

83-86

成形极限曲线的新概念*

陈光南

胡世光

(中国科学院力学研究所 北京 100080) (北京航空航天大学)

A

摘要 失稳理论是成形极限曲线 (FLC) 的理论基础。本文论述了 FLC 理论研究 中存在的问题。研究指出, 一般出厂板的表面状况不会影响板料的集中失稳, 板内损伤平面应变时最严重; 双拉时, 板内损伤的积累、发展, 导致应力状态向平面应变漂移, 拉压时, 载荷失稳后引起的双拉, 也会导致平面应变。因此平面应变状态的出现是板料集中失稳的共同原因。在此基础上, 建立了 FLC 左右两半部统一的模型。新模型与试验结果符合良好, 优于 M-K 理论。

关键词: 板料成形 失稳 成形极限

0 前言

板料成形的基本变形方式, 不外两种类型、四种状态。即以拉伸为主的“放”(Stretching, 包括拉一拉、拉一压两种状态) 和以压缩为主的“收”(Shrinking, 包括压一拉、压一压两种状态)^[1]。目前生产中广泛应用的成形极限曲线 (FLC), 实际上仅在单拉与双向

等拉之间, 其应力与应变状态范围分别是: 拉压区 (FLC 的左半部): $0 \leq \alpha \leq \frac{r}{1+r}$, $-\frac{r}{1+r} \leq \rho \leq 0$; 拉一拉区 (FLC 的右半部): $\frac{r}{1+r} \leq \alpha \leq 1$, $0 \leq \rho \leq 1$ ($\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$, $\rho = \frac{e_2}{e_1}$)。

拉伸失稳理论是建立 FLC 的理论基础。近 10 多年来, 一直受到学术界和工程界的广泛关注, 是塑性理论中一个十分活跃的研究方向^[2]。

目前, 文献中关于预报成形极限的理论研究, 存在两个明显的问题: 其一是 FLC 两半的理论基础不统一, 左半以 Hill 的集中性失稳准则为依据, 右半则以 M-K 假说为出发点; 其二是 M-K 理论缺乏坚实的实验根据, 基础薄弱。

应用宏观、细观和微观等观测分析手段, 系统地研究了金属薄板的拉伸失稳机制, 针对上述问题, 提出了成形极限曲线的统一的物理模型, 在此基础上建立了计算 FLC 的数学模型, 并对计算结果作了试验验证。

1 板面状况对集中性失稳的影响^[3,4]

用金相显微镜及扫描电镜、静、动态观测研究了板面粗化的机制, 应用形貌仪和网格技术

* 国家自然科学基金、国家教委博士点基金、航空科学基金资助项目。19911010 收到初稿, 19920809 收到修改稿

观测分析了抛光板和毛面板在不同变形方式和变形程度下板面粗糙度的变化, 并用人工划痕毛料考察了表面局部缺陷对集中失稳的影响, 提出以下与 M-K 模型有关的看法:

(1) 板面粗化有三种机制: 表面缺陷的扩展, 滑移带的产生、发展和晶粒的转动。板面缺陷是三维参量, 具有明显的随机性, 不可能按 M-K 模型作有序排列, 并以参量——初始不均度衡量。晶粒转动造成的表面起伏是粗糙度增加的主要来源, 其大小与方位取决于变形程度与变形方式, 是塑性变形后才出现的新形貌, 与 M-K 模型所定义的初始不均度没有关系。

(2) 人工划痕试验表明, 划痕深度有一临界值, 小于此值时, 变形后划痕被掩盖淡化, 集中失稳发生在划痕之外; 大于此值时, 变形后划痕迅速深化, 集中失稳发生在划痕之内 (图 1)。

此临界值一般均明显大于出厂板的表面缺陷, 也大大超过文献中引用 M-K 模型时所设定的初始不均度 f_0 值 (图 1 中损伤参数 $D = \frac{\text{划痕深度}}{\text{板料厚度}} = 1 - f_0$)。

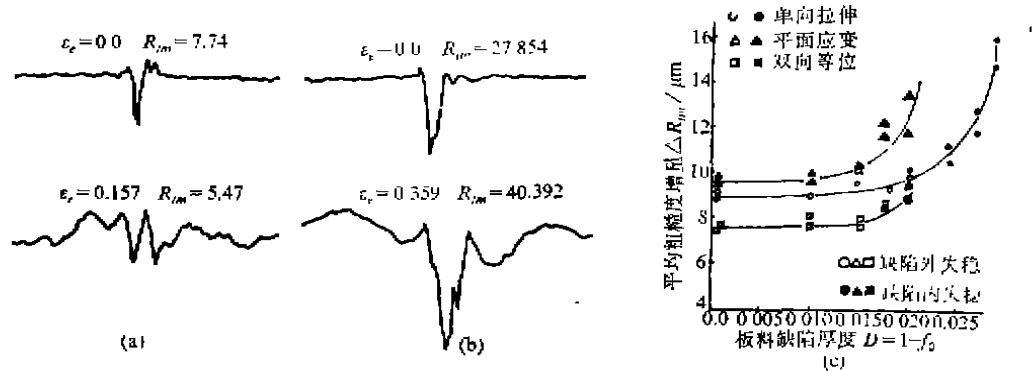


图 1

- (a) $D < D_c$, 变形后划痕淡化掩盖, 集中失稳发生在划痕之外 (R_m 单位为 μm)
- (b) $D > D_c$, 变形后划痕迅速深化, 集中失稳发生在划痕之内 (R_m 单位为 μm)
- (c) 划痕深度对粗糙度增量 ΔR 和集中失稳的影响 (试验板材: SPCEEN)

因此, 可以认为: 一般成形用板料, 出厂状态的表面形貌及其变形后的发展变化不会导致应变集中, 也不会影响其极限应变。文献中广为引用的 M-K 模型, 在实际板料上是不存在的。

2 板内损伤与集中性失稳^[5,6]

以三种低碳钢板为研究对象, 应用扫描电镜和图象分析仪, 剖析、统计了板料在不同变形方式和变形程度下, 板内损伤的形成、形态和发展机制, 寻求它与板料集中失稳的关系。主要结果简述如下。

板内损伤取决于内部微空洞的形态、大小与分布, 可用空洞面积百分数来衡量损伤的程度。一般而言, 随着变形程度的增加, 损伤量也增加。实验观察表明: 在变形初期, 损伤量增加的主要表现是空洞的萌生与长大, 很少发生空洞间的串联与聚合。载荷失稳后, 损伤量急剧上升, 损伤增长速率也不断加快, 损伤发展的主要形式是空洞的串联、聚合, 形成较大的空洞。在以拉为主的变形方式下, 板厚减薄, 板面与空洞之间的材料向内塌陷, 形成凹坑, 发展而成宏观沟槽, 这就是集中失稳。

板料成形中,变形方式对板内损伤有极为显著的影响。变形方式不同,空洞的形态亦异。在拉-压状态($\rho < 0$)下,空洞多呈球或椭球状,随着应变比增加,空洞面积和密度增加,平面应变时达到了极值,空洞大而密,多呈球状;在 $\rho > 0$ 的双拉状态下,厚向压缩,空洞呈扁平状扩展,损伤增长速率低于平面应变。应变比增加,空洞长宽比变化,呈层状参差分布。双向等拉时,分层现象最为严重。图2所示为不同变形方式下,损伤量的演变规律。由图中曲线可见,在相同变形程度下,平面应变状态下的损伤量及增长速率最大,因而从变形角度看平面应变状态是变形方式中最危险的状态,最易发生集中失稳,形成沟槽。

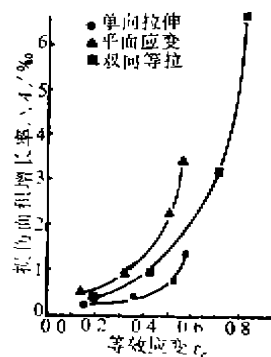


图2 08A1钢板损伤演变规律

3 FLC统一模型的建立

载荷失稳以后,平面应变状态的出现是拉-拉区和拉-压区产生集中失稳的共同原因,这就是我们建立FLC统一的理论模型的出发点。

在 $\rho > 0$ 的拉-拉变形区,载荷失稳前,板料变形均匀,载荷失稳后,板内扁平空间的串连、聚合活动加剧,由于不同层次参差分布的细长缝隙,破坏了拉伸的连续传递,使应力松弛下来,在局部范围内出现平面应变状态,造成了局部集中失稳的前提,积累发展为宏观的平面应变状态($de_2 = 0$)。在这里,损伤的关键作用不是削弱板料的承载能力而是导致板料应变状态向平面应变漂移。

在 $\rho < 0$ 的拉-压变形区,平面应变的出现主要由于变形的约束作用。例如,板条拉伸时,载荷失稳以后,颈区的变形分布很不均匀,除边沿纤维外,材料宽向收缩受到牵制,越近板条中心,宽向牵制越大,直至出现 $de_2 = 0$ 的零应变状态,所以板条中心最早产生集中性失稳。

综上所述,可将各种加载方式下,板料变形,产生集中失稳(沟槽),达到极限的全过程描述如下(图3)。

应变路径分为两个阶段:

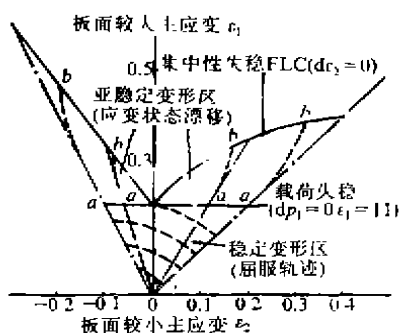


图3 板料拉伸成形应变路径与极限应变曲线示意图

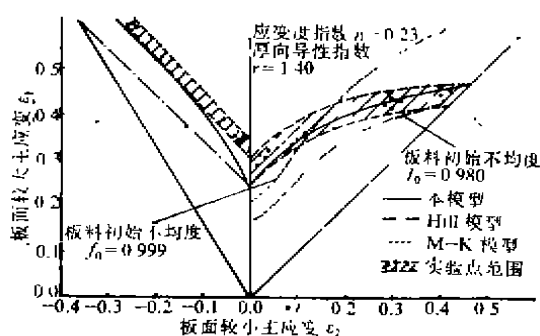


图4 08A1成形极限曲线的计算与试验曲线

第一阶段为线性应变（比例加载）阶段（图3中 oa 段）：自变形开始，至载荷失稳（ $dP_1 = 0$ ）时止。在此阶段，载荷稳定上升，应变路径保持线性。这部分两个主应变分量为〔7, 8〕

$$(\epsilon_1)_{dP_1=0} = n \quad (\epsilon_2)_{dP_1=0} = \frac{(1+r)a+r}{1+r-ar} n$$

第二阶段为应变路径漂移阶段（图3中 ab 段）：自载荷失稳开始至平面应变发生（ $d\epsilon_2 = 0$ ）时止。在此阶段载荷在最高水平基本保持稳定，由于变形的约束作用（拉—压区）和板内损伤破坏了拉力传递的连续性（拉—拉区），使板料的应力应变状态发生变化（ α , ρ 减小），逐渐趋近平面应变 $d\epsilon_2 = 0$ 。这部分变形量可用数值积分迭代计算。

图4所示为本模型的计算曲线与试验曲线。图中还示出了按M-K理论求得的计算曲线。可见，本模型与试验结果吻合较好，优于M-K理论。

4 结论

(1) 一般出厂板，变形前、后的表面损伤不影响集中性失稳。学术界广为引用的M-K模型实际上是不存在的。

(2) 造成应变集中的原因，是载荷失稳后应力状态向平面应变漂移。拉—拉区是因为板内损伤破坏了拉力的连续传递所致；拉—压区则因材料收缩受到牵制所致。

(3) 据此，提出了FLC左右两半统一的计算模型： $dP_1 \approx 0$, $d\epsilon_2 = 0$ 。

(4) 本模型的计算结果与试验结果符合良好，优于M-K理论。

参 考 文 献

- 1 胡世光，陈鹤埏。板料冷压成形原理（修订本）。北京：国防工业出版社，1989。
- 2 Semiatin S L. Formability & workability of metals: plastic instability & localization. New York: ASM, 1984.
- 3 Chen Guangnan, et al. Roughening of the free surface of metallic sheets during stretch forming. Mat. Sci. Eng., 1990 (A128):33~38
- 4 陈光南，胡世光，沈还。伸展成形中冷轧钢板表面粗糙度的演变及其对应变集中的影响。钢铁，1990 (2):30~34
- 5 陈光南，胡世光。薄钢板塑性成形损伤与断裂。北京航空航天大学学报，1989 (3):39~45
- 6 陈光南。板料拉伸变形损伤、失稳与成形极限研究：〔博士论文〕。北京航空航天大学，1991。
- 7 梁炳文，胡世光。弹塑性稳定理论。北京：国防工业出版社，1984。
- 8 梁炳文，胡世光。板料成形塑性理论。北京：机械工业出版社，1987。

NEW CONCEPT OF FORMING LIMIT CURVE

Chen Guangnan

(Mechanics Institute, Academia Sinica)

Hu Shiguang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

Abstract A very important tool in the description of sheet metal formability is the well known Forming Limit Curve (FLC), prediction of which is generally based on models using instability theories. Our experimental observations indicate that the surface roughness of as-received metal sheets generally does not lead to strain localization. At the same level of effective strain, the internal damage of a metal sheet is the most severe situation in plane strain state. When deformation is at tension-tension state, damage development results in the drifting of the strain state to plane strain state. When deformation is at tension-compression state, the stretch caused by load instability also lead to the development of plane strain state. Based on these results, a united model for the construction of both the left and right halves of FLC is proposed. FLCs predicted by this new model is consistent with experimental results and the new model is proven to be better than the M-K theory.

Key words: Sheet metal forming Instability Forming limit

作者简介 陈光南,男,1948年出生。工学博士,现为中科院力学所研究员。曾在武钢钢铁研究所工作多年,取得科研成果多项,现在力学所从事激光轧印网纹控制板面形貌,以提高板料成形性能的研究。