

移实时测量系统,并在重庆重点区域得到应用.对茅坪滑坡进行一个水文年的现场监测;用于等离子体裂解危险废弃物的150kW交流等离子体弧裂解炉主要部件已经加工完毕,待安装调试,研制成功30kW直流等离子体弧裂解炉,并开展了交流等离子体炬的研究.另外,在院创新研制改造项目的支持下,建成柔性边界加载三轴材料试验机.

目前,DES承担的国家重大院重大项目进展顺利.同时正在积极组织力量进行“三峡升船机”、“深海空间站”、“天然气水合物”的预研和争取立项,力争在国民经济中的关键问题上做出更大贡献.

### 3.5 技术发展研究部 (DTD)

2004年,DTD以创新课题组为主体,不断强化科研力量、拓展科研领域,在多个方面取得了明显的进展.所承担的院重大项目“集成化激光智能制造及柔性加工系统”项目通过科学院组织的验收和鉴定,专家组认为该项目研究成果整体达到了国际先进水平.“遥科学技术”课题组按“十五”发展目标,圆满完成了各项预定任务;所承担的4项国家863计划项目,均已按计划顺利完成或执行.“材料表面改性”课题组,除继续配合相关单位完成“大口径机枪延寿技术”十五军工预研项目外,在揭示镀层界面激光强韧化机理方面取得了重要进展,发现了激光作用促进钢基体表面镀铬的外延生长的机制.此外,DTD有关激光毛化、汽车检测线、超细粉体制备等方面的工作都产生了较好的经济效益.

## 4 发展思考

2004年,对于力学所来说,是思考和谋划未来发展的一年.根据新时期科学院研究所的定位,以及社会经济发展对于力学学科的重要需求,结合国内外学科发展态势及科技力量的布局,力学所将在如下方面进行探索和尝试,以充分发挥在国家创新体系中应有的作用和地位.

(1)进一步强化“国家需求”和“世界科学前沿”的双重牵引,加强力学所发展规划的深化论证和实施,带动科研工作的整体进展和重大项目的立项.

(2)加强研究所的学术气氛和研究力量的凝聚.探索重大项目的组织和管理思路的变革.进一步完善创新课题组的运行和考核机制,特别关注其成果产出、可持续发展能力、影响力、学术活跃程度等.

(3)坚持以人为本,以设立“郭永怀讲座访问教授”席位等措施,吸引国内外一流人才来力学所工作.同时加强人才培养基地的建设.保持研究生的生源质量、培养水平和规模的高速发展势头.

(4)以保密论证和质量体系论证为起点,提高承担重大任务的资质和管理水平.充分发挥学术委员会、学术顾问、职工代表大会方方面面的作用,以科学的决策程序,提高研究所的管理水平.

(5)通过“钱学森国家实验室”、“国际力学中心”等的筹建和运作,以新的体制和模式培育有重要显示度的成果和人才.

## 破坏力学教育部重点实验室研究工作进展

### 破坏力学教育部重点实验室

清华大学航天航空学院工程力学系,北京 100084

国家教委于1993年12月批准成立破坏力学开放研究实验室(Failure Mechanics Laboratory, FML),挂靠在清华大学工程力学系,1999年正式命名为破坏力学教育部重点实验室.自1994年以来,在教育部和清华大学的领导与支持下,作为重点学科固体力学中的骨干研究基地,FML在科研上承担了众多国家重点科技攻关项目、“973”和“863”项目以及国家自然科学基金重大、重点和面上项目,取得了多项国家和部委级的科技成果奖和人才奖,在科研和人才两方面取得了显著的成绩.FML对国内外科学工作者开放以及开放研究实验室建设也取得了显著的进展.在1998年教育部组织的重点实验室评估中被评为A;在2002年教育部组织对材料与工程领域的38个重点实验室评估中被评为第一名;在2003年科技部组织的工程与材料科学国家重点实验室评估中被评为B.FML承担的国家自然科学基金优秀创新群体项目“微/纳米尺度力学与智能材料的力学”在2004年结题评优,获得第2期资助.

2003~2004年度FML承担科研项目111项.其中有“973”国家重点基础研究发展规划项目;国家“863”计划项目;国家自然科学基金优秀创新群体项目;国家自然科学基金杰出青年基金项目;国家自然科学基金海外杰出青年基金

项目;国家自然科学基金面上项目;部、省级科研项目;国际合作项目;以及面对国民经济建设的横向课题项目.近两年到位科研经费共1480.36万元.杨卫教授当选为中国科学院院士和第三世界科学院院士,黄克智教授当选为俄罗斯科学院外籍院士.在2003~2004年获得国家自然科学基金二等奖一项、教育部提名国家自然科学奖一等奖两项、国高校自然科学二等奖一项、霍英东教育基金委第九届高等院校青年教师基金一等奖一项、全国优秀博士论文一篇、机械工业科技进步二等奖一项、美国机械工程师学会Melville奖一项、国家质量监督检验检疫总局“科技兴检”奖一等奖一项、中国工程物理研究院科学技术基金一等奖一项、北京市科技新星奖一项、北京青年科技奖提名奖一项.FML人员近两年出国参加国际会议50人次.接待国际学者讲学和从事合作科研工作58人次.在国外学术期刊上发表论文148篇,在国内期刊上发表论文129篇,在国际会议上发表论文92篇,在国内会议上发表论文53篇,其中SCI检索文章154篇,另外还出版教材与学术专著13部.

近两年来,FML在破坏过程的力学研究、微/纳米力学及应用、重要工程结构的失效力学、智能材料与结构的力学行为与多场耦合4个主要研究方向获得显著的研究进展,

主要研究成果体现在以下几个方面:

## 1 本构关系与破坏力学

### 1.1 张量函数表示理论与材料本构方程不变性研究

《张量函数表示理论与材料本构方程不变性研究》项目 2004 年获得国家自然科学基金二等奖(获奖人:郑泉水和黄克智)。

该项系统性成果为各向异性复杂力学性质研究打下了普遍适用的理性基础,具有深远影响。国际最具影响力的力学年鉴《应用力学评论》邀请郑泉水撰写并发表了以本项目成果为主的长篇综述,他还应邀作为力学界影响力最高的杂志 JMPs 的特邀主编发表了有关最新进展的专集一期。项目成果被 SCI 他引 200 多次,被广泛应用于建立复杂材料行为的本构模型,涉及各种天然、人工和生物材料的塑性、损伤、强度、失效、演化、优化等复杂行为。

### 1.2 复相材料的本构关系<sup>[1~8]</sup>

网络交织复合材料是一类具有特殊细观结构的新型材料,它可以不包含独立存在的颗粒状组相,各组分相在细观尺度上形成各自的三维空间连续网络结构,互相交织、缠绕在一起,从而在细观结构上没有传统意义上的夹杂与基体之分。我们从微观结构的连通度特点出发,发展了适用于不同连通度的一种细观力学胞元模型。这类模型不仅适用于传统的颗粒、纤维等离散夹杂增强复合材料,也适用于具有三维网络交织结构的复合材料。在预估网络交织复合材料方面的有效弹性模量方面,综合利用等应力假设、等应变假设以及 Mori-Tanaka 方法,非常简单地计算材料的有效弹性模量,同时利用有限元方法对所建立的理论模型进行验证。理论结果与有限元数值结果和实验数据相符得较好。其二,在此模型的基础上,冯西桥等计算了网络交织复合材料的有效弹塑性本构关系,并与有限元结果进行了对比。

在大体积分数比颗粒的金属基复合材料方面,我们提出了能够预测多种实验性能的宏观本构方程。我们还详尽地考察了多晶体的相形状和分布对宏观性能的影响。

### 1.3 超高速断裂研究<sup>[9~20]</sup>

郭高峰、杨卫、黄永刚最近在跨音速断裂的基本解<sup>[9]</sup>、变速解<sup>[10]</sup>取得新进展,并首次得到超音速断裂的连续介质解<sup>[11]</sup>,该解由随裂纹扩展的椭圆核和相邻的向后掠射的特征线解组成。该研究表明:实现超音速断裂的必要条件是:(1)上翘型应力应变曲线;(2)由于应变造成的能量存储;(3)存在弱面;(4)有足够大小的椭圆核尺度。该项工作在 2003 年 8 月在德国举行的动态断裂的研讨会上受到该领域著名学者 Rice, Abraham, Willis, Needleman 等人的好评。并在 2003 年 10 月在日本仙台举行的第 5 届国际断裂与强度大会上作为大会特邀报告,杨卫在该次会议上当选为亚太断裂学会主席。

黄永刚等用有限变形理论研究了高速断裂时剪切裂纹的开口,证明亚音速剪切裂纹具有有限开口,与分子动力学结果一致<sup>[12]</sup>;而跨音速剪切裂纹不能有有限大开口,亦与分子动力学结果一致<sup>[13]</sup>。黄永刚和高华键也用分子动力学<sup>[14]</sup>和“虚内键”方法<sup>[15,16]</sup>研究裂纹扩展,并发表综述文章<sup>[17]</sup>。

庄茁等<sup>[18~20]</sup>研究了宏观尺度高韧性高压气体管道动态裂纹止裂分析。根据小试件冲击断裂能量实验和有限元数

值模拟,提出 X70 至 X80 钢制管道的断裂韧度,和基于裂纹张开角的断裂准则,给出西气东输管线工程的可靠性评估。

### 1.4 脆性材料的细观损伤与断裂力学<sup>[21~23]</sup>

以往的脆性材料细观损伤力学理论存在 3 个难以解决的重要理论问题:(1)是复杂的微裂纹损伤演化过程的描述;(2)是难于应用到复杂加载的情形;(3)是难于完整描述可适用于强化和应力跌落及软化全过程的力学行为。冯西桥提出了微裂纹扩展区(domain of micro-crack growth, DMG)的概念,用以描述复杂的微裂纹损伤状态。利用这种新的损伤描述方法,在复杂加载过程中,损伤的演化可以借助于集合的运算方法进行计算,从而解决了脆性损伤演化的细观表征这一难题,这是区别于以往损伤模型的一种新思路。利用微裂纹扩展区的概念,建立了一套完整的、三维的细观损伤力学模型——微裂纹扩展区损伤模型。

## 2 微、纳米力学及应用

微、纳米力学取得系统进展和国际承认:在微、纳米力学方面的工作取得了系统性的进展。这些成果获得国内外专家的认可,其主要标志在于:(1)国际理论与应用力学联合会(IUTAM)任命杨卫担任其微纳米尺度力学工作委员会的主席,任命黄永刚为该工作委员会 4 名成员之一;(2)IUTAM 批准将在 2005 年在北京举行微纳米力学方面的 IUTAM 学术报告会,郑泉水为科学委员会成员之一;(3)Elsevier 出版社的工具书“结构完整性大全”在 2003 年出版,并获得当年世界工程教育学会的最佳工具书奖,而杨卫为其“界面与纳米尺度失效”卷<sup>[1]</sup>的主编之一,并对该领域进行了综述<sup>[24~28]</sup>; (4)黄永刚、高华键和黄克智一起获得美国机械工程师协会 2004 年 Melville 奖,奖励他们在碳纳米管断裂方面的突破性工作<sup>[29,30]</sup>。

### 2.1 超高频机械振荡器的理论与实验研究<sup>[31~33]</sup>

郑泉水等提出了多壁碳纳米管作为十亿机械振荡器(Zheng & Jiang, Phys. Rev. Lett., 2002)的构想和理论预测, Phys. Rev. Focus 立即做了焦点报道。随后国际上多个研究组进行了高强度的后续理论和实验研究。两年间由 Web of Science 摘引的引用论文有 37 篇,其中他引 33 篇、8 篇为 Phys Rev Lett 和 PNAS 上的论文。这些研究开辟了原子级光滑表面之间的相对运动时的能量耗散机理、摩擦、系统能量在不同模态之间转换等重要研究新领域。多壁碳纳米管振荡器成为这些研究的“Testing bed”。

首次发现<sup>[31,32]</sup>:轴向振荡能量可转换为转动等低频机械运动模态的能量;并发现这些低频机械运动模态的耦合,基本上是非耗散的;而耗散的本质,主要源于对各种高频声子模态的激发。在系统研究了各种能量转换和耗散的机理之后,提出了基本避免或大大降低耗散的三类方略<sup>[33]</sup>,这些对于今后的 NEMS 研究,可能具有指导性意义。此外,采用原子模型和分子动力学方法研究了双壁碳纳米管作为振荡器的滑移阻力和能量耗散,揭示了内外管的螺旋角是否共度,对能量耗散率有显著的影响,非共度双壁管可以实现长得多的振荡,从而有利于与现有的能量补给频率接轨<sup>[33]</sup>。

首次通过实验发现了块体晶体材料(高纯度石墨)可实现部分抽出,且具有自恢复现象,具有重要科学发现价值。用分子动力学方法,首次研究了碳纳米管振荡器的本征能量

耗散机理,提出了明显减低耗散的3个方略,这项工作可望对于 NEMS 的研究提供指导性设计思想。

## 2.2 纳米晶体的力学行为<sup>[34~36]</sup>

杨卫等最近在纳米晶体的变形机制上取得理论上的突破,提出了纳米晶体在插入-转动联合机制下的单轴<sup>[34]</sup>、平面应变和三维本构关系<sup>[35]</sup>,结果已经为固体力学领域影响因子最高的期刊 JIMPS 连续发表(2002~2004)。对经过表面纳米化材料的常温渗氮的机理研究也取得了显著的进展<sup>[36]</sup>。

为发展可适用于纳米晶体力学模拟的高效率并行算法,构建了从晶体生成、计算到显示的分子动力学(MD)模拟系统。MD 算法基于经典的对势和多体势上的 Verlet 算法,并行格式基于 Linked-Cell-List 方案,并针对特定的研究模型进行了各计算层次的优化,构建了交互式显示和控制子系统,可提供显示原子图像和属性的高质量图形输出。利用此模拟系统对纳米晶体进行了拉伸大变形和压痕模拟,结果表明:在高速加载率下,堆垛层错(偏位错)的进发、传播及其在晶界处的终止是纳米晶体变形的的主要机制。杨卫与学生还利用这一方法研究了纳米晶体在纳米压痕下的堆垛层错的进发和终止。研究了在高速多方向喷丸下的表面纳米化过程。其中一个重要步骤在于利用分子动力学研究位错群通过驰豫而形成纳米晶粒的过程。

## 2.3 微/纳米尺度效应<sup>[37~48]</sup>

黄克智等研究了含孔塑性介质的尺寸效应。把著名的 Rice 与 Tracey 关于无限大介质中单个孔的增长率公式和 Gurson 的含孔介质本构模型都推广到具有尺度效应的情况<sup>[37~39]</sup>,并用于计算单拉情况的剪切带问题<sup>[40,41]</sup>。

黄永刚与黄克智等建立了 MSG 塑性应变梯度流动增量理论<sup>[42]</sup>,并用大变形理论研究了扭转与裂纹尖端场<sup>[43]</sup>。证明当有几何必需位错存在时 J 积分不守恒<sup>[44]</sup>,把基于 Taylor 关系的非局部(TNT)塑性理论推广到有限变形情况<sup>[45]</sup>,建立了一个考虑塑性应变梯度效应的新的常规(CMSG)理论<sup>[46]</sup>,这个新的理论的特点是考虑了 Taylor 律而又不引进高阶应力,便于应用于工程实际,如断裂<sup>[47]</sup>和压痕问题<sup>[48]</sup>。黄永刚、高华键和黄克智建立了基于原子势的适用于纳米尺度的连续介质力学模型,该工作获得美国机械工程师协会 2004 年 Melville 奖,奖励他们在纳米尺度力学方面的突破性工作<sup>[29,30]</sup>。

## 2.4 生物和仿生材料的微纳米力学

破解生物体构造的奥秘,对于研制新型的“仿生材料”和“仿生机器”等,有着重大的科学意义。我们与中科院化学所合作,对水龟的奇妙力学特性进行了研究。测试了水龟单腿在手面的承载能力,发现水龟腿的表面具有大量微米尺寸的刚毛,且每个刚毛上又具有规则的、纳米特征尺寸的独特沟槽结构;根据该微/纳米双重特征结构,我们理论预测了水龟腿具有非常好的超疏水性,并得到了实验验证;表明该超疏水性是导致水龟承载力了水面各种运动特性的关键。

仿生学表明,贝壳、动物骨架等生物材料都是由蛋白质和矿物质组成的复合材料,矿物质和蛋白质是机械性能较差的材料,但是生物复合材料本身的强度、硬度和断裂韧性等性质却非常优良。FML 长江讲座教授高华键等的研究发现,生物材料的优良性能来源于在生物进化中形成的精巧的纳米结构;纳米尺度使矿物质和蛋白质的复合结构得到优

化,从而使这些生物材料获得了最优化的强度、韧性和稳定性。这一研究成果对于仿生学、材料科学以及相关工程学科都有非常大的指导意义。该结果发表在 2003 年 5 月 13 日出版的《美国科学院院刊》上<sup>[49]</sup>,并被选为该期的封面文章,《Max Planck Research》、《Nature Materials》等杂志都对这一结果给予了报道和高度评价。用高华键等提出的虚内键方法模拟了生物矿物晶体和生物纳米复合材料的断裂行为<sup>[50~52]</sup>,验证了理论预测和相关的实验结果。

## 2.5 碳纳米管力学<sup>[53~60]</sup>

一个在碳纳米管研究界长期争论的问题是:单壁碳纳米管作为圆柱薄壳,应该采用什么弹性参数和厚度?我们的研究<sup>[53]</sup>表明,直径 1 nm 以下的单壁碳纳米管作为圆柱薄壳,其弹性模量以及厚度都与直径相关,且并非各向同性。应用该超薄圆柱壳模型,我们<sup>[54]</sup>研究了单壁碳纳米管束作为块体材料的非线性弹性和材料相变性质,预报了较所有六方晶体材料具有更为极端弹性性质的新六方材料,论文发表在力学影响因子最高的 J Mech Phys Solids 上。文<sup>[55]</sup>表明弯曲起皱是解释一系列重要实验奇异现象的关键,论文发表在凝聚态物理引用因子最高的 Phys Rev B 上。揭示了水的毛细力可导致碳纳米管薄膜形成阵列,从而提出了一种新的阵列形成方法并得到了实验实现,论文发表在化学引用因子最高的 Angew Chem 上<sup>[56]</sup>。

冯西桥等对碳纳米管增强的复合材料进行了细观力学和纳米力学研究<sup>[57~60]</sup>。首先,提出了一种基于原子势的方法研究碳纳米管的变形和破坏问题,可以模拟孤立的或位于复合材料之中的碳纳米管的变形与破坏问题,分析了碳纳米管中缺陷的形核过程,以及碳纳米管的强度与直径、螺旋角之间的关系,结果与分子动力学模拟以及实验结果吻合得很好。其二,尽管碳纳米管复合材料,碳纳米管的强度和刚度 and 人们期望的结果有很大差距。对影响碳纳米管有效弹性性质的各种因素进行了详细的细观力学研究,包括界面效应、弯曲效应、团聚效应等,发现碳纳米管的弯曲和团聚对碳纳米管复合材料的影响十分明显,而界面对有效弹性模量的影响较小。关于碳纳米管的摩擦学研究揭示其特有的浮游接触现象和摩擦力与压力之间的反常关系<sup>[57]</sup>。

研究了单壁碳纳米管阵列的摩擦学行为:用分子动力学方法对平行堆叠的单壁碳纳米管之间的接触与摩擦过程进行了模拟和分析。展示了纳米管之间的悬浮和异常摩擦学现象,发现碳纳米管分子之间的范德华力是导致碳纳米管这些异常行为的主要原因。

## 2.6 弹塑性阶段下的加卸载条件下的粘着微接触力学<sup>[61~67]</sup>

采用双参数的结合力模型研究了弹塑性阶段下的加卸载条件下的粘着接触问题,并将该模型用于研究塑性阶段下以及考虑切向载荷的粘着接触问题。对于仅考虑 Amonton 摩擦力适用的情况,研究了粘着力对受切向力的接触体影响。利用 Gurson 模型研究了考虑孔洞型损伤情况下粘着塑性接触问题。考虑附着在无限大刚性基底上的薄膜与其表面上方刚性压头在范德华力相互作用下的失稳问题。用解析的方法计算了弹性薄膜在二维、三维情况下的接触失稳问题;并且利用 ABAQUS 软件建立了一种计算此类问题的有限元计算模型。对采用二维理论预测偏差较大的一些实验现象进行了

新的较为合理的解释。

通过有限元进行了薄膜的后屈曲计算,考虑了原来测量薄膜粘着强度的压痕法中所未涉及的一些因素,首次得到了双屈曲情况下的修正公式;指出材料的塑性对于其后屈曲行为有较大的影响。研究了压电材料的粘着接触问题,得到了外加电载荷对粘着接触行为的影响。结果表明:相对湿度及液桥体积对粘着力有重要影响,进而影响粘着区的应力应变分布。为微机械系统的接触与摩擦的设计理论提供力学基础理论的支持。

## 2.7 微 / 纳米实验力学的研究 [68~79]

提出了应用聚焦离子束 (FIB) 制作正交高频光栅的新工艺,成功地制作出 10000 line/mm 的光栅,解决了在 MEMS 上制作高频光栅的难题。研究了分子束外延法制作纳米光栅技术,将所制作纳米光栅应用于纳米尺度残余变形测量。首次提出了适用于微米 / 纳米尺度区域变形测量的相移聚焦离子束云纹技术、扫描隧道显微镜 (STM) 扫描云纹技术及相移技术,并应用于物体在微 / 纳米区域的变形测量。为了提高纳米云纹的测量精度,首次提出了 TEM 纳米云纹条纹倍增技术,应用 TEM 纳米云纹技术成功测量硅单晶 Si(111) 中具有位错、原子键裂、夹杂等特征区域的非均匀应变场。

提出了双视场电子散斑薄膜力学性能实时检测方法,建立了集薄膜单轴向微力与薄膜轴向微变形的一体化全场干涉测量系统,完成了序列厚度纯镍膜、氧化铝绝缘膜、金及金铬多层膜等的力学性能检测;基于 Linnik 显微几何构形,设计和建立了散斑微干涉微尺度对象动静态全场位移与变形检测系统,系统地完成了微干涉系统视场、景深和分辨率等性能研究,并实现了微悬臂试件及 Cu 和 NiFe 微桥的力学性能检测;提出了一种基于晶粒尺度的微尺度、微区域变形分析技术——晶粒运动与变形分析技术 (CGDMA),并将其应用于多晶体微区域非均匀变形检测。该技术使得变形检测直接和检测对象的微观结构及其演化联系起来;研制和开发了多套适用于薄膜和微尺度对象检测的加载、标定系统与传感器件。

发展了相干梯度敏感 (CGS) 光学干涉技术,包括测试原理、理论研究、测试技术等,用于聚合物、纳米复合材料、功能梯度材料的断裂研究。

## 3 智能材料与结构的力学行为与多场耦合

FML 在铁电材料的本构关系与断裂行为方面的研究取得系统进展,其中在智能材料的本构关系与断裂方面相关的研究工作获得 2002 年教育部提名国家科学技术奖一等奖 (获奖人杨卫、方岱宁等)。

由杨卫、方菲、方岱宁所著长篇综述“铁电材料的失效”<sup>[80]</sup> 在 Elsevier 的“结构完整性大全”上发表。鉴于 FML 在智能材料和智能结构方面的突出研究成果,国际理论与应用力学联合会 (IUTAM) 于 2004 年 9 月 1 日 ~ 3 日在清华大学召开 IUTAM 学术研讨会“智能材料的力学与可靠性”,由 FML 的杨卫教授担任研讨会主席。关于铁电、铁磁材料的本构关系和力 - 电 / 力 - 磁失效的新进展见文献 [80 ~ 122]。

### 3.1 铁电材料的本构关系与断裂行为研究 [81~99]

方岱宁等建立了一个新的断裂参量——电致断裂

COD, 并建立了一个新的 COD 电致断裂判据。在国际上首次完成了中心裂纹板试件在力 - 电耦合载荷下的断裂实验,获得了断裂载荷与力 - 电耦合载荷之间的实验数据。实验结果表明该新判据能够很好地描述电场对断裂载荷的影响<sup>[81]</sup>。该成果的论文已发表在国际力学期刊 *Mechanics of Materials* 上。完成了铁电陶瓷的单边自然穿透裂纹的电疲劳裂纹扩展的实验,量测了电致疲劳的电场幅度门槛值和电致裂纹扩展速率等,揭示了两类不同的电致疲劳裂纹扩展机理和疲劳裂纹闭合效应等一些新的电疲劳损伤现象。在国际上首次提出了电致疲劳裂纹扩展速率公式,这方面的实验结果国际上未见他人报道。该成果的论文已被国际上最好的陶瓷学术期刊 *J Am Ceram Soc* 发表<sup>[82]</sup>。建立了一个新的畴变判据,与已经存在的判据进行了对比,发现该判据,能够比其它判据更好地描述实验结果,正在将该判据应用到有限元程序分析和电致疲劳裂纹扩展的分析中去<sup>[83]</sup>。

### 3.2 磁致断裂的小范围畴变理论模型研究 [100~103]

在获得了软铁磁材料的裂纹问题的理论解的基础上,研究磁场对软磁材料的断裂问题。按照磁场对材料表现断裂韧性的影响,软磁材料一般可以分为两类,即大感应磁致伸缩系数材料和小感应磁致伸缩系数材料。磁场对这两类材料的表现断裂韧性的作用不同。在工程计算中,可以按照材料的感应磁致伸缩系数划分和判断。磁场对小感应磁致伸缩系数材料的表现断裂韧性几乎没有影响,从而解释了我们关于锰锌铁氧体磁致断裂实验结果以及文献中关于软磁钢的实验结果<sup>[100]</sup>。获得了软铁磁体中心裂纹问题的非线性分析及线性模型下对不同磁弹性理论和各向异性问题的求解,从而能够解释线形理论得到的裂尖应力强度因子随磁场变化出现奇异的现象,获得磁力耦合裂纹问题裂面应力边界条件和磁场连续性条件的表达式<sup>[101,102]</sup>。在线性磁化关系分析的基础上,采用小范围理想饱和磁化模型,构造了细长椭圆裂纹尖端的磁饱和区域,求解了饱和区域的磁场分布和应力场分布。分析细长椭圆裂纹尖端延长线上的应力场,解释了我们所测量的磁场作用下锰锌铁氧体陶瓷的断裂载荷的实验结果和文献中关于磁场下软铁磁钢的断裂韧性的实验结果。该成果的论文已发表在国际著名的力学期刊 *Inter J Solids and Struc* 上<sup>[103]</sup>。

### 3.3 铁磁材料的本构关系 [104~106]

实验测量获得了锰锌铁氧体陶瓷试件和稀土铁系超磁致伸缩材料在力磁耦合载荷下的实验曲线。根据实验结果,在国际上首次提出了一个基于畴变密度的唯象非线性本构关系,所提出的基于畴变密度的本构模型能反映磁致伸缩材料的全部 3 个特征,即中低磁场的非线性,高磁场的饱和性以及对应力的敏感性,因而能较好地模拟材料的磁弹性响应曲线<sup>[104]</sup>。对于磁致伸缩复合材料,将夹杂相的磁致伸缩应变作为本征应变,利用双夹杂模型,将力磁耦合场解耦,得到磁致伸缩复合材料的有效弹性模量和有效饱和磁致伸缩。该模型数学表达简洁、完整,应用方便<sup>[105]</sup>。基于磁畴非连续旋转模型,提出了磁畴翻转模型。由 Gibbs 自由能作为磁畴翻转的判据,模型中使用的微观参数全部直接由实验给出。本模型物理意义清晰,不仅能够预测不同应力状态下的磁滞回线和磁致伸缩回线,而且成功的描述了实验中的发现的“扭曲”现象。目前其他的模型,是不能够模拟这些力磁耦合行

为的。类比于经典塑性理论中的 J2 流动理论, 将剩余磁化强度和剩余应变作为内变量, 引入力磁耦合屈服面, 提出各向同性唯象本构模型 I. 在此基础上进一步假设剩余应变和剩余磁化强度之间的关系, 并通过 Legendre 变换, 得到仅以剩余磁化强度作为内变量的唯象本构模型 II, 该模型的参数均可通过实验获得. 将这两个模型分别与 Ni6 的实验数据对比, 理论值较好的符合实验数据<sup>[106]</sup>.

### 3.4 研制出了国内首台多轴多功能力磁耦合设备与铁磁

#### 功能材料的实验研究<sup>[104,105,107,108]</sup>

FML 自行设计并研制出了国内首台多轴多功能力磁耦合设备, 不仅可以进行多轴本构力磁耦合实验, 还可以进行力磁耦合断裂实验, 通过软件自动控制了测量过程, 并实现数据的自动采集与处理. 分别对金属软磁材料 Ni6 和电解镍, 超磁致伸缩材料<sup>[110]</sup> 方向定向生长的 TbDyFe 合金 (Terfenol-D) 多晶体, 以及铁磁相变材料——NiMnGa, 进行了全面的力磁耦合实验, 得到不同应力状态下磁滞回线, 磁致伸缩曲线, 不同磁场强度下应力应变曲线等特征曲线. 以上 3 种材料的力磁耦合行为都是由于应力作用下磁畴状态的改变引起的. 实验中, 获得了以前未有报道的数据, 主要有: 完成了拉压两种应力状态对 Ni6 磁性性质的影响; 高应力高磁场状态下超磁致伸缩材料 Terfenol-D 的力磁耦合行为; 以及 Terfenol-D 的铁弹性与应力退磁化现象; 掺 Fe 对 NiMnGa 单晶韧性的提高. 代表性成果的论文已在国际著名物理期刊 Appl Phys S Lett 上发表<sup>[107]</sup>. 首次设计并采用磁场作用下的三点弯断裂实验和磁场下的维氏压痕实验测量锰锌铁氧体陶瓷在不同大小磁场作用下的断裂韧性. 实验结果表明: 对于小感应磁致伸缩系数材料, 如锰锌铁氧体, 磁场对其断裂韧性的影响很小. 这与文献中关于另一种小感应磁致伸缩系数材料软铁磁钢的磁断裂实验结论是一致的<sup>[108]</sup>.

### 3.5 在压电材料的损伤与热效应上取得系列进展<sup>[112~117]</sup>

(1) 对压电介质弹性波的散射问题, 求解了压电介质层与半无限大弹性介质间的界面裂纹对平面波的散射问题, 同时求解了对 Love 波的散射问题. 讨论了材料组合、入射方向和裂纹尺寸对左右裂纹尖端的动态应力强度因子的影响. 结果表明: 对 Love 波散射和平面波散射, 不同的材料组合导致动态应力强度因子的峰值和共振频率存在差异, 选择适当的材料组合可以阻止裂纹的扩展; 入射方向对左右裂尖的动态应力强度因子的影响各不相同; 动态应力强度因子的峰值、共振频率和波动性明显的依赖于裂纹尺寸<sup>[109]</sup>. 应用波函数展开法与积分变换法, 求得了压电复合材料 (夹杂与基体) 界面脱粘后波的散射的近场解<sup>[110]</sup>.

(2) 提出了高电冲击载荷作用下, 压电介质中裂纹尖端的热效应问题<sup>[111]</sup>. 在冲击问题求解的基础上, 研究了裂纹尖端热效应的反平面问题. 并讨论了裂纹尺寸和力冲击载荷的影响. 结果表明: 当电冲击载荷较高时, 裂纹尖端产生小区域的高温场, 并将提高压电材料的断裂韧性; 裂纹尺寸对温度和高温影响区域的大小有很大的影响, 而力载荷的影响几乎可忽略. 在条状电饱和区模型的基础上, 对具体的压电材料 (PZT-5) 进行数值求解和模拟, 结果表明裂尖的热效应对于材料的力学行为具有不容忽视的影响.

(3) 研究了压电粘着接触问题. 利用 Maugis 模型研究了考虑表面力及表面能的压电材料粘着接触问题, 研究了外

加载荷对粘着接触行为的影响. 论文作为邀请报告, 发表在 Int Conf MM-2003, HongKong 国际会议上<sup>[112]</sup>. 考虑到液桥力的重要影响, 研究了由于液桥力引起的压电粘着接触问题. 讨论了相对湿度及液桥体积的影响. 结果表明: 相对湿度及液桥体积对粘着力有重要影响, 进而影响粘着接触行为. 论文发表在 J Appl Physics 上<sup>[113]</sup>.

此外, 在特殊压电材料的本构关系、功能梯度材料的断裂行为等方面取得进展<sup>[114~117]</sup>.

### 3.6 智能切削技术的纳米力学研究<sup>[118,119]</sup>

智能切削是生产 SOI 晶圆材料的最先进的、可以用于大规模生产的先进技术. 冯西桥等对智能切削技术的物理机制进行了研究, 需要跨越从原子键、微裂纹到宏观器件的多级尺度. (1) 研究了氢离子注入引起的缺陷形核问题, 在考虑单晶硅的晶体结构以及氢-硅之间的相互作用的基础上, 研究了在纳米尺度上氢离子注入引起单晶硅缺陷形核的物理机制, 建立了相应的分析模型. (2) 对智能切削工程中关键工艺参数 (如氢离子注入剂量和注入能量、退火温度、氢离子分布参数等) 的确定进行了探讨. (3) 研究了 SOI 晶片中裂纹扩展、起泡和开裂的问题, 对 SOI 结构中裂纹扩展进行了断裂力学研究, 从而为采取什么措施和工艺条件预防起裂、起裂等缺陷发生和提高 SOI 结构的质量提供理论依据.

### 3.7 铁电单晶力学行为研究<sup>[120~122]</sup>

进行了交变电场下 BATiO<sub>3</sub> 铁电单晶的电致疲劳实验研究. 为了在光学显微镜下实时观察交变电场下裂纹的扩展行为与 90° 畴变的关系, 并尽可能避免畴结构的重叠, 我们采用了超薄片铁电单晶样品 (厚度小于 90 μm). 研究表明在电场幅值低于或高于矫顽场强下都能产生电致疲劳裂纹的扩展; 裂纹的扩展行为是一个裂纹长度由渐变到突变, 再由突变-渐变的不断循环过程, 表现在裂纹扩展长度-循环次数曲线上的一个个突变点, 理论分析表明裂纹扩展的突变行为与裂纹的电学边界条件在不断往复循环的电场作用下发生了从绝缘至穿透再至绝缘的不断变化过程密切相关. 观察到了裂纹扩展过程中裂纹尖端的向前移动伴随着 90° 畴界的移动, 为 90° 畴变在电致疲劳裂纹扩展行为中的作用提供了直接的实验依据.

## 4 多尺度计算力学方法

### 4.1 跨层次计算与理论<sup>[30,123~131]</sup>

通常学术界都认为由于原子的离散性质, 连续介质力学的理论不能用于纳米尺度. 黄克智等试图根据原子势建立纳米结构材料的一个纳米连续介质力学. 通过令连续介质固体能量与原子键中储存的键能等效, 把原子势计入连续介质本构模型之中, 于是可根据熟知的 Tersoff-Brenner 原子势建立了碳的纳米连续介质理论, 并用此一理论研究了碳纳米管的机械变形, 包括:

- (1) 未变形前的能量, 即在出现变形前储存于碳纳米管中的能量<sup>[123]</sup>;
- (2) 碳纳米管的裂纹萌生应变<sup>[30]</sup>;
- (3) 碳纳米管中的缺陷萌生<sup>[124]</sup>;
- (4) 由于机械变形引起的电学性质变化, 该问题对于基于碳纳米管的电子学可靠性至关重要<sup>[125]</sup>;
- (5) 热膨胀系数, 属于可以用我们的纳米连续介质理论

进行预测碳纳米管的热学性质<sup>[126,127]</sup>;

(6) 碳纳米管之间的结合能, 对于纳米管复合材料中的纳米管束的研究至关重要<sup>[128]</sup>.

基于原子势的纳米连续介质理论与原子模型的结果符合得非常好, 而且无需任何拟合参数. 此一理论可望应用于复杂纳米尺度的材料系统 (例如纳米复合材料) 与装置 (例如纳米电子学). 为此目的我们发展了纳米连续介质理论的原子尺度有限元方法<sup>[129]</sup>. 该方法提供了与常规有限元方法相衔接的途径, 因此对于多尺度模拟非常有用<sup>[130]</sup>.

此外, 还发展了基于位错的连续介质理论, 并且用于研究纳米压痕试验, 因为纳米压痕是测量纳米尺度力学性质的关键技术. 我们首次研究了纳米压痕试验中的有限源位错 (source-limited dislocations)<sup>[131]</sup>.

#### 4.2 并行分子动力学数值模拟方案与大规模模拟<sup>[132,133]</sup>

提出一种高效率、具有  $O(N)$  计算性能的并行分子动力学数值模拟方案. 采用该方法对纳米结构进行了并行分子动力学数值模拟<sup>[132]</sup>. 已经实现对 100 万个原子的系统进行数百万步的国内计算量最大的分子动力学模拟.

杨卫等<sup>[133]</sup> 还利用这一方法研究了纳米晶体在纳米压痕下的堆垛层错的迸发和终止. 研究了在高速多方向喷丸下的表面纳米化过程<sup>[134]</sup>. 其中一个重要步骤在于利用分子动力学研究位错群通过驰豫而形成纳米晶粒的过程. 更有意义的一项工作是最近刚刚发表的关于超高速撞击的分子动力学模拟<sup>[135]</sup>. 研究表明: 当以 10 km/s 的高速用铜纳米颗粒撞击铜基体时, 会形成以超音速的速度传播的激波.

#### 4.3 微裂纹相互作用的计算方法<sup>[21~23]</sup>

大量微裂纹的相互作用及其引起的材料破坏过程是岩土工程等领域非常关心的问题. 冯西桥等<sup>[21~23]</sup> 给出了一种计算大量微裂纹相互作用的近似方法, 其基本思想是在微裂纹数目密度很大的情况下, 采用一种整体 / 局部方法, 将微裂纹分成两组, 并分别采用不同的方法处理. 在计算某一个微裂纹的应力强度因子时, 在其附近区域内的微裂纹直接用细观力学方法计算, 而其他距离较远的微裂纹对该裂纹的影响通过对远场应力的修正来体现. 利用这种方法, 可以求解任意多个裂纹的相互作用问题, 因为求解其中一个裂纹的应力强度因子所需要的工作量只决定于子域内的微裂纹数目. 如果要求多个裂纹的应力强度因子, 工作量最多再乘以相应的倍数, 而不是以级数形式增长. 作为该方法的应用, 分析了由于随机分布微裂纹的相互作用引起的材料强度的尺寸效应, 包括拉伸和压缩两种情况. 另一个应用是用上述方法直接计算微裂纹体的有效弹性模量, 为各种有效模量近似方法提供了一种数值评价手段.

#### 4.4 计算力学方法研究<sup>[136~151]</sup>

FML 在无网格法及应用方面取得研究进展<sup>[136~145]</sup>. 针对高速碰撞问题的具体特点, 张雄等基于配点法和最小二乘法建立了若干高效的无网格方法, 如最小二乘配点无网格、紧支径向基函数配点无网格法、伽辽金最小二乘无网格法、伽辽金配点无网格法等, 并建立了岩体结构的无网格格式, 提出了伽辽金型无网格法本质边界条件处理的有效方法. 另外将物质点法的思想引入有限元法中, 建立了物质点有限元法, 克服了传统拉格朗日法和欧拉法的缺点, 充分吸

收了他们的优点, 是求解超高速碰撞问题 (如空间碎片防护问题) 的最优方法之一.

FML 通过快速多极边界元法的研究, 已经使边界元法的解题规模从 2000 年在微机机群上并行计算达到 5 万自由度 (常规边界元法), 发展到现在在单台微机能计算数十万、上百万自由度的问题, 在微机机群并行系统能计算上千万自由度的二维问题和数百万自由度的三维问题, 从而为边界元法计算大规模问题提供了可能性. 姚振汉等针对复合材料进行模拟, 在二维三维含大量随机分布弹性夹杂 (包括上百个球形夹杂, 长、短纤维夹杂) 弹性体的模拟、二维含大量裂纹弹性体的模拟和疲劳裂纹扩展的模拟等方面取得成果<sup>[146~151]</sup>.

## 5 重要工程结构的力学

### 5.1 太阳能帆板的热诱发振动研究<sup>[152~155]</sup>

发展了辐射换热下复杂截面形状薄壁管空间结构的瞬态温度场有限元分析方法, 提出了一种薄壁管傅里叶温度有限单元, 成功地计算了复杂空间结构的瞬态非线性温度场问题, 研究成果在 *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 发表. 发展了热载荷与大型空间柔性结构变形耦合有限元分析方法: 既可以考虑几何非线性, 又可以考虑非线性的拉索结构元件, 还可以考虑结构变形与热载荷的耦合作用, 即计算 3 种非线性效应综合作用下大型空间结构的热变形历史. 针对热诱发振动问题, 提出了有限元分析方法, 使得对于实际的大型空间结构进行热诱发振动分析成为可能. 而已有国内外文献中仅有关于简单梁、板模型的理论分析方法. 应用所提出的方法, 编制了具有自主知识产权的计算程序, 对我国航天工业提供的两种太阳帆板进行了 3 个运行周期的温度场、热变形与热应力分析. 并对进一步改进结构设计提出了初步建议.

### 5.2 圆柱壳大开孔接管的薄壳理论解研究取得重要进展<sup>[156~158]</sup>

(1) 得到了 3 种支管力矩作用下的圆柱壳大开孔接管薄壳理论解, 比前人大大扩展了理论解的适用范围. 经过对前人的实验结果和大量的三维有限元计算结果的验证 (三维有限元采用 ANSYS 商业软件, 连接部位采用 4 层 20 节点三维等参单元, 每个模型节点总数超过 20 万), 所有的理论结果与实验、有限元计算结果均能很好地符合, 证明了该理论分析的科学与有效性. (2) 运用这种理论解可以方便地得到各种参数、各种载荷条件下的设计曲线、图表, 其适用范围远远超过日前在国际压力容器界通行的各种设计方法, 便于工程师们使用. 因此受到中国全国锅炉压力容器标准化技术委员会的重视. 根据我们的理论解建立一整套工程设计方法的立项报告经中国全国锅炉压力容器标准化技术委员会审批通过.

### 5.3 含体积型缺陷压力管道塑性失效分析与安全评定方法研究<sup>[159~167]</sup>

采用系统的概念, 以在役压力管道体积型缺陷状况的调查与分析为先导, 以压力管道塑性极限与安定分析及内力、应力分析一般理论和算法研究为手段, 以体积型缺陷安全评定方法研究为核心, 以大规模工程应用为目标, 深入、系统地研究压力管道体积型缺陷安全评定方法与技术, 成功地解决了大幅度降低极限与安定数值计算规模、含自然缺陷

试件制作、缺陷多影响因素化简、组合载荷下大应变测试、含缺陷管道三维有限元数据的全自动生成和自适应技术、数据拟合处理、免评条件建立等关键技术,在复杂载荷作用下含局部减薄、未焊透、气孔、夹渣等体积型缺陷的压力管道塑性极限与安定分析理论和数值算法研究、缺陷表征和规则化、失效模式建立、数据库和专家系统建立、极限与安定分析及安全评定方法研究等方面取得了突破性进展:

(1) 建立了极限与安定分析的特征模式和层叠模型理论和方法,提出了工程结构塑性上、下限分析的分区迭代法、线性步进法和逐步渐近法等三种数值计算方法,给出了层次式分级布局  $h$ -自适应和  $p$ -自适应型计算优化策略和算法。

(2) 研制开发并集成了具有自主知识产权的管道应力分析和安全评定的工程化计算分析软件系统 SupPipe,提供了一套先进、完整、经济、实用的管系结构现代分析手段。利用该软件给出了包括 120 条典型工业管线的应力图谱。

(3) 确定了复杂管道系统危险源产生的条件、位置及其特征判据,提出了管道体积型缺陷危险源的辨识与评价方法。

(4) 在大量理论、计算、实验测试的工作基础上,建立了各种缺陷在不同载荷组合下所对应的整体破坏、整圈破坏和局部泄漏等 3 种典型的塑性失效模式,建立了塑性极限与安定载荷数据库及专家系统,给出了形式简捷、物理意义明确的塑性极限与安定载荷工程计算公式,建立了无需进行复杂管系内力计算、应用简便的含局部减薄、未焊透、气孔、夹渣缺陷压力管道免于评定条件和塑性失效工程评定方法。

#### 5.4 大射电望远镜馈元支撑系统<sup>[168,169]</sup>

任革学和陆秋海组成的研究组结合 FAST(500 m 射电天文望远镜)这一重大科学工程的设计,在机敏结构控制方面取得突破和进展。他们开展了“FAST 馈源支撑及稳定系统研究”,在无平台概念的基础上建议了移动小车式无平台馈源支撑方案。其进展包括两个方面。(1) 一次支撑方案试验研究:建立移动小车型馈源支撑方案的 1:30 缩尺的 20 m 模型,研究其运动学与动力学特性;(2) 建立 1:5 缩尺的 Stewart 稳定平台,研究其作为二次精调稳定系统的可行性,其成果参加国家 863 计划 15 年成果展。

**致谢** 由衷地感谢教育部、科技部、国家自然科学基金委对本实验室的始终如一的资助与支持,感谢国家自然科学基金对优秀创新群体项目“微/纳米尺度力学与智能材料的力学”的第 1 期和第 2 期资助。

#### 参 考 文 献

- 1 Wang G F, Yu S W, Feng X Q. A continuum damage theory with rotation gradients. *Int J Damage Mechanics*, 2003, 12(3): 179~192
- 2 Wang G F, Yu S W, Feng X Q. Elastic constitutive relation for piezoelectric solids with torsion gradients. *European Journal of Mechanics A - Solids*, (in press)
- 3 Wang G F, Feng X Q, Yu S W. Interface effects on effective elastic moduli of nanocrystalline materials. *Mater Sci Engineering A*, 2003, A363: 1~8
- 4 Li R, Yu S W. Cohesive model for thin film/substrate in interfacial cleavage fracture. *Materials Science Forum*, 2003, 423-425: 651~658
- 5 Ma L, Feng X Q, Gao K W, Yu S W. Elastic and plastic

- analyses of functionally graded elements. *Materials Science Forum*, 2003, 423-425: 731~736
- 6 Zhou C W, Yang W, Fang D N. Mesofracture of metal matrix composites reinforced by particles of large volume fraction. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2004, 41(1-3): 311~326
- 7 Zheng Q S, Zhao Z H. Green's function and Eshelby's fields in couple-stress elasticity. *International Journal for Multiscale Computational Engineering*, 2004, 2(1): 15~27
- 8 Ren Z Y, Zheng Q S. Effects of grain sizes, shapes, and distribution on minimum sizes of representative volume elements of cubic polycrystals. *Mechanics of Materials*, 2004, 36: 1217~1229
- 9 Guo G F, Yang W, Huang Y. Intersonic crack growth under time depended loading. *Int J Solids & Structures*, 2003, 40(11): 2757~2765
- 10 Guo G F, Yang W, Huang Y, Rosakis A J. Suddenly decelerating or accelerating intersonic shear cracks. *J Mech Phys Solids*, 2003, 51: 311~331
- 11 Guo G F, Yang W, Huang Y. Supersonic crack growth in a solid of upturn stress-strain relation under anti-plane shear. *J Mech Phys Solids*, 2003, 51(11-12): 1971~1985
- 12 Chen B, Huang Y, Gao H, Wu P D. Shear crack propagation along weak planes in solids: A finite deformation analysis incorporating the linear harmonic potential. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41: 1~14
- 13 Chen B, Huang Y, Gao H, Yang W. On the finite opening of intersonic shear cracks. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41: 2293~2306
- 14 Buehler M J, Gao H, Huang Y. Atomistic and continuum studies of a suddenly stopping supersonic crack. *Computational Materials Science*, 2003, 27: 385~408
- 15 Thiagarajan G, Hsia K J, Huang Y. Finite element implementation of Virtual internal bond model for crack behavior simulation. *Engineering Fracture Mechanics*, 2004, 71: 401~423
- 16 Thiagarajan G, Huang Y, Hsia K J. Fracture simulation using an elasto-viscoplastic virtual internal bond model with finite elements. *Journal of Applied Mechanics (ASME Transactions)* (in press)
- 17 Rosakis A J, Huang Y. Intersonic debonding. In: Karimhaloo B, Ritchie R, Milne I, eds. *Comprehensive Structural Integrity Handbook Elsevier Science*, v 8, Interfacial and Nanoscale Fracture (volume eds, Gerberich W, Yang W), chap 8.4, Oxford: Elsevier Science. 2003. 137~179
- 18 You X C, Zhuang Z, Tang T. Dynamic ductile fracture toughness test and simulation for ultra-high pressure gas pipelines interacting with supersonic jet stream. *Key Engineering Materials*, 2003, 243-244, 381~386
- 19 You X C, Zhuang Z, Huo C Y, et al. Crack arrest in a rupturing steel gas pipelines. *International Journal of Fracture*, 2003, 123: 1~14
- 20 由小川, 庄苗. 高韧性管道动态断裂的气体减压模式和材料韧性研究. *力学学报*, 2003, 35(5): 615~622
- 21 Feng X Q, Li J Y, Yu S W. A simple method for calculating interaction of numerous microcracks and its applications. *Int J Solids and Structures*, 2003, 40(2): 447~464
- 22 Feng X Q, Li J Y, Ma L, Yu S W. Analysis of interaction of numerous microcracks. *Computational Materials Science*, 2003, 28(3-4): 454~461

- 23 Feng X Q, Qin Q H, Yu S W. Quasi-micromechanical damage model for quasi-brittle solids with interacting microcracks. *Mechanics of Materials*, 2004, 36(3): 261~273
- 24 Yang W. An Outline for Interfacial and Nanoscale Failure, to appear as Chapter 8.0 in *Comprehensive Structure Integrity*, vol. 8, Interfacial and Nanoscale Failure. Gerberich W W, Yang W, eds. Oxford: Elsevier Science. 2003
- 25 郑泉水, 冯西桥, 孟庆国, 詹世革. 物理力学与纳米科技的多学科交叉. *力学进展*, 2003, 33(1): 142~149
- 26 杨卫, 王宏涛, 马新玲, 洪伟. 纳米力学进展. *力学进展*, 2002, 32(2): 161~174
- 27 杨卫, 王宏涛, 马新玲, 洪伟. 纳米力学进展(续). *力学进展*, 2003, 33(2): 175~186
- 28 王宏涛, 杨卫. 纳晶金属的力学行为. *力学进展*, 2004, 34(3): 314~326
- 29 Zhang P, Huang Y, Gao H, Hwang K C. Fracture nucleation in single-wall carbon nanotubes under tension: a continuum analysis incorporating interatomic potentials. *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME*, 2002, 69(4): 454~458
- 30 Zhang P, Jiang H, Huang Y, Geubelle P H, Hwang K C. An atomistic-based continuum theory for carbon nanotubes: analysis of fracture nucleation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2004, 52(5): 977~998
- 31 Zheng Q S, Jiang Q. Multiwalled carbon nanotubes as gigahertz oscillators. *Physical Review Letters*, 2002, 88(4): article 045503
- 32 Zheng Q S, Liu J Z, Jiang Q. Excess van der Waals interaction energy of a multiwalled carbon nanotube with an extruded core and the induced core oscillation. *Physical Review B*, 2002, 65(24): article 245409
- 33 Guo W L, Guo Y F, Gao H, Zheng Q S, Zhong W Y. Energy dissipation in gigahertz oscillators from multiwalled carbon nanotubes. *Physical Review Letters*, 2003, 91(12): article 125501
- 34 Yang W, Wang H T. Mechanics modeling for deformation of nano-grained metals. *J Mech Phys Solids*, 2004, 52: 875~889
- 35 Wang H T, Yang W. Constitutive modeling for nanocrystalline metals based on cooperative grain boundary mechanisms. *J Mech Phys Solids*, 2004, 52: 1151~1173
- 36 Wang H T, Yang W. Nitriding simulation for polycrystals of grain size gradient. *Scripta Materialia*, 2004, 50: 529~532
- 37 Liu B, Qiu X, Huang Y, et al. The size effect on void growth in ductile materials. *J Mech Phys Solids*, 2003, 51(7): 1171~1187
- 38 Hwang K C, Liu B, Qiu X, et al. The void size effect in metallic materials. *Key Eng Mat*, 2003, 243-2: 405~410
- 39 Wen J, Huang Y, Hwang K C, Liu C, Li M. The modified Gurson model accounting for the void size effect. *International Journal of Plasticity* (in press)
- 40 Wen J, Huang Y, Hwang K C. The void-size effect on plastic flow localization in the Gurson model. *Acta Mechanica Sinica* (in press)
- 41 Liu B, Huang Y, Li M, Hwang K C, Liu C. Void size effect incorporating the shape-changing velocity field: A study based on the Taylor dislocation model. *Journal of Engineering Materials and Technology* (ASME Transactions) (in press)
- 42 Qiu X, Huang Y, Wei Y, Gao H, Hwang K C. The flow theory of mechanism-based strain gradient plasticity. *Mechanics of Materials*, 2003, 35: 245~258
- 43 Hwang K C, Jiang H, Huang Y, Gao H. Finite deformation analysis of mechanism-based strain gradient plasticity: torsion and crack tip field. *International Journal of Plasticity*, 2003, 19: 235~251
- 44 Shi M, Huang Y, Gao H. The J-integral and geometrically necessary dislocations in nonuniform plastic deformation. *International Journal of Plasticity*, 2004, 20: 1739~1762
- 45 Hwang K C, Guo Y, Jiang H, Huang Y, Zhuang Z. The finite deformation theory of Taylor-based nonlocal plasticity. *International Journal of Plasticity*, 2004, 20(4-5): 831~839
- 46 Huang Y, Qu S, Hwang K C, Li M, Gao H. A conventional theory of mechanism-based strain gradient plasticity. *International Journal of Plasticity* (in press)
- 47 Qu S, Huang Y, Nix W D, Jiang H, Zhang F, Hwang K C. The indenter tip radius effect on the Nix-Gao relation in micro- and nanoindentation hardness experiments. *Journal of Materials Research* (in press)
- 48 Qu S, Huang Y, Jiang H, Liu C, Wu P D, Hwang K C. Fracture analysis in the conventional theory of mechanism-based strain gradient plasticity. *International Journal of Fracture* (in press)
- 49 Gao H, Ji B, Jager I L, Arzt E, Fratzl P. Materials become insensitive to flaws at nanoscale: Lessons from nature. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 2003, 100: 5597~5600
- 50 Chang T, Gao H. Size-dependent elastic properties of a single-walled carbon nanotube via a molecular mechanics model. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2003, 51: 1059~1074
- 51 Gao H, Ji B. Modeling fracture in nano-materials via a virtual internal bond method. *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, 70: 1777~1791
- 52 Wang L F, Zheng Q S, Liu J Z, Jiang Q. Size-dependence of Super-thin Shell Models of Carbon Nanotubes. *Phys Rev Lett* (submitted in July 2004, in reviewing) 2004
- 53 Liu J Z, Zheng Q S, Wang L F, Jiang Q. Mechanical properties of single-walled carbon nanotube bundles as bulk materials. *J Phys Mech Solids* (in press)
- 54 Liu J Z, Zheng Q S, Jiang Q. Effect of bending instabilities on the measurements of mechanical properties of multiwalled carbon nanotubes. *Physical Review B*, 2003, 67: article 075414
- 55 Liu H, Li S H, Zhai J, Li H J, Zheng Q S, Jiang L, Zhu D B. Self-assembly of large-scale micro-patterns on aligned carbon nanotubes films. *Angew Chemie* (in press)
- 56 Shi D L, Feng X Q, Huang Y, Hwang K C, Gao H. The effect of nanotube waviness and agglomeration on the elastic property of carbon nanotube-reinforced composites. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2004, 126: 250~257
- 57 Li H X, Liu Y H, Feng X Q, Cen Z Z. Limit analysis of ductile composites based on homogenization theory. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 2003, 469(2031): 659~675
- 58 Feng X Q, Mai Y W, Qin Q H. A micromechanical model for interpenetrating multiphase composites. *Computational Materials Science*, 2003, 28(3-4): 486~493
- 59 Shi D L, Feng X Q, Huang Y, Hwang K C. Critical evaluation of the stiffening effect of carbon nanotubes in composites. *Key Engineering Materials*, 2004, 261: 1487~1492
- 60 Ma X L, Wang H T, Yang W. Tribological behavior of aligned single-walled carbon nanotubes. *Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the*

- ASME*, 2004, 126(3): 258~264
- 61 Li Q Y, Yu S W. A model of computational investigation of elastic-plastic contact with adhesion effects. In: European Conf on Solid Mechanics, 2003-08-17-22. Thessaloniki, Greece, 2003
  - 62 Chen Z R, Yu S W. Adhesive contact of a spherical rigid punch on a piezoelectric half-space. In: Proceeding of Int Conference MM2003, Hongkong, 2003-12-07-09. 2003
  - 63 Chen Z R, Yu S W. Capillary adhesion in microscale contact between a spherical rigid punch and a piezoelectric half-space. *J Appl Phys*, 2003, 94(10): 6899~6907
  - 64 Li Q Y, Yu S W. A model for computational investigation of elasto-plastic normal and tangential contact considering adhesion effect. *Acta Mechanica Sinica*, 2004, 20(2): 1~7
  - 65 Yu S W, Li Q Y. Adhesion measures of double buckling elasto-plastic thin film via buckle-driven delamination. In: 15TH European Conference on Fracture, (ECF15), Stockholm, Sweden, 2004-07-26-29. 2004
  - 66 Yu S W, Li Q Y. Buckle driven delamination of thin film and the influence of the Casimir or van der Waals force interaction. In: Int Conf High Density Packaging, (HDP04), Shanghai, China. 2004-06-30-07-04. (Invited paper) 2004
  - 67 Chen Z R, Yu S W. Adhesive contact of a spherical rigid punch on a piezoelectric half-space. *Composite Materials*, B, (in print) 2004
  - 68 Xie H M, Liu Z W, Fang D N, et al., Optical fringe multiplication technique with TEM nano-moire method. *Measurement Science & Technology*, 2005, 16(2): 529~534
  - 69 Liu Z W, Xie H M, Fang D N, Sang H X, et al. A novel experimental technique-nano-moiré method with scanning tunneling microscope (STM). *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 148(1): 77~82
  - 70 Xie H M, Li B, Geer R, Xu B. James Castracane. *Focused Ion Beam Moiré Method, Optics and Lasers in Engineering*, 2003, 40(3): 163~177
  - 71 Xie H M, Liu Z W, Fang D N, Dai F L, et al. A study on the digital nano-moiré method and its phase shifting technique. *Measurement Science and Technology*, 2004, 15(9): 1716~1721
  - 72 Xie H M, Liu Z W, Fang D N, et al. A study on the digital nano-moire method and its phase shifting technique. *Measurement Science & Technology*, 2004, 15(9): 1716~1721
  - 73 Tao G, Li X D, Shi H J. Study of ballistite material mechanical behaviors using temporal speckle pattern interferometry. *Mechanics of Materials*, 2004, 36(3): 275~283
  - 74 Wang K, Li X D. Quantitative analysis of the parameters of a defect with speckle interferometry and finite element optimization method. *Key Engineering Materials*, 2004, 261-263: 759~764
  - 75 Xide Li, Kai Wang, Bing Deng. Matched correlation sequence analysis in temporal speckle pattern interferometry. *Optics & Laser Technology*, 2004, 36(4): 315~322
  - 76 Li X D, Yang Y, Wei C. In-situ and real-time tensile testing of thin films using double-field-of-view electronic speckle pattern interferometry. *Measurement Science and Technology*, 2004, 15(1): 75~83
  - 77 Yao X F, Xu W, Xu M Q. Caustic study on stress singularities in laminated composites under concentrated loads. *International Journal of Solids and Structure*, 2004, 41(13): 3383~3393
  - 78 Yao X F, Chen J D, Jin G C. Caustic analysis of stress singularities in orthotropic composite materials with mode-I crack. *Composites Science and Technology*, 2004, 64(7-8): 917~924
  - 79 Yao X F, Xu W, Jin G C, et al. Low velocity impact study of laminate composites with mode I crack using dynamic optical caustics. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2004, 23(17): 1833~1844
  - 80 Yang W, Fang F, Fang D N. Failure of Ferroelectrics. Chapter 2.14 in *Comprehensive Structure Integrity*, vol. 2, Fundamentals, Eds. B Karihaloo and W G Knauss, Oxford: Elsevier Science, 2003
  - 81 Fang D N, Zhang Z K, Soh A K, Lee K L. Fracture criteria of piezoelectric ceramics with defects. *Mechanics of Materials*, 2004, 36(10): 917~928
  - 82 Fang D N, Liu B, Sun C T. Fatigue Crack Growth in Ferroelectric Ceramics Driven by Alternating Electric Fields. *J Am Ceram Soc*, 2004, 87(5): 840~846
  - 83 Li F X, Fang D N. Simulations of domain switching in ferroelectrics by a three-dimensional finite element model. *Mechanics of Materials*, 2004, 36(10): 959~973
  - 84 Yang W, Fang F. Toughening of Ferroelectrics by Out-of-Plane Poling. *Acta Mechanica Sinica*, 2003, 19(2): 147~153
  - 85 Cui Y Q, Yang W. Effect of transverse stress on switch-toughening of ferroelectrics. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2003, 39: 137~142
  - 86 Wan Y P, Fang D N, Hwang K C. Nonlinear constitutive relations for magnetostrictive materials. *Inter J Nonlinear Mechanics*, 2003, 38: 1053~1065
  - 87 Wang Y, Fang D N. A three-dimensional constitutive model for shape memory alloys. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2003, 4(1): 81~88
  - 88 Zhang Z K, Fang D N. A study of crack closure in electric-field-induced fatigue in ferroelectric ceramics. *Acta Mechanica Sinica*, 2003, 16(1): 41~46
  - 89 Feng X, Fang D N, Soh A K, Hwang K C. Predicting effective magnetostriction and moduli of magnetostrictive composites by using the double-inclusion method. *Mechanics of Materials*, 2003, 35: 623~631
  - 90 Li F X, Fang D N, Feng X. Effect of Lateral pressure on the non-linear behavior of PZT ceramics. *Chinese Physics Letters*, 2003, 20(12): 2250~2251
  - 91 Wan Y P, Fang D N, Soh A K, et al. Effect of magnetostriction on fracture of a soft ferromagnetic medium with a crack-like flaw. *Fatigue Fract Eng M*, 2003, 26(11): 1091~1102
  - 92 Wan Y P, Fang D N, Soh A K, et al. Experimental and theoretical study of the nonlinear response of a giant magnetostrictive rod. *Acta Mech Sinica*, 2003, 19 (4): 324~329
  - 93 Li F X, Fang D N. An analytical axisymmetric model for the poling-history dependant behavior of ferroelectric ceramics. *Smart Materials and Structures*, 2004, 13: 668~675
  - 94 Liu J X, Fang D N. Comment on Moving screw dislocation in a piezoelectric bimaterial. *Phys Stat Sol*, (b) 2004, 241(4): 962~964
  - 95 Mao G Z, Fang D N. Fatigue crack growth induced by domain switching under electromechanical load in ferroelectrics. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2004, 41(1-3): 115~123
  - 96 Guo X H, Fang D N. Simulation of interface cracking in piezoelectric layers. *Int J Nonl Sci and Num Simu*, 2004, 5(3): 199~206

- 97 Guo X H, Fang D N. Analysis of piezoelectric fracture under combined mechanical and electrical loading based on meshless method. *Key Engineering Materials*, 2004, 261: 543~549
- 98 Fang D N, Liu Z W, Xie H M, Li S, et al. Study on fracture behavior of ferroelectric ceramics under combined electromechanical loading by using a moiré interferometry technique. *Acta Mechanica Sinica*, 2004, 20(3): 263~269
- 99 Wan Y P, Zhong Z, Fang D N. Permeability dependence of the effective magnetostriction of magnetostrictive composites. *J of Applied Physics*, 2004, 95(6): 3099~3110
- 100 Wan Y P, Fang D N, Soh A K, Hwang K C. Effects of magnetostriction on fracture of a soft ferromagnetic medium with a crack-like flaw. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2003, 26(11): 1091~1102
- 101 Liang W, Fang D N, Shen Y P, Soh A K. Nonlinear magnetoelastic coupling effects in a soft ferromagnetic material with a crack. *Inter J Solida & Struc*, 2002, 39: 3997~4011
- 102 Liang W, Fang D N, Shen Y P. Mode I crack in a soft ferromagnetic material. *Fatigue, Frac Eng Mater Struc*, 2002, 25(5): 519~526
- 103 Wan Y P, Fang D N, Soh A K. A small-scale magnetic-yielding model for an infinite magnetostrictive plane with a crack-like flaw. *Inter J Solida & Struc*, 2004, 41(22-23): 6129~6146
- 104 Wan Y P, Fang D N, Hwang K C. Nonlinear constitutive relations for magnetostrictive materials. *Inter J Nonlinear Mechanics*, 2003, 38: 1053~1065
- 105 Feng Xue, Fang Daining, Soh A K, Hwang K C. Predicting effective magnetostriction and moduli of magnetostrictive composites by using the double-inclusion method. *Mechanics of Materials*, 2003, 35: 623~631
- 106 Fang D N, Feng X, Hwang K C. Study of magnetomechanical nonlinear deformation of ferromagnetic materials: theory and experiment. *Accepted by Journal of Mechanical Engineering Science*, 2005, in press
- 107 Feng Xue, Fang D N, Hwang K C, Wu G H. Ferroelastic properties of oriented TbxDy<sub>1-x</sub>Fe<sub>2</sub> polycrystals. *Appl Phys Lett*, 2003, 83(19): 3960~3962
- 108 Wan Y P, Fang D N, Soh A K. Effect of magnetic field on fracture toughness of manganese-zinc ferrite ceramics. *Modern Phys Lett B*, 2003, 17(2): 1~10
- 109 Yu S W, Gu B. Wave scattering to the crack between piezoelectric layer and semi-infinite substrate. In: Yang J S, Maugin G R, eds. *Mechanics of electromagnetic solid*, Kluwer Academic Publishers, 2003. 99~107
- 110 Wang X Y, Yu S W. Scattering of S H Waves By An Arch-shaped Crack Between A Cylindrical Piezoelectric Inclusion And Matrix: Near Fields. In: 3rd Int Conf. on Damage and Fracture Mechanics, 2003, Sept. Paderborn, Germany, Key Engineering Materials, 2003 vols. 251-252: 215~220
- 111 Gu B, Yu S W. The thermal effect of piezoelectric medium for anti-plane problem under high electrical impact loading. *Computational Materials Sciences*, 2003, 28: 628~632
- 112 Chen Z R, Yu S W. Adhesive contact of a spherical rigid punch on a piezoelectric half-space. In: Proceeding of Int Conference MM 2003, Hongkong, 2003 December, (Also submitted to *Mechanics of Materials*), Invited Paper
- 113 Chen Z R, Yu S W. Capillary adhesion in microscale contact between a spherical rigid punch and a piezoelectric half-space. *J Appl Phys*, 2003, 94(10): 6899~6907
- 114 Huang G Y, Wang Y S, Yu S W. Fracture analysis of a functionally graded interfacial zone under plane deformation. *Int J Solids and Structures*, 2004, 41: 731~743
- 115 Li Q Y, Yu S W. A model for computational investigation of elasto-plastic normal and tangential contact considering adhesion effect. *Acta Mechanica Sinica*, 2004, 20(2): 1~7
- 116 Gang-Feng Wang, Shou-Wen Yu, Xi-Qiao Feng. A piezoelectric constitutive theory with rotation gradient effects. *European J of Mechanics, A/Solids*, 2004, 23: 455~466
- 117 Huang G Y, Wang Y S, Yu S W. A new model of functionally graded coatings with a crack under thermal loading. *Journal of Thermal Stress*, 2004, 27: 491~512
- 118 Feng X Q, Y Huang. Mechanics of Smart-Cut technology. *Int J Solids and Structures*, 2004, 41: 4299~4320
- 119 Wang X S, Feng X Q. Electrochemically synthesized polythiophene films with self-organized microstructure. *Polymer Engineering and Science*, 2003, 43(4): 919~922
- 120 Fang F, Yang W, Zhang F C, Luo H S. Fatigue crack growth for batio<sub>3</sub> ferroelectric single crystals under cyclic electric loading. *J Am Ceram Soc*, accepted, 2005
- 121 Fang F, Li Y H, Yang W. Effect of poling directions on the electric-field-induced fatigue crack growth in barium titanate ferroelectric single crystals. *Ferroelectrics*, accepted, 2005
- 122 Fang F, Yang W, Zhang F C, Luo H S. In-situ observation of electrically induced fatigue crack growth for ferroelectric single crystals. In: International Union of Theoretical and Applied Mechanics, Beijing, China. 2004-09-01-04. 2004
- 123 Jiang H, Zhang P, Liu B, Huang Y, Geubelle P H, Gao H, Hwang K C. The effect of nanotube radius on the constitutive model for carbon nanotubes. *Computational Materials Science*, 2003, 28: 429~442
- 124 Jiang H, Feng X Q, Huang Y, Hwang K C, Wu P D. Defect nucleation in carbon nanotubes under tension and torsion: Stone-Wales transformation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2004, 193: 3419~3429
- 125 Liu B, Jiang H, Johnson H T, Huang Y. The influence of mechanical deformation on the electrical properties of single wall-carbon nanotubes. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2004, 52: 1~26
- 126 Huang Y, Wang Z L. Mechanics of carbon nanotubes. In: Karihaloo B, Ritchie R, Milne I, eds. *Comprehensive Structural Integrity Handbook*, Elsevier Science, v8, Interfacial and Nanoscale Fracture (volume eds., Gerberich W and Yang W), chap 8.16, Oxford: Elsevier Science, 2003. 551~579
- 127 Jiang H, Liu B, Huang Y, Hwang K C. Thermal expansion of single wall carbon nanotubes. *Journal of Engineering Materials and Technology* (ASME Transactions), 2004, 126: 265~270
- 128 Chen B, Gao M, Zuo JM, Qu S, Liu B, Huang Y. Binding energy of parallel carbon nanotubes. *Applied Physics Letters*, 2003, 83, 3570~3571
- 129 Liu B, Huang Y, Jiang H, Qu S, Hwang K C. The atomic-scale finite element method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2004, 193: 1849~1864, 2004
- 130 Shi M, Huang Y, Li M, Hwang K C. On source-limited dislocations in nanoindentation. *Journal of Applied Mechanics* (ASME Transactions), 2004, 71: 433~435, 2004
- 131 Liu B, Yu M F, Huang Y. Role of lattice registry in the full collapse and twist formation of carbon nanotubes. *Physical*

- Review B (in press)
- 132 Ma X L, Yang W. MD simulation for nanocrystals. *Acta Mech Sinica*, 2003, 19(6): 485~507
  - 133 Ma X L, Yang W. Molecular dynamics simulation on burst and arrest of stacking faults in nanocrystalline Cu under nanoindentation. *Nanotechnology*, 2003, 14: 1208~1215
  - 134 Ma X L, Wang W, Yang W. Simulation for surface self-nanocrystallization under shot peening. *Acta Mechanica Sinica*, 2003, 19(2): 172~180
  - 135 Ma X L, Yang W. Supersonic wave propagation in Cu under high speed cluster impact. *Nanotechnology*, 2004, 15: 449~456
  - 136 张雄, 刘岩. 无网格法. 北京: 清华大学出版社 /Springer, 2004
  - 137 宋康祖, 张雄, 陆明万. Elasto-plastic analysis based on collocation with moving least square method. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2003, 16(2): 162~170
  - 138 张雄, 胡炜, 潘小飞, 陆明万. 加权最小二乘无网格法. *力学学报*, 2003, 35(4): 425~431
  - 139 潘小飞, Sze K Y, 张雄. An assessment of the meshless weighted least-squares method. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2004, 17(3): 270~282
  - 140 张雄, 刘小虎, 宋康祖, 陆明万. Least-square collocation meshless method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2001, 51(9): 1089~1100
  - 141 刘岩, 张雄, 陆明万. A meshless method based on least-squares approach for steady- and unsteady-state heat conduction problems. *Numerical Heat Transfer*, 2005, 47(3): 257~275
  - 142 张雄, 宋康祖, 陆明万. Meshless methods based on collocation with radial basis functions. *Computational Mechanics*, 2000, 26(4): 333~343
  - 143 宋康祖, 张雄, 陆明万. Meshless method based on collocation with consistent compactly supported radial basis functions. *Acta Mechanica Sinica*, 2004, 20(5): 551~557
  - 144 潘小飞, 张雄, 陆明万. Meshless Galerkin least-square method. *Computational Mechanics*, 2005, 35(3): 182~189
  - 145 Pang X F, Zhang X, Lu M W. Galerkin Collocation Meshless Method. Sixth World Congress on Computational Mechanics in conjunction with the Second Asain- Pacific Congress on Computational Mechanics, 2004, Beijing, China. 2004-09-05-10. 2004
  - 146 Wang H T, Yao Z H. A new fast multipole boundary element method for large scale analysis of mechanical properties in 3D particle-reinforced composites. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2005, 7(1): 85~96
  - 147 Wang H T, Yao Z H. Application of a new fast multipole bem for simulation of 2D elastic solid with large number of inclusions. *Acta Mechanica Sinica*, 2004, 20(6): 613~622
  - 148 Wang H T, Yao Z H. On the preconditioners for fast multipole boundary element methods for 2D multi-domain elastostatics. *Engineering Analy SIS with Boundary Elements* (in press)
  - 149 Yao Z H, Wang H T, Wang P P. Fast multipole boundary element method for simulation of composite materials. In: International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences, Madeira, Portugal. 2004-07-26-29. 2004 (国际会议主题报告)
  - 150 Yao Z H, Wang H T, Wang P P. Some applications of fast multipole boundary element method. In: 5th International Conference on Boundary Element Techniques, Lisbon, Portugal. 2004-07-21-23. 2004 (国际会议特邀报告)
  - 151 Wang H T, Yao Z H. Large scale simulation of 3D particle-reinforced composites using fast multipole boundary element method. In: WCCM VI in conjunction with APCOM'04, Beijing, China. 2004-09-05-10. 2004. (国际会议主题报告)
  - 152 Mingde Xue, Yong Ding. Two kinds of tube elements for transient thermal- structural analysis of large space structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 59(10): 1335~1353, (SCI04: 800MN)
  - 153 丁勇, 薛明德, 姚海民. 空间薄壁管结构瞬态温度场、热变形有限元分析. *应用力学学报*, 2003, 20(1): 42~48
  - 154 程乐锦, 薛明德, 唐羽焯, 姚海民. 大型空间结构的热-结构动力学分析. *应用力学学报*, 2004, 21(2): 1~9
  - 155 程乐锦, 薛明德. 大型空间结构热-动力学耦合有限元分析. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2004, 44(5): 681~684
  - 156 Xue M D, Li D F, Hwang K C. Analytical solution of two intersecting cylindrical shells subjected to transverse moment on nozzle. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41(24-25): 6949~6962 (SCI04: 859PD)
  - 157 Xue M D, Li D F, Hwang K C. Thin shell theoretical solution for two intersecting cylindrical shells due to external branch pipe moments. ASME/JSME Pressure Vessels And Piping Conference, 2004, 477: 61~73
  - 158 薛明德, 李东风, 黄克智. 带径向接管的圆柱壳受支管载荷作用的薄壳理论解. *压力容器*, 2004, 21(1): 18~24
  - 159 Liu Y, Zhang X, Cen Z. Lower bound shakedown analysis by the symmetric Galerkin boundary element method. *International Journal of Plasticity*, 2005, 21: 21~42
  - 160 Liu Y, Zhang X, Cen Z. Numerical determination of limit loads for three-dimensional structures using boundary element method. *European Journal of Mechanics/Solids*, 2004, 23: 127~138
  - 161 Liu Y H, Zhang X F, Cen Z Z. Lower bound limit analysis of three-dimensional elastoplastic structures by boundary element method. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2003, 24(12): 1466~1474
  - 162 Zhang X, Liu Y, Cen Z. Boundary element methods for lower bound limit and shakedown analysis. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2004, 28: 905~917
  - 163 Zhang H, Liu Y, Xu B. Plastic limit analysis of periodic heterogeneous materials by a static approach. *Key Engineering Materials*, 2004, 274-276: 739~744
  - 164 Huang L, Sun X, Liu Y. Parameter identification for two-dimensional orthotropic material bodies by the boundary element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2004, 28(2): 109~121
  - 165 Sun X S, Huang L X, Liu Y H, Cen Z Z. Elastic-plastic analysis of two-dimensional orthotropic bodies by the boundary element method. *Computers, Materials and Continua*, 2004, 1(1): 91~105
  - 166 Zhang X F, Liu Y H, Zhao Y N, et al. Lower bound limit analysis by the SGBEM and Complex method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2002, 191(17-18): 1967~1982
  - 167 陈钢, 刘应华. 结构塑性极限与安定分析理论与工程方法. 北京: 科学出版社, 2005
  - 168 Cheng Y, Ren G X. Vibration control of Gough-Stewart platform on flexible suspension. *IEEE T Robot Autom*, 2003, 19(3): 489~493
  - 169 林贵斌, 路英杰, 陆秋海. 大型射电望远镜馈源 1/30 模型的轨迹跟踪控制. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2003, 43(2): 238~241