

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^[1]

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^[2~4]

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、

止裂、再起裂的模式循环向前扩展的过程。定量给出了电致疲劳裂纹扩展量与电场翻转次数的理论预测值,并与实验观测结果吻合较好。

1.3 压电材料的损伤与断裂^[5,6]

合作研究求得了含空洞损伤的热压电效应的应力场,获得了异质界面可动裂纹的动态应力强度因子,以及Ⅲ型共线裂纹在力电动态冲击下的瞬态响应。利用积分变换与奇异积分方程技术首次获得 I 型问题的力-电冲击下的动态响应。用波函数展开法处理了局部脱胶的柱状压电夹杂对入射的 SH 波的散射问题,求得近场解与远场解。计算表明:两类材料组合的近场解存在低 ν 共振现象。远场解表明,对于压电 1、压电 2 两种材料的组合,在高频带频繁出现大峰值的主宰散射能流的次振峰。这些结果对于此类材料的无损检测具有实际的意义。

1.4 电致断裂的裂纹偏折^[7]

求解了铁电陶瓷中偏折裂纹的问题,讨论了电场对裂纹偏折的影响。基于线性压电本构,将偏折裂纹等效为连续分布的位错和电偶极子,采用推广的 Stroh 方法,建立了以位错密度和电偶极子为未知量的奇异积分方程组。数值计算结果表明:(1)在垂直拉应力和垂直正电场作用下,裂纹不发生偏折,沿直线扩展;(2)在混合型机械载荷作用下,垂直正电场将增加裂纹偏折角度;(3)沿水平侧向施加的正电场和水平拉应力促进裂纹偏折,而沿水平侧向施加的负电场和水平压应力抑制裂纹偏折。

2 计算力学与数值模拟

2.1 三维非均匀脆性材料弹性行为及破坏过程的数值模拟^[8]

采用格形化方法和统计技术建立了三维非均匀固体材料的有限元模型。在每个单元格中将材料按照均匀处理,在不同单元格中认为材料服从给定的非均匀随机分布。然后对非均匀脆性材料选用简单的本构关系与断裂准则,通过非平衡迭代技术对刚度矩阵进行不断修正,实现了非均匀脆性材料的弹性行为及破坏过程的数值模拟。在此基础上,通过数值计算研究了材料的非均匀分布和几何尺寸对材料宏观等效弹性性质、破坏过程的影响,并且给出了材料破坏全过程的载荷-位移曲线,以及在不同载荷阶段的三维损伤破坏的演化图。

2.2 巷道围岩中支护拓扑优化法^[9,10]

以巷道的柔顺性为目标函数,采用均匀化拓扑优化法,计算了在均质围岩中支护材料分布问题。结果表明:在一般应力状态下,支护材料分布与绝对值最大的主应力方向一致。为使优化的提法更自

然,以巷道收缩率观测中的扇形布置法为依据,提出一个巷道变形目标函数,讨论了在主动载荷和被动载荷下,支护材料分布问题。软巷道的底臃或帮臃,是巷道支护的一个难题。在控制底臃或帮臃的目标函数下,计算了控制底臃或帮臃的支护材料分布。计算表明在巷道角点附近加设加固带对防底帮臃有重要作用,其中部分结果被实践所证实。

2.3 新的冲击接触算法与基于并行有限元方法的汽车被动安全性研究^[11,12]

汽车碰撞过程是一个典型的大变形动态接触过程,冲击接触是汽车碰撞的本质。在使用有限元法进行汽车碰撞过程模拟时,一辆整车模型一般要包含 50000~100000 个单元,节点自由度一般为 250000~500000。又由于高速冲击问题本身具有很强的非线性,使得时间积分的步长必须很小(一般为 10^{-7} s~ 10^{-6} s 的量级,计算 0~20 ms 的响应需要数万个时间步)。因此,并行化计算的意义极大。在我们采用的全局搜索算法中,使用了计算机数据结构中的最新链接技术,将搜索运算量由目前的 $O(N \log 2N)$ 减少到 $O(N)$ 。另外,为了便于并行,将三维搜索转化为一维搜索进行,提高了并行效率。而在局部搜索算法中,引入了自由曲面造型技术,明显提高了搜索精度,而且解决了因线性单元间连接而出现的接触搜索死区问题。另外,由于不必再区分各种不同的接触状态,从而进一步提高了并行程度。新的冲击接触算法,已用于 33 万阶自由度的仿 SAAB 汽车模型的有限元计算。计算结果接近于 DYNA3D 的分析结果。

2.4 气体传输管道中的动态裂纹扩展^[13,14]

采用节点力释放技术和生成模式的动态断裂数值研究方法,分析了扩展裂纹尖端区域由于热-机械耦合作用而造成的温度升高,并进一步考虑了温度效应对气体管道轴向动态断裂的影响。分析结果表明,当裂纹扩展速度为 600 m/s 时,裂尖区域温度升高达 90°C 以上,并导致能量释放率有明显的下降,降幅达 12%。因此,在分析气体传输管道轴向断裂扩展时不能忽略裂尖区域温度升高对动态断裂行为的影响。这说明如果不考虑裂尖温度效应,计算的能量释放率就会偏高,使分析偏于安全。

3 功能材料的实验研究

3.1 铁电材料力电耦合性能与变形实验研究^[15,16]

建立的测量铁电陶瓷与铁电复合材料的本构实验系统,主要解决了高电压的绝缘和脆性材料的单轴压缩实验难题,从而具备了同时对铁电材料施

加压应力场和电场的技术. 实验研究了铁电陶瓷的介电性能、压电特性、以及在不同压应力场情况下铁电陶瓷的电致应变效应. 发现当铁电陶瓷在逐渐增大的压应力场作用下, 其矫顽电场强度降低, 剩余极化降低, 电致应变的幅值即蝶形曲线的幅值也随着降低. 实验研究了 0-3 联铁电复合材料和 1-3 联铁电复合材料的介电性能、压电性能和本构行为. 发现基体材料介电弛豫导致 0-3 联铁电复合材料的介电弛豫, 基体材料 P-24、PVDF 的矫顽电场强度很高也导致了 0-3 联铁电复合材料的矫顽电场强度很高; 铁电相决定了 0-3 联铁电复合材料的压电特性. 对于 1-3 联铁电复合材料, 发现其介电性能、压电性能是由铁电相决定的.

3.2 形状记忆合金单相相变变形的实验研究^[17,18]

建立多轴复杂路径加载实验装置和技术. 建立力电耦合载荷下光、电、显微观测相结合的测试方法和技术. 获得形状记忆合金十字形试件双轴非比例复杂路径下的相变塑性和伪弹性变形结果; 获得马氏体正反相变及变体重取向的特征和相变体积分数的关系. 完成理论计算和试验结果的比较. 用长焦显微技术获得单晶试件的不同单轴拉伸方向对相变变形行为的影响和相变带在加卸载过程中的演化形貌. 根据晶体学理论、材料相变理论和宏观本构理论, 完成理论计算和试验结果的比较.

4 应变梯度塑性理论^[19~22]

近年的实验研究结果表明, 在微米尺度下金属材料的硬化曲线随着非均匀塑性变形的尺度减小而升高, 因此传统的塑性理论不能用于微米尺度, 因为在传统的塑性本构关系中不含有表征材料性质的长度量纲参数. Fleck-Hutchinson 提出了两种考虑应变硬度效应的新的塑性理论, 即偶应力 (CS) 塑性理论与伸张梯度 (SG) 塑性理论. FML 的研究人员与客座人员利用这两种理论较系统地分析了带裂纹材料的尖端附近局部或全场应力应变状态, 并参与提出了新的基于位错机制的应变梯度 (MSG) 塑性理论, 可以精确预言微压痕的实验结果, 同时还建立了大变形情况下的应变梯度塑性理论.

讨论了承剪的双层厚壁圆柱界面的应力状态. 发现在界面附近, 剪应力和偶应力存在边界层型的解. 由于异质界面上的转角不协调, 破坏往往在界面附近发生. 提出了考虑应变梯度的平均转动破坏准则. 研究了双晶界面考虑晶体塑性的偶应力边界层. 求得了屈曲驱动分层的新解. 研究了功能梯度材料的残余应力.

5 材料的不稳定性

5.1 蒸发 - 沉积机制下三维界面演化的有限元模拟^[23]

在物质迁移的经典理论及其弱解描述的基础上, 将该理论框架的数值方法延伸到三维几何构型, 发展了可描述线性蒸发 - 沉积速率过程和形貌演化的有限元方法. 整个界面系统的自由能由块体相化学势能差、界面能、三晶交线能组成. 数值计算模型的建立包括下述内容: 界面物质迁移弱解格式的提出, 物质迁移场的离散化, 蒸发 - 沉积速率过程描述, 三交线和四交点的可动性描述, 表面和界面能各向异性, 形貌变分的驱动力计算, 离散动力系统的生成与求解, 等等. 将这一新的数值计算方法应用于两类材料微结构演化问题: (1) 单晶材料的晶粒长大计算和晶面形成, 以及在不同初始表面形貌下演化路径的分叉; (2) 沉积在基底上的双晶薄膜和三晶薄膜的界面和表面的微观演化, 以及在多种速率过程下的薄膜形貌选择.

5.2 电迁移下表面导线的损伤^[24]

试验和数值模拟. 研究在强电场作用下由电迁移导致的内导线损伤 (凸起和沉陷) 的发生、发展和稳定过程. 试验研究表明晶界扩散引起的凸起失稳生长可分成四个阶段: 孕育生长期、突发生长期、减速生长期和最终稳定期. 提出的分析模型能够有效地揭示试验发生现象的内在机制, 可以处理包括流入晶粒的起伏变化的质量流、通过表面层和缺陷层的质量流的分流、质量塞积导致的压力和沿着晶界的滑移阻尼等问题. 发展了兼具统计和分析特征的新的数值模拟方法, 数值模拟结果得以解释试验现象. 该方法能够预测晶粒凸起的孕育时间和凸起高度, 并揭示出晶粒凸起的孕育时间与晶粒尺寸的平方成正比, 而凸起高度与晶粒尺寸的平方近似成反比等规律. 为抑制多晶导线的电迁移损伤, 在薄膜内导线的设计中需要保证该导线的凸起孕育时间长于内导线的服役时间, 在制造工艺中应该保证生成大而均匀的多晶晶粒, 且应尽量减少晶界扩散系数的变化.

6 复合材料力学

6.1 聚合物基铁电复合材料本构关系研究^[25~27]

得到了铁电夹杂内的约束电 - 弹性场的封闭形式解. 从而为建立考虑夹杂之间相互作用和组分材料性能影响的畴变准则奠定基础. 系统地研究了铁电复合材料的线性性质. 得到了压电复合材料有效压电模量的封闭形式解. 建立了考虑铁电夹杂间相互作用和组分材料性能影响的畴变准则. 以微观

力学方法构造了铁电复合材料本构构元的能量,并以此建立了基于铁电畴变和铁弹畴变的铁电复合材料本构关系. 与实验结果比较表明,此本构关系可以很好地分析铁电复合材料的极化问题与非线性力电耦合问题. 建立了考虑基体粘弹性效应和介电弛豫性质以及铁电夹杂之间相互作用的畴变准则. 得到了考虑基体粘弹性效应和介电弛豫性质的铁电复合材料本构关系. 理论值与实验结果比较表明,此本构关系可以描述此类铁电复合材料的力电行为.

6.2 金属基复合材料的多重损伤分析^[28]

金属基复合材料 (MMC) 具有多种损伤机制, 这些损伤机制同材料的细观结构密切相关. FML 在细观力学层面上, 对 MMC 的损伤机理及交互作用进行了研究. 建立了以改进的内聚力模型为基础的界面单元, 模拟增强相基体之间界面的损伤及脱粘. 在有限变形的超弹性、粘塑性本构框架下实现了 GURSON-TVERGAARD 损伤模型的有限元格式, 描述以微孔洞形核、长大、聚合为特征的韧性基体的损伤. 提出了采用数值计算与宏观试验相对比确定材料细观损伤参数的策略. 在以上的损伤模型基础上, 研究了 MMC 中界面、基体和增强相的损伤演化规律以及它们之间的相互作用效应. 分析了诸如界面强韧性、增强相体分数、增强相形状等材料细观参数与 MMC 损伤模式之间的内在联系, 进而从细观结构上解释了材料宏观的力学行为. 同时还研究了加工冷却及热循环荷载过程中产生的热失配应力和初始损伤, 分析了它们对材料后继力学性质的影响, 提出了一个表征界面抵抗热失配损伤的能力的无量纲参量.

7 材料的热机械疲劳与接触疲劳

7.1 高温合金材料热机械疲劳的力学性能和损伤机制的研究^[29,30]

探讨了温度变化对应力循环的影响, 蠕变和疲劳间的相互作用, 建立热机械疲劳损伤和寿命预测模型. 在实验研究上, 对航空发动机材料的热机械疲劳 - 蠕变性能进行宏观实验和微观结构损伤分析, 分析疲劳和蠕变的不同损伤机制. 对热机械疲劳过程进行计算机模拟, 建立了数值计算模型.

7.2 接触力学的工程应用^[31,32]

进行了多层壳体的接触预紧松弛问题的研究, 分析弹塑性材料和非线性弹性材料间在惯性力作用下的接触应力变化规律. 进行了滚动接触疲劳研究, 分析了速度对接触应力的影响, 多裂纹体在滚动接触疲劳中的应力场分布特征. 在研究混合应

力场作用下材料疲劳特性方面, 探讨了在斜向载荷作用下, 疲劳裂纹的萌生和偏折特性, 研究了载荷偏转角和裂纹偏折角之间的关系, 研究了偏折裂纹在 I 型和 II 型混合应力场的特征.

参 考 文 献

- 1 Lu W, Fang Dai-Ning, Hwang K C. Nonlinear electric-mechanical behavior and micromechanics modeling of ferroelectric domain evolution. *Acta Mater*, 1999, 47(10): 2913~2926
- 2 Zhu T, Yang W. Fatigue crack growth in ferroelectrics under alternating electric loading. *J Mech Phys Solids*, 1999, 47: 81~97
- 3 Fang F, Yang W, Zhu Ting. Crack tip 90° switching in tetragonal lanthanum-modified lead zirconia titanate under an electric field. *Journal of Materials Research*, 1999, 14(7): 2940~2944
- 4 Zhu T, Fang F, Yang W. Fatigue crack growth in ferroelectric ceramics below coercive field. *Journal of Materials Science Letters*, 1999, 18: 1025~1027
- 5 Chen Z T, Yu S W. Transient response of a piezoelectric ceramic with two-coplanar cracks under electro-mechanical impact. *Acta Mechanica Sinica*, 1999, 15(4): 325~333
- 6 Chen Z T, Yu S W. Anti-plane crack moving along the interface of dissimilar piezoelectric materials. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 1999, 12(1)
- 7 Zhu T, Yang W. Kink crack growth in ferroelectrics. *Int J Solids & Structures*, 1999, 36(33): 5013~5027
- 8 陈永强, 郑小平, 姚振汉. 三维非均匀脆性材料弹性行为及破坏过程的数值模拟, 1999, in press
- 9 Yin L, Yang W. Tunnel reinforcement via topology optimization. *Inter J for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2000, 24: 201~213
- 10 殷露中, 杨卫. 拓扑优化方法防治底、帮鼓. *煤炭学报*, 1999, 24(5): 477~480
- 11 程建钢, 任革学, 姚振汉, 郑兆昌. 时变结构动力响应分析的粗粒度并行算法. *清华大学学报 (自然科学版)*, 1999, 39(4): 10~12
- 12 寇哲君, 程建钢, 黄文彬, 姚振汉. 结构动力分析显隐式混合积分并行算法及实现. *清华大学学报 (自然科学版)*, 1999, 39(4): 21~24
- 13 O'Donoghue P E, Zhuang Z. A finite element model for crack arrestor design in gas pipelines. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1999, 22(1)
- 14 Zhuang Z, Guo Yongjin. The analysis for dynamic fracture mechanism in pipelines. *Engineering Fracture Mechanics*, 1999, 62(12)
- 15 Fang D N, Li C Q. Nonlinear electric-mechanical behavior of a soft PZT-51 ferroelectric ceramic. *Journal of Materials Science*, 1999, 34: 4001~4010
- 16 Jiang Bing, Fang Dai-Ning, Hwang Keh-Chih. The constitutive model of ferroelectric composites with a viscoelastic and dielectric relaxation matrix. Part

- II: experiments, calculation and analysis. *Science in China*, Series A, 1999, 42(12): 1193~1200
- 17 Fang Dai-Ning, Lu W, Inoue T, Yan W Y, Hwang K C. Stress-strain relation of CuAlNi SMA single crystal under biaxial loading—constitutive model and experiments. *Acta Mater*, 1999, 47(10): 2913~2926
- 18 Fang Dai-Ning, Lu W, Hwang K C. Pseudoelastic behavior of CuAlNi single crystal under uniaxial loading. *Metall Mater Transaction A*, 1999, 30A(8): 1933~1943
- 19 黄克智, 邱信明, 姜汉卿. 应变梯度理论的新进展(一) 偶应力理论和 SG 理论. *机械强度*, 1999, 21: 81~87
- 20 黄克智, 邱信明, 姜汉卿. 应变梯度理论的新进展(二) 基于细观机制的 MSG 应变梯度塑性理论. *机械强度*, 1999, 21: 161~165
- 21 Yu S W, Wang G F. On the strain jump in shape memory alloys—a crystallographic-based mechanics analysis. *Euromech 402# Proc. Seeheim, Germany*, 1999. 89~90
- 22 Wang G F, Yu S W. The boundary layer solutions of the interface problem considering the strain gradient. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 1999, 12(3)
- 23 Huang J, Yang W. Three dimensional evolution of interfaces under evaporation-condensation kinetics: a finite element simulation, element simulation. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 1999, 7: 87~105
- 24 Huang J, Yang W. Interconnect damage by electromigration: Experiment and numerical simulation. *Acta Mater*, 1999, 47: 89~99
- 25 Jiang Bing, Fang Dai-Ning, Hwang Keh-Chih. A unified model for piezocomposites with non-piezoelectric matrix and piezoelectric ellipsoidal inclusions. *Inter J of Solids & Structures*, 1999, 36(18): 2707~2733
- 26 Jiang Bing, Fang Dai-Ning, Hwang Keh-Chih. The constitutive model of ferroelectric composites with a viscoelastic and dielectric relaxation matrix. Part I: theory. *Science in China*, Series A, 1999, 42(11): 1193~1200
- 27 Jiang Bing, Fang Dai-Ning. The effective properties of piezoelectric composite materials with transversely isotropic spherical inclusions. *Applied Mathematics and Mechanics*, 1999, 20(4): 371~380
- 28 周储伟, 杨卫, 方岱宁. 内聚力界面单元与复合材料的界面损伤分析. *力学学报*, 1999, 31(3): 372~377
- 29 Shi H J, Liu S L. Low cycle fatigue and fatigue-creep behavior of a high temperature alloy on notched specimens. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 1999, 12(1): 37~42
- 30 施惠基, Korn C. 铝合金在高温热机械应力循环下的疲劳性能. *航空材料学报*, 1999, 19(2): 13~19
- 31 Shi H J, Niu L S. Mixed mode fatigue behavior under inclined loading conditions for an austenitic 304L steel. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1999, 40(2): 153~158
- 32 施惠基, 马俊昆, 卿新林. 环形含钝缺口试件在斜加载作用下弹塑性场的分布特征. *应用力学学报*, 1999, 16(2): 54~60

生物力学与组织工程实验室研究工作进展

徐世荣 龙勉 蔡绍哲

重庆大学生物工程学院, 生物力学与组织工程教育部重点实验室, 重庆 400044

生物力学与组织工程教育部重点实验室挂靠重庆大学, 是专门从事生物力学与组织工程研究的开放性实验室。近 2 年, 实验室以组织工程研究为主线, 以细胞力学、分子动力学、生物材料、体液流变学、组织 / 器官力学、生物医学仪器各研究方向为基础, 以国家自然科学基金重点项目“应力-生长关系及其应用”和教育部“211 工程”生物力学及组织工程重点学科建设为龙头, 在相关领域研究工作中取得了一定的新进展。

1 体液流变学及其应用研究

近年的工作重点是: 深化血液流变学的研究,

完善和改进血液流变检测仪; 以心脑血管疾病为对象, 以药物流变学为重要研究内容, 开发药物治疗机理与疗效的流变学评价方法体系。主要进展有:

(1) 血流动力学和微循环流变学。首先在理论上较全面地研究了粘弹血管的入口流动问题^[1,2], 推导出了适用于粘弹血管的入口流动公式及一些重要结论; 其次, 研究了烧伤病人血容量变化问题^[3], 我们将“血容量”区分为微循环血容量、大血管血容量和总血容量, 提出了临床血容量变化定量考察的更准确的公式, 在临床应用中得到验证。第三, 研究了脾脏的血流动力学问题^[4,5]。研究发现脾动脉血流量增加时, 脾的体积增大、脾内血球压