

## 超宽对称式三辊滚弯工艺上辊挠度补偿优化

张芷娟, 施宇杰, 张浩稼, 鲁世红  
(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 针对超宽对称式三辊滚弯机的上辊受板材成形力的反作用力作用, 挠曲变形较为明显, 从而导致成形板材精度不足的问题, 对上辊的受力变形进行分析, 并利用 ABAQUS 有限元分析软件对超长铝合金板材滚弯工艺进行三维动态仿真。为解决仿真中圆柱体刚性支撑与可变形上辊间的穿透现象, 设计开发了有效的补偿结构——一种可简化为支撑块的绕上辊环形分布的多辊支撑结构。相较于传统的双辊支撑结构, 多辊支撑结构模型减小上辊挠度的效果更优, 且其简化的支撑块模型有效地消除了穿透现象。利用有限元法结合响应曲面法, 探究支撑块各物理参数对上辊挠度补偿的影响规律, 结果表明, 上辊最大挠度随着支撑块组数、长度、宽度的增加而减小; 并基于优化目标设计支撑块的最优参数组合。

**关键词:** 超宽; 对称式; 滚弯; 挠度; 双辊支撑结构; 多辊支撑结构

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.01.022

**中图分类号:** TH161 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 01-0173-09

## Compensation optimization on upper roller deflection in super wide symmetrical three-roller roll bending process

Zhang Zhijuan, Shi Yujie, Zhang Haojia, Lu Shihong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** For the problem of insufficient accuracy of the formed plate caused by the obvious deflection deformation, which because the upper roller of super wide symmetrical three-roller roll bending machine was affected by the reaction force of plate forming force, the force deformation of the upper roller was analyzed, and the 3D dynamic simulation of the roll bending process of the ultra-long aluminum alloy plate was carried out by finite element analysis software ABAQUS. Then, in order to solve the penetration phenomenon between the rigid cylindrical support and the deformable upper roller in simulation, an effective compensation structure was designed and developed, namely, a multi-roller support structure distributed annularly around the upper roller was simplified to a support block. Compared with the traditional two-roller support structure, the multi-roller support structure model had a better effect on reducing the upper roller deflection, which effectively eliminated the penetration phenomenon. Furthermore, the finite element method combined with the response surface method was used to investigate the influence laws of physical parameters for the support block on the deflection compensation of the upper roller. The results show that the maximum deflection of the upper roller decreases with the increasing of the number, length and width of the support block. And the optimal parameter combination of the support block was designed based on the optimization objective.

**Key words:** super wide; symmetrical; roll bending; deflection; two-roller support structure; multi-roller support structure

三辊滚弯机是将板材卷制为圆柱形、圆锥形或筒形的专用加工成形设备, 是制备飞机蒙皮、船身船舷等钣金零件的关键成形设备, 是航空、船舶、石油化工、锅炉等行业中必不可少的高档设备<sup>[1]</sup>。一般细长轴是指辊轴的长度与其直径之比大于 20~25, 而本文的上辊长度为 8400 mm, 直径为  $\Phi 75$  mm,

长度与直径之比约为 112, 属于超宽细长轴。针对超宽对称式三辊滚弯成形工艺, 由于存在超长跨度的辊轴, 其加工的主要难点有上辊的挠曲变形、超长上辊两端电机不同步产生的扭转变形等。在实际滚弯加工过程中, 上辊在自身重力和板材成形力的反作用力的共同作用下产生挠曲变形, 导致板材轴向方向成形压力分布不均, 从而影响成形精度, 所以研发超宽对称式三辊滚弯机的重大技术难点之一是解决超宽上辊挠度问题。

对于上辊挠度的优化问题, 国内外学者不断探索更优的解决方法, 提出了挠度补偿的理念, 并对

收稿日期: 2023-08-24; 修订日期: 2023-11-22

作者简介: 张芷娟 (1999-), 女, 硕士研究生

E-mail: 18651881501@163.com

通信作者: 鲁世红 (1964-), 女, 博士, 教授

E-mail: lush@nuaa.edu.cn

其开展了具体的分析和完善。宋坤<sup>[2]</sup>分析了无补偿状态、单辊支撑结构补偿状态和双辊支撑结构补偿状态 3 种状态下四辊卷板机侧辊的挠曲变形程度。结果表明,两种补偿结构均能减小侧辊 50% 以上的最大挠度变形量,且双辊支撑结构的挠度补偿效果更好,并设计了一种四辊卷板机侧辊双辊支撑结构挠度补偿装置。王新宇<sup>[3]</sup>建立了四辊卷板机下辊理论挠度曲线,并利用仿真模拟验证了其准确性,设计了一种双辊支撑结构的挠度补偿装置。陈兰<sup>[4]</sup>、郑九华等<sup>[5]</sup>提出了一种可调整式多点支撑实时自动补偿方法:在上辊和机架中间安装一系列支撑辊,通过在机架安装独立的位移传感器,实现高效、精确的实时自动挠度补偿。甄诚等<sup>[6]</sup>使用逆推思维,计算出上辊所受的最大反作用力,利用二维模拟分析得出上辊挠度曲线,提出一种不可调的挠度补偿方法,即减小上辊两端的直径。柳建明<sup>[7]</sup>同样使用逆推法,假定滚弯过程中上辊在 4 个支撑辊补偿作用下的最大理论挠度为已知量,模拟分析当上辊仿真挠度接近假定的最大理论挠度时,4 个支撑辊施加在上辊的集中力大小,并基于这组力优化上辊横梁结构。Maklakova E A 等<sup>[8]</sup>分析总结了两种避免轧辊弯曲的方法:(1) 建立工作辊弯辊系统,在工作辊附加一个液压缸控制系统,在滚弯过程中,液压缸对工作辊施加压力以补偿工作辊挠度;(2) 将中空的工作辊置于电磁场中,辊内部安装一个能够沿辊中心轴移动的特殊活塞。周迟<sup>[9]</sup>推导了四辊滚弯机下辊的挠度理论公式,利用有限元法优化支撑辊的组数、位置及载荷分布,从而控制下辊挠度变形值。但现存的研究中,鲜有关于上辊挠度补偿结构及各参数的研究,因此,为了完善超宽滚弯成形加工工艺,采用有限元模拟和优化分析相结合的方法探究支撑结构及参数对上辊挠度补偿的影响,不失为一种非常有价值的举措。

本文基于超宽对称式三辊滚弯机的工作机理,对滚弯机上辊建立力学模型并进行挠度分析,设计一种上辊挠度补偿结构,并以超宽对称式三辊滚弯机加工长度为 8 m 的 2A12-T4 铝合金板材工艺过程为例,利用 ABAQUS 仿真软件建立有限元模型,探究支撑块的组数、长度、宽度等参数对挠度的影响规律,并合理设计优化上辊支撑块的组数、长度、宽度的参数组合,以减小上辊挠曲变形,提高板材成形精度。

## 1 滚弯数学模型

传统滚弯工艺多采用对称式三辊滚弯成形技术,

其工艺形式简单、设备要求低、应用面广。但缺点是不能进行端部预弯,成形后板材两端存在一段直边。

在对称式三辊滚弯成形的基础上,通过更改辊子的位置分布能够实现非对称式滚弯成形。非对称式三辊滚弯成形技术具有成形精度高、可加工板材厚度范围广等优势,且非对称式三辊滚弯成形后的板材不存在两端直边。

对称式三辊滚弯机由一个上辊和两个下辊组成,3 个辊均为驱动辊,其成形原理图如图 1 所示,其中, $r_1$ 、 $r_2$  分别为一个上辊和两个下辊的半径, $R$  为板材滚弯半径( $O$  为圆心), $t$  为板材厚度, $a$  为下辊中心距, $d_p$  为上辊下压量, $O_2$ 、 $O_3$  为下辊的重心。板材水平置于辊间,上辊在液压系统作用下向下运动(重心由  $O_1$  变为  $O_1'$ ),使板材产生一定的弹塑性变形<sup>[10]</sup>;上下辊在电机驱动下发生转动,板材与辊轴间的摩擦力驱动板材跟随进给,从而实现板材连续的滚弯运动<sup>[11-12]</sup>。

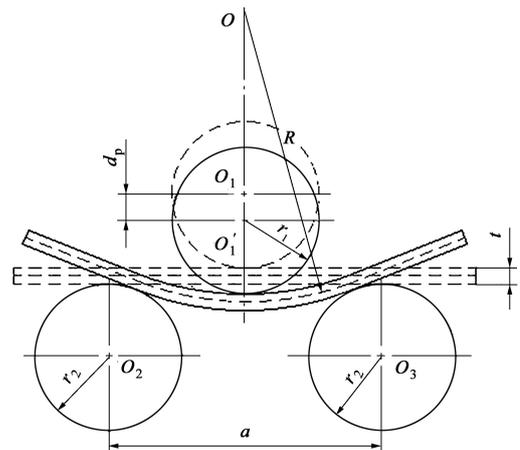


图 1 对称式三辊滚弯工艺原理图

Fig. 1 Principle diagram of symmetrical three-roller roll bending process

基于对称式三辊滚弯工艺的特性,首先提出两点假设<sup>[13]</sup>:

(1) 针对滚弯过程中的板材理论成形载荷,板材与上辊的切向摩擦力忽略不计,用法向正压力近似代替板材成形过程中的工作载荷;

(2) 板料的中面层、中性层、无伸长层在加工过程中始终重合。

鉴于以上两点假设,可以对对称式三辊滚弯过程中工作辊的受力情况和变形情况进行理论分析。

### 1.1 上、下辊角速度的关系

选取滚弯过程的一部分进行剖析,如图 2 所示。其中,上、下辊在时间  $t_1$  内旋转过的弧长分别为  $L_1$ 、 $L_2$ ,上、下辊在时间  $t_1$  内旋转过的角度分别为  $\alpha_1$ 、

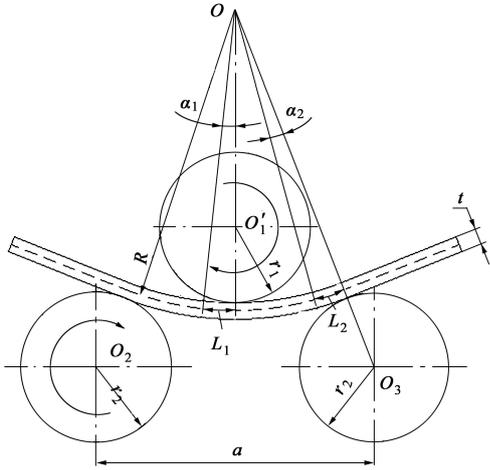


图 2 上辊与下辊角速度关系推导原理图

Fig. 2 Principle diagram of derivation for angular speed relation between upper and lower rollers

$\alpha_2$ 。上辊在电机的驱动下顺时针旋转，两下辊逆时针转动，辊轴与板材间的摩擦力驱动板材向左进给。

则有：

$$\begin{cases} L_1 = \left(R - \frac{t}{2}\right) \times \alpha_1 \\ L_2 = \left(R + \frac{t}{2}\right) \times \alpha_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} L_1 = \omega_1 \times t_1 \times r_1 \\ L_2 = \omega_2 \times t_1 \times r_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\omega_1$ 、 $\omega_2$  分别为上辊、下辊的角速度。

滚弯过程中上、下辊同步旋转，依图 2 中几何关系可知  $\alpha_1 = \alpha_2$ ，联立式 (1) 与式 (2)，得：

$$\omega_2 = \frac{\left(R + \frac{t}{2}\right) \times \omega_1 \times r_1}{\left(R - \frac{t}{2}\right) \times r_2} \quad (3)$$

## 1.2 上辊反作用力

当板材被滚弯为一定曲率的工件时，板材结构的内部应力已全部达到材料的屈服极限，此时其变形为纯塑性变形，则板材在滚弯阶段的弯矩  $M$  为：

$$M = \left(K_1 + \frac{K_0 t}{2R}\right) R_{el} \frac{bt^2}{4} \quad (4)$$

式中： $b$  为板材的宽度； $R_{el}$  为材料的屈服强度； $K_1$  为材料的硬化修正系数， $K_1 = 1.10 \sim 1.25$ ； $K_0$  为板材截面形状系数。

根据静力学平衡得到滚弯时板材对上辊的反作用力为：

$$N_1 = F_1 = \frac{2M}{R \tan \theta} = \frac{(2K_1 R + K_0 t) R_{el} bt^2}{4R^2 \tan \theta} \quad (5)$$

式中： $N_1$  为滚弯时板材对上辊的反作用力； $F_1$  为上辊下压力； $\theta$  为  $OO_3$  与  $OO'_1$  的夹角， $\theta = \arcsin \frac{a}{2R + D_2}$ ； $D_2$  为下辊直径。

## 1.3 挠度

### 1.3.1 无支撑下的上辊挠度分析

单独取上辊进行受力分析，将上辊简化为二维简支梁 ( $AB$ ) 模型，令  $A$  点为坐标原点，以水平向右为  $X$  轴正方向，以竖直向下为  $Y$  轴正方向。将滚弯过程中板材对上辊的反作用力  $N_1$  看作作用在上辊的均布载荷  $q_1$ ，将上辊自身重力  $G$  看作作用在上辊的均布载荷  $q_2$ ，如图 3 所示。则有：

$$\begin{cases} q_1 = \frac{N_1}{b} \\ q_2 = \frac{G}{L} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $L$  为上辊长度。

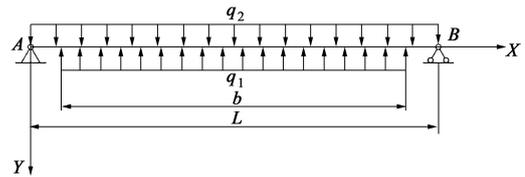


图 3 上辊简支梁受力模型

Fig. 3 Stress model of simply supported beam for upper roller

设均布载荷  $q_1$  和  $q_2$  单独作用于上辊的挠度变形值为  $y_{q1}$  和  $y_{q2}$ ，基于材料力学中的梁模型积分法<sup>[14]</sup>，得：

$$y_{q1} = \begin{cases} \frac{q_1 b}{48EI} [4x^3 + (b^2 - 3L^2)x], & 0 < x \leq \frac{L-b}{2} \\ -\frac{q_1}{48EI} \left[ 2\left(x - \frac{L-b}{2}\right)^4 - 4bx^3 + b(3L^2 - b^2)x \right], & \frac{L-b}{2} < x \leq \frac{L+b}{2} \\ -\frac{q_1 b}{48EI} [4(x-L)^3 + (b^2 - 3L^2)x + L(3L^2 - b^2)], & \frac{L+b}{2} < x \leq L \end{cases} \quad (7)$$

$$y_{q2} = \frac{q_2 x}{24EI} (x^3 - 2Lx^2 + L^3) \quad (8)$$

式中:  $E$  为材料弹性模量;  $x$  为积分点的横坐标;  $I$  为上辊截面惯矩,  $I = \frac{\pi d^4}{64}$ ;  $d$  为上辊直径。

由叠加原理可知, 上辊在反作用力均布载荷  $q_1$  和自身重力均布载荷  $q_2$  共同作用下的挠度为两者单独作用于上辊时产生的挠度之和, 则可得到上辊在  $q_1$  和  $q_2$  共同作用下的挠度  $y$  为:

$$y = y_{q_1} + y_{q_2} \quad (9)$$

### 1.3.2 有刚性支撑下的上辊挠度分析

设在上辊与上梁间建立支撑结构以减小上辊挠度变形, 其组数为  $n$  个。则上辊的受力模型如图 4 所示<sup>[8]</sup>, 其中,  $F_i$  为第  $i$  个支撑结构对上辊的作用力,  $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。取任意相邻两组刚体支撑结构间的一段  $A_i B_i$  进行受力分析, 如图 5 所示。其中,  $x_i$  为第  $i$  个支撑结构右端面与第  $(i+1)$  个支撑结构左端面之间的距离。

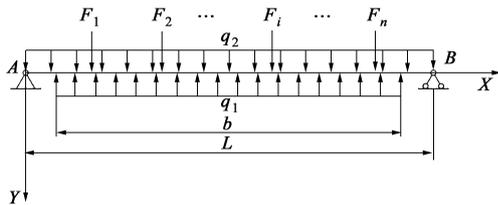


图 4 加支撑结构后上辊的力学模型

Fig. 4 Mechanical model of upper roller after adding support structure

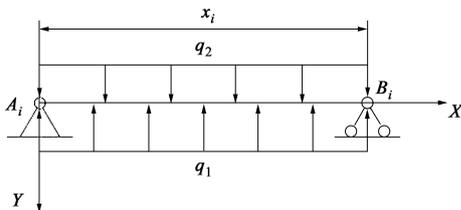


图 5 相邻两组刚体支撑结构间的力学模型

Fig. 5 Mechanical model between two adjacent groups of rigid support structures

则任意相邻两组刚体支撑结构间的上辊挠度  $y_i$  为:

$$y_i = \frac{(q_1 + q_2)x}{24EI} (x^3 - 2x_i x^2 + x_i^3) \quad (10)$$

从式 (10) 可以看出, 挠度大小在辊轴向上分布不均。以 8.4 m 超宽滚弯机为研究对象, 以上

辊最大挠度低于  $10 \mu\text{m}$  为优化目标, 对支撑结构及其物理参数进行优化设计。

## 2 滚弯数值模拟和分析方法

为了分析超长 2A12-T4 铝合金薄板滚弯过程中的支撑结构及其参数对上辊挠度变形的影响, 利用 ABAQUS 有限元仿真软件建立了基于 ABAQUS/Explicit-Standard 的有限元分析模型。

### 2.1 数值模拟

#### 2.1.1 滚弯有限元模型的建立

为了使得模拟接近实际中对称式三辊滚弯机的滚弯过程, 模型的尺寸与实际尺寸一致, 下辊的尺寸为  $\Phi 100 \text{ mm} \times 8400 \text{ mm}$ , 两下辊的中心距为 130 mm, 设置为刚体。考虑到上辊后续施加轴承约束, 上辊尺寸设置为  $\Phi 70 \text{ mm} \times 8400 \text{ mm}$ , 设单个刚性支撑结构长度为 100 mm, 与上辊接触配合限制其弯曲变形。成形所用板材的尺寸为  $8 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ , 为提升仿真效率<sup>[15]</sup>, 将其设置为壳单元, 壳厚度为 6 mm, 建立模型并装配, 如图 6 所示。

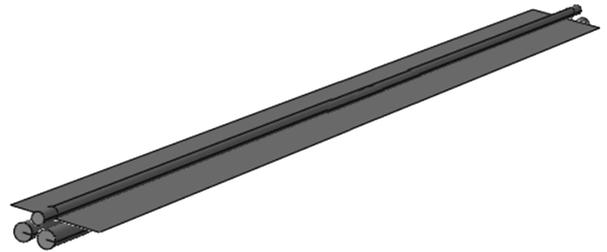


图 6 滚弯模型

Fig. 6 Model of roll bending

板材所用材料为 2A12-T4 铝合金, 密度为  $2800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 其他部件材料为高速钢, 密度为  $7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 假定板材为各向同性材料。有限元分析中 2A12-T4 铝合金采用 Johnson-Cook 材料本构模型, 而对于上辊, 由于只考虑挠度变形, 所以不考虑其塑性变形, 模型材料力学参数设置如表 1 所示。上辊与支撑结构的接触属性为切向无摩擦, 其余接触面的切向接触采用罚摩擦算法, 摩擦因数为 0.3, 而法向接触均采用硬接触。

表 1 材料的性能参数

Table 1 Performance parameters of material

材料	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	应变硬化系数/MPa	应变硬化指数	热软化指数
板材 (2A12-T4 铝合金)	73	0.33	350	470	0.730	1
上辊 (高速钢)	206	0.30	1200	1680	0.439	1

### 2.1.2 支撑结构的选择与建立

为了减少上辊挠度、提高板材成形精度，大型滚弯机的支撑结构一般采用双辊支撑结构，较单辊支撑结构更稳定，减小上辊挠度的效果更佳，如图 7a~图 7f 所示。

假设 3 种双辊支撑结构的辊长均为 100 mm 并沿上

辊轴向方向均匀分布，建立含刚性支撑结构的超宽对称式三辊滚弯有限元模型，探究支撑组数一定时，3 种双辊支撑结构对上辊最大挠度的影响。结果显示，无论何种双辊支撑结构，刚性圆柱体支撑与可变形上辊结构均发生穿透现象，即与刚性支撑结构发生接触的那一段上辊仍有较大挠度，各支撑结构对应的挠曲变

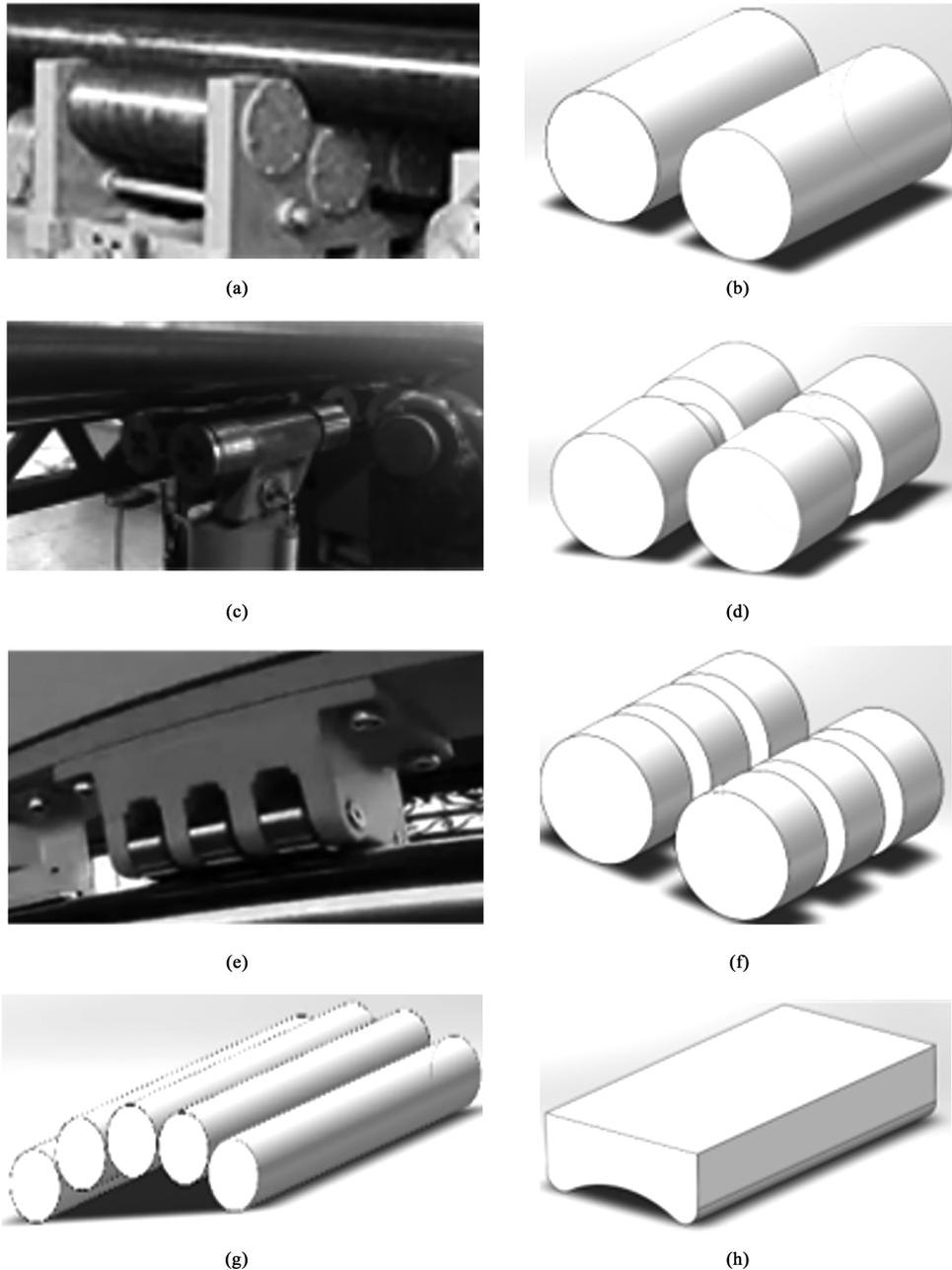


图 7 支撑结构及其简化模型

- (a) 双辊支撑结构 1    (b) 双辊支撑结构 1 的简化模型    (c) 双辊支撑结构 2    (d) 双辊支撑结构 2 的简化模型
- (e) 双辊支撑结构 3    (f) 双辊支撑结构 3 的简化模型    (g) 多辊支撑结构    (h) 多辊支撑结构的简化模型

Fig. 7 Support structures and their simplified models

- (a) Two-roller support structure 1    (b) Simplified model of two-roller support structure 1    (c) Two-roller support structure 2
- (d) Simplified model of two-roller support structure 2    (e) Two-roller support structure 3    (f) Simplified model of two-roller support structure 3
- (g) Multi-roller support structure    (h) Simplified model of multi-roller support structure

形云图如图 8a~图 8c 所示, 其中, 以补偿效果相对较差的双辊支撑结构 3 对应的挠度峰值 0.1043 mm 作

为各云图标尺的最大边界, 以便更直观地从颜色及波峰高度对比各支撑结构对上辊挠度的补偿效果。

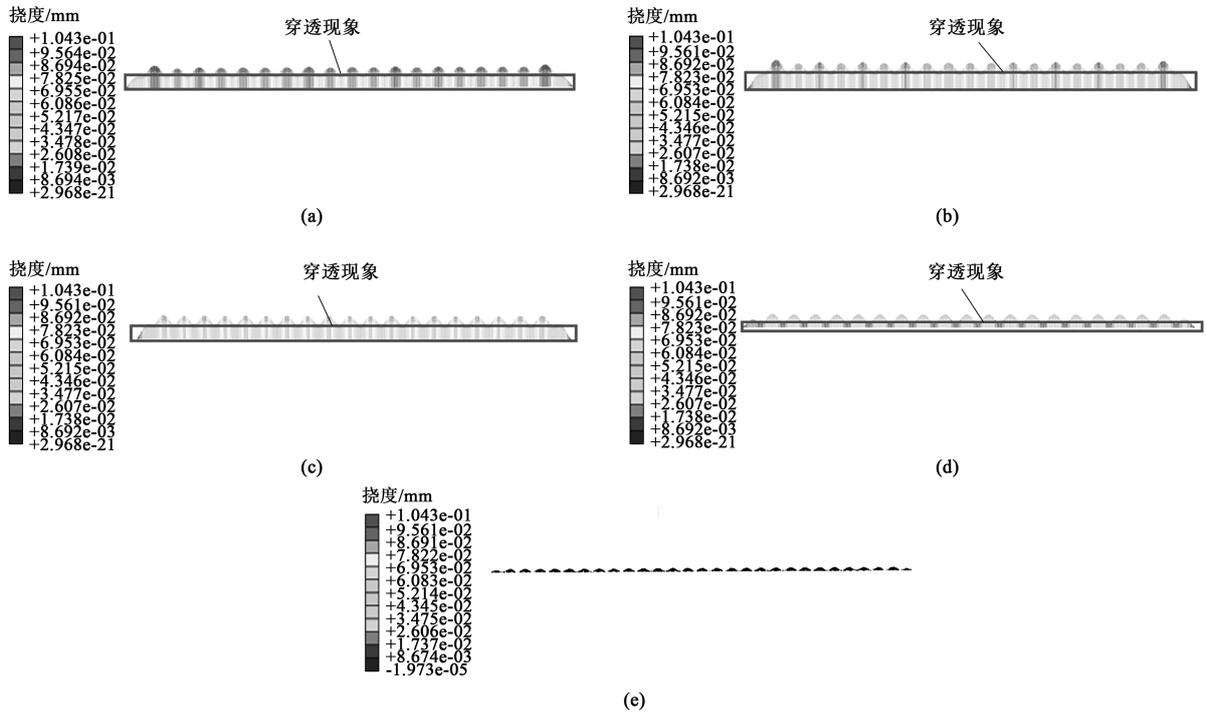


图 8 不同支撑结构下的上辊轴线挠度曲线

(a) 双辊支撑结构 1 (b) 双辊支撑结构 2 (c) 双辊支撑结构 3 (d) 多辊支撑结构 (e) 支撑块

Fig. 8 Deflection curves of upper roller axis line under different support structures

(a) Two-roller support structure 1 (b) Two-roller support structure 2 (c) Two-roller support structure 3 (d) Multi-roller support structure (e) Support block

本文基于上述现象, 设计了一种多辊支撑结构 (图 7g), 该结构是由一系列圆柱体辊轮在上辊表面沿端面方向均匀分布组成的。仿真结果表明, 相较于双辊支撑结构 1、2、3, 多辊支撑结构减小上辊最大挠度和受力的效果更佳, 但仍存在穿透现象 (图 8d)。

基于该多辊支撑结构与上辊的接触特性和实际情况, 将其三维结构简化为均匀分布的支撑块模型 (图 7h), 通过图 8e 可知, 支撑块模型可消除穿透现象对超宽三辊滚弯有限元仿真的影响, 且上辊最大挠度在多辊支撑结构补偿状态与支撑块结构补偿状态下, 随组数的变化趋势基本一致 (图 9), 即简化为支撑块模型后几乎未改变多辊支撑结构对上辊挠度的影响规律。

因此, 为了减小误差, 本文设计了一种多辊支撑结构, 并在有限元三维模型中将其简化为均匀分布的支撑块模型 (图 10, 其中  $l$  为支撑块长度,  $c$  为支撑块宽度)。

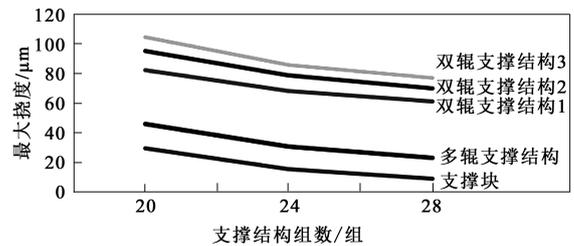


图 9 各支撑结构下的最大挠度随组数的变化曲线

Fig. 9 Changing curves of maximum deflection with group numbers under each support structure

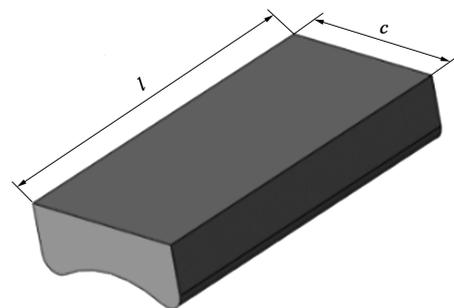


图 10 支撑块三维模型

Fig. 10 3D model of support block

## 2.2 分析方法

响应面法是一种优化试验条件的方法，运用适量的试验或模拟数据，通过适宜的数学模型和拟合方法，建立性能指标与影响因素之间的响应面模型。

基于 Minitab 中 Box-Behnken 设计的响应面试验设计是一种在多因子系统中寻找最佳条件的数理统计方法，可用于建立连续变面模型、评价影响因子及其相互作用、确定最优水平范围，由于试验组的数量相对较少，被广泛应用于各种优化过程。

## 3 结果分析

### 3.1 各参数对上辊挠度及受力的独立影响

从 2.1 节分析可知，将多辊支撑结构简化为均匀分布的支撑块模型（图 10），通过设计其组数  $n$ 、长度  $l$  以及宽度  $c$  等参数，可对上辊的挠度变形做出合理的调整。

#### 3.1.1 组数对挠度及受力的影响

支撑块组数是影响上辊挠度的重要因素之一，基于国际上滚弯机技术领先的瑞士公司 Haeusler 设备数组资料，旗下加工长度为 18 m、厚度为 50 mm 板材的滚弯机中，其上辊支撑结构的组数为 18 组，故本文加工 8 m 板材的支撑结构组数参数  $n$  取 11~32，以观察组数对上辊最大挠度的影响规律。利用 ABAQUS 进行超宽对称式三辊滚弯模拟仿真，得出支撑块组数与最大挠度及最大受力的关系，如图 11 所示。

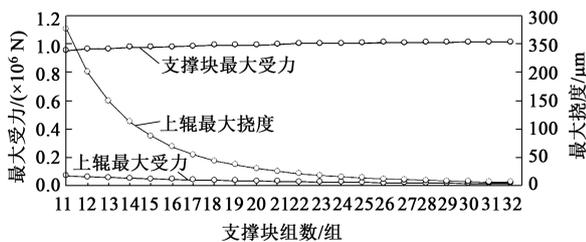


图 11 最大挠度、最大受力与支撑块组数的关系

Fig. 11 Relationships between maximum deflection, maximum force and group number of support block

从图 11 中可以看出，在滚弯加工厚度为 6 mm、回弹后成形曲率为 500 mm 铝合金板的模拟过程中（简称为 6-R500 mm），随着支撑块组数  $n$  增多，上辊最大挠度逐渐减小，支撑块组数大于 19 组时，减小的趋势变得平缓；随着支撑块组数  $n$  增多，支撑块的最大受力随之增加，上辊的最大受力随之减小。当组数由 11 组增长为 32 组时，上辊最大受力从 66199.9 N 减小为 11305.3 N。

因此，在滚弯成形中要通过增加支撑块组数以减小上辊最大挠度及最大受力，从而提高板材的成形精度。

#### 3.1.2 长度对挠度及受力的影响

支撑块长度通过影响支撑结构与上辊接触面积，从而影响挠度的变化，长度  $l$  取 10~150 mm，得出不同长度与最大挠度及最大受力的关系，如图 12 所示。

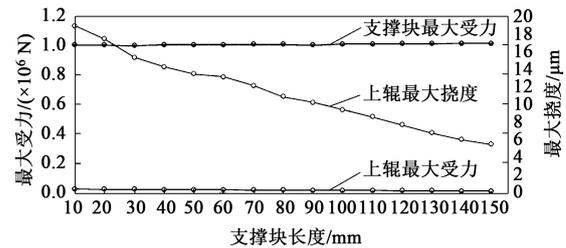


图 12 最大挠度、最大受力与支撑块长度的关系

Fig. 12 Relationships between maximum deflection, maximum force and length of support block

从图 12 中可以看出，在滚弯 6-R500 mm 模拟过程中，随着支撑块长度  $l$  的增大，上辊最大挠度平稳减小；支撑块最大受力基本不变，上辊最大受力逐渐减小。当长度由 10 mm 增长为 150 mm，上辊最大受力从 24324.9 N 减小为 10585.2 N。

因此，在滚弯成形中要适当增加支撑块长度以减小上辊最大挠度及最大受力，从而提高板材的成形精度。

#### 3.1.3 宽度对挠度及受力的影响

支撑块宽度也是滚弯成形过程中影响上辊挠度的重要因素，在支撑块组数  $n$  为 27 组、长度  $l$  为 100 mm 的条件下，宽度  $c$  取 30、40、50、60、70 和 80 mm，利用有限元仿真得出不同宽度与上辊挠度及受力的关系，如图 13 所示。

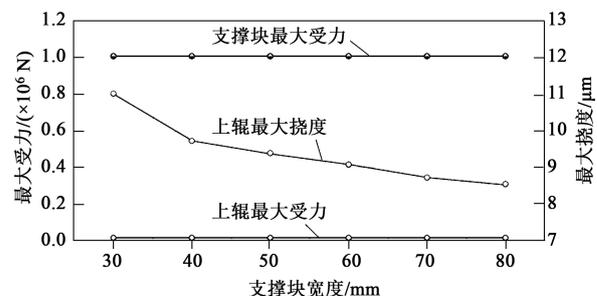


图 13 最大挠度、最大受力与支撑块宽度的关系

Fig. 13 Relationships between maximum deflection, maximum force and width of support block

从图 13 中可以看出，在滚弯 6-R500 mm 模拟过程中，随着支撑块宽度  $c$  的增大，上辊最大挠度逐渐减小，当宽度范围为 40~80 mm 时，挠度变化较为平

稳；随着支撑块宽度的增大，支撑块最大受力基本不变，上辊最大受力随宽度的增大而略有减小。

因此，在滚弯成形中要通过合理增加支撑块宽度以减小上辊最大挠度，从而提高板材成形精度。

### 3.2 参数最优组合

在运用响应面法前，应确定恰当的试验因素与水平。基于 3.1 节最大挠度与长度、宽度的变化趋势，令长度取值范围为 80~150 mm，宽度取值范围为 30~80 mm。

基于上辊最大挠度低于 10  $\mu\text{m}$  的优化目标，利用仿真模拟可得  $n$  的取值范围为 24~30 组，利用 Minitab 创建响应面因子设计，并生成由 15 组试验数据组成的正交表，模拟仿真得出各组试验中的上辊最大挠度。

根据上述响应面设计试验，利用 Minitab 的预测功能，得到优化目标下的 6 组候选参数数据<sup>[16]</sup>，并运用有限元仿真模拟进行验证，预测拟合最大挠度与仿真最大挠度结果如表 2 所示。基于优化目标和节约环保原则，最终选取的支撑块最优参数组合为：组数为 28、长度为 80 mm、宽度为 40 mm。

表 2 6 组候选数据结果  
Table 2 Results of six groups of candidate data

组别	组数/ 组	长度/ mm	宽度/ mm	拟合最大 挠度/ $\mu\text{m}$	仿真最大 挠度/ $\mu\text{m}$	误差/%
1	26	100	70	10.15	10.33	1.77
2	26	110	50	9.98	9.79	1.85
3	27	90	50	10.22	10.20	0.20
4	27	100	40	9.92	9.75	1.73
5	28	90	30	9.95	10.56	6.15
6	28	80	40	10.05	9.98	0.69

## 4 结论

(1) 对超宽对称式三辊滚弯机的上辊受力弯曲变形进行了理论分析。利用材料力学弯曲变形理论推导出上辊无支撑补偿状态及有刚性支撑补偿状态下的挠度变形计算公式。

(2) 设计了一种平行于上辊端面方向绕上辊分布的多辊支撑结构，基于实际情况，将三维模型简化为均匀分布的支撑块模型。通过有限元分析软件 ABAQUS 对比分析了多辊支撑结构与 3 种传统双辊支撑结构的挠度补偿效果。仿真结果表明，多辊支撑结构的挠度补偿效果优于传统双辊支撑结构，且将多辊支撑结构三维模型简化为支撑块，可大大减

小穿透现象对挠度的影响。

(3) 由仿真结果和响应曲面法可得，最大挠度随着支撑块组数、长度、宽度的增加而减小，且组数的影响程度最大。基于响应面设计法和 Minitab 数据分析软件，满足上辊最大挠度低于 10  $\mu\text{m}$  的优化目标的支撑块最优参数组合为：组数为 28、长度为 80 mm、宽度为 40 mm。

### 参考文献：

- [1] Wu J J, Zhang Z K. An improved procedure for manufacture of 3D tubes with springback concerned in flexible bending process [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34 (11): 267-276.
- [2] 宋坤. 高精度四辊卷板关键技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2017.  
Kun S. Research on Key Technology of High-precision Four-roll Coil [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [3] 王新宇. 四辊卷板精度分析与误差补偿技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2019.  
Wang X Y. Research on Precision Analysis and Error Compensation Technology of Four-roll Coil [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [4] 陈兰. 超大型数控船用卷板机上辊挠度分析及补偿技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.  
Chen L. Research on Roll Deflection Analysis and Compensation Technology on Ultra-large CNC Marine Bending Machine [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [5] 郑九华, 杨树田, 常欣, 等. 超大型数控船用卷板机上辊挠度实时检测及自动补偿研究 [J]. 机械设计与制造, 2012, (9): 181-183.  
Zheng J H, Yang S T, Chang X, et al. Research on real-time detection and automatic compensation of roll deflection on ultra-large CNC marine bending machine [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2012, (9): 181-183.
- [6] 甄诚, 郭瑞峰, 郭永平. 对称三辊卷板机上辊挠度补偿计算与受力分析 [J]. 机械研究与应用, 2015, 28 (1): 52-54.  
Zhen C, Guo R F, Guo Y P. Calculation and force analysis of roll deflection compensation on symmetrical three-roll bending machine [J]. Mechanical Research and Application, 2015, 28 (1): 52-54.
- [7] 柳建明. 基于 ANSYS 的超宽型卷板机超静定问题的研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.  
Liu J M. Research on Ultra-static Determination of Ultra-wide Bending Machine Based on ANSYS [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [8] Maklakova E A, Maklakov A S, Gasiyarov V R, et al. The work roll bending control system of the hot plate rolling mill [J]. Procedia Engineering, 2015, 129: 37-41.
- [9] 周迟. 四辊卷板成形工艺技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018.  
Zhou C. Research on Four-roll Coil Forming Technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [10] Thanasoulas I D, Gantes C J. Stability criteria for roller-bent circu-

- lar-hollow-section steel arches [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 176: 106431.
- [11] Shrinaath Viswanathan, Vairavignesh Ramalingam, Padmanaban Ramasamy. Parametric study on the spring-back effect in AA5052 alloy in the course of three-point roll bending process [J]. *Acta Mechanica et Automatica*, 2020, 14 (3): 128-134.
- [12] Mercuri A, Fanelli P, Giorgetti F, et al. Experimental and numerical analysis of roll bending process of thick metal sheets [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1038 (1): 012067.
- [13] Gong H, Sun X, Liu Y, et al. Residual stress relief in 2219 aluminum alloy ring using roll-bending [J]. *Materials*, 2019, 13 (1): 105-128.
- [14] 陈兰, 曾梁彬, 张新洲, 等. 大型船用卷板机上辊挠度分析及支承结构优化 [J]. *机械设计与制造*, 2012, (1): 221-223. Chen L, Zeng L B, Zhang X Z, et al. Analysis of roll deflection and support structure optimization on large marine bending machine [J]. *Machinery Design and Manufacturing*, 2012, (1): 221-223.
- [15] Baek G, Shim D. FE simulation-based process design for manufacturing structural members of commercial vehicle using pipes with rectangular cross-sections [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015, 16 (4): 723-733.
- [16] Ghiabakloo H, Kim J, Kang B. Specialized finite elements for numerical simulation of the flexibly-reconfigurable roll forming process [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 151: 133-153.

-----

(上接第 80 页)

- [3] 郑欣, 王祝堂. 国外汽车车体轻量化研发进展 [J]. *轻合金加工技术*, 2017, 45 (3): 1-5. Zheng X, Wang Z T. Progress of foreign automotive body lightweighting R&D [J]. *Light Alloy Processing Technology*, 2017, 45 (3): 1-5.
- [4] Kim Y J, Lee D H. Technology convergence on automotive lightweight materials: Evidence from South Korea [J]. *Technology Analysis & Strategic Management*, 2023, 35 (3): 1973666.
- [5] Wang B, Zhang Z Y, Xu G C, et al. Wrought and cast aluminum flows in China in the context of electric vehicle diffusion and automotive lightweighting [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2023, 191: 106877.
- [6] 孙风蔚, 孔祥学, 程志雄, 等. 顶盖横梁的结构优化设计 [J]. *汽车制造业*, 2020, 654 (5): 36-37. Sun F W, Kong X X, Cheng Z X, et al. Structural optimization design of top cover crossbeam [J]. *Automotive Manufacturing*, 2020, 654 (5): 36-37.
- [7] 王俊楠. 新能源客车车身的结构优化 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022. Wang J N. Structural Optimization of New Energy Bus Body [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [8] 宋开跃. 汽车中地板加强板全工序冲压成形数值模拟 [D]. 长春: 吉林大学, 2016. Song K Y. Numerical Simulation of Full-process Stamping and Forming of Automotive Mid-floor Reinforcement Plate [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [9] 刘玉山, 赵明, 郑飞. 应用反拉伸及刺破有效解决后背门内板起皱及开裂问题 [J]. *模具制造*, 2018, 18 (10): 5-9. Liu Y S, Zhao M, Zheng F. Application of counter stretching and piercing to effectively solve the problem of wrinkling and cracking of the inner panel of the back door [J]. *Mold Manufacturing*, 2018, 18 (10): 5-9.
- [10] 刘丽莉, 李丽芳, 郭杰. 电动汽车分片式前翼子板冲压工艺分析 [J]. *锻造与冲压*, 2022, (10): 21-25. Liu L L, Li L F, Guo J. Analysis of stamping process of split front wing panel for electric vehicles [J]. *Forging & Metalforming*, 2022, (10): 21-25.
- [11] 徐浩. 汽车后纵延伸梁冲压成形工艺优化设计 [D]. 镇江: 江苏大学, 2020. Xu H. Optimization Design of Stamping and Forming Process for Rear Longitudinal Extension Beam of Automobile [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [12] 金共志. 高强度复杂车身覆盖件模具型面设计与优化研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2019. Jin G Z. Research on the Design and Optimization of Complex Body Coverings Mold Surface of High Strength Steel [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [13] 管幸寰. 关于补偿回弹的冲压件模具设计方法的探讨 [J]. *中国设备工程*, 2018, (4): 106-107. Guan X H. Exploration on the design method of stamping parts die with compensated rebound [J]. *China Equipment Engineering*, 2018, (4): 106-107.
- [14] 王天武. 汽车后背门空气弹簧加强板冲压成形工艺及参数优化研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2022. Wang T W. Study on Stamping and Forming Process and Parameter Optimization of Air Spring Reinforcement Plate for Automotive Back Doors [D]. Jilin: Northeastern Electric Power University, 2022.
- [15] 王淑芬, 胡文文, 李玉光, 等. 汽车座椅骨架的拓扑优化研究 [J]. *机电工程*, 2014, 31 (9): 1149-1153. Wang S F, Hu W W, Li Y G, et al. Topology optimization study of automotive seat skeleton [J]. *Mechatronic Engineering*, 2014, 31 (9): 1149-1153.
- [16] 肖红波, 蔡浩华. 轿车侧围外板冲压成形工艺优化 [J]. *模具工业*, 2017, 43 (8): 28-30. Xiao H B, Cai H H. Optimization of stamping and forming process for car side surround outer plate [J]. *Mould Industry*, 2017, 43 (8): 28-30.
- [17] 汤云翔. 汽车大型外覆盖件冲压拉伸成形仿真与冲压工艺参数优化技术研究 [D]. 镇江: 浙江大学, 2022. Tang Y X. Simulation and Optimization of Stamping Process Parameters for Stamping and Drawing Forming of Large Outer Covering Parts of Automobiles [D]. Zhenjiang: Zhejiang University, 2022.
- [18] Jisik C, Jinwoo L, Myoung-Gyu L, et al. Advanced constitutive modeling of AHSS sheets for application to springback prediction after U-draw double stamping process [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 734 (3): 032029.