



国家自然科学基金重大项目“材料损伤、断裂机理初宏观力学理论”子课题

变形与损伤的局部化理论

(1994—1996年工作总结)

1 损伤演化的物理方程

现有的大多数损伤演化方程均不是基于演化的物理机制，而是一种经验形式，因此讨论损伤局部化时只能就事论事。为了使研究工作有较好基础，探讨了损伤演化的物理方程。主要结果是：

(1) 建立了一套可观察，可采集实验数据的细观损伤演化的实验（单脉冲冲击和循环载荷）和数据处理方法。

(2) 建立了细观损伤相空间中微损伤数密度演化方程的整体框架，并结合上述实验具体处理了二种（一维和二维）偏微分方程，得到相应的解。

(3) 给出了一种联系细观和宏观损伤变量的途径，从而推导出了损伤演化的物理方程。发现，对细观损伤的线性粘性扩展，损伤演化方程可用经验参数拟合法在宏观层次上封闭。这与损伤演化经验方程相当。

(4) 对多种非线性损伤演化过程进行探索，着重于微损伤成核机理和宏微观尺度过程以及无序性效应的分析。认为，对于早期损伤，利用理想损伤模型是一种平均场方法，描述了损伤演化过程；对于晚期损伤，损伤破坏的共性特征可能是“损伤演化诱致突变”和样本个性。

2 循环加载下微损伤演化规律

主要结果有：

(1) 用定点跟踪损伤演化的方法，取得了大量疲劳短裂纹集体演化的观测数据，方法是有效的。

(2) 实验发现，疲劳短裂纹数密度的演化，在微裂纹的尺度空间上，存在双峰现象，双峰所在位置分别大于和小于平均晶粒尺寸。

(3) 根据微损伤数密度的演化方程和晶界阻碍微裂纹扩展的假设，数值模拟了微损伤演化，再现了实验观察的双峰。

(4) 数值模拟表明，破坏时的临界损伤分数具有较宽分散带，不是一确定值。

(5) 进一步计算模拟短裂纹损伤局部化的过程，重点考察裂纹取向分布和晶粒边界对

裂纹群体行为的影响；基于裂纹数密度演化的模型，分析短裂纹群体损伤向局部化转变的临界时间及其影响因素。

(6) 用扫描电镜在位拉伸，实时观察单调载荷下，其变形、损伤由均匀演化为集中的局部化过程；结合材料表面激光毛化处理的背景，研究表面层粗糙度，残余应力及细观组织状态对损伤局部化以至对疲劳寿命的影响。

3 变形局部化的微观机制

主要结果有：

(1) 建立了可实现单脉冲加载的动态扭转装置，消除了波反射造成的二次加载效应。为实现变形局部化的宏-微观相关研究提供了较可靠的基础。

(2) 针对几种典型合金材料和复合材料进行单脉冲加载实验，考察了微损伤发生汇合和变形局部化的演化过程，并分析了在这过程中标度律和微结构演化的因素。认为，在局部化过程中，微结构演化是剪切带导致材料失效的重要因素。

(3) 实验总结出强度是产生剪切带的敏感量，且随强度提高剪切带变窄。

(4) 实验观察到加工硬化段是位错产生、交互作用并形成不易滑动的六角位错网络的结果。

(5) 剪切带的形成是个局部化过程，软化时主要发生如下事件：晶体转动，取向变化；位错胞墙形成，拉长，崩溃；组织结构损伤，微孔洞（裂纹）成核，生长与聚合。

4 变形的局部化计算模拟

主要结果为：

(1) 用总体拉格朗日及非线性大变形有限元格式，自适应网格和分岔后稳定分支搜索技术，完成单晶体变形局部化的数值模拟。

(2) 针对多晶材料，提出了二维任意多边形单元方法，证明了其等参元是协调元。计算结果成功地模拟了单向拉伸试件的剪切局部化带，以及紧缩现象。

(3) 完成任意多边形二次单元有限元分析的理论推导和程序编制。

(4) 将近代数学中“小波变换”理论引入细观力学。利用小波具有局部性的特点，有效地模拟了局部化剪切带的几何特征。建立了正交 Haar 小波多边形有限元。在常规有限元形函数基础上，当检测到局部化即将发生的情况下，加入小波非协调项，这种新型的非协调有限元能通过分片试验。

(5) 推导了晶界有限元的大变形非线性格式。

(6) 综合运用高密度云纹、形貌仪和激光 Raman 微探针技术，对 Ce-TZP 多晶体结构陶瓷在室温下应力诱导相变塑性行为进行了宏细观实验研究。完成了高难度单轴拉伸下局部化现象的观测。

(7) 采用考虑体膨胀和剪切效应的细观本构模型 (Sun, et al)，将控制相变本构行为的参数归结为硬化系数 α 和相变剪切效应 h_0 ，导出了多轴非比例加载相变局部化的必要条件表达式，并对单轴拉伸与单轴压缩情况进行了分析，理论结果与实验观测基本相符。

白以龙 供稿