

# 非对称截面辊弯成形扭曲有限元分析

李 冲, 韩 飞

(北方工业大学 机械与材料工程学院, 北京 100144)

**摘要:** 由于非对称截面的立边长度不同, 辊弯成形过程中易出现扭曲缺陷。采用实验及有限元模拟相结合的方法, 对非对称截面的辊弯成形进行研究。建立了超高强钢辊弯成形的有限元仿真模型, 提出了通过倾斜前置轧辊来减轻 V 型非对称截面扭曲缺陷的方法, 对前置轧辊倾斜角度的计算方法进行了探讨。结果表明: 对于 V 型非对称截面的辊弯成形, 倾斜前置轧辊改变了板材进入成形轧辊的状态, 前置轧辊的倾斜角度  $\varphi = 8.9^\circ$ , 扭曲角度减少 40.9%, 变形区纵向应变的峰值明显降低, 且应变变量减小; 两侧立边所受的弯矩差值是引起扭曲缺陷的重要因素, 倾斜前置轧辊使得板材两侧立边所受弯矩差值的大小和方向发生变化, 合弯矩从  $0.18 \text{ N} \cdot \text{m}$  变为  $17.60 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 方向从转向短立边变为转向长立边, 从而一定程度上抑制了扭曲缺陷。

**关键词:** 辊弯成形; 非对称截面; 扭曲缺陷; 前置轧辊; 倾斜角度; 扭曲角度

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.01.008

**中图分类号:** TH16      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2023) 01-0066-06

## Finite element analysis on twist defect in roll forming of asymmetric section

Li Chong, Han Fei

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

**Abstract:** The vertical edge length of asymmetrical section is different, and twist defect is easy to occur during the roll forming process. Therefore, the roll forming of asymmetric section was studied by combining the experiment and finite element simulation, and a finite element simulation model of ultra-high-strength steel roll forming was established. Then, a method of reducing the twist defect of V-shaped asymmetric section by tilting front roller was proposed, and the calculation method of tilt angle for front roller was discussed. The results show that for the roll forming of V-shaped asymmetrical section, the tilting front roller changes the state of the sheet entering the roller, the tilt angle of front roller is  $\varphi = 8.9^\circ$ , the twist angle reduces by 40.9%, the peak value of longitudinal strain in the deformation zone significantly reduces, and the strain amount decreases. In addition, the bending moment difference on both sides of vertical edges is an important factor causing twist defect, and the tilting front roller causes the magnitude and direction of the bending moment difference on both sides of vertical edges for sheet to change. The resultant bending moment changes from  $0.18 \text{ N} \cdot \text{m}$  to  $17.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ , and the direction changes from turning to the short vertical edge to turning to the long vertical edge, thus suppressing the twist defect to a certain extent.

**Key words:** roll forming; asymmetric section; twist defect; front roller; tilt angle; twist angle

辊弯成形 (Roll Forming, 又称冷弯成形) 是一种

高效、节能、节材的板材金属成形“绿色”工艺技术, 其工作原理如图 1 所示, 通过顺序配置的多道次成形轧辊, 将卷材、带材等金属板带逐渐地进行横向弯曲, 以制成特定断面的型材<sup>[1-2]</sup>。

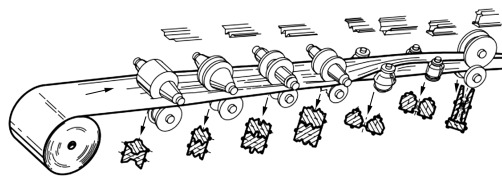


图 1 辊弯成形基本原理

Fig. 1 Basic principle of roll forming

收稿日期: 2022-04-07; 修订日期: 2022-07-28

基金项目: 北京市自然科学基金-市教委联合资助项目 (KZ201910009011); 北京市属高校高水平教师队伍培养计划 (CIT&TCD20190306); 北京市教委基本科研业务费项目 (110052972027/024); 北方工业大学毓杰团队支持计划 (107051360021XN083/001); 国家自然科学基金资助项目 (51074204)

作者简介: 李 冲 (1988-), 男, 硕士

E-mail: lichong@mail.ncut.edu.cn

通信作者: 韩 飞 (1977-), 男, 博士, 教授

E-mail: hanfei@ncut.edu.cn

板带在辊弯成形加工时,非对称截面产品的立边长度不一致会引起受力不对称,这种受力不对称易引起扭曲缺陷的发生。扭曲缺陷对产品的质量存在不良影响,因此,减少扭曲缺陷对于非对称截面的辊弯成形加工非常重要。

张乐乐等<sup>[3]</sup>基于U、L法的弹塑性大变形样条有限元方法的理论基础,建立了体现辊弯成形特点的流动模型,并引入计算机图像处理手段,实现了基于OOP的辊弯成形可视化模拟,并对非对称截面辊弯成形进行了研究。工业上也常通过添加调整垫片的方法来调整轧辊的横向位置,即通过轧辊的偏移来减轻非对称截面在辊弯成形时的扭曲缺陷<sup>[4]</sup>。Cha W G等<sup>[5]</sup>基于弹塑性有限元方法,模拟非对称截面的辊弯成形过程,将增强拉格朗日技术应用于接触算法和预先确定的变形区域划分方法,以提高计算效率,并通过对3道次辊弯成形的简化横截面进行实验,测量成形后出现的扭曲和弯曲量,验证了模型的精度。随后,Cha W G等<sup>[6]</sup>借助该模型,对低碳钢和高强度钢的辊弯成形进行了研究,发现高强度钢产品比低碳钢产品表现出更多的扭曲和弯曲程度,并提出了一种通过沿厚度方向压缩网以减少缺陷的方法。经过验证,该方法可以显著地减少辊弯成形产品的扭曲和弯曲缺陷。Kasaei M M等<sup>[7]</sup>通过有限元分析研究了非对称截面中的扭曲和纵向弓形缺陷,研究了包括带材厚度、腹板宽度和翼缘宽度在内的几何特性对上述缺陷的影响,结果表明,扭曲缺陷随着翼缘宽度的增加而增加。

袁浩等<sup>[8]</sup>针对螺旋式钢板仓非对称截面钢板的成形工艺特点,基于显示动力学并结合工程实际,建立了两个成形阶段的有限元模型,并验证了该模型的精度。钱志平等<sup>[9]</sup>使用有限元分析对非对称截面的拉弯变形进行了研究,用塑性工程解析法推导了平面拉弯时的法向附加弯矩公式。

郭湘宇等<sup>[10]</sup>研究发现,在设计不对称截面辊花时,长立边弯曲角度可按经验确定,短立边弯曲角度需要依据长短立边长度比和长立边弯曲角度确定,这样设计可有效避免截面在辊弯成形时发生扭曲等缺陷。在实际辊弯成形不对称截面时,轧辊按上述结果进行设计,并运用于实际生产,取得了良好效果。Meng Z等<sup>[11]</sup>为实现辊弯成形过程中边缘缺陷的快速预测,提出了一种基于齿条平均纵向应变的新分析方法,并验证了该方法的合理性。通过这种方法,可以快速预测辊弯成形效果,并确定较大纵向应变发生的位置。Wang Y等<sup>[12]</sup>针对Z形钢在辊

弯成形过程中经常出现的扭转缺陷,提出最小扭转优化的成形方法,得到最佳抗扭角为 $32^\circ$ 。

在辊弯成形工艺中,校正扭曲的传统方法多为后处理,即在成形完成后进行反向扭转校正<sup>[4]</sup>。但是,受加工硬化效应等因素的影响,后处理存在一些不足之处。针对非对称截面辊弯成形时的扭曲缺陷进行探讨,如图2所示,建立了有限元模型,提出一种前处理工艺方法,通过引入首道次倾斜轧辊来减小非对称截面在辊弯成形加工时的扭曲缺陷。

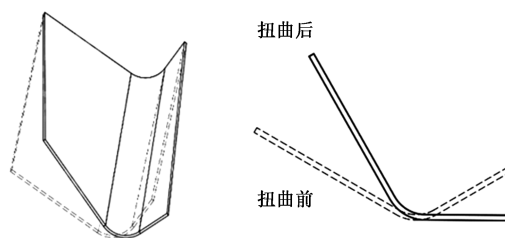


图2 非对称截面辊弯成形的扭曲缺陷  
Fig. 2 Twist defect of roll forming for asymmetric section

## 1 有限元模型建立

### 1.1 有限元模型

使用ABAQUS软件的动态显式算法,建立仿真模型。板带的长度为900 mm,宽度为54.5 mm,厚度为1 mm。采用S4R壳单元进行建模,厚度方向5个积分点。板带纵向划分900个单元,横向变形区网格进行细化处理。建立了由两个机架组成的辊弯成形计算模型。第1个机架用于将带材导入第2个机架,第2个机架将带材成形至 $30^\circ$ ,两个机架轧辊之间的间距为250 mm,如图3所示。

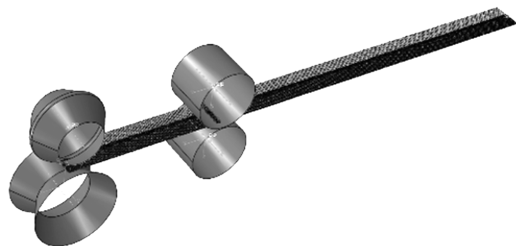


图3 两道次辊弯成形有限元模型  
Fig. 3 Finite element model of roll forming with two passes

### 1.2 实验材料

研究使用的材料为淬火延性钢,牌号为Q&P980,具有韧性好、强度高的特点,是新一代的汽车用超高强钢。材料参数通过单轴拉伸实验获得,使用Instron5982型拉伸实验机对材料进行单轴拉伸

实验, 应变计使用德国 Gom 公司的 Digital Image Correlation。拉伸试件尺寸参考 GB/T 228.1—2021<sup>[13]</sup>。性能见图 4 及表 1, 化学成分见表 2。

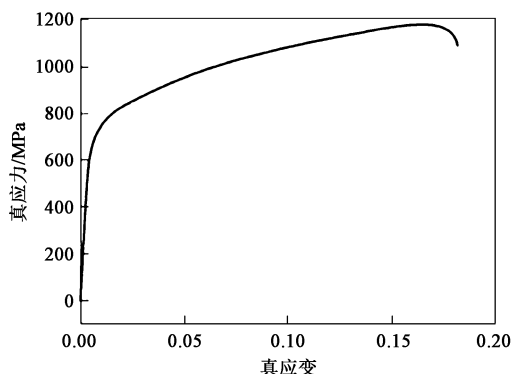


图 4 材料真应力-真应变曲线

Fig. 4 True stress-true strain curve of material

表 1 Q&P980 钢的材料性能

Table 1 Material properties of Q&P980 steel

参数	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	硬化系数
数值	210	0.3	730	1200	1670

表 2 Q&P980 钢的化学成分 (%, 质量分数)

Table 2 Chemical compositions of Q&P980 steel  
(%, mass fraction)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Fe
0.208	1.386	1.876	0.008	0.002	0.036	余量

### 1.3 截面几何尺寸

研究对象为 V 型非对称截面, 截面的几何形状及尺寸如图 5 及表 3 所示。其中,  $\alpha$  为成形角度,  $b$  为长立边长度,  $c$  为短立边长度,  $R$  为弯曲半径,  $t$  为板厚。

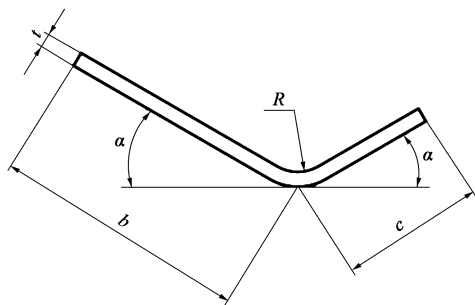


图 5 非对称截面几何形状

Fig. 5 Geometrical shape of asymmetric section

表 3 非对称截面尺寸

Table 3 Asymmetric section sizes

参数	$b/\text{mm}$	$c/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$\alpha/(\circ)$	$R/\text{mm}$
数值	34.5	20	1	30	6.6

## 2 有限元模型验证

### 2.1 实验平台

实验平台使用北方工业大学高精度辊弯成形机组, 如图 6 所示。机组采用下轴驱动, 轧辊与机架的几何尺寸与有限元模型相同, 并增加了成形角度为  $10^\circ$  及  $20^\circ$  的成形模型验证实验。实验使用的板带的宽度为 54.5 mm、长度为 900 mm、板厚为 1 mm, 具有对称截面。



图 6 辊弯实验机

Fig. 6 Roll forming experimental machine

### 2.2 有限元结果验证

使用对称截面, 前置轧辊水平设置进行实验, 分别对板带进行成形角度为  $10^\circ$ 、 $20^\circ$  和  $30^\circ$  的单次对称截面辊弯成形实验, 使用 Profile360 激光测量设备对成形角度进行测量。成形角度为  $30^\circ$  时, 仿真模型与实验截面对比如图 7 所示, 二者的重合度较好。

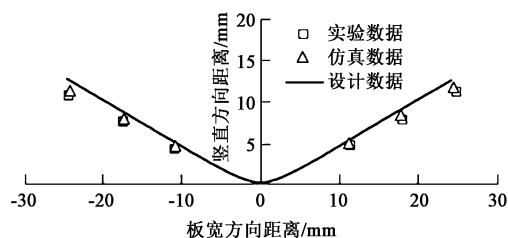


图 7 有限元模型仿真与实验截面对比

Fig. 7 Comparison of finite element model simulation and experimental section

## 3 倾斜前置轧辊设计

Yaser T 等<sup>[14]</sup>认为, 非对称截面辊弯成形时, 长立边边缘在短立边边缘接触到轧辊之前先接触到轧辊。因此, 长立边先受到轧辊的接触力, 短立边后受到轧辊的接触力。这种轧辊对立边的不对称施力会产生扭曲转矩, 从而导致长立边向短立边的扭曲缺陷。

为避免长短立边不同时受力的状况出现,如图8所示,将前置轧辊向立边较短的方向倾斜一个角度,使板带在进入轧辊前倾斜一个角度 $\varphi$ ,长短两个立边边缘同时接触轧辊。

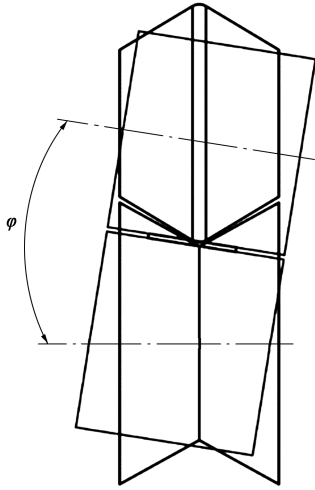


图8 前置轧辊倾斜

Fig. 8 Tilting of front roller

使板带在前置轧辊的引导下发生倾斜,板带在进入成形辊时长短立边与轧辊同时发生接触的近似几何关系如图9所示。其中, $L$ 为板带宽度, $L_1$ 为弯角中心理论偏移量, $\varphi$ 为倾斜角度, $y_1$ 和 $y_2$ 分别为长、短立边与轧辊理论接触点的高度。

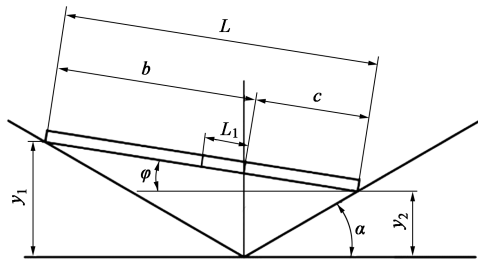


图9 板带倾斜角度几何关系

Fig. 9 Geometrical relationship of tilt angle for strip

近似几何关系可表示为:

$$y_2/\tan\alpha = (L/2 - L_1)\cos\varphi \quad (1)$$

$$L\cos\varphi = y_1\cos\alpha + y_2\cos\alpha \quad (2)$$

$$y_1 - y_2 = L\sin\varphi \quad (3)$$

$$b + c = L \quad (4)$$

$$b - c = 2L_1 \quad (5)$$

由式(1)、式(2)、式(3)、式(4)和式(5)可得:

$$\varphi = \tan^{-1} \left[ \frac{b + c - (b - c)\sin\alpha}{(b + c)\cos\alpha} \right] \quad (6)$$

前置轧辊倾斜角度可用式(6)计算。

### 3.1 测量基准

在有限元模拟中,所有有限元测量均是在板带与轧辊接触时进行的。取截面角度的中心线为参考,截面的角度平分线与竖直线夹角为截面扭曲角度,如图10所示。

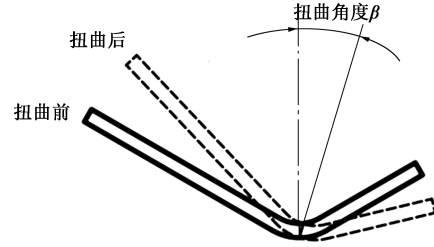


图10 扭曲测量基准

Fig. 10 Measurement standard of twist

### 3.2 扭曲角度对比

图11为前置轧辊水平和倾斜两种情况下,扭曲角度随着距成形辊辊缝中心距离的变化曲线。前置轧辊水平时,扭曲角度从 $0^\circ$ 增加至 $12.7^\circ$ ;前置轧辊倾斜角度 $\varphi=8.9^\circ$ 时,扭转角度从 $0^\circ$ 增加至 $7.5^\circ$ ,扭曲方向相同。

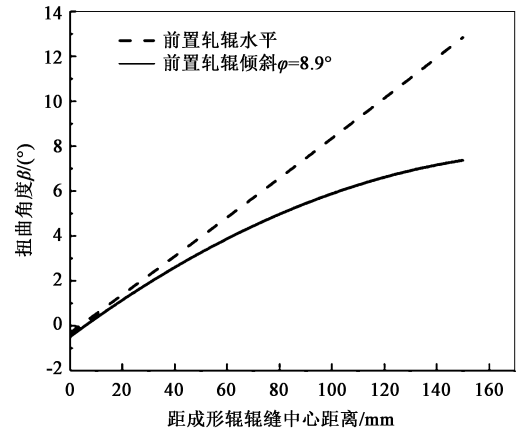


图11 前置轧辊水平和倾斜时的扭曲角度对比

Fig. 11 Contrast of twist angles between level and tilted front rollers

对比发现,前置轧辊水平时,扭曲角度随距成形辊辊缝中心距离的增加呈线性变化;前置轧辊倾斜角度 $\varphi=8.9^\circ$ 时,扭曲角度随距成形辊辊缝中心距离的增加而增加的趋势放缓。总体而言,扭曲角度减小了40.9%。

图12为 $\varphi$ 取不同值时,扭曲角度 $\beta$ 的变化规律。前置轧辊倾斜角度 $\varphi$ 越大,扭曲程度越小。但是,当前置轧辊倾斜角度超过 $11^\circ$ 时,成形质量会逐渐下降,边波等成形缺陷逐渐增多, $\varphi$ 取值在 $6^\circ\sim 9^\circ$ 之间时,可以保证比较稳定的成果。

在图13中, $\Phi$ 为设计成形角度, $\theta$ 为实际成形



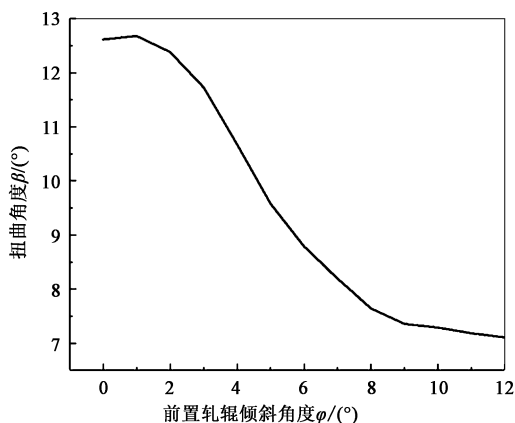
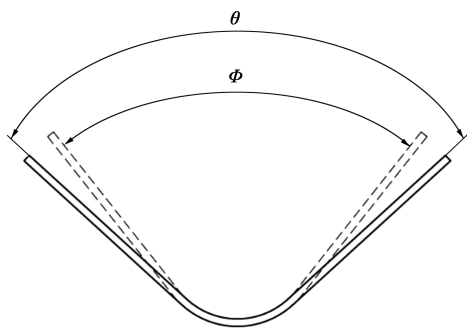
图 12 扭曲角度  $\beta$  随  $\varphi$  的变化规律Fig. 12 Variation law of twist angle  $\beta$  with  $\varphi$ 

图 13 设计成形角度与实际成形角度示意图

Fig. 13 Schematic diagram of designed and actual forming angles

角度。

表 4 为前置轧辊水平和倾斜两种情况下实际成形角度的对比,在距成形辊缝缝中心距离为 150 mm 处进行测量。测量结果显示,在前置轧辊倾斜角度  $\varphi=8.9^\circ$  时,实际成形角度的差异并不显著。可见,当前置轧辊倾斜时,并不影响成形质量。

表 4 实际成形角度对比 (°)

Table 4 Comparison of actual forming angles (°)

前置轧辊	水平	倾斜 ( $\varphi=8.9^\circ$ )
成形角度	127.1	126.4

在前置轧辊适当倾斜的情况下,能够有效地降低非对称截面的扭曲程度,为后续通过工艺手段更好地消除扭曲缺陷降低了难度。

### 3.3 纵向应变对比

V 型截面变形区的中心纵向应变对比如图 14 所示。纵向应变趋势保持一致,但是前置轧辊倾斜时,在辊缝中心位置处纵向应变幅值显著降低。这使得前置轧辊倾斜时,截面变形区的纵向应变减少,在一定程度上改善了板材辊弯成形时变形区的受力状况。

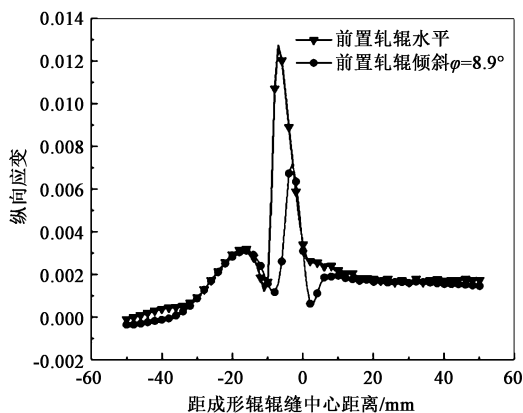


图 14 变形区纵向应变对比

Fig. 14 Comparison of longitudinal strains in deformation zone

成形方向上,距成形辊缝缝中心距离 150 mm 范围内,长短立边底部纵向应变对比如图 15 所示。前置轧辊倾斜时,立边底部的纵向应变明显减小。这说明当前置轧辊倾斜时,立边上相同位置的纵向应变也有一定的减小,这也从一定程度上改善了非变形区的受力状况。

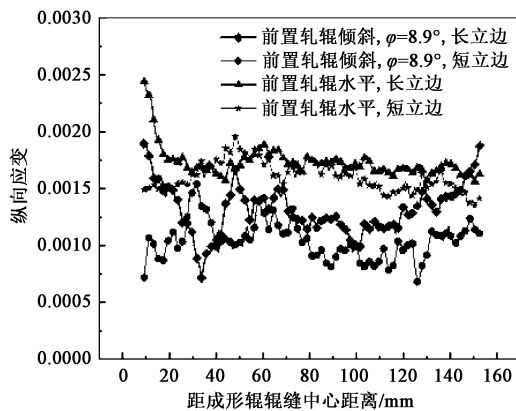


图 15 立边部位纵向应变对比

Fig. 15 Comparison of longitudinal strains in vertical edge

### 3.4 弯矩差值对比

Yaser T 等<sup>[14]</sup>认为,非对称截面在辊弯成形时产生扭曲的原因与长短立边所受成形弯矩的差异有关。V 型非对称截面成形时,两侧立边所受的弯矩差值如图 16 所示。前置轧辊水平时,两侧弯矩差值为  $0.18 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,合弯矩方向与扭曲方向相同。但是,当前置轧辊倾斜时,短立边受到的弯矩比长立边受到的弯矩高  $17.60 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,合弯矩的方向与截面的扭曲方向相反。

长短立边的弯矩差值是造成板材扭曲缺陷的重要原因。当长立边所受弯矩大于短立边所受弯矩时,板材受合弯矩作用,整体向长立边所受弯矩方向扭曲。这也是在实际生产过程中,长短立边差值越大,

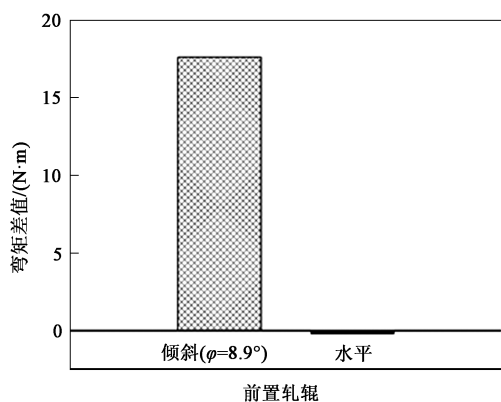


图16 长短立边弯矩差值对比

Fig. 16 Comparison of bending moment difference values for long and short vertical edges

弯矩差值就越大,扭曲越严重的原因。当前置轧辊倾斜时,长短立边所受弯矩出现变化,导致合弯矩的方向与板材扭曲方向相反,对于扭曲的出现起到显著的抑制作用,成形时扭曲缺陷得到明显缓解。因此,对于V型非对称截面而言,改变长短立边的成形弯矩差异是比较有效的方式。

## 4 结论

(1) 长短立边同时接触轧辊时,前置轧辊倾斜角度为 $8.9^\circ$ 的情况下,非对称截面扭曲角度减少了40.9%,且回弹角度无显著变化。

(2) 相对于前置轧辊水平布置,前置轧辊倾斜布置时,板材变形区纵向应变的峰值明显降低,且总体的应变量减小,受力状况得到了明显改善。

(3) 两侧立边所受的弯矩差异是扭曲缺陷产生的重要原因。倾斜前置轧辊使板材两侧立边所受弯矩差值的大小和方向发生了变化,合弯矩从 $0.18 \text{ N} \cdot \text{m}$ 变为 $17.60 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,方向变为与板材扭曲方向相反,对于扭曲趋势有显著的抑制作用,成形时扭曲缺陷得到了明显缓解。

### 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 F, Liu J Y, Ai Z Q, et al. State of the art of research on roll forming process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010, 17(5): 71-78.
- [2] Halmos G T. 刘继英,艾正青,译. 冷弯成型技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.  
Halmos G T. Translated by Liu J Y, Ai Z Q. Roll Forming Handbook [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [3] 张乐乐,谭南林,张华弟,等. 非对称断面型材成型有限元模

拟与可视化研究[J]. 塑性工程学报, 2005, 12(6): 30-33.

Zhang L L, Tan N L, Zhang H D, et al. Research on finite-strip simulation and visualization of profile forming with asymmetric section [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 12(6): 30-33.

- [4] 小奈弘,刘继英. 冷弯成型技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.  
Hiroshi D, Liu J Y. Cold-Bending Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [5] Cha W G, Kim H L, Kim N S. A study on the development of dedicated fea tool for roll forming of asymmetrical U-channel [J]. Advanced Materials Research, 2012, 445: 73-78.
- [6] Cha W G, Kim Naksoo. Study on twisting and bowing of roll formed products made of high strength steel [J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2013, 16(9): 1527-1533.
- [7] Kasaei M M, Naeini H M. 2019 Geometry effects of asymmetrical channel sections on common defects in the roll forming process [J]. Journal of Applied and Computational Mechanics, 2019, 30(2): 1-16.
- [8] 袁浩,周学渊,操文武,等. 基于显式动力学非对称断面辊弯成形数值模拟及实验[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(10): 147-155.  
Yuan H, Zhou X Y, Cao W W, et al. Numerical simulation and experiment of asymmetric section roll forming based on explicit dynamics [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(10): 147-155.
- [9] 钱志平,林建凯,聂凯锋,等. 非对称截面型材平面拉弯成形时法向变形研究[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(7): 176-181.  
Qian Z P, Lin J K, Nie K F, et al. Research on normal deformation in surface stretch bending process of dissymmetric section profile [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(7): 176-181.
- [10] 郭湘宇,周海燕. 不对称角钢辊压成形断面长短边弯曲角度的研究[J]. 锻压技术, 2021, 46(10): 125-130.  
Guo X Y, Zhou H Y. Study on bending angles of long and short sides in rolling section for asymmetric angle steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(10): 125-130.
- [11] Meng Z, Fang Y, Ma L. A method for rapid prediction of edge defects in cold roll forming process [J]. Mathematics, 2021, 9(16): 1-11.
- [12] Wang Y, Xu X, Liu H, et al. Optimization of the forming method on torsion defect in cold-roll forming of Z section steel [J]. ACS omega, 2022, 7(6): 4804-4811.
- [13] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法[S].  
GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [14] Yaser T, Hassan M N, Roohollah A T, et al. A strategy to reduce the twist defect in roll-formed asymmetrical-channel sections [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 130: 395-404.