

某汽轮机叶片热成形工艺研究及优化

罗应娜

(重庆工业职业技术学院 机械工程与自动化学院, 重庆 401120)

摘要: 为提高某汽轮机叶片热冲压成形质量并降低试错成本, 首先, 通过等温热压缩试验获取了 X2Cr11 钢在不同温度和应变速率下的应力-应变曲线, 并构建了高精度 Hansel-Spittel 本构模型, 等温压缩结果表明, 温度和应变速率对材料的应力产生显著影响; 随后, 基于所建立的本构方程, 构建了某汽轮机叶片的热冲压数值仿真模型, 初步分析了原工艺存在的问题, 包括板料厚度不均匀和显著的回弹效应; 最后, 提出了一种基于拉丁超立方、有限元仿真、克里金模型和遗传算法的优化策略, 成功将最大回弹量控制在 1.5 mm 以内, 最大减薄率控制在 3.3% 以内。生产试制表明, 该策略显著提升了汽轮机叶片的成形质量、降低了试错成本。研究成果为汽轮机叶片的高质量生产提供了有效保障。

关键词: 汽轮机叶片; 热压缩; Hansel-Spittel 模型; 热冲压; 回弹; 减薄

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.12.009

中图分类号: TG316; TG146.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 12-0063-09

Research and optimization on thermal forming process for a steam turbine blade

Luo Yingna

(School of Mechanical Engineering and Automation, Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120, China)

Abstract: To improve the thermal stamping quality of a certain steam turbine blade and reduce trial-and-error costs, the stress-strain curves of X2Cr11 steel at different temperatures and strain rates were obtained by isothermal thermal compression tests, and a high-precision Hansel-Spittel constitutive model was constructed. Isothermal compression results indicate that the temperature and strain rate have significant effects on stress in material. Then, based on the established constitutive equation, a numerical simulation model of thermal forming for a specific steam turbine blade was constructed. The problem existing in the original process was preliminarily analyzed including uneven sheet thickness and considerable springback effect. Finally, an optimization strategy based on Latin hypercube, finite element simulation, Kriging model and genetic algorithm was proposed. The maximum springback amount is successfully controlled within 1.5 mm, and the maximum thinning rate is controlled within 3.3%. Production trial production shows that this strategy significantly improves the forming quality of steam turbine blades and reduces the trial-and-error costs. Thus, the research results provide an effective guarantee for the high-quality production of steam turbine blades.

Key words: turbine blades; thermal compression; Hansel-Spittel model; thermal stamping; springback; thinning

汽轮机叶片是汽轮机组的核心部件之一, 对汽轮机的服役寿命、转换效率及可靠性等有决定性影响^[1-2]。由于汽轮机叶片的结构复杂、尺寸较大、服役条件恶劣, 国内外学者对其成形工艺进行了大量研究。Liu F 等^[3]利用 DEFORM-3D 研究了叶片转子在精密成形过程中的变形特性, 发现精密成形可以提高叶片转子的性能。Xiang R 等^[4]采用数值模

拟技术对某空心叶片成形参数进行优化, 与原有的热成形工艺相比, 优化后的热成形工艺有效控制了材料流动并且回弹小、精度高。Gan W 等^[5]利用有限元分析了冲压件在 Y 方向上的整体位移量, 对模面进行反向补偿, 并利用试验验证了该方法的可行性。袁飞等^[6]针对汽轮机叶片的精度要求高、回弹补偿难度大和加工效率低等问题, 提出利用反向迭代补偿与黄金分割相结合的方法来修正精锻模具型腔, 最后得到满足终锻叶片精度要求的合理的模具型腔, 大大提高了模具设计的质量与效率。张丰收等^[7]以毛坯初始温度、模具预热温度、锻压速度和摩擦因数这 4 个主要工艺参数作为优化变量, 以锻件的变形均匀性为优化目标进行优化设计, 得到了

收稿日期: 2022-10-21; 修订日期: 2023-02-10

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目 (CSTB2022NSCQ-MSX1029); 重庆市教育委员会科学技术研究计划青年项目 (KJQN202203204)

作者简介: 罗应娜 (1979-), 女, 学士, 副教授

E-mail: lyn3796@163.com

一组最佳工艺参数。经过试验验证,该最佳工艺参数的变形均匀性与变形应力分别下降了 10.1% 与 8.8% 左右。徐永锋等^[8]研究了变形历史对汽轮机叶片力学性能的影响,其研究表明,经过锻造工艺后,叶片的安全性增加、疲劳性能得到显著改善。刘俊等^[9]利用 DEFORM-3D 软件对汽轮机叶片模锻进行数值模拟,确定了较为合理的预制坯形状,并进一步研究了始锻温度、摩擦因数和上模压下速度等工艺参数对锻造成形的影响。根据模拟优化结果,进行工艺试制,锻件的外观尺寸和力学性能均满足技术要求,验证了工艺方案的可行性。

针对汽轮机叶片的锻造成形工艺,国内开展了大量研究;然而,针对薄壁大型汽轮机叶片的热冲压成形工艺的研究较少,且该工艺存在回弹和减薄率不均匀等问题。因此,本文首先通过热压缩试验构建了材料的本构方程;随后建立了某汽轮机叶片的优化模型,并利用数值仿真得到了抽样数据,通过克里金模型和遗传算法对工艺参数进行了优化;最后通过生产试制验证了最优参数的可靠性,为同类产品的优化提供了参考。

1 材料及数值模型

1.1 流变曲线

由于汽轮机叶片服役时,存在高压蒸汽的冲击、旋转离心力以及旋转振动,导致叶片易发生应力腐蚀和水蚀失效;因此,汽轮机叶片通常选用铬不锈钢、低合金珠光体耐热钢、钛合金等材料。此外,为降低汽轮机叶片的转动惯量,汽轮机叶片通常设计为空心结构,这对材料的要求更加苛刻。X2Cr11 铁素体不锈钢(德国牌号为 1.4003)是德国产的超低碳、低铬经济型铁素体不锈钢,其被广泛应用于汽轮机叶片的制造,其名义化学成分如表 1 所示。

表 1 X2Cr11 铁素体不锈钢名义化学成分(%,质量分数)
Table 1 Nominal chemical compositions of X2Cr11 ferrite stainless steel(%, mass fraction)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
0.02	0.66	1	0.03	0.02	11.5	0.65	0.02

$$\begin{bmatrix} \ln\sigma_1 \\ \ln\sigma_2 \\ \vdots \\ \ln\sigma_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_1 & \ln\epsilon_1 & \ln\dot{\epsilon}_1 & 1/\epsilon_1 & T_1 \ln(1+\epsilon_1) & \epsilon_1 & T_1 \ln\dot{\epsilon}_1 & \ln T_1 \\ 1 & T_2 & \ln\epsilon_2 & \ln\dot{\epsilon}_2 & 1/\epsilon_2 & T_2 \ln(1+\epsilon_2) & \epsilon_2 & T_2 \ln\dot{\epsilon}_2 & \ln T_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & T_n & \ln\epsilon_n & \ln\dot{\epsilon}_n & 1/\epsilon_n & T_n \ln(1+\epsilon_n) & \epsilon_n & T_n \ln\dot{\epsilon}_n & \ln T_n \end{bmatrix} \beta + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

为获取 X2Cr11 铁素体不锈钢在不同温度和应变速率下的应力-应变曲线,将原材料切割为 $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的试样,并在 Geeble-3500 热模拟试验机上进行热压缩试验,试验温度为 $750 \sim 1050 \text{ }^\circ\text{C}$,试验应变速率为 $0.01 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ 。试样的加热速度为 $5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,保温时间为 180 s 。图 1 为 X2Cr11 铁素体不锈钢在不同条件下经过圆滑处理后的真实应力-真实应变曲线。

当应变速率相同时,随着温度的升高,材料的应力逐渐增加,且温度越低,温度对应力的影响越大;当温度相同时,应变速率越大,应力越大;当应变速率和温度均固定时,应力随着应变的增加而增加,随后趋于平缓。不同温度和应变速率下的真实应力-真实应变曲线的对比结果表明,X2Cr11 铁素体不锈钢对温度和应变速率均比较敏感。

1.2 本构方程

Hansel-Spittel 本构方程具有结构简单、材料参数较少的特点,被广泛应用于描述粘塑性材料的本构关系,具有 9 个待定材料参数,其表达式为^[10-11]:

$$\sigma = A \exp(m_1 T) \epsilon^{m_2} \dot{\epsilon}^{m_3} \exp\left(\frac{m_4}{\epsilon}\right) (1 + \epsilon)^{m_5 T} \times \exp(m_7 \epsilon) \dot{\epsilon}^{m_8 T} T^{m_9} \quad (1)$$

对式 (1) 取自然对数得到式 (2):

$$\ln\sigma = \ln A + m_1 T + m_2 \ln\epsilon + m_3 \ln\dot{\epsilon} + \frac{m_4}{\epsilon} + m_5 T \ln(1 + \epsilon) + m_7 \epsilon + m_8 T \ln\dot{\epsilon} + m_9 \ln T \quad (2)$$

式中: T 为变形温度; A 、 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 、 m_5 、 m_7 、 m_8 、 m_9 为材料常数,通常使用压缩数据进行回归得到; σ 为真实应力; ϵ 为真实应变; $\dot{\epsilon}$ 为应变速率。

将每条真实应力-真实应变曲线的应变在 $0.04 \sim 0.90$ 范围内等分为 20 份,进而得到共计 700 ($5 \times 7 \times 20$) 组数据,用这 700 组数据建立多元线性回归方程组式 (3),表 2 为本构方程参数取值。

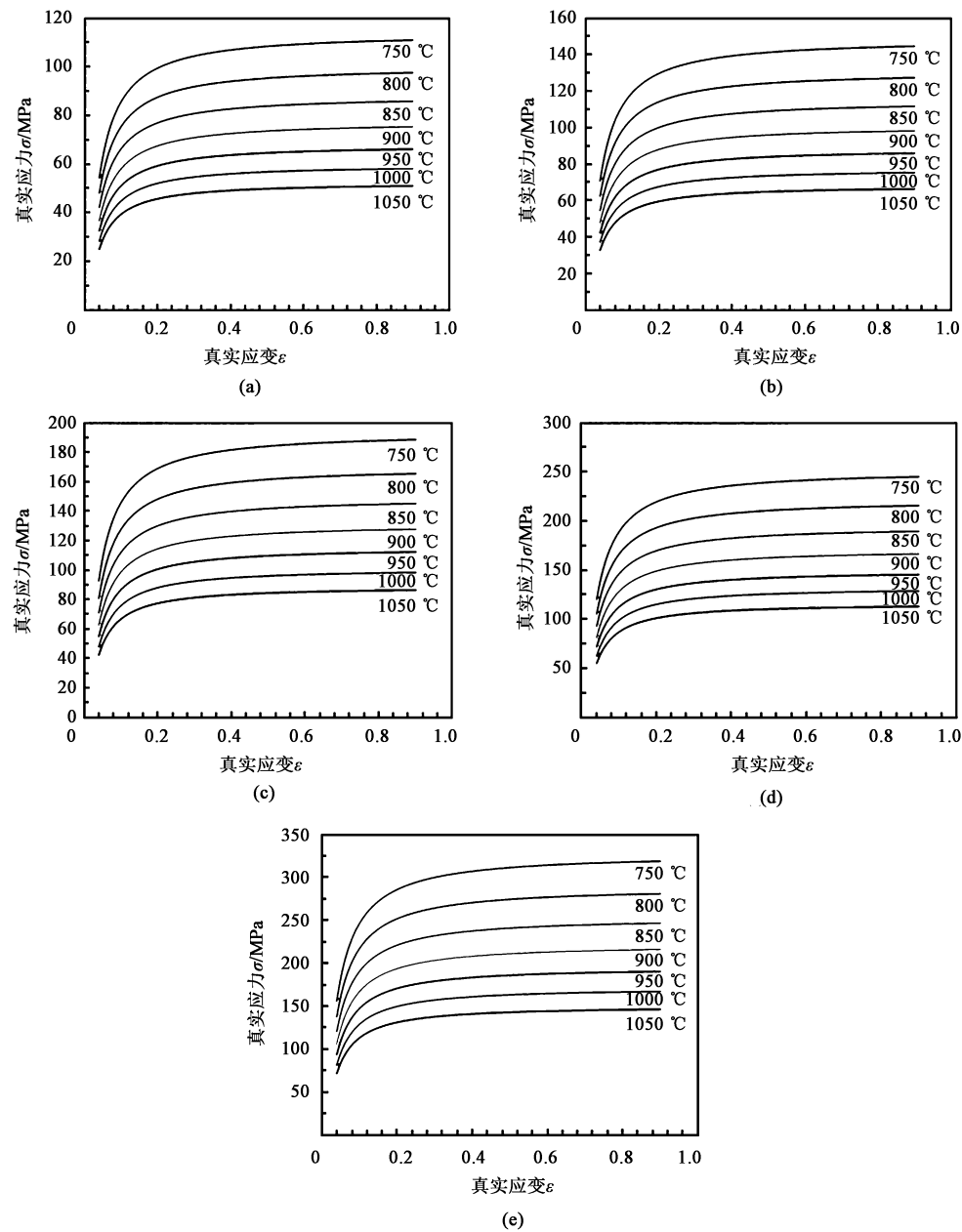


图 1 X2Cr11 铁素体不锈钢在不同温度及应变速率下的真实应力-真实应变曲线
(a) $\dot{\varepsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$ (b) $\dot{\varepsilon}=0.1\text{ s}^{-1}$ (c) $\dot{\varepsilon}=1\text{ s}^{-1}$ (d) $\dot{\varepsilon}=10\text{ s}^{-1}$ (e) $\dot{\varepsilon}=100\text{ s}^{-1}$
Fig. 1 True stress-true strain curves of X2Cr11 ferrite stainless steel at different temperatures and strain rates

表 2 本构方程参数值
Table 2 Values of constitutive equation parameters

参数	$\ln A$	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_7	m_8	m_9
取值	7.221646815	-0.0026	-0.00671	0.11457	-0.03069	-8.49×10^{-13}	8.12×10^{-10}	-6.27×10^{-14}	-4.15×10^{-9}

式中： β 为回归系数， $\beta=[\ln A, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7, m_8, m_9]$ ； σ_n 为第 n 组真实应力； T_n 为第 n 组温度； $\dot{\varepsilon}_n$ 为第 n 组应变速率； ε_n 为第 n 组真实应变； e_n 为第 n 组数据的误差，服从正态分布；本文中 $n=1, 2, 3$,

$\cdots, 700$ 。
如图 2 所示，试验曲线和预测点的误差较小，这说明 Hansel-Spittel 模型对该材料的本构关系的逼近精度较高；此外，多元线性回归能够避免局部最优解，得到全局最优参数。

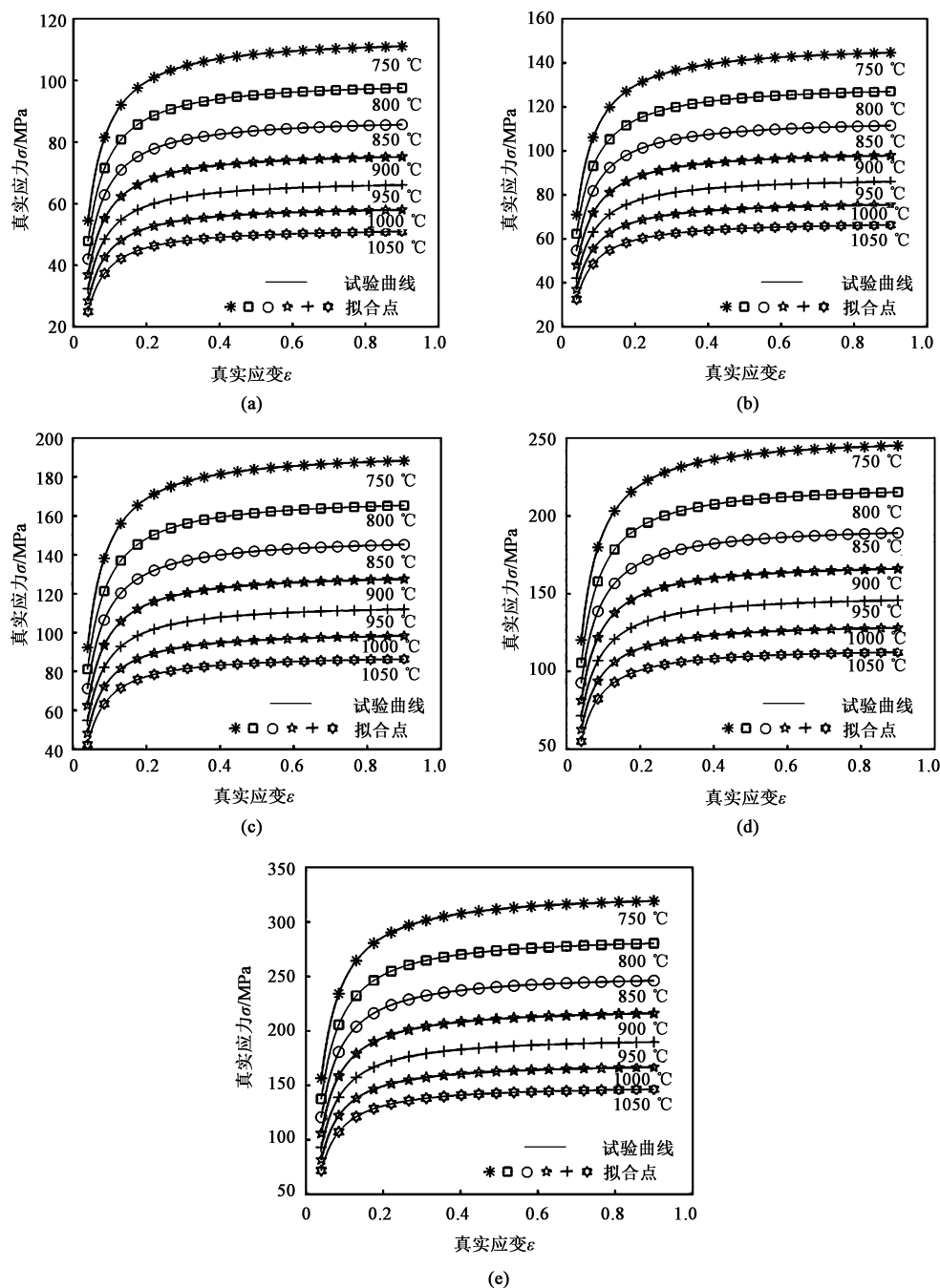


图2 X2Cr11 铁素体不锈钢在不同温度及应变速率下试验和拟合的真实应力-真实应变曲线对比

(a) $\dot{\varepsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$ (b) $\dot{\varepsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$ (c) $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$ (d) $\dot{\varepsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$ (e) $\dot{\varepsilon} = 100 \text{ s}^{-1}$

Fig. 2 Comparison between test and fitting true stress-true strain curves for X2Cr11 ferritic stainless steel at different temperatures and strain rates

1.3 数值仿真模型

某汽轮机叶片的 3D 图及有限元模拟如图 3 所示, 板料的厚度为 6 mm, 最大包络尺寸为 1700 mm×210 mm×300 mm。该汽轮机叶片的制造工序设计为: 下料→预热→成形→保压冷却→焊接→切割→检查→零件。由图 1 可知, 该材料的变形抗力对应变速率敏感, 因此, 基于显示动力学算法的 DY-NAFORM 软件不适于分析该材料的冲压成形。因为

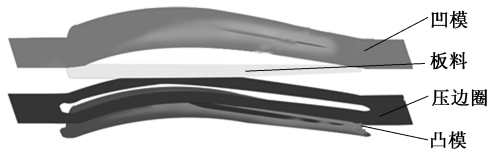


图3 某汽轮机叶片的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of a turbine blade

显示动力学算法为了提高计算速度会虚拟提升模具

的移动速度，从而导致分析材料对应变速率敏感且板厚比较大的零件时冲压成形严重失真。由于 AUTOFORM 软件基于静力隐式算法，采用此算法对该零件的冲压成形工艺进行仿真更合适。为了研究该方法的可行性以及对成形工艺进行分析和优化，首

先采用 AUTOFORM 软件构建叶片冲压成形的仿真模型，材料的应力、应变数据使用 1.2 节构建的本构方程，屈服模型选用 Barlat 模型^[12]，其余参数如表 3 所示，摩擦因数设置为 0.3，数值仿真结果如图 4 所示。

表 3 有限元仿真参数
Table 3 Finite element simulation parameters

参数	初始温度/℃		下压速度/ (mm · min ⁻¹)	转运时间/min	保压时间/min	压边力/kN	摩擦因数	金属模传热系数/ (W · (m ² · K) ⁻¹)
	板料	模具						
数值	900	350	600	0.5	5	550	0.3	20000

图 4a 显示板料无破裂倾向，其原因在于板料厚度大、加热温度高，板料可以充分流动，不易发生破裂。在叶片两侧的压边区域及叶片左端有增厚趋势，这是由于这些区域的材料首先与模具接触，材料流动被限制进而在此处堆积，使得这些区域均有起皱的趋势。但由于这些区域为工艺补充面，在后续切割时会被去掉，因此，不影响总体质量。此外，该汽轮机叶片的较大区域有不充分拉延的情况，这些区域的不充分拉延会直接影响叶片的型面质量，

需要进一步优化。
图 4b 为板料的厚度分布图，发现叶片板料在水平方向上两侧的厚度减薄量较小而叶身中间的厚度减薄量较大，垂直方向上也呈现出两头减薄量少、中间减薄量多的特点。因此，控制叶片中间区域的厚度减薄也是后续优化的重点之一。
图 4c 表明板料的最大回弹量约为 3.2 mm，且最大回弹区域位于零件左右两侧；最大回弹量约为板料厚度的 53%，其回弹量需要进一步控制。

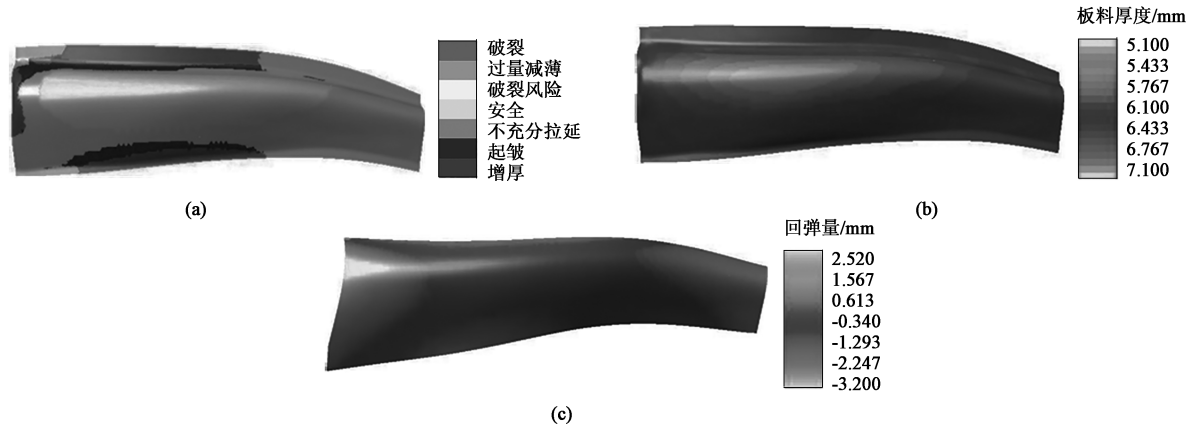


图 4 原始工艺的冲压仿真结果
(a) 成形极限分布 (b) 厚度分布 (c) 回弹分布

Fig. 4 Stamping simulation results of original process

(a) Forming limit distribution (b) Thickness distribution (c) Springback distribution

2 成形工艺参数优化

2.1 优化变量及优化目标

原始工艺存在板料厚度分布不均且叶片可能出现回弹的风险，为了优化原始工艺，本节将采用数值试验和优化算法相结合的方法进行工艺参数优化。影响该汽轮机叶片成形质量的因素很多，但其中最

重要的参数有：压边力 F 、摩擦因数 μ 、加热温度 T 和保压时间 t ，将这 4 个参数作为优化变量。根据长期生产试制经验，将这 4 个参数的取值范围定义为： $F \in [500 \text{ kN}, 900 \text{ kN}]$ ， $\mu \in [0.25, 0.35]$ ， $T \in [850 \text{ }^\circ\text{C}, 950 \text{ }^\circ\text{C}]$ ， $t \in [300 \text{ s}, 600 \text{ s}]$ 。使用厚度偏差和平均回弹量来衡量叶片的成形质量，两个指标可采用同一组采样点，厚度偏差指标 f_1 的计算公式为：

$$f_1 = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (h_i - h)^2} \quad (4)$$

式中: N 为采样点的总数目, 本文取为 100; h_i 为采样点 i 的厚度, $i = 1, 2, 3, \dots, N$; h 为板料的原始厚度。

在板料表面均匀地选取 100 个点作为采样点。平均回弹量 f_2 的计算公式为:

$$f_2 = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N s_i^2} \quad (5)$$

式中: s_i 为采样点 i 的回弹量。

两个指标越小, 板料的成形质量越好, 是一个典型的多目标优化问题。使用加权法将多目标问题

转化为单目标问题:

$$f = kf_1 + (1 - k)f_2 \quad (6)$$

式中: f 为加权后的优化总目标; k 为第 1 个指标占的权重, 在 $[0, 1]$ 之间取值, 本文取值为 0.5, 即两个指标同等重要。

2.2 试验设计及结果

由于优化变量全组合的样本空间较大, 传统抽样方法很难保证抽样样本在优化空间的代表性, 而拉丁超立方抽样方法能够得到优化空间中的均匀随机样本, 其抽样点在抽样空间的分布如图 5 所示, 试验方案和结果如表 4 所示。

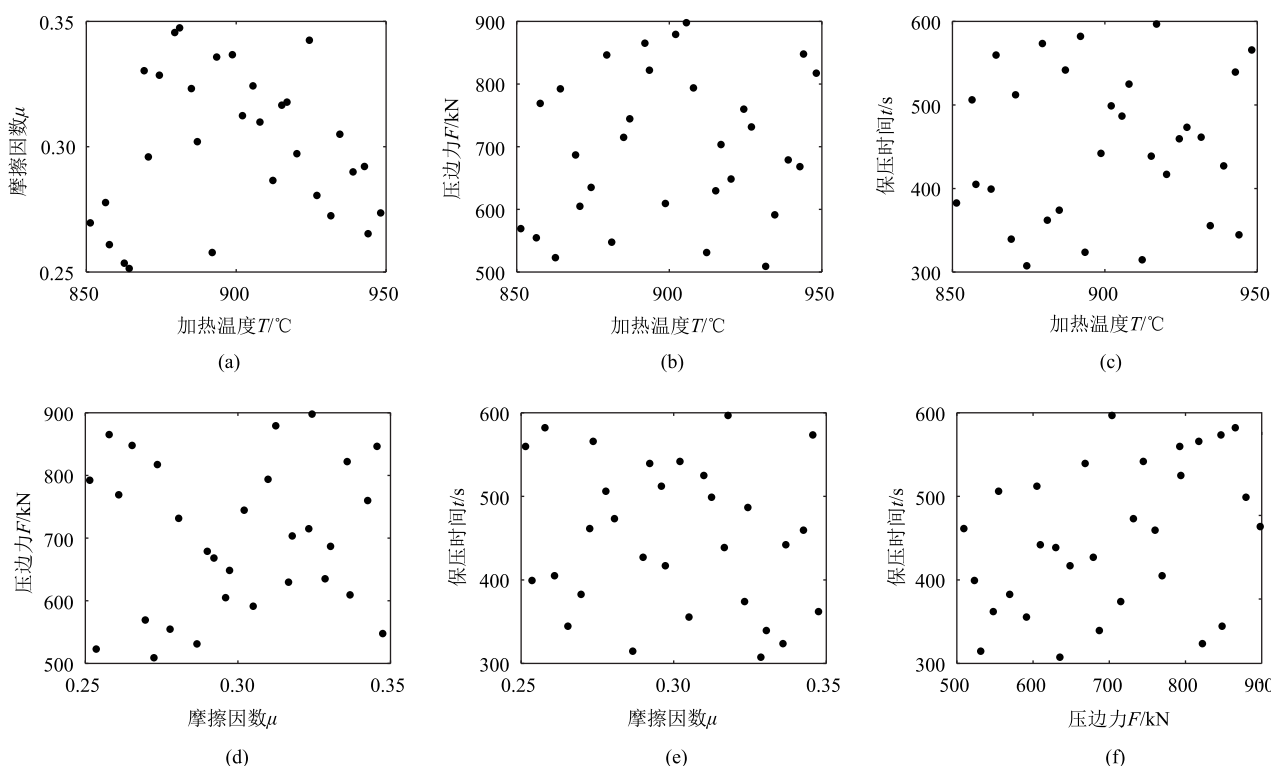


图 5 抽样点在抽样空间的分布

(a) 加热温度和摩擦因数 (b) 加热温度和压边力 (c) 加热温度和保压时间 (d) 摩擦因数和压边力
(e) 摩擦因数和保压时间 (f) 压边力和保压时间

Fig. 5 Distributions of sampling points in sampling space

(a) Heating temperature and friction coefficient (b) Heating temperature and blank holder force (c) Heating temperature and holding time
(d) Friction coefficient and blank holder force (e) Friction coefficient and holding time (f) Blank holder force and holding time

2.3 代理模型及优化

应用最广泛的代理模型有多项式响应面^[13]、人工神经网络^[14]和克里金模型^[15]等。其中, 多项式结构简单, 但对于高度非线性问题的逼近能力有限; 人工神经网络对于高度非线性问题的拟合效果较好, 但需要大量的训练集数据。本文涉及的问题可能存在高度非线性关系且训练数据集仅有 30 组, 因此,

采用克里金模型近似设计变量与设计指标之间的关系, 在 MATLAB 中使用 DACE 工具箱能够比较容易创建克里金模型。

图 6 中圆点表示抽样点, 曲面表示克里金模型的预测曲面。由图 6 可以观察到优化指标与设计变量之间存在复杂的非线性关系。此外, 通过对抽样数据进行回归, 得到的克里金模型展现出较高的预

表 4 拉丁超立方试验方案和结果

Table 4 Schemes and results of Latin hypercube test

方案	加热温度 $T/^{\circ}\text{C}$	摩擦因数 μ	压边力 F / kN	保压时间 t/s	优化目标 f
1	869.28	0.33	686.89	339.39	0.0318
2	856.40	0.28	554.72	506.10	0.0289
3	920.22	0.30	648.46	417.00	0.0322
4	851.32	0.27	569.32	382.66	0.0292
5	902.08	0.31	879.27	498.96	0.0339
6	881.12	0.35	547.75	362.07	0.0310
7	870.69	0.30	604.97	512.17	0.0297
8	912.22	0.29	531.27	314.68	0.0314
9	874.36	0.33	635.15	307.47	0.0316
10	862.65	0.25	523.01	399.29	0.0289
11	893.47	0.34	822.13	323.74	0.0346
12	864.29	0.25	792.39	559.75	0.0306
13	942.78	0.29	668.28	539.38	0.0327
14	915.19	0.32	629.76	438.70	0.0320
15	934.56	0.30	591.29	355.49	0.0330
16	926.90	0.28	731.59	473.28	0.0327
17	931.57	0.27	509.12	461.44	0.0309
18	907.91	0.31	793.88	525.02	0.0329
19	924.40	0.34	760.02	459.51	0.0344
20	916.92	0.32	703.49	596.86	0.0321
21	879.49	0.35	846.50	573.58	0.0333
22	891.98	0.26	865.26	582.14	0.0320
23	938.96	0.29	678.98	427.11	0.0333
24	857.69	0.26	769.23	405.02	0.0308
25	887.03	0.30	744.60	541.82	0.0314
26	885.03	0.32	714.96	374.05	0.0322
27	943.98	0.27	847.97	344.64	0.0361
28	905.58	0.32	897.97	486.69	0.0346
29	948.17	0.27	817.43	565.88	0.0341
30	898.70	0.34	609.45	442.06	0.0315

测精度，并且能够有效外推到其他试验空间点。由于克里金模型在局部构建非线性插值函数，因此在小样本数据预测中表现出较高的精度。

由于克里金模型没有显示表达式，导致其梯度信息计算比较困难，而遗传算法能够求解不具备梯度信息模型的全局最优解。如图 7a 所示，遗传算法作为控制算法，控制变量的演化方向；克里金模型作为预测模型，对每组变量组合的适应度值进行预测；通过拉丁超立方抽样和数值模拟获取克里金模型的训练集数据，构建精度较高的克里金预测模型（图 6）。通过克里金模型和遗传算法循环迭代，适应度值越小的个体在优化过程中被逐渐保留，最后

得到的种群即为平均适应度函数值较小的种群，最后种群中适应度最小的个体即为最优解。

如图 7b 所示，虚线表示遗传算法种群的平均适应度，实线表示种群的最小适应度；随着进化代数的增加，两条曲线趋于一致。在前 20 代以内，算法的收敛速度较快，并且随着进化代数的增加，收敛速度逐渐减小，最后优化到 100 代时得到最优解，此时的目标函数值为 0.0269。最优解的变量经过取整后的值为： $F=600\text{ kN}$ 、 $\mu=0.3$ 、 $T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $t=480\text{ s}$ 。

3 生产试制

图 8 为使用优化后的工艺参数进行数值仿真的结果。首先，叶片的安全变形区域得到大幅改善，叶身区域的板料得到充分拉延；其次，板料厚度的均匀性得到显著提高；最后，回弹量也得到显著降低。相比于原始工艺仿真方案（图 4）而言，优化策略能够显著提升该汽轮机叶片的成形质量。

使用优化后的参数进行生产试制，得到的如图 9a 所示的试制零件。使用三坐标扫描仪得到试制零件的 3D 模型并和标准模型进行比对，得到如图 9b 所示的偏差云图，其最大回弹量小于 2 mm，最小厚度为 5.8 mm，这两个指标均满足生产要求，优化后的工艺参数能够得到符合要求的产品。生产试制结果表明，拉丁超立方抽样→数值仿真试验获取抽样结果→克里金模型构建优化变量和优化目标之间的关系→遗传算法优化克里金模型的优化策略对实际零件的优化是有效的，能够提升汽轮机叶片的成形质量，减少试错成本。

4 结论

- （1）当应变速率相同时，随着温度的升高，材料的应力逐渐增加，且温度越低，温度对应力的影响越大；当温度相同时，应变速率越大，应力越大；当应变速率和温度均固定时，应力随着应变的增加而增加，随后趋于平缓。X2Cr11 铁素体不锈钢对温度和应变速率均比较敏感。
- （2）Hansel-Spittel 模型在建立 X2Cr11 铁素体不锈钢的高温流变关系方面表现出良好的适用性。该模型具备通过多元线性回归获得全局最优材料参数的能力，其本构方程具有高度精准、求解速度迅速、材料参数较为简洁的特点。此外，由于该汽轮

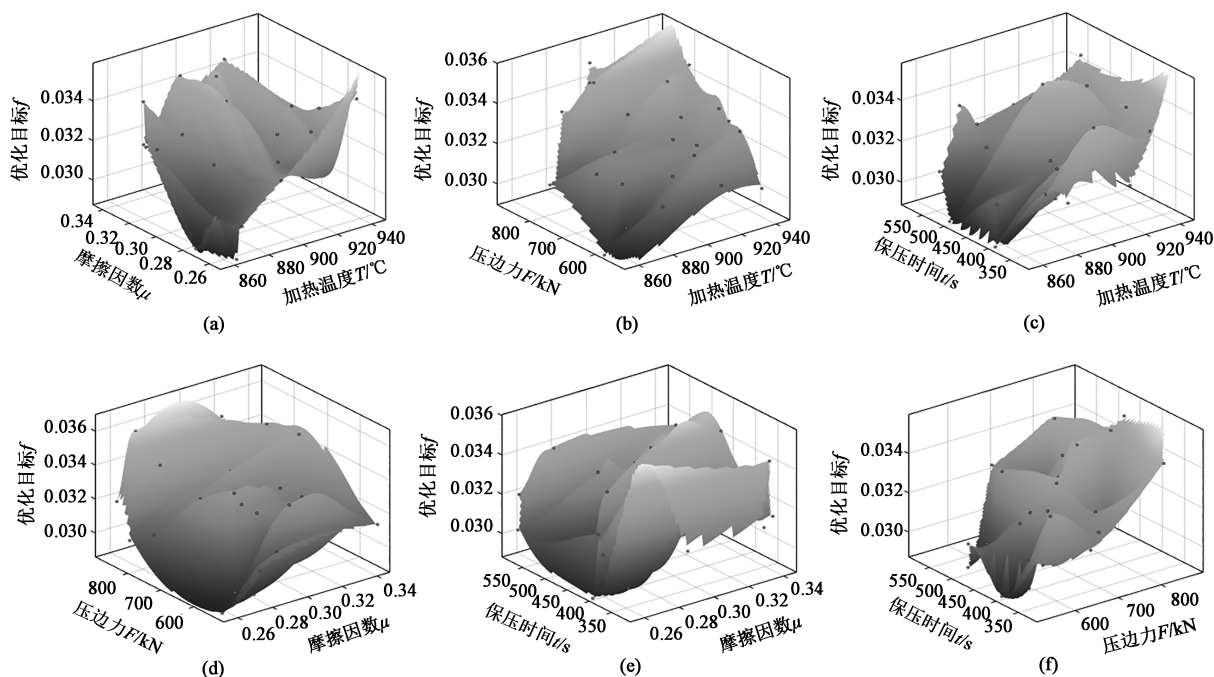
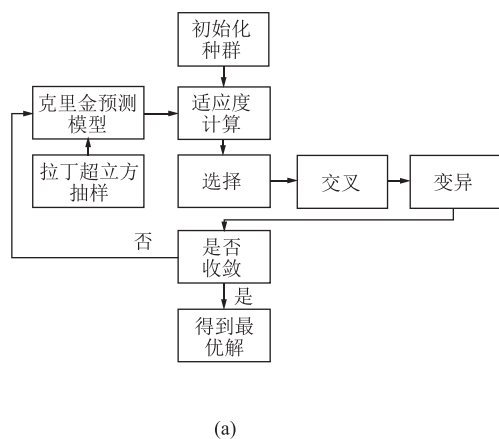


图 6 克里金模型和抽样点在抽样空间上的对比

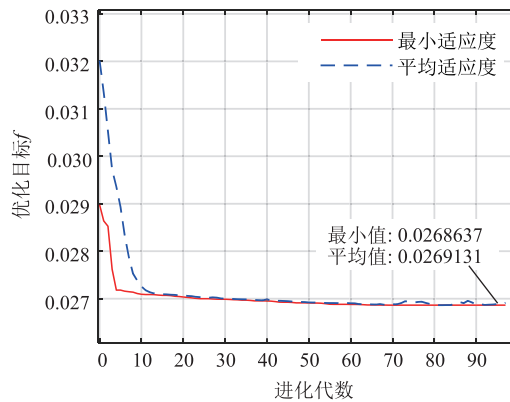
(a) 加热温度和摩擦因数 (b) 加热温度和压边力 (c) 加热温度和保压时间 (d) 摩擦因数和压边力
(e) 摩擦因数和保压时间 (f) 压边力和保压时间

Fig. 6 Comparisons of Kriging model and sampling points in sampling space

(a) Heating temperature and friction coefficient (b) Heating temperature and blank holder force (c) Heating temperature and holding time
(d) Friction coefficient and blank holder force (e) Friction coefficient and holding time (f) Blank holder force and holding time



(a)



(b)

图 7 遗传算法优化策略流程图 (a) 和优化收敛曲线 (b)

Fig. 7 Optimization strategy flow chart (a) and optimization convergence curve (b) of genetic algorithm

机叶片较厚, 因此, 在冲压成形过程中不存在开裂缺陷, 在优化时需要重点考虑板厚均匀性和回弹量。

(3) 拉丁超立方抽样→数值仿真试验获取抽样结果→克里金模型构建优化变量和优化目标之间的关系→遗传算法优化克里金模型的优化策略对实际零件的优化是有效的, 能够提升汽轮机叶片的成形质量、减少试错成本, 采用该优化策略能够得到满足要求的汽轮机叶片。

参考文献:

- [1] 朱姣, 钟振前, 翟战江, 等. 叶片开裂失效分析 [J]. 物理测试, 2022, 40 (1): 46-50.
Zhu J, Zhong Z Q, Zhai Z J, et al. Failure analysis of blade cracking [J]. Physics Examination and Testing, 2022, 40 (1): 46-50.
- [2] Li X P, Han R H, Xie Y S, et al. Analysis of failure causes of 0Cr19Ni9 blade crack [J]. Materials Science-Medziagotyra,

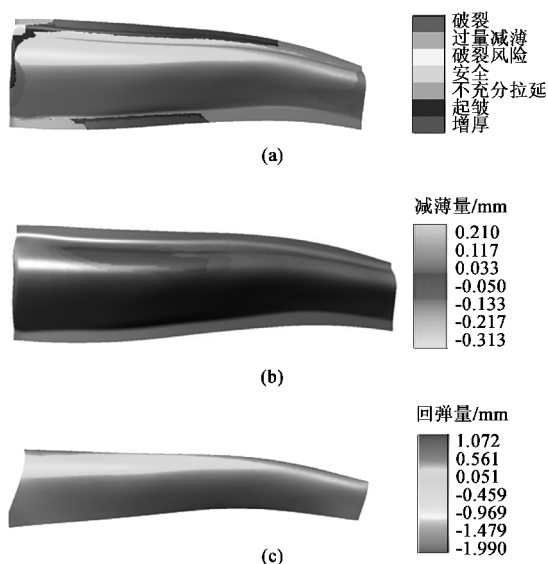


图 8 优化工艺冲压仿真结果

(a) 成形极限分布 (b) 厚度分布 (c) 回弹分布

Fig. 8 Stamping simulation results of optimized process

(a) Forming limit distribution (b) Thickness distribution

(c) Springback distribution

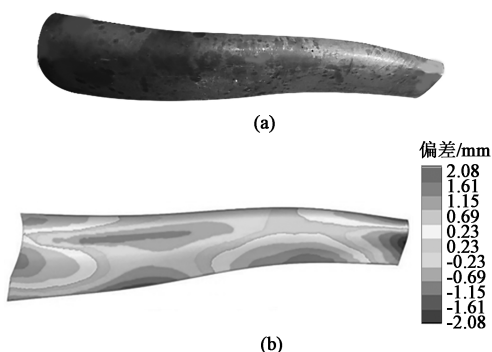


图 9 试制零件 (a) 及偏差检测结果 (b)

Fig. 9 Trial production part (a) and deviation detection result (b)

2022, 28 (3): 309-314.

- [3] Liu F, Lu Y Z. Numerical simulation of precision forming for blade rotor based on DEFORM [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 130-134: 2388-2391.
- [4] Xiang R, Zhou J, Xiong Y, et al. Hot forming of complex surface of hollow blade back arc based on drawing process [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93 (9-12): 4015-4021.
- [5] Gan W, Wagoner R H. Die design method for sheet springback [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46 (7): 1097-1113.
- [6] 袁飞, 吕彦明, 胡学超, 等. 汽轮机叶片精锻模具预补偿方法研究 [J]. 现代制造工程, 2020, (5): 113-118, 112.
- Yuan F, Lyu Y M, Hu X C, et al. Research on pre-compensation method of steam turbine blade precision forging die [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020, (5): 113-118, 112.

- [7] 张丰收, 马有福, 降文鹤, 等. 汽轮机叶片锻压成形参数的灰色多目标优化 [J]. 机械设计与制造, 2017, (9): 149-151.
- Zhang F S, Ma Y F, Jiang W H, et al. The Optimization for turbine blade forging process parameters based on grey theory [J]. Machinery Design & Manufacture, 2017, (9): 149-151.
- [8] 徐永锋, 高振恒, 杨明, 等. 锻造对汽轮机叶片钢力学性能的影响 [J]. 东方汽轮机, 2017, (3): 42-46, 57.
- Xu Y F, Gao Z H, Yang M, et al. Influence of forging on mechanical properties of turbine blade steel [J]. Dongfang Turbine, 2017, (3): 42-46, 57.
- [9] 刘俊, 盛伟, 施瑞华, 等. 汽轮机叶片锻造成形数值模拟与工艺优化 [J]. 金属加工 (热加工), 2016, (11): 38-40.
- Liu J, Sheng W, Shi R H, et al. Numerical simulation and process optimization of steam turbine blade forging [J]. MW Metal Forming, 2016, (11): 38-40.
- [10] 陈学文, 周会军, 陈天安. 基于 Hansel-Spittel 模型的 45Cr4NiMoV 合金热变形行为 [J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2015, 36 (5): 1-4, 14, 117.
- Cheng X W, Zhou H J, Chen T A. Hot deformation behavior of 45Cr4NiMoV alloy steel based on Hansel-Spittel model [J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science, 2015, 36 (5): 1-4, 14, 117.
- [11] 陈学文, 杨喜晴, 王纳纳. GCr15SiMn 钢的温变形行为及 Hansel-Spittel 流变应力模型 [J]. 金属热处理, 2018, 43 (5): 34-38.
- Chen X W, Yang X Q, Wang N N. Warm deformation behavior and Hansel-Spittel of constitutive model of GCr15SiMn steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43 (5): 34-38.
- [12] 高双明, 矫阿娇, 崔礼春. 某轿车后门内板冲压工艺及整形模具结构优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (1): 65-69.
- Gao S M, Jiao A J, Cui L C. Stamping process and structure optimization of sizing die for inner panel of a car rear door [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (1): 65-69.
- [13] 胡开元, 王雷刚. 基于响应面法与灰狼优化算法的壳体拉深成形模具优化设计 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (6): 244-250.
- Hu K Y, Wang L G. Optimization design on shell deep drawing die based on response surface methodology and grey wolf optimization algorithm [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (6): 244-250.
- [14] 王慧怡, 王岫鑫, 刘学. 汽车发动机罩的神经网络-强繁殖 NSGA-II 算法冲压参数优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (7): 100-106.
- Wang H Y, Wang X X, Liu X. Parameter optimization on stamping of neutral network-strong reproduction NSGA-II algorithm for automobile engine hood [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (7): 100-106.
- [15] 徐杰. 基于克里金模型和多目标遗传算法的转向节模具参数优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (7): 213-219.
- Xu J. Optimization on steering knuckle mold parameters based on Kriging model and multi-objective genetic algorithm [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (7): 213-219.