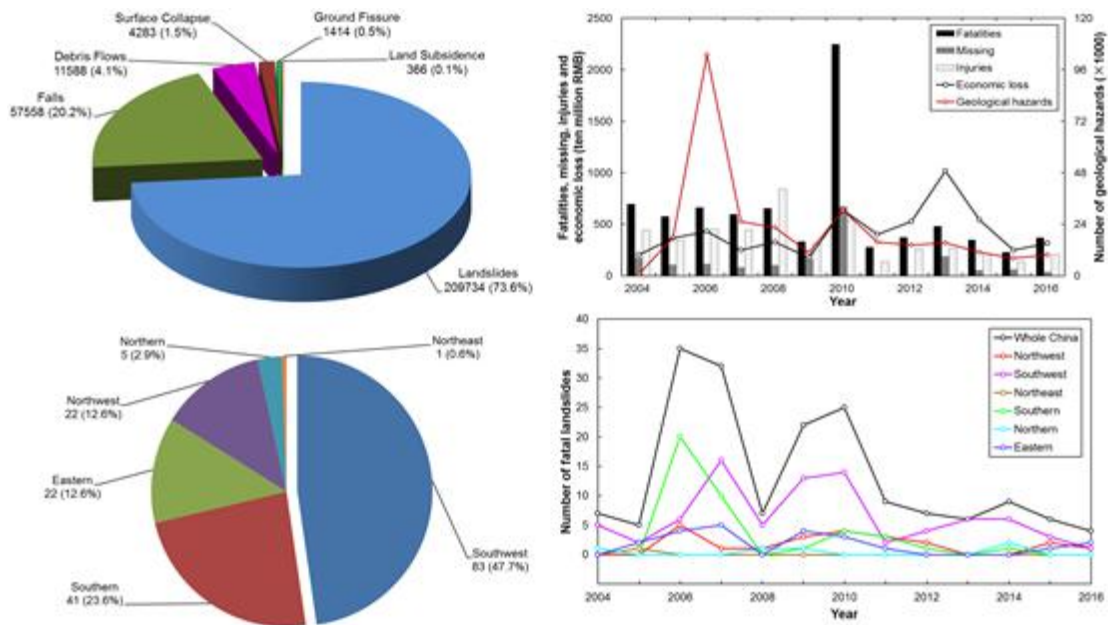


图 1. 中国致命性滑坡趋势与时空分布规律

- 研究了基于监测数据的桥梁构件可靠指标的新动态组合预测方法。利用美国 I-39 北桥的极值应力数据，对所建立的桥梁极值应力的贝叶斯动态加权组合预测模型以及基于此模型和容许应力信息的失效模式相互独立的桥梁构件可靠性动态预测方法进行了验证分析，如图 1 与图 2 所示。由图 1 可知，随着动态监测数据的修正，组合预测模型中各单一预测模型的权重不断发生变化；由图 2 可知，组合预测得到的可靠指标与监测可靠指标变化一致，且预测的上下限均可包含了监测可靠指标的变化范围，进一步说明预测可靠指标具有稳定的保证率。(Xue P. Fan, Yue F. Liu, New Dynamic Prediction Approach

for the Reliability Indexes of Bridge Members Based on SHM Data. ASCE Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(12): DOI: 10.1061 / (ASCE)BE. 1943-5592. 0001321) (专业顶级期刊)

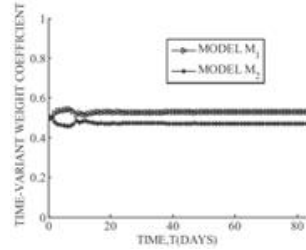


图1 模型权重的动态修正

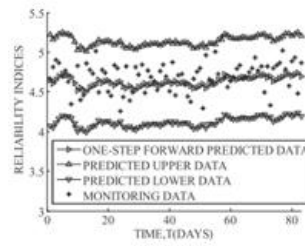


图2 可靠指标的组合预测

- 研究了基于动态线性模型和高斯混合粒子滤波器的钢桥可靠性分析方法。利用美国 I-39 北桥的极值应力数据，对所建立的桥梁构件监测点可靠性的折扣高斯粒子滤波预测方法进行了验证分析，如图 3 与图 4 所示。由图 4 可知：预测得到的可靠指标均小于监测可靠指标，因为预测考虑了监测数据的随机性，因而预测较为符合实际情况。(Fan Xueping, Liu Yuefei. Use of monitored daily extreme stress data for performance prediction of steel bridges: Dynamic linear models and Gaussian mixed particle filter. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 121: 841-855, DOI: 10.1016/j.ymsp.2018.11.047)

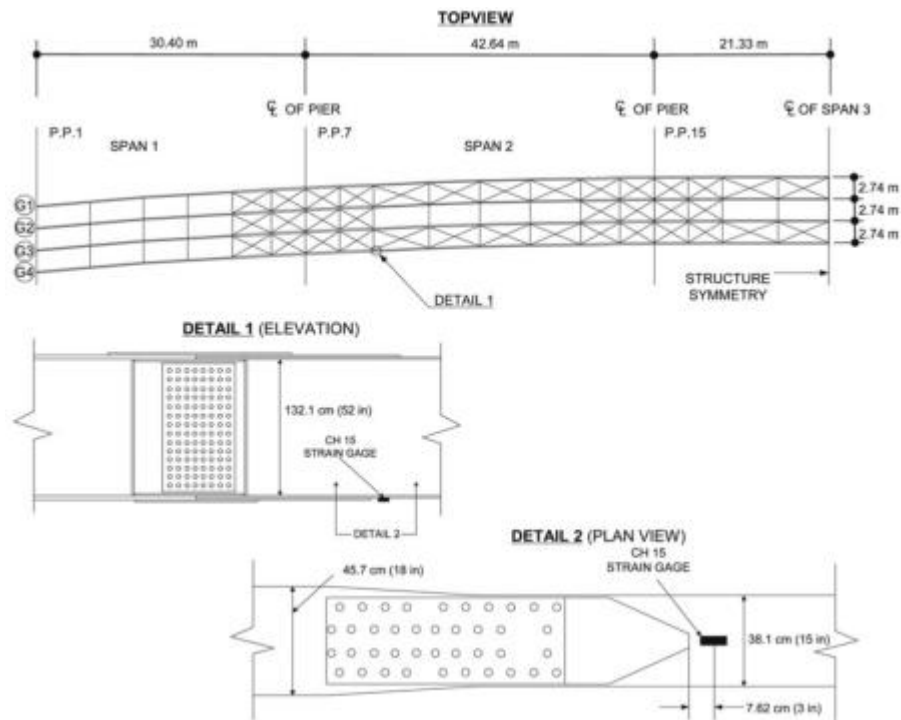


图1. 美国 I-39 北桥监测位置(CH15) (本图选自 Prof. Dan M. Frangopol 发表的文章)

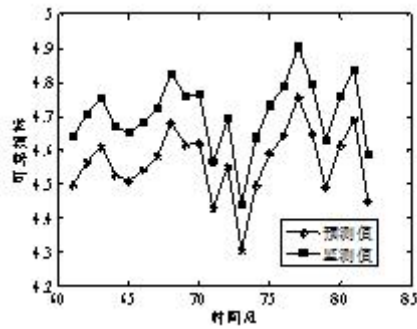


图 2. 监测与预测的可靠指标

- 研究了基于监测数据和贝叶斯动态 **Gaussian Copula** 模型的桥梁体系可靠性分析方法。采用长春伊通河桥主梁的挠度监测数据，建立了贝叶斯动态线性模型、一次二阶矩可靠性分析方法以及 Gaussian Copula 模型相融合的失效模式非线性相关的主梁可靠性的贝叶斯动态高斯 Copula 预测方法，并进行了合理性和适用性的验证分析，如图 5~图 7 所示。由图 6 可知，监测点失效对应功能函数之间存在时变非线性相关性；由图 7 可知考虑失效非线性相关性预测得到的可靠指标均大于不考虑相关性预测得到的可靠指标，即：考虑失效非线性相关性预测得到的失效概率均小于不考虑相关性预测得到的失效概率。说明不考虑失效非线性相关性预测得到的结果偏保守。(Xue P. Fan, Yue F. Liu, Time-variant reliability prediction of bridge system based on BDGCM and SHM data. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(7): DOI: 10.1002/stc.2185) (中科院 1 区顶级期刊)



图 1. 伊通河桥主梁

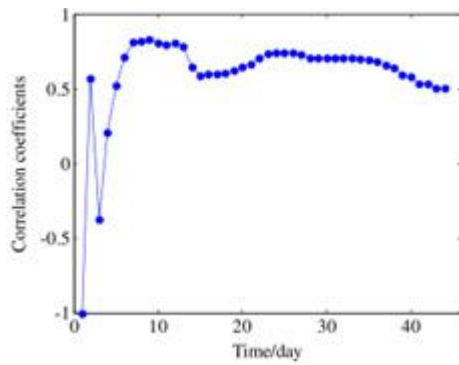


图 2. 功能函数之间的动态相关系数

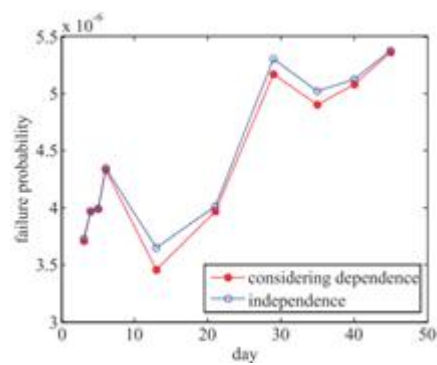


图 3. 桥梁主梁失效概率预测分析

- 研究了新型高温超导电缆的力-热-电多场耦合行为。近年来，研发和设计基于二代高温超导带材的新型高温超导电缆成为了高场超导磁体（受控核聚变磁体、高能加速器磁体、高磁场核磁共振谱仪、强磁场装置-散裂中子源等）应用研究领域中的热点。在实现高温超导材料的工程应用中，不仅要对超导材料的基本物理和材料性能深入了解，还需要对与超导结构功能性优化设计密切相关的力-热-电-磁多场耦合问题开展研究。其中，对超导带材力-热-电性能的分析和对超导电缆结构的优化来实现其运输性能提升是高温超导电缆应用研究中的核心内容。本文针对 TSSC 型多级电缆结构，建立了描述其力-热-电行为的多场耦合理论模型，并通过有限元方法对关于电磁场、温度和位移的非线性控制方程组进行了求解，得到了电缆内部电磁场、温度及应力分布特征，揭示了不同物理场之间的相互作用机制，分析了超导带材排布方式，电缆内芯力学性能参数对其运输性能的影响规律，并提出了电缆结构优化设计的合理建议，为改善高温超导电缆运输性能提供新思路，从而促进高温超导电缆结构优化方法的提升。

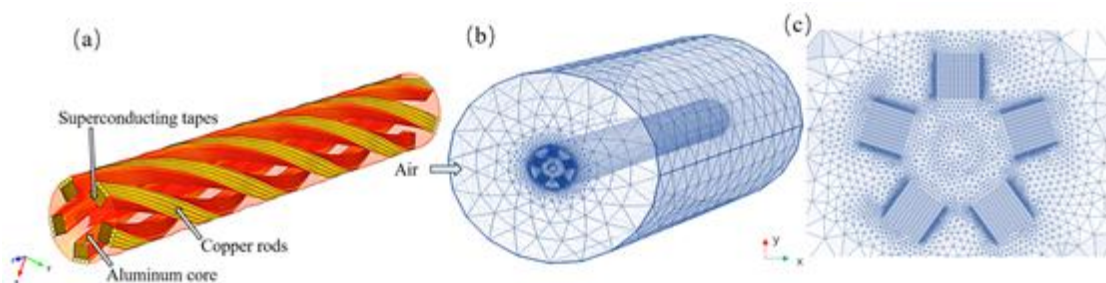


Fig. 1. (a) Sketch of the 3D solid model for the HTS cable. (b) The mesh of the cable and the surrounded air region. (c) The 2D version of the mesh.

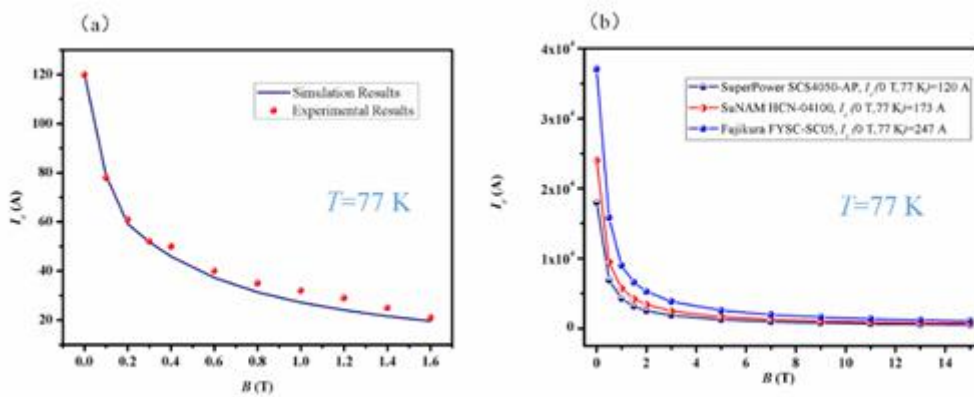
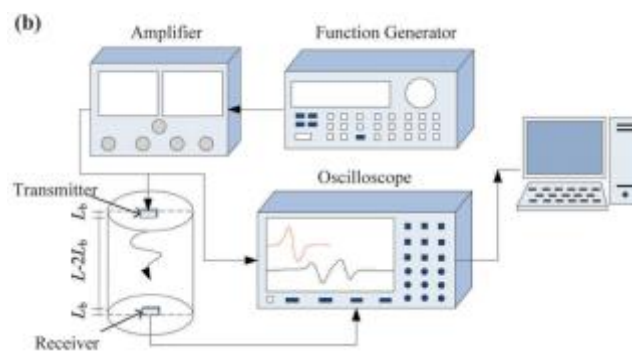


Fig. 2. (a) Simulation curve of I_c and experimental values with the applied field for single SuperPower SCS4050 tape in cable. (b) The critical current of three cables (SuperPower SCS4050, SuNAM HCN-04100 and Fujikura FYSC-SC05) versus applied field.

- 研究了压实土重塑含水率对刚度和吸力的影响。为了更好地了解粗细颗粒混合材料的土水相互作用特性，主要研究了土体细颗粒组分 (<4 mm) 对含水量变化的敏感性。首先确定了土壤的压实曲线，然后，测试了相同干密度下静态压实的样品最大剪切模量 G_{max} 和吸力，但试样重塑水含量不同。结果揭示最大 G_{max} 与最佳特征含水量存在较好的对应关系。从总吸力 Ψ 与含水量 w - $\log(\Psi)$ 的斜率关系曲线呈现双峰模式。最大 G_{max} 对应的吸力接近 $\Psi - dw/d\log(\Psi)$ 中两个峰值之间的最低点曲线。(Canadian Geotechnical Engineering, 2018, 55: 182-190)



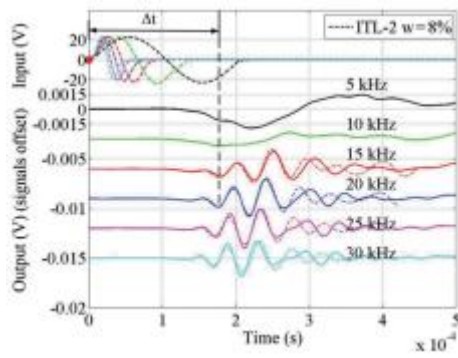


图 1. 研究方法与测试结果

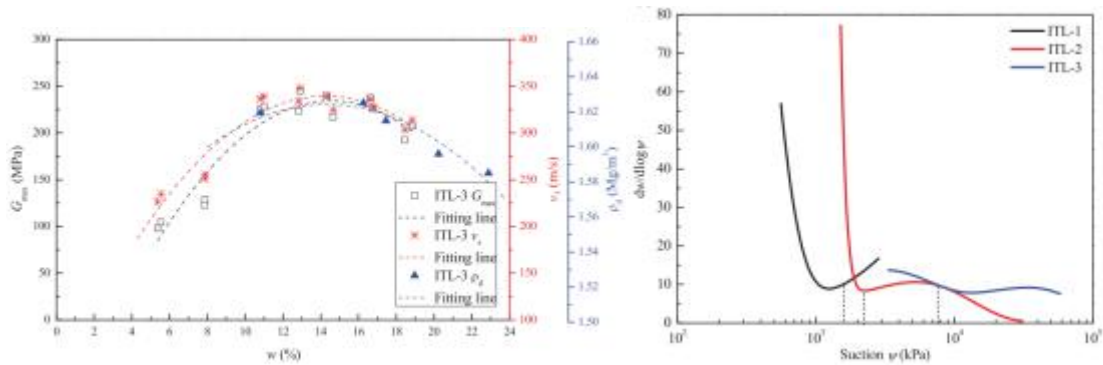


图 2. 吸力分布与压实土最大剪切模量的相关性

- **研究了复杂的山区风吹雪导致的积雪再分布规律。**中纬度山区冰雪消融是当地河流的重要水源，而积雪分布对地表径流具有重要的影响。通过理论建模和数值模拟结果，发展了坡面风吹雪的参数化方案，并集成到改进的中尺度大气模式 ARPS 中，建立小尺度积雪-大气耦合模式。通过模拟祁连山大冬树垭口的一场降雪时间，验证了耦合模式的准确性。模拟结果表明，降雪和风吹雪导致的积雪沉积具有不同的规律，降雪导致的积雪分布受风速和地形的综合效应影响，而风吹雪导致的积雪分布主要受地形的影响，但其量级对风速十分敏感。(Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(14): 7193-7203)
- **针对超导股线中微米尺度的 NbTi 材料低温摩擦力学行为进行研究。**研究发现，NbTi 微米丝在常温下没有显著的尺度效应，这与传统的认识相一致。另外，常温下微米尺度材料的摩擦实验结果表明，其摩擦系数也呈现出显著的尺度效应。在低温环境下，随着温度的降低，其低温下的摩擦性能完全有别于常温环境中，相关工作发表在摩擦类专业期刊(Acta Mechanica Solida

Sinica, 2018, 405-415)。

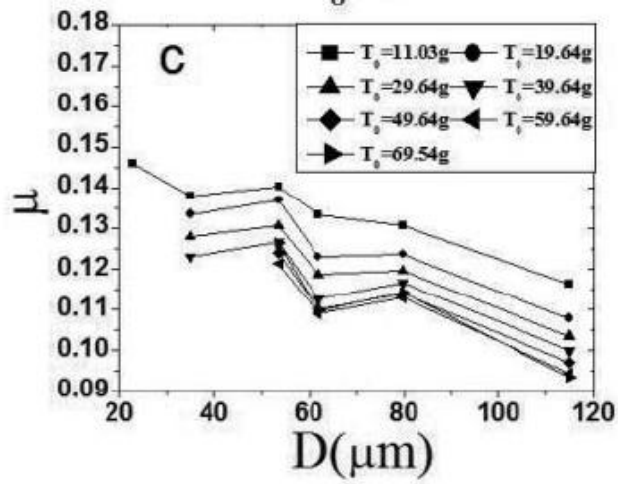


图 1. 微米丝的摩擦系数随直径的变化关系

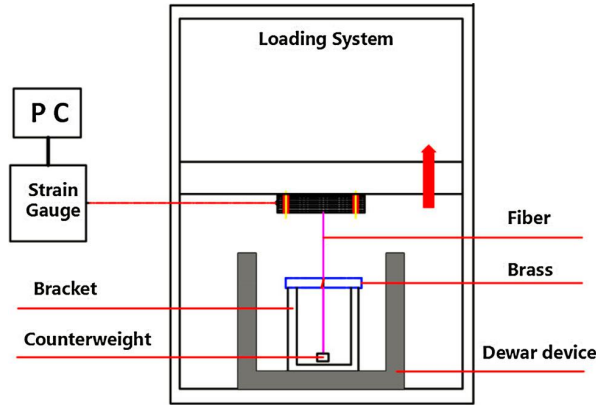


图 2. 低温下的微米尺度材料摩擦测试装置图

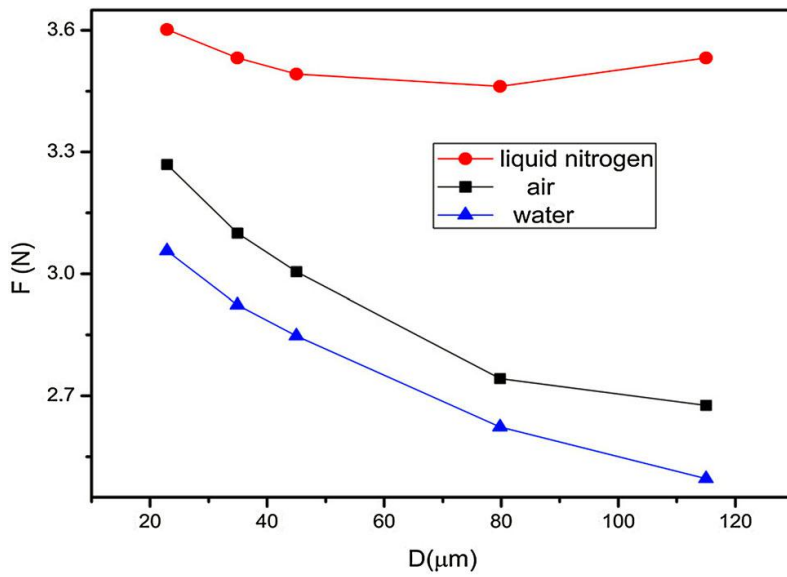


图 3. 在空气, 水和液氮中微米丝的摩擦系数随直径的变化

- 针对电缆一级单元即三股线的绞线，建立了一种针对其等效杨氏模量的新理论模型，该模型相比传统的 Costallo 模型。考虑了绞线的推扭效应，其理论计算与实验定性定量吻合良好，相关结果发表在(Theoretic and Applied Mechanical Letters, 2018,132-136)。

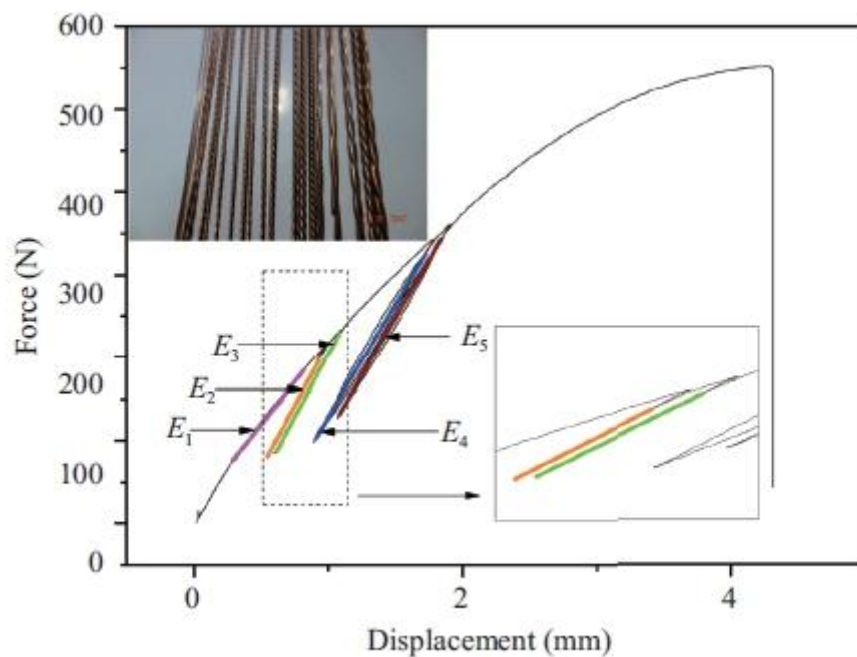


图 1. 三绞线结构拉伸曲线，不同的节距的绞线测得的弹性模量从其中不同颜色拟合线斜率获得

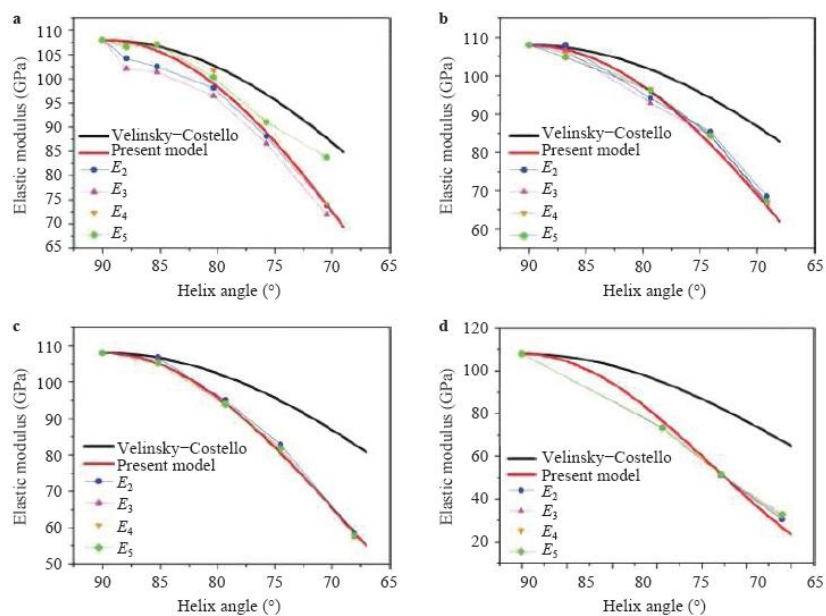


图 2. 新理论模型与实验结果以及传统 Costallo 模型的对比

- 针对 CICC 导体制备过程中拉伸退扭问题(该问题被 ITER 组织磁体组负责人列为当前 ITER 电缆面临的三大挑战之一)进行研究。项目组建立了退扭的理

论模型，采用中科院等离子所提供的实验参数，其计算结果与 ITER 组织的实验结果吻合良好，相关工作发表在超导类权威期刊 (Supercond Sci. Tech,31 2018,025001)。

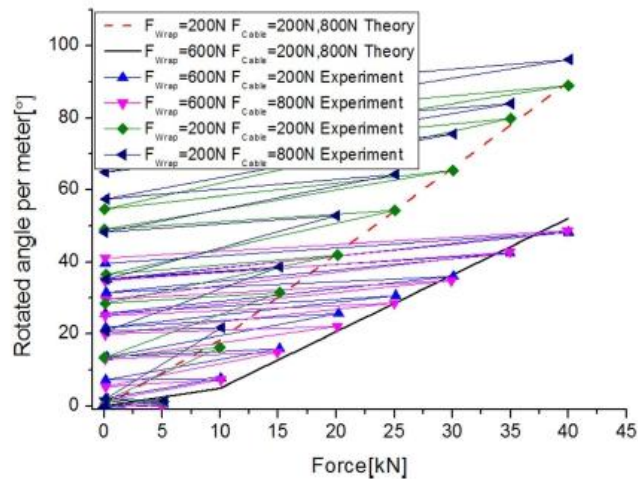


图 1. 拉伸引起的单位长度退扭角的理论与实验结果对比

- 针对 CICC 导体在循环电磁场中的分流温度退化的问题进行研究。该问题也是 ITER 组目前给出的电缆三大挑战之一，项目组建立了简化的力学模型，计算结果与 ITER 实验结果定性一致，目前定量尚存在一些问题，相关工作发表在(Acta Mechanica Sinica 2018 34, 614-622)。

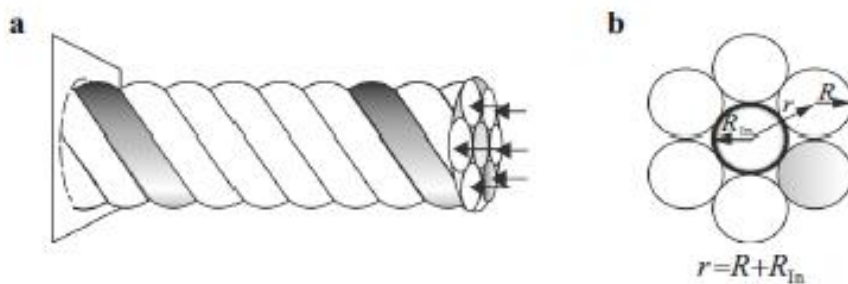


图 1. (a) 绞线受纵向压缩 (b) 绞线横截面

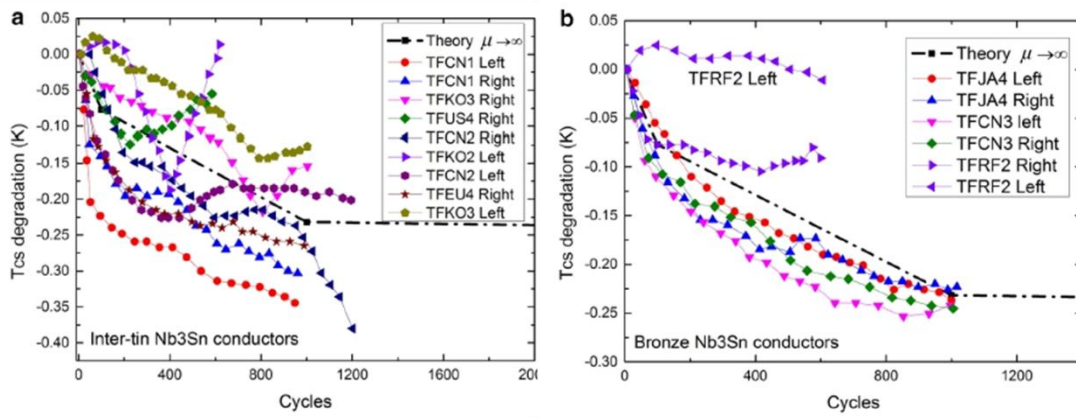


图 2. 分离温度退化的理论计算和实验结果对比

(a) 内锡法制备的 Nb3Sn 股线分离温度退化行为 (b) 青铜法制备的 Nb3Sn 股线分离温度退化行为

- 针对不同粘度的体在不同粗糙度的固体材料表面急速冷却过程进行研究。研究发现水滴在冷却过程中具有清晰的相变线，其冷却速度基板温度的降低而增加，但是不依赖与基板自身的热导率。此外还发现水在凝结完毕后出现凸起的尖点，此后从尖点处出现冰结晶现象这与硅油和机油液滴的凝结过程具有显著区别，这种不同的低温凝结机制得到揭示。相关工作发表在(AIP Advances,2018 8, 055226)。

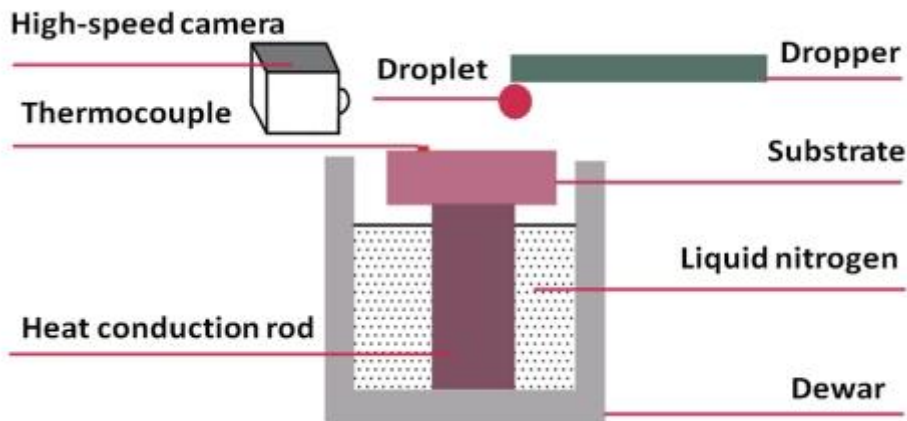


图 1. 液滴冷却实验装置示意图

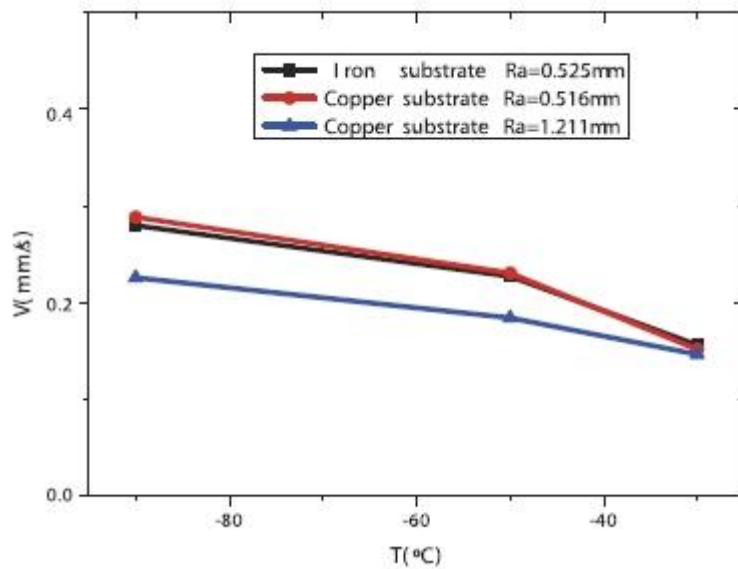


图2. 液滴冷却速度随基板的温度变化

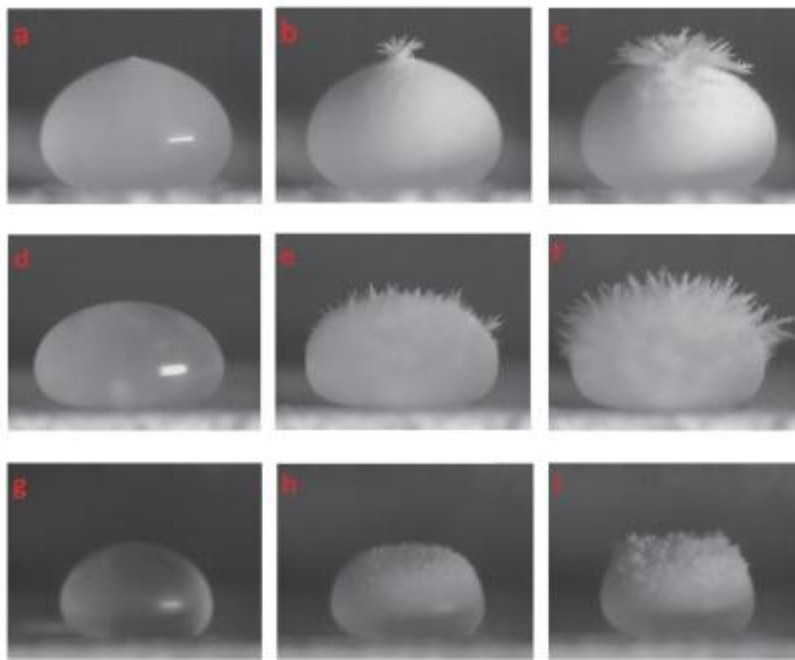


图2 不同液滴在-90°C的Cu基板上的冷却凝结过程。

(a)-(c) 水滴冷却过程, (d)-(f) 机油液滴冷却过程, (g)-(i) 硅油液滴的冷却过程

- 研究了磁-力-热-电多场耦合情形下磁电复合材料的磁电性能。由于磁电材料的高敏感性,在实际工程应用中,磁电器件往往会受到外界应力、温度和磁场等复杂环境的影响。因此研究复杂环境下层状磁电材料的磁电耦合效应显得非常重要和必要。采用磁致伸缩材料的非线性本构方程和压电材料的线性本构方程,针对 Terfenol-D/PZT/Terfenol-D 和 Ni/PZT/Ni 两种层状磁电结构建立了非线性磁-力-热-电多场耦合有限元模型。分别计算了考虑耦合应力情形以及不考虑耦合应力情形下两种层状磁电结构的磁电系数。计算结果表

明，在不同温度下两种层状磁电结构在低、中、高磁场下的磁电系数预测值都能与实验数据很好的吻合。耦合应力对 Terfenol-D/PZT/Terfenol-D 层状磁电结构的磁电系数影响很大，但对 Ni/PZT/Ni 层状磁电结构的磁电系数影响不大。此外，还详细研究了在不同温度和预应力条件下，层状磁电结构的磁通密度、位移和电压分布特性。研究表明，磁电系数对温度和预应力的敏感性可以分别通过对预应力和温度来调节，具体是提高温度可以降低磁电系数对预应力的敏感性，从而可以提高磁电器件在复杂环境下工作的稳定性。(Journal of Magnetism and Magnetic Materials 466 (2018): 200-211)

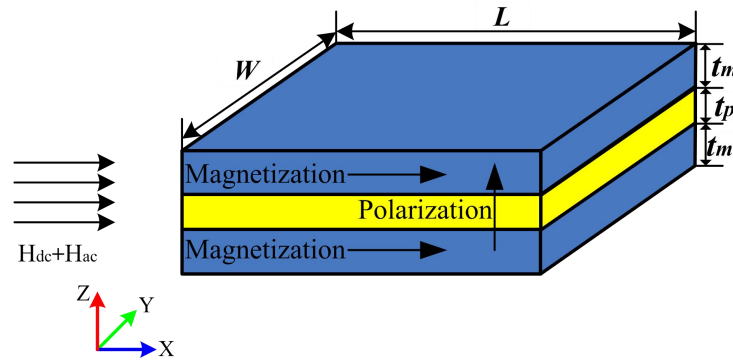
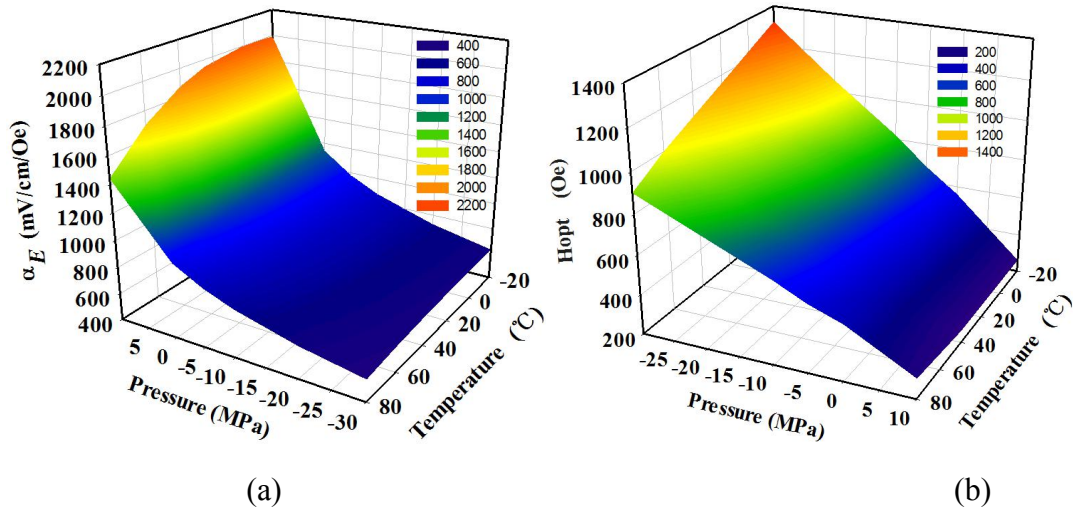
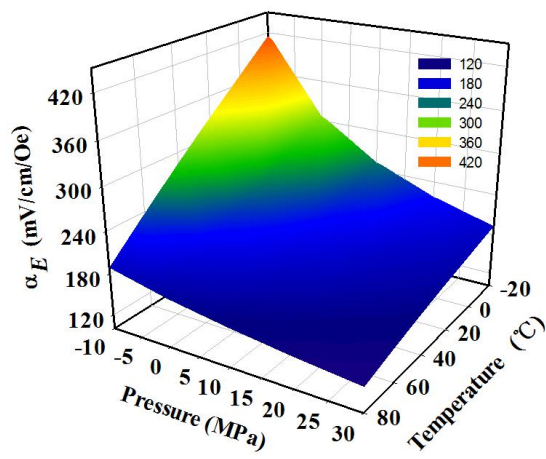
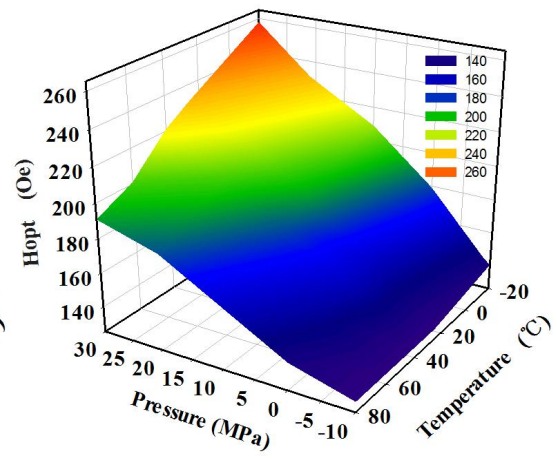


图 1. 层状磁电复合材料的示意图





(c)



(d)

图9. 不同温度和不同预应力下的最大磁电系数和最优磁场图 (a) T/P/T 结构的最大磁电系数 (b) T/P/T 结构的最优磁场 (c) N/P/N 结构的最大磁电系数 (d) N/P 结构的最优磁场/N 结构。