

轧制差厚板横向弯曲工艺参数研究

张华伟, 王新刚, 陈小辉, 侯东晓
(东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 以 U 型件为对象, 研究分析了差厚板的横向弯曲成形性能与特点, 探讨弯曲回弹以及过渡区移动等缺陷的发生机理. 在此基础上, 重点讨论工艺参数对差厚板回弹和过渡区移动的影响规律. 结果表明, 差厚板的回弹随着压边力的增大逐渐减小, 这种趋势对于未退火差厚板尤为显著, 随摩擦系数的增大而呈现先减小后增大的趋势, 随模具间隙的增大而增大; 过渡区移动量则随压边力的增大先递减而后递增, 随着摩擦系数的增大而逐渐减小, 而受模具间隙的影响较小. 采用 $(1 \sim 4)t$ 的压边力、0.12 左右的摩擦系数以及 $2.2 \sim 2.4$ mm 的模具间隙对于控制回弹以及过渡区移动量是非常有利的.

关 键 词: 轧制差厚板; 横向弯曲; 工艺参数; 退火; U 型件

中图分类号: TG 386.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)05-0728-06

Study on Process Parameters in Transverse Bending of Tailor Rolled Blanks

ZHANG Hua-wei, WANG Xin-gang, CHEN Xiao-hui, HOU Dong-xiao
(School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China.
Corresponding author: ZHANG Hua-wei, E-mail: zhanghw@neuq.edu.cn)

Abstract: The forming properties and characteristics of tailor rolled blanks (TRB) in transverse bending process were studied by taking U-channel as the research object. The mechanisms of forming defects, including bending springback and thickness transition zone (TTZ) movement etc., were discussed. On this basis, the special emphasis was put on the effects of process parameters on springback and TTZ movement. Results indicated that the springback of TRB decreases with the increase of blank holder force (BHF), and this trend is especially prominent for unannealed TRB. Springback decreases first and then increases with the increase of friction coefficient, and increases with the increase of die clearance. TTZ movement decreases first and then increases with the increase of BHF, decreases with the increase of friction coefficient, and it is almost not affected by die clearance. Overall, BHF of $(1 \sim 4)t$, friction coefficient of around 0.12 and die clearance of $2.2 \sim 2.4$ mm are advantageous in controlling springback and TTZ movement.

Key words: tailor rolled blank (TRB); transverse bending; process parameters; annealing; U-channel

轧制差厚板 (tailor rolled blank, TRB) 在材料性能、节材效果、零件质量、成本控制等方面优于拼焊板^[1-3], 可以替代相同材质和宽度、不同厚度的拼焊板进行汽车零部件的制造, 展现出较大的发展潜力^[4].

弯曲成形是生产梁类零部件常用的一种冲压方法. 轧制差厚板在横向弯曲 (弯曲中心轴与轧制方向垂直) 过程中, 厚度沿弯曲轴方向不发生变化, 因此在该方向上不存在回弹的不均匀分布. 但是在垂直弯曲轴方向上, 差厚板薄侧和厚侧由于厚度和性能的不同而导致两者回弹存在较大的差异, 并且在厚度过渡区 (thickness transition

zone, TTZ) 不同厚度的板料回弹相互制约^[5]. 此外, 差厚板横向弯曲过程中的板料厚度梯度方向与材料的流动方向是一致的, 但是薄厚两侧材料的流动速度是不同的, 因此差厚板零件在横向弯曲过程中还会发生显著的过渡区移动缺陷^[6]. 差厚板回弹量与过渡区移动量的大小除了受到差厚板板料尺寸、板料厚度、过渡区长度和位置等几何参数的影响外^[7], 还会受压边力、摩擦系数、模具间隙等工艺参数的影响. Adnan 等^[8]采用田口法分析了铝合金差厚板 V 型件的厚度比、弯曲角、弯曲基准位置等参数对差厚板回弹性能的影响. 夏元峰^[9]分析了变厚度 U 型件冲压成形的影响因素, 认为压边力是影响回弹的最主要因素. 已有研究多是针对成形更为简单的差厚板 V 型零件进行, 并且研究的成形过程主要是纵向弯曲, 关于差厚板 U 型件横向弯曲成形工艺参数方面的系统研究目前鲜有涉及.

本文以 U 型零件为对象, 通过有限元仿真和冲压实验研究了差厚板的横向弯曲性能, 阐述了差厚板的成形特点, 分析了回弹以及过渡区移动缺陷的发生机理, 讨论了压边力、摩擦系数、模具间隙等因素对差厚板 U 型件回弹以及过渡区移动的影响, 所得结果对于差厚板梁的制造具有指导意义.

1 成形仿真

本文采用 DYNIFORM 软件进行有限元仿真的建模工作, 图 1 给出了轧制差厚板 U 型件横向弯曲成形仿真有限元模型.

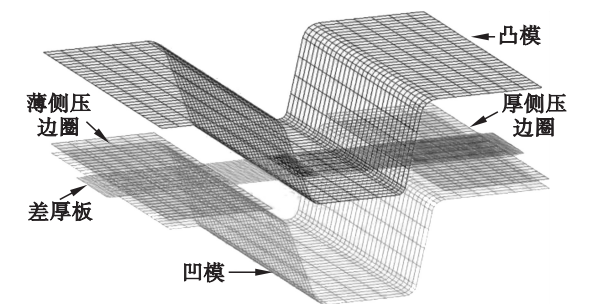


图 1 差厚板横向弯曲成形有限元模型
Fig. 1 FEM model of TRB in transverse bending

凸模行程 50 mm, 凸模圆角半径 7 mm, 凹模圆角半径 8 mm, 虚拟冲压速度 5 m/s. 工具定义为刚体, 板料遵循幂指数硬化方式和 3 参数 Barlat 屈服准则, 材料参数通过图 2 中的应力应变场来获取, 它是通过对差厚板等厚度侧板料的力学性能参数进行插值而获得的. 回弹分析采用

DYNAIN 方法, 提交 LS - DYNA 求解器进行求解计算. 为了获得较高的回弹计算精度, 成形模拟时网格单元类型采用四边形 BT 壳, 网格尺寸 2 mm, 厚向积分点 7 个, 成形模拟采用动力显示算法; 而在回弹仿真中, 板料选用全阶积分单元, 板料厚向积分点 9 个, 回弹分析采用静力隐式算法. 具体成形过程为: 将差厚板放置于凹模表面, 随后两块压边圈下行分别对差厚板薄板侧和厚板侧压边并施加不同大小的压边力, 最后凸模下行将板料拉入凹模, 凸凹模闭合, 完成 U 型件的冲压成形.

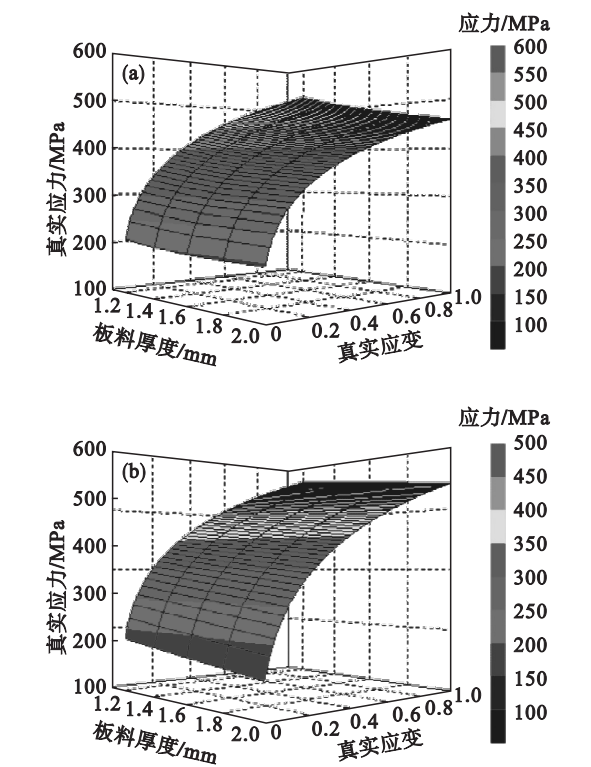


图 2 轧制差厚板真实应力应变场
Fig. 2 True stress-strain fields of TRB
(a) — 未退火; (b) — 已退火.

2 冲压实验

冲压实验所用材料为牌号 SPHC 的轧制差厚板, 其化学成分列于表 1 中. 板料尺寸 80 mm × 230 mm, 板料厚度 1.2/2.0 mm, 过渡区厚度由薄板侧线性过渡到厚板侧, 过渡区型面沿板料厚度中心对称分布, 过渡区长度 20 mm 且位于板料中心, 分为未退火和已退火两类情况, 图 3 显示了所采用的退火工艺路线. 之所以采用具有台阶的双斜率退火工艺, 主要目的是促进再结晶过程中形成更多的核心, 细化晶粒, 从而提高产品冲压性能^[10]. 实验在 140 t 液压机上进行, 模具采用普通

等厚度板材 U 型件冲压成形模具. 图 4 为成形结束后 U 型件的回弹示意图, 图中给出了零件的回弹趋势及回弹的评价方法. 选取零件法兰的边缘为回弹测量位置, 回弹值 ΔL 同时考虑零件沿竖直方向和水平方向的回弹, 且规定导致零件外展的回弹为正, 引起零件内收的回弹为负. 图中 A、B、C、D、E 分别表示在 U 型件底部、底部圆角处、侧壁、侧壁圆角处、法兰端部所取特征点, 用以显示 U 型件不同部位的回弹趋势.

表 1 牌号 SPHC 的差厚板化学成分 (质量分数)

Table 1 Chemical composition of TRB with the grade of SPHC (mass fraction) %

C	Mn	Si	P	S	Fe
0.083	0.316	0.041	0.017	0.012	Bal.

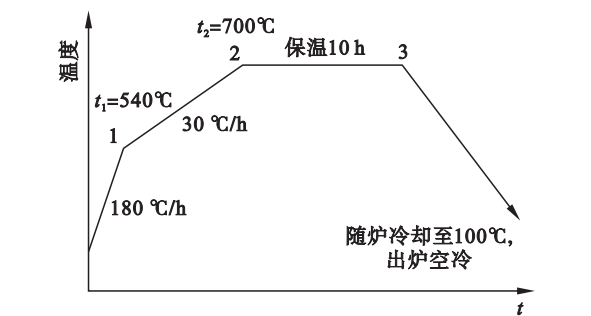


图 3 退火工艺路线
Fig. 3 Annealing process route

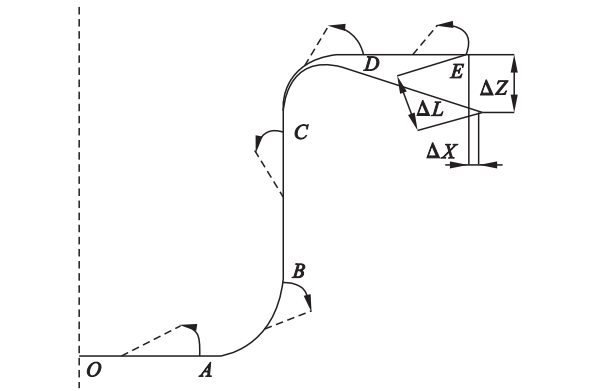


图 4 U 型件回弹示意图
Fig. 4 Springback schematic of U-channel

3 实验与仿真结果分析

图 5 为通过实验所获得的未退火与已退火差厚板 U 型零件. 图 6 给出了差厚板 U 型件回弹的仿真与实验结果对比. 从图 6 能够看出, 回弹的仿真与实验结果比较接近, 数值模拟较为精确地反映了实际差厚板零件的回弹情况.

此外, 分析图 5 和图 6 还可以知道, 未退火差厚板零件厚侧的回弹量比薄侧更小; 退火后差厚

板零件薄、厚两侧的回弹量比较接近. 退火工艺将整块差厚板的回弹量抑制在一个较低水平, 尤其薄侧的回弹大大减小, 整个差厚板零件的回弹分布更为均匀^[11]. 原因在于差厚板薄侧受到更大轧制压下率的作用而发生显著的加工硬化^[12], 残余应力出现在板料内部, 导致板料的屈服强度增大, 因而薄侧的等效应力更大. 不均匀的应力分布导致了差厚板卸载后厚侧部分的回弹变形要小于薄侧部分. 退火工艺使得整块差厚板的应力分布变得均匀^[13], 并且减小了卸载前后的应力差, 因而回弹水平降低.

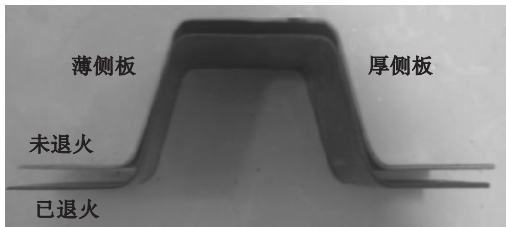


图 5 未退火与已退火差厚板 U 型零件
Fig. 5 Unannealed and annealed TRB U-channels

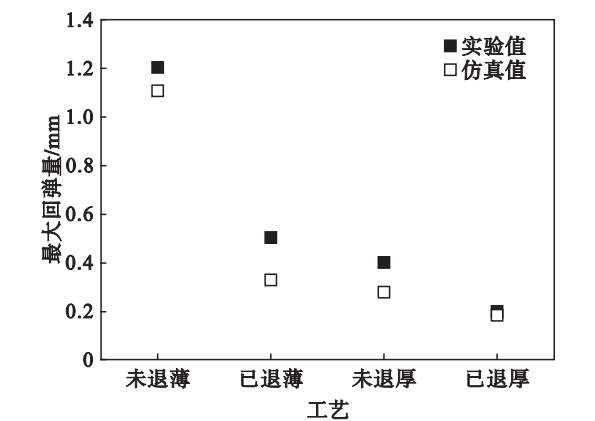


图 6 差厚板回弹仿真与实验结果
Fig. 6 TRB springback of simulation and experiment results

除了回弹缺陷外, 差厚板 U 型件在横向弯曲成形过程中还会发生过渡区移动. 轧制差厚板横向弯曲时, 薄板侧的贴模性比厚板侧差, 受到模具施加的摩擦力也小, 从而有更多的材料能够顺利流入凹模, 导致过渡区向厚侧移动^[14]. 此外, 厚侧板料屈服强度大, 因而产生了更小的塑性变形, 弯曲变形更多地集中在低强度的薄板侧, 这会进一步加剧厚度过渡区向厚板侧移动. 差厚板的板厚差以及强度差越大, 过渡区移动量也随之增大. 表 2 给出了差厚板 U 型件横向弯曲成形结束后过渡区移动量的仿真与实验对比.

由表 2 可知, 经过退火处理后, 差厚板的过渡区移动量增大. 原因在于, 差厚板薄侧在轧制加工

过程中发生了较为严重的加工硬化,薄板侧强度的提高将限制其塑性变形的发生,厚度过渡区位移减小. 经过退火处理后,差厚板的力学性能更加均匀^[15],薄侧的强度进一步降低,其塑性变形量大于厚侧,进而加剧了过渡区的移动.

表 2 过渡区移动量的仿真与实验结果				
Table 2 TTZ movement of simulation and experiment results				
差厚板尺寸	退火前		退火后	
	mm			
	仿真值	实验值	仿真值	实验值
80 × 230	7. 01	7. 00	9. 22	10. 12

3. 1 压边力的影响

差厚板 U 型件横向弯曲成形过程中,侧壁部分经历复杂的弯曲和拉深变形,沿板厚方向切向应力分布的不均是导致回弹的关键因素. 通过改变压边力,可以改善侧壁的内外层应力状态,从而抑制回弹的发生. 同时,施加合理的压边力可以改善材料的流动状态,从而改变差厚板的过渡区移动情况. 因此压边力是决定差厚板内部应力分布状态的关键因素,会显著地影响差厚板回弹和过渡区移动.

图 7 和图 8 分别为压边力对差厚板回弹以及过渡区移动的影响. 从图 7 可以看出,压边力对回弹有着较大影响. 总体来说,无论对于已退火差厚

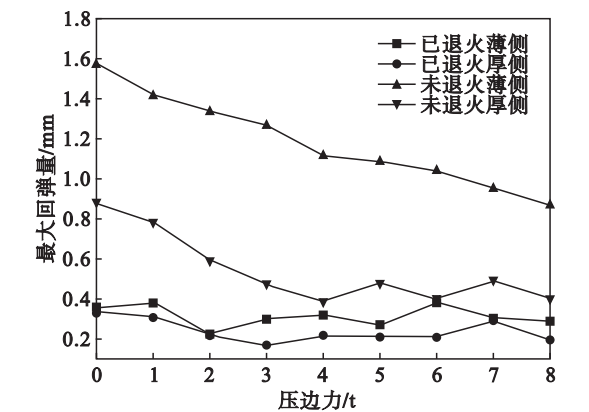


图 7 压边力对回弹的影响

Fig. 7 Effect of blank holder force on springback

板还是未退火差厚板,总的趋势均是回弹随压边力的增大而减小. 原因在于,更大的压边力引起更显著的板料拉伸效果,板料内侧也会由受压缩状态逐渐转变为受拉伸状态,从而减小了差厚板内、外表面的应力差,卸载后回弹也会随之降低. 另外,由图 7 还能够知道,对于未退火差厚板来说,这种变化趋势非常明显,而压边力的增加对于已退火差厚板回弹的减小作用则不那么显著. 原因

在于经过退火处理后,差厚板的回弹值已减小到较低的水平,这时再进一步降低回弹量变得非常困难,即使增大压边力,回弹量的减小幅度也非常有限,而且当压边力超过 8 t 时,零件还存在侧壁拉裂的风险.

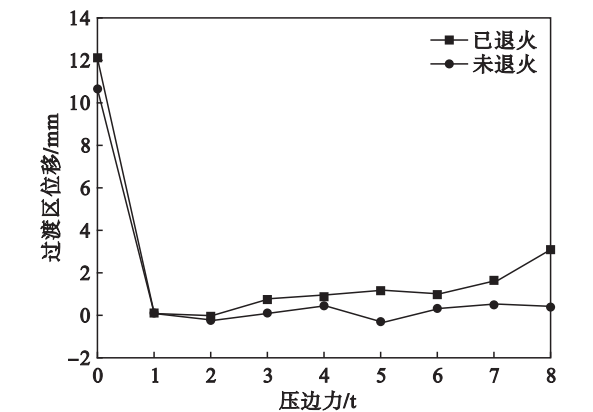


图 8 压边力对过渡区移动的影响

Fig. 8 Effect of blank holder force on TTZ movement

分析图 8 可以知道,采用 1 t 的压边力后,对于已退火或者未退火情况,过渡区位移均从大于 10 mm 减小到接近 0 mm. 此后,随着压边力的增大,对于未退火情况,过渡区位移变化不大;而对于已退火情况,过渡区位移甚至又逐渐增大. 原因在于,当未施加压边力时,在相同凸模力的作用下,薄侧发生的变形更大,并且薄侧材料的流动受到凸模的限制作用更小,因而过渡区向厚板侧的移动量较大. 当对差厚板施加压边力后,薄、厚两侧板料的变形及材料流动均受到较大的抑制,薄、厚两侧板料流动及变形更加均衡,过渡区移动量降低. 对于已退火差厚板,随着压边力的增大,薄、厚两侧板料流动均受到更大程度的限制,薄侧由于具有更小的强度而发生更大的变形,因而过渡区移动量反而增大,并且压边力越大,这种趋势也越明显. 而对于未退火差厚板,薄侧的强度甚至要大于厚侧,因而随着压边力的增大,薄侧的变形受到其自身强度的限制,过渡区移动量变化较小,甚至在较大压边力条件下出现过渡区向薄板侧移动的情况.

因此,为了限制回弹需要采用较大的压边力,但是过大的压边力不仅会导致过渡区位移的增大,还有可能导致零件破裂. 总的来看,采用 1 ~ 4 t 的压边力既能较好地抑制回弹,又能获得较小的过渡区位移.

3. 2 摩擦系数的影响

摩擦系数也是影响差厚板回弹和过渡区移动的重要因素. 差厚板表面和模具型面之间的摩擦

效应能够改变板料不同位置的应力应变状态,从而对差厚板的回弹和过渡区移动造成较大影响.

图 9 显示了摩擦系数对差厚板回弹的影响规律. 由图 9 能够知道,差厚板的回弹量随摩擦系数的增大呈现先减小后增大的趋势. 当摩擦系数处于较低水平时,它对差厚板回弹的影响类似于压边力因素的影响,采用更大的摩擦系数等同于增大了压边力,材料的流动受到了更大的摩擦阻碍作用,从而使板料的拉伸变形更加充分,回弹随之降低. 当摩擦系数增至 0.14 左右时,反向回弹出现,即发生了负回弹现象,而且反向回弹现象随着摩擦系数的增大而加剧.

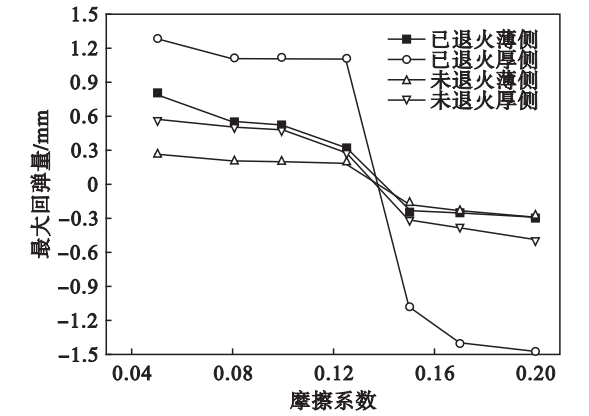


图 9 摩擦系数对回弹的影响
Fig. 9 Effect of friction coefficient on springback

图 10 显示了摩擦系数对差厚板过渡区移动的影响规律. 由图 10 能够看出,过渡区移动量随摩擦系数的增大而逐渐减小. 摩擦系数越大,则模具表面与板料之间的摩擦力也越大,与薄侧相比,差厚板厚侧具有更好的贴模性,从而受到的摩擦阻力也更大,厚板侧的拉伸变形变得显著,因此变形在薄、厚两侧分布更加均匀,过渡区移动量随之降低.

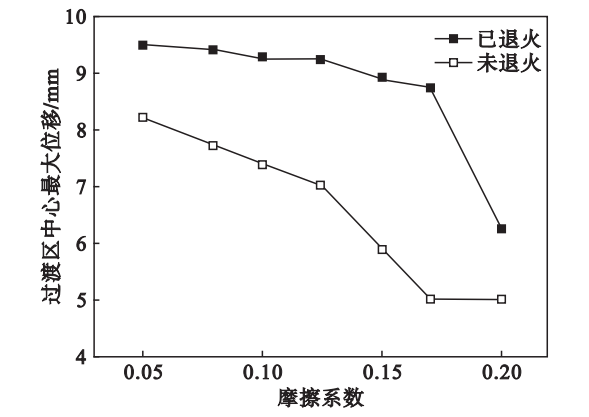


图 10 摩擦系数对过渡区移动的影响
Fig. 10 Effect of friction coefficient on TTZ movement

由以上分析可知,为了更好地抑制差厚板过渡区的移动,应保证摩擦系数处于较高的水平. 然而,摩擦系数过大对于控制回弹又是不利的,还会影响零件的表面质量. 此外,过大的摩擦系数会引起板料内部拉应力的增大,严重时导致差厚板零件厚度的过分减薄甚至破裂缺陷的发生. 所以,过大或过小的摩擦系数对于差厚板的弯曲成形都是不利的. 总的来说,采用 0.12 左右的摩擦系数对于限制差厚板的过渡区移动和回弹都是比较有利的.

3.3 模具间隙的影响

凸凹模间隙不仅控制着板料在凹模中的流动,从而改变差厚板过渡区的移动状态,而且会对板料在凸凹模圆角处的回弹产生较大影响. 图 11 和图 12 分别给出了模具间隙对差厚板回弹和过渡区移动的影响规律.

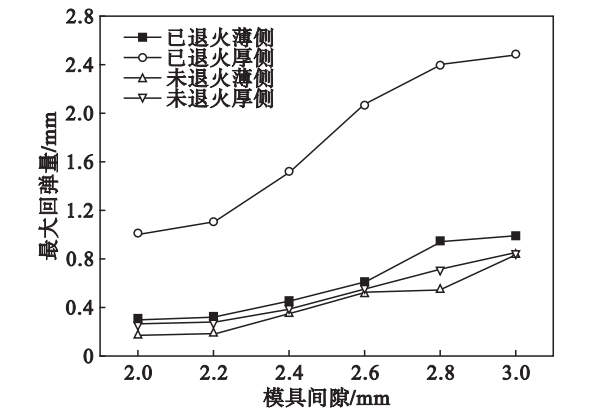


图 11 模具间隙对回弹的影响
Fig. 11 Effect of die clearance on springback

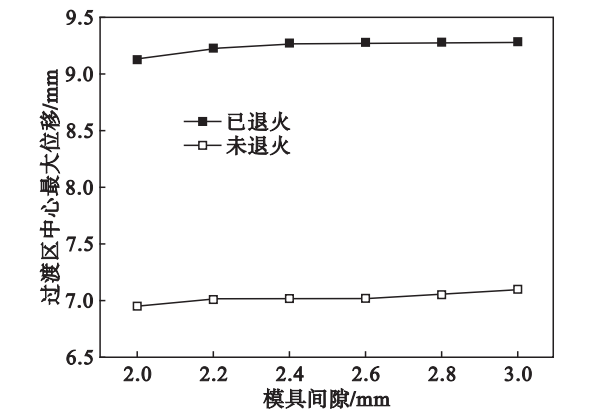


图 12 模具间隙对过渡区移动的影响
Fig. 12 Effect of die clearance on TTZ movement

由图 11 能够知道,随着模具间隙的增大,差厚板的回弹量增大. 原因在于,模具间隙增大后,板料的贴模性变差,差厚板弯曲件在径向受到的约束作用减小,弯曲半径增大,板料发生的塑性应变比例减小,弹性应变比例增加,因而回弹量增

大^[16]。由图 12 可知,随着模具间隙的增加,过渡区位移略有增加,但变化幅度较小,即模具间隙对差厚板过渡区移动的影响较小。

分析图 11 和图 12 还可以知道,模具间隙对差厚板回弹影响较大,而对过渡区位移的影响较小。因此,模具间隙的选取依据主要是差厚板的回弹量。过大的模具间隙会导致回弹加剧,差厚板零件的尺寸和形状精度降低;过小的模具间隙则会引起更大的弯曲力,零件厚度减薄且模具寿命下降。本文在保证模具寿命以及差厚板零件表面质量的前提下,优先采用 2.2 ~ 2.4 mm 的模具间隙,以便获得较好的零件精度。

综合本文对于差厚板横向弯曲回弹影响因素的分析,提出以下抑制差厚板回弹的措施:①采用退火处理;②适当增大压边力;③采用适中的摩擦系数;④采用较小的模具间隙。抑制过渡区移动的措施:①采用合适的压边力;②采用较大的摩擦系数。

4 结 论

1) 轧制差厚板 U 型件在横向弯曲成形过程中除了会产生回弹缺陷,还会发生厚度过渡区的移动。

2) 差厚板的回弹量随压边力的增大而减小,这种趋势对于未退火差厚板尤为显著,回弹量随摩擦系数的增大而先减小后增大,随模具间隙的增大而增大。

3) 过渡区移动量随压边力的增大而先减小后增大,随摩擦系数的增大而减小,受模具间隙的影响较小。

4) 综合来看,采用 1 ~ 4 t 的压边力、0.12 左右的摩擦系数以及 2.2 ~ 2.4 mm 的模具间隙能够有效控制回弹以及过渡区移动量,进而提高差厚板的横向弯曲成形性能。

参考文献:

[1] 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.

[2] Duan L B, Sun G Y, Cui J J, et al. Crashworthiness design of vehicle structure with tailor rolled blank[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2016, 53(2): 321 – 338.

[3] Kim J H, Ko D H, Ko D C, et al. Forming limit diagrams of

tailor rolled blank in hot stamping and its verification[J]. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2016, 2(4): 409 – 417.

[4] Liu X H, Zhao Q L, Liu L Z. Recent development on theory and application of variable gauge rolling: a review[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2014, 27 (3): 483 – 493.

[5] Weinrich A, Becker C, Maevus F, et al. Bending of tailored blanks using elastic tools[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1018: 301 – 308.

[6] 孔庆华, 张建宇. 拼焊板 U 型件成形性能及焊缝移动规律[J]. *中国工程机械学报*, 2011, 9(2): 209 – 213.
(Kong Qing-hua, Zhang Jian-yu. Formability and weld-line movement of U-shape TWB parts[J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2011, 9(2): 209 – 213.)

[7] 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.

[8] Adnan M, Abdullah A, Samad Z. Springback behavior of AA6061 with non-uniform thickness section using Taguchi method[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 89 (5/6/7/8): 2041 – 2052.

[9] 夏元峰. 变厚度汽车 B 柱冲压成形工艺研究及模具设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
(Xia Yuan-feng. Research on stamping process and mold design of B pillar with variable thickness[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.)

[10] 崔虎, 关建东, 康永林. CSP 生产 SPHC 板材的冷轧退火工艺研究[J]. *轧钢*, 2010, 27(3): 20 – 23.
(Cui Hu, Guan Jian-dong, Kang Yong-lin. Optimization of cold rolling and annealing processes of SPHC strip produced by CSP technology[J]. *Steel Rolling*, 2010, 27 (3): 20 – 23.)

[11] 包向军. 变截面薄板弯曲成形回弹的实验研究和数值模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2003.
(Bao Xiang-jun. Experimental investigation and numerical simulation of springback in tailor rolled blanks bending[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2003.)

[12] Zhang H W, Liu X H, Liu L Z, et al. Study on nonuniform deformation of tailor rolled blank during uniaxial tension[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2015, 28 (9): 1198 – 1204.

[13] Kim D, Kim J, Lee Y, et al. Study of residual stresses in tailor rolled blanked Al5J322T4 sheets[J]. *Rare Metals*, 2006, 25 (sup2): 111 – 117.

[14] 官英平, 王立君, 吕安松, 等. 拼焊板 V 形自由弯曲成形及回弹过程[J]. *塑性工程学报*, 2010, 17(6): 28 – 32.
(Guan Ying-ping, Wang Li-jun, Lyu An-song, et al. Research on the forming and springback in V-shape free bending of tailor welded blanks[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2010, 17(6): 28 – 32.)

[15] Kim H W, Lim C Y. Annealing of flexible-rolled Al-5.5wt% Mg alloy sheets for auto body application[J]. *Materials and Design*, 2010, 31 (sup1): 71 – 75.

[16] 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.