

非晶合金剪切带失稳临界条件及方向*

陈艳 戴兰宏

(中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京, 100190)

摘要 室温下的变形局部化及其诱致的脆性断裂是抑制非晶合金作为结构材料应用的重要原因。在低于玻璃态转变温度及高应力作用下, 非晶合金将经历初始均匀变形到剪切局部化的过程。这种转变通常发生在某个临界点。在该点, 材料内部的变形发生分叉, 某个局域的变形率与周围区域出现不连续的现象。实际上, 剪切带的形成可以认为是材料本构失稳或变形分叉的结果。这种失稳发生的临界条件与材料密切相关。然而, 非晶合金不同应力条件下的剪切带失稳条件及方向仍有待进一步研究。基于此, 本文考虑了非晶合金压力敏感、剪胀及内部微结构演化等一系列特性, 建立了非晶合金新的本构方程; 将材料变形分叉理论与新的非晶合金本构相结合, 得到了不同应力条件下变形局部化发生的临界条件, 进一步预测了剪切带发生的方向, 从而建立了材料微观起源与宏观连续本构失稳之间的关联。

关键词: 非晶合金 剪切带失稳 压力敏感 剪胀。

一、背景介绍

非晶合金的室温塑性与局部化剪切带行为密切相关。作为裂纹的前兆, 剪切带行为对于理解非晶合金的破坏机理, 调控其宏观塑性至关重要。非晶合金剪切带的起源最初被认为是由自由体积软化或热软化等单一因素控制。而越来越多的研究表明, 非晶合金剪切带形成是自由体积-热耦合作用的结果。基于热力耦合本构, Dai 等^[1, 2]、Jiang 和 Dai^[3]得到了一维简单剪切构型下的剪切带失稳判据。Rudinicki 和 Rice^[4]针对压力敏感及剪胀效应的材料本构, 得到了均匀变形本构失稳的临界条件以及剪切失稳路径的偏转角。剪切失稳路径是应力状态依赖的, 通过剪切失稳临界条件可以确定不同加载条件下的剪切带偏转角。然而, “无内变量”的压力敏感本构无法体现非晶合金的特点。因此, 如何得到非晶合金不同应力状态下的剪切带失稳条件和路径成为亟需解决的问题。基于此, 本文通过建立非晶合金剪切带失稳理论模型, 得到了剪切带失稳临界条件及方向。

二、理论模型

实验表明非晶合金屈服变形具有压力敏感和剪胀效应, 且其剪切局部化与内部微结构演化密切相关。将非晶合金中的自由体积等效为原子尺度的微孔洞, 微孔洞含量的多少直接影响材料的屈服行为。通过考虑非晶合金压力敏感、剪胀及内部微结构演化等一系列特性, 基于 GTN 模型^[5-7], 建立了非晶合金新的本构方程, 将材料变形分叉理论与新的非晶合金本构相结合, 得到了不同应力条件下变形局部化发生的临界条件^[8]:

$$A_c = \left(-\sqrt{B^2 - 4C_1^2 D} - B \right) / 2q_1 C_1^2 \quad (1)$$

其中 A_c 是临界自由体积增量, 临界失稳因子 $I_c = q_1 A_c$ 。 q_1 是 GTN 模型引入的材料

* 注: 国家自然科学基金 (批准号: 11202221, 11132011 和 11372315), 非线性力学国家重点实验室开放基金资助项目。

常数, B , C_l , D 是与应力状态及材料参数相关的函数。即存在一个临界自由体积增量, 当材料在外载作用下产生的自由体积未达到临界自由体积增量时, 材料将经历均匀变形, 一旦自由体积含量达到临界自由体积增量, 材料内部将发生剪切局部化。

三、结果与讨论

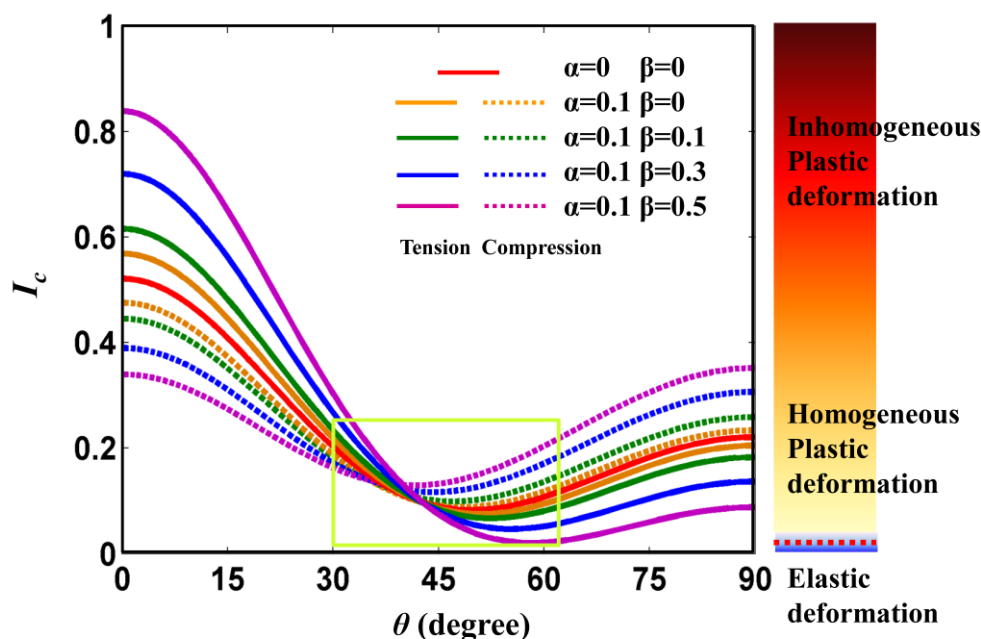


图 1 不同压力敏感及剪胀系数条件下, 临界失稳因子随潜在剪切带失稳方向变化规律。

当自由体积增量满足条件 (公式 (1)) 时, 材料本构将发生失稳, 此时剪切带将在初始均匀变形的非晶合金基体中形核。同时剪切带的偏转方向与自由体积增量密切相关。图 1 给出了单轴拉伸 (实线) 及单轴压缩 (虚线) 加载条件下, 临界失稳因子随潜在剪切带失稳方向的变化规律。当 $\alpha=\beta=0$ 时, 拉压曲线重合, 临界失稳因子最小值出现在 45° 附近。当 $\alpha=0.1$ 时, 随着 β 的增大, I_c 最小值在拉伸端逐渐减小而在压缩端逐渐增加。值得注意的是, 拉伸条件下的自由体积增量阈值通常低于压缩的阈值, 说明拉伸较压缩更容易发生剪切局部化, 这与实验观测结果一致。同时, 可以发现 I_c 最小值对应分布方向依赖于 β (或 α) 参数, 当增加 β 时, 该分布方向偏离 45° ; 通常拉伸下大于 45° ; 压缩下小于 45° 。剪切带失稳优先沿着自由体积增量阈值最低的方向发生。

四、结论

通过考虑非晶合金压力敏感、剪胀及内部微结构演化等特性, 建立了非晶合金新的本构方程, 结合材料变形分叉理论, 得到了不同应力条件下变形局部化发生的临界条件及对应的方向。研究发现, 剪切带失稳临界条件明显依赖于压力敏感系数 α 和剪胀系数 β , 且两个系数的变化在单轴拉压应力载荷下具有相反的变化趋势。 α 和 β 的增大, 导致拉伸失稳阈值减小而压缩失稳阈值增大, 意味着压缩载荷下材料在失稳前可以发生更多的均匀塑性变形, 而拉伸应力下几乎不经历或经历很少的均匀变形。较压缩条件, 材料

在拉伸应力下更容易发生剪切局部化，这也很好的说明了为什么非晶合金拉伸塑性明显低于压缩塑性；进一步预测了剪切带发生的方向，随着压力敏感系数 α 的增大，拉压端剪切带夹角逐渐偏离 45° ；拉伸端大于 45° ，压缩端小于 45° ；这与实验观测到的剪切带形成路径相吻合。

参 考 文 献

1. Dai, L.H., et al., Appl Phys Lett, 2005. 87: 141916.
2. Dai, L.H., Shear banding in bulk metallic glasses, in Adiabatic shear localization: Frontiers and advances, B. Dodd and Y.L. Bai, Editors. 2012, Elsevier: London. p. 311-361.
3. Jiang, M.Q. and L.H. Dai, J Mech Phys Solids, 2009. 57(8): 1267-1292.
4. Rudnicki, J.W. and J.R. Rice, J Mech Phys Solids, 1975. 23: 371-394.
5. Gurson, A.L., Transactions of the ASME, 1977. 99(1): 2-15.
6. Tvergaard, V., International Journal of Fracture, 1981. 17(4): 389-407.
7. Needleman, A. and V. Tvergaard, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1984. 32: 461-490.
8. Chen, Y. and L. Dai, Journal of Materials Science & Technology, 2014. 30(6): 616-621.