

基于 LSDYNA 对 U 型梁辊弯成形的仿真与分析

刘忆恒¹, 傅爱军¹, 赵彬荐², 杨晋博¹, 罗文刚¹

(1. 广西科技大学 机械与汽车工程学院, 广西壮族自治区 柳州 545000;

2. 广西大学 机械工程学院, 广西壮族自治区 南宁 530000)

摘要: 为解决高强度、大厚度板材辊弯成形尺寸难以控制的问题, 针对高强钢厚板 U 型梁辊弯成形, 建立了仿真模型并利用非线性有限元软件进行了成形过程仿真。通过引入辗轧道次, 将改变弯角部分的应力分布, 将其与仅单纯过弯道次时的应力分布进行对比。通过不同辗轧距离的仿真结果发现: 当进行辗轧后弯角部分的应力较仅有过弯道次时的应力更小且分布更加离散, 改善了截面缩口问题; 分析了辊站间距对边波缺陷的影响, 辊站间距越大, 边波缺陷越严重。最后通过实验, 将测量的实际加工零件尺寸参数和仿真参数进行对比, 较目标值的误差在 1% 以内, 符合设计生产要求。

关键词: 高强钢; 辊弯成形; 残余应力; 辗轧; 边波缺陷

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.12.006

中图分类号: TG335.4⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 12-0041-08

Simulation and analysis on U-shaped beam roll bending based on LSDYNA

Liu Yiheng¹, Fu Aijun¹, Zhao Binjian², Yang Jinbo¹, Luo Wengang¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545000, China;

2. School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530000, China)

Abstract: To solve the problem of difficult control of roll bending dimension for high-strength and large-thickness plates, for the roll bending of high-strength steel thick plate U-shaped beam, a simulation model was established, and the forming process was simulated by non-linear finite element software. Then, the stress distribution in the corner part was changed by introducing the rolling passes which was compared with the stress distribution of only simple bending pass. The simulation results of different rolling distances show that the stress in the corner part after rolling is smaller and more dispersed than that of only bending pass, which improves the cross-sectional shrinkage problem. By adjusting the spacing between roll stations, the influence on the edge wave defects was summarized. The larger the spacing between roll stations, the more serious the edge wave defects. Finally, through experiments, the measured dimensional parameters of actual processed parts and the simulation parameters were compared. The error compared with the target value is within 1%, which meets the design and production requirements.

Key words: high-strength steel; roll bending; residual stress; rolling; edge wave defect

梁类零件作为典型的基础构件, 于机械行业内被广泛运用。在专用汽车领域中为了满足更高的装载性能需求, 专用车横纵梁件则需要更高的强度才能达到使用要求。在如今汽车轻量化节能减排的大环境趋势下, 适当增加板厚及运用高强度钢成为主要的解决方法。由于梁类零件具有横截面形状不变, 且长度尺寸远大于宽度尺寸的特点, 传统加工方式既无法解

决高强钢的加工问题, 又存在生产线柔性程度低、占用面积大等问题。而通过辊弯成形则能满足高强钢的加工, 同时可改善晶粒组织以提高力学性能, 定长切断即可得到合格的成品, 提高企业的生产效率^[1]。对于专用车横纵梁的高非线性成形过程, 本文采用辊弯成形方法应用有限元软件 Hypermesh 和 LSDYNA 进行模拟分析, 探究不同工艺参数对辗轧过程的影响, 解决了零件缩口、边波等缺陷问题, 为现场生产提供必要的指导, 减少机床的调试成本。

1 零件分析

程学鹏^[2]从不同下料方式影响残余应力的角度

收稿日期: 2023-05-07; 修订日期: 2023-08-13

基金项目: 广西科技重大专项《重型专用汽车轻量化制造关键技术研究与产业化》(桂科 AA22068055-2)

作者简介: 刘忆恒 (1996-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: 511684740@qq.com

通信作者: 傅爱军 (1972-), 男, 硕士, 教授级高工, 硕士生导师

E-mail: 2394523982@qq.com

研究了回弹规律,发现回弹前最大残余应力在弯角处,回弹后最大残余应力在边板处。牛丽丽^[3]验证了实弯能有效增大是弯角区的塑性变形,提出了控制回弹成形的工艺方法,并进行了对比验证。Paralikas J 等^[4]、Bui Q V 等^[5]和 Safdarian R 等^[6]在对辊弯成形的数值模拟研究中发现,成形速度对模拟中成形质量产生的影响很小,在模拟过程中采用动态或准静态的方式均是可行的。Matthias Moneke 等^[7]通过仿真获得冷弯件残余应力分布,通过设置过弯和回弯工序来控制残余应力以减少开口现象。

高强度近年来被广泛用于汽车车身覆盖件和结构件中,可以有效降低整车重量。某公司用于辊弯成形 U 型梁的钢种牌号为 LG700^[8],生产于华菱涟源钢铁公司。产品的屈服强度为 764~781 MPa,抗拉强度为 781~816 MPa,属于高强度钢。产品的截面形状尺寸如图 1 所示,为对称 U 形截面,采用 8 mm 厚板,弯角部分为圆弧过渡,厚度方向的尺寸无变化,达到设计长度尺寸后切断,是最常用的汽车梁结构之一。为满足其使用要求,解决肋板起皱和高强度回弹严重等问题,以实现稳定生产,设计辊弯成形工艺路线为:下料→去应力处理→辊弯成形→整形处理→定长切断。

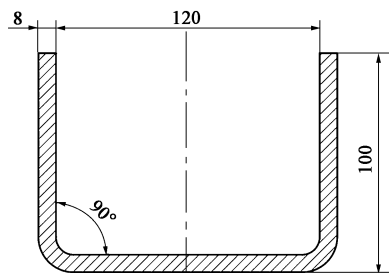


图 1 零件截面尺寸

Fig. 1 Cross-sectional dimensions of part

2 有限元模型建立

2.1 建模过程

为了使仿真更具有实际参考价值,在建立三维模型时,首先对实际辊弯成形生产线进行数据采集,保持三维模型与实际生产模具等的固定参数数据一致,确定总道次为 10。由于前半部分弯曲角度小,所以采用整体式下辊,后半部分采用分立式下辊的目的是节省工作空间。成形辊缝在横向方向上留有足够的加工余量,排除了辊缝长度对腹板尺寸的影响。弯曲角度采用式 (1) 计算得出,最后一道次

设置为过弯工序,过弯角度则用式 (2) 计算得出^[9-10]。

$$\cos\theta_i = 1 + (1 - \cos\theta_0) \left[2 \left(\frac{i}{N} \right)^{3+k} - 3 \left(\frac{i}{N} \right)^{2+k} \right] \quad (1)$$

式中: θ_0 为目标成形角; θ_i 为第 i 道次的弯曲角度, $i=1, 2, 3, \dots, N$; N 为总道次数; k 为变动指数。

$$\theta_{\text{opt}} = \left(0.13 \times \frac{H}{t} + 92.4 \right) \pm 0.5 \quad (2)$$

式中: θ_{opt} 为过弯角度; H 为边腿高度; t 为板厚。

利用 UG 参照以上参数进行三维模型建立,辊组间距为 1 m,板料尺寸为 310 mm×1800 mm×8 mm,可保证板料辊弯成形过程中有两个辊组同时工作,以保持板料的稳定和变形顺畅。将模型导入 Hypermesh 进行网格划分,辊子采用面网格且对于弯角、辗轧受力处进行网格细化、加密,将模型与板无接触的多余部分简化,且将辊子模具设定为刚体,整体采用面网格划分,以节约计算成本。

2.2 模型优化

采用以上方法进行建模,当 k 取 0 时,由式 (1) 计算得出各道次的弯曲角,出现板不啮合而卡顿的现象,由面网格构建的板料出现了夸张的回弹变形现象,不符合实际。分析原因为传统的辊弯成形对象的板厚一般为 0.2~2 mm,当使用 8 mm 厚板时,面网格厚度方向的受力影响过大,所以,使用体网格代替面网格,并尝试不同层数体网格划分,板料又在第 6 道次立辊处出现了板料撞击和无法咬入的情况,观察后发现是由于板料与立辊接触不平滑,无法产生足够的摩擦力使板料咬合,所以,应该增加接触面积,即有效接触弧长^[11]。

最终 k 取 0.1,再根据实际模具尺寸修正得到优化后的弯曲角度。考虑板厚和高强度钢材料综合特性,过弯角度需要适量降低,优化前后的工艺参数和模型如表 1、图 2 所示。板料采用 3 层边长为 5 mm 的正方形体网格划分。面网格数为 70957,板料体网格数为 7560。板料设为弹塑性变形体,轧辊设为刚体。由式 (3) 可以看出,板料与辊子的有效接触弧长与辊子半径成正比,因此,将立辊最小

表 1 弯曲角工艺参数 (°)

Table 1 Process parameters of bending angle (°)

道次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
弯曲角度	14	27	39	50	60	70	78	84	88	93
优化角度	10	22	30	45	60	70	78	85	89	92



图 2 辊弯组模型搭建

Fig. 2 Construction of roll bending group model

半径处统一增加 20~30 mm, 使得最小半径大于 50 mm, 增大有效接触弧长, 从而增加接触摩擦力, 使板料顺利咬合。一般认为, 辊弯时厚度方向没有大塑性变形, 但在辊子前后分别由于辊弯角增大和回弹影响导致板料下压, 所以, 板料压下量 Δh 为板料与辊子贴合顶点与贴合底边的高度差, 由材料的刚度和模型尺寸决定。

$$l'_c = \sqrt{R' \Delta h} \quad (3)$$

式中: l'_c 为接触弧长; R' 为修正的辊子的等效半径; Δh 为板料压下量。

2.3 模拟参数选择

板料辊弯成形是高度非线性塑性成形过程, 需要正确设置相关参数, 才能保证计算分析结果的准确。板料采用 -1 号体单元, 辊子限制除 x 向旋转以外的自由度。为了模拟板料进给过程中的张紧状态, 在板料两端设置方向相反的拉力, 同时为了使板料具有初始速度以进入第 1 道次辊弯组, 所以, 两组力的设置应该是正向前进, 拉力在开始时大于反方向的拉力以保证板前进, 此时板依靠与辊子之间的摩擦力和补偿后的正向拉力前进, 多余的正向拉力可以保证辊组咬入板料时不会因为阻力使板前后部的速度不一致而导致起皱和弯曲, 之后减少到和反向拉力持平, 此时仅依靠板料与辊子的摩擦力带动板料前进并继续加工, 与现实加工过程保持一致。

为了简化建模、降低运算成本, 本次模拟中并未使用导向轮, 如果不对板料添加横向位移约束, 会造成板料横向平移, 导致严重的计算误差, 同时, 因为模型穿透板料会在辊缝中上下曲翘, 则需添加竖直方向位移的约束。为了避免对计算精度的影响, 选取无明显应力变化的区域, 如底板中心线位置的少部分网格进行板料宽度方向和厚度方向的位移约束, 本文选择底板底部中心线附近的 3 列单元进行约束。为了缩减运算时间, 将主动辊转速主动上调为 $50 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$, 将质量缩放系数 DT2MS 设置为 -1.0×10^{-7} , 以控制显示步长, 保证计算精度。利用金属拉伸试验, 实际测量工厂所用的 LG700 钢材的

屈服强度为 637.6 MPa, 将塑性应变极限 1.355 输入材料模型, 当应变值达到该值时, 意味着材料破坏、开裂。摩擦因数采用 0.13 且粘性阻尼系数设置为 20, 按照以上设置可以得到稳定的成形过程。

3 仿真结果及分析

3.1 辗轧道次数据分析

对于 LG700 板料成形仿真分析, 采用优化后的工艺参数模型进行仿真分析, 成形过程顺畅、未出现卡顿情况, 板料变形过程平顺, 最终成形为规定的 U 型截面尺寸。图 3 为仿真过程中板料的能量变化, 从图 3 所示曲线的整体情况来看, 由于辊子主动旋转输出能量, 总能量随时间不断提高, 且逐道次变形使板内能增加, 而动能仅在前期存在极少量的增长而后保持稳定。其主要原因为: 完全咬合前, 板料并未受到完整的摩擦力带动其前进, 所以动能略低; 当进入稳定工作状态后动能保持不变, 沙漏能保持低量不变, 证明模型的穿透量小, 整体符合实际加工情况, 验证了仿真的有效性; 且曲线较光滑, 说明板料仿真过程顺畅、无卡顿。

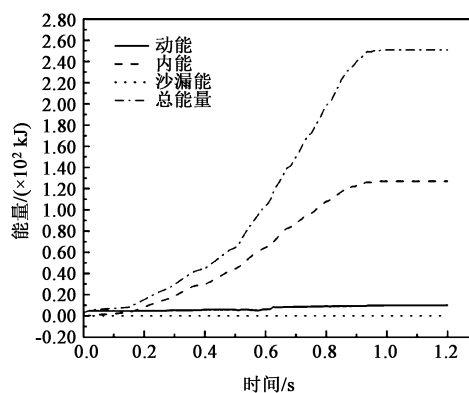


图 3 成形过程能量变化曲线

Fig. 3 Energy variation curves during forming process

高强钢板的回弹问题严重, 所以, 选取对回弹影响最大的弯角部分单元进行研究, 并且在实际生

产过程中发现,成形后梁零件在前端和末端会分别出现一定程度的缩口和扩口现象,当缩口和扩口现象严重时进行切除。综上所述,应选取靠近梁中部的稳定成形的弯角区域进行研究,本文选取 80436~80438 号单元,观察每道次成形过程中应力的变化情况,选同一截面上,两边沿部分的各中心位置处节点 83110、83088,单元与节点位置见图 4 (节点 803110 与节点 83088 关于中心对称轴对称,因此未标出),发现位移变化轨迹高度重合,记录其竖直方向(Z 向)的位移数据,观察是否达到图纸尺寸要求。整个辊弯成形过程中弯角部分的应力如图 5 所示,边沿部分的位如图 6 所示。

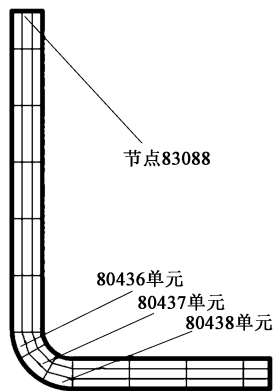


图 4 选取的单元和节点的位置

Fig. 4 Locations of selected elements and points

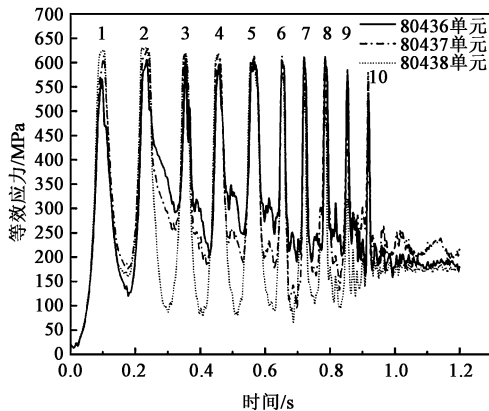


图 5 弯角部分应力变化曲线

Fig. 5 Stress variation curves of bending angle part

由图 5 可知,10 道次变形分别对应其有效应力峰值,其中:1~3 道次由于开始变形时角度增量较大,弯角单元均受到较大变形应力,但由于变形从弯角下部的 80438 单元开始,弯角处单元的应力峰值表现为从靠近底板向靠近边板处降低;辊弯 4~6 道次稳定变形,应力变化峰值差距不大;从第 7 道次开始,由于弯曲角度已经逐渐接近目标值,变形

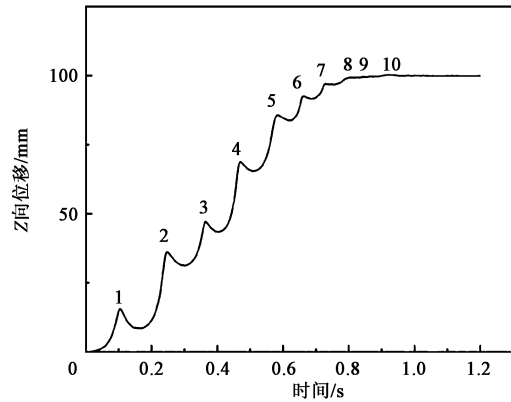


图 6 Z 向位移变化曲线

Fig. 6 Displacement change curve along Z direction

会主要集中于弯角上部靠近边板处,所以,7~9 道次的应力变化表现为 80436 单元的应力最大,80438 单元的应力最低;第 10 道过弯道次时,弯角部分再次整体受力变形,所以应力值均升高。

由图 6 可知,每道次的增量角越大则位移越大,在每道次变形后均出现一段回弹补偿,且前两道次的回弹量最大,之后回弹量逐渐减小,通过过弯道次后,回弹量达到最小且回弹后达到设计尺寸边缘高度尺寸 100 mm,符合实际成形规律。但经过过弯道次后,存在回弹量不如预期,边板轻微缩口等问题。

目前,大多数针对高强钢的回弹问题采用的均是过弯法,即适量增大弯曲角度,回弹后刚好满足目标尺寸的方法,但过弯法也存在板件和模具行程干涉和过弯开裂等问题。所以,针对厚板回弹问题效果更好的辗轧法做进一步研究,辗轧法通过收缩两立辊的横向距离,使其略微小于目标尺寸,板料通过两立辊时能实现辗轧效果,如图 7 所示,其中箭头表示辗轧辊子的移动方向。本文在过弯道次后增添 1 道辗轧道次,并设置不同的辊间距离,与单独的过弯道次相比较,观察辗轧后对弯角处的应力分布的影响以及对实际截面形状的整形作用。

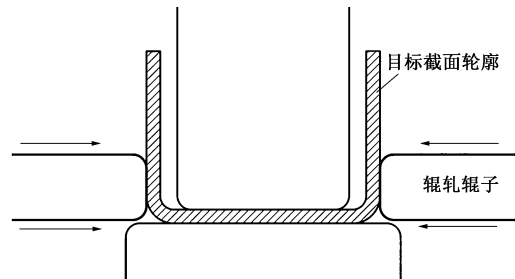


图 7 辗轧道次示意图

Fig. 7 Schematic diagram of rolling pass

仿真试验设计中,以调节两侧辗轧立辊对中距离为变量,单边辗轧辊缝距离增量(以下简称为单边增量)即一侧辊子从理论无辗轧处向中心线靠拢的位移,根据经验将其范围设置为 0~0.5 mm,增量过小则失去研究价值,过大则会造成底板褶皱甚至开裂,设置辗轧辊子时,注意尽量靠近变形弯角处。当增加辗轧道次时,相对于理论尺寸的单边增量分别为 0 (即普通整形道次,但由于板厚略微大于理论尺寸 8 mm,即使增量为 0 时,也具有轻微辗轧作用)、0.15、0.30 和 0.50 mm。为了方便表达计算结果,通过计算平均应力来表示应力的分布,通过计算标准差来表示应力的离散程度,仿真计算结果如图 8~图 10 所示。

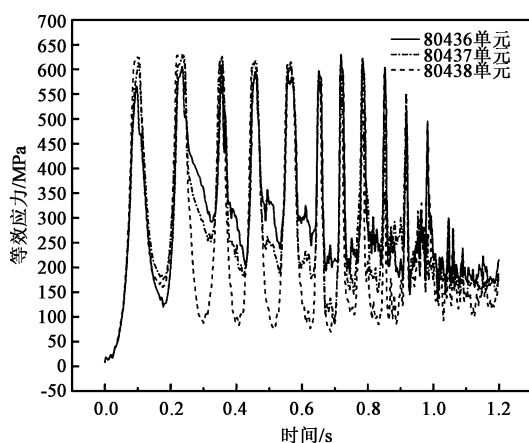


图 8 单边增量为 0.30 mm 时的应力变化曲线

Fig. 8 Stress change curves at one-sided increment of 0.30 mm

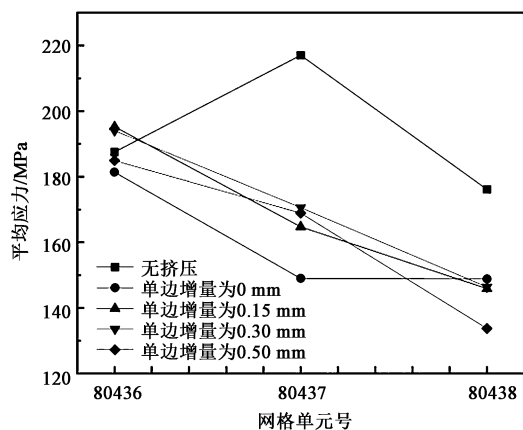


图 9 平均应力值分布

Fig. 9 Average stress value distributions

当仅有过弯道次时,于 1.05 s 完成加工,此时加工件状态稳定,观察得到弯角部分中间 80437 单元的平均应力高于两边 80436 单元和 80438 单元的应力,且平均应力值基本大于通过辗轧道次后的平

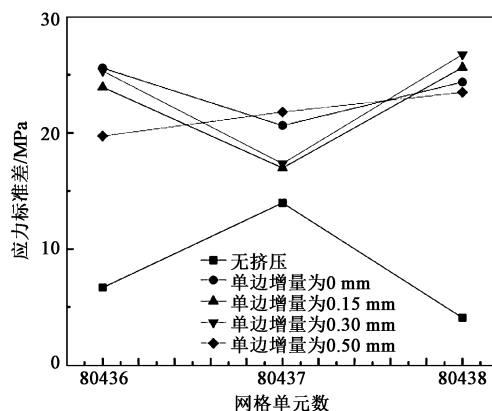


图 10 应力标准差分布

Fig. 10 Standard deviation distributions of stress

均应力;计算得到的标准差较小,即每层应力分布均在以平均值为中心的较窄的范围内分布,说明同一位置的应力较为集中,实际动态应力值靠近均值,不存在明显的应力分散现象。

添加辗轧道次后(以单边增量为 0.3 mm 为例),多出一个对应辗轧道次的应力峰值,待完全完成加工后,残余应力分布较之前单独过弯道次曲线更加紊乱,这说明通过辗轧作用弯角处较为集中的应力被离散化,在同一区域内重新进行分布。通过计算其标准差量化离散程度,可以看出当添加辗轧道次后,离散程度明显增加。通过对比平均应力曲线得出,辗轧后的平均应力值降低,且从 80436 单元向 80438 单元应力总体呈下降趋势;平均应力变化线性程度先随单边增量增加到 0.3 mm 时到达最大,此时单元间的平均应力均匀变化;当单边增量增加到 0.5 mm 时候,离散程度的线性度最好,此时应力的整体离散程度最高。但由于辊缝过小,辗轧作用过大可能会造成板料开裂,由于标准相差不大,所以,综合考虑当单边增量为 0.3 mm 时,有效应力变化最为稳定,对弯角部分的应力改善效果最优。

通过辗轧道次可以改善过弯后的应力分布,但是过于严重地辗轧板料之后会造成其局部起皱,影响加工效果。以单边增量为 0.30 mm 为例,选择底板上的 80440 号单元,随着辊缝增量的增大,通过辗轧道次时,该单元的有效应力相较无挤压工序时激增,且辊缝增量越大峰值越高,完成挤压后的残余应力也较无辗轧时提升明显;并且对比同截面底板端部到底板中部单元(80439 单元和 80440 单元)的应变变化,发现应变曲线高度重合。此举旨在验证本文使用的辗轧道次对零件截面的受力影响,证

明轧制增量的改变并不对零件形状和外形尺寸造成影响,即使用轧制道次对零件进行轧制后,仅改变其应力状态并不影响零件底板的尺寸精度。

经过轧制道次后对比之前截面形状,如图 11 所示。验证了经过轧制后,应力重新分布,因此截面发生轻微变形,较之前得到修正,边板的缩口现象减轻,更加贴合理论截面形状。

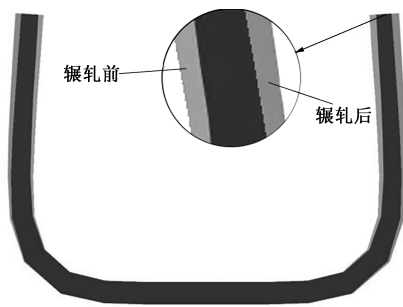


图 11 修正截面对比

Fig. 11 Comparison of corrected sections

3.2 边波问题数据分析

通过边板起皱的分析^[12]可以看到,当板料前端刚通过辊组时,边板部分并未发生塑性应变,这是因为板料完成辊弯加工的长度较短,回弹影响忽略不计。随着板料已加工段长度的增大,边板往弯曲反方向回弹,使板料下压,连带变形中的板的边沿部分在辊上发生塑性变形,边板部分的塑性应变累计形成边波。从图 12 可以看出,变形处在加工时受到正应力而被拉长,脱离加工段后由于弯曲作用,边板边沿受到挤压的负应力。

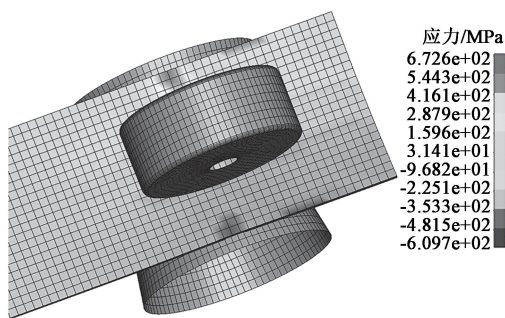


图 12 长度方向的应力云图

Fig. 12 Stress cloud diagram along length direction

所以,为了改善边波问题,应该控制板料经各道次后出现的回弹现象,可通过改变辊站间距。当辊站间距减小时,板料不能充分回弹即进入下一道次,且辊子对板料的支撑长度变短,有效减小了板料下压。使用边板边沿网格单元的有效塑性应变量表示边波缺陷程度。设置辊站间距分别为 1、0.7、

0.5 和 0.3 m。

设置板料中部边沿部分 80178 号单元作为应变观察单元,应变量随辊站间距的变化如图 13 所示。随着辊站间距缩短,有效塑性应变量同步降低,从最大值 0.10645 减小到最小值 0.0436,且辊站间距由 0.5 m 缩短到 0.3 m 时应变差值最大。证明辊站间距越大,板料边波缺陷越明显。

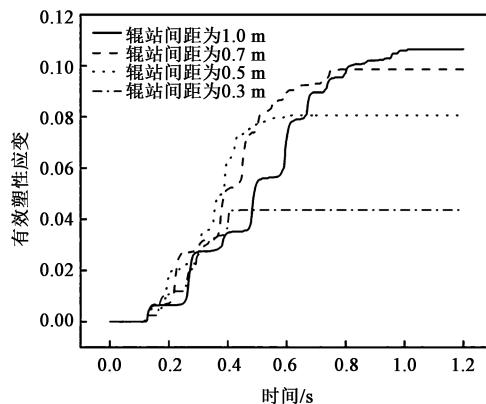


图 13 板料中部边沿应变对比

Fig. 13 Strain comparison at edge in middle part of plate

但是当辊站间距过小时,每道次间的板料没有足够的空间充分变形,易与模具发生干涉等不良接触。例如,当辊站间距缩短到 0.5 m 时,尖端单元的塑性变形激增,继续缩短辊站间距为 0.3 m 时,该单元压溃破坏,从而被删除,如图 14 所示。实际生产中对辊站间距的调整并不灵活,需保障辊站间距不能过小以免模具之间发生干涉,甚至部分辊弯加工线并不能调节辊站间距,当辊站间距无法调节时,可以在辊站间设置导向轮,起到变相调节间距的作用。由图 6 可知,前 3 道次的回弹量最大,则针对此优化调节方案,仅缩短 1~4 道次的辊站间距为 0.3 m,之后道次的辊站间距保持不变,为 1 m,

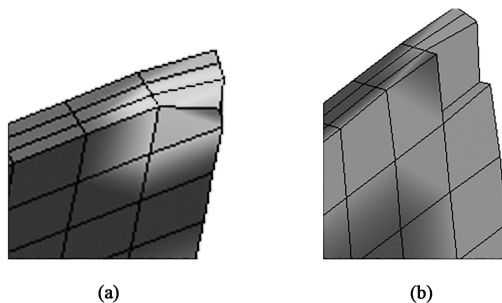


图 14 尖端单元破坏示意图

(a) 辊站间距为 0.5 m (b) 辊站间距为 0.3 m

Fig. 14 Schematic diagrams of failure in tip unit

(a) Distance between rollers of 0.5 m

(b) Distance between rollers of 0.3 m

得到调整后的应变曲线，和均匀的 1.0 m 辊站间距的应变对比，最大应变缩小 16.2%，既减轻了边波缺陷，板料还可充分变形，如图 15 所示。

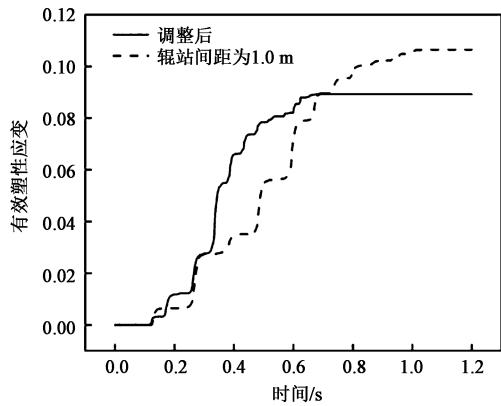


图 15 辊站间距调整后应变曲线
Fig. 15 Strain curves after adjustment of distance between rollers

4 试验验证

柳州某专用车公司拥有 15 m 辊弯成形生产线，根据现场测量，记录实际机床尺寸，用实测尺寸数据进行数字建模，辊站间距为 1.0 m，且无法调节，遂在前 3 道次间设置导向轮，实验数据与建模数据一致，辗轧道次增量为 0.2 mm，U 型梁顺利完成加工，无明显缺陷。对梁中部截面进行数据测量，运用激光测距测角仪，以底板作为测量基准，测量两边板对底板角度，实测图片及机床如图 16 和图 17 所示。

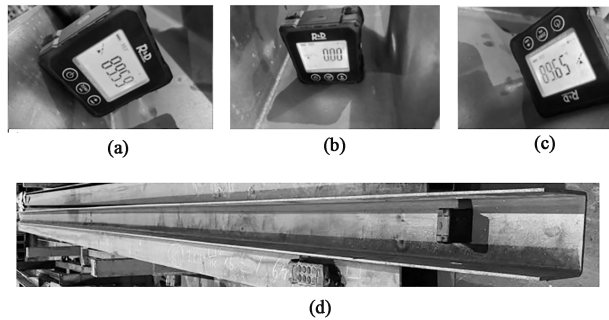


图 16 实际成品展示及测量
(a) 左侧弯角角度 (b) 两边板平行度
(c) 右侧弯角角度 (d) 产品整体展示
Fig. 16 Actual finished product display and measurement
(a) Angle of left corner (b) Parallelism of both side plates
(c) Angle of right corner (d) Overall product display

测试结果与仿真结果对比如表 2 所示，结果显示实测结果与仿真结果相比较目标值的误差均在 1%



图 17 辊弯成形机床
Fig. 17 Roll forming machine

表 2 实测数据与仿真数据对比
Table 2 Comparison between measured and simulation data

尺寸参数	仿真数据	实测数据
左边板角度/(°)	89.89	89.59
右边板角度/(°)	90.02	89.65
左边板高度/mm	99.85	99.75
右边板高度/mm	99.93	99.89

以内。所以，本文建立的辊弯生产仿真模型，具有真实性、有效性，合理的系统仿真模型可以较好地反映该系统的固有特性，为设计提供依据，可减少后期物理样机的试验次数。

5 结论

- (1) 采用非线性有限元仿真软件对辊弯成形模型进行仿真，相同线速度下随着立辊半径增大，有效接触弧长增加，板料的咬合情况越好。
- (2) 对比分析辗轧道次和单独过弯道次对弯角部分应力状态的影响，得出由于辗轧作用应力重新分布，弯角部分应力分布较单独过弯道次时更加离散，从而会引起轻微变形，达到修正截面形状的作用。
- (3) 对于边波问题，观察仿真过程发现边波是由于板料在每道次回弹下压时，造成边缘部分发生塑性应变积累而形成的，辊站间距越大，边波的程度越严重。
- (4) 最终以优化后的工艺设置完成目标零件的加工，零件的质量良好。

参考文献：

[1] 李元齐，徐厚军. 我国冷弯型钢结构发展现状及展望 [J]. 建筑结构, 2019, 49 (19): 91-101.
Li Y Q, Xu H J. Research and development of cold-formed steel structures in China [J]. Building Structure, 2019, 49 (19): 91-101.