

大截面Z型材滚弯成形缺陷的数值模拟及试验研究

王安恒¹,薛红前¹,高鹏飞¹,刘刚²,陈根发²

(1. 西北工业大学机电学院,西安 710072;

2. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司,成都 610092)

[摘要] 以控制大截面Z型材四轴滚弯成形中型材局部起皱、扭曲等质量缺陷为目的,利用 ABAQUS 有限元软件数值模拟大截面Z型材数控四轴滚弯过程,在分析滚弯成形缺陷产生原因的基础上,提出了侧滚轮非对称加载和二次滚弯方式控制成形缺陷的方法。结果表明:二次滚弯方式对起皱缺陷具有较好的改善作用;侧滚轮非对称式加载方式(左侧滚轮高于右侧滚轮),对起皱和扭曲等缺陷具有明显的抑制作用。滚弯试验结果证明,型材滚弯成形的扭曲量相比数值模拟结果误差在 10% 以内。

关键词: 大截面;Z 型材;滚弯成形;质量缺陷;数值模拟

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.07.062



王安恒

博士研究生,主要从事大型飞机框缘类型材滚弯成形过程的仿真分析及变形控制技术研究。

大截面 Z 型框缘类零件是组成飞机骨架的主要受力结构之一,具有尺寸大、截面结构复杂等特点,主要采用滚弯成形工艺进行生产和加工,

该成形方法具有柔性加工特点,经济性较好^[1]。

由于滚弯成形过程影响因素较多,传统试验方法难以确定滚弯工艺参数对成形质量的综合影响,易产生各种误差^[2]。因此,有限元数值模拟方法被认为是对型材滚弯成形回弹和缺陷预测的最有效的方法之一^[3-6]。滚弯回弹变形是板材成形质量控制的主要问题,许多学者^[7-8]通过数值模拟结合试验研究的方法建立了板材滚弯工艺参数与滚弯成形曲率的预测模型,较好地预测了板材滚弯的回弹变形。

相比较板材而言,型材受截面形状尺寸的影响,滚弯成形精度和质量控制难度更大^[9]。近年来,针对型材滚弯成形回弹和精度控制等问题,Leacock 等^[10]、陈高翔等^[6]研究了型材弹塑性弯曲卸载过程中腹板截面的切向应力变化情况,分析了 Z 型材滚弯回弹变形。随后,王杰等^[11]通

过建立大截面 Z 型材滚弯成形过程的三维数值模型,研究了大截面 Z 型材滚弯成形精度。然而,目前的研究工作主要针对滚弯成形过程中的应力应变分析及成形回弹变形分析,研究对象主要是板材或尺寸较小的型材零件^[12-13]。

针对大截面、大尺寸型材零件,在滚弯成形过程中不仅会产生回弹变形,滚弯成形中还会出现局部起皱、沿长度方向扭曲等问题。鉴于此,本文以机身框缘零件采用的大截面 Z 型材为对象,数值模拟分析型材滚弯成形过程,讨论滚弯成形中出现的局部起皱、扭曲等质量缺陷问题,提出滚弯成形缺陷的控制方法,以期精确预测成形缺陷,提高滚弯类零件的成形质量。

滚弯原理及有限元模型

1 大截面Z型材材料试验

本文 Z 型材所用材料为 7475-0

铝合金,拉伸试件几何尺寸如图1所示;试验所得应力-应变及真实应力-应变关系曲线,如图2所示,由此得出大截面Z型材滚弯数值模拟所需材料7475-O的物性参数:弹性模量 E 为71116MPa,泊松比 ν 为0.33,屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 为112MPa, $\sigma_{0.2}$ 对应的应变 $\varepsilon_{0.2}$ 为0.0025,应变刚模量 D 为2116MPa。

2 Z型材滚弯成形基本原理

Z型材滚弯成形工作原理,如图3所示滚弯机工作部分由4个滚轮组成,其中上滚轮为主动轮,主要用于夹持和传送型材。当上下滚弯轮开始旋转时,二者与型材的接触面产生一定的摩擦力,带动型材进行滚弯运动,经过夹持区域,完成弹塑性变形,实现滚弯运动。左右滚轮为弯曲轮,其中右侧滚轮为型材滚弯过程中的入口轮,左侧滚轮为型材滚弯过程中的出口轮,左右弯曲滚轮使得型材在滚弯过程中发生径向弯曲变形,通过设定左、右弯曲滚轮上升位移从而获得不同曲率半径的型材弯曲件。通常将图3中左右滚轮间的型材所经历的弯曲变形,近似为型材动态滚弯过程中的变形。由于右侧滚轮外的型材尚未进入变形阶段,通常被视为直型材;左侧滚轮外的型材已完成滚弯过程,变形结束,最终离开左侧滚轮形成具有一定曲率半径的框缘类零件。

根据弹塑性变形理论,型材在整个滚弯成形过程中分为3部分,即图3中DC区间为滚弯成形的弹性加载阶段,CB区间型材处于塑性加载变形阶段,BA区间为滚弯成形的弹性卸载阶段,决定了型材的最终滚弯质量和曲率大小。

3 Z试验型材

试验型材长度为2500mm,厚度为2mm,截面形状如图4所示。

4 有限元数值模拟

4.1 模型及网格划分

依据图3中机床滚轮运动关系,

两侧弯曲滚轮起始位置在最下方,夹持下滚轮为打开状态,为简化分析过程,本模型将下滚轮夹持型材闭合、两侧弯曲滚轮对称上升到和型材接触的位置作为分析模型的起始位置,型材与滚轮的装配模型如图5所示。图5中型材采用C3D8R八节点线性沙漏控制单元,腹板高度方向和沿缘条长度方向的网格长度均为10mm。滚轮采用R3D4四节点双线性四边形刚体单元,一般刚体的网格以接近但不小于变形体的网格单元大小为宜,可以提高计算速度和减少穿透现

象,因此设置滚轮网格单元大小为11mm。

4.2 边界条件与接触处理

针对整个滚弯过程的分析中,需要设定上下滚轮及左右侧滚轮绕X轴的转动约束,根据图5中设定的坐标系,设定型材成形过程中各部件的约束情况,如表1所示。

在滚弯成形阶段,上滚轮摩擦驱动力的作用下,型材沿长度方向逐渐通过上下轮夹持段(即图3中BC段)完成型材的滚弯成形,因此需对该阶段滚轮与型材之间的摩擦系数及接

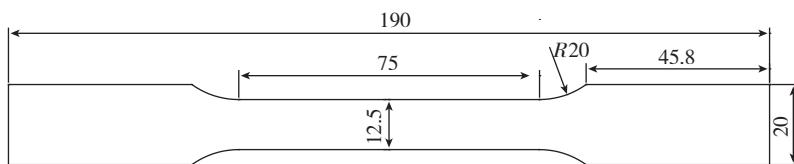


图1 拉伸试件尺寸(单位: mm)
Fig.1 Tensile specimen geometry

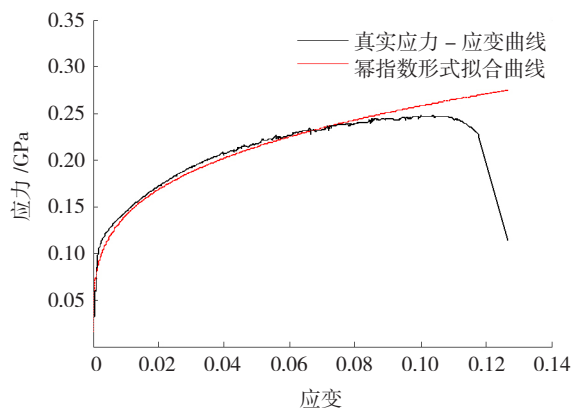


图2 应力-应变关系曲线
Fig.2 Stress-strain curve

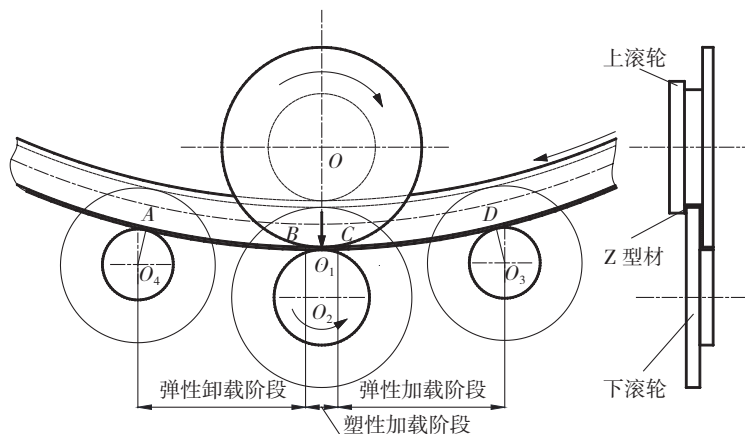


图3 Z型材滚弯成形原理图

Fig.3 Roll-bending process diagram of Z-shaped profiles

触进行定义,接触类型为点面接触,滑移类型为有限滑移,摩擦类型为库伦摩擦,摩擦系数为0.25。

大截面 Z 型材起皱缺陷

1 起皱现象及其原因

在型材的成形过程中,上缘受挤压作用,下缘受拉伸作用,而下缘夹持处所承受的拉伸作用最大。型材拉伸变形区各层的材料如同长度方向受拉,当拉应力随着曲率增大而增大,达到临界应力时,材料由弯矩最大处向弯矩较小的两侧流动,而径向

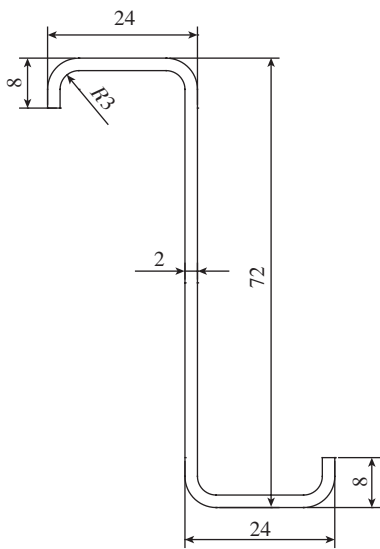


图4 Z型材截面尺寸(单位: mm)
Fig.4 Sectional dimension of Z-shaped profiles

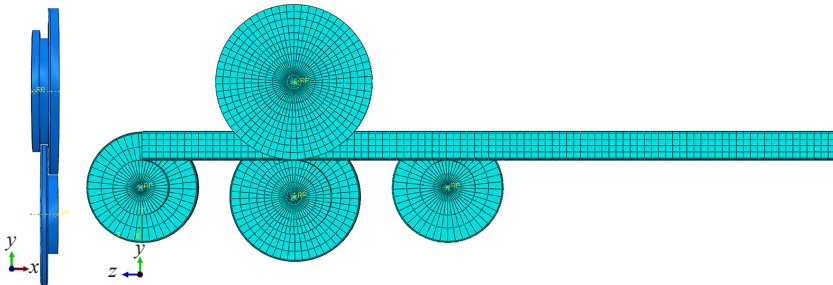


图5 滚弯成形有限元分析模型
Fig.5 Finite element analysis model for roll-bending process

表1 滚弯成形阶段各部件约束情况

约束类型	上滚轮	下滚轮	左侧滚轮	右侧滚轮	型材
移动约束	X, Y, Z	X, Y, Z	X, Y, Z	X, Y, Z	X
转动约束	Y, Z	Y, Z	Y, Z	Y, Z	无

受到夹持滚轮施加的压力,阻止型材材料向左侧流动,随着滚弯的进行,型材逐步向左侧推进,材料在上、下滚轮夹持处的右侧开始失稳堆积,导致型材的下缘板拉伸变形区从边缘开始失稳产生起皱现象,如图6所示。

参照材料 7475-O 的物性参数,设定工艺参数滚轮压力为 20kN、速度为 3.33mm/s、进给量为 100mm,数值计算滚弯成形过程型材下缘板处的应力分布。图7显示型材在上下滚轮夹持滚弯过程中,夹持点(图3中上下滚轮轴心连线上的 O_1 点)右侧的下缘板由弹性阶段向塑性阶段过渡,同时受到上下滚轮施加的较大切向压应力,使得该处应力最大为 270.78MPa。由于左右侧轮的抬升作用,夹持点右侧下缘板仅与上滚轮接触,未受到足够约束,由于面外变形所需能量较小,导致该处下缘板的变形路径向面外分叉,出现塑性失稳而产生局部变形不协调的起皱现象。

2 起皱缺陷的影响分析

针对起皱现象,本文采用以下两种方法对大截面 Z 型材的起皱现象进行分析。

2.1 二次滚弯对起皱的影响分析

实际生产中通常采用二次滚弯成形的方法避免起皱现象的产生,

该方法可有效降低型材在单次成形过程中由于侧滚轮抬升量过大而引起的材料流动剧烈且不均匀的情况。因此,针对已有起皱缺陷的型材,采用二次滚弯继续成形加工,第二次滚弯过程的模拟分析需采用第一次滚弯过程的分析结果,首先需提取第一次成形的 Z 型材模型导入到 ABAQUS /Standard 模块,在新装配的模型中重置相关边界条件和接触,删除原有分析步,新建一个动态通用分析步,进行二次滚弯过程的模拟分析。

针对两次滚弯过程的模拟分析,模型中第 1 次采用的滚弯参数:弯曲滚轮进给量 60mm、压力 20kN、速度 3.33mm/s;第 2 次采用的滚弯参数:弯曲滚轮进给量 40mm、压力 20kN、速度 3.33mm/s。图8给出了工艺参数分别为一次滚弯和二次滚弯的应力对比云图。比较图8(a)、(b)可知二次滚弯成形相对于一次滚弯成形的应力集中情况明显减弱,其原因是由于两次成形过程中,将零件的曲率半径变化量分解成两个较小的量,



图6 Z型材下缘板失稳起皱
Fig.6 Wrinkling of Z-shaped profiles during roll-bending process

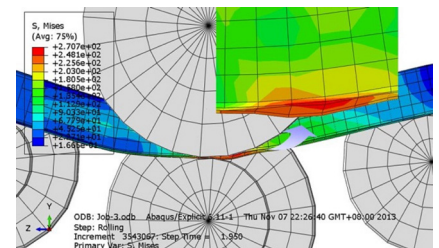


图7 Z型材下缘板失稳起皱模拟结果
Fig.7 Simulation result for wrinkling of Z-shaped profiles

在单次成形过程中,减小了每次滚弯时下缘的应力极值,从而使材料流动比较缓慢、均匀。

图9给出了Z型材等曲率滚弯成形过程中,以型材下缘板底部与右侧滚轮接触点(图3中D点)为零点,型材下缘面沿长度方向的应力分布情况。一次滚弯成形和二次滚弯成形的应力曲线变化均表明:整个滚弯过程中,型材从右侧弯曲滚轮到夹持滚轮弯矩逐渐增大,应力也相应地增大,是一个逐渐加载的过程;从夹持滚轮到左侧弯曲滚轮,型材截面所受弯矩逐渐减小,相应的应力也从大逐渐减小,是一个逐渐卸载的过程。图9中一次滚弯成形和二次滚弯成形的最大应力均出现在上下滚轮夹持处,分别为310MPa和277MPa,应力降低10.6%,卸载的过程中应力降低的比例逐渐增大,该变化趋势表明型材二次滚弯成形相对于一次滚弯成形而言,沿长度方向上的应力水平明显降低。因此,采用二次滚弯工序,通过减少应力集中区和降低应力值可有效避免起皱现象的发生。

2.2 加载方式对起皱的影响分析

上述二次滚弯成形法虽能够有效地避免起皱的发生,但实际生产中,二次装卸型材易导致加工效率降低,产生二次定位误差。以下将通过改变侧滚轮位置的方法,控制一次型材滚弯成形缺陷。型材需按照设计曲率半径进行滚弯成形,实际生产中一般通过调整左右侧轮的位置高度保持曲率半径不变;此外,还需降低型材在上下滚轮夹持处及其右侧受到的最大应力。通过调整左右轮几何关系,在保证型材滚弯成形半径不变及降低最大应力的前提下,本文提出抬高右侧滚轮(左低右高)、抬高左侧滚轮(左高右低)等非对称加载方式下新的型材滚弯成型工艺方案。上述3种加载方式下的工艺参数如表2所示。

图10给出了通过计算左右抬轮的

升降位移,调整左右抬轮的位置,设计滚弯曲率半径为2000mm,按照表2所示工艺参数滚弯成形时,通过改变侧滚轮位置,在对称加载方式与本文提出的新成形工艺加载方式下的应力云图,用以分析控制局部起皱的工艺方案。图10(a)、(b)、(c)分别为抬高右侧滚轮(左低右高)加载方式、对称加载方式、抬高左侧滚轮(左高右低)3种加载方式下,型材的应力变化云图。通过云图的放大部分可以看出上下滚轮夹持处及其右侧的应力集中区域在上述3种加载

方式下依次递减,尤其是抬高左侧滚轮(左高右低)加载方式下的塑性变形区应力水平明显降低。

图11(a)给出了Z型材等曲率滚弯成形过程中,采用起皱分析中相同的零点设置方法,分别在抬高右侧滚轮(左低右高)加载方式、对称加载方式、抬高左侧滚轮(左高右低)等加载方式下,下缘面沿长度方向的应力分布情况,型材下缘板处的应力变化趋势同图9保持基本一致,最大应力分别为314.3MPa、309.1MPa、278.6MPa;然而,由于左右滚轮抬升

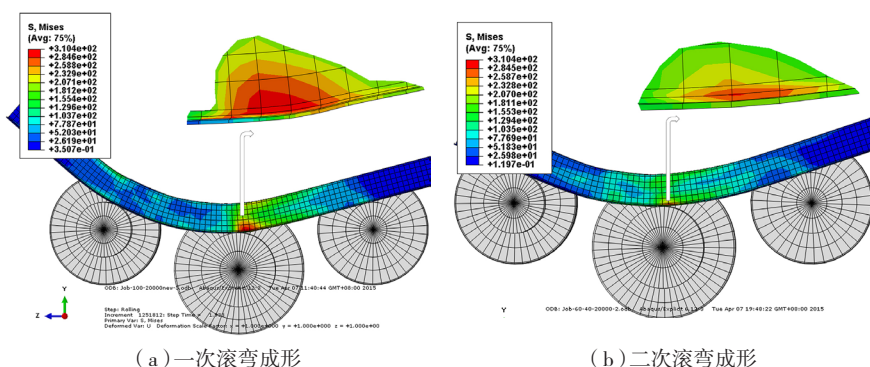


图8 一次和二次滚弯成形应力云图

Fig.8 Stress contour plot of one-pass forming and two-pass forming

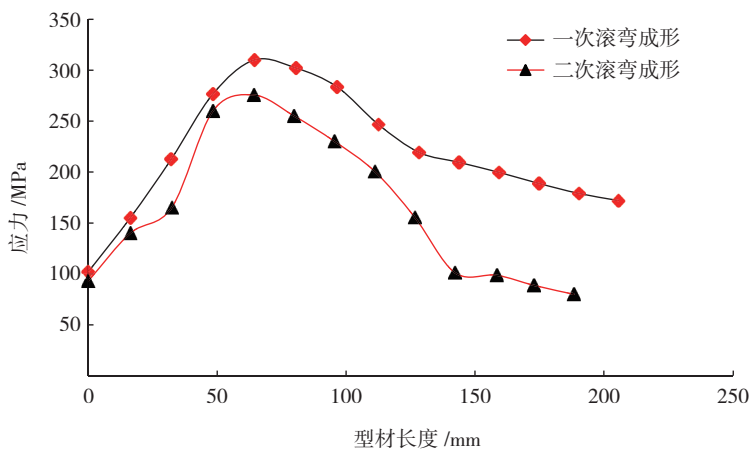


图9 滚弯阶段型材下缘沿长度方向的应力分布

Fig.9 Stress distribution of lower edge plate along the length during roll-bending process

表2 加载方式

试验编号	滚轮进给量(左,右)/mm	进给速 / (mm·s ⁻¹)	滚弯压力 /N
1	100,100(对称式)	3.33	20000
2	100,80(左高右低)	3.33	20000
3	80,100(右高左低)	3.33	20000

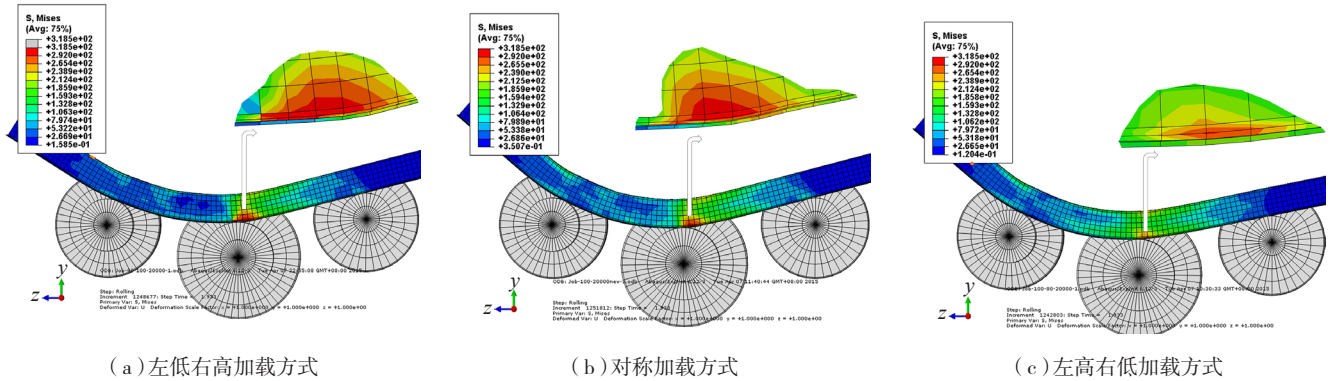


图10 3种加载方式下滚弯成形应力云图

Fig.10 Stress contour plot under three loading mode during roll-bending process

高度不同,使得型材与滚轮之间的位置关系变化,导致最大应力值分别出现在 47.29mm、64.86mm、79.73mm 处。相对于抬高右轮加载方式、对称加载方式而言,采用抬高左轮加载方式的最大应力分别降低了 11.36% 和 9.87%。

图 11 (b) 给出了分别在抬高右侧滚轮(左低右高)加载方式、对称加载方式、抬高左侧滚轮(左高右低)等加载方式下,下缘面沿长度方向的应变分布情况,最大应变分别为 0.181、0.169、0.126;相对于抬高右轮加载方式、对称加载方式而言,采用抬高左轮加载方式的最大应变分别降低了 30.39% 和 25.44%。

由图 11 可知,采用抬高左轮非对称加载方式的应力幅值和应变幅值均明显降低,该加载方式可有效解决滚弯过程中型材局部塑性失稳问题,可以在一定程度上避免起皱现象的发生。

大截面 Z 型材扭曲缺陷

1 扭曲缺陷原因及测量方法

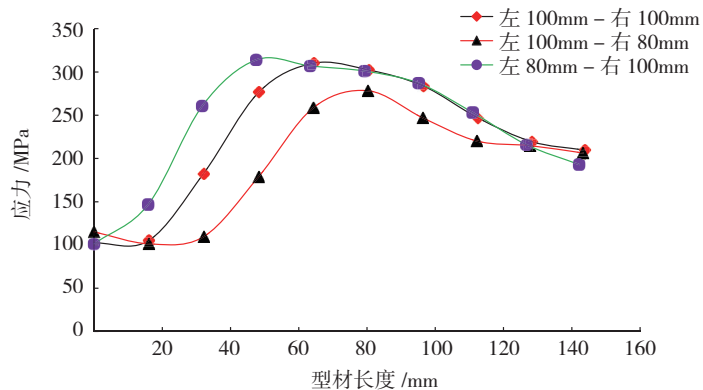
大截面 Z 型材在滚弯过程中,由于截面的不对称性,弯曲滚轮对型材作用力的合力无法作用在型材剖面的任一中心主惯性平面,滚弯成形后,型材长度方向沿 X 轴将产生正负相反的位移,使得型材出现扭曲;在滚弯阶段由于型材腹板与上、下滚轮存在不均匀摩擦力使得型材发生

进一步扭曲。随着型材的扭转,型材上出现了垂直于腹板平面的变形,如图 12 所示。

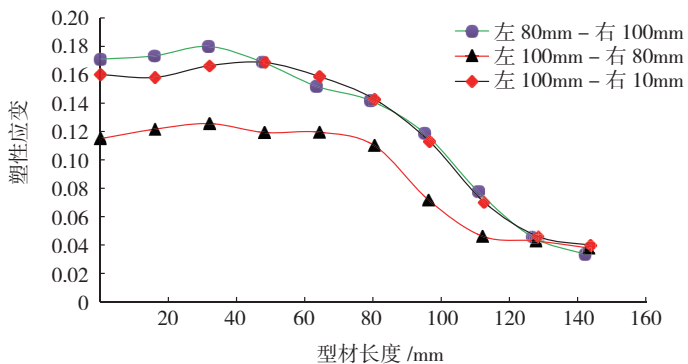
图 13 给出了 Z 型材沿滚弯长度方向扭曲的位移云图,扭曲主要发生在上下滚轮夹持点及其左侧部位。为了直接描述型材滚弯成形后的扭曲量,图 14 给出了 Z 型材沿长度方向扭曲程度的定量分析法,以右侧滚轮轴心线为 X 轴,右侧滚轮片和腹

板之间的接触平面(平行于 YZ 平面)与右侧滚轮轴心线的交叉点设为 O 点,以型材在 X 轴上位移量的大小来衡量型材沿滚弯长度方向上的扭转程度。

为明确非对称加载方式对扭曲现象的影响,同样采用表 2 所示加载方式,数值模拟分析加载方式对型材扭曲变形的影响。由于型材零件长度尺寸较大,成形后难以在整个长度



(a) 应力曲线



(b) 应变曲线

图11 3种加载方式沿滚弯方向的应力应变曲线

Fig.11 Stress and strain curves under three loading mode during roll-bending process

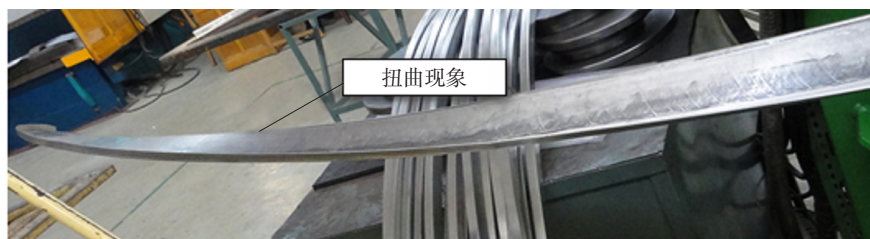


图12 大截面Z型材滚弯成形过程中的扭曲现象

Fig.12 Warping of Z-shaped profiles with large cross-section

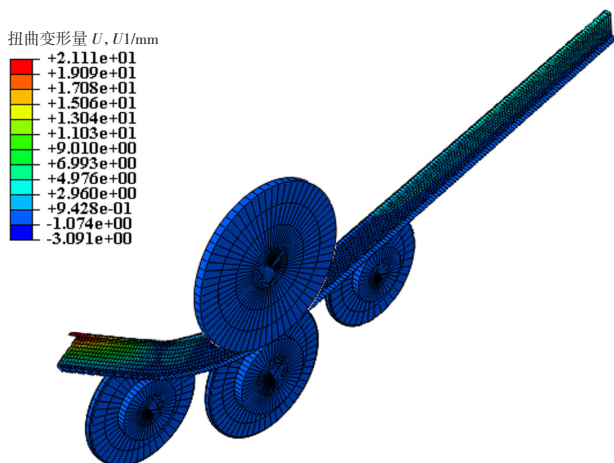


图13 大截面Z型材滚弯成形后沿长度方向的扭曲模拟

Fig.13 Simulation result for warping along the length of Z-shaped profiles after roll-bending process

方向上直观地反映出扭曲量改变,为表达采取措施前后扭曲量的变化,在成形后的型材下缘板的相同位置处选取一条路径,采用图14给出的Z型材沿长度方向扭曲程度的定量分析法,输出X方向变形量。

2 加载方式对扭曲的影响分析

图15中的曲线分别为对称加载方式、抬高右侧滚轮(左低右高)加载方式与抬高左侧滚轮(左高右低)加载方式等3种加载方式下,型材在整个滚弯阶段后的扭曲情况,沿X轴方向上的最大位移量分别为21.14mm、19.17mm、12.24mm。图15中曲线表明相比于对称加载方式,两种非对称加载方式下的扭曲量分别下降了9.32%、42.10%,其原因是由于非对称加载方式使型材在滚弯成形过程中与上滚轮接触面积变大,受到更多的几何约束;在非对称加载方式下,左高右低加载方式的扭曲量

仅为12.24mm,相比于左低右高式加载下的扭曲量下降了36.15%,其原因是左高右低加载方式使得上下轮夹持处左侧型材的已成形部分与滚轮接触面积较大,起到了更加有利于抑制扭曲的约束作用,使得该加载方式下型材的扭曲量最小,因此该加载

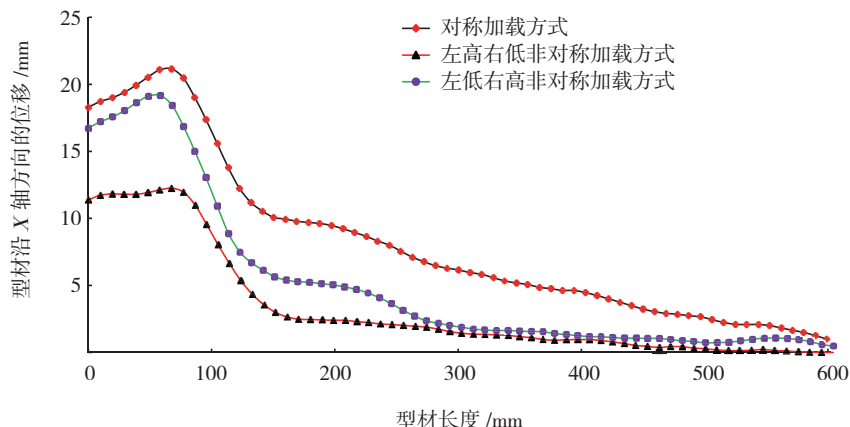


图15 滚弯阶段3种加载方式下沿型材长度方向的扭曲情况

Fig.15 Warping curves along the length under three loading modes during roll-bending process

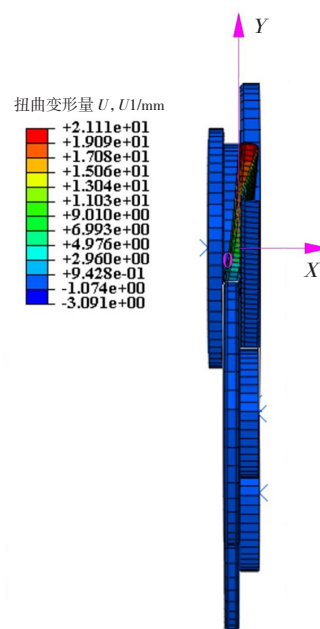


图14 扭曲量计算参考点

Fig.14 Calculating reference point of warping

方式能够有效地抑制大截面Z型材在滚弯过程中的扭曲变形。

3 扭曲缺陷试验验证

针对本文提出的左高右低式非对称加载方式可以在一定程度上减小大截面Z型材沿长度方向的扭曲量,为验证数值分析结果,采用数控四轴型材滚弯机(VPR-SPEC-CNC)进行试验验证。滚弯试验中主滚轮尺寸为220mm、左侧轮抬升100mm、右轮抬升800mm、夹紧力为20kN、摩擦系数为0.25。截取一段长度为

表3 扭曲量模拟计算值与测量值对比

节点编号	模拟计算值 /mm	试验测量值 /mm	误差 /%
1	11.374	10.95	3.73
2	12.121	11.69	3.50
3	9.538	9.15	4.10
4	2.988	2.78	6.90
5	2.234	2.09	6.40
6	1.437	1.36	5.35
7	0.940	0.88	6.38
8	0.329	0.31	5.77

600mm的成形Z型材,采用图14设定的扭曲测量方法进行测量,扭曲试验结果与数值模拟结果进行对比,如表3所示。由表3可知,各节点处有限元计算得到的扭曲量与测量值比较,最大误差为6.9%。从对比结果看:有限元计算误差较小,在可以接受的范围内。因此,有限元分析可以对给定工艺条件下的滚弯型材扭曲量进行有效的预测。

结论

(1)数值模拟了大截面Z型材滚弯成形过程,解释了滚弯成形过程中出现的起皱、扭曲等质量缺陷产生的原因。

(2)二次滚弯成形,有效降低了型材的变形不协调,从而抑制起皱。非对称加载方式可降低夹持点右侧型材下缘板上的应力极值,能够有效控制大曲率型材的局部起皱问题。

(3)非对称加载方式可以适当降低大尺寸Z型材沿长度方向的扭曲,尤其是左高右低式非对称加载方式,通过控制非对称截面内的应力变化梯度,可以有效控制大尺寸Z型材的扭曲变形,该种加载方式下扭曲量的模拟结果与试验结果相一致。

参考文献

[1] HUA M, BAINES K, COLE I M. Continuous four-roll plate bending: a production

process for the manufacture of single seamed tubes of large and medium diameters[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1999, 39(6): 905-935.

[2] 陈鹏,薛红前,王杰,等. Z型材变曲率数控滚弯等圆弧逼近算法与实现[J]. 材料科学与工艺, 2014(1): 68-73.

CHEN Peng, XUE Hongqian, WANG Jie, et al. Uniform-curvature arc approximation algorithm and its implementation of CNC roll-bending for Z-shaped variable curvature profiles[J]. Materials Science & Technology, 2014(1): 68-73.

[3] 李凡. 金属板材滚弯塑性成形的数学模型研究[D]. 上海: 复旦大学, 2002.

LI Fan. Study on mathematical model for roll-bending plastic forming of sheet metal[D]. Shanghai: Fudan University, 2002.

[4] ZENG G, LAI X M, YU Z Q, et al. Numerical simulation and sensitivity analysis of parameters for multistand roll forming of channel section with outer edge[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2009, 16(1): 32-37.

[5] BETTAIEB M B, LEMOINE X, DUCHÊNE L, et al. Simulation of the bending process of hardening metallic sheets using damage model. Part I: Theoretical development and numerical implementation[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 528(1): 434-441.

[6] 陈高翔,王亚锋. 型材滚弯数值模拟及应力、应变分析[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版), 2012(3): 94-96.

CHEN Gaoxiang, WANG Yafeng. Simulation

of profile roll-bending and analysis of stress-strain[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2012(3): 94-96.

[7] AGA J L, GALDOS L, UNCILLA L, et al. Development and validation of a numerical model for sheet metal roll forming[J]. International Journal of Material Forming, 2010, 3(1): 151-154.

[8] FENG Z, CHAMPLIAUD H. Modeling and simulation of asymmetrical three-roll bending process[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2011, 19(9): 1913-1917.

[9] SONG Y, YU Z. Springback prediction in T-section beam bending process using neural networks and finite element method[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2013, 13(2): 229-241.

[10] LEACOCK A G, MCCRACKEN D, BROWN D, et al. Numerical simulation of the four roll bending process[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2012, 27(4): 370-376.

[11] 王杰,薛红前,陈鹏,等. 大截面Z型材数控滚弯成形精度的数值模拟研究[J]. 机械科学与技术, 2015(9): 1467-1471.

WANG Jie, XUE Hongqian, CHEN Peng, et al. Finite element analysis of forming accuracy in roll-bending process for large cross-section Z profile[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015(9): 1467-1471.

[12] 金霞,鲁世红. U型材单轴柔性滚弯成形回弹有限元分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2010(1): 117-121.

JIN Xia, LU Shihong. Springback study of U-section one-axle rotary shaping with elastic pad medium based on finite element analysis[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010(1): 117-121.

[13] 黄世军,陈凌霄,田洪才,等. 型材滚弯回弹影响因素研究[J]. 塑性工程学报, 2017(4): 117-123.

HUANG Shijun, CHEN Lingxiao, TIAN Hongcai, et al. Study on the influential factors of profile roll bending springback[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017(4): 117-123.

通讯作者: 薛红前,博士、教授,研究方向为结构材料疲劳与断裂以及装配与连接技术研究, E-mail: xuedang@nwpu.edu.cn.

Numerical Simulation and Experimental of Forming Defects in Roll-Bending Process for Z-Shaped Profiles With Large Cross-Section

WANG Anheng¹, XUE Hongqian¹, GAO Pengfei¹, LIU Gang², CHEN Genfa²

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

[ABSTRACT] This paper focus on the defects, such as wrinkling and warping, which generated in the process of four-roll bending for aluminum profiles with a large size Z-shaped section. A finite element analysis model for CNC four-axis roll-bending forming process of Z-shaped profile with large section was established by ABAQUS. Based on the analysis of forming defects, asymmetrical loading mode and secondary roll-bending process were presented to control forming defects. The results indicated that the secondary roll-bending could improve forming quality. Asymmetrical loading mode, the left roller was adjusted higher than the right one, which had significant inhibitory function on defects like wrinkling and warping. Experimental results proved that compared with numerical simulation results, the error was within 10%.

Keywords: Large cross-section; Z-shaped profile; Roll-bending process; Forming defect; Numerical simulation

(责编 铃兰)

(上接第 47 页)

79-90.

[15] 杨昀. 薄壁件铣削系统动力学建模及稳定性预测方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.

YANG Yun. Dynamic modelling and chatter stability prediction of the milling process of thin-walled workpiece[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.

[16] SMITH J, TOBIAS S. The dynamic cutting of metals[J]. International Journal of Machine Tool Design and Research, 1961, 1(4): 283-292.

[17] TLUSTY J, ISMAIL F. Basic nonlinearity in machining chatter[J]. CIRP Annals

- Manufacturing Technology, 1981, 30: 299-304.

[18] ALTINTAS Y, BUDAK E. Analytical prediction of stability lobes in milling[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1995, 44: 357-362.

[19] INSPIERGER T, STEPAN G. Semi-discretization method for delayed systems[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2002, 55(5): 503-518.

[20] WAN M, ZHANG W H, DANG J W, et al. A unified stability prediction method for milling process with multiple delays[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(1): 29-41.

[21] LI Z Y, SUN Y W, GUO D M. Chatter prediction utilizing stability lobes with process damping in finish milling of titanium alloy thin-walled workpiece[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89: 2663-2674.

[22] YANG Y, ZHANG W H, MA Y C, et al. Chatter prediction for the peripheral milling of thin-walled workpieces with curved surfaces[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 109: 36-48.

通讯作者: 杨昀, E-mail: yunyang@mail.nwpu.edu.cn。

Dynamic Modelling Technology on Milling Process of Aerospace Thin-Walled Workpiece

YANG Yun^{1,2}, ZHANG Weihong², DANG Jianwei¹, ZHENG Xiaowei¹, WAN Min²

(1. AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Xi'an 710089, China;

2. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] Milling of thin-walled workpiece is the most widely used process in aerospace industries. Due to the low rigidity of the milling system, chatter often occurs, which will decrease the machining efficiency and product quality. Thus, it is greatly significant for high performance milling to study the dynamic modelling technics on milling process of aerospace thin-walled workpiece and further to select the process and tool geometry parameters. In this paper, dynamic modelling technics on milling process of aerospace thin-walled workpiece including dynamic modelling the tool-spindle system, the in-process thin-walled workpiece and milling processes are introduced.

Keywords: Aerospace thin-walled workpiece; Milling; Chatter; Tool point receptance; Workpiece dynamics

(责编 铃兰)