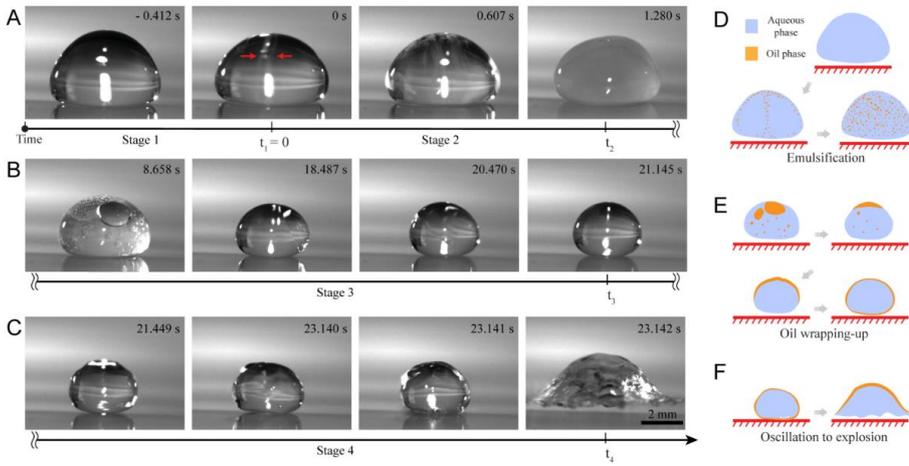


多尺度力学快讯

2021年 | 第1期 | 总第3期



多组分液滴在膜态沸腾状态下的蒸发动力学过程
(详见第3页, 孙超教授提供)



“非线性力学的多尺度问题研究”项目组
2021年6月5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20页)

多尺度力学

学术交流

何国威研究员应邀在美国物理学学会第73届流体力学年会作邀请报告
(详见第21页)

多尺度力学

年度会议

介绍基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”2020年度会议
(详见第22页)

一. 多尺度力学项目进展

1. 机器学习方法识别湍流/非湍流界面

近期,《Journal of Fluid Mechanics》刊登了中国科学院力学研究所何国威研究员科研团队在湍流/非湍流界面机器学习识别方面的研究进展。论文题目是《应用机器学习探测圆柱尾流中湍流区域》(Using machine learning to detect the turbulent region in flow past a circular cylinder)。

在自然界和工业界的流动中,存在大量湍流与非湍流共存的流动状态,找到湍流和非湍流的界面对发展计算模型至关重要,传统的湍流/非湍流界面识别通常基于湍流的某一特征(例如非定常性、具有不同尺度的涡等)选择对应的物理量(例如脉动能量、涡量幅值等)并指定相应阈值进行识别,这种方法的局限性在于特征量以及阈值的选择具有主观性,无法客观全面的反映湍流的特性。

研究团队提出使用极端梯度提升法(XGBoost)算法对圆柱尾流(图1上)中的湍流/非湍流界面进行识别。XGBoost方法可以同时处理多个输入变量,为了得到与坐标系无关的识别模型,我们选择流动变量中的不变量作为模型输入,经过一系列湍流输运方程的推导,我们选择了平均运动的应变率张量 \bar{S} 和涡张量 $\bar{\Omega}$ 、脉动应变率张量 S' 、脉动涡张量 Ω' 、以及这些张量的二次张量的所有非平凡不变量,再加上脉动速度能量 k 共计16个物理量作为输入变量进行模型训练。XGBoost方法属于机器学习中的监督学习方法,除了给出训练样本的输入变量外,还需要给出对应的流动状态,因此我们从流动状态已知的区域进行采样(图1下),训练完成后将模型用于全场,得到每一个离散点上的流动状态,从而得到湍流/非湍流界面(图2中的实线)。

和传统的湍流识别方法相比,机器学习方法体现出了以下两点优势:1)同时使用多个变量进行识别,2)不需要人工指定阈值,因此机器学习方法得到的湍流/非湍流界面更具有客观性。XGBoost方法除了能够给出界面位置,还可以给出所有输入变量的重要性,如果一个变量重要性高,说明该变量在湍流和非湍流中的值区别显著。图2给出了重要性最大的4个变量的云图,从上至下依次为脉动速度能量 k ,张量 $S' \cdot \Omega' + \Omega' \cdot S'$ 的第二不变量,张量 $S' \cdot S' + S' \cdot S'$ 的第三不变量,以及张量 $\bar{\Omega} \cdot S' + S' \cdot \bar{\Omega}$ 的第二不变量,其中 k 反映了湍流的非定常特性, $S' \cdot \Omega' + \Omega' \cdot S'$ 的第二不变量和 $\bar{\Omega} \cdot S' + S' \cdot \bar{\Omega}$ 的第二不变量反映了湍流中具有涡拉伸这一现象,而 $S' \cdot S' + S' \cdot S'$ 的第三不变量反映了湍流的三维特性,从图中还

可以看出如果单一使用其中某一个变量都可能造成误判，例如 $S' \cdot \Omega' + \Omega' \cdot S'$ 的第二不变量反映了涡拉伸效应，但是在非湍流分离区也存在涡拉伸，因此单独使用 $S' \cdot \Omega' + \Omega' \cdot S'$ 的第二不变量会造成该区域被误判为湍流区域。

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)的支持。论文链接：<https://doi.org/10.1017/jfm.2020.725>。

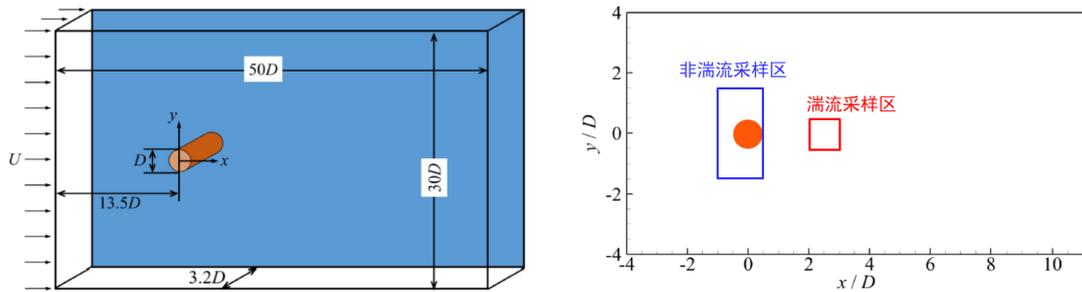


图 1. 使用机器学习进行圆柱尾流中湍流和非湍流界面识别所使用的数据和识别结果。左：数值模拟计算区域；右：监督学习使用的训练数据采样区域。

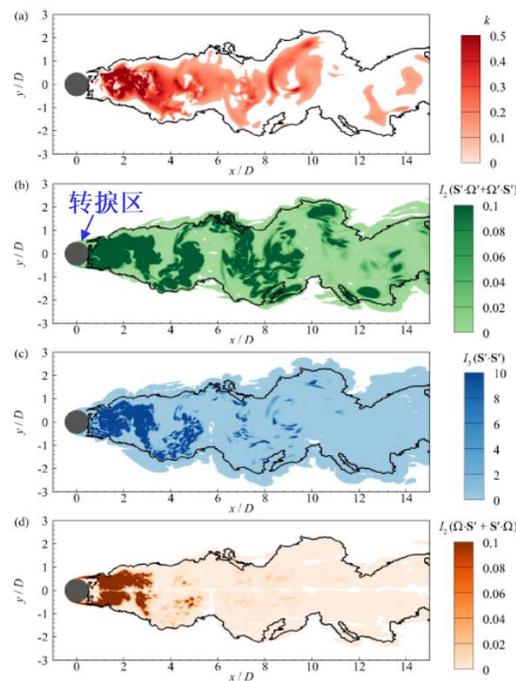


图 2. 使用机器学习得到的湍流与非湍流界面（实线）以及通过机器学习找到的区分湍流和非湍流的物理量，从上至下依次为脉动速度能量 k ，张量 $S' \cdot \Omega' + \Omega' \cdot S'$ 的第二不变量，张量 $S' \cdot S' + S' \cdot S'$ 的第三不变量，以及张量 $\bar{\Omega} \cdot S' + S' \cdot \bar{\Omega}$ 的第二不变量。

2. 膜态沸腾状态的多组分液滴蒸发动力学研究

近期,《Proceedings of the National Academy of Sciences》(美国国家科学院院刊)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吕思佳等人关于膜态沸腾状态的多组分液滴蒸发动力学的研究工作。论文的题目为《多组分莱顿弗罗斯特液滴的爆炸沸腾》(On explosive boiling of a multicomponent Leidenfrost drop)。该研究探究了多组分液滴在膜态沸腾状态下,液滴内部发生的丰富的流动和传热传质过程,包括混合液的相分离、相合并、相反转以及爆炸等物理过程。

由于多组分燃料液滴的汽化现象常见于各种与能源相关的技术中,因此该研究不仅有助于增强对多组分液滴在高温蒸发过程中各组分之间相互作用的认识,而液滴最终的自发爆炸也使得液滴能产生进一步雾化,生成大量小尺寸的液滴,这有利于在喷雾燃烧等领域中进一步增强燃料液滴的燃烧效率,降低污染排放。

在本次研究中,吕思佳等人发现并解释了由水、乙醇和反式茴香油这三种常见物质组成的多组分液滴(被称为“乌佐”)的独特爆炸汽化现象。整个蒸发过程如图3所示。由于三组分的挥发性和溶解性存在差异,因此随着液滴的不断蒸发,液滴内部的浓度比例发生改变,进而引起液滴内部产生相分离,析出大量微纳米级的油滴,这使得原本澄清的液滴开始变得浑浊。

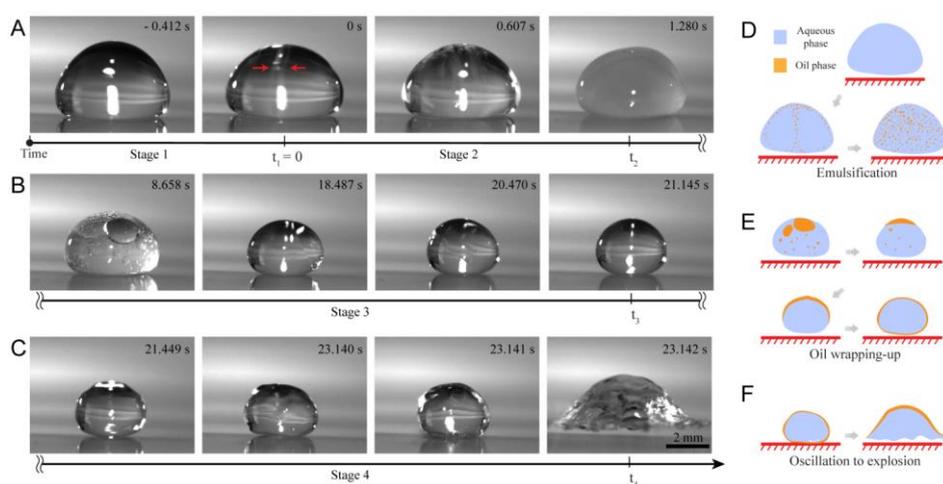


图 3. 多组分液滴在膜态沸腾状态下的蒸发动力学过程

吕思佳等人采用粒子图像测速法（PIV），通过实验测量了液滴内部的速度场信息，如图 4A 所示。并结合液滴内部的温度梯度和浓度梯度，以及液滴底部蒸汽层内的流动，从理论上解释了液滴内部的流动状态。由于膜态沸腾状态的液滴底部存在蒸汽层，因此液滴与壁面之间没有直接接触，分散的小油滴可以在内部流动的带动下自由移动，因此小油滴不断合并，最终聚集成一个大的油盖，附着在液滴的上部，此时液滴完成了相合并，形成了澄清的分离两相。

由于水-空气界面的表面张力大于油-水界面和油-空气界面的表面张力之和，因此上部的油相会在液滴表面上形成铺展，最终油膜完全包裹整个液滴，形成油包水的状态，整个液滴完成了从水包油到油包水的相反转过程。

由于油的挥发性较低，液滴的蒸发速率变小，无法在液滴和加热表面之间产生足够多的蒸汽，使用润滑近似模型分析液滴底部的蒸汽层厚度。发现油包裹液滴后，液滴底部蒸汽层厚度迅速降低，这使得液滴掉落并接触加热表面。接触点附近的温度超过油的沸点温度，远高于内部水相的沸点。因此内部的水会迅速汽化，在液滴内部形成蒸汽气泡，气泡的长大使得液滴形成爆炸，生成大量的次生小液滴，促进了液滴的雾化，如图 4B 所示。

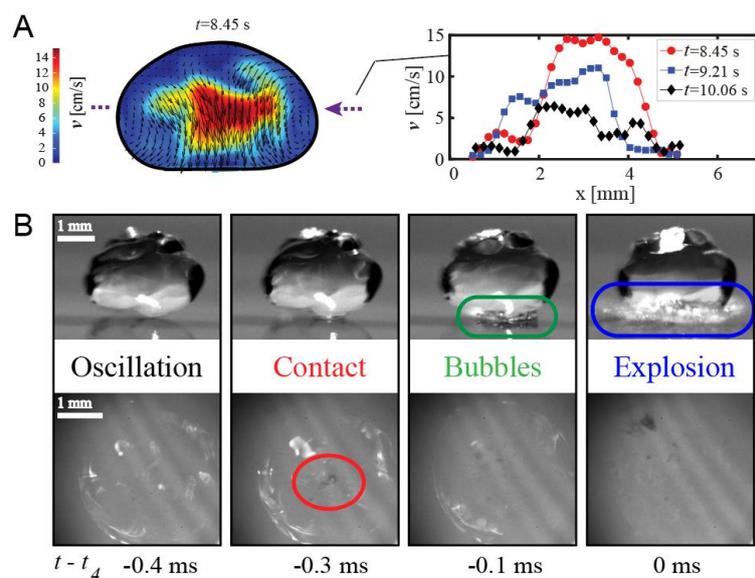


图 4. 液滴内部的速度场信息以及液滴最终自发爆炸的原因

通过对该多组分液滴的蒸发动力学进行了详细的实验和物理分析之后，他们给出了各组分在蒸发过程中所产生的不同作用，由于多组分液滴的成分和组成比例不断变化带来的复杂性，使其拥有了单组分液滴所不具备的许多特点。而日常生活和工业生产中的液体多为复杂的多组分体系，因此该研究更接近于实际的工业生产情况，对于日后研究无接触线影响的液滴反应器、微纳米液滴的析出和稳定、以及在高温下使用高沸点液体包裹低沸点液滴引发自发爆炸等多个研究领域均有指导和启发意义。

该论文的第一作者为清华大学能动系和燃烧能源中心 2016 级直博生吕思佳，孙超教授为通讯作者。论文合作者还包括加州大学圣巴巴拉分校的谭唤书博士（现任南方科技大学助理教授），清华大学能动系本科生若田雄辉和杨显军，普林斯顿大学的罗忠敬教授，以及荷兰特文特大学的 Detlef Lohse 教授。

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)的支持。论文链接：<https://www.pnas.org/content/118/2/e2016107118>。

3. 油水两组分两相湍流研究

近期，《Journal of Fluid Mechanics》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易磊等人关于油水两相湍流有效粘度与液滴统计特性的研究工作，论文的题目为《油水两组分两相湍流的流变特性与液滴统计特性》（Global and local statistics in turbulent emulsions）。该工作探究了油-乙醇水两相体系在剪切湍流条件下的宏观流变特性与微观液滴统计特性。

多相湍流是一类典型的流体物理系统，其中微观液滴结构与宏观流变特性具有显著的强耦合作用，这也使得该体系呈现复杂的动力学特性。此外，油水两相流动常见于包括石油开采、化工生产与食品加工等在内的多种工业过程中，并且其流动通常处于湍流状态，因此该研究不仅有助于增强对油水两相湍流系统流变特性与统计特性的科学认识，同时也具有湍流减阻、增强掺混等工业应用价值。

在该研究中，易磊等人通过利用一套 Taylor-Couette 剪切湍流装置，构建了稳定的油-乙醇水两相混合湍流体系，其中油相体积分数不高于 40%。在 1% 的低油相体积分数情况下，易磊等人通过高速摄像技术捕捉了湍流状态下的分散液滴，

并利用图像处理技术对分散液滴的直径进行了统计分析。如图 5(a)所示,在不同的雷诺数下,体系中液滴无量纲尺寸的概率密度分布可以通过对数正态分布函数来很好的描述,并且随着雷诺数的增加,分布的宽度逐渐变窄(对应于分布函数标准差 σ_0 减小)。这些结果表明,油水两相湍流体系中分散液滴的形成是由典型的破碎过程所主导的。

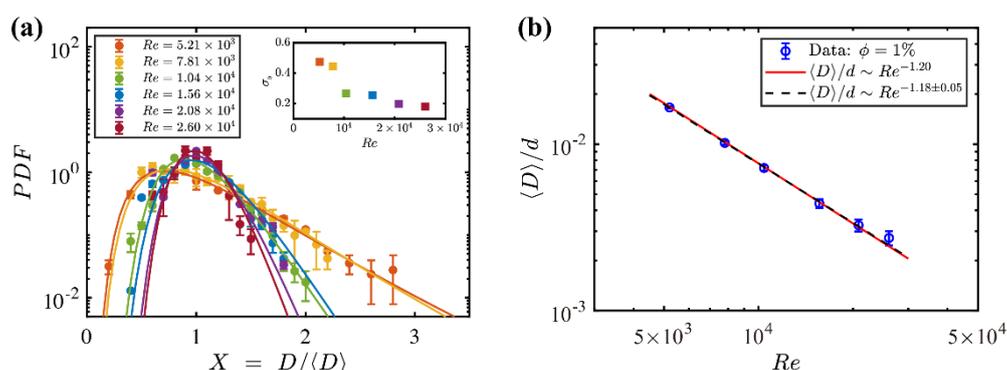


图 5. (a)油水两相湍流分散液滴尺寸分布; (b)液滴尺寸随雷诺数标度律关系

该研究进一步探究了油水两相湍流中液滴尺寸随雷诺数的依赖关系,如图 5(b)所示。实验发现,随着雷诺数的增加,分散液滴的平均尺寸显著减小。对实验数据的拟合结果表明,无量纲的平均液滴尺寸与雷诺数遵循-1.18 的标度律关系。基于体相区能量耗散率的进一步分析发现,这个-1.18 标度率关系与经典的 Kolmogorov-Hinze 理论推导得到的-1.2 标度律指数高度吻合。因此,我们推测 Taylor-Couette 油水两相湍流中液滴尺寸随雷诺数的依赖关系可能与体相区能量耗散率相关。

随着油相体积分数逐渐增加,分散相的存在对油水两相湍流的总体流变特性开始产生影响。通过采用一个新的有效粘度的计算方法,易磊等人得到了不同剪切速率下油水两相湍流体系的有效粘度随油相体积分数的变化情况,如图 6 (a) 所示。结果表明,随着油相体积分数的增加,体系的有效粘度显著增大,这一规律与固体球形颗粒的悬浮液体系类似。同时,研究还表明,随着剪切速率的增加,油水两相湍流体系的有效粘度逐渐减小,即存在剪切稀化效应,如图 6 (b) 所示。进一步的分析发现,以上的剪切稀化效应可以通过 Herschel-Bulkley 非牛顿流体模型来有效地描述,模型拟合得到的流动指数随油相体积分数的增加而减小,这也表明体系剪切稀化的效应随油相体积分数增加而更加明显。

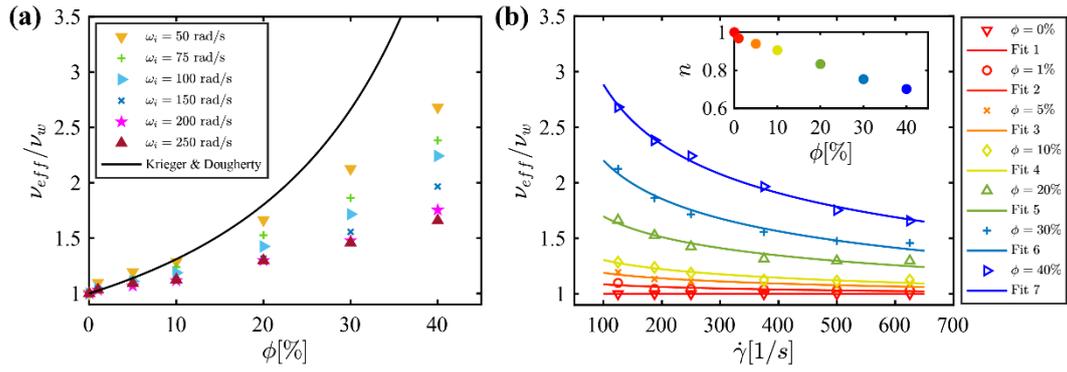


图 6. (a) 有效粘度随油相体积分数变化；(b) 剪切稀化效应

该实验研究的结果有助于将单相湍流与低雷诺数多相流动的理论拓展到多相湍流体系。同时，由于多相湍流体系在工业中的广泛存在，该研究得到的平均液滴尺寸随雷诺数的标度律关系有助于实现液滴尺寸的调控，而两相和两组分湍流中剪切稀化效应的发现则具有潜在的湍流减阻应用前景。

该论文的第一作者为清华大学能动系和燃烧能源中心 2018 级直博生易磊，孙超教授为通讯作者，论文合作者为荷兰埃因霍芬理工大学的 Federico Toschi 教授。

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)的支持。论文链接：<https://doi.org/10.1017/jfm.2020.1118>。

4. 移动固-液相变界面演化与湍流动力学耦合研究

近期,《Proceedings of the National Academy of Sciences》(美国国家科学院院刊)刊登了清华大学能源与动力工程系和燃烧能源中心孙超老师课题组王子奇等人关于移动固-液相变界面演化与周围湍流动力学耦合问题的研究工作,论文的题目为《流体的动力学特性如何影响冰的生长过程》(How the growth of ice depends on the fluid dynamics underneath)。

水体中的凝固、融化等相变过程与湍流热对流的复杂流动过程相结合,对塑造地球上的地形、地貌等景观方面发挥着重要作用,常见的诸如冰川、冰山的形成及演化、冬季里冻湖的形成等。准确量化水体环境与冰的形成或融化过程动态相互作用以及正确预测冰演化的动力学特性有助于深入理解海洋、地球物理等系统中的相变与湍流的耦合效应。前人的研究揭示了结冰过程的复杂性,但是常常忽略水的一个重要特性:密度反转,即水的密度在密度反转温度点(大气压下约 4°C)时达到最大值,温度降低或升高,都会引起密度的降低。这种密度随温度非线性变化特性会导致稳定分层(在一定温度梯度下,密度随深度增加而增加)和不稳定分层(在一定温度梯度下,密度随深度增加而减小,进而产生浮力驱动力,水体发生对流运动)共存。不同程度的热分层作用、湍流热对流和固液相变三者相互耦合给移动固-液相变界面演化问题的研究带来巨大的挑战。

为研究水的凝固过程和不同程度的热分层特性以及湍流热对流的动力学耦合,王子奇等人搭建了可控的高精度热对流系统固-液相变实验台;同时为保证数值模拟可以精确复现实验结果,他们对直接数值模拟方法进行了完善,即考虑水的密度反转所导致的热稳定层和不稳定层相互作用,同时在冰水界面考虑相变潜热影响的 Stefan 边界条件以及为准确恢复能量方程中的扩散项而考虑冰、水不同热物性所带来的源项。通过实验,直接数值模拟,和理论建模相结合的手段,首次较为全面地揭示热分层以及湍流耦合作用下的冰演化问题。

本研究首先从观测系统稳态的全局冰厚度入手,建立稳态理论模型,并与实验结果和模拟结果进行对比。研究发现,考虑水密度反转的理论模型(图 7 (C) 蓝色实线)可以对相变-湍流耦合系统的行为进行可靠的预测;但是当理论模型忽略密度反转特性,模型预测结果(图 7 (C) 紫色实线)和真实的冰厚度呈现巨大的偏差。这说明涉及到结冰问题时,由于温度范围包含水的密度最大值所对

应温度，密度反转对正确预测系统行为至关重要。为进一步解释这一现象背后的物理机制，研究人员对结冰过程的动力学特性进行观测。

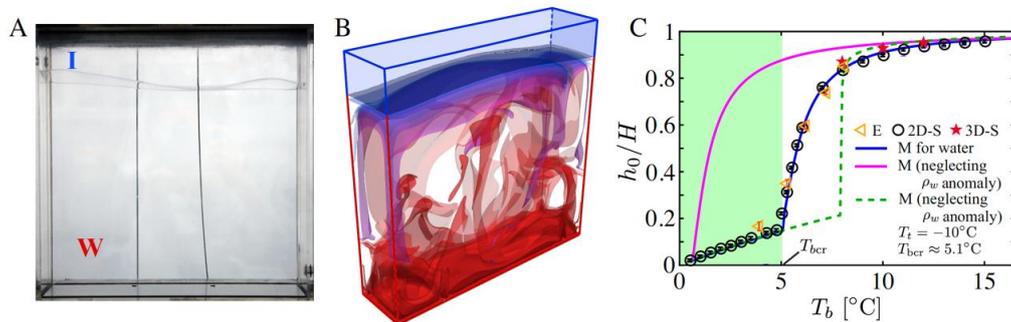


图 7. 相变-湍流耦合系统稳定状态的冰-水界面位置：A. 实验结果；B. 模拟 8 可视化结果；C. 实验、模拟和理论建模结果对比。

随着热驱动力强度的增加，系统内存在四种不同的传热与流动耦合机制。以 4°C 为分界，当热边界温度低于 4°C ，系统从初始到最终稳定，液体内部始终处于稳定分层的纯导热状态，此时液体内部温度剖面为线性变化（图 8（A））；热边界温度稍高于 4°C 时，系统从初始的对流状态，最终稳定到纯导热状态，最终 4°C 等温线以及冰-水界面均保持平直的状态（图 8（B））；当热边界温度提高，结冰过程中液体层内部始终存在对流， 4°C 等温线发生变形，但是由于冰锋面附近仍存在稳定层的保护，冰-水界面仍保持平直的状态（图 8（C））；热边界温度进一步升高，此时不稳定分层的流动强度足以穿透稳定分层而影响到冰-水界面的形貌，系统最终稳定到强对流状态（图 8（D））。

尽管冰面和流体之间存在复杂的相互作用运动，平均冰厚度和增长率可以被考虑水密度反转特性的瞬态理论模型进行捕捉。冰生长初期，冰内导热主导，水层内的流动影响较小，观察到冰厚度呈现扩散增长的规律（冰厚度 $\sim t^{0.5}$ ）；冰生长后期，水内对流运动为主导，冰厚度偏离扩散增长规律。系统的热驱动力强度对结冰时间影响较大，在研究的参数范围内，结冰时间在几个小时到几天的范围变化。

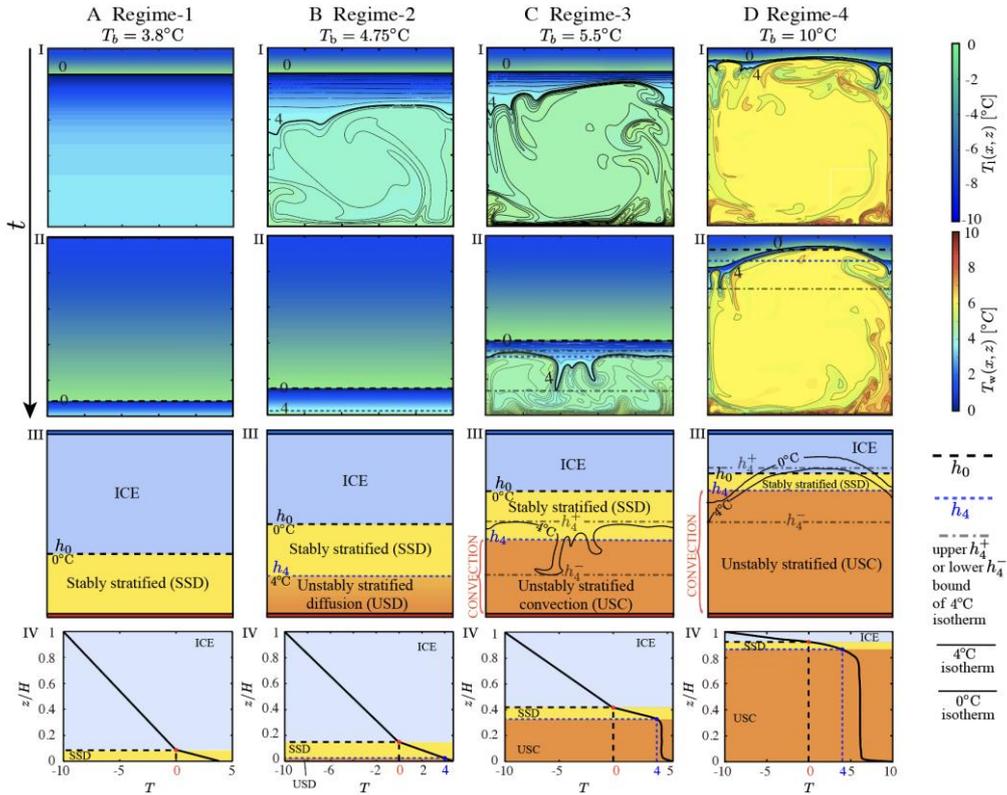


图 8. 四种不同的传热与流动耦合机制

这项研究所揭示的物理机制，当应用于湖冰的地质记录时，可以提供更加准确的气候变化指标。当前的研究为对流和凝固过程之间的耦合动力学提供了更深刻的思路和见解，同时有助于理解地球物理内部结构和演化以及天体物理等的相关问题。当前的工作仅在有限参数空间方面发现了冰水动力学丰富可能性的冰山一角，这是一个开始，待探索的是冰、水之中更广阔的世界。

2017 级直博生王子奇为该论文第一作者，孙超教授为通讯作者。论文合作者还包括法国里尔科技大学 Enrico Calzavarini 教授和荷兰埃因霍温科技大学的 Federico Toschi 教授。

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)的支持。论文链接：<https://doi.org/10.1073/pnas.2012870118>。

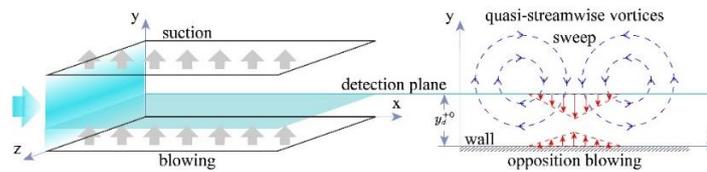
5. 反向控制吹气方案的湍流减阻特性及其深度学习实现

近期，北京大学工学院段慧玲教授以通讯作者身份在《AIP Advances》发表了题为“反向控制吹气方案的湍流减阻特性及其深度学习实现”的文章。

反向控制是一种典型的闭环控制减阻方案，通过在壁面上施加与探测平面内法向速度方向相反的吹气或吸气速度，可以对抗近壁区的速度脉动，达到减阻的目的。相比于同时考虑吹气和吸气的反向控制，仅考虑吹气过程的反向控制方案（简称反向控制吹气）可以显著增强减阻效果。然而，在反向控制方案的实际应用过程中，很难直接在探测平面内布置传感器以获取速度信息。因此，通常利用壁面上的切应力信息来预测探测平面内的速度分布。针对反向控制吹气减阻方案，该论文基于直接数值模拟方法，研究了在固定吹气质量流量条件下壁面吹气速度分布对减阻的影响，并采用深度学习算法来实现利用壁面信息预测探测平面信息的过程。具体而言，发现了减阻效果与吹气速度在反向控制吹气位置的分布几乎无关，简化了控制方案，并从统计的角度考察了流向和展向涡量与法向速度之间的关联，证实了分别以壁面切应力和探测平面法向速度方向作为卷积神经网络（CNN）模型输入和输出特征量的合理性。在此基础上，对训练得到的 CNN 模型开展了先验和后验测试，验证了模型的有效性，并将 CNN 模型应用于比训练集具有更高雷诺数的流动情况，扩展了 CNN 模型的适用性（图 9）。该论文有助于认识固定吹气分数条件下吹气减阻（包括反向控制吹气）的性质，为反向控制吹气方案的实际应用提供有效指导。

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）的支持。论文链接：<https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/5.0042740>。

(a)



(b)

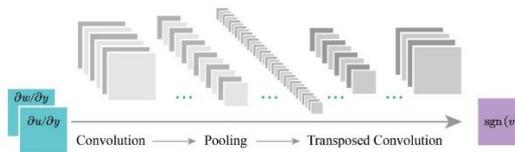


图 9. (a) 反向控制吹气方案示意图， y_d^+ 代表探测平面；(b) 壁面上的流向和展向切应力被同时作为 CNN 模型的输入特征量来预测探测平面内法向速度脉动的方向。

6. 数值均匀化方法研究进展

北京大学力学系唐少强教授研究组在《Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering》上发表了题为“虚拟聚类分析方法中参考材料强度的自适应选择”的研究论文，第一作者是该组的博士生朱熙同学。

数值均匀化是材料多尺度计算的重要方面，目的在于通过数值计算得到基于微观单元（如代表性体积单元）组成成分与结构的平均应力-应变关系，提供给宏观计算以实现准确的力学模拟。注意到给定平均应力（或应变）并不足以确定唯一的微观力学响应，在很大程度上还要看加载方式，人们通常采用周期边界条件。

该课题组之前提出虚拟聚类分析方法，通过聚类大大降低自由度和计算复杂度，再通过对与控制方程等价的积分方程离散化得到准确的代数系统，该积分方程涉及一个均匀线弹性参考材料。本研究发现，加载取决于参考材料的模量；对于弹性夹杂问题，微观单元的平均响应基本上不受参考材料的影响；但对于更复杂的问题，如弹塑性本构，加载方式会严重影响均匀化结果。进一步分析表明，参考材料的泊松比基本不影响加载，杨氏模量则起到举足轻重的作用。在此基础上，该文提出了恰当杨氏模量的判据，并给出了一个自适应选择恰当杨氏模量的数值方案。对于两种不同本构的弹塑性夹杂算例，通过与应力边界条件下的有限元数值模拟比较，验证了上述判据和自适应选择方案是有效的。该论文工作为进一步开展高效准确的数值均匀化和多尺度模拟提供了基础。

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）的支持。论文链接：

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782520308069>。

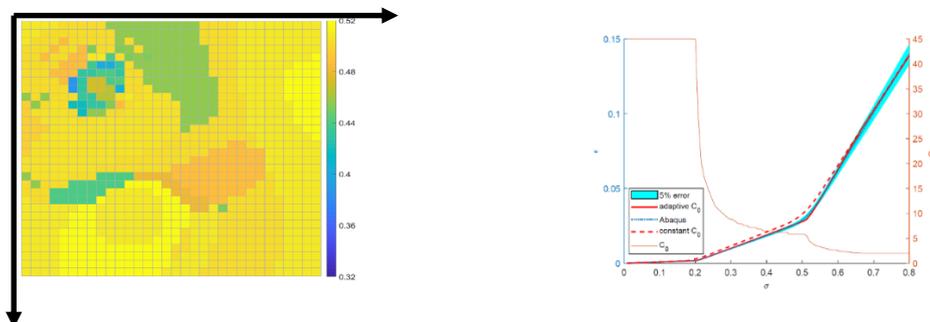


图 10. 左图显示了夹杂问题在一个表面上的应力分布，它并不是均匀的；右图显示了采用本文方案得到的数值均匀化结果，以及加载过程中自动选择的参考材料杨氏模量。

7. 金属玻璃的疲劳极限与裂纹扩展研究进展

近期，中科院力学所魏宇杰研究员团队在《国际疲劳》(International Journal of Fatigue)发表了题为“Fatigue Endurance Limit and Crack Front Evolution in Metallic Glass”的研究文章，揭示了非晶圆轴试件球形缺陷几何特征与疲劳裂纹诱发及扩展的关联关系。

非晶金属，也叫金属玻璃，是通过把特定组份的熔融合金快速凝固的方法得到的一种新型合金材料。金属玻璃由金属元素的组份，以类似玻璃的非晶结构构成，具有优异的力学性质（如 Vit1 金属非晶，断裂强度 $\approx 2\text{GPa}$ ，弹性极限 $\approx 2\%$ ，断裂韧性 $\approx 55\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）。金属非晶各向同性临界尺寸约为 100nm 量级，比常规多晶材料低三个数量级。因此金属非晶是理想的线弹性固体力学模型材料，具有大的弹性极限，又具有高强的韧性，便于加工便于分析力学性能与微观结构之间的关系。

本工作利用金属非晶的优良性质，结合超声疲劳和常规疲劳测试方法，把金属非晶的疲劳寿命研究拓展至 10^9 量级，发现金属非晶存在明显的疲劳极限；并通过疲劳残余强度的测试验证了该疲劳极限（图 11）。金属非晶中的疲劳裂纹诱发源绝大部分为理想球形孔洞，数值计算分析表面：可以利用球形孔洞的尺寸和位置计算其裂纹诱发韧性 K_0 。发现金属非晶的疲劳裂纹前沿为典型的椭圆弧形，并且其扩展演变遵从一定的规律，可以通过断裂时的扩展前沿估算材料的断裂韧性（图 12）。

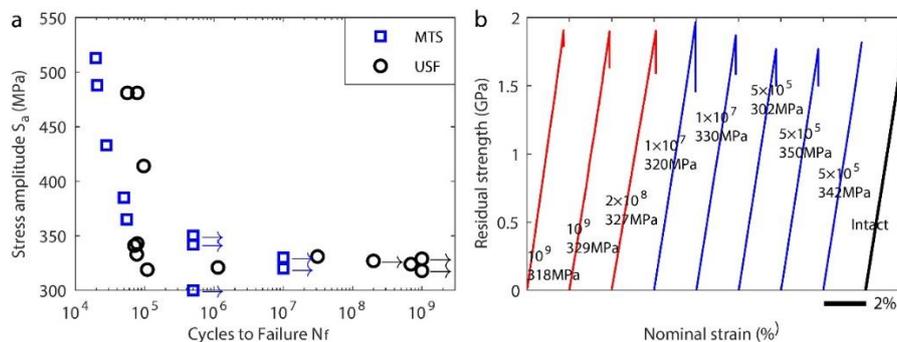


图 11: 金属非晶 Vitreloy 1 的疲劳特性：(a) 的 S-N 曲线，包括超声疲劳测试和常规疲劳测试。(b) 样品一定数量的循环载荷后的应力-应变曲线。

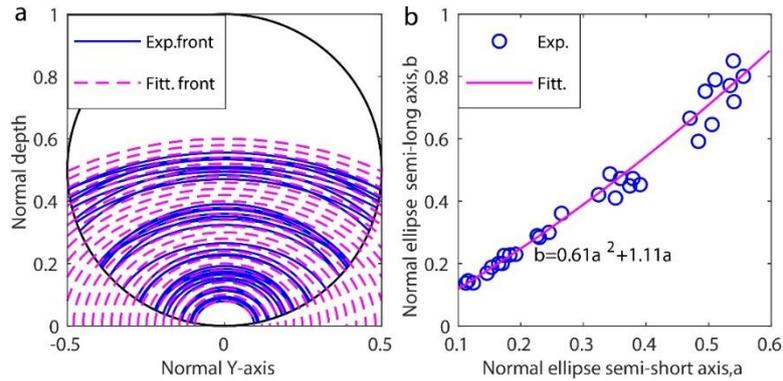


图 12: 金属非晶 Vitreloy 1 中疲劳断裂的裂纹前沿特征。(a) 实验 (蓝色实线) 和二次拟合 (红色虚线) 的裂纹前沿。(b) 疲劳裂纹扩展过程中椭圆前沿的短轴和长轴的相关特征。

该研究为探索疲劳裂纹萌生与材料微结构及缺陷之间的关系提供实验支撑；为探索裂纹萌生后的扩展规律提供实验支撑。对高铁车轴等轴杆类工程试件的疲劳寿命分析及剩余寿命评估提供指导。

该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”基础科学中心项目 (Grants NO. 11988102 和 NO. 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/pii/S0142112320305363>

8. 高速列车关键结构线路载荷谱特性研究进展

近期,中科院力学所魏宇杰研究员团队在《国际疲劳》(International Journal of Fatigue)发表了题为“A segmented load spectrum model for high-speed trains and its inflection stress as an indicator for line quality”的研究文章,揭示了高速列车转向架结构线路载荷谱的分段特性及其与线路质量的内在联系。

作为高速列车系统的主要承载构件,转向架结构的损伤状态由结构在服役过程中所承受的真实载荷谱决定,它将直接关系到列车运行的稳定性和安全性。理想情况下,人们希望获取转向架结构在全寿命周期内的载荷谱数据,以便对其进行准确的损伤和疲劳寿命估计。然而,由于开展全寿命周期监测的成本高昂,人们通常利用有限的试验数据来描述载荷谱,并将其扩展到全寿命周期。因此,在有限试验数据条件下准确掌握载荷谱特性并提高其表征精度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 CRH 380A 型高速动车组为试验平台,在京沪线、京广线、京太线和京成线(图 13a)上开展了为期 1 年多的线路试验,线路涵盖了无砟(300 km/h)和有砟(200 km/h)两种轨道类型。通过分析转向架结构疲劳关键位置的线路应力谱,该团队发现随着分级级数的增加,不同运行线路、轨道类型和运行速度下的应力谱在对数坐标下均呈现出显著的分段特征,并提出了一种分段 Weibull 分布模型来描述该分段特征。与现有模型相比,分段 Weibull 分布模型可以有效地捕捉应力谱的分段特征(图 13b),具有更高的表征精度,且简单易用。更为重要的是,分段 Weibull 分布模型中的拐点应力可以被用作评价无砟轨道线路质量好坏的一个参数化指标,即线路条件越好,拐点应力越小,拐点应力的分散性越小,对应的单位损伤也越小(图 14)。该研究对于深入理解高速列车关键结构线路载荷谱特性具有重要意义,同时也有利于关键结构线路载荷谱特性与线路条件之间内在联系的研究。

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”基础科学中心项目(Grants NO. 11988102),国家重点研发计划项目(2017YFB0202800)、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/pii/S0142112321000815>。

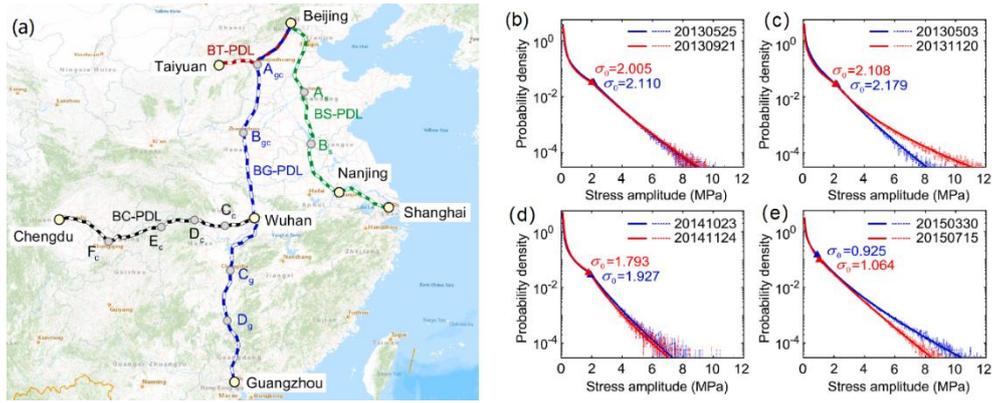


图 13. (a) 试验线路分布示意图，包括京沪线（BS-PDL）、京广线（BG-PDL）、京太线（BT-PDL）和京成线（BC-PDL）。(b)至(e)分别为京广线、京太线、京沪线和京成线上试验获得的转向架应力谱（虚线）与分段 Weibull 分布模型拟合的应力谱（实线）的对比。

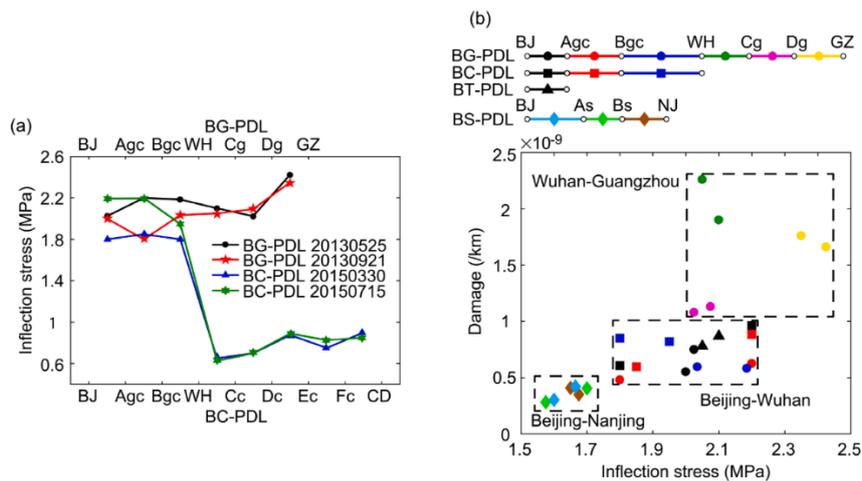


图 14. 线路条件对分段 Weibull 分布模型中拐点应力的影响：(a) 不同线路分区区间拐点应力分布。其中，京广线大部分为无砟轨道，京成线的北京至武汉段与京广线共线，武汉至成都段大部分为有砟轨道。由图可知，无砟轨道上的转向架关键位置应力谱的拐点应力明显大于有砟轨道上的拐点应力。(b) 不同无砟轨道线路区间上获得的线路应力谱的拐点应力与对应的每公里损伤的相关性：线路条件越好，拐点应力越小，相应的每公里损伤也越小。

9. 呼吸道飞沫传播的流体力学机制

近期,《Physics of 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呼吸道飞沫传播的流体力学机制的研究进展,报道了咳嗽气流和飞沫的运动规律。

呼吸道飞沫是病毒传播的重要途径。携带病毒的飞沫在咳嗽产生的高速气流作用下能传播数米之远。研究咳嗽气流对飞沫的影响对于理解病毒传播机理和制定疾病防控策略具有重要的实际意义。我们采用多种流体力学实验手段,例如流动显示技术、粒子图像测速技术以及粒子图像追踪技术等,研究了咳嗽气流和飞沫的运动规律。实验结果表明:气流对流速度随时间呈 $t^{-0.7}$ 衰减;飞沫的平均速度约为6米/秒。结合飞沫蒸发的理论模型,本研究进一步阐明了蒸发效应对飞沫运动的影响:当飞沫直径小于100微米或者直径大于500微米且出口速度大于5米/秒时,飞沫的传播距离将超过2米(图15)。本研究还探讨了气候变化对飞沫传播的影响。该工作对理解呼吸道飞沫传播的流体力学机制具有重要意义。

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”基础科学中心项目(基金号11988102)的支持。论文链接:DOI: 10.1063/5.0033849。

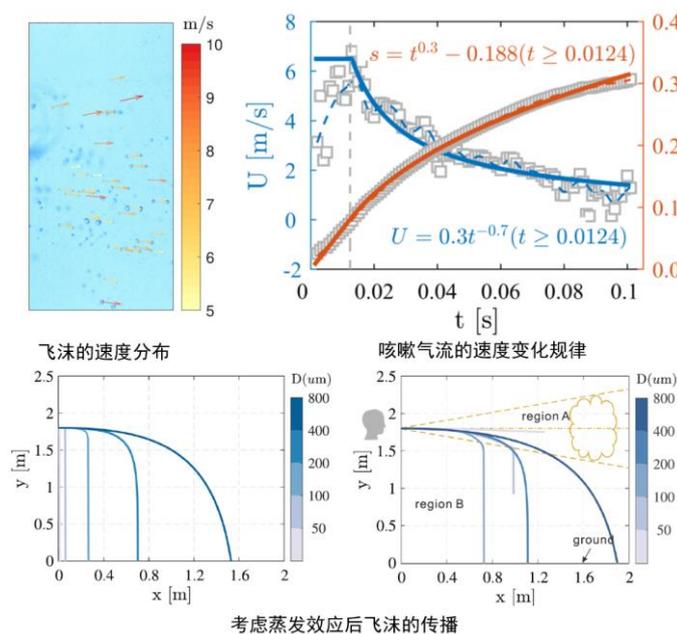


图 15. 咳嗽气流和飞沫的运动规律

10. 呼吸道飞沫在行人尾流中传播模式的研究

近期,《Physics of Fluids》杂志以快报的形式刊发了中科院力学所何国威研究员科研团队关于“呼吸道飞沫在行人尾流中传播模式”的研究进展。

呼吸道飞沫是新型冠状病毒肺炎(COVID-19)等呼吸道传染病的主要传播途径之一。病毒飞沫经咳嗽等方式从患者的呼吸道排出后,将受到环境流动的影响,表现出不同的传播模式,最终决定其影响范围。因此,研究环境流动对呼吸道飞沫的影响对于理解新冠病毒传播机理和制定防控策略具有重要的实际意义。以往的研究多围绕通风方式的影响展开探讨,缺少对于行人运动影响的关注。

该团队使用数值模拟方法,研究了咳嗽产生的飞沫在行人尾流中的传播规律,重点关注了走廊宽度和楼梯坡度的影响。在无坡度的情况下,飞沫弥散受到行走速度和走廊宽度的影响,表现出两种模态(如图 16)。第一种模态下,飞沫云团远离患者;第二种模态下,病毒飞沫因受到患者躯干后方回流区域的影响,分布在患者后方的较长区域内。在两种模态下,飞沫均易于在患者腰部高度处悬浮,提示儿童可能面临更高的感染风险。当有坡度时,飞沫在上、下行的行人尾流中的传播模态同样存在两种迥异的垂向传播模态(如图 17)。在行人上行时,其尾流中存在下洗速度,能够促进飞沫的沉降,进而缩短影响范围;当下行时,尾流中则存在上洗速度,使得飞沫的沉降减缓,最终增大其感染区域。

以上研究就新冠病毒的日常防护向公众提出两点建议:

(1) 在有人群走动的室内公众场所,尤其是狭窄的走廊,2米的安全社交距离不再适用,人群不密集的情况下也应该带好口罩做好个人防护;儿童需要与成人保持更大的社交距离。

(2) 当前的社交安全距离并不适用于坡道。在下行时,2米社交安全距离并不充足,需要尽量远离前方行人才能降低感染风险。

上述工作发表后被 50 余家媒体报道(包括路透社、Science Daily、U.S. News 等)。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力学研究”(No. 11988102)资助。论文链接: DOI: 10.1063/5.0034874。

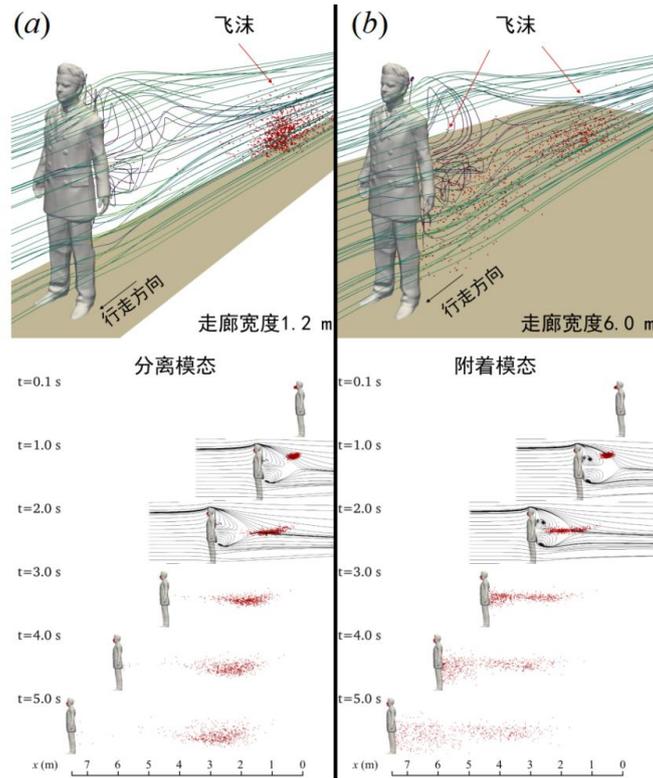


图 16. 咳嗽飞沫在行人尾流中的两种传播模式：(a) 窄走廊时发生的分离模式；
(b) 宽走廊时发生的附着模式。

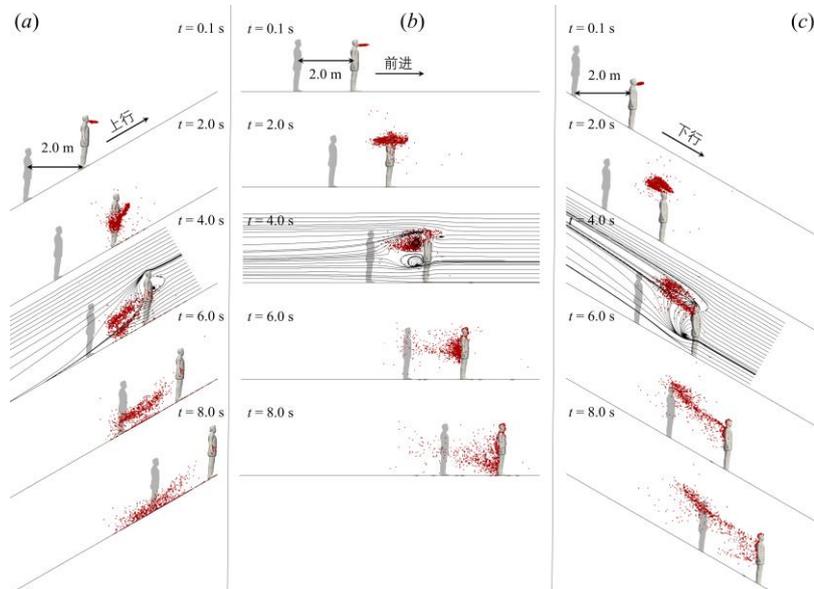


图 17. 坡度对于咳嗽飞沫在行人尾流中传播的影响：(a) 沿坡面上行时，尾流中的下洗速度促进了飞沫的沉降；
(b) 无坡度前进时，飞沫悬浮在行人腰部附近；
(c) 沿坡面下行时，尾流中的上洗速度阻碍了飞沫沉降。

11. 采用人工神经网络改进 PIV 近壁流场预测

近期,《Physics of 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利用神经网络修正 PIV 近壁测量结果的研究进展。

粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术能够得到流场的二维或三维速度分布,是实验流体力学中定量测量复杂流场的重要手段。但是受实验条件和算法本身的限制,PIV 具有空间分辨率低、近壁流场测量误差大等缺点,这些缺点限制了 PIV 在评估湍流耗散率、壁面切应力等方面的应用。特别是在近壁测量中,由于巨大的速度梯度,导致 PIV 测量数据基本不可用。本研究构建了超分辨率神经网络用于学习湍流特征,并应用于 PIV 近壁湍流场。该网络能够从低雷诺数湍流数据中预测高雷诺数湍流的近壁特性,从而修正 PIV 近壁测量结果,提高 PIV 流场的分辨率(图 18)。该工作将机器学习与实验数据处理相结合,能够提高近壁流场测量的精度和分辨率。

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(Grants No. 11988102)的支持。论文链接:

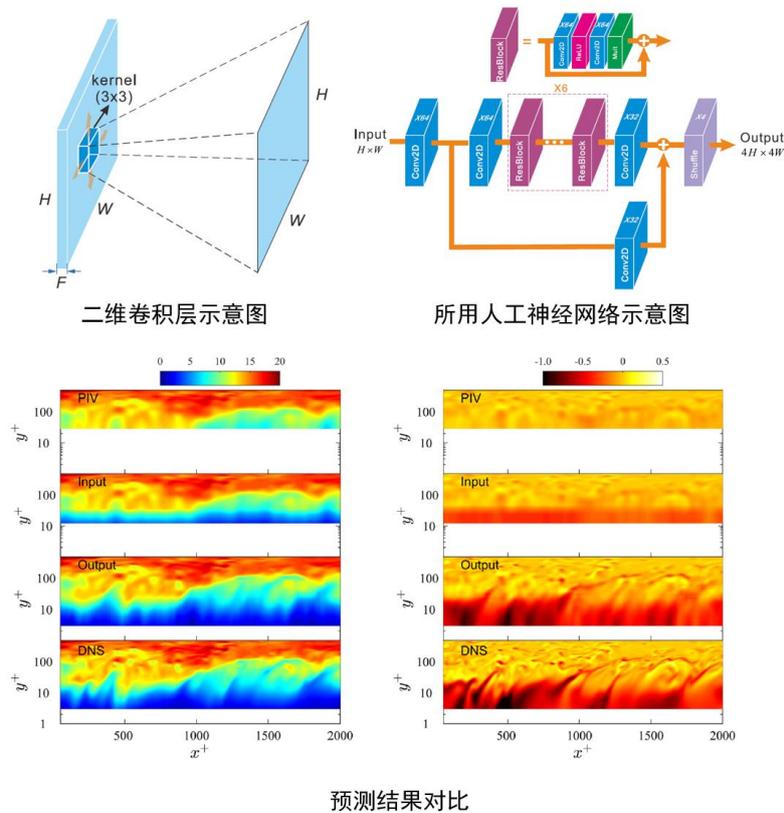


图 18. 采用人工神经网络改进 PIV 近壁流场预测

二. 学术交流

2020年11月22日，中国科学院力学研究所何国威研究员应邀在美国物理学会第73届流体力学年会作题为“湍流的时空能谱”的邀请报告。何国威研究员系统介绍了湍流时空能谱的EA模型及其最新研究进展。课题组发展的动态自回归动力学模型可以准确地再现时空能谱的一阶和二阶矩，DAR模型与线性随机估计相结合，可产生壁面模型中缺少的近壁面湍流脉动速度。

该研究得到国家自然科学基金委“非线性力学的多尺度问题研究”基础科学中心项目 (Grants No. 11988102) 的支持。

美国物理学会流体力学年会开始于1947年，至今已举办73届，是目前规模最大的国际流体力学会议之一，每年吸引3000多名来自世界各国的科学家和研究生参会交流流体力学的最新研究进展。何国威研究员是1978年改革开放以来第一位在该重要国际会议上作邀请报告的中国大陆学者。

邀请报告链接：<http://meetings.aps.org/Meeting/DFD20/Session/D03.1>

全 | meetings.aps.org/Meeting/DFD20/Session/D03.1 🔍 ☆ 🌐 📄 📱

American Physical Society Sites | [APS](#) | [Journals](#) | [PhysicsCentral](#) | [Physics](#)

[APS Meetings Home](#) | [Help](#) | [Contact APS Meetings](#)

Bulletin of the American Physical Society

Bulletin Home My Scheduler Epitome Author Index Session Index Invited Speakers Chair Index Word Search Affiliation Search Using My Scheduler	<p>73rd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics Volume 65, Number 13 Sunday–Tuesday, November 22–24, 2020; Virtual, CT (Chicago time)</p> <p>Session D03: Invited Talk: Space-Time Energy Spectra in Turbulent Flows 2:30 PM–3:05 PM, Sunday, November 22, 2020</p> <p>Chair: Beverley McKeon, Caltech</p> <p>Abstract: D03.00001 : Space-time energy spectra in turbulent flows 2:30 PM–3:05 PM Live</p> <p>Preview Abstract</p> <p>Authors: Guowei He (Chinese Academy of Science) Ting Wu (Chinese Academy of Science)</p> <p>Space-time energy spectra of velocity fluctuations describe energy distribution in turbulent flows over length and time scales. They are used to study spatio-temporal dynamics of turbulent flows, such as energy transfer, coherent structures and decorrelation processes. The growing applications of large-eddy simulation to turbulence-generated noise and fluid-structure interaction also require the accurate prediction of space-time energy spectra. Historically, Taylor's frozen-flow hypothesis for weakly shear flows and Kraichnan's random sweeping hypothesis for isotropic turbulence are the well-known models for space-time energy spectra. In the present talk, we will first introduce the elliptic approximation model for space-time energy spectra, which takes Taylor and Kraichnan models as two limits. Second, we will present a simple stochastic model which includes the minimal dynamics of the Navier-Stokes equations and a dynamic autoregressive (DAR) force. This model can exactly reproduce the first and second order moments of space-time energy spectra. Finally, the DAR model in combination with linear stochastic estimation will be used to generate the near-wall velocity fluctuations which are missing in wall modeling.</p>
---	---

激

三. 多尺度力学项目年会

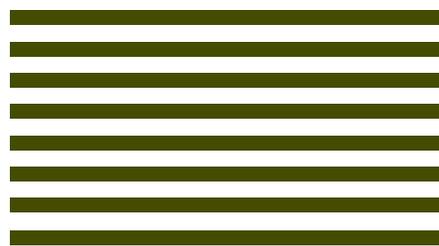
2021年4月8日，国家自然科学基金委基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”2020年度工作交流会在北京召开。本次会议的主要目的是听取项目各方向的研究进展，探讨项目执行中的相关问题，促进项目顺利执行。会议由项目负责人何国威院士主持，项目组成员、部分参研人员和管理人员等参加会议。

项目组成员清华大学孙超教授、中科院力学所魏宇杰研究员、北京大学陈十一院士团队杨越教授、北京大学唐少强教授和中科院力学所何国威院士依次报告了各方向在2020年的主要工作进展和2021年工作计划。孙超教授报告了超重力驱动热湍流实验平台建设和两相湍流输运等方面研究进展；魏宇杰研究员围绕微结构与固体强度，报告了晶界弛豫的尺度率和析出相界面位错强韧化等方面的进展；杨越教授代表陈十一院士团队报告了两相流中离散相与湍流相互作用机理和建模、湍流燃烧速度预测模型等方面进展；唐少强教授报告了4D可打印软材料本构关系模型和材料多尺度算法等方面的研究进展；何国威研究员报告了湍流时空能谱重构、潜艇标模 Suboff 大涡模拟壁模型等方面研究进展。

与会人员对相关方向的研究进展展开充分讨论，对项目执行中的任务聚焦、学术交流、规范管理、成果标注等问题给出具体建议和措施。



与会人员讨论项目执行情况和改进措施



多尺度力学快讯

2021年 | 第1期 | 总第3期 | 编辑人员：何国威, 晋国栋

