

微尺度塑性理论和应用

王自强

中国科学院力学研究所 100195

摘要

纳米材料和器件的蓬勃发展,微机电系统和微电子元件微型化趋势,先进材料微结构设计以及精细薄膜涂层,促使材料科学家和力学家关注微米尺度和纳米尺度范围内材料的力学行为。

大量实验表明,当非均匀塑性变形的特征长度在微米量级时,金属材料材料呈现很强的尺度效应。典型的实验包括:细铜丝扭转;纯镍薄膜弯曲;不同金属材料的微纳米压痕;碳化硅粒子增强的铝-镁基复合材料实验。

本文简要回顾微尺度塑性理论发展概况,说明了 Fleck-Hutchinson 的应变梯度理论和 Gao 和 Huang 等人的 MSG 理论成功地解释了大量的实验现象。但是这些理论均包含高阶应力,其控制方程和附加的边界条件相当复杂,而且与高阶应力对应的附加边界条件往往难以唯一确定,这给分析和计算带来很大的困难。

为此作者和合作者提出了《不含偶应力和高阶应力的塑性应变梯度理论》。这个理论保持经典塑性理论的基本框架,只是在切线模量中引入拉伸应变梯度和弯扭张量的影响。其控制方程并不比经典理论的控制方程复杂,而且不包括附加的边界条件,从而给分析和计算带来很大方便。这个理论成功预测了细铜丝扭转;纯镍薄膜弯曲;不同金属材料的微压痕;薄膜基底的微压痕;碳化硅粒子增强的铝-镁基复合材料等的实验结果。

作者和合作者又提出了《不含高阶应力的塑性应变梯度理论》。该理论在偶应力理论基础上,将拉伸应变梯度引入切线模量之中。

利用该理论成功地预测了局部剪切带的宽度和带内外剪切应变率的分布。

本文进而介绍了作者和合作者最近提出的《非局部理论新框架和基于新框架的塑性应变梯度理论》。经典的非局部理论将宏观应力看作是非局部量,它不涉及高阶应力,跟目前流行的塑性应变梯度理论没有任何内在的联系。

本文将体元的应变能密度看作是非局部量,提出了非局部理论新框架。能量非局部模型的本构关系不仅包括宏观应力的非局部公式而且包括高阶引力的非局部公式。前者与经典非局部理论的公式一致。

在此新框架基础上建立了塑性应变梯度理论。该理论成功预测了细铜丝扭转;纯镍薄膜弯曲和金属材料的微压痕的实验结果。