

文章编号:1674-2869(2019)02-0146-05

一种损伤准则在差厚板拉伸成形中的应用

余月红,付秀娟*,杨 帅,于 歌,赵 严

武汉工程大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430205

摘 要:差厚板由于截面非均一性导致其断裂行为与等厚板有差异,为了研究差厚板的断裂行为,采用单向拉伸实验和反复加载实验相结合的方法建立了差厚板的损伤变量与应变之间的本构关系,并将所建立的本构关系嵌入到 Abaqus 软件中进行了拉伸模拟实验。研究表明:差厚板损伤变量与应变之间为非线性关系,且损伤变量随应变增加呈现出先增加较快后较慢的趋势;采用有限元模拟得到的断裂位置、力和行程曲线与实验结果相吻合,验证了所建立损伤准则的准确性。

关键词:差厚板;损伤准则;有限元模拟;反复加载

中图分类号:TG386 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2019.02.009

Application of Damage Criterion in Strech Forming of Tailor Rolled Blank

YU Yuehong, FU Xiujuan*, YANG Shuai, YU Ge, ZHAO Yan

School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: The fracture behavior of tailor rolled blank is different from that of the blank with same thickness because of its non-uniformity in cross section. To study the fracture behavior of tailor rolled blank, we built a constitutive equation between damage variable and strain by a combination of uniaxial tensile tests and repeated loading experiments. The established constitutive relationship was embedded in the Abaqus software for tensile simulation experiments. The results suggest a nonlinear relationship between damage variable and strain. The damage variable increases faster with increasing strain during early stage but slower during later stage. The fracture position and stress-displacement curve obtained by finite element simulation is well consistent with experimental results, which verifies the accuracy of the damage criterion.

Keywords: tailor rolled blank; damage criterion; finite element simulation; repeated loading

差厚板做为一种轻量化材料,在能有效保持安全性能、舒适性的同时降低燃料的消耗,因此越来越受到人们的关注^[1-4]。然而在差厚板成形过程中板料发生的起皱、破裂等断裂缺陷直接影响零部件的质量,如何预测和避免发生这些缺陷对于指导生产实践有着重要意义^[5]。国内外学者从成形极限、韧性损伤准则等方面建立了各种预测板料破裂的准则,并采用实验和模拟结合的方法验证了所建立准则的准确性^[6-8]。李云^[9]基于 Lemaitre

理论,采用混合法对实验和模拟结果进行分析,建立了适用于高强钢差厚板热成形的韧性断裂准则。黄建科^[10]将新建立的韧性断裂准则应用于金属板料成形中断裂预测,并进行冲压试验,结果表明所建立的韧性断裂准则比成形极限图能够更好预测非线性变形路径下的板料冲压过程中的破裂现象。杨信^[11]以连续损伤力学为基础,通过 Abaqus 软件对盒形件冲压进行模拟,建立了韧性断裂准则并得到了差厚板盒形件的冲压成形极限

收稿日期:2018-09-04

基金项目:国家自然科学基金(51575406);武汉工程大学第九届研究生教育创新基金(CX2017012)

作者简介:余月红,硕士研究生。E-mail:862479972@qq.com

*通讯作者:付秀娟,博士,副教授。E-mail:Fuxiujuan2008@163.com

引文格式:余月红,付秀娟,杨帅,等.一种损伤准则在差厚板拉伸成形中的应用[J].武汉工程大学学报,2019,41(2):

预测值。

然而国内外学者^[12-16]大多数都是对等厚板进行研究,对于差厚板断裂成形行为研究较少,本文提出采用单向拉伸实验与反复加载卸载实验相结合的方法来研究差厚板拉伸断裂行为,首先通过单向拉伸实验获得了差厚板基本的力学性能参数,分析了拉伸中塑性行为变化,然后结合反复加载卸载实验得到了差厚板断裂准则,建立了损伤变量与应变之间的非线性关系式,并采用实验与数值模拟结合的方法来验证所建立准则的准确性。

1 实验部分

实验材料为Cr340差厚板,化学成分: $w(\text{C})=0.077\%$, $w(\text{Mn})=0.429\%$, $w(\text{Si})=0.341\%$ 。还含有少量的S、Al等元素。差厚板由厚度2 mm的厚区、过渡区和厚度1 mm的薄区组成,板材沿拉伸方向的截面形状如图1所示。根据实验标准ASTM,差厚板不同厚度区域反复加载卸载试样尺寸与单向拉伸试样尺寸相同,如图2所示。实验设备为INSTRON电子万能拉伸试验机,拉伸速度为2 mm/min。



图1 差厚板沿拉伸方向截面示意图
Fig. 1 Cross section of tailor rolled blank along direction of stretch

表1 轧制差厚板力学性能参数

Tab. 1 Mechanical property parameters of tailor rolled blank							
不同厚度区域	杨氏模量 / GPa	屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	硬化指数	强化系数 / MPa	断裂伸长率 / %	屈强比
薄区	202	398	473	0.28	975	16.7	0.84
过渡区	198	240	312	0.25	703	7	0.76
厚区	198	486	530	0.26	1033	16.3	0.91

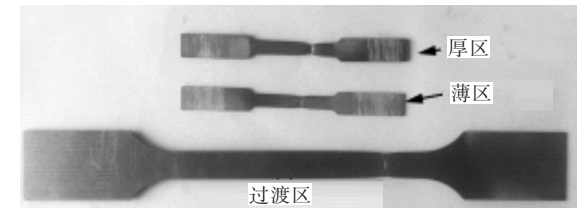


图3 差厚板不同区域试样拉伸结果
Fig. 3 Stretching results of tailor rolled blank in different zones

图3和图4表明,差厚板试样在单向拉伸力的作用下,经过弹塑性变化发生断裂,其断裂位置在过渡区内靠近薄区处,而等厚区其断裂位置位于平行部分中间处。这是由于差厚板厚度的不均匀性及加工过程导致的。一方面,在拉伸过程中,相同的拉伸力,截面积越小越容易产生断裂,另一方

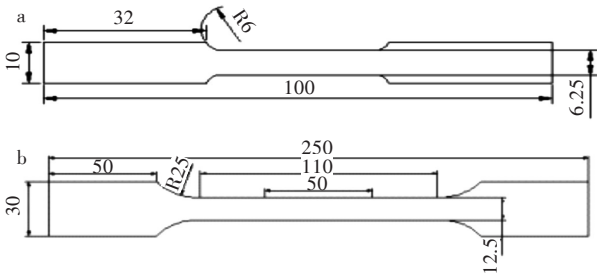


图2 差厚板试样尺寸(单位:mm):
(a)薄区和厚区尺寸相同,(b)过渡区
Fig. 2 Specimen sizes of tailor rolled blank(unit:mm):
(a)thin and thick zones in the same size,(b) transition zone

2 结果与讨论

2.1 单向拉伸实验

应用单向拉伸实验得到的材料力学性能参数如表1所示。拉伸结果如图3所示,差厚板不同区域拉伸真应力-应变曲线如图4所示。从表1可以看出,三者的杨氏模量相近,屈服强度和抗拉强度过渡区最小,板料的屈服强度是弹性变形和塑性变形的分界点,屈服强度越小,表明板料越容易发生塑性变形。差厚板过渡区的屈强比为0.76,与薄区、厚区相比其最小,而屈强比是衡量板料冲压成形性的间接指标,小的屈强比几乎对所有的冲压成型都是有利的,屈强比小表明板料容易产生塑性变形而不易产生拉伸断裂,塑性变形空间大,成形性能好。

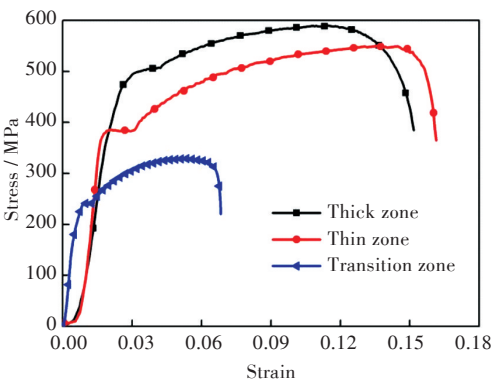


图4 差厚板不同厚度区域试样的真应力-应变曲线
Fig. 4 True stress-strain curves of tailor rolled blank in different zones

面,由于差厚板是轧制形成的,在加工过程中会产生微观上的空洞等缺陷,导致在拉伸过程中,断裂

易在缺陷处发生。

2.2 反复加载卸载实验

在拉伸相同距离后以相同的速率进行卸载，根据实验结果计算出弹性模量和损伤变量，计算方法如式(1)和式(2)所示，并获得不同厚度损伤变量、弹性模量与应变的关系，如图 5 所示。

$$\tilde{E}_i = \frac{E_i + E_{i-1} + E_{i+1}}{3} \tag{1}$$

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}_i}{E_0} \tag{2}$$

经过反复加载卸载实验得到不同厚度区域板料断裂时的应变 ε_c 、未损伤材料的弹性模量 E_0 及断裂时的损伤变量 D_c 如表 2 所示，不同厚度区域板料在拉伸初始阶段，弹性模量 E 下降趋势较大，

在接近断裂时，下降逐渐变缓慢。从图 5 可以看出，损伤变量随应变先上升得较快，后较慢，采用线性函数和非线性函数对其进行拟合，非线性拟合度大于线性拟合度，故损伤变量与应变之间的关系更适合于非线性拟合，拟合结果见式(3)~式(5)。

表 2 差厚板不同厚度区域加载卸载结果

Tab. 2 Results of loading and unloading of tailor rolled blank in different zones

不同厚度 区域	断裂 应变	未损伤弹性 模量 E_0 / GPa	损伤变量 D_c	线性 拟合度 R^2	非线性 拟合度 R^2
薄区	0.17	202	0.22	0.93	0.98
厚区	0.105	198	0.19	0.74	0.94
过渡区	0.043	198	0.23	0.81	0.92

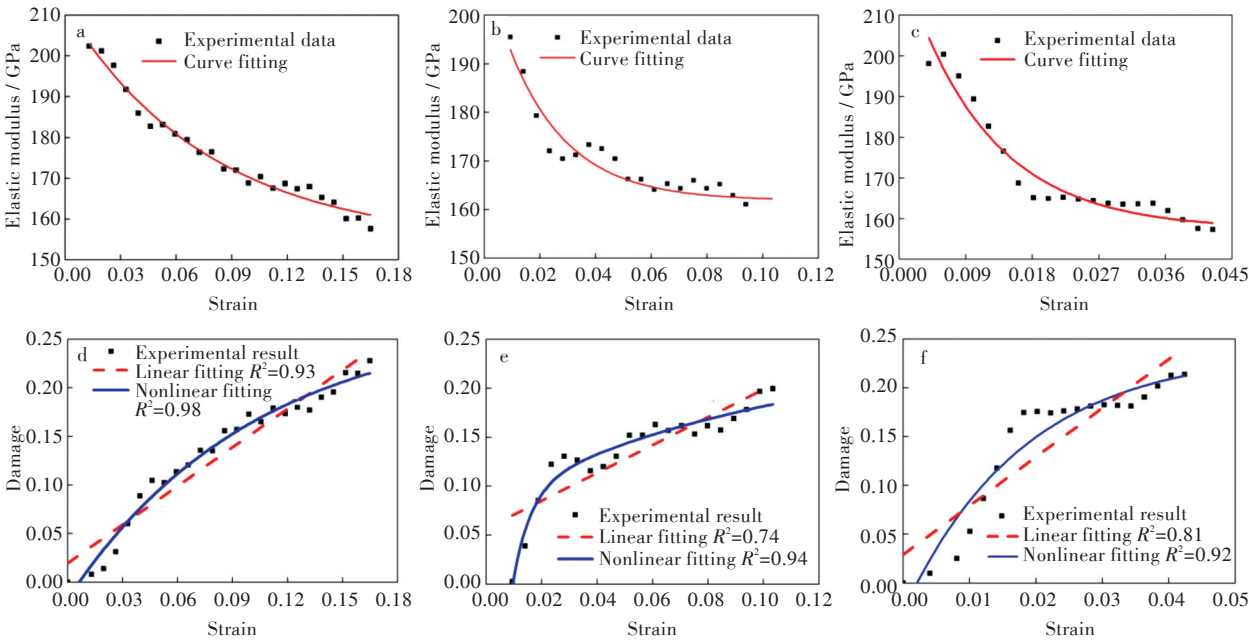


图 5 不同厚度区域弹性模量-应变关系：(a)薄区，(b)厚区，(c)过渡区；
不同厚度区域损伤变量-应变关系：(d)薄区，(e)厚区，(f)过渡区

Fig. 5 Relationships between elastic modulus and strain of specimens in different zones:(a) thin zone, (b) thick zone, (c) transition zone; Relationships between damage and strain of specimens in different zones: (d) thin zone, (e) thick zone, (f) transition zone

$$D_1 = 0.245 - 0.284e^{-\varepsilon/0.077} \tag{3}$$

$$D_2 = 0.174 - 0.246e^{-\varepsilon/0.0212} \tag{4}$$

$$D_{TRB} = 0.238 - 0.268e^{-\varepsilon/0.0181} \tag{5}$$

其中，式(3)为 1 mm 薄区损伤变量与应变关系，式(4)为 2 mm 厚区损伤变量与应变关系，式(5)为过渡区损伤变量与应变关系。

2.3 数值模拟结果

基于 Abaqus/cae 平台分别创建 1 mm 和 2 mm 的等厚区拉伸模型，同时创建厚度连续变化的过渡区板料的拉伸模型，并采用八节点线性六面体单元，缩减积分，沙漏控制(C3D8R)对其进行网格划分，并将实验中获得的材料参数赋予给对应厚

度的单元，一端固定，另一端以与实验相同的速率进行仿真模拟，差厚板单向拉伸仿真模型如图 6 所示。图 7 为嵌入损伤准则的差厚板拉伸后应变分布云图，从图 7 中可以看出，塑性变形集中于差厚板薄区内，厚区几乎不变形，其断裂位置位于试样邻近薄区的平行部分，且是发生明显紧缩后断裂，这与拉伸实验结果相吻合，表明损伤准则是较准确的。图 8 是实验和模拟的力与位移关系曲线，从图 8 可以看出，两者弹性模量较接近，发生紧缩位置相吻合，实验与模拟相比，两者基本吻合，再次验证了损伤准则的准确性。

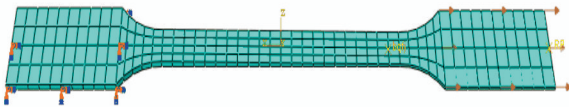


图6 单向拉伸试样有限元模型

Fig. 6 Finite element model of uniaxial tensile specimen

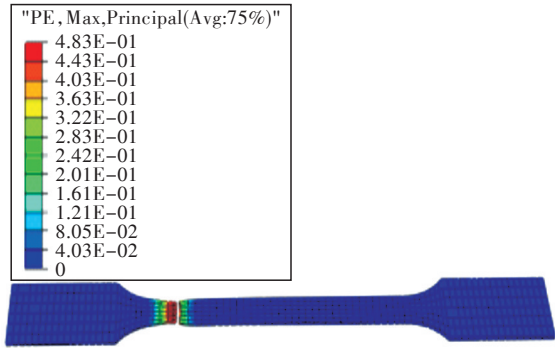


图7 差厚板单向拉伸应变分布云图

Fig. 7 Strain distribution contours of uniaxial tensile specimen

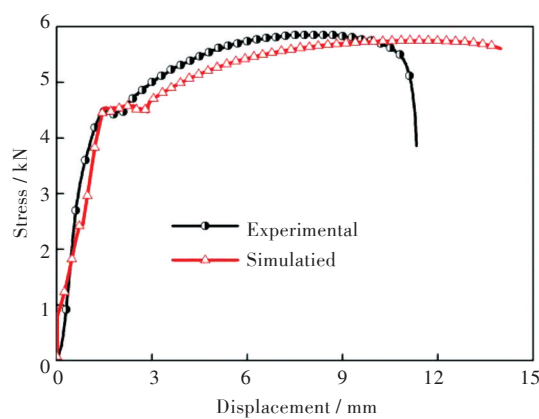


图8 实验与模拟的力-位移曲线

Fig. 8 Curves of experimental and simulated stress-displacement

3 结 语

本文通过单向拉伸实验建立了差厚板厚度真应力-应变关系曲线,结合反复加载卸载实验建立了差厚板非线性损伤准则,并将其运用于 Abaqus 有限元软件中,通过实验与模拟结合的方法,得到以下结论:

- 1)差厚板单向拉伸中损伤变量与应变之间呈现非线性关系,且损伤变量随应变增加呈现出先增加得较快后较慢的趋势。
- 2)将实验得到的损伤关系式嵌入 Abaqus 软件中对差厚板进行模拟实验,模拟结果表明塑性变形主要集中于邻近薄区的厚区过渡区,断裂位置与实验相吻合,验证了损伤关系的准确性。

参考文献

[1] 张华伟,吴佳璐,刘相华,等. 轧制差厚板方盒形件起皱缺陷研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),2016,37(11):1554-1558.

[2] 张华伟,刘立忠,胡平,等. 轧制差厚板单向拉伸性能研究[J]. 大连理工大学学报,2012,52(5):648-651.

[3] HIRT G, SENGE S. Selected processes and modeling techniques for rolled products[J]. Procedia Engineering, 2014,81:18-27.

[4] MERKLEIN M, JOHANNES M, LECHNER M, et al. A review on tailored blanks—production, applications and evaluation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014,214(2):151-164.

[5] 庄蔚敏,曹德闯,叶辉. 基于连续介质损伤力学预测 7075 铝合金热冲压成形极限图[J]. 吉林大学学报(工学版),2014,44(2):409-414.

[6] 曾嵘,黄亮,李建军,等. 一种改进的损伤断裂准则及其在板料成形中的应用[J]. 锻压技术,2015,40(8):13-20.

[7] XIA T X, YAO W X. Comparative research on the accumulative damage rules under multiaxial block loading spectrum for 2024-T4 aluminum alloy [J]. International Journal of Fatigue, 2013,48:257-265.

[8] SKRIPALENKO M M, ROMANTSEV B A, GALKIN S P, et al. Prediction of the fracture of metal in the process of screw rolling in a two-roll mill [J]. Metallurgist, 2018,61(11/12):925-933.

[9] 李云. 基于韧性断裂准则的高强钢 TRB 热成形破裂预测研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.

[10] 黄建科. 金属成形过程的细观损伤力学模型及韧性断裂准则研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.

[11] 杨信. 高强钢 TRB 盒形件热冲压成形极限预测研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.

[12] 古田. 高强钢热成形韧性断裂准则研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.

[13] 张学广. 基于损伤理论的铝合金板料成形极限研究[D]. 长春:吉林大学,2016.

[14] 赵伟,邱小婷,陈丽. 基于 Lemaitre 韧性断裂准则的 1060 铝板成形极限研究[J]. 锻压技术,2017,42(3):149-153.

[15] 谢延敏,于沪平,陈军,等. 板料成形中韧性断裂准则应用研究进展[J]. 工程设计学报,2007,14(1):6-10.

[16] SOYARSLAN C, RICHTER H, BARGMANN S. Variants of Lemaitre's damage model and their use in formability prediction of metallic materials [J]. Mechanics of Materials, 2016,92:58-79.