成形极限预测韧性断裂准则及屈服准则的影响

陈劼实 周贤宾

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 将韧性断裂准则用于预测板材成形极限,通过数值模拟 HS 钢、IF 钢和 6111-T4 铝合金 3 种板材在单向拉伸、平面应变和双向等拉等不同应变路径下的变形过程,获得试件中心区域主应变最大单元的应变历史,结合成形极限实验数据计算韧性断裂准则的材料常数;通过对接近平面应变变形路径下的模拟结果与实验获得的网格应变相比较分析了 Hill48, Hill90 和 Barlat89 3 种各向异性屈服准则对模拟获得的应变路径的影响. 结果表明, Barlat89 屈服准则可以较好地描述单元的应变路径;在此基础上比较了几种韧性断裂准则用于预测板材断裂成形极限的计算结果, Cockcroft-Latham 准则和总塑性功准则的计算结果比较理想,材料常数的确定也较为简单.

关 键 词: 板料冲压; 成形极限; 韧性断裂准则; 屈服准则; 应变路径

中图分类号: TG 381

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)08-0969-05

Suitability of some ductile fracture criteria and yield criteria in forming limit prediction

Chen Jieshi Zhou Xianbin

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Some ductile fracture criteria was applied to predict the forming limit of sheet matels. The numerical simulation for deformation processes with uniaxil tensile, plane strain, equi-biaxial strain and some other strain paths were carried out for HS steel, IF steel and 6111-T4 aluminum alloy sheets. Ductile fracture criteria was combined with the finite element simulation. The constants in the criteria were determined by using the calculated strain path and stress at the element with maximal major strain combined with the critical values of strain obtained in the tests. The effect of yield criteria Hill48, Hill90 and Barlat89 on strain path in numerical simulation was compared and evaluated with the measured strain path near the plane strain. Barlat89 can reasonably well predict the strain paths of three kinds of sheet matels. Further calculations were carried out for the forming limit with several ductile fracture criteria combined with Barlat89. It is shown that Cockcroft-Latham and the total plastic work criteria give more reasonable prediction and the material constants in the criteria can be calculated easily.

Key words: sheet metal forming; forming limit; ductile fracture; yield criterion; strain path

多年来,绝大多数关于成形极限曲线的理论研究都是建立在拉伸失稳理论或分叉理论基础上的,但是通过与试验数据对比发现每种准则都有一定的适用条件,对板料的各种成形过程还没有一种能够普遍适用的准则. 为了寻找一种能在更大范围内预测板料成形极限的方法,鉴于在体积成形领域广泛使用韧性断裂准则,人们也将韧性断裂准则的概念引入到了板料成形领域,用于板料的成形极限预测[1]. 而且由于韧性断裂准则从变形能量的角度出发判断断裂发生,相对于根据

收稿日期: 2005-09-14

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20040006022)

作者简介: 陈劼实(1979-),女,辽宁锦州人,博士生, chenjieshi@yahoo.com.cn.

经典塑性理论计算得到的 FLD(Forming Limit Diagram),具有可以考虑应变路径变化的优点.

1 材料常数的计算方法

韧性断裂准则通常是以应力、应变和微观变量的独立或者组合形式来表达的:

$$f(\sigma,\varepsilon,\cdots)=C \tag{1}$$

式中,C 是材料常数,是与材料本身某些性能有关的统计物理量,在实际应用中认为是常数. 准则表达式的推导与屈服准则、相关的流动规则、等效应变函数形式、线性应变路径假设及强化规律有关. 韧性断裂准则中材料常数的准确性直接影响预测结果的精度.

由于确定与常数 C 有关的材料参数需要大量的实验数据,而且是统计量,这种预测方法不便于在工程中应用. 在目前的应用中都是采用一些宏观试验数据来确定常数 C. 文献[2]指出,如果确定常数 C 的实验加载条件与将要预测的成形过程的加载条件越相近,则预测的结果越与实验结果相符. 可是如果用与预测的成形过程完全相同的实验来确定,这种方法对预测虽然具有很高的精度,但是实验相对很繁琐.

目前常用的方法是用拉伸实验法来确定,通过拉伸试样的断裂应变等参数来求得准则中的材料常数. 在实际应用中,通常选取与准则中材料常数个数等同的拉伸变形实验,并且应力状态不同,来确定材料常数.

常用的工程方法有:单向拉伸实验,平面应变拉伸实验,等双拉实验等. 板料断裂是大变形过程,如果通过理论公式计算材料常数,需要假定应变路径为线性,那么对于铝合金等塑性差的材料,在断裂发生时没有明显的颈缩出现,应变路径仍近似保持原始的拉伸路径,可以认为确定出的材料常数是准确的;而对于断裂出现时有明显颈缩的材料,颈缩出现后应变路径已明显的改变,这时与原始拉伸路径不符,会造成偏差. 但是如果通过数值模拟拉伸过程获得的应力应变来计算材料常数,就可避免这一问题.

为确定材料常数,首先进行单向拉伸实验,对于包含 2 个材料常数的准则,还要进行平面应变或者双向等拉实验,获得断裂处第一主应变,然后采用 Pam-stamp 进行相同变形情况的数值模拟,在模拟过程中当试件上第一主应变最大的单元达到此应变值时,认为此处发生断裂. 然后将此单元的应力应变历史代入韧性断裂准则的积分式,计算材料常数. 采用这种方法确定材料常数的优点是按照单元真正的变形路径进行积分,而不是简单地假定为线性. 但同时存在一个问题,模拟得到的应变路径与实际变形路径是否吻合. 不同应变路径下的极限应变是不同的,因而能否正确描述单元的应变路径对于韧性断裂准则材料常数的计算及预测的成形极限都有很大影响.

影响数值模拟计算结果的因素包括所采用的强化模型和屈服准则[3]. 目前在 FLC(Forming Limit Curve)理论模型的分析中,绝大多数采用的是等向强化模型. 虽然随动强化对不同失稳模型的影响还没有研究得很清楚,但是其影响是存在的[4].

文献[5]认为动态的影响是瞬间的,当应变路径发生变化的时候,在等向强化模型下,很小的应变就会引起很大的应力增长;也就是说当应变路径发生变化的时候,只要屈服曲面离成形极限足够远,采用随动强化还是等向强化模型并不是很重要,达到成形极限时这 2 种模型会得到同样的应力. 因而考虑随动强化问题主要是针对在接近成形极限的时候改变应变路径的情况. 但是在实际应用中,应变往往被控制在安全区以内,离极限应变还有一段距离,因而随动强化对于成形性的影响并不是特别明显. 在以下的分析计算中,材料模型采用等向强化模型,结合 Hill48,Hill90 和 Barlat89 3 种各向异性屈服准则来分析屈服准则对应变路径的影响.

2 屈服准则对应变路径的影响

采用 NUMISHEET'96[6] 中提供的 HS 钢板、IF 钢板和 6111-T4 铝合金板 3 种材料的力学性能参数进行成形极限实验的数值模拟. 为节省计算时间,根据试件的对称性,只模拟四分之一试件的变形过程(图 1),初始网格为 1 mm 的壳单元. 各种应变路径下加载条件完全相同,板料与凹模和压

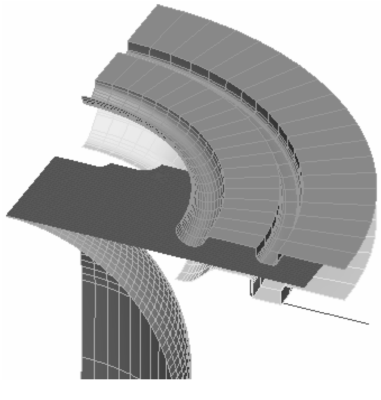


图 1 数值模拟中建立的模型

边圈之间的摩擦系数为 0.12,与凸模之间的摩擦系数为 0.05,压边力为 200 kN,凸模速度为 10 mm/ms. 应变路径的变化通过改变试件尺寸来实现,试件长度为 176 mm,宽度从 15 ~ 176 mm 递增.

图 2 ~ 图 4 是 3 种材料由不同屈服准则计算得到的单向拉伸、平面应变路径附近以及双向等拉变形过程试件中心区域第一主应变最大单元的应变路径,图中所示 FLC 是由试题[6]中提供的成形极限实验数据点进行拟合得到的.

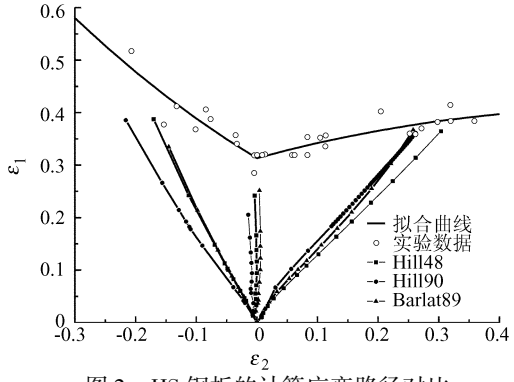


图 2　HS 钢板的计算应变路径对比
(平面应变路径凸模行程 25 mm)

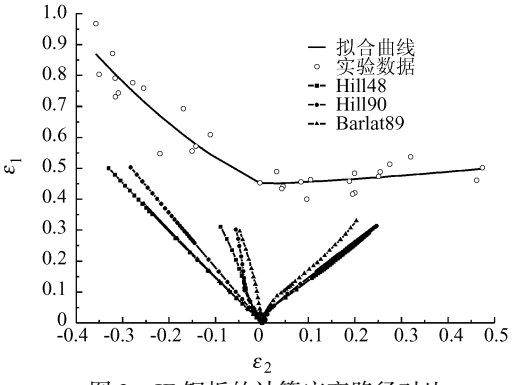


图 3　IF 钢板的计算应变路径对比
(平面应变路径凸模行程 34.5 mm)

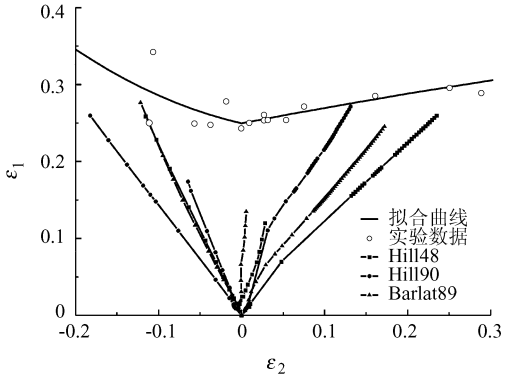


图 4　6111-T4 铝合金板的计算应变路径对比
(平面应变路径凸模行程 19.5 mm)

可以看出,对于单向拉伸 Hill48 与 Barlat89 屈服准则的预测结果基本一致,Hill90 差别较大;平面应变路径方向 Barlat89 最靠近纵轴,Hill90 偏离纵轴最多;等双拉方向对 2 种钢板 3 种屈服准则的计算结果差别不是很大,而对铝合金板差别就非常明显. 平面应变路径的试件尺寸采用的是 180 mm×100 mm,试题[6]中提供了这一尺寸试件在凸模行程达到某一固定值时沿试件 2 个对称轴 x 轴和 y 轴方向的应变分布实验数据,原点为试件中心(图 5 所示). 图 6 ~ 图 8 为 3 种材料的该尺寸试件沿 x 轴和 y 轴方向的第二主应变分布实验数据.

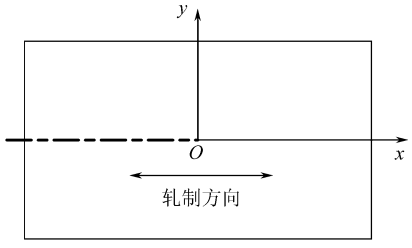


图 5　试件原始形状及坐标系

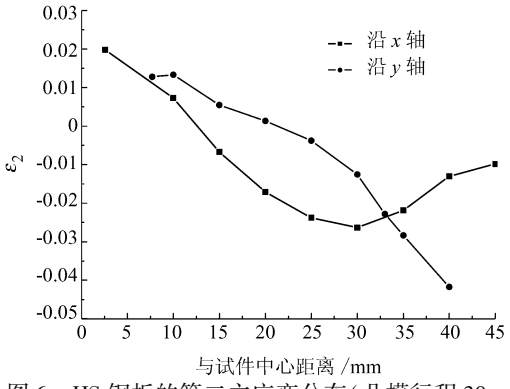


图 6　HS 钢板的第二主应变分布(凸模行程 30 mm)

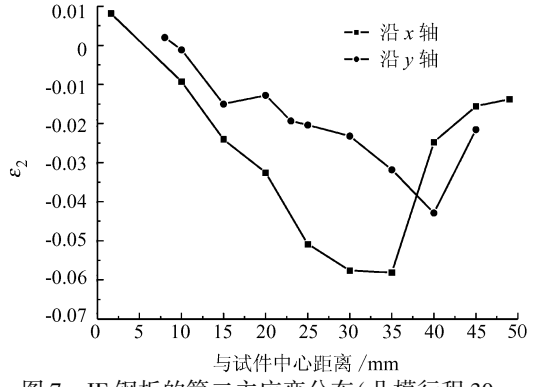


图 7　IF 钢板的第二主应变分布(凸模行程 30 mm)

对 HS 钢板而言(图 6),第二主应变集中在 -0.025 ~ 0.025 的范围内,所以图 2 中 3 种准则预测的结果都可以接受;对于 IF 钢板(图 7),第二主应变绝大多数都为负值,集中在 -0.06 ~ 0 范围

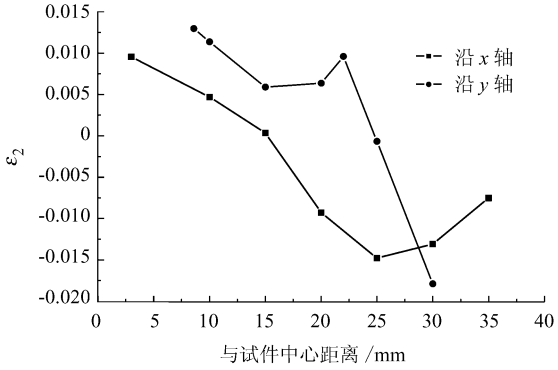


图 8 6111-T4 铝合金板的第二主应变分布
(凸模行程 20 mm)

内,所以图 3 中 Barlat89 计算的结果比较理想;而对于 6111-T4 铝合金板(图 8),第二主应变集中分布在 -0.015 ~ 0.015 范围内,图 4 中同样是 Barlat89 计算的结果比较理想,Hill90 偏差最多.

因而从整体上来看,Barlat89 屈服准则最为可取,可以比较恰当地描述单元的应变路径. 在以下应用韧性断裂准则预测材料的断裂极限曲线的计算中,应力应变均为采用 Barlat89 屈服准则的数值模拟计算结果.

3 几种韧性断裂准则的比较

基于各种不同的假定,人们提出了很多种不同的韧性断裂准则,但应用比较广泛的不外乎以下几种:

文献[7]考虑了拉伸最大主应力在直到断裂时整个塑性应变路径范围内的作用,提出公式(2):

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} (\sigma_1/\bar{\sigma})\,\mathrm{d}\bar{\varepsilon} = C \tag{2}$$

这个准则应用最为广泛,但是没有反映出静水应力对断裂产生的作用,Brozzo 经验地修改了这个准则,使式(2)含有静水应力项:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{2\sigma_1}{3(\sigma_1 - \sigma_m)}\mathrm{d}\bar{\varepsilon} = C \tag{3}$$

Clift 等人[8]应用总塑性功预测断裂:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \bar{\sigma}\,\mathrm{d}\bar{\varepsilon} = C \tag{4}$$

Oyane[9]的韧性断裂准则假定静水应力的历史影响韧性断裂的发生:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \left(\frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} + a\right)\mathrm{d}\bar{\varepsilon} = C \tag{5}$$

式中,a 是材料常数.

前 3 种准则只有一个材料常数 C,采用单向拉伸试验数据和数值模拟过程来确定;第 4 种准则有 2 个材料常数,采用单向拉伸和双向等拉或者平面应变试验数据和数值模拟过程来确定,计算所得材料常数见表 1.

将介于单向拉伸与双向等拉之间的几种应变路径下的数值模拟结果与韧性断裂准则相结合,得到断裂极限点,如图 9 ~ 图 11 所示. 其中 HS 钢板和 IF 钢板 Oyane 准则的材料常数是由单向拉伸和双向等拉应变路径确定的;由于 6111-T4 铝合金板双向等拉应变路径下的实验数据点位置较高,因而采用单向拉伸和双向等拉应变路径确定的材料常数为负值,无法应用于计算,所以采用单向拉伸和平面应变 2 种应变路径确定材料常数,但是这样就导致 Oyane 准则对于双向拉伸区域的预测结果低于实验数据.

表 1 不同韧性断裂准则的材料常数

板料	C				a(Oyane)
	Cockcroft-Latham	Brozzo	Clift	Oyane	
HS	0.676	0.713	0.427	1.447	1.673
IF	0.923	0.939	0.377	97.470	106.247
6111-T4	0.200	0.269	0.077	0.172	0.459

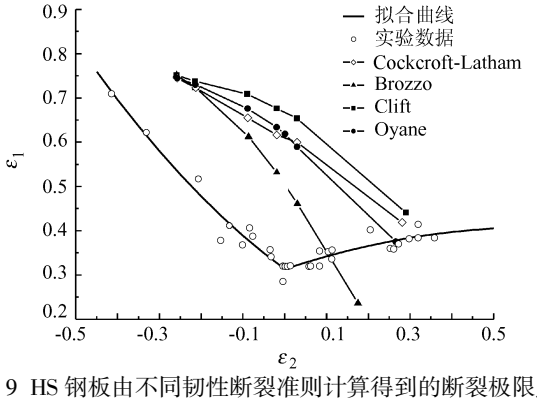


图 9 HS 钢板由不同韧性断裂准则计算得到的断裂极限点

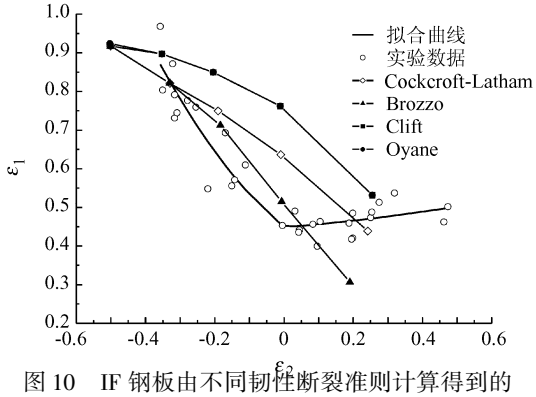


图 10 IF 钢板由不同韧性断裂准则计算得到的断裂极限点

由于实验数据点是通过测量断裂处附近的网格获得的,所以计算出的断裂极限点高于实验数据点是合理的. 从上述图中不同材料的断裂极限点分布来看,Cockcroft-Latham 准则的计算结果最理想;Oyane 准则由于具有 2 个材料常数,所以需

要 2 种应变路径下的极限应变点,并且只适用于单向拉伸明显比双向等拉极限应变高的材料.

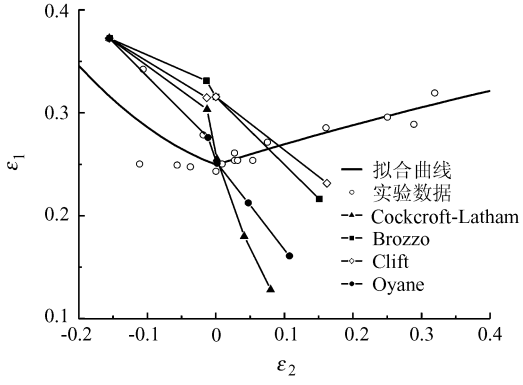


图 11　6111-T4 铝合金板由不同韧性断裂准则计算得到的断裂极限点

4　结　论

通过数值模拟拉伸过程获得的应力应变结合相同拉伸试验过程获得的极限应变来确定韧性断裂准则的材料常数可以考虑应变路径的变化. 对采用不同屈服准则的模拟过程获得的应变路径进行比较,Barlat89 准则与实际情况符合较好. 根据采用 Barlat89 屈服准则的数值模拟数据对几种韧性断裂准则的预测结果进行了比较,对于不同材料其预测理想程度差别较大;Cockcroft-Latham 准则和总塑性功准则的计算结果比较理想,材料常数的确定也较为简单;Oyane 准则具有 2 个材料常数,其曲线位置会随着用于计算材料常数的应变路径不同而发生改变,但是在确定材料常数方面稍为复杂,并非所有的应变路径都适用于计算该准则的材料常数,这样就使其应用受到一定限制.

参考文献（References）

[1] 陈劼实,周贤宾. 板料成形极限的理论预测与数值模拟研究[J]. 塑性工程学报,2004,11(1):13-17
Chen Jieshi, Zhou Xianbin. The theoretical prediction and numerical simulation of sheet metal forming limit[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2004,11(1):13-17(in Chinese)

[2] Goijaerts A M, Govaert L E. Evaluation of ductile fracture model for different metals in blanking[J]. Journal of Materials Processing Technology,2001,110:312-323

[3] Li X Q, Zhou X B, Wu X D, et al. Suitability of the yield criterion in numerical simulation of stretch bending of Aluminum extrusions[C]//Smith L M, Pourboghrat F. NUMISHEET'2005, 6th International Conference: Numerical Simulation of 3-D Sheet Metal Forming Processes, Detroit, US:[s. n.], 2005:359-364

[4] Yao Hong, Cao Jian. Prediction of forming limit curves using an anisotropic yield function with prestrain induced backstress[J]. International Journal of Plasticity, 2002,18:1013-1038

[5] Graf A F, Hosford W F. Calculations of forming limit diagrams for changing strain paths[J]. Metals Transaction A, 1993,24:2497-2501

[6] Lee J K, Kinzel G L, Wagoner R H. NUMISHEET'96, 3rd International Conference: Numerical Simulation of 3-D Sheet Metal Forming Processes——Forming Limit Diagram Benchmark[C]. Dearborn, Michigan:[s. n.], 1996: 476-518, 834-840

[7] Cockcroft M G, Latham D J. Ductility and the workability of metals[J]. Journal of the Institute of Metals, 1968,96:33-39

[8] Clift S E, Hartley P. Fracture prediction in plastic deformation processes[J]. International Journal of Mechanical Science, 1990,32:1-17

[9] Oyane M, Sato T. Criteria for ductile fracture and their applications[J]. Journal of Mechanical Working and Technology, 1980,4:65-81

(责任编辑:张　嵘)