38

DP800 双相高强钢折弯及回弹研究

吴信涛,丁方强,刘国凯,董力源,李萍

(合肥工业大学 材料科学与工程学院,合肥 230009)

摘要:目的 针对高强度钢板成形过程中的回弹问题,研究工艺参数对回弹的影响规律,优选工艺参数组合, 以获得回弹较小的 V 形件。方法 采用 dynaform 软件对 V 形件进行成形及回弹的数值模拟,以摩擦因数、 模具间隙、冲压速度、凹模圆角半径等工艺参数为自变量,以回弹前后水平距离差最大值为因变量,设计 了四因素三水平的正交试验方案,研究多个工艺参数对回弹影响的规律。结果 实验结果表明,V 形件回弹 值大小随着摩擦因数的增大呈现减小趋势;随着模具间隙、凹模圆角半径的增大,回弹值呈现增大的趋势; 而冲压速度对 V 形件回弹的影响较小,且工艺参数影响 V 形件回弹大小的主次顺序为模具间隙、摩擦因数、 凹模圆角半径、冲压速度。结论 优选工艺参数组合为:摩擦因数为 0.2、模具间隙为 2.6 mm、冲压速度为 1200 mm/s、凹模圆角半径为 12 mm,此时回弹水平距离差最大值为 0.566 mm,最大减薄率为 1.40%;实际生产可以忽略冲压速度对回弹的影响,仿真结果对实际生产具有指导意义。

关键词:高强度钢板;DP800;弯曲回弹;数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.04.007

中图分类号: TG386 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2016)04-0038-05

Bending and Springback of High-strength Dual Phase Steel DP800

WU Xin-tao, DING Fang-qiang, LIU Guo-kai, DONG Li-yuan, LI Ping

(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

ABSTRACT: As for the springback of high-strength steel forming process, in order to study the influence rule of process parameters on springback, optimize the combinations of process parameters and obtain a smaller V-shaped springback value, dynaform software was used to carry out numerical simulation for the forming and spring back of V-shaped workpiece. An orthogonal experimental plan of four factors and three levels was worked out with process parameters, i.e. friction coefficient, die clearance, punch speed and radius of bottom die as independent variables and the maximum horizontal distance difference before and after springback as the dependent variable, so as to research the influence rule of several process parameters on the springback. The experiment showed that the springback of V-shaped workpiece gradually reduced along with the increase of the friction coefficient and got bigger along with the increase of die clearance and radius of bottom die; The punch speed had little influence on the springback of V-shaped workpiece and the process parameters influenced the V-shaped springback in the order: first die clearance, friction coefficient, radius of bottom die, and last punch speed. The optimal process parameters are: friction coefficient 0.2, die clearance 2.6 mm, punch speed 1,200 mm/s, radius of bottom die 12 mm. With these optimal parameters, the maximum springback can be ignored in actual production, and the simulation results have practical significance for the production.

KEY WORDS: high-strength steel; DP800; bending springback; numerical simulation

收稿日期: 2016-06-10

作者简介:吴信涛(1990-),男,安徽宿州人,硕士生,主要从事材料成形过程控制及结构仿真研究。

通讯作者:李萍(1973—),女 哈尔滨人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为精密成形和数值模拟。

随着科学技术的不断发展,工程机械和汽车的 轻量化成为了可能,已经成为减少废气排放和燃油 消耗的有效方法,轻量化设计逐渐成为产品设计制 造的主流方向。以双相钢(DP)、相变诱发塑性钢 (TRIP)、低碳马氏体钢(MART)为代表的先进高 强钢,在保证结构零件强度的同时,减小了零件的 厚度,起到了轻量化与提高安全性能的作用,是目 前最流行的轻量化材料^[1-3]。

DP800属于马氏体和铁素体组成的双相高强钢, 随着马氏体含量的增加,其强度值可达 1200 MPa, 被用于制作结构强度要求较高的零件。DP800 具有 较低的屈服强度比、较高的加工硬化指数和烘烤硬 化性能,没有屈服延伸和室温时效现象。高强度钢 板在成形过程中会产生较多的弹性变形和残余应 力,成形后零件的弹性恢复和应力释放将会导致零 件有回到原始状态的趋势,引起回弹。回弹降低了 零件的尺寸精度,增加了后续零件装配的难度,在 实际生产过程中应严格控制和减小回弹^[4-7]。

北京科技大学的唐学峰等人^[8]建立了 DP800 的 U形件冲压模型,研究了压边力、摩擦因数、模具圆 角半径对回弹的影响,最后基于各工艺参数对回弹 的影响,提出了减小回弹的方法;重庆大学的丰慧 珍等人^[9]对 U 形高强度钢板进行了冲压数值模拟, 研究了板料厚度、摩擦因数、拉延筋设置对冲压回 弹的影响规律,最后提出了控制高强度钢板冲压回 弹,提高成形稳定性的有效方法。目前很少有对高 强度钢板的成形及回弹过程进行工艺参数优化的研 究,本文基于 dynaform 研究 V 形件折弯成形及回弹 过程,利用正交试验设计,研究了摩擦因数、模具 间隙、冲压速度、凹模圆角半径对 V 形件成形及回 弹的影响,对工艺参数进行优化分析,最后得出使 回弹角度最小的成形工艺参数组合,为实际实验提 供指导^[10-14]。

1 V形件折弯模型的建立

1.1 有限元模型的建立

采用 catia 软件建立 V 形折弯仿真模型,如图 1 所示。凸模通过凹模偏置得到,仿真过程中,凸模、 凹模设置为刚性体,板料设置为弹塑性体,板料尺 寸为 95 mm×35 mm×2.5 mm,模拟采用无压边圈形 式,对高强钢进行冲压成形模拟,研究工艺参数对 V 形件成形及回弹的影响。此次仿真所选择板料材料为 DP800 高强度钢板,材料模型选用 dynaform 材料 库中 DP800 双相钢,材料的力学性能参数如下:密度为 7.85 g/cm,弹性模量为 207 GPa,泊松比为 0.28,硬化指数为 0.111, *R*₀=0.85, *R*₄₅=0.87, *R*₉₀=0.88,应力-应变曲线如图 2 所示^[15-16]。



图 1 V形折弯有限元模型 Fig.1 Finite element model of V-shaped bending



Fig.2 DP800 stress-strain diagram

1.2 回弹指标及测量

选取下面截面线作为研究对象,测量回弹前后的水平距离差,作为评定零件回弹后的尺寸精度和回弹大小的标准,如图3所示,水平距离差*d*越大,回弹越大,反之则回弹越小。

2 实验方案及结果

高强钢板的成形及回弹是一个多因素共同作用 的过程,因此有必要对多因素进行综合分析,研究 多参数对成形及回弹的影响规律。本文基于正交试 验法,对摩擦因数、模具间隙、冲压速度、凹模圆 角半径4个工艺变量进行四因素三水平的试验设计, 针对上述因素对 V 形件成形及回弹的影响进行定性 和定量分析,选取因素及水平值如表 1 所示,模拟 结果如表 2 所示。

设置摩擦因数为 0.1、模具间隙为 2.6 mm、冲压 速度为 800 mm/s、凹模圆角半径为 10 mm,即对第

39



40

Fig.3 Measurement of springback

表 1 正交试验因素及水平值 Table 1 The factors and levels of Orthogonal experiment

麽嫁因粉	模具间隙	冲压速度	凹模圆角半径	
净原西奴	/mm /(mm·s ⁻¹)		/mm	
0.10	2.6	800	10	
0.15	2.8	1000	12	
0.20	3.0	1200	14	

1 组实验参数组合进行成形仿真, 折弯后的成形 极限 riment 图及厚度减薄图如图 4 所示。从图 4 可 以看出, 折弯后的板料几乎不发生塑性变形, 仅在 与凸模接触区域的两侧发生少量的变形, 从成形后 零件厚度分布可以看出, 板材的最大减薄率为 1.462%、最大增厚率为 0.297%, 整体来说厚度变化 不明显。

表 2	四因素三水平正交试验结果
Table 2 Orthogo	onal test of four factors and three levels

实验组数	摩擦因数	模具间隙/mm	冲压速度/(mm·s ⁻¹)	凹模圆角半径/mm	最大减薄率/%	水平距离最大值/mm
1	0.10	2.6	800	10	1.48	0.913
2	0.10	2.8	1000	12	1.56	1.623
3	0.10	3.0	1200	14	1.52	2.321
4	0.15	2.6	1000	14	1.40	1.000
5	0.15	2.8	1200	10	1.56	1.514
6	0.15	3.0	800	12	1.52	1.826
7	0.20	2.6	1200	12	1.40	0.566
8	0.20	2.8	800	14	1.48	1.458
9	0.20	3.0	1000	10	1.48	1.694
均值1	1.619	0.826	1.399	1.374		
均值 2	1.447	1.532	1.439	1.338		
均值 3	1.239	1.947	1.467	1.593		
极差	0.380	1.121	0.068	0.255		



图 4 折弯成形仿真结果 Fig.4 Bending and forming simulation results

3 工艺参数对回弹的影响

3.1 摩擦因数对回弹的影响

V形件在成形过程中,板料表面分别产生压应力

和拉应力作用,由于凹凸模和板料之间存在摩擦力 作用,可增大拉应力变形区,使板料内外表面的应 力状态趋于一致,因此摩擦因数越大,回弹量越小; 但是摩擦力较大时,产生的拉应力也较大,会影响 隔热板的表面质量,严重时出现拉裂现象。摩擦因

41

数对回弹的影响如图 5 所示。



图 5 摩擦因数对回弹的影响 Fig.5 Effect of friction coefficient on the springback



3.2 模具间隙对回弹的影响

凹凸模间隙对板材成形有很大的影响,合理的 凹凸模间隙数值有利于获得成形效果较好、回弹值 小的零件。从图 6 可以看出,在一定程度范围内, 回弹随着凹凸模间隙的增大而增大。这是由于凹凸 模间隙越小,成形过程产生的应变值越大,能有效 减小弹性变形的影响,从而使卸载后的回弹减小。

3.3 冲压速度对回弹的影响

不同成形速度控制下的回弹结果如图 7 所示。由 图 7 可见,随着冲压速度的增大,回弹水平距离差略 微增大,但是增大趋势不明显,当冲压速度从 800 mm/s 增加到 1200 mm/s 时,回弹值仅增大 0.068 mm,可知 冲压速度对折弯后零件回弹的影响不明显。

3.4 凹模圆角半径对回弹的影响

凹模圆角半径的大小对零件的成形及成形后零 件回弹的影响比较复杂,合理控制凹模圆角半径是 获得合格零件的关键。小的凹模圆角有利于增大板 料通过凹模边缘时的摩擦阻力,同时径向拉应





图 8 凹模圆角半径对回弹的影响 Fig.8 Effect of die radius on the springback

力增大,金属的塑性变形充分,成形后零件回 弹较小;但较小的凹模圆角半径使摩擦阻力较大, 导致零件开裂。凹模圆角半径对回弹的影响如图 8 所示。

3.5 优化参数组合

通过分析表 2 可以看出,模具间隙、摩擦因数 对回弹的影响较大,凹模圆角半径与冲压速度对回 弹的影响相对较小。在实验条件下,摩擦因数、模 具间隙、冲压速度、凹模圆角半径 4 个因素对回弹 值影响程度的先后顺序为:模具间隙占 61.46% (1.121/1.824)、摩擦因数占 20.83% (0.380/1.824)、 凹模圆角半径占 13.98% (0.255/1.824)、冲压速度占 3.73% (0.068/1.824)。进一步对正交实验结果进行分 析,可知较优参数组合为:摩擦因数为 0.2、模具间 隙为 2.6 mm、冲压速度为 1200 mm/s、凹模圆角半 径为 12 mm,此时最大减薄率为 1.40%,回弹水平距 离最大值为 0.566 mm。

4 结论

1) 基于 V 形件折弯仿真实验, 研究了高强度钢

板 DP800 折弯成形及回弹问题,通过正交实验方案 设计,分析了多个工艺参数对成形及回弹的影响规 律,结果表明工艺参数对薄板折弯成形后的 V 形件 最大减薄率影响较小,对回弹的影响较大。

2)摩擦因数、模具间隙对折弯后 V 形件的回弹 影响较大,回弹值随着摩擦因数的增大而减小,随 着模具间隙和凹模圆角半径的增大而增大,冲压速 度对 V 形件的回弹的影响较小,实际生产可以忽略 冲压速度对回弹的影响。

参考文献:

- TISZA Miklós, LUKÁCS Zsolt. Springback Analysis of High Strength Dual-phase Steels[J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 975–980.
- [2] 何昌炜,谢震,章哲. 800 MPa 级 DP 钢冲压成形及裂纹扩展 机理[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(1): 121—125.
 HE Chang-wei, XIE Zhen, ZHANG Zhe. Study on Stamping Formability and Instability Mechanism of 800MPa DP Steel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20(1): 121—125.
- [3] 马鸣图,易红亮.高强度钢在汽车制造中的应用[J]. 热处理, 2011, 26(6): 9—20.
 MA Ming-tu, YI Hong-liang. Application of High Strength Steel to Manufacturing Auto[J]. Heat Treatment, 2011, 26(6): 9—20.
- [4] 余燕,张小盟,江秋. 汽车用高强度钢板 DP800 的疲劳性 能研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(20): 106—108.
 YU Yan, ZHANG Xiao-meng, JIANG Qiu. Study on Fatigue Performance of Automotive High-strength DP800 Steel[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(20): 106—108.
- [5] 阮光明. 基于响应面法的 DP800 高强钢冲压回弹工艺参数优化[J]. 锻压技术, 2015, 40(4): 40—44. RUAN Guang-ming. Technological Parameters Optimization of Springback for DP800 High Strength Steel Based on Response Surface Method[J]. Forging&Stamping Technology, 2015, 40(4): 40—44.
- [6] 瞿烨波, 余际星, 彭勇, 等. 基于 Dynaform 纵梁后板成 形工艺及回弹控制模拟分析[J]. 锻压技术, 2011, 36(1): 43-46.

QU Ye-bo, YU Ji-xing, PENG Yong, et al. Simulation Analysis of Forming Process and Springback Control for Longeron After-Reinforcing Plate Based on Dynaform[J]. Forming&Stamping Technology, 2011, 36(1): 43—46.

- [7] 谢震,李萌,王武荣.高强度双相钢薄板拉弯成形试验数 值模拟[J].上海交通大学学报,2013,47(5):760—765.
 XIE Zhen, LI Meng, WANG Wu-rong. Stretch Bending Limit of Dual Phase Sheet and ITS Numerical Simulation[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47(5):760—765.
- [8] 唐学峰, 王宝雨, 周靖, 等. DP800 先进高强钢冲压回规

律研究[C]. 第十三届中国机械工程学会塑性工程分会 年会, 2003: 476—480.

TANG Xue-feng, WANG Bao-yu, ZHOU Jing, et al. Effect of Forming Parameters on Springback of Advanced High Strength Steel DP800[C]. The 13th Chinese Mechanical Engineering Society Annual Meeting in Plastic Engineering Branch, 2003: 476—480.

- [9] 丰惠珍,温彤. 高强度钢板冲压成形的回弹预测与控制 [C]. 第三届锻压装备与制造技术论坛特种加工技术及 产品信息交流会议论文集, 2007:32-34. FENG Hui-zhen, WEN Tong. Forecast and Control of Springback of High Strength Steel During Stamping[C]. Third Metalforming Equipment & Manufacturing Technology Forum on Special Processing Technology and Product Information Exchange Conference Proceedings,2007, 32—34.
- [10] VORKOV V, AERENS R, VANDEPITTE D, et al. Springback Prediction of High-strength Steels in Large Radius Air Bending Using Finite Element Modeling Approach[J]. Procedia Engineering, 2014(81): 1005—1010.
- [11] TANG Long, WANG Hu, LI Guang-yao. Advanced High Strength Steel Springback Optimization by Projection-based Heuristic Global Search Algorithm[J]. Materials and Design, 2013, 43: 426-437.
- [12] 徐迎强,薛克敏,周结魁. 基于智能优化的汽车内板件回 弹控制[J]. 塑性工程学报, 2011, 18(5): 64—69.
 XU Ying-qiang,XUE Ke-min,ZHOU Jie-kui.Control of Springback in the Forming Process of Auto Inner Panels Based on Intelligent Optimization[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2011, 18(5): 64—69.
- [13] 付泽民, 莫健华, 陈伟, 等. 基于量纲分析法的金属板材 折弯回弹数学模型[J]. 机械工程学报,2010,46(12):53-58.
 FU Ze-min, MO Jian-hua, CHEN Wei, et al. Springback Model for Air-bending of Sheet Metal Based on Dimensional Analysis Method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12): 53—58.
- [14] 闻瑶,方笠纬, 王成国,等. 汽车U形隔热板冲压回弹控制[J]. 精密成形工程, 2014, 6(5): 124—127.
 WEN Yao, FANG Li-wei, WANG Cheng-guo, et al. Springback Control in the Forming of U-shaped Thermal Baffle[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(5): 124—127.
- [15] 黄伟, 李梦群, 杨亚威. 基于 dynaform 的 V 形件弯曲回 弹数值模拟[J]. 锻压技术,2014, 39(6): 118—121.
 HUANG Wei, LI Meng-qun, YANG Ya-wei. Numerical Analysis of Springback for V-shaped Pieces Based on Dynaform[J]. Forging & Stamping Technology, 2014, 39(6): 118—121.
- [16] 陈贵江, 康永林, 朱国明.高强度双相钢 DP800 成形件碰 撞性能仿真分析[J], 塑性工程学报, 2010, 17(4): 91—95. CHEN Gui-jiang, KANG Yong-lin, ZHU Guo-ming. The Influence of Stamping Springback and Strain Rate on Collision Performance of High-strength Dual-phase Steel DP800 Parts[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010,17(4): 91—95.