

锻造

## 基于类等势场法的轮盘锻件预成形多目标优化设计

孔 萌<sup>1</sup>, 王宗申<sup>1</sup>, 陈 磊<sup>1</sup>, 朱立华<sup>1</sup>, 高 珊<sup>2</sup>

(1. 山东理工大学 机械工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 山东理工大学 材料科学与工程学院, 山东 淄博 255000)

**摘要:** 以轮盘类锻件为例, 结合数值模拟与优化算法, 研究基于类等势场法的锻件预成形多目标优化设计。首先, 模拟分析坯料在预锻和终锻过程中的充填情况、变形均匀性和成形载荷, 发现存在充填不足、折叠等缺陷。然后, 以锻造充填率为响应值, 基于静电场模拟结果进行响应面分析, 获得预锻件最佳体积比和等势线取值范围。最后, 以电势值为设计变量, 对锻件预成形进行基于变形均匀性和终锻成形载荷的多目标优化设计, 最终得到电势值取 0.2370 V 时为最优解。结果表明, 优化后锻件充填效果良好, 无折叠等缺陷, 等效应变方差由 0.4000 降为 0.1945, 应变分布更为均匀, 终锻成形载荷由  $1.22 \times 10^5$  kN 降为  $9.71 \times 10^4$  kN, 优化效果显著, 可为同类锻件的生产提供借鉴和理论指导。

**关键词:** 轮盘; 预成形; 类等势场法; 变形均匀性; 终锻成形载荷

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.03.001

**中图分类号:** TG316

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 03-0001-10

## Multi-objective optimization design on preforming for wheel disc forgings based on quasi-equipotential field method

Kong Meng<sup>1</sup>, Wang Zongshen<sup>1</sup>, Chen Lei<sup>1</sup>, Zhu Lihua<sup>1</sup>, Gao Shan<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

**Abstract:** For wheel disc forgings, combining the numerical simulation and optimization algorithm, the multi-objective optimization design of preforming for forgings based on quasi-equipotential field method was investigated. Firstly, the filling condition, deformation uniformity and forming load of billet during the pre-forging and final forging processes were simulated and analyzed, and the defects such as insufficient filling and folding were observed. Then, choosing forging filling ratio as the response value, the response surface analysis was carried out to achieve the optimal volume ratio and the value range of equipotential lines for pre-forgings based on the simulation result of electrostatic field. Finally, taking the potential value of equipotential lines as the design variable, the multi-objective optimization design on the forming forgings based on deformation uniformity and final forging load was conducted, and the potential value was 0.2370 V as the optimal solution. The results show that after optimization, the filling effect of forgings is good without defects such as folding, the equivalent strain variance is reduced from 0.4000 to 0.1945, the strain distribution is more uniform, and the final forging load decreases from  $1.22 \times 10^5$  kN to  $9.71 \times 10^4$  kN. Thus, the optimization effect is remarkable, which can provide reference and theoretical guidance for the production of similar forgings.

**Key words:** wheel disc; preforming; quasi-equipotential field method; deformation uniformity; final forging load

预成形可以改善锻造金属的填充效果和显微组织, 从而提高锻件质量<sup>[1]</sup>。目前, 锻件预成形优化

设计已成为塑性加工领域的前沿研究方向之一。反向模具跟踪算法<sup>[2-3]</sup>是较早应用于预成形设计的方法, 但其计算结果很大程度上依赖于边界节点确定的准确性。Yang Y H 等<sup>[4]</sup>利用响应面法建立了二阶近似模型, 并结合有限元模拟方法实现了对航空发动机盘面的优化设计。Liu C S 等<sup>[5]</sup>以瓶坯状锻件为研究对象, 利用椭圆傅里叶分析、有限元法和遗传算法反向设计瓶坯形状, 完成了预成形优化设计。Kitayama S 等<sup>[6]</sup>采用径向基函数网络进行近似优化, 通过模拟确定各目标间的 Pareto 边界, 将裂纹风险降

收稿日期: 2022-01-19; 修订日期: 2022-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51605266); 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2019PEM009); 山东省高等学校青创科技支持计划项目 (2021KJ068); 淄博市校城融合发展计划项目 (2018ZBXC037)

作者简介: 孔 萌 (1999-), 女, 硕士研究生

E-mail: 21401030026@stumail.sdut.edu.cn

通信作者: 王宗申 (1986-), 男, 博士, 副教授

E-mail: wangzsh@sdut.edu.cn

到最低。然而,预成形设计的基本思路与试错法相同,主要通过大量反复实验不断进行修正,设计自动化程度较低。近年来,更多优化算法被引入到塑性成形过程中以实现工艺优化设计。类等势场法基于静电场理论进行静电场模拟,再利用响应曲面优化算法进行优化设计,模拟实验与优化过程相对独立,优化设计效率得到提高,同时节省了计算时间<sup>[7]</sup>。

本文以轮盘类锻件为例,首先,对锻件的锻造成形过程进行有限元模拟与分析,研究采用传统设计方法时,轮盘在锻造成形过程中的金属充填情况、变形均匀性和载荷变化等,分析并指出锻造缺陷。然后,利用基于类等势场法的锻造预成形多目标优化设计方法对轮盘预锻过程进行优化设计,最终获得形状符合要求、飞边较小、变形均匀且成形载荷低的锻件。

## 1 轮盘锻造过程有限元模拟与分析

本文选用某轮盘锻件的结构和尺寸如图 1 所示。采用传统的锻造工艺分析与模具设计方法,确定模膛形状以及初始坯料尺寸为  $\Phi 240 \text{ mm} \times 184 \text{ mm}$ ,作为初始模拟方案。基于锻件的轴对称性,借助 DEFORM-2D 软件对锻造过程进行有限元建模和分析,主要模拟参数及取值如表 1 所示,选用材料的流动应力模型如式 (1) 所示。

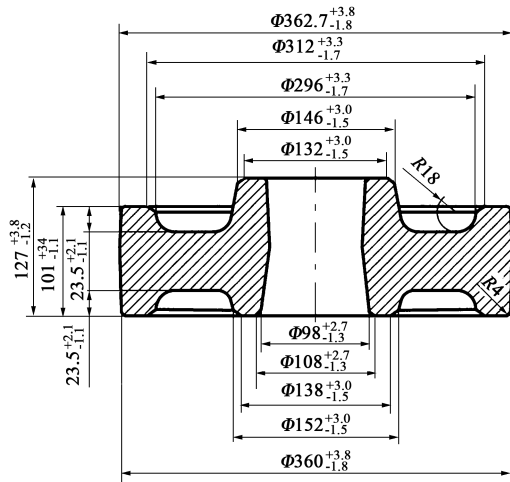


图 1 轮盘锻件的结构和尺寸

Fig. 1 Structure and dimensions of wheel disc forgings

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\sigma} = (A + B\bar{\varepsilon}^n) \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right) \right] \left( \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right)^\alpha \times \\ (D - ET^*m) \\ T^* = \frac{(T - T_{\text{room}})}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \end{array} \right. \quad (1)$$

表 1 主要模拟参数及取值

Table 1 Main simulation parameters and their values

模拟参数	取值
锻件材料	AISI-1045
模具材料	AISI-H-13
坯料初始温度/℃	1050
模具初始温度/℃	300
摩擦因数	0.3
上模运动速度/(mm · s <sup>-1</sup> )	50
对流换热系数/(kW · (m <sup>2</sup> · K) <sup>-1</sup> )	2.9
锻件比热/(W · (m · K) <sup>-1</sup> )	3.77
锻件热导率/(W · (m · K) <sup>-1</sup> )	35
模具比热/(W · (m · K) <sup>-1</sup> )	3.2
模具热导率/(W · (m · K) <sup>-1</sup> )	25
接触换热系数/(kW · (m <sup>2</sup> · K) <sup>-1</sup> )	11

式中:  $\bar{\sigma}$  为流动应力;  $\bar{\varepsilon}$  为等效应变;  $\dot{\bar{\varepsilon}}$  为等效应变速率;  $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$  为参考应变速率, 取值为 1;  $D$  为损伤参量, 取值为 1;  $T^*$  为比温度;  $T$  为锻件与模具接触部分温度;  $T_{\text{room}}$  为环境温度, 取值为 20 ℃;  $T_{\text{melt}}$  为材料熔化温度, 取值为 1500 ℃;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $E$ 、 $n$ 、 $\alpha$  和  $m$  均为常数, 取值为  $A = -4044.81$ ,  $B = 35029$ ,  $C = 0.128244$ ,  $E = 1.0$ ,  $n = 0.186116$ ,  $\alpha = 0$ ,  $m = 0.0187744$ 。

图 2a 和图 2b 分别给出了初始模拟方案中预锻和终锻过程中金属的充填情况。从图 2b 可以看出, 终锻结束后坯料未能完全充满模膛, 部分坯料溢出模膛形成飞边。这主要是由于材料接触到下模内壁后才开始流动, 上、下模具挤压使得坯料溢出模膛, 导致轮毂下部坯料减少, 无法完全充满同时形成较大的飞边。

坯料在预锻和终锻后的等效应变分布云图分别如图 3a 和图 3b 所示。预锻完成后, 等效应变分布整体比较均匀, 最大值为 3.205, 出现在预锻件中心下部; 中心下部凸起处的等效应变水平最低, 约为 0.115, 如图 3a 所示。如图 3b 所示, 终锻过程中, 随着上模下压量的增加, 在坯料与上、下模接触部分的等效应变逐渐增大, 由于受到模具和锻件接触面摩擦力的影响, 使得锻件中心部分的金属变形受阻, 坯料在成形锻件中心时较为困难, 不能很好地沿模膛壁流动。由于接触表面摩擦力的影响, 应变沿径向由外缘向中心逐渐增大, 沿高度方向由表面向中心逐渐减小。故终锻结束后, 应变分布不均匀, 最大值为 6.835, 出现在终锻件中心上部; 最小值为 0.415, 出现在终锻件中心上部凸起处<sup>[8]</sup>。

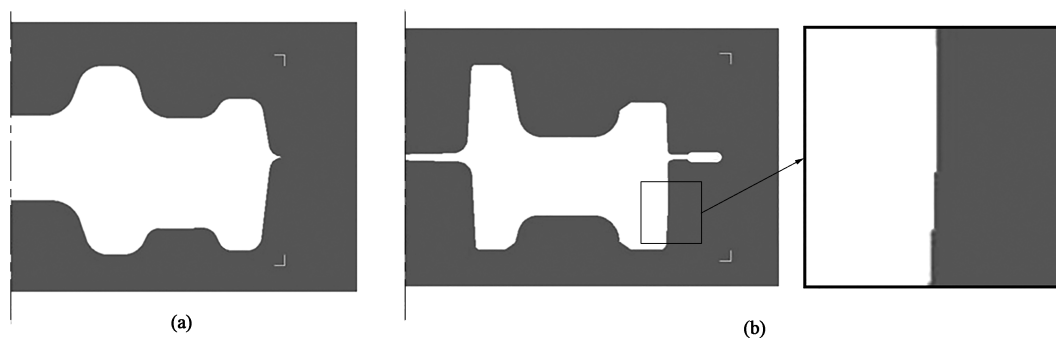


图2 初始方案的充填效果

(a) 预锻 (b) 终锻

Fig. 2 Filling results in initial scheme

(a) Pre-forging (b) Final forging

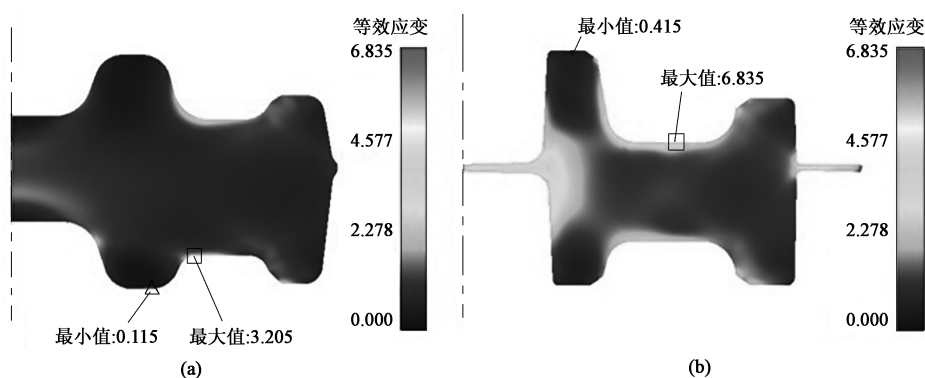


图3 初始方案的等效应变分布

(a) 预锻 (b) 终锻

Fig. 3 Equivalent strain distributions in initial scheme

(a) Pre-forging (b) Final forging

坯料在预锻和终锻后的等效应力分布如图4a和图4b所示，终锻结束后等效应力最大值出现在锻件中心上部，约为308 MPa，且等效应力最大处出现坯料折叠，将会影响成形终锻件的表面质量，

也会破坏其连续性，在使用时容易出现应力集中而发生疲劳裂纹，很大程度上影响锻件的承载能力，严重影响其力学性能。经分析可能是因为预锻模具中心圆角处设计不合理，导致内部出现折叠缺陷<sup>[7,9-10]</sup>。

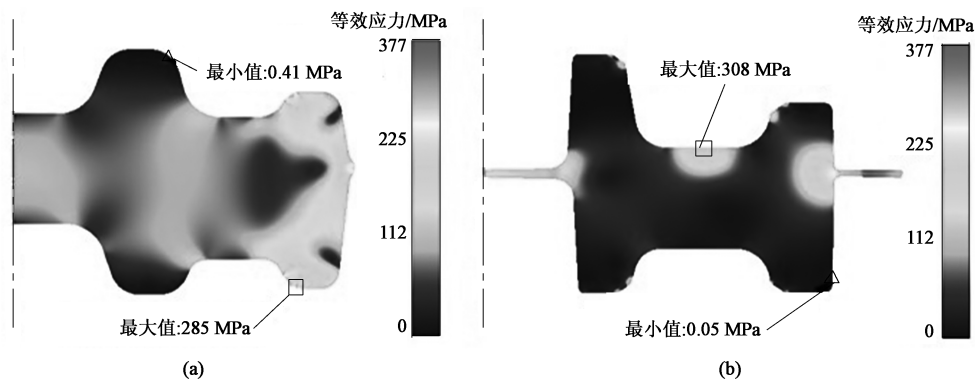


图4 初始方案的等效应力分布

(a) 预锻 (b) 终锻

Fig. 4 Equivalent stress distributions in initial scheme

(a) Pre-forging (b) Final forging

图 5 给出了材料在终锻不同工步的材料流动速度矢量图。可以看出,随着终锻过程的进行,材料首先随上模向下流动,接触下模模膛后开始填充圆角并形成飞边,如图 5c 所示。由于预锻件形状设计

不合理,终锻后期材料在锻件上部两凸缘之间形成对流现象并逐渐加剧,最终导致出现较为明显的折叠缺陷,如图 5d 所示。因此,对锻件进行预成形优化是避免上述缺陷产生的有效方法。

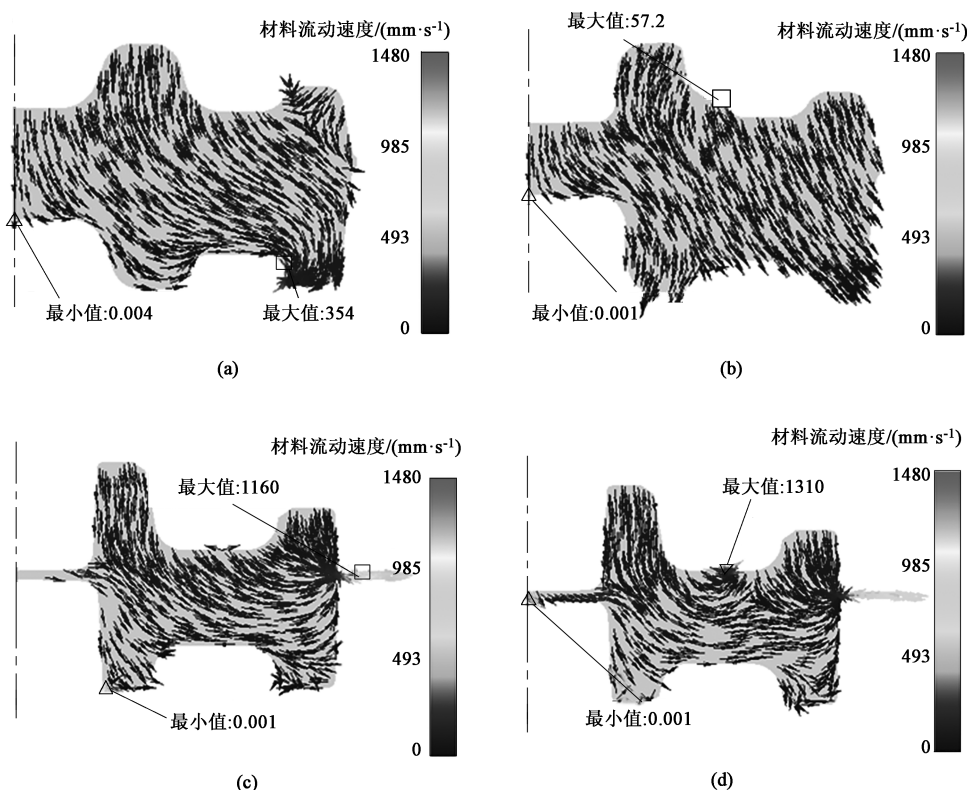


图 5 初始方案的材料流动速度

(a) 第 447 步 (b) 第 570 步 (c) 第 686 步 (d) 第 706 步

Fig. 5 Material flow velocities in initial scheme

(a) Step 447 (b) Step 570 (c) Step 686 (d) Step 706

轮盘锻件在预锻和终锻过程中的成形载荷-行程曲线如图 6 所示。预锻过程中,随着上模的运动,载荷缓慢上升,上模运动至 125 mm 之后成形载荷急剧上升,在此过程中坯料完全充满模膛,最大预锻成形载荷达到  $6.18 \times 10^4$  kN。终锻过程中,上模的成形载荷变化规律与预锻过程类似,在终锻模具行程后期,上模的成形载荷急剧上升,达到最大值,为  $1.22 \times 10^5$  kN。一般来说,过高的成形载荷会加剧模具的疲劳磨损,甚至会直接损坏模具,且需要的设备吨位更高,能耗大。因此,有必要通过预成形优化降低成形载荷来避免上述问题。综上分析可知,针对传统方法设计的轮盘锻造工艺与模具,经数值模拟后发现存在充填不足的缺陷,并产生较大的飞边,材料应变分布不均匀,中心上部易产生折叠缺陷,锻造成形载荷过高。针对以上缺陷,本文将采用类等势场法对该锻件的预成形进行多目标优化设计。

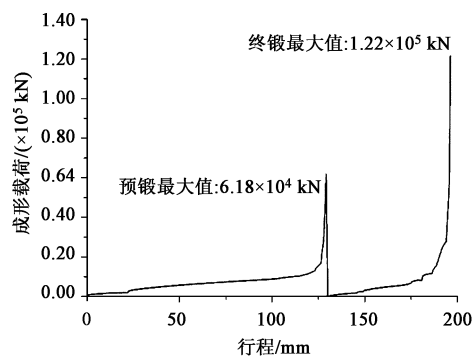


图 6 初始方案上模成形载荷-行程曲线

Fig. 6 Forming load-stroke curves of top die in initial scheme

## 2 基于类等势场法的锻造预成形多目标优化设计

### 2.1 静电场模拟

借助大型结构分析有限元软件 ABAQUS 进行静



电场模拟，其几何模型和等势线分布分别如图 7a 和图 7b 所示。静电场中，初始形状为圆柱体坯料，终了形状为终锻件形状。一般来说，将坯料放大 2~3 倍便于将终锻件放入坯料内部，若锻件形状简单，则将坯料放大 2 倍，若锻件形状复杂，则放大 3 倍。如图 7a 所示，根据锻件形状的复杂程度，本文选择将坯料实际尺寸放大 2.5 倍，采用 3 节点二维壳体单元，网格尺寸为 10 mm，载荷类型设置为电压载荷，设置边界条件为坯料和锻件分别施加 1 和 0 V

电压。提交求解后，得到静电场的等势线分布如图 7b 所示。可以看出，坯料与锻件之间形成一个完整电场，该区域内的 24 条等势线即为 24 种预锻件形状。电压值越低，等势线越靠近终锻件一侧，预锻件形状越接近终锻件，因此，达不到设计预锻件形状的目的；电压值越高，预锻件形状越简单，终锻成形难度越大，同样达不到预制坯设计的目的<sup>[11]</sup>。等势线围成的空间体积应等于终锻件的体积，因此，需要将等势线所围成的空间体积缩放为终锻件体积<sup>[12]</sup>。

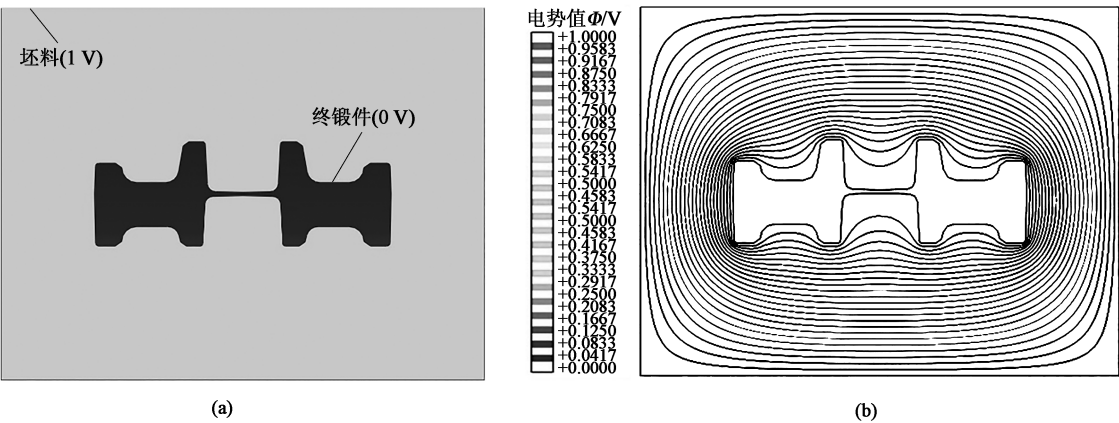


图 7 静电场分析几何模型 (a) 和等势线分布 (b)  
Fig. 7 Geometric model (a) and equipotential line distribution (b) for electrostatic field analysis

2.2 响应面分析

中心复合实验设计 (Centre Composite Design, CCD) 方法具有高度灵敏性、可旋转性和序贯性，预测精度较高，稳定性较强，被广泛应用于工程优化设计<sup>[13]</sup>。刘东雷等<sup>[14]</sup>以中心复合实验法进行实验规划，引入响应曲面法结合方差分析建立了产品的预测模型。因此，本文选用 CCD 方法，实验设计主要考虑两种影响因素：因素 A 为预锻件与终锻件的初始体积比  $R_v$ ，因素 B 为电势值  $\Phi$ ，各实验因素及取值水平如表 2 所示。根据预锻件与终锻件的初始体积比  $R_v$  和电势值  $\Phi$  的取值水平，设计了 13 组实验，如表 3 所示，其中，中心点实验重复 5 次。

表 2 中心复合实验因素及水平

Table 2 Factors and levels of centre composite experiment					
实验因素	取值水平				
	-1.5	-1	0	1	1.5
A	1.00	1.02	1.06	1.1	1.12
B/V	0.0416	0.0833	0.1667	0.2500	0.2917

本文选用锻造充填率  $y$  作为响应值，定义如下<sup>[15]</sup>：

表 3 实验设计及响应面分析结果

Table 3 Experimental design and results of response surface analysis

实验编号	因素 A	因素 B/V	响应值 $y$
1	1.02	0.0833	1.0170
2	1.10	0.0833	1.0182
3	1.02	0.2500	1.0174
4	1.10	0.2500	1.0180
5	1.00	0.1667	1.0168
6	1.12	0.1667	1.0181
7	1.06	0.0416	1.0176
8	1.06	0.2917	1.0171
9	1.06	0.1667	1.0179
10	1.06	0.1667	1.0178
11	1.06	0.1667	1.0178
12	1.06	0.1667	1.0181
13	1.06	0.1667	1.0179

如果终锻模具模膛未完全充满，则：

$$y = \frac{\text{模膛内流动材料的体积}}{\text{理想锻件的体积}}$$

(2)

此时， $y$  取值介于 0~1 之间。锻造结束后，利

用 UG 提取模膛内的材料形状, 在 UG 中计算材料的体积即可获得模膛内流动的材料与理想锻件体积的比值。其中, “理想锻件的体积” 是指去除飞边之后的终锻件体积。

如果模膛完全充满, 则:

$$y = \frac{\text{恰好充满模膛时流动材料的体积}}{\text{理想锻件的体积}} \quad (3)$$

此时,  $y$  大于或等于 1。观察锻造过程中坯料充填情况, 若某一工步材料恰好完全充满模膛, 同时可能形成飞边, 选取该工步的坯料体积减去可能形成的飞边体积作为 “恰好充满模膛时流动材料的体积”, 进而计算其与理想锻件体积的比值得到锻造充填率  $y$ 。若此时上、下模完全打靠且无飞边形成, 则  $y=1$ , 为最优值; 若此时上、下模未完全打靠, 之后飞边继续形成至终锻结束, 则  $y>1$ 。将设计的 13 组实验分别进行数值模拟, 获得对应响应值  $y$ , 如表 3 所示。对 13 组实验点的响应值进行回归分析, 得到的响应曲面二阶回归方程为:

$$y = 0.88771 + 0.22568R_v + 0.056862\Phi - 0.044991R_v^2 - 0.097651R_v\Phi - 0.029847\Phi^2 \quad (4)$$

对回归模型中的线性项、平方项以及交叉项进行分析, 结果如表 4 所示。通常情况下,  $F$  值反映了目标函数的波动情况,  $F$  值越大, 波动性越强, 则充填率的变动也越大。 $P$  值小于 0.05, 说明各因素间存在明显差异<sup>[16]</sup>。由表 4 可以看出, 初始体积比  $R_v$  的  $F$  值明显大于其他参数, 说明锻造充填率随初始体积比变化更为明显。 $P$  值小于 0.05 的是回归项、线性项  $A$  (初始体积比  $R_v$ )、平方项 ( $R_v^2$ 、 $\Phi^2$ ), 说明其对锻造充填率的影响更为显著。故从

表 4 方差分析结果

Table 4 Analysis results of variance

方差来源	离差平方和	自由度	均方差	$F$	$P$
模型	$2.297 \times 10^{-6}$	5	$4.593 \times 10^{-7}$	13.52	0.0018
$A$	$1.694 \times 10^{-6}$	1	$1.694 \times 10^{-6}$	49.86	0.0002
$B$	$3.559 \times 10^{-8}$	1	$3.559 \times 10^{-8}$	1.05	0.3402
$AB$	$9.000 \times 10^{-8}$	1	$9.000 \times 10^{-8}$	2.65	0.1477
$A^2$	$2.022 \times 10^{-7}$	1	$2.022 \times 10^{-7}$	5.95	0.0448
$B^2$	$3.562 \times 10^{-7}$	1	$3.562 \times 10^{-7}$	10.48	0.0143
残差	$2.379 \times 10^{-7}$	7	$3.398 \times 10^{-8}$		
失拟性	$1.779 \times 10^{-7}$	3	$5.929 \times 10^{-8}$	3.95	0.1087
纯误差	$6.000 \times 10^{-8}$	4	$1.500 \times 10^{-8}$		
总误差	$2.534 \times 10^{-6}$	12			

方差分析结果来看, 初始体积比  $R_v$  对锻造充填率的影响最显著。

通过拟合得到的线性回归方程用响应曲面表示, 如图 8a 所示。通过分析可知, 当初始体积比  $R_v$  较小时, 电势值对充填率的影响较小。当初始体积比  $R_v$  较大时, 随着电势值的减小, 充填率增大。可以看出, 充填率随初始体积比  $R_v$  的变化更为显著, 结合方差分析结果, 说明与电势值  $\Phi$  相比, 锻造充填率对初始体积比  $R_v$  的变化更为敏感。终锻结束后, 要使坯料完全充满模具模膛, 充填率要保证大于或者等于 1。通过对目标函数进行优化, 可以得到初始体积比  $R_v$  和电势值  $\Phi$  的最佳取值范围, 如图 8b 所示。同时, 当锻件初始体积比  $R_v$  取 1.008、电势值  $\Phi$  取 0.0912 V 时, 目标函数取得最优值, 此时锻造充填率为 1, 充填效果最佳。

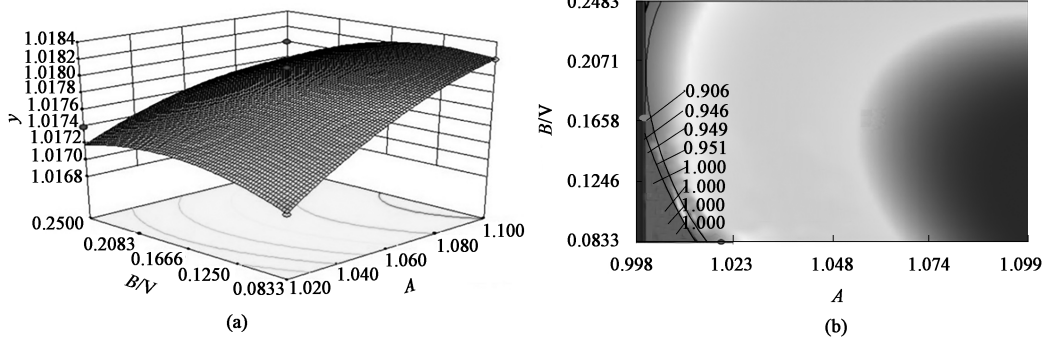


图 8 锻造充填率的响应面图 (a) 和优化结果 (b)

Fig. 8 Response surface diagram (a) and optimization results (b) of forging filling rate

### 2.3 基于变形均匀性和终锻成形载荷的预成形多目标优化

基于响应面优化结果, 以电势值  $\Phi$  为设计变

量, 对变形均匀性和终锻成形载荷进行多目标优化设计, 以此来获得变形均匀、终锻成形载荷低的终锻件。本文采用均分法, 即在 0.0833~0.2500 V 之

间每隔 0.0104 V 取一组等势线作为预锻件形状，共计 17 组实验，如表 5 所示，其中， $V_{\text{underfill}}$  为未填充的体积， $S_w^2$  为等效应变方差， $F_L$  为终锻成形载荷， $\Psi$  为总目标函数。锻件初始体积比  $R_v$  为 1.008，故毛坯采用  $\Phi 240 \text{ mm} \times 181 \text{ mm}$  的棒料。

表 5 实验设计及目标函数值

Table 5 Experimental design and objective function values

编号	$\Phi/\text{V}$	$V_{\text{underfill}}/\text{mm}^3$	$S_w^2$	$F_L/\text{kN}$	$\Psi$
1	0.0833	0	0.3682	$1.62 \times 10^5$	0.8728
2	0.0937	0	0.3784	$1.69 \times 10^5$	0.9041
3	0.1042	0	0.4225	$1.65 \times 10^5$	0.9418
4	0.1146	0	0.3947	$1.66 \times 10^5$	0.9137
5	0.1250	0	0.3757	$1.72 \times 10^5$	0.9097
6	0.1354	0	0.4007	$1.72 \times 10^5$	0.9375
7	0.1458	0	0.4309	$1.74 \times 10^5$	0.9768
8	0.1562	0	0.4307	$1.74 \times 10^5$	0.9767
9	0.1667	0	0.4259	$1.74 \times 10^5$	0.9753
10	0.1771	0	0.4491	$1.75 \times 10^5$	1.0000
11	0.1875	0	0.3810	$1.55 \times 10^5$	0.8737
12	0.1979	0	0.3846	$1.59 \times 10^5$	0.8825
13	0.2083	0	0.3691	$1.27 \times 10^5$	0.7738
14	0.2187	0	0.3568	$1.25 \times 10^5$	0.7544
15	0.2291	0	0.3280	$1.16 \times 10^5$	0.6966
16	0.2395	0	0.3422	$1.00 \times 10^5$	0.6667
17	0.2500	0	0.3715	$1.10 \times 10^5$	0.7279

### 2.3.1 目标函数的建立

本次优化设计具有两个目标函数即变形均匀性和终锻成形载荷，因此，采用线性加权函数法<sup>[17]</sup>进行求解计算。以总目标函数  $\Psi$  取最小值为优化目标的优化设计模型如下：

$$\begin{cases} \text{目标函数: } \min \Psi \\ \text{约束条件: } V_{\text{underfill}} \leq 0 \\ \text{边界条件: } 0.0833 \text{ V} \leq \Phi \leq 0.2500 \text{ V} \end{cases}$$

其中， $V_{\text{underfill}}$  的计算公式为：

$$V_{\text{underfill}} = V_{\text{desire}} - V_{\text{actual}} \quad (5)$$

式中： $V_{\text{desire}}$  为理想锻件体积； $V_{\text{actual}}$  为锻件去除飞边体积后实际获得的体积。

总目标函数  $\Psi$  的计算公式为：

$$\Psi = \lambda_1 S_w^2 + \lambda_2 F_L \quad (6)$$

式中： $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为加权因子， $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ ，本文取加权因子  $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$ 。

由于锻件的等效应变方差和终锻成形载荷的单位不一致，故需要在加权之前，将目标函数数量纲一致化<sup>[18]</sup>，由此来保证目标函数处于 0~1 之间。以此将模拟得到的数据进行整理，得到的子目标函数和总目标函数的取值如表 5 所示。将表 5 中的等效应变方差  $S_w^2$  和终锻载荷  $F_L$  随电势值的变化以折线图的形式表示出来，分别如图 9a 和图 9b 所示。通常  $S_w^2$  越小，锻件变形越均匀。由图 9a 可以看出，在电势值取值范围内， $S_w^2$  随着电势值的增大基本呈先升后降的趋势。其中，电势值在 0.1042 ~ 0.1458 V 之间时， $S_w^2$  的波动性较为明显且呈下降趋势，可能是由于模拟过程中网格重划分导致等效应变关系出现变化<sup>[7]</sup>。当电势值在 0.1771 ~ 0.2395 V 之间时， $S_w^2$  逐渐减小，当电势值为 0.2291 V 时， $S_w^2$  最小，最小值为 0.3280，说明此时应变均匀性最好。由图 9b 可以看出：电势值在 0.08 ~ 0.18 V 之间时，终锻成形载荷  $F_L$  基本呈缓慢增大趋势；在 0.18 ~ 0.24 V 之间时， $F_L$  随等势值的增大迅速减小。当电势值为 0.2395 V 时， $F_L$  最小，最小值为  $1.00 \times 10^5 \text{ kN}$ 。

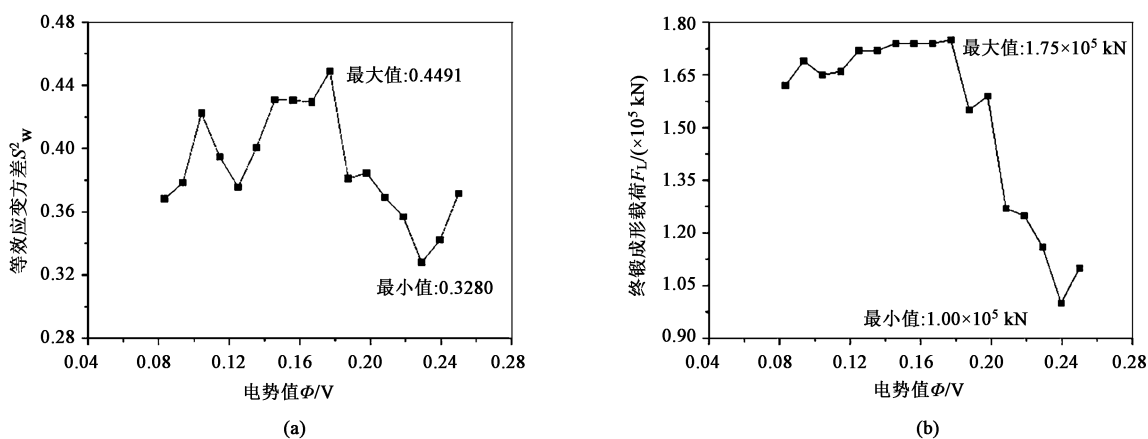


图 9 等效应变方差 (a) 及终锻成形载荷 (b) 随电势值变化关系图

Fig. 9 Changing relationship diagrams of equivalent strain variance (a) and final forging load (b) with potential value

### 2.3.2 多目标优化

对总目标函数与电势值之间的数据关系进行最小二乘意义上的多项式拟合。拟合所得目标函数为：

$$\Psi = -3.80248 + 175.87444\Phi - 2584.80885\Phi^2 + 18536.02814\Phi^3 - 64128.19689\Phi^4 + 84982.34171\Phi^5 \quad (7)$$

将总目标函数  $\Psi$  的真实值与五阶多项式拟合值随电势值  $\Phi$  的变化关系以曲线形式表示，如图 10a 所示。可以看出，五阶拟合函数较好地反映了总目

标函数  $\Psi$  随电势值  $\Phi$  的变化趋势，电势值在 0.23~0.24 V 范围内某处，总目标函数  $\Psi$  取最小值。同时，五阶拟合多项式的残差分析如图 10b 所示。由图 10b 可知，各组实验残差在 0 值附近随机波动，残差绝对值均小于 0.05，说明总目标函数曲线拟合较好。对总目标函数  $\Psi$  的五阶拟合函数进行求导计算，求得函数的最小值即为优化获得的最优解。当电势值  $\Phi$  为 0.2370 V 时，函数取最小值为 0.6679，即此时锻件的应变更均匀，终锻成形载荷更低。

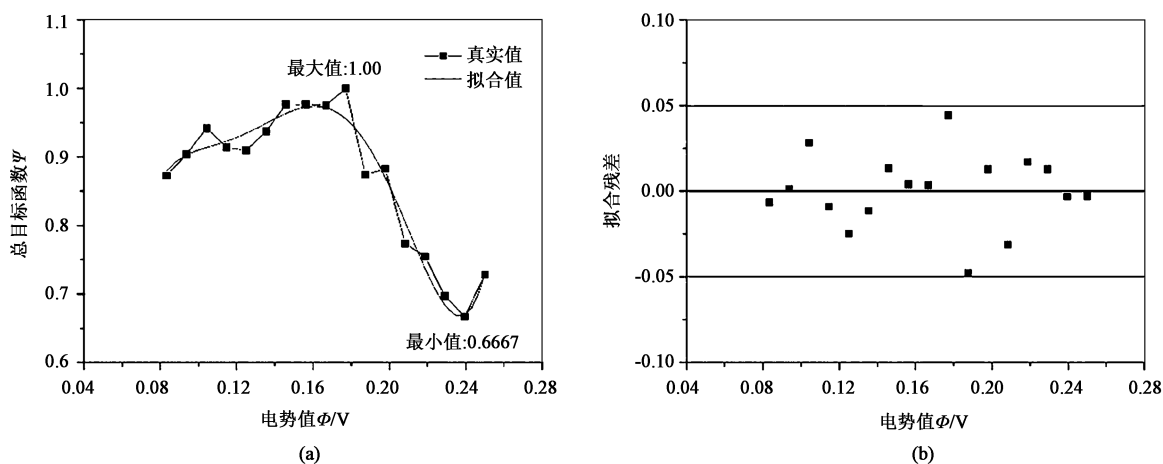


图 10 多目标优化拟合结果 (a) 及残差分析 (b)

Fig. 10 Fitting results (a) and residual analysis (b) of multi-objective optimization

## 3 优化结果与讨论

将基于上述多目标优化获得的预锻件形状进行轮盘的锻造成形过程模拟，得到锻件的充填情况如图 11 所示。与初始方案相比，锻件能够完全充满模膛，

未出现充填不足的缺陷，且形成飞边较小，材料利用率得到显著提高。优化设计后得到的预锻和终锻的等效应变分布如图 12a 和图 12b 所示。与初始方案相比，预锻完成后，等效应变最大值由 3.205 降低为 2.294，如图 12a 所示。终锻完成后的最大等效应变由 6.835 减小为 4.337，且最大值

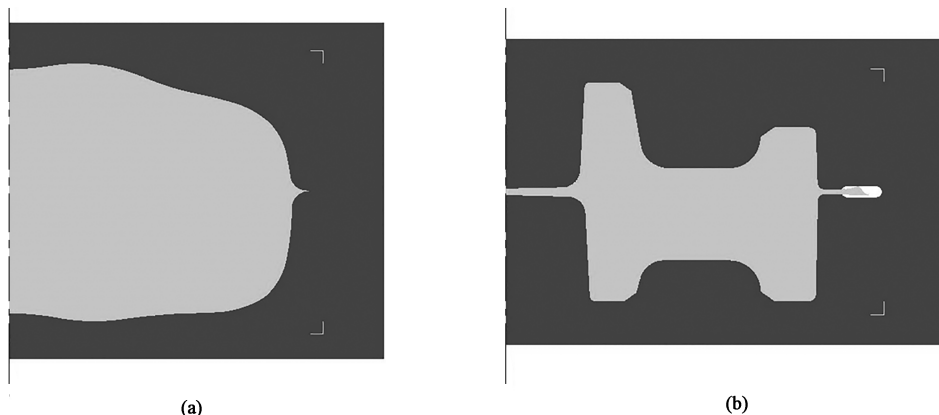


图 11 优化方案的充填效果

(a) 预锻 (b) 终锻

Fig. 11 Filling effects in optimization scheme

(a) Pre-forging (b) Final forging



出现在飞边处,如图12b所示。初始方案的等效应变均匀性方差为0.4000,而优化后方差减小为0.1945,锻件的变形均匀性大幅提高。优化设计后得到的预锻和终锻的等效应力分布如图13a和图13b所示。与初始方案相比,虽然预锻件的等效应力的最大值由285 MPa升高为377 MPa,但最大值出现在预锻件边缘处,同时,初始方案得到的预锻件的等效应力分布不均匀,更易造成开裂现象。终锻件的最大等效应力由308 MPa降为279 MPa,

锻件的中心部位不再出现明显的应力集中,没有出现折叠等缺陷,成形质量得到了明显的改善。

通过分析优化后上模的成形载荷-行程曲线,发现初始方案锻造过程的终锻成形载荷高达 $1.22 \times 10^5$  kN,而优化后降低为 $9.71 \times 10^4$  kN,优化效果显著。综上分析可得,以优化得到的电势值 $\Phi = 0.2370$  V、锻造初始体积比 $R_v = 1.008$ 的等势线作为预锻件进行锻造模拟时,保证了终锻件的成形质量,达到了良好的预成形优化设计效果。

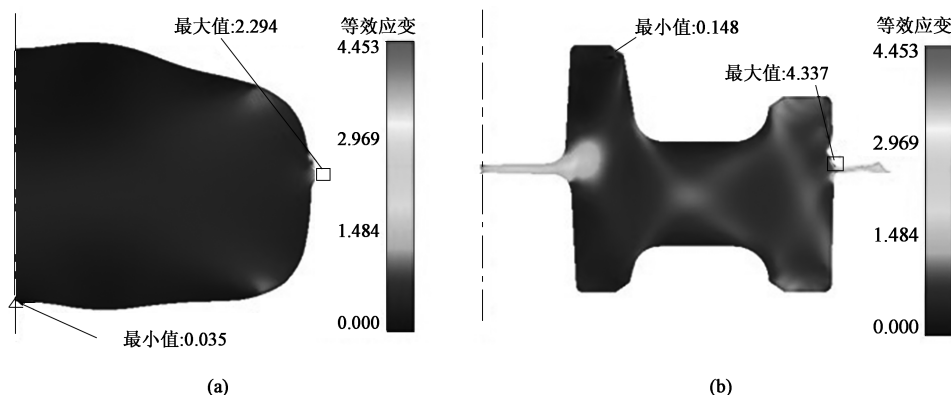


图12 优化方案的等效应变分布

(a) 预锻 (b) 终锻

Fig. 12 Equivalent strain distributions in optimization scheme

(a) Pre-forging (b) Final forging

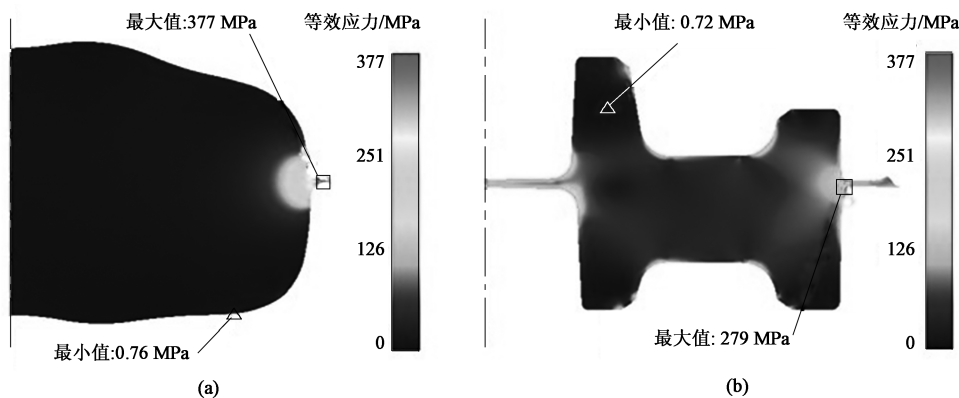


图13 优化方案的等效应力分布

(a) 预锻 (b) 终锻

Fig. 13 Equivalent stress distributions in optimization scheme

(a) Pre-forging (b) Final forging

## 4 结论

(1) 利用传统锻造工艺锻造轮盘时,出现充填不足的缺陷,且产生较大飞边。材料的应变分布不均匀,应力过大,中心部位产生折叠缺陷,终锻成

形载荷较高。

(2) 基于类等势场法,通过静电场模拟、响应面分析和多目标优化对轮盘进行锻造预成形多目标优化设计,得到当电势值 $\Phi = 0.2370$  V时,优化获得最优预锻件形状,得到充填完整、变形均匀、无缺陷的终锻件。

(3) 与传统锻造工艺设计方法相比, 基于类等势场法进行预成形多目标优化设计获得的终锻件的等效应变最大值由 6.835 减小为 4.337, 等效应变均匀性方差由 0.4000 减小为 0.1945, 变形更均匀。终锻件的最大等效应力由 308 MPa 降为 279 MPa, 无折叠等缺陷产生, 成形质量得到了明显的改善。终锻成形载荷由  $1.22 \times 10^5$  kN 降低为  $9.71 \times 10^4$  kN, 取得了良好的预成形优化效果, 可为其他同类锻件的锻造预成形优化设计提供借鉴和理论指导。

#### 参考文献:

- [1] 王丽娟. 锻压技术的发展及其在新材料加工中的应用探析 [J]. 山东工业技术, 2019, (6): 75-75.  
Wang L J. Development of forging technology and its application in new material processing [J]. Journal of Shandong Industrial Technology, 2019, (6): 75-75.
- [2] Zhao G Q, Wright E, Grandhi R V. Forging preform design with shape complexity control in simulating backward deformation [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1995, 35 (9): 1225-1239.
- [3] Zhao G Q, Wright E, Grandhi R V. Computer aided preform design in forging using the inverse die contact tracking method [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996, 36 (7): 755-769.
- [4] Yang Y H, Liu D, He Z Y, et al. Optimization of preform shapes by RSM and FEM to improve deformation homogeneity in aerospace forgings [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23 (2): 260-267.
- [5] Liu C S, Xu W J, Wang Y, et al. Optimal design of preform shape based on EFA-FEM-GA integrated methodology [J]. International Journal of Material Forming, 2021, 14 (5): 1043-1056.
- [6] Kitayama S, Kadoya S, Takano M, et al. Multi-objective optimization of process parameters in cold forging minimizing risk of crack and forging energy [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2021, 21 (3): 132.
- [7] 刘目娟. 基于类等势场法和响应面分析的锻造预成形优化设计 [D]. 济南: 山东大学, 2015.  
Liu M J. Study on Preform Shape Optimization in Forging Process Based on Quasi-equipotential Field and Response Surface Methodology [D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [8] 董海涛, 崔军. 轮盘体预制坯结构对锻造成形质量的影响 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (11): 101-103.  
Dong H T, Cui J. Influence of preform structure of wheel body on forging quality [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (11): 101-103.
- [9] Chen H Y, Guan Y J, Liu M J, et al. Preform optimization of a brake drum part based on quasi-equipotential field and response surface methods [J]. Procedia Manufacturing, 2020, 50: 276-279.
- [10] 李传民, 王向丽, 闫华军, 等. DEFORM 5.03 金属成形有限元分析实例指导教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.  
Li C M, Wang X L, Yan H J, et al. DEFORM 5.03 Guide Course for Finite Element Analysis of Metal Forming [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2007.
- [11] 夏玉峰, 陈邦华, 杜婉婉, 等. 基于类等势场法和模型的锻件预制坯设计 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2015, 46 (3): 804-811.  
Xia Y F, Chen B H, Du W W, et al. Pre-forming design in forging process based on equipotential field and model [J]. Journal of Central South University: Natural Science, 2015, 46 (3): 804-811.
- [12] Guan Y J, Bai X, Liu M J, et al. 3D Preform design in forging process based on quasi-equipotential field and response surface methods [J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 468-473.
- [13] 张志红, 何桢, 郭伟. 在响应曲面方法中三类中心复合设计的比较研究 [J]. 沈阳航空航天大学学报, 2007, (1): 87-91.  
Zhang Z H, He Z, Guo W. A Comparative study of three central composite designs in response surface methodology [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2007, (1): 87-91.
- [14] 刘东雷, 申长雨, 刘春太, 等. 基于响应曲面法与改进遗传算法的 RHCM 成形工艺优化 [J]. 机械工程学报, 2011, 47 (14): 54-61.  
Liu D L, Shen C Y, Liu C T, et al. Efficient process parameters optimization of rapid heat cycling technology based on response surface methodology and improved genetic algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47 (14): 54-61.
- [15] Lee S, Lee Y, Park C H, et al. A new method of preform design in hot forging [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, (44): 773-792.
- [16] 杨艳慧, 刘东, 贺子延, 等. 基于响应面法 (RSM) 的锻造预成形多目标优化设计 [J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38 (6): 1019-1024.  
Yang Y H, Liu D, He Z Y, et al. Multi-objective preform optimization using RSM [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38 (6): 1019-1024.
- [17] 张渝. 基于代理模型的锻造模具结构智能优化研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2009.  
Zhang Y. Forging-die Structure Intelligent Optimization Research Based on Surrogate Model [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [18] 赵新海, 李剑锋, 黄晓慧, 等. 控制锻件变形均匀性和变形力的锻造预成形多目标优化设计 [J]. 机械工程学报, 2009, 45 (5): 193-197.  
Zhao X H, Li J F, Huang X H, et al. Multi-objective optimization design of forging preform for controlling deformation uniformity and deformation force [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45 (5): 193-197.