

基于ANSYS Workbench的型材拉弯有限元仿真模块开发*

韩志仁^{1,2}, 罗雪磊¹

(1. 沈阳航空航天大学航空宇航学院, 沈阳 110136;

2. 沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 沈阳 110136)

[摘要] 使用现有的商用有限元软件对型材拉弯工艺过程进行有限元模拟, 容易出现有限元建模效率低、有限元模型不合理和对工程技术人员要求高等问题。针对以上问题, 研究了型材拉弯的有限元模拟, 分析其中的拉弯方式、几何建模、材料模型、边界条件设置、夹钳轨迹计算和求解算法。然后对有限元软件 ANSYS Workbench 的几何建模模块和仿真模块进行二次开发, 嵌入对应的操作模板, 快速实现型材拉弯有限元模拟的几何模型建模和前处理工作, 并且利用开发的型材有限元建模模块对具体实例进行了仿真模拟。结果表明开发的模块可以快速、高效地完成型材拉弯的有限元模拟, 并且模拟结果具有一定的参考价值。

关键词: 型材拉弯; ANSYS Workbench; 夹钳轨迹计算; 二次开发; 有限元建模

Development of Finite Element Simulate Module of ANSYS Workbench on Profile Stretch-Bending

HAN Zhiren^{1,2}, LUO Xuelei¹

(1. College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

[ABSTRACT] The finite element simulation of the profile bending process is carried out using the existing commercial finite element software, which is prone to problems such as low efficiency of finite element modeling, unreasonable finite element model and high requirements for engineers and technicians. In view of the above problems, this paper studies the finite element simulation of profile bending and analyzes the bending method, geometric modeling, material model, boundary condition setting, clamp trajectory calculation and solving algorithm. Based on the previous research, the geometric modeling module and simulation module of the finite element software ANSYS Workbench were redeveloped, and the corresponding operation template was embedded to realize the geometric model modeling and pre-processing of the finite element simulation of the profile bending. For the specific example, the simulation of the profile finite element modeling module was carried out. The results show that the module developed in this paper can quickly and efficiently complete the finite element simulation of profile bending, and the simulation results are worth to reference.

Keywords: Profile stretch-bending; ANSYS Workbench; Clamp trajectory calculation; Secondary development; Finite element modeling

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.13.064

型材拉弯成形因为具有回弹小和能满足较高的刚度要求等优点, 广泛运用在航空、汽车、高铁、电梯、桥梁、建筑等生产^[1-2], 其成形过程中可能出现的缺陷有回弹、起皱、破裂和截面畸变等^[3], 对各种缺陷的准确预测是一个十分关键的问题。由于缺陷的产生是拉弯成形

* 基金项目: 航空科学基金(2018ZE54028)。

整个过程的历史累积, 与材料参数、工艺参数和温度条件等方面密切相关^[4], 对型材拉弯过程中产生的缺陷进行理论分析十分困难, 使用有限元软件对型材拉弯工艺过程进行有限元模拟是解决缺陷预测问题的有效方法之一^[5]。虽然使用有限元软件对型材拉弯工艺过程进行模拟是一种低成本、有效的手段, 但型材拉弯的有限元分

析包括型材、拉弯胎模型的建模和夹钳轨迹计算等^[6],使用现有的有限元软件进行分析对设计人员的操作要求高^[7],需要丰富的仿真模拟经验,即使是专门从事仿真工作的专业人员也会在有限元建模和夹钳轨迹计算等方面花费大量时间。因此,针对型材拉弯过程的有限元模拟,对现有的有限元软件进行二次开发,可以减少设计人员的工作量以及降低对设计人员的仿真经验要求,具有重要的意义。

本文首先研究型材拉弯有限元模拟,分析其中的几何建模、材料模型、边界条件设置、夹钳轨迹计算的网格划分等,然后对 ANSYS Workbench (简称 WB) 这一有限元软件进行二次开发,建立型材拉弯有限元仿真模块。

1 型材拉弯有限元建模分析

型材拉弯方法主要包括转台式拉弯和张臂式拉弯,其中张臂式拉弯可以通过夹钳位移控制方法控制成形过程中型材的拉伸量以及弯曲角度使其绕拉弯胎成形,可以实现型材与拉弯胎的准确贴合,是最常用的方法,因此本文针对张臂式型材拉弯成形的有限元建模过程进行分析研究,为型材拉弯成形有限元建模模块开发提供依据。

1.1 张臂式拉弯机

张臂式拉弯机的简化结构如图 1 所示,其工作过程为:夹钳首先将型材预拉伸至屈服极限,然后带动型材开始绕拉弯胎旋转,这个过程既有弯曲,也有拉伸;弯曲过程完成后,夹钳再进行补拉,直到拉伸工作完成。

1.2 几何模型

如图 2 所示,型材拉弯几何模型包括型材、夹钳和拉弯胎,型材模型需要建立横截面草图,然后通过拉伸操作得到几何模型;拉弯胎模型需要创建横截面轮廓草图和切面轮廓形状,然后通过扫略操作得到拉弯胎模型,切面轮廓形状包括定曲率、变曲率和其他复杂轮廓形状;夹钳模型简化为两个矩形平面,需要保证与型材的两端贴合。各模型之间需要按一定的位置装配,以保证夹钳带动型材拉弯成形后能够与拉弯胎准确贴合。

1.3 材料模型

型材的拉弯成形属于大位移、大转角变形,在成形过程中需要考虑材料塑性流动的非线性。在材料的流动模型中,真实应力 σ 是真实应变 ε 的函数,一般表示为 $\sigma=\sigma(\varepsilon)$ 的形式^[8],常用来模拟型材拉弯的材料本构模型为 Bilinear 模型,从单轴拉伸试验结果来看, Bilinear 模型能够很好地反映材料真实的应力应变关系,如式(1)所示。

$$\sigma = \begin{cases} \varepsilon E & (\varepsilon \leq \varepsilon_s) \\ \sigma_s + (\varepsilon - \varepsilon_s) \times D & (\varepsilon > \varepsilon_s) \end{cases} \quad (1)$$

式中, σ 和 ε 分别表示应力和应变; E 和 D 分别表示弹性模量和塑性模量; ε_s 表示弹性极限,并且有 $\sigma_s = \varepsilon_s \cdot E$ 。

1.4 接触和约束

有限元模拟时,拉弯胎设置为全约束,型材与拉弯胎之间设置摩擦接触,为了准确模拟成形过程,摩擦系数包括静摩擦系数和滑动摩擦系数,接触算法为罚函数法,型材的两端与对应的夹钳面设定 Fixed 铰接。设定夹钳面的参考点的位移约束以代替整个夹钳面的移动,如图 3 所示,在弯曲过程中,参考点在 Z 方向和 Y 方向按照给定的位移逐步加载, X 方向限制不动,并且整个夹钳面绕参考点在拉弯平面内转动,即 RX 根据弯曲角度设置,并且为了准确模拟拉弯过程的变形,需要释放 RY、RZ。

1.5 夹钳轨迹

夹钳轨迹的控制方法包括控制拉伸力法和控制位移法,控制拉伸力法与所选的型材的材料有关,需要反复试验确定,难度较大^[9],因此一般使用控制位移法来模拟型材的拉弯成形。拉弯的关键在于弯曲阶段,并且对于不同类型的弯曲目标形状,其轨迹计算方法也不相

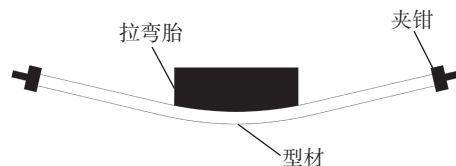


图1 张臂式拉弯结构简图

Fig.1 Schematic diagram of arm-type bending

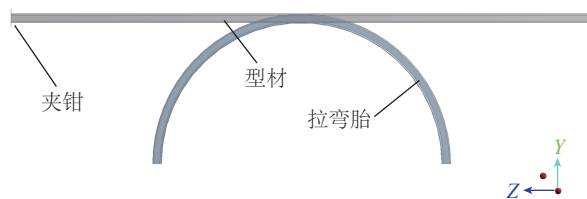


图2 型材拉弯几何模型

Fig.2 Profile bending geometry model

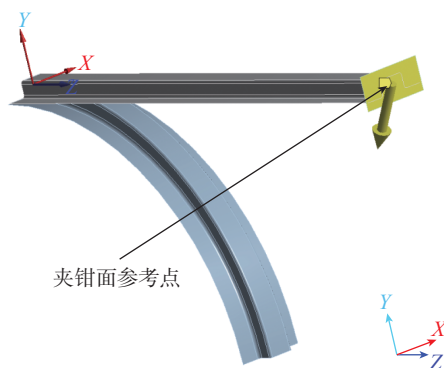


图3 夹钳面参考点示意图

Fig.3 Clamp face reference point schematic

同。目前的夹钳轨迹计算方法是目标轮廓形状等距离散成多段,然后在弯曲过程中控制型材的形心引导线与目标轮廓曲线逐段重合(忽略型材在预拉和弯曲过程中中性层偏移的影响),直至完成弯曲成形工作,这样的计算方法可用于任何弯曲目标形状。

如图4所示, $\widehat{OO'}$ 为型材弯曲的目标形状,弯曲过程中型材的形心引导线与目标轮廓形状逐步重合,则图4中的 A_i 点是弯曲过程中不同时刻型材形心引导线与目标轮廓曲线的切点, $A_i A_i'$ 为切线,因此以 A_i 点作为夹钳参考点,设定夹钳位移。假设整个弯曲过程分为 n 步,则在第 i 步弯曲时,弯曲目标轮廓线的 i/n 与型材贴合,即 $\widehat{OA} = \widehat{OO'} \times (i/n)$,根据以上假设,以 O 点为坐标原点, O' 为弯曲轮廓的终点,夹钳轨迹的计算可以由以下公式算出:

$$\begin{aligned} X_i &= (L - L_i) \cos \alpha_i + x_i \\ Y_i &= (L - L_i) \sin \alpha_i + y_i \end{aligned} \quad (1)$$

其中, X_i, Y_i 为夹钳参考点在 X 轴和 Y 轴的位移; L 为型材弯曲之前的长度; x_i, y_i 为 A_i 点 x 坐标; y_i 为 A_i 点 y 坐标; α_i 为 A_i 点的切线与水平方向所成夹角。

$$L_i = \widehat{OA}_i = \widehat{OO'} \times (i/n) \quad (2)$$

1.6 网格划分

单元类型和网格尺寸大小对模拟结果有很大影响,合理的设置可以加快计算速度、节约计算机内存和提高计算精度。由于型材、夹钳和拉弯胎几何模型均为面体,因此使用四边形壳单元 (shell163) 进行网格划分,并且型材圆角处的网格需要细化处理。

1.7 求解方法选择

型材拉弯成形时间很短,动态显示算法是最合适的算法,该方法时间增量很小,可以提高求解的精度,并且显示算法也是一种求解速度快的算法,可以节约模拟的时间。因此本文使用 WB 有限元软件的 Explicit Dynamic 显示动力学分析模块进行型材拉弯有限元仿真模拟。

2 二次开发

从第1节的分析可以得知:型材拉弯有限元仿真建

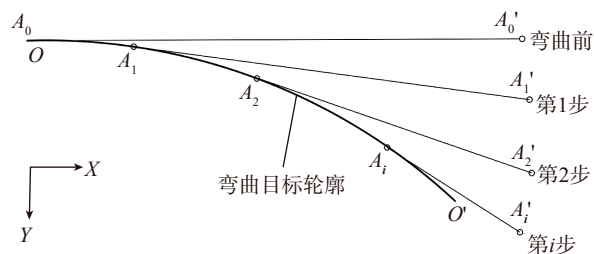


图4 拉弯轨迹计算示意图

Fig.4 Schematic diagram of drawing curve

模过程复杂,需要设计人员具有较高的几何建模水平和丰富的有限元仿真经验,并且有限元建模过程需要考虑各种细节,手动建模方法容易出现错误。因此,为了提高型材拉弯有限元建模效率和提高有限元模型建立的准确性,本文对 WB 有限元分析软件进行二次开发,提高有限元建模效率。

WB 有限元分析软件是一个开放的专业化定制平台,配备各种各样的开发工具包、应用程序集以及相应运行环境,可以满足不同行业用户在该平台上定制专业的工具以及集成相对应的应用^[10],为了满足要求,本文将对几何建模界面和仿真界面进行二次开发,建立型材拉弯参数化建模工具和仿真工具。

2.1 型材拉弯参数化建模模块介绍

本文对 WB 有限元软件的 DesignModeler 几何建模模块进行二次开发,创建图5所示的参数化建模界面,用户只需要在界面上选择结构类型、型材横截面轮廓形状和拉弯胎切面轮廓,然后输入各参数并点击“应用”就可以完成几何模型的建立。程序会自动计算出型材横截面的形心引导线,以供后续夹钳参考点的确定,程序运行步骤如图6所示,建模方法如1.2节所述。

2.2 仿真模块介绍

图7为开发好的仿真界面,用户需要选择各个相对应的模型和表面,然后点击“确定”建立 NameSelection,系统才能识别各个模型并且设置相应的接触、约束和载荷施加。需要输入的参数包括动摩擦因数、静摩擦因数、全局网格尺寸、细分网格尺寸以及弯曲过程中的各参数。系统默认的单元类型为 shell163,约束、载荷施加方式与1.4节相同,夹钳轨迹计算方法与1.5节相同,夹钳参考点位于夹钳面并且与型材横截面的形心引导线重合。图8为夹钳轨迹计算流程图,其中弯曲目标形状在几何模型建立时提取。

3 仿真实例

使用文献[11]中的一则算例来验证本文开发模块

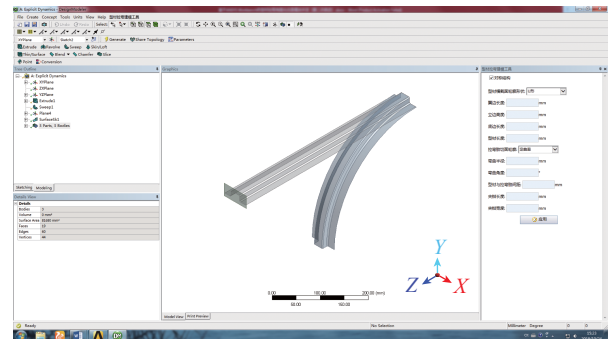


图5 参数化建模界面

Fig.5 Parametric modeling interface

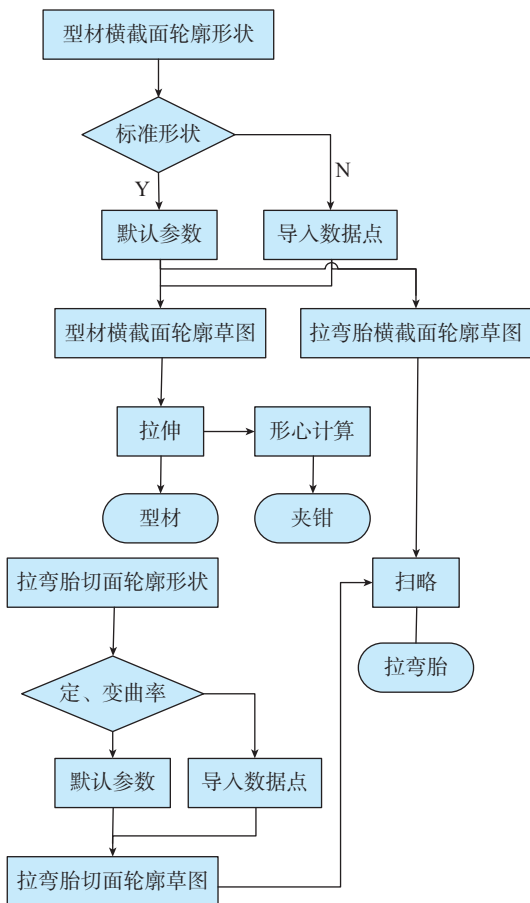


图6 型材拉弯几何模型生成流程图
Fig.6 Profile drawing technology

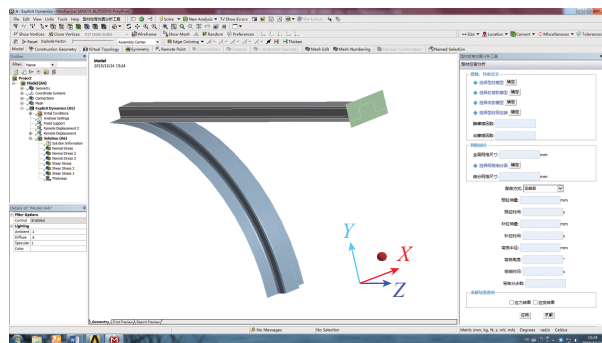


图7 型材拉弯仿真模板界面
Fig.7 Profile bending simulation template interface

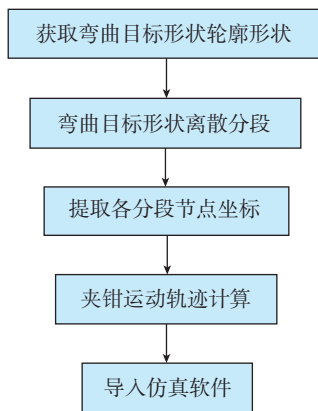


图8 夹钳轨迹计算流程图
Fig.8 Clamp trajectory drawing technology

的正确性,型材材料弹性模量为 73800MPa,泊松比为 0.31,屈服强度为 511MPa,抗拉强度为 572.2MPa,总拉伸率为 7.3%。算例中弯梁几何构型为对称结构,如图 9 所示,可以取 1/2 模型研究,型材厚度为 0.8mm,在开发的参数化几何建模界面中输入各参数,建立图 10 所示几何模型。然后进入仿真界面,在开发的仿真模板界面中选择各相对应的模型,输入静摩擦系数为 0.12,动摩擦系数为 0.1,设置全局网格尺寸为 3mm,局部细化网格尺寸为 0.8mm,输入预拉伸量,弯曲角度、弯曲半径等参数然后点击运用完成有限元分析的前处理工作。

本文所做有限元模拟的计算机配置:i5-4200H 处理器、4.00GB 内存(RAM)、CPU 计算时间 42min。计算的等效应力结果、回弹结果和塑性应变结果分别如图 11~13 所示,从图 11 中可以看出计算的最大等效应力为 610.15MPa,最小等效应力为 16.62MPa,文献 [11] 中计算出的最大等效应力为 610.6MPa,最小等效应力为 17.46MPa;从图 12 中可以看出本文计算的回弹量为 20.048mm,文献 [11] 中给出了试验中该型材拉弯成形后的回弹量为 20mm。从以上结果可以看出本文开发模块的计算结果与文献 [11] 的计算结果和试验结

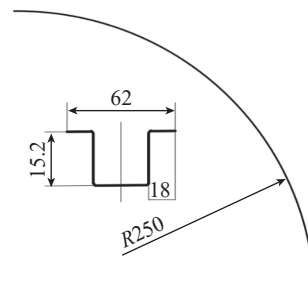


图9 型材构件几何特征
Fig.9 Profile member geometry

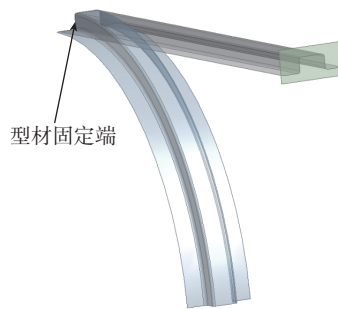


图10 几何模型
Fig.10 Geometric model

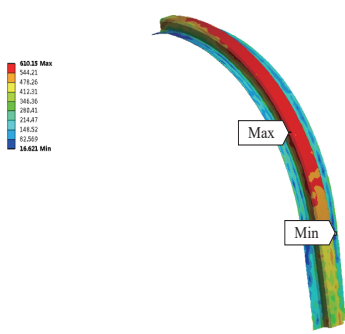


图11 有限元分析等效应力结果
Fig.11 FEA equivalent stress result

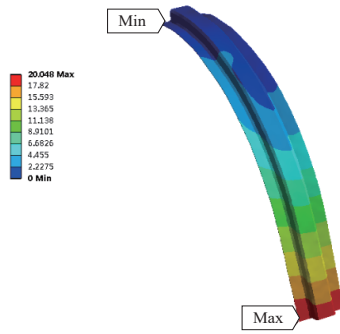


图12 有限元分析回弹结果
Fig.12 FEA rebound result

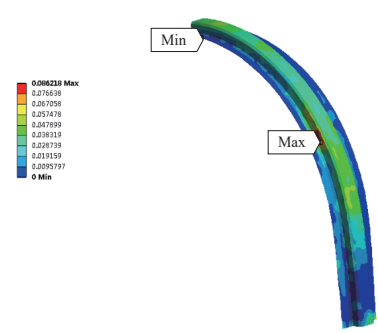


图13 有限元分析等效塑性应变结果
Fig.13 FEA equivalent plastic strain result

果基本一致,偏差产生的原因主要是两个有限元软件 ABAQUS 和 ANSYS 的算法和计算精度不完全相同所导致。因此本文开发的模块所做的型材拉弯有限元模拟结果具有一定的参考价值。

4 结论

(1) 研究了型材拉弯有限元模拟中几何模型的建立方法和有限元仿真的前处理方法。

(2) 开发了型材拉弯有限元建模模块,与手动建模方式相比,开发的模块可以明显提高有限元建模效率。

(3) 使用本文开发的型材拉弯有限元仿真模块所做的模拟结果与实际生产具有很好的一致性,可供设计人员参考。

参考文献

[1] 罗健玺,卢锴钧,张学广,等.拉弯过程解析计算及仿真实验[J].机械设计与研究,2018,34(5):136-139,147.
LUO Jianxi, LU Kaijun, ZHANG Xueguang, et al. Analytical, numerical and experimental research on the kinematics of profile stretch bending[J]. Machine Design and Research, 2018, 34(5): 136-139, 147.
[2] 杜建宁,李小强,高岩.典型铝合金型材零件拉弯成形工艺的数值模拟与实验研究[J].锻压技术,2015,40(4):148-151.
DU Jianning, LI Xiaoqiang, GAO Yan. Numerical simulation and experimental research of stretch-bending process for typical aluminum alloy parts[J]. Forging and Stamping Technology, 2015, 40(4): 148-151.
[3] 谷净巍,张文学,吕萌萌,等.宽翼边U型截面不锈钢型材拉弯成形缺陷控制[J].吉林大学学报(工学版),2017,47(4):1165-1170.
GU Zhengwei, ZHANG Wenxue, LÜ Mengmeng, et al. Stretch bending defect control of U-section stainless steel profile with wide flange[J]. Journal of Jilin University (Engineer and Technology Edition), 2017, 47(4): 1165-1170.
[4] 刘天骄.挤压型材拉弯回弹预测与补偿方法研究[D].西安:西北工业大学,2016.
LIU Tianjiao. Springback prediction and compensation of extruded profiles in stretch bending[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.

[5] ZHAO J, ZHAI R X, QIAN Z P, et al. A study on springback of profile plane stretch-bending in the loading method of pretension and moment[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 75: 45-54.

[6] NANU N, BRABIE G. Analytical model for prediction of springback parameters in the case of U stretch-bending process as a function of stresses distribution in the sheet thickness[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2012, 64(1): 11-21.

[7] 买买提明·艾尼,陈华磊.ANSYS Workbench 18.0 高阶应用与实例解析[M].北京:机械工业出版社,2018.

Buying Timing Aini, CHEN Hualei. ANSYS Workbench 18.0 highlevel application and case analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2018.

[8] 金朝海,周贤宾,谷净巍,等.基于位移控制的型材2D张臂式拉弯加载轨迹设计及数控代码生成[J].塑性工程学报,2009,16(2):66-71.

JIN Chaohai, ZHOU Xianbin, GU Zhengwei, et al. Jaw trajectory design for displacement-controlled profile 2D stretch-wrap bending and part program generation[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(2): 66-71.

[9] 刘杰.汽车门框上条三维拉弯成形仿真研究[D].成都:西南交通大学,2018.

LIU Jie. Simulation method for three-dimensional stretch-bending forming of car door sash[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[10] 李元林,江思跃.ANSYS Workbench 二次开发技术及应用[J].中国制造业信息化,2010,39(14):46-48.

LI Yuanlin, JIANG Siyue. Secondary Development Technology and Application of ANSYS Workbench[J]. China Manufacturing Information Technology, 2010, 39(14): 46-48.

[11] 卜晓珍,翟华,周丽华,等.π截面铝合金型材拉弯成形工艺数值模拟研究[J].塑性工程学报,2019,26(2):151-161.

BU Xiaozhen, ZHAI Hua, ZHOU Lihua, et al. Numerical simulation research on stretch-bending process for π-section aluminum alloy profiles[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(2): 151-161.

通讯作者:韩志仁,教授,研究方向为塑性成形,E-mail:hanren888@163.com。

(责编 阳光)