

板料成形

## 电动汽车座椅横梁辊冲成形仿真与试验研究

刘 洋<sup>1</sup>, 邹天下<sup>1</sup>, 梁振业<sup>1</sup>, 钱 朕<sup>2</sup>, 李大永<sup>1</sup>, 肖 华<sup>3,4</sup>, 石 磊<sup>3,4</sup>, 周国伟<sup>5</sup>

(1. 上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240; 2. 昆士兰大学 机械与矿业工程学院, 澳大利亚 昆士兰 4072;

3. 宝山钢铁股份有限公司研究院, 上海 201900; 4. 汽车用钢开发与应用技术国家重点实验室 (宝钢), 上海 201900;

5. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 为了解决采用传统薄板成形工艺制造超高强钢座椅横梁成形缺陷多、尺寸精度低的问题, 提出了两道次辊冲成形工艺方案, 并基于 Abaqus/Standard 建立了相应的有限元模型, 分析了辊冲成形过程中零件上的应变分布、成形载荷和截面形状。仿真结果表明, 辊冲成形后的零件上无起皱与开裂缺陷, 零件的横、纵截面尺寸与目标较为一致。基于现有的辊冲成形机组, 开展了电动汽车座椅横梁两道次辊冲成形试验, 并测量了成形零件的关键尺寸, 其中法兰外轮廓的尺寸偏差小于 $\pm 0.5$  mm, 满足焊接装车要求。该研究表明, 辊冲成形工艺可以在室温下成形超高强钢车身变截面梁类零件, 有助于推动其在超高强钢市场的应用。

**关键词:** 超高强钢; 辊冲成形; 电动车座椅横梁; 起皱; 尺寸精度

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.09.009

**中图分类号:** TG335

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 09-0051-07

## Simulation and experiment research on chain-die forming of EV seat beam

Liu Yang<sup>1</sup>, Zou Tianxia<sup>1</sup>, Liang Zhenye<sup>1</sup>, Qian Zhen<sup>2</sup>, Li Dayong<sup>1</sup>, Xiao Hua<sup>3,4</sup>, Shi Lei<sup>3,4</sup>, Zhou Guowei<sup>5</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. School of Mechanical and Mining Engineering, University of Queensland, Queensland 4072, Australia;

3. Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China;

4. State Key Laboratory of Development and Application Technology of Automotive Steels (Bao Steel), Shanghai 201900, China;

5. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of many forming defects and low dimensional accuracy for the seat beam of ultra-high strength steel by traditional thin sheet forming process, a two-pass chain-die forming process scheme was proposed, and the corresponding finite element model was established by Abaqus/Standard. Then, the strain distribution, forming load and section shape of part during the chain-die forming process were analyzed. The simulation results show that there are no wrinkles and cracks on the part after chain-die forming, and the dimensions of the transverse and longitudinal sections for the part are relatively consistent with the target. Based on the existing chain-die forming unit, the two-pass chain-die forming experiment of EV seat beam was carried out, and the key dimensions of formed parts were measured. The dimensional deviation of flange outer contour is less than  $\pm 0.5$  mm, which meets the requirement of welding. The research results show that the chain-die forming process can form variable-section beam parts of ultra-high strength steel body at room temperature, which is helpful to promote its application in the ultra-high strength steel market.

**Key words:** ultra-high strength steel; chain-die forming; EV seat beam; wrinkle; dimensional accuracy

近年来, 面对环境恶化和能源危机, 越来越多

的车企开始优化车身结构、采用新型轻质材料和先进工艺来实现汽车轻量化<sup>[1-2]</sup>, 降低车辆油耗。超高强钢由于比强度高、综合制造成本低, 是汽车结构件轻量化的理想材料。但是超高强钢给传统的薄板成形工艺带来了巨大挑战, 例如冷冲压成形过程中的成形载荷高, 模具容易磨损<sup>[3]</sup>; 热冲压成形过程中, 板料需要进一步加热, 增加了能源消耗, 提

收稿日期: 2021-08-30; 修订日期: 2021-12-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1860110)

作者简介: 刘 洋 (1997-), 男, 博士研究生

E-mail: liuyang0312@sjtu.edu.cn

通信作者: 李大永 (1973-), 男, 博士, 教授

E-mail: dyli@sjtu.edu.cn

高了制造成本。

辊冲成形是一种新颖的渐进成形工艺,可以在常温条件下,以较小的成形载荷成形超高强度零件。Zhang Y K 等<sup>[4]</sup>通过仿真探究了辊冲成形 U 形件过程中不同翼缘高度对于冗余应变的影响,证明了辊冲成形相对于辊弯成形具有冗余应变小的优势。Sun Y 等<sup>[5]</sup>采用了响应面的方法对辊冲成形 U 形件的最大纵向应变进行了分析,结果表明, U 形件的翼缘高度对于纵向应变的影响最大。Li Y G 等<sup>[6]</sup>建立了高强度 Chaboche-HV 模型,提高了辊冲成形 U 形件的回弹预测精度。黄慧琳等<sup>[7]</sup>采用随动硬化模型探究了材料屈服强度等材料参数和摩擦因数等工艺参数对于辊冲成形 U 形件峰值纵向应变的影响。梁振业等<sup>[8]</sup>分析了仿真参数对于辊冲成形过程中帽形件回弹角度的影响规律。Sun Y 等<sup>[9]</sup>基于几何形状,建立了辊冲成形过程中纵向应变的解析模型,并通过试验和仿真验证了该解析模型的准确性。李亚光等<sup>[10]</sup>采用正交试验对辊冲成形中腹板翘曲现象、张口缺陷、边波缺陷的影响因素进行了分析。Qian Z 等<sup>[11]</sup>建立了 4 道次辊冲成形生产线,并优化了辊冲成形机支撑柱的几何尺寸,提高了成形过程的稳定性。Li Y G 等<sup>[12]</sup>通过有限元仿真,验证了采用辊冲成形工艺制造变深度和变高度零件的可行性。Sun Y 等<sup>[13]</sup>建立了变宽度零件的纵向塑性应变和纵向翘曲

的解析模型,通过仿真和试验证明了该解析模型具有较高的计算效率和精度。

目前,辊冲成形工艺的研究主要集中在制造等截面零件和变截面缩比件,鲜有涉及到实际零件的制造过程。本文针对电动汽车中典型变截面梁类零件——座椅横梁,首先提出了采用辊冲成形该零件的制造方案,然后进行了两道次辊冲成形有限元仿真并分析了辊冲成形工艺的可行性,最后开展了辊冲成形试验与样件的制备。

## 1 辊冲成形工艺

辊冲成形机主要由模具块、链节、驱动齿轮、履带板等组成,如图 1 所示<sup>[10]</sup>。辊冲成形工艺的主要特征是将传统的冲压整体模具离散化处理,形成多对模具块。通过驱动齿轮和链节带动模具块绕具有巨大虚拟半径的圆弧旋转并逐步啮合,进而成形板料。辊冲成形机上的模具块具有较强的灵活性,可以根据目标零件的形状进行设计,具有制造变截面零件的能力。此外,由于模具被单元化处理,模具的维修成本降低,仅需要维护已经磨损部分的模具块即可。该工艺继承了冲压模具的灵活性和辊弯成形的运动连续性,某种程度上算是一种辊压与冲压的复合工艺<sup>[10]</sup>。

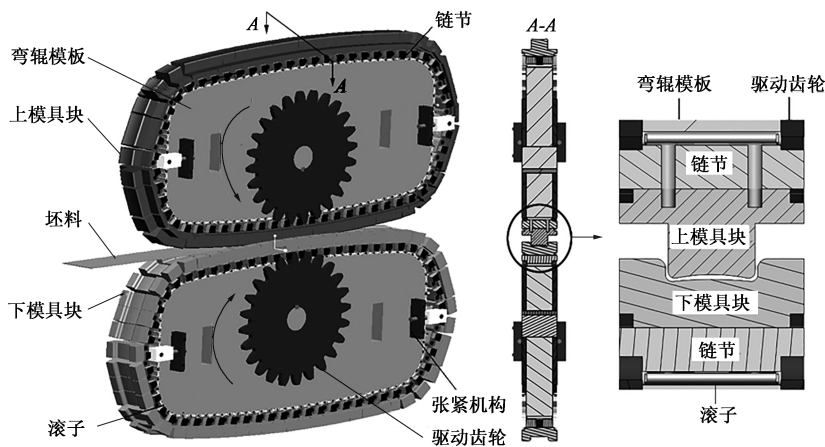


图 1 辊冲成形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of chain-die forming

## 2 座椅横梁结构分析与辊冲成形工艺方案

本文研究对象座椅横梁的三维模型如图 2 所示。该零件的长度约为 1.5 m,采用的材料为厚度为

1.4 mm 的 QP1500 超高强度钢。该零件具有马鞍面特征和变宽度开口特征,成形过程中可能会出现起皱、破裂等缺陷。零件腹板上具有连续的凸包特征,用于与其他零件的安装。

由于该零件的深度较大 (65 mm),同时为满足零件精度的要求,本文将采用如图 3 所示的两道次

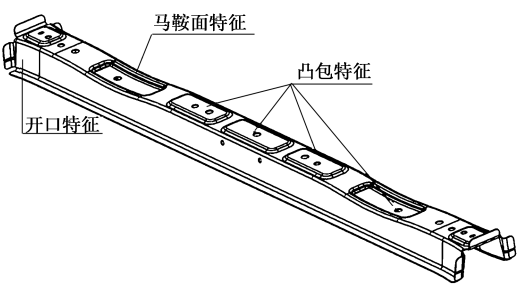


图 2 电动汽车座椅横梁的三维模型  
Fig. 2 Three-dimension model of EV seat beam

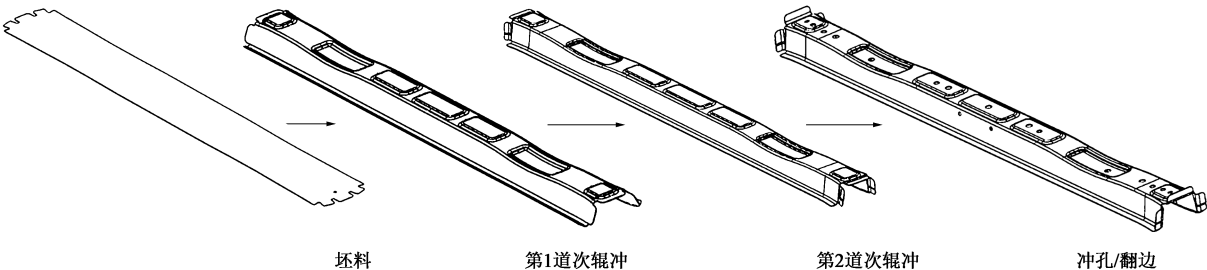


图 3 辊冲成形工艺流程图  
Fig. 3 Flow chart of chain-die forming process

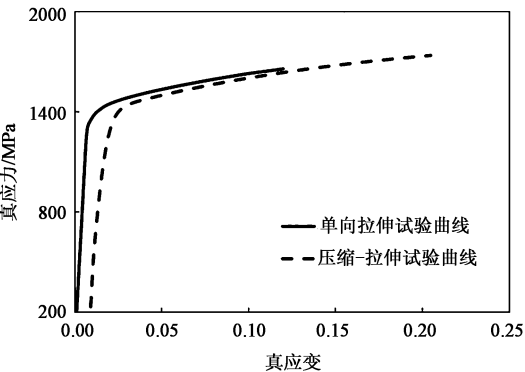


图 4 QP1500 超高强钢的单向拉伸与压缩-拉伸试验曲线  
Fig. 4 Uniaxial tensile and compression-tensile test curves of QP1500 ultra-high strength steel

于超高强钢普遍具有明显的包辛格效应，本文采用包含 3 项背应力的 Chaboche 模型来描述 QP1500 超高强钢的材料特性。材料模型中的参数可以通过材料的试验数据拟合得到，如表 1 所示。其中， $c_i$  和  $\gamma_i$  为随动硬化分量的第  $i$  组 ( $i=1, 2, 3$ ) 背应力参数，为材料常数， $Q$  为塑性应变无穷大时的饱和应力， $b$  为等向强化应力的饱和速率。

表 1 QP1500 超高强钢的 Chaboche 模型拟合参数  
Table 1 Fitting parameters for Chaboche model of QP1500 ultra-high strength steel

参数	$c_1/\text{MPa}$	$\gamma_1$	$c_2/\text{MPa}$	$\gamma_2$	$c_3/\text{MPa}$	$\gamma_3$	$Q/\text{MPa}$	$b$
数值	2904	6.4	26968.7	326.6	664473.6	3986.8	51.5	108.1

辊冲成形工艺方案进行制造。第 1 道次辊冲成形过程主要成形腹板上的局部特征；第 2 道次辊冲成形过程进一步弯曲板料至目标角度；最后将辊冲成形后的零件放置到冲压机上进行冲孔和翻边。

3 两道次辊冲工艺仿真分析

3.1 材料模型

试制过程中的 QP1500 超高强钢板由宝山钢铁股份有限公司提供。QP1500 超高强钢的单向拉伸和压缩-拉伸的真应力-真应变曲线如图 4 所示。由

3.2 有限元模型

本文利用 ABAQUS/Standard 建立两道次辊冲成形有限元模型，如图 5 所示。第 1 道次的成形坯料为平板，第 2 道次的成形坯料是第 1 道次辊冲成形变形后的单元结果。为了保证仿真的准确性与连贯性，第 2 道次仿真开始时的应力与应变场继承了第 1 道次仿真结束时的应力与应变场。

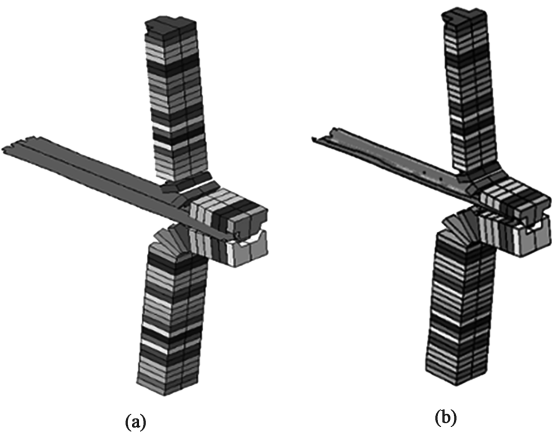


图 5 两道次辊冲成形有限元模型  
(a) 第 1 道次 (b) 第 2 道次

Fig. 5 Finite element models of two-pass chain-die forming  
(a) The first pass (b) The second pass

由于该零件的几何、边界条件对称，本文采用 1/2 几何模型进行建模。辊冲成形过程中模具块运动轨迹

的虚拟圆弧半径设定为 40 m。板料初始设置为静止状态,随后给上、下模具块添加大小相同、方向相反的速度载荷,以带动板料进行成形与脱模。板料采用 C3D8R 实体单元,厚度方向采用 3 层单元。由于成形过程中板料上对应腹板的局部特征、弯曲圆角等区域变形剧烈,需要将网格在这些地方做精细化处理,最终板料划分为 140412 个单元。仿真中模具块划分为 R3D4 离散刚体单元。为了提高仿真计算效率,对板料上接触面进行划分,使得每一块模具仅与板料上与之对应的表面有接触定义<sup>[14]</sup>。板料和模具块之间的摩擦采用 Coulomb 摩擦模型,摩擦因数设定为 0.1<sup>[6]</sup>。

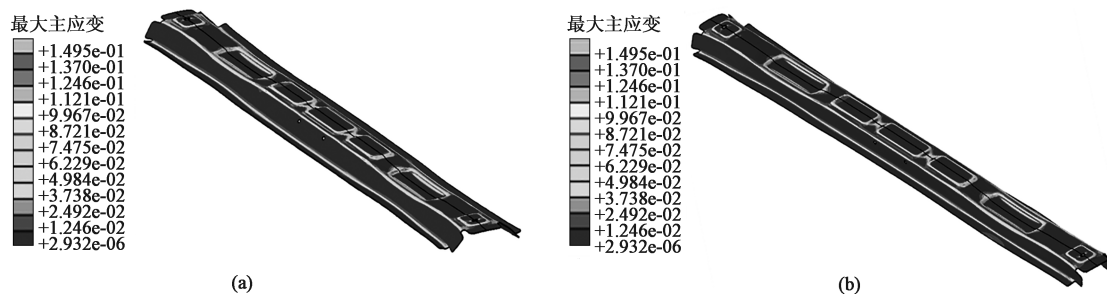


图 6 最大主应变分布云图

(a) 第 1 道次 (b) 第 2 道次

Fig. 6 Distribution cloud maps of maximum principal strain

(a) The first pass (b) The second pass

零件上的马鞍面特征在成形过程中由于材料的不均匀流动会使法兰产生较大的纵向压应变,进而可能会诱发起皱缺陷。零件上的纵向应变分布如图 7 所示。仿真中如果法兰出现褶皱现象时,上下两个表面的纵向应变将会出现差值,本文将该差值定义为弯曲应变 $\varepsilon_{\text{弯曲}}$  ( $\varepsilon_{\text{弯曲}} = \varepsilon_{\text{上}} - \varepsilon_{\text{下}}$ ,其中, $\varepsilon_{\text{上}}$ 和 $\varepsilon_{\text{下}}$ 分别为法兰上、下表面上最外侧节

点的纵向应变)。图 8 为两道次辊冲成形中法兰最外侧节点的弯曲应变随着成形进度的变化历程。由于辊冲成形过程中板料渐变成形,本身会造成一定弯曲应变。仿真结果中弯曲应变在一定小范围内波动,最终趋近于零。这说明两道次辊冲成形过程中板料变形较为平稳,法兰不会产生起皱缺陷。

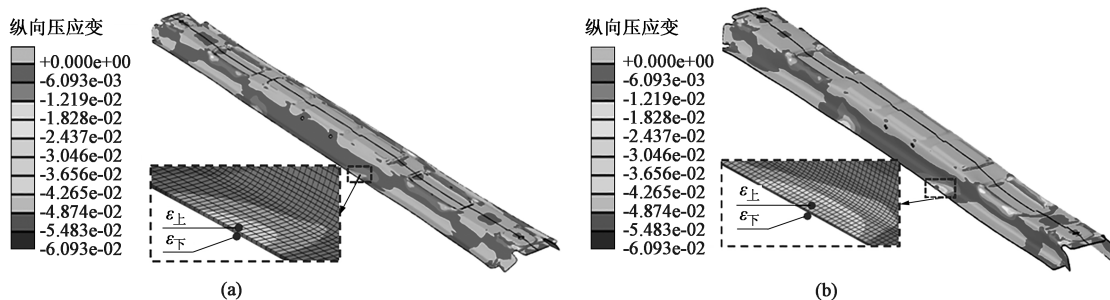


图 7 纵向压应变分布云图

(a) 第 1 道次 (b) 第 2 道次

Fig. 7 Distribution cloud maps of longitudinal compressive strain

(a) The first pass (b) The second pass

### 3.3.2 成形载荷分析

在仿真中可以提取到每块模具的反作用力,线性叠加后即可得到该道次的辊冲成形机受到的成

### 3.3 仿真结果分析

#### 3.3.1 应变分析

通过分析辊冲成形过程中零件的应变分布,可以评价模具设计的合理性并对成形过程中的开裂和起皱等成形缺陷进行预测。从图 6 可以看出,零件上局部特征圆角处的最大主应变数值较大,但是仍小于 QP1500 超高强钢的伸长率,所以在成形过程中零件破裂的风险较低。此外,由于辊冲成形模具运动轨迹的虚拟半径较大,零件上侧壁的最大主应变较小,有助于保证辊冲成形后零件的尺寸精度。

形载荷。如图 9 所示,每道次成形过程中,辊冲成形机受到的成形载荷首先逐步增大;然后当第一对模具经过运动轨迹的最低点后,成形载荷到达饱和



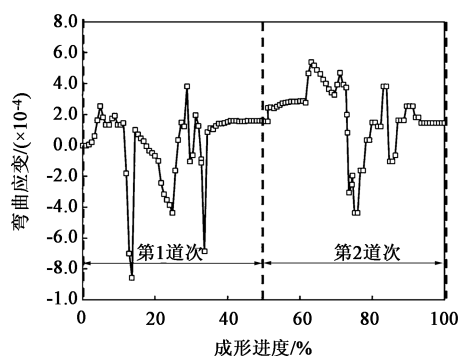


图8 法兰最外侧节点的弯曲应变变化曲线

Fig. 8 Variation curve of bending strain at outermost node for flange

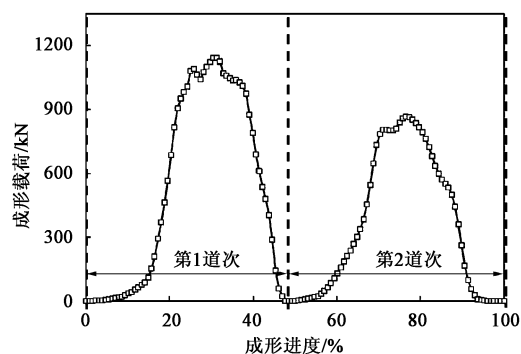


图9 辊冲成形机受到的成形载荷变化曲线

Fig. 9 Variation curve of forming load on chan-die forming machine

值；随着模具块逐步脱开模具，成形载荷平稳降低，最终在道次结束时，成形载荷归零。两个辊冲成形道次在稳定工作时的载荷分别为 1180 和 920 kN。第1道次时，由于主要成形腹板上具有凸包和马鞍面特征，成形较为剧烈，需要较大的成形载荷。通过仿真可以看出，辊冲成形是一种冷成形、低载荷成形技术。这种优势会减小机架变形，有助于超高

强钢零件成形精度的控制，降低成形设备的刚度要求。

### 3.3.3 截面形状分析

将辊冲成形的仿真结果和目标零件依次导入三维分析软件 Geomagic Qualify 中进行最小二乘法拟合，截取重要横、纵截面进行对比，截取的位置如图10a所示。从图10b、图10c和图10d中可以

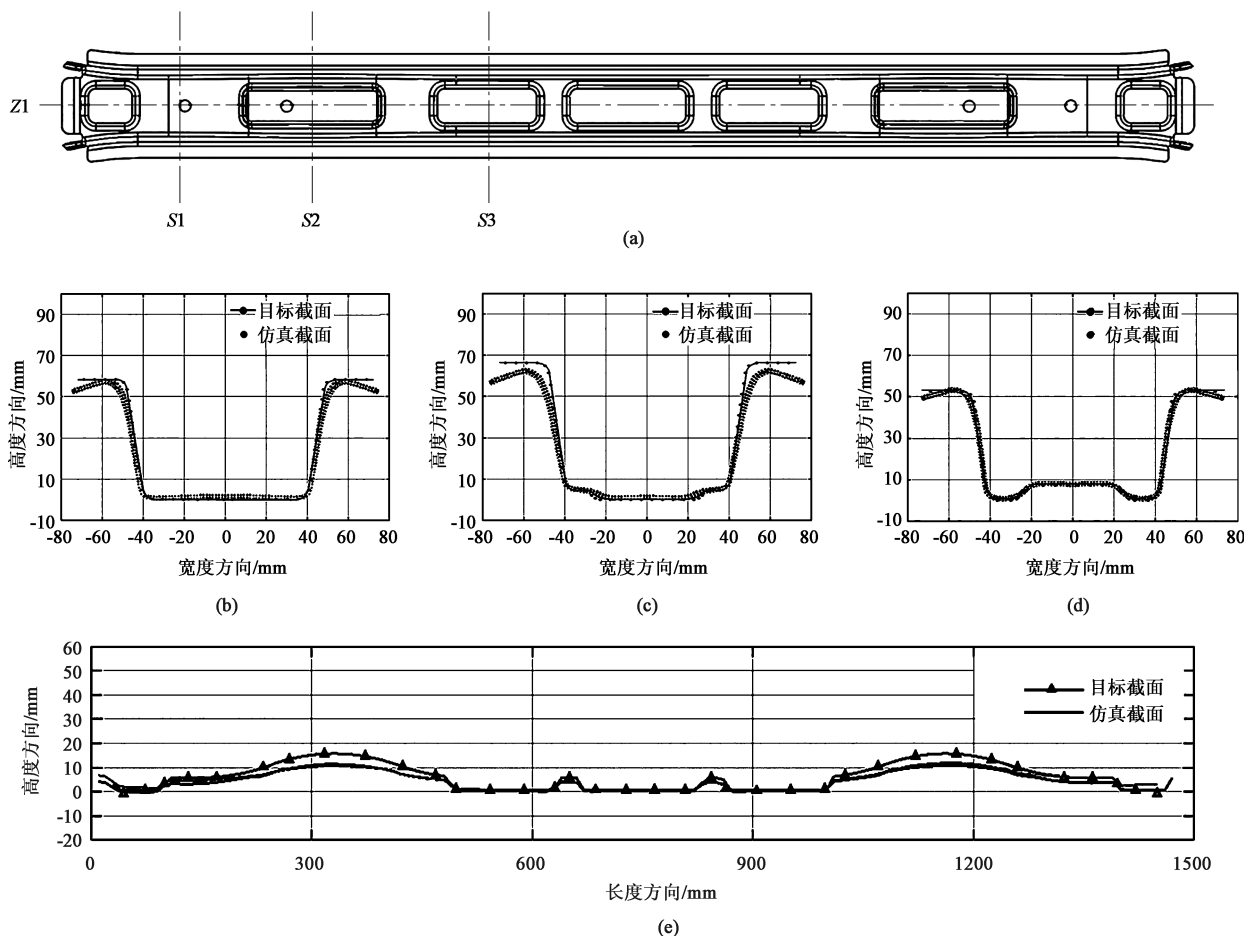


图10 仿真结果和目标零件的截面尺寸对比结果

(a) 截面位置 (b) S1截面 (c) S2截面 (d) S3截面 (e) Z1截面

Fig. 10 Comparison results of section dimensions between simulation results and target parts

(a) Section locations (b) Section S1 (c) Section S2 (d) Section S3 (e) Section Z1

看出,零件的腹板角度基本满足设计要求,侧壁未出现过量的反弧缺陷。法兰角度存在一定的过补偿。从图 10e 可以看出,腹板上凸包特征的纵向位置与目标一致,并且左右对称。马鞍面凸包特征的高度与目标有一定偏差,为 2.9 mm,但是该特征高度的尺寸精度要求不高。综合分析零件的截面尺寸,可以认为两道次辊冲成形工艺的道次角度分配较为合理,模面设计符合目标零件要求。从仿真角度证明了辊冲工艺可以作为一种超高强钢电动汽车座椅横梁的制造方案。

#### 4 辊冲成形试验与样件制备

图 11 为成形座椅横梁零件所需要的辊冲成形模具块,将其安装在辊冲成形设备上。试验过程中模具块的运动轨迹与仿真设定一致,上、下模具块在轨迹最低点时的啮合间隙调整为板料厚度,完成试验准备阶段。

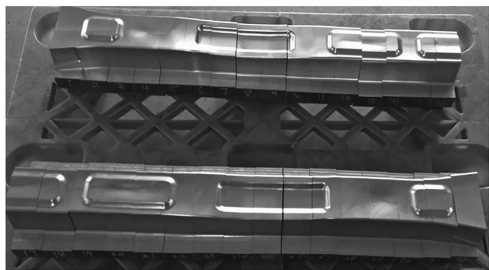


图 11 辊冲成形模具块

Fig. 11 Die blocks of chain-die forming

电动汽车座椅横梁零件经过两道次试制后,成形结果如图 12a 所示。零件的圆角处未发生破裂缺陷,法兰处也未发生起皱缺陷。试验结果说明了仿真中对应变分析的准确性。经过冲孔之后的零件如图 12b 所示。对其中 5 件零件使用专用检具进行外轮廓尺寸检测,检测位置见图 12a,结果汇总于表 2。检测结果表明,零件法兰的外轮廓尺寸偏差小于  $\pm 0.5$  mm,满足产品焊接装车的要求<sup>[15]</sup>。

#### 5 结论

(1) 本研究提出了电动汽车座椅横梁的两道次辊冲成形工艺方案,成功制备了 QP1500 超高强钢座椅横梁零件,其成形精度满足焊接装车要求。

(2) 通过试验验证了本文建立的两道次辊冲成形有限元模型具有较高的准确性,可以用于评价成



(a)



(b)

图 12 电动汽车座椅横梁制造结果

(a) 两道次辊冲成形后的零件 (b) 冲孔后零件

Fig. 12 Manufacture results of EV seat beam

(a) Parts formed by two-pass chain-die forming

(b) Parts after punching

表 2 法兰外轮廓尺寸偏差检测结果 (mm)

Table 2 Detection results of dimension deviation for flange outline (mm)

产品 序号	检测位置							
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
1	-0.3	-0.4	0.2	0.5	-0.2	0.2	0.0	0.1
2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.2
3	0.5	0.4	0.5	0.3	-0.5	-0.4	-0.5	0.2
4	0.2	0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.3	0.4
5	0.4	0.5	0.3	0.4	0.5	-0.5	-0.4	-0.5

形过程中破裂和起皱的风险。

(3) 辊冲成形作为一种典型的渐进成形工艺,能够以较低的成形载荷实现超高强钢的冷成形,为实现汽车轻量化提供了一种有效途径。

#### 参考文献:

- [1] 田凯. 电动汽车碳纤维复合材料保险杠防撞梁轻量化设计 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.  
Tian K. Lightweight Design of Carbon Fiber Composite Bumper Impact Beam for Electric Vehicles [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [2] 刘清梅, 封娇洁. 汽车轻量化条件下先进高强钢的发展及现状 [J]. 轧钢, 2020, 37 (4): 65-70, 90.  
Liu Q M, Feng J J. Development and current situation of advanced high-strength steel under the condition of automobile light weight [J]. Steel Rolling, 2020, 37 (4): 65-70, 90.
- [3] 裴永生, 张世哲, 孟宁. QP980 超高强钢 A 柱补强板冲压成形性能分析 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (12): 28-33.

- Pei Y S, Zhang S Z, Meng N. Stamping formability analysis of QP980 ultra-high strength steel A-pillar reinforcement plate [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (12): 28-33.
- [4] Zhang Y K, Ding S C. Parametric study on chain-die forming for advanced high strength steels [J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2013, 47 (1/2/3/4): 138-149.
- [5] Sun Y, Li Y G, Liu Z B, et al. Experimental investigation and prediction of the maximum edge longitudinal membrane strain and springback of Chain-die-formed AHSS U-channels using response surface methodology [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90 (5-8): 1963-1976.
- [6] Li Y G, Liang Z Y, Zhang Z H, et al. An analytical model for rapid prediction and compensation of springback for chain-die forming of an AHSS U-channel [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 159: 195-212.
- [7] 黄慧琳, 李亚光, 丁士超, 等. 高强度 U 型槽钢链模成形有限元仿真分析 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (6): 8-13.  
Huang H L, Li Y G, Ding S C, et al. Finite element simulation of chain-die forming for U-profiled advanced high strength steel products [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (6): 8-13.
- [8] 梁振业, 杨浩, 肖华, 等. 先进高强钢帽形件链模成形数值模拟 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (7): 103-106, 116.  
Liang Z Y, Yang H, Xiao H, et al. Numerical simulation on the chain-die forming of hat-shaped part for advanced high strength steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (7): 103-106, 116.
- [9] Sun Y G, Li Y G, Daniel W J T, et al. Longitudinal strain development in Chain-die forming AHSS products: Analytical modelling, finite element analysis and experimental verification [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243: 322-334.
- [10] 李亚光, 李大永, 丁士超, 等. 先进高强钢 U 型件链模成形缺陷机理分析及影响因素研究 [J]. 锻压技术, 2019, 44 (7): 62-71.  
Li Y G, Li D Y, Ding S C, et al. Research on defect mechanism and influential factors in chain-die forming for U-shaped part of advanced high strength steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2019, 44 (7): 62-71.
- [11] Qian Z, Wang C, An K, et al. Investigation of the forming load in the chain-die forming process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 70-82.
- [12] Li Y G, Sun Y, Huang H L, et al. Finite element simulation of chain-die forming U profiles with variable cross-section [J]. Materials Science Forum, 2017, 4502: 1177-1182.
- [13] Sun Y, Qian Z, Daniel W J T, et al. Analytical and numerical analyses of the longitudinal plastic strain and web-warping in Chain-die-formed AHSS sections with variable widths [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92 (1-4): 1147-1164.
- [14] 尤彬波, 林楷, 谢育涛, 等. A 柱加强板热成形拐角开裂起皱优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 105-110.  
You B B, Lin K, Xie Y T, et al. Optimization on wrinkle and crack at corner of A-pillar reinforcement panel in thermoforming [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 105-110.
- [15] 李仁威, 左治江, 李涵, 等. 基于双目视觉及激光测量融合的冲压件在线尺寸测量 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (12): 203-209.  
Li R W, Zuo Z J, Li H, et al. On-line dimension measurement of stamping parts based on fusion of binocular vision and laser measurement [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (12): 203-209.

