



力学科学处 2011 年重点项目结题 审查情况的简要介绍

詹世革 张攀峰 吕守芹 张文明

国家自然科学基金委员会数理科学部, 北京 100085

按照《国家自然科学基金重点项目管理办法》的有关规定: 自然科学基金委应当自收到结题材料之日起 90 日内, 组织同行专家对重点项目完成情况进行审查. 为了促进重点项目之间的交流, 加强对比, 提高效率, 数理科学部于 2012 年 3 月 15 日至 16 在北京召开会议组织专家对 2011 年结题

的重点项目进行了集中审查, 会议采取分学科处进行的方式. 力学科学处共有 10 项重点项目进行了结题审查 (见表 1). 各项目负责人就研究计划的完成情况、取得的成果及水平, 以及人才培养和国际合作与交流的成效等进行了汇报. 评审专家进行了认真讨论, 形成了结题审查专家组评价意见.

表 1 2011 年力学科学处结题重点项目清单

批准号	负责人	题目	依托和合作单位
10732010	刘凯欣	极端条件下非晶态材料及结构的力学行为	北京大学、中国工程物理研究院流体物理研究所、哈尔滨工业大学
10732020	张伟	高维非线性系统动力学理论及在机械结构中的应用	北京工业大学、天津大学
10732030	孙茂	昆虫飞行的动稳定性与控制研究	北京航空航天大学、清华大学
10732040	郭万林	低维功能材料结构力-电-磁耦合与器件原理的物理力学研究	南京航空航天大学、上海大学
10732050	冯西桥	天然生物材料的多尺度力学与仿生研究	清华大学、中国科学院力学研究所
10732060	孟光	燃气轮机转子系统在多场耦合作用下的非线性振动与控制	上海交通大学、清华大学
10732070	姜宗来	血管细胞分化与迁移的力学生物学机制	上海交通大学、清华大学
10732080	亢一澜	微纳尺度实验力学中的传感、测量、识别新方法研究	天津大学、清华大学、中国科学技术大学
10732090	何国威	复杂边界湍流大涡模拟的理论和方法	中国科学院力学研究所、北京航空航天大学
10732100	王彪	微纳电子材料及器件的力、电、热耦合破坏理论和实验研究	中山大学、湘潭大学

基于专家组的评价意见, 下面将这 10 个结题项目在执行期间所取得的主要研究成果介绍如下:

1 极端条件下非晶态材料及结构的力学行为 (负责人: 刘凯欣)

(1) 对 $Zr_{51}Ti_5Ni_{10}Cu_{25}Al_9$, $Ti_{40}Zr_{25}Ni_3Cu_{12}Be_{20}$

等典型非晶合金的玻璃形成能力的结构起源及优化进行了深入研究, 提出了设计非晶合金成分的新方法“二元共晶成分比例混合法”, 开发了临界直径达 14 mm 的 $Zr_{50.7}Cu_{28}Ni_9Al_{12.3}$ 非晶合金.

(2) 分别采用新型 SHPB 实验系统、热冲击试验机、电炮、轻气炮加载平台获取了典型非晶合金在不同应变率和温度等复杂极端条件下的 Hugo-

not 压力线、屈服强度和剪切强度等参数随压力变化的力学特性。

(3) 基于典型非晶合金本构方程、状态方程和损伤/破坏准则, 构建了能计及微观力学机制的流体弹塑性本构模型。

(4) 建立了新的 CE/SE 格式, 改造了已有的 Super CE/SE 软件, 增添了处理有材料内部裂纹形成和扩展、带化学反应的多相爆轰、多物质气-固-液一体化计算模块, 并对其精度和有效性进行了评估和验证。

(5) 对非晶合金爆炸焊接的复杂力学行为进行了计算分析, 进而用爆炸焊接技术实现了块体非晶态材料与晶态材料爆炸复合和薄带非晶态材料在块体晶体材料表面的爆炸复合, 并澄清了其力学机理。

2 高维非线性系统动力学理论及在机械结构中的应用 (负责人: 张伟)

(1) 研究了高维非自治非线性系统的全局分析方法, 改进了广义 Melnikov 方法, 并结合全局摄动法研究非自治非线性系统的全局分叉、多脉冲轨道及 Shilnikov 型混沌动力学。

(2) 应用新发展的适用于高维非自治非线性系统理论研究了功能梯度材料结构、复合材料和压电复合材料结构、黏弹性传动带系统及其他典型机械结构的复杂的周期运动、混沌运动及多脉冲跳跃现象。

(3) 用同伦分析方法得到了长时、高效、高精度的耦合杜芬范德波振子的近似解析周期解。

(4) 建立了柔性梁板结构非线性振动的实验系统, 发现了能量在不同模态之间传递及幅值跳跃现象等。

3 昆虫飞行的动稳定性与控制研究 (负责人: 孙茂)

(1) 通过实物观测给出了蜂蝇和食蚜蝇悬停飞行时翅膀拍动的运动学参数及其随时间的变化规律, 为建立理论模型提供了依据。

(2) 建立了昆虫身体和若干拍动翅的动力学方程, 与流体动力学方程结合在一起, 构建了昆虫运动的基本方程组。

(3) 应用“平均模型”的思想将运动方程简化, 开展了稳定性理论分析, 揭示出昆虫的悬停飞行的动不稳定性及其物理机制。

(4) 通过运动方程和流体动力学方程耦合的数值模拟, 获得了昆虫悬停飞行时的周期振荡运动, 应用 Floquet 理论分析了昆虫悬停飞行的周期解稳定性。

(5) 研究工作揭示了昆虫悬停飞行虽然是不稳定的, 但是可控的。通过反馈适当的控制参数, 可实现稳定的悬停飞行。悬停附近的前后运动由拍动平均角控制, 上下运动由拍动幅度控制, 侧向运动由左右拍动幅度差动控制, 绕垂直轴的定常转动则主要由左右翅攻角差动控制。

4 低维功能材料结构力-电-磁耦合与器件原理的物理力学研究 (负责人: 郭万林)

(1) 基于分子力学方法, 建立了氮化硼纳米管的分子力学模型, 研究了其弹性性能的尺度依赖性; 建立了碳纳米管的各向异性壳模型, 通过解析方法研究了手性导致的碳纳米管各向异性力学行为, 阐明了碳纳米管泊松比随尺寸反常变化的物理机理。

(2) 通过数值模拟发现了碳纳米管的多米诺骨牌效应和温度调控的可逆多米诺现象, 为实现热能和机械能之间的可控相互转换提供了新思路; 发现碳纳米管层间摩擦不仅和接触面积相关而且和接触边界相关, 据此提出了一种新的纳尺度摩擦规律;

(3) 揭示了水合阀调控钠钾离子通道非选择性导通的结构和功能机制, 探索了生物和纳米受限环境中水分子的热力学行为, 发现环境温度下纳米管中水链具有从无规则高熵热运动向低熵规则高频振动重复转化的规律。

(4) 数值模拟表明: 横向电场可使氮化硼纳米带能隙显著单调地减小直至关闭, 从而出现绝缘体-半导体-金属的转变; 氟化氮化硼纳米管具有长程的铁磁性自旋序和管曲率依赖的自旋极化特性, 通过施加径向压力可使其自旋磁性得到大幅调制并提高其居里温度; 硅基底上石墨烯纳米带强烈的双段线性磁电效应, 揭示了利用力电耦合原理调控石墨烯磁学和电学性能的原理和机制。

(5) 发现了半导体弯曲微、纳米线电子结构和能带随应变梯度变化的现象, 以及在 ZnO 和 CdS 等光电微纳米线中存在能带随应变梯度线性减小的柔性电子效应和规律。

此外, 还研制了超声微波协同合成仪, 合成了

热电性能显著提高的纳米材料；制备了石墨烯流致生电器件。

5 天然生物材料的多尺度力学与仿生研究 (负责人: 冯西桥)

(1) 实验研究了蚕茧和蚕丝从宏观、细观到纳观的多尺度结构特征、力学性能及其相互关联, 提出了一种基于超声波技术的天然纳米纤维制备方法, 成功制备了多种纳米纤维生物材料, 并利用蚕丝制备了一种新型可降解复合材料。

(2) 实验发现了贝壳珍珠母的负泊松比效应; 采用基于微纳米结构的断裂力学方法, 研究了贝壳珍珠母的缺陷容忍性和桥联增韧机制, 比较了不同层错晶片结构的强韧化效果, 得到了晶片矿物桥的优化特征尺寸。

(3) 通过实验表征、理论分析和数值模拟, 研究了牛角的力学性质及其与微纳米结构之间的联系, 揭示了牛角角蛋白外壳的波浪层状多级结构对材料优异力学性能的强韧化机理。

(4) 对生物粘附问题进行了理论与实验研究, 得到了横观各向同性材料、正交各向异性材料、功能梯度材料等的微尺度粘附接触问题的解, 并深入分析了壁虎的粘附机制及其影响因素。

(5) 对固体材料的浸润特性与微纳米表面结构之间的关系进行了理论与实验研究, 分析了荷叶表面分级结构对其自清洁功能的重要性及水黾腿超强拒水特性的物理机制。

(6) 发展了用以描述生物软组织生长导致的表面失稳的理论模型和计算方法, 研究了若干典型几何构型生物软材料的表面失稳与形貌演化特征; 并研究了测量薄膜与纤维弹性性质的失稳测量方法, 得到了任意形状横截面纤维失稳波长的显式表达。

(7) 通过在陶瓷表面刻蚀类似于蜻蜓翼膜的表面微纳结构, 大幅度提高了陶瓷材料的抗热震性能; 对仿生错层复合材料和纤维增强复合材料进行了理论分析和优化设计。

6 燃气轮机转子系统在多场耦合作用下的非线性振动与控制 (负责人: 孟光)

(1) 建立了计入陀螺力矩、含有非线性油膜力的八自由度转子-轴承系统模型, 以及考虑热弹耦合、非线性不平衡磁拉力作用下的转子系统模型。

(2) 建立了密封齿腔流动非定常的模型, 推

导了直通式篦齿密封中的气流的双控体控制方程, 得出了密封-转子流固耦合转子系统振动频率与系统参数、转子固有频率以及流体脉动主频率的关系式。

(3) 揭示了旋转机械转定子碰摩、基础松动、转轴裂纹 3 类典型故障的若干新特征; 提出了准确描述基础松动的分段线性刚度和阻尼的松动故障模型; 研究了斜裂纹转子系统在弯-扭和拉-扭耦合效应下的非线性振动, 为转轴直裂纹和斜裂纹的诊断提供了依据。

(4) 提出了一种网格格式结构支持向量机多类算法, 实现了少故障样本下的故障高准确率识别; 发展了复合故障的多重经验模态分解和盲源分离的诊断方法, 并进行了实验验证。

(5) 建造了 300MW 汽轮机 1:3 轴系大尺寸多跨转子实验系统, 包括转子-轴承系统、供油系统、控制系统和测试系统; 搭建了单跨双支撑的高转速气流激振转子试验台和柔性发电机转子不平衡电磁拉力试验台, 研究了气流激振和不平衡电磁拉力对转子振动和稳定性的影响。

(6) 开展了转子系统振动主动控制的研究, 提出了自抗扰振动控制器的概念, 利用带磁流变液阻尼器的高速旋转试验件, 验证磁流变液阻尼器对转子振动的减振效果。

7 血管细胞分化与迁移的力学生物学机制 (负责人: 姜宗来)

(1) 发现低切应力上调 ECs 合成和分泌 PDGF-BB, PDGF-BB 作用于 VSMCs 引起 Akt 和 p38 磷酸化增加, 促进了 VSMCs 的迁移。低切应力还可以通过抑制 VSMCs 的 Rho-GDI α 表达, 促进 VSMCs 迁移。载荷作用下 Rab 28 蛋白参与调控血管细胞迁移、增殖和凋亡。

(2) 发现张应变频率是 VSMCs 排列的重要调控因素之一, 完整的细胞骨架微丝系统是感受应变频率信号的关键结构。不同频率张应变可以诱导体外培养的合成表型 VSMCs 转化为收缩表型。生理范围的周期性张应变可以诱导 VSMCs 收缩表型标志分子和 Sirt1 的表达增加; Sirt1/Akt / Foxos 信号通路在张应变诱导的 VSMCs 表型分化中发挥作用。

(3) 成功从大鼠 VSMCs 克隆了 BK 通道基因, 并进行了稳定表达, 将通道 RCK 结构域及以后的部分进行删除突变, 发现突变后通道仍具有生物

活性. 将克隆的 BK 和突变体过表达达到 VSMCs, 观察其对 VSMCs 迁移和分化的影响.

(4) 发现切应力诱导 EPCs 向 ECs 分化, 而抑制其向 VSMCs 的分化, SIRT1 促进了 EPCs 向 ECs 分化. 静态 ECs 促进 EPCs 向 ECs 分化, 静态 VSMCs、牵拉 ECs 和牵拉 VSMCs 均促进 EPCs 向 VSMCs 分化, 其调控与 Akt 和 ERK 信号分子活化有关.

(5) 牵张刺激对门静脉 VSMCs 的作用是增强 L-型钙电流活性, 而对血管 Cajal 样间质细胞的起搏电流具有明显的抑制作用, Ang II 明显增加门静脉 VSMCs 收缩张力, 且增加其自发性收缩的频率.

8 微纳尺度实验力学中的传感、测量和识别新方法研究 (负责人: 亢一澜)

(1) 建立了 4 类微纳传感检测技术, 并建立了相应的测量理论, 解决了不同类型检测对象的传感载体制作与力学检测技术: CNT 平面微应变传感理论与拉曼读出技术, 微梁阵列传感与光学读出技术, 显微光学的精细微变形测量技术, 单晶硅微力传感器与标定技术.

(2) 研制了系列的微/纳尺度力学实验测量平台与加载系统和基于 SEM 的多探针力学系统以及自制 AFM 双探针系统等探针力学实验平台; 研制了适用于同步辐射光源的纳米 CT 成像系统及微拉伸装置, 并通过该平台研究了微波烧结过程中陶瓷三维微结构的变形与演化机理.

(3) 针对若干典型问题, 将整体化实验分析方法用于复杂问题的实验分析与非直接测量力学量识别: 三维微结构观测的同步辐射技术等界面力学与接触力学的参数识别, 整体分析探针与被测物的动力学耦合效应与微力识别.

(4) 着重研究了若干微纳尺度力学问题: CNT 纤维多尺度力学性能研究; 低维材料力学性能测定; 微梁阵列系统应用; 力电耦合作用下金属薄膜线的力学与失效行为研究; 多孔硅动态毛细应力作用下的工艺应力测量与失效分析.

9 复杂边界湍流大涡模拟的理论和方法 (负责人: 何国威)

(1) 提出了剪切湍流时空关联的椭圆模型, 揭示了剪切湍流的时空关联取决于涡的特征传播速

度和涡的特征变形速度, 而 Taylor 和 Kraichnan 模型则是该模型的特例; 并在此基础上, 得到了压力时空关联的唯象表达式.

(2) 发展了磨光 Delta 函数方法, 提出了离散函数形式的浸入方法, 并与直接数值模拟和大涡模拟相结合, 用于湍流的模拟, 得到很好的结果.

(3) 发展了基于相干结构的近壁区湍流模型, 对边界层内相干结构的生成机理、热量输运机理、可压缩激波捕捉以及激波与边界层的相互作用进行了研究, 对湍流输运机理研究提出了一个新解释.

(4) 发展了一种动态耦合模型, 采用约束粒子动力学和分子统计热力学方法确定经验参数, 可用于流体力学方程和分子动力学耦合区. 利用该模型研究了超疏水表面的流动, 解释了超疏水材料的流动减阻机理. 从而证明该方法可以用于复杂物性边界流动问题的数值模拟.

10 微纳电子材料及器件的力-电-热耦合破坏理论和实验研究 (负责人: 王彪)

(1) 发现利用应变调控纳米铁电材料自发极化的方向可以实现大范围调控其电阻特性, 并将这一效果定义为巨应变电阻效应. 针对这一问题, 开展了广泛的理论建模、仿真和实验研究.

(2) 通过理论预测、第一性原理仿真和实验研究, 揭示了具有不同费米能级的电极对铁电畴的调控效应, 发现非对称电极和铁电纳米层结构可以实现二极管效应, 理论分析与实验结果一致.

(3) 利用非对称电极对铁电性能的调控, 发现可以实现单向为 0 的自发极化临界尺寸, 从而实现铁电畴的调控.

(4) 针对同时有优良的光电和力学性能的新材料, 利用第一性原理仿真系统研究了不同化学键的作用, 指导了新材料的研发.

(5) 利用发展的多尺度仿真软件, 对铁电纳米线在多场耦合作用下铁电畴的演化进行了研究, 揭示了纳米铁电材料中存在旋涡状铁电畴的事实, 并建立了调控旋涡状铁电畴的方法.

(6) 利用发展的实验技术, 制备了多种超薄铁电薄膜样品, 并首次制备出 PTO 铁电纳米管, 对其铁电、介电、击穿漏电、抗疲劳性能等进行了测试和表征.

A BRIEF INTRODUCTION OF FINISHED KEY PROJECTS ON MECHANICS IN 2011

ZHAN Shige ZHANG Panfeng Lü Shouqin ZHANG Wenming

Department of Mathematical and Physical Sciences, NSFC, Beijing 100085, China