

·成果简介·

“材料损伤断裂机理和宏微观力学理论”研究获硕果

孟庆国 靳征谟

(国家自然科学基金委员会数理科学部, 北京 100083)

[关键词] 宏微观力学, 材料, 损伤, 断裂

断裂是材料失效的重要方式之一。90年代,以宏细微观相结合研究损伤断裂机理成为力学和材料科学研究的前沿和热点。国家自然科学基金委员会与原国家科委共同资助的“八五”重大项目“材料的损伤断裂机理与宏微观力学理论”,由清华大学、北京科技大学、中国科学院力学研究所、中国科学院金属研究所等8个单位承担,黄克智、肖纪美两位院士为项目负责人,经4年的努力,出色地完成了研究任务。1997年12月,本项目顺利通过了国家自然科学基金委员会组织的专家组的验收。

该重大项目在以下6个方面提高了对材料的损伤断裂机理的进一步认识,丰富了宏微观力学理论的知识。

1 细微观变形、破坏模型和基本理论

以滑移、裂尖、晶界和位错为主要基元,系统地研究了单晶、双晶和多晶材料的细微观变形、破坏模型和基本理论:建立了晶体离散滑移的力学理论和晶体硬化系数精确有效的标定方法;阐明了晶体裂纹尖端位错发射与解理断裂相互竞争的力学机制;建立了晶体准解理断裂的位错理论;通过大量的原位高倍TEM的实验观察,揭示了裂纹尖端无位错区的物理本质,发现了纳米量级微裂纹的形核过程。提出了形核后的微裂纹行为控制了材料的韧脆行为的新观点。

以上结果在材料细微观结构、内部缺陷与材料变形、破坏力学之间架起了定量沟通的桥梁;在宏观连续介质力学、细微观实验观测、细观力学分析及分子动力学模拟计算的诸层次中,初步建立了定量的跨尺度连接。

2 损伤与断裂的宏细观过程

以微裂纹与微孔洞作为细观损伤的主要基元,研究了基于细观的唯象损伤理论,推进了人们对宏细观损伤力学过程的认识。提出了微裂纹扩展的方位区理论,得到了在复杂加载路

国家自然科学基金“八五”重大项目,批准号19392300。

本文于1998年1月5日收到。

径下材料的细观损伤演化与各向异性损伤的本构关系。通过精细网格技术，找到了一种适于研究微孔洞损伤演化的实验方法，研究了柱形微孔的变形特征和微孔的汇合。研制了激光热-力联合加载装置，发现一种称为“反冲塞”的新破坏模态。利用张量表示理论系统研究了损伤体有效弹性性质的细观和宏观损伤的关系。提出了复杂加载下，热粘塑性体的本构关系的函数空间理论。研究了热-力电材料的损伤行为。

3 变形与损伤的局部化理论

建立了一套较系统的描述细观损伤演化，联系宏观、细观损伤变形的损伤演化物理方程，从理论上探索微损伤形核机理和宏微观尺度过程。建立了一套可观察、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。提出了在循环加载下损伤局部化是由裂纹群体演化过程所致，损伤位形敏感性和损伤矩响应则是该过程的主要特点。单脉冲加载下局部化的微观机理表明，局部化发展后期微结构间强相互作用是主导因素。形成了从细观力学模型到宏观力学行为的多晶体材料塑性变形局部化的数值模拟的完整方案和模拟系统。

形成了深入认识相变局部化现象以及对裂纹行为影响的初步理论框架，并深入研究了一类陶瓷材料软化失稳和记忆合金的相变行为。

4 材料界面在疲劳和断裂过程中作用的基础研究

通过疲劳损伤与裂纹萌生的晶体学关系的研究，揭示了循环形变物理损伤的本质，为长期争论的“晶体循环应力-应变曲线是否有平台区”的问题提供了结论性的解释。通过对晶界在疲劳损伤早期的作用的研究，揭示了晶界的疲劳裂开主要决定于组元晶体的取向，而不是如文献报道的决定于重位点阵参数表示的晶界的结构。晶界附近的残余应力及其消除、三铝化镍/铝界面的疲劳裂纹萌生的特征、氮化硅基陶瓷晶界相与疲劳性能的关系、界面裂纹尖端的应力应变分析、双晶循环变形损伤计算模拟以及界面附近三维位移场的测量结果，对于新材料设计和实际应用均具有指导作用。

5 典型材料与微结构的强韧化力学原理

在强韧化物理力学理论方面取得突破，提出了连续介质与原子描述相结合的理论模型和计算方法，基于梯度塑性理论构造了典型材料的裂纹尖端场，建立了跨音速分层力学和界面层断裂力学的基本理论。提出抑制相变局部化、纳米复合和断裂过程区形貌控制3种增韧机制，对层合相变陶瓷、三氧化二铝/纳米碳化硅、三氧化二铝/纳米氮化硅、增韧聚丙烯、增韧聚碳酸酯5种材料取得了显著的增韧效果。首次制成含 β - C_3N_4 的晶型超硬膜，体积模量达349 GPa，并在膜基界面结合强度上发展出滚压疲劳分层的测量方法。对多层介质、颗粒增强介质和材料断裂路径模拟发展了新的材料细观计算力学方法和软件。

6 环境断裂机理研究

发现腐蚀过程本身、液体金属吸附及氢能促进位错的发射和运动，当发展到临界条件时，脆性裂纹就会在无位错区中形核。发现氢和应力腐蚀存在协同作用。发现一系列新现象，如：相间应力腐蚀、阴极溶解、阴极保护抑制应力腐蚀和预蠕变无关，在纳米尺度上用

分形理论可描述环境脆断断口。在理论研究的基础上,开发出抗 H_2S 石油套管钢,已下油井 1 500 t, 1997 年交货 2 000 t。

验收专家组认为,在下列 9 个方面取得具有国际先进水平和较大影响的重要成果:

(1) 由宏观塑性理论深入到晶体塑性理论,在硬化矩阵确定、细观相变塑性本构与滑移晶体方面取得重要进展。

(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物理过程,提出了考虑位错发射影响及由位错塞积驱动的准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,进行了在疲劳加载作用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置备了 $Ce-TZP/Al_2O_3$ 层状增韧陶瓷。

(8) 在电致断裂、电致疲劳和电致畸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。

通过该重大项目的实施,正在实现力学和材料两个学科的结合,在材料的损伤、断裂的细观机制以及力学性能刻划上形成了结合点。由于实验、理论与计算研究方法的互相补充,在学术上彼此受益,并在跨学科队伍中形成共同语言。该项目组已成为一支能协同进行材料的力学行为研究、处于国际研究前沿的基础性研究队伍。

本重大项目共计发表学术专著 6 部,学术论文 783 篇(其中国际学术期刊 247 篇,全国性科技期刊 315 篇,国际会议邀请报告 32 篇);获国家及部委级奖励 10 项(其中国家自然科学奖三等奖 2 项,中国科学院自然科学奖一等奖 2 项,国家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);培养博士后 21 人,博士 47 人,硕士 45 人。

ACHIEVEMENT ON THE STUDY OF DAMAGE AND FRACTURE MECHANISMS OF MATERIALS AND MACRO-MICRO-MECHANICS

Meng Qingguo Jin Zhengmo

(Department of Mathematical and Physical Sciences, NSFC, Beijing 100083)

Key words macro-micro-mechanics, material, damage, fracture