

科学基金

国家自然科学基金重大项目“材料损伤、断裂机理和宏微观力学理论”子课题

损伤断裂的宏微观过程

(1994—1996年工作总结)

国家自然科学基金委员会设立的重大项目“材料损伤断裂机理和宏微观力学理论”第2课题“损伤断裂的宏微观过程”自1994年1月至1996年6月两年半时间内共取得下列主要成果

1 提出了微裂纹扩展方位区理论

以往的微裂纹损伤脆性体的细观理论存在三个难以解决的重要理论问题:一是关于微裂纹复杂的损伤演化过程如何描述;二是难于应用到非比例加载的情形;三是难于完整描述可适用于强化、应力跌落和软化全过程的力学行为。本课题建立了一套完整的脆性材料细观损伤的微裂纹扩展方位区理论,用以描述材料在三轴拉伸和压缩情况下从初始无损状态到最终宏观裂纹形成的各个阶段的细观损伤本构关系。提出以伴随加载历程的微裂纹扩展方位区的集合作为细观损伤的表征。利用复合型裂纹扩展准则,可求得微裂纹扩展的方位区 Ω ,解决了在非比例加载下微裂纹损伤演化描述的困难问题,得到了在复杂加载路径下材料的细观损伤演化与各向异性损伤的本构关系。分别讨论了在线弹性、非线性强化、应力突然跌落和应变软化4个阶段的细观损伤机制,详细研究了在拉伸和压缩情况下不同的损伤机制与破坏模式,求得张开裂纹的自相似扩展和闭合微裂纹的摩擦滑移、自相似扩展和弯折扩展等不同情况下的柔度张量。提出了一种柔度等效的损伤测量方法。在微裂纹扩展方位区理论的基础上,对含损伤饱和段的脆性材料,研究了宏观裂纹尖端的微裂纹屏蔽效应。应用考虑应力跌落和材料软化的理论,指出脆性材料的宏观裂纹尖端将产生损伤局部化,并给出了局部化带长度的计算方法。

2 利用激光热-力联合加载装置,首次报道了一种称为“反冲塞效应”的新的破坏模式

结合我们首次报道的激光诱导的“反冲塞”现象,编制了二维热-力耦合的大变形动态有限元程序,用于研究在激光辐照下产生的热-力联合变形与破坏效应。计算表明,除了剪

切效应外, 热 - 力耦合下的材料失稳可能是导致“反冲塞”现象的重要原因。开展了在非绝热条件下, 材料变形局部化过程的研究, 证明了不同的应力率会产生不同的剪切流动图案, 提出了一维简单剪切流运动模式不稳定的观点。此外, 成功地研制了一台较高精度、较高时 - 空分辨率的无接触式铟化铟 (InSb) 红外瞬态测温仪, 用于材料表面微区温度场变化的实验研究。

3 利用张量表示理论研究了损伤体有效弹性性质的细观与宏观损伤的关联, 并给出了不变性描述

给出了各向同性和各向异性弹性基体含给定任意密度、尺寸、形状、分布和取向的微裂纹与微孔洞的等效弹性性质的显式关系。证明了损伤张量 H 与基体弹性模量 E_m 的积与基体的 E_m 和泊松比 ν_m 无关的不变性关系。通过引进微缺陷相互作用张量, 建立了二维情况下考虑微缺陷间相互作用的损伤固体有效弹性性质的一般理论模式。考虑了微缺陷相互作用所引起的损伤柔度张量的高阶效应。

4 提出了在复杂加载下, 弹塑性和热粘塑性体本构关系的函数空间理论

给出应力应变、弧长、曲率、拐折、加卸载等有关的计算公式。分析了钝裂纹端部的应力、位移和孔隙率, 给出大范围屈服下不同断裂试件中裂纹尖端的三轴应力约束效应和断裂准则。

5 微孔洞损伤演化的实验与理论研究

发展了一种适于微孔洞损伤演化研究的精细网格测量方法。获取孔径为 $10\text{--}20\mu\text{m}$ 的不同排列的人造细观孔洞附近的塑性变形。通过实验观察指出, 微孔形状变化可以用椭圆度的变化来表征。单个椭圆微孔洞变形过程中短轴基本保持不变, 孔边滑移带与最大剪应变场相对应, 而且 $Mises$ 等效应变的极值区域与孔洞的串接汇合区域相对应。在实验观察的基础上, 进行了微孔损伤及其演化的理论研究。给出了一个 $Eshelby$ 的细观夹杂应变场的扩展解。提出韧性材料在高应力三轴度下的失稳有两种可能的机制, 即小孔隙度下材料的瞬态失稳和较高孔隙度下微孔长大、材料发生塑性流动最终出现失稳。还研究了双孔洞材料在脉冲拉伸下应力波对微孔洞作用的影响, 利用 $DANA-3D$ 程序进行了数值模拟。

6 热 - 力电材料的损伤行为

近年来, 智能材料与微机 - 电系统 (MEMS) 得到很快发展, 本课题宏细观损伤的研究工作也与这种发展背景相联系, 取得了一些有关的成果, 例如:

- (1) 求得了压电材料界面裂纹尖端存在一种对数型奇异场;
- (2) 得到了热释电材料裂纹尖端力学行为的描述;
- (3) 对考虑损伤的压电材料, 获得了其等效弹性模量、热传导系数和热膨胀系数的细观力学计算结果;

(4) 利用可动边界的变分原理, 详细分析了含压残余应力的薄膜 - 基底系统屈曲驱动层裂的破坏模式 给出了过屈曲与界面层裂扩展的耦合计算方案, 分析了由轴对称过屈曲直至非轴对称过屈曲所引起的圆形脱层非轴对称扩展的破坏过程

余寿文 供稿

(上接第143页)

子) 及其可靠性和经济性的要求将为力学开辟若干个从未涉足的新领域; 制造业和汽车工业的发展将导致工艺力学的脱颖而出

(2) 在目前计算软件研制的国际性竞争形势下, 我国年轻一代力学工作者应着重研究有自己特色, 技术含量高, 具有良好用户界面, 与国际通用软件环境平台接轨的力学分析软件, 充分发挥力学工作者在计算和分析软件上的带动作用 论坛上几位从事冷冲压成型、橡塑模具设计、穿甲与高速冲击等研究领域软件开发的学者所介绍的成果引起与会者的浓厚兴趣和重视 在算法和计算范围方面有创新性的多种尝试也引起与会者的关注

(3) 力学学科本身应不断扩充自己的内涵和外延 多位报告人介绍了在宏观、细观、微观相结合方面的工作, 力求突破力学只研究宏观事物和采用宏观分析方法的框框; 介绍了非线性科学(如混沌、分形)等对力学研究方法和研究思想的影响, 探讨了电场、磁场和力学场在高新技术中的耦合作用 对正分析和反分析之间的辩证关系也进行了热烈的讨论, 并讨论了反分析在我国资源开发、故障缺陷、诊断和系统参数识别中的应用

代表们一致认为“青年科学家论坛”是一种极好的交流形式 在短短的两天中进行了紧凑热烈和自由的讨论, 大家对今后开展各种形式的交流和合作、技术的推广和应用提出了不少很有启发的经验和建议 如尽快交流新开发的软件, 新论文、新观点; 尊重和引用中国人自己的研究成果; 实验设备取长补短充分利用; 密切人员来往等 大家力争在新一代力学工作者之间形成更好的合作气氛, 共同努力使走向21世纪的中国力学为基础理论和高新技术发展作出贡献 会上还对一些新想法和奇思异想展开了热烈争论 与会青年科学家在会议期间建立的个人友谊与业务沟通, 一定会在今后的科学研究和工程应用中充分地体现出来

会后由国家自然科学基金委资助出版了题为《走向21世纪的中国力学——中国科协第9次“青年科学家论坛”文集》(清华大学出版社出版), 文集汇编了与会代表的31篇论文, 由杨卫、郑泉水、靳征谟主编 内容包括他们在各自研究领域所取得的成果精选、研究中遇到的主要问题、对力学理论与与工程学科关系的认识, 以及充满各种色彩的个人简历 从文集丰富的内容中, 可以清楚地看到未来3到5年内中国新一代力学学者在理论与工程应用方面的研究趋势

清华大学 杨 卫 郑泉水 供稿