

轧制

## 基于响应面法的异形截面环件轧制宏观成形缺陷的分析与优化

马君慧<sup>1,2</sup>, 吴运新<sup>1,2,3</sup>, 龚海<sup>1,2,3</sup>, 张涛<sup>2,3</sup>, 郝铁文<sup>2,3,4</sup>, 刘磊<sup>2,3</sup>

(1. 中南大学机电工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 中南大学高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南长沙 410083;  
3. 中南大学轻合金研究院, 湖南长沙 410083; 4. 一重集团大连工程技术有限公司, 辽宁大连 116600)

**摘要:** 缺肉是异形截面环件在轧制过程中容易产生的成形缺陷问题, 缺肉程度与异形截面环件几何参数的关联关系十分复杂。建立 2219 铝合金不对称异形截面环件轧制的数值模型, 分析了异形截面环件槽型深度和槽型角度对环件成形质量的影响, 通过分析缺肉缺陷的形成机理, 提出采用优化毛坯尺寸参数的方式来抑制缺陷。基于响应面法, 以槽型深度、槽型角度和毛坯角度为设计变量, 以缺肉系数为设计目标, 建立了表征缺肉系数的响应面模型, 并对该模型进行了回归检验。结果表明, 槽型深度越大、槽型角度越小, 越容易产生成形缺陷。利用建立的响应面模型对目标槽型深度为 45 mm、槽型角度为 70° 的环件的毛坯角度进行了优化, 结果显示优化后的毛坯较好地抑制了缺肉缺陷。

**关键词:** 成形缺陷; 不对称异形截面; 环件轧制; 响应面模型; 毛坯角度优化

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.09.020

**中图分类号:** TG335

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 09-0135-10

## Analysis and optimization onacroscopic forming defect for profiled section ring rolling based on response surface method

Ma Junhui<sup>1,2</sup>, Wu Yunxin<sup>1,2,3</sup>, Gong Hai<sup>1,2,3</sup>, Zhang Tao<sup>2,3</sup>, Hao Tiewen<sup>2,3,4</sup>, Liu Lei<sup>2,3</sup>

(1. College of Electromechanical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;  
2. State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China;  
3. Institute of Light Alloy, Central South University, Changsha 410083, China;  
4. CFHI Dalian Engineering & Technology Corporation Limited, Dalian 116600, China)

**Abstract:** Insufficient filling is a problem of forming defects that are easily generated during the rolling process for profiled section rings, and the relationship between the degree of insufficient filling and the geometric parameters of profiled section rings is very complicated. Therefore, the numerical model of asymmetric profiled section ring rolling for 2219 aluminum alloy was established, and the influences of groove depth and groove angle of profiled section ring on the forming quality of ring were analyzed. Then, by analyzing the forming mechanism of insufficient filling defects, the method of optimizing blank size parameters was proposed to suppress the defects. Furthermore, based on the response surface method, taking groove depth, groove angle and blank angle as the design variables and the insufficient filling coefficient as the design goal, the response surface model to characterize the insufficient filling coefficient was established, and the regression test was carried out. The results show that the larger the groove depth is and the smaller the groove angle is, the easier it is to produce forming defects. Using the established response surface model, the blank angle of ring with the target groove depth of 45 mm and the groove angle of 70° is optimized. The result shows that the optimized blank can better suppress the insufficient filling defects.

**Key words:** forming defects; asymmetric profiled section; ring rolling; response surface model; blank angle optimization

航天运载器的整体制造水平代表了一个国家进

入太空的能力, 随着我国航天工程的快速推进, 对火箭/弹体结构的大型化、轻质化、一体化和可靠化有了更高的要求, 因此, 铝合金回转体构件作为运载火箭及导弹的重要结构件, 在航天工程中有广泛的应用。相比于自由锻、马架扩孔以及弯焊等传统工艺, 环件轧制整体成形技术以制造效率高、生产成本低和产品质量高的优势, 成为高性能回转体结构件制造中最为有效的手段之一<sup>[1-2]</sup>。针对火箭贮箱过渡环、工业管道、轮毂、轴承环、法兰环等无

收稿日期: 2021-12-31; 修订日期: 2021-04-02

基金项目: 民用航天预研项目 (B0109); 高性能复杂制造国家重点实验室自主研究课题 (ZZYJKT2021-05); 黑龙江省重点研发计划项目 (GA21D003)

作者简介: 马君慧 (1997-), 女, 硕士研究生

E-mail: junhuim\_nov17@foxmail.com

通信作者: 吴运新 (1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师

E-mail: wuyunxin@csu.edu.cn

缝异形环件, 异形截面环件轧制技术可以进一步节约原材料, 提高产品的制造效率和综合性能, 但目前环件轧制的研究主要集中在矩形截面环件轧制, 异形环件轧制技术的研究尚不成熟, 因此, 异形截面环轧技术成为了近些年的研究热点<sup>[3-4]</sup>。

与传统矩形截面环件轧制技术相比, 异形截面环件轧制过程中的金属流动更加复杂, 尤其是非对称截面环件, 在轧制过程中很容易出现缺肉、鱼尾和爬辊等成形缺陷<sup>[5]</sup>。为此陈菲<sup>[6]</sup>针对锥形法兰环件, 采用中心复合实验设计探究了毛坯结构尺寸参数和进给策略与环件截面填充率的关系。Kang B S 等<sup>[7]</sup>通过三维有限元法和反向跟踪方案对矩形截面和 T 形截面进行预成形环件设计, 从而抑制环件轧制中端面高度不一致的缺陷。Li Y O 等<sup>[8]</sup>基于 Forge 有限元软件, 分析了法兰截面环件轧制成形过程中底部产生缺陷的原因, 并采用优化毛坯截面形状的方式来改善缺陷。除了通过优化毛坯形状来抑制成形缺陷, 工艺参数对成形质量的影响也是主要的研究方向, 宋亚东等<sup>[9]</sup>分析了环件在轧制过程中的受力情况, 通过改变导向辊倾角抑制了爬辊缺陷。Xie C 等<sup>[10]</sup>建立了有限元程序 H-RING, 研究了矩形截面环件在轧制过程中鱼尾缺陷的产生机理, 并探究了进给量与鱼尾缺陷之间的关系。目前, 针对环件的成形缺陷问题, 学者们主要针对工艺参数和毛坯结构尺寸参数对某一确定目标尺寸下环件的影响进行研究, 但目标尺寸的变化会造成环件的成形难度发生变化, 从而产生不同程度的成形缺陷, 因此, 结合目标尺寸对成形缺陷的影响, 对缺陷的形成机理和抑制方法进行研究对轧制工艺的设计具有重要的意义。

因此, 本文针对非对称异形截面大型铝合金环件易产生成形缺陷的问题, 探究异形截面环件的几何参数(槽型深度和槽型角度)和毛坯尺寸参数对环件成形缺陷的影响, 并将数值模拟与数理统计相结合, 建立响应面模型, 以期在不同的异形截面环件几何参数下, 获取使成形缺陷最小的最优毛坯尺寸参数, 同时预测成形缺陷的程度。

## 1 有限元仿真及成形缺陷分析

### 1.1 建立有限元模型

基于 Abaqus 建立如图 1 所示的不对称异形截面环件轧制有限元模型。为限制环件的轴向宽展和轴向摆动、提高轧制的稳定性, 模型采用闭式轧制孔型; 环件材料选用 2219 铝合金, 其中 2219 铝合金

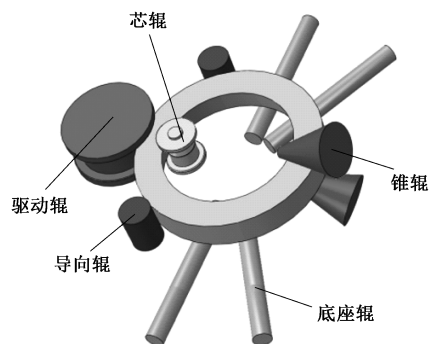


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

的塑性流变应力参数由热压缩实验获得, 从而保证模拟的可靠度和准确度; 目标环件的几何尺寸为: 外径为  $\Phi 3364$  mm, 端部内径为  $\Phi 3004$  mm, 整体高度为 317 mm; 其他轧制工艺参数按照表 1 设置; 为协调控制各个辊轮的运动, 利用 Fortran 语言对 Abaqus 进行二次开发, 编写 VUAMP 子程序, 提交运算时调用编写好的子程序。

表 1 轧制工艺参数

Table 1 Rolling process parameters

参数	数值
驱动辊半径 $R_d/\text{mm}$	450
芯辊下部半径 $R_c/\text{mm}$	250
导向辊半径 $R_g/\text{mm}$	175
锥辊锥角 $\gamma/(\circ)$	17.5
驱动辊转速 $w/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	1
芯辊进给速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	0.5
辊系温度/ $^{\circ}\text{C}$	80
环坯初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	500
周围环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	20
热传递系数 $/(\text{N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1})$	10
热对流系数 $/(\text{N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1})$	0.02
热辐射系数 $/(\text{N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1})$	0.7
摩擦因数 $\mu$	0.3
轧制比	1.8

### 1.2 2219 铝合金热压缩实验

由于本文研究的异形截面环件材料为 2219 铝合金, 因此, 为了使数值模拟结果更加可靠、准确, 需要获取 2219 铝合金准确的塑性流变应力参数, 对其进行单向热压缩实验。

结合生产经验, 2219 铝合金环件的轧制热加工温度为  $420 \sim 500$   $^{\circ}\text{C}$ , 加工应变速率小于  $5 \text{ s}^{-1}$ , 因

此, 本次实验采用的温度分别为 350、400、450 和 500  $^{\circ}\text{C}$ , 应变速率分别为 0.01、0.1、1.0 和 10  $\text{s}^{-1}$ 。实验采用 Gleeble-3500 动态材料试验机, 将加热至

目标温度并保温后的试样以恒定的应变速率压缩至真应变为 0.8, 随即进行水淬冷却。实验得到的真应力-真应变曲线如图 2 所示。

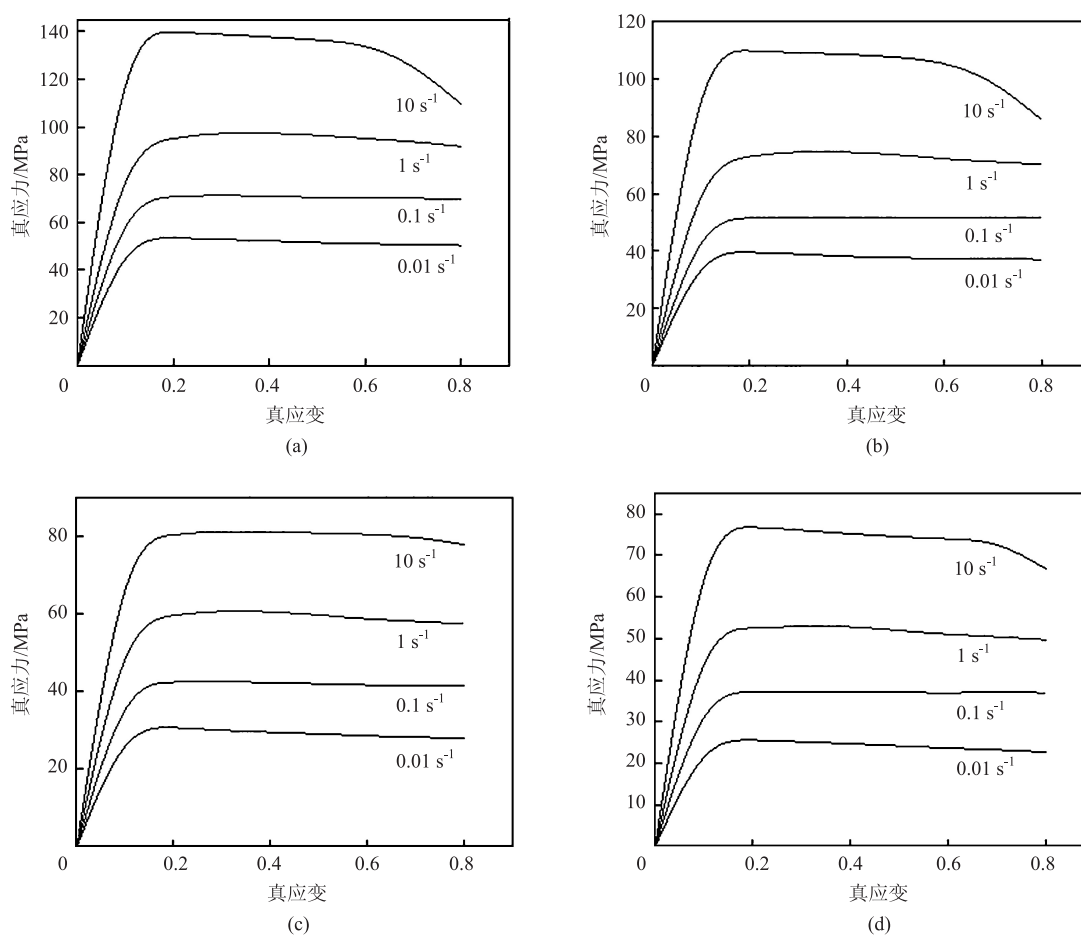


图 2 不同变形条件下 2219 铝合金环件的真应力-真应变曲线

(a) 350  $^{\circ}\text{C}$  (b) 400  $^{\circ}\text{C}$  (c) 450  $^{\circ}\text{C}$  (d) 500  $^{\circ}\text{C}$

Fig. 2 True stress-true strain curves of 2219 aluminium alloy ring under different deformation conditions

### 1.3 成形缺陷的形成及形成机理

对不同的目标槽型深度和槽型角度进行有限元仿真, 通过观察和分析仿真结果发现, 由于矩形环坯在充形过程中, 轴向流动分配不合理, 并且该环件截面为非对称截面, 受到旋转力矩和轴向力的作用, 导致最终轧成的环件呈现出明显的缺肉缺陷。

#### 1.3.1 异形截面环件几何参数对缺肉程度的影响

异形截面环件的几何参数 (槽型深度和槽型角度) 与环件的成形难度有很强的关联性, 成形难度越大, 越容易产生缺肉现象。为探究异形截面环件的几何参数对缺肉程度的影响, 本文分别对同一目标槽型角度下不同槽型深度以及同一目标槽型深度下不同槽型角度的环件的轧制过程进行仿真。槽型

角度为 65 $^{\circ}$ 时, 不同槽型深度的仿真结果如图 3 所示, 从图 3 中可以看出, 槽型深度为 30 mm 时, 未产生明显的缺肉缺陷; 当槽型深度增大至 45 mm 时, 环件产生明显的缺肉缺陷, 缺肉程度达到 8.594 mm; 当槽型深度继续增大至 60 mm 时, 缺肉的程度进一步加大, 达到 16.442 mm, 由此可见, 缺肉程度随着槽型深度的增大而增大。

槽型深度为 45 mm 时, 不同槽型角度的仿真结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 当槽型角度为 76 $^{\circ}$ 时, 环件产生了轻微的缺肉缺陷, 缺肉程度为 4.849 mm; 当槽型角度减小至 70 $^{\circ}$ 时, 缺肉程度加大至 5.528 mm; 当槽型角度为 65 $^{\circ}$ 时, 产生更加明显的缺肉现象, 达到 8.594 mm。由此可见, 随着槽型角度的减小, 缺肉的程度增大。

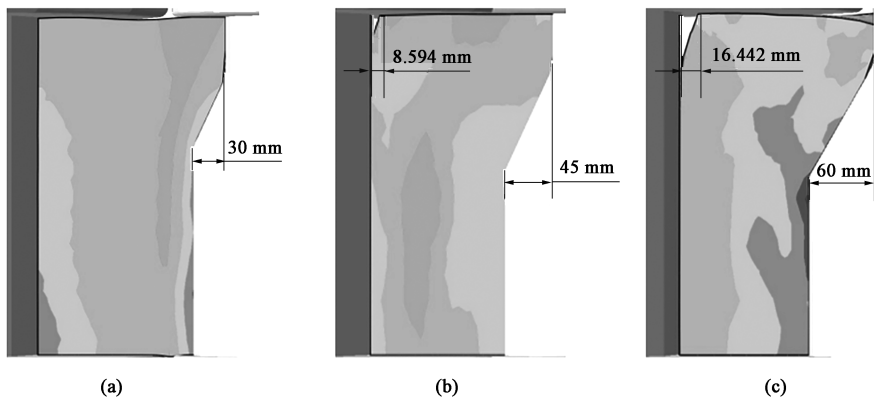


图 3 不同槽型深度下的仿真结果  
(a) 30 mm (b) 45 mm (c) 60 mm  
Fig. 3 Simulation results under different groove depths

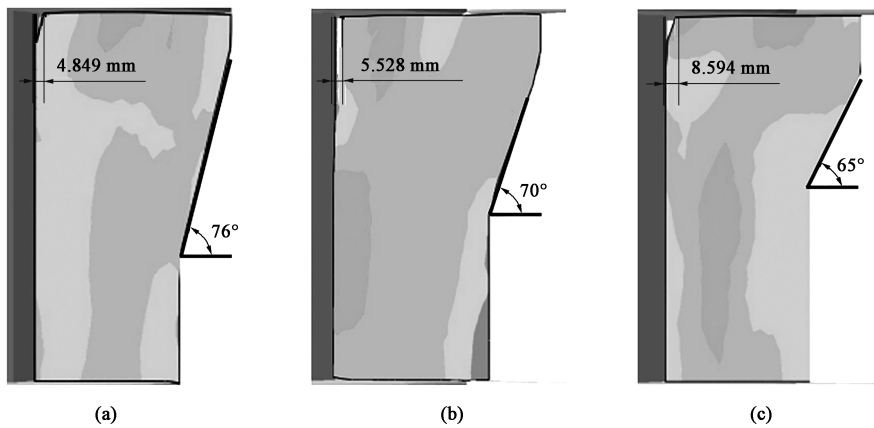


图 4 不同槽型角度下的仿真结果  
(a) 76° (b) 70° (c) 65°  
Fig. 4 Simulation results under different groove angles

1. 3. 2 缺肉缺陷的形成与抑制

要抑制缺肉缺陷，首先要知道缺肉缺陷是如何形成的。为分析缺肉缺陷的形成机理，以槽型深度为 50 mm、槽型角度为 76°、初始毛坯为矩形毛坯为例，探究轧制区环件的表面和内部的径向金属流动情况，截取初始时刻轧制区截面上由内表面至外表面的 4 条路径 a~d，并在每条路径上从环件上端面至下端面等间距选取 9 个追踪点，截取路径示意图如图 5 所示。

图 6a~图 6d 分别展现了环件轧制区路径 a~路径 d 的金属径向流动情况，图 7a~图 7d 分别展现了环件轧制区路径 a~路径 d 的金属轴向流动量的变化情况。

从图 6d 可明显发现，环件在轧制过程中产生了缺肉现象，环件外表面的上部金属（追踪点 1、追踪点 2、追踪点 3 和追踪点 4）在第 2 道次沿芯辊方

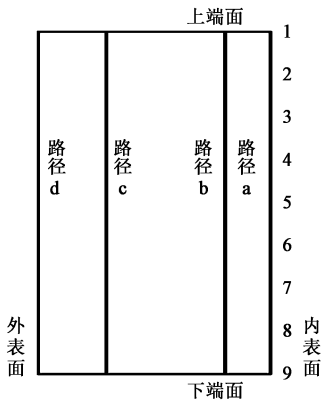


图 5 轧制区截面路径和追踪点示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of cross-sectional paths and tracking points for rolling zone

向产生了径向流动，即产生了缺肉现象，在第 3 道次时缺肉程度达到最大，随着轧制的进行，缺肉程度得到小幅度缓解，但驱动辊上壁和环件上端面的



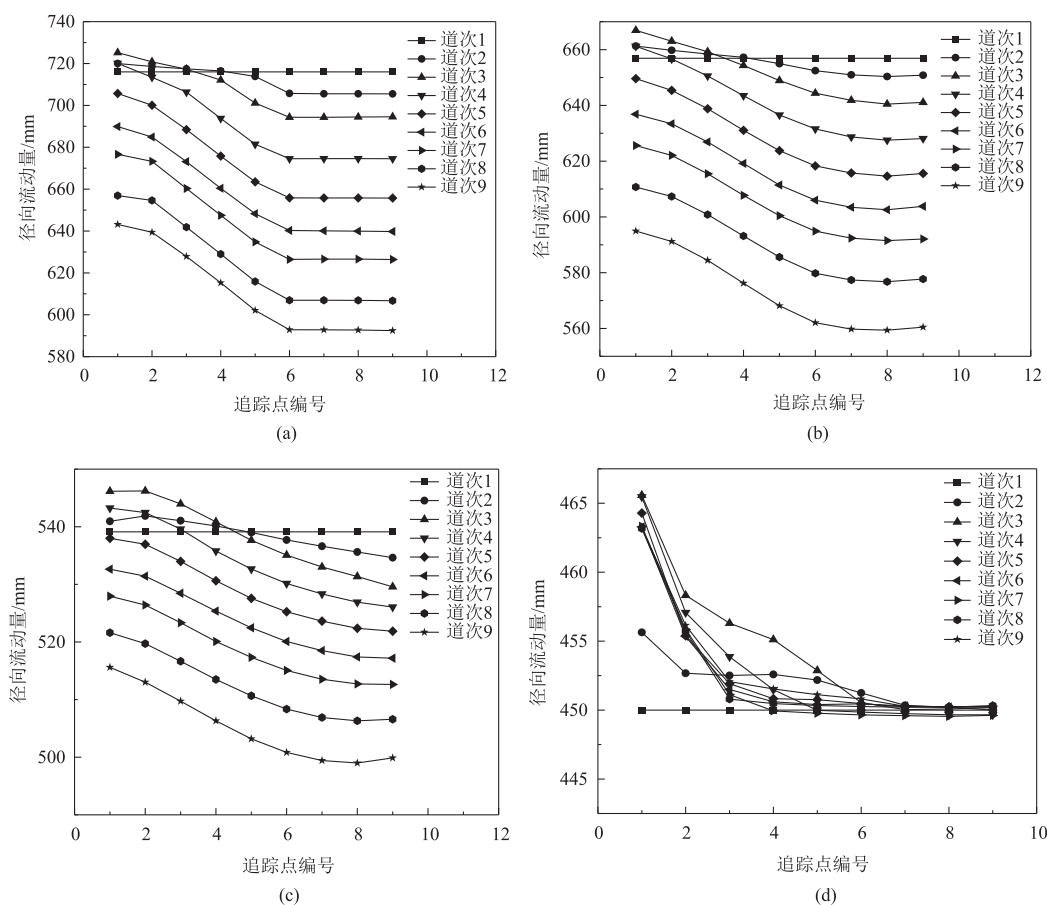


图6 轧制区不同路径上追踪点的径向流动量

(a) 路径 a (b) 路径 b (c) 路径 c (d) 路径 d

Fig. 6 Radial flow amounts of tracking points along different paths in rolling zone

(a) Path a (b) Path b (c) Path c (d) Path d

摩擦力阻止了金属的径向流动, 所以缺肉现象依旧严重。结合图 6a~图 6c 可发现, 环件上部金属 (追踪点 1、追踪点 2、追踪点 3 和追踪点 4) 在前 4 个道次产生了与进给方向相反方向的径向流动, 从第 5 道次开始才充型成功, 进入稳定轧制阶段, 但此时环件外表面的缺肉现象已经形成。由图 7a~图 7b 可知, 环件内侧 (路径 a~路径 b) 的金属在前 4 个道次沿轴向向下流动, 流动速度从环件上端面至下端逐渐减小, 且前 3 个道次中, 轴向流动速度逐渐增大, 到第 5 道次, 即充型成功后, 开始沿轴向向上流动。由图 7c~图 7d 可知, 环件外侧 (路径 c~路径 d) 的金属基本在前 4 个道次中沿轴向向上流动, 且在前 3 个道次中轴向流动速度越来越快, 只有环件上端面的金属在前两个道次有少量沿轴向向下的流动量, 第 5 道次后, 环件外侧金属的轴向流动量较小。通过对比前 4 个道次环件内侧沿轴向向下的流动速度和环件外侧沿轴向向上的流动速度

可知, 在环件轧制的充型阶段, 环件外侧金属沿轴向向上的流动速度小于环件内侧沿轴向向下的流动速度, 造成在环件上端的外侧产生了缺肉现象, 在充型完成后, 环件内侧金属的轴向向上流动量也不足以使缺肉现象消失。为进一步分析缺肉现象产生的原因, 绘制环件在轧制过程中的受力情况, 如图 8 所示, 其中,  $V$  为芯辊进给速度,  $F_1$  和  $F_2$  分别为驱动辊和芯辊对环坯的作用力,  $F_3$  为芯辊上部侧壁对环坯的作用力,  $M$  为以芯辊和毛坯接触面的上边缘为原点而产生的旋转力矩。

结合图 6~图 8 分析, 缺肉缺陷主要是由于轴向流动分配不合理和环件受到旋转力矩而造成的。首先, 如图 8a 所示, 由于芯辊下部先与毛坯接触, 因此, 在轧制初期, 毛坯下部先被锻透, 而上部并未与毛坯接触, 因此, 坯料内部金属会加快向没有约束的地方流动 (即轴向流动), 而毛坯形状为矩形坯, 所以金属向上部的轴向流动的需求过大, 容易

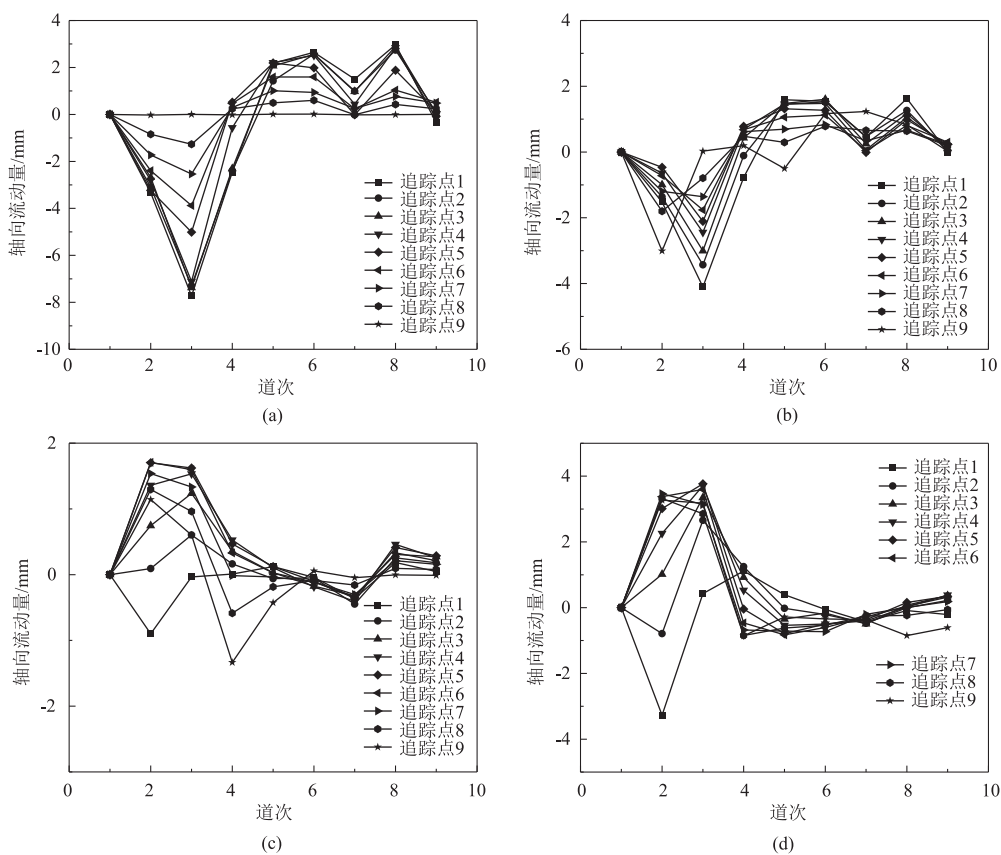


图 7 轧制区不同路径上追踪点的轴向流量

(a) 路径 a (b) 路径 b (c) 路径 c (d) 路径 d

Fig. 7 Axial flow amounts of tracking points along different paths in rolling zone

(a) Path a (b) Path b (c) Path c (d) Path d

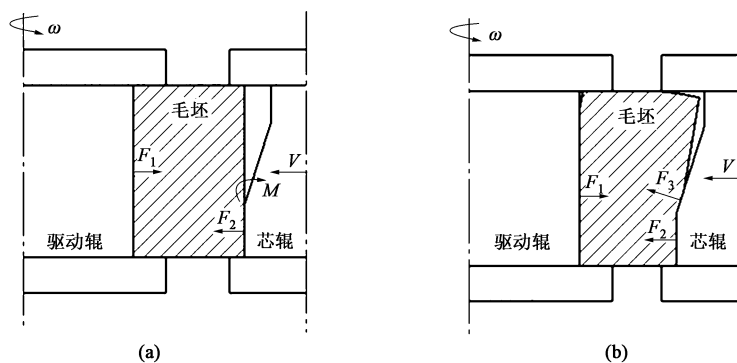


图 8 环件在轧制过程中的受力示意图

(a) 轧制初期 (b) 轧制中期

Fig. 8 Schematic diagrams of force on ring during rolling process

(a) Initial stage of rolling (b) Mid-stage of rolling

产生上部充型不足的现象；同时，在轧制初期，毛坯受到驱动辊的支撑力和芯辊的轧制力的作用，因此，以芯辊和毛坯接触面的上边缘为原点，产生了旋转力矩，使环件上部向芯辊方向倾倒，倾倒方向如 8a 中弯箭头所示，由此导致了图 6a~图 6d 中环件上部金

属在前 4 个道次产生了与进给方向相反方向的径向流动，只有轧制至中期，如图 8b 所示，毛坯在与芯辊上部的侧壁接触时受到轧制力的作用，产生相反方向的旋转力矩，才可逐渐与前期产生的旋转力矩平衡。

为抑制缺肉缺陷，本文对轧制毛坯形状进行优

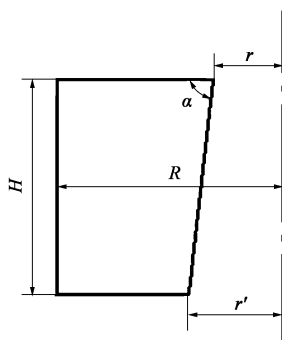


图9 环坯截面

Fig. 9 Cross section of ring blank

化, 采用的环坯截面如图9所示, 其中,  $H$  为环坯

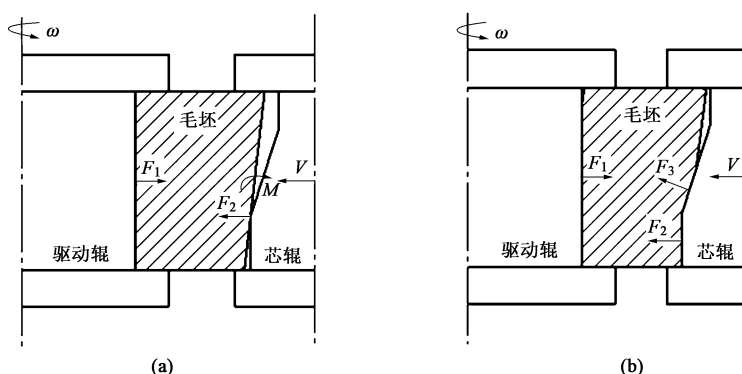


图10 优化后环件在轧制过程中的受力示意图

(a) 轧制初期 (b) 轧制中期

Fig. 10 Schematic diagrams of force on optimized ring during rolling process

(a) Initial stage of rolling (b) Mid-stage of rolling

## 2 响应面法实验设计及优化

### 2.1 响应面法

为获取能够抑制缺肉缺陷的最优的毛坯角度  $\alpha$ , 本文利用响应面法建立有关异形截面环件的几何参数 (槽型深度和槽型角度) 和毛坯角度与缺肉缺陷之间的响应面模型, 对毛坯角度进行优化设计。响应面法可以很好地规划因子实验信息, 利用较少的实验数量, 得到比较准确的实验结果。本文利用 Design-Expert 软件进行响应面实验设计<sup>[13-14]</sup>。响应面法主要分为中心复合设计和 Box-Behnken 设计。由于本文的设计目标受到槽型深度、槽型角度和毛坯角度这3个因素的影响, 且仿真的时间成本较高, 对设计变量的安全区域保障也有较高的要求, 因此, 本文选用 Box-Behnken 设计方法进行实验设计。该设计方法的实验点为实验空间边缘中点, 实验次数更少, 运作成本比中心复合设计更低, 并且没有伸

高度。以缺肉程度最小为目标, 改变毛坯角度  $\alpha$ , 毛坯的外径  $R$ 、上端内径  $r$ 、下端内径  $r'$  由体积不变原则计算得出<sup>[12]</sup>。优化后的环坯结构在轧制过程中的受力情况如图10所示, 图10a为轧制前期的受力示意图, 图10b为轧制中期的受力示意图。由图10a分析可知, 毛坯形状优化后减少了环件在轧制过程中向上部流动的轴向流动量, 并且毛坯在轧制前期受到的旋转力矩更小, 由图10b也可发现, 毛坯上部更早与芯辊上半部分的斜壁接触, 受到芯辊的轧制力, 产生相反方向的旋转力矩, 与前期产生的旋转力矩平衡, 因此, 从受力的角度分析, 该毛坯形状可以有效地抑制缺肉缺陷。

出立方体的轴向点, 因此, 对安全操作区域的保障更好<sup>[15-16]</sup>。

### 2.2 Box-Behnken 法实验设计

由前文分析可知, 缺肉缺陷程度与槽型的深度和角度有关, 由于改变毛坯角度可以改善缺肉缺陷, 因此, 本文以槽型深度、槽型角度和毛坯角度为设计变量, 以缺肉系数为设计目标进行实验设计, 其中槽型深度、槽型角度以及毛坯角度的示意图如图11所示, 其中,  $D$  为槽型深度,  $\theta$  为槽型角度。

为量化缺肉程度, 本文定义缺肉系数  $\Delta\varepsilon$  的计算公式如式(1)所示, 缺肉系数的计算示意图如图12所示。

$$\Delta\varepsilon = \Delta B / B \quad (1)$$

式中:  $\Delta B$  为缺肉程度;  $B$  目标环件上端的厚度。

设计变量的取值范围通过前期实验分析而定, 由于图9所示环坯截面的毛坯角度在  $75^\circ$  时成形情况较好, 具有制坯可行性, 因此, 将毛坯角度的下限设置为  $75^\circ$ 。如表2所示, 根据 Box-Behnken 实验

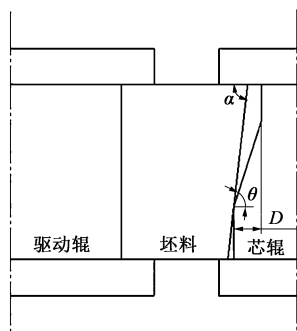


图 11 设计变量示意图

Fig. 11 Schematic diagram of design variables

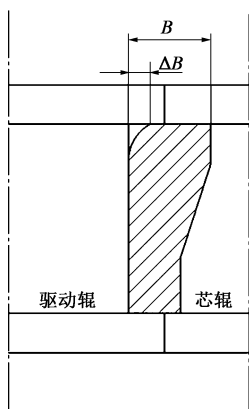


图 12 缺肉系数示意图

Fig. 12 Schematic diagram of insufficient filling coefficient

设计方法构建了 13 个实验点, 实验点的信息和实验结果如表 3 所示。

表 2 设计变量取值范围

Table 2 Value ranges of design variables

设计变量	下限	上限
槽型深度/mm	30	60
槽型角度/(°)	65	76
毛坯角度/(°)	75	90

### 2.3 响应面模型的建立及误差分析

根据有限元仿真分析的实验数据, 利用最小二乘法拟合出响应面方程, 从而反映槽型深度  $D$ 、槽型角度  $\theta$  和毛坯角度  $\alpha$  和缺肉系数  $\Delta\epsilon$  之间的函数关系, 其中, 拟合的缺肉系数函数的表达式为:

$$\Delta\epsilon = 2.430 \times 10^{-4}D + 8.939 \times 10^{-3}\theta + 1.106 \times 10^{-3}\alpha - 1.210 \times 10^{-4}D\theta + 1.140 \times 10^{-4}D\alpha - 6.200 \times 10^{-5}\theta\alpha - 3.906 \times 10^{-1} \quad (2)$$

对该多项式拟合方程进行方差分析, 结果如表 4 所示。在进行方差分析时,  $P$  值主要用于反映响

表 3 Box-Behnken 设计法构建样本空间

Table 3 Sample space constructed by Box-Behnken design method

实验号	设计变量			设计目标
	槽型深度 $D/\text{mm}$	槽型角度 $\theta/(^\circ)$	毛坯角度 $\alpha/(^\circ)$	缺肉系数 $\Delta\epsilon$
1	30	65.0	82.5	0.00167
2	30	70.5	75.0	0.00139
3	30	76.0	82.5	0.00102
4	30	70.5	90.0	0.00143
5	45	65.0	75.0	0.01293
6	45	70.5	82.5	0.01701
7	45	76.0	75.0	0.00242
8	45	76.0	90.0	0.02694
9	45	65.0	90.0	0.04774
10	60	76.0	82.5	0.01528
11	60	70.5	90.0	0.06095
12	60	70.5	75.0	0.00954
13	60	65.0	82.5	0.05584

表 4 方差分析结果

Table 4 Variance analysis results

方差来源	平方和	自由度	均方差	$F$ 值	$P$ 值
模型	0.0056	6	0.0009	89.27	<0.0001
$D$	0.0023	1	0.0023	221.81	<0.0001
$\theta$	0.0007	1	0.0007	62.98	<0.0001
$\alpha$	0.0015	1	0.0015	146.96	<0.0001
$D\theta$	0.0004	1	0.0004	38.15	0.0003
$D\alpha$	0.0007	1	0.0007	63.20	<0.0001
$\theta\alpha$	0.0000	1	0.0000	2.54	0.1500
残差	0.0001	8	0.0000		
失拟向	0.0001	6	0.0000		
纯误差	0.0000	2	0.0000		
总值	0.0108	14			

应值与设计变量之间的回归关系。当某一项的  $P \leq 0.05$  时, 则表示该项对响应值的影响显著; 当  $P \leq 0.01$  时, 则表示该项对响应值的影响极其显著; 而当  $P > 0.05$  时, 则表示该项对响应值的影响不显著<sup>[17]</sup>。因此, 由表 4 可知, 该拟合方程中,  $D$ 、 $\theta$ 、 $\alpha$ 、 $D\theta$ 、 $D\alpha$  项对响应值的影响极其显著,  $\theta\alpha$  项对响应值的影响不显著, 因此, 应舍弃该项重新拟合, 重新拟合后的缺肉系数的函数表达式为:

$$\Delta\epsilon = 2.430 \times 10^{-4}D + 3.794 \times 10^{-3}\theta - 3.291 \times 10^{-3}\alpha - 1.210 \times 10^{-4}D\theta + 1.140 \times 10^{-4}D\alpha - 2.783 \times 10^{-2} \quad (3)$$



为研究该响应面模型的拟合度，缺肉系数响应面的模型如式（3）所示，进行相关性分析，结果如表 5 所示。其中决定系数  $R^2$  与校正拟合度（*Adjusted  $R^2$* ）反映模型的拟合准确度，因此值越接近 1，表示模型的拟合度越高，大于 0.8 则表示存在显著相关性，预测拟合度（*Predicted  $R^2$* ）的值反映模型的预测能力，越接近 1 越好<sup>[17]</sup>，*Adeq Prediction* 反映响应范围与平均误差的比率，其值应大于 4，且越大越好。由表 5 可知，缺肉系数响应面近似模型具有较好的拟合度。

表 5 相关性分析结果

Table 5 Correlation analysis results

参数	数值
$R^2$	0.9806
<i>Adjusted <math>R^2</math></i>	0.9699
<i>Predicted <math>R^2</math></i>	0.9523
<i>Adeq Prediction</i>	30.1304

3 毛坯角度优化及结果分析

随着目标截面尺寸的变化，缺肉的程度发生变化，因此，针对实验范围内不同的异形截面环件的几何参数（槽型深度和槽型角度），利用得出的响应面模型，以缺肉系数最小化为目标，均可以得到相应的最优毛坯角度，从而优化毛坯形状，并预测缺肉系数。以槽型深度为 45 mm、槽型角度为 70°为例，毛坯形状为矩形时，有限元仿真结果如图 13 所示，产生了明显的缺肉缺陷， $\Delta B$  达到了 5.528 mm， $\Delta \varepsilon$  达到了 0.0307。通过响应面模型对该目标截面尺寸下的毛坯角度进行优化后，采用新的毛坯形状进行环件轧制的有限元仿真结果如图 14 所示，该优化模型的目标及约束条件如表 6

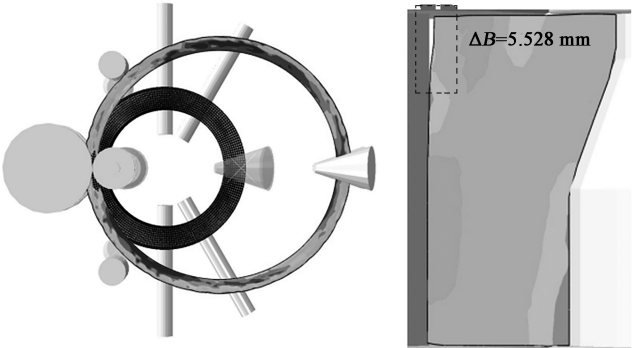


图 13 优化前有限元仿真结果

Fig. 13 Finite element simulation results before optimization

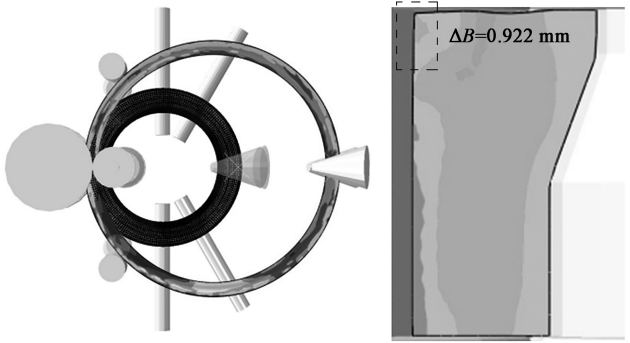


图 14 优化后有限元仿真结果

Fig. 14 Finite element simulation results after optimization

所示，优化得出的方案如表 7 所示。

表 6 优化模型的目标及约束条件

Table 6 Objective and constraint conditions of optimization model

设计参数/响应	变化范围/目标
槽型深度/mm	45
槽型角度/(°)	70
毛坯角度/(°)	75~90
缺肉系数	最小

表 7 优化方案

Table 7 Optimization scheme

参数	槽型深度/ mm	槽型角度/ (°)	最优毛坯角度/ (°)	预测的缺肉 系数
数值	45	70	75	0.006

优化后的环坯在轧制完成后的缺肉系数与优化前的缺肉系数的结果对比如表 8 所示。通过分析图 14 的有限元仿真结果可知，经过优化的环坯在轧制过程中未出现明显的缺肉现象， $\Delta B$  减小至 0.922 mm， $\Delta \varepsilon$  减小至 0.0051，缺肉系数减少了 83.4%。经对比发现，毛坯角度优化后，较好地抑制了缺陷的形成。

表 8 环坯优化前后缺肉系数对比

Table 8 Comparison of insufficient filling coefficients for ring blank before and after optimization

环坯状态	缺肉系数
优化前	0.0307
优化后	0.0051

## 4 结论

(1) 本文基于 Abaqus 对非对称异形截面环件轧制过程进行数值模拟, 仿真结果显示, 采用矩形毛坯时, 在轧制过程中环件极易受到轴向流动分配不合理和旋转力矩的影响而产生缺肉缺陷, 且缺肉程度随着槽型深度的增大而增大, 随着槽型角度的增大而减小, 因此, 本文采用优化毛坯形状的方式来抑制缺肉缺陷。

(2) 定义了表示缺肉程度的缺肉系数的计算公式, 利用 Box-Behnken 实验设计以及响应面法构建出表示 2219 铝合金异形截面环件的缺肉系数与环件的几何参数 (槽型深度和槽型角度) 及毛坯角度和缺肉系数之间定量关系的响应面模型, 对缺肉系数进行预测, 并对该模型进行了方差分析和相关性分析, 结果表明该模型的拟合度良好。

(3) 采用响应面模型对槽型深度为 45 mm, 槽型角度为 70° 的目标截面进行毛坯角度优化, 对优化后的毛坯进行环件轧制数值模拟, 结果显示, 毛坯角度优化后, 缺肉系数减小了 83.4%, 较好地抑制了缺肉缺陷。

### 参考文献:

- [1] 倪江涛, 张文学. 锻造技术在航天运载器中的应用及展望 [J]. 航天制造技术, 2019, (5): 61-65, 70.
- Ni J T, Zhang W X. Application and development prospects of forging technology in aerospace vehicle [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2019, (5): 61-65, 70.
- [2] 王敏, 张春. 大型环件热辗扩成形宽展的工艺因素效应研究 [J]. 热加工工艺, 2012, 41 (7): 4-7.
- Wang M, Zhang C. Effects of process factors on spread in hot rolling of large ring [J]. Hot Working Technology, 2012, 41 (7): 4-7.
- [3] 钱东升. 异形截面环件冷轧力学原理和工艺理论研究 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2012.
- Qian D S. Study on the Mechanics Principle and Process Theory of Cold Rolling of Special-shaped Cross Section [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2012.
- [4] Jenkouk V, Hirt G, Franzke M. Finite element analysis of the ring rolling process with integrated closed-loop control [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2012, 61 (1): 267-270.
- [5] 谢亚琳. T 形环件约束轧制成形工艺研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- Xie Y L. Research on Constrained Profile Ring Rolling of T-shaped Ring [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
- [6] 陈菲. IN718 高温合金异形环件轧制坯料设计及进给策略研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- Chen F. Research on Ring Billet and Feeding Strategy Design for Profile Ring Rolling of IN718 Super Alloy [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [7] Kang B S, Kobayashi S. Preform design in ring rolling processes by the three-dimensional finite element method [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1991, 31 (1): 139-151.
- [8] Li Y O, Tae W H, Young Y W, et al. Analysis of defects in L-section profile ring rolling [J]. Procedia Manufacturing, 2018, 15: 81-88.
- [9] 宋亚东, 曾旭东, 钱东升. 环件径向轴向轧制中轴向爬升机制与抑制方法研究 [J]. 中国机械工程, 2013, 24 (12): 1665-1670.
- Song Y D, Zeng X D, Qian D S. Research on mechanism and suppression method of axial climbing in radial-axial ring rolling [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24 (12): 1665-1670.
- [10] Xie C, Dong X, Li S, et al. Rigid-viscoplastic dynamic explicit FEA of the ring rolling process [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40 (1): 81-93.
- [11] 王凯, 吴运新, 龚海, 等. 2219 铝合金高温塑性变形应变补偿的本构模型 [J]. 热加工工艺, 2019, 49 (9): 120-124.
- Wang K, Wu Y X, Gong H, et al. Strain-compensated constitutive model for high temperature plastic deformation of 2219 aluminum alloy [J]. Hot Working Technology, 2019, 49 (9): 120-124.
- [12] 华林, 黄兴高, 朱春东. 环件轧制理论和技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- Hua L, Huang X G, Zhu C D. Ring Rolling Theory and Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [13] Abdolhossein Sadrnia, Yasin Orooji, Ali Behmaneshfar, et al. Developing a simple box-behnken experimental design on the removal of doxorubicin anticancer drug using Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/graphene nanoribbons adsorbent [J]. Environmental Research, 2021, 200: 111522.
- [14] Amine Nekkaa, Akila Benaissa, Lalaouna Abd E D, et al. Optimization of the extraction process of bioactive compounds from Rhamnus alaternus leaves using Box-Behnken experimental design [J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2021, 25: 100345.
- [15] 蔡正祥. 响应面法在机械结构优化问题上的应用研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- Cai Z X. Application of Response Methodology in Mechanical Structural Optimization [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.
- [16] 岳炯, 于存贵, 汪国梁, 等. 基于响应面法的某火箭炮结构参数优化 [J]. 兵工自动化, 2015, 34 (9): 83-86.
- Yue J, Yu C G, Wang G L, et al. Structural parameters optimization of MLRS based on response surface method [J]. Ordnance Industry Automation, 2015, 34 (9): 83-86.
- [17] 徐向宏, 何明珠. 试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- Xu X H, He M Z. Experiment Design and Design-Expert, SPSS Application [M]. Beijing: Science Press, 2010.