

基于剪切修正 GTN 模型的金属弹性退化机理研究¹⁾

肖文康 张纯禹²⁾

(中山大学中法核工程与技术学院, 广东珠海 519082)

摘要 许多金属材料在进行显微或宏观压入测试时, 测得的弹性模量会随着压入深度的增大而不断降低. 考虑到在压痕测试过程中金属材料并不产生明显的裂纹, 这种性能退化应是由材料的损伤引起. 然而, 经典损伤理论认为以受压和受剪为主的压入变形不会引起材料软化和损伤. 本文结合剪切变形下材料损伤的萌生和演化机理, 对经典的 GTN (Gurson-Tvergaard-Needleman) 模型进行了修正, 对压入测试进行了有限元模拟. 模拟结果显示, 材料在压入过程中的损伤是由现有空洞的扭曲变形和次级空洞的萌生共同引起, 如果只考虑现有空洞变形则会低估材料在压入变形过程中的损伤演变.

关键词 压痕法, 损伤, 有限元模拟

中图分类号: O39 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-15-235

THE DEGRADATION OF THE ELASTIC PROPERTIES OF METALLIC MATERIALS EVALUATED BASED ON AN EXTENDED GTN MODEL¹⁾

XIAO Wenkang ZHANG Chunyu²⁾

(Sino-French Institute of Nuclear Engineering & Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, Guangdong, China)

Abstract Although an indentation does not induce apparent cracking in ductile materials, the degradation of the elastic stiffness of ductile metals does occur in micro-/macro- indentation tests. After comparing the degradation predicted based on extended damaged-plasticity models with that measured by experimental testing, it is found that the softening due to the distortion of the existing voids is not enough to cause a notable degradation of elasticity. It is suggested that an independent damage-nucleation mechanism due to the shear deformation may be in operation. Although attractive in practical applications for its nondestructive nature, the damage-based indentation technique for estimating the fracture properties of ductile materials needs further investigations.

Key words indentation technique, damage, finite element modeling

引 言

随着精密仪器和控制技术的进步, 仪器化压入技术被广泛地用于表征材料的力学性能, 其中弹性性能的压入表征方法得到了最系统的研究^[1]. 在纳

米尺度进行压入测试时, 由于表面效应、摩擦效应以及应变梯度塑性等因素的作用, 测得的弹性模量会随着压入深度的增大而有所变化, 但超过一定深度后变化不再明显. 在微观和宏观层次上进行压痕测试时, 由于压入尺寸效应不明显, 通常会认为测得的

2015-10-09 收到第 1 稿, 2015-11-23 收到修改稿.

1) 广州市科技计划资助项目 (1563000624).

2) E-mail: zhangchy5@mail.sysu.edu.cn

引用格式: 肖文康, 张纯禹. 基于剪切修正 GTN 模型的金属弹性退化机理研究. 力学与实践, 2016, 38(2): 153-157

Xiao Wenkang, Zhang Chunyu. The degradation of the elastic properties of metallic materials evaluated based on an extended GTN model. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(2): 153-157

弹性模量对压入深度不敏感. 然而, 大部分金属材料在进行显微压入试验或宏观压入试验时都会发现, 测得的弹性模量会随着压入深度的加大而显著降低(如图 1). 基于该现象, 许多研究者尝试将压痕技术作为一种无损手段来测量金属材料的断裂韧性^[2-3]. 和脆性材料不同, 韧性材料在压入过程中并不会产生明显的裂纹, 因此这种性能退化应该归因于压入变形引发的材料损伤. 由于涉及材料损伤和弹塑性损伤, 损伤塑性理论是研究压入损伤的合理手段. 然而, 经典的塑性损伤理论认为以受压和受剪为主的压入变形不会引发材料软化和损伤, 因此, 这种由压入变形引发的材料力学性能退化需要从机理上进行深入的研究.

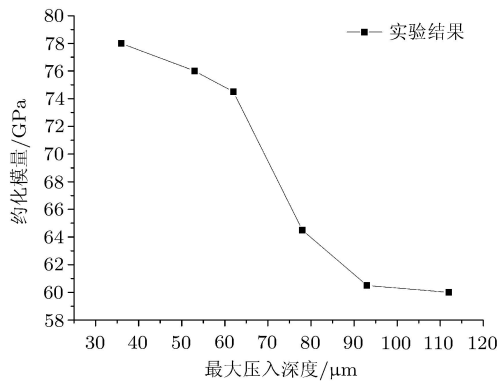


图 1 铝片的弹性模量随着压入深度增加而下降

在多种塑性损伤模型中, Gurson-Tvergaard-Needleman(GTN) 模型^[4-5] 由于能很好地描述材料在高应力三轴度下的损伤行为而得到了广泛的应用. 但是, 经典的 GTN 模型认为, 只有在拉应力状态下(三轴应力为正), 空洞才会萌生和演化, 以受压和受剪为主的压入变形(三轴应力为负)并不会引发金属材料的损伤和软化. 本文结合剪切变形下材料损伤萌生和演化的机理, 对经典的 GTN 模型进行了修正和有限元实现, 然后利用有限元模拟对压入测试进行模拟, 尝试对压入变形引起的材料性能退化进行合理的解释.

1 改进的 GTN 模型

1.1 经典的 GTN 模型

GTN 模型基于塑性材料单元中含有球形空洞的基本假设, 通过引入了空洞率 f 这一参数, 根据刚

塑性理论得到的退化材料的屈服函数如下^[4]

$$\phi(q, \sigma_0, f, \sigma_m) = \frac{q^2}{\sigma_0^2} + 2f \cosh\left(\frac{3\sigma_m}{2\sigma_0}\right) - 1 - f^2 = 0 \quad (1)$$

式中, σ_m 是平均应力, q 是等效的 Von-Mises 应力, σ_0 是基体材料的屈服强度, f 为空洞率. Tvergaard 考虑材料的硬化以及剪切应变下产生的剪切变形带后, 经过数值分析修正了 Gurson 模型的一些参数, 改进后的屈服函数如下^[5]

$$\phi(q, \sigma_0, f, \sigma_m) = \frac{q^2}{\sigma_0^2} + 2q_1 f \cosh\left(\frac{3q_2 \sigma_m}{2\sigma_0}\right) - 1 - (q_3 f)^2 = 0 \quad (2)$$

式中, q_1, q_2 和 q_3 是修正参数, 当 $q_1 = q_2 = q_3 = 1$ 时, 表达式同式 (1). Tvergaard 在研究一些含空洞的材料后发现, 这些修正参数与硬化指数存在着明确的对应关系^[4].

材料中的空洞会随着材料的变形而不断地演化^[4]

$$\dot{f} = \dot{f}_{\text{nucleation}} + \dot{f}_{\text{growth}} \quad (3)$$

式中, \dot{f} 为空洞演化率, $\dot{f}_{\text{nucleation}}$ 为空洞成核率, \dot{f}_{growth} 为空洞增长率, 其中

$$\dot{f}_{\text{nucleation}} = \frac{f_N}{s_N \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\epsilon}^p - \epsilon_N}{s_N}\right)^2\right] \bar{\epsilon}^p \quad (4)$$

$$\dot{f}_{\text{growth}} = (1 - f) \bar{\epsilon}_v^p \quad (5)$$

随着空洞的长大, 当其体积达到临界值的时候, 受外界应力的作用下, 便会与周围的空洞发生连接. GTN 模型对空洞聚合采取了经验性的处理, 即假设当空洞率达到了一个临界值 f_c 时聚合才会发生, 当达到另一个临界值 f_F 时, 聚合就完成了. Tvergaard 和 Needleman 在 1984 年提出用空洞有效体积 f^* 来代替 f ^[5]

$$f^* = \begin{cases} f, & f < f_c \\ f_c + \left(\frac{1}{q_1} - f_c\right) \frac{f - f_c}{f_F - f_c}, & f \geq f_c \end{cases} \quad (6)$$

1.2 GTN 模型的改进

在所受三轴应力较大和以空洞生长为主的情况下, 上述经典的 GTN 模型可以很好地预测断裂位置. 但在剪切力主的情况下, 经典模型却无法描述空洞的演化. 实际上, 经典的 GTN 模型假定空洞不会在三轴应力为负的情况下形成和生长.

为了让 GTN 模型适用于剪切应力主导的情况, Nahshon 和 Hutchinson 通过修正 \dot{f}_{growth} 来表现空洞扭曲变形引起的剪切软化^[6]; 考虑到空洞扭曲变形并不会改变空洞率, Xue^[7] 认为剪切软化应该被分开考虑, Xue 通过引入洛伦角函数 g , 提出了一个新的损伤参数 D ; Nahshon-Hutchinson 和 Xue

的修正模型都建立在剪切变形不会形成新的空洞和剪切软化只作用在现有的空洞上. 然而现实中, 工程合金有可能在剪切作用下因二相粒子的断裂而产生次级的空洞. 类似于塑性应变或静水压力情况下的成核机制, Malcher 等^[8] 提出了一个独立的空洞剪切成核机制. 3 个修正模型的具体内容见表 1.

表 1 剪切变形引起的空洞演化修正

| 修正名称 | 主要修正公式 | 修正说明 |
|-----------------------|--|---|
| Nahshon-Hutchinson 修正 | $\dot{f}_{\text{growth}} = (1-f)\dot{\varepsilon}_p^v + kf \left[1 - \left(\frac{27J_3}{2q^3} \right)^2 \right] \frac{\dot{P}}{q}$ | 式中, 右边第 2 项表示空洞变形引起的剪切软化, k 是比例系数, J_3 是偏应力张量的第三不变量, \dot{P} 是塑性功率. |
| Xue 修正 | $\dot{D} = \delta_D (q_1 \dot{f} + \dot{D}_{\text{shear}})$ $\dot{D}_{\text{shear}} = q_3^* f^{q_4} \bar{\varepsilon}_p \dot{\varepsilon}_p g$ | 其中, \dot{D}_{shear} 是剪切损伤率, q_3 和 q_4 是材料常数, $\bar{\varepsilon}_p$ 是等效应变. 在受到广义拉力时, $g = 0$, \dot{D}_{shear} 不起作用, 而在广义剪切的作用下, $g = 1$. 当 $D = 1$ 时, 材料将发生断裂. 这一修正参数可以被看成是一个对屈服函数没有影响的指标. |
| 成核机制 | $\dot{D}^n = \frac{D_N}{s'_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\varepsilon}^p - \varepsilon'_N}{s'_N} \right)^2 \right] \dot{\varepsilon}$ | 式中, \dot{D}^n 表示损伤成核率, D_N 表示可能成核的二相粒子所占比例, ε'_N 和 s'_N 分别表示二相粒子成核的平均应变和其标准差, $\bar{\varepsilon}^p$ 表示等效塑性应变. |

1.3 弹性模量与损伤参数的关系

假设球形空洞在连续介质内均匀分布, 则损伤参数 D 是一个空洞比 f 的简单函数^[2]

$$D = \frac{\pi}{(4\pi/3)^{2/3}} f^{2/3} \quad (7)$$

结合上述 GTN 模型的修正, 此处的空洞率 \dot{f} 表达式为

$$\dot{f} = (1-g)\dot{f}_{\text{nucleation}} + \dot{f}_{\text{growth}} + \dot{D}_{\text{shear}} + g\dot{D}^n \quad (8)$$

衰减的弹性模量 E_D 可以通过下式得出^[9]

$$E_D = (1-D)E_0 \quad (9)$$

其中, E_0 为本底材料的杨氏模量.

2 结果和讨论

上文提到的 GTN 模型各个修正版本已经通过编写 UMAT 子程序的方式添加到经典的 GTN 模型中. 本文使用图 2 中的结构化网格, 在 ABAQUS 6.13 中对压入变形进行了数值模拟. 此网格为轴对称网格, 为了尽可能地减少尺寸效应的影响, 材料的边长和厚度均设为最大接触直径的 10 倍. 球形压头被设定为刚性弧.

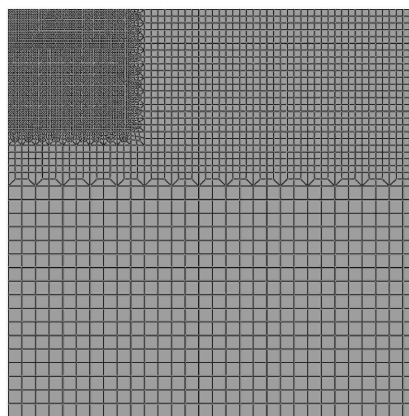


图 2 压入变形模拟的有限元网格

2.1 不同机制下的损伤演变模拟

Nahshon-Hutchinson 和 Xue 的修正模型均忽略了损伤成核机制, 假设在剪切作用下不会产生新的空洞, 剪切软化仅仅作用在现有空洞的扭曲上. 从图 3(a) 可以看到, 剪切软化的效果明显地集中在压头侧面的一个较为窄小的区域内. 而在考虑损伤聚合的情况下, 由于假设新的损伤会在二相粒子周围形成, 因此从图 3(b) 可以看到在压头下面一个较大的范围内都有因剪切作用引起的损伤.

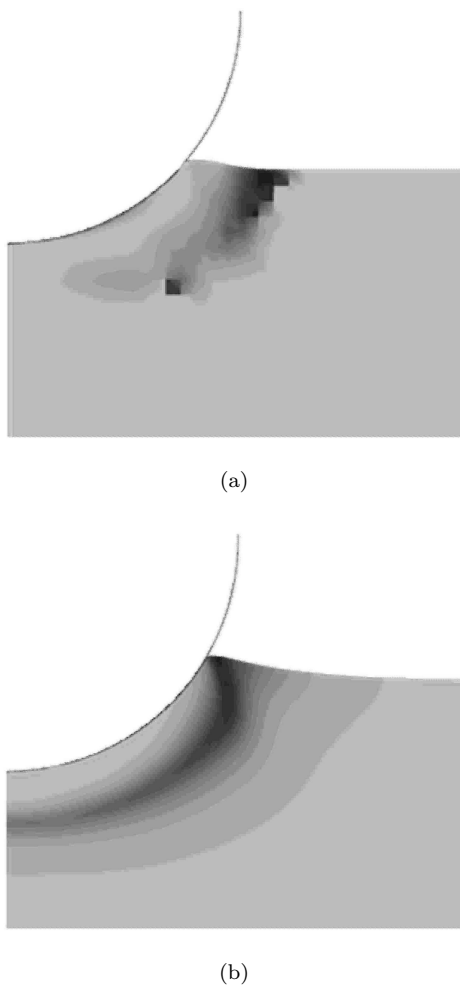


图3 不考虑成核机制与考虑成核机制的损伤演变对比

2.2 弹性模量下降曲线拟合

为了研究弹性模量下降与材料损伤之间的关系,分别用两种修正模型对图1的压入进行了模拟,并通过修改模型中的参数使计算结果尽可能逼近实验结果.铝片的弹塑性参数设定值为: $E = 72 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$, $n = 0.1$.

从图4不难看出,Nahshon-Hutchinson修正模型只能定性给出弹性模量下降的上限和下限,其预测的下降速度明显低于实际速度,由此可得Nahshon-Hutchinson修正模型低估了损伤的演变.在考虑损伤成核机制后,Xue修正模型较为准确地预测出了弹性模量的下降趋势.这一结果在一定程度上验证了损伤成核这一设定的合理性.

经反复试验,得到最优模型参数见表2.

表2 铝片弹塑性参数

| q_1 | q_2 | q_3 | q_4 | f_0 | f_N | ε_N | s_N | f'_N | ε'_N | s'_N |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|-------|--------|------------------|--------|
| 1.5 | 1.0 | 3.0 | 1/3 | 0.005 | 0.1 | 0.1 | 0.06 | 0.2 | 0.1 | 0.06 |

为了进一步验证考虑损伤成核机制下Xue模型的适用性,继续对一份韩国实验结果^[2]进行分析.

从图5中可以看出,考虑损伤成核机制后的Xue修正模型能够定量地给出不同类型的钢的弹性模量的下降趋势的上限和下限.

从上述模拟结果可以得出,在剪切作用下,仅仅考虑现有空洞扭曲变形产生的损伤并不充分,而且次级空洞的生成对剪切损伤有很大影响.

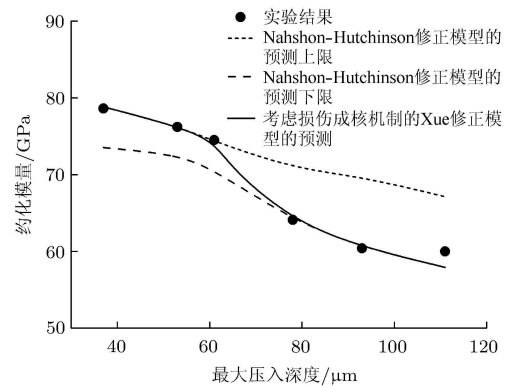


图4 不同模型对铝片的弹性模量下降趋势的预测

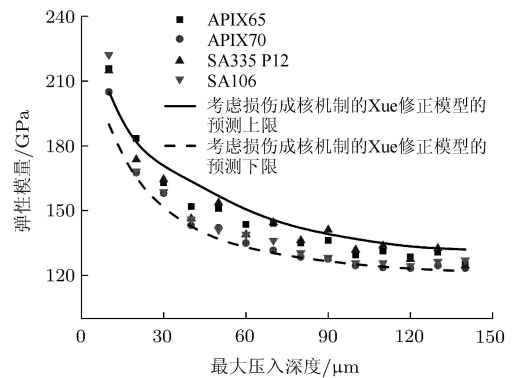


图5 考虑损伤成核机制的Xue修正模型的预测结果

3 结论

本文利用多种修正后的GTN模型对压入过程进行模拟,发现考虑损伤成核机制后的Xue修正模型对压入变形导致的弹性性能下降的描述最为准确.模拟结果显示,材料在压入过程中的损伤是由现有空洞的扭曲变形和次级空洞的萌生共同引起,如果只考虑现有空洞变形则会低估材料在压入变形过程中的损伤演变.因此,在应用压痕技术评估韧性材料的力学性能时,必须要严谨地选择正确力学模型来对实验结果进行分析,否则可能会得出存在较大偏差的评估结论.此外,在拟合过程中,剪切作用对损

伤变化速度的影响明显,可以看出压入变形造成的损伤更多是由剪切力引起的。

参 考 文 献

- 1 Oliver WC, Pharr GM. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology. *J Mater Res*, 2004, 19: 3-20
- 2 Lee JS, Jiang J, Lee BW, et al. An instrumented indentation technique for estimating fracture toughness of ductile materials: a critical indentation energy model based on continuum damage mechanics. *Acta Mater*, 2006, 54: 1101-1109
- 3 Amiri S, Lecis N, Manes A, et al. A study of a micro-indentation technique for estimating the fracture toughness of Al6061-T6. *Mech Res Commun*, 2014, 58: 10-16
- 4 Gurson AL. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: part 1. Yield criteria and flow rules for porous ductile media. *ASME J Eng Mater Technol*, 1977, 99: 2-15
- 5 Tvergaard V, Needleman A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. *Acta Metall*, 1984, 32: 157-169
- 6 Tvergaard V. Influence of voids on shear band instabilities under plane strain condition. *Int J Fract*, 1981, 17: 389-407
- 7 Xue L. Constitutive modeling of void shearing effect in ductile fracture of porous materials. *Eng Fract Mech*, 2008, 75: 3343-3366
- 8 Malcher L, Reis FJP. Evaluation of shear mechanisms and influence of the calibration point on the numerical results of the GTN model. *Int J Mech*, 2013, 75: 407-422
- 9 Lemaitre J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture. *J Engng Mater Tech*, 1985, 107: 83-89

(责任编辑: 刘希国)

《力学学报》将刊发《隧道及地下结构》专题

论文题目: 隧道及地下工程的基本问题及其研究进展 (综述性论文)

作者简介: 张顶立, 北京交通大学教授, 土木建筑工程学院院长, 973 项目首席科学家, 北京交通大学隧道及地下工程学科带头人。

论文题目: 城市轨道交通地下结构性能演化机制

作者简介: 朱合华, 同济大学教授, 教育部长江学者特聘教授、973 项目首席科学家, 同济大学隧道及地下工程学科带头人。

论文题目: 高度铁路隧道空气动力学效应及其控制

作者简介: 高波, 西南交通大学教授, 土木工程学院院长, 西南交通大学隧道工程学科带头人。

论文题目: 盾构管片隧道结构设计理论与方法

作者简介: 何川, 西南交通大学教授, 教育部长江学者特聘教授、杰出青年基金获得者, 西南交通大学科学研究院院长。

论文题目: 岩溶隧道灾害形成机理与控制研究

作者简介: 李术才, 山东大学教授、副校长, 教育部长江学者特聘教授、杰出青年基金获得者, 973 项目首席科学家。

论文题目: 城市地下结构抗震性能研究

作者简介: 陶连金, 北京工业大学教授, 岩土及地下工程学科带头人。

论文题目: 隧道支护与围岩动态作用模型及其应用

作者简介: 张顶立, 北京交通大学教授, 土木建筑工程学院院长, 973 项目首席科学家, 北京交通大学隧道及地下工程学科带头人。

论文题目: 隧道施工影响下城市地下结构的变形响应

作者简介: 侯艳娟, 北京交通大学博士, 从事城市地下工程的教学与研究工作。