

基于 DIC 技术的 5083 铝合金成形极限研究

杨英杰^{1,2}, 史立秋^{2,3}, 侯 波^{2,3}, 丁明明^{2,3}

(1. 宁夏大学 机械工程学院, 宁夏 银川 750000; 2. 浙江水利水电学院 机械与汽车工程学院, 浙江 杭州 310000;
3. 先进水利装备浙江省工程研究中心, 浙江省农村水利水电资源配置与调控关键技术重点实验室, 浙江 杭州 310000)

摘要: 5083 铝合金板材的成形极限测定不仅精确度低而且实验过程复杂、成本较高, 为了更加准确地得出 5083 铝合金材料的成形极限并降低结果成本, 利用数字图像相关法技术和 Nakajima 实验对 5083 铝合金的成形极限进行研究。将 5083 铝合金材料做成不同尺寸的板材以改变其受力状态, 并模拟材料实际所受的单向拉伸、平面应变和等双拉 3 种受力状态。利用应变率准则对 5083 铝合金材料的实验数据进行处理, 得到实验条件下的 5083 铝合金的成形极限曲线。为方便快捷地预测出 5083 铝合金材料的成形极限, 建立了 5083 铝合金成形极限的数学模型, 将模型预测结果与实验结果具有很高的重合度, 为预测 5083 铝合金的成形极限提供了较好的依据。

关键词: 5083 铝合金; 成形极限; 数字图像相关法; 单向拉伸; 平面应变; 等双拉

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.03.010

中图分类号: TH142.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 03-0075-05

Research on forming limits on 5083 aluminum alloy based on DIC technology

Yang Yingjie^{1,2}, Shi Liqiu^{2,3}, Hou Bo^{2,3}, Ding Mingming^{2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750000, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Hydropower, Hangzhou 310000, China;

3. Zhejiang Key Laboratory of Key Technologies for Rural Water Conservancy and Hydropower Resource Allocation and Regulation, Advanced Water Conservancy Equipment, Zhejiang Engineering Research Center, Hangzhou 310000, China)

Abstract: The forming limit determination of 5083 aluminum alloy sheet is not only low in accuracy but also complicated in the experimental process and high in cost. Therefore, in order to obtain the forming limit of 5083 aluminum alloy material more accurately and reduce the cost of result, the forming limit of 5083 aluminum alloy was investigated by using digital image correlation method technology and Nakajima experiment, and the 5083 aluminum alloy material was made into sheets with different size to change the stress state and simulate the three stress states of unidirectional tension, plane strain and equal double tension that the material suffered practice. Then, the experimental data of 5083 aluminum alloy material were processed by the strain rate criterion to obtain the forming limit curve (FLC) of 5083 aluminum alloy under the experimental conditions. Furthermore, in order to predict the forming limit of 5083 aluminum alloy material conveniently and quickly, a mathematical model of the forming limit for 5083 aluminum alloy was established and the model prediction and experiment results have a high degree of overlap, which provides a good basis for predicting the forming limit of 5083 aluminum alloy.

Key words: 5083 aluminum alloy; forming limit; digital image correlation method; unidirectional tension; plane strain; equal double tension

铝合金由于具有优良的耐腐蚀性、可成形性、强度等一系列优异的材料属性, 越来越多地被用于

汽车的轻量化设计中来取代传统的钢板。在金属板材的成形制造过程中, 颈缩是最常见的失效现象^[1], 而材料的成形极限反映了颈缩失效极限。不同种类的铝合金材料的成形性差异较大。材料的成形极限曲线的研究通常通过实验、分析和数值模拟 3 种方法。其中, 实验方法是获得金属板材的成形极限曲线 (Forming Limit Curve, FLC) 的基本且成熟的方法。目前, 国际上主要有两种成形实验, 即平面外和平面内拉伸实验。平面外拉伸实验, 例如 Nakajima 实验^[2]、Hecker 实验^[3]; 平面内拉伸实

收稿日期: 2022-05-12; **修订日期:** 2022-08-17

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (LY20E050012); 浙江省重大科技计划项目 (2020C01062); 浙江省重大科技计划项目 (2021C03019); 浙江省基础公益研究计划项目 (LZJWD22E090001)

作者简介: 杨英杰 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: yangyingjie323@163.com

通信作者: 史立秋 (1978-), 女, 博士, 教授

E-mail: jmsdxshiliqiu@163.com

验,例如 Marciniak 实验^[4]。但是材料的 FLC 在相同实验条件下使用不同准则求得的结果具有明显差异,孰是孰非目前尚无定论,已经成为了当前领域研究的热点问题。2008 年,国际社会制定了统一标准 ISO 12004-2: 2008^[5]。然而,对于 FLC 的实验测定,除了通常认为的过于模糊的 ISO 12004-2: 2008 外,没有准确的标准来检测局部颈缩的开始,并构建更稳定和可复制的 FLC。

Zadpoor A A 等^[6]回顾了基于连续塑性的许多理论建模,比较了 4 种不同的颈缩和断裂方法,以预测 2024-T3 高强度铝合金的失效。Zadpoor A A 等^[7]还讨论了厚度应变梯度对延迟颈缩开始的影响。Zhang L 等^[8]模拟了各向异性板料中的局部颈缩。进入 21 世纪,随着科学技术的发展,光学技术和数字成像技术取得了长足的进步,出现了基于数字图像技术的时间判断准则。例如 Merklein M 等^[9]提出了相关系数法,分别是滑行相关系数和平均数与中位数的滑行差异。Situ Q 等^[10]开发了 1 种分析断裂区域某一点处的主应变 ε_1 及其第 1 和第 2 时间导数的方法。基于 Eberle B 等^[11]之前的工作, Volk W 和 Hora P^[12]提出了破坏区域的截面对厚度应变 ε_3 及其厚度应变率的方法。Li J 等^[13]提出使用新的实验/理论方法为 5182-O 铝合金生成了具有中间退火步骤的两阶段成形技术的基于应力的成形极限图。

目前,相关学者提出的判断颈缩的准则方法各异,但总体可归为 3 类:(1) 基于时间的准则;(2) 基于位置的准则;(3) 基于时间、位置的准则。本文利用数字图像相关 (Digital Image Correlation, DIC) 技术可以实时观察到板材的应变状态,所以,选用基于时间相关的 T-D 法准则计算 5083 铝合金材料的 FLC。T-D 法与应变率相关,是在 M-K 理论上进一步改进得到的方法。得到 5083 铝合金材料的 FLC,并根据实验数据建立其对应的数学模型,对比结果发现模型预测与实验数据吻合较好,对指导生产加工具有重要意义。

1 实验

1.1 材料与方法

本次研究采用厚度为 1 mm 的国产 5083 铝合金薄板作为实验材料。目前,国际上测量板材成形极限的实验方法有很多种,本次实验选择应用更加广泛的 Nakajima 实验进行胀形实验,示意图如图 1 所示,并利用数字图像相关技术进行实验信息的实时

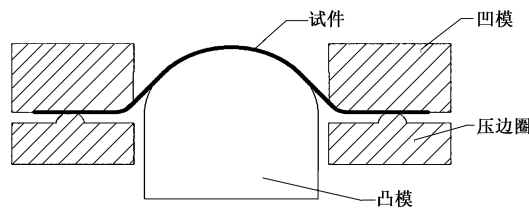


图 1 Nakajima 实验原理图

Fig. 1 Principle diagram of Nakajima experiment

采集。实验所用设备由 PMLAB DIC-3D 三维应变测量系统和北京航空航天大学研发的 BCS-30A 板材成形性极限实验机这两套设备共同组成。材料选用长度均为 180 mm、宽度分别为 20、60、100、120 和 180 mm 的板材进行实验,分别用于模拟板材单向拉伸、平面应变和等双拉 3 种受力状态。板材采用激光切割的方式进行加工成形,板材的形状和尺寸如图 2 所示。

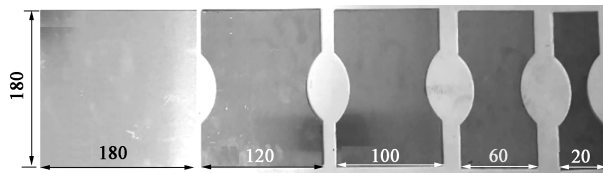


图 2 不同尺寸的 5083 铝合金板材

Fig. 2 5083 aluminum alloy sheets with different sizes

1.2 散斑制备

散斑制备在 DIC 数据采集中至关重要,常用方法有激光打印、电腐蚀网格法、转印、印刷、油漆或墨水喷涂等。本次实验采用油漆喷涂方法,先喷涂白色底漆,然后喷洒黑色斑点。喷涂要点为按压力和喷涂距离来控制斑点的大小、密度和形状,图 3 为喷涂质量较好的斑点以及分析云图。

1.3 实验系统准备

首先,根据实验实际需求,选定不同尺寸规格的标定板对 PMLAB DIC-3D 三维应变测量采集设备进行标定。其次,设置胀形压边力为 300 kN、冲头速度为 $15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。为了实验的准确性,图像采集每秒不得少于 10 帧,本次实验拍摄频率设置为每秒 15 帧。

实验过程中板材与冲头之间的摩擦力会影响板材的受力情况,本实验在 ISO 12004-2: 2008^[5]提供的润滑方式的基础上通过实验摸索进一步改进,使用两层聚氨酯,并在每层聚氨酯上包裹 PTFE 薄膜,薄膜于聚氨酯之间刷油润滑。图 4 为采用新的润滑方法后实验成形的板材,可以看到裂纹均在板材中间。

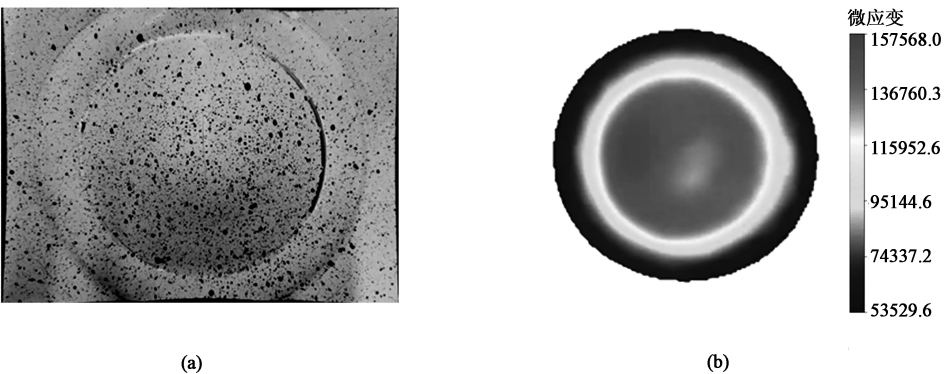


图 3 质量较好的板材斑点 (a) 及分析云图 (b)

Fig. 3 Sheet spot with better quality (a) and analysis cloud map (b)

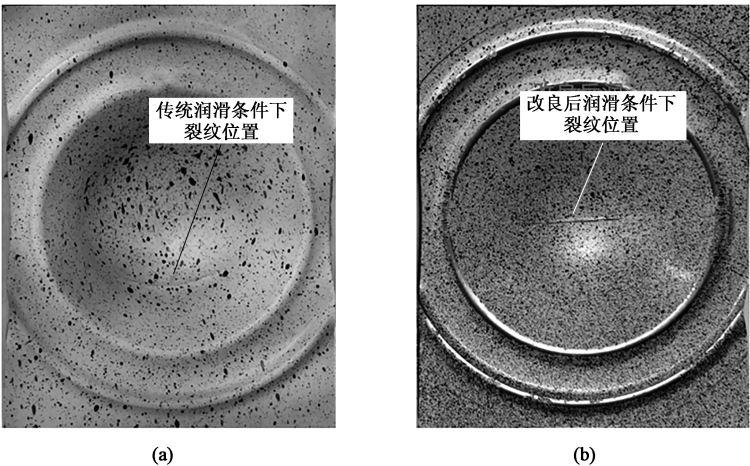


图 4 润滑改进前后的成形板材

(a) 改进前 (b) 改进后

Fig. 4 Formed sheets before and after lubrication improvement

(a) Before improvement (b) After improvement

1.4 实验数据的采集

本实验是基于 DIC 的实验方法，在实验结束后板材的实时受力情况将会在 PMLAB DIC-3D 计算机软件中以应力云图的形式显示出来。实验数据提取方法是在 ISO 12004—2: 2008^[5] 对位置选择的基础上进行修改，具体操作如下：在选取图像云图的正中间画一条阶段线，然后在其左右每隔 1 mm 即板材厚度距离各画一条阶段线，如图 5 所示。阶段点的位置沿着 3 条阶段线分布，1 个像素选择 1 个点，选择其中一条阶段线作为演示，分布情况如图 5 所示。针对应变率准则，需要不同位置阶段点的主应变和次应变随时间的变化数据，导出各阶段点的主应变随时间变化的数据，得出的主应变变化曲线如图 6 所示。

2 结果与讨论

T-D 法是在 M-K 理论上进一步改进的关于应变

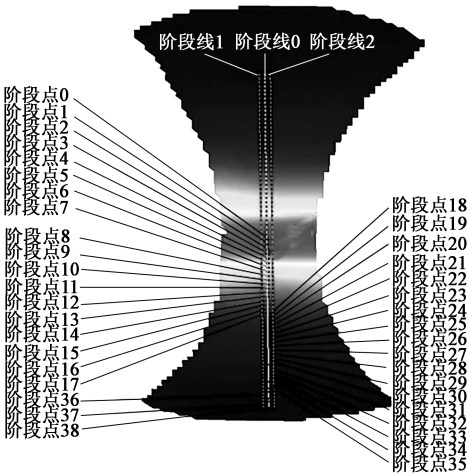


图 5 阶段点的分布

Fig. 5 Distribution of stage points

率的一种计算方法，其原理是板材在发生颈缩时，颈缩区的主应力逐渐增大直至板材发生断裂破坏，而颈

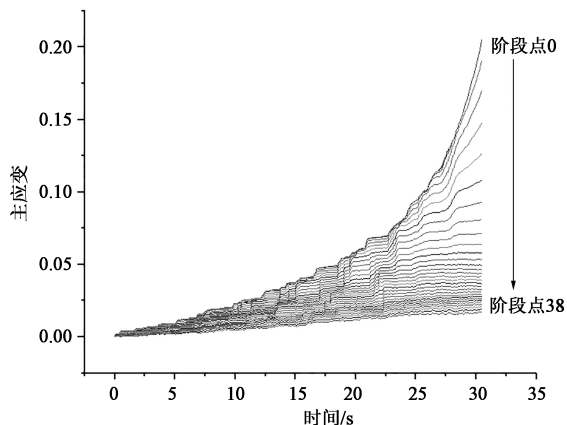


图 6 主应变随时间的演变曲线

Fig. 6 Evolution curves of main strain with time

缩区外的点的主应力增加将会变缓,最后保持在一个稳定水平,直至板材断裂。根据两个区域的应变特点,当两个区域的过渡界点的应变率达到最大值时,判定板材此刻发生颈缩,示意图如图 7 所示。找出该时刻过渡界点对应的主应变 ε_1 和次应变 ε_2 ,记为坐标 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$,即为所求 FLC 的一个点。

图 8 分别为板材颈缩帧频、断裂前一帧、断裂帧频图像。根据选取阶段点的实验数据绘制主应变随时间的演变图像,本文以宽度为 60 mm 的板材试样的结果作为演示,如图 9 所示。图 9 按照 1.4 节中所述方法选取所有阶段点后,通过筛选曲线趋势,去除多余点的曲线并保留 5 个具有代表性的阶段点

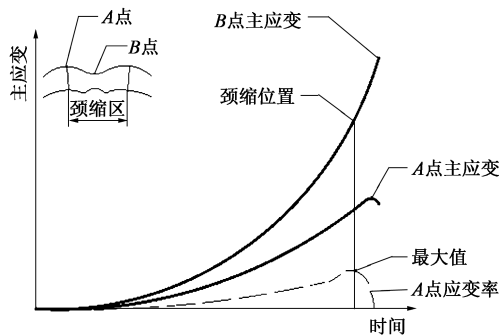


图 7 T-D 计算方法示意图

Fig. 7 Schematic diagram of T-D calculation method

的主应变曲线进行演示。从图 9 中可以看出:阶段点 0 的主应变一直增加,在最后阶段约 58 s 时,急剧增加,在 60 s 时板材发生断裂;阶段点 1 的变化趋势与阶段点 0 的变化一致,只是最后阶段的主应变较小;可以明显看出在最后阶段阶段点 2 的主应变已不再上升而是稳定在一个值上下浮动,趋于平稳,最后有一个下降趋势,主应变曲线形成一个弯钩的形状。经分析,弯钩形成的原因是由于板材在断裂发生的最后时刻发生载荷卸载,产生回弹而导致;阶段点 3 和阶段点 4 的主应变随时间的演变趋势与阶段点 2 的变化趋势一致,只是阶段点 4 距离颈缩区距离较远、主应变较低。据此判断,阶段点 2 为颈缩区与非颈缩区的过渡界点,在阶段点 2,主应变曲线趋势变缓时板材发生颈缩。

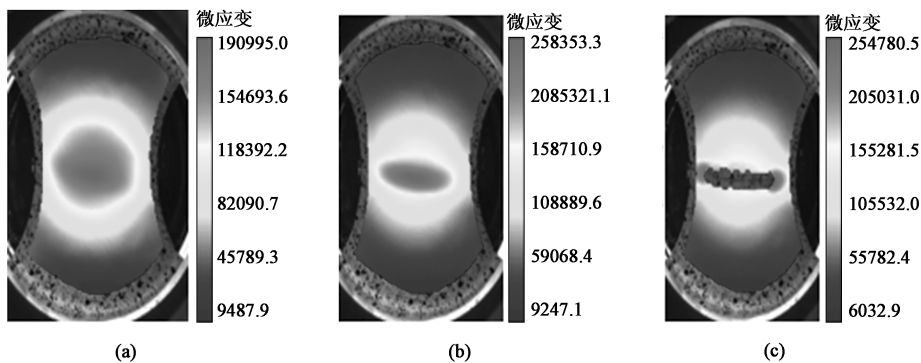


图 8 板材的应变演变

(a) 颈缩时刻 (b) 断裂前一帧 (c) 断裂时刻

Fig. 8 Strain evolution of sheet

(a) Moment of necking (b) Frame before break (c) Fracture time

通过应变率曲线变化来确定颈缩发生的具体时刻和对应的主应变及次应变的值。通过 7 点求导公式法求解应变率,即应变对时间的一阶导数,并绘制图像,如图 10 所示。从图 10 中可以明显看出,阶段点 2 的应变率曲线在最后阶段有 1 个弧形,根据 T-D 法准则,

阶段点 2 的应变率达到局部最大值时颈缩开始,因此,需找到阶段点 2 的应变率最大的时刻。在图 9 所示阶段点 0 的应变随时间的演变曲线中找到对应时刻,得到主应变 ε_1 和次应变 ε_2 ,记为坐标 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$,即为所求 FLC 中的一点。按照上述方法求出所有尺寸的坐

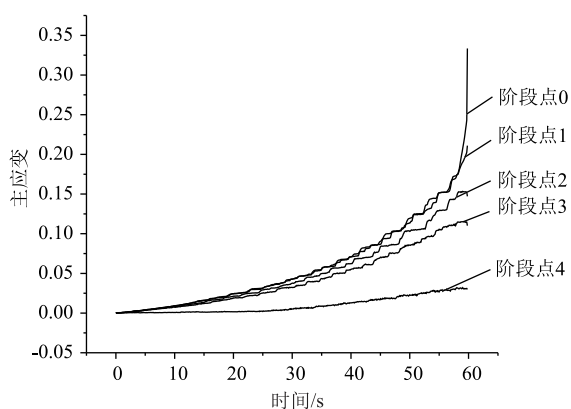


图9 各阶段点的主应变随时间的演变曲线

Fig. 9 Evolution curves of main strains at various stage points with time

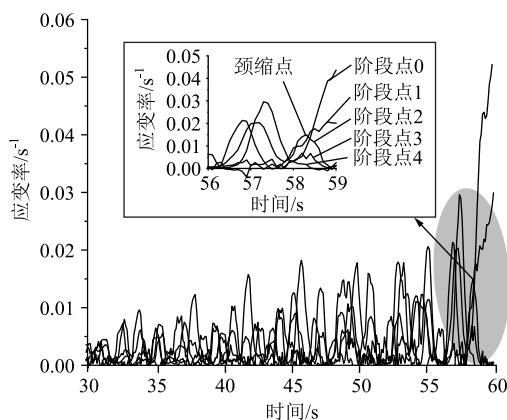


图10 应变率随时间的演变曲线

Fig. 10 Evolution curves of strain rate with time

标值。

根据所求坐标绘制出材料的散点图和利用散点拟合的 FLC, 如图 11 所示。根据实验数据建立适合 5083 铝合金 FLC 的数学模型表达式为:

$$\varepsilon_1 = F_0 + a\varepsilon_2 \quad (\varepsilon_2 < 0) \quad (1)$$

$$\varepsilon_1 = F_0 + b\varepsilon_2^2 + c\varepsilon_2 \quad (\varepsilon_2 > 0) \quad (2)$$

式中: F_0 为拟合函数与纵坐标的交点纵坐标值; a 、 b 、 c 为常数。

将所有数据带入拟合求解得到 $F_0 = 0.1399$, $a = -0.515$, $b = 2.316$, $c = -0.0376$ 。

3 结论

(1) 根据 DIC 技术的实验数据, 用 T-D 准则求得 5083 铝合金的 FLC, 并利用实验数据建立了常温下 5083 铝合金材料的数学模型。

(2) 实验数据均布在模型曲线附近, 比计算机散点图拟合曲线更加贴近, 此模型具有对 5083 铝合金的成形极限进行预测的价值。

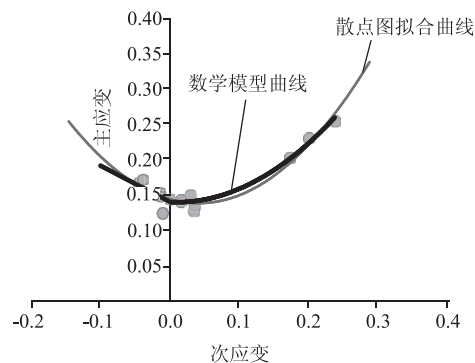


图11 数学模型 FLC 和散点拟合的 FLC

Fig. 11 Mathematical model FLC and scatter-fitted FLC

参考文献:

- [1] Kuwabara T, Yoshida K, Narihara K, et al. Anisotropic plastic deformation of extruded aluminum alloy tube under axial forces and internal pressure [J]. International Journal of Plasticity, 2005, 21 (1): 101-117.
- [2] Yasuyoshi Fukui, Kenji Nakanishi. A study on the formability of steel sheets [J]. Materials Science, 1989, 10 (32): 142-148.
- [3] Ghosh A K, Hecker S S. Stretching limits in sheet metals; In-plane versus out-of-plane deformation [J]. Metallurgical Transactions, 1974, 5 (10): 2161-2164.
- [4] Marciniak Z, Kuczynski K, Pokora Y. Influence of the plastic properties of the material on the forming limit diagram for sheet metal tension [J]. Int. Mech Sci., 1973, 15 (73): 789-805.
- [5] ISO 12004-2: 2008, Metallic materials—sheet and strip determination of forming limit curves, Part 2: Determination of forming limit curves in the laboratory [S].
- [6] Zadpoor A A, Sinke J, Benedictus R. Formability prediction of high strength aluminium sheets [J]. International Journal of Plasticity, 2009, 25 (12): 2269-2297.
- [7] Zadpoor A A, Campoli A, Sinke J, et al. Fracture in bending-The straining limits of monolithic sheets and machined tailor-made blanks [J]. Materials and Design, 2011, 32 (3): 29-41.
- [8] Zhang L, Wang J. Modeling the localized necking in anisotropic sheet metals [J]. International Journal of Plasticity, 2012, 39 (5): 103-118.
- [9] Merklein M, Kuppert A, Geiger M. Time dependent determination of forming limit diagrams [J]. Cirp Annals-manufacturing Technology, 2010, 59 (1): 295-298.
- [10] Situ Q, Jain M, Bruhis M. A suitable criterion for precise determination of incipient necking in sheet materials [J]. Materials Science Forum, 2006, 519/521 (1): 111-116.
- [11] Eberle B, Volk W, Hora P. Automatic approach in the evaluation of the experimental FLC with a full 2D approach based on a time depending method [J]. Computer Science, 2008, 279-284.
- [12] Volk W, Hora P. New algorithm for a robust user-independent evaluation of beginning instability for the experimental FLC determination [J]. International Journal of Material Forming, 2010, 4: 339-346.
- [13] Li J, Carsley J E, Stoughton T B, et al. Forming limit analysis for twostage forming of 5182-O aluminum sheet with intermediate annealing [J]. International Journal of Plasticity, 2013, 45 (1): 21-43.