

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

## 典型材料与微结构的强韧化力学原理

(1994—1996年工作总结)

国家自然科学基金会和国家科委攀登项目共同资助的重大项目“材料损伤、断裂机理与宏微观力学理论”的05课题“典型材料与微结构的强韧化力学原理”在执行的前半期研究期间取得了下述主要进展和结果

### 1 材料的宏微观断裂

本课题在宏微观结合的断裂力学中取得了突破性成果。在原子点阵/连续介质交叠带方案下,首次模拟出从裂尖发射的原子点阵位错运行并转变为连续介质位错群的动态过程,探讨了在不同界面断裂混合度下波折界面对位错发射的抑制作用。实现了从纳观计算力学到细观计算力学,再到宏观计算力学的贯穿。对裂纹尖端原子非线性运动的研究结果揭示了裂尖原子运动的突变行为与混沌现象。我们证明随着远场应力强度因子幅值的提高,解理过程与位错发射过程均出现突变与混沌,并首次提出了位错云的概念。突变过程的能量释放可以解释实验中所观察到的裂尖粒子发射现象,并可探测裂尖原子混沌运动的特征。杨卫在国防科学出版基金资助下,完成了题为《宏微观断裂力学》的学术专著,由国防工业出版社在1995年出版。

### 2 断裂过程的脆韧过渡

针对1994年汇报会上北京科技大学对纳米裂纹方面的实验研究,提出了由裂纹前方DFZ前位错反塞积所驱动的准解理断裂理论。该理论成功地解释了对一类准脆性材料,在裂纹前方的纳米裂纹成核并随之与主裂纹汇合的机制。该结果不仅阐明了近年来国内外的细观与纳观断裂实验中所观察到的新现象,而且可以定量地预测材料的断裂阻力曲线。该模型可望解释韧性扩展后的脆性解理断裂,体现了力学与材料的跨学科结合所具有的优势。此外,对强

约束下多层材料的准解理断裂也取得了重要的研究成果。上述进展对阐述断裂过程的脆韧过渡有重要意义。得到了梯度塑性理论下的若干裂纹尖端场, 目前受到国际断裂界的重视。

### 3 新的强韧机制

#### (A) 控制相变局部化传播的陶瓷增韧机制

建立了描述单晶体马氏体相变的宏细观本构理论, 舍弃了以前模型中关于相变应变平行于基体偏应力的假定, 得到了更为严格的本构关系。对自催化相变所涉及的增韧行为的研究表明, 自催化的力学机制归因于相变软化、长程剪切效应和加载路径三者的关联耦合。引入双尺度微结构, 可有效地控制自催化, 显著提高含裂纹构件的失稳载荷。我们通过有限元计算揭示了相变剪切对静止裂纹具有负屏蔽效应。对计及剪切效应的 SHY 相变模型, 进行了变形局部化分析, 细致的参数研究揭示了复杂的临界相变行为。利用数值模拟展现了控制相变局部化传播方向的结构陶瓷的增韧潜力, 并在理论指导下初步制备了 Ce-TZP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 层状增韧陶瓷, 该材料显示出较好的增韧效果。

#### (B) 聚碳酸酯的超钝化和拖带损伤增韧

提出宏细观结合的晶态高分子材料的本构关系, 利用张量函数表示定理清晰地描述了高分子材料由于链段不可伸长而造成的织构演化过程。理论模型解释了实验中发现的高分子材料(聚丙烯类和聚碳酸酯类)的超钝化增韧机理。在聚丙烯类材料中实现能量释放率增加一个量级, 在聚碳酸酯类材料中实现撕裂模量增加一个量级。在后一种材料中还提出了拖带损伤增韧的假说。

#### (C) 纳米陶瓷复合材料的多重增韧

提出陶瓷材料中添加纳米陶瓷颗粒而产生的多重增韧效果。提出4种增韧模型: (1) 由晶界断裂转化为穿晶断裂, (2) 由曲折断裂路径而造成的穿晶断裂表面增加, (3) 曲折裂纹面的啮合增韧效果, (4) 由减少残余应力波长而造成的增韧。在这4种增韧机制下纳米陶瓷复合材料的韧性可增至原基体材料的3.5倍。

#### (D) 复合材料的颗粒增强

对颗粒增强的复合材料, 用数值计算的方法考察了颗粒形状、百分比、分布、界面状况等因素对复合材料强度的影响。

#### (E) 材料中的分层断裂与增韧

首次得到跨音速分层断裂力学平面问题的解析解, 解释了跨音速分层断裂的实验现象。发展、完善了界面层断裂理论。增添了裂纹垂直于界面层和裂纹平行于材料不均匀层的两种构形, 并在这一理论基础上发展了界面层断裂评价软件。提出层合板的 Hamilton 理论框架, 实现层合细观结构的高效算法。初步研制了复合材料的断裂模拟软件, 该软件能识别复合材料中的断裂路径与强度。

### 4 电致破坏机理

在电致断裂、电致疲劳和电致畴变增韧方面取得重要进展, 解释了在导电电极或缺陷附

近的电场集中引起非均匀电致应变, 从而引起电致断裂。电致应变的迟滞回线是引起电致疲劳的原因。电场对电致畸变的作用是引起断裂韧性非对称变化的原因。并初步建立了畸变增韧模型。

在电致迁移孔洞损伤方面取得实验、理论和数值计算的重要成果。在实验上揭示了铝导线亚微米柱状晶体由于电致迁移而造成的材料坑刺状流动失稳, 在数值计算上模拟了单晶铝导线孔洞的C状失稳过程, 在理论上解释了由于在内导线和封装层之间的传质过程而造成孔洞的成核和封装层的开裂, 为内导线临界线长的确定给出了新的公式。

## 5 新型薄膜的研制与薄膜力学

在国际上首次用石蜡中的粒子回收和合成技术获得 $\beta$ -CN<sub>4</sub>超硬相, 并得到较为完备的X射线光谱。并在多层膜技术下得到了调制低磁阻的优异材料结构。

由于薄膜与多层膜的厚度在纳米至微米量级, 其材料力学性能数据的测试便成为一个难题。一个可能的解决方法是采用微硬度测量。我们研究了膜基组件的微硬度测量过程, 提出了微硬度测量过程的顺序式参数辨识方法。

我们采用小角度和大角度X射线掠射法得以测量薄膜中的残余应力。发展了薄膜/基体粘结强度的滚压测试方法。

杨卫 供稿

---

## 《力学进展》获中国科学院优秀自然科学期刊奖

《力学进展》杂志参加了1996年度中科院优秀自然科学期刊评奖, 获三等奖。尽管有多项评奖条件(如成果首报量、论文报道的成果获奖情况及经济效益统计等)与《力学进展》性质不符, 但由于其社会效益显著, 专家、读者评价突出而受到重视。中科院出版图书情报委就这次评奖撰写的总结分析文章中特别指出, 对于进展类期刊的评奖仍有不够公正合理之处, 有待改进(见: 谢淑莲, 李廷杰. 中国科学院1996年度优秀期刊总体质量的综合分析. 中国科技期刊研究, 7, 4 (1996): 17—18)。

《力学进展》杂志取得的成绩, 凝聚了我国几代力学工作者的心血。我们借此向我国力学界的广大读者、作者、审稿者以及所有给予此刊厚爱的人们致以深切的谢意, 衷心期望它在各方面的爱护、支持下越办越好。

《力学进展》编辑部