

宽底面 U 形框拉弯成形工艺

李 倩¹, 胡德友¹, 陶现宾^{1,2}, 齐文耀¹, 王明欢¹, 侯银松¹

(1. 天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462; 2. 首都航天机械有限公司, 北京 100076)

摘要: 针对某运载火箭宽底面 U 形框拉弯后内弧边褶皱和成形精度低的问题, 模拟分析了不同拉弯工艺参数下补拉弯过程中拉伸量对零件内侧应变的影响规律, 并试验研究了工艺参数对零件拉弯成形后型面精度的影响规律。模拟结果表明: 包覆角度由 0° 增至 90° 时, 内侧应变呈现先缓慢减小再快速增大后减小的规律, 在包覆角度为 60°~70° 时内侧应变最大; 随着拉伸量的增加型材的内侧应变逐渐增加, 增加拉伸量有助于零件拉伸变形, 减少褶皱。试验结果表明: 零件在不拉断的情况下, 拉弯力和拉伸量越大, 零件的型面精度越高, 增大拉伸量可有效消除褶皱, 试验与模拟结果一致。在预拉弯力和补拉弯力为 80 kN、预包覆角度为 60°、补包覆角度为 90°、补拉伸量为 55 mm 时, 零件型面精度最高, 立边间隙、底边间隙和弧度间隙最小, 符合技术指标要求。

关键词: 宽底面 U 形框; 拉弯成形; 拉伸量; 褶皱; 包覆角度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.04.023

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 04-0195-06

Stretch bending process of wide bottom U-shaped frame

Li Qian¹, Hu Deyou¹, Tao Xianbin^{1,2}, Qi Wenyao¹, Wang Minghuan¹, Hou Yinsong¹

(1. Tianjin Aerospace Long March Rocket Manufacturing Co., Ltd., Tianjin 300462, China;

2. Capital Aerospace Machine Co., Ltd., Beijing 100076, China)

Abstract: For the problem of wrinkles on the inner arc edge and low forming accuracy for a wide bottom U-shaped frame of a launch rocket after stretch bending, the influence law of stretch amount on the strain on the inner parts under different stretch bending process parameters during the supplementary stretch bending was simulated and analyzed, and the influence law of the process parameters on the surface accuracy of parts after stretch bending was experimentally studied. The simulation results show that when the wrapping angle ranges from 0° to 90°, the strain on the inner parts first decreases slowly, then increases rapidly, and then decreases, and when the wrapping angle is 60°~70°, the strain on the inner parts is the largest. As the stretch amount increases, the strain on the inner parts gradually increases, which helps the parts to stretch deformation and reduces wrinkles. The experiment results show that when the part is not break, the greater the bending force and the stretch amount, the higher the surface accuracy of parts. The wrinkles are effectively eliminated by increasing the stretch amount, and the experiment results are consistent with the simulation results. When the pre-bending force and the supplementary bending force are 80 kN, the pre-wrapping angle is 60°, the supplementary wrapping angle is 90°, and the supplementary stretch amount is 55 mm, the surface accuracy of parts is the highest, and the vertical edge clearance, bottom edge clearance and arc clearance are the smallest, which meets the technical index requirements.

Key words: wide bottom U-shaped frame; stretch bending; stretch amount; wrinkle; wrapping angle

型材框产品属于大型钣金零件, 常应用于运载火箭贮箱端框, 一般采用拉弯成形工艺。在弯曲过程中对型材零件施加一定的拉力, 使其产生拉伸弯曲变形, 简称拉弯^[1]。型材拉弯成形因具有回弹小、刚度高等优点, 广泛应用于汽车、航空、高铁

和桥梁等的生产^[2-3]。拉弯成形过程可能出现起皱、回弹、剖面畸变和纵向扭曲等问题^[4-5]。

国内外许多学者对拉弯成形缺陷问题进行了研究, 并采取了一些控制措施。吕晨阳^[6]研究了拉弯工艺参数对截面变形的影响, 分析了 5 种工艺参数对截面变形影响的主次关系。高丙坤等^[7]采用有限元模拟和试验相结合的方法研究了铝合金 U 形臂弯曲过程中缺陷产生的原因。Gu Z W 等^[8-9]研究了不同型材拉弯过程中起皱和截面畸变的原因, 并给出了解决办法。Liang J C 等^[10]研究了矩

收稿日期: 2024-10-26; 修订日期: 2025-01-11

作者简介: 李 倩 (1985-), 女, 硕士, 工程师

E-mail: liqianfly99@163.com

通信作者: 齐文耀 (1998-), 男, 硕士, 助理工程师

E-mail: 345668618@qq.com

形管弯曲角度对管壁凹陷的影响。Joo M 等^[11]通过仿真模拟分析了预应变对回弹的影响。金妍等^[12]研究了不同拉弯力和包覆角度对铝合金型材截面起皱和回弹的影响,并得出优化的工艺参数。型材由于截面特殊性,拉弯成形过程受拉弯力、包覆角度和拉伸量等多种工艺参数的影响,工艺参数的选取对于零件型面精度起着重要的作用,因此,研究拉弯工艺参数具有重要意义。

本文针对某一运载火箭宽底面 U 形框零件进行了补拉弯过程仿真模拟,分析了拉伸量对零件应变

的影响规律。并结合仿真结果进行了拉弯试验,分析了拉弯工艺参数对零件型面精度的影响规律,得出较优的拉弯工艺参数。

1 宽底面 U 形框零件

该零件截面为中空 U 形框,底面宽度达 100 mm,壁厚较薄,为 3 mm,零件内半径为 1028 mm,弯曲成 180°的半圆。零件底边长度为 100 mm,立边长度为 50 mm,将其置于平台上, U 形框开口朝上,如图 1 所示。

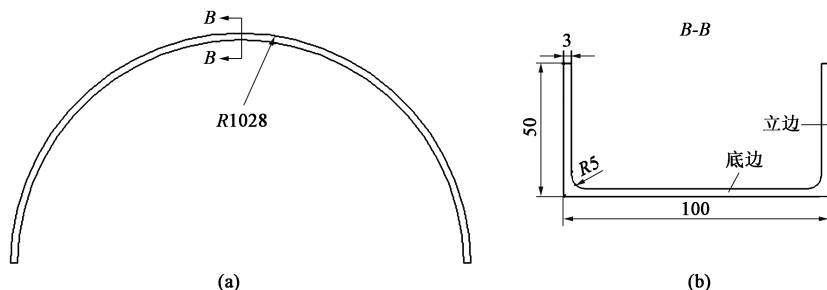


图 1 型材框零件图
(a) 主视图 (b) B-B 旋转剖视图

Fig. 1 Part drawing of profile frame
(a) Main view (b) B-B rotating section view

该 U 形框零件的原材料为退火态 7A09 铝合金,采用二次拉弯成形工艺,成形工艺流程为:预拉弯成形—淬火—补拉弯成形—修整—人工时效—检验—包装交付。该 U 形框为中空型框,底平面较宽且壁厚较薄,补拉弯成形后立边局部发生了严重褶皱,导致零件尺寸超差,如图 2 箭头处所示。且只有内弧边局部有褶皱,外弧边无褶皱,说明内弧边为受压状态,外弧边为受拉状态,若要消除立边褶皱,须使内弧边由受压状态改为受拉状态。通过分析,零件立边褶皱与拉弯工艺参数,尤其是拉伸量的选取有关,因此,需优化拉弯工艺参数,消除立边褶皱,以提高零件型面尺寸精度。

2 有限元仿真分析

2.1 宽底面 U 形框的建模

利用有限元仿真分析软件对宽底面 U 形框拉弯成形过程进行建模及仿真,该型材采用二次拉弯法,由于是在补拉弯过程中立边处出现褶皱,因此,只模拟淬火后补拉弯过程。根据前期生产时预拉弯过程中包覆角度为 60°,因此,模拟补拉弯过程时包覆角度从 60°增至 90°,再进行补拉伸。如图 3 所示,模型分为模具、U 形框、夹钳和填料 4 部分,



图 2 零件褶皱图
Fig. 2 Wrinkle drawing of part

型材长度为弯曲后的长度与余量之和,型材两端各加 300 mm 的余量,总长度为 3830 mm。U 形框为变形体,共划分 21804 个单元和 9970 个节点,夹钳和 U 形框端部通过绑定方式连接在一起。填料材质为聚缘脂,与 U 形框为接触式连接。

7A09 铝合金型材淬火后的力学性能参数及聚缘脂填料的性能参数如表 1 所示。

2.2 模拟结果分析

本文对补拉弯过程进行模拟仿真,分析拉伸量对应变场的影响规律,拉伸量分别设定为 30、40 和 50 mm。仿真模拟后不同拉伸量下补拉弯过程的应

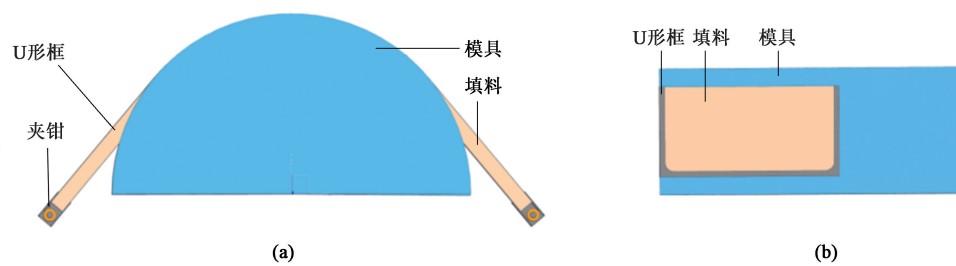


图 3 U 形框建模图
(a) 主视图 (b) 局部剖视图
Fig. 3 Modeling diagram of U-shaped frame
(a) Main view (b) Partial section view

表 1 材料的主要性能参数
Table 1 Main performance parameters of materials

材料	参数	数值
7A09 铝合金型材	抗拉强度 R_m /MPa	310
	屈服强度 R_{eL} /MPa	280
	均匀伸长率 A /%	6
	杨氏模量 E /GPa	71
	泊松比 ν	0.33
聚缘脂填料	杨氏模量 E /GPa	0.11
	泊松比 ν	0.42

变如图 4 所示。从图 4 可以看出，随着拉伸量的增加型材的应变逐渐增加。半圆形中间部分和余量区应变较小，距两端 1/3 处应变较大。

为方便观察各包覆角度下的应变数值，对型材

弯曲的包覆角度进行划分，由于型材弯曲后对称，因此只划分左半部分，以型材弯曲后圆心到半圆形顶点方向为 0°，以圆心到水平方向为 90°，每隔 10° 进行划分，测量内侧应变数值，如图 5 所示。

由图 5 可以看出，宽底面 U 形框内侧应变随包覆角度从 0°增加至 90°呈现出先缓慢减小再快速增大再减小的规律。在包覆角度为 10°~30°时内侧应变最小，在包覆角度为 60°~70°时内侧应变最大，说明在补拉弯过程中此处变形最大，受力也最大。内侧左边受到压应力作用而容易出现褶皱，通过与前期生产的零件进行对比，褶皱也是发生在包覆角度为 60°~70°范围内。随着拉伸量的增加宽底面 U 形框内侧最大应变逐渐增加，说明增加拉伸量有助于零件拉伸变形，减少褶皱，但零件变形过大也会

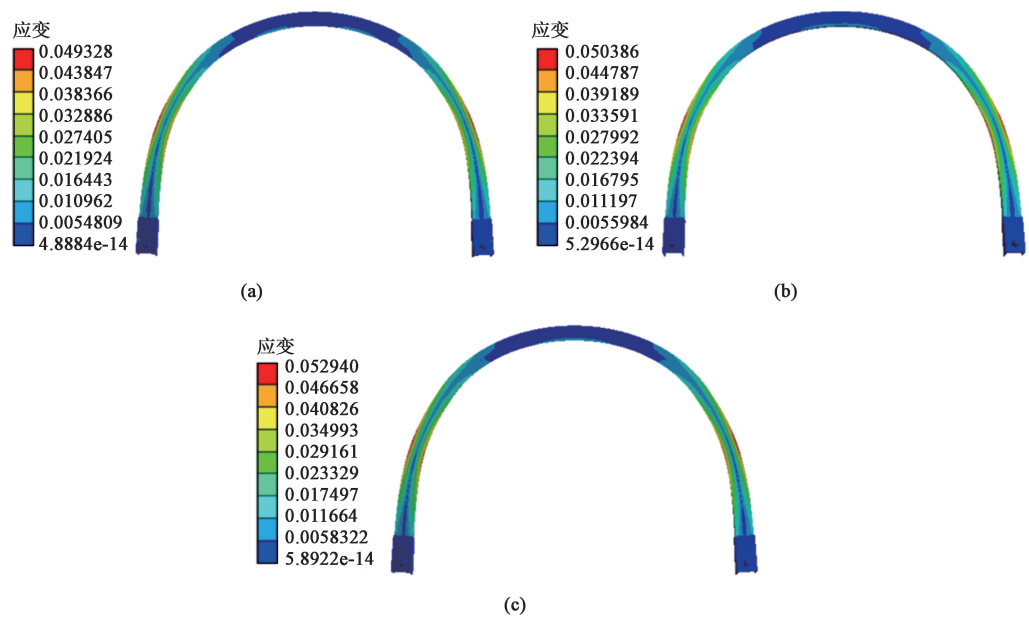


图 4 不同拉伸量下补拉弯过程的应变分布图
(a) 拉伸量为 30 mm (b) 拉伸量为 40 mm (c) 拉伸量为 50 mm
Fig. 4 Strain distribution diagrams during supplementary bending process under different stretching amounts
(a) Stretching amount of 30 mm (b) Stretching amount of 40 mm (c) Stretching amount of 50 mm

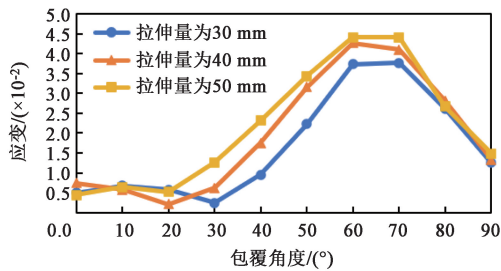


图 5 不同包覆角度下的应变分布曲线

Fig. 5 Strain distribution curves under different wrapping angles

容易断裂，因此，宽底面 U 形框在不拉断的情况下应尽量增加拉伸量。

3 宽底面 U 形框拉弯试验

3.1 工艺参数制定

宽底面 U 形框采用二次拉弯法，分为预拉弯成形和补拉弯成形，预拉弯成形过程为上料后先给型材施加一个预拉弯力，然后预包覆角度，再将料卸下；补拉弯成形过程为上料后先给型材施加一个补拉弯力，然后补包覆角度，最后施加一个补拉伸量，再将料卸下。因此，工艺参数为预拉弯力、预包覆角度、补拉弯力、补包覆角度和补拉伸量。

本次试验根据有限元仿真分析结果，为减小试验试模次数，补拉伸量在仿真分析的基础上首先选取优化的模拟值 50 mm 进行试验，然后微调参数，再选取 55 和 60 mm 进行试验；预拉弯力和补拉弯力的数值相同，按前期生产参数选取 70 和 80 kN；预包覆角度选取 60°；补包覆角度均为 90°。工艺参数设置如表 2 所示。

表 2 拉弯试验工艺参数设置

Table 2 Setting of process parameters for stretch bending experiment

试验	预拉弯力/ kN	预包覆角度/ (°)	补拉弯力/ kN	补包覆角度/ (°)	补拉伸量/ mm
1	70	60	70	90	50
2	70	60	70	90	55
3	70	60	70	90	60
4	80	60	80	90	50
5	80	60	80	90	55
6	80	60	80	90	60

3.2 拉弯成形试验

宽底面 U 形框由直料铝型材拉弯成形为内半径为 1028 mm 的半圆形，首先对型材进行下料，下料总长度为 3830 mm（两端各加 300 mm 余量），拉弯前需仔细检查毛料表面质量，查看是否有裂纹、划伤等缺陷并打磨排除。由于为中空型框，两次拉弯时均需在中空部分增加填料，填料材质为聚缘脂，填料截面与 U 形框中空部分一致，每段长度为 120 mm，共填加 30 段，单块填料两端有凹槽，方便拉弯后从 U 形框中取出填料。单块填料如图 6 所示，零件带填料补拉弯后如图 7 所示。

宽底面 U 形框采用二次拉弯法，拉弯过程为：填料—上料—预拉弯成形—卸料—拆填料—淬火—填料—上料—补拉弯成形—卸料—拆填料—修整—检验。准备就绪后按每组工艺参数对零件进行拉弯试验，补拉弯后观察内弧边是否有褶皱，然后测量零件的型面尺寸，主要测量 3 个数值，分别为零件内弧立边与直角尺之间的间隙（即立边间隙）、底边与平台之间的间隙（即底边间隙）、内轮廓与半



(a)



(b)

图 6 单块聚缘脂填料照片

(a) 正面 (b) 侧面

Fig. 6 Photos of single polymer filler

(a) Front (b) Side

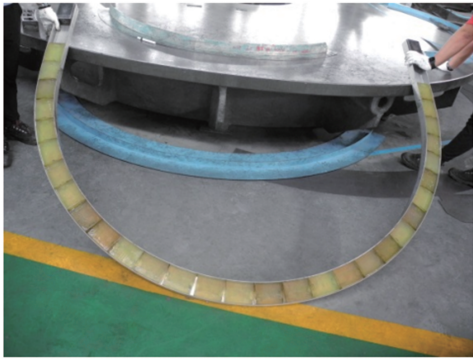


图 7 零件带填料补拉弯
Fig.7 Part with filler after bending

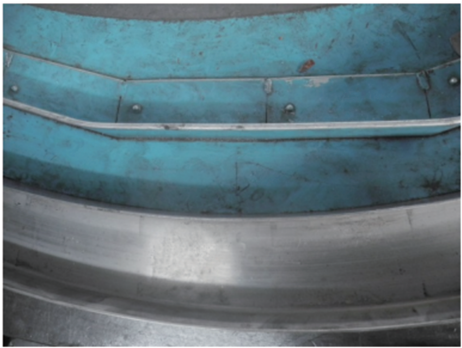
径样板之间的间隙（即弧度间隙），对于型框该 3 个数值均合格即为零件合格。测量 3 个指标的最大间隙，如表 3 所示。

表 3 拉弯试验测量结果

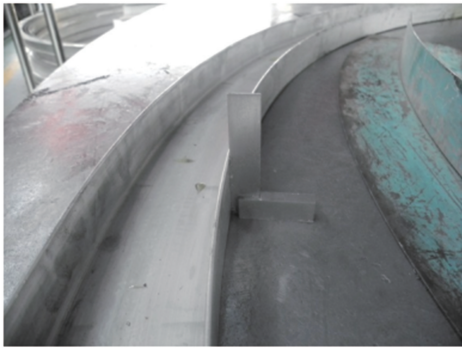
试验	立边间隙/mm	底边间隙/mm	弧度间隙/mm	零件状态
1	2.7	2.6	2.8	有褶皱
2	1.8	2.2	2.4	无褶皱
3	1.0	1.6	1.7	无褶皱
4	1.6	1.8	1.9	无褶皱
5	0.5	0.8	1.0	无褶皱
6	—	—	—	断裂
技术指标	≤0.8	≤1.5	≤1.5	—

从表 3 中可以看出：在拉弯力相同的条件下，增加拉伸量可以消除内弧边褶皱情况，拉伸量越大，零件的立边间隙、底边间隙和弧度间隙越小，说明拉伸量越大，零件变形越大，试验和模拟结果一致；在拉伸量相同的条件下，拉弯力越大，零件的立边间隙、底边间隙和弧度间隙越小，型面精度越高。但拉弯力和拉伸量不能过大，当拉弯力为 80 kN、拉伸量为 60 mm 时，零件发生断裂。在工艺参数预拉弯力和补拉弯力为 80 kN、预包覆角度为 60°、补包覆角度为 90°、补拉伸量为 55 mm 时，零件型面精度最高，立边间隙、底边间隙和弧度间隙最小，符合技术指标要求。

试验后零件的弧度间隙和立边间隙的测量如图 8 所示，可以看出，零件立边与弧度样板及直角尺紧密贴合。成形后零件图如图 9 所示，对零件右端头部分进行了后续缺口加工处理。通过优化工艺参数成形出尺寸合格的宽底面 U 形框零件。



(a)



(b)

图 8 零件测量图

(a) 弧度间隙 (b) 立边间隙

Fig.8 Part measurement drawings

(a) Radian clearance (b) Edge clearance

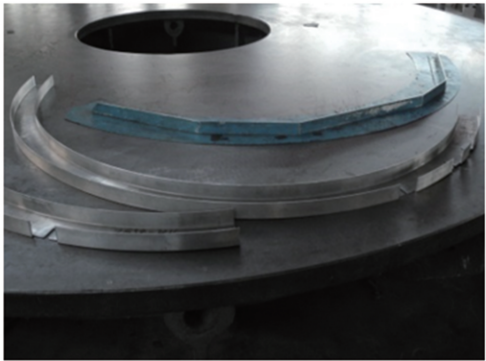


图 9 成形后的零件
Fig.9 Formed parts

4 结 论

(1) 模拟分析了拉伸量对宽底面 U 形框补拉弯过程中应变的影响规律，得出随着拉伸量的增加型材的应力和应变逐渐增加，在包覆角度为 60°~70° 时应力和应变最大，增加拉伸量有助于零件拉伸变形，减少褶皱。

(2) 试验分析了工艺参数对宽底面 U 形框拉弯

特种成形栏目由中国机械总院集团北京机电研究所有限公司赞助刊出

成形后型面精度的影响规律,得出增加拉伸量可以消除内弧边褶皱情况,与模拟结果一致,拉弯力和拉伸量越大,零件的立边间隙、底边间隙和弧度间隙越小,型面精度越高,但拉弯力和拉伸量过大,零件容易发生断裂。

(3) 在工艺参数预拉弯力和补拉弯力为 80 kN、预包覆角度为 60°、补包覆角度为 90°、补拉伸量为 55 mm 时,零件型面精度最高,立边间隙、底边间隙和弧度间隙最小,符合技术指标要求。

参考文献:

- [1] 王海宇. 飞机钣金工艺学 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2011.
Wang H Y. Aircraft Sheet Metal Technology [M]. Xi'an: North-western Polytechnical University Press, 2011.
- [2] 罗健玺, 卢锴钧, 张学之, 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 J X, Lu K J, Zhang X Z, 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.
- [3] 祝鹤, 杨立新, 卢影峰, 等. 钛合金挤压薄壁型材变曲率拉弯成形工艺 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (9): 68-74.
Zhu H, Yang L X, Lu Y F, et al. Variable curvature stretch bending process of titanium alloy extruded thin wall profile [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (9): 68-74.
- [4] 谷净巍, 张文学, 吕萌萌, 等. 宽翼边 U 形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 Z W, Zhang W X, Lyu M M, 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.
- [5] 金朝海, 周贤宾, 刁可山, 等. 矩形截面铝合金型材拉弯成形有限元模拟 [J]. 材料科学与工艺, 2006, 12 (4): 332-335.
Jin C H, Zhou X B, Diao K S, et al. Springback analysis for stretch bending of aluminum profile of rectangle cross section [J]. Material Science & Technology, 2006, 12 (4): 332-335.
- [6] 吕晨阳. 铝型材柔性多点拉弯中工艺参数对截面变形的影响分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2022.
Lyu C Y. Analysis of the Influence of Process Parameters on Section Deformation in Flexible Multi-point Stretch-bending of Aluminum Profile [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [7] 高丙坤, 李思奇, 白鹭, 等. 铝合金 U 形臂的弯曲工艺设计及优化 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (3): 27-33.
Gao B K, Li S Q, Bai L, et al. Design and optimization on aluminum alloy U-shaped arm bending process [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (3): 27-33.
- [8] Gu Z W, Lyu M M, Li X, et al. Stretch bending of Z-section stainless steel profile [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2016, 23 (6): 525-530.
- [9] Gu Z W, Lyu M M, Li X, et al. Stretch bending defect control of L-section SUS301L stainless-steel components with variable contour curvatures [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2019, 26 (12): 1376-1384.
- [10] Liang J C, Liao Y F, Li Y, et al. Study on the influence of bending angle of multipoint stretch-bending of profiles on section distortion of parts [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020 (1): 1-11.
- [11] Joo M, Wi M S, Yoon S Y, et al. A crystal plasticity finite element analysis on the effect of prestrain on springback [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 36 (3): 237-246.
- [12] 金妍, 杜建宁, 崔丽, 等. 变截面型材拉弯成形工艺仿真与优化 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (3): 88-94.
Jin Y, Du J N, Cui L, et al. Simulation and optimization on stretch bending process for variable cross-section profile [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (3): 88-94.
- [13] 秦勤, 罗斌, 李长聪, 等. 皮尔格冷轧管机轧制过程工艺优化 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2023, 54 (12): 4711-4719.
Qin Q, Luo B, Li C C, et al. Process optimization of Pilger cold rolling [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54 (12): 4711-4719.
- [14] 郝坤羽, 金朝阳, 陈思远, 等. 基于智能算法的 C-Mn 钢轧制工艺优化与性能预测 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (7): 87-93.
Hao K Y, Jin Z Y, Chen S Y, et al. Rolling process optimization and performance prediction of C-Mn steel based on intelligent algorithm [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (7): 87-93.
- [15] Li Y, Lei F. Robust multi-objective optimization of rolling schedule for tandem cold rolling based on evolutionary direction differential evolution algorithm [J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2017, 24 (8): 795-802.
- [16] 张书荣. 六辊可逆冷轧机全轧程轧制力预测的方法研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
Zhang S R. Research on Rolling Force Prediction Method of Six-high Reversible Cold Rolling mill [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.
- [17] 张新彤, 张成明, 李立毅, 等. 电推进用高效轻质永磁同步电机的设计方法 [J]. 机械工程学报, 2023, 59 (8): 181-195.
Zhang X T, Zhang C M, Li L Y, et al. Design method of high efficiency lightweight permanent magnet synchronous motor for electric propulsion [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59 (8): 181-195.
- [18] Min S G, Sarlioglu B. 3-D performance analysis and multiobjective optimization of coreless-type PM linear synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65 (2): 1855-1864.

(上接第 146 页)