

基于克里金模型和数值仿真的汽车转向节成形工艺优化

黄 进

(重庆工业职业技术学院 电子与物联网工程学院, 重庆 401120)

摘要: 针对某汽车转向节热锻成形过程中存在的欠填充和成形载荷过大等问题, 采用 Forge 有限元软件进行仿真优化。首先, 基于热压缩实验, 建立了 40Cr 钢的 Hensel-Spittel 本构模型; 其次, 选取阻力墙结构参数作为优化设计变量, 开展了正交实验设计和数值仿真; 最后, 构建了响应面模型, 并利用多目标遗传算法进行了优化。研究表明, 40Cr 钢在 1123 K 以上发生再结晶软化, 且温度升高和应变速率降低时, 软化现象愈加明显。当温度超过 1123 K 且应变速率低于 1 s^{-1} 时, 出现显著应力峰值; Hensel-Spittel 模型能够高精度预测材料的高温流变特性, 其参数易于求解; 合理设计的阻力墙结构能够有效改变坯料流动规律, 确保填充性能。实际生产试制结果验证了从最优前沿解集中选取的最优解可获得合格锻件。

关键词: 转向节; 热锻成形; 克里金模型; 遗传算法; 阻力墙结构; 40Cr 钢

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.11.002

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 11-0008-08

Optimization on forming process of automobile steering knuckle based on Kriging model and numerical simulation

Huang Jin

(School of Electronics and IoT Engineering, Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120, China)

Abstract: For the problems of insufficient filling and excessive forming load in the hot forging process of a certain automotive steering knuckle, the simulation optimization was conducted by using finite element software Forge. First, a Hensel-Spittel constitutive model for 40Cr steel was established based on hot compression experiments. Next, the structure parameters of resistance wall were selected as the optimization design variables, and the orthogonal experimental design and numerical simulations were carried out. Finally, a response surface model was constructed, and the optimization was performed by using a multi-objective genetic algorithm. The research shows that 40Cr steel undergoes recrystallization softening above 1123 K, and the softening phenomenon becomes more pronounced as the temperature increases and the strain rate decreases. When the temperature exceeds 1123 K and the strain rate is below 1 s^{-1} , a significant stress peak occurs. The Hensel-Spittel model can accurately predict the high-temperature rheological characteristics of the material, and the parameters are easy to solve. A well-designed resistance wall structure can effectively change the flow laws of blank and ensures the filling performance. The actual production trial results have verified that the optimal solution selected from the optimal frontier solution set can obtain qualified forgings.

Key words: steering knuckle; hot forging; Kriging model; genetic algorithm; resistance wall structure; 40Cr steel

转向节作为汽车重要的零部件之一, 负责传递转向力矩, 并在行驶过程中承受不同程度的冲击载荷, 服役工况严苛, 对材料的力学性能有较高要求; 通常通过热锻成形工艺进行制造, 以提高其力学性能、满足服役要求^[1-2]。许多学者对汽车转向节的热成形工艺进行了研究。胡祚麻等^[3]使用 Deform-3D 有限元软件对某汽车转向节进行热锻成形数值模

拟, 发现长枝叉处存在塌角缺陷, 通过设计阻力墙结构和正交实验确定了影响预锻成形载荷和飞边长度的关键结构因素并得到了较优的阻力墙参数, 通过实际生产验证了其设计合理, 锻件充填完整, 无塌角缺陷。陆建明等^[4]对某型铝合金汽车转向节辊锻+终模锻成形工艺进行数值仿真分析, 结果显示, 铝合金汽车转向节需要多次辊锻制坯成形, 最大等效应力主要集中于成形件上下模具分模面接触部位。随着摩擦因数的增加, 最大等效应力逐渐减小, 而辊锻的最大成形载荷逐渐增加。邱劲等^[5]通过建立广义回归神经网络 (Generalized Regression Neural Network, GRNN) 模型, 以始锻温度、

收稿日期: 2024-02-21; 修订日期: 2024-05-28

基金项目: 重庆市职业教育教学改革研究项目 (Z233028); 重庆工业职业技术学院教育科学规划项目 (2023GZYJYGHY-02)

作者简介: 黄 进 (1981-), 男, 博士研究生, 副教授

E-mail: huangjin@cqipc.edu.cn

终锻温度、模具预热温度、锻压速度为输入, 抗拉强度、成形载荷、磨损量为输出, 对汽车转向节热锻成形工艺进行优化。优化结果表明, 抗拉强度提升率为 1.55%, 成形载荷和磨损量分别降低了 8.2% 和 4.2%, 最佳热锻工艺参数为: 始锻温度为 1260 ℃、终锻温度为 1140 ℃、模具预热温度为 230 ℃、锻压速度为 48 mm · s⁻¹。曹洪等^[6]采用自由锻制坯、预锻、终锻的工艺, 结合 Deform-3D 软件模拟和实验证明, 成功地减少了 S 级汽车转向节锻件的折叠缺陷和成形载荷, 实现了金属的合理分配, 锻件无明显成形缺陷, 为转向节锻件的实际生产提供了理论指导。徐杰^[7]通过选择模具冲头斜度、冲头头部长羊角侧圆角半径、杆部与法兰盘连接处圆角半径作为设计变量, 以杆部末端欠填充距离和终锻最大成形载荷作为优化目标, 通过正交实验设计、Deform-3D 数值模拟、克里金模型和多目标遗传算法相结合的策略, 获得了优化的最优参数, 模拟和生产验证结果证明了该优化策略的有效性, 并将材料利用率从 75% 提高至 85%。代璐蔚^[8]提出了 38MnVTi 非调质钢的两种成形工艺, 研究揭示了金属流动规律、应力、应变、速度、温度场、损伤、最大主应力分布以及行程-载荷曲线。分析结果表明, 通过拔长-锻粗-预成形-终成形的工艺方案, 所得到的产品具有优良的力学性能。此外, 进行了高温压缩实验、硬度实验、摩擦磨损实验和电化学腐蚀实验, 以分析 38MnVTi 非调质钢的力学性能受变形温度、应变速率和应变量的影响规律, 验证了数值模拟结果的准确性和工艺的可行性, 为转向节生产工艺的制定提供了参考。

综上所述, 数值仿真技术在研究转向节成形工艺中扮演着重要角色。为了解决某汽车转向节成形工艺中的挑战, 本文首先建立了高精度的有限元模型。接着, 通过代理模型和数值仿真技术对预锻模的阻力墙结构参数进行了优化。随后, 通过数值仿真和实验验证了所提工艺的可行性, 有效地提升了锻件的成形质量。

1 热锻成形工艺及有限元模型

1.1 结构分析

锻件的结构细节如图 1 所示。转向节由杆部、盘部及分叉 3 大部分组成, 其中, 杆部和分叉的成形难度较高。在热锻成形过程中, 若工艺设计不当, 这些部位极易出现欠填充等缺陷, 因此, 其热锻成

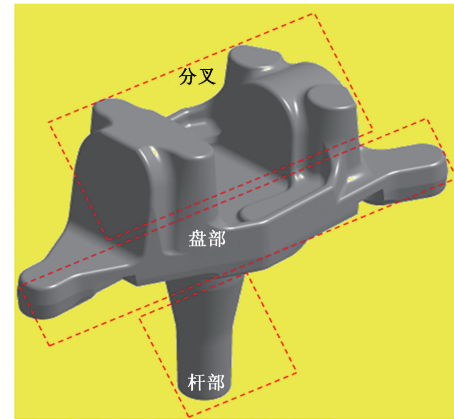


图 1 某汽车转向节锻件图

Fig. 1 Diagram of a automotive steering knuckle forgings

形工艺设计颇具挑战性。成形工艺的初步设计流程为: 锻粗→预锻→终锻。该锻件的质量约为 40 kg, 下料规格为 $\Phi 150$ mm (直径) × 282 mm (长度)。

1.2 材料模型

锻件采用的材料为 40Cr 钢, 而构建高精度有限元模型的关键在于准确的本构模型。为了建立这种材料的高精度有限元模型, 首先, 通过等温热压缩实验获得了该材料在不同温度和应变速率下的流变行为数据。在进行等温热压缩实验时, 设置的实验温度分别为 1123、1223、1333 和 1433 K, 而应变速率分别设定为 0.01、0.1、1 和 10 s⁻¹, 共制备了 16 个压缩试样。通过这些实验, 获得了如图 2 所示的 16 条详细的真实应力-真实应变曲线, 为后续的建立和分析提供了重要数据基础。在 Forge 软件中, 材料本构模型为 Hensel-Spittel (HS) 模型, 其表达式^[9-10]为:

$$\sigma = A e^{m_1 T} T^{m_9} \varepsilon^{m_2} e^{\frac{m_4}{\varepsilon}} (1 + \varepsilon)^{m_5 T} e^{m_7 \dot{\varepsilon}} \dot{\varepsilon}^{m_3} \varepsilon^{m_8 T} \quad (1)$$

式中: σ 为真实应力; ε 为真实应变; T 为温度; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; A 、 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 、 m_5 、 m_7 、 m_8 和 m_9 为材料常数, 与材料特性有关。

式 (1) 的对数形式为:

$$\ln \sigma = \ln A + m_1 T + m_9 \ln T + m_2 \ln \varepsilon + m_4 / \varepsilon +$$

$$m_5 T \ln(1 + \varepsilon) + m_7 \dot{\varepsilon} + m_3 \ln \dot{\varepsilon} + m_8 T \ln \dot{\varepsilon} \quad (2)$$

式 (2) 对于材料常数来说是一个多元线性方程, 可以使用多元线性回归分析获取所有材料常数的全局最优值。将等温热压缩获得的真实应力、真实应变数据带入式 (2) 中进行多元线性回归, 得到材料的本构方程材料参数为: $A = 3237.77$, $m_1 = -0.00197$, $m_2 = 0.30391$, $m_3 = -0.20379$, $m_4 = -0.00291$, $m_5 = -0.00222$, $m_7 = 0.91457$, $m_8 = 0.0002524$ 和 $m_9 = 0.00826$ 。将本构方程的预测值

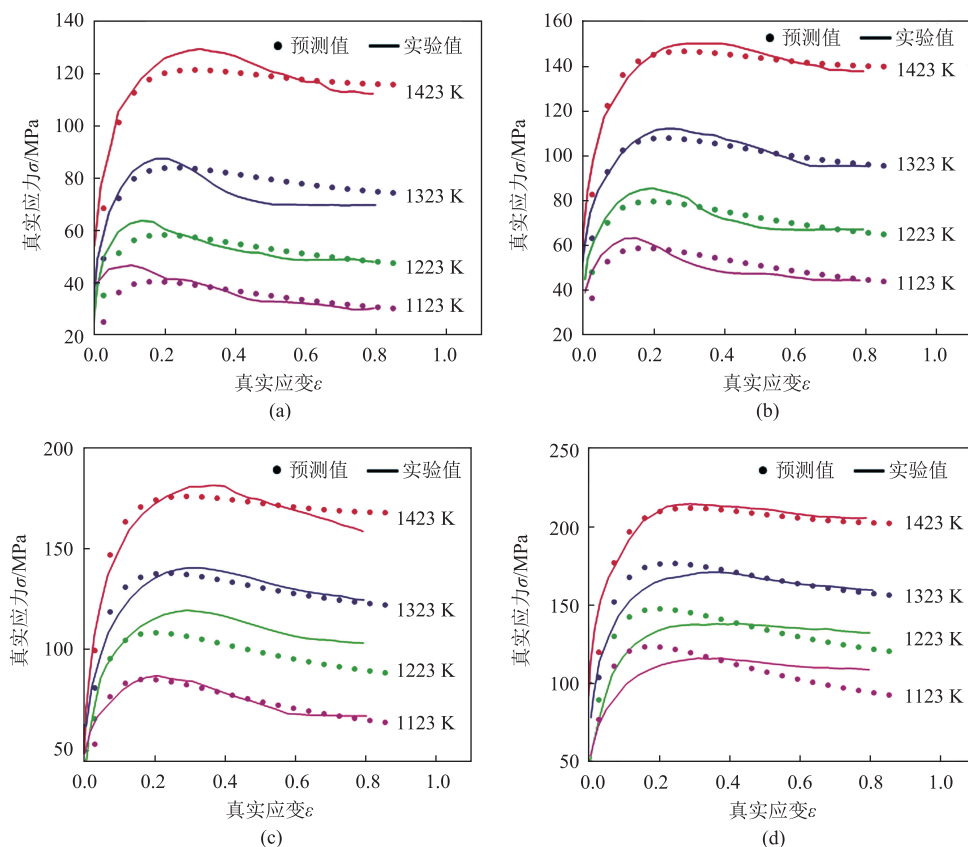


图 2 不同应变速率和温度下 40Cr 钢热压缩实验曲线及 HS 模型预测数据对比

(a) 应变速率为 0.01 s^{-1} (b) 应变速率为 0.1 s^{-1} (c) 应变速率为 1 s^{-1} (d) 应变速率为 10 s^{-1}

Fig. 2 Comparison of hot compression experiment curves and predicted data by HS model for 40Cr steel at different strain rates and temperatures

(a) Strain rate of 0.01 s^{-1} (b) Strain rate of 0.1 s^{-1} (c) Strain rate of 1 s^{-1} (d) Strain rate of 10 s^{-1}

和实验值进行对比,如图 2 所示。

由图 2 可知,40Cr 钢材料在 1123 K 以上的温度下均表现出了再结晶软化的现象,且随着温度的升高和应变速率的降低,再结晶软化的效果更为显著;特别是当温度超过 1123 K 且应变速率低于 1 s^{-1} 时,材料出现了明显的应力峰值。通过对实验数据与预测数据的对比分析可以看出,Hensel-Spittel (HS) 模型的预测精度整体上较高,该模型能够有效地预测材料的再结晶软化特性。

1.3 仿真参数

除了材料模型之外,摩擦条件、网格数量、压机速度以及传热条件等因素对仿真模型的精度也产生了显著影响。在 Forge 软件环境下,这些参数的设定相对容易获取。通过多轮模拟实验,能够确定这些仿真参数的最佳值,具体参数设置如表 1 所示。这些参数的精细调整对于确保仿真结果的准确性和可靠性至关重要,使得模拟过程更加接近实际生产条件,从而提高仿真预测的有效性。

表 1 有限元模型的其他参数

Table 1 Other parameters of finite element model

参数	初始锻造温度/ $^{\circ}\text{C}$	下压速度/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	坯料网格数目	摩擦条件 (混合模型)		金属模强传热/ $(\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1})$
				库伦	剪切	
数值	1100	250	100000	0.15	0.3	20000

利用前文提及的参数设置,对其成形过程进行了数值模拟,模拟的预锻结果如图 3 所示,其中, l 为预锻阶段杆部的欠填充距离。从图 3 中可以明显看出,在预锻工序中,杆部分发生了明显的欠填充

现象。如果这种欠填充现象过于严重,将会导致在最终的锻造过程中也出现欠填充的问题。因此,在后续的工艺优化中,应当着重考虑减少这种欠填充现象,以确保锻件的质量和成形的完整性。通过调

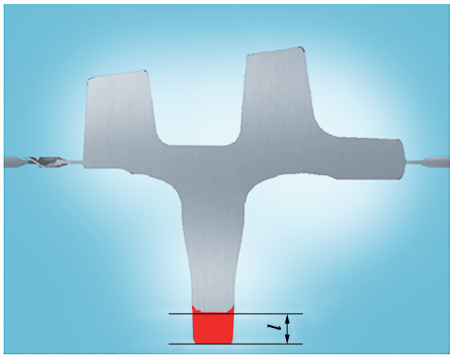


图 3 预锻有限元仿真结果

Fig. 3 Finite element simulation result of preforming

整工艺参数或者改进模具设计，可以有效地减轻或避免预锻阶段的欠填充问题，从而提高最终产品的质量。

2 模具结构参数优化

2.1 优化方案

鉴于原始工艺存在部分批次锻件杆部欠填充的问题，需要对其进行优化，同时要求尽可能地减少对模具结构的修改，且终锻模具的结构不允许变动。因此，本文选择预锻阶段的模具作为优化对象，在尽可能地减少模具尺寸修改的前提下，选取阻力墙结构作为优化设计的变量。阻力墙的主要作用是抑制金属流动的非必要方向，有助于增加金属在所需方向上的流动，从而改善金属充填效果^[4,11]。然而，在转向节模锻中，阻力墙应用的资料相对有限，实际应用中需要根据具体情况选择合适的阻力墙结构形式，并调整多个设计参数，这种灵活性导致模具的设计周期相对较长。同时，需注意若参数设计不合理，可能会导致转向节的成形载荷显著增加，进而影响整体成形质量。因此，在阻力墙结构的设计与应用中，需综合考虑各种因素，以确保最终达到良好的金属充填效果和成形质量。

如图 4 所示，预锻模的阻力墙结构参数包括桥部高度 d 、阻力墙高度 h 、阻力墙宽度 w 、阻力墙倾角 θ 以及阻力墙间隙 n ，选取这 5 个参数作为设计变量，并将设计目标设定为预锻阶段杆部的欠填充距离 l 和终锻成形载荷 f 。

2.2 实验设计

选取桥部高度 d 、阻力墙高度 h 、阻力墙宽度 w 、阻力墙倾角 θ 、阻力墙间隙 n 这 5 个参数设计如表 2 所示的 5 因素 3 水平正交实验。

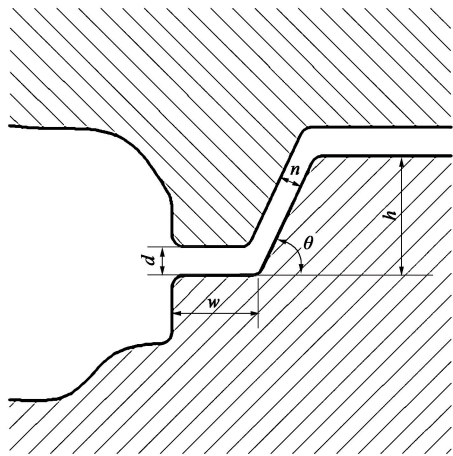


图 4 阻力墙结构及参数

Fig. 4 Structure and parameters of resistance wall

表 2 正交实验因素水平表

Table 2 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素				
	桥部高度 d/mm	阻力墙高度 h/mm	阻力墙宽度 w/mm	阻力墙倾角 $\theta/(^\circ)$	阻力墙间隙 n/mm
1	1	10	12	5	2
2	3	20	15	7	4
3	5	30	18	9	6

使用表 2 中的各个参数组合在 Forge 软件中进行数值模拟分析，得到的正交实验方案及指标值如表 3 所示。

表 3 正交实验的方案和结果

Table 3 Schemes and results of orthogonal experiment

方案	因素						目标结果	
	桥部高度 d	阻力墙高度 h	阻力墙宽度 w	阻力墙倾角 θ	阻力墙间隙 n		l/mm	$f/(\times 10 \text{ MN})$
1	1	1	1	1	1		25.6080	2.8997
2	1	2	2	2	2		20.0750	4.0774
3	1	3	3	3	3		22.8360	2.9775
4	2	1	1	2	2		25.1130	3.6774
5	2	2	2	3	3		16.1590	2.5331
6	2	3	3	1	1		21.1530	4.3662
7	3	1	2	1	3		18.3150	3.2441
8	3	2	3	2	1		22.9680	3.7107
9	3	3	1	3	2		24.1780	3.1219
10	1	1	3	3	2		17.2370	5.1106
11	1	2	1	1	3		22.6050	3.2663
12	1	3	2	2	1		30.6020	4.0329
13	2	1	2	3	1		28.5450	2.3220
14	2	2	3	1	2		23.9470	3.1108
15	2	3	1	2	3		29.3040	3.5330
16	3	1	3	2	3		32.9120	2.4109
17	3	2	1	3	1		30.3930	3.2209
18	3	3	2	1	2		25.5530	4.2110

2.3 代理模型

由于实验设计中包含 5 个设计变量和 2 个优化目标, 实验数量仅为 18 组, 这样的情况下使用传统的代理模型 (如多项式、神经网络等) 进行预测的精度较为有限。为了建立设计变量与设计指标之间的近似关系, 使用解决这类小样本多变量问题的较为理想的克里金模型。图 5 和图 6 展示了由克里金

模型构建的响应面模型, 其中, 当设计变量未出现时, 取值为表 2 中水平 2 的数值。

通过观察图 5 和图 6 可以发现, 2 个设计目标与 5 个设计变量之间存在较强的非线性关系, 但规律不明显, 并且存在互斥情况。因此, 在对克里金模型进行优化时, 需要采用适用的优化算法。遗传算法是一种较为适用的方法, 能够有效地对克里金

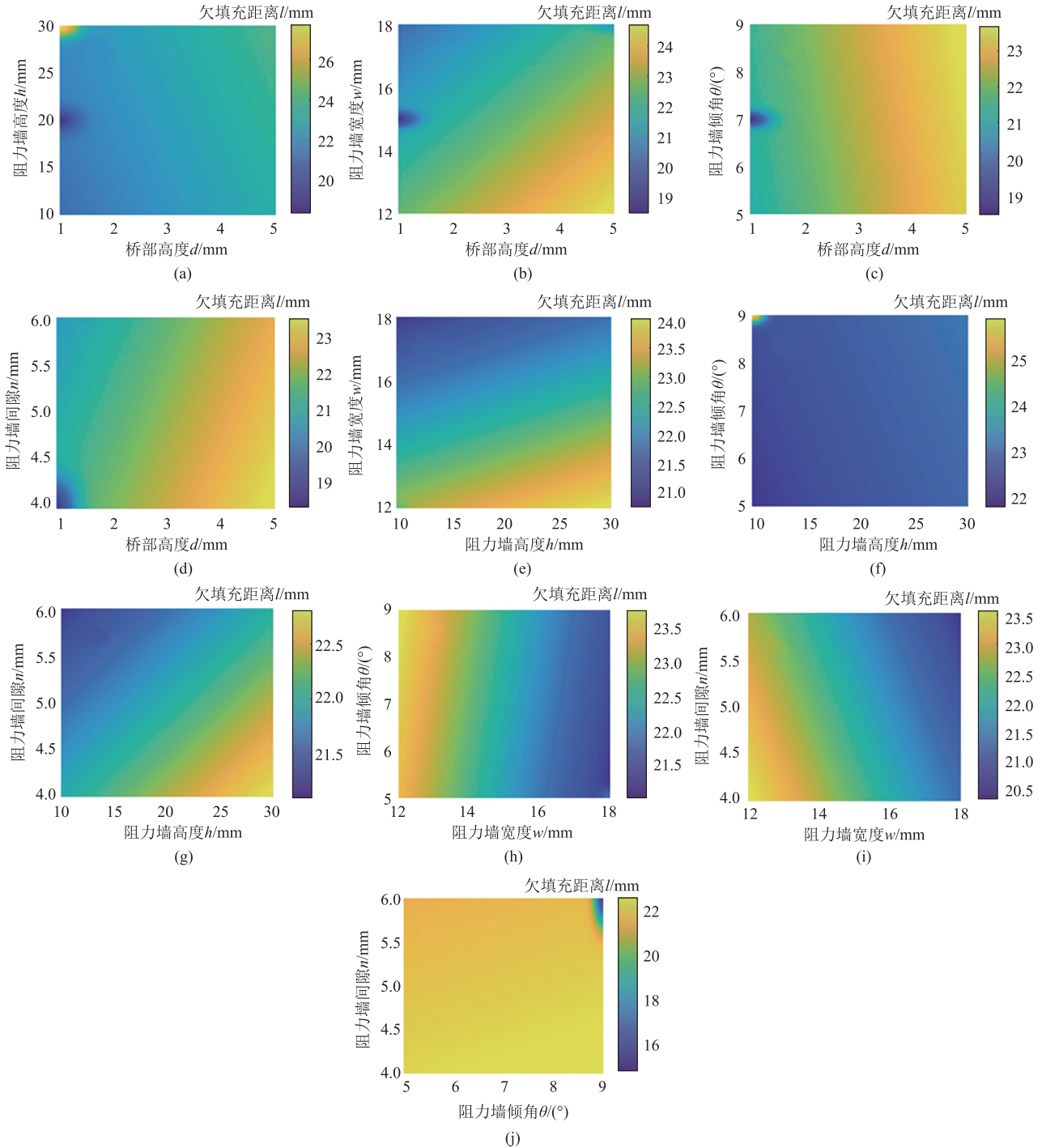


图 5 欠填充距离的克里金响应面模型

(a) l - h - d (b) l - w - d (c) l - θ - d (d) l - n - d (e) l - w - h (f) l - θ - h (g) l - n - h (h) l - θ - w (i) l - n - w (j) l - n - θ

Fig. 5 Kriging response surface model of insufficient filling distance

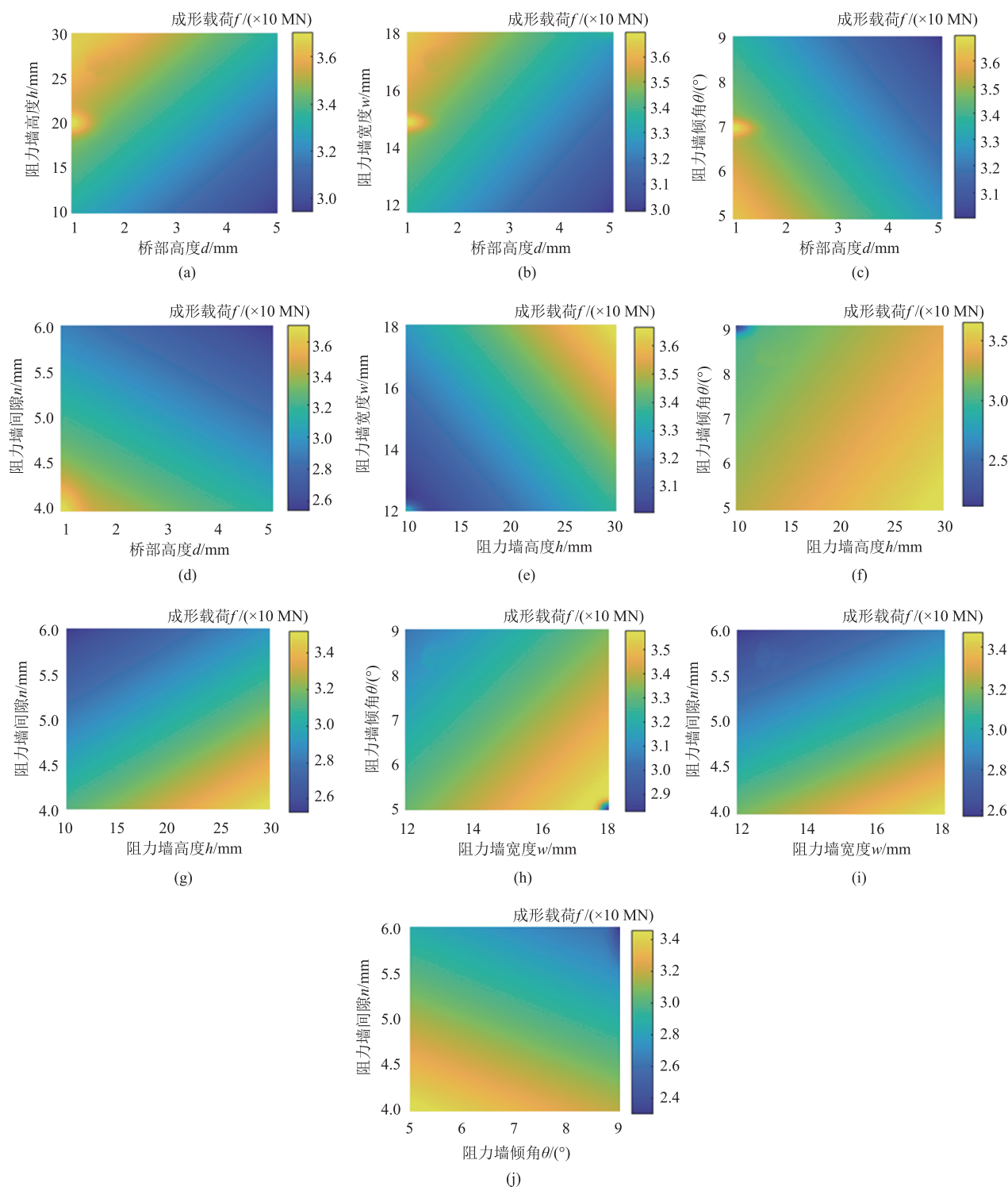


图 6 成形载荷的克里金响应面模型

(a) $f-h-d$ (b) $f-w-d$ (c) $f-\theta-d$ (d) $f-n-d$ (e) $f-w-h$ (f) $f-\theta-h$ (g) $f-n-h$ (h) $f-\theta-w$ (i) $f-n-w$ (j) $f-n-\theta$

Fig. 6 Kriging response surface model of forming load

模型（无梯度、非线性）进行优化。

2.4 优化策略

根据相关研究^[11]的指导, 优化过程中, 杆部未填充距离 l 和成形载荷 f 均需要最小化。然而, 这两

个指标具有不同的优先级, 即在确保杆部未填充距离 l 小于临界值的前提下, 尽可能减小两个指标。这涉及到一个典型的多目标优化问题。为了解决这个问题, 采用多目标遗传算法 (NSGA-II) 对克里

金模型进行优化,得到的 Pareto 前沿解集如图 7 所示。

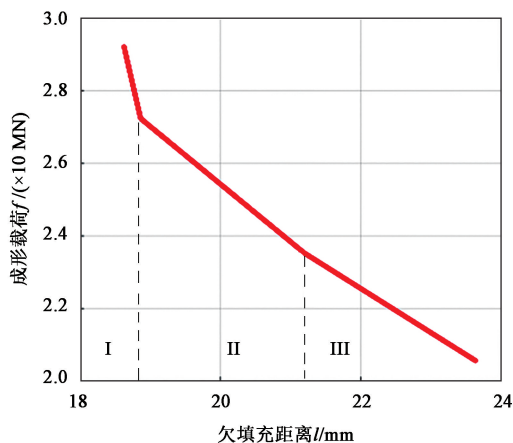


图 7 Pareto 前沿解集

Fig. 7 Pareto front solution set

根据图 7 所示, Pareto 前沿解集可被分为 I、II、III 3 个区域。在区域 I 中,随着杆部未填充距离的变化,成形载荷急剧下降;在区域 II 中,成形载荷随着杆部未填充距离的增加而逐渐下降;而在区域

III 中,随着杆部未填充距离的增加,成形载荷缓慢下降。鉴于欠填充问题的重要性,将区域 I 的边界视为最优解,其对应的设计变量取整后得到最优解,如表 4 所示。

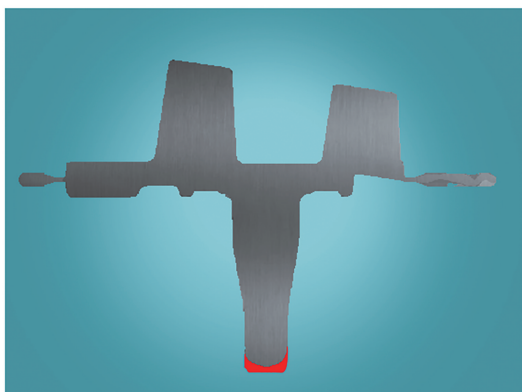
表 4 最优解取值

Table 4 Values of optimal solution

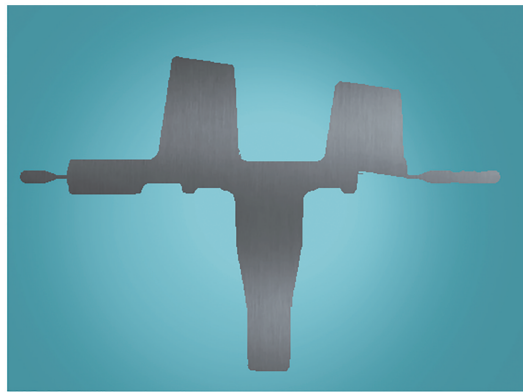
参数	桥部高度 d/mm	阻力墙高度 h/mm	阻力墙宽度 w/mm	阻力墙倾角 $\theta/(\text{°})$	阻力墙间隙 n/mm
取值	2	14	15	9	2

3 生产验证

为验证优化结果的合理性,利用有限元技术对优化后的模具参数进行了数值模拟分析,其中,其余参数使用表 1 中的数值。图 8 展示了优化前后转向节终锻模拟仿真结果。从图 8a 可以观察到,在优化前,杆部区域存在一定程度的未完全填充现象。而由图 8b 可以看出,在优化后,杆部区域能够完全填充,这证明了优化方案的有效性。



(a)



(b)

图 8 优化前后转向节终锻件仿真结果

(a) 优化前 (b) 优化后

Fig. 8 Simulation results of final forgings for steering knuckle before and after optimization

(a) Before optimization (b) After optimization

如图 9 所示,使用经过优化的模具参数进行了模具试制,并在 4000 t 热模锻压力机上进行了终锻。实际生产结果表明,经过挤锻工艺成形后,模具的难填充区域均能够充满,成形所得的锻件各部位结构均在公差范围内。此外,零件表面光滑,无折叠等缺陷。这进一步验证了优化方案的实际有效性。

4 结论

(1) 40Cr 钢材料在温度超过 1123 K 时表现出再结晶软化现象,且随着温度的升高和应变速率的降低,该现象更为显著。在温度高于 1123 K 且应变速率低于 1 s^{-1} 的条件下,出现了明显的应力峰值。

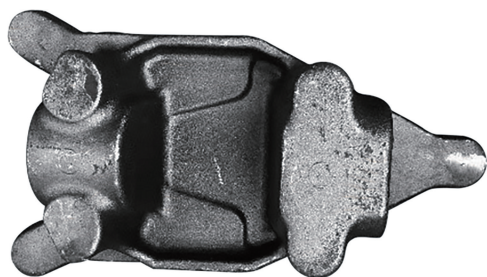


图 9 最优参数组合下的转向节锻件

Fig. 9 Steering knuckle forgings under optimal parameter combination

通过实验数据与预测数据的比较分析, Hensel-Spittel 模型准确预测了 40Cr 钢在高温下的流变行为, 展现出高精度预测能力, 为数值仿真模型的构建提供了便利。

(2) 模具中阻力墙的设计参数, 包括桥部高度、阻力墙高度、阻力墙宽度、阻力墙倾角以及阻力墙间隙, 对成形工艺有着显著影响。通过优化阻力墙结构, 可以有效地改善金属流动规律, 从而提高填充性能。同时, 阻力墙参数对成形载荷和填充性能的影响较为复杂, 涉及多变量的交互作用。

(3) 克里金模型在近似模具参数与设计指标之间的关系时, 展现出了高精度的近似能力, 尤其适合处理小样本的复杂问题。通过 Pareto 前沿解集的分析, 可以将解集分为 3 个区域: 在区域 I, 小幅度变化的杆部未填充距离导致成形载荷显著降低; 在区域 II, 随着杆部未填充距离的增加, 成形载荷逐渐降低; 区域 III, 成形载荷随杆部未填充距离缓慢减小。选择最优前沿解集中的解 (桥部高度为 2 mm、阻力墙高度为 14 mm、阻力墙宽度为 15 mm、阻力墙倾角为 9° 、阻力墙间隙为 2 mm) 能够生产出合格的锻件, 实际生产实验验证了优化后的挤压制坯及终锻模锻工艺的有效性与合理性。

参考文献:

[1] 宛加雄, 武建祥, 晏洋, 等. 汽车转向节臂端部冷精整工艺优化 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (9): 66-72.
Wan J X, Wu J X, Yan Y, et al. Optimization of cold finishing process for the end of automobile knuckle arm [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14 (9): 66-72.

[2] 齐羿, 薛喜云, 焦斐, 等. 盘式转向节锻造工艺优化与过程模拟分析 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (9): 32-40.
Qi Y, Xue X Y, Jiao F, et al. Forging process optimization and process simulation analysis on disc steering knuckle [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (9): 32-40.

[3] 胡祚麻, 刘淑梅, 毛欣然. 基于正交实验与响应面法汽车转向节模具结构优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (8): 178-184.
Hu Z X, Liu S M, Mao X R. Structural optimization on automobile steering knuckle mold based on orthogonal test and response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (8): 178-184.

[4] 陆建明, 刘杰, 潘晓涛. 基于 Deform 的铝合金汽车转向节锻造成形分析 [J]. 热加工工艺, 2023, 52 (5): 111-113.
Lu J M, Liu J, Pan X T. Analysis of forging forming of aluminum alloy automotive steering knuckle based on Deform [J]. Hot Working Technology, 2023, 52 (5): 111-113.

[5] 邱劲, 扶教龙. 基于神经网络的转向节热锻成形工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2022, 51 (9): 106-109.
Qiu J, Fu J L. Hot forging forming process optimization of automobile steering knuckle based on neural network [J]. Hot Working Technology, 2022, 51 (9): 106-109.

[6] 曹洪, 薛世博, 薛传妹, 等. 基于圆弧形锻粗模合理体积分配的转向节成形工艺 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (9): 7-11.
Cao H, Xu S B, Xue C M, et al. Forming technology of steering knuckle based on reasonable volume distribution for circular arc upsetting die [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (9): 7-11.

[7] 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.

[8] 代璐蔚. 非调质钢 38MnVTi 转向节热锻成形数值模拟及工艺优化 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2019.
Dai L W. Numerical Simulation and Process Optimization of Hot Forging Process for Steering Knuckle of 38MnVTi Non-quenched and Tempered Steel [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2019.

[9] Mehtedi M E, Spigarelli S, Gabrielli F, et al. Comparison study of constitutive models in predicting the hot deformation behavior of AA6060 and AA6063 aluminium alloys [J]. Materials Today Proceedings, 2015, 2 (10): 4732-4739.

[10] Mehtedi M E, Musharavati F, Spigarelli S. Modelling of the flow behaviour of wrought aluminium alloys at elevated temperatures by a new constitutive equation [J]. Material Design, 2014, 54: 869-873.

[11] 杨海, 周杰, 黄亮, 等. 基于数值模拟的转向节挤压工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (1): 72-74.
Yang H, Zhou J, Huang L, et al. Extrusion process optimization for steering knuckle based on numerical simulation [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (1): 72-74.