

总公司计划在“十五”期间投入数千万元在中科院立项。

三峡工程三期围堰爆破拆除项目取得新进展：提出了翻转爆破新方案，并就水对爆炸的影响，不耦合装药减少震动的规律等各项研究和数值模拟取得新结果。

技术发展部结合若干国家高新技术发展的战略需求，突出体现力学与其他学科的交叉，发展关键技术，在系统集成的基础上形成具有自主知识产权的创新科技成果，并以合作攻关、技术推广等方式使科技成果向现实生产力转化。

在 2000 年里技术发展部承担了一项院创新重大项目：“集成化激光智能加工及柔性制造系统”。该项目的核心与我国在加工制造业的战略需求密切相关，项目完成后对我国汽车制造业中的模具制造过程将有重大革新，并且将对我国激光加工的发展起推动

作用。

在 2000 年里技术发展部还承担了多项纵、横向项目。其中：承担了 863 航天领域“遥科学实验中的可视化观察系统”和“遥科学地面演示与研究系统集成技术研究”项目，完成了宽带受限条件下大容量信息的实时传输实验系统关键技术攻关；建成了可直接面向航天应用的遥科学地面演示与研究系统。

由于力学所按照中国科学院知识创新工程中的要求所进行的改革和结构调整，力学所在科技奖、论文与著作、科技人才、研究项目与经费等方面取得了长足的进展。据中国科学院 2000 年度综合评价指数，力学所在中国科学院 20 余个基础类研究所中综合排名第四，比前几年的排名情况大有进步，力学研究所在中国科学院的基础研究队伍中发挥着越来越重要的作用。

非线性力学国家重点实验室近期研究进展简介

赵亚溥 宋凡

非线性力学国家重点实验室 (LNM)，中国科学院力学研究所，北京 100080

非线性力学国家重点实验室的前身是成立于 1988 年 6 月的非线性连续介质力学开放研究实验室 (LNM)，经过十余年的建设和发展，在 1995 年国家评估结果为“优秀”的基础上，经专家组论证和主管部门——中国科学院的推荐，国家科学技术部于 1999 年 10 月批准进行重点实验室的建设，2001 年 4 月 10 日 LNM 通过了专家组的建设验收。验收专家组认为：

“该实验室在建设过程中，结合中科院“知识创新工程”对研究目标进一步进行了凝练，在保持原来研究特色的基础上，近期突出纳米 / 微米尺度力学与跨尺度关联、纳 / 微电子机械系统力学、多尺度复杂流动的动力学理论与控制原理等创新方向，创新方向具有前瞻性、基础性和先进性。该实验室为中科院创新试点单位。实验室在建设期间，围绕上述目标，新建设了微系统力学实验室，结合国家“973”计划研制了微流动实验台，使 LNM 在微尺度和微系统的力学研究方面拥有了必要的实验环境和关键的测试手段，以及开展微尺度流动特性及机理等前沿问题实验的基本能力，为国内的微系统研究提供了重要条件，该实验室已结合“973”项目、国家自然科学基金重大项目和中科院重点项目等开展了工作。对原有设备的改造和升级也丰富了实验室的实验手段。”

“在实验室建设期间，实验室联合主持了一项国

家自然科学基金重大项目、一项中科院“九五”重大项目，参加了国家“973”计划和国家“攀登计划”各 6 个子课题的研究。获得了中科院自然科学二等奖和北京市科技进步二等奖各一项，白以龙院士还获得了何梁何利奖和周培源力学奖。发表的学术论文逐年增加，两年内在国内外核心期刊上共发表学术论文 220 篇，其中在国际期刊上发表 94 篇，另外出版专著 1 部。”

“在实验室建设阶段，积极开展与国内外相关学术机构的实质性学术合作与交流。2000 年主办了“微系统科学高级研讨班”，创建了中科院力学所 - 香港科技大学微系统联合研究实验室。在建设期间，有一人被聘任为《Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures》的副主编。一年多来，先后有 15 位外国学者来实验室讲学，两年来共开放课题 22 项。LNM 已经成为国内非线性力学的学术交流中心。”

“实验室重视队伍建设，特别注重优秀青年科技人才的培养和引进，并做出了突出成绩。建设期间，获得了一项国家杰出青年科学基金，一项海外青年合作研究基金，有两人入选中科院“百人计划”。博士后和研究生的数量有了明显的提高，有 8 位研究生获得了不同等级的 11 项奖励。”

“综上所述，验收专家组一致认为：非线性力学

国家重点实验室高质量地完成了建设任务，达到了国家科技部对国家重点实验室的要求，已成为从事非线性力学研究和培养高级非线性力学人才的基地。”

2000 年度，LNM 除顺利通过了由科技部和国家自然科学基金委员会等单位组织的 2000 年度对国家重点实验室的评估外，还获得中科院和北京市科委二等奖两项，并承担 973、攀登计划、重大、重点等项目 20 余项，全年发表论文共计 150 余篇（其中国际期刊论文 49 篇、专著 1 部）。限于篇幅，以下简要介绍 LNM 的部分进展，欲详细了解 LNM 研究工作、承担项目以及论文发表等情况的读者，请访问 LNM 主页 (<http://web.imech.ac.cn/>)。

1. 关于“非均匀材料细观损伤破坏过程、强度理论与强韧化力学机制”和“材料的宏微观力学与强韧化设计”的研究进展

(1) 提出严格考虑微裂纹群体交互作用的分析方法。建立了二维裂纹群体损伤演化力学，成功地预示了微裂纹损伤演化全过程。针对典型细观结构群体（椭圆增强颗粒、短纤维、空洞、微裂纹），提出严格考虑交互作用的新方法。建立了二维细观结构群体与宏观力学参量的定量关系。发展了多相材料有效弹性模量的三维解析公式；建立了颗粒、纤维增强复合材料的弹塑性本构关系，确立了多相材料强度、韧度与其细观结构定量关系；提出了超晶格外延生长薄膜位错演化动力学方程。对多层膜和含有成分梯度变化的缓冲层的多层膜细丝位错，失配位错演化和应变松弛进行了系统的分析。分析结果与系统的实验结果相吻合。

(2) 发展了非有序细观结构集体演化的非平衡统计力学。发现了细观非均匀性对宏观强度的作用主要是通过其集体演化行为表现的。因此，通过沟通这两个物质层次的非平衡统计规律的研究，建立统计演化方程、截断方式，实现了从细观物理过程到宏观力学行为的贯通。

(3) 设计并制作了 2 种新型夹具（获实用新型专利），从而在相应的试样上进行力学量和细观量的观测。分别对合金钢、有序合金、非晶和细晶合金的微观结构进行跨越 6 个尺度量级（ $10 \text{ nm} \sim 10 \text{ mm}$ ）的观测；对微损伤群体演化进行分析；对微结构及微损伤与力学量进行关联表征。表明短裂纹群体损伤导致的疲劳寿命与晶粒尺度成反比；疲劳极限应力与晶粒尺度的平方根成反比。用局域最大裂纹尺度和局域裂纹总数刻画短裂纹萌生和发展的随机性。揭示了激光熔凝表面层非晶和细晶以及有序合金的细-微结构，并用微区硬度的微区弹性模量表征微结构的力学性质。

(4) 建立了细观结构、增强体（粒子、纤维）、基体及界面对宏观力学行为影响的力学模型。确定了复合材料的组份配比、组态结构与宏观力学行为关系。发展了新的数值离散方法，开发的模拟软件首次在三

维空间内模拟出大自由度的复杂非均质系统，计算裂纹、缺陷与增强体相互作用下材料损伤破坏的细、宏观全历程，成为研究跨尺度关联问题的得力工具。

2. 关于“脆性介质损伤累积统计和破坏预测的非线性演化理论”的研究进展

非均匀脆性介质的破坏呈现为灾变现象，但灾变阈值的宏观不确定性给灾变预测带来困难。基于耦合斑图映射模型提出了灾变的一种共性特征，称为临界敏感性：当系统接近灾变点时，它对外载及随机损伤等外界扰动的响应变得极为敏感。临界敏感性的发现不仅有助于加深对灾变性破坏机理的了解，而且，它作为灾变的一种共同前兆，为灾变预测提供了线索，它可能是地震预测的加载载荷响应比方法的物理机理。

3. 关于“MEMS 的力学检测”、“微电子机械系统的微尺度力学检测和计算机辅助设计”与“微机械材料力学行为”的研究进展

(1) 和北大微电子所合作，设计并制作了微机械加速度计，进行了有关测试；对其进行冲击载荷下的失效机理和可靠性分析，表明其主要失效模式有：可动与不可动以及可动部件之间的粘着、硅梁断裂、整体碎裂等。结合该部分工作，建立了理论模型，还应用 ANSYS 软件进行了微系统模拟以及微梁在冲击载荷下的失效计算，得到了和实验结果较为一致的结论。

(2) 针对 MEMS 中的“表面效应”进行了深入研究，指出：应用 Tabor 数、粘着数（adhesion parameter）和剥离数（peel number）表征不同微结构之间的粘着，可以作为 MEMS 结构的设计参数。

(3) 针对 MEMS 领域中公认的必须迫切解决的设计工具——“MEMS 材料数据库”进行了创建且已经初具规模，包括：(a) 不包含“尺度效应”的 MEMS 主要材料的物理和力学性能；(b) 包含“尺度效应”的力学性能；(c) 碳纳米管的若干物理、力学性能以及若干分子动力学的数值结果等；(d) MEMS 材料性能指数。

(4) 开发了面向对象的 Windows 可扩展基础软件平台，可用于微执行器的性能模拟。

(5) 针对 MEMS 制备的新工艺——Ni 诱导横向结晶 (MILC) 应用纳米硬度计进行了微力学检测。

(6) 研究了 van der Waals 力在纳米薄膜生长中的作用；针对 MEMS 用硅和多晶硅 LPCVD 和 PECVD 薄膜进行了微米 / 亚微米尺度的压痕实验，得到了同一压痕深度下不同加载速率下的微硬度的测试结果以及压痕过程中的多次“pop-in”和单次“pop-out”的新现象；提出了“应变率梯度塑性动力学理论”的新概念。

4. 关于“考虑多尺度效应薄膜脱胶的理论和实验”的研究进展

(1) 建立理论模型。同时采用了“EPZ 模型”、“SSV”模型以及“unified”模型刻划了薄膜脱胶时的

界面分离过程；同时采用塑性应变梯度理论刻划尺度效应。从这一理论模型出发完整地预测出薄膜脱胶的多尺度效应。结合实验结果，即可获得塑性应变梯度理论中微尺度参量的取值，又获得了薄膜脱胶时裂尖无位错核的厚度值；

(2) 建立多重尺度问题的数值方法。在先前提出的“纯位移导数”的新有限元方法的基础上，完善和发展这一方法并将它成功地应用于对薄膜脱胶多尺度效应的预测；

(3) 薄膜表面及界面性能的实验研究。通过精细的实验和量测，获得了微尺度下材料所表现的强烈的尺度效应特征，也为组织和实施更精细而难度更大的薄膜微撕裂实验和微劈裂实验打下了坚实的基础。

5. 关于“尾迹流动旋涡位错与转捩数值研究”的研究进展

(1) 从流体动力学基本方程(N-S)的DNS解出发，揭示了尾迹型流动非线性波动中由展向局部非均匀性引起的旋涡位错及其形成的大尺度旋涡重联，刻画了旋涡位错重联结构的特征，建立了动力学模型，提出了机制分析。

(2) 用LES结合Smagorinsky SGS模型计算亚临界雷诺数($Re = 500$)三维圆柱绕流，研究大尺度湍流统计特性及近尾迹结构，所得升力、阻力、脱落频率、峰值雷诺应力流场时均剖面与已有实验及DNS计算相符很好。

6. 关于“复杂流动机理与控制”研究进展

(1) 在尾迹转捩非线性特征数值研究方面：从近尾迹到下游尾迹存在着多种不同尺度旋涡结构的激发，相互作用与演化，模态竞争。大尺度Karman涡出现斜脱落，流向变形；大小尺度涡的相互作用缠绕与重联，直到下游破碎，经历有一系列复杂的变化，呈现出重要的非线性特征：1) 揭示了尾迹三维不稳定非线性增长特征；2) Re 数在200~250范围，大尺度Karman涡的脱落有明显的展向相位差变，形成斜脱落，脱落后的Karman涡不平行柱轴，在下游进一步变形形成不同曲向的马蹄涡，它的更下游发展导致破碎。随着时间增长，涡的破碎位置向上游移动。流动从有序转向无序；3) 揭示了尾迹中大尺度展向涡与小尺度流向涡间的强相互作用，导致小尺度流向结构的破坏，两种尺度旋涡间的相互缠绕，形成大尺度涡与邻近且具有相反符号大尺度涡间的跨涡街旋涡重联。这种重联在空间分布具有随机性。

(2) 平面尾流中粒子动力学研究方面：针对粒子在平面尾流中的复杂运动行为，采用Lagrange观点，研究了粒子尺度对粒子在Karman涡街流场中的扩散产生的影响。结果表明，粒子的运动轨迹在流场中出现聚集。随着粒子尺度的增加，粒子的轨迹将出现一个周期倍分岔到准周期轨道或混沌轨道的过程，

同时相应的吸引域随着减小、粒子聚集的时间也随着缩短。最后经过临界突变，粒子的轨迹全部从尾流区逃逸。

(3) 针对粒子在平面尾流中的复杂运动行为，揭示了粒子尺度对粒子扩散产生的影响，即出现一个周期倍分岔到准周期轨道或混沌轨道的过程。进一步证明了在不同的旋涡空间参数下，平面尾流的流线拓扑具有三种类型，它们以零流线的分布为特征。当考虑到旋涡空间参数的不同，即随着该参数的增加，粒子轨迹的分岔过程将得到抑制。

(4) 采用非线性动力学方法，对DNA序列进行的平面度规表示，该方法可用于确定短的核苷酸串缺失。进一步通过计算分形维数来测量DNA序列中短核苷酸串缺失，并确定长的核苷酸串的重复。上述特征均偏离于随机符号序列。

7. 关于“多尺度复杂流动的数值模拟”的研究进展

(1) 利用所建立的平面混合流的直接数值模拟数据库，分析了可压缩效应对湍流特征的影响。指出，随着对流马赫数的增加，脉动压力梯度增加，导致湍噪声的产生。

(2) 针对声波与激波干扰的流动特征，构造了具有四阶精度的群速度直接控制方法。方法用于数值模拟涡-激光器波强干扰的气动声场，给出了复杂流场的演化和四极小声的发生、发展与演化过程。研究了激波强度对声场的影响，声波传播特征的噪声产生的机理。

(3) 在直接模拟的基础上，从能量方程出发，研究了可压缩效应对充分发展槽道湍流近壁拟序结构的影响。

8. 关于“微流动特性研究”和“微孔流动中液体分子凝聚尺度的临界效应研究”的研究进展

(1) 研究不同性质液体在微管道流动中的尺度效应：对简单分子液体(去离子水、三种有机液体等)在 $25\mu m$ 内径的石英圆管内的流动进行了实验研究。实验结果表明，在定常层流条件下，圆管内的流量与两端压力差成正比，其压力-流量关系符合经典Hagen-Poiseuille流动关系。这说明对分子结构简单但分子量较大的液体，在微米尺度的管道流动中，低 Re 数下的流动规律仍符合连续介质假设的经典流体力学模型。

(2) 微系统性能分析：对数字式推进器的气动、传热、强度等问题作出综合分析，指出“非定常热传导”非线性效应将成为推进器微型化过程中的主要限制因素。

(3) 用LNM新建的低湍流度水洞进行平板的层流和湍流边界层的定量测量，得到了湍流边界层的能量及流向脉动速度等流动参量，为边界层流动控制研究提供精确测量数据。