

基于 Oyane 准则的金属板材渐进成形破裂预测

李军超[†], 龚鹏程, 杨世涛, 王维

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要:针对渐进成形中的破裂缺陷,将 Oyane 准则引入数值模拟中,有效预测了渐进成形中金属板料的成形极限.首先,针对 DC56D+Z 钢板,基于获取的 Oyane 准则材料参数,通过试验与数值模拟确定了破裂积分值 $I=4$ 为破裂的临界条件.然后,基于响应面法建立了工艺参数与 I 积分值之间的非线性模型,且通过方差分析验证了该模型的有效性.研究得出:该数值模型可以有效预测最大破裂积分 I 值, I 值随着成形角 α 、层间距 Δz 和工具头直径 d 的增大而增大,3 个工艺参数的影响作用逐渐减弱,且 α 与 Δz 、 α 与 d 两种组合的交互作用影响较大.

关键词:渐进成形;Oyane 准则;破裂预测;工艺参数;数学模型

中图分类号: TG386

文献标志码: A

Fracture Prediction of Sheet Metal Incremental Forming Based on Oyane Criterion

LI Junchao[†], GONG Pengcheng, YANG Shitao, WANG Wei

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to solve the fracture defects in incremental forming, the Oyane criterion was introduced into numerical simulation, and the forming limit of sheet metal in incremental forming was effectively predicted. Firstly, based on DC56D+Z plate and its material constants of the Oyane criterion, the critical value of fracture integral ($I=4$) was determined by experiment and numerical simulation. Afterwards, by using response surface methodology, a nonlinear model between the process parameters (forming angle α , interlayer spacing Δz and diameter of tool head d) and I was established, and the effectiveness of the model was verified by a parametric analysis. It is found that the value of I can be effectively predicted by the numerical model. The value of I increases with the increase of α , Δz and d . The influence of α , Δz and d on I value gradually decreases in sequence. In addition, the relative large interaction effects of α & Δz and α & d are found.

Key words: incremental forming; Oyane criterion; fracture prediction; process parameters; mathematical model

* 收稿日期: 2018-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51575066), National Natural Science Foundation of China(51575066); “控制科学与工程”浙江省重中之重学科开放基金资助项目, Zhejiang Provincial Top Key Discipline of Mechanical Engineering

作者简介: 李军超(1979—), 男, 河南平顶山人, 重庆大学副教授

† 通讯联系人, E-mail: ljchust@163.com

渐进成形技术 (incremental sheet forming, ISF) 是一种针对金属板料的先进快速柔性成形技术^[1-2]。在无需专用模具的条件下,通过控制工具头的加工轨迹对板料进行逐层加工得到变形量大、形状复杂的产品。在小批量生产、产品定制、缩短研发周期和生产成本等方面具有优越性^[3-4]。目前,渐进成形技术在交通运输、医疗、航空航天等领域得到广泛应用^[5-7]。

近年来,渐进成形的板材破裂及预测一直是研究的重点和难点。Hirt 等^[8]提出成形后板厚 t 与初始厚度 t_0 符合正弦定律 $t = t_0 \sin(90^\circ - \theta)$ 。Hussain 等^[9]建立了渐进成形过程的经验成形极限图 (FLD),并证明了当层间距和工具头直径在一定范围内时,所建 FLD 图的有效性。Huang 等^[10]设定最大厚度减薄率,通过板料减薄率的大小来判断断裂的发生。上述预测方法通常对加载路径有特殊要求,或不能有效地预测塑性较低金属的破裂情况。基于韧性破裂准则不依赖外界加载条件的特点及其在传统板材成形工艺的成功应用,有学者将此方法引入到板材渐进成形工艺中。李磊等^[11]运用 Oyane 破裂准则证明渐进成形的成形极限远高于传统板材成形工艺。Malhotra 等^[12]运用 Xue^[13]提出的断裂准则取得了较以往模型更准确的成形力和破裂预测结果。目前关于破裂准则的研究不够深入,且不能对实际渐进成形加工起显著的指导作用。因此,找到适合预测渐进成形破裂情况的破裂准则,变得尤其重要。本文应用 Oyane 韧性破裂准则对渐进成形的成形极限进行了预测,并结合试验和有限元分析,确认了临界破裂积分值。基于响应面法建立了工艺参数与破裂积分的数值模型,探讨工艺参数及其交互作用对韧性破裂的影响规律。

1 韧性破裂准则的应用

1.1 Oyane 准则

本文所使用的 Oyane 准则^[4]为:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \left(C_1 + \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \right) d\bar{\varepsilon} = C \quad (1)$$

式中: $\bar{\varepsilon}_f$ 为破裂发生处的等效应变; σ_m 为静水应力; $\bar{\sigma}$ 为等效应力; $\bar{\varepsilon}$ 为等效应变; C 、 C_1 为材料常数。

为了后续应用的便捷,将 Oyane 准则变形为:

$$I = \frac{1}{C} \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \left(C_1 + \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \right) d\bar{\varepsilon} \quad (2)$$

式中: I 为积分值,当 I 大于一定临界值时,材料发生破裂。

1.2 材料属性

试验采用尺寸为 160 mm×140 mm×0.8 mm 的 DC56D+Z 钢板为研究对象,其力学性能参数如表 1 所示。材料常数 C 和 C_1 是 Oyane 准则应用的基础。本研究中,结合单向拉伸和平面应变拉伸得出 $C = -0.174$, $C_1 = -1.117 5$ 。

表 1 DC56D+Z 钢板性能参数

Tab.1 Performance parameters of DC56D+Z steel plate

弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	密度/(kg·m ⁻³)	硬化指数	泊松比
207	136.19	7 850	0.24	0.28

1.3 FEM 模型

基于 ABAQUS 软件,建立的渐进成形 CAE 模型如图 1 所示,包括工具头、板料、支撑和上下压边圈五部分。模型采用 S4R 壳单元,板料与工具头的摩擦系数为 0.05,板料与其余部件摩擦系数为 0.25,上下压边力差值为 2 000 N,刀具轨迹为 UG 处理好的相应数据(成形角 α 、工具头直径 d 、层间距 Δz)。工具头网格大小为板料网格大小的 1/4。Oyane 准则通过 VUMAT 子程序实现。

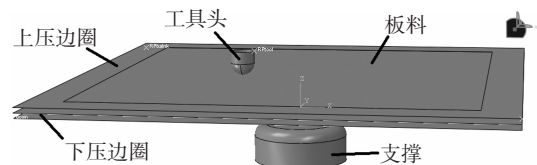


图 1 板材数控渐进成形 CAE 模型

Fig.1 NC incremental sheet metal forming CAE model

2 Oyane 模型对渐进成形的破裂预测

2.1 试验参数

采用重庆大学三轴数控渐进成形机 NH3532 分别加工成形角(α)为 75°、80°、85°、90°的四种去顶圆锥件,目标制件尺寸如图 2 所示。试验加工参数为:层间距 $\Delta z = 0.5$ mm,工具头直径 $d = 8$ mm,加工速度 $V = 2 000$ mm/s。此外,以相同的参数在 ABAQUS 软件上进行有限元模拟。

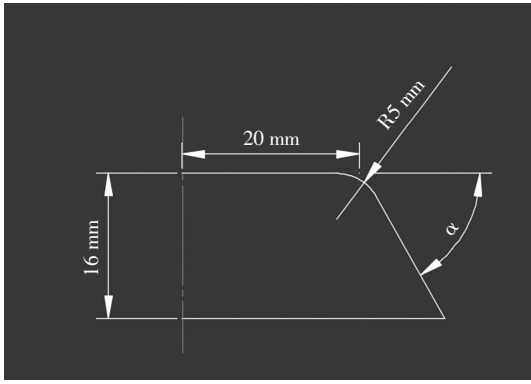


图 2 目标制件尺寸
Fig.2 Size of target parts

2.2 预测结果与讨论

如图 3 所示,只有当成形角为 75°时,制件才能成功加工,而成形角为 80°、85°、90°的制件均出现破裂现象.由此说明,这种加工条件下的目标制件的极限成形角为 75°~80°间的某个角度.分析三组破裂制件的壁厚发现,三组试样从顶圆到侧壁厚度逐渐降低,当成形深度达到一定值时试样发生破裂,且三组试验的破裂均发生在制件侧壁.成形角 α 为 75°、80°、85°、90°时的最大成形深度分别为:16 mm、8 mm、7.5 mm、6 mm.随着成形角的增大,最大成形深度逐渐降低.

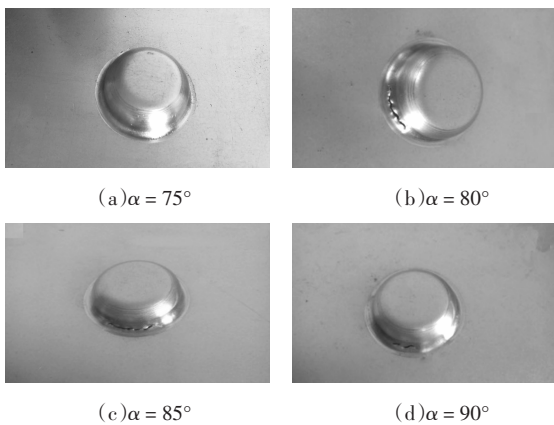
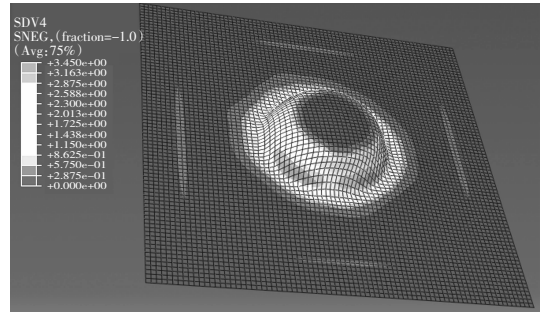


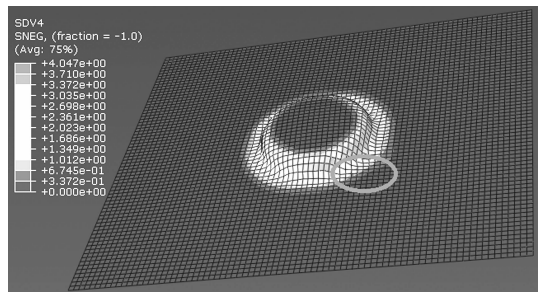
图 3 渐进成形加工所得制件
Fig.3 Workpiece made by incremental forming

有限元模拟结果如图 4 所示,只有当成形角为 75°时,才能完整模拟得到加工高度为 16 mm 的制件.整个加工过程中破裂积分 I 值从顶圆到侧壁底部呈现先增大后减小的趋势,这与渐进成形制件的板料厚度减薄率的变化情况一致^[15],最大破裂积分值($I = 3.45$)出现在板料侧壁中下部位.当成形角为 80°、85°、90°时,破裂积分 I 最大值分别为 4.047、4.261、4.400,且其破裂时加工高度分别为 8.230 0

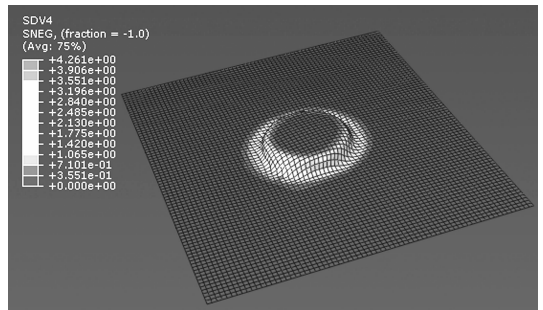
mm、7.480 2 mm、5.937 0 mm,与试验结果吻合.破裂的三组最大积分 I 值均为略高于 4 的某值,然而,试验所测值为平均值,模拟测定为单元瞬时值,实际临界破裂积分值会比模拟测得的略小.因此,临界破裂积分值 $I = 4$ 可作为预测渐进成形过程中板材破裂是否发生的判据.



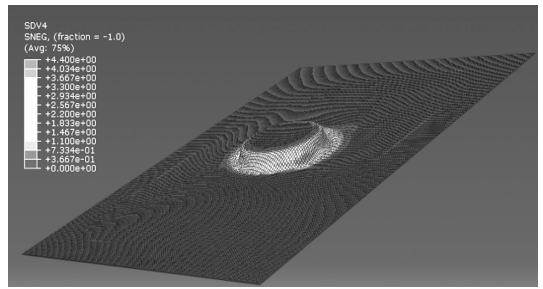
(a)成形角 $\alpha = 75^\circ$



(b)成形角 $\alpha = 80^\circ$



(c)成形角 $\alpha = 85^\circ$



(d)成形角 $\alpha = 90^\circ$

图 4 不同成形角的有限元分析结果

Fig.4 Finite element analysis results of different forming angles

3 工艺参数对韧性破裂的影响

当 $I > 4$ 时,板材会发生破裂.为了避免板材发

生破裂,探究工艺参数对破裂积分 I 值的影响规律意义重大.选用 Design Expert 软件中的 Box-Behnken 方法设计正交试验.为保证结果的有效性,将正交试验的中心点试验 ($\alpha = 40^\circ, \Delta z = 0.6 \text{ mm}, d = 10 \text{ mm}$) 重复 3 次,共进行 15 组试验.因素水平如表 2 所示.

表 2 因素水平

Tab.2 Factor levels

水平	成形角 $\alpha/^\circ$	层间距 $\Delta z/\text{mm}$	工具头直径 d/mm
1	20	0.5	5
2	40	1.0	10
3	60	1.5	15

3.1 数值模型的建立

正交试验的数值模拟结果如表 3 所示,选用响应面模型中的二次模型^[16]:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum \sum_{i < j} a_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3)$$

式中: y 为响应拟合函数,即为最大破裂积分值 I ; k 为变量组合数 ($k = 15$); a_0, a_i, a_{ij} 为待定回归系数,个数为 $(k+1)(k+2)/2$; ε 为随机误差; x_i 为相互独立的设计变量.

表 3 正交试验安排及数值模拟结果

Tab.3 Arrangement of orthogonal test and results of numerical simulations

试验号	成形角 $\alpha/^\circ$	层间距 $\Delta z/\text{mm}$	工具头直径 d/mm	最大破裂积分 I 值
1	40	0.5	15	12.730
2	40	1.0	10	15.080
3	40	0.5	5	3.239
4	60	0.5	10	7.791
5	20	0.5	10	0.921
6	60	1.0	15	13.930
7	60	1.5	10	16.770
8	40	1.5	15	16.350
9	40	1.0	10	14.18
10	20	1.0	15	1.746
11	20	1.0	5	2.450
12	40	1.5	5	16.140
13	40	1.0	10	15.080
14	60	1.0	5	3.450
15	20	1.5	10	3.773

基于响应面法,得出最大破裂积分值 I 和设计的三种工艺参数的响应函数如下:

$$I = -36.445 + 13.224 \times \Delta z + 2.13063 \times d + 1.19249 \times \alpha + 0.15317 \times \Delta z \cdot \alpha - 0.9281 \times \Delta z \cdot d + 0.02796 \times \alpha \cdot d - 1.491 \times \Delta z^2 - 0.017734 \times \alpha^2 - 0.0917 \times d^2 \quad (4)$$

式中: Δz 为层间距; α 为成形角; d 为工具头直径.

为了验证预测模型的有效性,进行方差分析.结果如表 4 所示:SS 代表残差平方和;df 为自由度;MS 为均方差;F 值代表了对应的可控因子对响应函数的影响的显著程度. p 值 = 0.0006 < 0.05, 证明模型显著,且各参数对 I 值的影响的显著情况为:成形角 > 层间距 > 工具头直径.

表 4 方差分析结果

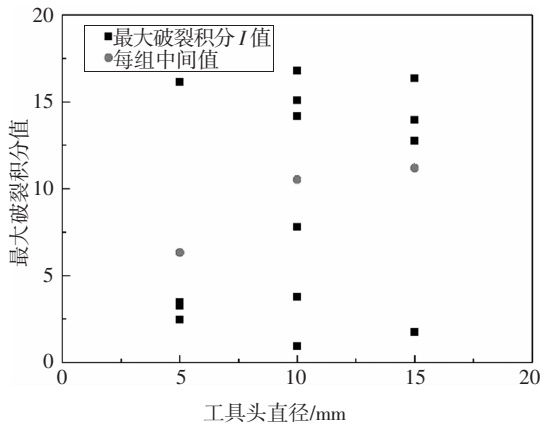
Tab.4 Results of variance analysis

方差来源	SS	df	MS	F 值	p 值
A(层间距 Δz)	100.48	1	100.48	56.62	0.0007
B(成形角 α)	136.55	1	136.55	79.64	0.0002
C(工具头直径 d)	47.42	1	47.42	26.72	0.0036
AB	9.39	1	9.39	5.29	0.0085
AC	21.53	1	21.53	12.13	0.0698
BC	31.27	1	31.27	17.62	0.0176
A ²	0.51	1	0.51	0.29	0.6139
B ²	185.79	1	185.79	104.69	0.0003
C ²	19.41	1	19.41	10.96	0.0213
残差	8.87	5	0.042		
总计	552.96	14			
R ²	0.9508		R ² 校正值	0.8623	
R ² 预测值	0.7764		Adeq Precision	10.686	

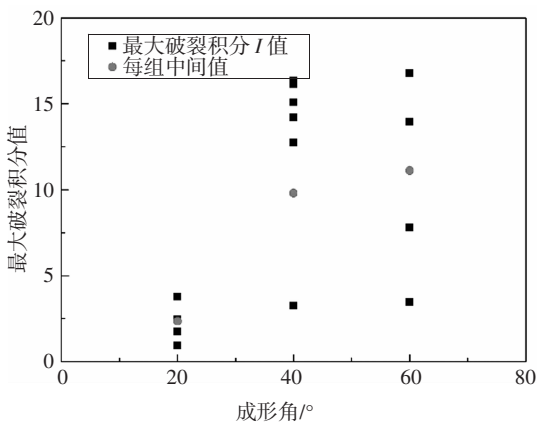
3.2 工艺参数的独立影响

图 5 所示为各工艺参数对最大破裂积分 I 值的影响情况.如图 5(a)所示,随着工具头直径的增大,最大破裂积分 I 值增大.这种增大现象主要有两个原因:1) 板料接触面积随工具头的增大而增大,进而使参与塑性变形的板料面积增大;2) 最大破裂积分 I 值的增大与工具头加工过程中与板料摩擦产热有关.但整体的增大趋势较缓,表明工具头直径对最大破裂积分 I 值影响较小.如图 5(b)所示,当成形角增大时,最大破裂积分值 I 显著增大,但增长趋势不呈线性,在成形角为 $40^\circ \sim 60^\circ$ 区间内增加趋势放缓.这与渐进成形过程遵循正弦定理一致,当成形角

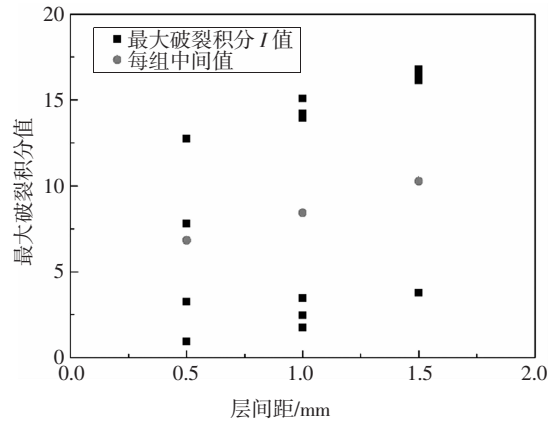
增大时,板料变形程度增加,最大破裂积分 I 值增大,当增加到某一临界值时,板料厚度急剧减薄直至出现破裂现象.如图 5(c)所示,随着层间距的增加,最大破裂积分 I 值显著增大.引起这种变化的主要原因如下:随着层间距的增加,相同情况下板料成形所需的成形力更大,且两相邻加工层间重叠区域面积减小,板料流动能力减弱.成形角对最大破裂积分 I 值的影响最大,层间距次之,工具头直径最小.



(a)工具头直径对最大破裂积分值 I 的影响



(b)成形角对最大破裂积分值 I 的影响



(c)层间距对最大破裂积分值 I 的影响

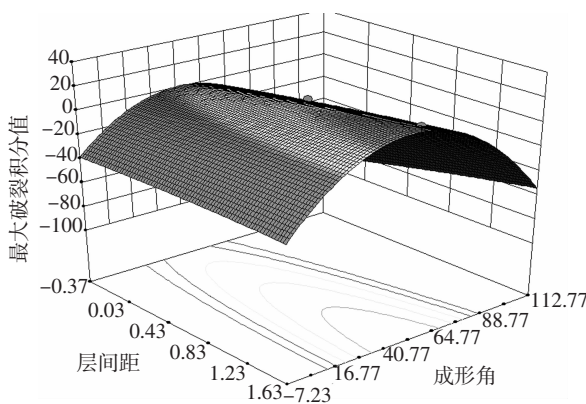
图 5 工艺参数对破裂积分值 I 的独立影响

Fig.5 Effect of process parameters on the maximum value of I

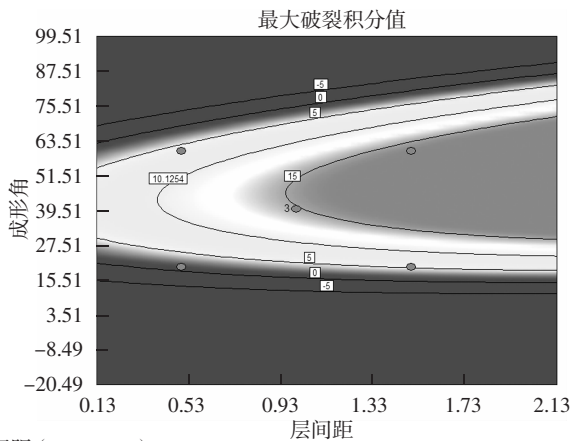
3.3 工艺参数交互作用的影响

除了工艺参数对韧性破裂的独立影响,在实际加工过程中多种工艺参数的交互作用也起到一定影响,其对最大破裂积分 I 值的影响如图 6 所示.如图 6(a)所示,当 $d = 10 \text{ mm}$ 时,曲面图变化的坡度较大,则成形角对最大破裂积分 I 值影响较大,随着成形角的增大,最大破裂积分 I 值先增大后减小,在 80° 左右开始呈减小趋势.但实际加工成形中,成形角超过 80° 便难以单道次加工出制品.考虑实际情况后,最大破裂积分 I 值随成形角的增大而显著增大.等值线呈椭圆形,则层间距和成形角间的交互作用明显.

如图 6(b)所示,当 $\alpha = 40^\circ$ 时,随着层间距的减小,最大破裂积分 I 值减小,且坡度较大,说明层间距对最大破裂积分 I 值的影响较大.随着工具头直径的增大,最大破裂积分 I 值增大,但相比层间距的



(a)成形角和层间距 ($d = 10 \text{ mm}$)



最大破裂积分值

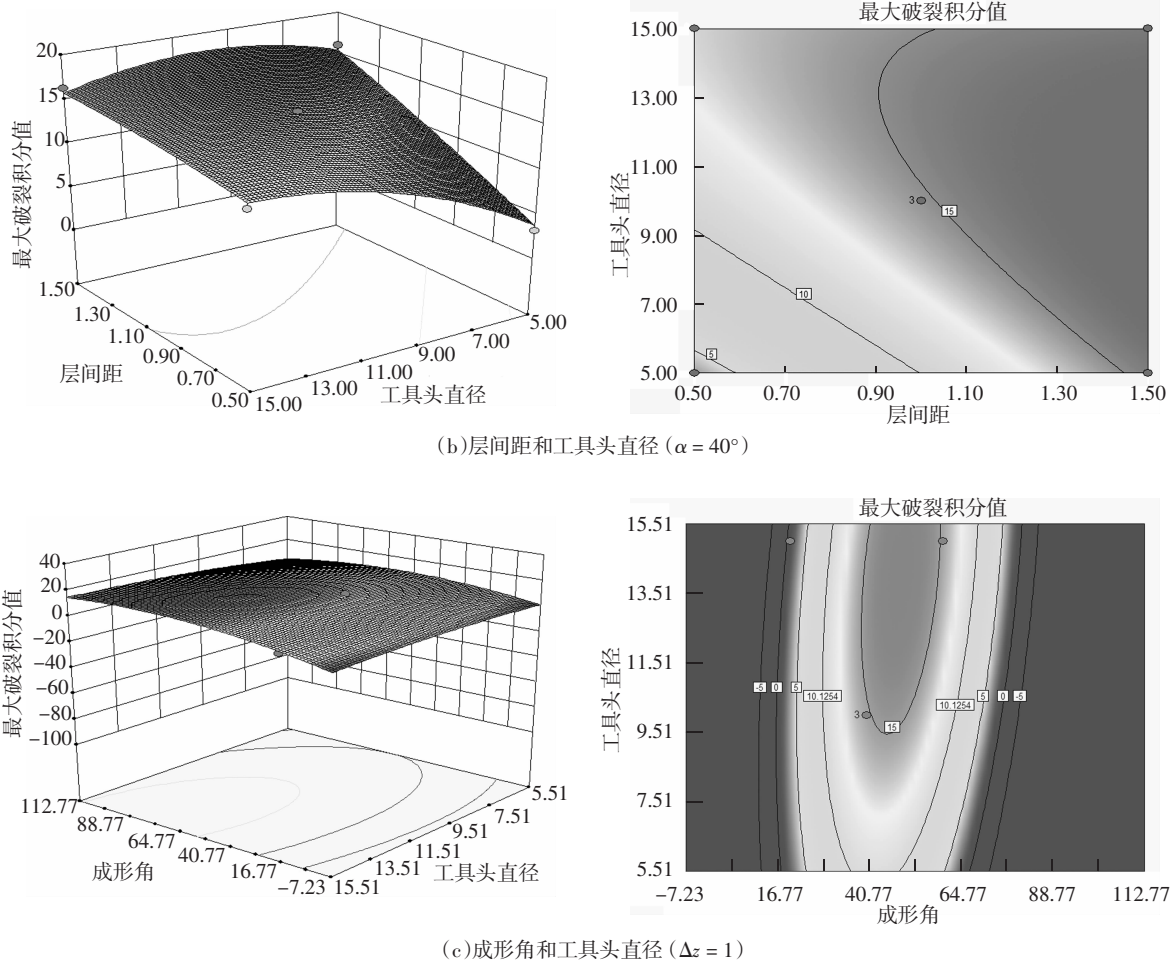


图 6 各参数组合的交互作用对破裂积分值的影响

Fig.6 The interaction of parameter combinations on fracture integral value

变化坡度,曲面上升坡度较小,因此层间距对最大破裂积分 I 值的影响比工具头直径更小. 等值线与椭圆形状相差较大,因此层间距和工具头直径间交互作用对最大破裂积分 I 值的影响较小.

如图 6(c)所示,当 $d = 1 \text{ mm}$ 时,随着成形角的增大,最大破裂积分 I 值增大,且曲面上升趋势明显,再次表明成形角变化对最大破裂积分 I 值影响波动较大.同理分析,工具头直径对最大破裂积分 I 值的影响小于成形角. 等值线为椭圆且等值线间隔很小,因此,成形角与工具头直径的交互作用对最大破裂积分 I 值的影响较大.

4 结论

1)应用 Oyane 准则预测 DC56D+Z 钢板在渐进成形过程中的破裂情况,结合试验与有限元分析得

出:破裂积分值 $I = 4$ 可作为渐进成形韧性破裂的临界值.

2)确定了预测最大破裂积分 I 值的数值模型,并结合方差分析验证了该模型预测的有效性.

3)最大破裂积分 I 值随着成形角 α 、层间距 Δz 和工具头直径 d 的增大而增大,三个工艺参数的影响作用逐渐减弱,且 $\alpha \& \Delta z$ 、 $\alpha \& d$ 两种组合的交互作用影响较大.

参考文献

[1] KOCHAN A. Dieless forming [J]. Assembly Automation, 2001, 21 (4):321—323.
 [2] AMBROGIO G, FILICE L, RATINIF L, et al. Process mechanics analysis in single point incremental forming [J]. AIP Conference Proceedings, 2004, 712(1):922—927.
 [3] MATTINS P A F, BAY N, SKJOEDT M, et al. Theory of single point

- incremental forming [J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2008, 57(1):247—252.
- [4] NIMBALKAR D H, NANDEDKAR V M. Review of incremental forming of sheet metal components [J]. International Journal of Engineering Research & Applications, 2013, 3(5): 39—51.
- [5] DURGUN I, SAKIN A. Automobile sheet metal part production with incremental sheet forming [J]. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 2016, 22(1):8—16.
- [6] LIU G. The application of single point incremental forming technology of sheet metal in bus prototyping [J]. Advanced Materials Research, 2011, 338:46—55.
- [7] DUFLOU J R, LAUWERS B, VERBERT J, *et al.* Medical application of single point incremental forming: Cranial plate manufacturing[J]. Journal of the American Medical Association, 2005, 90(23): 1867—1869.
- [8] HIRT G, JUNK S, WITULSKY N. Incremental sheet forming: quality evaluation and process simulation [C]// Proceeding of the 7th ITCP. Yokohama, 2002:925—930.
- [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] HUANG Y M, CHIEN K H. The formability limitation of the hole-flanging process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 117(1/2):43—51.
- [11] 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.
- LI L, ZHOU W L, HUSSAIN G. Numerical simulation of single point incremental forming limit of sheet metal [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18):102—107. (In Chinese)
- [12] MALHOTRA R, HUANG Y, XUE L, *et al.* An Investigation on the accuracy of numerical simulations for single point incremental forming with continuum elements[C]//Proceedings of the 10th International Conference. New York: American Institute of Physics, 2010:221—227.
- [13] 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.
- [14] OYANE M, SATO T, OKIMOTO K, *et al.* Criteria for ductile fracture and their applications [J]. Journal of Mechanical Working Technology, 1980, 4(1):65—81.
- [15] 陶龙, 王进, 姜虎森. 单点渐进成形时工艺参数对成形能力的影响[J]. 锻压技术, 2012, 37(3):19—22.
- TAO L, WANG J, JIANG H S. Effect of process parameters on forming ability in single point incremental forming [J]. Forging Technology, 2012, 37(3):19—22. (In Chinese)
- [16] 隋允康, 宇慧平. 响应面方法的改进及其对工程优化的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011:117—128.
- SUI Y K, YU H P. The improvement of response surface methodology and its application on engineering optimization [M]. Beijing: Science Press, 2011:117—128. (In Chinese)