



中国科学院流固耦合系统力学 重点实验室

Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences

季 报

2018 年第 2 期（总第 15 期）

目 录

- 第四届全国非定常空气动力学学术会议召开3
- “岩质边坡灾变风险及成灾范围评估方法”大纲评审会议在北京召开5
- 第二届连续-非连续会议成功召开7
- 国家重点研发计划课题“近岸水动力泥沙多因子相互作用机制及演化规律”研究进展交流会在大连召开9
- 国家重大科学仪器设备开发专项“水下油气水高效分离与计量装置”通过项目初步验收.....11
- 院战略性先导技术专项（B 类）“页岩气勘探开发基础理论与关键技术”之项目二“页岩气微观赋存状态与微观流动”年中交流会召开13
- 马里兰大学朱伟东教授应邀访问力学所并作钱学森工程科学讲座14
- 交流新进展，筹划新合作17
- 德国赫姆霍兹德累斯顿研究中心 Lucas 教授应邀访问力学所并做学术

讲座	18
➤ 水合物分解过程沉积物力学特性研究取得进展	19
➤ 海床瞬态液化的修正判别准则及液化深度预测进展	20
➤ 激光充能技术研究进展	22
➤ 探讨页岩气开采中微观参量对宏观产量的影响	23
➤ 气泡溃灭的力学模型及压力测量研究进展	25
➤ 二维气泡与冲击波相互作用的研究进展	26
➤ 自由液面和刚性壁面共同影响下气泡脉动和水泵现象研究进展	27

► 第四届全国非定常空气动力学学术会议召开

5 月 10-13 日, 第四届全国非定常空气动力学学术会议在合肥召开。来自中国科学院、高等院校、科研院所及非定常空气动力学领域的百余名代表参加了会议。会议由中国力学学会流固耦合力学专业委员会、非定常气动力专业组主办, 中国科学院力学研究所承办, 中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和设计重点实验室协办。北京航空航天大学杨超教授任大会主席。

中国科学院材料力学行为和设计重点实验室倪勇副主任致欢迎词, 他简要介绍了中国科学技术大学的近况和取得的成绩, 并预祝会议圆满成功。

杨国伟教授、杨超教授分别致开幕词, 代表组委会感谢承办方的努力与付出, 欢迎各位代表参会, 并回顾了会议的发展历程和发挥的作用, 分析了非定常空气动力学领域的发展现状, 希望通过交流讨论碰撞出新的火花。

会议安排了 5 篇大会邀请报告和 32 篇学术交流报告, 力学所崔凯研究员应邀做了“高压捕获翼新概念及 I 型布局”的大会邀请报告。同时通过会议代表投票评选出了 13 篇优秀论文。



杨超教授致开幕词



崔凯研究员做大会邀请报告



表彰优秀论文



会议现场



参会代表合影

(流固耦合与数值计算课题组供稿)

➤ “岩质边坡灾变风险及成灾范围评估方法”大纲评审会议在北京召开

2018 年 6 月 11 日, 中国岩石力学与工程学会组织了由中国科学院力学研究所、中国科学院地质与地球物理研究所、中国中铁二院工程集团有限责任公司、清华大学、北京科技大学、北京工业大学、河北工业大学、西南交通大学、重庆三峡学院、中国科学院武汉岩土力学研究所、煤炭科学研究总院、中国安全生产科学研究院、华能澜沧江水电股份有限公司、中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司、辽宁省第十地质大队承担的中国岩石力学与工程学会团体标准“岩质边坡灾变风险及成灾范围评估方法”的大纲评审工作。

殷跃平、刘大安、黄理兴、马国伟、盛谦、纪洪广、杨强、杨天鸿、孙世国、王来贵、冯俊德、姚栓喜十二位评审专家及主编、参编单位代表共计 38 人出席了本次会议。



会议首先由中国岩石力学与工程学会黄理兴副秘书长主持，黄教授介绍了中国岩石力学与工程学会团体标准的整体情况和本次大纲评审会的评审原则，并经过讨论确定了评审组长。在评审组长殷跃平研究员的主持下，主编单位汇报了“岩质边坡灾变风险及成灾范围评估方法”的编制情况，详细介绍了该团体标准的编写单位、基本框架、主要章节、各章节的分工以及团标编制经费保障情况等。在听取汇报、查阅相关评审资料的基础上，评审专家就团标名称、团标主体框架、团标适用范围、团标编制原则等方面与编写单位展开了热烈讨论，并形成了评审意见。





此次大纲评审会，更加明确了“岩质边坡灾变风险及成灾范围评估方法”的编制目标和方向，细化了编制细节，完善了编制方法与措施，对于顺利推进该团标的编制工作开了一个好头，并将对后续工作的推进产生重要作用。

(工程地质力学及应用课题组供稿)

➤ 第二届连续-非连续会议成功召开

由中国力学学会岩土力学专业委员会主办、华北水利水电大学与中国科学院力学研究所非连续介质力学及工程灾害(中英)联合实验室承办的“连续-非连续数值分析方法及应用专题讨论会暨第二届连续-非连续数值分析方法及应用学术研讨会(CDEM 2018)”于2018年4月20日至22日在河南郑州成功举行。相关高等院校、科研院所、设计施工单位等150余名代表参加了本次会议。

会议开幕式由大会组委会副主席、中国科学院力学研究所李世海研究员主持，华北水利水电大学副校长刘雪梅出席开幕式并致欢迎词，中国力学学会岩土力学专业委员会主任委员郑宏教授致开幕词。

美籍华人科学家石根华教授、北京大学刘谋斌教授、中国科学院大学王颖教授、北京工业大学郑宏教授、河海大学章青教授、中国矿业大学(北京)鞠杨教授、大连理工大学韩非副教授、清华大学张雄教授、中国科学院力学

研究所李世海研究员、中国水利水电科学研究院张国新教授、华北水利水电大学魏群教授、河北工业大学马国伟教授、清华大学庄茁教授等 13 位国际国内有影响力的专家学者出席会议并作大会特邀报告。

会议重点关注了连续-非连续数值分析方法的理论体系、研究现状及发展趋势,多场耦合及强动载荷下固体介质破裂、碎化及运动过程的模拟,连续-非连续数值分析方法的高效并行加速技术及仿真软件,以及连续-非连续数值分析方法在岩土、水电、交通、矿山、能源等领域的应用。参会代表围绕块体类方法及应用、计算力学软件研发、冲击与爆炸问题模拟、键与粒子类方法及其应用、颗粒离散元方法及散粒体特性、隧道及地下工程问题模拟、岩土介质中的流固耦合问题、非连续性与振动效应的数值算法、岩土介质破裂过程分析等 9 个分会主题进行交流和讨论,并展示了相关领域最新研究成果。

专家学者们本着认真、严谨、负责的精神和态度热烈而又轻松地交流和讨论了连续-非连续数值分析方法的发展与创新,积极展示了最新研究成果,尽情享受学术盛宴,畅想未来连续-非连续数值分析方法的发展与机遇。两天会议报告、研讨交流的时间虽短,但成功达到了交流成果、促进中国连续-非连续数值分析方法及应用发展的目的。

本次会议具有以下鲜明的特点:首先,本次大会报告显示了我国力学工作者对学术及社会问题解决两方面都具有良好的敏感性,不仅关注于学科建设方面的问题,更是直接探讨力学在社会实际问题中的应用。在力学的各类学术前沿问题、理论建设、实际工程应用技术解决等方面,都提供了富有创新性的系统观点及研究成果,大大拓展了与会者的学术视野,这样的学术交流,无疑将对中国力学的发展产生重要的影响。其次,新生代力学的研究群体在力学研究人员中占比不断提高,大批博士、硕士研究生的参会,为中国力学的学术研讨带来了新的活力。



(工程地质力学及应用课题组供稿)

➤ 国家重点研发计划课题“近岸水动力泥沙多因子相互作用机制及演化规律”研究进展交流会在大连召开

2018 年 7 月 11 日, 我室周济福研究员负责的“近岸水动力泥沙多因子相互作用机制及演化规律研究”课题(“海洋工程动力环境精细化预报与安全保障及评估技术研究”项目之课题二)在大连理工大学开展了研究进展交流会, 并参观了大连理工大学新建的“大型海洋动力环境/结构/海床相互作用 O-Tube 试验装置”。参会指导的领导和专家有: 专项依托单位南京水利科学研究院(南科院)河港研究所所长陆永军研究员、大连理工大学梁书秀教授、陈兵副教授、艾丛芳副教授。会议由课题负责人周济福研究员主持。

首先, 专题负责人汇报了各专题的研究进展。南科院李寿千博士就专题 1“波流边界层的紊流特性”、中科院力学所王旭博士就专题 2“波流作用下泥沙运动机理与参数化模式”、中科院力学所周济福研究员及海洋一所芦静博士就专题 3“极端水动力强输沙规律”、大连理工大学唐国勇博士就专题 4“波流作用下海工结构局部冲刷机制”的具体研究情况进行了汇报, 与会专家进行了详细讨论。

在听取各专题的汇报后, 陆永军研究员作为专项依托单位的领导, 并代表此次会议的指导专家发言。他说, 课题二作为基础层面的研究课题, 应为其它课题提供理论支撑, 同时要重视学术产出、注重成果在海丝沿线关键节

点的应用。他认为, 目前各专题总体上都取得了不错的进展, 希望大家进一步开展工作, 及早准备迎接专项的中期检查 (可能于今年年底进行)。

最后, 课题负责人周济福研究员对此次交流会进行了简要总结, 并对与会专家、课题参研人员及大连理工大学吕林研究员的会务组织表示感谢! 同时希望各专题及各参研单位, 在既有良好合作的基础上, 进一步加强沟通与协作, 并对每个专题的后续研究工作提出了具体要求。





(流域水环境课题组供稿)

➤ 国家重大科学仪器设备开发专项“水下油气水高效分离与计量装置”通过项目初步验收

7月5日,国家重大科学仪器设备开发专项“水下油气水高效分离与计量装置”项目初步验收会在力学所召开。会议由项目组织部门中国科学院和项目牵头单位力学所共同组织进行。中国科学院条件保障与财务局科技条件处主管苏驰及项目初步验收专家组成员、项目和课题负责人等40余人参加了会议。副所长魏宇杰、科技处处长王展、科技处副处长张大为应邀参加会议。会议由苏驰主管、测试专家组组长雷震霖研究员、验收专家组组长李建刚院士主持。

项目初步验收分为现场测试和内容汇报两部分。上午由测试专家组对项目研制的仪器和装置进行现场测试,测试依次在力学所中关村园区和怀柔园区的实验室内进行。现场测试中,专家组分别对“多相流动可视化及参数计量系统”、“高效管道式多相分离装置”、“深水环境模拟运行装置”和“定容管活塞式多相计量仪”等关键部件和室内样机的工作指标和运行稳定性等进行了系统的测试。经过测试专家组的一致认证,项目研制的仪器和装置的技术指标均优于任务书中规定的内容,且油气水多相分离效率和计量精度均达到国际先进水平。

下午进行的汇报中，首先由副所长魏宇杰致辞。他向出席会议的领导、专家表示了诚挚的感谢，并介绍了力学所长期以来对该项目的支持和推动等情况。随后，项目负责人吴应湘研究员对项目总体情况进行汇报，介绍了项目的完成情况以及取得的主要研究成果，各任务研究团队分别汇报了 6 个任务的完成情况，以及取得的具体的研究进展和技术突破等。

最终，项目初步验收专家组通过质询和审查，一致认为该项目圆满完成了项目任务书中所规定的各项内容和考核指标，发展了一系列具有自主知识产权的核心技术，研制了关键仪器和设备，并通过了现场测试和应用验证，其整体性能达到国际先进水平，同意通过验收，并建议进一步加快项目成果产业化进程，并形成相应的规范和标准，促进我国在多相分离与计量高技术产业的跨越式发展。



(多相流体力学课题组供稿)

► 院战略性先导技术专项 (B 类) “页岩气勘探开发基础理论与关键技术”之项目二“页岩气微观赋存状态与微观流动”年中交流会召开

2018 年 7 月 9 日, 由海洋环境与工程课题组组织的中国科学院战略性先导技术专项 (B 类) “页岩气勘探开发基础理论与关键技术”之项目二“页岩气微观赋存状态与微观流动”2018 年年中交流会在力学所小礼堂会议室召开, 会议由中科院地质与地球物理研究所郭广军研究员主持。

中科院前沿科学与教育局地球科学处段晓男处长、李颖虹副处长、专项首席科学家李晓研究员、会议特邀的学术咨询专家国土资源部油气战略研究中心李玉喜研究员、中石化石油勘探开发研究院刘光祥教授、中国地质大学 (北京) 丁文龙教授, 各课题、子课题负责人和研究骨干等 30 余人出席了交流会。

会上, 中科院地质与地球物理研究所王彦飞研究员、张刘平研究员和中科院大连化物所邓伟桥研究员和我所林緬研究员, 分别就项目二执行以来的四个亮点工作进行了汇报。专家组认真分析研讨, 并提出了宝贵意见和建议。从汇报情况看, 各课题与国际、国内相关研究单位展开了广泛的交流, 达到了预期研究目标, 取得了较好的研究进展及阶段性成果。

会后, 段晓男处长做了总结, 他明确指出, 要进一步凝练页岩气专项在基础理论方面的重大成果, 特别是项目二的研究已经有了很好进展, 并希望提前着手准备验收工作, 围绕国家重大需求, 推动相关学科发展。最后, 李晓首席衷心感谢中科院、各课题承担单位和与会专家对专项的支持和指导, 表示在下一步工作中将针对专家指导建议、专项计划任务和项目管理要求, 认真总结, 凝练聚焦, 提升专项重大成果产出。会后, 与会专家参观了海洋环境与工程课题组的实验室, 大家对实验室在专项支持下所取得的成绩给予了充分的肯定和赞赏。



交流会现场



实验室参观

(海洋环境与工程应用课题组供稿)

➤ 马里兰大学朱伟东教授应邀访问力学所并作钱学森工程科学讲座

6 月 2-10 日, 马里兰大学巴尔的摩分校朱伟东教授应邀访问力学研究所, 并做了题为“Recent Advances in Dynamic System Research”的钱学森工程科学讲座。所学术委员会副主任姜宗林研究员、流固耦合系统力学实验室副主任杨国伟研究员、力学学会刘俊丽副主任, 以及所内外相关领域的科研人员和研究生近 50 余人参加了报告会。会议由宋宏伟研究员主持, 并致欢迎辞。报

告开始前姜宗林研究员为朱伟东教授颁发了中国科学院力学研究所“钱学森工程科学讲座教授”证书。



朱伟东教授的报告主要包括三部分内容：Vibration and Stability of Distributed Structural Systems（分布式结构的振动和稳定性），Vibration-based structural damage detection（基于振动的结构探伤）、Infinitely Variable Transmission and Wind Energy（无极变速传动和风能）。朱教授介绍了具有时变长度/速度介质的分布式结构的振动和稳定性问题，具有正弦或周期变化速度的分布结构系统的参数失稳；详细介绍了将增量简谐平衡法用于分析具有一般非线性的非线性分布系统的高维模型，并讨论了一种新的空间离散和子结构方法，从而求解一致收敛；还介绍了一个适用于含弯曲刚度和任意移动端点的松弛索的非线性单元模型，这种单元模型相比于传统有限单元，新单元的数量只需要十分之一就可得到相同精度的计算结果，并具体阐述了这些新方法在电梯和其它系统方面的应用。介绍了基于振动的损伤识别理论以及基于模型的损伤识别的两个主要挑战：结构的准确建模、损伤定位和定量识别的鲁棒性算法。朱教授的报告引起了在座科研人员的极大兴趣和热烈的讨论。



朱教授来访期间，还参观走访了流固耦合系统力学实验室、非线性国家重点实验室和高温气体动力学国家重点实验室的一些重要的实验装备，并与研究者进行了深入交流。



6月7日下午，流固耦合系统力学重点实验室组织了激光测振技术及应用、结构健康监测与深海结构安全领域的专题研讨。朱教授做了“Continuously scanning laser Doppler vibrometry and its application to vibration-based structural damage detection”的学术报告，详细介绍了连续扫描激光测振技术最新发展及其在结构健康监测领域的应用。宋宏伟研究员、陈伟民研究员和黄国君高工

分别报告了在激光测振、损伤识别和海洋结构动响应的研究进展。双方就感兴趣的问题进行了深入的探讨和交流。(热结构耦合课题组供稿)

➤ 交流新进展，筹划新合作

2018 年 7 月 1 日至 6 日，岩土力学与工程课题组吴梦喜高工出访奥地利维也纳，参加在此召开的 2018 年 ICOLD(国际大坝协会) 86 届年会暨 26 届水工国际研讨会，并与奥地利维也纳自然资源与生命科学大学 (BOKU)、奥地利维也纳工程咨询公司 (VCE) 等单位进行了交流访问。



水工国际研讨会现场

本次大会有来自世界各地的 1500 名代表参会。我国由中国大坝协会组团、包括中国电建集团的若干设计院、水电水利规划总院、各大水电开发公司以及相关科研院所共 100 余人参加了会议。吴梦喜高工在库岸稳定研究分会场上做了题为“Research on Stability of Reservoir Accumulative Body Slope and the impact of Water Storage”的报告，并在会议期间与国内外代表进行了交流。

7 月 3 日下午，吴梦喜高工与中国电建贵阳院杨家修副院长、湛正刚副总工程师一起，前往奥地利维也纳自然资源与生命科学大学水、大气与环境系水管理、水文与水利工程研究所交流。研究室主任 Helmut Habersack 教授主持，听取了 Christoph Hauer 博士关于泥沙沉积物的运动规律与水库疏浚课

题的研究情况介绍,并探讨了未来可能的合作事宜。7月4日下午,会同华能澜沧江水电开会股份公司基建部主任陈江和技术研究中心主任卢吉博士以及电建贵阳院的2位领导,到维也纳工程咨询公司(VCE)参观,听取维也纳工程咨询公司关于边坡监测技术和如美有关边坡监测方案的介绍,筹划进一步合作事宜。7月5日,在Wenzel教授陪同下,吴梦喜高工与贵阳院2位领导访问Econhydro GMBH公司,了解拟建的装机420MW的抽水蓄能电站项目的情况。



与 Econhydro 公司交流

(岩土力学与工程课题组供稿)

➤ 德国赫姆霍兹德累斯顿研究中心 Lucas 教授应邀访问力学所并做学术讲座

6月1日,德国赫姆霍兹德累斯顿研究中心(以下简称HZDR)计算流体力学部门的学科带头人Lucas教授应邀访问力学所,并做了题为“Multiphase flow CFD activities at HZDR”的学术讲座。许晶禹研究员等所内外相关领域科研人员和研究生参加了学术讲座。

报告中, Lucas 教授简要介绍了 HZDR 的计算流体力学研究工作和进展状况。HZDR 计算流体力学部门的工作旨在验证和改进多相流体力学数值仿真的中等和大尺度工业应用, 主要集中于双流体和多流体模型(欧拉-欧拉模型)的应用。在多相流数值仿真中, 局部尺度的相间相互作用需要通过模型封闭。由于相间相互作用的复杂性, 学者们尚未就封闭模型达成共识。针对这个问题, HZDR 计算流体力学部门近年来致力于发展不同的基线模型。目前已提出了适用于泡状流的 iMUSIG 模型和适用于分层流的 AIAD 模型。此外也创新性地提出了 GENTOP 模型, GENTOP 模型可以模拟包括分散流、连续分层流和两种流型间的过渡流型。Lucas 教授不仅对上述模型做了详细介绍, 也分享了相关的工程实例, 引起了与会研究人员的浓厚兴趣和热烈讨论。

报告结束后, Lucas 教授参观了多相流体力学实验室, 对多相流模拟装置进行了详细的了解, 并且与课题组确定了进一步合作事项。

(多相流体力学课题组供稿)

➤ 水合物分解过程沉积物力学特性研究取得进展

海底浅层水合物开采与常规油气的本质区别在于相变及引起的欠固结土的软化, 因此, 水合物分解相变过程沉积物的力学特性是开采及安全性评价的基础力学参数。

海洋土力学课题组提出了降压控制水合物分解程度的物理模拟技术, 利用自主研制的含水合物沉积物合成、分解与静动态力学特性测量一体化装置, 开展了系统的不同水合物分解程度的沉积物力学特性测量, 提出了模量和强度与水合物饱和度的关系模型以及考虑应变软化的力学本构关系模型。

该研究工作得到国家自然科学基金重点项目、国家地调专项、中石油-中科院战略合作项目的资助, 近期相关成果在 *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*、*Acta Mechanica Sinica* 等国内外重要期刊发表。

(土力学课题组供稿)

➤ 海床瞬态液化的修正判别准则及液化深度预测进展

海床瞬态液化, 是行进波浪在波谷下方的海床土层产生超静孔压梯度而引起向上的渗透吸力, 导致一定深度土体有效应力骤减为零的物理现象 (见图1)。瞬态液化深度的评价对于海洋工程基础结构设计具有重要意义。国际上通常将波浪诱导的“瞬态孔压梯度”与“既有的有效应力”进行解耦分析, 以判别瞬态液化是否被触发: 当超静孔压梯度大于或等于土体浮容重时, 曾被认为海床会发生瞬态液化。

流固土耦合力学课题组分析指出了现有的海床瞬态液化理论存在不足: 超静孔压梯度若允许大于砂土浮容重, 则某一深度与海床表面的超静孔压差将大于上覆土体的有效应力, 从而产生方向向上的净合力而引发土体溅出的物理谬误 (图2a)。Mory et al. (2007) (J. Waterway, Port, Coast., Ocean, Eng., 133(1): 28-38) 曾在法国西南部大西洋Capbreton 海域的海床液化现场监测中发现、但在当时却无法利用现有瞬态液化理论解释的物理规律: 海床发生瞬态液化后, 施加更大波高的波浪载荷, 海床土体的超静孔压梯度却难以逾越某一阈值。研究人员通过瞬态孔压与有效应力关联分析发现, 该阈值实为砂质海床土层有效应力 ($\sigma' = \gamma' z$) 的垂向导数。研究人员对瞬态液化物理机理进行揭示, 提出了修正判别准则: 在砂质海床土体的瞬态液化区内, 超静孔隙压力梯度幅值应恒等于 (不应“大于”) 土体浮容重。

在所提出的海床瞬态液化修正判别准则的基础上, 利用多孔介质渗透固结理论, 推导得到了描述含瞬态液化层的砂质海床土体孔压分布的理论解, 可科学地预测瞬态液化深度。利用该理论解, 可对上述Mory et al. (2007)获得的瞬态液化海床孔压分布和液化深度的现场观测实验规律给出科学解释。分析发现若利用前人的解耦分析, 则会明显低估瞬态液化深度(图2(a) (b)), 从而给海洋工程设计带来风险。

相关研究成果发表在 Ocean Engineering (Qi and Gao, 2018)和 Theoretical & Applied Mechanics Letters (Qi and Gao, 2015)。研究工作得到了中科院 B 类

先导专项、国家自然科学基金和国家重点基础研究发展计划 (973) 等项目的支持。

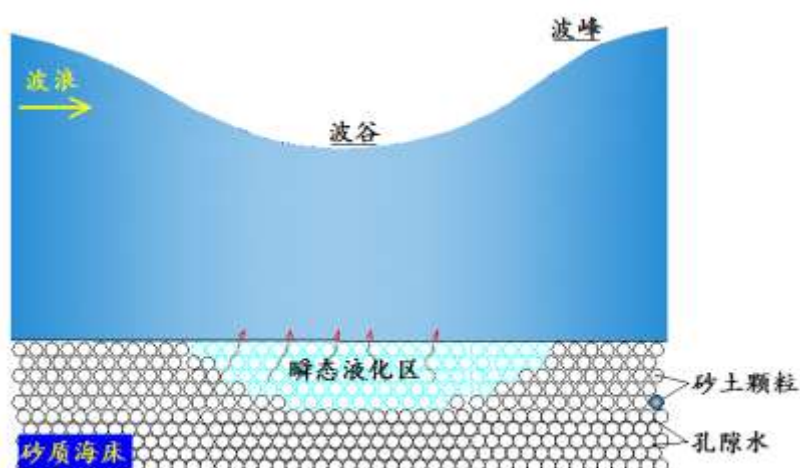
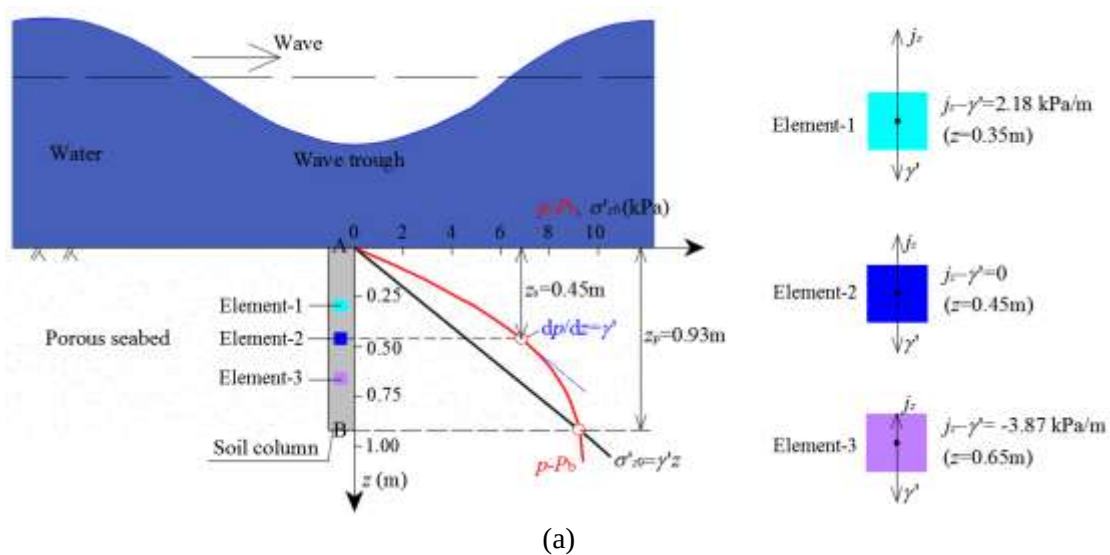
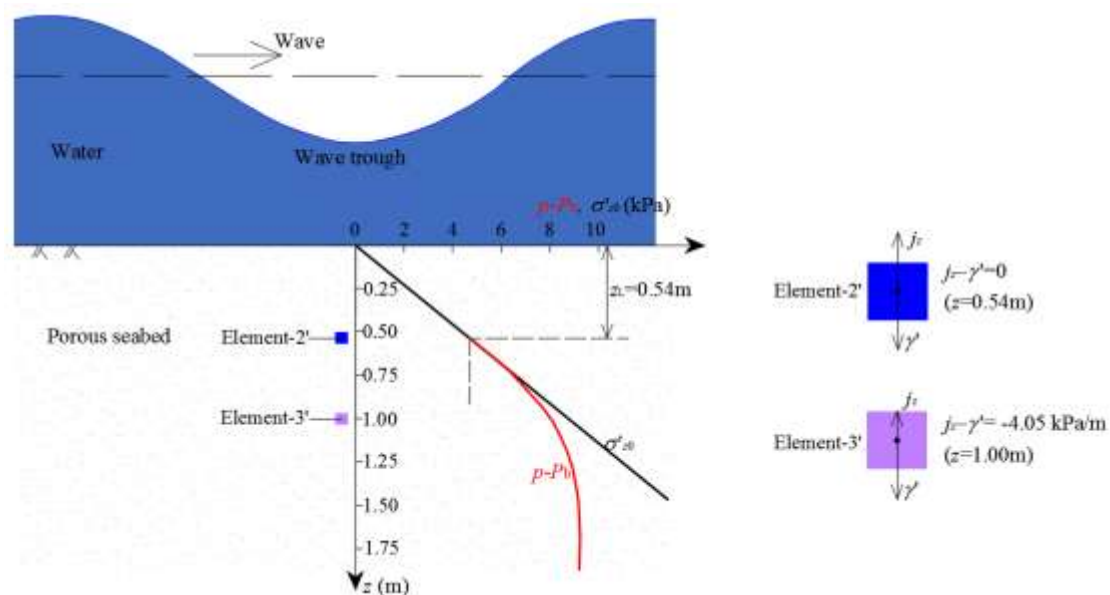


图 1. 波浪作用下砂质海床发生的瞬态液化



(a)



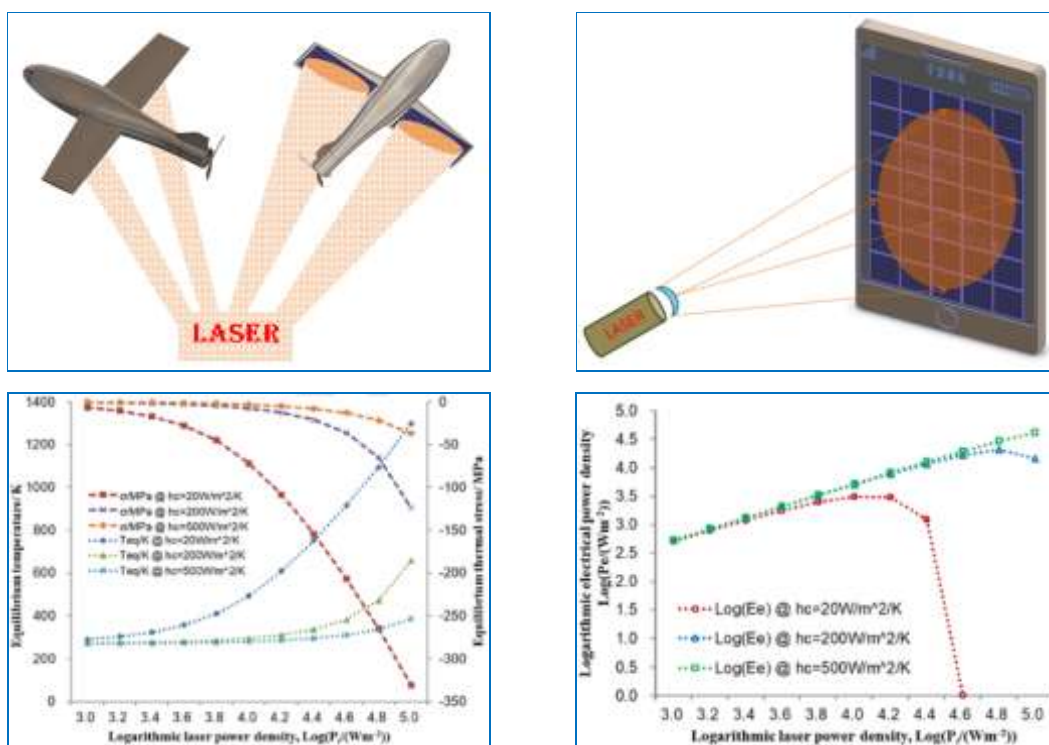
(b)

图 2. 含瞬态液化层的砂质海床孔压分布: (a) 前人关于瞬态孔压与有效应力的解耦分析; (b) 新得到的基于瞬态液化修正准则的理论解 (p 为任意位置超静孔压, P_b 为床面处的超静孔压幅值, γ' 为土体的浮容重)

(流固土耦合力学课题组供稿)

➤ 激光充能技术研究进展

激光充能技术是指利用激光束和光电池实现远距离、无线充电的技术,可应用于无人机续航和便携式电器充电等,该技术关键在于高亮度激光辐照环境的光电转换效率和稳定性。因为,激光辐照光电池的光电转换过程总是伴随着热耗散,热耗散引起的材料升温 and 热应力又会通过若干机制(改变材料带隙、缩短载流子寿命等)降低光电效率,更多光能耗散成热能、温升/热应力进一步加剧....这种耦合行为甚至会导致光电池暂时或永久失效。



图(上) 激光充能技术概念(下) 激光辐照光电池的力、热、电效应耦合算例

针对激光充能系统稳定性和能量转换效率问题,中科院力学所科研团队建立了从激光输入到电能输出的耦合模型,发展了光能吸收分布求解的

数学格式, 阐明了光能向电能/热能/应变能转化的耦合机制, 构造了系统最优参数窗口搜索算法, 并获得了试验验证。

研究得到了国家自然科学基金项目和中科院 A 类先导项目的资助, 部分结果公开发表在相关领域经典期刊【*Journal of Power Sources* 2018 (393)211-216, *Energy* 2017(134)248-255, *Applied Thermal Engineering* 2015(88)410-417】。该研究为激光充能技术搭建了多效应理论框架、为充能系统设计提供了高效率优化算法。 (冲击与耦合效应课题组供稿)

➤ 探讨页岩气开采中微观参量对宏观产量的影响

众所周知, 页岩中存在丰富的纳米孔隙, 并且具有低孔、低渗的特点, 页岩气开采时必须采用水力压裂等手段在储层中形成密集有效的裂缝网才能实现商业开采。那么, 页岩气的产量与有机质内的纳米孔隙的关联度如何? 怎样建立微观与宏观的联系? 是当前页岩气开发中急需解决的科学问题。

近期, 中科院力学所流固耦合实验室林缅研究团队针对这一问题取得重要进展。研究人员从认识页岩中至关重要的有机质块和有机质孔出发, 提出了有机质表征单元体 (oREV) 的概念, 通过多尺度扫描图像, 结合统计方法, 建立了具有 oREV 尺度的统计耦合模型。该模型充分考虑了有机质和无机质的耦合。通过融合课题组前期工作, 将纳米喉道内的甲烷吸附、有机质内甲烷的运移扩散, 及无机质内裂缝网的达西流动有机地结合在一起, 形成了一套快速高效预测页岩气产量的方法, 真正实现了跨尺度的渗流模拟。通过计算分析发现, 统计耦合模型所预测的产量曲线比其他模型的结果更合理, 能够部分回答当前关于理论预测产量与实际产量脱钩的问题。

该研究成果已发表在石油工程学科顶级国际期刊 *Journal of Petroleum Science and Engineering* (Cao G, Lin M, Jiang W, Zhao W, Ji L, Li C, et al. A statistical-coupled model for organic-rich shale gas transport. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 2018; 169: 167-183.) 上。研究工作得到了中科院先导

B 页岩气专项、国家自然科学基金和国家重点基础研究发展计划 (973) 等项目的支持。

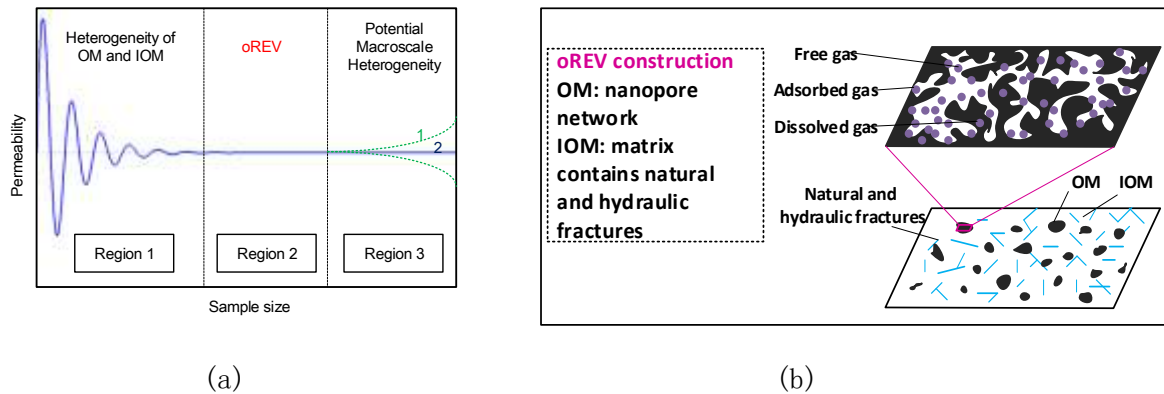


图 1 (a)oREV 的定义,(b)oREV 的构建

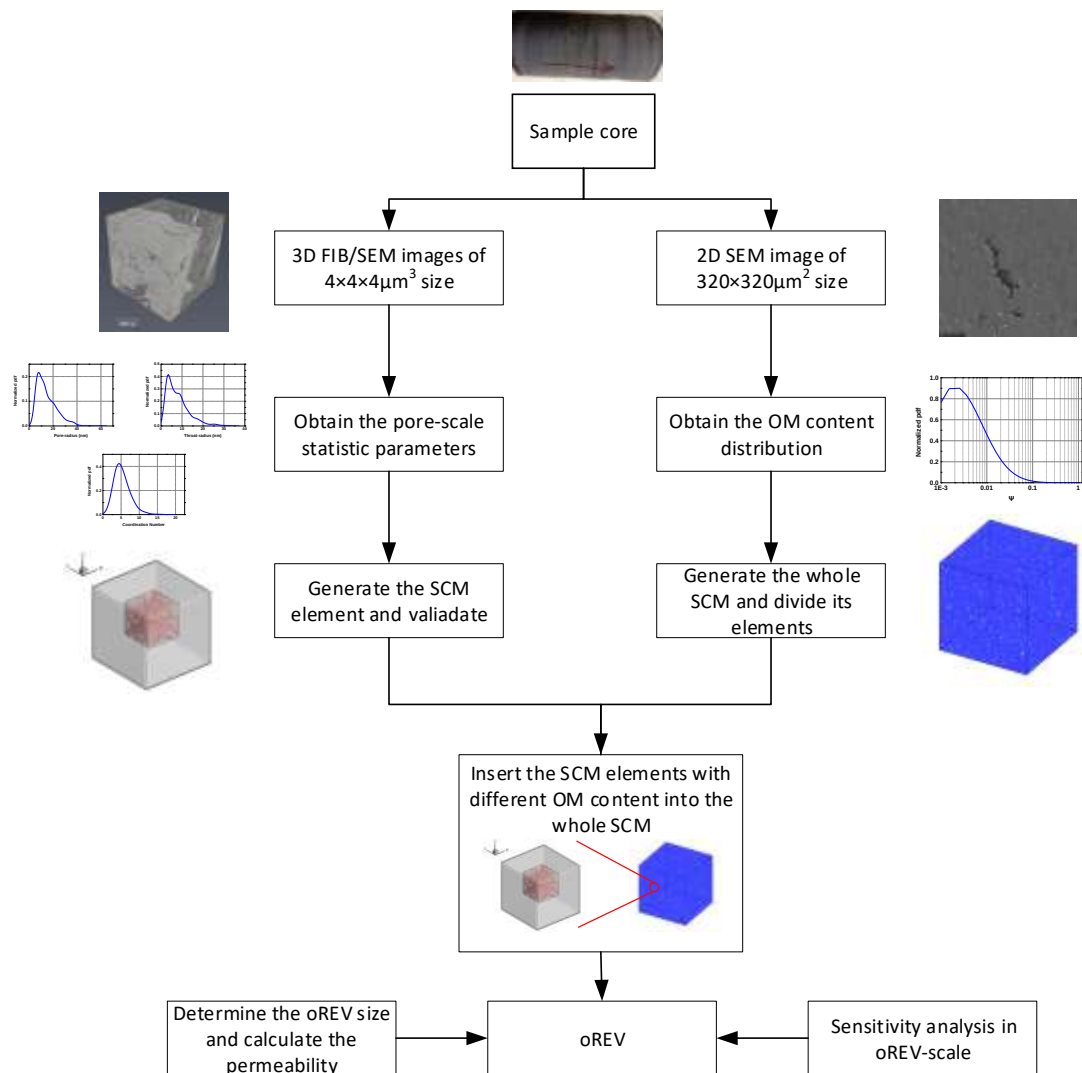
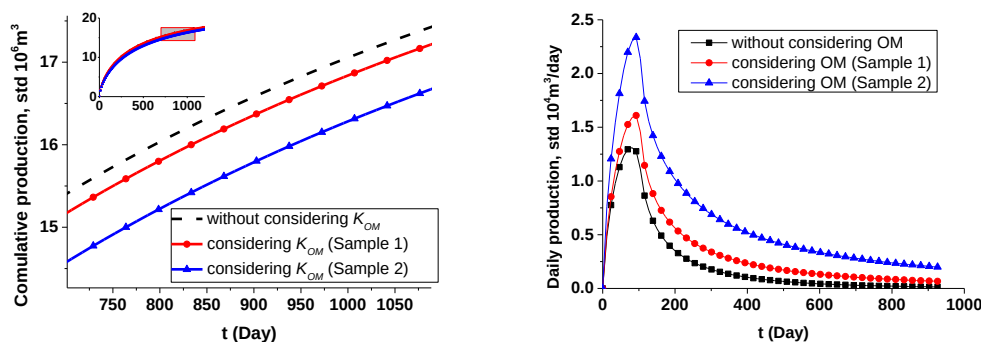


图 2 计算流程



(a) 累积产气量随时间变化

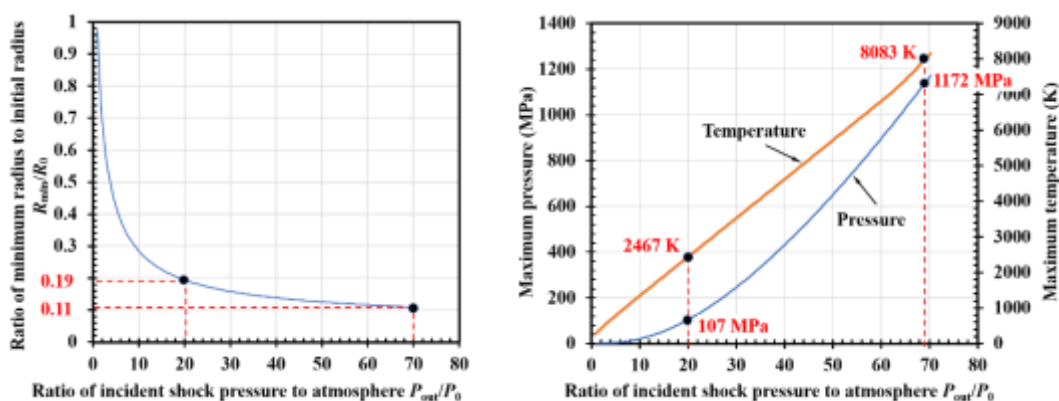
(b) 日产气量随时间变化

图 3 多级压裂水平井产气曲线

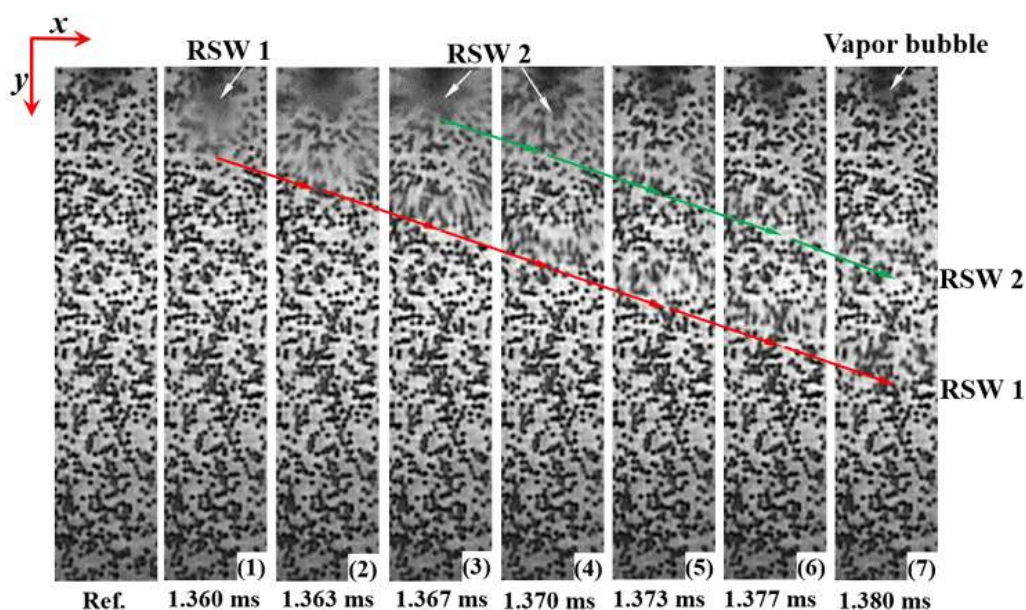
(海洋环境与工程应用课题组供稿)

➤ 气泡溃灭的力学模型及压力测量研究进展

冲击波作用下气泡的多模态响应问题是气泡动力学中的重要研究方向, 涉及非线性、非定常等各种流体动力学现象的强烈耦合。冲击与耦合效应课题组以水中冲击波加载气泡为研究对象, 分析了气泡的体积振荡和溃灭冲击波的生成, 在气泡溃灭力学模型及压力测量方面取得了最新进展。理论方面在原有压力作用下体积振荡模式基础上, 进一步考虑了液体压缩性、界面热传导、质量交换和分子的热分解等因素, 建立了气泡在下的综合力学模型, 实现了对泡内温度、压强、羟基自由基生成等多场物理量的理论求解。实验方面采用背景指向条纹法 (Background Oriented Schlieren), 通过分析水中冲击波造成的背景散斑偏移, 重构气泡溃灭冲击波的压强分布特征, 相比与传统的压强传感器单点测量, 新方法可以得到高时空分辨的压强场分布。相关研究成果发表在 *Ultrasonics Sonochemistry*、*Journal of Visualization* 等相关领域权威期刊上。



在 0.1 兆帕-7 兆帕的外来冲击波作用下直径为 100 微米的气泡溃灭运动的理论解，发表于
Ultrasonics Sonochemistry



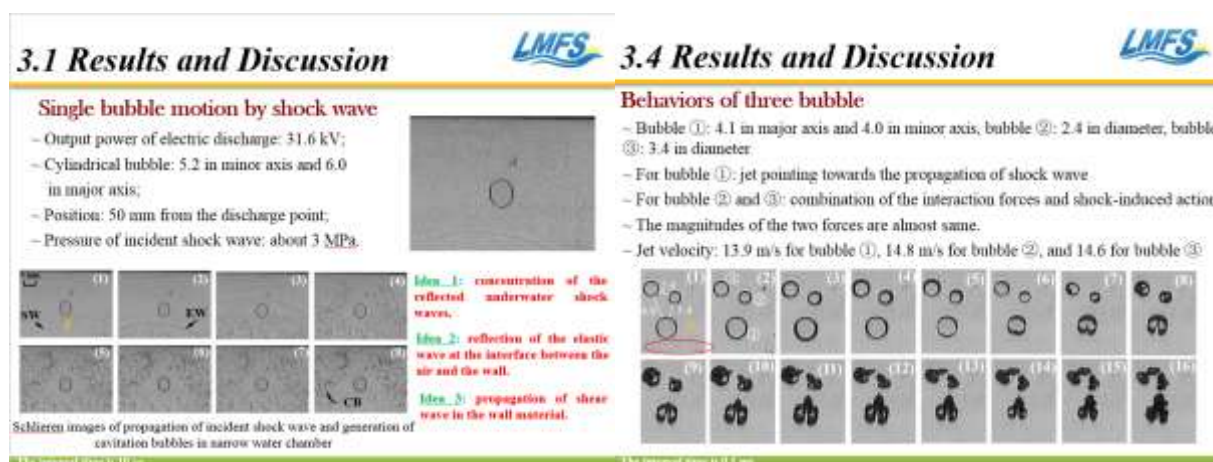
气泡溃灭冲击波在背景上造成的散斑偏移，发表于 Journal of Visualization

(冲击与耦合效应课题组供稿)

➤ 二维气泡与冲击波相互作用的研究进展

冲击与耦合效应课题组王一伟、杜特专和王静竹于 5 月 13 日参加了在美国巴尔的摩举办的第 10 届国际空化学会 (10th International Symposium on Cavitation)，并且做分会场报告。针对回转体与空泡、自由面的流固耦合问题，王一伟和杜特专分别作了题目为“Cloud cavitating flow around an axisymmetric projectile in the shallow water”和“Suppression of cavity volume and its oscillation using adaptive geometry”的报告。王静竹报告了在冲击波作用

下二维气泡运动响应的相关研究, 题目为“Experimental study on interaction of multiple cylindrical bubbles with underwater shock waves”。在研究中发现, 当触发脉冲稳压电源时, 二维气泡的周围有很多空化气泡生成。经过纹影法观测发现, 大量能量在电极处瞬时释放时, 水中产生冲击波的同时, 还引起了腔室板材料的变形, 导致应力波在板面传播, 从而诱导水中拉伸区域的产生, 生成空泡。在大会上, 还报告了多个气泡的运动响应, 通过气泡射流的方向和速度, 可以推算出气泡间相互作用力的大小。报告后与多位学者进行深入讨论, 得到了关于改进实验方法等一些建议。



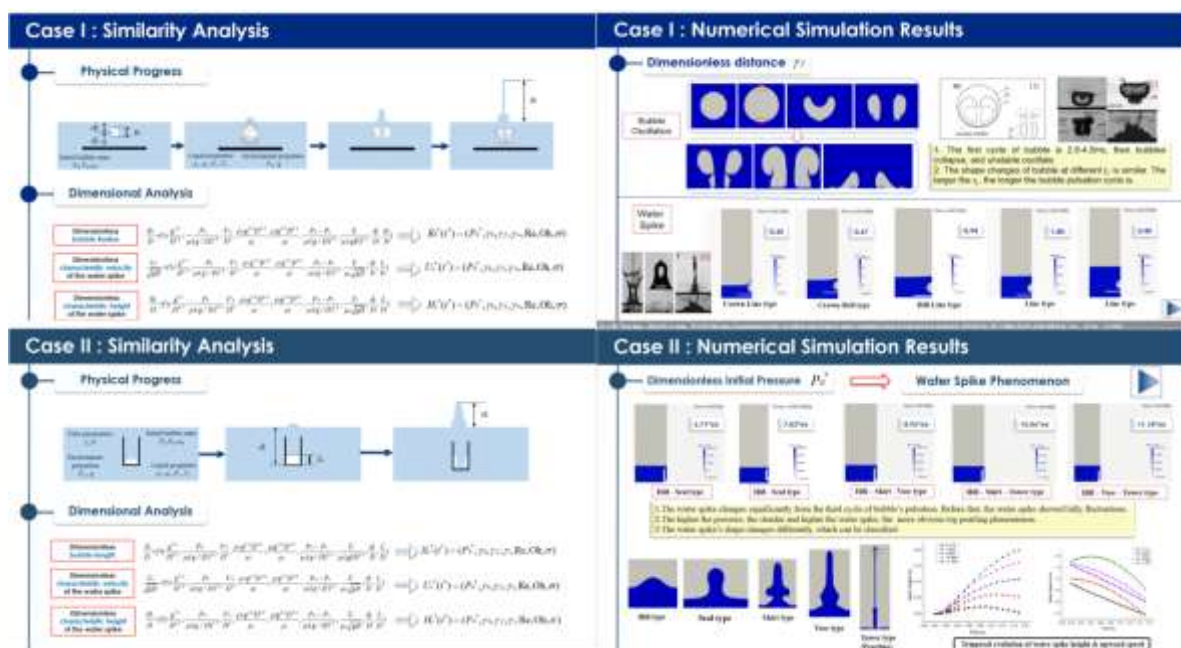
在水中冲击波作用下一个气泡和多个气泡的运动响应

(冲击与耦合效应课题组供稿)

➤ 自由液面和刚性壁面共同影响下气泡脉动和水泵现象研究进展

冲击与耦合效应课题组王一伟和李泓辰于 6 月 5 日前往美国芝加哥参加第 18 届美国力学大会 (18th U.S. National Congress for Theoretical and Applied Mechanics)。针对自主开发的气/汽/水三相可压缩求解器的研究进展, 王一伟报告了题目为“A numerical method for compressible multiphase flow with cavitation effects and its applications in ocean hydrodynamics simulations”相关内容。李泓辰报告了自由液面和刚性壁面共同作用下的气泡动力学和水泵现象, 题目为“Similarity analysis and numerical simulation of bubble evolution and water spike phenomenon near free surface and different walls”。该现象涉及非线性

性、非定常等各种流体动力学现象的强烈耦合, 气泡演化过程中伴随的高温高压和射流等现象是目前研究的重点。随着微流控设备、水下推进、船舶减阻等工程应用中气泡脉动的环境愈加复杂, 对于约束空间内的气泡动力学的研究有着重要意义。报告结合之前课题组有关管内激光空泡的相关实验研究, 对两种不同约束条件下气泡脉动和水泵现象进行了相似分析和数模拟, 并与相关实验结果进行了对比。报告结束后, 清华大学的孙超教授和西安交通陶益壮教授对报告进行了点评和交流, 并对管内气泡动力学的相关研究进行了探讨, 并给出了有关理论求解、射流等实验重点关注对象等方面的一些建议。



两种不同约束条件下气泡脉动和水泵现象的相似分析和数值模拟结果



报告过程中与会后合影

(冲击与耦合效应课题组供稿)