

力学处 2013 年度重点项目结题审查情况简要介绍

张攀峰¹⁾ 詹世革 王立峰 许向红

(国家自然科学基金委员会数理科学部, 北京 100085)

摘要 对 2013 年度国家自然科学基金委员会数理科学部力学科学处结题的 12 项重点项目结题审查情况进行了简要介绍. 给出了 12 项 2013 年度结题重点项目清单以及经专家组讨论形成的结题审查评价意见.

关键词 国家自然科学基金, 力学, 重点项目, 结题

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 2014 年 3 月 10 日至 11 日在北京召开会议组织专家对 2013 年度结题的重点项

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 12 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. 专家组进行了认真讨论, 形成了结题审查评价意见.

表 1 2013 年度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
10932001	王建祥	孔隙介质的力学和输运性能研究	北京大学、宁波大学、北京航空航天大学
10932002	梅凤翔	约束力学系统的对称性、约化与控制	北京理工大学、辽宁大学
10932003	胡 平	高强度钢板热成形关键力学问题研究	大连理工大学
10932004	王 骥	压电声波器件的非线性多场耦合振动理论及其分析方法	宁波大学、华中科技大学
10932005	符 松	快速畸变湍流的模式理论、数值模拟与实验研究	清华大学
10932006	杨绍普	高维载重车辆-道路耦合非线性系统动力学研究	石家庄铁道大学、上海大学
10932007	陈宜亨	材料构型力学理论和实验研究	西安交通大学、上海交通大学
10932008	李玉龙	超细晶材料在高温、高应变率下的力学行为	西北工业大学、宁波大学
10932009	朱位秋	工程结构非线性随机振动的控制	浙江大学、西北工业大学
10932010	卢德唐	多孔介质中复杂流动细观机理与方法研究	中国科学技术大学、华中科技大学、浙江师范大学
10932011	魏悦广	材料纳米力学行为的连续与准连续表征理论和方法研究	中国科学院力学研究所、中国科学院数学与系统科学研究院
10932012	李家春	水动力作用下土体结构破坏和致灾机理研究	中国科学院力学研究所、武汉大学

基于专家组的评价意见, 下面将这 12 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 孔隙介质的力学和输运性能研究 (负责人: 王建祥)

(1) 发展了多相复合材料的湿热耦合热力学框架, 建立了预测非规则多连通孔隙介质宏观等效热力学性能的细观力学方法, 给出了考虑表面应力影

响的多相热弹性复合材料的等效比热和等效热膨胀系数的解析表达式.

(2) 研究了微/纳米蜂窝材料以及天然蜂窝的多层次结构和力学性能, 揭示了天然蜂窝的多层次结构和力学性能随时间的变化规律.

(3) 发展了一种改进的生成非统计均匀的非规则多连通孔隙介质的模型, 研究了非规则孔隙材料和热防护材料的传热性能和力学性能; 揭示了多孔氮

本文于 2014-06-30 收到.

1) E-mail: zhangpf@nsfc.gov.cn

化硅陶瓷的弹性性能和压缩强度随孔隙率的变化规律;揭示了钨渗铜发汗材料的弹性常数和热膨胀系数随铜体积分数的变化规律,以及温度随时间和空间的变化规律.

(4) 建立了考虑损伤耦合的有害离子在混凝土中扩散的新模型以及描述输运过程的方程,揭示了混凝土中的侵蚀物质输运机理和侵蚀损伤机理,得到了混凝土侵蚀后动态力学性能和黏性性能的演化规律.

(5) 制备了具有不同微结构的纳米多孔金以及纳米多孔铜样品,研究了水滴在孔隙金基底上的浸润特性和抽吸特性,测量了微纳米孔隙金属材料的毛细输运性能.

2 约束力学系统的对称性、约化与控制 (负责人:梅凤翔)

(1) 运用非完整映射研究了 Riemann-Cartan 流形的几何构造及其应用,给出了测地线和自平行线之间的映射关系,可成为一般非完整动力学系统的几何力学研究的基础.

(2) 建立了广义 Birkhoff 系统动力学的理论框架,讨论了若干非完整约束力学系统的广义 Birkhoff 逆问题、对称约化问题和积分理论,给出了广义 Birkhoff 表示和 Birkhoff 函数(组)的构造方法.

(3) 研究了非完整约束力学系统和 Birkhoff 系统的多种保结构算法,它们在稳定性和保能量、守恒量计算等方面具有显著优点,可为一般非完整动力学系统提供新的几何数值积分方法.

(4) 用离散几何力学与最优控制方法,初步建立了 Birkhoff 系统的控制理论框架,研究了自动车辆的最优编队控制问题,讨论了最优控制状态的算法和误差估计问题,为几何力学与控制结合打下理论基础.

此外,还研究了约束力学系统的多种积分方法和梯度表示,将信息几何与系统的稳定性和控制相融合等问题,取得有特色的结果.

3 高强度钢板热成形关键力学问题研究 (负责人:胡平)

(1) 建立了热成形过程中高温奥氏体组织的流动应力同应变、应变率与温度间的关系;建立了马氏体相变速率及相变开始温度与应力的关系;获得了热成形高强钢相变及淬火过程中多场及多尺度耦合本

构模型的宏观力学参数;建立了热成形高强度钢板力学参数数据库.

(2) 在系统实验的基础上建立并完善了高强度板热成形优化生产工艺数据库;建立了热成形过程中的温度测量系统并提出了考虑板料上/下表面接触热传导模型;研制了高温下高强度钢板成形极限的测试设备,获得了不同温度和成形速率下金属板材的成形极限曲线;分析了压强与氧化等因素对界面换热特性的影响,较好地表征并模拟了高强度板热成形及淬火冷却中的瞬态热传导过程.

(3) 基于材料的微结构和晶体热动力学构造了单晶热粘弹塑性本构模型,建立了热、力耦合细观本构积分算法;得到了考虑多场耦合和宏-微观变形机制的多晶本构模型.基于系统的实验并利用热平衡数值积分和 Beck 顺序估算法获得了较真实的界面换热系数与管道换热系数,建立了高强度钢板热成形的热传导模型和界面换热模型;建立了适用于高强度钢板热成形的考虑热、力、率、相变耦合的大变形弹塑性微宏观本构模型.

(4) 发展了热成形温度场分析的算法并发展了相应的有限元模块,发展了考虑界面摩擦及模具热变形的中心差分格式的热变形弹塑性大变形有限元算法;通过对典型车身部件实际热成形过程的数值模拟验证了模型及其算法的有效性.

(5) 建立了热成形高强度钢冷却速率和强度硬度间的关系;发展了基于硬度梯度复合模型的关键部件碰撞安全性的形状设计及拓扑优化;提出了高强度钢板热成形零部件的“功能设计”方法,明确了热成形高强度钢部件对提高整车耐冲击性的作用机理.

(6) 建立基于多场弱耦合方式实现数据交换的热冲压虚拟样机工程,可弥补传统设计中的缺陷,达到快速、准确、系统和可重复设计热成形模具的需求.

4 压电声波器件的非线性多场耦合振动理论及其分析方法 (负责人:王骥)

(1) 建立了考虑几何非线性、材料非线性和非线性电场效应的完整的非线性 Mindlin 板理论,并针对厚度剪切振动作了简化,提出了压电石英晶体板非线性频率漂移的完整计算方法,得到了各向同性材料、石英晶体的剪切振动幅频和电压-频率关系.

(2) 建立了压电俘能器常见材料和典型结构的非线性方程,提出了压电俘能器中结构与电路单元之间的非线性耦合动力学模型,实现了结构与电路的

整体分析和全局优化.

(3) 建立了典型多层压电变压器结构的非线性振动方程, 分析了不同输入电压和电路阻抗情形下变压比的多值性和跳跃现象, 阐明了设计参数改善结构性能的机理.

(4) 建立了一维表面梁阵列和二维表面半球单元阵列与石英晶体谐振器耦合振动的动力学模型, 提出了与表面结构内禀属性相关的等效质量因子, 有效模拟了表面结构对谐振器动力行为的作用特征.

(5) 研究了新型压电磁复合材料中的波传播问题, 计算了典型波模态的波速和特征, 为探索新型材料的应用、弹性波的激发以及传感器应用等提供了基本依据.

(6) 利用激光振动测试设备完成了压电弹性体表面位移的高精度测量.

5 快速畸变湍流的模式理论、数值模拟与实验研究 (负责人: 符松)

(1) 针对复杂湍流场的模拟, 提出与 RANS/LES 混合方法匹配的、全速域的自适应耗散格式, 完善了 RANS/LES 混合方法. 开展低速大分离流动, 跨声速非定常分离流动的机理研究, 开展超声速条件下单个粗糙单元引起的强制转捩的研究.

(2) 将气体动力学格式 (GKS) 与湍流/转捩模式相结合, 模拟高雷诺数湍流问题. 对快速畸变湍流、可压缩槽道湍流及跨/超音速典型湍流等问题进行了直接数值模拟, 揭示了压缩性对变形湍流、剪切湍流的影响.

(3) 通过激光流动显示、PIV 测量、PSP 测量、油流显示等方法及数值计算, 研究了翼尖涡近场发展、卷起的特性和机理. 在此基础上, 揭示了翼梢涡气和翼梢小翼联合控制翼尖涡的机理.

(4) 开展了用涡流发生器对多段翼型, 用扰流片对短舱导致分离, 用非定常卡门涡发生器对扩展管道流动分离, 用鼓包、涡流发生器对超临界翼型激波/边界层干扰等典型流动进行控制的机理研究.

此外, 还开展了动壁面流动控制、高精度新格式在可压缩湍流中的应用、等离子体控制边界层分离等问题的研究.

6 高维载重车辆-道路耦合非线性系统动力学研究 (负责人: 杨绍普)

(1) 建立了三维轮胎力计算模型, 得到了轮胎负

荷与下沉量的关系, 通过实验对车辆悬挂系统的关键参数进行了识别, 以此为基础建立了载重车的多体动力学模型, 并对车辆的非线性动力学行为进行了研究.

(2) 利用沥青混合料 Burgers 模型和非线性粘弹性动力学理论, 建立了移动车辆载荷下路面垂向运动的多层板模型和道路的多层体系黏弹性模型. 根据高速公路试验段的结构层参数, 建立了三维有限元半刚性沥青路面模型.

(3) 对立方非线性 Winkler 地基上 Euler-Bernoulli 梁在移动载荷下的动力学行为进行了研究, 得到不同边界条件对系统动力学行为的影响规律. 研究了三参数描述的黏弹性 Pasternak 地基梁的横向振动特征, 得到不同边界条件下的频率方程的近似解析式以及模态函数表达式.

(4) 对车路耦合动力系统进行了数值研究, 得到了车辆和道路参数对车路耦合动力学行为的影响规律.

(5) 在大广高速公路上构建了实车运行试验路段, 对道路各层结构的动压力、动应变和温度、湿度等动、静态参数进行监测, 构成完整的车-路耦合动力学实验平台, 并进行了不同工况的实车实验, 可为研究车-路耦合动力学行为、车辆和道路设计, 以及道路破坏机理研究提供基础.

7 材料构型力学理论和实验研究 (负责人: 陈宜亨)

(1) 建立了微裂纹损伤的 M 积分描述方法, 构建了固体力学守恒定理与微裂纹损伤间的内在联系, 基于材料构型力和守恒积分提出一种描述材料复杂缺陷损伤和失效的新准则.

(2) 将构型力及守恒积分应用于压电材料多裂纹问题, 证明了 Jk 向量两个投影守恒定理在力电耦合情况下仍然成立, 为压电材料断裂问题研究提供了一个新思路.

(3) 将构型力概念应用于纳米损伤力学, 分析了表面能、表面残余应力和表面的 Lamé 常数变化对纳米孔洞扩展、聚合的影响, 成功描述了纳米尺度的损伤演化和尺度效应.

(4) 发现工程结构材料中缺陷附近物质迁移的主要驱动力是应力梯度, 材料损伤与愈合过程的实验表明, 损伤缺陷附近的二相粒子的迁移扮演重要角色.

8 超细晶材料在高温、高应变率下的力学行为 (负责人:李玉龙)

(1) 提出了能够获得均匀超细晶材料的最佳工艺路线;成功地制备了块体超细晶铜、铝、钛以及细晶镁合金,揭示了 ECAP 过程中的这些合金材料微观组织演化过程。

(2) 确定了超细晶材料高温试验的最高温度及加热时间;改进了 Hopkinson 杆高温实验同步组装系统,最短同步组装时间可达到 5 ms;建立了一套系统的超细晶材料高温、高应变率耦合条件下力学性能测试新方法。

(3) 系统地开展了超细晶铜、钛、铝以及细晶镁合金在较大温度和应变率范围内的压缩/拉伸力学性能测试;定量研究了温度、应变率、晶粒尺寸等因素对超细晶材料力学性能的影响。

(4) 提出了 FCC 结构金属计及应变率、位错密度、晶粒尺寸以及晶界影响的本构模型;分析获得了 HCP 结构 AZ31 镁合金晶粒细化的微观机理和应变硬化、应变率硬化特性变化的微观机制;利用分子动力学方法研究了晶粒尺寸、孪晶厚度、堆垛层错厚度等对纳米金属材料强化机制的影响。

(5) 揭示了超细晶铁和超细晶铜内部绝热剪切带形成与晶粒尺寸、应变硬化、应变率的依赖性;研究了绝热剪切带的动态传播规律,获得了剪切带传播速度与加载应变率的依赖关系。

9 工程结构非线性随机振动的控制 (负责人:朱位秋)

(1) 基于拟哈密顿系统随机平均法与随机动态规划原理,考虑系统状态部分可观测、控制力时滞与有界、系统模型与参数不确定性,建立了非线性随机最优控制理论方法。

(2) 基于拟哈密顿系统随机平均法与随机极大值原理,提出并发展了非线性最优控制理论方法。

(3) 提出了以响应概率密度为目标的非线性随机最优控制理论方法。

(4) 提出了以智能材料为执行机构的非线性随机最优半主动控制理论方法。

(5) 提出了具有分数阶阻尼的拟哈密顿系统的随机最优分数阶控制理论方法。

(6) 研究了最优控制系统的非线性随机动力学,获得了随机响应、稳定性、可靠性与性能指标之间的关系。

(7) 搭建了非线性随机最优控制试验平台,完成了三层土木结构模型和悬臂梁的非线性随机最优控制实验,验证了理论方法的有效性。

10 多孔介质中复杂流动微观机理与方法研究 (负责人:卢德唐)

(1) 利用国家同步辐射实验室光源得到岩石样品、动物脏器、植物杆茎等多孔介质微结构三维数据,采用图像识别、边缘提取等图形图像处理技术进行了三维重构。

(2) 利用重构的三维结构研究了多孔介质的微结构分形特征等。

(3) 利用不同温度及压力下的多孔介质微结构数据,获得了孔隙骨架形变特性。

(4) 采用分子动力学与格子波尔兹曼微观数值模拟方法以及分形几何理论,揭示了不同种类多孔介质宏观流动方程所包含的微观流动机理,修正了用于宏观模拟的达西定律。

在上述研究工作基础上,项目组结合已有的油藏数值模拟软件,形成了用于我国页岩气及致密油气开采的产能预测软件和化学驱油的区块数值模拟软件,已在大庆及新疆等油田示范应用,有效地解决了我国页岩气开发中缺乏工具软件的难题。

11 材料纳米力学行为的连续与准连续表征理论和方法研究 (负责人:魏悦广)

(1) 建立了连续介质尺度理论的框架.采用球体膨胀模型和纳米板拉压模型,将连续介质尺度理论预测结果与 Cauchy-Born 法则方法预报结果进行能量等效,获得了大量的金属材料系列和陶瓷材料系列的特征尺度值以及表界面能密度值,为认识材料的跨尺度力学行为提供了新的资料。

(2) 发展了高效高精度的分子集团统计准连续方法,模拟出系列纳米材料及结构的强度和破坏特征的新结果.基于发展的准连续方法,模拟出较分子动力学方法更大规模的材料强度及破坏特征结果,从而有望与微尺度实验结果实现关联。

(3) 研究了离散模拟与准连续模拟链接区产生“鬼力”的机制,建立了消除“鬼力”和获取优化稳定解的机理.因而有望提出严格的更有效的准连续方法和多尺度模拟方法,为实现连续介质尺度理论与有效准连续方法的关联提供严格的基础.激光作用下熔池形成及演化过程。

12 水动力作用下土体结构破坏和致灾机理研究 (负责人: 李家春)

(1) 提出了数值三轴仪的概念, 并采用改进的离散元方法, 从土体细观结构入手, 研究了土体的宏观力学特性; 提出了裂隙介质宏观特性的统计描述方法和裂隙网络等效渗透率张量的算法.

(2) 实验研究了堤坝在水流作用下的冲刷破坏机制, 建立了水流与堤坝溃决过程的双层积分耦合模型. 针对管涌、流土导致的堤防溃决问题, 建立了渗透破坏导致土体流失过程的物理模型, 揭示了渗透破坏导致堤防垮塌的机理, 并建立了降雨/库水位涨

落与库岸边坡失稳的耦合动力学模型.

(3) 模拟了唐家山堰塞坝的溃决过程; 分析了重庆汪家院子、农机技校、万州花园三个典型滑坡体的渗流场及稳定性; 获得了长河坝水电站孔隙水、土体、结构的耦合作用及其对坝体稳定性的影响规律.

(4) 积累了大量有关溃坝和滑坡的实验和现场观测数据集, 包括岩土体特性、三峡地区滑坡区水文地质环境监测、唐家山堰塞体溃决过程、西南地区若干水电站坝基地质和坝工设计以及溃坝水槽试验等数据, 可供后续研究使用.

doi: 10.6052/0459-1879-14-193

A BRIEF INTRODUCTION OF COMPLETED KEY PROGRAM PROJECTS ON MECHANICS IN 2013

Zhang Panfeng¹⁾ Zhan Shige Wang Lifeng Xu Xianghong

(Department of Mathematical & Physical Science, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China)

Abstract The paper brief introduced the completion and evaluation of 12 NSFC key program projects on mechanics in 2013. The detail projects list and the evaluation assessments provided by expert committee are given.

Key words NSFC, mechanics, key program project, completion and evaluation