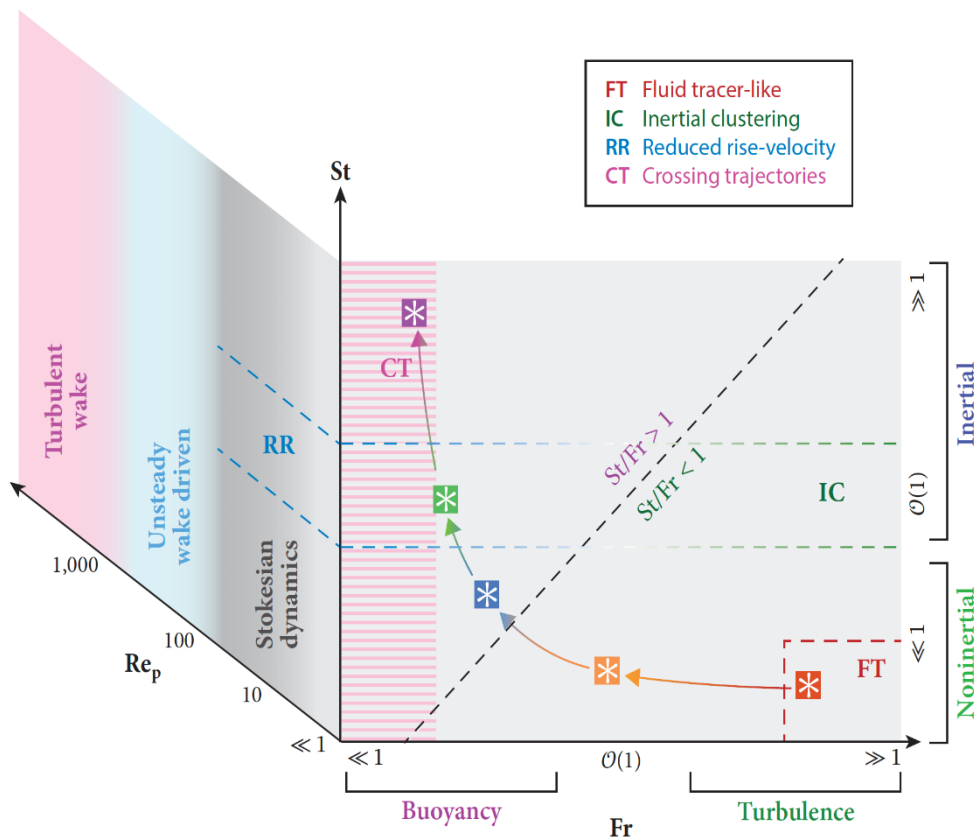
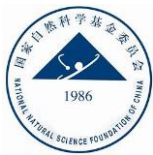


多尺度力学快讯

2020年 | 第1期 | 总第1期



携带颗粒两相湍流参数相图。(详见第8页, 孙超教授提供)



“非线性力学的多尺度问题研究”项目组

2020年4月30日

非线性力学的 多尺度问题研究

介绍国家自然科学基金委2019年立项的基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”概况。(详见第1页)

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”2020年度研究计划、研究目标以及近期进展。(详见第3页)

多尺度力学 学科前沿

新型冠状病毒肺炎的传播涉及到从微观到宏观不同尺度上物理过程的时空耦合, 它为多尺度力学提供了新的课题和挑战。现汇集相关问题供研究人员参考, 并欢迎对多尺度力学的学科前沿问题展开讨论。

(详见第9页)

一. 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”

1. 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。

2. 核心骨干

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。研究骨干为陈十一院士、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
				

3. 拟解决的前沿核心科学问题

(1) 建立湍流噪声的时空尺度动态耦合理论和方法，并应用于高速运载设备噪声的全尺度计算机模拟，为湍流噪声控制提供新的原理和设计工具。

(2) 发展两相湍流中颗粒、气泡、液滴等离散相与湍流相互作用的理论和模型，研究气泡的湍流减阻机制，建立离散相对极高雷诺数两相流运输的调控方法。

(3) 建立固体宏观行为和微观结构的关联理论与本构模型，发展介尺度结构形成与非线性演化动力学，建立高效微细观局部结构和宏观行为耦合的算法。

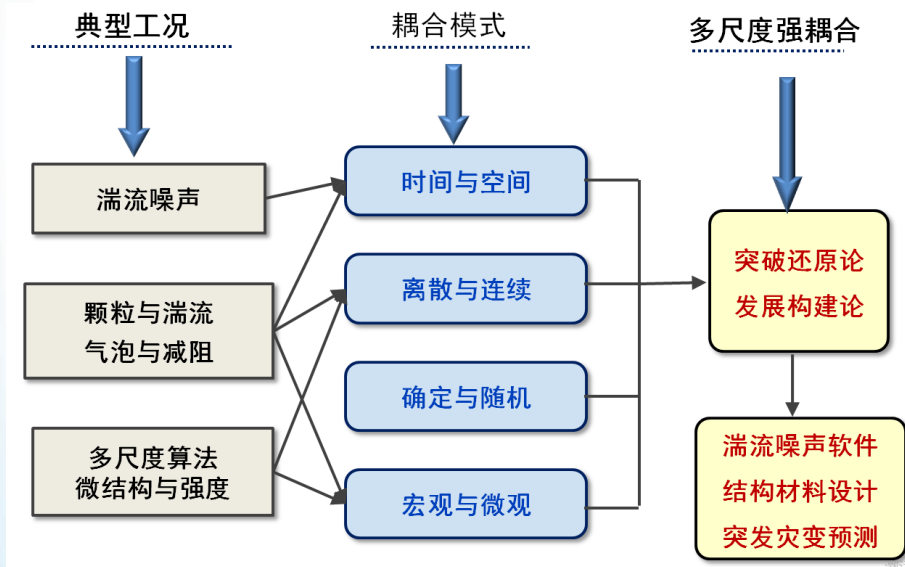
4. 预期成果

项目将聚焦以下四类多尺度耦合问题：(1) 宏观与微观，(2) 时间与空间，(3) 连续与离散，(4) 确定与随机，并从“湍流噪声”、“颗粒气泡-湍流相互作用”和“微结构和固体强度”三个典型案例出发，发展非线性力学多尺度耦合的理论和方法。通过项目团队的紧密合作与协同攻关，充分发挥学科交叉的优势，争取在流体湍流和固体破坏这两个核心科学问题上取得重大进展，它包括：从湍流的涡传播和畸变过程出发，发展湍流的时空关联模型，提出湍流噪声源的识别方法和控制原理；开展湍流和颗粒气泡的相互作用研究，进行全解析的直接数值模拟和实验研究，发展离散相和连续相的耦合方法，提出气泡湍流减阻的新机制；发展固体破坏的多尺度模型和方法，揭示介观结构形成和演化规律，从而能够预测多级结构与宏观力学性能之间的内禀关联。

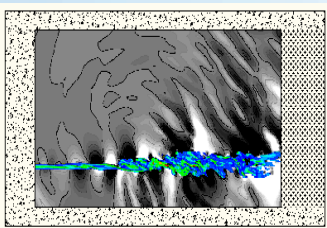
5. 项目目标

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。

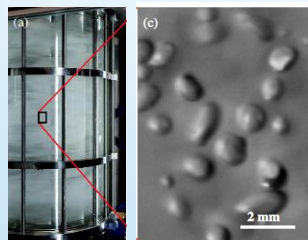
6. 实施方案



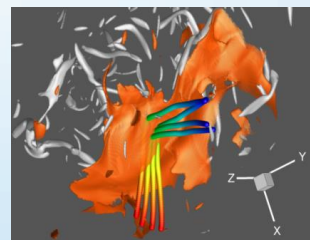
从典型案例出发，发展非线性力学多尺度耦合的理论和方法



湍流噪声



边界层中的变形气泡



颗粒与湍流



固体破坏

二. 多尺度力学项目进展

2020年是“非线性力学的多尺度问题研究”项目实施第一年，我们汇集了项目的本年度工作计划和目标。欢迎项目参加人员借此报道工作进展和阶段性成果。

1. 湍流噪声时空能谱的实验重构和超算模拟

流致噪声课题组在2020年的工作目标是：（1）从湍流速度场的不完整实验数据重构湍流的时空能谱；（2）完成水下航行器标模湍流噪声的全尺度数值模拟。湍流噪声是流体力学的重要问题，它研究湍流噪声的产生与传播过程，并且在航空和航海等领域有重要的应用。本课题组的第一个工作目标是在湍流噪声的基础研究理论上取得重要进展，第二个工作目标是在湍流噪声的应用上取得标志性成果。

Lighthill在上世纪五十年代创立了声学比拟理论，奠定了湍流噪声的理论基础。该理论指出：湍流噪声取决于湍流脉动的时空能谱。但是，现有的实验测量只能得到湍流脉动的部分时空信息，由部分信息不能直接计算湍流的时空能谱，必须利用泰勒冻结流模型计算时空能谱，由此得到时空能谱的谱宽为零的错误结果。我们将引入局部调制波的模型反映湍流的对流和畸变的耦合机制，从而可以从湍流场的两点上测量的时间序列重构湍流的时空能谱，正确预测时空能谱的谱宽。该模型不仅给出了湍流时空能谱的多普勒加宽效应的物理机制，而且可以应用于湍流噪声场实验测量的时空能谱重构。

Lighthill在展望湍流噪声的发展时预测：随着大型计算机的发展，将迎来湍流噪声研究的一个黄金时代。现在的研究大多集中在对飞机船舶部件的湍流噪声模拟，这将大大低估飞机船舶的整体噪声水平。例如澳大利亚根据部件噪声水平设计的柯林斯号水下航行器，整体噪声大大高于设计水平。因此需要开展全尺度的湍流噪声的模拟。在“多尺度力学”项目的支持下，我们率先开展了水下航行器标模的全尺度湍流噪声计算。该项工作由如下三个部分组成：（1）湍流噪声源的大涡模拟；（2）复杂几何壁面湍流的近壁流模型；（3）超级计算机的高效大规模并行计算。目前，我们已在全力推进这三项工作。初步结果显示，我们的计算能够揭示了水下航行器标模湍流噪声的指向性特征。

湍流噪声不仅是重要的流体力学问题，也是多尺度力学的四个核心科学问题之一“时间和空间尺度耦合问题”的典型案例。通过对湍流噪声的研究，发展的湍流时空耦合方法，将推动多尺度力学的核心科学问题的进展。

2. 两相湍流全解析计算方法，多尺度计算模型

两相湍流课题组在 2020 年的工作目标是：（1）在多相、多组分湍流介观计算方法上，实现基于离散统一气体动理学（DUGKS）框架下能同时处理可压缩性、传热、多相或多组分湍流的直接并行计算，优化设计和处理介观方法中的源项、平衡态、介观速度空间里的数值积分、和边界条件自相适，为开发可压缩湍流、携带颗粒的多相湍流，和双流体流动等应用奠定基础；（2）揭示湍流中的涡结构对离散相、及离散相对燃烧的作用机理，实现多尺度建模；（3）获得湍流结构对离散相时空输运和受力的影响规律，为离散相输运的大涡模拟模型和受力模型的建立奠定理论基础。两相流是流动减阻、燃烧、沙尘暴治理、激光核聚变、化工、旋转机械与水下推进系统等领域的常见问题，也是湍流研究中的重点和难点问题，具有时空结构复杂，强非均匀性和多尺度特性。本课题组的第一个工作目标是在湍流相和粒子相的计算方法上取得重要进展，第二个工作目标是在两相相互作用多尺度建模上取得标志性成果。

在湍流相和离散相的计算方法方面，系统研究介观方法中的共性细节问题。在 Chapman-Enskog 近似条件下，综合考量计算精度与计算效率，优化介观速度空间里离散速度的选择与数值积分格式。根据宏观速度、温度边界条件以及 Chapman-Enskog 近似，推导出未知介观分布函数和已知介观分布函数之间的严格关系式。研究在 DUGKS 方法中实现熵耗散约束条件的途径，和高效实现高马赫数可压缩湍流的介观计算的技术问题。以 DUGKS 为总体框架，实现高效、准确的可压缩热流、多相湍流等复杂流动介观 DNS 计算。本年度主要考虑可压缩单相湍流和可压缩热流，研究各种马赫数条件下压缩性和激波对湍流结构的影响，和可压缩条件下的温度场结构和传热特性，建立考虑激波捕捉的通量处理格式，并与传统 CFD 计算结果进行比对。

在湍流相和离散相相互作用机理与建模方面主要包含三部分研究内容。（1）通过直接数值模拟与数据驱动算法重构亚网格尺度湍流场，改善大涡模拟中的颗粒分布预测结果。由大尺度速度场重构亚网格速度场问题将利用并改进现有的生成对抗网络方法与图像超分辨率算法实现，然后通过模型后验测试进一步优化模型。（2）研究湍流燃烧中离散相对预混燃烧速度的影响。通过分析气液两相湍流燃烧直接数值模拟数据，探究发动机燃烧室雾化中液相对湍流燃烧速度的影响，并结合拉格朗日自传播片元模型进行燃烧效率建模。（3）研究重粒子跟随流体的运动和快速穿越湍流场的运动。在前期的局部“过零”研究中，证实了具有 1 个穿越点的结构具有最强的间歇性，这样的结构可以用具有拉伸的涡丝结构来表征。重粒子受到涡丝诱导速度的离心力作用，同时在有背景流动的向内压缩和沿涡丝方向的拉伸作用下，形成了重粒子的聚集性。通过研究湍流结构对粒子输运影响的规律，为构建亚网格结构对重粒子输运的影响模型提供理论基础。重粒子通常不跟随流体运动，在重粒子快速穿越湍流场时，湍流结构复杂的作用力对粒子最终运动形态有重要的影响。通过研究粒子受力的情况与湍流结构的时空关联，为建立粒子受力模型奠定基础。

两相流是重要的流体力学问题，也是多尺度力学的四个核心科学问题之一“离散相和连续相耦合问题”的典型示例之一。通过对两相湍流全解析计算方法和多尺度计算模型的研究，发展的离散相和连续相耦合方法，将推动多尺度力学的核心科学问题的进展。

3. 超重力热湍流系统湍流结构以及变形分散相对多相湍流输运影响的实验研究

多相湍流输运课题组在 2020 年的工作目标是：（1）研究超重力驱动热湍流系统中的湍流结构和输运特性；（2）研究变形分散相对湍流整体输运的影响。湍流和多相湍流的输运问题不仅是流体力学中重要的基础科学问题，也对相关工业应用有着重要意义，例如通过控制多相湍流中的分散相特性可以达到控制湍流输运效率的目的。第一个工作通过引入超重力这个崭新的概念来研究湍流输运特别是热湍流输运，为传统湍流实验研究提供了一个新思路，目标是在流体力学基础研究方面取得开创性成果。团队的第二个工作是探究变形分散相对多相湍流整体输运特性的影响，目标是在湍流减阻的基础理论和相关应用上取得标志性成果。

随着湍流强度的增加，湍流系统的边界约束对湍流结构的统计行为和其在时空中的演化发展有着重要作用，湍流系统的宏观输运特性也会随之而变。最近的研究表明高雷诺数湍流存在着不同的湍流状态，并且这些湍流状态可以相互转换。这些发现使得我们很难把现有的实验室结果外推到工业、地球物理以及天体物理现象。本团队拟以封闭湍流系统作为平台，研究极高湍流强度下的大尺度湍流结构以及系统整体输运参数的统计特性。对于提高湍流强度，无论是实验上还是数值模拟上都是一个关键而有挑战性的问题。我们以热湍流为研究对象，提高湍流驱动参数（瑞利数）的传统方法是增加系统尺寸，使用高压或者极低温气体作为工质等，这些方法都有不同程度的限制，使得现有高瑞利数热湍流输运特性的研究存在着很多不足。本团队提出一个崭新的思路，建立一个超重力热湍流系统：利用离心加速度替代重力加速度，通过数百倍于重力的高离心力驱动热湍流。本系统可以把瑞利数大幅度提高，为研究热湍流提供了一个崭新的途径。初步的研究结果已经证明这个系统的先进性，相关研究在国内外具有开创性。预期可以在湍流输运等基础科学上取得开创性成果。

混有气泡、液滴或者固体颗粒的多相湍流是众多工业应用中的关键问题，例如采油工业、管道运输等。处于湍流状态的流动会在运动固体边界产生极大的表面摩擦阻力，从而导致额外的能量耗散。通过在流动中引入分散相可以有效地改变湍流流动引起的表面摩擦阻力，是极具潜力的研究方向。然而，分散相对湍流及表面摩擦阻力的具体影响还没有定论。近期研究初步表明在湍流状态下气泡的变形对减小表面摩擦阻力起着关键作用。其中两个可能的关键因素是：气泡在湍流场中的动态变形过程，以及气泡的最终形状，但是这两个因素在减阻中的具体效应还不明确，有待进一步研究。

由于气泡和液体的密度差别太大，使得很多实验平台和实验技术的使用受到了限制。这一部分工作的主要内容为：探索可变形油滴在湍流（水为连续相）中是否可以获得与气泡类似的减阻效应；同时探究一个两相湍流中的对称性问题，即水滴在连续相油中和油滴在连续相水中是否具有实验结果的对称性及其物理原因；研究椭圆形固体颗粒在湍流场中能否提供类似气泡的减阻效应，探究气泡的最终形状是否是湍流减阻的关键因素之一。通过测量这些不同类型分散相和湍流场的相互作用，研究流动中分散相调控湍流引起的表面摩擦阻力和湍流输运相互作用的物理机理。预期可以在湍流减阻基础理论和相关应用上取得原创性成果。

多相湍流输运不仅是重要的流体力学问题，也是多尺度力学的四个核心科学问题之一“连续与离散耦合问题”的典型示例。通过对湍流和多相湍流输运的研究，发展的湍流调控机制，将推动多尺度力学的核心科学问题研究的进展。

4. 固体破坏的微观结构涌现机制与演化动力学

固体破坏课题组在 2020 年的工作目标是：（1）固体结构宏-微观交互作用机理研究；（2）实验识别介尺度结构。介尺度是影响固体介质时空尺度变形事件和宏观力学行为的内禀尺度，揭示介尺度结构涌现机制与演化动力学，是材料与结构跨尺度关联的核心科学问题。本课题组的第一个工作目标是在固体材料微结构演化影响的宏观力学性能的物理机理揭示方面取得重要进展；第二个目标是在实验识别介尺度结构上取得标志性成果。

材料性能与结构的关系几乎是所有领域一直以来的研究重点。而材料的性能，包括塑性变形、疲劳损伤、断裂等，与材料微结构及其所包含的特征缺陷（如位错、界面、微观裂纹等）密切相关。目前，微结构及其所包含的典型缺陷特征影响的塑性变形、疲劳损伤演化、及断裂等的物理机制尚未有一个系统且清晰的研究。本年度第一部分研究内容将分别针对四类典型的固体材料问题进行研究，包括：异构多级金属结构强韧化的微观机理、无序合金非平衡塑性流动、增材制造合金材料微结构缺陷诱导疲劳损伤、以及页岩储层多尺度缝网下的变形与破坏。自下而上地从微观结构相互作用入手，准确刻画微结构演化与宏观力学性能之间的非线性关联。通过以上四类问题的研究，能够提出系统和完整地建立宏-微观交互作用机理的研究方法，并将该方法推广到更多的材料体系和力学问题的研究中。

通过试验方法进行微结构的识别、演化过程的追踪、揭示材料损伤和破坏特性与不同尺度微结构特征的关联、实现微结构的调控，是实现微结构设计具有抗疲劳、抗冲击、抗腐蚀、抗热震、抗电化学环境等特性的先进固体材料的重要组成部分。本年度在实验方面的研究聚焦于微结构的观测以及材料损伤和破坏特性与不同尺度微结构特征的关联上。分别包括：（1）针对高强合金材料疲劳问题的机理研究，发展对疲劳裂纹萌生特征区萌生演化过程的识别和追踪的实验技术，建立高强合金材料超高周疲劳问题与微结构缺陷及其演化过程相关联的物理规律；（2）在无序合金的非平衡塑性流动和强韧化的机理研究方面，发展辐照高温环境下核用钢材料的微结构观测的实验手段，为之后开展多物理场耦合环境下的固体结构破坏问题的实验研究提供技术支撑。

基于微结构缺陷的固体结构破坏问题是固体力学领域重要的问题，也是多尺度力学的四个核心科学问题之一“微结构和材料强度”的典型示例。通过对微结构缺陷影响的固体结构破坏问题的研究，实现固体结构材料性能的调控与改善，将推动多尺度力学的核心科学问题的进展。

5. 面向微观结构的多尺度均匀化方法与应用

多尺度力学计算方法课题组在 2020 年的工作目标是：（1）发展面向微观结构的多尺度均匀化方法，降低计算复杂度、提升准确性；（2）针对不同材料（金属、单晶和非晶合金、3D/4D 打印材料等），开展多尺度模型、计算研究。通过微观结构获取材料宏观力学性质是计算力学的主要任务之一，在材料分析、设计与生产中有着重要的应用需求和前景。本课题组的第一个工作目标是在多尺度均匀化的计算方法上取得重要进展，第二个工作目标是通过相关应用来验证、深化多尺度模型与算法成果。

计算力学的主要矛盾在于计算复杂度和计算结果的精度。在材料力学性质的多尺度计算中，通过综合细观尺度的几何结构与细观组分的本构模型，获得唯象的单一尺度本构模型无法获得的机理。具体来说，先将细观几何结构通过有限元离散化，把宏观材料积分点的变形状态作为一种本底应变信息传递到细观尺度；再在细观尺度上，利用组分的本构模型，获得该变形状态下的力学响应，反馈给宏观材料积分点；两个尺度迭代收敛后，取平均就得到宏观的力学响应。这样的多尺度数值均匀化计算复杂度巨大，需要发展降阶的多尺度均匀化方法，平衡计算量与精度。

在“多尺度力学”项目的支持下，我们计划开展多尺度均匀化方法研究，由以下三个部分组成：（1）研究聚类分析方法数值均匀化的精度提升方案；（2）发展在简单几何（分块）下训练生成复杂本构模型的降阶多尺度均匀化方法；（3）基于均匀化方法，开展应用问题中材料（金属、单晶和非晶合金、3D/4D 打印材料等）有着微孔洞、位错、裂纹等微观结构的多尺度建模与模拟。

多尺度均匀化不仅是重要的计算力学问题，也是多尺度力学的四个核心科学问题之一“宏观与微观耦合问题”的主要方面之一。通过对材料多尺度均匀化的深入研究，发展材料宏观与微观耦合方法，将推动多尺度力学核心科学问题的进展。

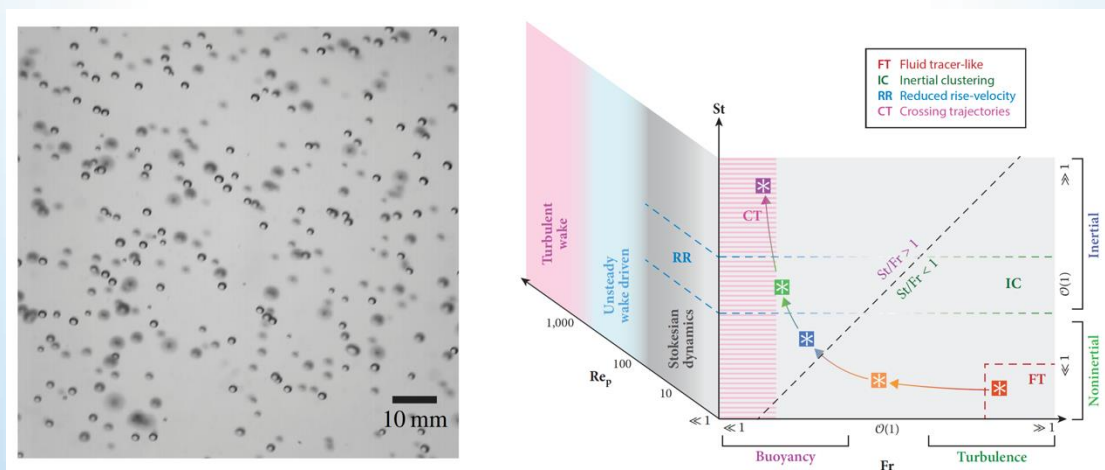
两相湍流近期研究进展

近期，清华大学燃烧能源中心、能源与动力工程系和航天航空学院的孙超教授以通讯作者身份与美国布朗大学的 Varghese Mathai 以及荷兰屯特大学 Detlef Lohse 合作在《凝聚态物理年鉴》(Annual Review of Condensed Matter Physics) 发表了题为“携带气泡和轻颗粒的两相湍流”的综述性论文。《凝聚态物理年鉴》是 Annual Reviews 系列出版的一个专题期刊，主要介绍凝聚态物理和相关主题的重要进展，在该领域具有很高的影响力。

与层流相比，湍流通常具有更大的阻力，以及更高的传热和混合效率等诸多特点。在许多自然场景和工业环境中，湍流往往包含分散的气泡和轻颗粒，在气泡和轻颗粒的浮力作用下，湍流系统会被显著改变，伴随出现全新的系统特性和物理现象。最近，相关问题得到广泛关注，众多研究通过实验和高分辨率直接数值模拟对这类流动的特征及其物理机理进行了探讨。该综述总结了目前人们对于携带气泡和轻颗粒的两相湍流现象各个方面的认识。具体而言，该文讨论了上浮颗粒穿越涡结构时引起的效应，尾涡引起的液体掺混，气泡和颗粒在近壁面或涡结构中的倾向性团聚行为等现象的物理机制。在此基础上，该文进一步探讨了分散相气泡和轻颗粒对均匀各向同性湍流、槽道湍流、泰勒-库埃特湍流以及热浮力驱动湍流等多种典型湍流流动的具体影响。文章最后展望了该领域未来发展亟需解决的关键问题。

该综述文章讨论的内容有助优化工业应用中多相湍流的流动减阻、增强湍流传热等方面的具体设计，同时也为多相流的实验和理论研究提供了重要的参考。该论文得到了国家自然科学基金委基础科学中心项目“非线性力学的多尺度问题研究”的支持。

论文链接：<https://www.annualreviews.org/doi/full/10.1146/annurev-conmatphys-031119-050637>



左图显示了一个携带气泡的两相湍流流场样例；在湍流场中气泡和轻颗粒具有丰富的动力学行为并与湍流相互耦合，如右侧的参数相图所示。

三. 多尺度力学学科前沿

新型冠状病毒肺炎的传播涉及到从微观到宏观不同尺度上物理过程的时空耦合，它为多尺度力学提供了新的课题和挑战。现汇集相关问题供研究人员参考，并欢迎对多尺度力学的学科前沿问题展开讨论。

1. 咳嗽气流对飞沫传播的影响

王洪平，王士召，何国威

中国科学院力学研究所，非线性力学国家重点实验室，北京 100190

呼吸道传染病，例如重症急性呼吸综合征(SARS)、甲型 H1N1 流感、中东呼吸综合征(MERS)等，是世界范围内引起人类死亡的主要原因之一，严重威胁人类的健康。最近由一种新的冠状病毒 SARS-CoV-2 引起的呼吸道传染病新冠肺炎 (COVID-19) 在短时间内席卷全球，造成数十万死亡，对全球的经济造成不可估量的损失。深入理解这些疾病的传播方式和途径对传染病防治至关重要。一般而言，呼吸道传染病的传播方式有飞沫传播、接触传播和飞沫核传播[1-2]。被感染的病人通过说话、咳嗽、打喷嚏等方式产生大量的飞沫，这些飞沫携带大量的病毒进入周围环境，成为病毒传播的源头。因此，了解咳嗽和打喷嚏时飞沫的运动状态有助于了解病毒的传播过程，进而提出更加合理的防治措施（社交距离、行为规范以及卫生习惯等）。

对飞沫的研究由来已久。早在 20 世纪 30 年代，Wells (1934)对比了不同尺寸飞沫的沉降时间和蒸发时间发现：当直径大于 100 微米时，飞沫会快速沉降；当小于 100 微米后，飞沫在沉降之前由于水分蒸发会变成很小的飞沫核。若飞沫核中包含病毒，该病毒能够跟随周围气流运动到很远的地方[3]。2014 年，MIT 的科学家 Bourouiba 从流体动力学的角度重新考虑了飞沫的传播[1]。她将说话、咳嗽、打喷嚏呼出的气体看成多相湍流气体云 (multiphase turbulent gas cloud)，这团温暖潮湿的气体云裹挟着部分飞沫向前运动并阻止了飞沫的蒸发，延长了飞沫的传播距离和时间。同时，作者还发展了理论模型用于预测飞沫的传播距离。最近，结合新冠肺炎，Bourouiba (2020)对其湍流气体云理论进行了综述并指出：由于未考虑咳嗽气流对飞沫的影响，当前的防疫措施有可能低估了飞沫的传播[4]。

目前，对飞沫的研究大多通过流动显示的方式观察飞沫在空气中的运动轨迹和状态，缺少定量分析气流对飞沫的影响。建议聚焦咳嗽时飞沫的运动，通过粒子图像测速技术 (PIV) 测量飞沫和气流的速度分布，定量分析气流对飞沫运动状态的影响。同时，我们将借助于流体力学理论预测咳嗽气流的传播距离。该研究能够揭示飞沫传播的动力学机制，有助于理解呼吸道传染病的传播途径，为当前新冠肺炎的防治提供科学依据。

参考文献

- [1] Bourouiba, L., Dehandschoewercker, E., Bush, John W. M. (2014). Violent expiratory events: on coughing and sneezing. *J Fluid Mech*, 745:537-563.
- [2] Huang, H., Fan, C., Li, M., et al. (2020). COVID-19: A Call for Physical Scientists and Engineers. *ACS Nano*, 14:3747-3754.
- [3] Wells, W. F. (1934). On air-borne infection - Study II Droplets and droplet nuclei. *Am J Hyg*, 20:611-618.
- [4] Bourouiba, L. (2020). Turbulent Gas Clouds and Respiratory Pathogen Emissions: Potential Implications for Reducing Transmission of COVID-19. *JAMA*.

2. 双回路人工心肺机模型的数值研究

王春雨, 王士召

中国科学院力学研究所, 非线性力学国家重点实验室, 北京 100190

人工心肺机, 又称体外膜肺氧合 (Extracorporeal Membrane Oxygenation, ECMO), 是拯救新冠肺炎等呼吸衰竭患者的关键设备[1]。ECMO 将血液从静脉引出, 经膜肺氧合后, 通过静脉输入人体 (V-V 回路模式)。临床抢救过程中, 呼吸衰竭患者常引发心功能衰竭, 需要 ECMO 提供心脏支持。此时, 循环回路血液经氧合后分成两支, 并分别经动脉和静脉返回患者身体 (V-VA 双回路模式)[2]。对于临床医生来说, 准确控制分支管道内的血液流量十分重要。这一问题属于分支管道的流量分配问题, 是流体力学和临床医学研究的交叉领域。

现有的 ECMO 循环过程研究多集中于单回路模型。双回路 ECMO 中的分支管路流量分配规律等问题是临床工作中亟待解决的问题。2019 年 Mirko Belliato 等[3]首次提出了一个模拟 V-VA 双回路模式 ECMO 的实验模型, 并通过该模型研究了管道长度和直径对不同回路内流量的影响。他们的实验表明: 随着 ECMO 总流量的增加, 动脉分支和静脉分支内的血液流量呈不同比例增加, 最佳插管组合是动脉端采用 19Fr/18cm 而静脉端采用 17Fr/50cm。在该搭配下, 可观测到一个等流量分割点; 另外, 他们还给出了维持动脉血液流动的最小总流量。

双回路管道内的流动规律强烈地依赖于管路尺寸和分支接口的几何特征。上述实验仅给出了分支管路内的平均流量信息, 无法满足流动规律的精细分析和管路优化设计等要求。建议采用计算流体力学提供双回路 ECMO 模型内详细的流动信息, 特别是 Y 型分支管附近更多的流动细节, 以及几何参数对流量分配的影响, 分析双回路 ECMO 流量分配的规律和机理, 为临床救护新冠肺炎重症患者提供指导。

关键词: 体外膜肺氧合, 流量分配, 计算流体力学

参考文献

- [1] Conrad, S.A., Broman, L.M., Taccone, F.S., et al. (2018). The extracorporeal life support organization Maastricht treaty for nomenclature in extracorporeal life support. A position paper of the extracorporeal life support organization. *Am J Respir Crit Care Med*, 198(4): 447–451.
- [2] Ius, F., Sommer, W., Tudorache, I., et al. (2015). Veno-veno-arterialextracorporeal membrane oxygenation for respiratory failure with severe haemodynamic impairment: technique and early outcomes. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*, 20(6): 761–767.
- [3] Mirko, B., Luca, C., Alessandro, A., et al. (2019). An experimental model of veno-venous arterial extracorporeal membrane oxygenation. *IJAO*, 43(4): 268–276.

3. 新冠肺炎传播过程的环境因素

朱力行, 杨子轩, 何国威

中国科学院力学研究所, 非线性力学国家重点实验室, 北京 100190

新冠病毒肺炎业已成为全球性大流行病[1]。为了阻断肺炎的传播, 各国政府均已颁布旅行禁令并要求在公共场合保持社交距离以阻断感染者和易感人群的接触。然而, 新冠病毒从宿主到宿主的传播机制尚不明确, 需要借助计算流体动力学 (CFD) 手段模拟飞沫经呼吸道喷出后在介质中的扩散[2], 作为公共卫生政策制定过程中的参考。

现有的研究表明, 呼出的飞沫 (包括呼吸, 咳嗽和打喷嚏) 并不能简单地假定为符合某个统计意义上的粒径分布 (例如 Rosin-Rammler 分布) 的飞沫团[3]。为了充分估计感染者飞沫的影响范围, 必须要把这个比较复杂的湍流云与环境因素综合考虑进 CFD 模拟中, 并在大涡模拟 (LES) 尺度下分析这些因素对飞沫传播的影响。

新冠病毒在飞沫蒸发后形成的飞沫核 (droplet nuclei) 悬浮在空气形成气溶胶, 以及沉降到物体表面之后, 依据环境因素, 仍然能存活数小时[4]。CFD 模拟能提供飞沫核形成的气溶胶以及飞沫核在物体表面沉积的浓度, 为临床判断气溶胶传播的风险和易感公共场所的消杀工作提供分析依据。现有的结果没有考虑环境因素对于气溶胶分布的影响。

最新研究关注了大气颗粒污染物和病毒传播速度的关系, 并提出了污染可能加快病毒传播的假说[5]。虽然大气颗粒污染物的浓度和肺炎致死率的相关性已经在 SARS 和 Covid-19 的病例中得到充分验证, 但是其与病毒传播速度的影响还没有任何实际结论。我们在 CFD 模拟中可以考虑到大气污染物浓度对于飞沫传播的影响以验证假说。

现有的新冠病毒传播的研究主要采用 Unsteady-RANS 求解流场, 所得结果有一定局限性。建议提出采用大涡模拟方法模拟环境流场的方案, 以更准确地捕捉飞沫传播过程中的非定常效应。通过参数研究得到飞沫传播受到环境因素的影响。同时模拟大气污染物的输运, 以验证污染物浓度对病毒传播的影响, 并与实验结果进行比较。

参考文献

- [1] World Health Organization, Coronavirus disease 2019, (2020). <https://doi.org/10.1001/jama.2020.2633>.
- [2] Blocken, B., Malizia, F., Van Druenen, T., Marchal, T. (2020). Towards aerodynamically equivalent COVID-19 1.5 m social distancing for walking and running.
- [3] Bourouiba, L. (2020). Turbulent gas clouds and respiratory pathogen emissions: potential implications for reducing transmission of COVID-19, JAMA - J. Am. Med. Assoc. E1–E2. <https://doi.org/10.1001/jama.2020.4756>.
- [4] van Doremalen, N., Bushmaker, T., Morris, D.H., Holbrook, M.G., Gamble, A., Williamson, B.N., Tamin, A., Harcourt, J.L., Thornburg, N.J., Gerber, S.I.J., Lloyd-Smith, O., de Wit, E. Munster, V.J. (2020) Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1, N. Engl. J. Med. <https://doi.org/10.1056/nejmc2004973>.
- [5] Setti, L., Passarini, F., De Gennaro, G., Barbieri, P., Perrone, M.G., Piazzalunga, A., Borelli, M., Palmisani, J., Di Gilio, A., PISCITELLI, P., Miani, A. (2020). The potential role of particulate matter in the spreading of COVID-19 in Northern Italy: first evidence-based research hypotheses, MedRxiv. 2020.04.11.20061713. <https://doi.org/10.1101/2020.04.11.20061713>.

4. 新冠病毒飞沫在楼梯间的传播和防护要点

李墨斌, 杨晓雷

中国科学院力学研究所, 非线性力学国家重点实验室, 北京 100190

楼梯是日常使用频率最高的楼内公共空间, 是传播新冠病毒的高危场所。楼梯空气流通差、空间狭小, 尤其是行人快速走动引起的空气扰动更有助于病毒飞沫在空气中的传播和扩散。2020年3月16日, 北京市首例境外输入关联病例即疑似通过共用楼梯感染^[1]。因此, 研究楼梯间内真实的空气流动状态和飞沫在此环境下的运动扩散规律, 有助于理解病毒在居民日常活动空间内的传播过程, 对确立合理的防护准则具有重要的现实意义。

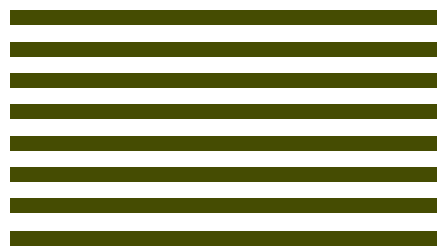
现有的关于病毒飞沫的研究多在水平或开阔场地条件下开展^{[2]-[4]}。未见对于楼梯间这种狭小且带有高差的特殊环境的研究。

建议使用计算流体力学模拟行走引起的楼梯间内空气流动, 使用拉格朗日法计算飞沫在流场中的传输、弥散、蒸发、沉降过程, 在考虑飞沫的直径、空气阻力、重力、蒸发等因素下, 研究病毒飞沫在楼梯间内传播、下落并最终附着在物面处的过程和规律, 探讨使用楼梯时应遵循的社交安全距离, 提出相应的防护要点。

关键词: 楼内公共空间, 计算流体力学, 病毒飞沫传播

参考文献

- [1] 孟竹,高星, (2020).北京通报首例境外输入关联病例:疑与确诊邻居走同一楼梯被传[EB/OL]. (2020-3-24)[2020-4-22]<http://bj.people.com.cn/n2/2020/0324/c14540-33900519.html>.
- [2] Gupta, J.K, Lin, C.H., Chen, Q. (2012). Risk assessment of airborne infectious diseases in aircraft cabins[J]. *Indoor air*, 22(5): 388-395.
- [3] Poussou, S.B., Mazumdar, S., Plesniak, M.W., et al. (2010). Flow and contaminant transport in an airliner cabin induced by a moving body: Model experiments and CFD predictions[J]. *Atmospheric Environment*, 44(24): 2830-2839.
- [4] Blocken, B., Malizia, F., van Druenen, T, et al. (2020). Towards aerodynamically equivalent COVID-19 1.5m social distancing for walking and running[J]. Preprint.



多尺度力学快讯

2020年 | 第1期 | 总第1期 | 编辑人员: 何国威, 晋国栋

