

第十八届美国理论与应用力学大会总结

段慧玲^{1,1)} 曲绍兴² 施兴华³ 杨绍普⁴ 王立峰⁵ 魏宇杰⁶ 季葆华⁷ 郭万林⁵ 王杰⁷ 柯燎亮⁸ 彭志龙⁹ 阚前华¹⁰ 吕朝锋¹¹ 陈玉丽¹² 姚海民¹³ 周济福⁶ 孙超¹⁴
刘桦¹⁵ 张一慧¹⁶ 王萍¹⁷ 廉艳平¹⁸ 阎军¹⁹ 章青²⁰ 孙洪广²⁰
王东东²¹ 张雄¹⁶ 詹世革²² 孟庆国²² 陈杰²³ 汤亚南²³

¹(北京大学力学与工程科学系, 北京 100871)

³(国家纳米科学中心, 北京 100190)

⁵(南京航空航天大学航空宇航学院, 南京 211106)

⁷(浙江大学工程力学系, 杭州 310027)

⁹(北京理工大学先进结构技术研究院, 北京 100081)

¹¹(浙江大学建工学院, 杭州 310058)

¹³(香港理工大学机械工程系, 香港)

¹⁵(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院工程力学系, 上海 200030)

¹⁷(兰州大学土木工程与力学学院, 兰州 730000)

¹⁹(大连理工大学工程力学系, 大连 116024)

²¹(厦门大学建筑与土木工程学院土木工程系, 厦门 361005)

²³(中国力学学会办公室, 北京 100190)

²(浙江大学工程力学系, 杭州 310027)

⁴(石家庄铁道大学机械设计制造及其自动化系, 石家庄 050043)

⁶(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

⁸(北京交通大学土建学院力学系, 北京 100044)

¹⁰(西南交通大学力学与工程学院, 成都 610031)

¹²(北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100083)

¹⁴(清华大学燃烧能源中心, 北京 100084)

¹⁶(清华大学工程力学系, 北京 100084)

¹⁸(美国西北大学机械工程系, 美国埃文斯顿市)

²⁰(河海大学力学与材料学院, 南京 210098)

²²(国家自然科学基金委员会数理科学部, 北京 100085)

1 会议概况

2018 年 6 月 5—9 日, 第 18 届美国理论与应用力学大会 (18th U.S. National Congress of Theoretical and Applied Mechanics, USNCTAM2018) 在美国芝加哥召开. 本次大会由美国力学国家委员会和中国力学学会联合主办, 旨在探讨和交流近四年世界范围内在理论和应用力学领域的基础研究、创新技术的最新进展, 吸引了来自世界各地的近千名专家学者参会, 其中近 300 人来自中国. 本次会议分为固体力学、流体力学、计算力学、生物力学和动力学与控制五大专题, 并增设了博士与博士后职业发展研讨会和女性研究人员社交活动. 大会由美国塔夫斯大学曲建民教授、美国西北大学 Wing Kam Liu 教授、浙江大学杨卫院士 (中国力学学会理事长) 和北京理工大学方岱宁院士 (中国力学学会副理事长) 担任共同主席. 本次大会展现了中国科学研究在力学领域的雄厚力量, 多数学者报告了近两年在国际前沿方向的研究成果.

本文于 2018-09-03 收稿.

1) E-mail: hlduan@pku.edu.cn

引用格式: 段慧玲, 曲绍兴, 施兴华等. 第十八届美国理论与应用力学大会总结. 力学学报, 2018, 50(5): 1266-1275

Duan Huiling, Qu Shaoxing, Shi Xinghua, et al. 18th U.S. National Congress of Theoretical and Applied Mechanics. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(5): 1266-1275

6 月 6 日上午, 中方代表方岱宁、翟婉明、段慧玲、詹世革、孟庆国、郭万林, 美方代表曲建民、Wing Kam Liu、Ravi-Chandar Krishnaswamy、Gareth H McKinley、Linda Franzoni、Ruth Hengst 出席了中美力学组织高层双边早餐会 (CSTAM-USNC/TAM VIP Breakfast Meeting), 讨论了中美进一步合作事宜. 6 月 7 日晚, 中方代表方岱宁、翟婉明、郭万林等, 美方代表曲建民、Wing Kam Liu、Jane Wang、Ravi-Chandar Krishnaswamy、Tom Pence、Kim Kyung-Suk、Ruth Hengst 出席了中美双边 VIP 招待会 (US-China VIP Reception), 双方就合作的可能性, 合作形式等展开讨论并达成一致: 认为本次大会是中美合作好的开始.

6 月 8 日晚, 中国力学学会副理事长方岱宁院士在大会晚宴上致辞, 表示中美双方将展开更深入密切的交流与合作.

本次大会为期 5 天, 采用主会场、分会场和专题研讨会三大板块相结合的学术交流形式, 会议包括 3 个大会报告, 9 个半大会报告, 72 个专题研讨会,

收录论文摘要 896 篇。3 个大会特邀报告邀请了美国现任国家工程院院长 C. D. Mote、休斯敦卫理公会研究中心主任 Mauro Ferrari 以及中国力学学会副理事长翟婉明。9 个半大会报告中有 3 位来自中国, 分别是中国科学技术大学陆夕云、清华大学冯西桥和北京大学唐少强。

本次大会中方组织或共同组织了固体力学分会场 14 个、软物质力学分会场 1 个, 生物力学分会场 5 个、相关专题研讨会 4 个。中方组织的固体、软物质和生物领域的分会场约占大会总体的三分之一, 吸引了相关领域著名学者的关注, 全面展示了中国力学工作者在以上领域的成果和进展。

流体力学领域共有 3 个流体力学分会场报告、9 个流体力学相关领域的专题研讨会。流体力学分会场分别邀请了 University of North Carolina 的 Boyce Griffith、中国科学技术大学陆夕云和美国 Los Alamos 国家实验室 Daniel Livescu 做邀请报告。

计算专题包含 14 个分会场, 内容涉及工程结构和材料破坏、地质力学、纳米材料、软材料和结构、近场动力学模拟、生物力学、反常扩散、多尺度多物理场的材料力学等新理论、新方法和新应用。中国计算力学相关专家学者积极参加并参与组织了其中的 6 个分会场以及固体和流体等大专题的有关分会。

动力学与控制专业委员会共组织连续介质的动力学、多体系统动力学、动力学的新进展及工业应用、工程系统中的动力学与控制等 4 个专题研讨会, 报告了动力学与控制领域最新的理论、计算和实验方面的研究成果。

另外, 为给高年级力学博士生及博士后提供职业发展各个方面的宝贵经验, 由中国力学学会和美国力学大会共同发起在此次大会组织“博士及博士后职业发展研讨会”, 由来自中美双方的 6 位青年学者担任研讨会组织者。研讨会邀请了来自国家实验室、高校和企业界领域的杰出学者和管理人员为正在和即将面临寻找工作和应聘职位的研究生和博士后提供咨询和帮助。中国在读研究生占了本次参会人员相当比例, 他们与国际专家面对面交流, 英语报告流利, 回答问题清楚, 展现了中国学生的良好风貌。

为给广大女性科研人员提供交流和拓展人际网络的机会, 中国力学学会和美国力学大会在大会期间发起了女性研究人员社交活动 (Women Re-

searchers' Networking Event)。世界计算力学学会女性协会 (IACM-FRC) 担任组织者、Springer 提供赞助。中国力学学会女科技工作者委员会副主任委员段慧玲和来自中国各大学与研究机构的多位女学者参加了此次活动。

2 大会主要内容介绍

2.1 大会特邀报告和半大会报告 (中方)

2.1.1 大会特邀报告

中国力学学会副理事长翟婉明做了题为“中国高速铁路动力学问题挑战”的特邀报告。近年来中国高速铁路发展迅猛, 取得了举世瞩目的成就, 同时也仍面临着诸多的工程与科学挑战。报告概要回顾了中国高速铁路的发展历程, 包括中国铁路六次提速进程和当前的高速铁路发展现状, 分别介绍了我国高速铁路快速发展过程中在设计施工与运营维护两个阶段面临的关键动力学问题与挑战, 重点结合其研究团队针对这些挑战所开展的工作及取得的最新进展, 并举例说明了在高速铁路工程中的实践效果, 充分展示了应用动力学理论解决动力学挑战性问题的思路和途径。

2.1.2 半大会报告

中国科学技术大学陆夕云的报告题目为“旋涡流动的模拟和分析”。报告首先介绍了自然界和工程流动中剪切过程、压缩过程和热力过程的多物理过程分解和耦合的一般理论框架, 以及上述多物理过程与主导全局流动特性的局部流动结构的内在关联。进而介绍了报告人提出的有界域涡量矩理论, 并结合数值模拟, 应用该理论方法研究了仿生拍动推进变形体的复杂旋涡结构与物体受力和功耗的关系。最后, 针对航空航天等工程中关注的激波、湍流和旋涡分离等共存的复杂流动问题, 介绍了运用上述多物理过程分解和耦合的理论方法, 研究获得的关于压缩、剪切和热力效应耦合作用引起的一系列流动机理和规律。

清华大学冯西桥的报告题目是“细胞群体动力学”, 他介绍了其研究组在细胞分裂、迁移等动力学行为方面的实验与理论研究成果。首先, 提出了一种细胞分裂的多尺度力学模型, 证明细胞分裂服从相应的力学法则, 而传统的几何方法难以解释细胞分裂的很多实验现象; 接着, 他提出了一种软组织形貌动力失稳的力-化-生耦合理论, 证明果蝇胚胎等组织的振荡行为是由于群体细胞力-生化信号的负反

馈机制造成的 Hopf 动力学分岔, 机械变形是激发其振荡的关键因素; 此外, 他还研究了细胞群体动力学方法在肿瘤等方面的应用.

北京大学唐少强的报告题目为“数据驱动的自洽聚类分析方法和虚拟聚类分析方法”, 报告介绍了新近提出的自洽聚类分析方法 (SCA) 和虚拟聚类分析方法 (VCA) 的数学框架, 它们可准确高效地对复合材料进行数值均匀化. 在线下步骤, 对代表性体积元进行少量的精细模拟计算, 利用其结果采用机器学习方法把精细的网格单元分类成若干个聚类; 接着在线上步骤, 对与控制微分方程等价的积分方程——Lippmann-Schwinger 方程, 在同一聚类的不同单元有着一致形变的假设下进行离散求解, 这样自由度大为减少, 计算复杂度大为降低. 对于一维问题, 严格证明了方法 (随着聚类数目增加时) 的收敛性; 二维问题的数值模拟结果表明方法准确有效.

2.2 分会场及专题研讨会报告

2.2.1 固体力学及软物质力学

本次大会, 中方组织或共同组织了软物质力学分会场 1 个, 固体力学分会场 14 个.

美国西北大学黄永刚做了题为“Mechanically-guided Deterministic 3D Assembly”的大会报告. 报告中, 黄永刚详细介绍了如何利用可控力学屈曲机制进行微尺度三维结构组装, 并利用此类微尺度三维结构组装新方法实现从二维微纳米薄膜到三维细微观结构的高精度组装, 进一步以半导体、金属、聚合物、塑料等各种材料类型为例展示该方法对不同特征尺度材料组装的应用效果, 最后介绍了该方法在生物医学器件、微机电系统、光电子器件和超材料等众多科技领域潜在的应用前景.

智能软材料与柔性结构力学 (Mechanics of Soft Materials and Structures) 研讨会由浙江大学曲绍兴、哈尔滨工业大学吕海宝、西安交通大学卢同庆共同组织的智能软材料与柔性结构力学 (Mechanics of Soft Materials and Structures) 分会场, 共有 18 位学者提交报告摘要. 内容涵盖了智能软材料制备、本构与失效、柔性结构与器件设计、制造等. 浙江大学曲绍兴课题组的尹腾昊做了《基于光子晶体和介电高弹体的柔性显示》报告, 哈尔滨工业大学刘延菊做了《介电高弹体热力学与失稳》的报告, 浙江大学曲绍兴课题组的陈哲做了《多自由度仿生柔性臂的设计与性能分析》报告, 西安交通大学唐敬达做了《韧性水凝胶》的报告, 中国工程物理研究院的刘太祥做了

《软磁敏颗粒增强复合材料及其三维微结构调控》的报告, 伊利诺伊大学芝加哥分校的 Martina Guidetti 做了题为“Fabrication of Transversely Isotropic Phantoms Replicating Skeletal Muscle Tissue and Viscoelastic Characterization through Magnetic Resonance Elastography”的报告, 浙江大学曲绍兴做了《智能软材料、软机器与力学》的报告, 北京大学 Hao Wu 做了题为“Passive and Active Triaxial Wall Mechanics in a Two-Layer Model of Porcine Coronary Artery”的报告, 美国海军研究实验室/Leidos 的 Wonmo Kang 做了《加速度引起的软材料空化的表征和模拟研究》的报告, 西安交通大学陈曦课题组的杨鹏飞做了题为“Abrupt Out-of-plane Edge Folding of A Circular Thin Plate: Bio-inspired Soft Actuators Driven by Instability”的报告, 西安交通大学卢同庆做了《软材料黏弹性与失效耦合模型》的报告.

压电器件与结构的力学与应用 (Mechanics and Applications of Piezoelectric Devices and Structures) 分会场由宁波大学王骥、南京航空航天大学高存法和钱征华等组织, 涵盖压电器件的波动特性等动态响应问题. 宁波大学 Guangying Yang 报告了《周期形式的极化锂铌铁结构中的表面声波特性》, 介绍了本领域的研究进展, 发现了弹性波在该系统中传播的一些新奇现象以及分析了相关原因, 在此基础上对该类结构的应用范围做出了相关展望. 宁波大学张爱兵报告了具有黏性流体穿孔梁的振动问题, 针对工程实际提出了相关模型, 分析了振动过程中的独特现象. 除此之外, 还有一些相关报告分散在其他会场. 法国里尔的电子、微电子及纳米技术研究院研究人员 Anne-Christine Hladky-Hennion 报告了电学控制压电声子晶体的可调与非互异问题. 美国西北大学 Horacio Espinosa 报告了在悬浮单层系统中压电材料的干涉测量识别问题. 美国弗吉尼亚理工学院 Davresh-Hasanyan 报告了叉指形电极振动过程中的优化问题及其在磁电与能量采集效应中的应用.

微纳米力学分会场 (Nano- and Micro-Mechanics) 由南京航空航天大学郭万林、华盛顿大学 Jiangyu Li、佐治亚理工 Ting Zhu、清华大学李群仰和上海大学张田忠组织. 郭万林做了题为“Physical Mechanics on the Edge”的学术报告, 阐述了在小尺度时纳米材料与块体材料性能的极大差异, 展示了如水滴在石墨烯上流动、水分蒸发产生电信号等新颖的物理现象, 给广大力学工作者在多学科交叉研究领域以极

大的启迪. 华盛顿大学 Jiangyu Li 做了题为“Scanning Probe Microscopy for Advanced Functional Materials: When Nanomechanics Meets “Big” Data”的报告,介绍了基于应变的扫描探针显微镜(s-SPM)的原理和优势,并展示了其在科研和工程领域的应用,如在电化学系统、生物结构材料等领域都可以测得灵敏度高的信号,并可以结合统计工具进行数据分析. 佐治亚理工的 Ting Zhu 做了题为“In Situ Nanomechanics: Integrating Atomistic Modeling and In Situ Experiment”的报告,介绍了新兴的原位纳米力学,并展示了他的研究团队在 BCC 纳米晶体中孪晶主导变形、硅纳米晶体的应力诱导固态非晶化等重要成果,以及正在进行的关于非均匀纳米结构和 3D 打印材料的纳米力学工作,展望了利用原位纳米力学充分实现材料潜在力学性能优势的美好前景. 匹兹堡大学 Scott Mao 做了题为“In Situ Mechanics at Atomic Scale- Experimental Molecular Dynamics”的报告,介绍了结合原位高分辨率透射电镜的实验分子动力学新方法,展示了该方法对纳米金属玻璃和体心立方金属晶体中高应变诱发的晶格扰动、位错偶极子成核、变形过程中滑移与孪晶的竞争等纳米尺度行为的研究成果. 马里兰大学的 Teng Li 做了题为“Rethink Wood: Its Unconventional Applications in Advanced Material Design”的报告,从力学、材料和环保的角度,对木材进行了重新思考和深入研究,展示了以木材为原料的轻质、高强新材料,为高性能、低成本、可持续发展的结构材料提供了一个前景广阔的解决方案.

辐照结构/材料力学研讨会由密歇根大学范悦与四川大学范海冬共同主持. 本研讨会由北京大学段慧玲、复旦大学丁淑荣、内布拉斯卡大学王健共同组织. 本会场设置 2 位邀请报告,分别是来自普度大学张星航与上海交通大学汪华苗. 两位分别就辐照环境下的纳米孪晶材料的力学性能和镁合金的应变率效应展开精彩报告,并就听众的多个问题耐心解答. 纳米孪晶材料是当前学界研究的热点,张星航课题组揭示了此材料在辐照环境下的重大用途,如孪晶界吸收辐照缺陷、辐照后良好的力学性能等,这对提高辐照环境下材料力学性能具有重要的应用前景,他的报告也得到了与会代表的好评. 此外,北京大学程洋洋、陈李嵘,四川大学范海冬,内布拉斯卡大学苏青,中国科技大学吴凤超汇报了辐照材料结构中的其他力学问题. 其中苏青汇报的纳米多层结

构材料,对提高金属材料的抗辐照性能具有重要的应用. 本次研讨会的报告来自中美多个课题组,研讨会的举办加强了各个课题组之间的交流,对辐照材料/结构力学研究具有良好的推动作用.

从原子到连续介质建模及界面变形表征分会场(Atomistic to Continuum Modeling and Characterization of Deformation at Interfaces)由北京理工大学陈少华和彭志龙组织,共有 10 位学者与会做口头报告,内容涵盖了表界面力学、仿生力学和物理力学的内容. 西安交通大学 Juzeng Song 报告了具有多级多孔结构的生物质材料对二氧化碳的吸附及脱附性能. 中国科学技术大学 Zezhou He 报告了轻量化高强铜纳米点阵结构的力学性能. 石家庄铁道大学张存报告了一种缺陷可控碳纳米管制备的新方法. 佐治亚理工学院魏遥驰报告了空洞对高聚物黏结炸药临界冲击点火的影响. 北京理工大学姚寅报告了其基于界面能密度函数提出的一种表征纳米材料界面效应的新理论;彭志龙报告了其课题组在仿生黏附力学方面的进展,研究了环境温度和相对湿度的耦合效应对壁虎黏附的影响. 湘潭大学马雯波报告了深海土颗粒与金属履带表面的黏附行为,主要考虑了表面粗糙度的影响. 伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校的 Bharath V. Raghavan 报告了连续性与热力学第二定律的矛盾. 弗吉尼亚理工大学的 Harmeet Singh 报告了材料对称性和守恒定律. 该分会场报告内容覆盖面广吸引了众多听众,并与作者进行了深入的讨论.

位错动力学模型的多尺度方法分会场(A Multi-Scale Perspective of Dislocation Dynamics Models)由清华大学柳占立、庄茁和华中科技大学李振环、黄敏生组织,共有 7 位学者做口头报告. 佛罗里达大学 Douglas Spearot 采用原子模拟的方法建立了离散位错动力学模型,报告了金属铝中的位错性质. 江苏科技大学的 Wei Zhao 报告了硅中 Shuffle 型 60° 位错对锂的稳定性和扩散的影响. 斯坦福大学的 Yifan Wang 报告了球谐函数法在求解球界面中应力的应用. 清华大学柳占立报告了通过发展的耦合位错滑移-攀爬模型研究亚微米金柱的高温退火硬化问题. 大连理工大学 Liqun Du 报告了应力释放几何对电畴金属微结构中降低残余应力的影响. 燕山大学的 Xiao Yang 报告了单壁二氧化锆纳米管的振动性质. 西北大学的 Zhaoxu Meng 报告了多层石墨烯和石墨烯增强聚合物基纳米复合材料的力学性质.

接触、摩擦、磨损和黏着分会场(Contact, Fric-

tion, Wear and Adhesion) 由北京交通大学柯燎亮和西南交通大学蒋晗组织, 共有 6 位学者与会作口头报告, 内容涵盖了利用理论分析、有限元模拟、仿真技术等方法研究的滑动、滚动、黏着接触以及热弹性接触问题. 布朗大学 Haneesh Kesari 课题组 Weilin Deng 报告了基于分子作用势研究固体黏着接触的有限元模拟方法, 并进一步研究了表面粗糙度对固体界面黏着强度的影响; 研究结果对利用表面粗糙度导致的微尺度接触失稳来设计具有较好黏着强度的界面具有一定指导意义. 北京交通大学王曦课题组侯宇报告了高速列车轴箱轴承内部打滑行为的仿真研究工作, 并提出一种基于应变响应的轴承内部打滑检测方法, 同时验证了该方法的可行性. 北京交通大学柯燎亮介绍了在功能梯度材料热弹性接触方面的研究进展. 主要目标是考查梯度指数和梯度变化的不同形式对摩擦热接触特性的影响, 研究如何利用梯度涂层来调节接触应力分布和表面温度分布, 改善热接触损伤, 实现材料表面抗热接触损伤的优化设计. 美国伊利诺伊大学的 Debashish Das 报告了有关聚合物纳米纤维材料的黏着接触问题. 匹兹堡大学的 Scott Mao 报告了利用原位透射电子显微镜研究原子尺度的黏着和去凝聚过程. 西北大学的 Linlin Sun 报告了非均匀材料在滚动和滑动联合作用下的弹塑性线接触问题.

工程材料的循环变形和疲劳行为分会场 (Cyclical Deformation and Fatigue Behavior of Engineering Materials) 由西南交通大学康国政和蒋晗、成都大学王清远、四川大学刘永杰共同组织, 与会者就循环变形及其疲劳失效行为的最新进展进行了汇报和交流. 西南交通大学陈义甫介绍了新发展的应力控制循环荷载作用下橡胶材料循环变形行为的大变形本构模型, 中国核动力研究设计院的田俊展示了温度相关循环塑性模型的有限元实现及其应用. 该分会场由于签证问题实际仅有 2 位学者进行了报告, 但仍吸引了 20 余位国内外同行前来聆听和交流.

固体多级构筑分会场 (Mechanical Design on Multiscale Architected Solids) 由佐治亚理工学院的朱廷, 西南交大的张旭, 北京大学的韦小丁, 中科院力学研究所的魏宇杰, 大连理工大学的阎军, 以及来自 Swiss Federal Institute of Technology 共同组织, 目前为 IJSS 副主编的 Dirk Mohr 等就固体材料的构筑方法、制备工艺、结构-性能关系、结构优化算法等方面的内容做了精彩报告, 与会学者就报告内容和

未来发展开展了深入交流和讨论.

柔性可延展电子器件力学分会场 (Mechanics of Flexible/Stretchable Electronics) 由清华大学冯雪和浙江大学吕朝锋共同组织, 共有 9 位学者与会做口头报告, 内容涵盖柔性电子器件的设计、制备、表征以及其生物医学应用. 清华大学张一慧报告了一种基于仿生设计的网络软结构, 并给出了其力学性能的预测模型. 浙江大学宋吉舟介绍了一种可拉伸电子器件和皮肤集成的热分析方法, 其课题组令狐昌鸿报告了由磁场控制的可调黏附强度的弹性体表面蚜虫仿生设计, 可用于转印技术中. 浙江大学吕朝锋课题组张阳阳报告了复杂激励条件下柔性压电俘能器件的能量收集和存储效率优化, 以及该类器件在生物微能量收集应用与生物组织环境的一体化优化设计方法. 清华大学马寅佳报告了一种可以提高蛇形导线可拉伸性的齿形衬底设计. 华中科技大学黄永安课题组肖琳报告了与非可展曲面共形的柔性可延展电子的岛桥结构设计. 卞敬报告了用于柔性电子的超薄聚合物膜的激光剥离制备方法. 美国西北大学黄永刚课题组厉侃报告了柔性电子的自组装三维螺旋互连网络设计. 薛烨光报告了力学建模在可穿戴微流控系统设计中重要作用.

相变固体材料多尺度和多场耦合力学行为及其理论表征分会场 (Multiscale and Multifield Coupled Mechanical Behavior of the Solid Materials With Phase Transition and Its Theoretical Characterization) 由西南交通大学康国政和阚前华、武汉大学孙庆平和吴文平共同组织, 其中共有 14 位学者对相变固体材料的多尺度和多场耦合力学行为进行了汇报和交流. 美国爱荷华州立大学的 Valery Levitas 做了题为 “Interaction between Phase Transformations and Large Plastic Deformations under High Pressure: Four-Scale Theory and Interpretation of Experiments” 的主题报告, 汇报了关于高压下相变与大塑性变形相互作用的实验和多尺度数值模拟研究. 此外, 美国爱荷华州立大学的 Mehdi Kamrani 介绍了未约束和准约束下的高压扭转装置及铝合金应力诱发 Alpha 到 Omega 相变行为, Hao Chen 采用分子动力学方法研究了理想和含缺陷 Si I 和 II 的相变行为; 西南交通大学王冰报告了循环变形过程中纳米多晶 NiTi 形状记忆合金超弹性行为的原子研究, 谢曦汇报了 NiTi 形状记忆合金循环变形的相场模拟研究结果, 李建介绍了新提出的温度诱发形状记忆聚氨酯的有限变形本构模型. 武

汉大学博士生聂凯报告了纳米尺度下 NiTi 形状记忆合金的能量配分问题, 陈俊余生报告了多晶 NiTi 形状记忆合金中晶粒尺寸对疲劳裂纹生长的影响; 香港科技大学的闫凯, 魏朋博, 华鹏和储康杰分别报告了激光冲击对纳米多晶 NiTi 抗疲劳性能的影响、纳米晶粒尺寸下梯度表面层 NiTi 板的疲劳性能研究、纳米多晶 NiTi 在微观尺度下的循环变形行为和冷轧 NiTi 形状记忆合金的 Elinvaric 行为. 会议期间, 参会者还就相变固体材料研究目前存在的问题和未来发展趋势进行了深入交流, 加深了中美学者在相变固体材料研究领域的相互了解.

微结构相场模拟研究进展分会场 (Advances in Phase Field Modeling of Microstructures) 由中国科学技术大学倪勇和浙江大学王杰共同组织, 共有 9 位学者与会作口头报告, 分别对材料微结构演化的相场模拟进行了汇报. 德国达姆施达特大学胥柏香报告了铁电材料相场模拟的研究进展, 分享了其课题组最近在铁电纳米颗粒中模拟到的新型微结构. 北京理工大学苏煜报告了钛酸钡陶瓷铁电特性的晶粒尺寸和电场频率的依赖性. 中国科学技术大学倪勇介绍了位错与非共面核结构交互作用的相场模拟, 其课题组博士生 Lige Chang 报告了任意形状弹塑性电极两相锂化的相场模拟. 浙江大学王杰报告了铁磁材料中斯格明子拓扑相变的相场模拟. 爱荷华大学 Valery Levitas 研究组的 Anup Basak 和 Hamed Babaei 分别介绍了多变量马氏体相变的相场模拟和包含位错的纳米结构演化的相场模拟. 最后, Brandon Runnels 报告了具有各向异性晶界迁移的相场模拟, Richard Magin 介绍了磁共振图像的扩散模型. 与会学者就不同材料微结构的相场模拟进行了深入交流和讨论, 分享了各自对相场模拟未来发展的思考.

2.2.2 流体力学

在流体力学领域, 共有 3 个流体力学分会场报告、9 个流体力学相关领域的专题研讨会.

流体力学分会场邀请报告情况如下: (1) 美国 Los Alamos 国家实验室 Daniel Livescu 做了题为“Turbulence with Large Density Variations”的报告, 介绍了在天体物理、海洋大气流动、燃烧、空气动力学及其关心约束聚变等领域存在的具有大密度变化特征的湍流问题, 系统讨论了湍流密度脉动与流体可压缩性和温度的关系. (2) University of North Carolina 的 Boyce Griffith 做了题为“Fluid-Structure Interaction: Methods, Models and Applications in Biology and

Medicine”的报告, 系统地介绍了基于 IBM(Immersed Boundary Method) 的流固耦合数值模拟方法及其软件, 展示了其在水生物游动、心血管流动等领域的应用. (3) 中国科学技术大学陆夕云做了题为“Simulation and Analysis of Vortical flows”的报告, 系统地介绍了多过程分裂与耦合的一般理论框架及其数值实现, 以及在不可压缩流动、跨音速流动、超音速流动和高超音速流动等方面的应用.

流体力学领域两个相对较为集中的专题研讨会的基本情况将被重点介绍.

海洋水动力学分会场 (Ocean Hydrodynamics) 由中国科学院力学研究所周济福、上海交通大学刘桦、中国科学院力学研究所王展共同组织, 共收到来自中美两国学者的报告摘要 15 篇. 但因中方部分人员未得到签证, 到会宣讲的报告共 9 个, 内容涉及内波、自由表面波、空化流动的实验和数值模拟方法, 以及内波、自由表面波与海洋工程结构的相互作用.

美国伊利诺伊大学香槟分校 Lixing Zhu 主要介绍了一种用于描述大振幅自由表面湍流的数值模型. 中科院力学研究所周济福介绍了利用数值模拟方法研究破碎波与高桩承台结构相互作用的工作, 揭示了破碎波对高桩承台结构的载荷特征. 上海交通大学刘桦报告了淹没、长平板在变化地形上波浪载荷的实验与理论分析研究工作. 中科院力学研究所王一伟主要介绍一种基于开源 OpenFOAM 建立的可压缩 CFD 方法, 并应用该方法研究包含水、空气和气泡的多相流动问题. 中科院力学研究所 Xu Wang 介绍了一种内孤立波的造波方法, 并分析了 SPAR 平台在内孤立波波列作用下的载荷特征. 北京交通大学 Bingchuan Nie 报告了一种海洋环流和波浪的耦合模型, 并将该模型应用于中国东南沿海的风暴潮研究. 上海交通大学 Qian Wang 报告了用于产生多个孤立波和波状水跃的实验水槽及其实验过程. 中科院力学研究所 Dalin Tan 介绍了一种改进的海洋密度剖面模型, 证明了其在不同海域和不同季节的普适性, 并应用该模型研究了内孤立波的分裂演化问题. 上海交通大学 Changhong Zhi 报告了应用谱方法来求解变系数的 meKdV 方程, 并以此来研究强色散内孤立波在变化地形下的演化过程.

液滴与气泡专题研讨会 (Drops and Bubbles) 由中国科学技术大学丁航、清华大学孙超和中科院力学研究所胡国庆共同组织. 专题研讨会最终有 12 个

高质量的展示报告,涉及与液滴和气泡相关的众多领域.在这 12 个报告中,有 10 个来自中国学者的报告,以及 2 个来自美国学者的报告.中国科学技术大学 Yang Zhu 和 Haoran Liu 分别展示了计算方法的发展和此计算方法在液滴碰撞动力学中的应用,讨论了相关的数值模拟技术.北京大学 Pengyu Lyu 报告了超疏水表面在水下时气液界面的稳定性问题.清华大学 Sijia Lyu 展示了 Leidenfrost 状态的悬浊液液滴的动力学问题.美国弗吉尼亚大学 Xiaolong Deng 展示了关于气泡流和相变的大尺度模拟,讨论了考虑压缩效应时气泡对声速的影响,以及相变过程的模拟.西安交通大学 M.-J. Thoraval 展示了液滴碰撞深水池时所捕捉的空气膜的收缩情况,给出了所捕捉的空气膜在碰撞过程中的动力学过程,并且分析了滞留空气膜的相图.美国密西根大学 Dale Karr 报告了关于悬挂液滴形状的理论计算,给出了一些非常有趣的演示实验.上海交通大学 Yang Zhang 展示了两个球形气泡在黏性流体中的合并现象,给出了自己的数值结果与实验的比较结果.清华大学 Gaoming Xiang 报告了由于激波引起的气泡变形过程的模拟结果.清华大学 Wangxia Wu 报告了高速液滴碰撞碰撞后激波的模拟结果.中国科学技术大学 Jingcun Fan 报告了关于三相接触区域的力平衡分析,讨论了极小尺度的接触角的情况.中科院力学研究所 Hongchen Li 报告了自由界面附近的气泡动力学问题,展示了气泡演变和界面附近射流形成的模拟结果.

2.2.3 动力学与控制

动力学与控制专业委员会共组织连续介质的动力学、多体系统动力学、动力学的新进展及工业应用、工程系统中的动力学与控制等 4 个专题研讨会,报告了动力学与控制领域最新的理论、计算和实验方面的研究成果.

连续介质的动力学专题研讨会共收到 9 份报告摘要,北京工业大学马莉、杨绍武、牛燕、吴美琦、刘亚泽、刘涛,国立台湾大学吴亦莊,河海大学沈仁杰,华中科技大学蒋天利等到会报告了研究成果.主要介绍了新型气动力下旋转叶片的非线性动力学,非经典边界条件下在轴向和径向载荷作用下碳纤维增强复合材料的非线性动力学,预扭转叶片的非线性动力学,双稳态复合材料结构的非线性动力学,双稳态压电材料板动力学的跳跃现象,两端覆膜复合材料圆柱壳的混沌动力学,基于高阶变形理论的

厚板的振动分析,基于高斯核函数和状态空间方法的广义阻尼模型描述,线性剪切错流作用下简支输流管道的动力学特性等方面的最新研究进展.

多体系统动力学专题研讨会共收到 21 份报告摘要,北京理工大学的 4 位学者以及来自美国伊利诺伊大学芝加哥分校的 5 位学者报告了最新研究进展.来自北京理工大学的田强、靳艳飞、孔伟振、王帅分别报告了多柔体系统的结构尺寸与拓扑优化问题,微重力环境下液体在柔性容器中的动力学行为,模块化拼装的天线展开动力学建模和索网找形分析,高斯白噪声激励下承受轴向载荷的非线性单稳态压电俘能器的随机响应和性能等方面的最新研究成果.

动力学的新进展及工业应用专题研讨会收到 18 份报告摘要,来自石家庄铁道大学杨绍普、司春棣、任剑莹,上海交通大学卫一民,南京航空航天大学王立峰,北京邮电大学孙晓娟,北京航空航天大学张丽媛,华中科技大学王梦月,北京航空航天大学樊登贵,南京林业大学陈宁,西安交通大学吴莹和北京邮电大学石霞等分别报告了基于可调 Q 因子小波变换的轴承性能退化评估,沥青路面的温度-渗流-应力耦合响应,基于 APDL 的车辆-曲桥系统动力学相应,碰撞振动系统能量吸收的三次非线性模型,预应力下石墨烯的热振动,噪声诱导的神经元网络的随机多共振,基于齿状回-CA3 神经回路计算模型的颞叶性癫痫的瞬态动力学,基于多宿主模型的弓形虫株病毒毒力演化,基于小世界拓扑空间扩展神经域模型的癫痫局灶性发作传播动力学,基于动力学理论的中医经络原理分析,被忽略的 γ -氨基丁酸能星形胶质细胞:钙离子动力学和在癫痫发作中的作用,具有时滞抑制性突触的神经元网络的节律动力学的最新研究成果.

工程系统中的动力学与控制专题研讨会共收到 9 份报告摘要,西安交通大学江俊、洪灵、孙亚辉,石家庄铁道大学的赵俊武,天津大学的丁千等 5 位学者分别报告了自激机制下的非线性模态及其在转子-定子碰摩系统响应预测中的应用,存在模糊不确定性的分段光滑转子-定子碰摩系统的隶属分布函数演化动力学,基于随机灵敏度函数法的噪声系统分叉临界条件,基于非线性三向耦合模型的重载车辆积分 ABS/ESP 控制,转子系统的弹性环形挤压油膜阻尼器的动力学特性分析等方面的最新研究成果.

2.2.4 生物力学

在生物力学领域,共有 5 个生物力学相关领域的专题研讨会。此次生物力学相关的研讨会体现出几大特点:(1) 报告内容都是最近 1~2 年的新的研究成果,而且都是处于国际前沿;(2) 报告人中有较多的博士生来自国内,他们英语报告流利,回答问题清楚,展现了国内学生很好的风貌;(3) 会场听众较多,气氛比较热烈。

在细胞与组织力学专题研讨会会场,来自浙江大学的季葆华做了主旨报告,介绍了细胞群体运动方面的实验与模拟工作。来自威斯康辛麦迪逊分校的 Maria Proestaki 介绍了细胞胶原纤维模量测试方面的工作。来自中国科技大学的杨月华介绍了细胞体积调节细胞粘附以及脱离基底方面的工作。来自达特茅斯学院的 Zi Chen 介绍了肩关节反向偏侧对肩胛骨骨折风险的影响。来自美国海军研究实验室的 Peter Matic 介绍了头盔垫的构形和冲击倾角效应对大脑动力响应的影响。来自浙江大学的陈彬介绍了细胞骨架网络刚度传感中力的分布方面的工作。

在细胞骨架力学专题研讨会会场,来自中国科技大学姜洪源课题组的李景辰介绍了形状不对称控制有丝分裂纺锤体尺寸的工作。来自香港大学林原课题组的 Xi Wei 介绍了交联分子的力-化学因素对细胞骨架流变响应的影响。Chao Fang 介绍了细胞膜起泡的理论方面的工作。Zishen Yan 介绍了非小细胞肺癌细胞筛选方面的工作。来自浙江大学钱劲课题组的 Bo Gong 介绍了分子马达对交联生物聚合物骨架力学响应的影响。Yanzhong Wang 介绍了细胞伪足中的力学问题。来自国家纳米科学中心的施兴华介绍了他们在纳米药物输运方面最新的研究进展。来自罗德岛州立大学的 Bahador Marzban 介绍了心肌细胞肌原纤维排列受应力调控方面的工作。

在细胞膜专题研讨会会场,来自北京大学的易新介绍了膜管尺寸效应方面的工作。来自布朗大学的 Guijin Zou 介绍了一维/二维纳米材料填充囊泡方面的工作。来自香港大学的 TH Hui 介绍了电渗操控跨细胞膜输运方面的工作。

在生物材料力学专题研讨会会场,来自香港理工大学的姚海民作了生物材料与结构力学方面的主旨报告, Yang Gao 做了受生物材料启发的层状材料的加强效应的报告。来自弗吉尼亚理工大学的 Ting Yang 介绍了海胆脊柱的力学行为。

2.2.5 计算力学

计算专题包含 14 个分会场,内容涉及工程结构和材料破坏、地质力学、纳米材料、软材料和结构、生物力学、反常扩散、多尺度多物理场的材料力学等问题的新理论、新方法和新应用。中国计算力学相关专家学者积极参加并参与组织了其中的 6 个分会以及固体和流体等大专题的有关分会。会议期间,中国计算力学领域的专家学者呈现了精彩的学术报告,展示了该领域取得的国际性、高水平的研究成果,吸引了众多专家学者的参与和关注。

在固体专题研讨会中与计算力学相关的分会中,中国力学学会前任理事长、中国科学院院士胡海岩课题组结合大连理工大学郭旭提出的 MMC 框架与绝对坐标分析方法,建立了具有大转动和大变形的柔性多体系统的三维拓扑优化高效设计算法,获得国内外众多学者的关注。大连理工大学亢战将拓扑优化方法应用到超材料的创新设计中,在手性负泊松比材料、带隙超材料和考虑加工不确定性的光子晶体等问题中得到了一些非常有指导意义的结果。大连理工大学阎军在材料-结构协同优化的框架下,得到了考虑热力行为的多尺度轻质结构。大连理工大学张维声利用自主提出的 MMV 优化方法,考虑了局部应力约束下的结构的拓扑优化问题,他们得到的设计具有显式的几何信息,无需后处理即可方便地导入 CAD/CAE 软件系统。这些均表明我国在考虑多物理场、多尺度结构设计、局部相应约束等方面的拓扑优化以及拓扑优化技术在超材料设计中的应用方面涌现出了许多优秀的学术成果。

近场动力学分会场 (Peridynamics-Modeling, Theory and Applications) 由北京大学王建祥和河海大学章青参与组织筹办,是本次大会中最为活跃的分会之一。来自中国、意大利和世界其他地区的学者济济一堂,共进行了 7 个单元的报告会。其中,近场动力学创始人 Silling 专程到会,报告了他的最新研究成果。参会者分别围绕近场动力学的理论、本构模型、数值模拟技术及应用等相关问题进行了报告,会场讨论热烈。与会专家学者一致认为,近场动力学在理论、模型、方法、应用等方面还有大量问题需要深入研究,积极开展深入的专门研讨和学术交流非常重要。本次会议对进一步加强近场动力学相关研究领域中美学术交流与合作,推动近场动力学方法的发展、拓展近场动力学的影响,起到了积极的作用。

分数阶微分方程: 实验、分析、算法和应用分会场 (Fractional Differential Equations: Experiments, Analyses, Algorithms and Applications) 由北京大学唐少强、河海大学孙洪广和肖锐副参与组织筹办, 属于力学的前沿方向之一, 涵盖了分数阶导数方程数值算法、力学建模和应用等领域的最新进展和学术成果. 特别是唐少强关于基于无网格的数值算法、孙洪广关于变导数方程建模与应用和蔡伟关于声学耗散分数阶导数建模方面的报告吸引了本领域及许多相关领域的学者, 引起了热烈的讨论, 推动了分数阶微分方程模型的发展、扩大了中国计算力学学者在该领域的学术影响力.

基于数值仿真的结构防灾减灾工程分会场 (Simulation-based Engineering for Structure Resilience to Disastrous Events) 由清华大学张雄和厦门大学王东东参与组织筹办, 举行了 3 个单元的报告会, 介绍了无网格法研究进展和新的研究方向, 并受到了大会共同主席美国西北大学 Wing Kam Liu 的特别关注 (并安排其课题组相关博士后全程参与了分会). 其中, 美国加州大学圣地亚哥分校的 Jiun-Shyan Chen 详细讲述了重构核质点法在数值计算稳定性、积分方法方面的研究成果以及在边坡失效和裂纹扩展方面的应用进展; 张雄系统地阐述了其课题组近年来在物质点无网格法所取得的研究成果, 并重点讲述了在超高速碰撞防护问题方面的研究进展; 王东东详细介绍了其提出的用于等几何结构振动分析中的超收敛计算方法等. 报告期间, 专家学者点评, 参会者积极提问, 会场讨论热烈, 并就相关算法细节进行了深入交流. 本次会议进一步展现了无网格法在求解涉及结构和材料破坏力学问题方面所具有的优势, 同时也指出了无网格法及相关算法存在的问题和进一步发展的方向. 在其他分会场中, 来自中国的计算力学专家学者呈现的精彩学术报告吸引了相关领域的学者的关注, 会场交流讨论热烈.

本次大会中来自各个研究领域的中国计算力学专家学者与国际同行在会议期间进行了深入细致的学术交流, 并建立了广泛的学术联系, 进一步增强了我国学者在计算力学领域的国际学术影响力. 此外, 值得一提的是此次参会人员中中青年专家学者多达 70%, 充分体现了我国计算力学学术领域的可持续发展态势. 会后, 部分与会专家学者合影留念, 以期共同合作努力进一步推动我国在计算力学领域的发展.

2.2.6 力学学科博士及博士后职业发展研讨会

为给高级力学博士生及博士后提供职业发展各个方面的宝贵经验, 由中国力学学会和美国力学大会共同发起在此次大会组织“博士及博士后职业发展研讨会”, 由来自中美双方的 6 位青年学者担任研讨会组织者, 包括清华大学张一慧、北京大学韦小丁、浙江大学钱劲、大连理工大学张维声、美国康列狄格大学 Ying Li、美国宾州州立大学 Allison Beese.

此次研讨会于 6 月 7 日举行, 邀请了来自学术界、工业界、国家实验室、初创公司等不同领域的 6 位资深学者/经理担任特邀嘉宾, 包括美国 Sandia 国家实验室固体力学部门经理 H. Eliot Fang, 美国 Caulfield Engineering 公司首席工程师 Mark Fleming, 美国 QuesTek Innovations 公司技术部门经理 James Saal, 美国圣路易斯华盛顿大学机械工程系 Guy M. Genin, 美国 Analyswift 公司的首席技术执行官 Wenbin Yu (同时任普渡大学航空航天系教授), 美国宾州州立大学工程科学与力学系 Sulin Zhang. 参加此次研讨会的有来自美、中等国的博士生及博士后共 80 余人, 其中多数为博士生. 研讨会中, 六位特邀嘉宾首先分别分享了各自的求职经历以及与职业发展相关的经验教训, 其中 H. Eliot Fang 和 Guy M. Genin 还专门准备了幻灯片介绍他们认为非常有价值的经验, 譬如 H. Eliot Fang 分享了一个简单的公式, 形象地说明了一个学者的职业成功很大程度上取决于教育 (Education)、创造力 (Creativity)、坚持 (Persistence) 和运气 (Luck). 之后, 到场的听众就如何准备面试、如何选择职业、如何选择研究方向、如何发表高水平论文、面试过程的常问问题等方面与特邀嘉宾进行了深入的交流. 研讨会现场气氛非常热烈, 多位与会听众表示收获很大.

2.3 其他

为给广大女性科研人员提供交流和拓展人际网络的机会, 中国力学学会和美国力学大会在 2018 中美力学大会期间发起了女性研究人员社交活动 (Women Researchers' Networking Event). 此次活动于 6 月 6 日举行, 世界计算力学学会女性协会 (IACM-FRC) 担任组织者、Springer 提供赞助. 中国力学学会女科技工作者委员会副主任委员段慧玲和来自中国各大学与研究机构的 21 位女学者参加了此次活动.

USNCTAM 组委会秘书 Linda Franzoni 和 Springer Nature 应用科学资深编辑 Silvia Schilgerius

致辞, IACM-FRC 主席 H Alicia Kim 介绍本次社交活动的目的和 IACM-FRC 的宗旨并主持此次活动. 活动在愉快的接待晚宴中开始, 与会者进行了热烈的交流和讨论.

交流活动以圆桌自由讨论的形式开展, 主要提出并讨论了 3 个问题 (但不限于): (1) 如何达到当前的职业阶段? (2) 如何保持工作与生活的平衡? (3) 研究环境中男女平等的定义是什么?

与会者一致认为: 从本科生到博士阶段过程中受到的良好的科研训练和技能是一名女性科研工作者成功的必经之路; 来自家庭的有力支持是女性研究者事业成功的基石, 能够使其从容面对挑战和困难; 努力的工作, 明确的目标, 良好的沟通技巧和承担风险的能力也有助于女性在竞争激烈的学术环境中取得成功.

讨论中还给出了一些关于女性如何平衡科研工作与家庭生活关系的实用建议, 如: 明确区分工作时间与业余时间, 信任朋友和家人, 多抽时间参加锻炼并保持饮食健康.

与会者还呼吁在国际会议上邀请更多女性大会报告人, 在科学、技术、工程与数学 (STEM) 领域应摒弃对性别差异的固有成见, 在学术成就上给予两性学者平等认可, 不再以性别评价研究成果, 在科研环境中, 两性学者应同工同酬, 享有平等的机会和资源.

此外, 还提出在学术会议期间为新生儿母亲提供日间托护服务、利用各种社交媒体为女性科研工作者建立交流群组等.

段慧玲向 Springer Nature 的 Silvia Schilgerius 和 H Alicia Kim 介绍了中国力学学会女科技工作者委员会的情况, 并代表中国女科技工作者邀请 Silvia Schilgerius 参加中国力学学会女科技工作者委员会 2019 年的交流活动.

3 结语

美国理论与应用力学大会 (US National Congress of Theoretical and Applied Mechanics) 是美国力学国家委员会 (U.S. National Committee on Theoretical and Applied Mechanics) 主办的四年一次的学术例会, 迄今已经举办了 17 届. 本次大会中国力学学会首次共同参与该系列学术会议的组织工作, 为中美力学工作者提供了很好的交流平台, 并为中美力学的交流与合作奠定了良好的基础.

本次大会, 中方组织的固体、软物质和生物领域等领域的分会场占了大会的近三分之一, 结合会议参会与报告情况, 我们得到以下结论: (1) 中国研究力量雄厚且在微纳米力学、超材料、智能软材料力学、细胞与组织力学等方向上处于国际前列水平; (2) 多数报告内容都是近两年的新的研究成果, 且处于国际前沿; (3) 参会人员中青年学者超半数; (4) 国内单位对于科研和国际交流的支持力度强大, 在国内组织的若干分会场上, 中国在读研究生占了参会人员的相当比例, 到国际会场上报告学术进展并与国际专家面对面交流, 对于研究生开阔视野及提升研究水平有重要作用, 为未来中国的力学研究队伍进一步提升质量提供了重要支撑. 此外, 该会议是中美首次联合举办大型力学会议, 会议取得了圆满成功.

本文对第十八届全美力学大会的内容进行概要总结与评述, 以便力学界同仁和读者了解本次大会和中美力学学科的发展. 更多内容请参见大会中英文网页 (<http://en.cstam.org.cn/usnctam2018/about-usnctam2018/>; <https://sites.northwestern.edu/usnctam2018/>). 由于大会内容十分丰富, 而本文篇幅有限, 加之作者难免有所疏忽, 内容不全面或不准确之处, 敬请谅解和指正.

致谢 在撰写该会议总结的过程中, 作者们得到了很多与会代表的大力帮助, 特此致谢.

doi: 10.6052/0459-1879-18-294