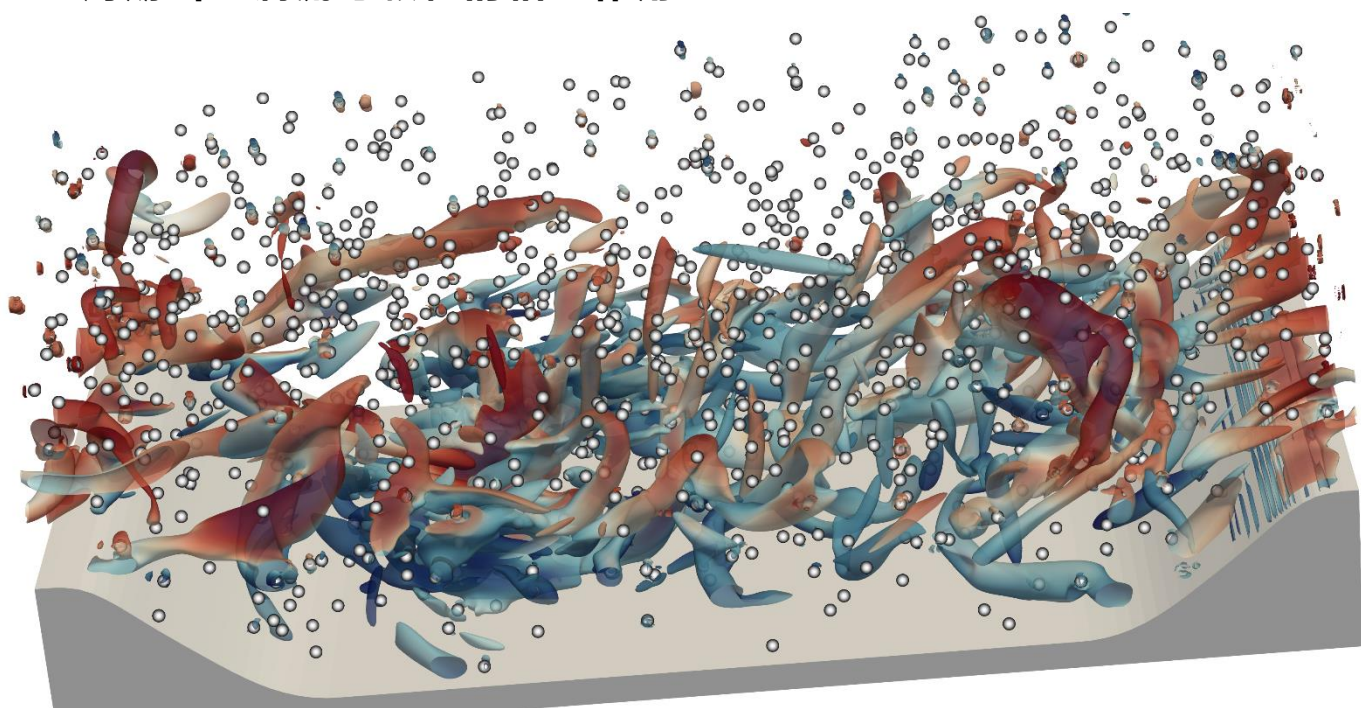


多尺度力学快讯

2022年 | 第1期 | 总第5期

▼ 周期山壁湍流与颗粒的相互作用



“非线性力学的多尺度问题研究”项目组

2022年5月11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

研究背景

多尺度问题是非线性力学的核心和前沿：非线性力学的两个主要科学问题——流体湍流和固体破坏，是典型的多尺度耦合问题，也是《Science》杂志列出的125个科学问题中的力学问题。同时，高速运载设备研制的卡脖子问题：湍流噪声和材料强度，也是典型的多尺度强耦合问题。因此，多尺度问题的研究对于非线性力学的发展和高速运载设备的研制起到关键作用。

项目组成员

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”（简称“多尺度力学”）于2019年立项，执行期为2020年1月至2024年12月。项目负责人为何国威院士，依托单位是中国科学院力学研究所，合作研究单位为北京大学和清华大学。项目组成员为陈十一院士、孙超教授、唐少强教授和魏宇杰研究员等在非线性力学领域具有国际影响力的中青年科学家。

何国威	陈十一	孙超	唐少强	魏宇杰
中科院力学所	北京大学	清华大学	北京大学	中科院力学所
研究员/院士	教授/院士	教授	教授	研究员
				

项目目标

通过该基础科学中心的建设，发展多尺度力学的新知识体系，凝聚和培养一支多尺度力学的高水平研究队伍，建成国际非线性力学的研究高地，并面向高速运载设备的湍流减阻降噪和固体破坏问题，发展新一代数值模拟软件，提出新的原理和发展新的技术。

目 录

一. 主要进展	1
1. 壁面压力时空谱：预测湍流噪声的关键	1
2. 高超声速边界层转捩壁面摩阻和热流过冲现象.....	2
3. 揭示颗粒调节湍流阻力的机制.....	2
4. 增材制造 Ti-6Al-4V 合金超高周疲劳裂纹萌生和演化机理	4
5. 先进结构及材料的非线性力学行为	4
二. 前沿探索	7
1. 拓扑结构对高超声速湍流边界层动能传输贡献与滤波尺度的关系	7
2. 有限尺寸颗粒湍流两相流数值模拟方法	7
3. 有限尺寸颗粒与湍流的耦合作用	8
4. 聚合物湍流线性失稳机理.....	9
5. 自然时效和变幅加载对 GCr15 轴承钢超高周疲劳行为机理	10
6. 辐照条件下金属微结构演化与局部变形特征的关联	11
7. 纳米多晶金属多尺度塑性本构模型	12
8. 量纲分析的机器学习研究.....	13
三. 工作动态	15
1. 2021 年度项目工作会议.....	15
2. 项目组成员组织的多尺度力学会议	17
四. 国际前沿	18
机器学习多尺度计算简介	18
五. 科学扫描	19
1. 流体力学 Batchelor 奖.....	19
2. 固体力学 Hill 奖	20

一. 主要进展

近来项目组在湍流壁面压力时空谱、湍流转捩、颗粒湍流减阻、材料的疲劳破坏与先进结构力学性能等方面取得阶段性进展。

1. 壁面压力时空谱：预测湍流噪声的关键

壁面压力的时空谱是壁湍流中湍流噪声的主要声源之一，因此成功预测壁面压力时空谱是气动噪声预测的前提。但是由于通过直接数值模拟（DNS）计算壁面压力时空谱需要较大的计算资源与存储空间，目前文献中壁面压力时空谱的 DNS 研究仅局限于 $Re_\tau = 180$ 的低雷诺数情况。

中国科学院力学所何国威研究员科研团队研究了 $Re_\tau = 180 \sim 1000$ 的槽道湍流 DNS 及相应的壁面压力时空谱，提出了壁面压力时空谱的随机下扫模型，最后利用 DNS 数据分析了快变、慢变压力互相关项对于总压力谱的贡献。

与速度类似，平均速度对流以及大尺度的随机下扫作用是壁面压力时间去关联的两个主要机制。因此，壁面压力时空谱可以采用随机下扫模型描述，表示为波数谱与高斯频率分布的乘积。该模型中三个速度尺度分别取为壁面压力的平均对流速度以及缓冲区中心 ($y^+ = 15$) 处的脉动速度，不含任何可调参数。图 1 对比了壁面压力时空谱的 DNS 结果与随机下扫模型的结果，证实了随机下扫模型可以很好地得到壁面压力时空谱的含能区性质。利用 DNS 数据，此研究计算并详细研究了忽略快变、慢变压力交叉项所带来的误差。分析表明，忽略交叉项会在亚对流区造成高达 4.7 分贝的误差（等价于 195% 相对误差），且不同雷诺数下这一误差峰值在粘性尺度无量纲下几乎是重合的。这表明这一误差峰产生于近壁的粘性区与缓冲区。

研究结果发表在《J. Fluid Mech.》，论文题目为《槽道湍流中壁面压力的时空能谱》，论文第一作者是中科院力学所研究生杨博文，通讯作者是杨子轩研究员。论文链接：[doi:10.1017/jfm.2022.137](https://doi.org/10.1017/jfm.2022.137)。

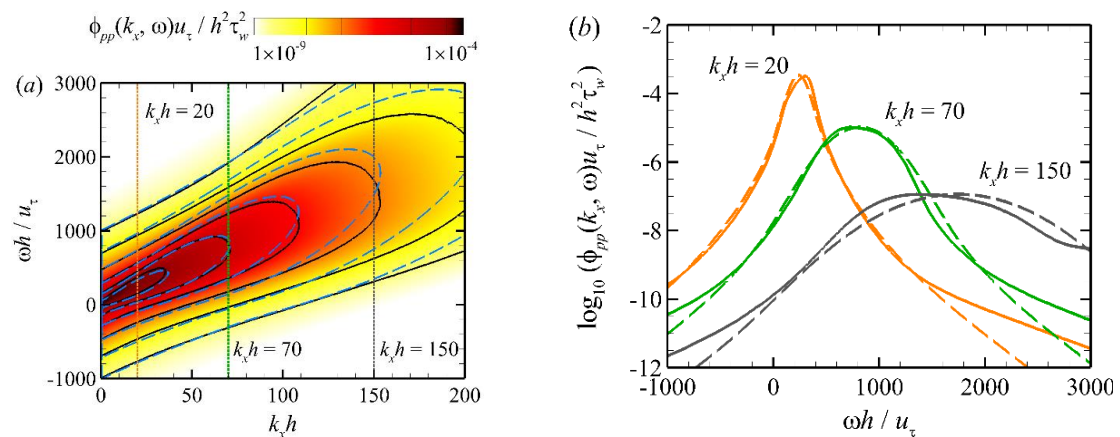


图 1. 壁面压力时空谱的 DNS 结果（实线）与随机下扫模型（虚线）的对比：（a）流向波数-频率时空谱；（b）流向波数为 $k_x h = 20, 70, 150$ 的截面对比。

2. 高超声速边界层转捩壁面摩阻和热流过冲现象

在槽道和边界层从层流转捩为湍流的过程中，常常会出现转捩峰处的摩阻和热流值大于充分发展湍流处的摩阻与热流值，这种现象被称为摩阻和热流的过冲现象。尽管过冲现象广泛存在于槽道、边界层等有壁面的流动中，但此现象背后潜藏的流动机理却少有研究。

北京大学陈十一教授科研团队首次利用冯卡门边界层二次积分的方法对高超声速边界层转捩时壁面摩阻和热流的过冲现象的主要原因进行了解释。图 2 表示了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。图 3 表示了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。

研究结果发表在《J. Fluid Mech.》，论文题目为《高超声速转捩与湍流边界层的壁面摩阻和热流分解》。论文第一作者为北京大学博士研究生许得豪，通讯作者为王建春教授和陈十一院士。论文链接：DOI:10.1017/jfm.2022.269

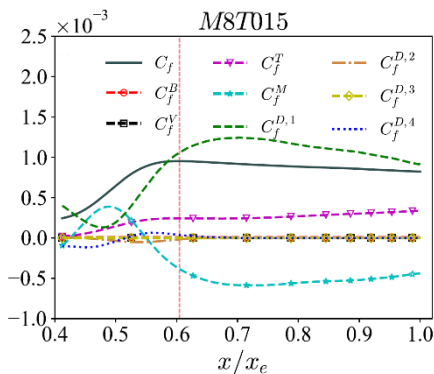


图 2：摩阻及摩阻分解各项随流向距离的变化。

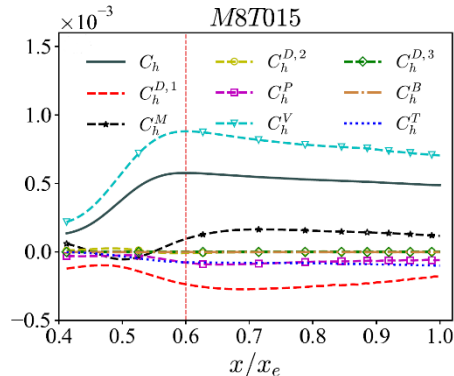


图 3：热流及热流分解各项随流向距离的变化。

3. 揭示颗粒调节湍流阻力的机制

湍流减阻具有重要的科学意义和工程应用价值。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课题组利用实验方法系统地研究了三种不同宽高比的颗粒，分别对应于扁形、球形和椭球形的有限尺寸颗粒对 Taylor-Couette 湍流的阻力影响及其机理。研究发现：由于固体颗粒的表面摩擦，向系统中加入任何形状的颗粒都会增加系统阻力。通过比较归一化阻力系数，发现随着 Re 增加，阻力增加的幅度均减小，即呈现出类似于非牛顿流体的剪切变稀效应，这可能是由于在当前的体积分数区间内，在高雷诺数下湍流应力成为流体应

力的主导项；由于不可忽略的流动惯性以及高雷诺数和高体积分数导致颗粒的不均匀分布，文中得到的体系有效粘度与适用于斯托克斯流的 Krieger & Dougherty 公式存在明显差异。通过改变颗粒的宽高比，发现向流场中加入球形颗粒后系统阻力增加的幅度最大，而加入扁形颗粒后系统阻力增加的幅度最小。利用图像处理技术对体积分数为0.5%和2%进行分析发现：在较低 Re 时，颗粒的运动较大程度地受到流体运动的影响，并且颗粒的分布反映出泰勒涡的形态；而随着 Re 增加，由于湍流强度的增加和颗粒的有限尺寸效应增强，颗粒能更容易逃离流体结构的束缚，从而在系统内分布更加均匀（如图 4 所示）。此外，不同形状的颗粒在系统内呈现不同的聚集分布特点，并为其不同的系统阻力调制效果提供了解释：倾向于聚集在靠近壁面的球形颗粒会在壁面附近形成颗粒层，导致在加入球形颗粒后系统阻力增加最大；相反地，倾向于聚集于远离壁面的中心区域的扁形颗粒则不会形成颗粒层，因此在加入扁形颗粒后系统的阻力最小。这项研究有助于理解湍流场中颗粒的有限尺寸效应，以及解释颗粒流的阻力调制机理，另外本工作中的颗粒流阻力与颗粒形状的依赖关系为解释气泡流阻力调制效应提供了参考，对指导气泡减阻等工业应用具有重要意义。

研究结果发表在《J. Fluid Mech.》，论文的题目为《有限尺寸颗粒是如何改变 Taylor-Couette 湍流的阻力响应》，第一作者为研究生汪程，通讯作者为孙超教授。论文链接：<https://doi.org/10.1017/jfm.2022.125>。

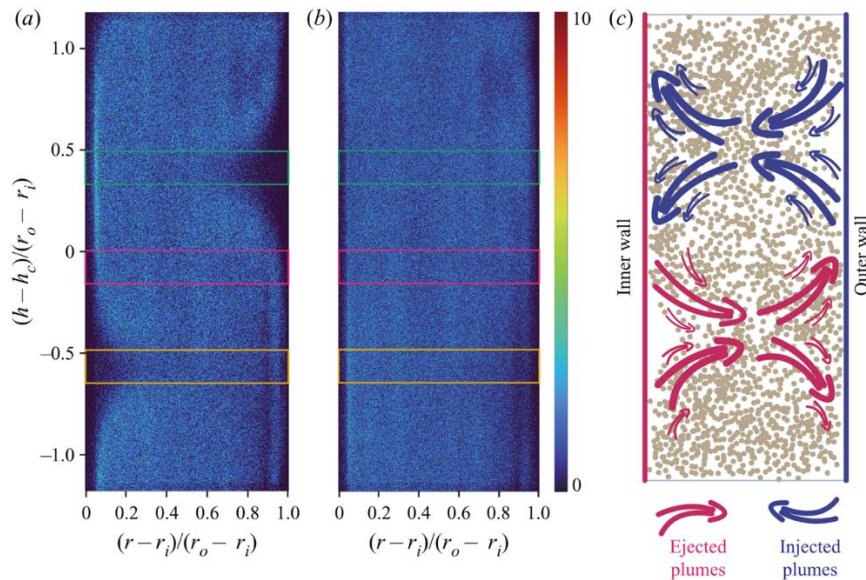


图 4: 球形颗粒在不同 Re 数下的位置分布: (a) $Re = 6.5 \times 10^3$, (b) $Re = 1.3 \times 10^4$, 体积分数均为 0.5%; (c) $Re = 6.5 \times 10^3$ 的卡通示意图，图中箭头表示羽流方向，颗粒位置（黄色实心圆）仅作参考。

4. 增材制造 Ti-6Al-4V 合金超高周疲劳裂纹萌生和演化机理

增材制造钛合金在航空领域具有很好的应用前景。在增材钛合金的潜在应用中，一些零部件不可避免地承受超高周疲劳载荷作用。作为一种崭新的技术，增材制造钛合金的微结构与传统的锻造钛合金有所不同。因此，深入理解增材制造钛合金的超高周疲劳失效机制对于准确预测增材制造钛合金的疲劳寿命以及增材制造钛合金构件的抗疲劳设计具有十分重要的意义。

针对这一问题，魏宇杰研究员团队研究发现，增材制造 Ti-6Al-4V 合金的超高周疲劳裂纹起源于试样表面或内部(图 5a-14d)所示。对于内部裂纹萌生，疲劳裂纹萌生和初始扩展区域呈现细小的粒状区域(Fine Granular Area, FGA)特征(图 5d)。进一步的透射电镜观测结果表明，FGA 区域裂纹面下的微结构具有不连续区域的细小晶粒微结构(图 5e)。基于实验结果，我们提出钛合金超高周疲劳裂纹萌生和初始扩展机理，即循环载荷作用下位错相互作用导致晶粒细化进而形成微裂纹以及在晶粒、晶界等形成的微裂纹共同所致。该机制也能合理解释钛合金超高周疲劳裂纹萌生和初始扩展区域具有细小晶粒层现象。

研究结果发表在《Int. J. Mech. Sci.》，论文第一和通讯作者为孙成其研究员。
论文链接：<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106591>。

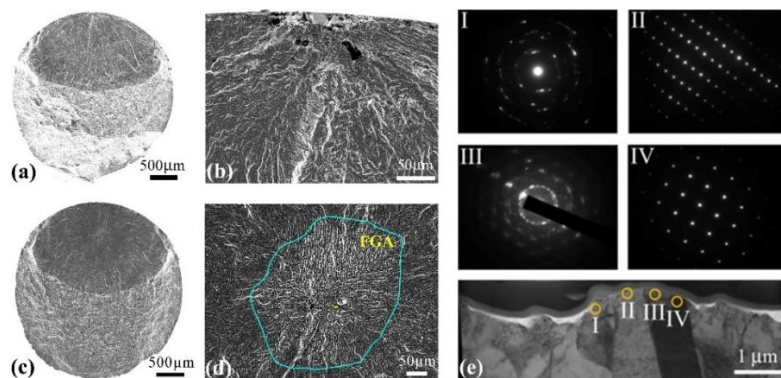


图 5: (a) 和 (b) 表面裂纹萌生, $\sigma_a=590$ MPa, $R=-1$, $N_f=5.51 \times 10^7$; (c) 和 (d) 内部裂纹萌生, $\sigma_a=550$ MPa, $R=-1$, $N_f=1.21 \times 10^8$, (d) 中短线表示沿加载方向提取透射电镜样品位置; (e) (d) 中短线位置提取样品的透射电镜观测结果, 圆圈表示选区衍射位置。

5. 先进结构及材料的非线性力学行为

随着先进制造技术的快速发展，各种类型的先进结构及材料不断涌现出来。其中，折纸变体结构和柔性智能材料由于其出色的变形能力和灵活的环境适应能力在软体驱动器、软体机器人、生物医疗器械等领域中具有重要的应用价值，吸引了大量的研究关注。在实际应用中，折纸变体结构和柔性智能材料常常会经历

非线性大变形。因此，研究相应的非线性力学行为对于设计具有特定功能的先进结构和材料具有重要指导意义。

在折纸变体结构的非线性力学行为方面，段慧玲教授课题组通过交叉折叠纸带的方法构建了一种折纸弹簧结构，并使用连续化等效方法建立了该结构变体行为分析的几何模型，从而揭示了其拉扭耦合变体机理（如图 6(a)所示）；进一步提出了柔性折纸结构刚性化处理的思想，对折纸弹簧结构的非线性力学特性进行了分析和优化（如图 6(b)所示）；最后，基于拉扭耦合变体行为和非线性力学响应特性分析的结果，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 Robotics》。此外，课题组还提出了一种双稳态的锥形折纸结构（如图 6(c)所示），并建立了分析其非线性大变形行为的等效力学模型，继而揭示了其变体过程中的能量转化机制（如图 6(d)所示）。通过对其能量泛函进行微分求导，得到了其稳态构型参数与单元几何参数之间的解析表达。最后，利用该折纸模型，发展了一套适用于各种类型的具有旋转对称性的折纸变体结构设计方法。设计出的结构不仅能够拟合给定的旋转对称曲面（如图 6(e)所示），而且具有多个稳态构型，不同稳态构型之间还可以相互转换。相关研究成果发表于英国皇家学会会刊《Proc. Royal Soc. A》。

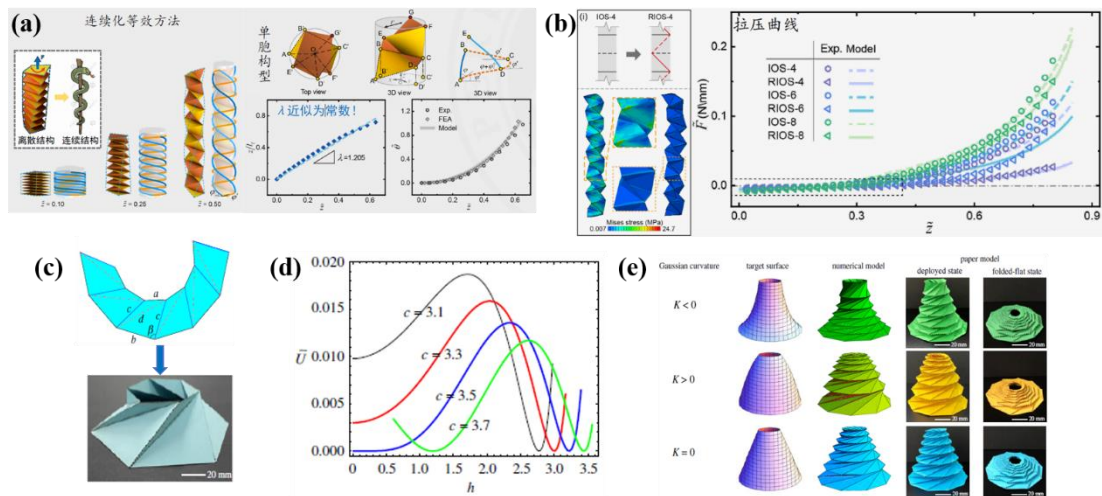


图 6: (a) 折纸弹簧结构连续化等效方法（左）及变体行为分析（右）；(b) 柔性折纸结构刚性化处理方法（左）及其非线性力学行为（右）；(c) 锥形折纸结构的折痕图案（上）和折叠构型（下）；(d) 锥形折纸结构的能量变化曲线；(e) 能够拟合指定旋转对称目标曲面的多稳态变体结构设计。

在柔性智能材料的非线性力学行为方面，段慧玲教授课题组首先聚焦于相变夹杂复合软材料，利用复合材料细观力学理论建立了相变夹杂复合材料的等效性能预测方法，准确预测了含固-液相变夹杂复合材料的变刚度行为（如图 7(a)所示），以及含液-气相变夹杂复合材料的膨胀变形行为（如图 7(b)所示）；揭示了夹

主要进展

杂固-液相变过程中复合材料刚度变化的响应机制，以及夹杂液-气相变过程中复合材料刚度保持不变的机理。在此基础上，采用微流控 3D 打印的方法制备了含有液-气相变夹杂复合材料的双层曲梁结构，利用曲梁结构的非线性大变形特性，将其成功用于柔性抓手（如图 7(c)所示）、以及可负载仿生尺蠖机器人（如图 7(d)所示）等应用中。相关研究成果发表于英国皇家学会期刊《Proc. Royal Soc. A》以及软体机器人领域顶级期刊《Soft Robotics》。此外，围绕相变夹杂复合材料，课题组还研究了固-液相变复合材料在不同应变率加载下的抗冲击特性及其能量耗散机制；并设计了一种内部具有微通道的超材料，通过替换微通道内的液体，这种超材料可以吸收不同频段的微波。相关成果发表在《Acta Mech. Solida Sin.》和《Mater. Lett.》。

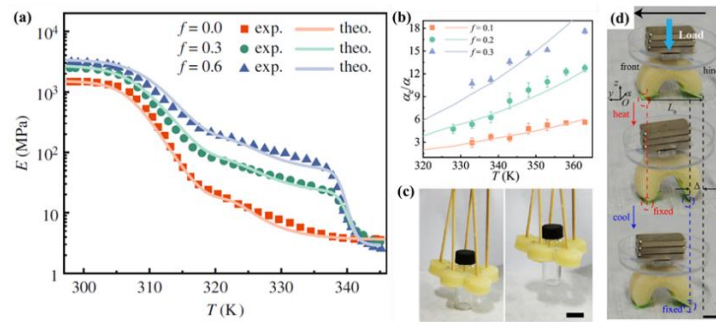


图 7: (a) 含低熔点合金（固-液相变）夹杂环氧树脂复合材料的模量变化；(b) 乙醇（液-气相变）夹杂复合材料的热膨胀系数变化；(c) & (d) 基于含乙醇夹杂相变复合材料双层曲梁结构设计的抓手结构和可负载仿尺蠖爬行器结构。

二. 前沿探索

项目组在湍流结构、有限尺寸颗粒与湍流相互作用机理、湍流转捩机理、材料超高周疲劳行为、材料本构以及多尺度力学的机器学习方法等领域开展前沿探索，取得一系列研究成果。

1. 拓扑结构对高超声速湍流边界层动能传输贡献与滤波尺度的关系

在可压缩边界层湍流中，基于速度梯度张量的不变量可以将流动分为八种不同的拓扑结构。北京大学陈十一教授科研团队通过研究滤波后的速度梯度张量的不变量，将滤波后的流场分为八种拓扑结构，不同的拓扑结构代表不同的流动特性。图 8 表示了拓扑结构 S4 在涡结构中占主导，展现出拉长的管状结构。拓扑结构 S7 主要出现在拓扑结构 S4 弯折的位置。而拓扑结构 S1 和 S5 主要受到强平均剪切的压缩作用，从而展现出球状结构。在远离壁面处，动能传输主要由拓扑结构 S1 和 S4 贡献。而在近壁区，壁面温度对拓扑结构的相对贡献有很大影响。在近壁区，低温壁面增强了拓扑结构 S1, S7 和 S8 的相对贡献，抑制了拓扑结构 S4 和 S5 的相对贡献。

研究结果发表在《Phys. Fluids》，论文题目为《流动拓扑结构对高超声速湍流湍流边界层动能传输的贡献》，论文第一作者为北京大学博士研究生许得豪，通讯作者为王建春教授和陈十一院士。。论文链接：DOI: 10.1063/5.0089126

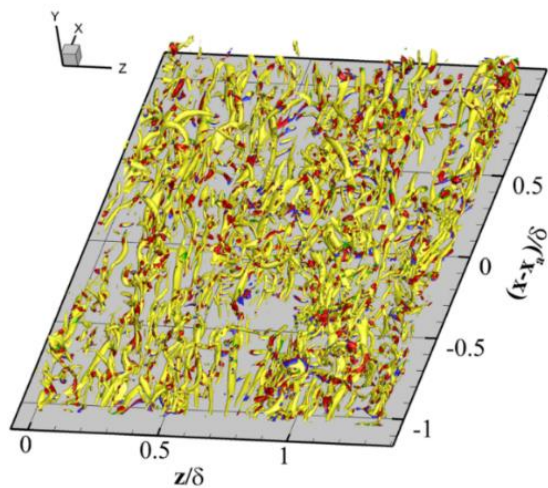


图 8: $Q=1000$ 的等值面图。红色表示拓扑结构 S1，黄色表示拓扑结构 S4，绿色表示拓扑结构 S5，蓝色表示拓扑结构 S7。

2. 有限尺寸颗粒湍流两相流数值模拟方法

由于流动的复杂性，两相湍流的理论和经验公式往往都有局限性。解析颗粒模拟可用于获取阻力、速度脉动和传热等闭合模型，进行实际设备尺寸的大规模

计算时，雷诺平均方法和大涡模拟方法均可使用这些闭合模型。

针对工程实际中的颗粒两相湍流往往伴随复杂几何边界的问题，中国科学院力学研究所何国威研究员科研团队开发了一种结合光滑和清晰界面浸没边界方法的计算框架。与此前的方法相比，所提出的框架具有以下两个方面的优势：1) 基于曲线网格的清晰界面浸没边界方法可轻松处理任意复杂的环境边界，这对于贴体网格方法来说较为困难甚至不能实现；2) 光滑界面的直接力浸没边界方法用于解析颗粒几何，可准确有效地模拟颗粒输运导致的运动边界，避免贴体网格方法的复杂动网格技术和清晰界面浸没边界方法模拟动边界问题时常出现的力的非物理性振荡。该方法可有效模拟复杂边界下的颗粒负载型流动。目前，该方法已成功应用于周期山颗粒湍流的颗粒解析模拟（图 9）。

研究结果发表在《Commun. Comput. Phys.》，论文题目是《复杂边界下颗粒流的混合光滑和清晰界面浸没边界方法》，第一作者为中科院力学所博士后秦建华，通讯作者是杨晓雷研究员。论文链接: [https://doi: 10.4208/cicp.OA-2021-0166](https://doi.org/10.4208/cicp.OA-2021-0166)。

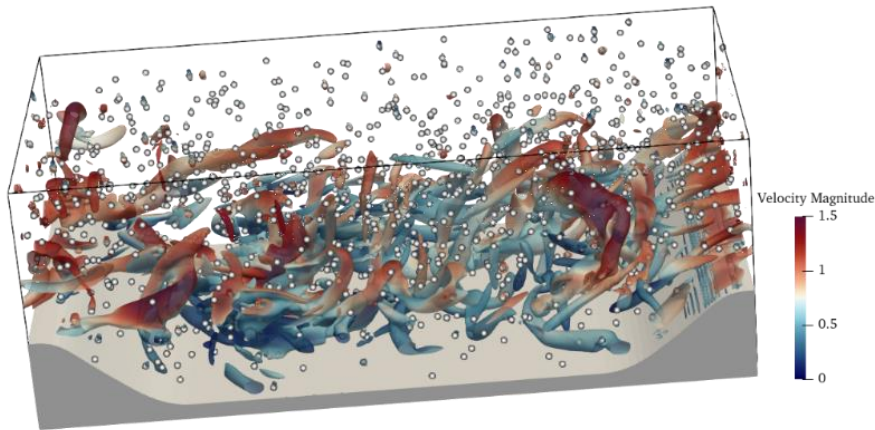


图 9: 周期山状颗粒湍流的瞬时 Q 值涡量图和颗粒分布。

3. 有限尺寸颗粒与湍流的耦合作用

清华大学孙超教授科研团队采用全尺度模拟精确地计算了湍流场与有限尺寸颗粒间的耦合作用。图 10 展示孙超团队利用全尺度模拟得到的颗粒运动轨迹和颗粒周围的能量耗散率以及速度的分布。研究发现，椭球颗粒的加速度均方值与颗粒的尺寸存在指数接近-1 的标度律关系。同时，采用流场加速度的体积平均同样表明了相同的标度律关系。这表明湍流场中悬浮有限尺寸颗粒的加速度特性由流场的体积平均作用主导。考察颗粒轴向加速度和横向加速度的比值可以发现，颗粒的方向与加速度方向的倾向性并不随尺寸变化，这表明了惯性尺度与耗散尺度流场的速度梯度存在相似的结构。

研究发现不同形状的颗粒旋转率均方值都与颗粒尺寸存在指数为-4/3 的标度律关系，这同样表明颗粒的整体旋转率由颗粒在流场中所占体积主导。不同形

状颗粒的自转率均方值与翻滚率均方值的比值随颗粒尺寸的增大而减小。结果表明了有限尺寸颗粒与湍流场的耦合作用改变了颗粒周围的流场,进而改变了颗粒旋转率的分布。

过去的研究认为悬浮有限尺寸颗粒与湍流场间的耦合作用较弱,有限尺寸颗粒的运动通常采用 K41 理论解释。孙超团队的全尺度模拟研究表明了悬浮有限尺寸颗粒与流场之间的耦合作用能够显著地改变颗粒的旋转特性,该研究对进一步理解有限尺寸颗粒多相湍流问题具有深远地意义。

研究成果发表在《J. Fluid Mech.》,论文题目为《湍流场中有限尺寸椭球颗粒的动力学:流动结构和边界层的作用》,论文第一作者为清华大学博士生蒋林峰,通讯作者是孙超教授和法国里尔大学 Calzavarini 教授。论文连接: DOI:10.1017/jfm.2022.197。

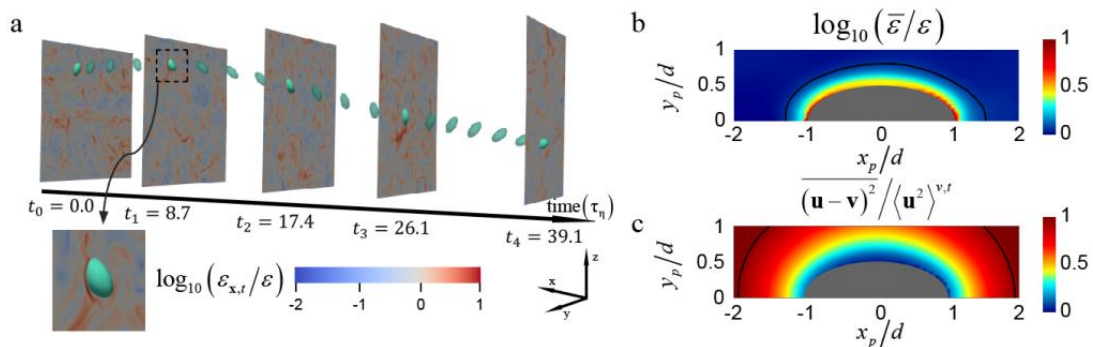


图 10: (a) 椭球颗粒的运动轨迹; 颗粒周围流场 (b) 能量耗散率分布以及 (c) 速度均方值的分布。

4. 聚合物湍流线性失稳机理

在湍流溶剂中加入微量的高聚物会达到减阻的效果,这已经被应用于阿拉斯加的石油管道运输工业中。近期实验发现,高聚物湍流的最优减阻状态发生在“弹-惯性湍流”机制下。这是一种不同于传统牛顿流体的新的湍流机制,它与粘弹性流动中特有的中心型失稳模态相关(对于牛顿流体,圆管流动中的线性扰动是绝对稳定的)。但是,对这种粘弹性失稳机制一直缺乏深刻的认识。

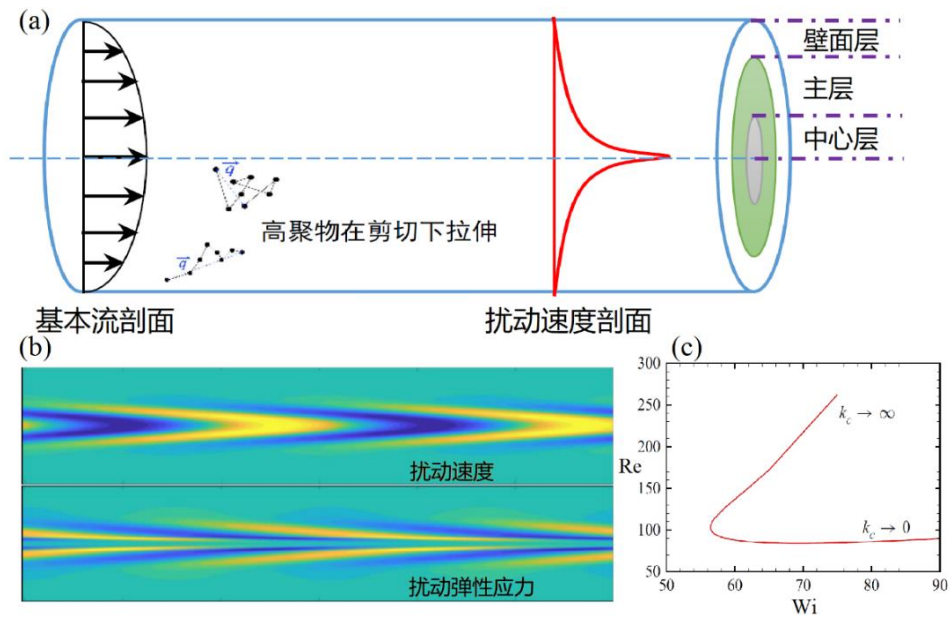


图 11: (a) 圆管高聚物溶液渐近分层的示意图; (b) 粘弹性模态扰动速度 (上) 和弹性正应力 (下) 的特征分布 (蓝色表示正值、黄色表示负值); (c) 展示粘弹性模态临界失稳状态的中性曲线, 其中 Re 为表示惯性力与粘性力之比的雷诺数, Wi 是表示高聚物弛豫时间与流动时间之比的威森伯格数; $k_c \rightarrow 0$ 和 ∞ 分别表示长波和短波极限。

中国科学院力学研究所何国威研究员科研团队首次从数学上展示了该粘弹性模态的多层结构特性, 见图 11-a, 并从物理上阐明了失稳的本质来源于在弱剪切层——中心层——内弹性应力张量的驱动作用。这一驱动机制甚至可以在粘性缺失的情况下存在, 这与传统牛顿流的粘性失稳机制有本质区别 (粘弹性中心型模态的特征分布见图 11-b)。本研究还发现了粘弹性管流中的长波和短波两种失稳机制 (分别对应于图 11-c 中 $k_c \rightarrow 0$ 和 ∞ 的情况), 并获得了各机制下不同控制参数之间的标度关系, 这为工业应用中最优湍流减阻状态的参数设计提供了理论基础。

研究结果发表在《J. Fluid Mech.》, 论文题目为《粘弹性流动线性稳定性渐进分析》, 论文第一和通讯作者是董明研究员。论文链接: DOI: 10.1017/jfm.2022.24。

5. 自然时效和变幅加载对 GCr15 轴承钢超高周疲劳行为机理

在工程应用中, 有些材料和结构在生产出来后会放置一段时间再进行使用, 这段时间便会产生自然时效, 而该因素对材料疲劳性能的影响有待研究。

中国科学院力学研究所魏宇杰研究员科研团队针对自然时效对 GCr15 轴承钢超高周疲劳行为的影响展开实验研究。研究发现经过 10000 小时的自然时效,

GCr15 轴承钢超高周疲劳寿命更长了(图 12a 所示)。光学显微镜对初始状态和自然时效后材料微结构的观察发现(图 12b 和 12c 所示), 经过自然时效后的微结构中沉淀出更多颗粒状碳化物, 该沉淀硬化效应既能强化 GCr15 轴承钢, 又能抑制裂纹的萌生和扩展, 从而延长该材料的超高周疲劳寿命。

对于 GCr15 轴承钢在使用中承受的变幅循环载荷的影响, 我们研究发现一旦目标应力幅值在疲劳裂纹萌生和初期扩展阶段造成的损伤或裂纹足够大, 随后低载循环也会促进损伤发展或者裂纹扩展, 最终降低材料在目标应力幅下的疲劳寿命。此外, 少量高载循环可加速裂纹的萌生和扩展, 并降低目标应力幅下的疲劳寿命。

研究结果发表在《Theor. Appl. Fract. Mech.》, 第一作者是中科院力学所研究生李根, 通讯作者是孙成奇研究员。论文链接: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103360>。

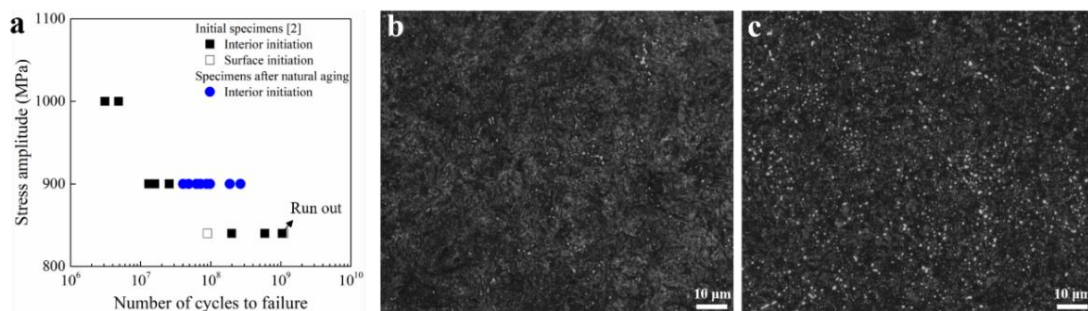


图 12: (a) 初始试样与自然时效后试样的 S-N 数据; (b) 和 (c) 初始状态和自然时效后的微结构。

6. 辐照条件下金属微结构演化与局部变形特征的关联

北京大学工学院段慧玲教授课题组在受辐照金属塑性变形的多尺度研究领域取得重要进展, 发表在《J. Mech. Phys. Solids》, 《Int. J. Plast.》和《Acta Mech. Sin.》等力学领域重要期刊。

辐照缺陷对金属材料力学性能影响的研究是一个典型的多尺度问题。在微观尺度下, 辐照缺陷会阻碍位错运动而引起辐照硬化, 同时塑性变形中的辐照缺陷湮灭会诱发材料内部形成位错通道等局部变形特征, 这被视为导致辐照脆化现象的主要原因。段慧玲教授课题组根据材料微结构的非均匀分布特性, 提出了一种模拟位错通道演化的随机晶体塑性模型, 认为位错通道的形成不仅与辐照缺陷密度有关, 还取决于微结构的非均匀程度。课题组进而基于所发展的晶体塑性有限元方法, 建立了微结构演化与局部变形特征的关联, 成功模拟了受辐照金属的位错通道形核和演化, 并给出了位错通道形核所需的临界辐照缺陷密度。

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。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（图 13）。

以上工作不仅对受辐照金属塑性变形的多尺度研究提供了新的见解，更为抗辐照材料的设计及工程应用提供了基础理论指导。

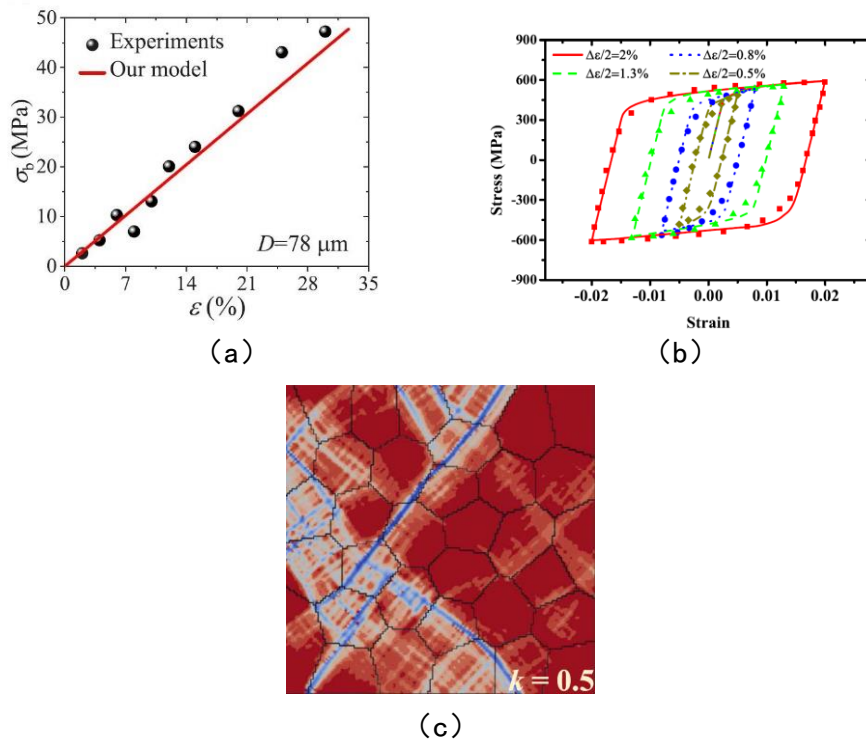


图 13: (a) 显示了变形过程中的背应力演化; (b) 显示了马氏体钢的循环变形应力-应变曲线; (c) 图显示了受辐照材料中位错通道模拟。

7. 纳米多晶金属多尺度塑性本构模型

在常压情况下，纳米多晶金属的晶粒尺寸软化现象不可避免。但近期的实验显示，在高压下纳米多晶镍的屈服强度会随着晶粒尺寸的减小而单调增大，即高压诱导了反 Hall-Petch 现象消失。目前对这一特殊现象的理论研究存在空缺。

北京大学工学院力学与工程科学系易新课题组以该组提出的位错存储模型 (J. Mech. Phys. Solids 154, 104530 (2021)) 为基础，建立了纳米多晶金属的统一多尺度静水压相关塑性本构模型。研究表明，反 Hall-Petch 现象消失是静水压诱

导的晶界强化和晶粒内部位错存储能力减弱这两个因素相互竞争的结果：静水压诱导的晶界强化能促进反 Hall-Petch 现象的消失，而晶内位错存储能力下降导致的晶内软化则会阻碍反 Hall-Petch 现象的消失 (图 14)。由于晶界强度对分法向应力的变化更为敏感，随着晶粒尺寸的减小，纳米多晶金属材料屈服强度的拉-压不对称性变得更加显著，且随着晶粒尺寸减小到几个纳米而最终达到饱和。此外，由于晶界塑性变形受到静水压抑制，纳米多晶金属材料中的剪切局域化现象以及相邻晶粒间的微裂纹和微孔洞汇聚现象得到缓解，导致宏观裂纹扩展受到阻碍。相应地，纳米多晶金属材料的延展性和断裂强度得到提升。同时，研究还发现负静水压引起的材料软化要比相同数值正静水压引起的强化效果更为显著。该研究为理解纳米多晶金属的高压强化现象提供了新见解，并为通过晶界工程合理设计和制造高强度、高延展性的纳米多晶金属提供了新思路。

结果发表在《Int. J. Plast.》，论文第一作者为北京大学力学与工程科学系 18 级博士生韩泉峰。论文链接：<https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2022.103261>。

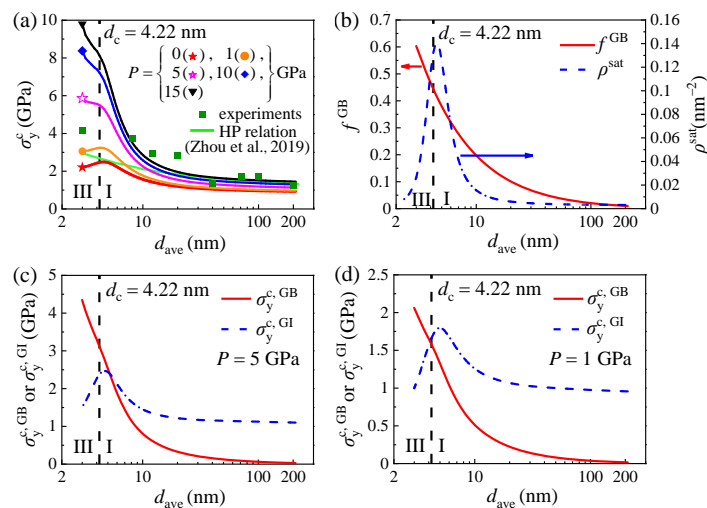


图 14: (a) 不同静水压下纳晶镍屈服强度模拟值和实验值；(b) 饱和位错密度和晶界体积分数随晶粒尺寸 d_{ave} 变化；(c, d) 不同静水压 P 作用下，晶界和晶内对屈服强度的贡献。

8. 量纲分析的机器学习研究

量纲分析基于量纲研究变量之间的关系，用无量纲量描述物理现象和规律，是研究复杂系统的有效工具。经典量纲分析的两个弱点是：(1) 无量纲量的形式不唯一，(2) 无法衡量各无量纲量的相对重要程度。数据驱动的量纲分析通过将经典的量纲分析与活跃子空间理论结合，弥补了上述两个缺点。数据驱动量纲分析的基础是物理系统中无量纲量的响应面函数可以写为岭函数的形式。

中国科学院力学研究所何国威研究员科研团队提出了一种基于全连接神经网络构建响应面函数的方法。该方法用量纲矩阵的零空间矩阵表示一个系统中的无量纲量，并采用神经网络通过学习数据集建立无量纲因变量与自变量之间的

前沿探索

相关关系。通过对其零空间矩阵的特征向量和特征值的分析和排序，生成新的无量纲量并对其的重要性定量评估，从而确定唯一且重要的无量纲量。此外，我们还提出了一种通过原始自变量调整无量纲量的增量，并且该无量纲量的增量，不引起其它无量纲量的变化，从而建立了计算响应面函数梯度与实验或计算参数之间的直接关系。相比于经典的数据驱动量纲分析方法，我们所提出的方法可以用较少的数据构建准确的响应面函数及其梯度。我们采用经典的圆管流动和流固耦合实验数据检验了我们所发展的方法，成功地不依赖预先的物理关系，从数据导出了流动系统和流固耦合系统的主导无量纲参数(见图 15)。

研究结果发表在《J. Comput. Phys.》。论文题目为《基于人工神经网络的量纲分析响应面函数》，论文第一作者是中科院力学所博士研究生许昭越，论文通讯作者是王士召研究员。论文链接：DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2022.111145>。

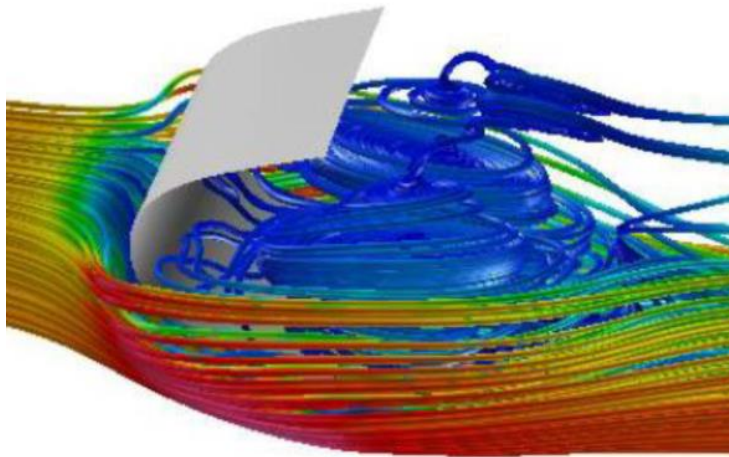


图 15: 流固耦合系统。

三. 工作动态

1. 2021 年度项目工作会议

2022 年 3 月 30 日，国家自然科学基金委基础科学中心“非线性力学的多尺度问题研究”项目组召开了 2021 年度工作研讨会，会议由项目负责人何国威院士主持，来自中科院力学研究所、北京大学和清华大学的项目参研人员参加了会议。项目成员汇报了过去两年围绕多尺度力学的核心科学问题所取得的主要进展和 2022 度的工作计划。中科院力学所科技处张玲芳主管介绍了基础科学中心项目过程管理，着重介绍了中期检查的时间、方式和要求。

中科院力学所魏宇杰研究员汇报了微结构与固体强度方向的工作进展：

(1) 首次在多主元合金中获得化学短程有序的直接观测证据，实验标定化学短程有序的具体元素占位、尺度信息，揭示亚纳米级化学短程有序与位错交互作用的强韧化机制；

(2) 得到了折线裂纹的应力场以及应力强度因子表达式，被巴黎-萨克雷大学 A. Vattré 认为是现代断裂力学的奠基性工作之一；

(3) 在国际上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，并将该计算方法应用于受到广泛关注的锂金属，实现了其力学行为精准描述。

北京大学唐少强教授汇报了多尺度算法与理论方向的工作进展：

(1) 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，提出了界面演化的标度关系；

(2) 揭示了复合材料纳米纤维横截面形貌在表面张力作用下发生收缩的变化规律和固-液复合材料在粘弹性阶段及损伤破坏阶段的能量耗散机制及其调控策略，提出了可编程变体设计和精准变形控制方法，实现了结构变体与功能协调控制；

(3) 提出恰当杨氏模量的判据，给出自适应选择恰当杨氏模量的数值方案，克服了给定平均应力（或应变）并不足以确定唯一的微观力学响应的困难。

清华大学孙超教授汇报了两相湍流输运特性方向的工作进展：

(1) 创造性地引入超重力来研究湍流输运特别是热湍流输运，搭建和完善了超重力驱动热湍流实验平台，获得高质量的测量数据，在近 2 个数量级的瑞利数范围证明了 Kraichnan 区间的存在；

(2) 揭示了连续相湍流和分散相液滴的相互作用机制，开拓了组分间特异性调控湍流输运新方法，发现形变分散相对湍流减阻正面效应，为解释变形气泡

减阻物理机制提供重要线索；

(3) 发现移动固液界面和周围流场的非线性耦合对于研究结冰问题的关键性作用，给出了结冰过程、厚度、结冰时间和周围流动之间的定量关系，被认为对“气候变化”有重要意义。

北京大学肖左利研究员代陈十一院士项目组汇报了两相流中离散相与湍流相互作用机理和模型方向的工作进展：

- (1) 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和动能的逆向传输的过程，发现脉动动能度的正向传输集中在压缩区，逆向传输集中在膨胀区；
- (2) 发现二次斜压涡量诱导速度影响湍动能演化的规律，基于粘性涡环模型并考虑二次斜压涡量对速度环量的影响，提出了基于涡环动力学的尖钉气泡增长率模型，通过涡重联时间匹配演化前期涡环模型与后期相似率模型建模湍流混合宽度；
- (3) 发现颗粒两相流中的颗粒减小了水流的流向平均速度，且平均速度的减小程度随颗粒体积分数的增加而增加，颗粒增加床面附近的小尺度涡结构，由于近壁流向涡结构的作用，发现沉积物颗粒优先存在于低速条纹区域。

中科院力学所何国威院士汇报了湍流时空耦合理论与应用方向的工作进展：

- (1) 建立了湍流时空能谱的动态自回归模型，正确预测了湍流的对流速度和时空能谱谱宽，生成了具有正确时空特征的近壁湍流速度脉动时空场，改正了涡粘方法存在的错误，提高了对大尺度结构的时空统计的预测精度；
- (2) 提出了一种有限域湍流噪声源的计算方法，揭示了涡结构的对流速度和扰动传播的相速度相对大小对湍流噪声源模型影响的机理，利用声源的时空关联修正涡结构穿出有界域边界的对流速度，实现了对声源非物理扰动的自动过滤；
- (3) 提出了风机偏航时尾迹的速度和长度的特征尺度，发现以该尺度标度的不同偏航角的尾迹间存在相似性，突破了常规尺度无法标度不同偏航角尾迹的局限为发展动态尾迹模型，实现考虑尾迹湍流的偏航控制，提供了理论依据。

项目组2年来发表SCI期刊论文212篇，其中包括Nature、Science Advances、PNAS等重要综合性期刊文章16篇，JFM、PRF、JMPS、Acta Mater等重要力学期刊文章84篇，论文总被引1075次，单篇最高引101次。授权专利10项，软件著作权4项，出版专著1项（高等教育出版社，2021. 全书392页，55万字）、组织多尺度力学专刊1期，机器学习与力学专刊1期。

获国内外力学领域重要奖项7项，包括国家自然科学基金二等奖2项、周培源力

学奖 1 项、美国物理学会 APS Fellow 1 项、腾讯基金会“科学探索奖”2 项、上海市自然科学二等奖 1 项。

获国家级和省部级人才项目 7 项，其中国家杰出青年基金 1 项、优青 2 项、中组部青年千人计划 1 项、中科院百人计划 3 人。

国内外重要会议和组织邀请报告 8 次，包括美国物理学会流体力学年会、法国图卢兹流体力学研究所“IMFT 流体力学访问教授”报告、第三十一届全国水动力学研讨会大会报告、第一届全国极端力学学术会议邀请报告、第二届智库理论暨双螺旋法研讨会、Balachandar 60 岁生日暨多相流研讨会、美国工程科学学会年度技术会议。

举办国内外重要会议 7 次，包括 BICTAM-CISM Symposium on Dispersed Multiphase Flows: from Measuring to Modeling、北大新工科国际论坛“智能制造与工业软件”分论坛、第一届全国极端力学学术会议、湍流结构的生成演化与作用机理重大研究计划年度交流会暨迎新春流体力学研讨会、复杂系统力学智能模拟与控制研讨会。



图 20: 项目负责人何国威院士作报告。

2. 项目组成员组织的多尺度力学会议

国际理论与应用力学联盟(IUTAM, International Union of Theoretical and Applied Mechanics)举办的“固体微观结构的多尺度构造：力学和制造”研讨会(IUTAM Multiscale architecting of microstructures of solids: mechanics and manufacture (MAMS-MM))将于 2022 年 6 月 26 日-6 月 28 日在北京举行(会议具体情况可能根据疫情管控情况调整)。会议主席为 Prof. Yujie Wei(魏宇杰)和 Prof. Hang Jerry Qi (齐航)，IUTAM 学术委员会代表是 Prof. Norman Fleck。会议网址为 <https://iutam2022-mams-mm.casconf.cn/>。

四. 国际前沿

机器学习多尺度计算简介

在力学设计的过程中，我们首先需要考虑的是使用何种材料，然后再选择采用何种结构，而连接材料和结构的媒介是基于材料数据的本构模型（Constitutive model）。英国剑桥大学的 Liu 教授等提出以数据驱动的方法学习 PDE，采用神经元算子（深度神经网络）、傅立叶神经元算子(Fourier neural operators)等方法来加速估算 PDEs，并融入了先验物理公式。他们的方法在求解纳维斯托克斯方程方程（NS）上比传统方法快了 1000 倍，克服了维数灾难，解决了小尺度模型计算成本非常大的问题。Liu 等的研究为我们今后解决问题提供了很好的思路。当面对求解费时耗力的复杂问题时，可以尝试在多尺度下分析问题，从大量数据中学习问题的物理机制，利用已经存在的物理公式等先验知识，来加速问题的求解，减少我们的计算时间并增加计算精度。此外，在使用机器学习来计算刚度矩阵的问题时，维度灾难的问题普遍存在，Liu 采用结合物理原理将矩阵分割为多个更小的矩阵来进行规避的方法值得借鉴。

资料出处：<https://www.bilibili.com/read/cv15832788>

Liu 等相关文章：<https://ddm.eng.cam.ac.uk/>

五. 科学扫描

流体力学 Batchelor 奖和固体力学 Hill 奖是流体力学领域和固体力学领域每四年一次的最高奖。最近几届获奖者的研究方向和取得的成果与多尺度力学密切相关。我们下面简介奖项设立的背景和最近几届的获奖人及其学术贡献。

1. 流体力学 Batchelor 奖

流体力学领域的 Batchelor 奖，以英国剑桥大学应用数学家、流体力学家，流体力学权威期刊《Journal of Fluid Mechanics》的创刊主编 George Keith Batchelor 教授命名，由《Journal of Fluid Mechanics》期刊和国际理论与应用力学联盟（International Union of Theoretical and Applied Mechanics, IUTAM）于 2007 设立，每四年在国际理论与应用力学大会(International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, ICTAM)上颁发给唯一的一名科学家，以表彰其在过去十年中对流体力学作出的重大研究贡献。该奖项由一个国际专家小组审议了来自世界各地研究人员的提名后颁发。研究成果代表了流体力学应用的一个新兴领域或流体力学已有分支的重大突破。



George Keith
Batchelor(1920-2000)

2008 年，第一届 Batchelor 奖被授予美国哈佛大学的 Howard Stone 教授。Stone 教授因在微流动领域的贡献而获奖，包括对滑移边界条件的理解，泡沫驱，表面张力和表面活性剂效应，生物流体力学和胶体动力学等。

2012 年，第二届 Batchelor 奖被授予荷兰屯特大学的 Detlef Lohse 教授。Lohse 教授因其在基础流体力学的杰出研究成果而获奖，包括气泡声致发光、湍流对流、多相流和微流动等。

2016 年，第三届 Batchelor 奖被英国剑桥大学的 Raymond E. Goldstein 教授。Goldstein 教授因对活性物质流体力学的开创性研究而获奖，包括细菌悬浮液中的集体行为、真核细胞中鞭毛的同步以及游动微生物的表面相互作用，在理解细胞运输和多细胞系统进化方面取得了重大进展。

2020 年，最近一届 Batchelor 奖被授予美国普林斯顿大学的 Alexander J Smits 教授。Smits 教授因对理解高雷诺数和高马赫数下壁湍流结构的开创性贡献而获奖，特别是通过设计新颖的实验和测量设备，以及在仿生推进和使用改性表面减阻方面的开创性工作。

(<https://iutam.org/the-batchelor-prize-in-fluid-mechanics-3/>)

2. 固体力学 Hill 奖

固体力学领域的 Hill 奖, 以英国剑桥大学固体力学家, 固体力学权威期刊《Journal of the Mechanics and Physics of Solids》的创刊主编 Rodney Hill 教授命名, 由爱思唯尔 (Elsevier) 出版社和国际理论与应用力学联盟 (International Union of Theoretical and Applied Mechanics, IUTAM) 于 2007 年设立, 每四年在国际理论与应用力学大会 (International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, ICTAM) 上颁发给唯一的一名科学家, 以表彰其在过去十年中对固体力学作出的重大研究贡献。该奖项由一个国际专家小组审议了来自世界各地研究人员的提名后颁发。研究成果代表了固体力学应用的一个新兴领域或固体力学已有分支的重大突破。



Rodney Hill
(1921-2011)

2008 年第一届 Hill 奖被授予美国加州理工大学的 Michael Ortiz 教授。Ortiz 教授因为在物理建模、数学分析和计算技术, 尤其包括开发用于多尺度建模的准连续方法; 为塑性变形制定新的增量变分方法, 非凸耗散函数自然导致位错子结构的形成; 开发三维有限变形内聚元模型, 用于模拟断裂和碎裂, 并开发相关辛积分器; 利用代数拓扑学中的工具研究有缺陷的晶格等方面的贡献而获奖。

2012 年第二届 Hill 奖被授予美国布朗大学的华裔科学家 Huajian Gao (高华健) 教授。高华健教授因其在基础固体力学及其与其他领域深刻而广泛的学科交叉成就而获奖, 这些成就重新定义了力学研究的现代前沿。他的工作包括基础理论以及材料科学、纳米技术和生物工程的应用。

2016 年, 第三届 Hill 奖被授予英国格拉斯哥大学的 Raymond Ogden 教授。Ogden 教授率先建立了非线性材料行为和大变形连续介质力学的连续介质力学框架, 提出类橡胶材料、生物材料、表现出电磁行为的软物质大幅度变形的本构描述, 开发了动脉壁的计算模型, 并被广泛应用于商业有限元软件中。

2020 年, 最近一届 Hill 奖被授予英国剑桥大学的 Vikram Sudhir Deshpande 教授。Deshpande 教授在材料力学方面作出了开创性的贡献, 从微结构材料的设计到软材料和活性材料的建模。他将理论理解与实验结合起来, 解释复杂的现象。

(<https://iutam.org/the-rodney-hill-prize-in-solid-mechanics-2020/>)

多尺度力学快讯

2022年 | 第1期 | 总第5期 | 编辑人员: 何国威, 晋国栋
