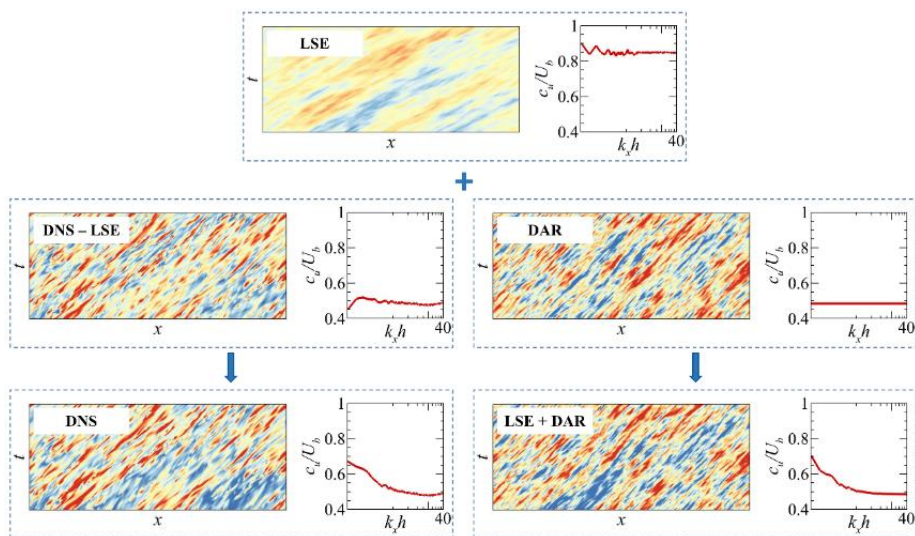


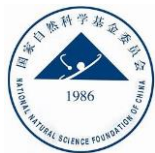
多尺度力学快讯

2021年 | 第2期 | 总第4期



动态自回归模型结合线性随机估计模型可重构具有给定湍流时空能谱特征的近壁湍流脉动速度场

(详见第1页, 何国威研究员提供)



“非线性力学的多尺度问题研究”项目组

2021年12月20日

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16页)

学术交流信息

介绍基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”2021年主办的学术会议、2022年与多尺度力学相关的会议信息、媒体报道等。

(详见第17至20页)

学术奖励

介绍基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”参研人员获得的重要学术奖励。

(详见第21页)

一. 多尺度力学项目进展

1. 湍流时空能谱随机动态模型的研究

近期,《Phys. Rev. Fluids》刊登了中国科学院力学研究所何国威研究员科研团队关于湍流时空能谱随机动态模型的研究进展。

湍流时空能谱表征了湍流能量在不同时间和空间尺度上的分布,是研究湍流时空尺度动态耦合和湍流噪声等流动物理现象的基本工具。构造湍流时空能谱的随机动态模型,生成具有正确时空性质的湍流场,这不仅有助于湍流来流生成和流动控制,也有助于时间精准壁模型的建立。通常的白噪声模型没有合理化湍流的畸变效应,尤其是没有包含随机横扫效应,这导致了其产生的时空能谱的谱宽为无穷大,这与真实湍流不符。针对这一问题,本研究提出了剪切湍流时空能谱的动态自回归模型。该模型通过引入自回归随机力代表湍流的随机横扫机制,并在模型中考虑了湍流大尺度结构对小尺度结构的随机激励作用以及更小尺度结构造成的涡粘耗散作用,从而构造了近壁湍流小尺度流动的随机动态方程。该模型正确预测了湍流的对流速度和时空能谱谱宽,克服了以前时间白噪声随机力模型无法预测时空能谱谱宽的根本缺陷。在此基础上,本研究采用线性随机估计方法来确定与外层流动相关的大尺度流动。将动态自回归模型与线性随机估计模型相结合,本研究成功重构了具有给定湍流时空能谱特征的近壁湍流脉动速度场(见图 1)。模型得到了槽道湍流直接数值模拟数据的验证。该模型可用于高速运载工具湍流噪声和颗粒湍流两相流等复杂流动的时间精准的大涡模拟方法。

此外,《Phys. Rev. Fluids》邀请何国威研究员撰写关于湍流时空能谱的研究综述,介绍该研究成果以及何国威研究员在湍流时空能谱领域的其他贡献。

以上研究获得国家自然科学基金基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”(No. 11988102) 资助。论文链接: DOI: 10.1103/PhysRevFluids.6.054602 以及 DOI: 10.1103/PhysRevFluids.6.100504。

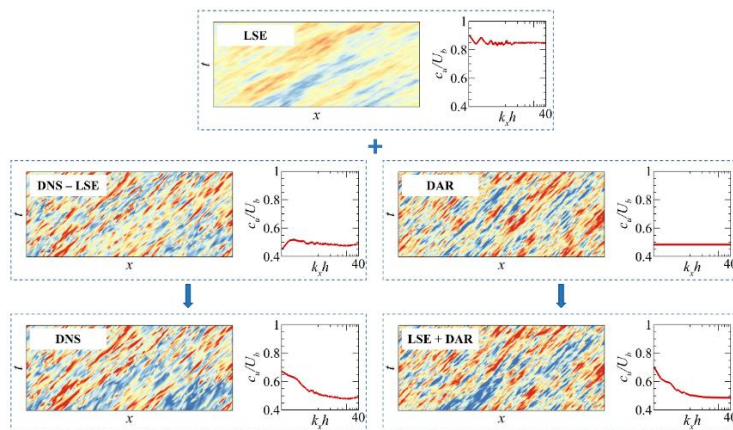


图 1: 动态自回归模型结合线性随机估计模型重构的具有给定湍流时空能谱特征的近壁湍流脉动速度场。

2. 风力机偏航时的尾迹机理研究

近期,《J. Fluid Mech.》刊登了中国科学院力学研究所何国威研究员科研团队在风轮机尾迹机理方面的研究进展。论文题目是《不同偏航角风轮机尾迹相似性的大涡模拟》(Large-eddy simulation on the similarity between wakes of wind turbines with different yaw angles)。

为实现碳中和、碳达峰 3060 目标,风能将在我国能源体系中发挥越来越重要的作用。风轮机将风能转化为电能会在其下游形成风速低、湍流强度高的尾迹区域,影响下游风轮机的电量产出和疲劳载荷。实地测量结果显示风轮机尾迹会带来电量损失 20%左右,甚至可高达 80%。对风轮机尾迹进行控制,降低其对下游风轮机尾迹的影响,有望显著提高风电场性能。通过对风轮机进行偏航控制,可将尾迹偏离下游风轮机,进而提高其电量产出。目前,人们对偏航时尾迹的时间平均特性已有较好的了解,但对其湍流特性还知之甚少。

在这项工作中,我们采用大涡模拟和风轮机的致动面模型模拟了不同风轮机偏航角和不同来流湍流下的风轮机尾迹特性,并推导了适合偏航风轮机流向和横向尾迹特征的速度和长度尺度。模拟结果显示,在不同偏航角下,尾迹特征在适当归一化时相互重叠,包括尾迹偏转的流向变化、中心线上的速度亏损、尾迹宽度、瞬时尾迹中心位置的标准差和瞬时尾迹宽度(见图 2)。不同偏航角尾迹的相似性表明,将偏航风轮机的尾迹分解为流向尾迹和横向尾迹偏转是合理的,这对于开发低阶尾迹模型至关重要。模拟结果也显示跟随瞬时尾迹中心的平均尾迹宽度和平均流向速度低于空间固定坐标上的时间平均值。进一步,我们提出了关联两个坐标系上尾迹特征的解析表达式。该工作加深了对偏航风轮机尾迹湍流特性的理解,为开发基于物理的动态尾迹模型提供了理论基础。该工作集中于单一风轮机,将来工作将着重于风轮机阵列的尾迹机理和控制。

该论文得到了国家自然科学基金基础科学中心项目(基金号 11988102)的资助。论文链接: <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.495>。

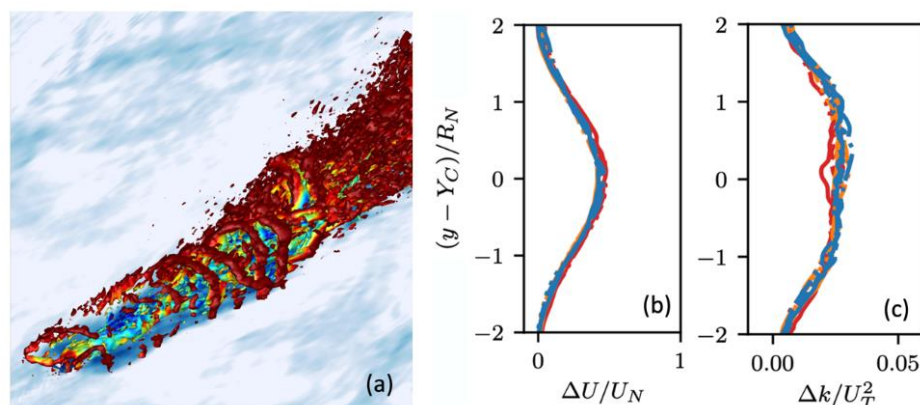


图 2: (a) 风力机偏航时的尾迹流动结构; (b) 不同偏航角风力机尾迹速度亏损对比; (c) 不同偏航角风力机尾迹湍动能增加对比。

3. 高超声速边界层湍流研究

近期,《Phys. Rev. Fluids》刊登了北京大学陈十一教授科研团队在高超声速边界层湍流方面的研究进展。论文题目为《等温壁面高超声速边界层湍流的可压缩性效应》(Compressibility effect in hypersonic boundary layer with isothermal wall condition)。

可压缩湍流广泛存在于各种工程问题和自然现象中,其中高超声速湍流边界层的流动机理因其在高超声速飞行器设计领域的重要指导意义而受到广泛关注。在此研究中, M8T1 为极低温壁面温度算例,而 M8T2 为弱低温壁面温度算例。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。同时,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。流向速度展现高速和低速条带结构,法向速度展现由上抛和下扫现象导致的斑点状结构。M8T1 的条带结构相比 M8T2 更长更厚,同时条带的展向间距也要更大,表明低温壁面增强流向条带结构的相关性。法向速度的斑点状结构在 M8T1 中更弱,表明低温壁面减弱了法向方向的流动混合。流向和法向速度的剪切分量占主导,与不可压边界层的结构相似,而其胀压分量展现了展向的波纹状结构从左向右传播。同时,研究发现低温壁面会增强正的流向剪切脉动速度和负的法向胀压脉动速度,而对流向胀压脉动速度和法向剪切脉动速度的影响很微弱。

从速度-温度的相关系数沿法向分布(见图3)可以发现,在近壁面区域,低温壁面可以增强正的流向速度-温度相关系数,并抑制负的法向速度-温度相关系数。速度-温度相关系数在近壁面区域主要由速度的胀压分量主导,在远离壁面的区域主要由速度的剪切分量主导。

以上研究获得国家自然科学基金基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”(基金号 11988102)资助。论文链接: DOI: 10.1103/PhysRevFluids.6.054609

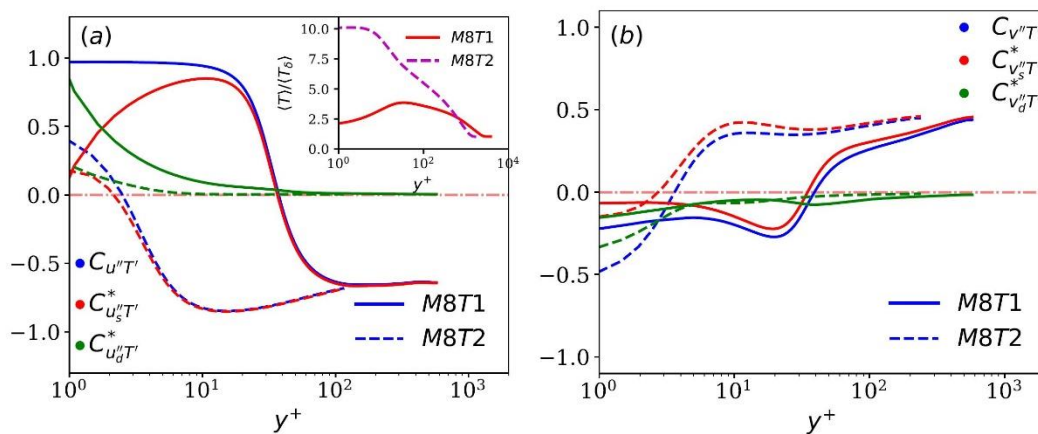


图 3:流向和法向脉动速度及其剪切和胀压分量与脉动温度的相关系数随法向的分布。

4. 高超声速边界层湍流的动能输运的研究

近期,《J. Fluid Mech.》刊登了北京大学陈十一教授科研团队在高超声速边界层湍流的动能输运方面的研究进展。论文题目为《壁面温度对高超声速边界层湍流的动能输运的影响》(Effect of wall temperature on the kinetic energy transfer in a hypersonic turbulent boundary layer)。

高超声速湍流边界层的流动机理在航空航天领域受到广泛关注。而高超声速湍流边界层的跨尺度间动能传输机理对可压缩湍流边界层的大涡模拟亚格子模型的构建有着指导意义,但目前却缺乏相关的研究。因此,研究壁面温度对高超声速边界层湍流的动能输运的影响对理解高超声速湍流边界层的跨尺度间动能传输机理和大涡模拟建模有着重要意义。

研究发现,低温壁面可以增强近壁处的压缩性,同时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。

图 4 显示了脉动亚格子能流传输项随速度散度的条件平均。可以发现,脉动动能的从大尺度向小尺度的正向传输主要集中在压缩区,而脉动动能的从小尺度向大尺度的逆向传输主要集中在膨胀区。

以上研究获得国家自然科学基金基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”(基金号 11988102) 资助。论文链接: doi:10.1017/jfm.2021.875。

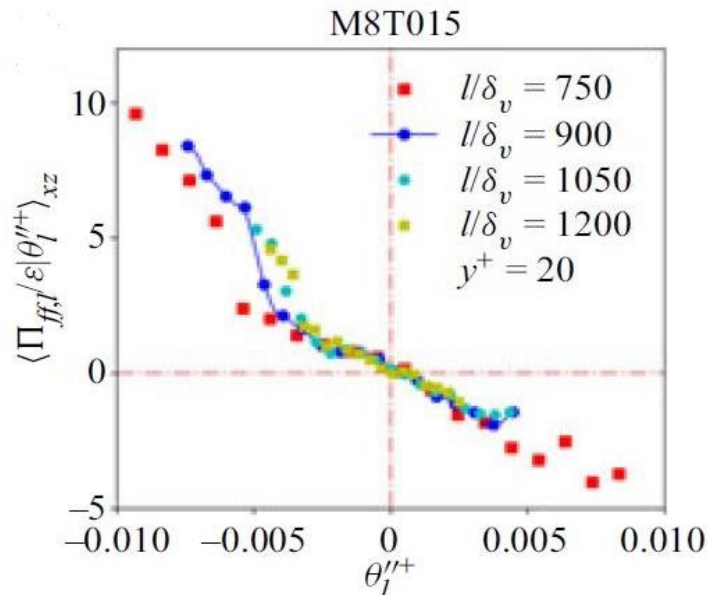


图 4:脉动亚格子能流传输项随速度散度的条件平均。

5. 粗糙壁湍流的约束大涡模拟研究

近期,《Phys. Rev. Fluids》和《Theor. Appl. Mech. Lett.》刊登了北京大学陈十一院士团队在粗糙壁湍流的约束大涡模拟方面取得的研究进展。

在工业和自然界的流动中,湍流经过的壁面往往并不光滑,并且粗糙的壁面会影响壁湍流的特性。开发适用于粗糙壁湍流的大涡模拟方法具有重要的研究意义。约束大涡方法是由陈十一院士团队原创的大涡模拟方法,旨在通过对亚网格应力添加物理约束,提高大涡模拟的准确性或者以较少的网格分辨率模拟较复杂的湍流流动。在此工作中,我们拓展了约束大涡方法,将其应用到了对复杂壁面流动的数值模拟中。首先,我们根据经典的 Nikuradse 粗糙圆管实验结果,对壁湍流混合长模型进行了粗糙度修正,用以提供合适的约束应力。然后将该应力添加到约束大涡模拟的框架中,对于常规的涡粘模式亚网格模型得到的亚网格应力进行约束。我们将该方法用于不同雷诺数和不同粗糙度表面流动的模拟,进行测试。结果表明,约束大涡方法中的应力约束能够很好地模拟粗糙带来的平均速度分布的向下偏移。进一步,我们统计了在约束大涡的应力约束条件下,湍流脉动对雷诺应力贡献的结果。根据以往的研究结果,粗糙壁面会导致湍流脉动对雷诺应力的贡献会以下扫现象为主。在靠近壁面具有应力约束的区域 ($y^+=17$),下扫现象(Q4)对雷诺应力的贡献相比光滑壁面的情况显著提高,而在远离壁面没有应力约束的位置上,上抛(Q2)、下扫(Q4)的贡献比例没有明显变化。这说明约束大涡方法所施加的平均应力约束成功达成了壁面粗糙对湍流脉动的影响。在此基础上,我们将约束大涡方法用到非均匀粗糙表面壁湍流的模拟中。如图5所示,非均匀约束的方法成功地模拟了内边界层的演化过程。

以上研究获得国家自然科学基金基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”(基金号 11988102)资助。论文链接: DOI: 10.1103/PhysRevFluids.6.044602、10.1016/j.taml.2021.100229。

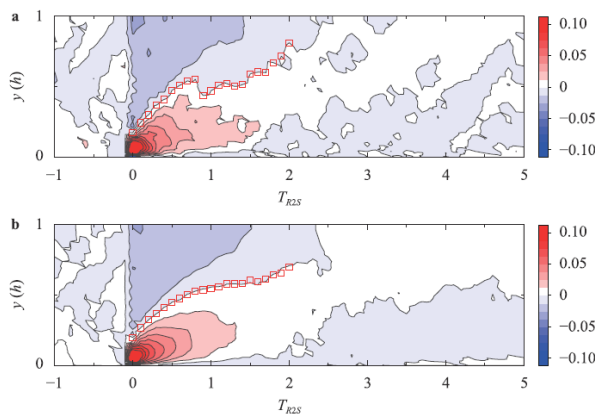


图 5: 非均匀粗糙表面局部速度的时间梯度云图。(a) 单次模拟结果。(b) 多次模拟平均结果。

6. 热对流大尺度结构的研究

近期,《J. Fluid Mech.》刊登了北京大学陈十一教授科研团队在热对流大尺度结构方面的研究进展。论文题目为《通过侧壁温度控制实现湍流 Rayleigh-Bénard 对流中大尺度环流稳定性的调控》(Stabilizing/destabilizing the large-scale circulation in turbulent Rayleigh-Bénard convection with sidewall temperature control)。

大尺度流动结构的反转现象在地球物理、天体物理等领域广泛存在,而 Rayleigh-Bénard 对流是研究反转现象的重要简化模型。传统的方腔 Rayleigh-Bénard 对流包含高温的等温下壁面、低温的等温上壁面、以及绝热的侧壁,在一定的瑞利数 (Ra) 和普朗特数 (Pr) 范围内呈现大尺度环流 (LSC) 的随机反转现象。此研究通过开展数值模拟和实验研究发现,在侧壁的某些位置令温度等于上下壁温的平均值,可以高效地抑制或促进 LSC 的反转。这对理解和控制自然界中大尺度流动结构的反转有重要意义。记 h_c 为控制点与方腔中心的相对高度,每个控制区域的宽度为方腔高度的 $1/20$ 。模拟得到 $Ra=10^8$ 、 $Pr=2$ 时二维 Rayleigh-Bénard 对流中角动量的时间序列,表明侧壁控制对二维系统中 LSC 的反转有显著影响,其中四点控制和 $h_c=0$ 的两点控制对两种 LSC 都起到稳定作用; $h_c>0$ 的两点控制只对顺时针 LSC 起到稳定作用。图 6 显示了实验和模拟得到的高 Ra 下 LSC 各状态的平均停留时间,表明实验和模拟得到的结果较为一致,而且进一步表明 $h_c>0$ 的两点控制倾向于使 LSC 保持顺时针状态。基于上述结果,从对称性角度分析,侧壁温度控制如果破坏了系统原有的镜像对称性,将使系统偏好特定方向的 LSC,降低另一方向 LSC 的稳定性;如果维持或增强了系统原有的镜像对称性,则无法预测该参数下的控制对 LSC 稳定性的影响,还需要对侧壁的羽流分离点展开具体分析。

以上研究获得国家自然科学基金基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”(基金号 11988102) 资助。论文链接: DOI: 10.1017/jfm.2021.58。

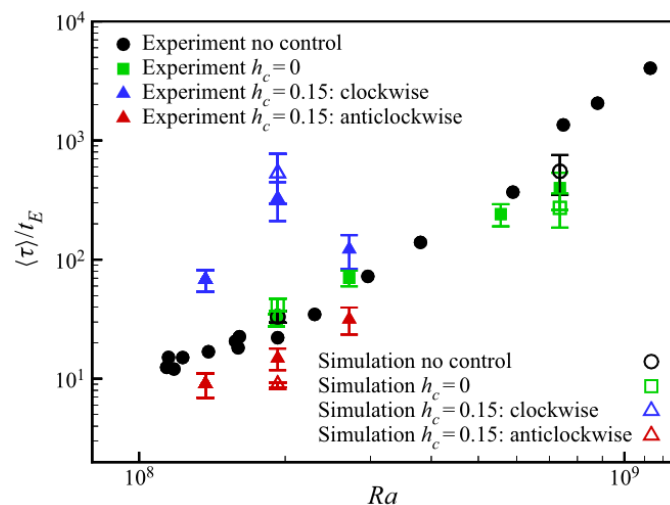


图 6: 实验和模拟得到的 $Ra>10^8$ 时 LSC 各状态在有控制和无控制时的平均停留时间比值。

7. 斜压流体的研究

近期,《J. Fluid Mech.》刊登了北京大学陈十一教授科研团队在斜压流体方面的研究进展。论文题目为《低马赫数流动中斜压矩的摄动分析》(Perturbation analysis of baroclinic torque in low-Mach-number flows)。

流体的浮力效应在地球物理、天体物理以及工业领域中广泛存在,但目前变密度流动中的浮力效应仍缺乏可靠的近似分析方法。此研究考虑到浮力效应的本质为斜压效应,基于 Navier-Stokes 方程的低马赫数极限(低马赫数方程),合理地定义了浮力项的误差,并推出斜压矩的摄动解,由此导出精确的级数型浮力项,最后分析了已知的各浮力项的误差以及参考系变换下的变换特性。

此研究首先指出,浮力项并不出现在原始的低马赫数方程中,只有在流体速度方程的压力项被近似为梯度项时才需要被引入,以弥补近似后涡量方程中斜压矩的缺失。因此,当浮力项的旋度等于原方程的斜压矩时,近似前后的流场方程将完全等价,该浮力项可认为是精确的;如果浮力项不满足该条件,其误差可定义为其旋度与原方程的斜压矩之差的 L2 模。

通过对压力方程的摄动分析,此研究将斜压矩用无穷多个泊松方程的解表示,并得到一系列精确浮力项表达式;再通过取极限的操作,得到前人提出的浮力项以及新提出的浮力项关于密度脉动量的相对误差收敛阶。分析表明,新提出的浮力项可以通过增加展开阶数达到任意的精度。图 7 展示了不同密度比下,低马赫数方程与带不同级数型浮力项的近似方程模拟得到的无量纲温度场,表明在密度比不大时,对应于经典 Boussinesq 近似的一阶级数型浮力项即可得到较为精确的流场;而在密度比较大时,需要更高阶的浮力项。

以上研究获得国家自然科学基金基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”(基金号 11988102) 资助。论文链接: DOI: 10.1017/jfm.2021.896。

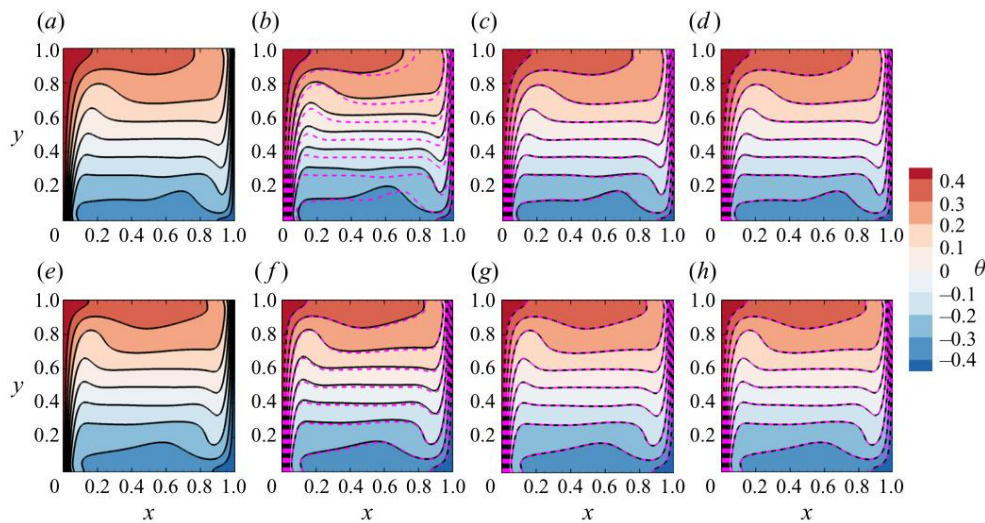


图 7: 无量纲温度场。(a,e) 低马赫数方程; (b,f) 一阶浮力项; (c,g) 二阶浮力项; (d,h) 三阶浮力项。(a-d)对应密度比为 4; (e-h)对应密度比为 1.43。

8. 可压缩湍流时间不可逆的拉格朗日研究

近期,《Phys. Fluids》刊登了北京大学陈十一教授科研团队肖左利等人关于可压缩湍流时间不可逆性的研究工作。论文题目为《不同惯性的粒子映射的可压缩湍流时间不可逆性研究》(On the time irreversibility of compressible turbulence reflected by particles of various inertias)。该工作基于朗格朗日观点,通过分析粒子运动的功率标度律探讨湍流不可逆特性的可压缩效应和粒子惯性效应。

湍流是远离平衡态系统的典范。湍流的非平衡不可逆特征在湍流非线性动力学中扮演着至关重要的角色。肖左利等人基于示踪粒子和惯性粒子的拉格朗日追踪,研究了湍流可压缩性对不可逆性质的影响规律和机理。可压缩湍流的不可逆性可以通过颗粒与流场中的涡结构和激波结构的相互作用过程加以解释。图 8 所示为高马赫数湍流 ($Mt=1.01$) 中不同惯性的粒子在涡结构附近运动 (a) 或穿过激波运动 (b) 时半个大涡翻转时间内的运动轨迹,并由各自的瞬时功率染色。可以发现,较小惯性粒子的轨迹在遇到这些流动结构时比较大惯性颗粒具有更大的曲率,原因是小惯性粒子更倾向于压缩区域或涡核位置。实际上,粒子的瞬时功率在涡旋主导区域和应变主导区域都倾向于为负值。从压缩性影响看,在强压缩区粒子更倾向于获得负功率。在强可压缩湍流中,激波的出现使得更多的湍动能转化为内能,从而加剧了湍流的不可逆性。在弱可压缩湍流中,对示踪粒子来说由“flight-crash”现象引起的湍流不可逆主要发生在涡旋主导区,而对惯性颗粒来说则主要发生在应变主导区。

以上研究获得国家自然科学基金基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”(基金号 11988102) 资助。论文链接: doi.org/10.1063/5.0041210。

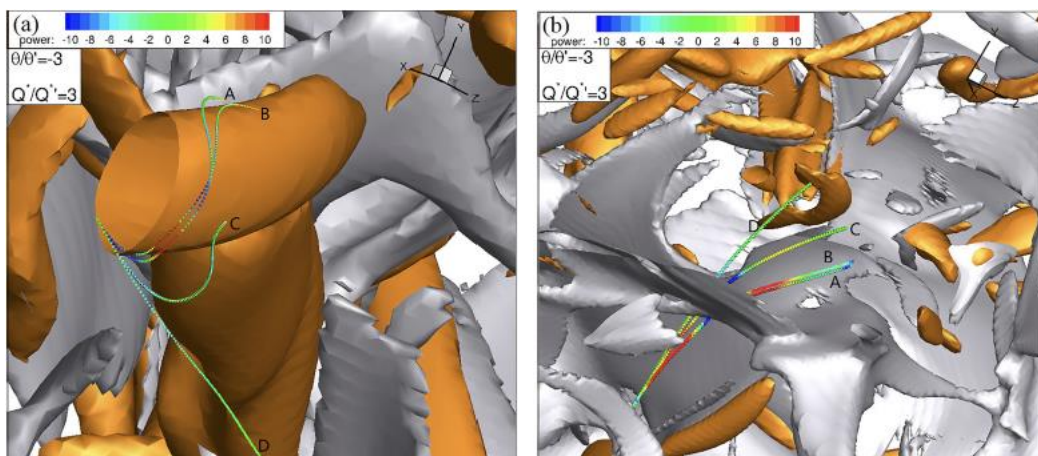


图 8: 湍流马赫数 $Mt=1.01$ 流场中不同惯性颗粒 (A:示踪粒子, B: $St=0.1$, C: $St=1.0$, D: $St=5.0$) 遇到涡结构 (a) 和激波结构 (b) 时的运动轨迹。所有颗粒的初始位置相同,每个颗粒的迹线由瞬时功率进行染色。

9. 半径比对超重力热湍流的影响研究

近期,《J. Fluid Mech.》刊登了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王东璞等人关于半径比对离心浮力驱动湍流热对流中的湍流结构和传热的影响的研究工作,论文的题目为《半径比对环形离心力瑞利伯纳德对流的影响》(Effects of radius ratio on annular centrifugal Rayleigh-Benard convection)。该工作探究了超重力热湍流在不同内外环曲率比条件下,纬向流的特征、热输运规律和非布斯涅斯克效应(non-Boussinesq effect)。

湍流热对流在许多自然现象和工业过程中广泛存在,如地球地幔和外地核中的对流、大气对流、海洋对流、旋转机械中的对流等,许多对流过程耦合了旋转效应的影响。下板加热上板冷却的瑞利伯纳德系统是研究热湍流的一个经典模型。为了提高浮力驱动强度,孙超课题组最近提出了通过高旋转产生的极端超重力驱动的热湍流研究的崭新方案,在该系统中发现了一种新奇的大尺度流动现象,即纬向流。纬向流与一些天体表面的沿纬度方向运动的大尺度波密切相关,也与航空发动机盘腔中的涡的周向进动等十分类似。王东璞等人推测该对称性破缺现象与内外环的曲率比及科里奥利力效应有关。

王东璞等人通过高时间和空间分辨率的三维直接数值模拟方法,对半径比0.3-0.9,瑞利数 10^6 - 10^8 高湍流强度范围内的流动和传热进行了系统的研究。首先,通过温度场发现,冷热羽流受科里奥利力作用发生偏转,偏转的轨迹近似为圆弧,在所研究的参数范围内,惯性力与科氏力平衡,得到轨迹圆的曲率半径与羽流运动速度成正比,再根据特征速度与超重力和相对温差的关系,得到了从外环脱体的热羽流的轨迹圆的曲率半径较小,并且随着半径比减小,热羽流相对冷羽流偏转程度增大,因此热羽流偏转撞击冷羽流的根部,推动大尺度环流相对旋转系统的正向进动,并且纬向流强度随着半径比减小而增强。

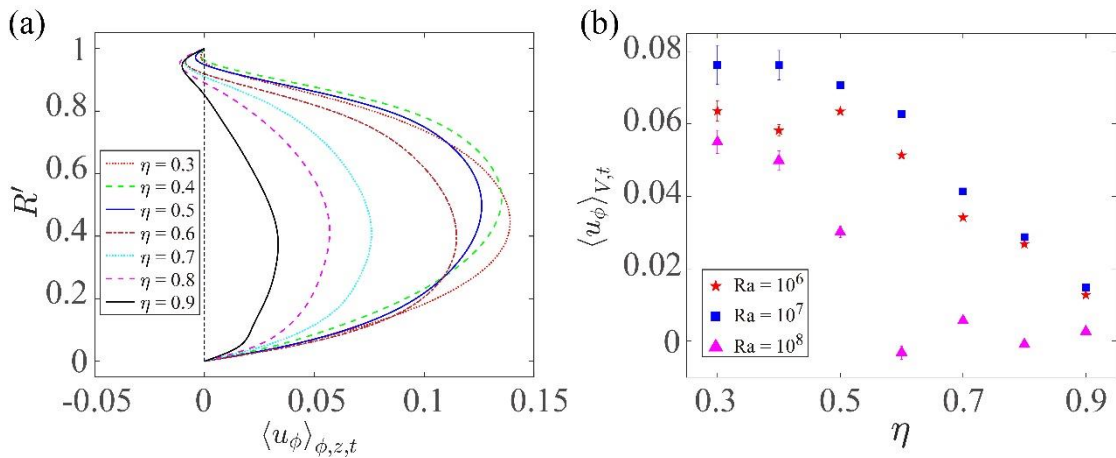


图 9: (a) $Ra = 10^7$, 不同半径比条件下的平均周向速度型; (b)不同浮力驱动强度 Ra 条件下, 时空平均的周向速度随半径比的变化。

通过改变半径比和瑞利数，并进行长时间统计分析，发现大尺度环流涡的进动频率随着半径比的减小而加快；并通过周向平均的周向速度定量地反映了冷热羽流偏转的不对性程度（图 9a），在不同 Ra 条件下都发现随着半径比减小，时空平均的周向速度增大（图 9b）。这些证据都说明内外环曲率不同，使得热羽流的偏转程度更大，偏转距离更长，撞击冷羽流进而形成了纬向流。研究还发现超重力系统中，大尺度环流涡的宽高比都大于 1，这可能是由于纬向流的作用，使涡在周向的尺度增大。随着 Ra 增加，涡逐渐趋近于宽高比 1 的情况，这是由于流动的湍流程度增强，更多的羽流从不稳定的边界层脱体，因此沿周向形成了更多的大尺度环流涡。

湍流传热一直是热对流研究的热点。在超重力系统中，发现随着半径比的增加，传热标度律指数先增加，当半径比大于 0.7 时逐渐趋于饱和(图 10)。通过计算反映浮力与剪切作用的比值的理查德森数随雷诺数的变化，得到了纬向流对传热的影响很小，推测传热随半径比的减小而降低可能与尺寸约束效应对羽流运动的影响有关。在经典 RB 系统中，由于物性参数随温度的变化，导致中心温度与平均温度存在偏差，称为非布斯涅斯克效应 (NOB 效应)。在超重力湍流系统中，发现了明显的温度非对称分布，这也是造成纬向流的一个重要原因，并通过理论建模和数值模拟，对该非对称分布做出了很好的预测，发现该非对称分布与超重力沿径向线性变化和曲率效应有关，还给出了内外边界层厚度比值的表达式。

该研究的结果有助于理解超重力热湍流系统中的湍流结构生成和演化及湍流传热规律，对于辅助优化设计新型实验腔体具有指导意义。纬向流形成机制的崭新解释对于改善理解天体物理和地球物理中的一些流动现象具有启发意义。通过超重力可以大幅增加体区温度，这一现象及精准的理论预测对于工业生产中的高速旋转机械中的流动和热控制方面具有借鉴意义。

以上研究获得国家自然科学基金基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”(基金号 11988102) 资助。论文链接：<https://doi.org/10.1017/jfm.2021.889>。

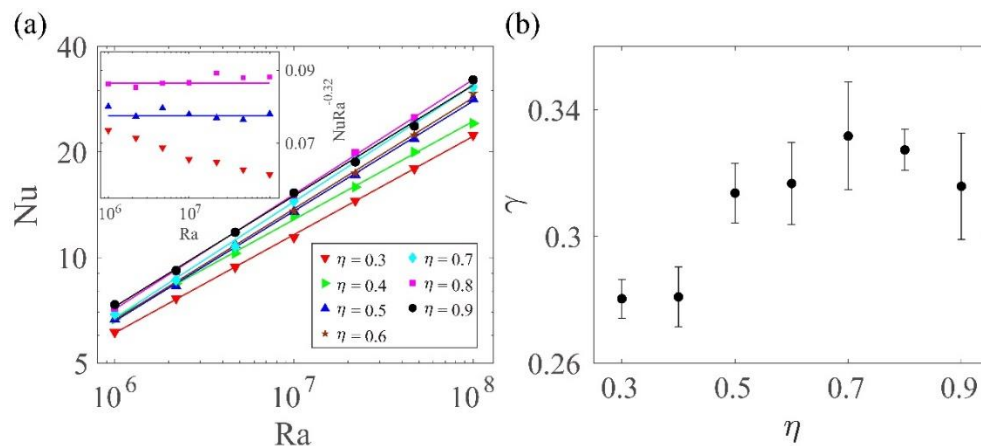


图 10: (a)不同半径比条件下，湍流传热效率 Nu 与 Ra 的标度律关系；(b)标度律指数随半径比的变化

10. 湍流流动和液体相变过程的耦合动力学

近期,《Phys. Rev. Fluids》杂志以快报(Letter)的形式刊登了清华大学孙超教授科研团队关于决定稳定态时冰水界面复杂形貌特征的物理原因的研究进展,论文题为“Ice front shaping by upward convective current”。

这项研究深入探索了影响冰水界面形貌的物理机制。研究发现:热浮力驱动力强度以及温度梯度和重力方向夹角是冰水界面形貌特征的主要决定因素,与传统的对流系统不同,在垂直对流系统中,系统内存在两个旋转方向相反的对流涡相互竞争,使得冰水界面发生相应于不同竞争关系下对流涡的形貌特征。这项研究重点对比了不同热浮力驱动强度下的固液界面形貌特征,同时系统地展示了冰形貌特征在不同梯度和重力方向夹角的条件下的演化特征。

为从定量角度揭示冰水界面形貌特征的决定因素,建立了两个物理模型,可以分别给出解释冰水界面的重要形貌特征的依据:1)通过建立边界层模型,可以预测冷羽流产生段冰的演化特征,主要建模理念为:通过观察流场的特征,发现冰附近存在向上发展的热边界层,因此在冰锋面附近的 $0-4^{\circ}\text{C}$ 温度等值线之间的流体可以分为热边界层区域和流动的主体区,同时在冷羽流产生及发展阶段冰锋面曲率较小,故平板边界层理论仍成立,当对流系统达到稳定状态时,冰内和边界层内为导热模式,存在热流守恒关系,即通过冷板边界的热流等于通过冰锋面的热流,由此可以得出相应的预测模型;2)通过建立浮力强度模型(见图 11),可以预测冰厚度的极大值点所对应的位置,主要建模理念为:冰存在最厚的位置是由于两个相反旋转的对流涡的相互竞争,对比两个对流涡的浮力强度的相对大小,可以得到相应的预测模型。

这项研究对于地球物理和气候科学领域的相变和湍流耦合下形貌特征的深入理解具有重要意义,尤其是在很多实际应用场景下,温度梯度的方向和重力方向存在一定的夹角情况下,复杂固液界面形貌特征的预测具有重要意义。以上研究获得国家自然科学基金基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”(基金号 11988102) 资助。论文链接:

<https://journals.aps.org/prfluids/abstract/10.1103/PhysRevFluids.6.L091501>。

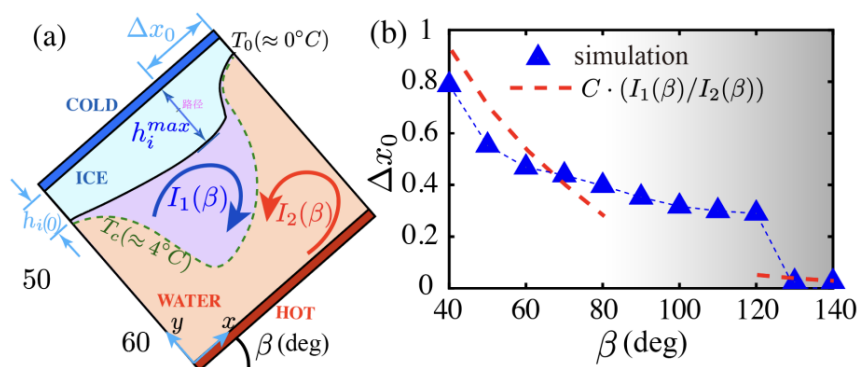


图 11: 浮力强度模型。(a) 浮力强度模型概念图; (b) 数值模拟和模型预测结果对比。

11. 金属玻璃的内禀非均匀性演化与材料力学性能的关联研究

近期,《Int. J. Mech. Sci.》和《J. Mech. Phys. Solids》报道了北京大学工学院力学与工程科学系韦小丁研究员课题组在金属玻璃内禀结构非均匀性多尺度分布特征的定量表征,以及非均匀性演化与宏观材料力学性能的关联关系方面研究进展。

课题组提出三维傅里叶分析的方法定量表征金属玻璃从原子尺度到纳米尺度等多个尺度上的结构非均匀性强度特征。研究发现金属玻璃在屈服后的均匀塑性变形能力与其在纳米尺度上的非均匀性强度具有显著的线性正相关特征。这项研究表明了调控金属玻璃在较大尺度上的非均匀性程度是抑止剪切带失稳、提升材料宏观塑性变形能力的有效手段。课题组进而基于热力学框架提出了能够描述金属玻璃内禀结构非均匀性演化的力-化学耦合连续介质模型,建立了微观结构演化与宏观塑性流动的关联。该模型成功模拟了金属玻璃在单轴拉伸以及简单剪切下的剪切带失稳和剪胀效应。进一步,课题组成功揭示了在低应力和高应力水平下金属玻璃蠕变行为的标度率转变起源于热能梯度驱动和应变能梯度驱动两种不同的原子扩散机制(见图 12)。在低应力情况下,非晶合金的蠕变伴随着原子沿着浓度梯度流动,材料趋于均匀;而在高应力下,非晶合金的蠕变伴随着原子沿着应变能梯度流动,材料的非均匀性逐渐加强直至失稳。新的连续介质本构理论有助于人们更加深刻的理解金属玻璃乃至非晶体系中的微观结构与宏观性能的关系。

以上研究获得国家自然科学基金基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”(基金号 11988102) 资助。论文链接:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740321003052>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002250962030435X>

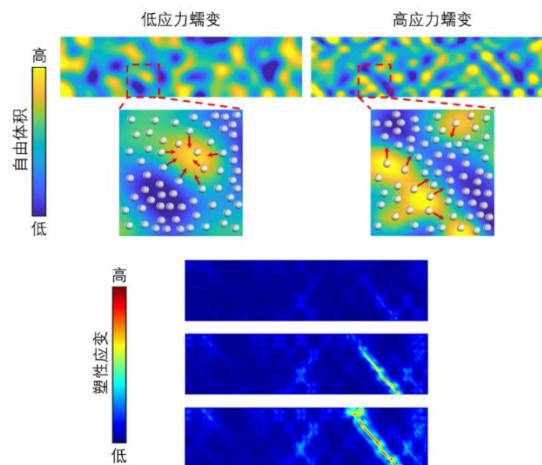


图 12: 上图,金属玻璃蠕变的两种微观粒子流动机制。低应力下原子由热能梯度驱动向自由体积更大(更松散)的区域迁移,高应力下原子由应变能梯度驱动向自由体积更小(更密实)的区域迁移从而促进剪切带的萌生。下图,单轴拉伸下主剪切带的萌生与发展。

12. 纳晶金属材料统一 Hall-Petch 和反 Hall-Petch 效应本构研究进展

近期, 北京大学工学院力学系易新特聘研究员课题组在《J. Mech. Phys. Solids》发表了题为“A unified mechanistic model for Hall–Petch and inverse Hall–Petch relations of nanocrystalline metals based on intragranular dislocation storage”的研究论文, 提出了晶内位错存储能力减弱导致纳晶金属材料发生尺寸软化的理论模型, 论文第一作者为北京大学力学系 18 级博士生韩泉峰。

纳晶金属材料具有“越小越强”的特点, 通常表现出 Hall-Petch (HP) 效应。但当纳晶金属材料的平均晶粒尺寸小于某一临界值后, 其屈服强度和硬度却会随着平均晶粒尺寸的减小而减小, 即所谓的反 HP 效应。相较于对 HP 效应的深入理解, 目前学术界对于反 HP 效应的形成机理仍未达成共识。

论文以晶内位错存储为基础, 提出了一种能统一描述纳晶金属材料 HP 效应和反 HP 效应的尺寸相关晶体塑性本构模型。该统一模型不仅成功描述了纳晶铜在单轴拉伸载荷下的 HP 和反 HP 行为, 指出晶内位错存储能力随晶粒尺寸减小而下降才是导致反 HP 效应产生的主要原因, 而且成功描述了极小晶粒尺寸下现有模型无法捕捉的扩展 HP 行为。进一步的分析表明, 纳晶金属材料在反 HP 阶段表现出的反常韧性增强现象是由于晶界和晶内的塑性变形在反 HP 阶段更加协调所导致, 因此通过调控晶粒尺寸小于 HP-反 HP 临界转变尺寸, 可以实现纳晶金属材料强度和韧性的共同提高。此外, 晶体塑性有限元模拟结果表明, 局部区域中存在的单个硬取向晶粒和成群的具有 Goss 织构的晶粒是导致局部剪切带形成的主要原因 (见图 13)。纳晶金属材料断裂时会形成具有数个晶粒尺寸大小的韧窝, 这些韧窝结构的形核即由上述局部剪切带结构导致。本研究不仅阐明了纳晶金属材料的晶内位错存储、晶界滑动和 HP/反 HP 行为之间的关系, 更为设计具有高强、高韧特性的纳晶金属材料提供了基础理论指导。

以上研究获得国家自然科学基金基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究” (基金号 11988102) 资助。论文链接:

<https://doi.org/10.1016/j.jmps.2021.104530>。

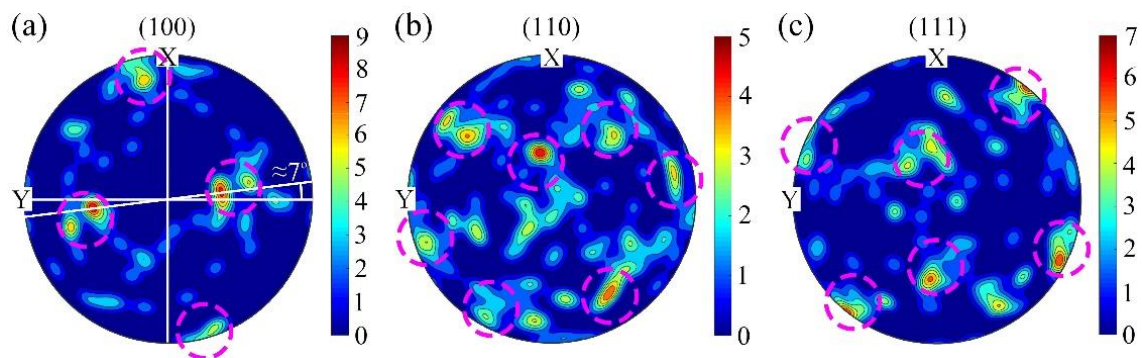


图 13: 形成剪切带的晶粒初始晶体取向(100)、(110)和(111)极图。该极图表明形成剪切带的初始晶体取向具有 Goss 织构特征。

13. 机器学习的本构建模与有限元联姻实现锂金属变形的精准刻画

近期, 国际力学权威期刊《J. Mech. Phys. Solids》刊登了中国科学院力学研究所魏宇杰研究员科研团队在构建数据驱动的材料本构模型及有限元结合方面的研究进展。论文题目是《物理机理驱动机器学习本构模型及其有限元集成方法准确刻画锂金属温度和率相关变形行为》。他们在国际上首次提出并实现了基于物理机理驱动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, 实现了它在不同温度和变形场景下的力学行为精准描述。

锂金属电极由于高的理论容量(3860 mAh/g)、低密度和低的电势(约-3.04 V), 是最理想的锂电池负极材料。准确地认识和表征锂金属负极温度、应力和率相关的变形行为是实现锂金属电池寿命和可靠性提升的关键。然而, 由于涉及到温度场、力场、率效应等多物理场多因素之间的相互作用, 以及非常有限的实验数据, 目前仍缺乏可靠的物理模型来描述锂金属温度-应力-率-变形行为。该团队通过将机器学习方法与物理机理相结合, 构建了一种新的数据驱动的本构模型。如图 14 所示, 该模型不仅能够精确地复现锂金属不同温度和应变率下的应力应变实验结果, 而且能够在更大的温度和应变率范围内, 实现锂金属温度-应力-率-变形行为的预测。同时, 该机器学习本构模型可以有效地和有限元计算方法联姻, 充分利用传统有限元计算在多物理场、复杂边界和变形系统的数值模拟优势。这一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。力学所助理研究员温济慈为第一作者, 北京信息科技大学邹庆荣为第二作者, 魏宇杰研究员为通讯作者。

以上研究获得国家自然科学基金基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”(基金号 11988102) 资助。论文链接:

<https://doi.org/10.1016/j.jmps.2021.104481>。

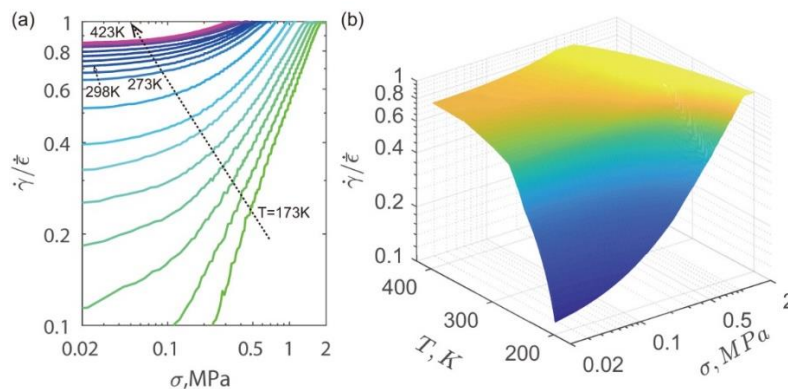


图 14: 物理驱动-机器学习本构模型预测锂金属不同温度、应力控制下的变形率, 包含了锂金属的全服役温度和服役载荷区间。

14. 偏折裂纹尖端弹性应力场的解析解

近期，国际力学权威期刊《J. Mech. Phys.Solids》刊登了中国科学院力学研究所魏宇杰研究员科研团队在偏折裂纹尖端应力场的求解方面的研究进展。论文题目是《偏折裂纹尖端弹性应力场的解析解》。

裂纹偏折是工程实践中无法避免的力学现象，是断裂力学经典问题之一。裂纹可能由于动态裂纹扩展、结构非均匀性、局部应力状态变化等因素导致偏折。裂纹偏折不仅在安全设计方面有很大指导意义，在能源开采领域的价值也在日益凸显，在飞速发展的水力压裂领域有着广阔的应用前景。

经过多年攻关，团队采用 Schwartz-Christoffel 变换 $z=\omega(\zeta)$ ，将复平面 z 上的偏折裂纹映射到复平面 ζ 上的单位圆上，使得边界值问题求解成为可能，进一步通过应用 Muskhelishvili 方法，求解获得了偏折裂纹的应力函数，以此为基础求解获得了任意几何尺寸的偏折裂纹尖端应力场，揭示了裂纹形状与裂纹应力场之间的关系（见图 15 理论与数值结果对照）。该小组的方法突破了偏折裂纹的长度限制，建立了任意长度偏折裂纹尖端应力场弹性解的通用求解方案。

以此为基础，可以相应地求解裂纹尖端的应力强度因子及应变能释放率，并以此建立了基于最大应变能释放率准则的偏折裂纹路径预测模型，该模型与有限元计算结果吻合良好。该方法同时可推广至多次裂纹偏折的弹性场求解。该研究成果为裂纹偏折行为和裂纹网络的形成机制提供了基础工具。

中科院力学所博士研究生刘卓尔为论文第一作者，魏宇杰研究员为论文通讯作者。以上研究获得国家自然科学基金基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”（基金号 11988102）资助。论文链接：

<https://doi.org/10.1016/j.jmps.2021.104619>。

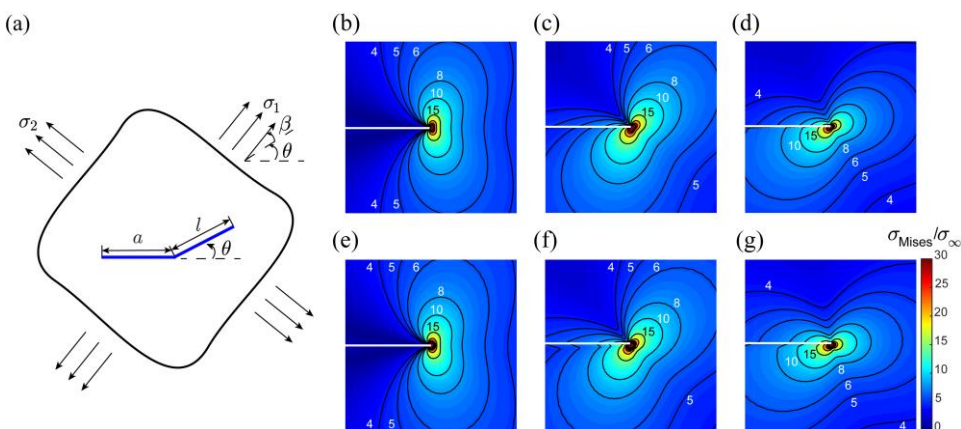


图 15: 二维裂纹偏折问题的几何及加载参数、经过 Schwartz-Christoffel 变换后两个复平面间的映射关系 (z 平面上的 z_1, z_2, h_1, h_2 点分别对应 ζ 平面上的 $\zeta_1, \zeta_2, \eta_1, \eta_2$ 点) 以及单轴加载下不同转折角 θ 对应的裂纹尖端应力场 (这里取 $l/a = 1$)。其中 (b)-(d) 为本研究给出的解析弹性场 von Mises 应力 (分别对应于 $\theta = 0, \pi/6, \pi/3$)，(e)-(g) 为对应的有限元计算结果；为便于观察，图片经过旋转使得偏折裂纹部分沿水平方向。

15. 二维材料中的纳米级褶皱实现其三维结构的高强度和高韧性

近期, 国际权威期刊《Nano Letters》刊登了中国科学院力学研究所魏宇杰研究员科研团队在偏折裂纹尖端应力场的求解方面的研究进展。论文题目是《二维材料中的纳米级褶皱实现其三维结构的高强度和高韧性》(Roughening for Strengthening and Toughening in Monolayer Carbon Based Composites)。研究团队通过原子尺度模拟和理论分析, 报道了高强度和高韧性的堆叠无定形碳基复合材料, 并揭示了纳米级褶皱产生的增强增韧这一反常规机制。

石墨烯等低维碳基材料具有极高的面内强度和杨氏模量, 但其三维堆叠结构难以继承这些优势且表现出极端脆性。我们通过原子尺度模拟和理论分析, 设计了基于二维无定形碳薄膜的堆叠结构(如图 3 所示), 与大多堆叠结构材料不同的是, 它们同时实现了高强度(\sim GPa)和类塑性的大变形。对变形过程分析发现, 大量初始缺陷引起的表面粗糙度和单原子层固有的面外柔性是其增强增韧的两个关键因素。在拉伸过程中, 表面大量的纳米级褶皱会带来不均匀的小尺度层间界面滑移, 从而导致剪应力的不均匀分布和类塑性变形, 避免了材料的突然失效。这些结论对其他类型的原子尺度薄膜材料具有普遍性, 为提高范德华异质结构的韧性, 有效避免灾难性失效提供了新的策略。

力学所博士研究生谢文慧为第一作者, 魏宇杰研究员为通讯作者。

以上研究获得国家自然科学基金基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”(基金号 11988102) 资助。论文链接:

<https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c01462>。

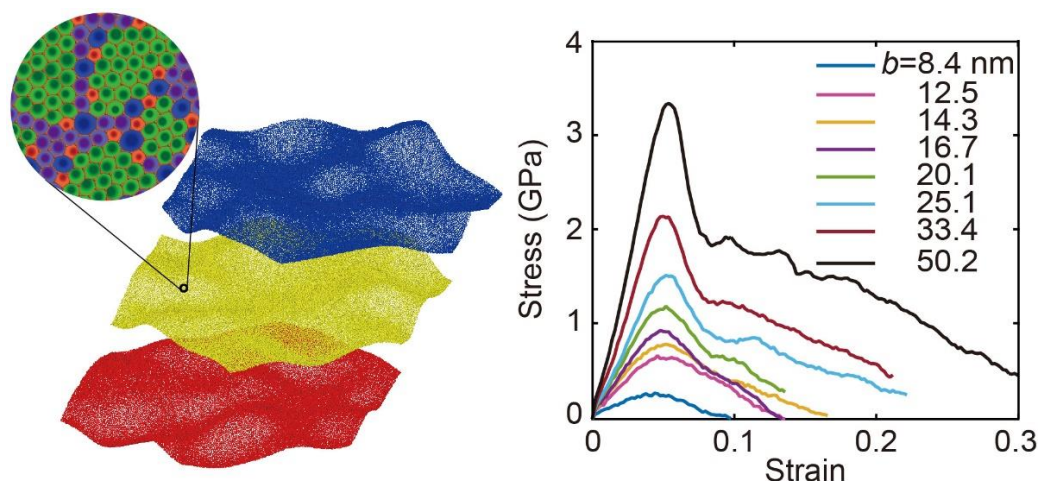


图 16: 二维无定形碳的三维堆叠, 由此产生的非晶碳基复合材料具有高强度 (\sim 3.5 GPa) 和良好的韧性。堆叠结构示意图和原子构型(左), 层中的纳米级褶皱是增强增韧源头; 堆叠片层尺寸 b 对复合材料力学性能的影响(右)。

二. 学术交流信息

1. 第三届复杂系统力学智能模拟与控制研讨会在中科院力学研究所顺利召开。

第三届复杂系统力学智能模拟与控制研讨会于 2021 年 9 月 3 日在中国科学院力学研究所顺利召开（图 17）。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。会议由“非线性力学的多尺度问题研究”基础科学中心主办。本次会议以线下和线上视频会议相结合的形式召开。会议得到学术界的广泛关注，来自国内外 500 余位专家学者和学生参加了线上会议和直播会议。

会议主席何国威院士首先向参会专家和学生致辞，感谢大家对会议的支持。他说，复杂系统力学智能模拟与控制突破了力学传统，是一个充满希望的新领域。希望会议能够提供一个机会，让专家和学者研讨该领域的问题，推动力学智能模拟和控制的发展。

会议以基于大数据的智能模拟和控制为主要研讨方向，同时涉及基础算法和平台建设等。来自北京大学、清华大学、哈尔滨工业大学（深圳）、西北工业大学、南京大学、武汉大学、重庆大学、中国科学院计算机与网络信息中心、中国科学院数学与系统科学研究院、新加坡国立大学、德国马普学会太阳系研究所、中国科学院力学研究所的 18 位专家学者就近期工作作了学术报告，内容涉及流动控制与减阻、湍流建模、量纲分析、强化学习方法及智能颗粒游动策略优化、融合物理模型的机器学习方法和固态本构关系构建等。人工智能领域和数学领域的专家报道了新的强化学习算法和高效的优化基础算法。中国科学院计算机与网络信息中心专家报道了人工智能计算和数据应用平台建设的最新进展。会议报告体现了很强的学科交叉特点。

会议执行主席魏宇杰研究员在会议最后总结了人工智能模拟与控制研究的发展态势，对人工智能如何促进力学学科发展提出了建议。智能模拟与控制是一门新兴学科，其发展势头日新月异，希望通过典型案例的研究带动力学学科的发展。



图 17: 第三届复杂系统力学智能模拟与控制线下与线上会议

2. 第一届北京国际力学中心与意大利国际力学中心离散多相流研讨会

第一届“北京国际力学中心与意大利国际力学中心离散多相流研讨会”于2021年3月2日至5日在线上成功举办。来自中国、意大利、法国、瑞典、西班牙、奥地利、德国、以色列、日本、波兰、荷兰、英国12个国家的多所大学、研究机构的专家学者70余人在线上ZOOM会议室参加了研讨会（见图18）。会议开放同步直播平台，吸引了全球23个国家1100余人次观看。

会议由北京国际力学中心（BICTAM）、意大利国际力学中心（CISM）、国际理论与应用力学联盟（IUTAM）、国家自然科学基金委员会、清华大学航天航空学院、中国科学院力学研究所“非线性力学的多尺度问题研究”基础科学中心和意大利乌迪内大学共同主办。会议主席由BICTAM主席、中国科学院院士李家春和CISM流体力学部主任、乌迪内大学教授Cristian Marchioli共同担任，孙超教授担任学术委员会联合主席。清华大学赵立豪教授和中科院力学所晋国栋研究员担任会议组委会共同主席。

会议特别邀请西安电子科技大学郑晓静院士、维也纳工业大学 Alfredo Soldati 教授、浙江大学林建忠教授、代尔夫特理工大学 Christian Poelma 教授、中国科学院大学倪明玖教授、图卢兹大学 Eric Climent 教授、清华大学徐海涛教授和亚琛工业大学 Wolfgang Schröder 教授共8位专家学者在大会上作了精彩的主旨报告。会议还安排了53个学术报告，其中国内学者25个、国外学者28个，内容涵盖湍流流动中颗粒、气泡、液滴的动力学，刚性及可变形颗粒悬浮两相流，非牛顿流多相流，液滴碰撞、聚集和破碎，以及相关实验和数值模拟方法的新进展等，不同国家的研究人员分享了他们优秀的科研成果。此次会议虽然是线上交流，但与参会人员参与积极性非常高，交流气氛十分活跃。



图 18: 北京国际力学中心与意大利国际力学中心离散多相流研讨会部分参会代表合影

3. 2022 年多尺度力学相关会议信息

(1) 第 15 届国际计算力学大会-日本横滨 2022

WCCM-APCOM (The 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) & the 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM-VIII)) 计划于 2022 年 7 月 31 日至 8 月 5 日在日本横滨举办。唐少强、袁子峰、唐山组织了 Computational Multiscale Method of Solids and Structures (编号 0321) 专题研讨会, <https://www.wccm2022.org/minisymposia0321.html>, 欢迎老师同学参加交流。研讨会主题包括但不限于: 多物理耦合问题的多尺度方法、含微观组分的本构模型、均匀化数学理论、直接和基于降阶模型的数值均匀化方法、基于机器学习和深度学习的数值均匀化、针对界面的计算方法、多尺度计算的其它问题。会议网址为 <https://www.wccm2022.org/index.html>。

(2) IUTAM 复杂流动和软物质的界面力学研讨会

国际理论与应用力学联盟(IUTAM, International Union of Theoretical and Applied Mechanics)举办的“复杂流动和软物质的界面力学”研讨会(IUTAM Symposium on Interface mechanics of complex flows and soft matter)将于 2022 年 6 月 29 日-7 月 2 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. Huiling Duan (段慧玲), 会议联合主席是 Prof. Chao Sun (孙超), IUTAM 学术委员会代表是 Prof. Gareth McKinley。会议网址为 <http://iutam2020.pku.edu.cn>。

4. 媒体报道:

孙超教授团队论文 “How the growth of ice depends on the fluid dynamics underneath”, PNAS, 118 (10) (2021)得到国外众多媒体介绍和报告。

(1) 标题: Breaking the ice on melting and freezing

媒体/网站: HealthMediciNet.com

媒体/网站所属地域: United States

发布日期: 23/11/20

链接: <http://healthmedicinet.com/breaking-the-ice-on-melting-and-freezing/>

(2) 标题: Breaking the ice on melting and freezing

媒体/网站: Innovations Report

媒体/网站所属地域: Germany

发布日期: 23/11/20

链接 <https://www.innovations-report.com/earth-sciences/breaking-the-ice-on-melting-and-freezing/>

(3) 标题: Breaking the ice on melting and freezing

媒体/网站: EurekAlert!

媒体/网站所属地域: United States

发布日期: 22/11/20

链接:

<http://ct.moreover.com/?a=43618465678&p=1gw&v=1&x=lwZswlRbp7AgFTdeeKNclA>

(4) 标题: Breaking the ice on melting and freezing

媒体/网站: Science Daily

媒体/网站所属地域: United States

发布日期: 22/11/20

链接::

<http://ct.moreover.com/?a=43619427281&p=1gw&v=1&x=dmpzmAjUdp2inIo-0pGcXQ>

(5) 标题: Breaking the ice on melting and freezing

媒体/网站: 7thSpace

媒体/网站所属地域: United States

发布日期: 22/11/20

链接::

<http://ct.moreover.com/?a=43618472868&p=1gw&v=1&x=PjP6ocxRqD3bFY5iW7H4kA>

(6) 标题: Breaking the ice on melting and freezing——A better understanding of iceberg melting and lake ice formation could provide new indicators of climate change.

媒体/网站: 美国物理协会流体力学分会 (APS Division of Fluid Dynamics)

媒体/网站所属地域: United States

发布日期: 22/11/20

链接: <https://aps.org/newsroom/vpr/dfd/2020/11-22-2020-05.cfm>

(7) 标题: How the growth of ice depends on the fluid dynamics underneath

媒体/网站: Phys.Org

媒体/网站所属地域: United States

发布日期: 22/11/20

链接: <https://phys.org/news/2021-03-growth-ice-fluid-dynamics.html>

三. 学术奖励

1. 何国威院士获第十二届“周培源力学奖”。

因对理解湍流的时空关联作出了重要贡献，何国威院士于 2021 年荣获第十二届周培源力学奖。

“周培源力学奖”是为奖励中国力学工作者的学术成就，加速力学科学的发展，促进中国现代化的建设，由周培源基金会于 1997 年设立。本奖旨在奖励国内、外力学研究工作中作出创造性成果或运用力学现有理论、方法解决重大关键问题等方面的中国力学工作者。“周培源力学奖”每两年评选一次，一般每次评选 1 人或 1 个项目。周培源基金会委托中国力学学会设立“周培源力学奖”评选委员会，负责初审后的评定工作，然后将评选结果报周培源基金会审批，由周培源基金会颁奖。

2. 孙超教授获第三届“科学探索奖”

2021 年 9 月，孙超教授以“极端条件下的湍流”获第三届“科学探索奖”。

“科学探索奖”是由腾讯基金会出资、科学家主导的公益性奖项，是目前国内金额最高的青年科技人才资助计划之一。奖项面向基础科学和前沿技术领域，每年遴选不超过 50 名获奖人，每位获奖人将在 5 年内获得总计 300 万元人民币的奖金，且可自由支配。“科学探索奖”于 2018 年设立。

3. 戴兰宏研究员团队获国家自然科学奖二等奖

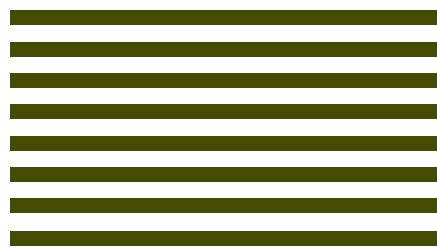
中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室戴兰宏研究员团队“考虑非均匀结构效应的金属材料剪切带”获得 2020 年度国家自然科学奖二等奖。

该成果针对具有非均匀结构的金属材料剪切带形成、演化及其工程应用开展深入研究，突破经典热塑剪切带理论框架，建立了考虑非均匀结构效应的剪切带新理论，全面揭示了剪切带的微/纳尺度结构效应，形成了具有鲜明特色的系统性的原创研究成果，得到国际力学领域 Timoshenko 奖、Hill 奖获得者在内的诸多知名学者广泛引用和高度评价，澄清了长期广泛的国际学术争议，推动了剪切带的科学认知和理论发展，并成功应用于新概念非晶合金梯度复合 Whipple 空间防护结构和高剪切自锐新型钨高熵合金的设计研发。

4. 段慧玲教授团队获国家自然科学奖二等奖

北京大学工学院段慧玲教授团队负责完成的“具有界面效应的复合材料细观力学研究”项目荣获 2020 年度国家自然科学奖二等奖。

本项目建立了具有界面效应的非经典 Eshelby 体系，发展了具有界面效应的复合材料细观力学理论框架。为连续介质力学的应用范围推广到小尺度提供了新的科学依据，为具有界面效应的复合材料广泛的力学行为提供了新的理论基础。



多尺度力学快讯

2021 年 | 第 2 期 | 总第 4 期 | 编辑人员: 何国威, 晋国栋

