

微尺度力学与有限元方法

魏悦广

中国科学院力学研究所, 北京 100190

随着纳微电子、纳微机械以及纳米材料技术的迅猛发展, 人们迫切需要发展系统的微尺度力学理论以建立适合纳微电子产品和纳米新材料的力学性能设计标准和质量标准。

微尺度力学理论的建立既可基于大量的微尺度力学实验, 又可基于微观物理分析等途径。大量的实验研究显示: 当固体的特征尺度小于百微米时, 固体材料及结构的力学性能表现出强烈的尺度效应, 而这种尺度效应由传统连续介质理论无法预测。代表性实验现象包括: 当金属薄膜厚度在微纳米尺度时, 薄膜/陶瓷基体体系在薄膜脱胶时展现出了超强的界面断裂特征, 其断裂强度接近甚至超过宏观屈服强度的十倍, 而由传统弹性理论预测出的断裂强度仅为材料屈服强度的 3 至 5 倍; 在微压痕实验中, 当压入深度小于微米时, 测量的硬度随压入深度的减小急剧升高, 而传统情况为硬度与深度无关; 在使用扭转实验测量材料的剪应力—应变关系时, 当试样的直径小到几十微米时的测量结果随尺寸的减小迅速上升, 等等。特别是近年来, 人们采用 FIB (聚焦离子束) 微加工先进技术制做出了更小的试样尺寸——亚微米甚至百纳米尺度的单晶柱, 压缩试验中测量出具有强烈尺度效应的应力应变关系以及无尺度效应的杨氏模量。为了表征尺度效应, 有两种研究思路: 一种是从微观物理方法 (量子、原子模拟; 统计连续及准连续等) 出发进行研究 (Bottom-Up 方法); 另一种思路是 Top-Down 方法, 即基于连续介质力学框架建立和发展的表征尺度效应的微尺度力学理论。在本文中, 将同时介绍两种理论和方法, 主要包括: 应变梯度理论、表面界面能理论、同时考虑应变梯度效应和表面效应的微纳米理论、统计热力学的连续与准连续理论以及 Cauchy-Born 法则等。

针对微尺度力学理论, 在很多情况下传统的有限元方法失效, 如何建立有效的有限元方法是一个十分具有挑战性的问题。在本文中, 主要针对应变梯度理论的有限元方法展开分析。指出 Zienkiewicz 的 C1 连续单元法对于应变梯度理论失效的原因, 提出有效的适合应变梯度理论的有限元方法。

关键词: 微尺度力学; 有限元法; 尺度效应