



# 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

2016 年第 2 期 (总第 9 期)

---

### 目 录

- 科工局基础科研重点项目启动会顺利召开 ..... 3
- 王一伟副研究员应邀赴法国里尔力学实验室进行学术访问与合作研究 ..... 3
- 海洋土力学课题组水合物研究项目开题 ..... 4
- 基于梯度缺陷的薄壁圆筒压溃历程主动控制研究取得进展 ..... 5
- 点阵夹层板热力载荷下失效行为研究取得进展 ..... 8
- 水合物分解相变相关地层安全评价研究取得进展 ..... 10
- 英国拉夫堡大学 Grimshaw 教授应邀访问力学所并做“地转效应对内孤立波影响”的学术报告 ..... 13
- 南安普顿大学邢景堂教授应邀访问力学所并开展“非线性动力系统能流理论及其应用”专题学术报告会 ..... 14
- 美国密西西比州立大学副教授刘宇澄来访并做学术报告 ..... 15

➤ 法国石油研究院 Benoît Noetinger 博士来访并做学术报告 ..... 15

## 科工局基础科研重点项目启动会顺利召开

2016 年 5 月 17 日,力学所召开科工局基础科研重点项目启动会。参加会议的包括黄晨光研究员、张新宇研究员、宋宏伟研究员、仲峰泉研究员在内的力学所 10 余位相关研究人员,以及中科院理化所田昌勇高工等 3 位参研人员。项目负责人宋宏伟研究员就项目的分工、进度和初步研究计划进行了报告,与会人员展开了深入的探讨。黄晨光研究员指出,科工局重点项目在进展与结题等各个环节的要求十分严格,各参研团队的紧密配合是顺利完成项目任务的基本保障,在执行项目过程中应勇于创新与突破,取得有显示度的研究成果。

## 王一伟副研究员应邀赴法国里尔力学实验室进行学术访问与合作研究

应法国里尔力学实验室 (Laboratoire de Mécanique de Lille) 主任 Coutier-Delgosha 教授的邀请,我室王一伟副研究员于 2016 年 6 月 2 日至 2016 年 6 月 25 日赴法国里尔力学实验室进行学术访问与合作研究。

Coutier-Delgosha 教授在汽液两相流动机理与实验方面均有很深入的研究,在该领域有很高的知名度与影响力。王一伟副研究员应邀进行学术访问研究并做了关于空化流动研究进展的报告,旨在促进双方在该领域中研究成果的交流与互动。交流期间,双方合作开展了气泡溃灭温度精细测量与数值模拟,并确定未来将进一步在气泡及空化流动精细数值模拟方面进一步合作,共享数据与成果,促进共同进步。

## 海洋土力学课题组水合物研究项目开题

天然气水合物我国的战略能源。水合物勘探在我国南海逐步开展,证实南海北部陆坡、东沙、琼东南等区域具有很丰富的潜在资源量。水合物的钻探、试采以及开采,可能引起土层不稳定,对海床及井筒等结构物构成严重威胁。因此很有必要开展海域天然气水合物土层的力学特性与分解导致的安全评价研究。

2016 年 5 月,中国地质调查局青岛海洋地质研究所合作研究课题《含水合物沉积物力学特性实验模拟》开题,项目负责人张旭辉副研究员,项目周期 2016 年-2018 年,经费 75 万元。

该项目以我国南海稳定带内沉积物工程地质条件为背景,开展天然气水合物分解过程中沉积物力学特性研究,据此提出分解过程中水合物沉积物的强度参数模型。研究内容包括:(1)水合物分解过程中实验测试技术与非饱和土、动态力学特性测量研究,系统深入分析水合物分解过程中沉积物孔隙压力演化规律;(2)结合实验数据与基本现象提出水合物分解过程中非饱和沉积物的强度参数、本构关系模型并开展敏感性分析工作。

2016 年 6 月,中国地质调查局广州海洋地质调查局合作研究课题《水合物分解的土力学响应及土层稳定性评价》开题,项目负责人鲁晓兵研究员,项目周期 2016 年-2018 年,预算经费 84 万元。

项目总体研究目标任务:配合项目组开展研究区含水合物土的分解过程中静态力学特性实验测量与强度参数模型研究,完善水合物分解引起的井口土层破坏评价模型,为我国水合物勘查和试采工程环境评价提供技术支撑。研究内容包括:(1)含水合物土宏微观力学特性研究,开展含水合物土样品制备与动力特征参数测量,进行水合物分解过程中物理和力学特性测量,并提出含水合物土分解过程中弹性模量、强度参数模型;(2)水合物分解的土层与结构不稳定评价研究,开展水合物分解引起的井口不稳

定物理模拟与临界条件分析,进行土层与结构变形、破坏的数值模拟,并探讨水合物分解的土层与结构不稳定监测方案与监测数据分析方法研究,为我国水合物钻探、开采引起的土层安全保障措施提出提供依据。

## 基于梯度缺陷的薄壁圆筒压溃历程主动控制研究取得进展

在高温气冷核反应堆中,控制反应速度的控制棒在遭遇地震、紧急停堆等事故时会触发自由跌落模式。因此,建立相应的防护系统以吸收控制棒动能是控制棒设计体系中的重要环节。由于核反应堆内部结构的特殊性,吸能防护系统的设计面临严苛的要求,包括吸能历程的稳定性、压溃力精确控制以及高温下的运行可靠性等。

面对上述问题,中科院力学所流固耦合系统力学重点实验室冲击与耦合效应课题组提出了基于梯度缺陷的主动控制方法来调控压溃历程,并通过赋予不同的梯度参数获取不同趋势的压溃力演化特征。研究人员在经典薄壁圆筒基础上,将人工预制的缺陷以内外环交叠的形式布置于筒壁上,其深度线性递减,形成了梯度缺陷圆筒结构(Gradient grooved tube, GGT)。理论分析中,在塑性铰理论基础上引入梯度缺陷项,获得了以压溃位移为自变量的分段平均压溃力函数,其中包含了应变强化及应变率强化的影响。研究发现,此类结构压溃历程主要受三个无量纲参数控制,包括控制局部几何协调性的无量纲凹槽宽度,控制局部稳定性的无量纲凹槽深度以及决定屈曲模式可控性的无量纲半波长。利用数值模拟方法,研究人员深入探讨了上述参数的合理范围及其对屈曲历程的影响规律。在相关工业部门进行的原型验证试验中,梯度缺陷筒表现出了优异的吸能特性和抗侧向扰动能力,实验过程中,吸能装置均能保持理想的圆环形屈曲模式和稳定的吸收历程,获得了总体设计单位的肯定。

薄壁圆筒作为重要的冲击防护结构形式, 在诸多领域有着实际的应用场景。本项研究实现了在非稳定加载条件下对吸能压溃历程的精确预测及主动控制, 已应用于最新的高温气冷核反应堆中, 并有望在各类吸能构件上推广应用。相关工作发表于期刊 *International Journal of Mechanical Sciences* 上, 第一及通讯作者为魏延鹏, 其他作者包括杨喆、闫贺、郭雅惊、吴先前、黄晨光等。原文链接:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740316000473>

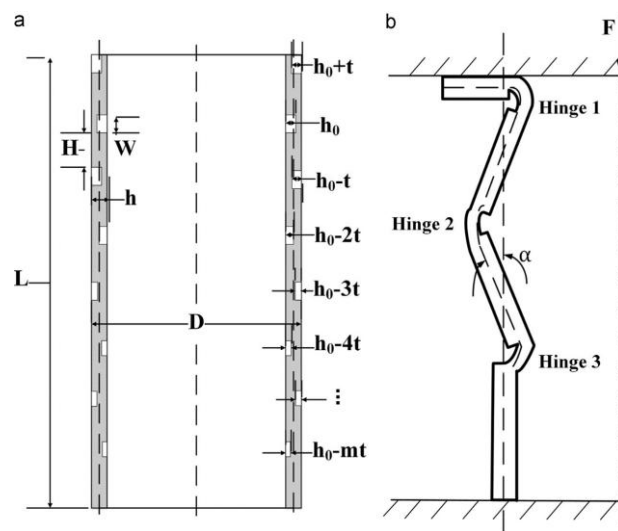


图 1 a) 梯度环形凹槽缺陷布置示意图 b) 梯度缺陷筒的褶皱屈曲模型

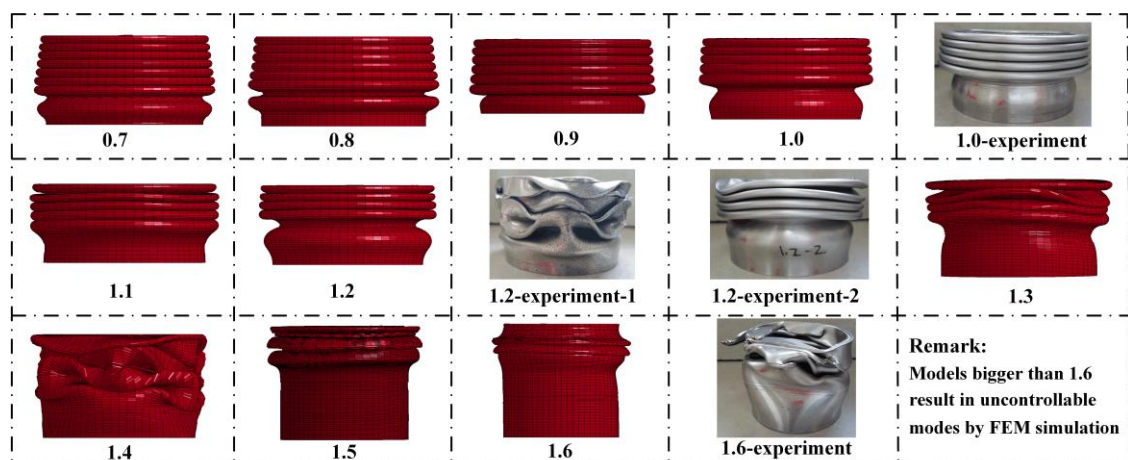


图 2 无量纲半波长对压溃历程的控制效果

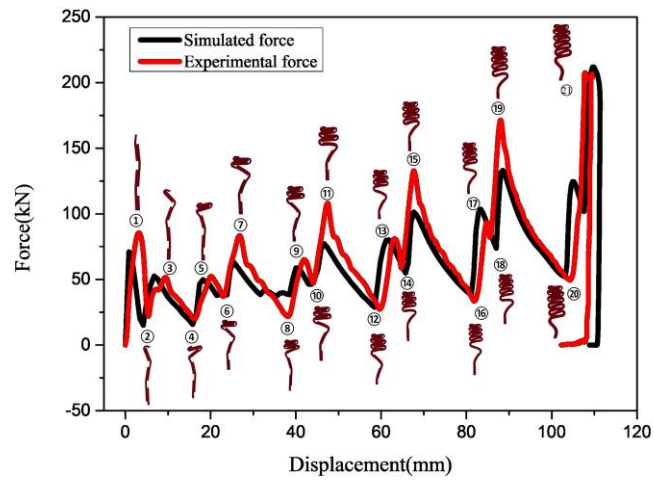


图 3 梯度缺陷筒压溃力的数值模拟结果与实验结果比较



图 4 原型验证实验 a) 模型试验中的细长控制棒 b) 控制棒冲击梯度缺陷筒 c) 完整筒受控制棒冲击发生欧拉失稳 d) 梯度缺陷筒的圆环形屈曲模式

## 点阵夹层板热力载荷下失效行为研究取得进展

点阵夹层板具有高比刚度、比强度、隔热、隔震、抗冲击及可设计性等特点, 在高速飞行器热结构设计中具有广阔的应用前景。在极端的热力学环境, 点阵夹层板可能出现不同的失效机理与失效模式, 开展点阵夹层板热结构响应方面的研究工作, 对于航天热结构轻量化设计具有重要意义。热结构耦合力学课题组近年来在金属点阵夹层板热结构失效行为的理论、分析与测试等领域取得了系列研究进展, 相关研究成果近期在 *AIAA Journal*, *Composite Structures*, *International Journal of Mechanical Sciences* 等一类期刊发表。

当应用于高速飞行器热结构时, 夹层板因热膨胀受到边界约束而产生内力, 可能出现热屈曲现象。课题组通过对未知变量进行双重傅里叶展开得到了四边固支条件下点阵夹层板特征值方程, 并分析了结构参数对临界屈曲温度的影响(*Journal of Thermal Stresses*, 2014)。然后, 通过变分原理建立了均匀温升条件下的四边简支点阵夹层板热后屈曲大挠度控制方程, 并以中心挠度作为小参量进行摄动展开得到了后屈曲平衡路径(*Journal of Thermal Stresses*, 2016)。实验上, 通过点阵夹层板试件与夹持装置的热膨胀系数差异来提供面内压力设计了点阵夹层板热屈曲实验装置, 避免了热力学边界条件相互冲突。并将非接触式光学测量方法 3D-DIC 引入到热屈曲实验当中, 对点阵夹层板热后屈曲行为进行了全场实时测量(*AIAA Journal*, 2015)。

初始缺陷有可能会对点阵夹层板力学性能产生较大影响。课题组进一步对单向压缩下点阵夹层板缺陷敏感性进行了试验研究和模型分析。研究表明, 点阵夹层板对缺陷位置十分敏感: 与压缩方向平行及中心处的缺焊以及点阵胞元缺失点阵夹层板的临界屈曲载荷影响较小; 而跟压



缩方向垂直方向的缺陷则显著地降低了点阵夹层板的抗屈曲强度 (Composite Structures, 2016)。

在热力载荷下, 点阵夹层板除了热屈曲之外还存在面板屈曲、面板屈服、夹芯屈曲与夹芯屈服等多种复杂的失效模式, 各种失效模式之间的竞争关系、发生的阈值与条件是值得深入研究的课题。课题组通过理论分析建立了均匀温升条件下点阵夹层板失效图谱, 然后并通过数值优化算法对点阵夹层板进行了优化设计, 得到了满足热结构安全裕度条件下的最优轻量化结构参数 (International Journal of Mechanical Sciences, 2016)。

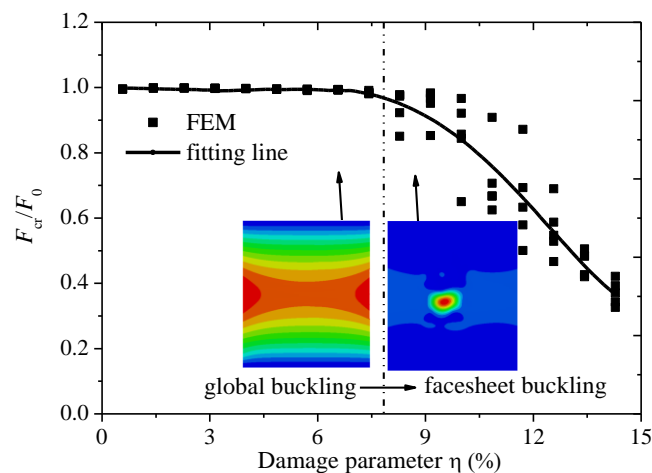


图 1. 随着缺陷增加夹层板从总体屈曲向面板屈服模态转变

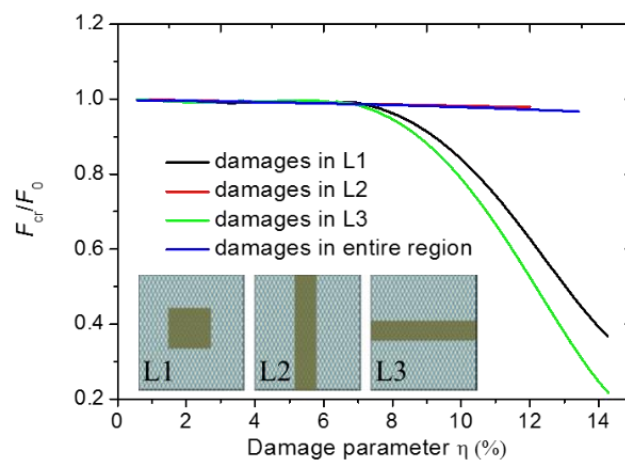


图 2. 缺陷排布对点阵夹层板屈曲行为的影响

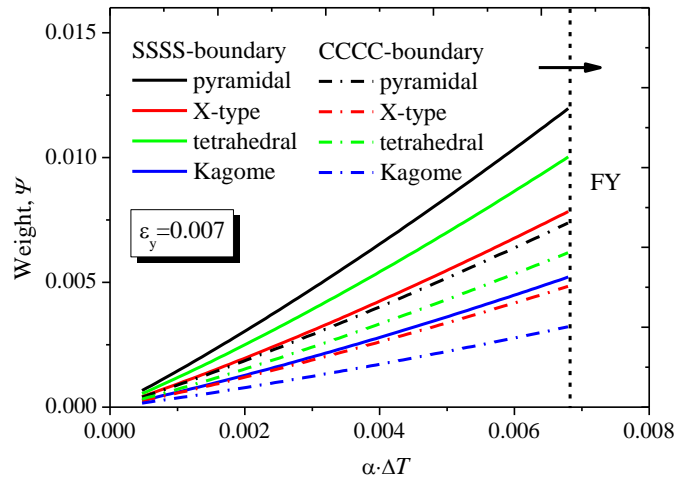


图 3. 点阵夹层板轻量化优化设计

## 水合物分解相变相关地层安全评价研究取得进展

天然气水合物是我国的战略能源，但水合物分解可能引发多种地质灾害。海洋土力学课题组自 2005 年以来，自主搭建了水合物开采安全评价实验及分析平台，首次在实验室发现水合物热分解引起的土层分层、气体喷发破坏形式 (J. Petro. Sci. Eng., 2011) 并进行了深入研究，对水合物分解引起的滑塌破坏开展了系列的研究。这是涉及传热、相变、多相渗流、土层变形和破坏的多个物理效应的流固耦合力学新问题，对水合物开采相关的工程安全和环境效应评价具有重要的工程价值。

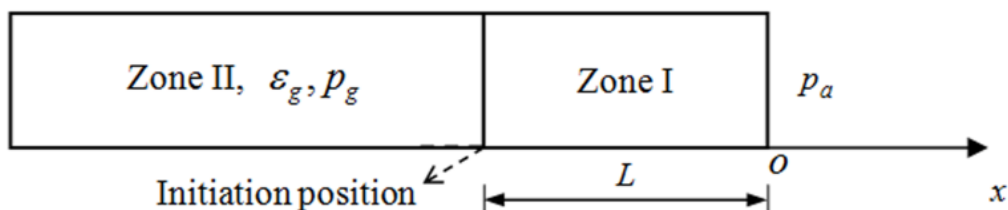


(a) 土层分层      (b) 气体喷发      (c) 土层滑塌

图 1 土层分层、气体喷发和土层滑塌实验现象

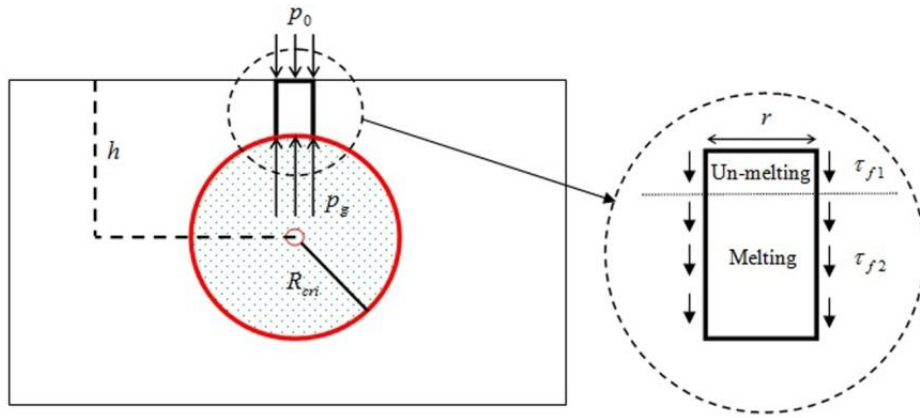
这些研究工作表明,水合物热分解引起的地层分层和喷发破坏是水合物热分解导致的分解区域内土层软化和超静孔隙压力而形成的,即随着分解区域的扩展,上部阻力逐渐减小,超静孔隙压力上升并超过上部阻力,造成土层开裂,形成有一定厚度的充满气体和水的裂缝(J. Petrol. Sci. Eng., 2015);在气体能量足够大时,气体携带分解区土体推出上覆层,形成类似火山喷发的气-液-固三相流(Int. J. Numer. Anal. Met., 2015);水合物分解引起的滑塌是水合物分解后,分解区与上覆层之间形成多处分层或大面积连续贯通的分层,在重力和孔隙压力作用下,将引起浅层大面积小坡度的海底滑塌(Ocean Eng., 2015; 2016)。

采用课题组自主研发的实验装置得到了水合物分解前后沉积物的热、力学参数(J. Heat Trans.-T. ASME, 2014; Mar. Petrol. Geol., 2015; Int. J. Offshore Polar, 2015),获得了土层分层、气体喷发和土层滑塌的临界条件和扩展规律(如图 2),为我国南海水合物勘探、试采以及开采安全及环境评价提供了科学依据。



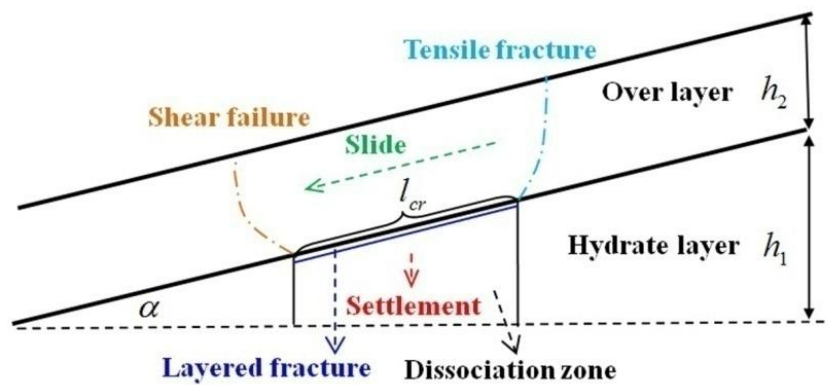
$$\text{Critical condition: } \frac{\varepsilon_g p_g + \varepsilon_w p_w - p_a - \varepsilon_m \rho_m g L + \varepsilon_h \rho_h g L}{L \tau_f l / A} = 1$$

(a) 土层分层模型



Critical condition: 
$$\frac{p_g - p_0}{4 \cdot (\tau_{f1} \cdot \xi + \tau_{f2} \cdot (1 - \xi)) \cdot (h - R_{cri}) / d + \bar{\rho}g \cdot (h - R_{cri})} = 1$$

(b) 气体喷发模型



Critical condition: 
$$\frac{\rho_{s2}gh_2 \tan^2(45^\circ + \phi/2)/2 + 2c \tan(45^\circ + \phi/2)}{l_{cr}\rho_{s2}g \sin \alpha} = 1$$

(c) 土层滑塌模型

图 2 土层分层、气体喷发与土层滑塌临界条件计算模型

本研究得到国家自然科学基金、院修购项目、中国地质调查局项目和中石油-中科院高端战略联盟研究计划项目的资助。

## 英国拉夫堡大学 Grimshaw 教授应邀访问力学所并做“地转效应对内孤立波影响”的学术报告

2016 年 6 月 28 日, 拉夫堡大学 Grimshaw 教授应邀访问力学所, 作了题为“The effect of rotation on internal solitary waves”的学术报告。讨论会由李家春院士主持, 周济福研究员、“青年千人计划”学者王展研究员、王旭助理研究员、王晓亮助理研究员以及力学所研究生 10 余人参与交流和讨论。

Grimshaw 教授介绍了地转效应对内孤立波影响的相关研究, 指出在非线形长波条件下, 海洋内孤立波可以由 KdV 方程描述, 但考虑地转效应后, 该方程就无法准确描述内孤立波。结合理论分析、数值模拟及相关实验, Grimshaw 教授指出, 地转效应作用以内孤立波波包的形式呈现, 同时若进一步考虑地形变化的影响, 还将有二次波等现象的发生。

针对报告中的数值模型, Grimshaw 教授与李家春院士、周济福研究员、王展研究员展开了深入讨论。随后王旭助理研究员、檀大林博士生就海底地形变化下内孤立波分裂演化问题, 同 Grimshaw 教授进行了交流和讨论。



## 南安普顿大学邢景堂教授应邀访问力学所并开展“非线性动力系统能流理论及其应用”专题学术报告会

2016 年 6 月 7 日, 南安普顿大学邢景堂教授应邀访问力学所, 作了题为“Energy Flow Theory of Nonlinear Dynamical Systems with Applications”的学术报告。讨论会由李家春院士主持, 周济福研究员、“青年千人计划”学者王展研究员、陈伟民副研究员、王旭助理研究员、王晓亮助理研究员以及力学所研究生 10 余人参与交流和讨论。

邢景堂教授介绍了其发展的广义能流理论, 该理论旨在研究各类科学及工程领域内的非线性动力系统问题 (例如 *stabilities, periodical orbits, bifurcations, and chaos*)。利用该理论, 邢景堂教授给出了常见的几类非线性动力问题 (*Diffing's oscillator, Lorenz attractor, Van der Pol's equation*) 的能流表达形式。同时邢景堂对该能流理论在材料安全准则及引力波等其他领域的应用进行了分析与展望。

随后, 邢景堂教授介绍了南安普顿大学流固耦合数值模拟方面的研究进展, 他们开发的流固耦合程序能够模拟海洋工程中多种强非线性问题, 并介绍了各类计算分析结果。针对流固耦合数值模型的构建等问题, 邢景堂教授与李家春院士、周济福研究员等研究人员一起展开了深入交流。

报告会上, 互动气氛热烈, 与会的年轻科研人员和研究生踊跃发言讨论。报告结束后, 邢教授参观了海洋流固耦合水槽, 并向力学所赠送了其最新学术著作《Energy Flow Theory on Nonlinear Dynamical Systems with Applications》。



## 美国密西西比州立大学副教授刘宇澄来访并做学术报告

2016 年 6 月 27 日, 冲击与耦合效应课题组邀请, 美国密西西比州立大学机械工程系副教授刘宇澄访问力学所, 并在会议中心 207 会议室做了题为“Multiscale Experimental-Computational Framework for Process-Structure-Property-Performance Sequence of Materials”的报告。报告中他详细介绍了材料高应变率的变形和断裂, 多尺度建模和模拟, 材料的工艺-结构-属性-行为的机理分析等最近开展工作。参加会议的包括来自流固耦合系统力学实验室、非线性力学实验室和北京科技大学的师生, 与会人员开展了热烈的讨论, 并希望以后可以加深沟通交流, 共同进步。



## 法国石油研究院 Benoît Noetinger 博士来访并做学术报告

2016 年 5 月 24 日上午, 法国石油研究院 Benoît Noetinger 博士来访并在力学所会议中心 207 室进行了学术交流。Noetinger 博士首先介绍了法国石油研究院(IFP)的基本情况, 然后做了题为“Up Scaling of Fracture Networks Accounting for Matrix to Fracture Flow”的报告。

报告介绍了目前裂缝性油气藏流动模拟的方法，指出了当前 Discrete Fracture Network (DFN) 方法存在的网格量巨大、计算效率低的问题。随后，Noetinger 博士介绍了一种“Pipe network”的方法，该方法仅以裂缝相交处的压力为未知量，不需要对全区域进行网格剖分，减少了自由度，提高了计算效率。随后，Noetinger 博士回答了与会者的提问。

