



## 力学所 1999 年基金项目研究工作进展

吕明身

中科院力学所科技处, 北京 100080

国家自然科学基金是基础性研究项目获得支持的重要渠道之一. 力学所历来重视科技人员在国家基金中的立项情况, 并且认真关注项目的执行动态和最终的完成情况. 1999 年力学所的基金项目研究工作进展是卓有成效的, 现做一简要回顾.

### 1. “脆性介质损伤累积统计和破坏预测的非线性演化理论”项目

基于耦合斑图映射模型, 采用相空间随机切片等方法, 考察了非均匀系统损伤破坏的非平衡、非线性演化的共性特征. 系统破坏表现为从稳态的损伤积累向突发性的灾变破坏转变, 灾变阈值宏观上有不确定性, 存在一个稳定与灾变模式的过渡区. 发现宏观破坏强度在一定范围内近似为 Weibull 分布, 但模数随样本尺度而变化且与应力分布规则有关. 上述转变发生时, 系统内应力场涨落水平显著增强, 同时损伤场涨落的空间尺度也显著增大, 这可视作宏观破坏的一种征兆. 根据导出的损伤场演化方程, 可给出损伤局部化判据, 由损伤动力学函数表达. 采用损伤场方程的数值解, 链网模型模拟研究, 表明损伤局部化是宏观破坏的前兆, 局部化判据可预言损伤局部化的出现. 这为系统破坏预测提供了一条可能的途径. 利用链网模型和发展的一种新的离散元模型, 有力地验证了加卸载响应比 (LURR) 理论, 利用弹簧-滑块模型研究了 LURR 的时空变化规律, 进一步证实了大地震前高 LURR 区的汇聚现象. 用 LURR 理论预测地震有新的进展.

### 2. “微重力流体物理基础研究”项目

在表面张力驱动对流及稳定性方面, 指出了模拟液桥模型的临界 Marangoni 数较通常液桥模型要低, 这意味着通常液桥模型较低的估计了热毛细振荡对流发生的可能性. 液桥的临界温度差随体积比的变化曲线被分为两支, 在体积比 0.95 左右

存在一间隙区, 在此区域中, 外加温度差高到液桥维持不住, 热毛细对流也是定常和轴对称的. 瘦桥分支和胖桥分支有不同的起振过程. 在多层流体及 Bénard-Marangoni 对流研究方面, 发现了二层流体在超临界状态下流型发展的非线性特征, 发现了完整的 Marangoni 对流涡数及形状随临界  $Ma$  数倍数的三个不同发展区域和明显的壁面效应. 研究了空气和硅油二封闭流体中气层对体系 Bénard-Marangoni 对流临界稳定性及对流结构的影响, 得到了空气层厚度变化对液层稳定性影响不大的结论. 完成了二层流体热毛细对流及 Marangoni 对流动力学差异的比较, 发现覆盖液层的稳定性作用和对被覆盖层液层内部流动的抑制作用前者比后者更加显著. 在液滴迁移研究方面, 得到了迁移速度与液滴尺寸基本呈线性关系, 不同尺寸液滴无量纲加速过程基本一致的结论. 在微、低重力气/液两相流研究方面, 在空间站上完成了流型实验, 结果表明: 与地基实验中所确认的主要流型相近. 空间实验发现了液相低流速下存在一个新的环状流型区域.

### 3. “含有液体的多孔介质在强动载荷作用下的力学行为 —— 饱和砂土在冲击载荷作用下的破坏和流动”项目

在两种砂柱 (圆柱形和扁盒形) 的落体冲击实验中进一步肯定了冲击后期发生了非均匀的变形和流动现象; 在砂柱底部加压的定常渗流驱动实验中, 也观察到砂柱中的液化及与之相关的非均匀变形和流动现象; 采用两相连续介质模型, 饱和砂土液化后的一维定常运动在小扰动作用下是不稳定的. 然而, 在砂土颗粒粒径级配比较均匀的实验中, 受冲击的饱和砂土并不产生水平断裂. 通过实验研究, 得到了饱和砂土在往复载荷下一维应变的应力应变关系; 提出了一个饱和砂土在垂向往复载

荷下的动力学模型。

#### 4. “高能束流表面加工与处理的超常热物理问题”项目

在激光和电子束表面处理方面, 激光熔池存在热传导型向深熔型转变的特性, 给出了临界功率密度和作用时间; 铁基多元合金结晶相选择实验表明, 随凝固速度提高, 领先相会从渗碳体转变为奥氏体; 控制非平衡奥氏体相在后续热处理中的转变过程, 可以得到弥散细小的碳化物, 从而进一步提高强韧化效果。以上结果已在产业界得到应用。对钢材进行电子束表面局部热处理和熔凝处理, 初步分析了改性效果。在高能束深熔焊接方面, 分析了激光焊熔池形貌特征及工艺参数的影响, 建立了量热装置并得到热效率和熔化效率数据; 用光谱技术, 获得了光致等离子体激发温度、电子密度数据; 分析了电子束深穿透熔池的传质规律; 建立了相关装置, 获得了动态电弧的光谱辐射数据; 揭示了等离子弧光谱线辐射强度随小孔形成与闭合变化的规律; 对变物性非正常热传导找到了一新的解析解法, 简化了深穿焊物理模型。在等离子表面加工方面, 对电弧等离子发生器、电弧和等离子射流特性进行了研究, 给出了亚声速-超声速流动与传热、射流的平衡与非平衡流动、外磁场对射流的影响的一些结果; 证明了双温度等离子 Saha 方程是错误的, 并找出其错误所在; 研制了新型电弧等离子发生器并产生出了稳定性好的常压层流等离子体射流; 建立了可控热物理参数的电弧等离子材料表面加工与处理实验装置。

#### 5. “干旱环境治理的动力学过程研究”项目

在野外观测与考察方面, 开展了林地开垦环境演变影响下土壤侵蚀过程的动态监测; 考察了甘肃地区水土保持和生态环境治理情况, 就侵蚀环境治理与防灾减灾等问题提出见解; 在沙坡头沙漠研究实验站选择不同的植物固沙区进行了气候观测。在实验室实验研究方面, 建立了简化水槽实验模型, 对坡面薄层水流的运动特性进行了研究, 重点观测了流速分布; 对坡面土壤侵蚀过程及暴雨产流过程进行了初步试验。在理论研究方面, 分析了坡度对坡面流水深、速度以及坡面流侵蚀力和土壤稳定性的影响, 解释了诸环境因素对土壤侵蚀影响的机理, 表明土壤侵蚀的坡度界限不是常数, 而是与坡面粗糙度、径流长、土壤粒径、降雨强度、土壤入渗率差值等相关, 得到了它们之间的基本关系; 建立了坡面产流模式和数值计算模型, 得到野外及实验资料的验证, 对黄土高原坡面产流进行了初步数值模拟; 建立了坡面土壤侵蚀的数值预报模型, 对西北地区典型坡面土壤侵蚀进行了模拟, 得到了实

测资料的较好验证; 将自己发展的 TSF (transient structure function) 亚格子模式, 应用于非均匀下垫面大气边界层流动的大涡模拟研究, 获得了植被覆盖和裸土交缘地区的局地微气象参数。分析了风沙两相流的运动特性以及跃移层中沙粒相的速度分布, 为研究风蚀打下基础。

#### 6. “用于裂解制造乙烯的气动加热方法研究”项目

该项目的核心问题是在温度与速度适中的条件下, 高效实现原料气与燃料气的一定均匀程度的混合, 实现短暂的可控的激波加热以使乙烯产率达到期望值。项目在实施过程中, 发现反向射流混合加热较同向混合加热更具优势且技术要求更加简易。现已完成反向冷态模拟实验, 正在安装调试燃气发生器核心实验装置等。

#### 7. “空间生物生长器的新原理新方法研究”项目

从鱼类鳃呼吸气血交换的生物力学原理出发, 提出了逆流透析式空间细胞培养器设计方案, 优点是: 培养室内氧和营养的供应比较均匀; 培养室内流动剪应力水平较低, 对微重力环境及细胞代谢无显著影响; 在同样条件下, 流动阻力为中空纤维培养器的千分之一到百分之一之间, 因而功耗低; 考虑到空间细胞培养系统中不允许有气/液自由界面, 发展了微重力气/液换热器、透析器等, 形成了一个闭环系统; 完成了原理分析、系统研制、数值模拟, 进行了地基培养实验。

#### 8. “超短脉冲载荷作用下断裂过程区的动态演化”项目

对 PMMA 材料进行了超短脉冲实验研究, 发现断口表面所出现的“准抛物线记号”存在临界速度, 其值可通过超声波断口图确定, 而且与试件的尺寸有关; 通过量纲分析, 建立了该临界速度与试件尺度之间的标度关系; 建立了高速破坏时断裂表面形态与主裂纹速度间的直接联系; 讨论了裂纹在起始和传播过程中所形成的“暗区”以及不共面裂纹和主裂纹速度之间的关系。

#### 9. “细观随机连续介质力学的涨落及其宏观力学效应研究”项目

针对 1998 年建立的细观对偶团簇模型作了进一步发展, 建立了适用于纤维增强复合材料的二维细观对偶团簇模型, 表明: 与三维体模量一样, 平面体模量也无尺度效应; 对于平面应变模型 (长纤维), 剪切模量的尺度效应与三维模型平面相当; 对于平面应力模型 (穿透短纤维) 可不考虑非均匀介质的尺度效应对模量的影响。提出了一种细观非局部本构理论, 其中模量为应变梯度的函数, 可由细观对

偶团簇模型得到,它相当于一种非线性本构关系,与唯象非局部本构理论相比,不需引入高阶应力项和相应的高阶模量,这样可在经典连续介质力学的理论框架内计及尺度效应,同时保持传统的计算方法不变,从而避免了理论上的繁琐且又使理论具有物理基础.对实际复合材料中的任意团聚情况,引入了一种表征细观成份涨落的统计方法,并应用等

效基体的方法,获得了一种广义的细观对偶团簇模型.与经典的细观力学模型相比,它不仅考虑了增强相的总的体积含量,而且计及了其在细观空间中的涨落,从而成功地解释了为什么在高体积含量时经典细观力学模型预报的剪切模量较实验值低,因为此时团聚效应显著.

## 破坏力学教育部重点实验室 1999 年研究工作若干进展

方岱宁 杨卫 黄克智

清华大学工程力学系,北京 100084

在 1999 年度,破坏力学教育部重点实验室(FML)承担科研项目 58 项,到位科研经费 301.21 万元,出版教材与学术专著 3 部,在国际学术期刊上发表论文 39 篇,在国内期刊上发表论文 83 篇,在国际会议上发表论文 46 篇,在国内会议上发表论文 10 篇,其中被 SCI 收录的论文有 33 篇.获得清华大学梅贻琦学术论文二等奖一项,获得莫比斯国际光盘评奖中国赛区“中国杯”奖三项.实验室在 1999 年度获得教育部批准的访问学者 5 人(其中国外学者 1 人).1999 年在教育部没有投入实验室开放课题基金的情况下,实验室克服困难自筹开放课题经费,批准实施的 1999 年度开放研究项目 6 项.1999 年 FML 成员出国参加国际学术会议 15 人次,出国从事合作研究和短期讲学 11 人次,接待国际学者讲学与从事科研合作工作 10 人次.

下面仅列举七方面的研究进展(限于篇幅,这里没有收入 FML 在纳米云纹法、航天结构分析、宏细观平均的 IDD 方法等方面的进展).

### 1 压 / 铁电陶瓷的本构变形、电致断裂与电疲劳失效

#### 1.1 铁电陶瓷本构关系理论<sup>[1]</sup>

着眼于电畴的整体分布,提出了一种基于铁电材料内部电畴分布的宏细观相结合的本构理论.利用无限大压电介质中含一椭球夹杂的解和将细观力学中的 Mori-Tanaka 平均场理论推广到压电介质中,给出了有限大压电介质中考虑夹杂的相互作用时夹杂内部的力电耦合场.采用细观力学的方法得出了本构单元的 Gibbs 自由能,取向分布函数

的 Fourier 系数被视为反映电畴反转过程中的内变量.所获得的取向分布函数的演化方程以及增量型的力电耦合本构关系能描述在力电加载条件下铁电陶瓷宏观本构特性的改变.理论预测和实验结果符合较好.

着眼于每个电畴的反转形式,提出了基于铁电陶瓷电畴类型变化的本构理论.取得以下创新成果:(1)根据钙钛矿类型铁电材料的特点,对应于每个电畴的固定局部坐标系中引入六种电畴类型,从而可以简单地通过电畴类型的变化反映电畴的 90° 和 180° 反转情况.分析了电畴 90° 和 180° 反转过程中能量耗散的不同,提出了形式统一的电畴 90° 和 180° 反转的能量准则.(2)导出了自发极化强度,自发应变等微观量与剩余极化强度和残余应变等宏观量的确定关系.为通过观测的宏观量直接计算出不易观测的微观量提供了一种方法.给出了与加载历史有关的全量形式的力电耦合本构关系.对铁电陶瓷本构行为的计算结果表明该理论与实验结果符合较好.

#### 1.2 电致疲劳的理论及实验研究<sup>[2~4]</sup>

观测了循环电场低于矫顽电场加载时,电致疲劳裂纹扩展的规律;首次阐明了电致疲劳裂纹扩展的机理.不同于 Cao 和 Evans 的实验报道(矫顽电场以下,裂纹不发生扩展),通过长焦距显微镜实时观测了循环电场的幅值低于矫顽电场时,铁电陶瓷中疲劳裂纹扩展的规律.在实验基础上,理论分析了铁电畴在交变电场作用下循环翻转而产生循环应力,以及由循环应力驱动裂纹以起裂、扩展、