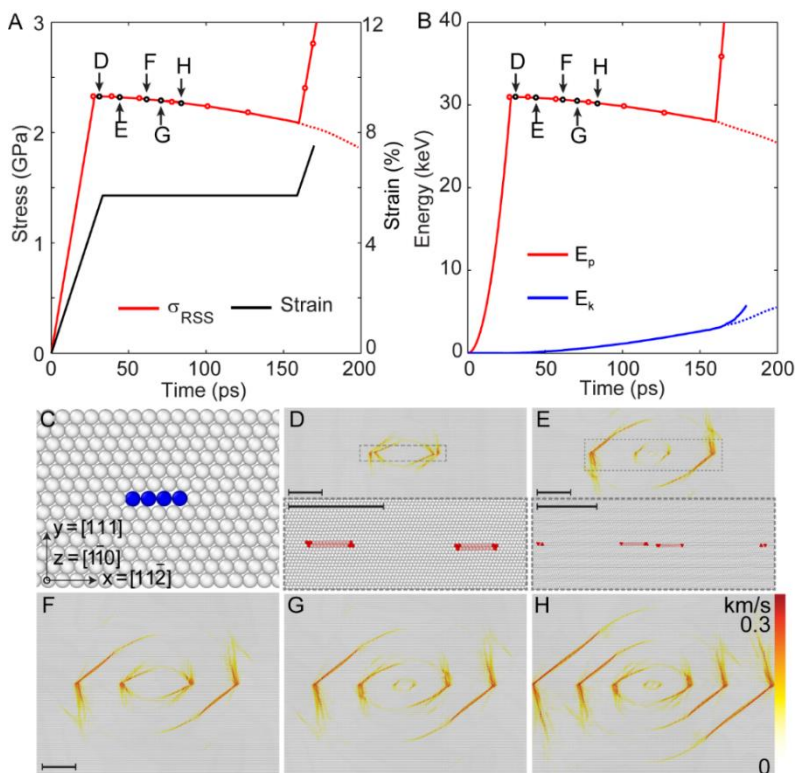


多尺度力学快讯

2020年 | 第2期 | 总第2期



具有高密度纳米析出相金属材料中，纳米析出相诱导的位错源机制
(详见第2页，魏宇杰研究员提供)

多尺度力学

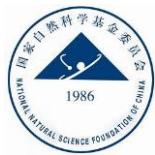
项目进展

介绍基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”近期研究进展。
(详见第1至14页)

多尺度力学的 智能模拟与控制

报道基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”组织召开的第二届复杂系统力学智能模拟与控制研讨会情况。

(详见第15至19页)



“非线性力学的多尺度问题研究”项目组

2020年10月30日

一. 多尺度力学项目进展

1. 重构湍流时空能谱的局部调制波模型

时空能谱描述了湍流结构的时空演化以及湍流能量的时空分布，是刻画湍流时空结构的重要统计工具。在国家自然科学基金委“非线性力学的多尺度问题研究”基础科学中心的支持下，中国科学院力学研究所何国威研究团队提出了一种通过两点测量的湍流速度脉动时间序列来重构时空能谱的统计模型。该模型使用局部调制波发展了湍流含能结构的高阶近似，可以正确预测时空能谱的平均波数和谱宽，从而克服了经典的泰勒冻结假设预测的零谱宽以及局部波数模型低估谱宽的缺陷。模型得到了槽道湍流直接数值模拟数据的验证（图 1）。该项工作不但给出了湍流时空能谱展宽的物理机制，而且为测量风电场、航空器绕流等工况中的时空能谱提供技术途径，在湍流噪声和结构疲劳等问题的预测中有重要应用。相关研究成果发表于 *Journal of Fluid Mechanics* (2020, 886, A11)。

论文链接：<http://dx.doi.org/10.1017/jfm.2019.1044>

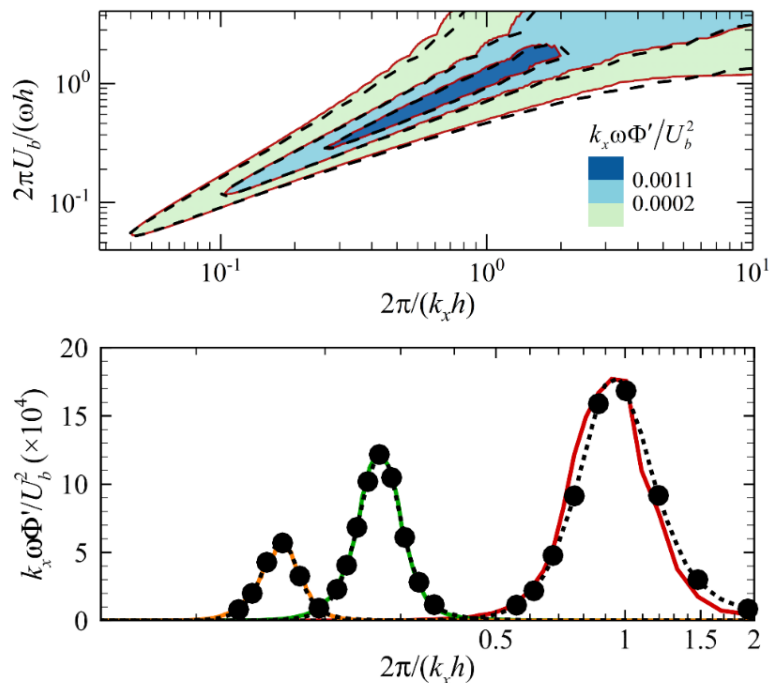


图 1. 上：云图与红色实线为直接数值模拟的时空预乘谱，黑色虚线为局部调制波模型的结果；下：彩色实线为直接数值模拟的时空预乘谱截面，黑色虚线与点为局部调制波模型的结果。

2. 突破材料强-韧对立的纳米析出相设计

近期，中科院力学所魏宇杰研究员、彭神佑博士（现湖南大学助理教授）与南洋理工学院高华健院士合作在《美国科学院院刊》（Proc. Nat. Acad. Sci）上发表了题为“Nanoscale precipitates as sustainable dislocation sources for enhanced ductility and high strength”的研究文章，揭示了在具有高密度纳米析出相的金属材料中，纳米析出相可以作为持续的位错源，以提升高应力状态下材料的变形能力，实现这类材料的强-韧协同优化。

传统上认为，材料中的析出相会阻碍位错的滑移并导致材料硬化，但材料硬化导致强度提高的同时会降低其韧性。众多研究发现，纳米级析出相的设计使材料能在提高强度的同时不牺牲其韧性，从而克服材料的强度与韧性的冲突。

该论文揭示高应力下的纳米析出相作为位错源这一新机制（如图2），发现了在高应力水平下，纳米析出相附近可持续的位错生成与发射。因此，纳米析出相可以增加材料的韧性。结合析出相的传统硬化功能，纳米析出相的强化和韧化双重机制可以实现高密度析出相合金在强度和韧性上的综合优异性能。同时研究人员也给出了纳米析出形成位错源的影响因素，它依赖于析出相和基底材料的晶格失配。

综合考虑纳米析出相的硬化效应和它作为位错源的机制，该团队提出可通过析出相材料中的两个关键尺度：析出相大小及析出相之间的距离（或者析出相密度），来实现材料强度-韧性的最优化匹配设计。通过理论分析，研究人员给出了材料设计过程中这两个尺度的相互关系。

该研究将有助于形成高密度析出相合金材料的强韧化优化设计基础。该工作获得了国家自然科学基金委“非线性力学的多尺度问题研究”基础科学中心（基金号 11988102）和国家自然科学基金（基金号 11425211），中国科学院先导专项以及卓越中心的支持。

全文链接：<https://www.pnas.org/content/117/10/5204.short>

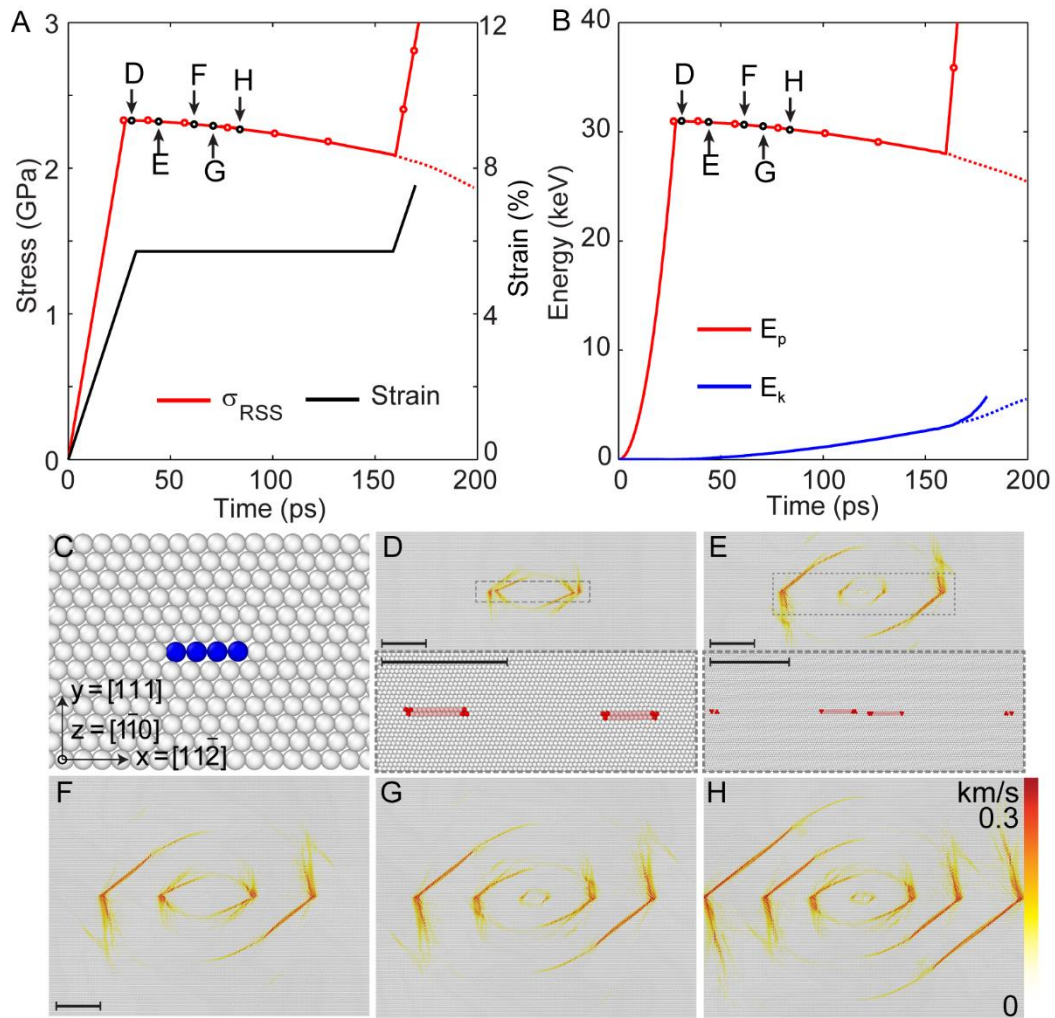


图 2. 纳米析出相诱导的位错源机制。(A) 加载的应力应变随时间的变化, (B) 势能和动能随时间的变化, (C)析出相 (蓝色) 所代表的原子结构示意图,(D)-(H)原子速度场显示在定常临界应变控制下, 螺位错从析出相和基底界面上不断萌生的过程。通过图(D)和(E)中下方的方框区域放大图,可以看到螺位错的基本原子结构。图中所给出的标尺为 8nm。

3. 多晶材料内耗峰值的尺寸效应

近日,《材料学报》(Acta Materialia)以“多晶固体内耗峰值的尺寸效应”为题报道了中科院力学所非线性力学国家重点实验室魏宇杰研究员团队在晶界内耗研究方面的进展。

振动的琴弦可持续很长时间,余音不绝,而某些材料在没有外部激励时则很快就停止振动,两者的差异通常由材料内部的微观结构-以及微观结构的耗散导致,物理上称之为内耗。内耗指固体振动过程中的能量耗散,它表征材料的阻尼性能。晶界作为多晶材料重要的内耗源,其力学弛豫会引起内耗。我国科学家葛庭遂先生于1947年首创可以测量低频内耗的“葛式扭摆”,在多晶铝的内耗谱(内耗作为温度或频率的函数)中发现了一个晶界内耗峰(又称“葛式峰”,见图3),并用晶界粘滞性滑动模型给予了解释,奠定了“滞弹性”这门学科的实验基础。

此后,科研工作者们测量了多种多晶材料的内耗谱,但得到差异很大的实验结果,其中有的材料并不出现晶界内耗峰,有的材料则出现多个晶界内耗峰。以往基于晶界粘性滑动假设的理论与模拟难以解释这些实验现象。该研究团队从晶界的微观变形机理出发,就晶界中的粘弹性蠕变与扩散耦合问题,发展了用于描述晶界中粘弹塑性变形的数值方法来研究多晶体中晶界弛豫引起的内耗。通过建立图(4a)所示的三维多晶模型,该团队计算了其损耗模量频率谱(见图4b),发现除了晶界切向应力的弛豫会导致损耗谱上产生耗散峰(“葛式峰”)外,晶界法向应力的弛豫也会引起耗散峰的出现。这一双峰弛豫的临界频率与晶粒尺寸 d 具有不同的幂律关系(见图4c),其中低频峰临界频率正比于 d^{-3} ,高频峰临界频率正比于 d^{-1} ,明确了两个耗散峰对应的晶界微观变形模式。此外,该团队还研究了晶界内耗峰对晶界弹性性质的依赖性,确定了两个耗散峰存在的条件。

该工作对晶界内耗峰的物理机制的研究具有重要意义,同时也有利于研究地震波在多孔介质以及颗粒材料传播过程中的衰减。该论文得到了国家自然科学基金委“非线性力学的多尺度问题研究”基础科学中心(基金号11988102)和国家自然科学基金(基金号11790291),中国科学院先导专项(XDB22020200)以及复杂系统力学卓越创新中心的支持。

论文链接: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135964542030793X>

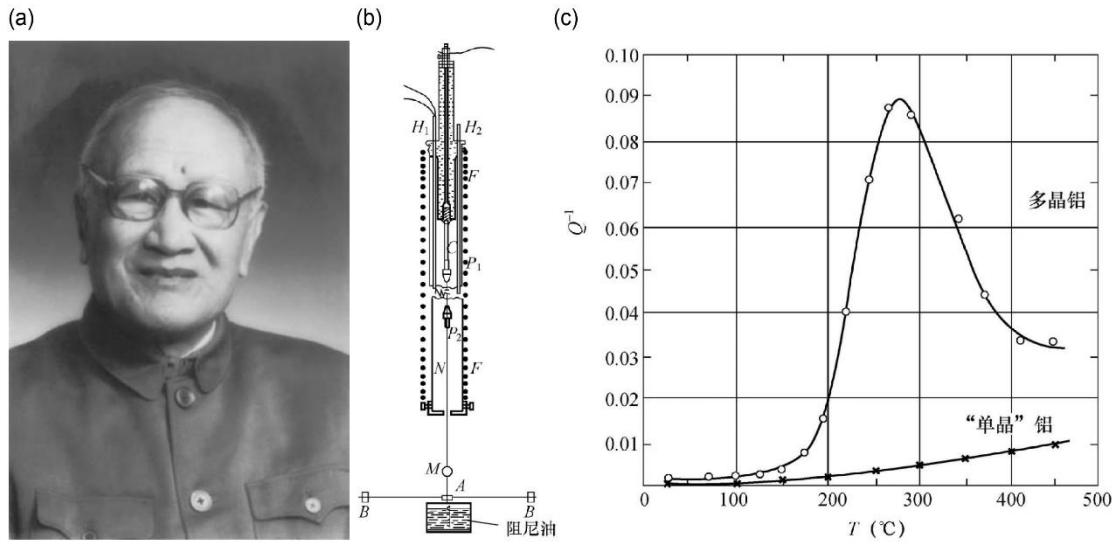


图 3: (a) 葛庭遂先生; (b)“葛式扭摆”, 可以用于测量丝状试样的内耗和切变模量; (c) “葛式峰”, 在多晶铝的内耗谱 (内耗作为温度的函数) 上发现了在单晶铝上不存在的内耗峰。其中, 图(a) 取自 Metallurgical and Materials Transactions A 30.9 (1999): 2267-2295, 图(b) 和 (c) 取自《固体内耗理论基础:晶界弛豫与晶界结构》, 北京大学出版社, 2014。

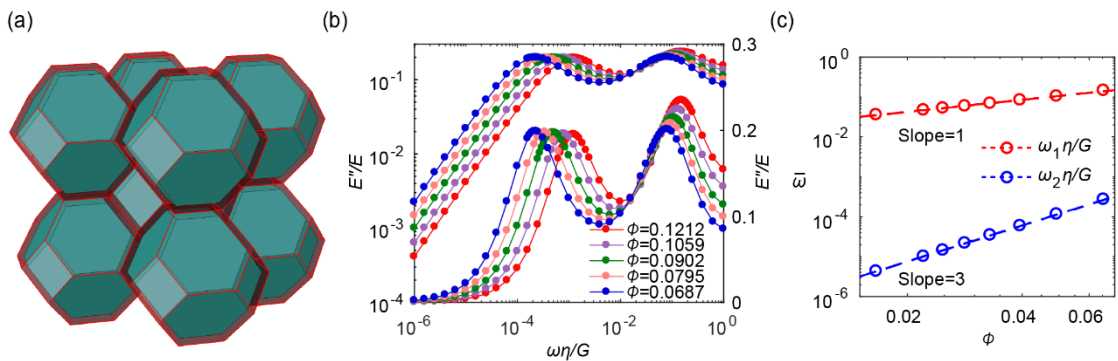


图 4: 三维多晶的内耗峰尺寸效应: (a) Wigner-Seitz 模型; (b) 不同晶界体积分数 ϕ 的多晶体的损耗模量频率谱: 这里高频峰对应于图 3(c)中的“葛式峰”, 由晶界的粘滞性滑动引起, 而低频峰则是新发现的耗散峰, 由晶界的法向弛豫引起; (c) 两个峰对应的临界频率值与晶界体积分数 ϕ 的关系, 注意晶界体积分数 ϕ 与晶粒尺寸 d 成反比, 即 $\phi \propto d^{-1}$, 因此低频峰临界频率正比于 d^{-3} , 高频峰临界频率正比于 d^{-1} 。

4. 三体颗粒磨损机理研究进展

近期，中科院力学所非线性力学国家重点实验室胡剑桥助理研究员以第一作者身份在《国际摩擦学》(Tribology International) 上发表了题为“Effect of plasticity on nanoscale wear of third-body particles”的研究文章，揭示三体颗粒摩擦过程中粘着磨损的新机理。《国际摩擦学》是著名摩擦学专业期刊，在摩擦磨损领域具有重要的国际影响力，受到国内外诸多著名摩擦学专家的关注。

粗糙表面在摩擦过程中会产生三体颗粒，这些两接触表面中的三体颗粒能通过运动和变形实现减小摩擦阻力、降低磨损量以及对表面损伤进行修复的功能；因此，对摩擦过程中三体颗粒变形与失效过程的研究在摩擦学调控领域具有重要的意义。该工作通过研究两表面间纳米颗粒的运动、变形和失效过程，提出了纳米颗粒在不同载荷下的两种磨损机理，揭示了粘性和塑性在纳米颗粒磨损失效过程中的影响。进一步地，通过对纳米颗粒失效过程中的磨损体积和塑性功进行统计分析，结果表明不同破坏机理下的磨损体积与塑性功表现出统一的线性相关性，而且纳米颗粒的磨损系数在该尺度下表现出尺寸无关性（图 5）。该研究工作被审稿人高度评价，评述为“*This is a new observation that can open more fundamental questions in the process of three-body adhesive wear*”。

该研究工作的发现有助于为三体颗粒的摩擦设计、界面摩擦调控等方面提供重要的参考与指导。工作得到了国家自然科学基金委“非线性力学的多尺度问题研究”基础科学中心（基金号 11988102）的支持。

论文链接：<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106739>

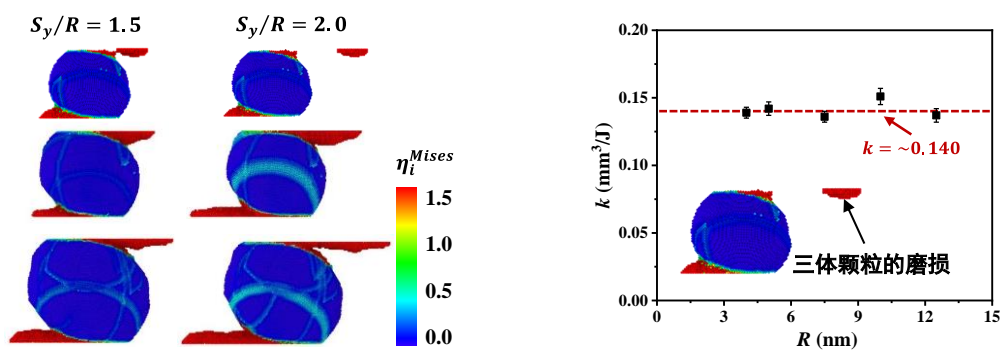


图 5. 左图显示了不同尺寸的纳米颗粒在剪切过程中的变形失效过程；右图展示了不同尺寸颗粒磨损系数的尺寸无关性。

5. 增材制造 AlSi10Mg 合金超高周疲劳研究进展

增材制造 (Additive Manufacturing) 属于一种数字化的制造技术, 可制备出传统工艺难以制备的复杂结构, 从而实现结构的个性化设计, 具有广阔的应用前景。然而, 由于增材制造材料微结构不均匀且包含有较多的缺陷, 导致材料疲劳性能较差, 这大大影响了其工业应用。长寿命服役中, 构件要求承受高周甚至超高周次 ($>10^7$) 的循环载荷, 因此探索增材制造材料的超高周疲劳性能至关重要。

中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室近期围绕增材制造铝合金 (AlSi10Mg) 高周、超高周疲劳特性开展了系列工作, 探索了激光选区熔化 (SLM) 制备工艺下不同粉末尺寸 ($20\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m}$) 和制备取向 (水平、垂直) 对 AlSi10Mg 的超高周疲劳性能及裂纹萌生机理的影响 (图 6)。揭示了增材制造材料微结构各向异性特征, 从宏观和微观角度分别探索了其对疲劳性能的影响机制。结果表明, 材料内部未熔合颗粒是其裂纹起源的主要形式, 并展示出五种不同的裂纹起源方式 (图 7)。基于 AlSi10Mg 材料的应力-寿命 (S-N) 数据和疲劳裂纹尺寸, 建立其高周、超高周疲劳失效概率与疲劳寿命、外加载荷的关联, 获得了裂纹萌生位置对裂纹扩展速率的影响模型。本研究不仅为增材制造铝合金的工程应用提供了有效的疲劳性能数据, 同时对于探索增材制造铝合金的裂纹萌生及扩展机制奠定了基础。

相关工作近期发表在疲劳研究领域重要期刊 *International Journal of Fatigue* (<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105696>, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106013>) 上。工作得到了国家自然科学基金委“非线性力学的多尺度问题研究”基础科学中心 (基金号 11988102) 的支持。

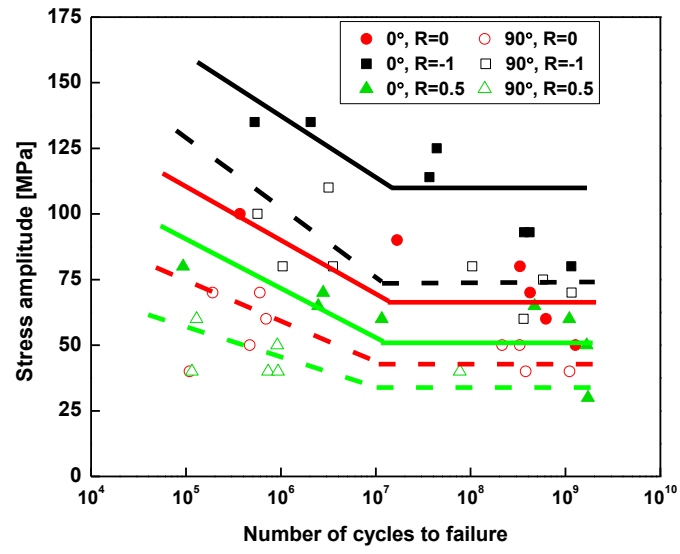


图 6. 不同制备取向及加载方式对材料疲劳强度的影响。

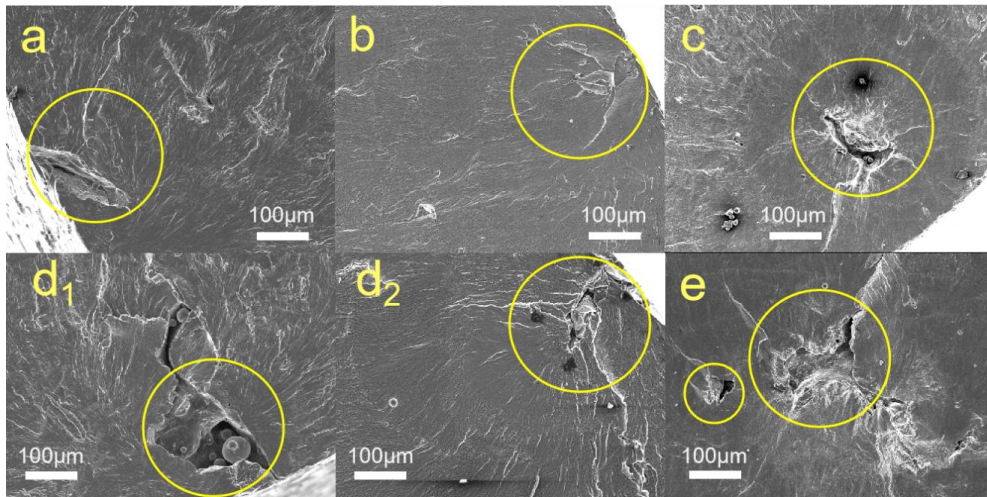


图 7. 制造铝合金 (AlSi10Mg) 五种疲劳裂纹起源方式。

6. 湍流大涡模拟亚格子模型研究进展

大涡模拟方法是下一代湍流数值预测的工具。近年来,大涡模拟方法的亚格子模型研究取得很大进展,使得该方法在单相不可压缩湍流的数值预测中取得很大成功,可以得到非定常湍流的时空统计性质。大涡模拟方法面临的新挑战之一是湍流与不同过程的耦合,如湍流噪声、多相湍流、湍流燃烧等。这些过程的预测需要大涡模拟精确地预测湍流的时空关联及其动态耦合。大涡模拟对时空关联的预测误差的主要来源于两个方面:一是由于滤波运算引起的小尺度湍流运动的缺失。这会导致解析尺度的湍流的积分时间尺度和空间尺度变大,湍流相干性变得比实际更强;二是来自于基于湍流涡粘假设的亚格子模型误差。大涡模拟方法最常用的 Smagorinsky 亚格子模型常常表现出过大的耗散性,使得解析尺度的湍流场相干性进一步增强。大涡模拟湍流时空关联的误差使得与之密切相关的颗粒相对弥散出现误差。为克服上述问题,中科院力学所晋国栋研究员与合作者周志登等发展了近似反卷积方法和运动学合成亚格子湍流的耦合方法,重构了小尺度湍流对时空关联和颗粒相对弥散的效应,有效提高了大涡模拟方法预测湍流中拉格朗日时空关联和颗粒弥散的预测精度(图8)。为进一步克服通常的亚格子模型湍流粘性耗散过大的问题,他们基于近来兴起的人工神经网络方法,以大尺度应变率张量和滤波尺度为输入特征量,发展了湍流亚格子应力的模型,适用于不同滤波宽度的大涡模拟,提高了湍流能谱和拉格朗日统计量的预测精度(图9)。相关结果发表在《Physics of Fluids》、《Comt. & Fluids》上。该工作得到了国家自然科学基金委基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”(基金号11988102)的支持。

论文链接:

<https://doi.org/10.1063/5.0018756>; <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2019.104319>

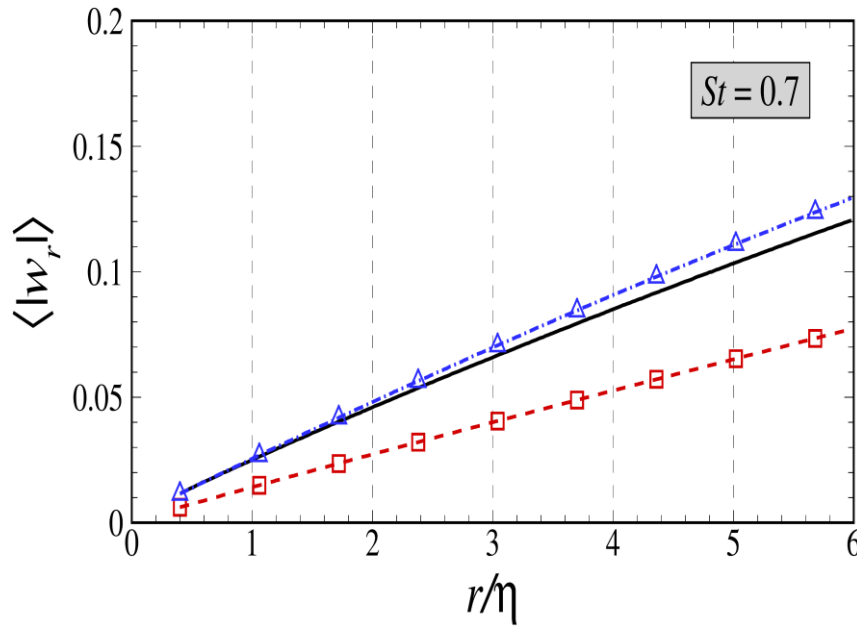


图 8. 湍流中 Stokes 数为 0.7 的颗粒平均相对速度随分离距离变化：实线为直接数值模拟，带方块的虚线为常规大涡模拟；带三角的点划线为应用模后的结果。发展的模型提高了大涡模拟预测颗粒相对运动统计量的能力。

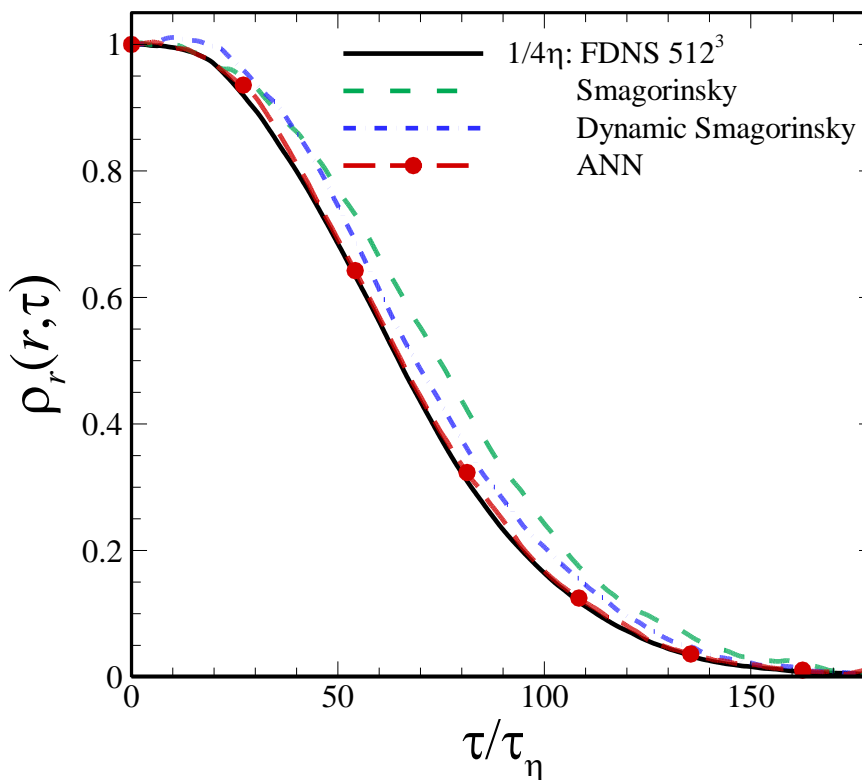


图 9. 湍流中两点两时间拉格朗日时空关联随时间变化：长短线为常规亚格子模型，短划线为动态亚格子模型，点红点的长短线为人工神经网络模型，趋向于实线表示理想大涡模拟结果，表明人工神经网络模型减少了模型误差。

7. 超重力驱动湍流近期研究进展

近期，清华大学燃烧能源中心、能源与动力工程系和航天航空学院的孙超教授团队和合作者在《科学进展》（Science Advances）上发表了题为“旋转超重力驱动的热湍流”（Supergravitational turbulent thermal convection）的研究论文。

《科学进展》是美国科学促进会(AAAS)的开源期刊，是一本涵盖所有学术领域的综合性科学刊物，被国内外高度认可。

浮力驱动的湍流广泛地存在于自然界和工业生产中，其在洋流、大气流、星球内部对流、发电站冷却等过程中扮演着至关重要的角色。热湍流研究的核心问题之一是理解高瑞利数条件下湍流结构以及全局传热的物理机理。因此，近年来学术界一直致力于研究如何有效提高瑞利数的范围。并且在极端条件（超重力、高速旋转）下，研究湍流结构和运输的意义重大：在工业过程中，超高速旋转的航空发动机盘腔内流动，火箭瞬间加速、减速过程中的流动机理；在自然现象中，快速旋转木星上大红斑的形成，恒星内部对流机理。

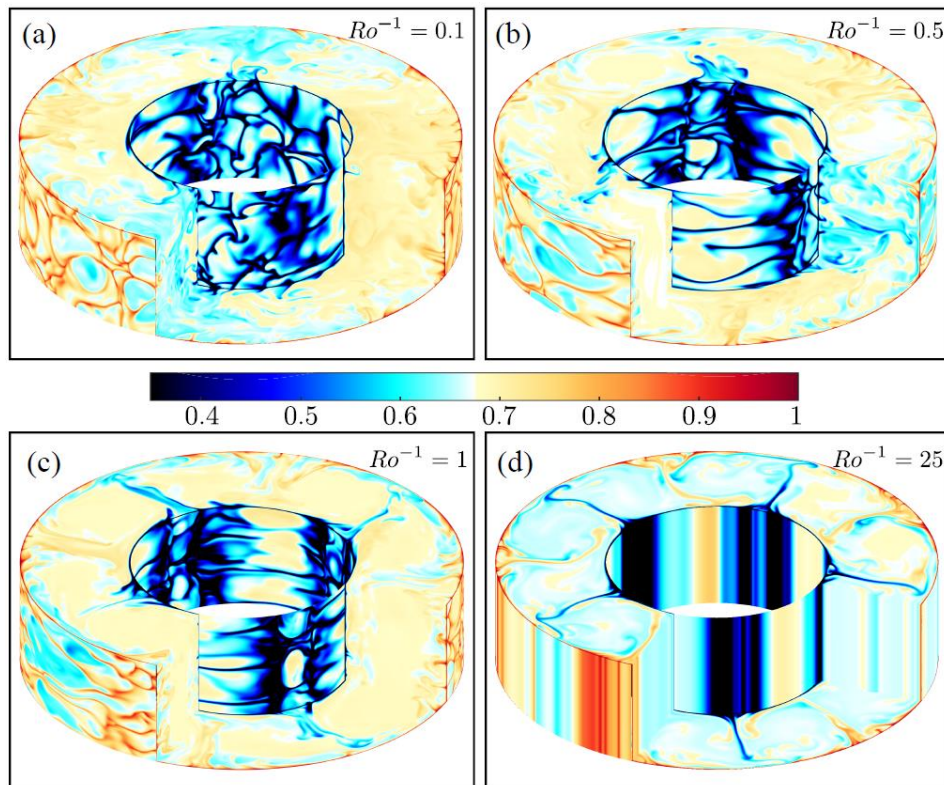


图 10. (a-d) 湍流流动结构随旋转效应的增大逐渐的演化规律。

本工作巧妙地利用高速旋转装置产生的离心力作为驱动力极大地提高了瑞利数，实现最高达 60 倍等效重力的离心力。结果表明，旋转系统引入了科里奥利力的作用，其会使流场二维化。同时，当系统处于准二维流态并且瑞利数足够大时，传热标度律指数亦会增大，他们认为这与系统流态的转变相关。此外，在该系统中观察到了与系统旋转方向相同的对流涡的大尺度湍流结构周向转动（Zonal flow），其产生与科里奥利力的作用以及内外环曲率的差异相关（图 10-11）。

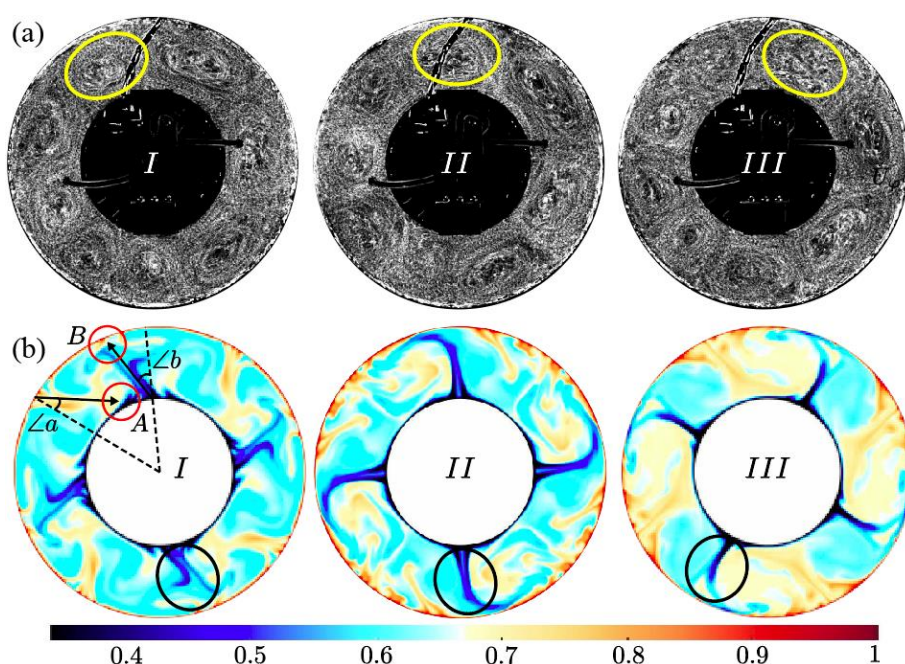


图 11. (a) 条纹图（实验）显示 Zonal flow 流动结构；(b) 瞬时温度场（数值计算）揭示 Zonal flow 产生机理。

审稿人评价当前研究为“Original contribution”。该研究成果为工业生产提供了理论支撑，同时也有助于理解海洋学、大气科学、地球物理学中的对流现象。论文作者包括孙超教授课题组成员蒋河川、王东璞，美国哈佛大学的朱晓珏博士以及荷兰屯特大学助理教授 S. G. Huisman 博士，孙超教授为本论文的通讯作者。该工作得到了国家自然科学基金委基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”（基金号 11988102）的支持。

论文链接：<https://advances.sciencemag.org/content/6/40/eabb8676>

8. 表面活性剂的气液界面效应研究进展

近期, 北京大学工学院的段慧玲教授课题组在《Journal of Fluid Mechanics》上发表了题为“表面活性剂引起的气液界面三维回流”的论文。

表面活性剂广泛存在于自然界(河流、海洋等)和工业界流体中, 吸附在界面上的表面活性剂会由于浓度梯度产生 Marangoni 力, 降低气液界面附近的流动性, 这严重影响了气液界面在减阻领域的工程应用。段慧玲教授课题组研究了表面活性剂对气液界面附近三维流动和气液界面滑移特性的影响, 发现表面活性剂不仅会减弱气液界面附近的流动, 当 Marangoni 效应占主导时, 还会产生回流; 通过与无活性剂的数值预测比较, 表明了表面活性剂会减小气液界面局部滑移长度; 揭示了三维回流的产生机制, 是由于展向和流向的浓度梯度共同导致; 提出了控制回流特征的两个关键参数, 即活性剂的浓度、气液界面的长和气液界面的宽, 其中, 表面活性剂浓度是影响回流强度和结构的主要参数; 当三个控制参数固定时, 在不同流速下, 回流表现出动力学相似的特性(图 12)。

当前的工作对于研究表面活性剂引起的三维回流现象提供了重要的参考, 将对理解表面活性剂对气液界面滑移特性的影响机制, 促进气液界面的实际应用具有重要的意义。工作得到了国家自然科学基金委“非线性力学的多尺度问题研究”基础科学中心(基金号 11988102)的支持。

论文链接: <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.426>

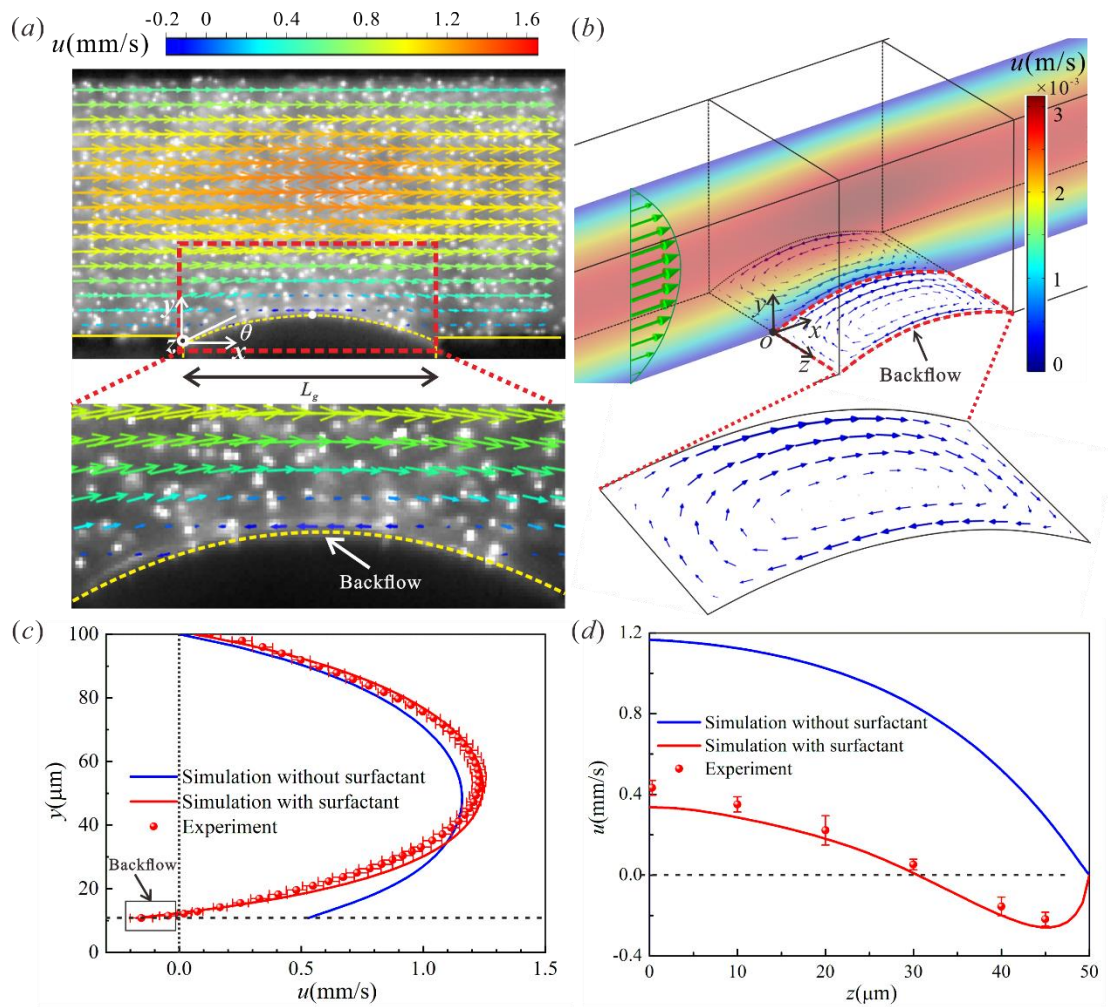


图12. 气液界面上的回流现象：（a）使用micro-PIV测量得到的具有活性剂吸附的速度场，（b）具有活性剂吸附三维流动的数值模拟结果，（c）气液界面顶点沿着 y 方向的局部速度剖面，（d）气液界面顶点沿着气液界面顶线的滑移速度分布。

二. 多尺度力学的智能模拟与控制

2020年10月28-29日，第二届复杂系统力学智能模拟与控制研讨会在中国科学院力学研究所顺利召开。本次会议由何国威院士担任主席，魏宇杰研究员担任会议执行主席，依托中国科学院复杂系统力学卓越创新中心、国家自然科学基金委“非线性力学的多尺度问题研究”基础科学中心、中国科学院力学所、中国力学学会和北京国际力学中心共同主办。

本次会议是在2019年第一届复杂系统力学智能模拟与控制研讨会基础上召开的。会议执行主席魏宇杰研究员在致辞中指出：复杂系统力学智能模拟与控制系列会议是顺应科技高速发展的趋势，应运而生。希望能够通过会议交流，加强大家在此方向的交流合作，促进力学学科智能模拟与控制研究的发展。

会议以人工智能模拟方法及其在复杂系统力学中的建模与控制、重要工程领域的应用为主题。来自北京大学、清华大学、中国科学技术大学、上海交通大学、北京航空航天大学、南京航空航天大学、南方科技大学、哈尔滨工业大学(深圳)、大连理工大学、中国科学院物理研究所、中国科学院力学研究所、北京计算科学研究中心等著名高校和研究机构的近20位专家学者就最新的工作进展作学术报告。报告内容涉及人工智能湍流建模、湍流减阻控制、湍流实验数据同化、流体输运性质和控制方程以及固体材料本构关系构建、参数化偏微分方程的求解、数值边界条件设计、以及在国家重大工程问题中的应用，包括高速铁路疲劳寿命周期载荷谱预测，风电场发电预测等。

会议采用现场、线上视频与网站同步直播相结合的方式进行，得到学术界的广泛关注。来自北京地区科研单位的100余人参加了现场会议，参加线上会议和直播会议的人数达300余人。经过两天的报告，学者们深入交流了人工智能模拟方面的研究进展，探讨了智能化模拟方法在力学前沿和重大工程问题中的应用。

目前人工智能模拟与控制与力学学科的交叉融合正处于快速发展的阶段，会议为国内研究学者提供了良好的学术交流平台。通过研讨，会议形成了该领域发展前沿和关键问题的共识，有助于科研工作者把握以数据驱动科学为特点的新的研究范式，进一步促进力学学科与人工智能模拟与控制的交叉融合，推动力学学科的发展。



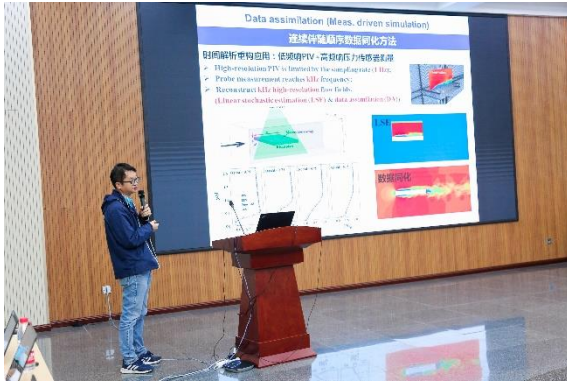
会议执行主席魏宇杰研究员致辞



王一伟研究员主持会议



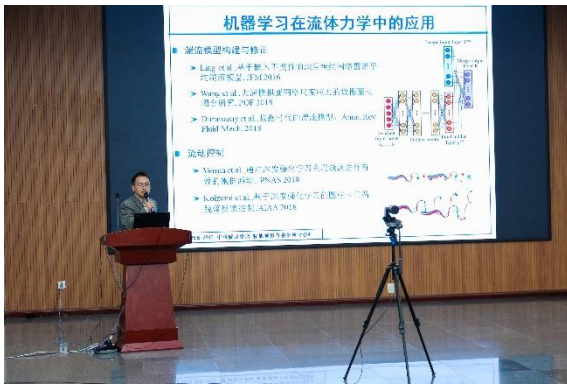
周裕教授报告



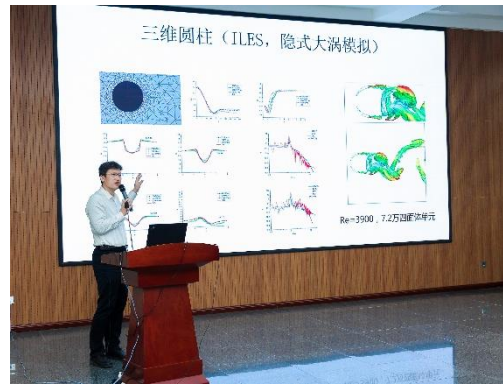
刘应征教授报告



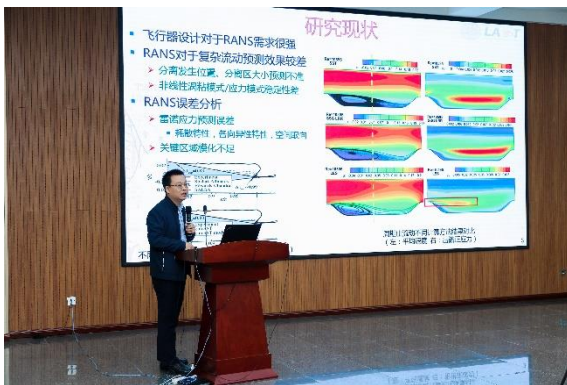
董彬副教授报告



黄海波教授报告



吕宏强教授报告



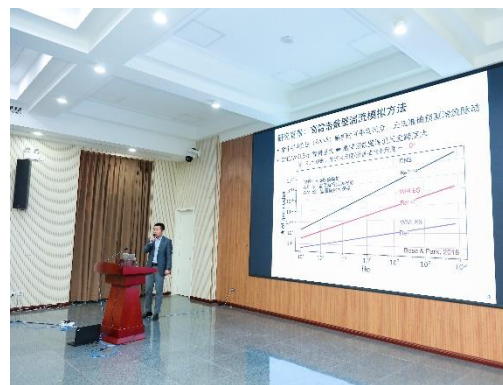
张宇飞副教授报告



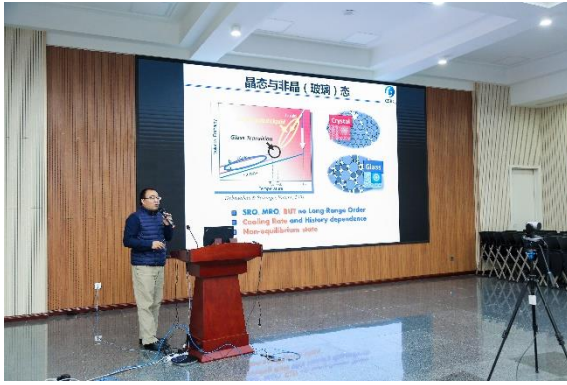
郭旭教授网络报告



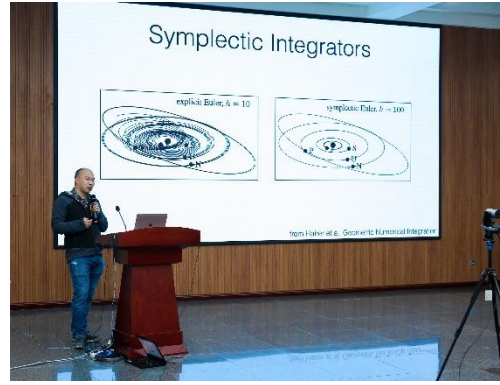
魏宇杰研究员报告



杨晓雷研究员报告



管鹏飞教授报告



王磊研究员报告



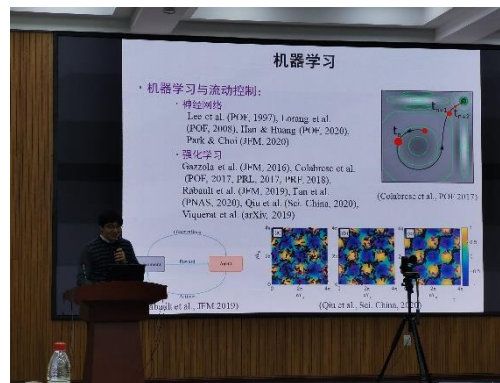
姚卫副研究员报告



由小川副教授报告



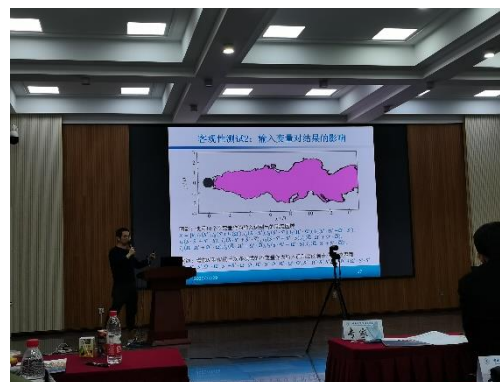
唐少强教授报告



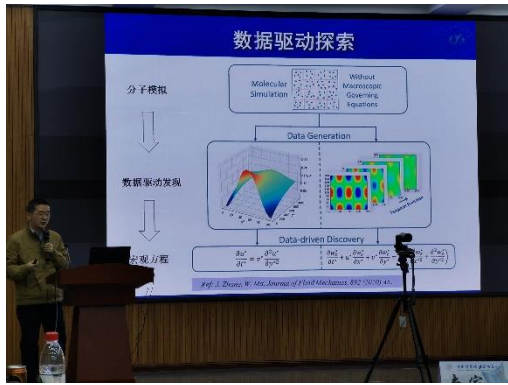
黄伟希副教授报告



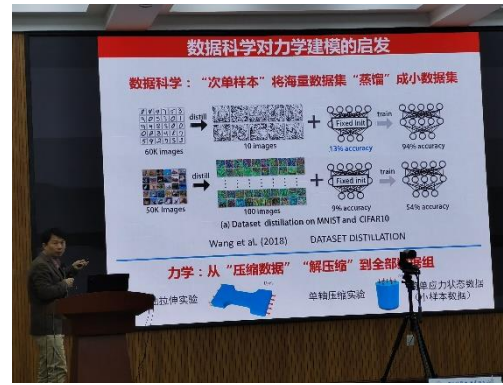
王建春教授报告



杨子轩副研究员报告



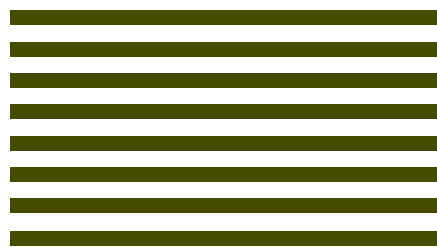
张俊教授报告



唐山教授报告



现场会议代表合影



多尺度力学快讯

2020年 | 第2期 | 总第2期 | 编辑人员: 何国威, 晋国栋

