

文章编号: 1004 - 0609(2003) 05 - 1223 - 04

基于韧性断裂准则的铝合金板材成形极限预测^①

于忠奇, 杨玉英, 王永志, 孙振忠

(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 为了准确地预测铝合金板材成形极限, 将韧性断裂准则引入到数值模拟中。在数值模拟获得的应力应变值基础上, 采用简单拉伸试验和数值模拟相结合的方法确定了韧性断裂准则中的材料常数, 并应用该韧性断裂准则预测了铝合金 LY12(M) 的圆筒件拉深和半球形凸模胀形的成形极限。预测结果与实验值吻合较好, 该韧性断裂准则能够预测铝合金板材成形极限。

关键词: 板材成形; 韧性断裂准则; 数值模拟; 成形极限

中图分类号: TG 386

文献标识码: A

板材成形中, 断裂是成形顺利进行的主要障碍之一, 它是板材在拉应力作用下产生塑性失稳造成的, 准确地预测断裂发生对板材生产具有重要的意义。用于计算理论成形极限曲线的 Swift 模型^[1]、Hill 模型^[2]、M-K“沟槽”模型^[3]以及 S-R 模型^[4]等为板材成形极限的预测提供了有效的工具。但是, 目前这些模型还不能准确地预测在断裂发生时有无颈缩现象的出现, 尤其对于塑性差的板材(如硬铝合金 LY12)。近些年, 应用韧性断裂准则预测板材成形极限受到关注^[5-9], 本文作者采用该准则对铝合金板 LY12M 的圆筒件拉深与半球形凸模胀形的成形极限进行预测, 并通过实验来验证该准则预测铝合金板材成形极限的准确性。

1 韧性断裂准则

本文所使用的韧性断裂准则^[10]为

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \bar{\epsilon} d\bar{\epsilon} = C \quad (1)$$

式中 σ_m , $\bar{\sigma}$ 分别为平均应力和等效应力; $\bar{\epsilon}$, $\bar{\epsilon}_f$ 分别为等效应变和断裂处等效应变; p , C 为材料常数。

在应用这个准则时, 要预先确定与断裂处的空洞体积分数密切相关的材料常数 p , C , 而空洞体积分是个统计物理量, 测定时需要大量的实验数据, 不便于工程中应用。因此, 在本研究中, 利用简单试验的宏观参量来确定这两个材料常数。选用单向拉伸试验和带切槽的平面应变拉伸试验, 平面

应变试样的切槽部分尺寸为: 长度为 40 mm, 宽度为 4 mm, 深度为 0.7 mm。采用拉伸试验和有限元模拟相结合的方法确定材料常数 p , C , 可以克服拉伸试验与模拟成形过程使用的有限元软件间的系统误差。

2 实验

2.1 材料参数

实验材料为铝合金 LY12(M), 厚度 $d_0 = 1$ mm。表 1 是 LY12(M) 单向拉伸性能, 取与轧制方向成 0° , 45° , 90° 3 个方向的平均值。

表 1 铝合金 LY12(M) 的单向拉伸性能

Table 1 Uniaxial tensile properties of aluminum alloy LY12(M)

E / GPa	σ_s / MPa	K / MPa	n	r	δ / %
70.09	91.41	356.23	0.21	0.8	19

2.2 拉深与胀形实验参数

圆筒件拉深实验模具参数为: 凸模直径 43.5 mm, 凸模圆角半径 3 mm; 凹模直径为 46 mm, 凹模圆角半径 6 mm; 板材与模具间采用机油润滑, 摩擦系数取 0.12; 采用固定压边间隙, 其值为 $1.02 d_0$ 。试样由一系列初始直径 D_0 相差 1 mm 的圆形板坯组成。

半球形凸模胀形实验模具参数为: 凸模球面直径 99.5 mm; 凹模直径 104 mm, 凹模圆角半径为 8 mm, 凹模和压边圈上带有矩形拉深筋。

① 收稿日期: 2002 - 10 - 15; 修订日期: 2003 - 02 - 20

作者简介: 于忠奇(1973 -), 男, 博士研究生。

通讯联系人: 于忠奇, 哈尔滨工业大学 435[#] 信箱, 哈尔滨 150001; 电话: 0451 - 86413970; E-mail: yuzhqcn@yahoo.com.cn

3 模拟结果与讨论

所有的模拟计算均在商用有限元软件 ETA/Dynaform 上运行。采用幂指数硬化规律, 屈服准则采用更适合铝合金板材成形的 Barlat 准则^[11] 的修改形式, 即

$$|\sigma_1|^m + |\sigma_2|^m + r|\sigma_1 - \sigma_2|^m = (r+1)\bar{\sigma}^m \quad (2)$$

式中 σ_1 , σ_2 分别为面内最大主应力和最小主应力; $\bar{\sigma}$ 为面内的平均应力; m 是和材料晶体结构有关的指数, 对于铝合金, $m=8$ 。

鉴于成形件为轴对称形件, 取其 1/4 部分为研究对象。在所有模拟中, 选用 B-T 壳单元, 板材的最小四边形单元为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 。在模拟胀形过程时, 板材的初始直径同拉深筋内边缘的直径相同, 并将其边界圆上的节点除 z 方向外全部进行约束。

3.1 拉伸试验模拟结果与材料常数计算

图 1 所示是模拟单向拉伸试验断裂时的厚度分布, 图中只给出试样标距 1/4 部分的结果。从图 1 中可看出, 试样断裂时没有出现颈缩现象。图 2 所示是模拟平面应变拉伸试验断裂时切槽部分的厚度分布。从图 2 中可知, 变形集中在切槽部分, 在切槽两端只有微小变形发生。上述结果说明它们的应变路径保持不变。将应力三轴度和断裂处等效应变值代入式(1)中, 计算出: $p=1.2$, $C=0.0048$ 。



图 1 单向拉伸试样断裂时厚度分布

Fig. 1 Thickness distribution of sample during uniaxial tension fracture

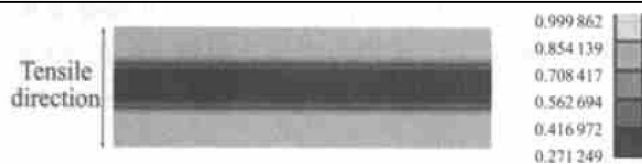


图 2 平面应变试样断裂时厚度分布

Fig. 2 Thickness distribution of sample during plane strain tension fracture

3.2 成形极限预测

用式(1)预测成形极限时, 将其变形为如下积分形式:

$$C_i = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^n \int_{\bar{\epsilon}_{i-1}}^{\bar{\epsilon}_i} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma} \right)_i \bar{\epsilon} d\bar{\epsilon} \quad (3)$$

把 Dynaform 计算的每一步的某径向单元应力应变值代入式(3)中, 计算出 C_i 值, 如果在某计算步某单元的 $C_i \geq 1$ 时, 则认为断裂从该单元发生。

圆筒件拉深断裂常常出现在靠近侧壁的凸模圆角区, 主要是成形过程中该区由于过度变薄而使承载能力减弱所致^[12]。图 3 所示是拉深断裂形式的实验件照片, 板材初始直径 $D_0=84\text{ mm}$, 实验测量的凸模行程 9.0 mm 。图 4 所示是用式(3)预测其成形极限的结果, C_i 值沿径向分布, 此时最大的 C_i 值等于 1, 即凸模行程 9.2 mm , 称为临界凸模行程; 图中最高的波峰, 它位于凸模圆角区内, 而随后的小波峰位于凹模圆角区。图 5 所示是与其对应的厚度分布。比较图 4 与图 5 可看出, 预测的破裂点位于变形最严重的区域内。由此可见, 预测结果与实验值吻合较好。

图 6 所示是半球形凸模胀形的实验件照片, 实



图 3 拉深件照片

Fig. 3 Photo of drawing workpiece

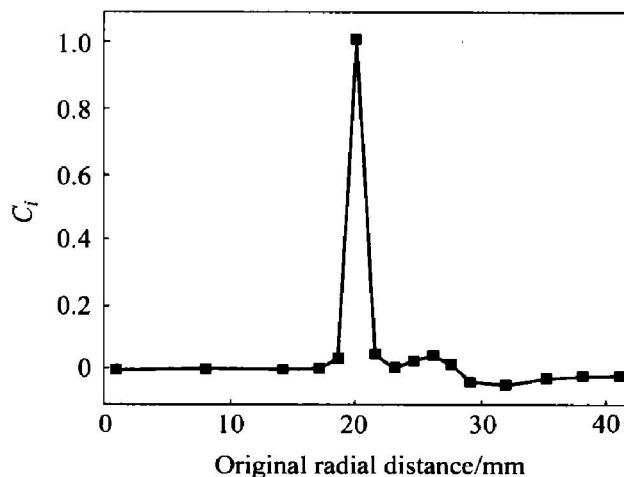


图 4 凸模行程为 9.2 mm 时预测结果

Fig. 4 Predicted result at punch stroke of 9.2 mm

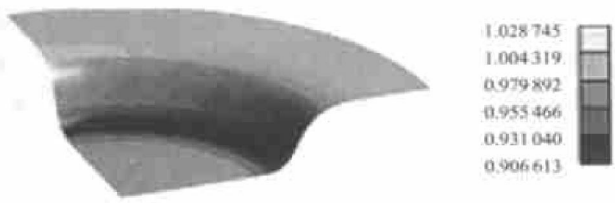


图 5 凸模行程为 9.2 mm 时的厚度分布

Fig. 5 Thickness distribution at punch stroke of 9.2 mm

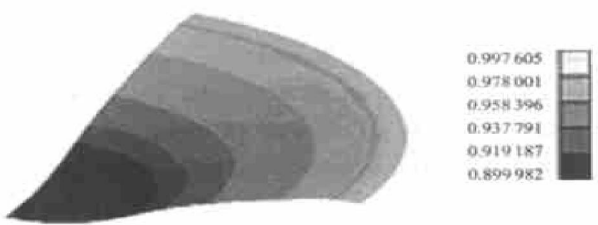


图 8 凸模行程 16.7 mm 时的厚度分布

Fig. 8 Thickness distribution at punch stroke of 16.7 mm

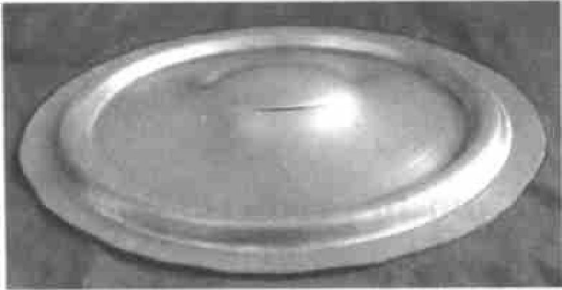


图 6 胀形件照片

Fig. 6 Photo of bulging workpiece

4 结论

采用拉伸试验与数值模拟相结合的方法较为精确地确定了韧性断裂准则中材料常数，并利用该韧性断裂准则对铝合金板 LY12(M) 的圆筒件拉深和半球形凸模胀形的成形极限进行了预测，预测值与实验值能够较好地吻合。表明该准则能在较宽范围内预测铝合金板材的成形极限，同时也为韧性断裂准则预测复杂形状冲压件的成形极限打下基础。

REFERENCES

[1] Swift H W. Plastic instability under plane stress [J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1952, 1: 1 - 18.

[2] Hill R. On discontinuous plastic states with special reference to localized necking in thin sheets [J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1952, 1: 19 - 30.

[3] Marciniak Z, Kuczynski K. Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1967, 9: 609 - 620.

[4] Storen S, Rice J R. Localized necking in thin sheets [J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1975, 23: 421 - 441.

[5] Takuda H, Mori K. Prediction of forming limit in deep drawing of Fe/Al laminated composite sheet using ductile fracture criterion [J]. Journal of Material Processing Technology, 1996, 60: 291 - 296.

[6] Takuda H, Mori K. Prediction of forming limit in bore-expanding of sheet metals using ductile fracture criterion [J]. Journal of Material Processing Technology, 1999, 92 - 93: 433 - 438.

[7] Jain M, Allin J. Fracture limit prediction using ductile fracture criterion for forming of an automotive aluminum sheet [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1999, 41: 1273 - 1288.

[8] Lei L P, Kang B S. Prediction of the forming limit in hydroforming processes using the finite element method

验测量的凸模行程为 19.5 mm。图 7 所示是用式 (3) 预测其成形极限的结果，临界凸模行程为 16.7 mm，图中第一个波峰值，它位于凸模顶点附近，所在的水平截面圆直径为 26.5 mm，而后面的小波峰位于凹模圆角区，其所处的水平截面圆直径为 110 mm。图 8 所示是此时的厚度分布情况。比较图 7 与图 8 可看出，破裂点位于板材变薄最严重的区域，而在凹模圆角区变薄程度比两侧要稍大一些。预测的裂纹点距法兰平面的垂直距离为 14.8 mm，而实验测量值为 14.5 mm。这些结果表明：预测结果与实验值吻合较好。

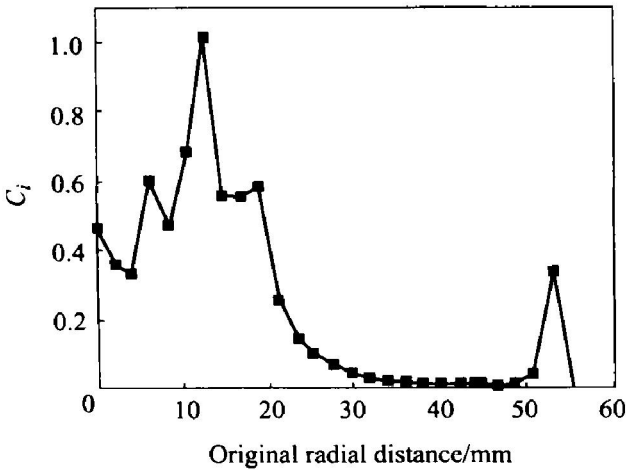


图 7 凸模行程为 16.7 mm 时预测结果

Fig. 7 Predicted result at punch stroke of 16.7 mm

- and a ductile fracture criterion [J]. Journal of Material Processing Technology, 2001, 113: 673 - 679.
- [9] Tang C Y, Chow C L. Development of a damage-based criterion for ductile fracture predictive in sheet metal forming [J]. Journal of Material Processing Technology, 1999, 91: 270 - 277.
- [10] 于忠奇. 基于 Lemaitre 损伤理论的韧性断裂准则建立及板料成形极限预测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003. 21 - 28.
- YU Zhong-qi. Establishment of a Ductile Fracture Criterion Based on Lemaitre Damage Theory and Prediction of Sheet Metal Forming Limit[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003. 21 - 28.
- [11] Barlat F, Lian J. Plasticity behavior and stretchability of sheet metals [J]. International Journal of Plasticity, 1989, 51: 51 - 66.
- [12] 吴诗 . 冲压工艺学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1990. 147 - 284.
- WU Shi-chun. Stamping Technology [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1990. 147 - 284.

Application of ductile fracture criterion to prediction of forming limit in aluminum alloy sheet forming

YU Zhong-qi, YANG Yu-ying, WANG Yong-zhi, SUN Zhen-zhong
(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150001, China)

Abstract: To accurately predict the forming limit in aluminum alloy sheet forming, ductile fracture criterion is introduced into numerical simulation. On the basis of the values of stress and strain calculated from numerical simulations, the material constants in ductile fracture criterion were determined by the combination of tension tests with numerical simulation, and the forming limits in cylindrical deep drawing and hemispheric punch bulging of aluminum alloy sheet LY12(M) were predicted. The experiments verify that the predicted results are in agreement with the experimental ones, and that the ductile fracture criterion can predict the forming limit of aluminum alloy sheet.

Key words: sheet forming; ductile fracture criterion; numerical simulation; forming limit

(编辑 李艳红)