



对力学科学处 2005 年重点项目结题验收情况的简要介绍

孟庆国 詹世革 刘青泉

国家自然科学基金委员会数理科学部, 北京 100085

2005 年力学科学处共有 4 项重点项目需进行结题验收 (见表 1). 按照《国家自然科学基金重点项目管理办法》的有关规定: 重点项目执行期结束后, 应组织专家完成项目验收工作. 为了加强对资助相近研究领域项目之间的交流和借鉴, 促进学术交叉和项目组管理经验的交流, 数理科学部力学科学处于 2005

年 1 月 27 日 ~ 28 日在北京召开会议对这 4 个重点项目进行了集中验收. 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. 验收专家组进行了认真讨论, 形成了验收组综合意见.

表 1 2005 年力学科学处需结题验收重点项目清单

批准号	负责人	项目名称	主要承担单位
10032010	黄筑平	共混 / 填充高聚物体系的动态力学行为	北京大学、中国科学院化学研究所、宁波大学
10032030	顾元宪	耦合系统的多学科优化设计理论与数值方法	大连理工大学
10032050	竺乃宜	高速流动中高温效应的实验研究	中国科学院力学研究所、中国科学技术大学
10032060	张涵信	飞行器机动飞行中若干关键的非常流动问题	中国空气动力研究与发展中心、北京空气动力学研究所、北京航空航天大学

基于验收专家组的意见, 下面将这 4 个结题验收的项目在执行期间所取得的主要研究成果介绍如下:

1 共混 / 填充高聚物体系的动态力学行为

(1) 从界面分子设计、改性剂的合成入手, 成功地研制出分散均匀, 界面粘结良好且具有一定粒子尺寸的硬核 / 软壳微观结构特征的 3 种共混 / 填充高聚物体系.

(2) 对共混 / 填充高聚物体系的微观结构和力学性能进行了实验测定, 研究了微观结构与力学行为之间的关联, 探讨了高聚物体系的界面性能及损伤破坏机理.

(3) 发展了新的动态实验方法和分析手段, 进行了 10^{-4} s^{-1} 到 10^3 s^{-1} 应变率范围的动态力学性能实验研究和理论分析, 重点研究了应变率、温度以及应力三轴度对具有不同界面相结构的高聚物体系力学性能的影响.

(4) 将橡胶弹性的分子网络模型、高聚物的瞬态网络模型和内变量理论有机结合, 在非平衡态热力学框架内, 提出了一个新的非线性热 - 黏弹性本构理论, 可以描述大变形条件下非晶态高聚物的非线性热 - 黏弹性力学行为.

(5) 基于细观变形机制, 定量描述了共混 / 填充高聚物体系在变形过程中的微损伤成核及其演化规律, 给出了计及微损伤演化的材料宏观本构关系.

(6) 给出了无厚度的弱界面模型与有厚度的界面相模型之间的对应关系; 提出了一个新的计及界面效应的超弹性体的能量泛函, 并由此导出了广义 Young-Laplace 方程; 探讨了界面相对复合材料静态和动态有效模量的影响.

(7) 发展了可描述粒子填充复合材料尺度效应或高体积分数的新的细观力学方法.

2 耦合系统的多学科优化设计理论与数值方法

(1) 提出了求解热传导方程的自适应精细积分方

法. 对线性、非线性稳态和瞬态热传导问题分别提出了新的灵敏度计算方法. 建立了线性 / 非线性稳态 / 瞬态热传导、相变热传导、非傅立叶热传导系统的优化设计以及热控制问题的数学物理模型和数值求解方法, 可以进行结构尺寸、形状、材料和热处理工艺的优化设计, 并可处理热控与反问题. 利用共轭梯度法求解稳态 / 瞬态热传导的反问题, 实现了对材料性质、热源项、边界条件等单一和组合识别.

(2) 对热应力(热变形)、热屈曲、热振动 3 类热力响应问题, 提出了结构与线性 / 非线性稳态 / 瞬态温度场耦合的灵敏度计算方法(直接法和伴随法), 建立了热传导与结构力学响应耦合的综合优化数学物理模型和数值求解方法, 实现了多学科综合优化设计. 能应用于单元尺寸、结构形状和拓扑、材料的优化设计.

(3) 提出了密闭腔体声场 - 结构耦合动力系统的模态分析方法, 建立了耦合特征频率和特征向量的灵敏度计算方法. 在考虑小阻尼的条件下, 提出了封闭腔体声场的特征频率和特征向量分析以及灵敏度分析的辛子空间迭代法.

(4) 采用磁通密度作为状态变量, 给出了适合形状优化的磁通密度灵敏度分析的半解析法和局部差分法. 在电磁铁、同步电机磁极等电磁结构设计中, 显示了结构形状优化方法对改进电磁特性的有效性.

(5) 对具有稳定性约束的结构拓扑优化问题进行了深入研究, 指明了约束可行域所具有的特殊性质, 提出了连续体结构优化的正则化刚度 - 密度插值格式, 并从数学上证明了这种格式优化问题解的存在性, 避免了优化结果的数值不稳定性. 提出了利用水平集技术处理拓扑优化中的拓扑相关荷载的方法, 成功地解决了此类传统算法难以处理的优化问题.

(6) 基于广义变分原理, 在结构优化中提出了一种新的伴随法灵敏度分析公式的系统推导方法, 这种方法完整地考虑了形状优化所对应的各种边界位移变化方式, 纠正了 Arora 等人所提出的形状优化灵敏度分析变分原理中的错误.

(7) 提出了一种结构可靠度的近似分析方法, 把可靠度分析的功能函数从一般算法中的高度非线性隐式函数, 简化为关于结构响应的线性显式表达式, 大大简化了结构可靠度分析. 研究了一次可靠度算法不收敛的原因, 提出了改进的方法, 提高了收敛性能.

(8) 提出了一种时域精细算法, 将偏微分 / 积分方程的初边值问题转化为一组具有递推形式的边值问题, 该算法可对步长变化进行自适应计算, 在非

线性问题的求解中不需要任何迭代.

(9) 研究了参数化有限元建模与三维实体有限元网格生成方法, 在 CAD/CAE 一体化的框架下研究解决了有限元建模中的若干关键问题.

3 高速流动中高温效应的实验研究

(1) 建立了二氧化碳自由基的三能级碰撞动力学模型, 取得了二氧化碳(A)和(a)态之间的碰撞转移及它们被数 10 种分子猝灭的速率常数等重要实验结果. 应用脉冲直流放电产生 CCl_2 自由基, 分别用不同波长的激光将电子基态 CCl_2 激励到激发态 A^1B_1 的不同振动态. 记录不同振动态的时间分辨荧光信号, 测得 $\text{CCl}_2(A^1B_1)$ 不同振动态被 O_2 , N_2 , NO , N_2O , NH_3 , H_2O 以及醇、酮和胺类分子的猝灭动力学速率常数.

(2) 在化学激波管中测定了 800 K ~ 2600 K 温度范围内钠离子与电子的电离复合系数. 在 1020 K ~ 1190 K 温度范围内得到二氯化烷 β 消除反应速率常数. 在 $\Phi 800\text{mm}$ 低密度激波管中, 在高温条件下实验研究了控制纯净空气电离的最主要反应 NO^+ 离子与电子的复合过程获得了与理论分析一致的结果. 在化学激波管中研究了聚丙烯在烧蚀过程中产生的解聚和裂解机理, 并测定了高温条件下的解聚和裂解速率系数. 首次获得在 1000 K ~ 2000 K 时聚丙烯的解聚速率系数.

(3) 在 $\Phi 800\text{mm}$ 高温激波管中, 初始压力 1.3 Pa 低密度条件下, 获得了空气中速度 (4.5 ~ 7.5) km/s 强激波后的电离激发时间. 在初始压力 (12 ~ 80) Pa 条件下, 获得了空气中速度为 (3 ~ 6) km/s 强激波后非平衡红外辐射的激发时间和松弛时间, 并研究了这些非平衡过程随初始压力和激波速度变化的规律.

(4) 建立了配套的爆轰驱动激波风洞系统. 取得了气动力测量新技术的一项发明专利. 同时研制成功能耐高速高温气流的瞬态测热探头、一维多点红外探测器、电离测量系统和光谱测量系统.

(5) 以 Te 元素空心阴极灯为光源, OMA4 为探测设备, 通过标定获得一氧化氮 γ 带系 ($A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi$) 对 Te214nm 和 225nm 两条谱线的非线性吸收特性, 采用“差比法”对自由流中低含量的 NO 进行了有效的诊断. 使用 OMA4 测量了二维钝体驻点区的发射光谱, 在 (200 ~ 280) nm 波长范围内获得 NO 的 γ 系、OH 的 A-X 跃迁、 N_2^+ 的 B-X 跃迁和烧蚀金属的部分原子线辐射. 获得了模拟再入条件下壁面催化性能对热流影响的有规律的数据和 5 km/s 再入速度条件下飞行器周围流场中的光电特性(红外、电

离) 的有价值的实验数据.

(6) 对超声速化学氧碘激光 (SCOIL) 的性能分析计算, 提出了非线性增益模型、增益反常饱和规律和反常饱和谱线形, 并与常用的线性增益模型的 SCOIL 性能计算结果作了分析对比, 系统考察了不同化学反应体系、可调参数的不同选择、阈值增益等因素的影响, 发展了相应的算法, 有重要的工程应用价值.

4 飞行器机动飞行中若干关键的非定常流动问题

(1) 在数值计算方法方面, 给出了网格、内点格式和边界点格式匹配协调的非定常计算方法和原则, 并给出了具体计算方法, 特别值得称道的是首次提出了非定常计算的保频谱原则.

(2) 在流场分离涡的演化方面, 通过物理分析, 给出超声速混合层流态演化的机理, 发现涡合并、流动分岔、扰动影响、小激波等演化的规律. 发现了物体转动时, 顺流运动壁和逆流运动壁附近的流动分离结构形态和规则.

(3) 在飞行稳定性方面, 通过求解耦合的飞行力学方程与 NS 方程, 并利用非线性动力学理论, 给出了确定动态稳定性参数的方法、动态稳定性判据以及分岔条件, 得到了动态演化规律.

(4) 在细长体大攻角非对称流动特性及其变化规律方面, 建立了细长旋成体非对称的背风涡系结构模型; 分析了截面侧向力沿轴向准周期分布与涡结构形态的关系, 研究了几何外型微小变化对涡流非对称发展的影响, 并探讨了非对称形成的空间不稳定性机制. 将涡流非对称性的研究拓展到可压缩流动, 并揭示了不同横流马赫数区间内的发展规律; 研究了涡流非对称发展的影响因素, 发现了非对称的周期性规律

源于激励扰动的周期性这一重要事实.

(5) 在跨声速气动-弹性负阻尼现象研究方面, 发现了振动模态的节点位置 (特别是前节点位置) 的模拟是影响实验结果的主要因素, 对气动阻尼实验有重要的指导意义; 揭示了产生跨声速气动负阻尼的两种不同机制: 跨声速激波等非线性动力学过程的作用和黏性引起的非线性气动效应; 引入了“分布气动阻尼”和“阻尼相位”的概念, 并发现了阻尼相位变化的 4 个分区及相位变化规律; 明确定义和区分了“时滞”、“半周期滞回”和“全周期滞回”3 个不同概念, 并分别研究了它们对气动阻尼的影响, 从而在物理本质上反映了分离流动的特性, 指出了黏性分离流动引起气动阻尼的机制.

(6) 在大攻角动稳定性风洞实验研究方面, 结果表明: 减缩频率对具有前后翼外形的导弹动稳定性有较大影响, 会导致失稳; 前翼产生的分离涡具有周期性, 当前翼的脱涡频率与全弹的俯仰运动固有频率接近, 且脱涡相位与全弹的俯仰运动的相位一致时, 可能导致全弹俯仰振动的失稳.

(7) 在俯仰三角翼涡破裂影响因素研究方面, 结果表明: 瞬时攻角增大, 前缘涡破裂点前移; 涡破裂位置相对于相应静态攻角下涡破裂位置有明显的滞后; 涡破裂位置的滞后, 可用动态洗流影响导致“有效攻角”的变化进行物理解释; 结果引起作用在三角翼上的气动力的非线性变化.

(8) 在利用襟翼对二维非定常涡进行控制研究方面, 结果表明: 中等攻角和小攻角下, 襟翼可有效控制涡的脱落和强度, 提高升阻比; 而大攻角下, 襟翼的作用不明显, 甚至起负面作用. 适当调整襟翼偏转角度, 可实现对分离涡的控制.