DOI: 10.3901/JME.2019.02.073

超高强钢多道次辊弯成形回弹规律研究*

韩 飞 李荣健

(北方工业大学机械与材料工程学院 北京 100144)

摘要: 超高强钢由于材料强度高、塑性较差等特点, 成形难度也比普通钢更大, 易发生回弹, 是影响辊弯成形精度的重要原因。采用试验及有限元模拟的方法, 对回弹规律及产生机理进行研究。设计三组道次数不同的辊弯成形试验, 从成形角度、道次数、弯角增量等方面阐明回弹角度的变化规律。建立超高强钢辊弯成形的有限元仿真模型, 分析 V 型件的成形特性, 重点分析总应变、塑性应变和弹性应变在板材横向的分布, 阐述辊弯成形回弹角度变化规律的产生机理。结果表明, 对于单道次辊弯成形, 随成形角度增大, 回弹角度呈先增大后减小的变化趋势, 弹性应变峰值的变化是回弹角度发生改变的主要原因; 对于多道次辊弯成形, 增多道次数有利于提高塑性变形量的积累、减小弹性应变峰值, 这种多道次增量成形是辊弯成形所特有的工艺特性; 增大弯角增量使板材弯角处厚度减薄, 促进角部材料流动, 有效减小了回弹量。对超高强钢多道次辊弯成形回弹规律进行了系统的阐述和研究, 为减小回弹、提高成形精度提供了理论依据。

关键词: 辊弯成形; 超高强钢; 回弹规律

中图分类号: TH16

Springback Law of Ultra High Strength Steel in Multiple Stands Roll Forming Process

HAN Fei LI Rongjian

(School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144)

Abstract: The forming difficulty of ultra high strength steel is greater than that of ordinary steel because of the high strength and poor plasticity of ultra high strength steel. Further, ultra high strength steel is prone to springback, which is an important factor influencing the roll forming accuracy. An investigation of the springback law and its production mechanism using experiments and finite element simulation is introduced. Three sets of roll forming experiments with different numbers of stands are designed. The variation law of the springback angle is elucidated in terms of the forming angle, number of stages, increment angle, and so on. The finite element simulation model of roll forming of ultra high strength steel is established. The forming characteristics of V-shaped sheets are analysed. The distribution of the total strain, plastic strain, and elastic strain in the transverse direction of the sheet are analysed. The mechanism of the variation of the springback angle in roll forming is discussed. The results show that for single-stand roll forming, the springback angle first increases and then decreases with increasing forming angle. The change in the elastic strain peak is the main reason for the variation of the springback angle. For multi-stand roll forming, increasing the number of stands is conducive to increasing the accumulation of plastic deformation and reducing the elastic strain peak. This multi-stand incremental forming is a unique process characteristic of roll forming; increasing the increment angle reduces the thickness of the sheet, promotes material flow in the forming zone, and effectively reduces the springback. The systematic investigation of the springback law of multi-stand roll forming provides a theoretical basis for reducing the springback and improving the forming accuracy.

Key words: roll forming; ultra high strength steel; springback

0 前言

辊弯成形是通过顺序配置的多道次具有特定轮

廓型面的成形轧辊, 把金属板材逐渐进行横向弯曲以成形特定型面的成形工艺^[1], 工作原理如图 1 所示^[1]。超高强钢具有材料强度高、塑性较差等特点, 成形难度比普通钢更大, 易发生回弹, 影响产品精度和质量。超高强钢辊弯成形产品广泛应用于汽车制造业, 利用高强度钢板代替普通钢板, 可减轻车身重量, 提升汽车产品性能。对超高强钢辊弯成形

* 国家自然科学基金(50905001)、国家自然科学基金和上海宝钢集团公司联合(51074204)、北京市自然科学基金(3112010)和北京市青年拔尖人才(2014000026833ZK12)资助项目。20180502 收到初稿, 20180706 收到修改稿

回弹规律的研究具有重要的理论和现实意义。

图1 辊弯成形工作原理

TRAUB 等^[2]以板材弯曲区域为研究对象,通过分析弯角处板材厚度变化和应变分布,得出弯曲半径与板厚的比值是影响成形效果的突出因素。

BADR 等^[3]对比了“定弧长”和“定半径”两种轧辊设计方式对最终成形质量的影响,通过试验及有限元仿真分析,得出用“定半径”法成形的工件边缘纵向应变更小,纵向弯曲和回弹缺陷得到改善。

WIEBENGA 等^[4]以纵向弯曲和回弹为研究对象,建立稳健性优化设计以修正产品缺陷,降低成形精度对材料性质的敏感程度。试验和仿真结果表明,纵向应变是产生纵向弯曲缺陷的关键因素,而轧辊间距的减小会使板材厚度减薄,有利于减小回弹角度。

韩飞等^[5]针对帽型件下弯角的回弹提出两种控制方案,对比空弯(辅助装置不与板材上表面接触)和实弯两种过弯形式对回弹的矫正效果,得出结论:实弯使板材与辅助辊充分接触,使板材角部厚度减薄,材料流动性更好,减小了纵向应变峰值和回弹量。

CURTZEN 等^[6]对闭口超高强钢辊弯型材的成形、焊接、切断等工序进行了深入的研究,运用拉格朗日欧拉方程判断成形和焊接的稳定性,并模拟切断后板材的成形效果,对提高复杂超高强钢管材成形精度提供了重要帮助。

ABVABI 等^[7]考察了残余应力对超高强钢辊弯成形的影响,在成形过程中所引入的残余应力将影响板材的弯曲程度及塑性变形,从而增大了回弹角度,在数值模型中引入残余应力信息将提高模拟的精度。

YU 等^[8-9]研究了 TRIP780 钢的非弹性恢复行为对回弹的影响。卸载过程中的应变恢复是弹性恢复和非弹性恢复的结合,非弹性恢复可达总恢复量的20%以上;用变弹性模量模拟成形过程,所得回弹角度大于恒定弹性模量模拟的结果,为改善回弹模拟精度提供了有效经验。LIU 等^[10-11]建立了变弹性模量模型,相比恒值模型,明显提高了辊弯成形回弹预测精度。

HAN 等^[12]以 U 型件辊弯回弹为研究对象,利用响应面法获得了最佳的工艺参数,调整了最终道次的弯曲角度和半径,减小回弹角度。ZENG^[13]基于响应面法对辊弯成形进行优化设计,建立了以成形角增量、轧辊半径为变量,以回弹角度和边缘纵向薄膜应变峰值作为目标函数和约束条件的数学模型,通过优化设计,减小边波和回弹缺陷。

综上所述,学者们对辊弯成形回弹的研究已取得一定进展,然而针对多道次辊弯成形对回弹影响的研究较少,本文以此为研究对象,研究不同成形角度、道次数及弯角增量等工艺参数对回弹的影响,为优化工艺参数控制回弹量提供了重要的理论依据。本文设计了三组道次数不同的超高强钢辊弯成形试验,由试验数据得出回弹角度的变化规律;结合试验,建立了辊弯成形的有限元仿真模型,对弯角部位的应力应变状态进行分析,阐述了辊弯成形这种典型增量成形工艺的回弹机理。

1 试验及仿真模型建立

1.1 试验平台

试验平台为北方工业大学的高精度辊弯成形机组,如图2所示。采用下辊轴驱动,在轧辊的转动及摩擦力的带动下,板材通过成形轧辊,最终成形目标截面。上轧辊半径为60 mm,下轧辊半径为50 mm,机架间距为250 mm。试验所用板材的宽度为54.5 mm,长为900 mm,板厚1 mm,轧辊间距为1 mm,成形速度0.5 m/s。试验所成形截面为V型。

图2 辊弯成形试验平台

成形的试验工件如图3所示,可以看出成形效果较好,无纵向弯曲、扭曲缺陷。

采用 Profile360 激光测量设备,通过非接触形式,测量试验工件的成形角度,测量精度在 0.1° 范围内,能够保证试验分析的精度要求,如图4所示。

试验材料为 Q&P 钢,全称“Quenching and Partitioning Steel”,即淬火延性钢,牌号为 Q&P980,具有强度高、韧性好的特点,是第三代汽车用超高强钢,材料性能见表1及图5,化学成分见表2。

回弹角度的测量如图6所示,目标成形角度为 θ ,实际成形角度为 θ' ,回弹角度为 δ ,即 θ 角与 θ' 角的差值。

图6 回弹角示意图

1.3 有限元仿真模型建立

在试验基础上,采用 ABAQUS 软件建立超高强钢辊弯成形有限元仿真模型,如图7所示。

图7 有限元仿真模型

板材选用缩减积分 C3D8R 单元,弯曲区域网格尺寸为 $1\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$,立边网格尺寸为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,如图8所示。仿真模型的几何参数与试验相同。轧辊设置为解析刚体,由入料轧辊的转动带动板材水平向前移动并通过成形轧辊,最终成形为目标截型。为尽可能模拟实际成形工况,板材边界约束仅限制沿板厚轴向的转动以及沿横向弯曲方向的平动。

图8 板材网格划分

2 试验结果及分析

2.1 单道次辊弯成形对回弹的影响

取1道次成形的试验数据,分析成形角度对回弹的影响。试验结果如表6所示。回弹角度随成形角度的变化趋势如图9所示。

表6 1道次成形试验结果 (°)

设计角度	成形角度	回弹角度
5	1.09	3.91
10	5.68	4.32
15	10.59	4.41
20	15.23	4.77
25	21.12	3.78
30	26.58	3.42

图9 1道次成形回弹角度变化规律

通常认为弯曲角度越大,回弹角度越大。PANTHI^[14]通过压弯成形,得出回弹角度随成形角度的增大而增大。然而本文试验结论与上述观点有明显不同。由表6、图9分析可知:当成形角度小于 20° 时,回弹角度呈增大趋势,当成形角度大于 20° 时,回弹角度下降。试验结果是随着成形角度的增大,回弹角度呈现先增大而后减小的变化趋势。

辊弯成形回弹角度的变化趋势是由其成形特性造成的,在下文有限元分析环节将具体阐述单道次辊弯成形回弹角度这种变化趋势的产生机理。

2.2 多道次辊弯成形对回弹的影响

2、3道次成形试验结果如表7、8所示。

图10为道次数对回弹角度的影响。由表7、表8、图10可知,成形角度相同时,3道次成形的回弹角度相比2道次成形大幅度减小。道次数增多有效减小了回弹角度,提高成形精度,这是辊弯成形这种增量成形工艺的特点决定的。

表 7 2 道次成形试验结果 (°)

1 道次设计角度	2 道次设计角度	试验成形角度	回弹角度
5	10	4.18	5.82
5	15	9.42	5.58
10		9.57	5.43
5	20	15.67	4.33
10		14.70	5.30
15		14.49	5.51
5	25	21.91	3.09
10		21.16	3.84
15		20.03	4.97
20		20.13	4.87
5	30	27.19	2.81
10		26.22	3.78
15		25.42	4.58
20		25.27	4.73
25		25.41	4.59

表 8 3 道次成形试验结果 (°)

1 道次 设计角度	2 道次 设计角度	3 道次 设计角度	试验成形 角度	试验回弹 角度
5	10	15	11.77	3.23
5	10	20	16.60	3.40
5	15		17.26	2.74
10			17.15	2.85
5	10	25	23.24	1.76
5	15		23.09	1.81
10			22.93	2.07
5	20		23.09	1.91
10			22.75	2.25
15			22.20	2.80
5	10	30	28.70	1.30
5	15		28.14	1.86
10			27.97	2.03
5	20		27.62	2.38
10			27.43	2.57
15			27.12	2.88
5	25		28.19	1.81
10			27.31	2.69
15			27.51	2.49
20			27.85	2.15

图 10 2、3 道次成形回弹角度对比

2.3 弯角增量对回弹的影响

2 道次成形试验结果如表 7 所示，利用试验结果分析弯角增量对回弹的影响。

由表 7 分析可知，成形角度为 20°、30°时，第 1 道次成形角度越小，第 1、2 道次间的弯角增量越大，最终回弹角度越小。图 11 反映回弹角度这种变化趋势。

图 11 弯角增量对回弹影响

3 有限元仿真分析

3.1 有限元仿真精度验证

有限元仿真结果如表 9 所示，数值模型回弹角度与试验回弹角度差值较小，能够满足仿真分析的精度要求。表中 10°→20°表示通过 2 道次成形，第 1、2 道次的成形角度分别为 10°、20°，其他类似。

表 9 3 道次成形试验结果 (°)

设计角度	成形角度	回弹角度
5	3.91	3.34
10	4.32	3.71
15	4.41	4.02
20	4.77	4.14
25	3.78	3.26
30	3.42	2.83
5→30	2.81	2.21
10→30	3.78	3.13
15→30	4.58	3.92
20→30	4.73	4.08
5→10→30	1.30	1.12

成形角度 30°时，仿真模型与试验截面对比如图 12 所示，二者重合度较好，仿真结果与试验截面接近。

3.2 单道次辊弯成形对回弹的影响

成形角度为 10°、20°、30°时，回弹角度的变化趋势如图 13 所示。

图12 有限元模型与试验工件截面对比

图13 单次模拟结果

图14a、14b为板材横向分布的总应变和塑性应变，由图可知，应变主要集中在弯角区域，塑性应变与总应变峰值接近，应变峰值出现在弯角处，并随成形角度的增大而增大。

(a) 总应变横向分布

(b) 塑性应变横向分布

图14 板材横向分布的总应变和塑性应变

图15a、15b为板材总应变、塑性应变峰值的变

化趋势，其差值弹性应变峰值在图中标出。弹性应变峰值在板材的内、外侧大致呈对称分布，内侧为压缩状态，外侧为拉伸状态，此外，板材内侧的弹性应变峰值大于外侧。

(a) 板材内侧应变峰值

(b) 板材外侧应变峰值

图15 板材应变峰值

由表10、图16可知，随着成形角度的增加，弹性应变呈先增大后减小的趋势，与回弹角度的变化规律一致；弹、塑性应变比值逐渐减小，与回弹、成形角度比值的变化趋势一致，弹性应变量减少是造成单次辊弯成形角度大于20°时，回弹量减小的原因。板材内侧弹、塑性应变比值高于外侧，且内侧弹、塑性应变比值与回弹、成形角度的比值更接近，说明板材内侧弹性应变回复是回弹的主因。

图16 弹性应变峰值与回弹角度对比

表 10 应变峰值与回弹角度汇总

成形角度/(°)	10		20		30	
	内侧节点	外侧节点	内侧节点	外侧节点	内侧节点	外侧节点
总应变峰值	-0.018 13	0.025 57	-0.032 99	0.042 22	-0.038 30	0.068 10
塑性应变峰值	-0.013 64	0.021 16	-0.027 78	0.037 48	-0.034 28	0.064 65
弹性应变峰值	-0.004 49	0.004 41	-0.005 21	0.004 74	-0.004 02	0.003 45
回弹角度/(°)	3.71		4.14		2.81	
弹性应变/塑性应变(%)	32.9	20.8	18.8	12.7	11.7	5.3
回弹角度/成形角度(%)	37.1		20.7		9.4	

3.3 多道次辊弯成形对回弹的影响

图 17 为成形角度为 30°时，道次数变化对回弹量的影响。成形角度分配为直接成形 30°、5°→30°、5°→10°→30°。

图 17 道次数对回弹角度影响

板材弯角处的弹应变值和回弹角度如表 11、图 18 所示。从表可知，随着道次数增多，弹性应变峰值减小，回弹角度减小，弹、塑性应变的比值与回弹和成形角度的比值比较接近，呈减小趋势。

表 11 弹性应变值峰值与回弹角度

成形角度/(°)	30	5→30	5→10→30
道次数	1	2	3
弹性应变峰值	-0.004 2	-0.003 2	-0.001 4
回弹角度/(°)	2.81	2.21	1.12
弹性应变/塑性应变(%)	11.7	10.8	6.4
回弹角度/成形角度(%)	9.4	7.3	3.7

图 18 不同道次数的弹性应变峰值与回弹角度对比

图 19 为不同道次数，板材弯角处等效塑性应变的历程。从图 19 可以发现，辊弯成形是典型的增量成形工艺，终成形角度相同时，随着道次数的增加，塑性变形量随之提高，弹性变形量的减小，从而使回弹角度减小。

图 19 不同道次数对等效塑性应变影响

3.4 弯角增量对回弹的影响

如图 20 所示，取 2 道次辊弯成形的仿真结果分析弯角增量对回弹的影响，成形角度为 15°→20°、15°→25°、15°→30°时，弯角增量逐渐增大，回弹角度逐渐减小。

图 20 弯角增量对回弹角度影响

板材弯角处的弹性应变值、厚度减薄量及回弹角度如表 12、图 21 所示。从表可知，随着弯角增量的增大，弹性应变峰值减小，弯角处厚度减薄，

材料流动更充分,弹、塑性应变的比值与回弹和成形角度的比值接近,呈减小趋势,回弹角度减小。

表 12 板材应变值随弯角增量变化趋势

成形角度/(°)	20→30	15→30	10→30
弯角增量/(°)	10	15	20
弹性应变峰值	-0.004 12	-0.003 74	-0.003 34
弯角处厚度减薄量/mm	0.043 2	0.041 9	0.039 0
回弹角度/(°)	4.08	3.92	3.13
弹性应变/塑性应变(%)	14.7	13.8	11.3
回弹角度/成形角度(%)	13.6	13.1	10.4

图 21 不同弯角增量的弹性应变峰值、弯角厚度减薄量与回弹角度对比

4 结论

(1) 对于单道次辊弯成形,随着成形角度的增大,回弹角度呈先增大后减小的变化规律,弹性应变峰值与回弹角度的变化规律一致,是决定回弹角度大小的关键因素,也是回弹角度发生变化的成因。板材内侧弹性应变峰值大于外侧,对回弹的影响更加显著。

(2) 对于多道次辊弯成形,通过多次小变形量积累而达到最终变形量,是辊弯成形所特有的工艺特性,随着成形道次数增多,等效塑性应变呈渐进阶梯式增长,成形工件积累的塑性变形量增大,弹性应变峰值下降,弹、塑性应变比值降低,从而使回弹减小。

(3) 随着弯角增量逐渐增大,板材弯角处厚度逐渐减薄,弯角处材料流动得到改善,弹性应变峰值减小,弹、塑性应变比值降低,从而使回弹减小。

参考文献

[1] 韩飞,刘继英,艾正青,等. 辊弯成型技术理论及应用研究现状[J]. 塑性工程学报, 2010, 17(5): 71-78.
HAN Fei, LIU Jiying, AI Zhengqing, et al. State of the art of resrarch on roll forming process[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010, 17(5): 71-78.

[2] TRAUB T, CHEN Xin, GROCHE P. Experimental and numerical investigation of the bending zone in roll forming[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 131-132: 956-970.

[3] BADR O M, ROLFE B, WEISS M. Effect of the forming method on part shape quality in cold roll forming high strength Ti-6Al-4V sheet[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 4(32): 513-521.

[4] WEIBENGA J H, WEISS M, ROLFE B, et al. Product defect compensation by robust optimization of a cold roll forming process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013(213): 978-986.

[5] 韩飞,牛丽丽,王允,等. 超高强钢辊弯成形回弹机理分析及控制研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(2): 131-137.
HAN Fei, NIU Lili, WANG yun, et al. Mechanism analysis and control research on springback of super high strength steel roll forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 54(2): 131-137.

[6] CRUTZEN Y, BOMAN R, PAPELEUX L, et al. Continuous roll forming including in-line welding and post-cut within an ALE formalism[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2018, 143: 11-31.

[7] ABVABI A, ROLFE B, HODGSON P D, et al. The influence of residual stress on a roll forming process[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2015, 101-102: 124-136.

[8] 余海燕,王友. 一种基于 Chaboche 理论的混合硬化模型及其在回弹仿真中的应用[J]. 机械工程学报, 2015, 51(16): 127-134.
YU Haiyan, WANG You. A combined hardening model based on Chaboche theory and its application in the springback simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(16): 127-134.

[9] YU Haiyan. Variation of elastic modulus during plastic deformation and its influence on springback[J]. Materials & Design, 2009, 3(30): 846-850.

[10] LIU Xiaoli, CAO Jianguo, CHAI Xueting, et al. Investigation of forming parameters on springback for ultra high strength steel considering Young's modulus variation in cold roll forming[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 29: 289-297.

[11] 刘晓立,曹建国,柴雪婷,等. 变弹性模量对高强钢辊弯成型回弹预测的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报 2018, 7(50): 1-7.
LIU Xiaoli, CAO Jianguo, CHAI Xueting, et al. Effect of variable elastic modulus on springback prediction of high strength steel roll forming[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 29: 289-297.

[12] HAN Fei, AI Zhengqing, LIU Jiying, et al. Robust

- Optimization design of ultra high strength steel roll forming based on response surface method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 20-23: 1416-1422.
- [13] ZENG Guo. Optimization design of roll profiles for cold roll forming based on response surface method[J]. Materials and Design, 2009(30): 1930-1938.
- [14] PANTHI S K, RAMAKRISHNAN N, AHMED M, et al. Finite element analysis of sheet metal bending process to predict the springback[J]. Materials & Design, 2010, 31(2): 657-662.
-
- 作者简介: 韩飞(通信作者), 男, 1977 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为辊弯成形工艺及装备。
E-mail: hanfei@ncut.edu.cn
- 李荣健, 男, 1989 年出生。主要研究方向为辊弯成形工艺及装备。