

【工程与技术】

基于 Lemaitre 韧性断裂准则的板材破裂预测

王梓鉴¹, 裴宝浩¹, 鲁哲¹, 杜现斌²

(1. 烟台职业学院 交通工程系, 山东 烟台 264670;

2. 山东科技大学 交通学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 渐进成形工艺在个性化产品生产及样品试制等方面有明显的优势。随着零部件表面积的增加, 板材厚度逐渐变薄并最终断裂, 这是制约成形极限的主要因素。针对以上问题, 在利用 Lemaitre 韧性断裂准则预测常规塑性成形过程中板材破裂情况的基础上, 引入渐进成形技术, 预测渐进成形过程中板材的成形极限。通过单向拉伸试验和循环加载试验, 测定 2024-T3 铝合金板材的基本力学性能, 构建材料的有限元模型, 并将该模型对单向拉伸试验和渐进成形试验的预测结果与试验结果进行比较, 验证了该模型对 2024-T3 铝合金板材破裂预测的有效性。

关键词: 渐进成形工艺; Lemaitre 韧性断裂准则; 破裂预测; 有限元仿真; 成形极限

中图分类号: TH 16; TH 14 **文献标识码:** A **DOI:** 10.13486/j.issn.2097-4973.2025.02.008

渐进成形工艺自日本学者松原茂夫于 20 世纪 90 年代提出以来^[1], 就受到各国学者的广泛关注。渐进成形工艺涉及的主要部件有支架、压板、板材以及成形工具。其中, 成形工具按照输入机床指定的成形轨迹逐层下压实现对板材的加工, 如此逐步累积, 最终形成期望的目标制件^[2-4]。与传统板材成形技术相同, 渐进成形工艺也是一种等材制造的加工方式, 在加工过程中板材变形伸长区减薄, 并且随着加工的进行, 板材会因减薄而发生破裂。

自渐进成形工艺问世以来, 对于成形极限的预测一直是研究的难点^[5]。Hirt 等^[6]发现渐进成形工艺中零部件成形区域的侧壁厚度符合 $t = t_0 \sin(90^\circ - \theta)$ 的正弦定律, t_0 为板材的原始厚度。为了预测渐进成形工艺中板材的破裂情况, 目前所采用的主要方式有试验手段、成形极限图、韧性破裂准则等。Szekeres 等^[7]综合分析了渐进成形过程中板材的受力情况与加工件侧壁厚度的关系, 实现了对板材渐进成形时最大成形深度的有效预测。Hussain 等^[8]基于渐进成形过程中板材壁厚正弦分布的规律, 发现渐进成形极限与加工参数的设置有关, 并据此来预测板材的渐进成形极限。Hussain 等^[9]通过成形极限图实现了对板材渐进成形极限的预测, 并证明了成形极限图在特定步距和工具头直径下的可靠性。但是, Emmens 等^[10]在研究中发现, 成形极限图对渐进成形极限预测结果的准确性受限于损伤发生的位置, 因此采用该方法对铝合金板材的渐进成形极限预测的准确性仅局限于损伤部位, 而对于弹性变形区域的成形极限预测不准确。故韧性破裂准则逐渐应用于渐进成形工艺中对成形极限的预测。文献^[11-12]将 Oyane 准则

收稿日期: 2024-10-17

基金项目: 山东省自然科学基金青年项目(ZR2022QE048); 山东省教育教学研究课题(2023JXY166); 中国高等教育学会高等教育科学研究规划重点课题(24RH0304)

第一作者简介: 王梓鉴(1995—), 男, 山东烟台人, 助教, 硕士, 主要从事机械设计与制造、汽车检测与维修研究。

E-mail: wangzijian0218@foxmail.com

通信作者简介: 裴宝浩(1987—), 男, 山东滕州人, 副教授, 硕士, 主要从事车辆工程、燃料电池和汽车维修研究。

E-mail: peibaohao@126.com

应用于渐进成形工艺中,实现了对圆锥形目标件在渐进成形时损伤位置的有效预测。Silva 等^[13]将壳单元和损伤模型相结合,提出了一种对于破裂应变进行预测的新手段。Malhotra 等^[14]将 Xue^[15]提出的破裂准则在渐进成形工艺中加以应用,所得到的成形极限预测结果更为准确。渐进成形破裂机理复杂,以上所述的预测手段都未考虑渐进成形工艺循环加载的受力特点。本文基于 Lemaitre 韧性断裂准则,通过拉伸试验测定材料的性能参数,并据此建立渐进成形极限的预测模型,实现了对于成形极限的有效预测。

1 Lemaitre 韧性断裂准则建立

1.1 Lemaitre 韧性断裂准则理论

Lemaitre 韧性断裂准则是一种各向同性塑性损伤理论,其基本要素包括损伤变量、各向同性损伤假设、有效应力和应变等效性假设^[16-17]。对于一个损伤体,取其中的一个损伤单元,损伤变量 D 可表示为

$$D = 1 - \frac{\bar{E}}{E} \quad (1)$$

式中: E 为材料无损伤时的弹性模量; \bar{E} 为材料受损时的弹性模量,即有效弹性模量。Lemaitre 韧性断裂准则中所需的弹性模量和有效弹性模量可分别通过单向拉伸试验和循环加载试验得到。

1.2 试验设计

试验所采用的 2024-T3 铝合金板材均来自同一批次,厚度为 2 mm。考虑到板材各向异性的因素,分别沿 3 个方向,采用线切割的方法进行取样,拉伸样件尺寸及其取样方案如图 1(a) 所示。样件尺寸根据《金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T228.1-2021)^[18] 确定。循环加载试验过程如图 1(b) 所示,A 阶段为初次加载,加载速率为 1 mm/s;到达第一个预卸载点 M 处时开始卸载,卸载路径为 B ,卸载速率为 150 N/s;当到达卸载零点 N 处时重新加载,加载路径为 C ,加载速率为 1 mm/s,随后的预卸载点重复以上循环路径。

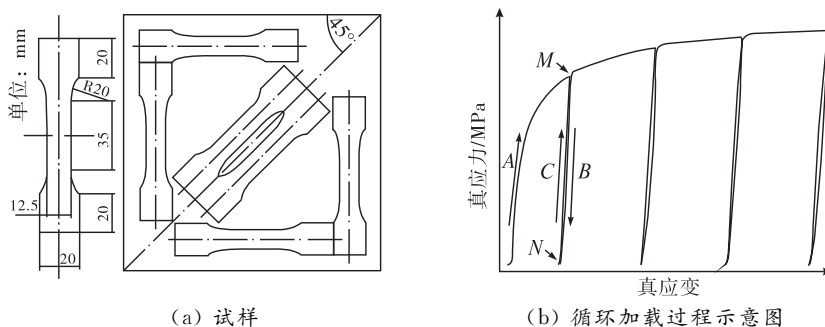


图 1 拉伸试样及循环加载过程示意图

1.3 单向拉伸与循环加载试验结果及分析

2024-T3 铝合金单向拉伸试验和循环加载试验结果如图 2 所示,表 1 为两种加载方式所得到的 2024-T3 铝合金材料的主要力学性能。

从单向拉伸试验结果可以看出试验所使用的 2 mm 厚度的 2024-T3 铝合金板材不仅拥有很高的强度,还具有良好的塑性。由图 2 可以发现,在单向拉伸试验的过程中,板材的应力-应变曲线的变化趋势是平顺的。而由循环加载试验所得到的结果可以看出,每经过一次卸载—重新加载后,板材的应力-应变曲线会产生明显的凸起,这表明每经过一个循环过程,板材上屈服点都在不断提高。在经历 4 次卸载—重新加载过程后,板材的上屈服点提高了 145.64 MPa。这种屈服点升高的现象可由金属材料的

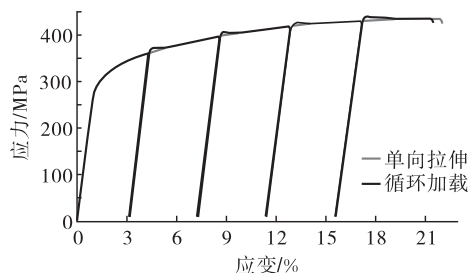


图 2 单向拉伸与循环加载试验结果

应变时效过程(Strain Ageing Process)解释。材料在拉伸变形过程中,由于应力作用诱发了位错应力场中间隙原子的重新排列,改变了晶体结构,导致上屈服点的升高。

表 1 2024-T3 铝合金主要力学性能参数

加载方式	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
单向拉伸	70.61	290.80	434.95	21.93
循环加载	69.92	294.13	436.07	21.44

对比沿不同方向切割的样件在单向拉伸试验和循环加载试验中得到的应力-应变曲线可知,试验所用的 2024-T3 铝合金材料的各向异性情况不明显,属于各向同性材料(图 3)。

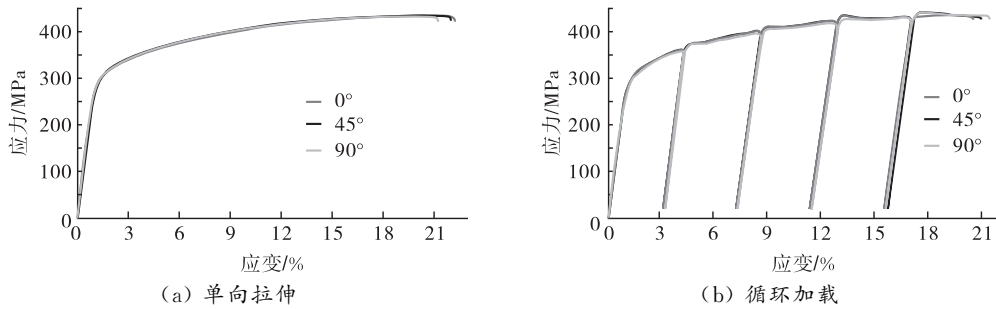


图 3 2024-T3 铝合金应力-应变曲线

材料的应力应变关系式^[19]为 $\bar{\sigma} = a(b + \bar{\epsilon})^c$ 。式中: $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\epsilon}$ 分别为等效塑性应力、等效塑性应变, a 、 b 、 c 为材料的待定系数。

选择 45°方向的试验结果作为计算依据,如图 4 中实线所示。通过 Matlab 进行拟合得到试验所用材料的本构模型: $\bar{\sigma} = -453.6\bar{\epsilon}^{-0.17} + 709.8$,拟合结果如图 4 中虚线所示。

通常在有限元仿真中,弹性模量是一个常数,但是对于渐进成形等具有循环加载过程的加工工艺,随着加工的进行,板材的弹性模量将发生变化。因此,为了提高仿真结果的准确性,通过循环加载试验对铝合金板材的有效弹性模量及其变化情况进行了探究。

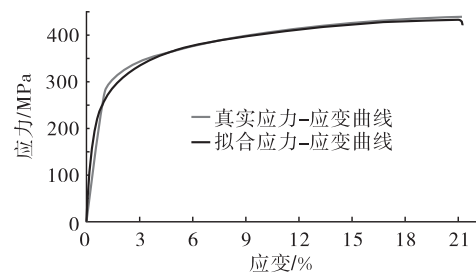


图 4 2024-T3 铝合金本构模型

为了进一步对板材有效弹性模量随应变的变化情况进行深入的探究,选择沿 45°方向切割的样件进行了 11 次卸载的循环加载试验,得到的应力-应变曲线和有效弹性模量变化趋势,如图 5 所示。

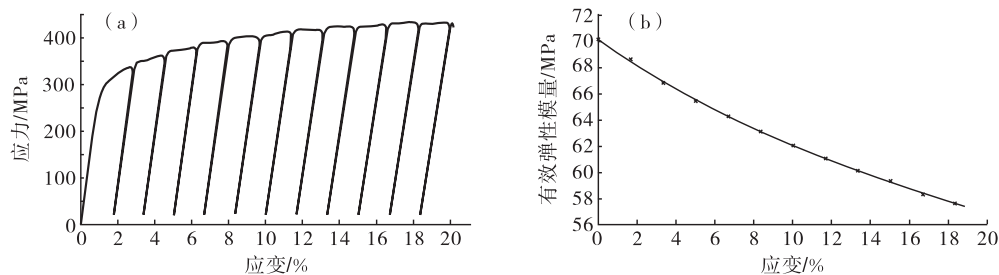


图 5 循环加载试验结果分析

对循环加载过程中有效弹性模量(\bar{E})的衰减趋势进行数学拟合: $\bar{E} = m e^{n\epsilon} + p e^{q\epsilon}$ 。经过拟合得到 $m = 4.892, n = -0.1302, p = 65.31, q = -0.007255$ 。得到的弹性模量衰减数学拟合模型

$$\bar{E} = 4.892e^{-0.1302\epsilon} + 65.31e^{-0.007255\epsilon}, \tag{2}$$

如图 5(b)所示。

2 预测模型的建立及验证

为了建立 Lemaitre 韧性断裂准则预测模型,本文对 ABAQUS 仿真软件进行二次开发,以实时准确地预测板材在变形过程中的损伤情况,将损伤变量作为材料在塑性成形阶段是否发生破裂的判断标准,进而实现对成形极限的预测。

2.1 破裂预测模型主要参数的确定

综合式(1)与式(2)即可求得损伤变量与应变之间的关系: $D=f(\epsilon)$ 。由于材料在成形过程中的损伤是一个逐渐累积的不可逆过程,这就要求 $D=f(\epsilon)$ 必须是一个增函数,即 $f'(\epsilon) > 0$ 。

由表 1 可知,2024-T3 铝合金单向拉伸的弹性模量 $E=70.61$ GPa,可求得 D 随 ϵ 的变化函数如为

$$D=1-0.06928e^{-0.1302\epsilon}-0.9249e^{-0.007255\epsilon} \quad (3)$$

对式(3)求导可得 $f'(\epsilon)=0.009020e^{-0.1302\epsilon}+0.006710e^{-0.007255\epsilon} > 0$,即 $D=f(\epsilon)$ 为增函数,满足 Lemaitre 韧性断裂准则的建立条件。将单向拉伸试验过程中 2024-T3 铝合金拉伸试样发生断裂时所对应的应变 $\epsilon_R=0.2193$ 代入式(3),求得损伤阈值 $D_C=9.24 \times 10^{-3}$ 。在仿真模型中,当板材变形过程中的损伤变量 D 值达到 9.24×10^{-3} 时,删除单元,板材发生破裂,仿真结束。

利用 ABAQUS 软件自带的 Mises 模型对单向拉伸试验进行仿真,模型的参数设置与实际试验一致,将仿真得到的应力-应变曲线与实际结果相对比,如图 6 所示。仿真与试验结果相吻合,这表明所建立的自定义材料可靠性好,能够用于板材变形规律的分析。

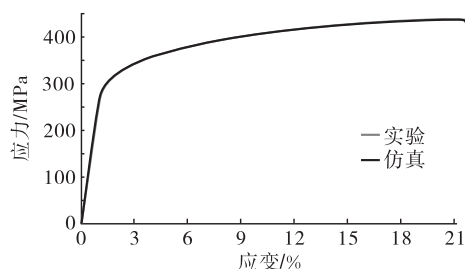


图 6 单向拉伸仿真模型验证

2.2 破裂预测模型在单向拉伸过程中的验证

在单向拉伸试验仿真模型中,是否调用破裂预测子程序所得到的应力、应变分布如图 7 示。由仿真结果可知,拉伸样件的变形区域都位于模型中部,且颈缩现象和删除的单元也位于该区域,这与实际情况一致。调用破裂预测子程序后,最大应力和最大应变均有所降低,这是因为调用子程序后,应力和应变较大的区域发生破裂,材料被删除后产生了应力释放。

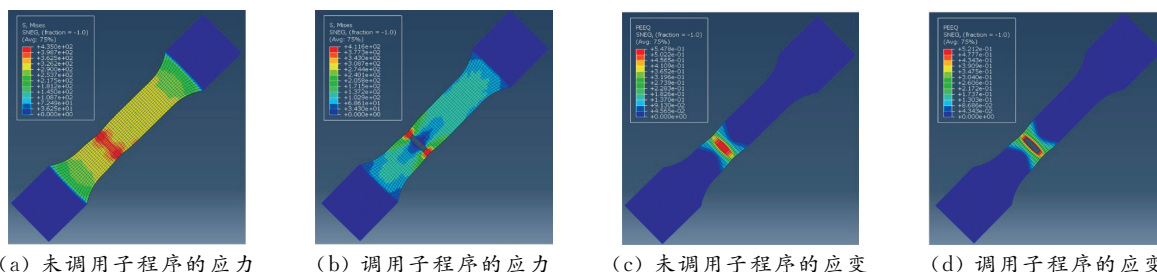


图 7 单向拉伸仿真应力、应变分布云图

调用破裂预测子程序后,板材在单向拉伸仿真中的应力、应变分布情况与原模型一致,且与实际情况相吻合,因此,所建立的破裂预测模型对于单向拉伸试验的仿真是准确可行的,并且与原模型相比,破裂预测子程序的引入会使仿真所得到的应力应变分布结果与实际情况更接近,误差更小。

2.3 渐进成形极限的破裂预测

2.3.1 渐进成形试验

为验证上文所建立的破裂预测模型在板材渐进成形工艺中的准确性,进行了渐进成形试验,加工工艺参数如下:工具头直径为 10 mm,步距为 0.3 mm,进给速度为 $2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,主轴转速为 0。

成形工具的运动轨迹由 UG 软件生成,对目标成形件的三维模型采用区域轮廓铣的方法,螺旋加工轨迹的螺距为 0.2 mm。进刀方式为线性沿矢量,矢量选择沿 Z 轴向下。由前文单向拉伸试验测得材料的性能参数如下:弹性模量为 70.61 GPa,屈服强度为 290.80 MPa,抗拉强度为 434.95 MPa,泊松比为 0.33。试验设备采用三轴数控柔性成形平台 VMC650。试验过程中将板材通过特定的夹具固定在机床工作台上,工具头和板材之间使用 HX8 5W-40 润滑油进行润滑,以减小摩擦系数,提高加工质量。如图 8 所示,2024-T3 铝合金在渐进成形加工时,机床主轴 Z 方向位移达到 14.682 mm 时发生破裂。

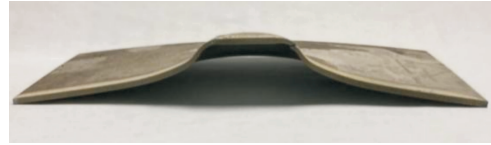


图 8 渐进成形加工所得到的零件

2.3.2 Lemaitre 模型对渐进成形极限的预测

渐进成形仿真模型主要包括成形工具和板材两个部件,仿真参数的设置根据文献[20-24]确定:板材采用壳单元,其尺寸为 160 mm×160 mm,其网格尺寸为 1 mm;工具头设置为直径 10 mm 的球头刚体,网格尺寸为 2 mm。

通过仿真得到深度为 14.27 mm 时的应力、应变分布云图如图 9 所示,是否调用破裂预测子程序所得到的应力、应变分布情况相似,且最大应力和最大应变在数值上几乎相等。在顶部与底部的未加工区域,材料均未参与变形,其应变值均为 0,这表明前文所建立的破裂预测子程序的引入不会影响原模型的准确性,在渐进成形工艺中可以实现对板材是否发生破裂的可视化仿真预测。

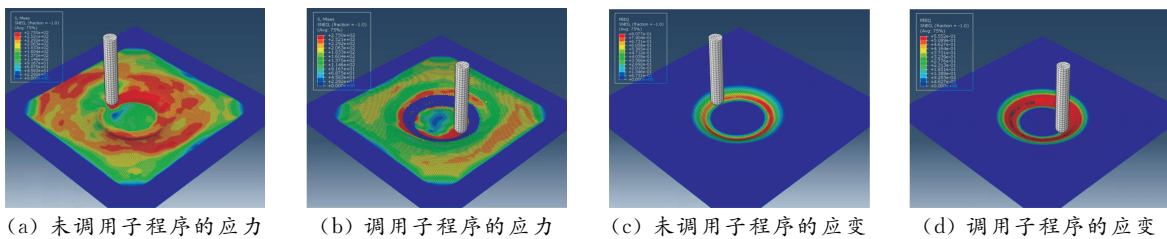


图 9 渐进成形仿真应力、应变分布云图

引入破裂预测子程序的仿真过程中,成形件产生破裂时成形工具以及板材中心区域在 Z 方向上的竖直位移量为 14.27 mm,如图 10 所示。即破裂预测模型对于 2024-T3 铝合金板材的渐进成形极限的预测结果为 14.27 mm,与实际试验结果(14.682 mm)的误差为 2.8%。因此,本文所建立的基于 Lemaitre 韧性断裂准则所建立的破裂预测模型能够实现对 2024-T3 铝合金板材在渐进成形工艺中成形极限的有效预测,并可以实现破裂情况的可视化。

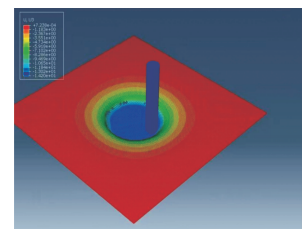


图 10 仿真位移分布云图

3 结语

针对渐进成形极限的可视化预测,以 2024-T3 铝合金为研究对象进行了探究。通过单向拉伸试验和循环加载试验测定了该材料的主要性能参数,并通过数学拟合确定了该材料的损伤变量随应变的变化规律。依据单向拉伸试验中试样发生断裂时的应变 $\epsilon_R = 0.2193$,此时的损伤变量即为该材料的损伤阈值 $D_C = 9.24 \times 10^{-3}$ 。通过对比是否引入破裂预测子程序的两种模型的仿真结果以及试验结果,验证了破裂预测模型的准确性,证明了文章所建立的模型能够有效预测板材在成形过程中的破裂情况。

虽然通过试验证明了破裂预测模型的准确性,但目前的工作仍有局限性。在仿真中所采用的模型为壳单元,因此所建立的破裂预测模型对于成形过程中板材厚向变形规律的探究尚有欠缺。因此,后续可采用实体单元综合全面地探究板材渐进成形极限的预测。

参考文献:

- [1] 松原茂夫. Formation manner and its formation device null:JP 特许第 3292570 号(P3292570)B2 [P]. 2002-06-17.
- [2] LI LY, LIU B Z, LU B H, et al. Experimental study and efficient prediction on forming forces in incremental sheet forming[J]. Advanced materials research, 2014, 3177(939): 313-321.
- [3] EYCKENS P, BELKASSEM B, HENRARD C, et al. Strain evolution in the single point incremental forming process: digital image correlation measurement and finite element prediction[J]. International journal of material forming, 2011, 4(1): 55-71.
- [4] PETEK A, KUZMAN K, KOPAC J. Deformations and forces analysis of single point incremental sheet metal forming[J]. Archives of materials science and engineering, 2009, 35(2): 107-116.
- [5] HIRT G, AMES J, BAMBACH M, et al. Forming strategies and process modelling for CNC incremental sheet forming[J]. CIRP annals-manufacturing technology, 2004, 53(1): 203-206.
- [6] HIRT G, JUNK S, WITULSKI N. Incremental sheet forming: quality evaluation and process simulation [C]. Proceedings of the 7th ICTP Conference, Yokohama, 2002.
- [7] SZEKERES A, HAM M, JESWIET J. Force measurement in pyramid shaped parts with a spindle mounted force sensor[J]. Key engineering materials, 2007, 67(344): 551-558.
- [8] HUSSAIN G, GAO L. A novel method to test the thinning limits of sheet metals in negative incremental forming[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2007, 47(3/4): 419-435.
- [9] HUSSAIN G, GAO L, HAYAT N, et al. A new formability indicator in single point incremental forming[J]. Journal of materials processing technology, 2009, 209(9): 4237-4242.
- [10] EMMENS W C, BOOGAARD A H V D. An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming[J]. Journal of materials processing technology, 2009, 209(8): 3688-3695.
- [11] HUANG Y, CAO J, SMITH K S, et al. Experimental and numerical investigation of forming limits in incremental forming of a conical cup[C]. Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME Paper Presented at NAMRC 36, Monterrey, 2008.
- [12] 李磊, 周晚林, HUSSAIN G. 金属板料单点渐进成形极限的数值模拟预测[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 102-107.
- [13] SILVA M B, SKJOEDT M, BAY N, et al. Revisiting single-point incremental forming and formability/failure diagrams by means of finite elements and experimentation [J]. The journal of strain analysis for engineering design, 2009, 44(4): 221-234.
- [14] MALHOTRA R, HUANG Y, XUE L, et al. An investigation on the accuracy of numerical simulations for single point incremental forming with continuum elements[J]. AIP conference proceeding 2010, 1252(1): 221-227.
- [15] XUE L. Damage accumulation and fracture initiation in uncracked ductile solids subject to triaxial loading[J]. International journal of solids & structures, 2007, 44(16): 5163-5181.
- [16] 丁玉龙. 盒形件智能化拉深的破裂预测[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2005.
- [17] 黄筑平, 杨黎明, 潘睿麟. 材料的动态损伤和失效[J]. 力学进展, 1993(4): 433-467.
- [18] 中国钢铁工业协会. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

- [19] 刘春达,张旭,刘健,等. 板材数控渐进成形过程数值分析与实验研究[J]. 锻压技术,2012,37(5): 35-39.
- [20] LIU F, LI X, LI Y, et al. Modelling of the effects of process parameters on energy consumption for incremental sheet forming process[J]. Journal of cleaner production, 2019, 250(20): 119456.
- [21] LIU F, LI Y, CHENG Z, et al. Preliminary modelling of forming forces in three directions for incremental sheet forming process based on the contact area[J]. Procedia manufacturing, 2020, 50: 630-636.
- [22] XU C, LI Y, WANG Z, et al. The influence of self-lubricating coating during incremental sheet forming of TA1 sheet[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2020, 110(9): 2465-2477.
- [23] LI Y, WANG Z, ZHAI W, et al. The influence of ultrasonic vibration on parts properties during incremental sheet forming[J]. Advances in manufacturing, 2021, 9(2): 1-12.
- [24] LIU Y, WANG Z, LI Y, et al. The effect of thermal spraying on the forming performance of incremental sheet forming[J]. Journal of materials research and technology, 2021, 12: 776-787.

Prediction of plate rupture based on the Lemaitre ductile rupture criterion

WANG Zijian¹, PEI Baohao¹, LU Zhe¹, DU Xianbin²

(1. Department of Traffic Engineering, Yantai Vocational College, Yantai 264670, China;

2. College of Transportation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Incremental sheet forming has significant advantages in the production of individual products. At present, due to the processing characteristics of its material manufacturing, with the increase of the surface area of the parts, its thickness gradually thinned and eventually ruptured, which is the main factor restricting its forming limit. To solve the above problems, the Lemaitre ductile rupture criterion is introduced into the progressive forming technology to predict the forming limit in the process of progressive forming on the basis of predicting the rupture in the process of conventional plastic forming. The basic mechanical properties of 2024-T3 aluminum alloy sheet were determined by unidirectional tensile test and cyclic loading test, and a finite element model of the material was constructed. The predicted results of the model were compared with those of the unidirectional tensile test and progressive forming test, respectively, to verify the effectiveness of the model in predicting the rupture of the 2024-T3 aluminum alloy sheet.

Keywords: incremental sheet forming; Lemaitre's ductile rupture criterion; prediction of sheet rupture; finite element simulation; forming limit

(责任编辑:王新亮)

引用格式 王梓鉴,裴宝浩,鲁哲,等. 基于 Lemaitre 韧性断裂准则的板材破裂预测[J]. 山东航空学院学报, 2025, 42(2): 61-67.

WANG Z J, PEI B H, LU Z, et al. Prediction of plate rupture based on the Lemaitre ductile rupture criterion[J]. Journal of Shandong University of Aeronautics, 2025, 42(2): 61-67.