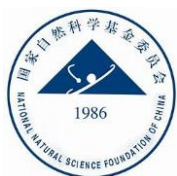
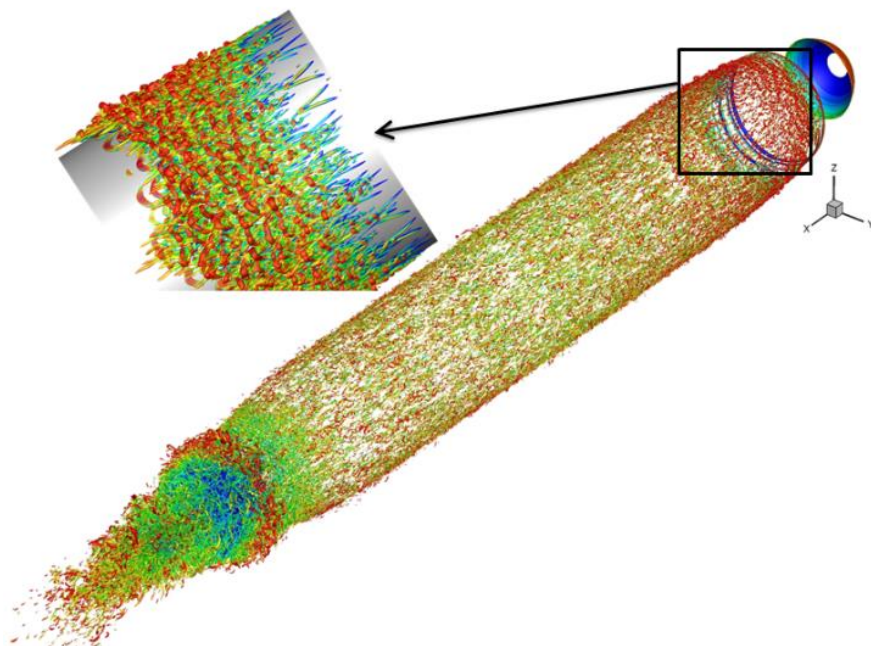


多尺度力学快讯

2022 年 | 第 2 期 | 总第 6 期

▼ 潜艇湍流中的多尺度涡结构



“非线性力学的多尺度问题研究”项目组

2022 年 8 月 10 日

基金委基础科学中心项目

“非线性力学的多尺度问题研究”简介

基础科学中心项目简介：国家基金委基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”(简称“多尺度力学”)于2019年立项,是我国力学领域第一个基础科学中心项目。项目负责人为何国威院士(美国物理学会 Fellow),依托单位是中国科学院力学研究所,合作研究单位有北京大学和清华大学。项目组成员为陈十一院士(美国物理学会 Fellow)、孙超教授(“千人计划”入选者,美国物理学会 Fellow)、唐少强教授(北京大学博雅特聘教授)和魏宇杰研究员(杰青)等在非线性力学领域具有国际影响力的中青年科学家。

基础科学中心项目特点：(1) **聚焦核心科学问题：**多尺度力学的核心科学问题包括时间与空间耦合、连续与离散耦合以及宏观与微观耦合。项目研究的两个非线性力学典型案例,湍流与多相流动、固体强度与破坏是《Science》杂志提出的125个最具挑战性的科学问题中的力学问题(分别对应第43个¹和第55个问题²)。(2) **满足国家需求：**项目研究的两个典型案例,湍流与多相流动、固体强度与破坏分别是超静音潜艇噪声、高铁服役安全可靠性的关键问题,在解决国家重大需求中将发挥关键作用。(3) **推动前沿交叉：**基础科学中心项目不仅涉及湍流与多相流动、固体强度与破坏等力学学科内部的交叉,而且注重多尺度力学与新兴的人工智能方法的交叉融合。

基础科学中心项目研究内容：围绕多尺度力学核心问题、国家需求和前沿交叉方向,项目研究内容安排如下表所示。

研究内容	研究团队	核心问题	国家需求	前沿交叉
湍流与多相流动	何国威	时间与空间耦合： 湍流时空能谱	超静音潜艇湍流降噪	基于机器学习的湍流建模
	陈十一	时间与空间耦合： 湍流能量传递机制	高超声速飞行器热防护	
	孙超	连续与离散耦合：热湍流、气泡-湍流作用机理	湍流气泡减阻	
固体强度与破坏	魏宇杰	宏观与微观耦合： 材料微结构与强度	高铁服役安全设计	数据驱动材料本构关系
	唐少强	宏观与微观耦合： 材料多尺度计算算法		聚类分析、机器学习方法

¹ 《Science》杂志提出的第43个问题：能否发展关于湍流动力学和颗粒材料运动学的综合理论？

² 《Science》杂志提出的第55个问题：是否存在有助于预报的地震先兆？

目 录

一 . 阶段成果	1
1. 湍流时空能谱理论与湍流噪声大涡模拟方法	1
2. 材料微结构与宏观性能	2
3. 多尺度力学的智能模拟方法	3
4. 极高端流度湍流和多相流动的输运机理	4
5. 高超声速转捩和湍流边界层摩阻和热流过冲机理	5
6. 复杂结构介质界面多尺度力学行为	6
二 . 近期进展	7
1. 提出高雷诺数壁湍流统一壁面律公式, 准确捕捉流向速度	7
2. 发展可压缩燃烧大涡模拟求解器, 实现标准火焰工况高保真预测	8
3. 流体涡管纽结演化路径	9
4. 城市冠层湍流的模型研究进展	10
5. 含颗粒湍流大涡模拟亚格子模型的研究进展	11
6. 超重力热湍流中的湍流脉动统计特性研究	12
7. 三元单相流体中自发形成的纳米结构域研究	14
8. 非均匀加热对热湍流系统流动反转的控制及其机理研究	15
9. 极端条件下金属的循环变形与界面损伤多尺度研究	16
10. 夹杂演化与复合材料等效力学性能的关联研究	17
11. 折纸/剪纸结构多模态变体及功能化设计研究	18
12. 商用锂电池不同充电倍率与循环寿命关系的疲劳模型	19
13. 高速列车关键结构线路应力谱研究进展	20
14. 通过热处理实现高熵合金增强增韧	21
15. 复合异构 CoCrNi 中熵合金在低温下的优异力学性能	23
16. Archard 定律在从塑性到断裂的磨损机制过渡中的失效	24
17. 基于机器学习的 Ti-6Al-4V 合金的超高周疲劳寿命预测	25
三 . 工作动态	27
1. IUTAM“固体微结构的多尺度构筑——力学与制造”专题研讨会	27
2. “高超声速边界层转捩研究的新进展”学术研讨会	28
四 . 人才培养	30
1. 让看不见的流场无所遁形 (王洪平)	30
2. 多源异构湍流数据同化提升噪声预测精度 (张鑫磊)	31
3. 多组分流体多尺度纳米级结构与系统整体性质 (历明波)	32

一. 阶段成果

项目实施以来,项目团队获国家自然科学基金二等奖 2 项、何国威院士获周培源力学奖。青年科研人员取得了长足进步,孙超教授入选美国物理学会 Fellow;孙超教授和杨越教授分别获腾讯基金会“科学探索奖”;多人获得基金委人才项目资助,其中杰青 2 名、“海内外”优青 4 名,中科院百人计划 4 名,在多尺度力学领域初步形成了具有国际竞争力的研究团队。

项目取得的阶段性成果如下:

1. 湍流时空能谱理论与湍流噪声大涡模拟方法

创建了湍流时空能谱理论,解决了湍流噪声多普勒谱宽问题,引领了湍流时空结构研究的新方向,发展了复杂几何边界湍流壁面模化大涡模拟和湍流噪声计算方法,率先完成了全尺度潜艇湍流数值模拟,实现了远场瞬时水动力噪声场指向性的预测。湍流是典型的时空多尺度非定常流动,是流体力学基础研究的核心难题,又是潜艇等战略装备水动力噪声的关键。依托基础科学中心项目,研究团队创立了湍流的时空能谱理论,解决了多普勒谱宽问题,提出了时空关联的去关联机制,发展了时空能谱的动力学方程,引领了湍流时空结构研究的新方向,发展了复杂几何边界湍流壁面模化大涡模拟和湍流噪声计算方法,自主开发了高雷诺复杂几何边界湍流模拟的万核级高效并程序,率先完成了全尺度潜艇湍流数值模拟和水动力噪声的机理分析(图 1),解决了远场瞬时水动力噪声场指向性预测的问题,被国际湍流噪声计算与预测权威,美国工程院院士、美国波音公司高级研究员 Spalart 引用为“更好的噪声预测结果(better acoustic predictions)”。鉴于此,何国威院士于 2020 年受邀在美国物理学会第 73 届流体力学年会作“湍流的时空能谱”大会邀请报告,成为改革开放以来第一位在此顶级国际学术会议作邀请报告的大陆学者,并受邀在美国物理学会旗舰刊物《Phys. Rev. Fluids》撰写有关综述论文。该论文不仅总结了该领域近二十年的重要成果,而且提出了今后需要关注的问题。同时,何国威院士因在湍流时空能谱方面作出的杰出贡献,于 2021 年荣获第 12 届周培源力学奖。

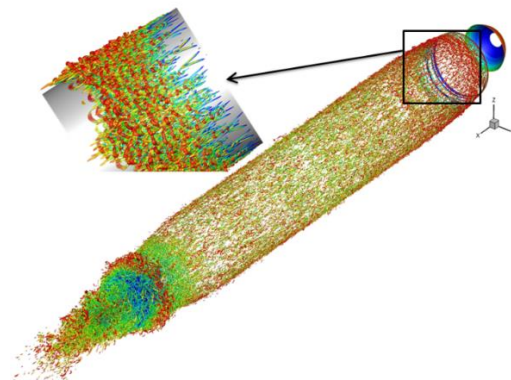


图 1: 潜艇湍流中的多尺度涡结构。

2. 材料微结构与宏观性能

首次提出合金材料微结构与宏观强度之间的理论关系，并首次通过直接实验观测证实了局部化学短程有序结构的存在，实现材料的强-韧协同优化，引领了增强增韧的新机制研究方向。针对纳米多晶金属材料，提出了尺寸相关的位错存储模型，建立了晶界和晶内的静水压相关晶体塑性本构模型，提出“动态剪滞模型”，揭示了微结构复合材料能量传递与耗散机理，建立了“材料组分-微观结构-吸能特性”的理论关联。

研究团队首次提出了析出相合金材料的强韧化优化设计中，微观析出相大小、析出相间距与材料宏观强度之间的理论关系。和传统析出相的 Orowan 强化不同，研究发现了高应力水平下纳米析出相可作为位错源持续发射界面位错，可提升高应力状态下的材料的变形能力，实现这类材料的强-韧协同优化。进一步提出了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，并给出了材料设计过程中这两个尺度与强度的关系，引领增强增韧的新机制研究方向。该工作在《Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.》上发表。

高熵合金由于抗断裂能力、抗拉强度、抗腐蚀及抗氧化特性都比传统的合金要好，成为未来最有发展潜力的新型材料之一。但迄今尚未有清晰证据可信地表明化学短程有序(CSRO)的存在。研究团队采用高角环形暗场扫描透射电镜高分辨率图像，首次通过直接实验观测证实了局部化学短程有序结构的存在，发现其尺寸在亚纳米级；如图 2 所示，揭示了亚纳米级化学短程有序与位错交互作用的强韧化机制。该工作通过 TEM 实验和计算模拟，首次直接实验证实了中熵合金化学短程有序及其与位错的交互作用，为理解高熵合金的基本微结构特征以及设计高性能的高熵合金提供了新的思路。相关工作发表在《Nature》2021。

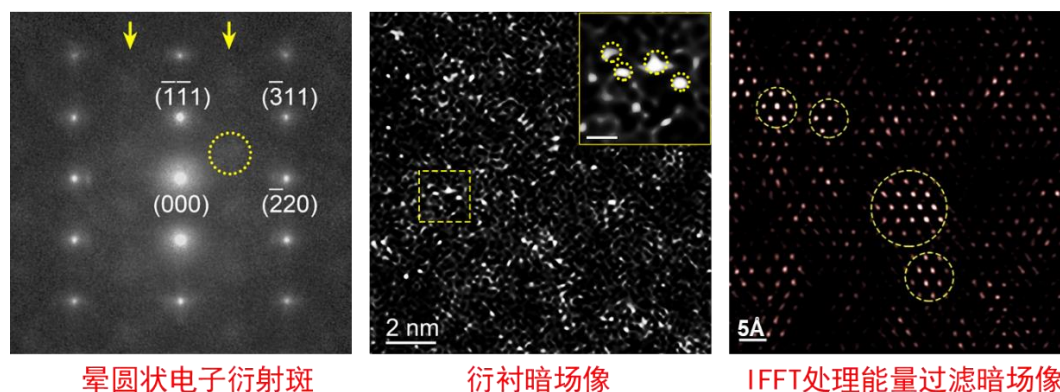


图 2: 采用高角环形暗场扫描透射电镜 (HAADF) 高分辨率图像，首次通过直接实验观察证实了局部化学短程有序结构的存在 (Nature, 592, 2021)

先进材料和结构往往在内部微结构具有空间上的多尺度，在承载时面临从准静态加载到冲击加载的时间多尺度特征。针对纳米多晶金属材料的尺寸相关力学行为，提出了尺寸相关的位错存储模型，阐明晶内位错存储能力随晶粒尺寸减小

而减弱是导致纳晶金属材料反 HP 行为产生的根本原因；建立了晶界和晶内的静水压相关晶体塑性本构模型，揭示反 HP 行为消失的主要原因为静水压诱导的晶界强化效应超越晶内位错存储能力下降诱导的软化效应；建立了综合考虑激光穿透、质量蒸发效应并融合射线追踪技术的激光束与金属相互作用新体热源模型，大幅减少极端高温在金属打印模拟中的出现次数，提高模拟精度，给出了更为合理、无人工干预的三维热场分布。论文发表在《J. Mech. Phys. Solids》《Int. J. Plast.》《Extreme Mech. Lett.》等。结合分子动力学、力化耦合连续介质理论、有限元模拟等多尺度理论与计算方法，提出“动态剪滞模型”，揭示了微结构复合材料能量传递与耗散机理，建立了“材料组分-微观结构-吸能特性”的理论关联，厘清了基体对复合材料抗冲击性能的影响，成功解释了英国皇家科学院 Norman Fleck 院士课题组、代尔夫特材料中心主任 S. van der Zwaag 教授课题组的实验结果；建立了非晶合金的微结构演化塑性本构模型，揭示了非晶-纳米晶双相合金的协同塑性变形和强化机理，构建了单分子层过渡金属硫化物的力致相变本构模型。相关工作发表在《J. Mech. Phys. Solids》《Sci. Adv.》《Int. J. Impact Eng.》等。

3. 多尺度力学的智能模拟方法

基于机器学习方法，构建了湍流大涡模拟亚格子模型和分离湍流壁模型；首次提出并实现了机器学习本构与有限元结合的计算方法；提出了虚拟聚类分析方法对于加载条件的依赖性和背景材料恰当模量的判别准则，设计自适应算法，有效提升均匀化的准确性；推广到有限变形、塑性等问题中，开放计算程序；提出按应变聚类、按位移计算的快速算法，便于结合现有软件加速材料数值均匀化和多尺度计算的开发与实现，引领了计算力学的人工智能化研究方向。

机器学习是近年来蓬勃兴起的前沿研究手段，在非线性多尺度力学研究中有望发挥独特功效。课题组采用机器学习方法在湍流大涡模拟亚格子模型、复杂湍流壁模型、固体本构模型及其与有限元算法的结合、虚拟聚类分析方法等方面取得了一系列成果。

研究团队实现了高雷诺数的分离流动数据驱动大涡模拟壁模型的构建，显著降低了计算量，在更高雷诺数的分离流动中准确预测了瞬时和时均的壁面切应力，表现了很强的泛化能力，为不同设置的分离流动壁面边界条件预测提供了技术工具，相关工作发表在《Phys. Rev. Fluids》，受到了美国阿贡国家实验室的关注。研究团队首次提出并实现了基于物理机理驱动的机器学习本构建模与有限元结合的计算方法，应用于受广泛关注的最理想的锂电池负极材料锂金属，实现了不同温度和变形场景下的力学行为精准描述。所构建的数据驱动的本构模型不仅能精确复现锂金属不同温度和应变率下的应力应变结果，而且能在更大的温度和应变率范围内，实现温度-应力-率-变形行为的预测（图 3）。有限元计算方法与该机器学习本构模型的有效联姻也引领了传统有限元计算的新方向。该工作为解决工程材料涉及温度、应力、率、变形等行为的精确描述和高效数值方法发展提供了创新思路。相关工作发表在国际力学权威期刊《J. Mech. Phys. Solids》上。

高效的数值均匀化算法是实现多尺度计算应用到材料分析设计的核心科学

阶段成果

问题之一。为此我们传播对于神经网络的理解；发展可以表示有限元、RKPM 等一系列计算力学算法的层级式深度学习神经网络 HiDeNN，及结合张量分解的神经网络降阶算法 HiDeNN-TD；利用机器学习等手段发展非线性分数阶微分方程的多尺度界面条件。通过上述工作展示了结合机器学习的多尺度计算有着巨大潜力。论文发表在《Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.》《Comput. Mech.》《Math. Comput.》《J. Sci. Comput.》《Theor. Appl. Mech. Lett.》等。其中 TAML 上发表的论文评为优秀论文；深度学习神经网络的工作在合作者美国西北大学 WK Liu 的研究组进一步发展为一套人工智能系统。面向计算力学软件自主可控的国家重大需求，参与某复合材料软件替代项目，为空间耦合多尺度计算方法的工程实践建立软件化的平台。

何国威院士与魏宇杰研究员担任会议主席，以基础科学中心项目为依托，已连续成功举办三届多尺度力学人工智能模拟与控制研讨会。会议得到国内外学者的广泛参与，有力推动了多尺度力学与人工智能的交叉融合。第四届多尺度力学人工智能模拟与控制研讨会于 2022 年 10 月在北京举行。

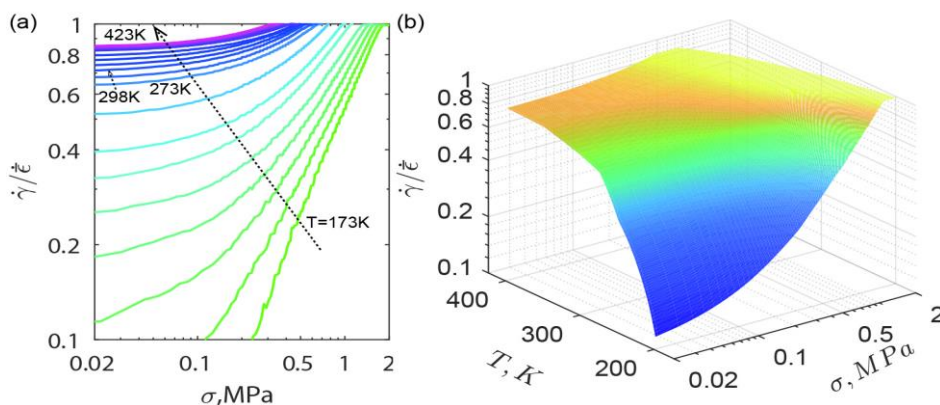


图 3: 物理驱动-机器学习本构模型预测锂金属不同温度、应力控制下的变形率，包含了锂金属的全服役温度和服役载荷区间 (JMPS, 104481, 2021)。

4. 极高端流湍流和多相流动的输运机理

聚焦研究极高端流湍流和多相流动的输运问题，开创性地提出利用高速旋转产生的超重力来驱动高端流湍流的新思路，为探索终极热湍流状态提供了重要路线；揭示了多相剪切湍流中离散相形成机制，为调控多相湍流提供重要理论基础。湍流流动在自然界、工业生产和国防军工中广泛存在，这些过程涉及超大的流动尺度以及超强的温度梯度，这使得系统内的湍流强度非常高。那么，当驱动湍流的控制参数趋于无穷大时，湍流会呈现哪些特征和规律？怎样才能基于实验室可达参数范围来研究和理解自然界和工业过程中具有极高强度的湍流运动？我们开创性地设计、搭建了旋转超重力热湍流实验台并验证了该方案在高端流湍流流动研究中的可行性，此平台利用高速旋转产生的离心力（最高可达 100g）作为驱动力来提高湍流强度（国际唯一此类型实验装置），并发展了超重力热湍流的直接数值模拟程序，研究了新型旋转超重力热湍流系统中的湍流输运和湍流结构。通过该开创性的研究，我们提供了一个提高热湍流的湍流强度并进一步加

剧边界层失稳的新途径,有助于探索高超声速热湍流边界层与湍流结构的耦合作用。我们正在对超重力湍流系统进行进一步升级和改进,预期可以将湍流控制参数进一步提高,探索著名流体力学家 Kraichnan 在 1962 年预测的终极热湍流区间的存在性问题。

多相和多组分流体的流动过程不仅是日常生活和自然界的常见现象,工程应用如实现船舶减阻,不仅具有巨大的经济效益,对于实现国家的双碳目标同样有着重要意义。多相流动研究的核心问题是离散相和连续相的耦合机制,只有透彻地理解耦合机制,才能利用相间特异性来调控湍流输运。我们在剪切湍流系统中,探究了油-水两组分湍流体系的微观离散相统计特性和宏观湍流输运特性。发现体系中离散相液滴尺寸的概率密度分布满足对数正态分布函数,离散相平均尺寸及对应的失稳参数范围与经典的 Komolgorov-Hinze 理论不吻合,我们发现多相剪切湍流体系中离散相形成过程是由典型破碎过程主导的,并引入 Levich 理论成功解释了离散相的尺寸是由边界层速度梯度引起的动压差决定。该工作揭示了离散相液滴在剪切湍流场中的形成机制,有助于理解多相湍流中连续相和离散相相互作用的耦合机制。同时,我们发现形变分散对湍流减阻具有正面效应,为解释变形气泡的减阻物理机制提供了重要线索,具有潜在的湍流减阻应用前景。

在多相湍流的研究中,我们发现相间特异性对于调控系统整体输运有着重要意义,研究了几类典型相间特异性调控系统整体特性的问题,包括相变界面的特异性:揭示了热分层以及湍流耦合作用下的冰层演化动力学过程及物理机制;发现了多组分流体蒸发过程中由于组分蒸发的特异性,液滴内部丰富的流动和传热传质过程导致液滴发生自爆炸的物理过程和物理机制,对于理解和控制燃料液滴雾化有着重要意义。相关系列结果发表在《Annu. Rev. Condens. Matter Phys.》《Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.》《J. Fluid Mech.》等顶级期刊,并且被国外多家媒体报道,报道认为本研究结果对理解气候变化有重要意义。

5. 高超声速转捩和湍流边界层摩阻和热流过冲机理

系统研究了来流马赫数为 6 和 8 的不同壁面温度的高超声速转捩和湍流边界层,揭示壁面温度对局部可压缩性、尺度间动能传输、壁面摩阻和热流的生成,摩阻和热流的过冲现象的机理。可压缩湍流广泛存在于各种自然现象和工程问题当中,包括高马赫数飞行器设计、高温化学反应流动、激光核聚变、超新星爆炸等。高超声速边界层的流动机理在高超声速飞行器设计、减阻降热控制技术的设计等领域有着重要的理论指导意义,因而受到广泛关注。关于高超声速边界层在小尺度流动结构、尺度间能量传输、摩阻热流的生成机理等领域,却缺乏系统的研究。我们利用直接数值模拟的方法,模拟了来流马赫数为 6 和 8 的不同壁面温度的高超声速转捩和湍流边界层的算例,系统研究了壁面温度对局部可压缩性、尺度间动能传输机理、壁面摩阻和热流的生成机理的影响。

首先,我们首次将脉动速度的亥姆霍兹分解引入可压缩边界层中,研究发现,壁面温度对流场涡量脉动强度的影响主要集中在近壁区,可压缩边界层的可压缩性主要集中在近壁区,且低温壁面可以极大地增强近壁区的压缩性,并主要增强

压缩运动, 低温壁面增强流向条带结构的相关性。其次, 我们利用滤波的方法研究了高超声速湍流边界层的尺度间动能传输机理。研究发现, 近壁处的速度散度展现出沿流向分布的正负相间的波纹状结构, 此结构与速度的胀压分量的流向分布的波纹状结构一致。亚格子能流项以正值为主, 表明动能主要从大尺度向小尺度传输, 而低温壁面增强了动能从小尺度向大尺度的逆向传输的过程。我们首次利用冯卡门边界层积分的方法解释了边界层转捩时壁面摩阻和热流的过冲现象。研究发现, 转捩峰处摩阻的过冲现象主要由强烈变化的平均速度梯度导致, 而之前文献中认为雷诺切应力是导致摩阻过冲现象的主要原因的论断是不合适的。另外, 转捩峰处热流的过冲现象主要是由近壁处强烈的粘性耗散导致的, 而之前文献中认为雷诺热流是导致热流过冲现象的主要原因的论断是不合适的。

6. 复杂结构介质界面多尺度力学行为

围绕“复杂结构介质界面”这一典型多尺度问题, 在流固滑移边界力学方面, 建立了流固滑移边界稳定性理论, 揭示了湍流边界层流动中液气界面的减阻机理, 发展了滑移边界流动控制及减阻技术, 为相关水下装备水动力设计提供了重要理论基础; 在金属材料极端力学方面, 发展具有界面和辐照缺陷相互作用的金属细观力学方法, 定量刻画金属辐照效应的多尺度力学行为。界面作为不同特性物质的交汇边界, 是影响甚至决定复杂结构介质载荷传递、物质破坏、流动减阻等的关键因素。在流固滑移边界力学方面, 开展了滑移边界稳定性理论及流动控制研究。建立了流固滑移边界稳定性理论, 揭示了流固边界演化规律, 提出了连续气层恢复及流固边界调控方法; 开发了单像素和窗口变形高精度 PIV 算法, 结合流场精准测量系统, 实现了层流/湍流近壁速度精准测量; 给出了受限空间内液气界面附近三维流动结构的非线性时空演化规律, 揭示了湍流边界层流动中液气界面的减阻机理; 采用深度学习算法, 利用壁面速度信息预测探测平面信息, 实现了反向控制吹气减阻方案; 提出了基于周期振荡的滑移长度测量方法, 发展了滑移边界流动控制及减阻技术, 为相关水下装备水动力设计提供了重要理论基础。在金属材料极端力学方面, 开展了极端条件下金属的塑性变形与界面损伤多尺度研究。提出了金属材料位错-晶界空间相互作用的物理模型, 建立了金属材料屈服强度随样品尺寸变化的统一模型; 构建了用于描述高应变率加载下韧性金属晶界处的层裂孔洞成核模型, 提出了“相容性应变能释放率”这一新的物理量; 建立了位错塞积极化理论, 为背应力演化提供了新的理解; 发展具有界面和辐照缺陷相互作用的金属细观力学方法, 定量刻画金属辐照效应的多尺度力学行为。研究成果发表在《Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.》《J. Fluid Mech.》《Phys. Rev. Lett.》《J. Mech. Phys. Solids》《Proc. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci.》《Phys. Fluids》《Phys. Rev. Fluids》《Meas. Sci. Technol.》等。《Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.》上的论文入选封面论文, 并被美国科学促进会(AAAS)报道; 《Phys. Rev. Lett.》的论文入选 Editors' Suggestion; 《Phys. Fluids》上的论文被北京市科协评为首都前沿学术成果。

二. 近期进展

在基础科学中心项目资助下，项目组成员在湍流结构、大涡模拟、材料微结构与宏观性能、锂电池塑性模型等领域开展前沿探索，取得一系列研究成果。

1. 提出高雷诺数壁湍流统一壁面律公式，准确捕捉流向速度

完全解析近壁小尺度湍流结构的大涡模拟和直接数值模拟，计算量高，难以应用于自然界和工程实际中的高雷诺数壁湍流。采用模型模化而非直接解析近壁小尺度湍流是一种广泛采用的替代方案。壁面律是一种常用的壁模型，其通常由两部分组成，适用于黏性子区的线性律和适用于对数区的对数律，但在线性律和对数律转换的区域，模型精度低。针对以上问题，中国科学院力学所何国威研究员科研团队提出了适用不同壁法向位置的单一公式壁面律，LOG-EXP 公式：

$$U^+(y^+, y/\delta) = \frac{1}{\kappa} \ln(1 + \kappa y^+) + AB^2 \left(1 - e^{-\frac{y^+}{B}} - \frac{y^+}{B} e^{-\frac{y^+}{B}} \right) + \Pi \sin^2 \left(\frac{\pi y}{2\delta} \right),$$

其中卡门常数 $\kappa = 0.4$, $A = 0.314$, $B = 4.775$, $\Pi = 0.793$ 。与通常基于阻尼函数的近壁模化方法不同，我们通过引入修正项弥补混合长模型与实际雷诺剪应力的差异，推导了以上表达式。与经典流动的直接数值模拟和实验数据对比显示该公式可以准确捕捉不同壁法向位置的流向速度（图 4）。

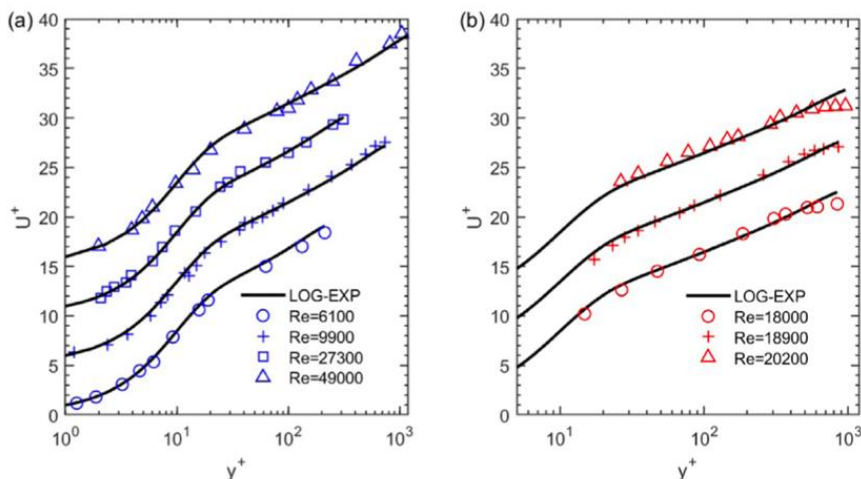


图 4: LOG-EXP 公式与圆管流动 (a) 和平板边界层流动 (b) 实验数据的对比。

以上研究结果发表在《Eur. J. Mech. B Fluids》，题目为《一种新的单一公式壁面律及其在壁面模化大涡模拟中的应用》，第一作者为中科院力学所研究生张风顺，通讯作者是杨晓雷研究员。

通讯作者简介：杨晓雷，中国科学院力学研究所研究员，博士生导师。2004 年在兰州大学获得学士学位，2010 年在中科院力学所获得博士学位，随后在明尼苏达大学和纽约州立大学石溪分校从事风能研究工作，2019 年入职中科院力学所。主要研究方向包括环境流体力学、风能、大涡模拟。近 5 年在《J. Fluid Mech.》《Appl. Energy》等期刊发表 SCI 论文 40 余篇。担任《力学快报（英文）》执行副主编，Energies、Wind 期刊编委。



2. 发展可压缩燃烧大涡模拟求解器，实现标准火焰工况高保真预测

目前学术界对于小火焰模型的燃烧大涡模拟计算大多数是基于低马赫数的求解器，但是低马赫数方法计算燃烧问题时存在其固有的缺陷。第一，它不能求解高速的燃烧流动，例如，超燃冲压发动机燃烧过程；第二，它不能描述声场和火焰的相互作用，无法预测热声不稳定性。中国科学院力学所何国威研究团队结合小火焰查表方法，对内能计算公式进行了线性简化，发展了基于可压缩燃烧大涡模拟求解器，成功应用于 Sandia Flame D 标准火焰工况高保真仿真(图 5)。对于各项同性湍流标量混合算例，求解器能够得到和滤波后 DNS 计算相同的结果。对于 Sandia Flame D 标准火焰工况，LES 的计算结果和包括 H₂O, CO₂, CO, H₂ 等实验的结果吻合很好，并且对网格无关性进行了验证。研究结果发表在《Aerosp. Sci. Technol.》，论文题目为《基于可压缩和查表化学的燃烧大涡模拟求解器的开发与验证》，论文第一作者是中科院力学所博士后张慧颖，通讯作者是吕钰副研究员。论文链接：10.1016/j.ast.2022.107693。

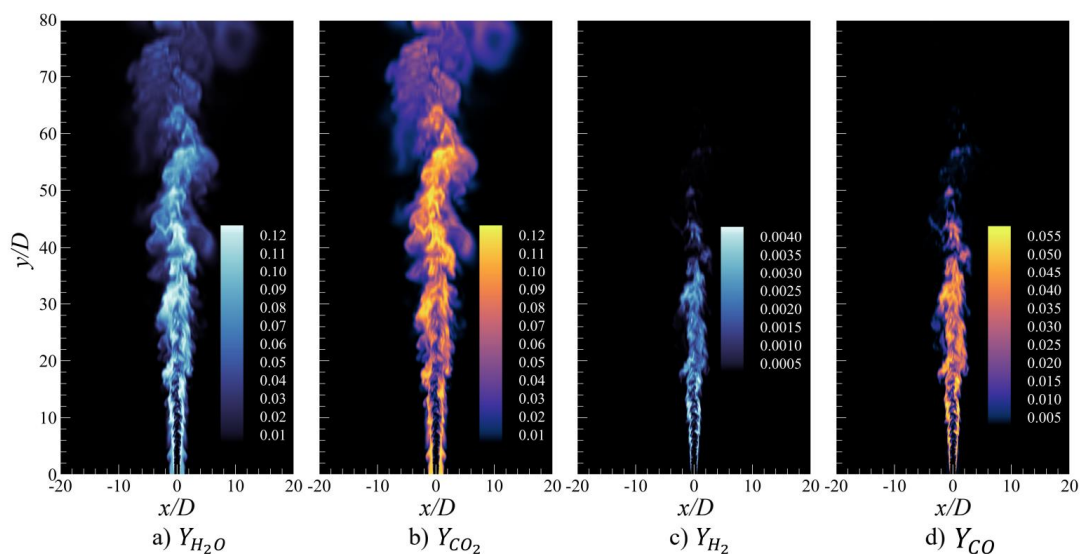


图 5: Sandia Flame D 瞬时各物质组分质量分数云图。

(a) H₂O, (b) CO₂, (3) H₂, (4) CO。

3. 流体涡管纽结演化路径

近期,《J. Fluid Mech.》报道了北京大学陈十一研究团队杨越教授课题组在流体涡管纽结演化路径方面研究进展。

纽结结构存在于日常生活与物理、化学、生物等系统中,其数学定义为三维空间中的简单闭曲线。在流体力学中,旋涡纽结复杂的拓扑和几何形态赋予其演化中丰富的多尺度涡动力学现象,因此纽结涡管可作为湍流拟序结构的简化模型。在各类流动中,构造纽结并探索其演化规律,可为转捩与湍流中的能量级串等机理研究提供启示,并为流体力学的几何化研究提供应用基础。

该研究发现了纽结与链环涡管在不同环面半径比和卷绕数下的三条独立演化路径(图 6):融合、重联及转捩。其中小环面半径比的涡纽结或链环会融合为含局部拧转的平凡涡环,完成卷曲向拧转螺度的快速转化;在大环面半径比下则通过逐次重联退化为卷绕涡圈;而中等环面半径比涡纽结演化中会产生不完全重联,并在强烈涡相互作用下触发转捩。论文链接: DOI: 10.1017/jfm.2022.464。

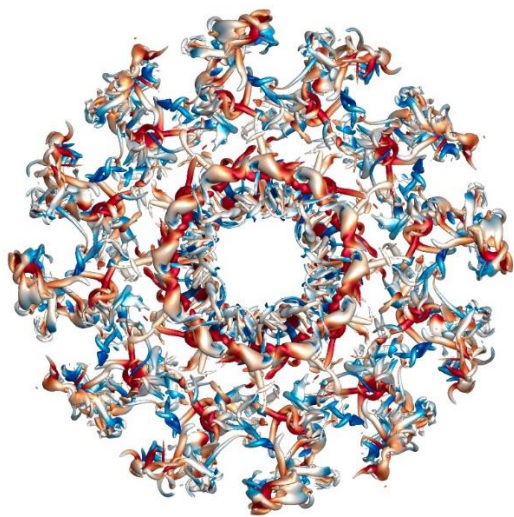


图 6: 卷绕涡圈演化中发生流动转捩。

通讯作者简介: 杨越, 北京大学工学院力学与工程科学系教授、系主任, 湍流与复杂系统国家重点实验室副主任。2004 年获浙江大学学士学位, 2007 年获中国科学院力学所硕士学位, 2011 年获加州理工学院博士学位, 随后于普林斯顿大学与康奈尔大学作博士后研究, 2013 年加入北京大学工作。现任中国力学学会副秘书长、中国空气动力学会理事,《Sci. Bull.》《Sci. China-Phys. Mech. Astron.》《Acta Mech. Sin.》《力学进展》期刊编委。曾获国家杰出青年科学基金、腾讯科学探索奖、求是杰出青年学者奖。主要研究方向为湍流、燃烧、涡动力学。



4. 城市冠层湍流的模型研究进展

《J. Fluid Mech.》刊登了南方科技大学陈十一研究团队万敏平教授课题组关于城市冠层湍流的模型研究进展。

城市冠层湍流是大气边界层湍流中从地面到建筑顶部附近的一部分流动(图 7)。城市冠层湍流与城市居住空间的空气对流息息相关,是城市大气环境的重要组成部分。对城市冠层湍流进行建模将有助于评估城市大气环境,为城市的规划布局提供科学依据。长期以来,尽管学术界进行了大量的研究,城市冠层的模型仍旧局限在冠层以上部分,进而对冠层的准确计算存在很大的困难。学术界普遍认为混合层比拟理论对于城市冠层湍流不成立,因为数值模拟和实验都没有观测到近似二维的大尺度流动结构。该项研究提出将城市冠层湍流在垂直方向的长度尺度作为其特征尺度。该长度尺度与其剪切尺度紧密关联,即与混合层湍流类似,并且该尺度与壁面垂直高度无关,进而证明冠层湍流与壁湍流存在显著区别。这样就从另一个角度说明混合层比拟对城市冠层湍流同样成立。与此同时,我们提出城市冠层湍流的速度型可以用一个统一的壁面律描述,进而为城市冠层的建模提供了新的思路 and 理论依据。论文链接: DOI: 10.1017/jfm.2022.507

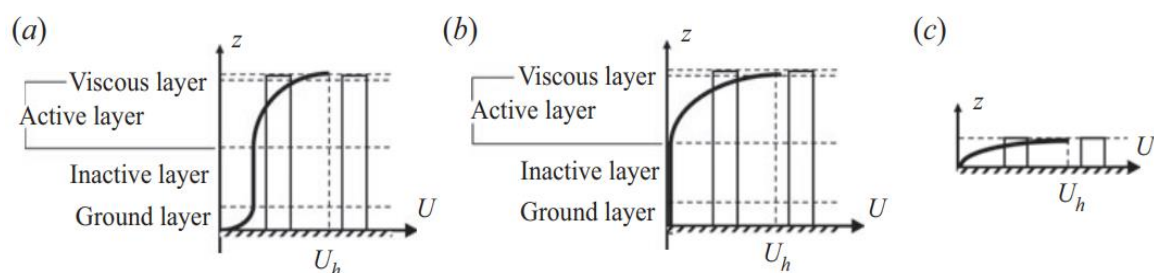


图 7: 城市冠层湍流的垂直分层结构 (a) 深度冠层 (b) 临界冠层 (c) 浅冠层

通讯作者简介: 万敏平, 南方科技大学工学院力学与航空航天工程系教授。2002 年本科毕业于清华大学工程力学系, 2008 年在约翰霍普金斯大学机械工程系获博士学位, 之后在美国特拉华大学物理与天文系工作, 先后任博士后和研究科学家, 2015 年加入南方科技大学任副教授, 2020 年 11 月晋升为长聘正教授。主要从事湍流理论与数值模拟、计算流体力学等方向的研究。已在 PRL, JFM 等学术期刊上发表论文 100 多篇。现为中国力学学会流体力学专业委员会委员、中国空气动力学学会计算空气动力学专业委员会委员,《力学学报》和《Acta Mech. Sin.》编委。曾获国家基金委杰出青年科学基金、求是杰出青年学者奖。



5. 含颗粒湍流大涡模拟亚格子模型的研究进展

近期,《Phys. Fluids》刊登了北京大学陈十一研究团队赵耀民教授课题组关于含颗粒湍流大涡模拟亚格子模型的研究进展。

传统的大涡模拟 (LES) 亚格子应力模型难以精确预测湍流中颗粒的统计量,特别是在描述小 Stokes 数颗粒的加速度间歇性和惯性聚集现象时往往存在较大误差。近年来,数据驱动的湍流建模方法得到越来越多的关注,机器学习方法逐渐成为亚格子应力建模的新研究范式。其中,基于基因表达式编程 (gene-expression programming, GEP) 方法发展的机器学习亚格子应力模型可以得到显式的模型表达式,并被应用于各向同性湍流大涡模拟后验测试中,针对湍流的高阶统计量和小尺度结构均取得了良好的预测效果。

该项研究首次将基于 GEP 的机器学习亚格子应力模型应用于两相流问题,模拟重颗粒在各向同性湍流中的运动,重点关注了 Stokes 数从 0.01 到 20 范围内的颗粒的加速度、速度和惯性聚集等统计量,详细测试了 GEP 模型的预测效果,并与直接数值模拟 (DNS) 和传统的动态 Smagorinsky 亚格子应力模型进行比较。结果表明,在不同 Stokes 数下, GEP 模型对于颗粒速度、加速度的概率密度分布函数 (PDF) 的预测结果与 DNS 符合很好。针对小 Stokes 数下颗粒加速度间歇性, GEP 模型的计算结果准确性相比动态 Smagorinsky 模型显著提升。此外,定性和定量比较了颗粒惯性聚集相关的统计量,如颗粒分布的 Voronoi 图、颗粒数密度的 PDF、以及径向分布函数 (RDF), GEP 模型的预测效果与 DNS 均符合。格子应力模型耗散较强,从而导致流场对颗粒的驱动力计算不准确。相较于传统的亚格子应力模型,基于 GEP 的亚格子应力模型的耗散较小,并在建模中引入与涡量相关的高阶项,因此可以更好地恢复 LES 中缺失的小尺度涡,而这些小尺度涡通常被认为与颗粒运动和惯性聚集密切相关。

论文链接: DOI: 10.1063/5.0098399

通讯作者简介: 赵耀民, 2011 年本科毕业于北京大学元培学院 (物理学), 2017 年在北京大学工学院获流体力学博士学位。2017-2020 年在澳大利亚墨尔本大学机械工程系做博士后, 2020 年 10 月加入北京大学应用物理与技术研究中心任助理教授。2021 年获得国家级人才计划青年项目资助, 荣获“中国科学技术协会青年人才托举工程”。先后在《J. Fluid Mech.》《Phys. Fluids》《J. Turbomach.》等领域内主流期刊上发表 20 多篇。主要研究方向为湍流、边界层转捩、叶轮机械流动数值模拟、机器学习方法在流体力学中的应用等。



6. 超重力热湍流中的湍流脉动统计特性研究

近期,《Phys. Fluids》刊登了清华大学孙超和上海大学周全科研团队的王东璞等人关于超重力热湍流中的湍流脉动统计特性研究工作,论文题为“Spectra and structure functions of the temperature and velocity fields in supergravitational thermal turbulence”。

极端超重力以及高速旋转条件下的湍流流动在自然界、工业生产和国防军工中广泛存在,对于极端重力条件下的湍流脉动统计特性的研究,有助于揭示超高湍流度下的热湍流的流动传热机理。

在均匀各向同性湍流中, Kolmogorov 认为动能仅从积分尺度注入,向下级串至耗散尺度,因此根据惯性力做功与粘性耗散率相平衡,可以得到 K41 标度律。在浮力驱动的对流中,温差通过浮力影响速度场,流动变得各向异性, Bolgiano 和 Obukhov 各自通过浮力输运与惯性力做功相平衡推导出了所谓的 BO59 能量级串规律,然而迄今在传统热湍流系统中,还没有测得横跨多尺度数量级范围的结果。

近期,孙超团队提出并开发了一个崭新的超重力驱动的热湍流系统,巧妙地实现了浮力效应大幅增加,提供了新的探索热湍流本质规律的思路,为后续进一步开发极端重力条件下的湍流模型奠定了基础。

这项研究通过直接数值模拟方法,对超重力热湍流系统中的湍流脉动特性进行了系统的研究。首先,能谱和结构函数服从 BO59 标度律(图 8a)。其次,随着瑞利数增大,BO59 标度律的尺度范围变得更宽(图 8b)。并且 BO59 标度律发生在大于 Bolgiano 尺度区间(图 8c),与 BO59 理论相一致。此外,研究发现随着瑞利数增大,边界层区外的概率密度函数呈现更宽范围的长尾的指数分布,说明流动具有更多高浮力的羽流结构。因此超重力热湍流中较大的离心浮力作用被认为是 BO59 标度律的原因。

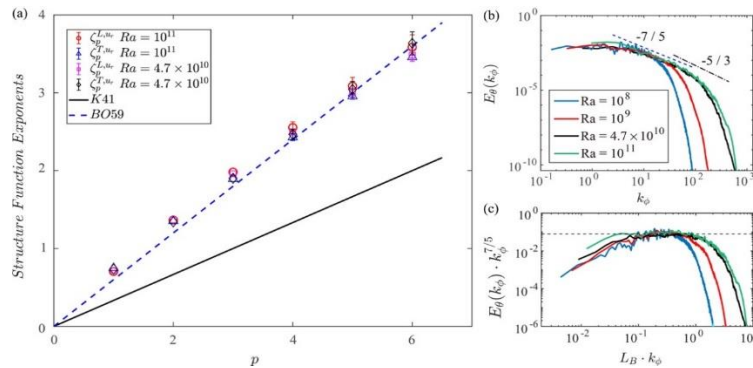


图 8: (a) $Ra = 4.7 \times 10^{10}$ 和 10^{11} , 径向速度的结构函数指数与尺度的标度律指数对波数的依赖关系, 与 BO59 标度律相符, 与 K41 标度律偏差较大; (b) 温度能谱与周向波数的依赖关系; (c) 通过 BO59 标度律归一化后的周向温度能谱与 Bolgiano 尺度归一化后的波数的依赖关系。

该工作实现了对极端条件及极高湍流强度下热湍流的时空精准湍流脉动模拟和分析,系统地研究了极高的离心浮力与非线性惯性力对湍流能量传递过程的复杂耦合作用,揭示了极端加速度、极端温度梯度等强各向异性的湍流换热机理。下一步将基于高旋转下温度和速度场的耦合规律,校验现有基于各向同性假设的湍流模型在超重力条件下是否适用。论文链接: <https://doi.org/10.1063/5.0091012>。

通讯作者简介:

周全,研究员,国家杰出青年科学基金获得者,上海大学钱伟长学院院长、上海市应用数学和力学研究所副所长、上海市能源工程力学重点实验室副主任。主要研究方向为湍流和热对流,已在《Sci. Adv.》《Phys. Rev. Lett》《J. Fluid Mech.》等期刊上发表 SCI 论文 50 余篇。目前担任中国力学学会第八届青年工作委员会委员和第十三届实验流体力学专业组组长、上海非线性科学研究会第七届理事会副理事长、上海力学学会第十三届理事会理事和青年工作委员会主任、《Appl. Math. Mech.-Engl. Ed.》和《J. Hydrodyn.》编委、《力学学报》、《实验流体力学》和《空气动力学学报》青年编委。曾作为第一完成人获得上海市自然科学二等奖。



孙超,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教授,国家特聘专家入选者,美国物理学会会士(APS Fellow),科学探索奖获得者。2009 年至 2015 年任教于荷兰屯特大学应用物理系;2015 年入职清华大学担任教授。孙超从事流体力学研究,主要研究方向为多相流和湍流。迄今为止在包括《Annu. Rev. Condens. Matter Phys.》《J. Fluid Mech.》《Phys. Rev. Lett.》《Nature Phys.》《Sci. Adv.》《Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.》等期刊发表论文 160 余篇,论文 SCI 引用 6100 余次,Google Scholar 引用 8700 余次。他应邀在“国际多相流大会”以及“欧洲湍流大会”作大会特邀报告。现为多相流领域期刊《Int. J. Multiph. Flow》的副主编,湍流杂志《J. Turbul.》编辑,《Phys. Rev. Fluids》编委,力学学报《Acta Mech. Sin.》编委会委员,《水动力学研究与进展》《J. Hydrodyn.》执行编委,实验流体力学期刊《Exp. Fluids》的顾问编委,南方科技大学广东省湍流基础研究与应用重点实验室学术委员会委员,美国物理学会流体力学 Frenkiel Award 遴选委员会委员,以及国际多相流大会管理委员会委员。



7. 三元单相流体中自发形成的纳米结构域研究

清华大学孙超团队在《J. Colloid Interf. Sci.》发表了题为“Spontaneously formed multiscale nano-domains in monophasic region of ternary solution”的研究论文。该工作聚焦于多相多组分流体中的共性基础问题，揭示了在宏观均一的单相三元溶液中可自发形成多尺度纳米结构域。清华能动系博士后厉明波为第一作者，孙超教授为通讯作者。

该研究的对象为三元混合溶液，其中包含一种助水溶剂和两种互不溶解但可以任意比例溶于该助水溶剂的液体。该类三元流体系统展现出了异常的增溶能力和介观性质，近几十年来一直受到普遍争议（图 9）。该研究从三元流体的宏观物理特性出发，系统地揭示了该流体的折射率、粘度等参数的组分依赖性，构建起宏观物理性质与纳米微域结构化组成之间的关系。动态光散射图谱表明，该体系中存在不同的纳米级平衡域：分子尺度的胶束状聚集体（ ~ 1 nm）或反相聚集体（ ~ 5 nm），和中尺度的介观液滴（ ~ 100 nm）。这些结构体是具有宏观寿命的物理实体，而不是简单的临界密度波动。然而，疏水组分只有极少部分比例以中尺度结构体的形式存在，大比例仍以分子或聚集体的形式存在。该介观液滴具有特定的纳米尺寸分布区间，且对流体组分比例的依赖性较弱；其数量浓度显著依赖于组分比例，可通过消耗分子聚集体而形成，具备可逆生成-破坏的特性。

同时，研究揭示了该纳米结构域表现出长期的热力学稳定性，Ostwald-ripening 仍是控制其老化的核心机制，但速率极低。其稳定性可依赖于双亲性分子和水分子之间形成强氢键的屏蔽效应、双亲性分子在界面处的结构化排布以及胶体稳定性。屏蔽层将介观液滴的疏水核心与本体溶液物理隔离，从而有效降低了表面张力。但由于其动力学演化极端缓慢，很难断定它们是热力学平衡状态还是动力学捕获的结构。这些多尺度纳米级结构体在一定程度上决定了该三元流体系统的整体性质，例如溶剂化能力或扩散性质，进而影响其宏观输运性能和相变特性，因此具有广泛的应用前景。

论文链接：<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.07.152>。

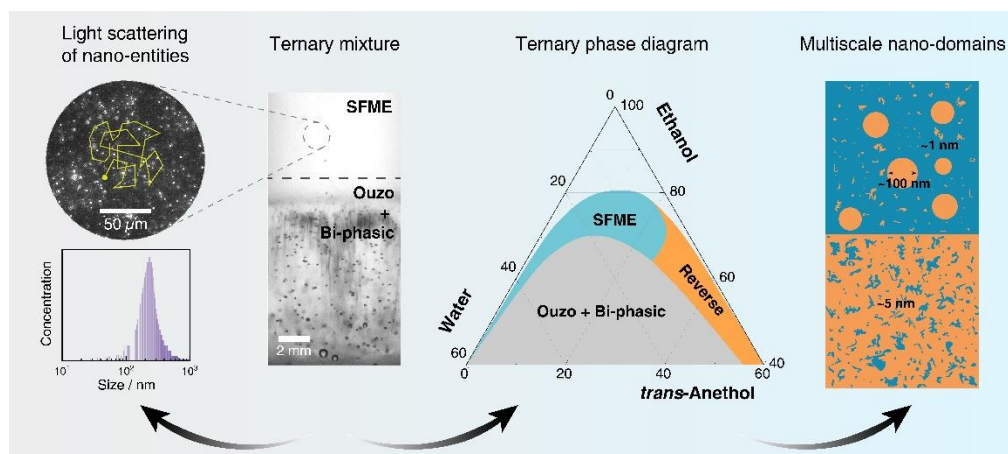


图 9：三元单相流体中存在的多尺度纳米结构域：分子聚集体和介观液滴。

第一作者简介：厉明波，男，1990年生，博士，助理研究员。2019年博士毕业于浙江大学机械电子工程专业，2019年9月至今于清华大学能源与动力工程系/燃烧能源中心从事博士后工作，合作导师孙超教授。目前主要是从事实验流体力学、多相流、纳米气泡、纳米液滴及空化方面的研究工作，相关研究成果已在《Chem. Eng. J.》、《J. Colloid Interf. Sci.》、《Int. J. Heat Mass Tran.》、《Phys. Fluids》等界面科学和流体力学领域权威期刊发表多篇学术论文。作为负责人主持国家自然科学基金青年科学基金项目和中国博士后科学基金面上资助各一项。



8. 非均匀加热对热湍流系统流动反转的控制及其机理研究

《J. Fluid Mech.》刊登了上海大学周全科研团队赵超本等人关于非均匀加热对热湍流系统中流动反转控制及其机理的研究工作，论文题为“Suppression of flow reversals via manipulating corner rolls in plane Rayleigh–Bénard convection”。该工作探究了非均匀加热对流动反转现象的影响规律，揭示了非均匀加热抑制角涡的发展，实现流动反转控制的物理机制。

热湍流现象普遍存在于自然界和实际工程中，热湍流结构的控制是湍流研究的核心和难点问题。Rayleigh–Bénard (RB) 系统是研究热湍流问题的经典模型。在 RB 系统中，大尺度环流结构主导着湍流输运过程。近年来，研究发现大尺度环流结构会出现反转现象(图 10)，而这种反转现象会引起湍流输运的剧烈变化，在工程中也会带来潜在的安全隐患。因此，实现流动反转的控制具有重要的科学和工程意义。

在二维/准二维 RB 系统中，流动反转的成因主要有两个：一是由于大尺度环流结构自身的不稳定性而产生的；二是由于角涡的不断发展而引起的。图 10-I 展示了由于角涡的发展而引起的流动反转过程。本研究针对这种角涡引起的反转现象，提出了通过非均匀加热实现对流动反转的控制方法。基于直接数值模拟结果，采用全局角动量的时间演化来定量刻画大尺度环流结构的反转过程(图 10-II)，并研究了不同振幅 A 情况流动反转频率与非均匀加热波数 k 的依赖关系：如图 10-III(a)所示，对于较大的 k ，反转频率接近于标准 RB 系统的反转频率；随着 k 的减小，反转频率逐渐降低；继续减小 k ，反转频率甚至接近于零，说明在 k 足够小的情况下流动反转可以被完全抑制。这是因为非均匀加热引起的水平对流作用，抑制了角涡的增长，增强了大尺度环流的稳定性，从而实现了流动反转的控制(图 10-IV)。基于水平对流的思想，提出了一个统一参数 k/A 系统刻画了非均匀加热对热湍流中大尺度结构反转现象的影响规律(图 10-III(b, c))。

该工作提出了以非对称非均匀加热方式控制热湍流流动反转的新方法，揭示了非均匀加热引入水平对流作用，抑制了角涡的发展，进而控制流动反转的物理机制。该研究成果为工程中实现热湍流结构的控制开拓了新的思路。

论文链接：<http://dx.doi.org/10.1017/jfm.2022.602>。

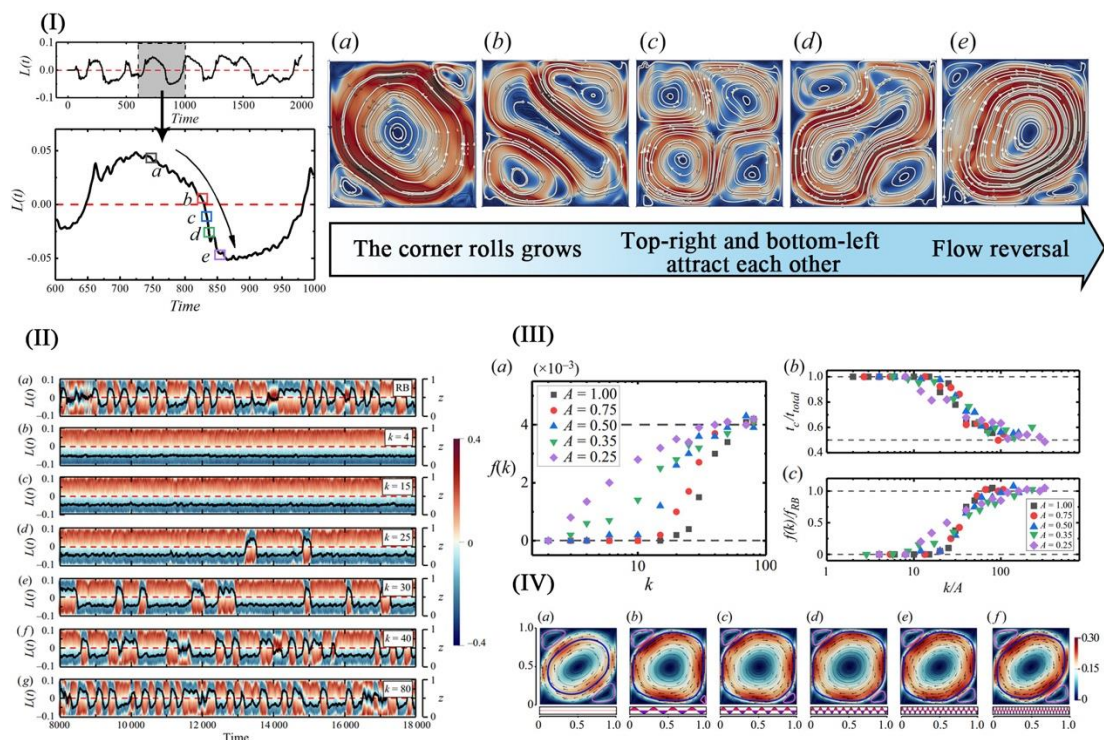


图 10: (I) 经典 RB 热端流系统中大尺度环流结构反转的演化过程。(II) $A=1$ 时, 不同非均匀加热波数 k 下全局角动量的时间序列。(III) 不同振幅 A 下, 流动反转频率 (a) 随波数 k 的变化以及 t_c/t_{total} (b) 和 $f(k)/f_{RB}$ (c) 随统一参数 k/A 的变化, 其中 t_c 是大尺度环流顺时针旋转的时间, t_{total} 是总时间。(IV) 不同波数 k 情况下非均匀加热对角涡大小的影响。以上所有计算结果均在 $Ra=108$, $Pr=0.7$ 情况下。

第一作者简介: 赵超本, 男, 山东临沂人, 2019 年-至今在上海大学力学与工程科学学院攻读博士学位, 导师周全教授, 从事流体力学、浮力驱动湍流研究。博士期间在《J. Fluid Mech.》, 《Phys. Rev. E》等期刊上发表论文。



9. 极端条件下金属的循环变形与界面损伤多尺度研究

近期, 北京大学工学院段慧玲教授课题组在极端条件下金属的塑性变形与界面损伤多尺度研究领域取得重要进展, 发表在《J. Mech. Phys. Solids》《Int. J. Plasticity》和《Acta Mech. Sin.》等力学领域重要期刊。

动态冲击加载下金属的损伤与断裂失效机理研究对于金属服役的安全性至关重要。对于金属材料, 晶界是层裂损伤的主要成核位点, 探究晶界处损伤成核机理是准确描述层裂损伤演化的关键。段慧玲教授课题组基于晶界损伤的微观机制, 建立了用于描述高应变率加载下韧性金属晶界处的层裂孔洞成核模型(图 11)。该模型首次提出了“相容性应变能释放率”这一定量描述晶界两侧变形不协调性

的物理量，定量地分析了晶界结构、加载条件、缺陷尺寸对孔洞成核的影响，填补了该领域理论研究的空白。课题组进而基于统计理论量化了晶界本征的抗损伤性能，成功给出了微观上临界损伤应力呈现特定分布特征的物理解释。相关成果发表在固体力学旗舰期刊《J. Mech. Phys. Solids》。

此外，课题组还开展了受辐照金属在循环变形条件下的多尺度研究。相比于单调变形，金属循环变形存在包辛格效应，即反向加载时的屈服强度会低于卸载前峰值应力，体现了金属的随动硬化特性和背应力演化。针对这一现象，课题组首次提出了位错塞积极化理论，认为背应力演化主要归因于材料内部晶界强度的多样化。不同于以往研究中只考虑晶界强度的平均特性，分析发现晶界强度的多样化会导致位错运动时材料内部的位错塞积出现极化，且极化应力的方向始终与外载相反，为背应力演化提供了新的理解。相关成果发表在固体力学旗舰期刊《J. Mech. Phys. Solids》。随后，课题组针对受辐照马氏体钢的循环变形展开了研究，考虑了背应力演化、辐照缺陷演化以及板条界面的湮灭，成功地模拟了马氏体钢的循环软化特性。相关成果发表在力学重要期刊《Acta Mech. Sin.》。

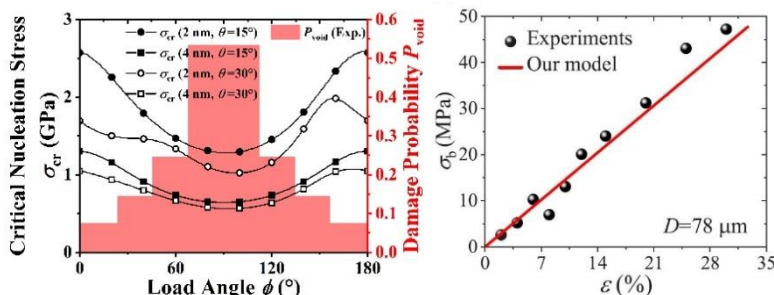


图 11: (a) 晶界临界损伤应力与加载角的关系。(b) 变形过程中的背应力演化。

10. 夹杂演化与复合材料等效力学性能的关联研究

近期，北京大学工学院段慧玲教授课题组在相变夹杂复合材料等效力学性能研究方面取得重要进展，相关成果发表在《Proc. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci.》《Acta Mech. Sin.》《Acta Mech. Solida Sin.》等国际主流期刊上。

课题组将处在相变演化过程中的夹杂相视为两相复合材料，利用复合材料细观力学理论，给出了相变夹杂复合材料在整个相变过程中等效力学性能的演化规律，准确预测了夹杂处在固-液相变时夹杂复合材料的变刚度行为，以及夹杂处在液-气相变时夹杂复合材料的热膨胀变形行为。该模型揭示了相变过程中复合材料刚度以及体积的非线性变化响应机制，为基于相变夹杂复合材料的功能器件提供了设计基础（图 12）。相关成果发表在英国皇家学会期刊《Proc. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci.》。课题组就具有界面效应的复合材料细观力学进行了整理研究，以综述形式发表在《Acta Mech. Sin.》。

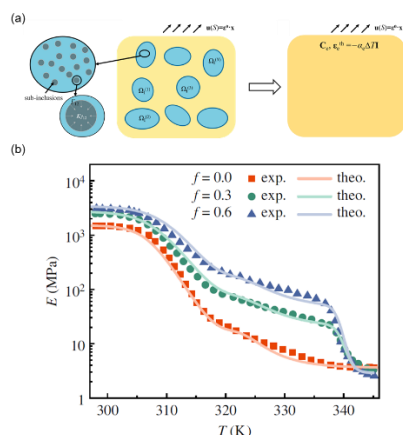


图 12: (a)相变演化过程中夹杂复合材料的模型示意图; (b)含低熔点合金(固-液相变)夹杂的环氧树脂复合材料在相变过程中模量随温度的非线性变化关系。

11. 折纸/剪纸结构多模态变体及功能化设计研究

近期, 北京大学工学院段慧玲教授课题组在折纸/剪纸结构多模态变体及功能化设计方面取得重要进展, 相关研究工作发表在《J. Mech. Phys. Solids》《Proc. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci.》和《Soft Robot.》等国际主流期刊上。

以折纸/剪纸结构为代表的多模态变体结构具有变换可控、构型多样、可设计性强等优点, 是可重构空间天线、变体机器人等领域的核心问题, 也是极具挑战的关键技术所在。在折纸变体结构的非线性力学行为方面, 通过交叉折叠纸带的方法构建了一种折纸弹簧结构, 揭示了其拉扭耦合变体机理, 并对其非线性力学特性进行了分析和优化。基于拉扭耦合变体行为和非线性力学响应特性, 设计制备了多款具有弹射、爬行以及变体等功能的折纸弹簧机器人。相关研究成果发表于软体机器人领域顶级期刊《Soft Robot.》。进一步提出了一种双稳态的锥形折纸结构, 并建立了分析其非线性大变形行为的等效力学模型, 揭示了其变体过程中的能量转化机制。基于该模型, 设计出能够拟合给定旋转对称曲面的折纸结构, 具有多个可以相互转换的稳态构型。相关研究成果发表于英国皇家学会会刊《Proc. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci.》。

在粘接失效过程的非线性力学行为方面, 基于界面剪纸结构设计, 提出了在宏观尺度下借助三维本体能量耗散实现水凝胶可控粘接的设计方法(图 13(a)); 利用几何非线性和材料的大变形行为, 建立了可以准确预测粘接力峰值的理论模型(图 13(b)); 利用超弹性材料本构对剪纸结构的界面失效过程进行了有限元分析(图 13(c)), 并采用多层级图案化设计方法优化了软材料的界面粘接强度和粘接能。相关研究成果发表于《J. Mech. Phys. Solids》。

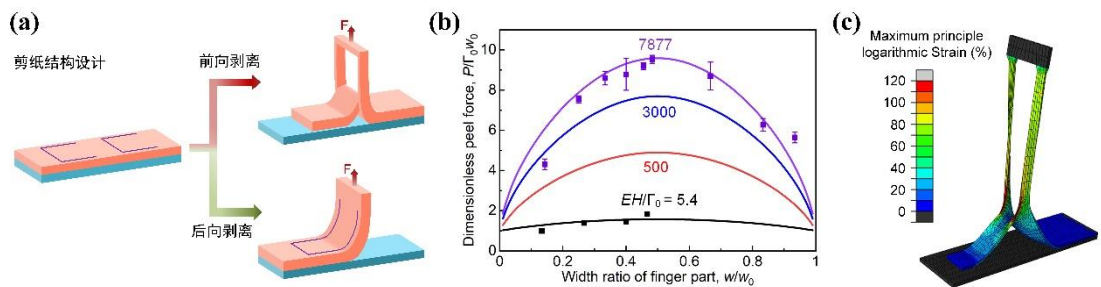


图 13: (a) 软材料剪纸结构可控粘接设计方法; (b)界面失效过程中材料刚度变化时粘接峰值力与几何参数的关系; (c) 非线性材料本构描述的界面失效有限元分析。

12. 商用锂电池不同充电倍率与循环寿命关系的疲劳模型

商用锂电池的健康管理目前存在大量亟待解决的问题，其中循环寿命的有效预测是电池管理系统的核心目标。中国科学院力学研究所魏宇杰研究员团队通过利用商业锂电池不同快充倍率下循环寿命的实验结果，发现并提出了锂电池等效快充倍率 c 与循环寿命 N 之间的标度律关系， $c = c_0 N^b$ (即 c - N 准则)，其中 c_0 表示电极材料极限充电倍率， b 是与电池材料相关的常数。这一 c - N 准则类似于固体材料疲劳中所周知的 S - N 曲线，适用于不同类型的商业锂电池，并通过已有的文献数据获得了验证。结合 c - N 准则和机器学习方法，我们发展了一种物理增强的机器学习模型，基于前面提出的 c - N 准则，使用首圈的充放电测试即可实现对电池循环寿命的高精度预测。这一工作为锂电池循环寿命预测、健康管理和锂电池的优化提供了基于力学原理的新思路。

商用锂电池显著的个体性能差异是影响锂电池寿命评估的另一个挑战，这是由于锂电池退化性能涉及到多物理场和跨尺度作用下多种失效机制交织影响。本研究利用机器学习方法从商用锂电池首圈的充放电测试数据中提取影响电池寿命

的因素，构建了商用电池个体差异的定量评价模型。结合 c - N 准则，建立了一种物理增强的机器学习模型 (PA-ML model)。该模型实现了基于商用锂电池首圈的充放电测试数据即可实现对电池循环寿命的高精度预测，预测精度达到甚至超过其它依赖于上百圈测试信息的寿命预测模型 (图 14)。

研究工作通过建立锂电池循环充电倍率影响的 c - N 疲劳准则和评价电池性能个体差异的机器

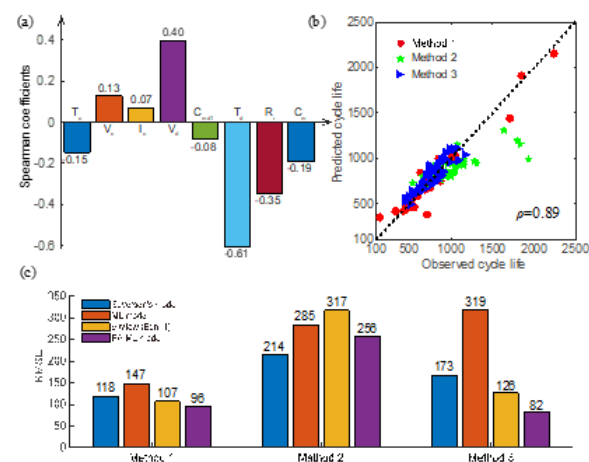


图 14: 商用锂电池 PA-ML 寿命预测模型。

学习模型，实现了“出厂即预测”的商用锂电池高精度寿命评估模型。这一工作可直接应用于锂电池的健康状态估计及动力设备的可靠性评估，并为锂电池的使用管理、性能优化等方面提供了新的研究思路。论文发表于《Acta Mech. Sin.》。

论文链接：<https://link.springer.com/article/10.1007/s10409-022-22108-x>

第一作者简介：

温济慈，中科院力学所助理研究员，主要研究方向为固体材料多物理场耦合本构模型与可靠性分析。



邹庆荣（共同第一作者）：北京信息科技大学副教授，主要研究方向为故障预测与健康管理、质量与可靠性、随机建模。



通讯作者简介：

魏宇杰，中科院力学所研究员、博士生导师，非线性力学国家重点实验室主任。国家“万人计划”科技创新领军人才，科技部“中青年科技创新领军人才”、国家杰出青年基金获得者，中科院百人计划入选者。主要研究方向为固体本构模型与可靠性分析。



13. 高速列车关键结构线路应力谱研究进展

作为高速列车系统的主要承载构件，转向架结构的动态载荷对安全设计至关重要，这种持续时间较长的载荷时间历程通常集中在载荷谱中进行可靠性评估。自 Miner 损伤累积理论以来，应力谱的标准化已广泛应用于轨道车辆等机械系统的疲劳分析。在这些研究中，结构的损伤通常是通过确定的载荷计算的，而不考虑运营变量的影响。不同的运营变量传递到特定结构时，会形成不同的载荷边界，并通过彼此的耦合改变结构载荷。因此，通过比较不同的运营变量，揭示不同变量对应力谱形式和特征的影响对于提升高速列车服役安全性和结构可靠性具有重要意义。

该研究以不同型号的高速动车组为试验平台，在“八横八纵”高速铁路网中的多条线路开展了长期的线路试验，线路涵盖了无砟和有砟两种轨道类型，运营速

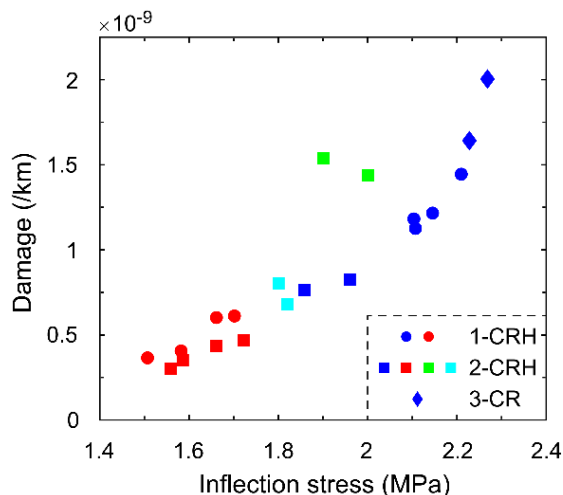


图 15. 线路条件对分段 Weibull 分布模型中拐点应力的影响: 不同无砟轨道线路区间上获得的线路应力谱的拐点应力与对应的每公里损伤的相关性: 线路条件越好, 拐点应力越小, 相应的每公里损伤也越小。

度包括 200 km/h、300km/h 等多种速度级。通过分析不同运营变量对高速列车转向架线路应力谱的影响, 该团队发现运营变量中轨道类型和运行速度相对其他因素对结构的应力谱更为重要。轨道类型是影响谱形式的重要因素, 运行速度对应力谱的幅值大小起着显著作用。运营变量对应力谱的影响直接反映在疲劳损伤中。在无砟轨道中, 当运行速度级固定时, 每公里线路的损伤越大, 分段 Weibull 模型中的拐点应力越大。这一结论证实了拐点应力可以作为表征线路质量的参数化指标 (图 15)。论文发表于《Vehicle

System Dynamics》。该研究对于深入理解高速列车关键结构的线路应力谱具有重要意义, 同时也有助于从系统力学的角度识别不同外部因素对结构疲劳损伤的贡献。论文链接: doi/full/10.1080/00423114.2022.2049320。

第一作者简介:

袁征, 于 2017 年 6 月获得北京交通大学工学学士学位, 同年 9 月进入北京交通大学机械与电子控制工程学院攻读硕博一体化学位, 导师为李强教授。2018 年 7 月进入中国科学院力学研究所联合培养, 导师为魏宇杰研究员。主要研究方向为数据驱动下的高速铁路列车结构疲劳性能。



14. 通过热处理实现高熵合金增强增韧

近年来, 研究人员打破传统的以单一主元为基础的合金设计理念, 运用多种元素以等原子或近等原子比混合, 成功制备出多种化学无序的“高熵合金”。这一类合金呈现出一系列优异的力学性能, 在航天、国防等领域展示出广泛的应用前景。目前对高熵合金在不同服役环境, 尤其是一些极端环境下的塑性流动行为及其背后的机理认识尚不充分, 亟待开展进一步的相关工作。本研究提出了一种有效的强化和韧化方法, 通过结合挤压加工和短时热处理来改善铬钼铁钴镍高熵合金 (HEA) 的拉伸性能。经过这样的处理, 这种合金已经实现了初步的结构异质性, 其中的强度得到了明显的提高, 同时与同质化的部分相比, 保持了良好的伸长率。显微结构表征显示, 在不同的处理下, HEA 有不同程度的部分再结晶, 位错密度或多或少。正是这样的结构不均匀性使这种合金在高流动应力水平下具有

良好的应变硬化能力（图 16）。

该研究成果近期发表在《Scr. Mater.》。中科院力学所 2014 级博士研究生蒲卓为该论文第一作者。

论文链接：https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4007946

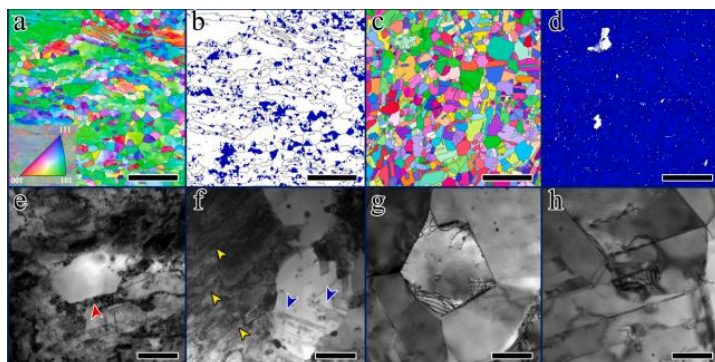


图 16: 高熵合金 CrMnFeCoNi 试样的 EBSD 和对应 TEM 照片。

第一作者简介:

蒲卓, 男, 31 岁, 博士, 2010-2014 就读于中国科学技术大学 (本科), 2014-2021 就读于中国科学院力学研究所 (硕博连读), 导师: 戴兰宏研究员。研究方向: 高熵合金在极端环境下的力学行为。2021 年 3 月至今, 中国核动力研究设计院设计所从事结构力学相关工作。



通讯作者简介:

戴兰宏, 男, 57 岁, 博士, 中国科学院力学研究所研究员, 博士生导师, 国家杰出青年基金获得者, 中国科学院“百人计划”和“新世纪百千万人才工程”国家级人选入选者, 享受国务院政府特殊津贴。主要从事冲击动力学、新型材料力学、结构安全评估、材料加工制造和工艺力学等多学科交叉领域的研究。系统地建立了非晶合金 (金属玻璃) 剪切带理论, 揭示了非晶合金剪切带形成的耦合软化机制与演化动力学规律, 得到了剪切带失稳判据、剪切带厚度、剪切带韧性、剪切带间距等理论表达; 提出了非晶合金一种新的基本变形单元——“拉伸转变区” (TTZ), 建立了统一断裂准则。系统阐明了应变梯度对颗粒增强复合材料剪切带形成影响的物理机制。发展了广义自洽 Mori-Tanaka 方法等细观复合材料力学方法。主持和参与国家自然科学基金重点项目、国家杰出青年科学基金、国家 973 项目、国家自然科学基金创新研究群体项目、中科院知识创新重要方向项目等多项课题。在《J. Mech. Phys. Solids》《Int. J. Plasticity》《Phil. Mag.》《Int. J. Solids Struct.》《Acta Mater.》《Appl. Phys. Lett.》《J. Appl. Phys.》《Phys. Rev. B》《Int. J. Impact Eng.》等国际重要学术期刊发表 SCI 论文 80 余篇。



15. 复合异构 CoCrNi 中熵合金在低温下的优异力学性能

大粗晶状态的中熵合金屈服强度较低,这限制了它们在室温和低温下的结构应用。众所周知,金属和合金可以通过晶粒细化、冷轧或析出相来提高的屈服强度。然而,由均匀晶粒结构调整出具有非共格界面的大析出相引起的强度提升不可避免地

伴随着拉伸塑性的牺牲。这种强度-塑性的困境可以通过构建非均匀的晶粒结构和相干纳米沉淀物来避免。通过形成这些共格纳米沉淀物,除了最大限度地减少塑性应变不协调和防止应力集中外,还可以通过 Orowan 硬化以在中熵合金中获得更好的拉伸性能。此外,这种双重非均质结构通过应变梯度和几何必要位错(GNDs)在界面引起额外的应变硬化。应力/应变分配和异质变形诱导(HDI)硬化在这种复合异质结构的拉伸变形过程中也发挥重要作用,以实现强度和塑性的协同。

中国科学院力学研究所魏宇杰研究员团队袁福平研究员研究并比较了基于 CoCrNi 基质的中熵合金在室温和低温环境下的拉伸性能和相应的变形机制,并进行了对比分析(图 17)。发现复合异质结构是由多级晶粒和相干 L1₂ 纳米沉淀相组成。与室温相比,在低温温度下均质结构以及复合异质结构都同时表现出的更优异屈服强度和均匀伸长率,这可以归因于较高的异质变形诱导的硬化率和较高的几何必需位错。对于均质结构而言,沿两个滑移系的纳米间距层错(间距较小,密度较高)应是维持应变硬化的关键因素,从而获得较好的低温拉伸塑性。观察到 L1₂ 纳米沉淀物对其周围位错的滑移和堆积非常有效。对于复合异质结构,低温拉伸变形后缺陷与 L1₂ 纳米沉淀物之间的相互作用更强,导致 L1₂ 纳米沉淀物破碎细化,获得比室温更好的拉伸性能。

以上研究结果发表于《J. Mater. Res. Technol.》中科院力学所 2019 级博士研究生张子晗为该论文第一作者。论文链接:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785422002484>

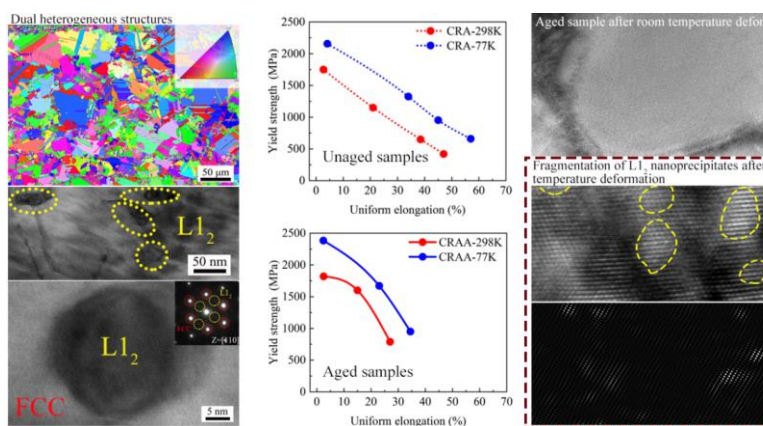


图 17: 以上图片分别为复合异质结构的微结构状态、复合异构的室温以及低温拉伸性能、变形后的微结构分析。

第一作者简介：

张子晗，男，26岁，2015-2019年就读于山东大学（本科），2019级中国科学院力学研究所硕博连读生，导师：袁福平研究员。研究方向：双相中熵合金的强韧化及变形机理。



通讯作者简介：

袁福平，中国科学院力学研究所研究员，博士生导师，2008年毕业于 Case Western Reserve 大学获博士学位。国家自然科学基金委优秀青年科学基金项目获得者，爆炸力学第一届优秀青年学者，中国科学院青年创新促进会优秀会员，中国科学院青年创新促进会，中国科学院卢嘉锡青年人才奖，作为通讯作者发表 SCI 近 60 篇，出版专著 1 本。研究领域包括纳米结构金属的力学行为和变形机理以及材料的动态力学性能、计算固体力学。



16. Archard 定律在从塑性到断裂的磨损机制过渡中的失效

Archard 磨损定律广泛用于量化材料的磨损，是由凹凸不平模型推导出来的。然而，扁平化模型是如此理想化，以至于它不能正确地代表一般互锁非晶的真实情况，在这种情况下，非晶的犁状磨损而不是剪切扁平的非晶。中国科学院力学研究所魏宇杰研究员团队刘小明研究员利用分子动力学模拟，讨论了 Archard 定律在互锁界面的犁式磨损中是否能够成立（图 18）。结果表明，当断裂在磨损中占主导地位时，Archard 定律会被打破。增加界面附着力或降低材料的延展性会使主导的磨损因素从塑性变为断裂。提出了一个标准来确定 Archard 磨损定律何时会被打破，并讨论了所提出的真实材料的标准。提出了 Archard 定律失效的临界点尺寸；证明当交错的粗糙面的耕作被断裂的碎片所控制时，Archard 定律失效；同时，强烈的粘附性促进了磨损碎片的形成，从而将使 Archard 磨损定律失效。该研究成果发表在《Tribol. Int.》。中科院力学所研究员刘小明为该论文（共同）通讯作者。

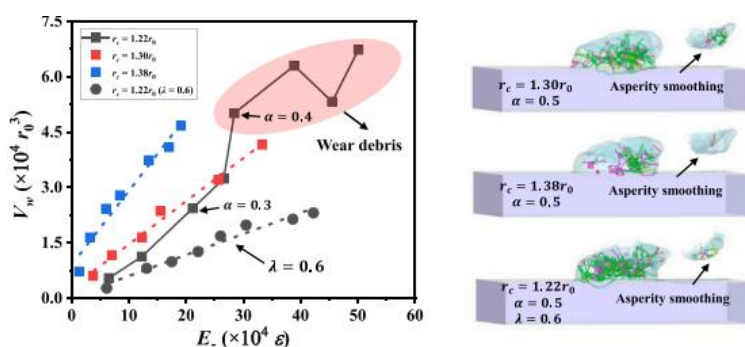


图 18: 磨损量关于凹凸面中 E_z 的函数。

通讯作者简介:

刘小明, 中国科学院力学研究所研究员, 博士生导师, 2009年毕业于清华大学获博士学位, 国家自然科学基金委优秀青年科学基金项目获得者。International Association of Computational Mechanics, General Council; 中科院力学所学位委员会委员; 力学学会/计算力学专业委员会委员; 力学学会/理性力学与数学方法专委会委员; 力学学报编委。



研究领域包括跨尺度力学、接触与摩擦力学、极端条件下材料的塑性与破坏、复杂环境下的结构动力学。从事接触摩擦过程中微尺度塑性变形规律的研究, 研究内容包括材料内部微结构演化导致塑性行为的尺度效应, 以及小尺度接触斑; 塑性对轮轨高速动力学性能的影响。此外在国家需求方面, 研究包括核燃料运输容器缓冲材料的本构关系, 国家第4代先进堆型-快堆堆芯辐照肿胀下的变形研究, 新型环保容器的安全性研究, 高速列车轮轨关系检测技术研究。

17. 基于机器学习的 Ti-6Al-4V 合金的超高周疲劳寿命预测

很少有机器学习 (ML) 模型被应用于超高周疲劳 (VHCF) 分析, 这些方法遇到了数据稀少和过度拟合的限制。本工作旨在克服数据的稀疏性, 并提出一个易于使用和非冗余的 ML 模型用于 VHCF 分析(图 19)。运行蒙特卡洛模拟(MCs)来扩大数据集的规模, 并提出了一种 ML 方法来研究 Ti-6Al-4V 的缺陷大小、深度、位置和构建方向的协同影响。表示预测和实验疲劳寿命之间变化百分比的系数因子可以达到 0.98, 这意味着该模型表现出良好的预测精度。

该研究成果近期发表在《Int. J. Fract.》。中科院力学所正高级工程师(研究员)钱桂安为该论文通讯作者。

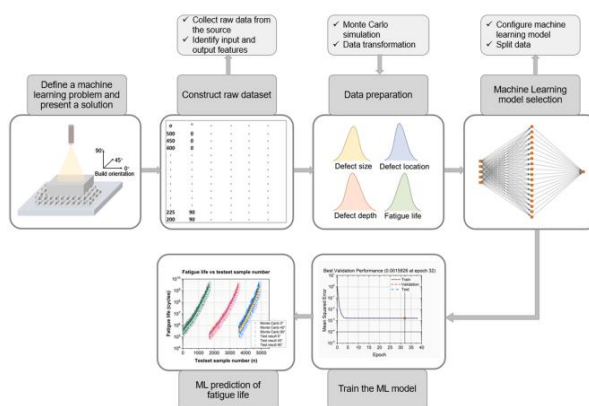


图 19: 用构建方向和缺陷的协同效应预测疲劳寿命的机器学习流程图。

通讯作者简介：

钱桂安, 中国科学院力学研究所正高级工程师(研究员), 博士生导师, 2009年毕业于中国科学院力学研究所获固体力学博士学位, 2009年至2018年在瑞士保罗谢尔研究所从事博士后及研究员工作。研究领域包括3D打印材料超高周疲劳, 核电结构完整性分析, 先进材料疲劳与断裂。发表SCI论文70余篇, 任Material Design & Processing Communications 副主编; Advances in Mechanical Engineering 编委; 中国机械工程学会材料分会青年工作委员会委员; 中国材料学会疲劳分会理事。曾获美国机械工程师协会压力容器分会(ASME PVP)2016年优秀论文奖, 欧洲结构完整性协会(ESIS)2018优秀论文奖。



三. 工作动态

1. IUTAM“固体微结构的多尺度构筑——力学与制造”专题研讨会

2022 年 6 月 26 日至 28 日，国际理论与应用力学联合会（IUTAM）“固体微结构的多尺度构筑——力学与制造(MAMS-MM)”专题研讨会在北京成功举行。研讨会由国际理论与应用力学联合会、中国力学学会、北京国际力学中心、中国科学院力学研究所、非线性力学国家重点实验室、力学学报（英文版）和“非线性力学的多尺度问题研究”基础科学中心共同支持，成立了由中科院力学所魏宇杰研究员、佐治亚理工学院 Hang Jerry Qi 教授、剑桥大学 Norman Fleck 教授、美国麻省理工学院 Markus J. Buehler 教授、北京理工大学方岱宁院士、新加坡南洋理工大学高华健教授、美国加州理工学院 Julia R. Greer 教授、瑞士洛桑联邦理工学院 Pedro M. Reis 教授、美国哈佛大学锁志刚教授、浙江大学杨卫院士组成的学术委员会，邀请了来自美国、英国、德国、新加坡、中国香港和内地的 22 位领域内的顶尖学者做学术报告。会议采用线上和线下相结合的方式进行，主会场设在中科院力学所。

开幕式上，IUTAM 理事、中国科学院院士、中科院力学所学术所长何国威教授，会议主席、非线性力学国家重点实验室主任魏宇杰研究员，会议主席、佐治亚理工学院 Hang Jerry Qi 教授分别代表会议主办方、支持单位和组织方致辞，对研讨会的顺利召开表示祝贺，对线上和线下的参会者表示欢迎，希望大家利用研讨会的平台充分交流，更好地推动固体微结构多尺度构筑领域的研究和发展。

会上，麻省理工学院 Markus J. Buehler 教授、佐治亚理工学院 Ting Zhu 教授、伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校 Taher Saif 教授、浙江大学杨卫院士、加州理工学院 Julia R. Greer 教授、新加坡南洋理工大学高华健教授、中科院金属所卢磊研究员、西南交通大学康国政教授、中山大学王彪教授、德国马普学会钢铁研究所 Dierk Rolf Raabe 教授、南方科技大学葛锜副教授、西北大学 Horacio D. Espinosa 教授、麻省理工学院 Carlos M. Portela 助理教授、马里兰大学李腾教授、北京大学魏悦广院士、斯坦福大学 Ruike Renee Zhao 助理教授、香港城市大学吕



图 21: 何国威院士、魏宇杰研究员和 Hang Jerry Qi 教授分别致开幕词。

坚教授、香港城市大学杨勇教授、西安交通大学卢同庆教授、香港城市大学朱运田教授、新加坡南洋理工大学 Kun Zhou 副教授和剑桥大学 Norman Fleck 教授分别围绕结构化仿生智能材料、分层编织结构、微纳米结构材料、极端异质材料、梯度结构材料、形状记忆合金、可编程结构、超级木头、水凝胶、磁驱动超材料、高熵合金、绿色钢铁、高分子材料、填充蜂窝结构的微观结构和机理、建模计算、力学性能、界面力学行为、构筑和应用等固体微结构多尺度构筑研究领域的前沿进展做了精彩的学术报告，在与会者中间引起了积极的反响和广泛的讨论。研讨会通过蔻享学术平台进了全程直播，累计观众超过 1 万人。

此次研讨会旨在促进讨论如何通过多尺度的架构设计和相应的制造策略来定制固体材料的力学行为，以实现具有预期性能和功能的先进结构。研讨会为全世界的学者和工程技术人员提供了一个展示最新研究成果、分享见解的交流平台，并将促进与先进固体微结构材料生产与应用相关的工业技术的发展。

2. “高超声速边界层转捩研究的新进展”学术研讨会

2022 年 8 月 10 日，“高超声速边界层转捩研究的新进展”学术研讨会在中国科学院力学研究所顺利举办。研讨会在“非线性力学基础科学中心”支持下，由中国科学院力学研究所、中国航天空气动力技术研究院（航天十一院）与天津大学联合承办，旨在探讨项目的研究进展，聚焦高超声速边界层转捩领域的研究前沿，规划未来的研究与合作方向。来自清华大学、北京大学、北京理工大学、天津大学、航天十一院、航天三院和中科院力学所等知名高校与科研院所的三十余名专家学者参加了本次研讨会。会议还设置了线上直播。力学所学术所长何国威院士代表力学所致辞，研讨会由力学所非线性力学国家重点实验室董明研究员主持。

何国威在致辞中首先对应邀参会的专家学者表达了诚挚欢迎和衷心感谢。他指出，高超声速边界层转捩是以国家需求为导向的基础科学问题，既有尚未解决的基础性难题，也是下一代的飞行器气动设计需要考虑的重要因素，需要从基础研究出发解决飞行器的实际问题。他指出，研讨会从基础研究出发，将在解决实际问题上发挥重要作用，并预祝研讨会成功。

本次研讨会共安排来自清华大学、北京大学、天津大学、力学所以及航天十一院的研究团队的 9 个学术报告，涵盖了高超

声速边界层转捩的最新研究进展，包括新物理机制的数学建模、高精度数值方法



图 22: 会议现场

的应用、实验测量技术的改进、实验新现象的观测以及相关理论的建立。学术报告结束后，参会专家学者重点围绕与高超声速转捩领域的前沿方向进行了深入的讨论，航天十一院的袁湘江研究员、中科院力学所的李新亮研究员等提出了宝贵的意见。

四. 人才培养

1. 让看不见的流场无所遁形（王洪平）

王洪平，中国科学院力学研究所特别研究助理。主要研究方向为流体力学实验测量技术、湍流边界层拟序结构、心血管血流动力学。主持国家自然科学基金项目两项，在国内外期刊发表论文 30 余篇，一篇论文被评为中国科协第六届优秀科技论文，已通过力学研究所“力星计划”的评审。

王洪平本科毕业于兰州大学，博士就读于北京航空航天大学，专业为流体力学，2016 年 6 月获工学博士学位。怀着对探索未知的渴望以及对科研工作的热忱，同年进入中国科学院力学研究所继续从事实验测量方面的研究工作。实验测量是揭示流动机理、发现新现象的重要途径。一方面，它可以揭示流动过程中的流态或流动特征，让看不见的流场无所遁形；另一方面，流动参量的直接测量可以为数值模拟提供参考和基础。如何准确高效地获取流场数据是实验流体力学的重要研究内容，也是实验测量的核心问题之一。在力学研究所何国威院士的带领下，他围绕三维流场测量技术和心血管复杂流动开展了系统的研究工作。他提出了多种原创性方法降低流场测量误差，突破了三维流场测量中的关键技术。科研道路充满未知、困难和挑战，他始终保持热情、坚持初心，在流场测量上不断追求更准确、更快速、更精细的目标，为实验技术的发展贡献自己的青春与智慧！他工作的主要创新点和贡献如下：



实验系统方面，他参与研制了国内首个层析粒子图像测速平台，发展并改进了层析粒子重构算法，形成了完整的具有原创性的三维测量软件。该软件包含空间标定、图像前处理、空间灰度重构、三维速度场计算以及速度场后处理。该技术能够实现复杂流场的高时空分辨率精细化测量，填补了国内三维层析技术的空白。参与开发的单相机三维流场测速关键技术及装备获得国家技术发明二等奖。通过与商业公司合作，形成商业产品，产生了较大的社会效益。

实验技术方面，申请人从原理驱动、数据驱动以及物理驱动三个方面提出了多种技术和方法，部分解决了实验测量中测不准、精度低等问题。申请人原创性地提出了基于全局优化的粒子图像互相关算法，提高了粒子图像测速算法的精度和分辨率，可以用于测量湍流等复杂流动中的小尺度结构。该技术已获得了国家发明专利，相应的论文发表于实验流体力学重要期刊；申请人还发展了基于物理神经网络的数据融合技术，通过在损失函数中嵌入物理方程和测量数据，同时实现了速度场优化和压力场求解。该技术可以将非结构测量数据物理地插值到结构网格，突破了传统测量对时空分辨率的限制，为实现四维度全参量流场测量奠定

了基础。相关文章发表于流体力学重要期刊。

王洪平及其所在团队（湍流和大涡模拟课题组）勇于拼搏、敢于挑战，不断攻克流体物理、数值模拟与实验技术中的难题，既能深入基础研究的国际前沿，也能服务于国家重大战略需求。王洪平及其所在团队将不忘初心、努力工作，继续为祖国的科技事业而奋斗！

2. 多源异构湍流数据同化提升噪声预测精度（张鑫磊）

张鑫磊,中国科学院力学研究所特别研究助理, 主要研究方向为数据驱动湍流建模。主持国家自然科学基金委青年基金项目一项, 并获博士后基金一等资助, 共发表 SCI 论文 19 篇, 包括《J. Comput. Phys.》, 《AIAA J.》等流体力学领域重要期刊。



现有湍流模型, 对于带有分离、相变等现象的多流态复杂流动, 存在模型形式不完备的问题, 会导致较大的预测不确定性, 直接影响航空航天及水下重大装备研发设计的可靠性。鉴于这一背景, 张鑫磊发展了湍流数据同化和机器学习湍流建模方法, 克服了湍流特征维度高和数据样本小的困难, 并应用于湍流噪声、空化等重大工程应用中的复杂流动问题。他的主要学术创新成果包括:

(1) 针对湍流数据同化的不适定问题, 张鑫磊提出了基于贝叶斯理论的正则集合卡尔曼方法, 实现了物理约束下的多源异构湍流数据同化。该方法不仅能够施加不同的物理约束提高反演场的准确性, 还可以考虑多源数据实现湍流多物理场重构。该方法被应用于湍流噪声问题中, 通过结合近场速度和远场噪声数据, 反演推断湍流的时空积分尺度, 提升了远场噪声的预测精度。研究成果为广义约束下的湍流数据同化提供了具有应用前景的实用工具, 被瑞典皇家理工大学 S. Larsson 教授评述为“复杂系统性能评估的主要标准案例 (main benchmarks) 之一”。

(2) 针对湍流数据样本少的问题, 张鑫磊提出了与雷诺平均方程耦合迭代的小样本机器学习方法, 构建了基于稀疏含噪数据的端到端机器学习框架。该框架结合了集合方法、伴随方法和神经网络等先进人工智能算法, 不仅显著提升了湍流模型的训练效率和泛化能力, 而且突破了传统机器学习技术过于依赖数据的限制。该方法被应用于周期山状流、翼型绕流等经典流动中, 实现了基于稀疏多源异构数据源的机器学习湍流建模, 并提升了所训练模型的鲁棒性和泛化性。所提出的小样本学习框架有望成为机器学习湍流建模的实用方法, 相关工作被宾州州立大学 X. Yang 教授评述为“机器学习在雷诺平均模型应用中引人注目的案例 (notable example)”。

(3) 针对空化的压缩性问题, 提出了基于边界层厚度修正的数据驱动空化湍流模型, 揭示了经典空化压缩性修正的原理与局限, 利用构建的空化湍流模型进一步考虑了压缩性对边界层厚度的影响, 提高了边界层内流场脉动量的预测精

度。研究成果不仅提出了原创性的高精度空化湍流模型，而且阐明了经典空化模型修正诱导产生回射流的机制，被德国贝塞尔研究奖得主 M. Dular 教授评价为“评估并证实了（justified）”经典空化模型修正的作用。

张鑫磊不仅在流体力学的前沿基础研究方面开展了深入工作，还从事潜艇噪声等重大工程应用方面的研究，参与了科工局的国家重点工程和国家数值风洞工程项目，服务于国家重大战略需求！

3. 多组分流体多尺度纳米级结构与系统整体性质（历明波）

历明波，孙超教授科研团队成员，清华大学能源与动力工程系助理研究员。2019 年 6 月获得浙江大学机械电子工程专业博士学位，2019 年 9 月~至今于清华大学燃烧能源中心/能源与动力工程系从事博士后研究工作，合作导师孙超教授。研究领域主要涉及实验流体力学、多相流、纳米气泡及纳米液滴等方面，相关研究成果已在《Chem. Eng. J.》、《J. Colloid Interf. Sci.》、《Int. J. Heat Mass Tran.》、《Phys. Fluids》等界面科学和流体力学领域权威期刊发表多篇学术论文。作为负责人主持国家自然科学基金青年科学基金项目和中国博士后科学基金面上资助各一项。



目前的研究主要致力于从微观的角度解析气泡、液滴等分散相在多相多组分流体系统中的动态行为特性和热力学稳定特性。多相多组分流体在日常生活及工业生产中极为常见，其复杂的动力学行为不仅涉及连续与离散元素的非线性耦合，而且存在离散相介质的跨尺度演化，包括常见的气泡和液滴等。尤其，当气泡和液滴等尺度进一步缩小，进入纳米尺度后，对这些纳米结构体本身物理性质的认知也是各领域所面临的共同难题。以纳米气泡为例，作为特殊的纳米受限空间，其气液界面层不再是力学平衡模型中简单的零厚度曲面，而是具有恒定或者动态变化厚度的物理微区，且结构化环境，涉及水分子特异性排布、带电介质倾向性吸附/解吸附、气体分子动态交换及双亲性活性分子富集等等。

围绕纳米气泡，其已开展系列研究，取得的进展包括：（1）发展了纳米颗粒跟踪分析系统，实现了对纳米气泡特征参数的动态测试；（2）完整揭示了体相纳米气泡在宽温度范围内的热力学响应特性，发现在温度场中溶液中水分子自电离作用和气液界面处离子的迁移特性共同决定了气泡的热力学平衡状态；（3）系统性探究了流体离子环境对于体相纳米气泡稳定性的影响，初步揭示了体相纳米气泡表面电荷来自于溶液中带电离子的竞争性吸附；（4）解耦了流体界面张力和表面电荷对于体相纳米气泡稳定性的作用机制。围绕纳米液滴，研究发现在多组分流体系统中，不仅存在可自发形成的多尺度纳米结构域，而且其宏观物理性质如粘度等与纳米结构之间具有紧密的联系。该纳米结构域表现出长期的热力学稳定性，不同结构之间可能存在成分的互换但是没有明显的消失或聚结；尤其是对于温度等因素非常敏感，具有可逆的响应特性，可在温度触发下自发形成、长大或

消失。其稳定性的起源可依赖于双亲性分子和水分子之间形成的强氢键的屏蔽效应，双亲性分子在界面处的结构化排布以及胶体稳定性。

这些多尺度纳米级结构在一定程度上决定了该多组分流体系统的整体性质，例如溶剂化能力或扩散性质，进而影响其宏观输运性能和相变特性。这些纳米尺度的结构体已被证实普遍存在于多相流体中，那么随之许多结论和现象需要重新审视，尤其为气泡减阻和空化相变的研究提供了完全崭新的视角与理论挑战，有助于从微观的角度发展多相流体系宏观输运性质调控的新机制。

多尺度力学快讯

2022 年 | 第 2 期 | 总第 6 期 | 编辑人员：何国威，晋国栋