

差厚板U形件工艺孔成形性能仿真

胡贤磊, 朱永胜, 支颖

(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 以冷冲压差厚板U形件作为研究对象,通过有限元仿真分析了工艺孔的位置、数量、尺寸以及形状对成形性能的影响。结果表明,差厚板在薄区侧壁处开孔时有利于减少侧壁的残余应力;差厚板的回弹与工艺孔在板件中的位置分布关系不大,与工艺孔的数量、半径及形状有关。从成形性能和回弹影响角度考虑,工艺孔优先选差厚板U形件端部的厚区与过渡区区域,如果必须在侧壁开孔,优选侧壁薄区区域。在相邻区域,工艺孔的数量尽量不超过2个,工艺孔尺寸小一些更合适,工艺孔形状沿轧制方向距离越小越合适。

关键词: 差厚板;工艺孔;U形件;冷冲压;成形性能;回弹

中图分类号: TG 156.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2024)08-1080-08

Simulation of Process Hole Forming Performance for U-Channel Part of Tailor Rolled Blank

HU Xian-lei, ZHU Yong-sheng, ZHI Ying

(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHU Yong-sheng, E-mail: zysdbdxzrkxxb@163.com)

Abstract: Finite element simulations were used to analyze the influences of the position, number, size, and shape of process holes on the forming performance of cold stamping tailor rolled blank U-channel parts. The results indicated that tailor rolled blanks are advantageous in reducing residual stresses in the sidewalls when holes are positioned in the thin zone of the sidewalls. The springback of the tailor rolled blank was found to be less dependent on the distribution of process holes but more influenced by their number, radius, and shape. From the standpoint of forming performance and springback impact, it is preferable to locate process holes in the thick zone and transition zone areas at the end of the U-channel part of the tailor rolled blank. If holes must be drilled in the sidewall, the thin zone area is the preferred location. In adjacent areas, the number of process holes should ideally not exceed two, with smaller sizes being more suitable. A shorter distance along the rolling direction is also preferred for the shape of the process hole.

Key words: tailor rolled blank (TRB); process hole; U-channel part; cold stamping; forming performance; springback

随着节能减排政策的推进,新能源汽车不断发展,汽车轻量化技术越发受到重视。汽车材料和制备工艺快速向轻量化推进^[1-2]。轧制差厚板(tailor rolled blank, TRB)具有质量轻、厚度灵活可变、耐撞性高等优点,在汽车结构件中具有广泛的应用前景^[3]。国内东北大学差厚板团队独立成功开发了差厚板的各项技术,并通过成果转化

实现了工业化生产^[4]。

差厚板经轧制后沿轧制方向加工硬化程度不同,经退火后差厚板过渡区各部分力学性能具有一定的差异。Meyer等^[5]发现差厚板可以增加最大拉伸深度,也可以降低关键区域的载荷失效,同时,文献[6-7]针对差厚板不同厚度处的组织性能提出了单式退火和连续退火两种退火工

艺,得出了差厚板因退火方式不同其性能出现差异,根据这种差异,通过实验与仿真评价了差厚板拉伸成形的性能. Fan等^[8]认为差厚板U形件弯曲过程中由于过渡区特殊的厚度分布,导致Mises应力的不均匀分布. Lu等^[9-10]采用实验与模拟的方式对比了差厚板与相邻厚度的等厚板U形件成形后的回弹特性,并对退火前后差厚板的回弹变化进行了分析. Zhang等^[11-12]以差厚板U形件为基础,研究了差厚板冲压后回弹的影响因素,提出了材料厚度和过渡区位置是影响板件回弹的主要因素,随后与未退火差厚板对比,退火后差厚板的回弹明显减小.

为了提高板件的成形性能,施于庆等^[13]以盒形件冲压为基础,对板件边缘部分打上均匀分布的工艺孔,发现带工艺孔拉伸可有效提高材料的拉伸性能. 孙立君等^[14]通过仿真的方式提出预工艺孔的冲压成形特点,工艺孔附近材料处于双向拉应力状态,工艺孔边缘近似处于单向拉应力状态,在拉伸成形时出现破裂风险的区域位于边缘位置. 朱亨荣等^[15]以外径相同、内孔直径不同的带孔板坯拉伸-翻孔复合成型工艺为对象,得出带孔板坯拉伸过程随着工艺孔的增大,板件的变形方式逐次由纯拉伸变为拉伸-翻孔复合变形,最后变为纯翻孔工艺,变形力随着工艺孔的增加而减小.

工艺孔作为车身零部件中必不可少的一部分,对等厚板中工艺孔对成形性能的影响研究较多,发现工艺孔能够改善等厚板的拉伸性能,然而对差厚板成形过程的影响还没有相关的研究和报道. 本文以差厚板U形件为研究对象,以有限元仿真为基础并通过实验验证,得到差厚板U形件中工艺孔位置和形状对成形性能的影响,分析结果为冷冲压差厚板的孔形设计及位置设计提供理论指导.

1 实验材料及研究方法

1.1 TRB制备

实验材料为来料厚度为2.2 mm的HC340LA等厚板,其化学成分(质量分数/%)为:C 0.081, Si 0.017, Mn 0.4, P 0.019, S 0.005, Al 0.075. 经柔性轧制成差厚比为1:2和1:1.6的差厚板,几何尺寸如图1所示. 并根据仿真需要轧制成厚度为1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 mm等厚板,用于测量差厚板过渡区的力学性能. 热处理工艺为:以

10 °C/min从室温升至620 °C保温1 h后随炉缓冷,以消除部分加工硬化.

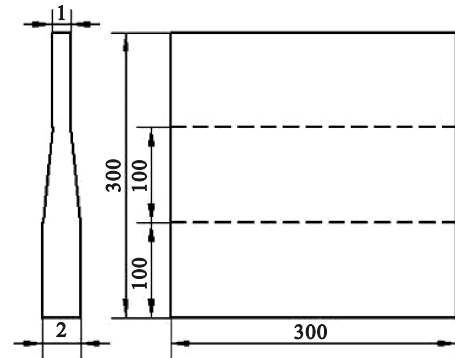


图1 差厚板尺寸(单位:mm)

Fig. 1 TRB size (unit: mm)

1.2 差厚板U形件建模

使用三维建模软件CATIA设计本次实验所使用的差厚板模具,该模具包含凸模、压边圈、凹模与板件4个部件,模具间隙为1.1倍板厚,模具型面采用差厚板专用形式进行设计,沿轧制中心线对称建模. 图2为差厚板模具的1/2模型,对应薄、厚区尺寸为:凸模圆角薄区3.90 mm,厚区3.8 mm;凸模薄区长48.90 mm,厚区长47.80 mm;凹模圆角薄区5.00 mm,厚区6.00 mm,底部长50.00 mm,冲压深度40.00 mm. 将差厚板模具数据导入有限元软件ABAQUS中,对U形件冲压过程进行分析. 冲压过程中,将差厚板设置为可变形体,模具的凸模、压边圈、凹模统一设为解析刚体.

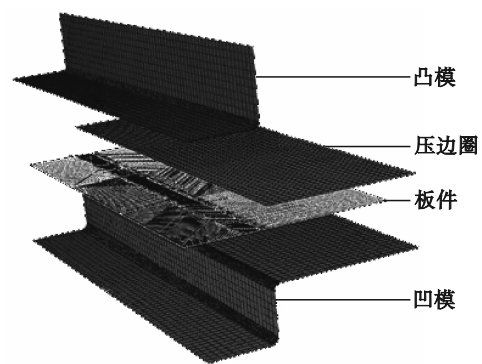


图2 差厚板模具

Fig. 2 TRB mold

基于差厚板自身特性,在ABAQUS中采用壳单元形式建模. 材料杨氏模量为210 GPa,泊松比为0.3,密度为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. 引入场变量对差厚板材料属性进行赋值,使用辛普森7个积分点,差厚板等厚区采用常用的赋值方式赋予厚度,过渡区使用解析场定义轮廓曲线的方式建立厚度场,

即可获得差厚板完整的材料模型。

图3为沿轧制方向 0° 、 45° 、 90° 取样后测得的力学性能分布图.从图中可以看出,差厚板的屈服强度均随着厚度的增加先减小再升高后降低,沿轧制方向 0° 的屈服强度要低于其他两个方向,

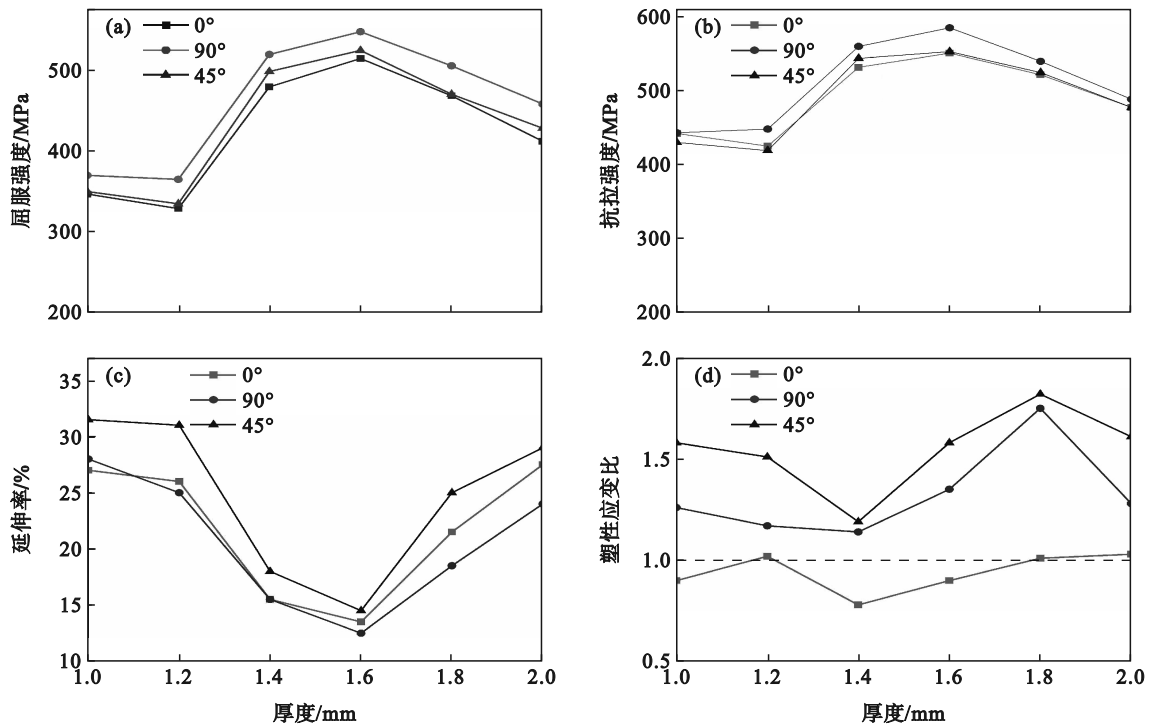


图3 差厚板力学性能随厚度变化关系曲线

Fig. 3 Variation curves of mechanical properties of TRB with thickness

(a)—屈服强度; (b)—抗拉强度; (c)—延伸率; (d)—塑性应变比.

压下率小于27%时,退火过程中不足以提供足够的再结晶驱动力,因此再结晶程度低,晶粒保持硬化态,强度较高.延伸率随压下率增大先降低后升高.在27%压下率时,延伸率最低,同时差厚板的屈服强度最高,沿轧制方向 45° 的延伸率比其他两个方向性能较好.同时,从塑性应变比来看,沿轧制方向 0° 的塑性应变比小于1,可见轧制方向沿 0° 的拉伸变形程度较差,另外两个方向的塑性应变比大于1,使板件容易在宽度方向上产生变形,不易起皱和拉裂,具有较高的成形性能.

1.3 孔形设计

冲压过程中工艺孔一般使用3种孔形:圆形孔、方形孔和腰形孔.根据U形件结构特性,可将U形件划分为端部、侧壁、底部及与之相连的上下圆角5个部分,如图4所示.基于差厚板U形件在冷冲压过程中的基本特性,底部金属在冲压过程中仅与凸模发生同步向下的运动,几乎不发生塑性变形.下圆角的金属是连接底部与侧壁的

在压下率大于27%时(板件厚度为1.6 mm时),组织基本为铁素体再结晶晶粒,由于加工硬化产生的畸变能,再结晶驱动力大,退火过程再结晶温度低,再结晶形核点多,再结晶程度高.

过渡区域,主要受径向拉伸应力与压应力作用,在变形过程中发生轻微减薄.侧壁处的金属是主要的变形区域,该位置金属随着凸模向下位移逐渐发生减薄.上圆角处金属是端部金属流向侧壁的区域,同样受径向拉应力与压应力作用,同端部金属一起在冲压过程中流向模具型腔内部,是金属发生塑性变形的主要区域.

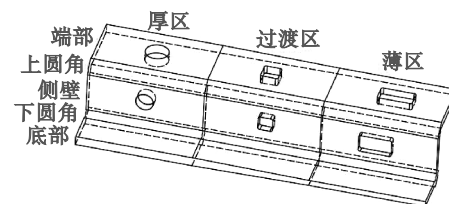


图4 工艺孔位置分布示意图

Fig. 4 Schematic diagram of process hole location distribution

差厚板包含厚区、过渡区、薄区3个部分,在冲压过程中过渡区侧壁的减薄程度与凸模的位移大小及应力分布相关,由于过渡区力学性能不

均匀,导致应力的不均匀分布,使得冲压后残余应力无法得到充分的释放,产生不均匀的回弹现象.基于这一特点,首先进行实验验证,然后对比未开孔与开孔的差厚板的成形性能,再分析双工艺孔对成形性能的影响,随后分析工艺孔位于不同位置对差厚板带来的影响,最后讨论孔形及尺寸对差厚板的影响.

1.4 冷冲压实验方案

受实验室设备限制,差厚板尺寸最大为 200 mm×80 mm.因此,本文差厚板设计的最大外形尺寸为轧制方向薄区 25 mm、过渡区 30 mm、厚区 25 mm,冲压方向长度 200 mm,薄区厚度 1.0 mm,厚区厚度 1.6 mm.其实验模具设计为差厚板专用形式,具体尺寸为:凸模圆角薄区 6.90 mm、厚区 6.24 mm,底部薄区长 57.80 mm、厚区 56.48 mm,凹模圆角半径 8.00 mm,底部长 60.00 mm.模具冲压速度为 5.00 mm/min,冲压深度 40.00 mm,实验前做好退火处理以及润滑.

图 5 为差厚板 U 形件回弹的测量方法.具体方式如下:首先在后处理云图中选择回弹后板件

边缘沿冲压方向的位移分量(如图 5 中 Δz 所示);提取差厚板边缘一系列节点,获得每个节点的沿 Z 轴方向的位移;最后在 origin 选择合适的坐标并绘制其回弹曲线.



图 5 回弹的测量方法

Fig. 5 Measurement method of springback

2 U 形冲压数值模拟结果与分析

2.1 未开孔差厚板成形性能模拟与实验结果

实验与仿真结果如图 6 所示,可以看出,差厚板在经 U 形冲压后,从模具中取出发生了回弹现象,发生回弹的位置主要位于侧壁的上下圆角附近,底部发生的回弹变化很小,通过回弹对比可见差厚板薄区的回弹高于厚区.与仿真结果对比可见,二者的回弹相似度较高.

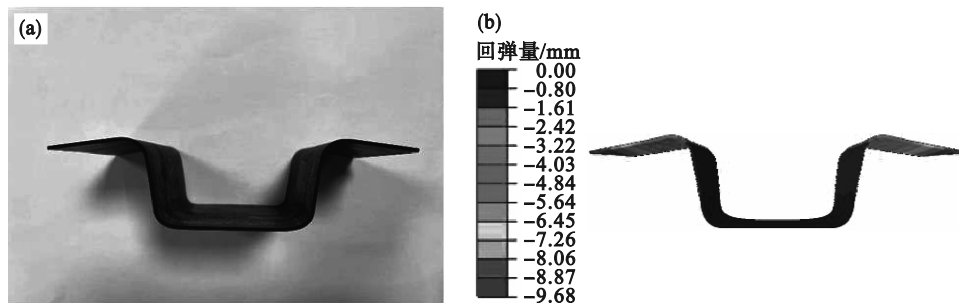


图 6 实验与仿真结果对比

Fig. 6 Comparison of experimental and simulation results

(a)—实验结果; (b)—仿真结果.

表 1 为实验与仿真回弹结果的对比, $\bar{\Delta z}$ 为差厚板薄区与厚区回弹量的平均值,可以看出:实验与仿真结果相差不大,薄区最大误差为 5.96%,厚区最大误差为 2.01%,均在 10% 以内,模拟结果精度较高,能真实地反映实际冲压过程.可见仿真模型构建的可靠性.

表 1 模拟值与实验值对比

Table 1 Comparison of the simulated value and experimental value

差厚板区域	$\bar{\Delta z}$ /mm			误差/%
	模拟值	实验值	差值	
薄区	8.22	8.71	0.49	5.96
厚区	9.43	9.62	0.19	2.01

2.2 开孔对差厚板成形性能的影响

图 7 为未开孔与开孔差厚板应力分布.板件的厚度与 U 形件底部应力正相关,即应力大的位置为厚区,应力小的位置为薄区,中间为过渡区.从图 7a 中可以看出,差厚板经冲压后应力沿厚度减小的方向逐渐减小,受差厚板过渡区材料强度波动及厚度影响,在侧壁及上下圆角处产生了明显的应力集中,按照应力大小排序:过渡区侧壁>厚区侧壁>薄区侧壁>厚区圆角>薄区圆角>厚区底部>厚区端部>其他位置.与未开孔差厚板相比,在应力最大的过渡区侧壁中心位置开圆孔后,沿冲压方向应力呈下降趋势,且对总体的影响很小.

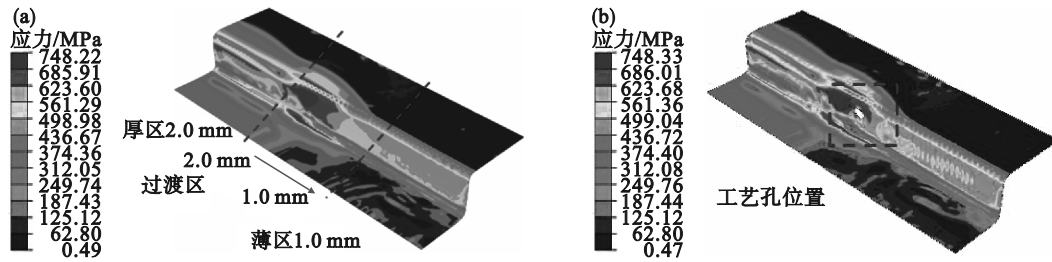


图7 未开孔与开孔差厚板中应力分布

Fig. 7 Stress distribution in unopened and opened TRB

(a)—未开孔差厚板应力; (b)—开孔差厚板应力.

如图 8a 所示,随着厚度从大变小,回弹量逐渐增大,薄区回弹量大于厚区.在过渡区侧壁的中心位置开孔导致厚区的回弹量少量上升,其余部分的回弹差异很小.图 8b 是差厚板厚区与过渡区交界处的过渡区金属向薄区流动的偏移量,位置从差厚板端部至轧制中心线,可以看出,差厚

板底部金属几乎不发生偏移,与轧制中心线距离越远,偏移量线性增加,但最大偏移量为 0.5 mm.通过对比开孔与未开孔差厚板的偏移量发现,在底部及下圆角处高于未开孔差厚板,侧壁、上圆角及端部位置几乎没有变化,可见开孔对金属流动性的影响很小.

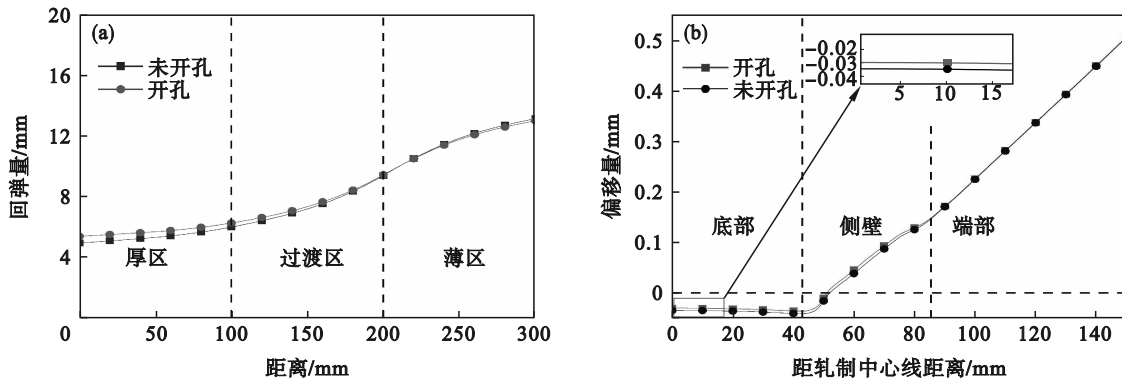


图8 未开孔与开孔差厚板中回弹量及偏移量

Fig. 8 The amount of springback and offset in the unopened and opened TRB

(a)—开孔与未开孔差厚板回弹量; (b)—开孔与未开孔差厚板偏移量.

2.3 差厚板侧壁及端部对成形性能的影响

2.3.1 差厚板在侧壁开孔对应力分布的影响

图 9 为圆形工艺孔分别位于差厚板侧壁中厚区、薄区位置的应力分布云图.由图 9a 可见,在金属厚区开孔增大了厚区应力分布的不均匀程度,

沿轧制方向应力升高,沿冲压方向应力下降,其余位置几乎没有变化.由图 9b 可见,薄区开孔沿冲压方向应力下降明显,轧制方向应力有轻微上升.因此,在差厚板薄区侧壁处开孔可有效缓解板件的残余应力,提高板件的成形性能.

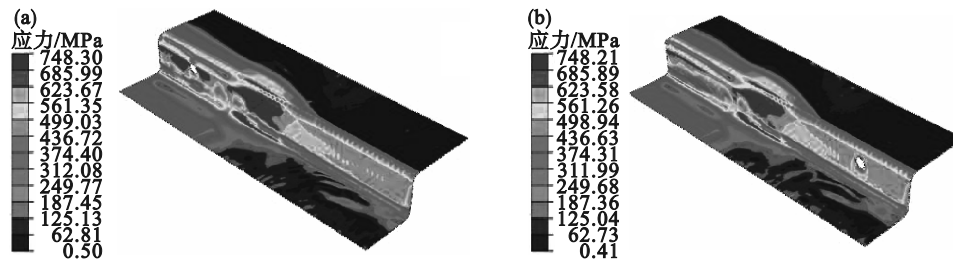


图9 差厚板侧壁开孔的应力分布

Fig. 9 Stress distribution of TRB sidewall opening holes

(a)—工艺孔位于厚区侧壁; (b)—工艺孔位于薄区侧壁.

2.3.2 差厚板在端部开孔对回弹的影响

图 10 以圆形工艺孔位于差厚板过渡区侧壁

中心位置为基准,向厚区移动为负,向薄区移动为正,讨论-40,-20,0,20,40 mm 5 种形式的回弹

情况.工艺孔向厚区偏移时,回弹逐渐升高,但总体变化量很小;工艺孔向薄区偏移时,板件在厚区的回弹逐渐升高,在过渡区的影响随着厚度的减小而逐渐减弱,薄区的回弹低于工艺孔位于侧

壁中心位置时板件的回弹,但所有区域的回弹变化量很小.因此,在侧壁开圆形孔时回弹量的变化较小,并不会影响板件的成形性能.

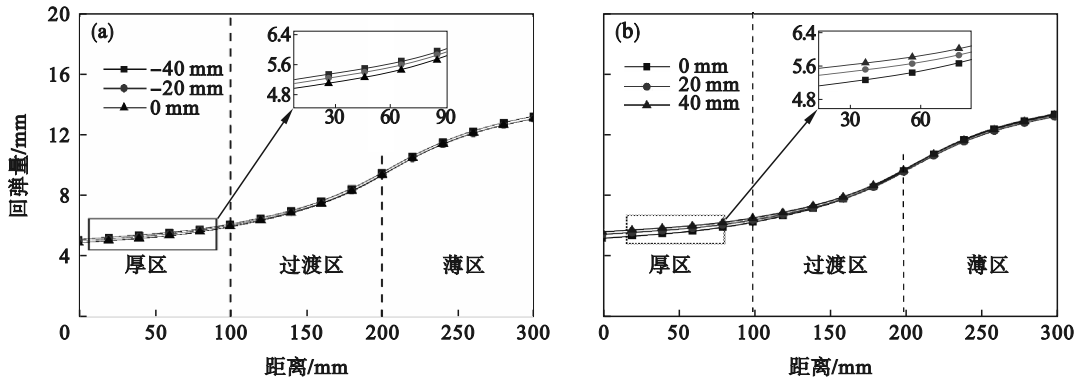


图 10 差厚板过渡区侧壁中不同孔位对应的回弹分布

Fig. 10 Springback distribution corresponding to different hole positions in the TRB transition zone sidewalls
(a)—厚区偏移回弹; (b)—薄区偏移回弹.

图 11 给出的是差厚板位于薄区、过渡区、厚区中心位置距端部 20, 30, 40, 50 mm 的回弹分布.图 11a 为差厚板工艺孔沿轧制方向分布时回弹分布,可以看出在工艺孔位于端部薄区中心位置时回弹高于位于端部过渡区与厚区的板件,这种差距在厚区表现最为明显,并随着厚度的减薄,回弹的差距逐渐减小.当工艺孔位于端部过

渡区与薄区中心位置时,二者的回弹几乎没有变化.从图 11b~11d 可见,不论是位于端部过渡区还是薄区、厚区,工艺孔沿冲压方向向侧壁方向移动时对板件回弹的影响较小.因此,在端部过渡区与厚区中心位置开孔对板件的影响较小,并且优于在端部薄区中心位置开孔,沿冲压方向开孔并不会影响板件的成形性能.

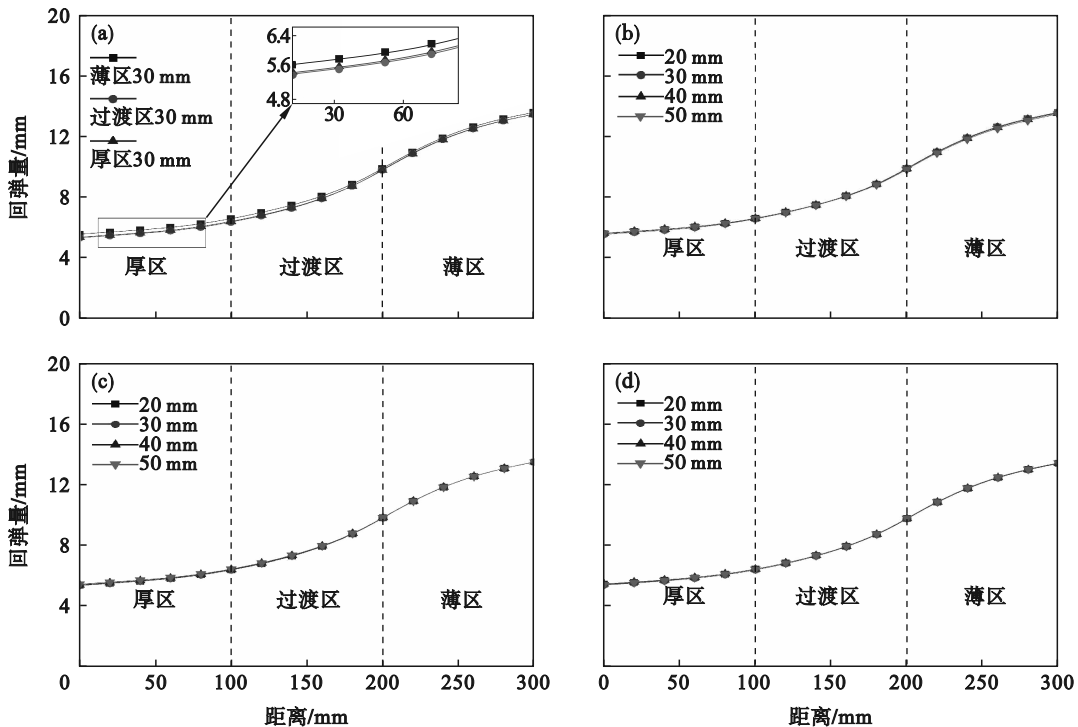


图 11 差厚板端部孔位对应的回弹分布

Fig. 11 Springback distribution corresponding to TRB end hole position
(a)—位于薄区、过渡区、厚区端部距边部 30 mm; (b)—位于薄区端部距边部 20, 30, 40, 50 mm;
(c)—位于过渡区端部距边部 20, 30, 40, 50 mm; (d)—位于厚区端部距边部 20, 30, 40, 50 mm.

2.4 差厚板开孔数量对成形性能的影响

图 12 为差厚板过渡区中圆形工艺孔数量的分布形式,位置以过渡区侧壁中心为基准,孔距为 20 mm,直径 10 mm.开孔数量为单孔、双孔、三孔,位置分别为工艺孔中心位于过渡区侧壁中心、沿厚度方向距过渡区侧壁中心 ± 10 mm、过渡区侧壁中心及距过渡区侧壁中心 ± 20 mm.

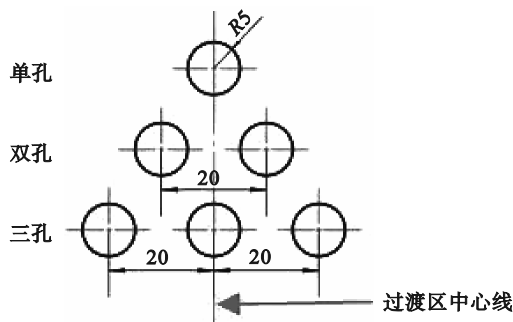


图 12 差厚板过渡区侧壁中心开孔数量(单位:mm)
Fig. 12 The numbers of opening holes in the TRB transition zone sidewall center

从图 13 可以看出,双孔的回弹量在厚区低于单孔,并随着厚度的减小该趋势逐渐减弱.三孔的回弹量高于单孔,在厚区回弹量的变化相对均匀.可以看出,开孔数量对回弹量产生的影响较大,相对于原始板件双孔和三孔回弹量变化最大,分别为 0.37, 0.53 mm,行业内该板件的允许偏差为 ± 0.5 mm,三孔稍大于允许偏差.因此,为保证板件的成形精度,在工艺孔集中分布的情况下开孔数量应小于 2,减小工艺孔过多对差厚板回弹的影响.

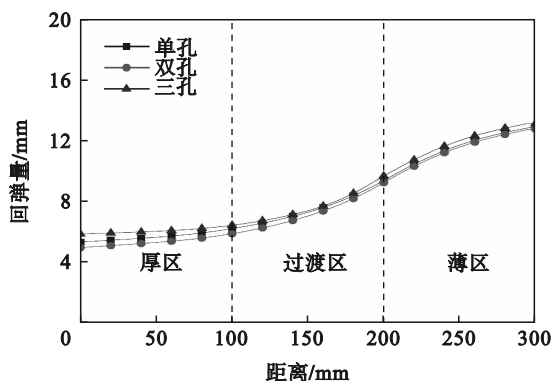


图 13 差厚板过渡区侧壁中心工艺孔数量对回弹分布的影响
Fig. 13 Springback distribution vs. process hole numbers in the TRB transition zone sidewall center

2.5 差厚板孔形尺寸对成形性能的影响

本节通过对过渡区中心位置 3 种不同尺寸的

工艺孔进行建模,对应尺寸分别为半径 5, 7.5, 10 mm 的圆形工艺孔,分析差厚板开孔面积大小对成形性的影响规律,并根据仿真结果提出合适的开孔方案.从图 14 可以看出,随着工艺孔面积的增加,回弹量逐渐上升,厚区至工艺孔中心位置的回弹变化逐渐均匀,对厚区的约束作用逐渐降低,工艺孔中心位置至薄区回弹变化逐渐升高.因此,为了减小差厚板的回弹,工艺孔面积应尽量小.

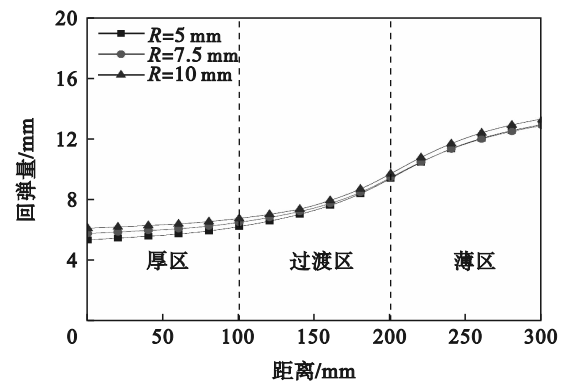


图 14 差厚板过渡区侧壁中心工艺孔尺寸对回弹分布的影响
Fig. 14 Springback distribution vs. hole size in the TRB transition zone sidewall center

2.6 差厚板孔形形状对成形性能的影响

图 15 为差厚板过渡区侧壁中心开孔形式,孔形分别为方形孔、圆形孔、腰形孔(长边沿轧制方向),尺寸如图 15 所示(单位:mm),其工艺孔面积均为 78.54 mm²,圆角半径为 2 mm.

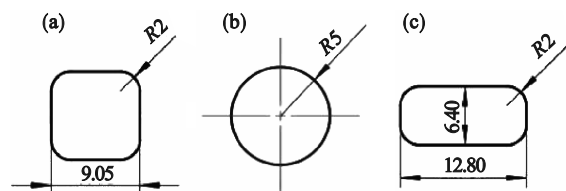


图 15 差厚板过渡区侧壁中心开孔形式(单位:mm)
Fig. 15 Opening hole shape in the TRB transition zone sidewall center
(a)一方形孔;(b)一圆形孔;(c)一腰形孔.

图 16 为差厚板过渡区侧壁中心不同开孔形式的回弹量分布,可以看出:不同形状的工艺孔回弹变化不同,腰形孔回弹量最大,圆形孔次之,方形孔最小.差厚板的回弹随着工艺孔沿轧制方向的距离的增加而增加,在过渡区侧壁处的金属流动性增强,减小了板件厚区金属的塑性流动,冲压过程中产生的残余应力得到提前释放.

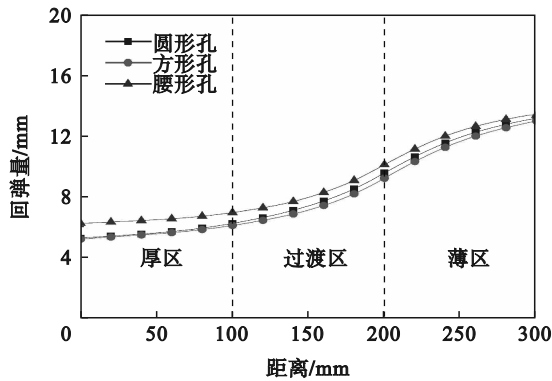


图16 差厚板过渡区侧壁中心开孔形式对应的回弹量分布
Fig. 16 Springback distribution vs. opening hole shape in the TRB transition zone sidewall center

3 结 论

1) 在差厚板薄区侧壁处开孔有利于减少残余应力,在差厚板过渡区侧壁处开孔后回弹有少量上升,厚区侧壁处开孔增大了应力分布的不均匀程度.在底部偏移量轻微下降,其余位置几乎没有变化,塑性流动很小.

2) 在差厚板过渡区侧壁处和端部开孔回弹变化很小,对板件的成形性能影响较小.在设计零件时,开孔位置优先选在端部的厚区与过渡区,其回弹的变化优于薄区.如果需要在侧壁开工艺孔,优选侧壁的薄区位置.

3) 在过渡区侧壁集中位置开2个孔回弹量变化在允许偏差之内,开3个孔回弹略高于允许偏差,集中分布时工艺孔数量应不超过2个;随着工艺孔孔形面积的增大,金属的回弹逐渐上升;随着工艺孔形状沿轧制方向距离的增加,金属流动性增强,回弹量逐渐增加.

参考文献:

[1] Zhang W, Xu J. Advanced lightweight materials for automobiles: a review [J]. *Materials & Design*, 2022, 221: 110994.
[2] Sun G Y, Tian J, Liu T Y, et al. Crashworthiness optimization of automotive parts with tailor rolled blank [J]. *Engineering Structures*, 2018, 169: 201-215.
[3] 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.
[4] Liu X H. Prospects for variable gauge rolling: technology, theory and application [J]. *Journal of Iron and Steel Research (International)*, 2011, 18(1): 1-7.
[5] Meyer A, Wietbrock B, Hirt G. Increasing of the drawing depth using tailor rolled blanks-numerical and experimental analysis [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, 48(5): 522-531.
[6] Zhang S J, Hu X L, Niu C L, et al. Annealing of HC340LA tailor rolled blanks-control of mechanical properties and formability [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 281: 116581.
[7] 张思佳, 胡贤磊, 刘相华. 轧制差厚板方盒件拉深成形的实验与数值模拟 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(6): 801-808.
(Zhang Si-jia, Hu Xian-lei, Liu Xiang-hua. Experimental and simulation study on deep drawing of square box made from tailor rolled blank [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2022, 43(6): 801-808.)
[8] Fan L F, Gou J J, Wang G, et al. Springback characteristics of cylindrical bending of tailor rolled blanks [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 2020: 9371808.
[9] Lu R H, Liu X H, Chen S D, et al. Springback behavior of tailor rolled blank in U-shape forming [J]. *Journal of Iron and Steel Research (International)*, 2017, 24(8): 787-794.
[10] Lu R H, Liu X H, Xu Z G, et al. Simulation of springback variation in the U-bending of tailor rolled blanks [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2017, 39(11): 4633-4647.
[11] Zhang H W, Liu L Z, Hu P, et al. Springback characteristics in U-channel forming of tailor rolled blank [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2012, 25(3): 207-213.
[12] Zhang H W, Guan Y P, Wu J L, et al. Transverse bending characteristics in U-channel forming of tailor rolled blank [J]. *Journal of Iron and Steel Research (International)*, 2016, 23(12): 1249-1254.
[13] 施于庆, 李凌丰. 带工艺孔的板坯拉深新工艺有限元模拟 [J]. *兵工学报*, 2009, 30(7): 967-972.
(Shi Yu-qing, Li Ling-feng. FEM simulation on new deep drawing process to blank with technique holes [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(7): 967-972.)
[14] 孙立君, 阮锋. 预冲工艺孔的板料冲压成形分析 [J]. *锻压装备与制造技术*, 2007, 42(6): 56-58.
(Sun Li-jun, Ruan Feng. The analysis of the forming characteristics of sheet with punching hole [J]. *China Metalforming Equipment and Manufacturing Technology*, 2007, 42(6): 56-58.)
[15] 朱亨荣, 王志忠, 王镇柱, 等. 轴对称带孔板坯拉深-翻孔复合成形的仿真与实验 [J]. *塑性工程学报*, 2013, 20(5): 50-55.
(Zhu Heng-rong, Wang Zhi-zhong, Wang Zhen-zhu, et al. Simulation and experimental study for drawing-flanging compound forming of axisymmetric holed slab [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2013, 20(5): 50-55.)