

基于 TOPSIS 和 CRITIC 的齿轮坯闭式热模锻工艺方案评估

李永亮^{1,2}, 梁 强^{1,2}, 贾艳艳^{1,2}

1. 重庆工商大学 机械工程学院, 重庆 400067

2. 重庆工商大学 智能装备绿色设计与制造重庆市重点实验室, 重庆 400067

摘 要:目的 基于热力耦合机理,应用模型数值仿真和多参数化的评价机制,实施方案寻优,从而提升齿轮坯闭式热锻工艺的设计效率和成形质量。方法 基于 DEFORM 仿真软件对某工程齿轮坯锻件的 3 种闭式热模锻成形工艺方案进行 CAE 仿真分析,研究其金属塑性流动规律,并采用 TOPSIS(Technique for Order Preferences by Similarity to Ideal Solution)和 CRITIC(Criteria Importance Through Intercriteria Correlation)相结合的方法,构建以应变、应力、载荷、充填性、磨损等 8 个评价指标的评估模型及权值计算方法,进行工艺方案评估。结果 通过仿真可以发现不同的预锻方案,金属塑性流动方式不同,成形结果不同,其中方案 1 未填满,成形有毛刺,受载不均匀,模具损伤值较大;方案 2 受载均匀,填充饱满,模具磨损深度大,等效应力大;方案 3 成形质量较好,但受载不均匀,且同样模具磨损深度大,等效应力大;综合考虑锻件成形质量和模具使用寿命,通过指标同向标准化处理、权重计算,得到方案 1、2、3 贴近程度分别为 0.446、0.511、0.556,方案 3 值最大,结果最优。对方案 3 进行工艺试验,获得的齿轮坯充填饱满、无折叠缺陷。结论 通过数值模拟与评估模型相结合的方法,可以精确、高效地评估闭式热锻造工艺方案的优劣,提高设计效率与成形质量。

关键词:闭式热锻;预锻方案;热力耦合 CAE 分析;多参同向标准化;权重计算与评价

中图分类号:TG316.3 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0003.001

Evaluation of Closed Hot Forging Process Scheme for Gear Blank Based on TOPSIS and CRITIC

LI Yongliang^{1,2}, LIANG Qiang^{1,2}, JIA Yanyan^{1,2}

1. School of Mechanical Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China

2. Chongqing Key Laboratory of Green Design and Manufacturing of Intelligent Equipment, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China

Abstract: **Objective** Based on the thermal coupling mechanism, the numerical simulation of the model and the evaluation mechanism of multi-parameters are applied to implement the optimization of the scheme, so as to improve the design efficiency and forming quality of the closed hot forging process of gear blanks. **Methods** A CAE simulation based on DEFORM was conducted to analyze three closed hot forging forming process schemes for an engineering gear blank forging. The simulation analysis investigated the plastic flow pattern of the metal under the hot forging process. Based on this, this paper adopted a combined evaluation method of TOPSIS (a technique for order preferences by similarity to ideal solution) and CRITIC (criteria importance through intercriteria correlation). It constructed an evaluation model with eight evaluation indicators including strain, stress, load, compaction, wear, etc., and a weight calculation method to evaluate the process scheme. **Results** In the simulation, different pre-forging solutions had different plastic metal flow patterns, which in turn led to different forming results. The simulation results of option 1 showed that gear blanks were not filled, had

收稿日期:2023-03-31 修回日期:2023-05-05 文章编号:1672-058X(2024)03-0001-08

基金项目:重庆市自然科学基金面上项目(CSTC2020JCYJ-MSXMX0276);重庆工商大学校内科研项目(2152026)。

作者简介:李永亮(1982—),男,山东威海人,工程师,硕士,从事先进制造技术研究。

通讯作者:梁强(1988—),男,博士,副教授,从事精密塑性成形及优化技术研究。Email:2017015@ctbu.edu.cn。

引用格式:李永亮,梁强,贾艳艳.基于 TOPSIS 和 CRITIC 的齿轮坯闭式热模锻工艺方案评估[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2024,41(3):1—8.

LI Yongliang, LIANG Qiang, JIA Yanyan. Evaluation of closed hot forging process scheme for gear blank based on TOPSIS and CRITIC[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(3): 1—8.

burrs, and were not uniformly loaded, with a significant mold damage value. The simulation results of option 2 showed that gear blanks were uniformly loaded and filled, but the mold wear depth was large and the equivalent force was high. The simulation results of option 3 showed that the gear blanks were formed with good quality, but they were not uniformly loaded, and the mold wore to a large depth and the equivalent force was high. Considering the forging forming quality and mold service life comprehensively, the index weights were calculated by isotropic standardization of different indexes, and the degrees of closeness of options 1, 2, and 3 were obtained as 0.446, 0.511, and 0.556, respectively. The results showed that option 3 had the largest value and the best results. Process tests were conducted for option 3 and the gear blanks were obtained with full filling and no folding defects. **Conclusion** The combination of finite element numerical simulation and evaluation models allows for an accurate and efficient evaluation of the advantages and disadvantages of closed hot forging process solutions. This method can improve the design efficiency and forming quality of the closed hot forging process of gear blanks.

Keywords: closed hot forging; pre-forging scheme; thermodynamic coupling CAE analysis; multi-participant isotropic standardization; weight calculation and evaluation

1 引言

齿轮是机械装备中传递动力与运动的关键元件,在工艺加工过程中锻造是获取齿轮毛坯的主要手段,经锻造成形的齿轮坯,具有较好的内部微观组织和综合力学性能^[1-2]。近年来,为节约材料,降低能耗与制造成本,减少工序与加工余量,提高生产效率,精密锻造逐渐成为齿轮类零部件毛坯制造工艺中的主流技术。如何提高齿轮坯精密锻造成形的材料利用率、提升锻件品质是当下制造企业与相关学者关注的热点。

按工艺成形温度,精密锻造可以分为热精锻、温精锻、等温精锻、冷精锻、复合精锻等多种工艺。因工艺成形变形小,塑性好,可成形复杂零件,热精锻受到了国内外众多学者的追捧。戴龙杰等^[3]提出了闭式模锻成形链轮齿形的精确设计方法,通过工艺实验,验证了设计方法的合理性、准确性,为齿轮类锻件精密模锻齿廓型腔的精确设计提供了理论与实践支撑。刘鑫等^[4]通过对齿轮零件的结构优化,提出了“楔横轧制坯+模锻成形”的新工艺方案,实现了模具设计的通用化,并探究了相关工艺参数对芯部损伤值的影响规律,提高了生产效率。陈光伟等^[5]通过数值模拟对比了冷锻和热锻工艺,分析了伞齿轮坯在成形过程中各场量的变化情况。马自勇等^[6-10]提出了一种直齿圆柱齿轮轴向滚轧成形工艺方案,并研制了相应成形机床。梁强等^[11-14]提出了大模数直齿圆柱齿轮冷挤压+冷精整的成形工艺方案。

金属塑性成形机理及材料流动规律是齿轮坯锻造工艺研究的理论基础。新工艺、新方法、多方案比较及模具的结构优化与试验是齿轮坯锻造工艺研究的主要技术手段。然而,这些技术手段从工艺到现实,增加了模具的试模成本,也带来了很多技术上的不确定性。为此,寻求一种兼顾经济性与实用性的锻造工艺研究方法成为一种必然。

随着计算机技术及数值仿真技术的发展,有限元分析与机器学习逐渐被应用于精密锻造工艺的研究中。陈云等^[15]针对锻造工艺中齿轮坯尺寸精度的影响

因素,进行了锻造工艺有限元仿真及工艺参数寻优分析,在保证尺寸精度的同时解决了成形的飞边问题。Eyercioglu 等^[16]基于齿轮配合的预紧力导致的齿廓尺寸变化的现象,提出了一种新型齿廓结构,并应用有限元分析验证了结构尺寸的补偿作用。蔡力钢等^[17]将有限元与因子试验相结合,应用较少的试验分析了模具磨损影响因素,实现了工艺参数的优化。庄武豪^[18]应用遗传算法及 BP 神经网络建立了预紧量与齿轮精度的非线性模型预测,提升了直齿齿轮的精密形成精度。有限元仿真分析及机器学习方法为精密锻造工艺带来了新技术、新手段,极大降低了试模的成本,提高了生产效率。然而工程实践中,不同对象、不同的工艺方案及多类别的工艺参数,如何评价、分析及选取最佳工艺方法却鲜有文献报道。

本文以某齿轮坯的精密热锻工艺为研究对象,设计了 3 种不同的闭式热模锻成形工艺,应用 DEFORM 软件构建了不同方案的热力耦合有限元模型,分析了不同工艺方案中的金属塑性流动规律,并进行了数值模拟仿真。为降低试模成本,围绕着工艺仿真数据,建立了基于 TOPSIS 和 CRITIC 的成形工艺方案数学评估模型,进行了工艺方案评估、选择与试验。论文将多工艺方案设计、有限元仿真分析、数值权值计算与评价有机结合起来,为齿轮闭式热锻工艺的设计与评估提供了新的、可行的技术方法。

2 热模锻工艺方案设计

某齿轮坯锻件如图 1 所示,材质为 20CrMnTi,锻件重量 738.3 g,是轿车传动箱重要零部件之一。其主要结构特点为:轮毂高、内孔深。目前常规的模锻成形方案为热模锻压力机上镦粗+开式模锻成形,但采用开式热模锻压成形时金属水平方向流动较垂直方向更为剧烈,成形后锻件飞边较大、轮毂处易出现充填不饱满的情况。考虑零件的结构特点,同时为避免零件充填不饱满,提高材料利用率,选择闭式热模锻工艺为齿轮坯的成形方案。

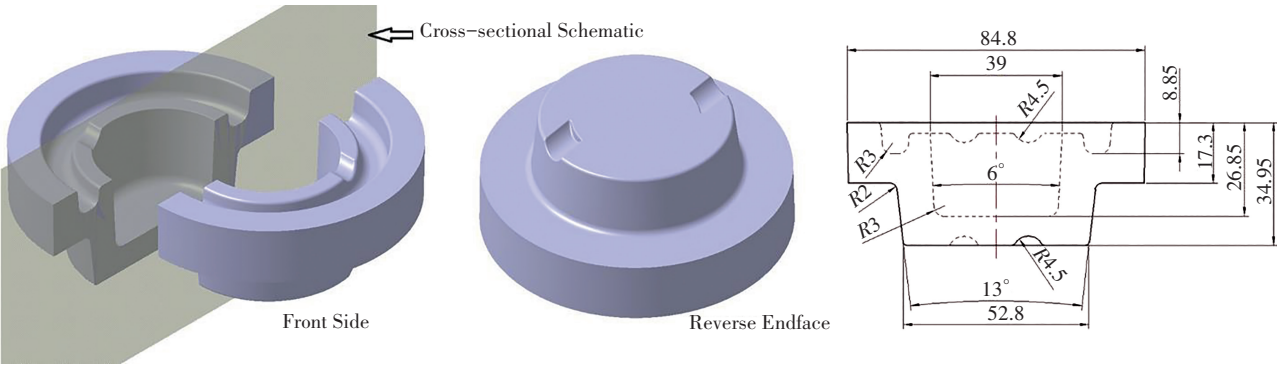


图 1 锻件示意及锻件图

Fig. 1 Diagram of forging and forging drawing

根据已有的工程实践,参考相关文献^[19-20],结合齿轮坯结构特点,设计如图 2 所示的 3 种热锻成形工艺方案。根据锻件重量及圆棒料锻粗原则设计下料的规格为 $\Phi 40.6\text{ mm}\times 74.1\text{ mm}$ 。方案 1 中,首先经锻坯去除坯料的氧化皮后进行锻粗制坯,再将饼形坯料置于齿轮坯模具型腔进行终锻成形;方案 2 和方案 3 中,坯料经锻坯去除氧化皮后先进行预锻成形,再将预锻坯料进行终锻成形。方案 2 和方案 3 的区别在于设计了两种不同形状的预锻件。

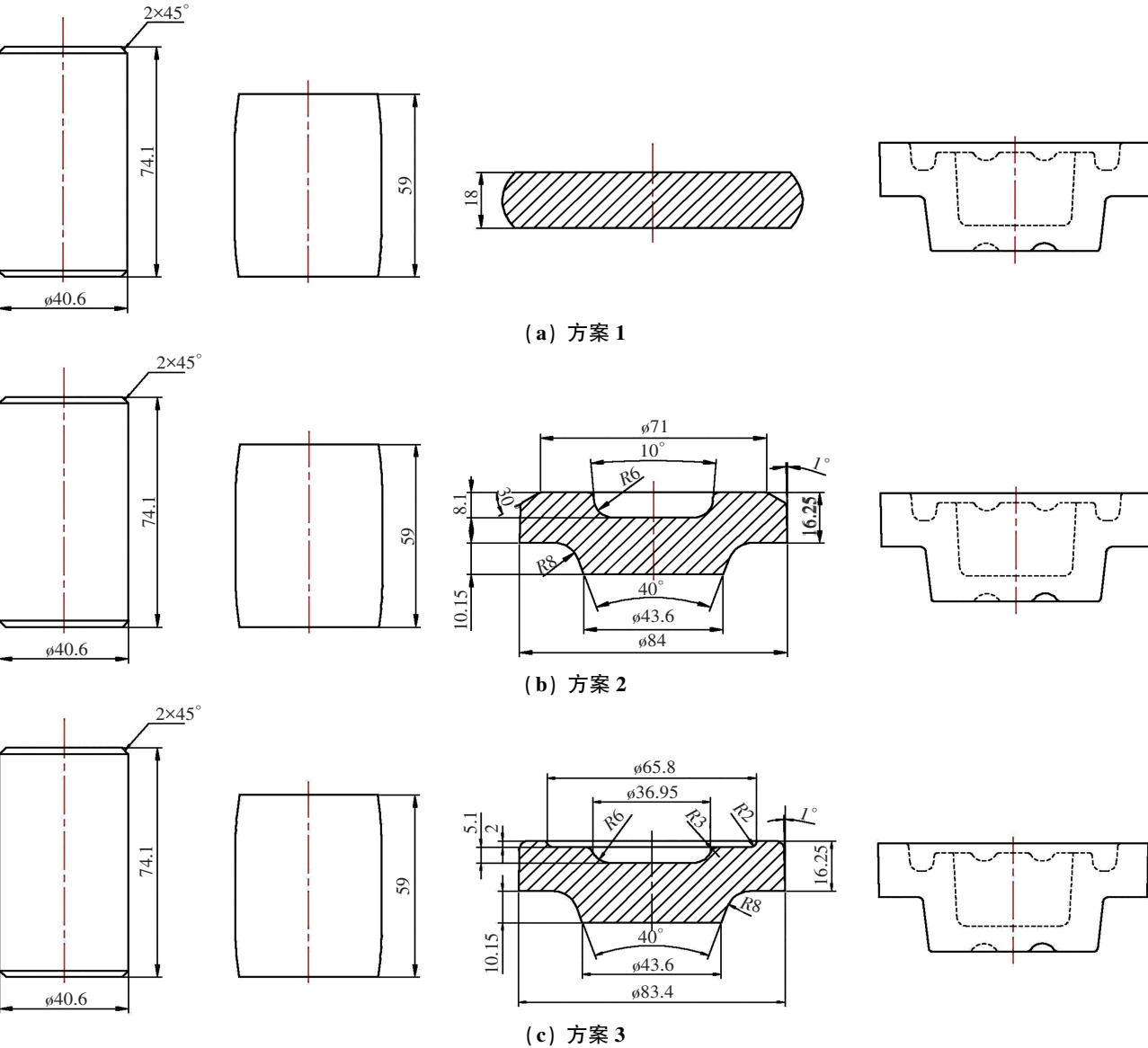


图 2 齿轮坯成形工艺方案

Fig. 2 Process schemes of gear blanks

3 齿轮坯热锻数值建模及仿真

为探究齿轮坯闭式精密热锻成形工艺过程,分析金属在不同热锻工艺方案塑性变形过程中的流动规律,采用 DEFORM 软件构建有限元数值模型。鉴于 3 种方案的齿轮坯均为回转体且零件上、下两端面均有对称油槽,为提高计算速度,有限元分析模型采用 1/2 模型进行仿真。建模后,坯料划分网格数量为 80 000 个,并设置坯料温度为 1 180 ℃,模具材料为 H13 钢,模具预热温度 250 ℃,坯料与模具之间的热传导系数为 5 N/(sec · mm · ℃),坯料与模具之间的摩擦系数为 0.3,上模速度为 200 mm/sec。同时,基于文献[21]构建模具的 Archard 磨损模型。

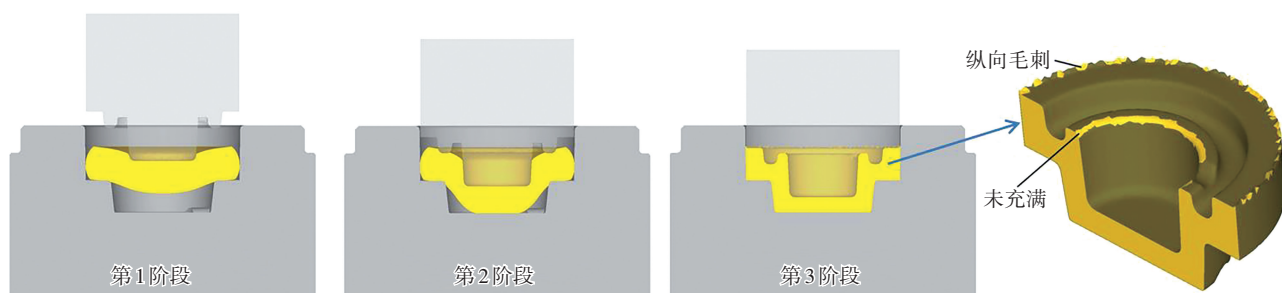


图 3 方案 1 数值模拟结果

Fig. 3 Simulation results of scheme 1

(2) 方案 2。预锻成形过程如图 4(a) 所示。第 1 阶段,随着上模下压,上模芯轴逐渐插入坯料内,此时坯料上半部分金属径向流动;第 2 阶段,随着芯轴压入坯料,上模型腔持续下压,坯料高度降低,形变以镦粗为主,此时金属流动以径向和轴向的复合流动为主;第 3 阶段,在成形末期,金属流动逐步充满预锻模

具型腔。方案 2 终锻成形过程如图 4(b) 所示。第 1 阶段主要为坯料轴向流动逐渐充填模具型腔,第 2 阶段为金属向上流动逐渐充填至上轮毂型腔,第 3 阶段为金属充满模具型腔。由模拟结果可看出方案 2 终锻件充填饱满、未见折叠缺陷,同时齿圈部分未见明显毛刺。

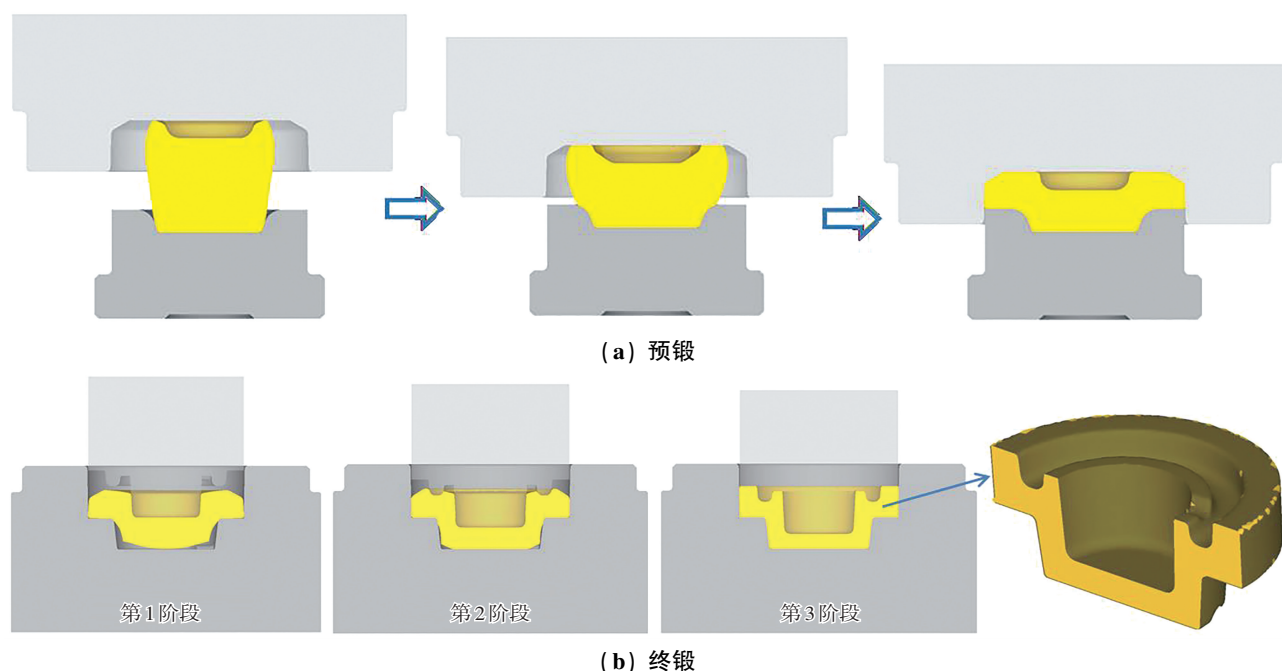


图 4 方案 2 数值模拟结果

Fig. 4 Simulation results of scheme 2

(3) 方案 3。预锻成形过程如图 5(a)所示,其成形过程同方案 2 相近,随着上模下压,金属仍以径向和轴向的复合流动为主,从模拟结果可看出预锻成形后,预锻件无毛刺和折叠缺陷。方案 3 终锻成形过程如图 5(b)所示,工

艺过程中,坯料首先轴向流动逐渐充填模具底部型腔,随后,金属向上流动逐渐充填上轮毂型腔,直至模具型腔被金属充满。由模拟结果可以看出方案 3 终锻件同样充填饱满、未见折叠缺陷,同时齿圈部分未见明显毛刺。

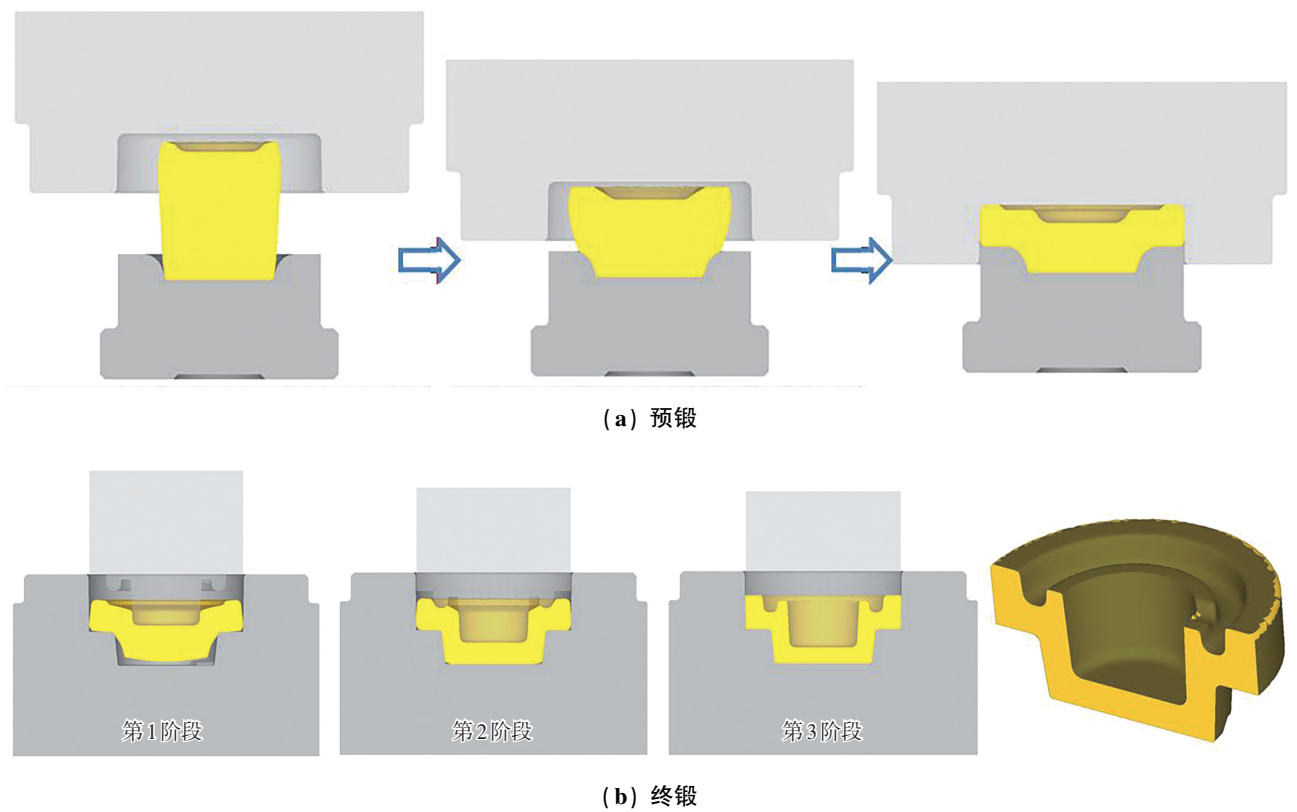


图 5 方案 3 数值模拟结果

Fig. 5 Simulation results of scheme 3

4 基于 TOPSIS 和 CRITIC 的工艺方案评估

闭式热锻工艺下的金属塑性流动是一个极其复杂的工艺过程,涉及了应力、变形程度、载荷、损伤值等多个影响因素,且从坯料到产品,其工艺往往存在多个过程及多种方案。选择合理的工艺是获得高质量、高精度、高性能合格产品的必备过程,因此实施工艺方案评估,选择最优工艺方案就显得尤为重要。有限元数值仿真可以为热锻工艺过程提供多场域耦合模拟过程,因此结合仿真数值的工艺评估及优化可以为热锻工艺的选择、设计效率的提高及生产成本的节约提供一种有效、实用的发展思路。参考林新波等^[22]提出的评估数学模型,采用 TOPSIS 和 CRITIC 法相结合的评价方法^[23],对上述 3 种闭式热锻成形工艺方案进行综合评估,进而实施工艺评价与寻优。具体评估过程如下:

步骤 1 获取评估指标值。根据黄晶晶等^[24]在文献中提出的评估数学模型,并结合 3 种成形工艺方案

的有限元模拟结果,从锻件的应变、载荷、充填性、最大损伤值以及预、终模具的最大磨损和最大等效应力等 8 个影响因素进行评估,8 个指标及仿真结果数据如表 1 所示。其中,应变不均匀度为终锻件等效应变的标准差,主要用来描述锻件变形的不均匀程度,其值越小,锻件各部分的变形差异小、组织越均匀、残余应力越小。载荷不均匀度为预、终锻最大成形载荷的标准差,其值表示预、终锻最大成形载荷的分布是否均匀,该值越大,则成形载荷越大,从而加剧相应工序模具的磨损,降低模具使用寿命。充填性为 0 表示锻件未充满,为 1 则表示锻件充填饱满。数据显示,方案 1 填充不饱满,载荷不均匀度、模具最大损伤值均较大,但在模具最大磨损深度与模具最大等效应力数值较好;方案 2 填充饱满,载荷不均匀度较小,模具最大磨损深度及最大等效应力较大;方案 3 填充饱满,模具最大损伤值较好,应变不均匀较好,但同样模具最大磨损深度及最大等效应力较大。

表 1 3 种方案的考察指标对比

Table 1 Comparison of investigation targets for three schemes

方 案	应变不均匀 度 mm/mm	载荷不均 匀度×10 ³ N	充填 性	最大损 伤值	预锻最大磨损深 度/(×10 ⁻⁴ mm)	终锻最大磨损深 度/(×10 ⁻⁴ mm)	预锻模具最大等 效应力 /MPa	终锻模具最大等 效应力 /MPa
1	0.700	1 826	0	1.170	0.70	1.23	331	1 360
2	0.775	190	1	0.747	2.69	2.16	1 140	1 450
3	0.510	850	1	0.772	2.27	2.12	1 020	1 300

步骤 2 数据标准化。影响因素的数据指标,影响程度不一,有的指标数据越大越好,有的指标数据则是越小越好,为避免不同影响因素造成影响尺度的混乱,必须对不同指标数据进行标准化处理。TOPSIS 法使用距离尺度来度量样本之间的差距,可以对不同属性的指标进行同向标准化处理。由于充填性的数据仅有 0 和 1,因此计算时可采用式(1)进行计算,其余各指标均可采用式(2)进行处理,标准化处理好的数据构成 X 矩阵,表示为式(3)。

$$x_{ik} = \frac{x_{ik}^* - \min x_{ik}^*}{\max x_{ik}^* - \min x_{ik}^*} \quad (1)$$

$$x_{ik} = \frac{\max x_{ik}^* - x_{ik}^*}{\max x_{ik}^* - \min x_{ik}^*} \quad (2)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(2)中: x_{ik}^* 和 x_{ik} 分别为原始数据和标准化处理后的数据,其中, $i=1, 2, \cdots, n$, n 为待评价方案, $n=3$; $k=1, 2, \cdots, m$, m 为指标, $m=8$ 。

步骤 3 CRITIC 法计算权值。工艺实践中,不同的工艺参数指标重要程度往往不同,为体现重要程度的影响,采用 CRITIC 法进行各评价指标的权重系数的计算。方法主要是通过计算评价指标的对比强度和指标之间的冲突性来综合计算各指标的客观权重^[25]。其中指标对比强度常用标准差 σ_k 来表征,而指标间的冲突性 c_k 常用式(4)进行计算。

$$c_k = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ik}) \quad (4)$$

式(4)中: r_{ik} 为评价指标之间的 Pearson 相关系数。

各指标的权重值由对比强度 σ_k 和冲突性 c_k 综合评价计算所得,计算见式(5),计算的权重值结果见表 2。

$$\omega_k = \frac{\sigma_k \times c_k}{\sum_{k=1}^m (\sigma_k \times c_k)} \quad (5)$$

表 2 各指标的权重

Table 2 Weight of each index

指 标	对比强度	指标冲突性	权 重
应变不均匀度	0.432	5.691	0.096
载荷不均匀度	0.411	10.312	0.166
充填性	0.471	5.784	0.107
损失值	0.458	10.249	0.184
预锻最大磨损	0.430	5.688	0.096
终锻最大磨损	0.462	5.759 1	0.104
预锻最大等效应力	0.437	5.701	0.097
终锻最大等效应力	0.410	9.408	0.150

步骤 4 计算各工艺评价方案的贴近程度,进行工艺评价与寻优。最优方案 X^+ 由 X 中每列元素的最大值构成,最劣方案 X^- 由 X 中每列元素的最小值构成。分别由式(6)和式(7)进行计算各评价方案与最优方案、最劣方案之间的距离 D_i^+ 和 D_i^- ,并由式(8)计算各评价方案的贴近程度 S_i ,得出各个评价方案的得分, S_i 值越大,说明方案越优,数据见表 3 所示。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{k=1}^m \omega_k (X_k^+ - x_{ik})^2} \quad (6)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{k=1}^m \omega_k (X_k^- - x_{ik})^2} \quad (7)$$

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (8)$$

表 3 各评价方案接近度计算结构

Table 3 Calculation results of closeness of each scheme

评价方案	D_i^+	D_i^-	S_i	排 序
1	0.779	0.627	0.446	3
2	0.666	0.695	0.511	2
3	0.558	0.699	0.556	1

由表 3 可知,方案 3 的贴近度 S_i 值最大,因此方案最优。为验证工艺方案设计、数值仿真及工艺评价、寻优的合理性,以方案 3 进行模具加工,将模具预热时间 1 h,进行坯料下料,中频感应加热至 $1\ 150 \pm 30\ ^\circ\text{C}$,选择

水基石墨润滑乳为润滑剂,进行锻造工艺试验,最终获得的锻件如图6所示,锻件未见折叠缺陷,锻件充填饱满以及齿圈外侧未见纵向毛刺。结果表明试验方案与数值仿真宏观结果一致,且采用工艺方案3可以满足工艺设计要求,生产出合格的锻件产品。

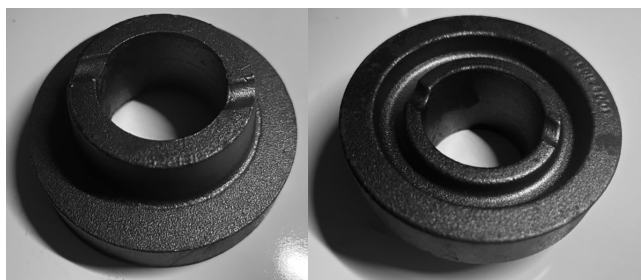


图6 工艺试验结果

Fig. 6 Results of process test

5 结 论

(1) 针对某齿轮坯零件的结构和工艺特点分析,设计了3种闭式热模锻成形工艺方案,应用 DEFORM 构建了成形工艺方案的热力耦合有限元模型,并通过数值模拟分析了成形工艺方案下的金属塑性流动规律及成形结果。

(2) 基于 TOPSIS 和 CRITIC 构建了闭式热锻成形工艺方案的数学评估模型,结合模拟结果,从锻件的应变、载荷、充填性和损伤值,以及模具的磨损量及应力值等8个维度对3种成形工艺方案进行计算评估,结果表明第3种方案最优。

(3) 将方案3进行实际工艺试验,结果表明锻件未见折叠缺陷,锻件充填饱满以及齿圈外侧未见纵向毛刺,采用该方案可以获得符合工艺要求的齿轮坯零件,同时也验证了有限元模拟仿真和所构建数学评估模型的准确性。

参考文献(References):

- [1] 高原,鞠丽,李文新. 汽车变速器齿轮类零件的锻造[J]. 锻造与冲压, 2022, (13): 26—28.
GAO Yuan, JU Li, LI Wen-xin. Production of gear forging of automobile gear box [J]. Forging & Metal forming, 2022, (13): 26—28.
- [2] 张浩,郭磊. 基于 FEA 的齿坯锻造模具寿命的提高[J]. 锻压技术, 2022, 47(10): 250—256.
ZHAN Ghao, GUO Lei. Improvement of service life for gear blank forging die based on FEA [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(10): 250—256.
- [3] 戴龙杰,刘毅,谢爱军,等. 链轮闭式模锻成形模具齿形型腔精确设计方法[J]. 机械传动, 2022, 46(4): 171—176.
DAI Long-jie, LIU Yi, XIE Ai-jun, et al. Precision design method of tooth cavity of chain wheel flashless die forging[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2022, 46(4): 171—176.
- [4] 刘鑫,周宇飞,朱春东,等. 汽车后桥主动齿轮坯的楔横轧成形工艺[J]. 锻压技术, 2022, 47(10): 198-202, 215.
LIU Xin, ZHOU Yu-fei, ZHU Chun-dong, et al. Cross wedge rolling process for automobile rear axle drive gear billet [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(10): 198-202+215.
- [5] 陈光伟,于泽琦. 工艺参数对齿轮坯锻造质量的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(7): 108—110.
CHEN Guang-wei, YU Ze-qi. Effect of technological parameters on forging quality of gear blank [J]. Hot Working Technology, 2021, 50(7): 108—110.
- [6] MAZ Y, LUO Y X, WANG Y Q. On the pitch error in the initial stage of gear roll-forming with axial-infeed [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, (252): 659—672.
- [7] MAZ Y, LUO Y X, WANG Y Q, et al. Geometric design of the rolling tool for gear roll-forming process with axial-infeed [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, (258): 67—79.
- [8] MAZ Y, LUO Y X, WANG Y Q, et al. Numerical and experimental investigation on material flow in gear forced through feed rolling process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(1): 3361—3381.
- [9] 马自勇,罗远新,王勇勤,等. 齿轮轴向滚轧成形建模与轮齿完整性研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(6): 133—145.
MA Zi-yong, LUO Yuan-xin, WANG Yong-qin, et al. Integrity and modeling of gear tooth forming in the roll-forming of gear with axial infeed [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(6): 133—145.
- [10] 马自勇,王旭,罗远新,等. 行星滚柱冷轧成形材料流动模拟与实验[J]. 太原科技大学学报, 2022, 43(3): 220—225.
MA Zi-yong, LUO Yuan-xin, WANG Yong-qin, et al. Simulation and experiment study on material flow behavior of planetary roller manufactured by cold rolling process [J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2022, 43(3): 220—225.
- [11] 梁强,周杰,何雄,等. 载重汽车用直齿轮冷挤压工艺参数多目标优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(12): 3216—3223.

- LIANG Qiang, ZHOU Jie, HE Xiong, et al. Multi-objective optimization of cold extrusion process parameters for spur gear of camion[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2017, 48(12): 3216—3223.
- [12] 梁强, 李平. 载重汽车用直齿轮复合成形工艺设计及实验[J]. 兵器材料科学与工程, 2017, 40(6): 48—52.
- LIANG Qiang, LI Ping. Design and experiment of compound forming process of spur gear for camion[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2017, 40(6): 48—52.
- [13] 梁强, 周杰, 朱姗姗, 等. 大模数冷挤压直齿轮冷整形方式的选择[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(8): 1995—2001.
- LIANG Qiang, ZHOU Jie, ZHU Shan-shan, et al. The choice of cold precision sizing method for cold extrusion gear with big modulus[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2017, 48(8): 1995—2001.
- [14] 梁强, 周杰, 朱姗姗, 等. 冷整形对大模数直齿轮精度的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(2): 310—315.
- LIANG Qiang, ZHOU Jie, ZHU Shan-shan, et al. Influence of gear accuracy in cold precision sizing for spur gear with big modulus[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2017, 48(2): 310—315.
- [15] 陈云, 倪俊芳, 周爱鹏. 直齿锥齿轮精密锻造成形有限元分析与工艺研究[J]. 煤矿机械, 2018(1): 74—76.
- CHEN Yun, NI Jun-fang, ZHOU Ai-peng. Finite element analysis and process research on precision forging of straight bevel gears[J]. Coal Mine Machinery, 2018(1): 74—76.
- [16] EYERCIÖGLÜ O, TAS G, ALADAG M. Evaluation of tooth profile changes of symmetric and asymmetric spur gear forging dies due to shrinkfit[J]. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 2020: 38(1): 71—81.
- [17] 蔡力钢, 刘海东, 程强, 等. 基于正交试验法的模锻模具磨损分析及优化[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(1): 1—9.
- CAI Li-gang, LIU Hai-dong, Cheng Qiang, et al. Analysis and optimization of die forging wear based on orthogonal test method[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(1): 1—9.
- [18] 庄武豪. 直齿非圆锥齿轮热锻成形规律与精度控制方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019: 100—142.
- ZHUANG Wu-hao. Research on hot forging forming law and precision control method of straight non-bevel gears[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019: 100—142.
- [19] 江叔通. 精化齿坯热锻工艺浅析[J]. 锻压装备与制造技术, 2017, 52(2): 74—77.
- JIANG Shu-tong. Analysis of hot forging process for precise gear blank[J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2017, 52(2): 74—77.
- [20] 董奇, 金飞翔, 秦强, 等. 基于正交试验齿圈座热锻成形工艺优化[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(8): 18—22.
- DONG Qi, JIN Fei-xiang, QIN Qiang, et al. Optimization of hot forging forming process based on orthogonal test for gear ring seat[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(8): 18—22.
- [21] 王雷刚, 黄瑶, 孙宪萍, 等. 基于修正 Archard 磨损理论的挤压模具磨损分析[J]. 润滑与密封, 2006, (3): 10—12.
- WANG Lei-gang, HUANG Yao, SUN Xin-ping, et al. Wear analysis of extrusion die based on Archard's theory[J]. Lubrication Engineering, 2006, (3): 10—12.
- [22] 林新波, 李荣先, 柳百成, 等. 基于数值模拟的工艺评估与优化[J]. 塑性工程学报, 2005, 12(1): 58—63.
- LIN Xin-bo, LI Rong-xian, LIU Bao-cheng, et al. Process evaluation and optimization based on numerical simulation[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 12(1): 58—63.
- [23] 戴宁, 万林林. 基于组合赋权 TOPSIS 模型的工艺参数决策方法[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(4): 107—112.
- DAI Ning, WAN Lin-lin. Decision making method of process parameters based on TOPSIS model with combination weight[J]. Machine Building & Automation, 2022, 51(4): 107—112.
- [24] 黄晶晶. 基于 Deform 的汽车法兰盘体零件锻造成形工艺[J]. 锻压技术, 2022, 47(6): 81—86.
- HUANG Jing-jing. Forging process for automobile flange body part based on Deform[J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(6): 81—86.
- [25] 周沅桢, 和小娟, 王泽宇, 等. 基于 CRITIC 赋权法的细支烟物理指标综合质量评价研究[J]. 包装工程, 2022, 43(9): 176—183.
- ZHOU Yuan-zhen, HE Xiao-juan, WANG Ze-yu, et al. Comprehensive quality assessment for physical indexes of slim cigarette based on CRITIC weighting approach[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(9): 176—183.