



非线性力学国家重点实验室(LNM) 2016 年度学术年会

时间：2016 年 12 月 17 日~18 日

地点：中国科学院力学研究所二层半小礼堂

一、17 日上午 8:15~8:45 开幕式

主持人：武晓雷 研究员

- 1、主任报告（魏宇杰 研究员）：LNM2016 年工作报告
- 2、领导讲话
- 3、全体代表合影

二、17 日上午 8:45~12:00 学术报告

8:45-10:30 主持人：魏宇杰 研究员

时 间	报告人	职称、单位	报告题目
8:45-9:15	郑晓静	院士 西安电子科技大学	沙尘运输中的多尺度分析
9:15-9:45	何国威	研究员 LNM	湍流的时间尺度问题：从泰勒模型到潜艇噪声
9:45-10:15	苏业旺	研究员 LNM	具有超大延展性的柔性电子器件非屈曲结构设计及应用

10:15-10:30 休息、可视化作品竞赛投票

10:30-12:00 主持人：胡国庆 研究员

时 间	报告人	职称、单位	报告题目
10:30-11:00	冯西桥	教授 清华大学	生物软组织力学
11:00-11:30	赵亚溥	研究员 LNM	页岩气开采中解吸与驱替动力学
11:30-12:00	孙超	教授 清华大学	液滴对高温固体表面的撞击动力学：动态莱顿弗罗斯特现象

12:00-13:30 午餐

三、17日下午 13:30~17:30 学术报告

13:30-15:50 主持人：苏业旺 研究员/张健 副研究员

时 间	报告人	职称、单位	报告题目
13:30-14:00	汪卫华	院士 中国科学院物理研究所	非晶合金中动力学和力学性能的关系研究
14:00-14:25	蒋敏强	副研究员 LNM	Amorphous plasticity: from dynamic free volume to shear transformation
14:25-14:55	洪家旺	教授 北京理工大学	先进功能材料与能源材料的多场耦合行为研究
14:55-15:25	孙茂	教授 北京航空航天大学	昆虫飞行的力学及仿昆虫微型飞行器
15:25-15:50	王士召	副研究员 LNM	基于自适应网格的浸入边界方法及其在仿生推进中的应用

15:50-16:05 休息、可视化作品投票

16:05-17:30 主持人：宋凡 研究员

时 间	报告人	职称、单位	报告题目
16:05-16:35	宣向春	Associate Professor Clemson University	Field-induced Microfluidic Separation of Particles by Shape
16:35-17:05	袁福平	特聘研究员 LNM	Strain hardening behaviors under quasi-static tension and spall behaviors under shock loading for a high specific strength lightweight steel
17:05-17:30	马寒松	副研究员 LNM	基于应变梯度理论的复合材料跨尺度力学模型

四、18日上午 8:15~12:05 学术报告

8:15-10:15 主持人：戴兰宏 研究员

时 间	报告人	职称、单位	报告题目
8:15-9:00	Huajian Gao	院士 Brown University	Multiscale Mechanics of Cell Interactions with Nanomaterials
9:00-9:30	Jian Wang	Associate Professor University of Nebraska-Lincoln	Multiscale Interfaces Design in Solid for Improving Mechanical Properties and Irradiation Tolerance of Materials
9:30-10:00	裴永茂	特聘研究员 北京大学	磁控声波超表面的设计方法

10:00-10:15 休息、可视化作品竞赛投票

10:15-12:05 主持人：张吟 研究员

时 间	报告人	职称、单位	报告题目
10:15-10:45	罗喜胜	教授 中国科学技术大学	三维界面 Richtmyer-Meshkov 不稳定性的主曲率调控
10:45-11:15	吴锤结	教授 大连理工大学	空间站解体陨落中的多体运动与控制的数值模拟研究

11:15-11:40	肖攀	博士 LNM	分子/集团统计热力学多尺度计算方法及应用
11:40-12:05	韦佳辰	博士 LNM	胶粒系统凝聚及自组装机制的粗粒化分子模拟

12:05-13:30 午餐

五、学术委员会及研究生科研成果展、可视化竞赛评选会

1) 18 日下午 14:00-17:30 LNM 学术委员会会议

主持人： 方岱宁 院士

地点： 力学所主楼 344 会议室

2) 18 日下午 13:30-16:30 LNM 可视化竞赛评选会

主持人： 王士召 副研究员

参加人员： 竞赛评选委员会

地点： 力学所主楼 334 会议室

六、18 日晚上 17:30~18:30 闭幕式

地点： 力学所主楼小礼堂

中国科学院力学研究所
非线性力学国家重点实验室
2016 年 12 月

报告 1

沙尘输运中的多尺度分析

郑晓静,

西安电子科技大学

摘要: 基于本研究组建立的针对大气表面层风场高雷诺数壁湍流特性的野外观测阵列和目前最高雷诺数流动的观测数据分析, 给出风场的不同尺度结构物理特性和对沙尘运输的影响等。

报告人简介: 郑晓静, 西安电子科技大学教授、校长, 中国科学院院士, 发展中国家科学院院士。现兼任中国科协副主席、中国科学院数学物理学部副主任、发展中国家科学院工程科学评奖委员会主席、中国力学学会副理事长。主要从事风沙环境力学、电磁固体力学、非线性板壳力学方面的研究。曾获国家自然科学奖二等奖, 国家科技进步奖二等奖, 何梁何利科学与技术进步奖(数学力学奖)等。

报告 2

湍流的时间尺度问题：从泰勒模型到潜艇噪声

何国威

中国科学院力学研究所非线性国家重点实验室

摘要: 湍流的主要特征是宽广范围内时间和空间尺度的非线性耦合产生了复杂的流动形态。如果只是单独考虑时间尺度或空间尺度, 都不能正确描述湍流的特征。同时, 它也是飞机和潜艇中湍流噪声的基本问题。本次报告将介绍湍流时空耦合的理论和湍流模拟方法。首先, 我们将介绍湍流的时空关联模型, 它包括 Kraichnan-Tennekes 模型, Taylor 冻结流模型和 EA 模型, 可压缩湍流的时空关联模型; 其次, 我们将介绍湍流模拟的时空关联方法以及对湍流噪声的应用; 最后, 我们将讨论三个前沿问题: 湍流的欧拉和拉格朗日时间尺度, 潜艇噪声的全尺度模拟和实验数据重构时空能谱。本报告主要内容参见: He, Jin and Yang, Space-time correlations and dynamic coupling in turbulent flows, Annu. Rev. Fluid Mech. 2016 49:51-71.

报告 3

具有超大延展性的柔性电子器件非屈曲结构设计及应用

苏业旺

中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室

摘要: Great progresses have been made during the past decade on the designs of emerging stretchable electronics, most of which are based on mechanism that exploits the buckling of thin-film structures to achieve elastic stretchability. Many known designs of stretchable electronic systems adopt ultra-thin interconnects that are bonded to the substrates in order to enable devices that need to be encapsulated, but this type of bonded interconnects offer only a

moderate level of stretchability (<60%). In this work, non-buckling interconnect design with >45- μm -thick cross sections is proposed and systematically studied by experiments, finite element analysis (FEA) and mechanics modeling. The results show that, compared to thin-film structures, non-buckling structures can achieve much higher elastic stretchability, as well as lower electric resistance and less heat generation (power dissipation), which are crucial for high-performance, high-efficient electronic devices. Mechanics analysis on non-buckling designs identify key geometric parameters that govern the deformation modes and the elastic stretchability, and gives an optimal elastic stretchability as large as ~350% which is about six times larger than previously reported optimized value (~60%). Non-buckling structures that serve as semiconductor device and metal interconnects are optimized by mechanics modeling, and experimentally demonstrated in applications such as stretchable LED arrays, solar cell arrays, and antennas.

报告 4

生物软组织力学

冯西桥

清华大学工程力学系生物力学与医学工程研究所

摘要: 生物软物质的弹性模量很低、对外界刺激响应敏感,因而比传统硬固体物质更容易产生大变形与形貌失稳。本报告以生物粘膜组织、肿瘤等为例,介绍其研究组在生物组织的生长与形态演化力学方面的一些粗浅结果,包括生物软组织的力学表征、形貌演化及其在诊疗过程中的一些应用。基于有限变形弹性理论和体生长模型,建立了生物软组织受限生长和失稳的一般性理论框架,给出了粘膜、肿瘤等组织表面失稳的临界条件和形貌特征,理论分析、数值模拟和实验测量的结果都吻合较好。

报告人简介: 冯西桥,1968年生。1990年7月,1991年7月和1995年3月先后在清华大学工程力学系获学士、硕士和博士学位。1997年6月清华大学核研院博士后出站。之后获洪堡奖学金,在德国 Darmstadt 工业大学和荷兰 Delft 工业大学任洪堡研究员。1999年回国,在清华大学工程力学系任副教授,2001年起教授、博士生导师。现任清华大学工程力学系主任、生物力学研究所所长、长江学者特聘教授,兼任《Applied Physics Letters》、《Journal of Applied Physics》、《Engineering Fracture Mechanics》等10余种SCI期刊的编委或副主编。其主要研究领域在生物力学、损伤与断裂力学、微纳米力学,发表SCI论文约200篇、专著3部。曾获中国青年科技奖、国家杰出青年科学基金、全国优秀博士学位论文奖及指导教师奖等奖励。

报告 5

页岩气开采中解吸与驱替动力学

赵亚溥

中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室

摘要：非常规能源中的力学问题既是国际学术前沿也是国家重大需求，力学研究所也将该方向作为十三五的重点培育方向之一。2016年，我组在该方向的研究上继续取得了实质性进展[1-4]。目前，严重限制我国页岩气开发的瓶颈来源于两个基本难题：(1) 压裂形成裂纹网络的影响范围小；(2) 解吸附、驱替并运移出来的天然气少；这两个难题均与力学直接相关。美国 Barnett 页岩气资源中吸附气的含量高达 85%，我国鄂尔多斯地区的含量也在 75% 以上。目前我国页岩气的采收率仅为 6%，如果裂纹网络影响范围增加 25%，或解吸附、驱替的天然气增加 8.2%，相当于开一口新井，节约成本 5000~8000 万元。这不仅是工程界亟待提高页岩气采收率的关键，也是力学、地质、地球化学等学科迫切需要解决的前沿难题。

页岩气开发中的困难与力学直接相关：多孔介质中毛细凝聚和吸附相变、压裂尖端滞后区的应力奇异性和缝网连通、多尺度孔隙中驱替和气体运移等 (图 1)。我组紧密结合工程实际，从多场耦合、流固耦合、界面演化三个方面剖析了页岩气开采中的跨尺度机理和多阶涌现行为，取得如下阶段性成果：

1. 揭示了多尺度孔隙内气体的吸附和解吸附机理。结合页岩超低孔隙率 ($< 5\%$) 和超低渗透率 ($< 1 \mu\text{D}$) 实际工况，建立了考虑分离压力的吸附相状态方程，阐明了超临界气体受温度、曲率等因素影响的毛细凝聚、吸附相变、解离和缔结吸附等吸附和解吸热力学和动力学规律。
2. 阐明了移动接触线诱导裂纹扩展的微观机制。剖析了水力压裂中的裂纹起裂、失稳、分叉和愈合的过程。建立了基于重整化群方法的缝网连通三维各向异性逾渗模型，可准确预测缝网连通的实际情况，为进一步研究水力压裂与缝网连通过程中的页岩气的解吸附机理奠定了基础。
3. 建立了耦合压强和切应力的全应力水力压裂模型。首次定量得到了能量耗散对裂纹尖端应力奇异性的影响，分析了应力奇异性和裂纹尖端滞后区 (lag zone) 的产生机理，阐明了水力压裂中的切应力分量对裂纹扩展不可忽略的作用，为水力压裂中裂纹扩展的精确预测提供了有效途径。
4. 阐明了超临界流体驱替页岩气的微观机制和驱替效率。建立了吸附\解吸引起应力场的理论模型，剖析了超临界流体驱替页岩气过程中自发、熵变、放热等过程；建立了考虑扩散界面和化学反应的多相流模拟新框架，探索了多孔介质中指进和分形的运移动力学，揭示了力化耦合的溶解运移机制。

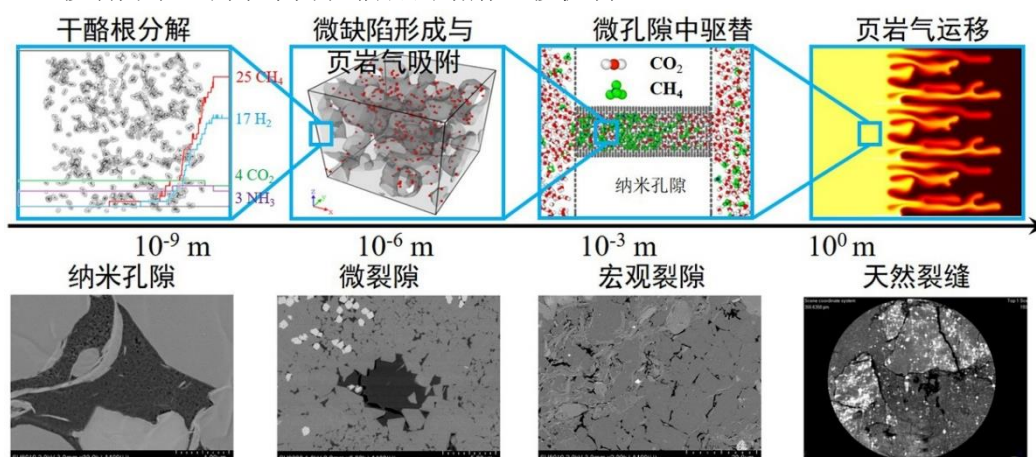


图 1. 页岩气开采中多尺度渗流力学特性与解吸附、驱替和运移动力学过程

参考文献

[1] Zuo P, Zhao Y P. Phase field modeling of lithium diffusion, finite deformation, stress

evolution and crack propagation in lithium ion battery. *Extreme Mechanics Letters*, 2016, 9: 467-479.

[2] Lin K, Yuan Q, Zhao Y P, Cheng C M. Which is the most efficient candidate for the recovery of confined methane: Water, carbon dioxide or nitrogen? *Extreme Mechanics Letters*, 2016, 9: 127-138.

[3] Zhao YP, Chen JC, Yuan QZ, Cheng CM. Microcrack connectivity in rocks: a real-space renormalization group approach for 3D anisotropic bond percolation. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2016 (1): 013205, 2016.

[4] 赵亚溥. 近代连续介质力学. 北京: 科学出版社, 2016. (已连续印刷两次)

报告 6

液滴对高温固体表面的撞击动力学：动态莱顿弗罗斯特现象

孙超

清华大学燃烧能源中心

摘要: Heat transfer from solid surfaces to impacting liquid droplets plays an important role in many industrial technologies such as power electronics cooling, spray cooling, engine performance, and pollutant emissions. When a liquid droplet impacts on a surface heated above the liquid's boiling point, the droplet either immediately boils when it contacts the surfaces (contact boiling), or without any surface contact forms a Leidenfrost vapor layer towards the hot surface and bounces back (film boiling). We study the dynamics of the thin vapor layer (around 100 nm) between an impacting droplet and the superheated surface, and investigate how the boiling dynamics of the droplet change with impact inertia and substrate properties. We find that the whole impact dynamics is largely determined by the dimple and neck formation beneath the droplet at the very beginning of the impacting process.

报告人简介: 孙超: 香港中文大学物理学博士, 2009 年至 2015 期间, 在荷兰屯特大学应用物理系任教, 2015 年加入清华大学燃烧能源中心。主要研究领域包括湍流, 多相流, 液滴和气泡等。他在 *Annu. Rev. Fluid Mech.*, *J. Fluid Mech.*, *Phys. Rev. Lett.* 等杂志上发表论文 80 余篇。现为国际多相流期刊 *International Journal of Multiphase Flow* 的副主编, 水动力学研究与进展 *Journal of Hydrodynamics* 的执行编委。

报告 7

非晶合金中动力学和力学性能的关系研究

汪卫华

中国科学院物理研究所

摘要: 非晶合金的流变行为和规律、力学性能不同于常规晶体金属材料。其流变行为和规律, 以及其流变时的结构响应的认识、力学性能的物理本质仍然是凝聚态物理和材料科学的难题。非晶材料在低于玻璃转变温度 T_g 和材料屈服之前, 在实验室时间窗口 (一般小于 103 s) 内几乎很难观察到宏观的流动行为。

通过对非晶合金中结构和动态不均匀性研究的深入,人们发现在玻璃态中可能存在一些所谓的类液区域,这些区域具有相对较高的自由能、较低的密度和粘弹性等流动特性,可能扮演着类似晶体中缺陷的作用,因而被定义为玻璃中的流动单元(Flow unit)【1-2】。流变单元因为其动力学行为的不同,可以通过其动力学弛豫行为来进行表征,可从动力学流动单元的角度来认识、表征甚至调控非晶材料的本征特性、流变、以及力学性能【3】。我们结合动态力学弛豫谱和改进的宽温度区间应力弛豫谱等方式,对室温到玻璃转变温度 T_g 以上的温度区间内非晶合金流动单元的演化和相互作用进行了系统和详细的研究。证实了非晶合金的流动行为主要是非晶中浓度不超过 10%的潜在流动单元导致的。随着测试温度的升高,流动单元区域的激活过程并不是简单的线性关系,而是可以被划分为可逆激活-玻液转化-整体流动三个阶段,并且在 β 弛豫激活温度附近发生了从局域到协同激活的转变过程。流动单元浓度在转变温度附近达到了经典的临界逾渗阈值,而且这个激活过程与基于键结合扰动的理论预测也基本吻合。通过分析潜在局域流变演化的过程与非晶合金整体力学行为表现之间的联系,将玻璃转变和形变机制,动力学和力学行为这些重要问题通过流动单元的激活过程建立起联系,初步给出了非晶合金从玻璃态到液态转变过程中几个重要阶段的全景式动力学描述【1-9】,初步实现用动力学来调控非晶合金力学性能(而不是像传统晶态材料那样,根据结构来调控材料性能)。这些工作对认识非晶合金的形成本质,探索具有实际应用价值的非晶合金具有重要意义。

参考文献:

- [1] Z. Wang, P. Wen, L. S. Huo, H. Y. Bai, and W. H. Wang, Signature of viscous flow units in apparent elastic regime of metallic glasses. *Appl. Phys. Lett.* 101, 121906 (2012)
- [2] W. Jiao, P. Wen, H. L. Peng, H. Y. Bai, B. A. Sun, W. H. Wang. Evolution of structural and dynamic heterogeneities and activation energy distribution of deformation units in metallic glass. *Appl. Phys. Lett.* 102, 101903 (2013)
- [3] Z. Lu, W. Jiao, W. H. Wang, and H. Y. Bai. Flow unit perspective on room temperature homogeneous plastic deformation in metallic glasses. *Phys. Rev. Lett.* 113, 045501 (2014).
- [4] Z. Wang, B. A. Sun, H. Y. Bai and W. H. Wang. Evolution of hidden localized flow during glass-to-liquid transition in metallic glass. *Nature Communications* 5, 5823 (2014).
- [5] B. A. Sun, H. B. Yu, W. Jiao, H. Y. Bai, D. Q. Zhao, W. H. Wang: The plasticity of ductile metallic glasses: a self-organized critical state. *Phys Rev. Lett.* 105, 035501 (2010)
- [6] H. B. Yu, X. Shen, Z. Wang, L. Gu, W. H. Wang, H. Y. Bai, Tensile plasticity in metallic glasses with pronounced beta relaxations. *Phys. Rev. Lett.* 108, 015504 (2012).
- [7] P. Luo, Y. Z. Li, H. Y. Bai, P. Wen and W. H. Wang. Memory effect manifested by boson peak in metallic glass. *Phys. Rev. Lett.* 116, 175901 (2016)
- [8] X. Yang, R. Liu, M. Yang, W. H. Wang, K. Chen. Structures of local rearrangements in soft colloidal glasses. *Phys. Rev. Lett.* 116, 238003 (2016)
- [9] L. Chen, C. R. Cao, J. A. Shi, Z. Lu, Y. T. Sun, P. Luo, L. Gu, H. Y. Bai, M. X. Pan, and W. H. Wang. Fast surface dynamics of metallic glass enable superlattice-like nanostructure growth. *Phys. Rev. Lett.* (2016) in press.

报告人简介: 汪卫华, 中国科学院物理所研究员, 中国科学院院士, 发展中国家科学院院士。主要从事非晶材料的研制、物理和力学性能的基础研究。发表学术论文 200 余篇, 被引用 14000 多次。国际会议邀请报告和大会报告 60 多次。1999 年获国家杰出青年基金, 2003 年获国家基金委优秀创新群体基金支持。相关科研工作曾获 1999 年国家科技进步二等奖, 2000 年国家发明二等奖, 2009 年周培源物理奖, 2010 年国家自然科学二等奖。

报告 8

Amorphous plasticity: from dynamic free volume to shear transformation

蒋敏强

中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室

摘要: Understanding plasticity, i.e., how solids flow, is a classical problem. The plasticity of crystals has been well described in terms of dislocation mobility starting with the seminal contributions of Orowan, Polanyi, and Taylor, all in 1934. This classical mechanism however breaks down in the face of amorphous solids lacking long-ranger period lattice. Instead, it is accepted that amorphous plasticity results from the accumulation of local irreversible rearrangements occurring within "zones" few tens of particles wide. Such rearrangement events were initially defined as "shear transformations (STs)" by Argon in 1979. Despite much controversy, it is commonly assumed that dynamic STs strongly correlate with the inherent structural defect, i.e., free volume, and its dynamics. But the key is how to correlate. In this talk, we develop a constitutive model for amorphous plasticity, by taking the interaction of STs and free volume dynamics into account. A striking feature of the present model is that the free volume (together with the temperature and stress) directly influences the ST rates, instead of the absolute density of potential zones of STs. This constitutive model can capture various plastic yielding behaviors including stress overshoot, strain softening and hardening. Our analysis demonstrates that STs preferentially occur in those zones possessing high capacity of dilatancy, i.e., creating free volume, rather than having high initial static free volume. This physical picture has been evidenced experimentally in colloidal glasses. Finally, the intrinsic transition from jammed to flowing states is reexamined within the present model. It is revealed that the plastic yielding is inherently controlled by ST operations, whereas the post-yielding behaviors highly depend on the free volume dynamics.

报告人简介: 蒋敏强，中国科学院力学研究所副研究员。国家优秀青年科学基金、中国科学院卢嘉锡青年人才奖和英国麦克斯韦青年作者奖获得者。2009年6月毕业于中国科学院力学研究所，获固体力学博士学位，同年7月进入中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室工作至今。2013年6月到2014年12月获德国“洪堡学者”奖学金资助赴明斯特大学，开展合作研究。2015年聘为中国科学院大学岗位教授。目前主要从事非晶固体的变形与断裂、玻璃物理、激光-物质相互作用、混凝土海水侵蚀等方面的研究。至今已发表SCI论文50余篇，SCI引用700余次。曾获2010年中国科学院优秀博士学位论文和2011年全国百篇优秀博士学位论文提名。现为中国科学院青年创新促进会会员、德国物理学会（DFG）会员。

报告 9

先进功能材料与能源材料的多场耦合行为研究

洪家旺

北京理工大学

摘要: 先进功能材料与能源材料体现出多场耦合效应, 比如应变场、应变梯度场、电场、磁场以及热场等多物理量之间的耦合。这种耦合效应由于对材料组分, 结构以及外部激励非常敏感而成为许多新型器件的核心材料元件。采用第一性原理方法, 我们研究了压铁电材料与一般电介质材料中普遍存在的一种应变梯度与电极化强度之间的新的力电耦合效应——挠曲电效应。通过发展第一性原理挠曲电方法, 揭示了挠曲电效应存在的内在微观机理并预测了具有强挠曲电效应的材料体系。同时, 结合第一性原理计算和非弹性中子散射/同步辐射散射测量, 我们研究了材料内部原子振动(声子)在材料电磁耦合效应、热电效应中的重要作用。

报告人简介: 洪家旺, 北京理工大学教授, 博士生导师, 国家“青年千人”计划入选者。主要从事先进功能材料和能源材料的多场耦合行为理论研究与实验研究, 以及原子尺度模拟计算方法的发展。在 *Nature*, *Nature Physics*, *Phys. Rev. Lett.*, *Appl. Phys. Lett.* 等期刊发表学术论文 30 余篇, 10 余次国际会议邀请报告, 担任 *Phys. Rev. Lett.*, *Phys. Rev. X*, *Nature Communications*, *Advanced Materials* 等期刊审稿人, *Scientific Reports* 期刊编辑。

报告 10

昆虫飞行的力学及仿昆虫微型飞行器

孙茂

北京航空航天大学

摘要: 昆虫是体积最小的飞行者; 能悬停、跃升、快速转弯, 飞行技巧十分高超。由于尺寸小, 翅膀的相对速度很小, 从而进行上述飞行所需的升力系数很大; 但昆虫翅膀的雷诺数又很低。它们是如何在低雷诺数下产生高升力的? 飞行的高机动性是如何获得的? 本报告第一部分: 分析昆虫拍动翼的非定常流动, 揭示昆虫产生高升力的机理。第二部分: 分析昆虫飞行的动稳定性, 解释昆虫既能稳定飞行, 同时机动性又好的原因。第三部分: 简介上述理论在仿昆虫微型飞行器上的应用。

报告人简介: 孙茂, 北京航空航天大学教授。1978 年毕业于北京航空学院。1983 年获美国普林斯顿大学航空工程系博士学位; 1983—1985 年在美国马里兰大学做博士后工作。他是“长江学者”特聘教授, 国务院学科评议组(力学)成员、中国空气动力学学会副理事长。孙茂主要研究动物飞行的空气动力学和飞行力学, 为微型飞行器研制和动物运动生物力学研究提供力学基础。他的工作 2012 年获得“教育部自然科学奖”一等奖, 2013 年获得“国家自然科学基金”二等奖; 最近他应邀在国际顶尖综述刊物《现代物理评论》发表“昆虫飞行力学”的长篇综述论文。

报告 11

基于自适应网格的浸入边界方法及其在仿生推进中的应用

王士召

中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室

摘要: 仿生是改善微型飞行器和无人水下航行器推进性能的重要技术途径。采用计算流体力学研究仿生推进的主要困难为复杂几何与运动边界的数值处理和三维非定常流动方程的准确快速求解。针对上述困难，我们发展了基于自适应网格的浸入边界方法，该方法采用非贴体网格技术处理复杂几何形状和运动边界，且避免了传统浸入边界方法在边界上的滑移误差和非贴体网格局部加密引起的计算量迅速增加。针对所发展的数值方法，我们改进了并行算法，并开发了三维不可压流动方程的并行求解程序，该程序在百亿网格节点（十万核）上实现了不可压流动的数值模拟。利用上述方法和程序，我们模拟了蝙蝠飞行这一典型的复杂几何与运动边界的三维非定常流动，发现了翼展伸缩运动提供扑翼飞行性能的非对称涡效应。我们定量地分析了涡结构与升力间的关系，发现涡升力的增加是提高飞行性能的主导因素。我们对从矩形翼到蝙蝠飞行等不同类型的仿生推进模型进行了研究，发现该效应不依赖于翼的具体几何形态，展向运动是提高涡升力的有效途径。本工作所发展的数值方法和程序在其它仿生推进和工程流动数值模拟中的应用也将被简要介绍。

报告人简介: 王士召，中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室，副研究员。2011年毕业于中国科学院力学研究所，获中国科学院院长优秀奖。主要从事仿生推进、湍流大涡模拟和大规模并行计算方面的研究。

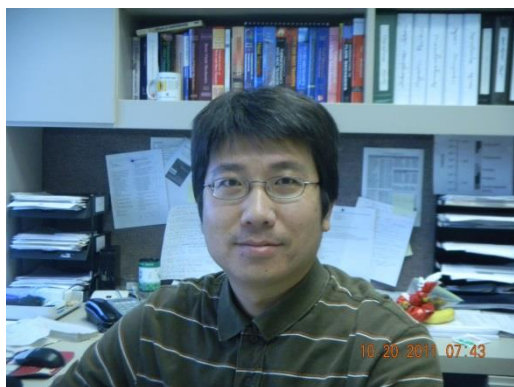
报告 12

Field-induced Microfluidic Separation of Particles by Shape

Xiangchun Xuan (宣向春)

Department of Mechanical Engineering, Clemson University

摘要: Shape is a fundamental property of particles, and also a good indicator of cell type, cycle and state. It provides useful information for particle identification, cell synchronization and disease diagnostics etc. Therefore, shape can be a specific marker for label-free particle separation. I will present in this talk our recent studies on field-induced separation of particles based upon shape. Specifically, three different microfluidic approaches will be covered in my talk: (a) electric field-driven, where particles are separated in a double-spiral microchannel via shape-dependent dielectrophoretic motion; (b) magnetic field-driven, where (diamagnetic) particles are separated in a T-shaped microchannel via shape-dependent magnetophoretic motion in a dilute ferrofluid; (c) flow field-driven, where particles are separated in either a T-shaped or a simple straight rectangular microchannel via shape-dependent elasto-inertial lift in a viscoelastic fluid. For each approach I will present experimental demonstration as well as theoretical/numerical prediction if available.



报告人简介: Dr. Xuan is currently an Associate Professor of Mechanical Engineering at Clemson University. He received his PhD degree from the Department of Mechanical and Industrial Engineering at University of Toronto in 2006 and Bachelor of Engineering degree from University of Science and Technology of

China in 1995. Dr. Xuan was a recipient of NSF CAREER award in 2012. His research interests cover the fundamentals and applications of microfluidics with special interest in particle and cell manipulations. He has published over 100 journal articles.

报告 13

Strain hardening behaviors under quasi-static tension and spall behaviors under shock loading for a high specific strength steel

袁福平

中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室

摘要： We report a detailed study of the strain hardening behavior of a Fe₁₆Mn₁₀Al_{0.86}Ce₅Ni (weight percent) high specific strength (i.e. yield strength-to-mass density ratio) steel (HSSS) during uniaxial tensile deformation. The dual-phase (γ -austenite and B2 intermetallic compound) HSSS possesses high yield strength of 1.2-1.4 GPa and uniform elongation of 18-34%. The tensile deformation of the HSSS exhibits an initial yield-peak, followed by a transient characterized by an up-turn of the strain hardening rate. Using synchrotron based high-energy in situ X-ray diffraction, the evolution of lattice strains in both the γ and B2 phases was monitored, which has disclosed an explicit elasto-plastic transition through load transfer and strain partitioning between the two phases followed by co-deformation. The unloading-reloading tests revealed the Bauschinger effect: during unloading yielding in γ occurs even when the applied load is still in tension. The extraordinary strain hardening rate can be attributed to the high back stresses that arise from the strain incompatibility caused by the microstructural heterogeneity in the HSSS.

A series of plate-impact experiments have also been conducted to investigate the influences of shock pre-compression stress and microstructure on the shock and spall behaviors of the high specific strength steel. It is observed that the spall strength significantly decreases with increasing pre-compression stress. This trend could be attributed to the accumulation damage within the target as the initial shock-induced compression wave propagates through the target. The microcracks are clearly observed to nucleate from the interfaces between γ -austenite and B2 phase, and propagate along the interfaces or by cutting through the B2 phase in the high specific strength steel during the spall process. The spall strength was found to be higher when the strain hardening ability of the corresponding microstructure under quasi-static uniaxial tensile condition is higher, indicating that the spall strength should be a microstructure parameter of the HSSS reflecting the impact toughness under impact tensile conditions. A damage function model was used to explain the microstructure effect on the spall strength of the HSSS, the critical damage value relating to the situation for triggering the onset of void coalescence was found to be the dominant factor for determining the spall strength. The current findings should provide insights of designing microstructures in the high specific strength steels for optimizing the impact properties.

Ref: M.X. Yang, et al., *Acta Materialia* 109, 213 (2016).

报告人简介：袁福平，男，1976年9月出生，中国科学院力学研究所特聘研究员、博导、

中国科学院大学岗位教授。1999，2002年在中国科学技术大学分别获学士和硕士学位，2008年1月在Case Western Reserve University (USA) 获博士学位，随后在该校进行了两年的博士后研究。2009年12月起在中国科学院力学研究所工作至今。2011年获得中国科学院卢嘉锡青年人才奖，2012年入选中国科学院青年创新促进会，2012年获得国家自然科学基金委优秀青年基金，2016年获得爆炸力学优秀青年学者，2016年获得中国科学院青年创新促进会优秀会员。先后主持国家自然科学基金青年基金、优秀青年基金、面上项目多项，中国科学院B类先导专项子课题负责人，并参加多项科技部973项目和国防973项目。目前主要从事高强韧材料的力学使役行为以及冲击动力学方面的学术研究。至今已正式发表SCI论文40余篇，并由Springer出版社出版英文书章1篇。发表的SCI论文包括PNAS, J Mech Phys Solids, Int J Plasticity, Acta Mater, Scientific Reports等国际知名杂志。多次在国际国内学术系列会议上作学术邀请报告。

报告 14

基于应变梯度理论的复合材料跨尺度力学模型

马寒松

中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室

摘要：随着科技的发展，人们可以在纳、微米尺度对材料的微观结构进行设计和改进，从而实现其宏观力学性能的优化，得到高强度、高韧性、或者满足某种特定功能等的先进材料，比如纳米复合材料、纳米颗粒陶瓷涂层镍基合金基体体系等。如何将这种先进材料的微观结构与其宏观性能相关联，对其宏观性能进行有效表征，为先进材料的优化设计提供理论支撑，将成为力学领域关注的核心问题之一。传统的连续介质力学对材料进行了均匀化的假设，忽略了材料微观结构的影响，显然并不适用于表征先进材料的力学行为。而先进材料往往同时具有纳米、微米和宏观等多尺度，对其力学行为的表征属于跨尺度力学问题，因此需要采用跨尺度力学理论和方法。本工作即是基于高阶连续介质力学中的应变梯度理论，建立了复合材料细观力学模型，对颗粒增强复合材料的宏观弹塑性性能进行了预测。结果显示，微纳米复合材料的宏观弹塑性性能与其夹杂尺寸密切相关，表现出尺度效应现象，并且当夹杂尺寸足够大时，可退化为传统结果。

报告人简介：马寒松，副研究员，毕业于北京理工大学，主要从事跨尺度力学理论研究，在高阶连续介质力学（微极理论、微膨胀理论、应变梯度理论）、表界面效应以及复合材料细观力学方面有多年的研究基础。主持和参与多项国家自然科学基金及973项目。在IJSS、IJES等国际期刊发表SCI论文10篇。

报告 15

Multiscale Mechanics of Cell Interactions with Nanomaterials

Huajian Gao

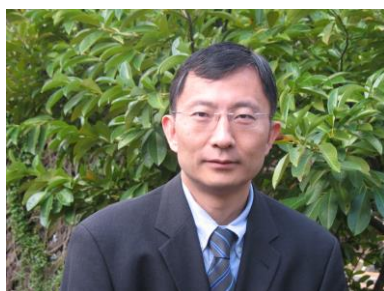
School of Engineering, Brown University

摘要：Nanomaterials, including various types of nanoparticles, nanowires, nanofibers, nanotubes, and atomically thin plates and sheets have emerged as candidates as building blocks for the next generation electronics, microchips, composites, barrier coatings, biosensors, drug delivery, and energy harvesting and conversion systems. There is now an

urgent societal need to understand the biological interactions and environmental impact of Nanomaterials which are being produced and released into the environment by nearly a million tons per year. This talk aims to discuss mechanics as an enabling tool in this emerging field of study. The discussions will touch on some of the recent experimental, modelling and simulation studies on the mechanisms of cell uptake of low-dimensional nanomaterials and their effects on subcellular vesicles and damage.

Selected references:

1. H.J. Gao, W.D. Shi and L.B. Freund, “Mechanics of Receptor-Mediated Endocytosis,” 2005, PNAS, Vol. 102, pp. 9469-9474.
2. X.H. Shi, A.v.d. Bussche, R.H. Hurt, A.B. Kane and H.J. Gao, “Cell Entry of One-Dimensional Nanomaterials Occurs by Tip Recognition and Rotation,” 2011, Nature Nanotechnology, Vol. 6, pp. 714–719.
3. Y.F. Li, H.Y. Yuan, A.v.d. Bussche, M. Creighton, R.H. Hurt, A.B. Kane and H.J. Gao, “Graphene Microsheets Enter Cells through Spontaneous Membrane Penetration at Edge Asperities and Corner Sites,” 2013, PNAS, Vol. 110, pp. 12295–12300.
4. W.P. Zhu, A. von dem Bussche, X. Yi, Y. Qiu, Z.Y. Wang, P. Weston, R.H. Hurt, A.B. Kane and H.J. Gao, “Nanomechanical Mechanism for Lipid Bilayer Damage Induced by Carbon Nanotubes Confined in Intracellular Vesicles,” 2016, PNAS, Vol. 113, pp. 12374-12379.



报告人简介: Huajian Gao received his B.S. degree from Xian Jiaotong University of China in 1982, and his M.S. and Ph.D. degrees in Engineering Science from Harvard University in 1984 and 1988, respectively. He served on the faculty of Stanford University between 1988 and 2002, where he was promoted to Associate Professor with tenure in 1994 and to Full Professor in 2000. He served as a Director at the Max Planck Institute for Metals Research

between 2001 and 2006 before joining the Faculty of Brown University in 2006. At present, he is the Walter H. Annenberg Professor of Engineering at Brown.

Professor Gao’s research is focused on the understanding of basic principles that control mechanical properties and behaviors of materials in both engineering and biological systems. He is a Member of the National Academy of Engineering, a Foreign Member of the Chinese Academy of Sciences and the Editor-in-Chief of Journal of the Mechanics and Physics of Solids, the flagship journal of his field. He is also the recipient of numerous academic honors, from a John Simon Guggenheim Fellowship in 1995 to recent honors including Rodney Hill Prize in Solid Mechanics from the International Union of Theoretical and Applied Mechanics in 2012, and Prager Medal from Society of Engineering Science and Nadai Medal from American Society of Mechanical Engineers in 2015.

报告 16

Multiscale Interfaces Design in Solid for Improving Mechanical Properties and Irradiation Tolerance of Materials

Jian Wang

摘要: Interfaces are common planar defects in solids. Interface can act as barriers, sinks and sources for other defects. By tailoring interface structures and properties, materials can be designed to achieve unusual properties, such as high strength, good ductility, high toughness, and high irradiation tolerance. This can be accomplished through two steps: (1) Discover unusual mechanical behavior (e.g., high strength and good ductility) of nanostructured composites, and Develop theory and fundamental understanding of unusual mechanical behavior. (2) Transform fundamental understanding of structural characters and deformation physics of nanostructured composites into a mesoscale capability of discovering, predicting, and designing superior nanostructured materials (strength, ductility, toughness, radiation). To achieve this goal, multi-scale methods including experiment and theory and modeling are necessary. In this talk, I will present fundamental principles in developing interface-dominated composites, and the development of experimental techniques and materials modeling tools at different scales.

报告人简介: Dr. Jian Wang is an Associate Professor at Mechanical and Materials Engineering at University of Nebraska-Lincoln. He received his Ph.D in Mechanical Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA, in 2006. After that, He joined Los Alamos National Laboratory and has been working as Technical Staff Member for 9 years. Currently, his research interests are focused on more quantitative exploring the structure-properties relationships of structural and nanostructured materials. He was awarded International Journal of Plasticity Young Reseach Award, 2015; TMS MPMD Young Leader Professional Development Award, 2013; the LDRD/Early Career Award (2011); and the LANL Distinguished Postdoctoral Performance Award in 2009. He has ~200 peer-reviewed publications (~5400 citations and H-index = 44, 25 papers selected as 25 Hottest Articles in Materials Science), three book chapters and 65+ invited/keynote presentations. He is serving as Editorial Boards for several materials journals such as International Journal of Plasticity and Scientific Reports.

报告 17

磁控声波超表面的设计方法

裴永茂

北京大学工学院力学与工程科学系

摘要: 声学超材料是一类具有子波长尺度的人工结构/材料, 因可实现负折射、超分辨率成像与隐身等奇异现象, 得到了广泛关注。共振型声学超材料的高频散特性导致可用频段较窄, 同时被动型超材料的构型一旦确定, 只能针对某固定的频段表现出超常特性。为了拓宽声学超材料的工作频段, 我们发展了一类磁场调控的薄膜型声学超材料, 实验验证了所提出声学超材料可实现对声波的宽频可调。并进一步地提出了磁控声波超表面的设计方法。该超表面有深子波长特性, 其厚度近似为工作波长的 $1/85$, 可实现磁场调控的宽频声波异常反射、声学聚焦、声波弯曲等现象。

报告人简介：裴永茂，北京大学工学院力学与工程科学系。2007年获得清华大学航天航空学院博士学位，2007-2009年在北京理工大学力学系工作，2009年至今在北京大学力学与工程科学系工作。从事多场耦合实验力学表征方法与仪器研制，轻质多功能复合材料的理论和设计方法，微波近场成像与检测方法等研究工作。负责和参与了国家自然科学基金委的优秀青年基金项目、近空间重大研究计划培育项目、重大项目、仪器专项和重点项目等。

报告 18

三维界面 Richtmyer-Meshkov 不稳定性的主曲率调控

罗喜胜

中国科学技术大学

摘要：Richtmyer-Meshkov不稳定性(RMI) 发生在激波冲击加速两种不同性质流体组成的界面时，界面上的初始扰动会经历线性和非线性增长，最后进入湍流混合。RMI是一种十分复杂的多尺度强非线性物理问题，在天体物理、惯性约束核聚变、水中炸药爆炸、航天火箭发动机、国防尖端武器等领域有着重要而广泛的应用背景，其研究对界面稳定性、旋涡动力学及湍流混合有重要的学术意义，因此近几十年来受到了极大的关注和广泛的研究 [1]。那么，基于对RMI的认识，我们能否实现对RMI的调控？如果可以，怎么调控？本报告试图从界面主曲率来调控三维界面的增长。我们将主要从实验、理论和计算三个方面来研究初始界面主曲率对三维RMI的调控作用[2-4]。取决于界面的主曲率，初始界面可以分为三类典型构型：二维界面（一个主曲率），三维凸界面（两个方向相同主曲率）和三维凹界面（两个方向相反主曲率）。实验上，我们采用肥皂膜技术首先生成了三类气柱界面。计算和实验都发现凸和凹界面都呈现分层演变，其不稳定性增长受初始主曲率的影响。进一步研究了三维单模界面的演化，发现不同组合的界面主曲率可以改变界面附近的涡量和压力分布，从而有效调控界面增长。因此，可以设计具有特定主曲率的初始界面来抑制或促进界面扰动增长，从而实现三维RMI的调控。

[1] Experimental study on the interfacial instability induced by shock waves. *Advances in Mechanics*, 44(2014), 201407.

[2] The Richtmyer-Meshkov instability of a three-dimensional air/SF6 interface with a minimum-surface feature. *Journal of Fluid Mechanics*, 722 (2013), R2.

[3] Richtmyer-Meshkov instability of a three-dimensional SF6-air interface with a minimum-surface feature. *Physical Review E*, 93 (2016), 013101.

[4] Principal curvature effects on the early evolution of three-dimensional single-mode Richtmyer-Meshkov instabilities. *Physical Review E*, 93 (2016), 023110.

报告人简介：罗喜胜，中国科学技术大学工程科学学院近代力学系教授，博士生导师。1989年就读中国科学技术大学，1997年获得硕士学位，2000年留学荷兰，2004年获得博士学位后在德国亚琛工业大学从事高速流动研究，2008年以中国科学院百人计划回中国科学技术大学近代力学系工作，2016年获得国家杰出青年科学基金资助。主要学术兼职有：《实验流体力学》编委、《力学进展》编委、激波与激波管专业委员会委员、安徽省力学学会常务理事等。研究领域为实验流体力学，近年着重围绕高速流动中的相变与多相流动、气体界面不稳定性等开展实验、理论和数值研究，在流体力学领域权威期刊如 *Journal of Fluid Mechanics* 和 *Physics of Fluids* 等上发表论文50多篇。

报告 19

空间站解体陨落中的多体运动与控制的数值模拟研究

吴锤结 李涛 关晖

大连理工大学航空航天学院

摘要：超声速流中刚体系统的分离运动不仅存在动边界,还涉及到激波、湍流等多物理过程相互作用,是一个具有挑战性的课题。本报告以大型复杂航天器陨落再入过程中的轨道预测和落点控制为研究背景,研究了超声速流中自由刚体系统和绳系刚体系统的动态分离过程。开发了六自由度刚体求解器,刚体姿态使用四元数描述,旋转运动使用四阶 Runge-Kutta 法数值求解。能够处理复杂形状的刚体,且具备使刚体发生主动变形的能力。与开源软件包VTF中的流体求解器耦合,采用level-set配合ghost-fluid方法施加内置边界条件。得到可模拟三维动边界问题的并行自适应流固耦合求解器。自由刚体系统方面,模拟了不同构型的系统在四马赫的超声速流中的分离运动。研究发现,刚体的侧向分离速度在其沿激波以类似“冲浪”的形式运动时达到最大。刚体的形状会影响物体的旋转运动,旋转运动又会进一步增大“冲浪”运动产生的侧向速度。在再入陨落飞行器返回地球时,对称性更好的内部组件的会使其散布范围更小。绳系刚体系统方面,模拟了不同构型的绳系系统在四马赫的超声速流中的分离运动。通过定性和定量分析,发现绳子的存在能有效减小刚体系统的散布范围,也会改变系统质心的流向速度。

报告人简介：1955年5月6日出生。1982年毕业于江苏工学院流体机械专业,1986~1988赴英国威尔士大学卡的夫学院从事激光测速研究,1988~1989赴美国田纳西大学空间研究院从事涡动力学研究。1992年特招入伍,由讲师破格晋升为教授。2000年以国家留学基金高级访问学者身份赴美国约翰·霍普金斯大学任访问教授,从事格子波尔兹曼方法研究。2012年9月任美国 Kennesaw State University 数学系访问教授,与杜志华教授合作进行火箭发动机 Kelvin-Helmholtz instability waves 引发的 scratch tone 及其对发动机叶片疲劳裂纹产生的作用研究。曾担任中国力学学会理事、中国力学学会流体力学专业委员会委员及湍流与稳定性专业组副组长、计算力学专业委员会委员和特邀委员、环境力学专业委员会特邀委员;江苏省力学学会副理事长、南方计算力学联络委员会委员;湍流研究国家重点实验室学术委员会委员、非线性力学国家重点实验室学术委员会委员和特邀委员;北京大学力学系教授、兰州大学兼职教授、河海大学博导、解放军理工大学首席教授;《中国科学》(中、英文版)编委、Advances in Applied Mathematics and Mechanics 的 Associate Editor、《应用数学和力学》流体力学主编、《大连理工大学学报》编委。2008年转业至大连理工大学任航空航天学院创院院长(2008-2013)。在湍流、非线性动力学、流动控制、涡动力学、计算流体力学、环境流体力学和水动力学等方面进行研究。在国际上首先提出最优动力系统建模理论和最优智能物面流动控制方法。承担和参加 973 课题、国家自然科学基金重点项目、面上项目等二十余项。在国内外学术期刊和国际学术会议发表论文三百余篇。

报告 20

分子/集团统计热力学多尺度计算方法及应用

肖攀

摘要：微/纳米材料和结构的力学响应通常涉及到多个空间和时间尺度物理过程的非线性耦合。例如，结构破坏过程中位错和微裂纹的扩展规律。对这类问题的模拟，采用具有原子表象的分子动力学方法，可获得原子层次物理信息，但计算时间尺度（约 10^{-9} s）和空间尺度（约 10^{-7} m）有限；采用连续介质表象的有限元方法，具有较大空间和时间尺度，但难以刻画原子尺度变形细节。因此，建立耦合分子表象和准连续介质表象的多尺度计算方法是当前微/纳米力学发展的一个重要方向。针对这一背景，我们提出了分子/集团统计热力学多尺度计算框架，用于微纳米材料在有限温度下的准静态力学行为分析。理论方面，建立了分子表象和准连续介质表象的统一Helmholtz自由能表达式，从而构建了耦合分子/集团统计热力学多尺度计算方案；程序方面，开发了基于分子/集团统计热力学方法的大规模通用并行计算程序和可视化软件；同时，将该方法应用到了纳米压入、单晶铜纳米杆和ZnO纳米线等结构的力学性能分析当中，并对其计算效率和可靠性进行了系统分析。

报告人简介：肖攀，中国科学院力学研究所，非线性力学国家重点实验室，助理研究员。2006年7月，毕业于湘潭大学工程力学系；2011年9月，获中国科学院力学研究所固体力学博士学位；2015年2-10月，佐治亚理工学院，访问学者。主要研究方向包括微/纳米多尺度计算方法、多尺度方法的并行算法及可视化、微/纳米材料和结构的相变行为。已发表学术论文14篇，获软件著作权登记两项。

报告 21

胶粒系统凝聚及自组装机制的粗粒化分子模拟

韦佳辰

中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室

摘要：胶粒系统的凝聚及自组装是通过胶粒分子间弱相互作用自发形成团簇或有序结构的相变过程。该过程对系统的结构及动力学特性均有显著影响，是创造纳米层级新材料以及产生新功能的重要手段。球状蛋白质溶液也是典型的胶体系统。当蛋白质分子内出现异常加工、错误折叠时，会引起蛋白质分子间的凝聚，进而导致人体疾病的发生。本研究通过分析拥挤环境中球状及链状胶粒分子间相互作用力变化所导致的自组装及凝聚过程，研究其相行为及结构特性变化。在不同种类球状胶粒分子溶液的计算中加入外场分析系统的热力学相变，为分析蛋白质凝聚的成病机理及其可能的恢复机制提供理论依据。

报告人简介：韦佳辰，固体力学博士，中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室助理研究员。研究方向为软物质（生命物质、各种聚合物及其溶液等）的结构和性能。2006.9-2010.6，同济大学，应用物理专业，学士；2010.9-2015.6，中国科学院力学研究所，固体力学专业，博士；2015.7-至今，中国科学院力学研究所，助理研究员。