

# 超常环境力学领域研究新进展<sup>1)</sup>

## ——《力学学报》极端力学专题研讨会综述报告

姜宗林\* 刘俊丽<sup>†,2)</sup> 苑朝凯<sup>\*,3)</sup> 陈海璇<sup>†</sup> 陆夕云<sup>\*\*</sup>

\*(中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190)

<sup>†</sup>(《力学学报》编辑部, 北京 100190)

<sup>\*\*</sup>(中国科学技术大学近代力学系, 合肥 230027)

**摘要** 介绍了超常环境力学领域的相关研究背景, 综述了《力学学报》极端力学专题研讨会的学术报告与前沿问题研讨. 以极端力学关注的学科问题为视点, 聚焦深海、深空、超高温、超高速等具有国家重大需求背景的研究方向, 分别介绍了超常环境力学领域的重要成果与最新研究进展. 通过这次会议, 《力学学报》编辑部努力探索一种新的学术交流模式, 能够及时将前沿性、基础性的学术成果传递给相关领域的科研人员, 从而对相关领域的工程技术研发起到支撑作用. 还对会议涉及的研究领域进行总结, 期望能促进超常环境力学领域的研究与交流.

**关键词** 极端力学, 力学学报, 超常环境力学领域, 研究进展, 研究展望

中图分类号: O35 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-20-442

## NEW PROGRESS IN THE FIELD OF EXTRAORDINARY ENVIRONMENTAL MECHANICS — REVIEW OF THE CHINESE JOURNAL OF THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS SYMPOSIUM ON EXTREME MECHANICS<sup>1)</sup>

Jiang Zonglin\* Liu Junli<sup>†,2)</sup> Yuan Chaokai<sup>\*,3)</sup> Chen Haixuan<sup>†</sup> Lu Xiyun<sup>\*\*</sup>

\*(State Key Laboratory of High-Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>†</sup>(Periodical Publishing House of Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Beijing 100190, China)

<sup>\*\*</sup>(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract** This article introduces the background knowledge of extraordinary environmental mechanics and reviews the frontier progress in the field of extreme mechanics that was reported on the Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics (CJTAM) symposium. This article focuses on research directions that are critical for the national security, such as the deep sea, deep space and high temperature and hypersonic flow, and introduces the significant achievements

2020-12-21 收稿, 2020-12-28 录用, 2020-12-30 网络版发表.

1) 中国科学院科学出版基金中文科技期刊择优支持项目资助.

2) 刘俊丽, 编审, 主要研究方向: 力学期刊编辑出版工作. E-mail: liujunli@cstam.org.cn

3) 苑朝凯, 高级工程师, 研究方向: 高超声速测量技术. E-mail: yuanck@imech.ac.cn

**引用格式:** 姜宗林, 刘俊丽, 苑朝凯, 陈海璇, 陆夕云. 超常环境力学领域研究新进展 ——《力学学报》极端力学专题研讨会综述报告. 力学学报, 2021, 53(2): 589-599  
Jiang Zonglin, Liu Junli, Yuan Chaokai, Chen Haixuan, Lu Xiyun. New progress in the field of extraordinary environmental mechanics — Review of the Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics symposium on extreme mechanics. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(2): 589-599

and the latest research progress in the field of extraordinary environmental mechanics. Through this conference, the editorial department of CJTAM is exploring a new communication mode, which can timely convey the cutting-edge and groundbreaking achievements to researchers, thus supporting the research and development in related engineering and technology fields. This article also summarizes the research fields involved in the symposium, hoping to promote research and communication within the field of extraordinary environmental mechanics.

**Key words** extreme mechanics, Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, field of extraordinary environmental mechanics, research progress, research prospects

## 1 领域背景与会议概况

进入 21 世纪以来,伴随着科学技术和国民经济的快速发展,力学学科进入了一个新的发展时期,在研究的广度和深度上都发生了深刻的变化,与重大需求协同发展成为当前力学发展的基本趋势.随着力学与重大工程的结合越来越紧密,尖端技术发展使得力学系统部分或整体面临超高温、超高速、超高压、深海和深空等超常服役环境,涉及到了物理、化学、微尺度和超大结构等多过程耦合与多学科交叉问题,表现出以非平衡、非线性、多尺度的力学行为.根据超常环境下极端力学的学科特征,配合新时期“上天、入地、下海”的国家工程技术发展需求,积极开展极端力学领域新问题、新现象、新规律和新理论的研究,为国民经济的可持续发展提供坚实的科学支撑,就具有非常重大的意义.

2020 年 11 月 7~8 日,超常环境力学领域学术报告会暨《力学学报》(中英文版)极端力学专题研讨会在中国科学院力学研究所召开.本次会议由中国科学院力学研究所主办,中国科学院复杂系统力学卓越创新中心(以下简称卓越中心)、《Acta Mechanica Sinica》及《力学学报》共同承办.《力学学报》主编、中国科学技术大学陆夕云院士担任会议主席,《力学学报》副主编、中国科学院力学研究所姜宗林研究员担任会议执行主席.中国科学院力学研究所李家春院士,中国力学学会副监事长、中国科学院力学研究所副所长魏炳忱研究员,卓越中心主任魏宇杰研究员,中国科学技术大学副校长罗喜胜教授,中国科学院大学工学院副院长倪明玖教授等出席了此次会议.本次会议采用线上与线下相结合的方式开展,参会人数共计 130 余人.

会议开幕式由姜宗林研究员主持,李家春院士、魏炳忱副所长分别为本次会议致辞.李家春院士在致辞中强调,本次会议不仅展示了复杂系统力学卓越

中心的中青年团队近期研究的新进展,而且通过这种会议与《力学学报》紧密结合的新模式,也有利于创新成果在力学界的传播与交流.魏炳忱副所长在致辞中肯定了卓越中心发展的关键时期,围绕极端力学专题,召开此次会议的重要性.强调了这次会议既是对卓越中心前阶段所取得成果的总结,也是对其未来所开展工作的规划.姜宗林研究员介绍道,这次会议的名称为《超常环境力学领域学术报告会暨《力学学报》(中英文版)极端力学专题研讨会》,其中包含三个意思.第一是中国科学院复杂系统力学卓越创新中心超常环境力学领域的年度学术报告会,主要目的是总结研究进展,强化学术交流、谋划协调发展,以推动超常环境力学领域的研究进展.第二是响应郑晓静院士关于极端力学的倡导.极端力学就像一面旗帜,让国内学术界对力学的范畴有更简洁、明确和深刻的认识.极端力学来自于超常环境服役,相对传统力学有新现象、新规律、甚至新的本构方程,是力学领域的学科前沿.极端力学是由郑晓静院士在 2019 年提出的,她将极端力学定义为“研究物质在极端服役条件下的极端性能和响应规律”<sup>[1]</sup>,极端力学作为新的学科发展方向已被列入科技部中长期发展规划.第三是通过此次专题研讨会,探讨学报和会议合作的新模式,为《力学学报》(中英文版)提供一些高质量的学术文章,增加《力学学报》的展示度,同时鼓励、推动超常环境领域的力学研究.

会议根据深海、深空、高温、高速等方向的研究进展,安排了 15 个学术报告,分 4 个时段进行,分别由罗喜胜教授、高福平研究员、康琦研究员和周济福研究员担任会议主持,展示了超常环境领域的最新进展.

## 2 深海方向的研究进展

深海作为人类生存与发展战略的新疆域,关系

生命起源、气候变化、地球演化、能源开发等重大科学问题, 另外深海空间的巨大资源潜力和环境服务价值日益受到关注, 所以深海开发是中国及世界海洋大国应对全球战略格局调整和引领新一轮经济转型发展的重大举措, 相关力学问题的研究需要予以高度重视。

## 2.1 南海深水区表层沉积物的物理和力学特性

深水海底管道结构稳定性面临着超常的油气输运工况、水动力环境以及海床沉积条件带来的挑战, 表现为: (1) 海底管道在深水海域处于高温高压的超常输运环境, 结构热屈曲成为主要的失稳模式之一。对于长输管道而言, 在位失稳、涡激振动、结构热屈曲等多种失稳模式共存且相互竞争。(2) 在浅水海域, 波浪和海流是主要的环境载荷; 随着水深增加, 海面重力波浪对海底的影响逐渐减弱, 海底洋流和浊流成为主要的水动力荷载。(3) 有机质软黏土和粉土是中国南海深水区的主要沉积物类型, 但人们对其物理和力学特性的认识尚不够深入。

高福平研究员以“南海深水区表层沉积物的物理和力学特性”为题, 介绍了相关前期研究工作, 包括推导出的预测海底管道地基极限承载力的塑性滑移线场理论<sup>[2]</sup>; 基于相似理论和水槽实验观测, 探究了管道在升速和降速海流作用过程中的涡激振动迟滞效应及影响规律<sup>[3]</sup>; 揭示了海底管道在砂质海床上发生侧向失稳的流固耦合机理<sup>[4]</sup>, 并发现管道侧向失稳与土体渗透破坏诱发管道悬空之间存在竞争机制<sup>[5]</sup>。高福平研究员重点论述了两个方面的最新研究进展:

(1) 针对中国南海北部海域某深水区采集的海床表层沉积物柱状样, 进行了微观物理和宏观力学性质分析, 确定了沉积物的主要化学成分。研究表明该深水区沉积物多为有机质软黏土, 具有高微生物含量、高孔隙率、超低强度等典型特性, 却通常表现出超固结土的特征。

(2) 基于管道结构热屈曲经典解析模型和可靠度理论, 通过蒙特卡洛模拟开展了管道侧向整体屈曲的可靠度分析。分析发现, 管土轴向摩阻的变异性可增大管道轴向走管概率; 当管土轴向摩阻满足正态分布时, 管道在大陆坡斜坡海床条件下的走管速度呈非对称概率分布, 其变异系数高于轴向摩阻的变异

系数。管道发生侧向热屈曲的临界温度、屈曲波长、侧向位移幅值及截面压应力的变异性均小于管土侧向临界阻力的变异性。基于确定性分析方法设计的海底管道依然面临高概率的结构屈曲风险。

## 2.2 深海资源提升系统的流固耦合研究

深海资源开发是解决能源问题的一个重要领域, 深海资源提升系统是深海开发的必备工程结构, 其运行安全可靠涉及深海水动力环境、大长径比结构及其与复杂内外流的相互作用, 包括: 大幅内孤立波发生演化规律及其对结构的水动力载荷、粗颗粒固液两相内流运动规律及其对结构的作用力、外流结构内流的流固耦合机理等。

周济福研究员以“深海资源提升系统的流固耦合研究”为题, 介绍了相关前期研究工作, 包括建立了内孤立波在真实海洋环境中传播演化的理论和数值模型, 研究了海洋内孤立波的分裂演化规律及其对柔性构件的作用机理, 重点关注了立管和半潜平台在内孤立波作用下的动力响应<sup>[6-8]</sup>。并且基于含内流立管振动方程和半经验水动力模型, 研究了不同内流速度和密度对顶张力立管涡激振动响应的影响规律<sup>[9]</sup>。周济福研究员进一步论述了 3 个方面的最新研究进展:

(1) 考虑真实海洋环境, 开展了南海内孤立波波幅演化规律的研究, 提出了定量刻画浅化效应和摩擦效应相对重要性的无量纲参数, 可以很好地表征内孤立波波幅演化与地形变化的关系, 据此可判断南海不同区域内孤立波波幅变化的规律。

(2) 建立了顶张力立管和悬链线立管在内孤立波作用下的有限元模型, 研究了两种立管的动力响应特征及立管的最大位移和最大弯矩的影响因素。

(3) 针对大长细比顶张式海洋立管, 基于含内流立管振动控制方程和半经验时域水动力模型, 研究了均匀和剪切外流作用下含稳定内流的顶张力海洋立管的涡激振动响应, 获得了内流速度和密度对立管涡激振动响应参数的影响规律。

## 2.3 深海天然气水合物分解引地层安全性研究

深海天然气水合物是我国的战略能源, 赋存于海底大陆坡浅层欠固结的地层。水合物开发与常规油气的本质区别在于相变, 开采不当极易引起土层

软化与超压形成, 导致地层与结构破坏, 甚至海底滑塌、甲烷泄漏等灾害. 岩土破坏、结构失稳机制研究包含水合物、土、气体和水多相, 涉及相变、传热、渗流、地层应力传播多效应耦合.

张旭辉副研究员以“深海天然气水合物分解引地层安全性研究”为题, 介绍了相关前期研究工作, 获得了中国南海水合物相变土层响应分析的力学参数及本构模型<sup>[10]</sup>, 并在实验室发现了土层分层、气体喷发、土层滑塌的地层破坏现象, 发现了含相变热传导、渗流、地层应力传播 4 种物理效应的特征时间相差 3 个数量级以上, 提出了解耦分析方法, 建立了基于多重时间尺度的简化分析模型, 给出了破坏发生的临界条件<sup>[11-12]</sup>, 回答了深海浅层水合物开发这些灾害什么条件发生及如何防范的问题. 张旭辉副研究员重点论述了两个方面的最新研究进展:

(1) 考虑宏微观的含相变岩土力学本构模型, 揭示天然气水合物相变与土体骨架的微观作用机制并建立相应的本构关系模型, 获得相变、裂隙开裂扩展等过程的流固耦合机制<sup>[13-14]</sup>.

(2) 深入阐明多孔介质中相变、热传导、多相渗流、地层变形与破坏相互作用机制, 揭示从实验室尺度、工程尺度到区域尺度土层变形、失稳的关联以及固体破坏向多相流动的发展规律, 紧密结合现场试采及商业化开发工程, 为天然气水合物开发安全与环境保护提供理论依据.

### 3 深空方向的研究进展

在深空探索领域, 微重力流体物理是一个基础性和应用性都很强的研究方向. 微重力流体物理关注微重力条件下流体流动的物理现象, 探索空间环境中流体的宏观、微观运动, 扩散过程及传热、传质的基本规律. “天宫二号”任务搭载液桥热毛细对流实验, 对空间环境流体的流动和耗散机理进行更深入的基础研究, 对人类认识和掌握空间流体的运动规律有重要意义.

#### 3.1 空间热对流转捩

热对流是自然界中最常见的自然对流, 地面热对流以浮力驱动流为主导, 空间热对流主要以表面张力驱动流为主导. 微重力环境是典型的超常环境, 应用空间热对流开展流动转捩问题研究, 作用力的

改变延展了层流到湍流转捩的时空尺度, 可以观测新现象、发现新问题、探索新规律, 拓展通向湍流过程的研究, 实现从机制到机理的认识.

康琦研究员以“空间热对流转捩”为题, 介绍了相关前期在“实践十号”(SJ-10) 返回式科学实验卫星上开展的环状流空间实验<sup>[15-16]</sup>, 以及在载人航天“天宫二号”(TG-2) 飞船上开展的液桥热对流空间实验<sup>[17-18]</sup>. 康琦研究员报告了 3 个方面的研究进展:

(1) 空间实验验证了空间热对流临界条件的体积比效应, 发现了几何参数新效应及多次转捩新机制;

(2) 探索了流动模式转换及热流体波的竞争与传播规律, 给出波的转换图谱;

(3) 分析了热毛细流动体系通向混沌的分岔道路, 包括准周期、拍现象、锁频、倍周期、阵发性、倒分岔、以及各种丰富的耦合分岔.

#### 3.2 微(低)重力环境下的沸腾传热及其重力标度规律

沸腾过程因相变潜热的释放有着极强的传热能力, 是广泛存在于日常生活并应用于工业过程中的一种高效热传输方式和技术. 沸腾过程中, 液气相变、相间作用、湍流等因素与过程紧密间耦合, 导致相应流动和传热现象极为复杂, 迄今沸腾传热理论仍不免存在显著的经验特色, 且往往基于地面常重力环境实验结果, 无法将重力作为独立变量进行控制和比较研究. 利用微重力环境将重力隔离, 探究重力在沸腾过程中的作用机制, 并寻求对重力效应的正确表征, 是目前微重力科学研究的重要前沿和热点之一.

赵建福研究员以“微(低)重力环境下的沸腾传热及其重力标度规律”为题, 介绍了相关前期利用中国第 22 颗返回式卫星、“实践八号”(SJ-8) 卫星、“实践十号”(SJ-10) 卫星以及北京落塔等, 开展的多个系列微重力池沸腾传热实验研究<sup>[19-20]</sup>, 并分别基于连续介质模型和格子玻尔兹曼(Lattice-Boltzmann)方法, 开展了沸腾传热数值模拟<sup>[21-22]</sup>. 系统梳理了核态池沸腾传热重力标度规律中不同形式的重力标度指数的物理意义, 为构建适用性广泛的重力标度模型提供了一个明晰的理论框架<sup>[23]</sup>. 赵建福研究员进一步论述了两个方面的研究进展:

(1) 微重力和常重力条件下丝状、光滑平板和方柱微结构表面沸腾传热与气泡动力学行为实验数据揭示了重力水平、系统压力、液体过冷度等因素对

沸腾过程的影响, 采用局部过热激发形成时空定位准确的微重力单气泡沸腾过程, 测量得到的气泡生长过程及气泡底部加热面温度场演化为进一步研究提供了可靠基准。

(2) 数值模拟了不同重力条件下核态池沸腾传热及生长气泡动力学特性, 确认在低热流密度条件下存在分别由重力或表面张力主导的沸腾区, 得到相应的分区判据; 在重力主导的沸腾区, 传热系数的重力标度指数接近 Rohsenow 关联式的预测结果, 气泡脱落直径及其脱落频率分别与 Fritz 模型及 Malenkov 模型相符。

### 3.3 蒸发液滴中的物质输运动力学与粒子组装行为

在空间制造过程中, 尤其是基于功能墨水材料的太空打印, 面临微重力下复杂的固-液界面相互作用规律, 例如复杂流体的界面撞击、润湿、铺展及流动控制问题, 这直接决定了打印质量和精度。另外, 墨水材料的固化成型与打印结构的功能及性能高度关联, 而这又与微重力下复杂流体的物质输运动力学, 非平衡相变过程及自组装行为密切相关。

王育人研究员以“蒸发液滴中的物质输运动力学与粒子组装行为”为题, 介绍了相关前期研究工作, 包括针对太空打印中的界面流动控制和蒸发固化成型问题, 基于“实践十号”卫星开展了天地实验研究<sup>[24]</sup>, 科学上突破了蒸发液滴中多物理效应协同和竞争下的粒子输运动力学与组装行为<sup>[25]</sup>, 实现基于单个液滴的图案形貌调控与有序结构构筑<sup>[26]</sup>, 技术上实现了微重力环境下基于图案化浸润性表面的液滴操控与复杂流体在轨管理<sup>[27]</sup>。王育人研究员汇报了 3 个方面的最新研究进展:

(1) 阐明了多物理效应(界面运动、重力沉降与毛细流动)协同下的粒子输运动力学, 揭示了蒸发去浸润效应驱动的“咖啡环”内部网络状图案的形成机制。

(2) 基于单液滴体系开展图案调控与有序结构构筑, 通过液体基底实现均匀有序结构的组装和制备, 通过微纳多孔基底实现大尺寸有序结构的快速制备。

(3) 首次基于图案化浸润表面实现液滴的空间操控验证, 揭示了微重力下图案化表面的液滴形状演化规律与浸润行为, 表明超浸润图案化技术对大尺寸液滴具有优越的钉扎及控制能力。

## 4 高温与高超声速方向的研究进展

高温与高超声速流动是气体动力学的前沿学科, 重点关注高速气体流动中, 高温所引起的气体各种物理化学变化、能量传递和转化规律。高温与高超声速气体动力学的主要特征是: 气体比热不再是常数, 在很多情况下, 完全气体状态方程不再适用; 流动中的传热、扩散、化学反应、电磁和辐射效应显著, 不能忽略; 该学科是气体动力学、热力学、统计物理、分子物理、化学动力学以及电磁学的交叉融合。该研究方向重点探索在高超声速气体流动中, 气体分子内部各种能级的激发和电离、离解、化学反应等物理化学变化的规律以及伴随有这些变化的能量转移和热量传递规律。

### 4.1 极端环境下液态锂铅包层研究进展

磁约束核聚变堆液态锂铅包层数值模拟面临的关键问题主要包括: (1) 极端条件下(强磁场、大温差), 数值方法及计算平台的发展, 需保证聚变环境极端条件下液态金属磁流体力学的精确高效求解; (2) 极端条件下完整包层模块内液态金属湍流的直接数值模拟。实际液态包层结构非常复杂, 包含了突扩管道、分流管道、90°弯管、U型通道以及突缩管道等部件, 同时入口速度高、体积热源大、约束磁场强, 因此其中的流动机制非常丰富, 内在机理非常复杂, 而先进液态包层的流道插件进一步增加了结构及流动的复杂性。对全尺寸包层模块进行直接数值模拟是一项极具挑战的工作, 目前国内外尚无先例。

倪明玖教授以“极端环境下液态锂铅包层研究进展”为题, 介绍了相关前期研究工作, 包括发展了精确计算强磁场作用下 MHD 的相容守恒格式<sup>[28]</sup>, 完成了软件平台 MHD-UCAS 的搭建, 此平台能实现“磁-热-流-固”多区域多物理场的精确耦合求解, 并行效率高。基于该平台, 以液态锂铅包层为背景, 分析了流道插件对于竖直管道(包层部件)内压降、温度、结构应力应变的影响<sup>[29]</sup>。在国际上首次实现了  $Ha$  约为  $10^4$ ,  $Re$  约为  $10^5$  完整液态包层模块内磁流体运动的直接数值模拟, 着重分析了流道插件对于压力分布, 流量分布的影响<sup>[30]</sup>。

倪明玖教授重点论述了对磁约束聚变堆极端条件下 ( $Ha$  约为  $10^4$ ,  $Gr$  约为  $10^{11}$ ,  $Re$  约为  $10^5$ ) 液态包层全尺寸热流问题分析, 结果表明: 绝缘壁情况下,

拐角位置存在死区, 温度偏高, 存在安全风险;  $Gr$  增大, 锂铅流体最大平均出口温度变化不大, 但死区的最大温度升高;  $Gr$  增大, 进出口压力降相应增大, 主要原因在于竖直管道的压力梯度增加, 因此竖直管道内的压降不可再通过无浮力情况下的理论公式进行预测;  $Gr$  增大, 竖直管道内的流量分布更加均匀; 相同参数下, 绝缘壁面条件下的流动比导电壁面条件容易失稳.

#### 4.2 高温非平衡流动的高精度模拟探索

高超声速流动在头激波压缩后常处于高温条件下的热化学非平衡状态, 准确描述流动过程需要刻画流场中气体分子的详细内能状态及精细的热化学过程, 而传统的热化学模型没有涉及内能状态的非平衡分布, 难以普适有效地预测高超声速热化学流动, 如何高效又准确地预测热化学非平衡状态是目前高超声速流动的一个关键问题.

孙泉华研究员以“高温非平衡流动的高精度模拟探索”为题, 介绍了相关前期研究工作, 包括发现了 NS 方程的降维模型可以高效准确地复现 NS 方程在高超声速驻点线的流动<sup>[31]</sup>, 而双温度模型与精细的态态方法在宏观流场预测上存在明显差别<sup>[32]</sup>, 且流动的非平衡状态与流场位置有关, 因而精细热化学模型对高超声速流动的精确预测至关重要. 孙泉华研究员重点论述了 4 个方面的研究进展:

(1) 拓展了高超声速驻点线模型, 经过多途径评估发现, 模型可完美复现全流场模拟在驻点线上的流动状态;

(2) 发展了分子振动和电子态的态态模拟技术, 包括计算给出了相关态态反应的反应速率数据;

(3) 模拟了 NASA EAST 激波管实验的典型状态, 计算的辐射结果与实验数据吻合良好;

(4) 首次给出了空气在高超声速绕流问题的态态模拟结果, 计算包含 157 个内能状态和 15 201 个态态反应, 揭示了驻点线上的详细热化学非平衡过程.

#### 4.3 复杂界面流动实验及机理研究

核聚变能源、航空发动机等已成为世界主要国家争夺的科技制高点, 存在着极端的物理条件和苛刻的实现方法, 受到广泛关注. 在这些重大工程中, 激波诱导高速界面流动是共性难题, 具有复杂的多尺度、多过程、强非线性等特征. 认识其中的物理过

程和规律, 解决其中所涉及的关键科学问题, 将为实际工程提供基础数据支撑.

司廷教授以“复杂界面流动实验及机理研究”为题, 介绍了前期相关研究工作, 包括围绕激波诱导界面流动时空演化和流动机理开展了丰富的实验研究, 自主研制了先进的激波管设备, 实验研究了初始界面结构(单模到多模、二维到三维等)及激波形状(平面到汇聚、发散等)对扰动增长的影响规律<sup>[33-37]</sup>, 结合理论分析和数值模拟, 揭示了曲率效应、汇聚效应、Rayleigh-Taylor 效应、模态竞争及界面耦合等复杂界面流动的内在机理. 司廷教授重点论述了两个方面的研究进展:

(1) 在基础实验研究方面, 提出了基于激波动力学理论壁面设计的汇聚激波生成新方法, 研制出竖直无膜环形激波管等新设备; 发展了不同形状初始气体界面产生技术, 实现了激波诱导界面不稳定过程实验观测; 获得了不同形状激波及反射激波作用下流体界面的时空演化特征, 揭示了界面扰动的增长规律和界面失稳全过程.

(2) 在流动机理研究方面, 通过不稳定性理论分析证明了界面上相反主曲率会抑制不稳定性的扰动增长; 研究了二维和三维初始界面的模态竞争及界面耦合, 结合旋涡动力学和激波理论, 获得了激波聚焦形成气体射流、界面扰动的线性和非线性发展规律; 在汇聚激波条件下推导了界面扰动增长方程, 发现了汇聚激波作用下界面扰动振幅的提前衰减, 揭示了汇聚效应、Rayleigh-Taylor 效应等的作用机制.

#### 4.4 JF-12 复现风洞高马赫数超燃冲压发动机实验

在高超声速吸气式发动机常规风洞试验中, 燃烧加热试验来流含有大量  $H_2O$ ,  $CO_2$  以及污染气体成分, 形成发动机进气道、燃烧室燃料点火和燃烧特性的污染气体效应, 造成风洞试验数据的天地一致性差异. 此外, 超声速气流中的燃烧振荡现象和机理未充分研究和认识, 吸气式发动机稳定工作边界尚不清楚.

王春研究员以“JF-12 风洞高马赫数超燃冲压发动机实验”为题, 介绍了相关前期研究工作, 包括利用激波管实验开展了超声速燃烧机理研究, 明晰了超声速燃烧本质上是超声速气流中的火焰传播现象<sup>[38]</sup>. 此外, 在燃烧直联风洞开展了  $Ma = 5 \sim 7$  碳氢燃料双燃式超燃冲压发动机原理试验验证<sup>[39]</sup>, 提出了强

化超声速混合和燃烧的新型三维壁面凹腔火焰稳定器技术<sup>[40]</sup>。王春研究员重点论述了 3 个方面的研究进展:

(1) 通过引入理想尾喷管概念, 提出一种基于推力势函数的发动机内流推阻性能评估方法, 能够综合考虑发动机内流燃料释热和总压损失影响, 评估超声速燃烧室或超燃冲压发动机半模模型的性能。应用该方法, 发现超声速燃烧室的污染气体效应会在一定程度上高估发动机推力, 且随污染气体比例增大更加严重。

(2) 在 JF-12 复现风洞首次实验上观察到超燃冲压发动机燃烧不稳定性形成的发动机“喘振”现象。基于化学反应流激波动力学, 提出激波/化学反应耦合作用的振荡器理论。

(3) 利用 JF-12 复现风洞实验条件, 提出高马赫数 ( $Ma = 10$ ) 超燃冲压发动机双突扩燃烧室设计技术, 同时解决了激波风洞毫秒级燃料同步难点技术问题, 国内首次成功实现了  $Ma = 10$  高马赫数超燃冲压发动机模型地面试验。

#### 4.5 聚变堆高温环境下第一壁抗热疲劳与冲击关键技术研究

聚变堆极端热环境条件下, 偏滤器及包层第一壁作为直接面向等离子体的关键部件, 正常运行时需要承受周期性高热载荷与其他复杂荷载的耦合作用, 严重影响第一壁的服役性能与使用寿命。目前国内外的相关研究不足, 缺乏专用的实验平台和在线观测技术, 多场耦合的损伤演化一体化理论评估方法不完善。

黄生洪教授针对聚变堆极端热环境条件下第一壁多载荷耦合的疲劳或损伤问题, 重点论述了平台建设、理论建模、抗疲劳与冲击创新技术研发等多方面取得进展:

(1) 建成了聚变堆高热流综合实验平台, 集成多载荷耦合加载技术和先进在线测量技术, 在各种模拟条件下, 开展了第一壁材料高热负荷稳态、冲击、热/机多载荷耦合加载等多种实验; 开发了高温及超高温数字图像相关测量技术, 突破了高温物体强自发光干扰难题, 实现了从常温到  $3\ 100\ ^\circ\text{C}$  的应变场测量<sup>[41]</sup>, 首次精确测量了偏滤器靶板件在  $10\sim 20\ \text{MW}/\text{m}^2$  载荷条件下经过上千次疲劳循环的损伤应变累积和脱黏失效的应变演化数据<sup>[42]</sup>。

(2) 为评估高约束模式下第一壁疲劳衰变特性, 理论方面建立了第一壁材料的多尺度、多效应损伤耦合力学本构模型, 开展了疲劳寿命预测, 获得了耦合载荷条件下的低周疲劳规律<sup>[43]</sup>。

(3) 发明了系列抗热疲劳和抗热冲击的创新工艺技术<sup>[44-45]</sup>, 从冷却、连接等方面提高第一壁抗疲劳与抗冲击性能。其中, 一种冷却表面改性工艺可将临界换热密度可提高  $1\sim 3$  倍, 稳态换热系数提高 1 倍以上, 且成本低、流阻小、具备较高的应用潜力。

#### 4.6 非平衡与复杂干扰流动的工程理论探索

稀薄非平衡和黏性干扰流动条件下的气动力/热精确预测是新型高超声速飞行器研制过程中面临的关键难题之一。新的流动物理下, 经典的预测理论和传统的实验计算手段都已失效, 甚至工程上常用的“天地换算”流动相似律都已不复存在。针对此问题, 新的实验设备和计算技术都在快速发展之中, 需要结合流动机理分析, 在理论方法方面开展一些探索研究。

王智慧教授以“非平衡与复杂干扰流动的工程理论探索”为题, 介绍了相关前期研究工作, 包括关注稀薄非平衡流动中的气-固相互作用, 研究了壁面有限催化和振动能非完全适应时的非平衡边界层传热特征<sup>[46-47]</sup>, 评估了非平衡效应对高焓激波风洞测热实验的影响<sup>[48]</sup>。此外, 针对高超声速飞行器强剪切及复杂干扰流动特征, 提出了广义的高超声速等效原理<sup>[49]</sup>, 并基于时空映射思想, 对舵体干扰引起的三维分离再附流动和局部高热流进行了快速的等效降维分析。王智慧教授重点论述了 3 个方面的研究进展:

(1) 基于能量传递与转化的广义物理模型, 建立了化学非平衡流动及壁面有限催化条件下的驻点热流预测工程理论。

(2) 基于振动和化学非平衡流动之间的广义比拟, 建立了振动非平衡流动及壁面非完全能量适应条件下的驻点及平板热流预测工程理论。

(3) 提出了广义的高超声速等效原理, 用于三维复杂干扰流动及局部峰值热流的快速等效降维分析。

#### 4.7 内转式进气道流动中的激波及相互作用研究

高超声速三维内转式进气道以其独特的高压缩效率、小润湿面积以及易于一体化设计等优势, 成为极具潜力的进气方案之一, 其流场品质攸关吸气式

高超声速飞行器的推进性能. 然而, 内转式进气道所固有的类圆形几何特征、复杂三维激波结构及其相互作用, 给流场观测、机理认知和理论预测带来诸多挑战, 迄今关于其流动的研究仍很不充分.

李祝飞副教授以“内转式进气道流动中的激波及相互作用研究”为题, 介绍了相关前期研究工作, 包括在来流马赫数为 6 的激波风洞中利用水蒸气凝华效应发展了纳米粒子示踪的平面激光散射技术, 实现了对内凹压缩面及圆形隔离段流场的观测<sup>[50]</sup>. 针对内转式进气道唇口处面临的极高气动热问题<sup>[51]</sup>, 率先提炼模化出 V 形钝化前缘模型, 揭示了激波干扰导致局部气动热剧增的机理. 发现 V 形钝前缘激波干扰流场振荡存在四种振荡模式, 并阐明了激波振荡模式的演化过程<sup>[52]</sup>. 李祝飞副教授重点论述了 3 个方面的研究进展:

(1) 提出了高超声速内转式进气道内流场的分段式观测方法, 实现了对内转式进气道的“类层析式”实验观测, 澄清了唇口附近流向涡对的成因, 刻画了唇口内侧激波与弯曲壁面边界层相互作用的过程, 阐明了低能流聚集在内转式进气道压缩面一侧的关键原因.

(2) 提出了 V 形钝化前缘激波干扰类型从异侧规则反射向马赫反射转变的判据, 建立了激波干扰类型的转变理论, 揭示了四种局部热流峰值的产生机制及关联因素<sup>[53]</sup>. 提出了多种大幅降低 V 形唇口局部极高气动热并改善流场品质的优化方案<sup>[54]</sup>.

(3) 根据内转式进气道流动特点, 提出了一种椭圆截面内收缩锥模型. 利用该模型刻画了偏离轴对称状态时内收缩流场中的激波汇聚效应, 发现了三种类型的激波干扰, 并揭示了椭圆截面长短轴比对激波干扰类型的影响机制. 在内转式进气道激波反射问题研究中, 提出了平面激波入射内凹柱面的简化模型, 揭示了内凹柱面上马赫反射向规则反射的转变机理.

#### 4.8 柱形汇聚激波非定常反射研究

非定常激波反射广泛存在于工程实际中, 已有的研究多集中在平面激波在曲面上发生的非定常反射, 曲面激波在壁面上发生的反射现象及波系转变机理则鲜有研究. 在曲面激波条件下, 影响波系转变的激波强度和壁面角度往往同时变化, 且会带来流场的非定常性, 这给波系演化及其转变带来复杂的

影响.

翟志刚副教授以“柱形汇聚激波非定常反射研究”为题, 介绍了相关前期工作, 包括开展了柱形汇聚激波在平直壁面上的反射研究, 发现非定常条件下马赫杆长度的变化同样是非定常的, 且马赫反射到规则反射的转变临界角超出了冯诺依曼准则预测的范围<sup>[55]</sup>. 为了消除入射角变化的影响, 设计了特殊凸曲面, 使得汇聚激波在特殊曲面上传播时入射角保持不变. 发现汇聚激波和凸曲面对马赫杆曲率起相反作用, 从而使得三激波理论在该情况下具有一定的适应性<sup>[56]</sup>. 翟志刚副教授主要论述了两个方面的研究进展:

(1) 为探讨准定常理论适用性, 在无黏条件下, 首先给出了非定常条件下能发生规则反射到马赫反射转变的所有可能性, 并在凸曲面的条件下, 根据扰动类型及流场条件对流场进行了分区, 详细分析了激波反射过程中的扰动传播规律.

(2) 研究了汇聚激波在双楔上的反射规律, 根据初始两个楔角的不同, 汇聚激波在楔面上会发生 7 种不同的波系类型. 对比了汇聚激波和平面激波在双楔上反射的不同, 突出了非定常效应的影响.

#### 4.9 高超声速气动实验研究进展

高超声速飞行器复杂干扰区气动加热具有空间梯度高、热流幅值高、脉动特性强等特点, 热流可高达  $20 \text{ MW/m}^2$  以上, 即使在脉冲实验设备中也会造成模型局部温升达到几百度, 形成了局部流场结构、气动加热、结构导热等强耦合特征, 颠覆了传统气动力、热的基本假设, 严重影响了实验数据精度.

韩桂来副研究员以“高超声速气动实验研究进展”为题, 介绍了相关前期研究工作, 包括发挥 JF-12 复现风洞的特色采用大尺度模型建立复杂干扰区, 并开展相关气动力、热特性研究, 利用尺度效应, 降低流场、结构等的空间梯度, 将局部流场结构、气动加热、结构导热等特征解耦, 在实验中获得接近恒温壁面条件下的气动力、热特性数据, 为后续数值模拟研究、耦合传热研究等提供基础性和验证性数据<sup>[57-61]</sup>. 韩桂来副研究员主要论述了两个方面的研究进展:

(1) 建立解耦条件下的大尺度模型实验方法, 采用 3 组不同模型, 获得了 1:100 量级放大尺度下的复杂干扰区气动力、热特性数据. 结果初步表明, 传统方法可能导致 20%~30% 的测量误差.

(2) 频谱分别表明, 大尺度模型构造的复杂干扰区存在不同类型的流场振荡形式, 作用机理分别为激波结构振荡和近壁射流振荡, 而在小尺度或实际尺度模型上, 两者可能存在相互耦合。

## 5 会议总结与展望

姜宗林研究员对会议进行了总结: 此次会议作为卓越中心的 3 个研究领域之一的“超常环境力学”学术报告会, 从深海、深空、高速、高温等几个研究方向汇报了大家的研究进展, 既有广度和深度, 也有高度, 会议非常成功。

超常环境力学是极端力学的重要组成部分, 深海、深空和高超声速超常环境力学问题都是服务国家战略需求的前沿学科问题, 呼唤着理论创新、概念创新、方法创新和技术创新。希望大家能够继续努力, 积极推动超常环境力学领域的研究。

从极端力学的观点来看, 在超常服役环境下, 新的现象和规律出现了, 超出了传统力学学科的研究范畴。所以, 今后的研究不仅要关注力学系统的复杂性, 更要关注极端力学方面的创新性, 从而推动力学学科的拓展。

通过此次学术会议既能为《力学学报》(中英文版) 在流体力学领域, 提供一些有重大需求背景的好论文, 增加《力学学报》的显示度, 又能充分利用《力学学报》这一平台加强学术交流, 推动极端力学发展, 是一条双赢之路, 应该坚持。

## 参 考 文 献

- 郑晓静. 关于极端力学. 力学学报, 2019, 51(4): 1266-1272. (Zheng Xiaojing. Extreme mechanics. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(4): 1266-1272 (in Chinese))
- Gao FP, Wang N, Zhao B. Ultimate bearing capacity of a pipeline on clayey soils: Slip-line field solution and FEM simulation. *Ocean Engineering*, 2013, 73: 159-167
- 刘俊, 高福平. 近壁面柱体涡激振动的迟滞效应. 力学学报, 2019, 51(6): 1630-1640 (Liu Jun, Gao Fuping. Hysteresis in vortex-induced vibrations of a near-wall cylinder. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(6): 1630-1640 (in Chinese))
- Gao FP. Flow-pipe-soil coupling mechanisms and predictions for submarine pipeline instability. *Journal of Hydrodynamics*, 2017, 29(5): 763-773
- Shi YM, Gao FP. Lateral instability and tunnel erosion of a submarine pipeline: competition mechanism. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2018, 77(3): 1069-1080
- Tan DL, Zhou JF, Wang X, et al. Combined effects of topography and bottom friction on shoaling internal solitary waves in the South China Sea. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2019, 40(4): 421-434
- Tan DL, Zhou JF, Wang X. Fission law of solitary waves propagating over sharply variable topography. *Journal of Hydrodynamics*, 2020, 32(4): 727-734
- Wang X, Zhou JF, Wang Z, et al. A numerical and experimental study of internal solitary wave loads on semi-submersible platforms. *Ocean Engineering*, 2018, 150: 298-308
- Duan JL, Chen K, You YX, et al. Numerical investigation of vortex-induced vibration of a riser with internal flow. *Applied Ocean Research*, 2018, 72: 110-121
- Zhang XH, Lu XB, Shi YH, et al. Study on the mechanical properties of hydrate-bearing silty clay. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 67: 72-80
- Zhang XH, Lu XB, Chen XD, et al. Mechanism of soil stratum instability induced by hydrate dissociation. *Ocean Engineering*, 2016, 122: 74-83
- Zhang XH, Lu XB, Xiao M. Gas outburst with sediments because of tetrahydrofuran hydrate dissociation. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 2015, 39(17): 1884-1897
- 刘林, 姚仰平, 张旭辉等. 含水合物沉积物的弹塑性本构模型. 力学学报, 2020, 52(2): 556-566 (Liu Lin, Yao Yangping, Zhang Xuhui, et al. An elastoplastic constitutive model for gas hydrate-bearing sediments. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(2): 556-566 (in Chinese))
- 杨柳, 石富坤, 张旭辉等. 含水合物粉质黏土压裂成缝特征实验研究. 力学学报, 2020, 52(1): 224-234 (Yang Liu, Shi Fukun, Zhang Xuhui, et al. Experimental studies on the propagation characteristics of hydraulic fracture in clay hydrate sediment. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(1): 224-234 (in Chinese))
- Kang Q, Wang J, Duan L, et al. The volume ratio effect on flow patterns and transition processes of thermocapillary convection. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 868: 560-583
- Kang Q, Wu D, Duan L, et al. Surface configurations and wave patterns of thermocapillary convection onboard the SJ10 satellite. *Physics of Fluids*, 2019, 31(4): 044105
- Kang Q, Wu D, Duan L, et al. The effects of geometry and heating rate on thermocapillary convection in the liquid bridge. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 881: 951-982
- Kang Q, Wu D, Duan L, et al. Space experimental study on wave modes under instability of thermocapillary convection in liquid bridges on Tiangong-2. *Physics of Fluids*, 2020, 32(3): 034107
- Zhao JF. Two-phase flow and pool boiling heat transfer in microgravity. *International Journal of Multiphase Flow*, 2010, 36(2): 135-143
- 吴克, 赵建福, 李会雄. 微重力池沸腾过程中的气泡热动力学特征研究. 力学与实践, 2016, 38(2): 203-206 (Wu Ke, Zhao Jianfu, Li Huixiong. Thermal dynamical behavior of vapor bubble during pool boiling in microgravity. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(2): 203-206 (in Chinese))
- Feng Y, Li HX, Guo KK, et al. Numerical study on saturated pool boiling heat transfer in presence of a uniform electric field using lattice Boltzmann method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 135: 885-896

- 22 Li ZD, Zhang L, Zhao JF, et al. Numerical simulation of bubble dynamics and heat transfer with transient thermal response of solid wall during pool boiling of FC-72. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2015, 84: 409-418
- 23 杜王芳, 赵建福. 核态池沸腾传热现象中的重力标度规律. 科学通报, 2020, 65(17): 9-17 (Du Wangfang, Zhao Jianfu. Gravity scaling law of heat transfer in nucleate pool boiling. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(17): 1629-1637 (in Chinese))
- 24 Li WB, Lan D, Wang YR. Exploration of Direct-Ink-Write 3D Printing in space: droplet dynamics and patterns formation in microgravity. *Microgravity Science and Technology*, 2020, 32(5): 935-940
- 25 Li WB, Ji WJ, Sun HH, et al. Pattern formation in drying sessile and pendant droplet: interactions of gravity settling, interface shrinkage, and capillary flow. *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*, 2019, 35(1): 113-119
- 26 Li WB, Ji WJ, Lan D, et al. Self-assembly of ordered microparticle monolayers from drying a droplet on a liquid substrate. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2019, 10(20): 6184-6188
- 27 Li WB, Lan D, Sun HH, et al. Drop capturing based on patterned substrate in space. *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*, 2018, 34(16): 4715-4721
- 28 Ni MJ, Munipalli R, Huang P, et al. A current density conservative scheme for incompressible MHD flows at a low magnetic Reynolds number. Part II: On an arbitrary collocated mesh. *Journal of Computational Physics*, 2007, 227(1): 205-228
- 29 Chen L, Li MJ, Ni MJ, et al. MHD effects and heat transfer analysis in magneto-thermo-fluid-structure coupled field in DCLL blanket. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2017, 84: 110-120
- 30 Chen L, Smolentsev S, Ni MJ. Toward full simulations for a liquid metal blanket: MHD flow computations for a PbLi blanket prototype at  $Ha \sim 10^4$ . *Nuclear Fusion*, 2020, 60(7): 076003
- 31 陈松, 孙泉华. 高超声速飞行流场中的最大氧离解度分析. 力学学报, 2014, 46(1): 20-27 (Chen Song, Sun Quanhua. Analysis of maximum dissociation degree of oxygen during hypersonic flight. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014, 46(1): 20-27 (in Chinese))
- 32 洪启臻, 王小永, 孙泉华. 高温非平衡流动中的氧分子振动态精细分析. 力学学报, 2019, 51(6): 1761-1774 (Hong Qizhen, Wang Xiaoyong, Sun Quanhua. Detailed analysis of vibrational states of oxygen in high temperature non-equilibrium flows. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(6): 1761-1774 (in Chinese))
- 33 Ding JC, Si T, Yang JM, et al. Measurement of a Richtmyer-Meshkov Instability at an Air-SF<sub>6</sub> Interface in a Semiannular Shock Tube. *Physical Review Letters*, 2017, 119(1): 014501
- 34 Si T, Long T, Zhai ZG, et al. Experimental investigation of cylindrical converging shock waves interacting with a polygonal heavy gas cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 784: 225-251
- 35 丛洲洋, 郭旭, 司徒廷. 反射激波诱导界面不稳定性研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50(10): 18-39 (Cong Zhouyang, Guo Xu, Si Ting. Advances in interfacial instability induced by reshock. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2020, 50: 104703 (in Chinese))
- 36 丁举春, 翟志刚, 司徒廷等. 汇聚 Richtmyer-Meshkov 不稳定性实验研究进展. 科学通报, 2018, 63: 618-628 (Ding Juchun, Zhai Zhigang, Si Ting, et al. Progress in experiments of converging Richtmyer-Meshkov instability. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63: 618-628 (in Chinese))
- 37 罗喜胜, 翟志刚, 司徒廷等. 激波诱导下的气体界面不稳定性实验研究. 力学进展, 2014, 44(1): 201407-201407 (Luo Xisheng, Zhai Zhigang, Si Ting, et al. Experimental study on the interfacial instability induced by shock waves. *Advances in Mechanics*, 2014, 44(1): 201407 (in Chinese))
- 38 Wang C, Han ZY, Situ M. Investigation of high-speed combustible gas ignited by a hot gas jet produced in the shock tube. *Shock Waves*, 2006, 15(2): 129-135
- 39 司徒明, 王春, 陆惠萍. 双燃式冲压发动机中富油燃气射流的超燃研究. 推进技术, 2001, 22(3): 237-240 (Situ Ming, Wang Chun, Lu Huiping. Investigation on supersonic combustion of fuel-rich hot gas as reacting jets in ramjet/scramjet combustor. *Journal of Propulsion Technology*. 2001, 22(3): 237-240 (in Chinese))
- 40 Wang C, Jiang ZL, Hu ZM, et al. Numerical investigation on the flowfield of "swallowtail" cavity for supersonic mixing enhancement. *Acta Mechanica Sinica*, 2009, 25(1): 37-44
- 41 Pan ZW, Huang SH, Su Y, et al. Strain field measurements over 3000°C using 3D-Digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 127: 105942
- 42 Pan ZW, Huang SH, Jiang ML. In-situ measurements of deformation to fatigue failure on a flat-type divertor mockup under high heat flux loads by 3D digital image correlation. *Nuclear Fusion*, 2021, 026018
- 43 Huang SH, Liu SM. Numerical analysis of fatigue behavior of ITER-Like monoblock divertor interlayer under coupled heat loads. *Journal of Fusion Energy*, 2018, 37(4): 177-186
- 44 黄生洪, 乐昊生. 一种金属表面形成微纳多层次复合结构的加工工艺. 2017-7-17, 中国: CN201710580981.5
- 45 黄生洪, 郑智风. 一种超高等静压静温环境生成装置及方法. 2017-3-13, 中国: CN201710145588.3
- 46 Luo J, Wang ZH. Analogy between vibrational and chemical nonequilibrium effects on stagnation flows. *AIAA Journal*, 2020, 58(5): 2156-2164
- 47 Wang ZH, Yu YL, Bao L. Heat transfer in nonequilibrium flows with homogeneous and heterogeneous recombination reactions. *AIAA Journal*, 2018, 56(9): 3593-3599
- 48 Yu YL, Li XD, Wang ZH, et al. Theoretical modeling of heat transfer to flat plate under vibrational excitation freestream conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 151: 119434
- 49 Wang ZH. Generalized hypersonic equivalence principle. *AIAA Journal*, 2020, 58(1): 255-264
- 50 李一鸣, 李祝飞, 杨基明等. 典型高超声速内转式进气道激光散射流场显示. 航空学报, 2017, 38(12): 121414 (Li Yiming, Li Zhufei, Yang Jiming, et al. Flow visualization of a typical hypersonic inward-turning inlet using laser scattering. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(12): 121414 (in Chinese))
- 51 Xiao FS, Li ZF, Zhang ZY, et al. Hypersonic shock wave interactions on a v-shaped blunt leading edge. *AIAA Journal*, 2018, 56(1): 356-367
- 52 Zhang ZY, Li ZF, Huang R, et al. Experimental investigation of shock oscillations on V-shaped blunt leading edges. *Physics of Fluids*, 2019, 31(2): 026110
- 53 Li ZF, Zhang ZY, Wang J. Pressure-heat flux correlations for shock interactions on v-shaped blunt leading edges. *AIAA Journal*, 2019, 57(10): 356-367

- 54 Wang J, Li ZF, Zhang ZY, et al. Shock interactions on v-shaped blunt leading edges with various conic crotches. *AIAA Journal*, 2019, 58(3): 1407-1411
- 55 Zhang F, Si T, Zhai ZG, et al. Reflection of cylindrical converging shock wave over a plane wedge. *Physics of Fluids*, 2016, 28(8): 086101
- 56 Wang H, Zhai ZG, Luo XS, et al. A specially curved wedge for eliminating wedge angle effect in unsteady shock reflection. *Physics of Fluids*, 2017, 29(8): 086103
- 57 Han G, Jiang Z. Approximate analytic solution of heat conduction in hollow semi-spheres flying at hypersonic speed. *International Communications in Heat & Mass Transfer*, 2013, 43: 46-52
- 58 Meng BQ, Han GL, Yuan CK, et al. Experimental and numerical study on hypersonic flow over double-wedge configuration. *AIAA Journal*, 2017, 55(9): 3227-3230
- 59 Meng BQ, Han GL, Zhang DL, et al. Aerodynamic measurement of a large aircraft model in hypersonic flow. *Chinese Physics B*, 2017, 26(11): 114702
- 60 姜宗林, 李进平, 胡宗民等. 高超声速飞行复现风洞理论与方法. 力学学报, 2018, 50(6): 1283-1291 (Jiang Zonglin, Li Jinping, Hu Zongmin, et al. Shock tunnel theory and methods for duplicating hypersonic flight conditions. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(6): 1283-1291 (in Chinese))
- 61 孟宝清, 韩桂来, 姜宗林. 结构振动对大型激波风洞气动力测量的干扰. 力学学报, 2016, 48(1): 102-110 (Meng Baoqing, Han Guilai, Jiang Zonglin. Theoretical investigation on aerodynamic force measurement interfered by structural vibrations in large shock tunnel. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(1): 102-110 (in Chinese))