

微纳尺度流动与界面流动专题序

关东石^{*,†,1)} 司廷^{**,2)}^{*}(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)[†](中国科学院大学工程科学学院,北京 100049)^{**}(中国科学技术大学近代力学系,合肥 230027)

微纳尺度流动与界面流动是流体力学的重要分支学科^[1],其中微纳尺度流动关注微米、亚微米乃至纳米尺度下流体运动及物质输运规律,界面流动关注不同流体或流固界面之间的相互作用及流动规律.随着微流控芯片和微纳机电系统的发展,微纳尺度流动与界面流动已成为流体力学学科的重要前沿领域,并且涉及了流体力学与生命科学、材料科学、医疗健康、能源环境、先进制造等多学科领域的交叉融合.从流体力学角度来看,微纳尺度流动呈现出不同于宏观尺度流动的特征及规律^[2-3]:一方面,流体被限制在“狭小”空间中流动,表面/界面作用突显,与表面/界面密切相关的传热、传质、表面物性的作用大大增强,宏观尺度下原本被忽略的因素,包括黏性效应、边界效应、表面/界面尺度、梯度量作用、多场耦合、流动滑移等在微纳尺度下可能起主导作用;另一方面,微纳尺度流动所涉及的流体和物质为微量,以此为基础的微流控技术具有精准操控、快速灵活、易自动化等优势,在化学、生物、医学、材料、新能源及环境等领域具有广阔的应用前景.

随着国内学者在微纳尺度流动与界面流动领域的研究队伍不断发展壮大,2014年中国力学学会流体力学专业委员会正式成立微纳尺度流动专业组;2020年国家自然科学基金委员会力学学科代码调整并确定了“微纳尺度流动与界面流动”(申请代码 A0907);2021年4月在合肥举办的首届微纳尺度流动研讨会,将国内流体力学领域在该方向上开展研究工作的青年学者聚在一起,共同研讨微纳尺度流动与界面流动的过去、现在和未来,取得了显著成效.近年来,力学学者在该领域及其交叉学科的研究中取得了一系列的创新性成果,不仅推动了基础科学研究的发展,还在诸多方面实现了技术创新和实际应用.《力学学报》特组织《微纳尺度流动与界面流动》专题,旨在总结和传播微纳尺度流动与界面流动的新理论、新方法和新技术,共同研讨相关方向亟需解决的重要科学和技术问题,探索新规律,揭示新机理,为实际应用提供坚实的科学支撑.本专题汇集了7篇综述论文和17篇研究论文,共计24篇论文,分两期刊登.本期包含了“微纳尺度多相流动”和“微纳流动与生物医学”两个方面的研究工作;下期包含“微纳尺度界面现象”和“微纳流动与工程应用”两个方面的研究工作.

在“微纳尺度多相流动”研究方面,主要介绍了微纳尺度下液滴、气泡和颗粒的输运规律与多场耦合效应.北京工业大学刘赵淼、王翔等研究了双重乳化液滴在分岔结构处的流动行为,对研究复合液滴的动力学特性以及建立相应的操控方法具有重要意义,有助于进一步实现复合液滴的按需制备以及在化工、医药和生物检测等领域的应用.南方科技大学谭唤书等利用数值模拟研究了不同马兰戈尼数下溶质马兰戈尼效应诱导的双液滴融合或分离现象,对于认识和理解多组分微液滴操控提供参考.江苏大学张忠强等利用构建的

2024-04-02 收稿,2024-04-17 录用,2024-04-18 网络版发表.

1) 通讯作者:关东石,教授,主要研究方向为微纳流动与界面流动、软物质与生命物质力学. E-mail: dsguan@imech.ac.cn2) 通讯作者:司廷,教授,主要研究方向为微纳尺度流动、高速界面流动. E-mail: tsi@ustc.edu.cn

引用格式:关东石,司廷.微纳尺度流动与界面流动专题序.力学学报,2024,56(5):1211-1213

Guan Dongshi, Si Ting. Preface of theme articles on micro- and nano-scale flow and interfacial flow. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2024, 56(5): 1211-1213

体声波显微实验系统,研究了影响体声波操控微小颗粒图案化效率的关键因素及其特性,在微小生物目标图案化排列方面展示出应用的潜力.河北工业大学勾易行、李子瑞等利用数值模拟研究了压力驱动双膜离子浓差极化系统中带电粒子的分离和富集,为多粒子同时富集并分离及多级 ICP 级联系统设计提供新的思路和理论指导.北京工业大学王军等基于气体动理论方法,推导得到非球形颗粒所受曳力的通用表达式,避免了求解具体非球形颗粒受力计算的繁琐计算过程,便于实际应用.湖南大学杨刚等提出了 ISPH-FVM 耦合数值模拟方法,研究了不同韦伯数以及雷诺数对上浮气泡与自由表面相互作用动力学的影响.

在“微纳流动与生物医学”研究方面,主要介绍了微纳尺度流动与界面流动在生命科学、医工交叉领域中的应用及进展.浙江大学李学进等综述了微流控芯片技术及基于微流控的数值仿真模拟手段在红细胞、白细胞及干细胞变形和流变学行为中的应用及进展,为未来的细胞流变学领域的基础研究及干细胞疗法的临床应用研究提供有力支撑.中国科学院力学研究所蒋玺恺等从理论模型、数值模拟和实验研究三方面综述了球腔内低雷诺数流体中颗粒运输的研究进展,阐述了球腔内低雷诺数流体中的颗粒运输在细胞内生命活动和微流控封装技术中的关键作用.上海交通大学龚晓波等采用浸入式边界法研究了细胞穿越狭窄通道的整个运动过程,探究了细胞在狭窄通道运动过程中的微观和宏观的力学、传质特性,以及不同狭缝通道属性、细胞生理特性对细胞传质的影响效应.大连理工大学薛春东等研究了非牛顿微液滴的粒子封装及检测,在细胞培养、药物可控释放和微量成分分析等生物医学领域具有应用前景,为优化基于非牛顿微液滴的粒子封装技术及开发一体化装置提供参考.北京工业大学申峰等通过实验与数值模拟研究了微流控系统中不同圆形微凹槽的粒子容纳能力,对微凹槽结构设计和提高粒子分选性能具有指导意义,为从复杂的细胞溶液中对目标细胞进行分选和富集提供基础.温州大学林博远等针对患者理想化和特异性的血管模型进行数值模拟,考虑了血液实际流变特性,综合分析了静脉血栓的溶栓治疗数值结果,为血栓治疗领域的数字医疗、智慧医疗技术提供研究基础.

在“微纳尺度界面现象”研究方面,主要介绍了液滴撞击、铺展、润湿等界面现象及其微观力学机理.中国科学院力学研究所关东石等综述了独特设计的长针式原子力显微镜技术在研究微纳尺度润湿动力学中的进展,该技术发挥了精准操控和小尺度力学测量等优势,实现了对各类非理想界面润湿动力学的系统性研究,为探究界面上复杂现象的物理本质提供参考.北京理工大学李真珍等综述了由溶质引起的自由液面马兰戈尼铺展,为开发借助溶质的本构性质等物理化学性质实现液体驱动的低能耗器件和生产工艺提供参考.华中科技大学周新平等综述了液滴撞击柔性基底动力学的研究进展,梳理了柔性体、柔性面和柔性杆 3 类柔性基底对液滴撞击的接触时间、最大铺展因子、气泡捕获、回弹和溅射等方面的影响.中国科学院大学李延深综述了稳定密度梯度内球形界面上流动不稳定性的研究进展,总结了液滴/气泡大小、容器大小、密度梯度大小、对流、扩散以及黏性等的影响规律,并对未来的研究与应用进行展望.电子科技大学陈龙泉等通过实验观测和理论分析研究了黏弹性液滴撞击超疏水表面的反弹行为,揭示了非牛顿流体流变特性和表面微观结构形貌对液滴反弹行为的影响规律,获得了描述液滴发生反弹的韦伯数阈值公式和反弹恢复系数的表达式.北京理工大学陈晓东等利用高速摄影技术研究了不同速度微射流撞击形成液膜的流动形态,得到了微射流撞击形成液膜的演变规律和机制,为相关应用研究提供了理论支持和定量认识.

在“微纳流动与工程应用”研究方面,主要介绍了微纳尺度流动与界面流动在能源环境和先进制造等工程领域的实际应用.中国计量大学包福兵等综述了现有的有源和无源液体微小流量测量方法,对未来发展来满足微小流量测量和传感器微尺度集成的需求进行了展望.中国科学院大学姚朝晖等结合数值模拟和实验研究,对亲水微槽道内空间立柱结构、二次内凹的空间立柱结构和二次内凹的微脊结构表面层级结构的减阻特性进行了研究,阐明了微结构表面气液界面与流动减阻的关系.金陵科技学院王昊利提出了融冰沿气槽结构超疏水表面顺向下滑过程的物理几何模型,研究了超疏水表面微结构与融冰层厚度等几何参数对冰层滑动速度影响规律,为超疏水除冰应用中的相关流体物理过程提供了参考.西安交通大学刘海湖等通过数值模拟研究了自击撞式双组元推进剂雾化过程,揭示了入口速度扰动、自击偏靠角度和射流速度对液滴粒

径分布与空间分布的影响机制, 以期对双组元推进剂系统的优化设计提供理论参考. 清华大学深圳国际研究生院殷振元等开发了新型的高压微流控可视化装置, 研究了孔隙尺度甲烷水合物生成与分解过程, 为深入理解水合物分解动力学与水合物沉积物两相渗流理论提供基础支撑. 东北石油大学王凤娇、刘义坤等采用分子动力学方法构建了岩石壁面-油相-驱替相模型, 研究了致密储层压驱焖井阶段的渗吸机理, 为致密砂岩储层有效开发和提高采收率提供理论支持.

综上所述, 我国在微纳尺度流动与界面流动领域的研究发展迅速, 研究内容几乎覆盖所有流体力学及其前沿交叉方向, 并取得了一批达到世界先进水平的研究成果. 然而, 该研究方向仍面临诸多科学和技术挑战, 主要来自其固有的交叉学科性质, 需要我国力学工作者进一步加强流体力学、化学、生物、医学、材料、新能源及环境等学科的深度融合, 打破力学学科与其他学科的壁垒, 发挥定量化与精确化的学科优势, 突破微流控芯片及其应用领域的颠覆性技术, 将微纳尺度流动与界面流动研究提升到更高的水平.

特此感谢《力学学报》编辑部、中国力学学会流体力学专委会微纳尺度流动专业组对微纳尺度流动与界面流动问题的关注以及对本专题的支持! 也特别感谢所有论文作者以及审稿专家对本专题出版的重要贡献和大力支持!

参 考 文 献

- 1 胡海岩. 中国力学 2035 发展战略. 北京: 科学出版社, 2023 (Hu Haiyan. China Mechanics 2035 Development Strategy. Beijing: Science Press, 2023 (in Chinese))
- 2 李战华, 郑旭. 微纳米尺度流动实验研究的问题与进展. 实验流体力学, 2014, 28(3): 1-11 (Li Zhanhua, Zheng Xu. The problems and progress in the experimental study of Micro/Nano-scaleflow. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2014, 28(3): 1-11 (in Chinese))
- 3 陈晓东, 胡国庆. 微流控器件中的多相流动. 力学进展, 2015, 45(1): 201503 (Chen Xiaodong, Hu Guoqing. Multiphase flow in microfluidic devices. *Advances in Mechanics*, 2015, 45(1): 201503 (in Chinese))

doi: [10.6052/0459-1879-24-190](https://doi.org/10.6052/0459-1879-24-190)