

纵弧棱 U 型梁的冲压变形行为分析

刘武静, 吕琳

(重庆理工大学材料科学与工程学院, 重庆 400054)

摘要: 针对高强度纵弧棱 U 型梁类件的冲压成形问题, 分析了纵弧棱 U 型梁成形件各个区域的冲压变形特点, 再通过有限元分析总结了其成形过程的应力、应变分布情况和厚度变化规律, 并结合模拟结果与物理试验探讨了该类零件在成形过程的减薄和增厚行为。验证结果表明: 该梁类件的主要变形区为翼板区, 且厚度从端部至中部逐渐减小; 主要危险部位处于中部侧壁上与顶部圆角的连接处, 最小厚度为 0.833 mm, 为制件质量的主要评估处, 该处应变变化较大, 其中厚度最大减薄量接近 0.20 mm, 易导致梁失效。研究结果对该类梁的成形工艺和模具设计具有参考价值。

关键词: 纵弧棱 U 型梁; 高强度钢; 冲压成形; 应力; 应变; 厚度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.01.007

中图分类号: TG386 文献标志码: A 文章编号: 1000-3940 (2022) 01-0049-07

Analysis on stamping deformation behavior for U-shaped beam with longitudinal arc edge

Liu Wujing, Lyu Lin

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: For the stamping problem of U-shaped beam parts with longitudinal arc edges of high strength steel, the stamping deformation characteristics of each area for the U-shaped beam forming part with longitudinal arc edge were analyzed. Then, the stress and strain distributions and the thickness change laws of the forming process were analyzed by finite element, and its thinning and thickening behaviors in the forming process were explored by combining the simulation results and physical experiments. The verification results show that the main deformation area of the beam is the wing plate area, and the thickness gradually decreases from the end to the middle. The main dangerous area was at the junction of middle side wall and fillet at the top with the minimum thickness of 0.833 mm, which is the main assessment position for the quality of parts. In addition, the strain at this place changes greatly, and the maximum reduction amount of thickness is close to 0.20 mm, which is easy to cause failure of the beam. Thus, the research results have reference value for the forming process and die design for this type of beam.

Key words: U-shaped beam with longitudinal arc edge; high strength steel; stamping; stress; strain; thickness

在轿车车身结构件中, 有一些是沿纵向有一定曲率的 U 型截面高强度钢件, 如前后防撞梁 (图 1)。由于 U 型截面梁的棱线具有曲率, 该类零件的变形行为比直棱 U 型梁复杂得多^[1-3]。对纵弧棱 U 型件的成形回弹问题, 已有一定研究^[4-8], 本文主要研究纵弧棱 U 型梁在冲压成形时各变形区域材料在径向、切向和厚向的变形规律, 了解工件的变薄程度, 为该类零件冲压成形坯件形状尺寸的确定以及该类

梁的强度刚度评定提供参考。

1 纵弧棱 U 型梁的冲压成形特点

可将弧棱梁冲压成形时的变形区域划分为: 两侧翼板区、两侧壁区、顶部区, 以及翼板圆角区和顶部圆角区。零件各变形区域的划分和坐标系如图 2 所示, 其中 θ 、 b 和 t 分别表示纵向、横向和厚度方向。

翼板区为变形区: 翼板材料上的应力主要为纵向压应力 σ_θ 和横向拉应力 σ_b , 应变状态以纵向负应变 ε_θ 为主, 厚度方向应变 ε_t 为负应变, 横向应变 ε_b 为正应变, 导致该区域板料有增厚的趋势, 如图 3a 所示。侧壁区由于材料已完成变形, 在凹

收稿日期: 2020-12-17; 修订日期: 2021-03-19

基金项目: 重庆市应用开发资助项目 (cstc2014yykfA60002)

作者简介: 刘武静 (1995-), 男, 硕士研究生

E-mail: liu415000267@163.com

通信作者: 吕琳 (1968-), 女, 硕士, 教授

E-mail: lulin@cqut.edu.cn

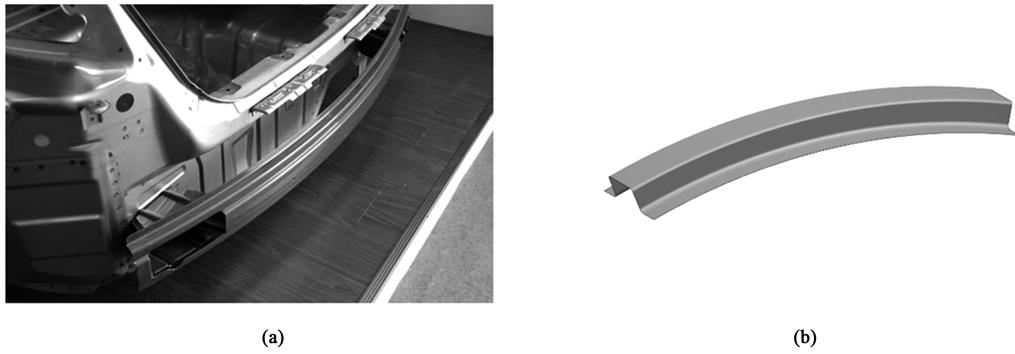


图 1 汽车防撞梁 (a) 与纵弧棱 U 型梁 (b)

Fig. 1 Automobile anti-collision beam (a) and U-shaped beam with longitudinal arc edge (b)

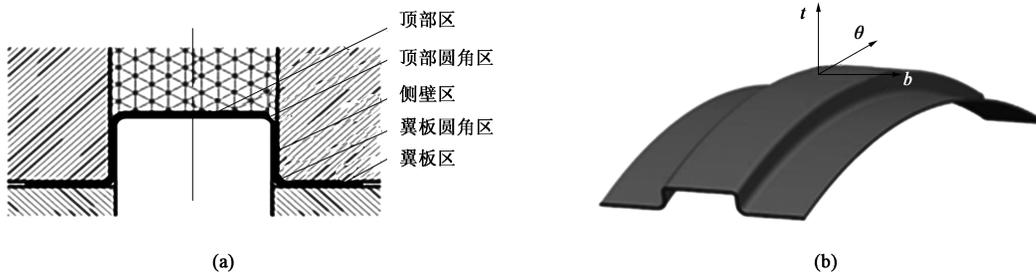


图 2 零件成形过程及变形区划分示意图

(a) 成形过程与变形区划分 (b) 坯料变形中间过程与基准坐标系

Fig. 2 Schematic diagrams of part forming process and deformation zone division

(a) Forming process and division of deformation zone (b) Intermediate process of blank deformation and reference coordinate system

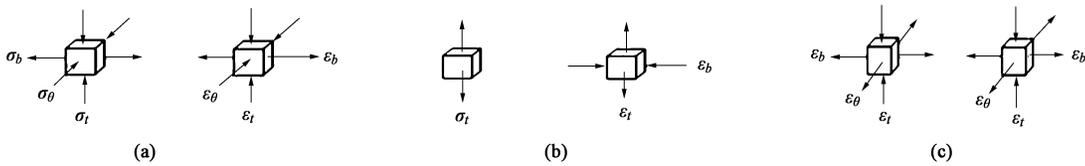


图 3 主要变形区的应力、应变状态

(a) 翼板区 (b) 侧壁区 (c) 顶部区

Fig. 3 Stress and strain states of main deformation zones

(a) Wing area (b) Sidewall area (c) Top area

模继续下行过程中，成形力经过直壁传到翼板区域，起传力的作用。侧壁区仅受到向下拉应力 σ_t 的作用，使侧壁板料厚度有变薄的趋势，但一般不产生塑性变形，如图 3b 所示。顶部区域在凹模与压边圈初始闭合过程中形成，类似于小弯曲变形，材料在纵向应力状态为外拉内压，厚度有少许减薄的趋势，如图 3c 所示。翼板圆角和顶部圆角区分别是翼板材料进入侧壁的过渡区和侧壁与顶部的过渡区，两区域的材料主要受到横向拉力 σ_b 和纵向压应力 σ_θ 的作用。

通过对上述各变形区的分析可以发现，纵弧棱 U 型梁的成形过程可以看作是拉深与弯曲相结合的形式，各变形区域之间的材料相互连续，成形过程

中相互制约。

2 有限元模型

采用高强度钢 DP590 板材，其材料基本参数如表 1 所示。坯料单元采用 Belyschko-Tsay (BT) 壳单元，厚度为 1.0 mm^[9-11]。

表 1 DP590 钢材性能参数

Table 1 Property parameters of DP590 steel material

参数	屈服	抗拉	弹性	泊松比	各向异性参数			硬化指数
	强度/MPa	强度/MPa	模量/GPa		r_0	r_{45}	r_{90}	
数值	389	644	203	0.293	0.87	0.88	1.06	0.18

考虑到制件为横向拉深和纵向弯曲的变形特点，采用倒装单动成形，即凹模在上、凸模在下。凸模、凹模、压边圈及板料的有限元模型如图 4 所示。由于零件的对称特性，后处理时取其长度的 1/2 来进行分析^[11-12]。板料与凸模、凹模和压边圈的摩擦因数 μ 均为 0.125。

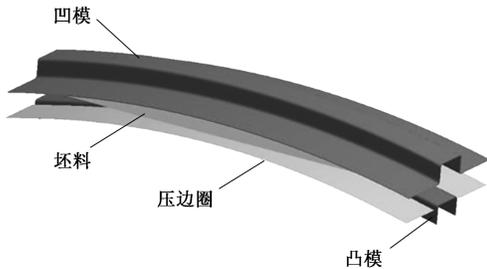


图 4 纵弧棱 U 型梁有限元模型

Fig. 4 Finite element model of U-shaped beam with longitudinal arc edge

3 成形数值模拟结果分析

3.1 各区域的应力分布

纵弧棱 U 型件成形时的两侧翼板区、翼板圆角区、顶部圆角区、侧壁区和顶部区的应力分布如图 5 所示（由于对称性，仅取前半段梁）。从图 5 中可以看出，两侧翼板区的横向应力主要为拉应力，

数值较大，纵向（梁的长度方向）应力主要为压应力，且翼板纵向中部压应力数值大于其他各变形区，趋近于 436 MPa，端部应力近似为 0。侧壁区沿侧壁高度方向（横向应力）主要为拉应力，长度方向（纵向应力）主要为压应力，等效应力与其他变形区相比，数值较大，最大值高达 310 MPa。由于各向应力数值较大，使得侧壁区与翼板圆角区相连处的强度较小，易成为危险区域。对于顶部区，其横向拉应力、纵向压应力和等效应力三者中的最大值小于 250 MPa，相对于其他变形区，数值较小，可忽略不计。对于翼板圆角区和顶部圆角区，两者的横向应力均为拉应力，纵向应力均为压应力，其两向应力的数值均较大。

3.2 主要区域的应变和变形分析

根据图 2b 的基准坐标系，两侧翼板区、翼板圆角区、顶部圆角区、侧壁区和顶部区的应变分布如图 6 所示。两侧翼板区的横向应变为正应变，数值小；纵向（长度方向）应变为负应变，数值大。其特点为中间的应变量大、两端的应变量小，且靠近翼板圆角区的应变绝对值最大，纵向的负应变值高达 0.015，可见翼板区的应变状态以纵向负应变为主。翼板区的成形主要是依靠横向材料伸长、纵向材料收缩、厚度增加的方式实现。

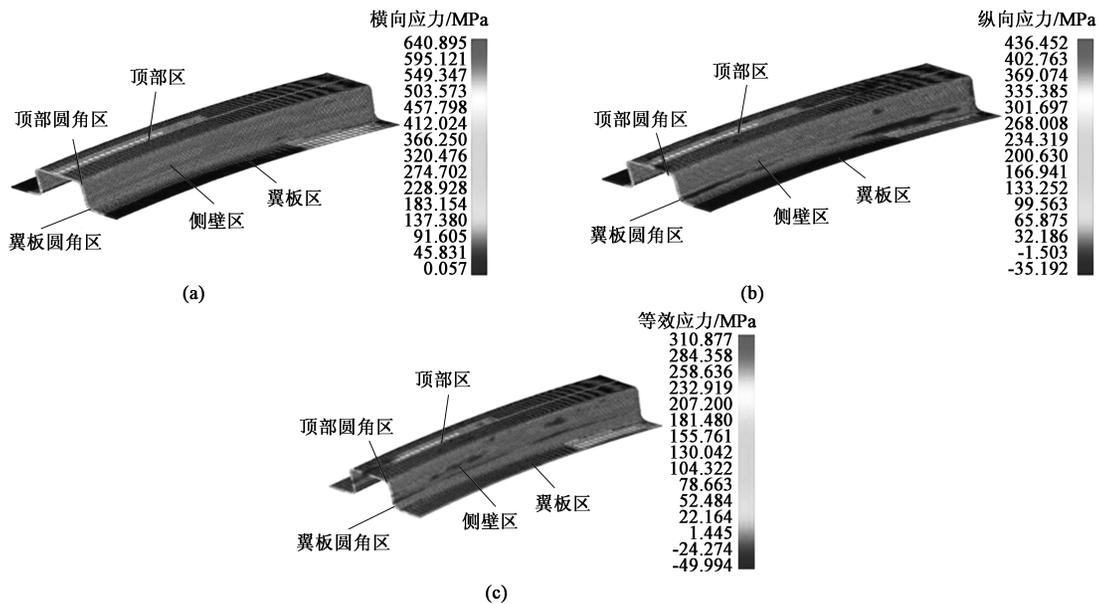


图 5 前半段制件应力分布图

(a) 横向应力 (b) 纵向应力 (c) 等效应力

Fig. 5 Stress distribution diagrams for the first half of part

(a) Transverse stress (b) Longitudinal stress (c) Equivalent stress

对于零件侧壁区（图 6），从侧壁底部开始，沿梁高度方向的正应变不断增大，直至临近翼板圆角

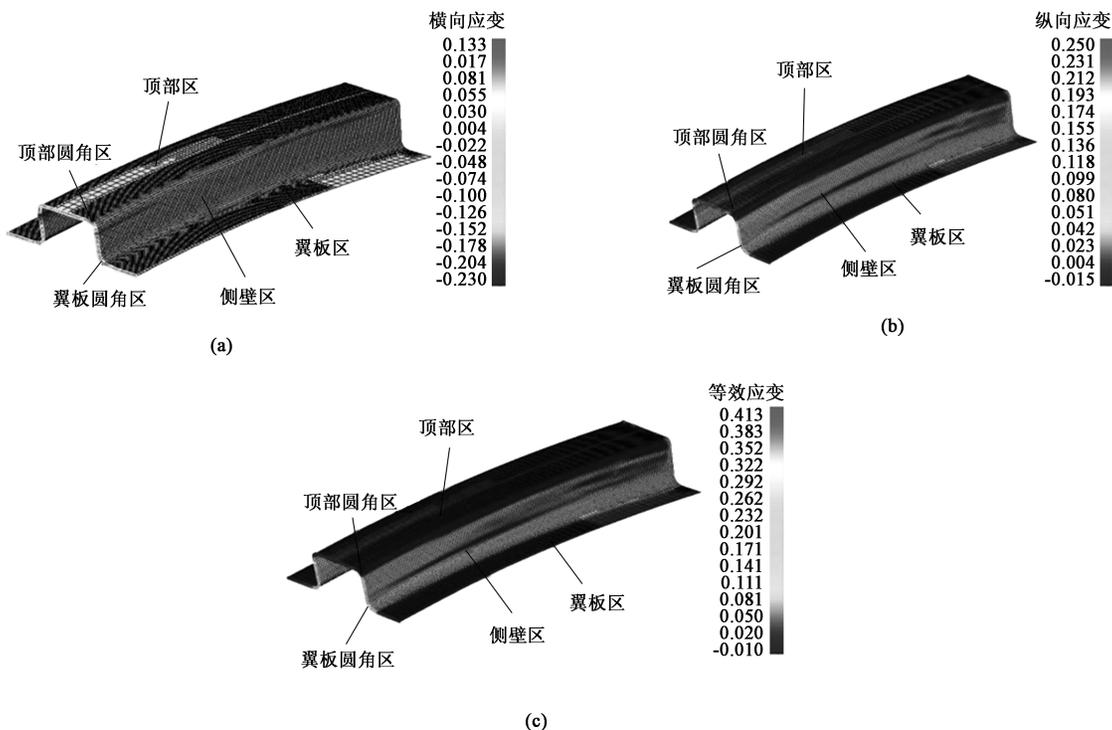


图 6 零件应变分布图

(a) 横向应变 (b) 纵向应变 (c) 等效应变

Fig. 6 Strain distribution diagrams of part

(a) Transverse strain (b) Longitudinal strain (c) Equivalent strain

处达到最大，其应变变化较大；沿梁侧壁长度方向的负应变，数值从中间向两端不断减小。侧壁区的变形方式主要为沿梁侧壁方向伸长、沿纵向收缩、厚度方向减薄。

对于顶部圆角区，其与侧壁相连处的正应变最大，最大值可达 0.133。说明该相连处的横向伸长达到最大，纵向有较小程度的收缩，厚度减薄到最小，易成为危险区。

而在翼板圆角区，材料的横向应变 ε_x 为正应变，纵向应变 ε_z 为负应变，两者的数值均略低于翼板区材料各向应变的数值。其变形方式也与翼板区材料相同，厚度仍在缓慢增加，直至在靠近侧壁区的厚度增加到最大。

在顶部区，由于顶部圆角和摩擦的阻碍，横向应变、纵向应变和等效应变均较小，其变形可忽略不计。

根据梁的整体及等效应变分析可知，侧壁区的等效应变主要为正应变，其余变形区的主要应变为压应变，并且，梁中间的纵向应变数值最大，两端的纵向应变数值最小。梁的整体变形主要为横向伸长、纵向缓慢收缩，成形后梁制件会发生沿纵向两端至中间逐渐增厚的现象，可通过坯料优化缩减板

料两侧的材料，增大纵向（长度方向）端部的材料。

3.3 U 型梁各区域的厚度分析

由于 U 型截面梁类件的厚度大小将直接影响到它的强度和刚度，所以为了直观地总结各变形区的厚度变化规律，在沿 U 型梁件纵向的正中间、端部及距端部 1/4 和 1/8 处各选取一个截面，并且在截面上选取同样的 5 个位置点进行厚度测量，如图 7 所示。

制件在成形后，翼板圆角与翼板相连的边缘处的材料厚度达到最大值（图 7a），且最大值高达 1.028 mm，位于制件中部。

最小厚度出现在中间截面侧壁上的顶部圆角附近，且由图 7a 可知，最小厚度为 0.829 mm。说明当翼板部分材料不断进入凹模内成为壁部后，沿侧壁高度方向的拉应力逐渐变大，材料不断伸长，由于纵向收缩极小，导致厚度逐渐减薄，且位于横向截面中部区域的材料减薄值大于过渡区域和端部区域。

增厚区域出现在两侧翼板区，主要集中于制件中部，且厚度沿中部至纵向（长度方向）端部逐渐减小。这是由于翼板区在成形过程中为主要变形区，板料在压料板和凹模的共同约束下，纵向受到挤压，

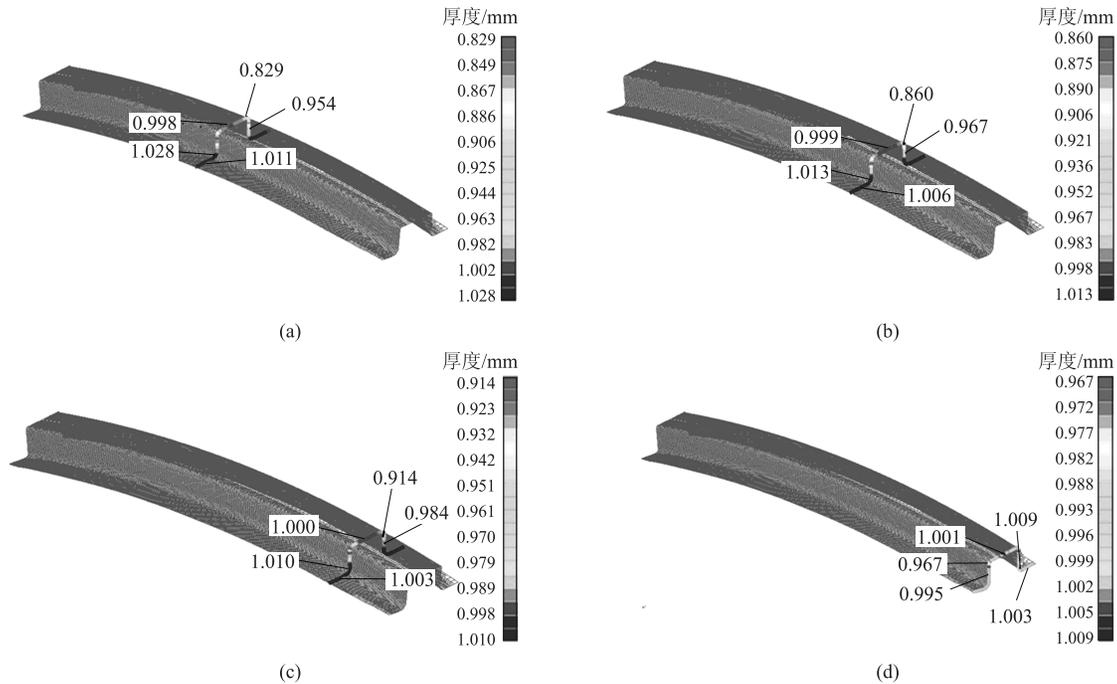


图 7 零件各横向截面厚度变化图

(a) 正中截面 (b) 距端部 1/4 处截面 (c) 距端部 1/8 截面 (d) 端部截面

Fig. 7 Thickness change diagrams of each transverse section for part

(a) Middle section (b) 1/4 from end section (c) 1/8 from end section (d) End section

而横向拉应力较小，横向伸长缓慢，导致材料向中部堆积，沿横向增厚。从图 7 模拟情况看，此处并不是危险部位，因为该处板厚增加，材料的承载力相应变大。

在成形中，由于顶部区域大部分材料被固定而无法流动，且又受到凸模的挤压和横向拉应力的作用，所以零件成形后，厚度有较小程度的减薄，但数值太小，低于 0.3%，可近似忽略。

4 物理试验结果与分析

4.1 试验制备

为研究工件各变形区的厚度变化，制作了曲率半径 R 为 400 mm 的一套模具（图 8a），试验中的其他工艺参数和选材与模拟时条件一致。试验后所得制件和截面测量位置的划分如图 8b 所示，截面 1（图 8c）为梁制件正中截面，截面 2（图 8d）为距中部 1/8 处截面，截面 3（图 8e）为距端部 1/8 处截面，由于截面 4 为端部截面，不需切割，故图 8 中不表示。

根据零件横向截面的形状特点，选用如图 9 所示的 13 个节点位置，分别测量各横向截面（图 8b）中节点位置的厚度。

4.2 试件厚度变化情况

试件厚度的测量结果如图 10 所示，厚度增大区域位于节点 1~节点 3 和节点 11~节点 13 之间，最大厚度位于截面 1（中部），数值模拟所测得厚度最大值为 1.028 mm，物理试验所得厚度最大值为 1.029 mm。而厚度减薄区域位于节点 4~节点 6 和节点 8~节点 10 之间，且最小厚度位置位于正中截面，数值模拟所测得的厚度最小值为 0.829 mm，物理试验所测得的厚度最小值为 0.833 mm。可见物理试验和数值模拟所测得的厚度数值之差处于误差范围内。

结合各节点厚度测量值和厚度变化云图分析发现，梁翼板区的整体厚度从端部到正中部，厚度缓慢增加，最大厚度位于截面 1 的节点 3~节点 4 和节点 10~节点 11 之间，即翼板区靠近圆角处。这是由于材料通过凹模圆角流入侧壁时，材料受到的纵向压应力仍大于所受到的横向拉应力，导致其厚度依然有少许增加，靠近节点 4 和节点 10 的厚度达到最大。

厚度减薄最严重的位置位于各截面的节点 6 和节点 8，且截面 1（正中）侧壁靠近顶部圆角处的厚度最小。这是因为：在成形过程中，材料流入侧壁，在到达与顶部圆角的连接处时，材料主要

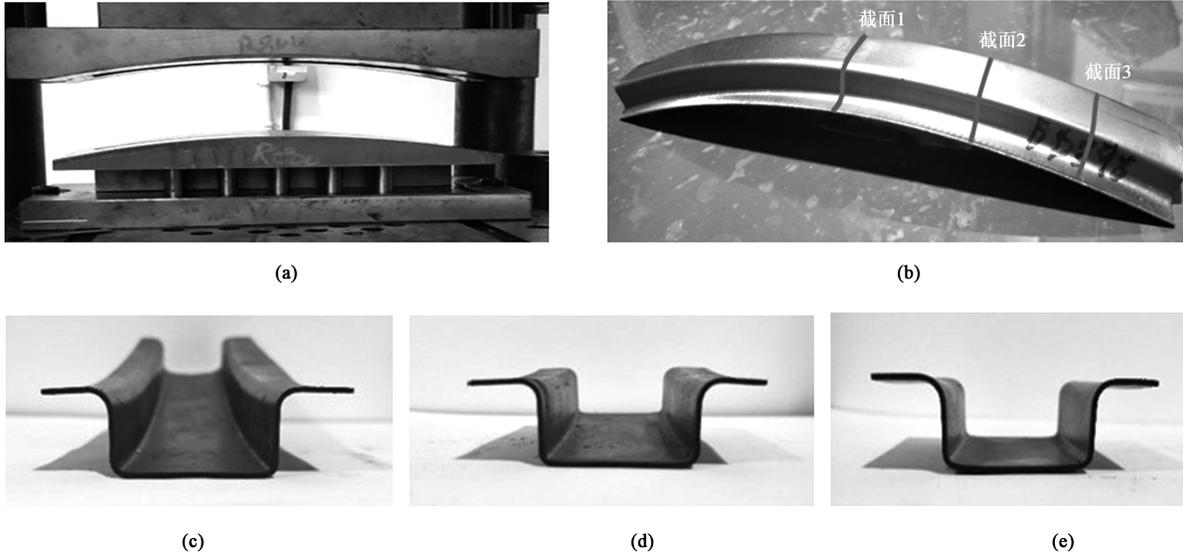


图 8 试验模具与试件
 (a) 试验模具 (b) 制件与截面划分 (c) 截面 1 (d) 截面 2 (e) 截面 3

Fig. 8 Experimental mold and samples

(a) Experimental mold (b) Part and division of section (c) Section 1 (d) Section 2 (e) Section 3

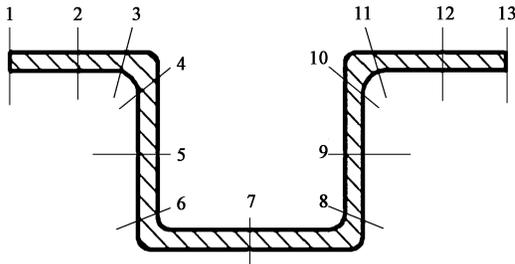


图 9 截面测量节点位置划分

Fig. 9 Division of point positions for section measurement

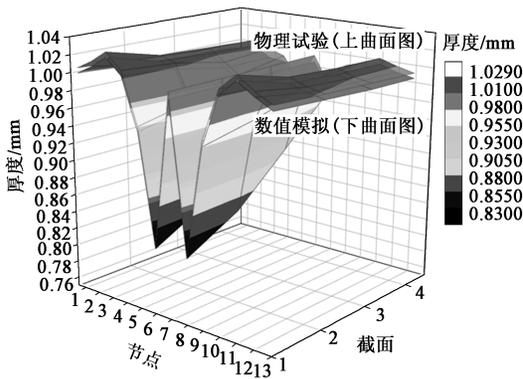


图 10 物理试验和数值模拟的厚度变化对比云图

Fig. 10 Contrast nephogram of thickness change between physical experiment and numerical simulation

受到拉应力，又由于凹模下行，变形程度逐渐增大，使得沿侧壁方向的拉应力也逐渐增大，造成侧壁区域材料快速减薄，在到达顶部圆角相切处

时减薄最严重。

为了防止厚度减薄引发的质量问题，可通过减小凹模圆角半径、减小压边力、增大弧棱半径等手段，使坯料流入凹模更容易，使得厚度不易减薄，侧壁区各节点位置上材料的承载能力也相应增强。

由于凸模顶压和横向拉应力的作用，顶部材料厚度有较小程度的减薄，但变化不大，从图 10 中可以看出，顶部材料（节点 6~节点 8）的数值模拟的厚度和物理试验所测得的厚度均略低于 1.003 mm，可忽略不计。

通过上述分析可以发现：梁翼板处的厚度变化规律与数值模拟分析相一致，且也验证了上文分析的翼板区“中间厚两头薄”的现象。

5 结论

(1) 纵弧棱 U 型梁零件的变形与直棱不同，可将坯料变形中间过程划为 4 个部分，两侧翼板处变形程度较大，为主要变形区：变形过程中梁的翼板处的横向拉应力和厚向压应力较小（可忽略），纵向压应力较大，应变状态主要为纵向负应变，发生较大的变形。

(2) 由于两端无拘束，纵向（长度方向）应力绝对值均从端部向中部逐渐增大，材料从两端向中间流动堆积，厚度增大，最大值趋近于 1.03 mm

(横向截面中部),同时也导致梁成形后形成“中间厚两端薄”的现象。为杜绝这类形状缺陷的产生,需通过对坯料轮廓进行优化处理。

(3)通过对侧壁和顶部圆角的各向应变和厚度变化的分析,梁的危险部位在中部侧壁上与顶部圆角的连接处,此处为制件强度和刚度的主要评估点:该处应变变化较大,其中厚度最大减薄量接近0.20 mm,易导致梁失效。

参考文献:

- [1] 崔令江. 汽车覆盖件结构特征与冲压成形性 [J]. 塑性工程学报, 2001, 8 (2): 11-3.
Cui L J. Structural characteristics and stamping formability of automobile panels [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2001, 8 (2): 11-3.
- [2] 刘绪功. 基于特征的汽车覆盖件冲压成形性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
Liu X G. Research on Stamping Formability of Automobile Panels Based on Features [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [3] 高伟, 程万军, 甄兴宇, 等. 轿车非典型U形件冲压成形工艺及模拟研究 [J]. 模具工业, 2013, 39 (11): 7-11.
Gao W, Cheng W J, Zhen X Y, et al. Study on the stamping process and simulation of atypical U-shaped parts for cars [J]. Die & Mould Industry, 2013, 39 (11): 7-11.
- [4] 吕琳, 邓明, 万舒, 等. 弧棱U型件的变形特点和回弹浅析 [J]. 锻压技术, 2015, 40 (7): 34-37.
Lyu L, Deng M, Wan S, et al. Analysis on the deformation characteristics and springback of arc-edge U-shaped parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2015, 40 (7): 34-37.
- [5] 高红兰. 轿车高强度弧槽零件的精确成形研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2019.
Gao H L. Research on Precise Forming of High-strength Steel Arc-shaped Parts for Cars [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2019.
- [6] 吕琳, 刘武静, 高红兰. 纵弧棱U型梁的冲压回弹预测 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (5): 211-217.
Lyu L, Liu W J, Gao H L. Prediction of springback of longitudinal arc U-shaped beams [J]. Chinese Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (5): 211-217.
- [7] 王鹏, 董湘怀. U型件冲压成形回弹过程的数值模拟及参数优化 [J]. 上海交通大学学报, 2007, 41 (10): 1590-1593, 1597.
Wang P, Dong X H. Numerical simulation and parameter optimization of the springback process of U-shaped parts stamping [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41 (10): 1590-1593, 1597.
- [8] 张茜, 刘淑影, 牛星辉, 等. 基于Dynaform的DP600高强度U形弯曲回弹影响因素研究 [J]. 模具制造, 2020, 20 (4): 32-35.

Zhang Q, Liu S Y, Niu X H, et al. Research on the influence factors of U-shaped bending springback of DP600 high-strength steel based on Dynaform [J]. Die & Mould Manufacturing, 2020, 20 (4): 32-35.

- [9] 王东涛, 谢延敏, 郭元恒, 等. 基于Kriging模型的高强度成形回弹工艺优化和模面补偿研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (10): 62-69.
Wang D T, Xie Y M, Guo Y H, et al. Research on the optimization of high-strength steel forming springback process and die face compensation based on Kriging model [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (10): 62-69.
- [10] 孙伟, 王岩松, 赵礼辉, 等. 基于响应面法的DP600高强度U型件冲压拉伸回弹变形研究 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (23): 115-120.
Sun W, Wang Y S, Zhao L H, et al. Study on the springback deformation of DP600 high-strength steel U-shaped parts based on the response surface method [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (23): 115-120.
- [11] 梁振业, 杨浩, 肖华, 等. 强钢帽形件链模成形数值模拟 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (7): 103-106, 116.
Liang Z Y, Yang H, Xiao H, et al. Numerical simulation of chain die forming of strong steel hat-shaped parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (7): 103-106, 116.
- [12] 章伊华, 侯培海. 高强度T形接头焊接残余应力的数值模拟 [J]. 机械工程师, 2013, (6): 93-95.
Zhang Y H, Hou P H. Numerical simulation of welding residual stress of high-strength steel T-joint [J]. Mechanical Engineer, 2013, (6): 93-95.

警惕不法网站, 保障投稿安全

近期,本刊接到多名作者投诉,网络上出现冒充《锻压技术》杂志官方网站的伪网站,如www.dyjsz.cn,这些网站盗用本杂志官网内容及相关行业信息,误导和欺骗广大投稿作者,骗取文章版面费、套取作者文章及个人信息,侵犯了广大作者的切身利益。

特此声明,本刊唯一官方网站为www.fstjournal.net,投稿方式为网站注册登录投稿,不接受邮箱投稿。请作者投稿时务必认准杂志官方网站,谨防受骗。

本刊郑重警告伪网站相关人员尽快停止违法行为,否则将严肃对待,并将运用一切法律手段维护本刊的权利。

请广大读者协助本刊监督网络上的不法行为,一经发现,请联系本刊,本刊将及时处理,共同努力营造良好的期刊网络氛围。

《锻压技术》杂志联系方式:fst@263.net;010-62920652。

《锻压技术》编辑部