

科学基金

力学学科“八五”重大、重点项目获得重要进展

靳征谟 孟庆国

国家自然科学基金委员会,北京 100083

国家自然科学基金项目分为三个层次:重大项目、重点项目和面上项目.每类项目都有相应的管理办法.重大、重点项目的立项与申请、评审与批准、计划实施与管理、验收与结题等,均按管理办法运行.现将验收结题项目的重要进展分述如下.

1 重大项目的重要进展

“八五”期间,力学学科的重大项目有两项,研究期限均为 1997 年 12 月底结束.其中“材料的损伤断裂机理和宏微观力学理论”重大项目已于 1997 年 12 月 24 日通过验收.结题.该项目在执行期间,出版学术专著 6 部,学术论文 783 篇(其中国际学术刊物 247 篇,全国性科技期刊 315 篇,国际会议大会邀请报告 32 篇).获国家及部委级奖励共 10 项,其中国家自然科学基金三等奖 2 项,中科院自然科学奖一等奖 2 项,教委科技进步奖一等奖 2 项,冶金部科技进步奖一等奖 1 项.验收专家组认为有 9 项研究成果达到国际先进水平,具有较大的国际影响,它们是:

(1) 由宏观深入到细微观,在晶体硬化矩阵确定、细观相变塑性本构和原子-连续介质嵌套模型方面取得了重要进展.

(2) 通过电镜加载原位观察,揭示了位错不均匀发射与纳米裂纹汇合相交织的断裂过程,提出了考虑位错发射影响及由位错塞积驱动的准确解理断裂的理论模型.

(3) 利用激光热-力联合加载装置,发现了称为“反冲塞”的新的破坏模式,并提出了相应的分析模型.

(4) 提出了微裂纹扩展方位区理论和微裂纹演化的数密度统计理论.

(5) 建立了可描述细观损伤演化,联系宏-细观损伤变形的损伤演化物理方程,给出了由细观损伤动力学表示的损伤演化率方程;发展了一套可观察、采集细观损伤演化的实验和数据处理方法(单脉冲加载和循环加载);建立了可模拟局部化过程的多边形有限元等方法.

(6) 对多滑移单晶体和具有不同取向与晶界重位因子的双晶体,进行了在疲劳载荷下的力学响应和位错结构的精细研究,阐明了多晶体循环应力-应变曲线和晶界疲劳裂纹萌生的特征.

(7) 建立了热弹性马氏体一类材料相变本构关系的统一热力学理论框架.利用数值模拟展现了由控制相变局部化传播方向而使结构陶瓷增韧的潜力,并在理论指导下初步制备了 Ce-TZP/Al₂O₃ 层状增韧陶瓷.

(8) 在电致断裂、电致疲劳和电致畴变增韧方面取得重要进展.

(9) 发现腐蚀和液体金属吸附能促进位错发射和运动,当它发展到临界条件时就导致环境

脆断(氢脆、应力腐蚀、液体金属脆)微裂纹的形核.

另一个重大项目“气体的旋涡、分离流动机理和控制”正进行课题和项目的总结,今年上半年将完成验收结题.

2 重点项目的重要进展

“八五”期间,力学学科有重点项目 11 个.其中有两个项目即“海气微相互作用的研究”、“多体复杂系统动力学与稳定性”,其研究结题时间为 1997 年 12 月底,按管理办法要求,将于今年上半年完成结题的验收工作.其余的 9 项已通过验收结题,其重要进展:

“湍流的基础研究”项目:

⑧ 分析了已广为流传了 30 多年的流动稳定性弱非线性理论中存在的重要缺陷,并成功地提出了改进意见.提出了湍流边界层中相干结构产生的动力学模型,并在湍流标量输运计算中应用了这一模型成果.这些在国际上都属首创.

⑨ 针对各种相干结构探测判据的不一致及它们的非客观因素,提出了先滤波后判别的新方法,并给出了滤波截止频率比较合理的判据,从而改进了相干结构的探测方法,还成功地用流动显示方法,显示出了边界层近壁区的近似流向锥型涡,与分析数值模拟方法而导出的概念性模型相符,支持了近年来国际上出现的对发卡涡的一些新看法.

⑩ 进行了中等雷诺数下槽道湍流的数值模拟,在我国第一次建立了槽道湍流的全流场数据库,为湍流研究打下了一个基础.在分析数据库中第一次明确提出了在壁面附近存在法向强扰动脉冲的问题,为合理地解释试验现象提供了重要线索,其成因及重要性值得进一步研究.此外,还对平面混合层、槽道流及边界层流动做了失稳后演化的数值模拟.

⑪ 做了边界层外层流向涡和壁湍流相互作用的实验和数值分析,发现了流向涡两侧的不同影响.并利用所开发的简易的粒子跟踪测速系统,做了弯槽湍流二维相关的测量,发现了凹壁上湍流脉动流向相关性不对称性,反映了凹壁湍流脉动的增长特性.

⑫ 开发了雷诺应力的近壁修正的非线性模式.论证了涡粘性的张量性质,并利用实验结果,提出若干种流动的涡粘模式.

“细观力学光测技术研究”项目:

⑬ 高密度栅制备技术.研究并实现了三种制栅方法:(1)用氩离子激光倍频获得紫外相干光,采取干涉法制表面栅,栅频达 6000 线/mm.(2)用掩膜法及离子束来刻蚀制栅,栅频达 3000 线/mm.(3)用双镀层法制成 1000 的耐高温栅.

所制光栅质量优于国外同类产品,所生产的 1200 线/mm 的光栅已售往国外,宏/微观云纹倍增干涉系统已试销海外.

栅线方法的信息处理,研究了三种方法:(1)数字相移逻辑云纹法.(2)显微倍增云纹干涉技术.(3)点阵数字处理技术.

⑭ 广义散斑方法.电子显微镜和原子力显微镜与广义散斑法相结合,获得表面位移场,位移灵敏度达亚微米,这在国内外均未见报道.同时研究了相应的分析方法:(1)数字图象相关技术.(2)载波图象变分法和图象有限元法,用于细观力学的分析是成功的.探索了细观力学中的三维位移场的重构方法,并应用于一些材料.

⑮ 应用同步辐射光的软 X 射线波段,获得了狭缝的全息图,完成了付里叶全息的数字再现,用同步辐射的 X 光透射技术,获得了材料内部损伤演化的信息,在国内外均属首次,并研究了显微 X 光 CT,完成软件和模拟实验,为建立材料力学实验站打下了基础.

⑯ 应用上述方法对如下几个方面进行了初步探索:(1)铜箔微米孔洞演化过程;(2)记忆合

金属材料局部相变;(3)单晶硅片的损伤;(4)碳纤维/环氧等几种复合材料内部界面的演化过程;(5)铝-硅复合材料界面位移;(6)半导体硅片键接界面热位移场.以上都达到了亚微米或更高的位移测量灵敏度.

“复合材料(树脂基)界面力学研究”项目:

⑧ 在进行纤维压入和微珠脱粘两种试验和数值分析基础上,阐明了国际上四种典型的界面剪切强度实验结果互不相符的根源主要在于圆柱形界面端不同的应力奇异性.

⑨ 分别用奇异积分方程解法和渐近展开解法,分析了纤维复合材料界面轴对称裂纹模型,求得了裂纹尖端场的奇异性.

对多相材料 H 损伤构形,建立了非线性奇异积分方程,研究了弱界面裂纹扩展规律,发现了分层过程中存在一个不稳定区.

⑩ 为考虑各向异性对桥连裂纹稳定性的影响,建立了非线性奇异积分方程,其解答揭示了界面强度对桥连增韧的影响.

⑪ 对弹塑性双材料界面裂纹尖端场进行了渐近分析,解决了位移交叉匹配问题.

对非理想界面问题,建立了弹簧层界面模型,导出了既具有基体蠕变又具有轻度界面蠕变的复合材料粘弹性本构关系.

⑫ 在复合材料界面应力分析的数值方法方面做了大量卓有成效的工作,积累了多种行之有效的计算软件.

“心室-血管耦合系统的力学问题研究”项目:

⑬ 以血管输入阻抗作为左心室后负荷的合适量度,通过分析比较筛选出多种适合于不同应用场合的后负荷模型(包括分布参数的管路模型以及多元件的集中参数模型等)模拟动脉系统;以时变弹性模量 $E(t)$ 和内阻 R 构成 $E(t) - R$ 模型左心室功能,二者组合构成模拟左心室-动脉耦合系统,以此为基础将左心室-动脉耦合系统的分析从 Sagawa 等的静态场合拓广到动态情况,使所得分析模型以及所得左心室与血管的相互影响都与实际循环系统的生理特征更加接近.

⑭ 以左心室的平均振荡势功率最小作为判据,合理地分析了左心室-动脉系统优化耦合的条件与特征,首次提出利用测量所得的动脉系统输入阻抗曲线直接在频域上分析优化耦合的方法,并以此为基础,详细讨论了心室与血管系统的相互影响,所得结果与实验数据相当符合.与时域分析相比更为合理,且有利于将来进一步应用于临床.

⑮ 发展了循环系统模拟技术和装置,其特色在于多参数计算机控制,并有较合理的心室前后负荷模拟单元,整机采用模块式结构,制作工艺较精巧,结构紧凑.具有进一步推广应用的价值,能较好显示循环系统生理特征,为心血管流体力学的深入研究提供合适的实验模拟手段.

“工业爆炸灾害力学研究”项目:

⑯ 针对突然揭开煤层引发的破坏现象,提出了拉伸间断的破坏波模型,从定量上明确了存在开裂和突出两类破坏,并合理地解释了侧压、瓦斯、煤体强度三因素的作用.

研制出连续自动检测钻孔指标实时预测突出的系统和图谱分析法,并研制了 EB 煤和瓦斯突出预警系统的软件.

⑰ 建立了从激波管到非限定条件下的实验装置和方法,如测定了石脑油等临界起爆能和爆轰极限等参数,为系统研究气云爆炸创造了条件.

研制了研究火焰与激波相互作用的四套实验装置,即:卧式爆轰管,三相燃烧管,方型卧式激波管,形成两相界面的激波管,为两相爆炸现象的研究提供了重要手段.

⑱ 提出和实施了水平爆轰管的扬尘方案:建立了粉尘等容燃烧的爆炸特性与等压燃烧速度

间的量化相关关系,研究了微细铝粉火焰的加速特性及稳定爆轰的转捩条件,并把有关成果应用于工业部门,如为宝钢高炉喷吹烟煤提供了等效燃烧速度随煤粉粒度、浓度、含氧量、环境初温与初压变化的量化规律,获得好评。

⑧对两相爆炸问题进行了理论分析,提出了若干理论模型,其中粉尘爆轰模型和薄膜爆轰模型,解决了诱导压和燃烧区的连续处理和 Chapman - gouguet 条件的确定等难题,并撰写了有关专著。

“复杂结构动力学”项目:

⑧基于大型捆绑式运载火箭的工程梁模型,利用子结构试验和系统综合技术得到运载火箭实际结构的整体振型和频率的可用数据,并在实尺全箭模态试验中用于试前预示和试后模型修改。

⑧为解决试验模态综合法中能测到的模态少、截断误差大的问题,用解析的方法解决了剩余项的问题,精细地实现了自由界面模态综合、固定界面模态综合、混合界面模态综合和子结构混合模态综合技术,使模态综合理论更加系统和完善。

⑧发展了典型组合结构的数学理论,并对其有限元方法获得了收敛性和误差阶估计,对无摩擦接触问题的有限元逼近理论中的收敛性问题取得了一些优于国际上的结果。

⑧给出了在热和机械荷载作用下屈曲后的自振特性分析的方法,提供了高效的确定性与随机动力响应分析方法和程序。

⑧建立了一类蜂窝夹层壳超参单元,能有效地进行蜂窝夹层壳的静动力分析,考虑刚体运动的动力响应分析,以及几何非线性和一类简化模型的材料非线性分析。

构造了 16~20 节点没有转动自由度的三维退化层合板壳元,用参数识别的方法识别粘弹性材料的粘性系数,用于有限元计算约束粘弹性阻尼结构的模态阻尼比。

“弹性动力学反问题研究”项目:

⑧本项目对弹性波反演、工程基础检测、地震层析等方面进行了研究,提出了一组反演理论和数值方法,并进行了一些实验和应用研究,获得了系统的成果,包括逆 Born 近似反演、非均匀介质射线理论反演、多参数反演、桩 - 土系统的反演等十一个方面的反演。

⑧在上述成果中,关于非均匀介质反投影,桩 - 土系统多参数多波段源反演、全空间和半空间弹性波多参数反演以及光声技术的应力测试的实验研究方面取得了突出进展,其成果具有一定的创造性。

“细观力学基础研究”项目:

该项目立项两年后,其主要研究内容转入重大项目“材料损伤断裂机理和宏微观力学理论”之中,余下的“脆性断裂的非平衡统计方法”研究,建立了金属材料脆性断裂过程中微、细、宏观相结合的演化方程,是获 1997 年度自然科学奖三等奖的重要内容之一。

“冲击载荷下材料与结构的响应”项目:

该项目的重要进展已在“力学进展”(1997,第2期,第276~280页)做了介绍。

上述项目的重要进展仅为定性结论,具体的细节请读者查阅有关文献。

待验收结题的“八五”重大和重点项目的进展,在今后适当的时间再与读者见面。