

基于响应面的TA1钛合金内螺纹管芯轴结构参数优化

黎华杰¹, 李旭东¹, 熊 振¹, 张征浩¹, 黄东男^{1,2}

(1. 内蒙古工业大学 材料科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

2. 中铝材料应用研究院有限公司, 北京 102200)

摘要: 为了得到芯轴最优的结构参数, 采用响应面法以螺纹长度 L 、螺纹升角 φ_1 及芯轴迎角 φ_2 为设计变量, 以螺纹管料头齿部的速度相对差值 VRD_1 与管壁的速度相对差值 VRD_2 及挤压成形最大载荷 F 为优化目标参数, 建立了多响应回归模型, 采用粒子群算法对已建立的多响应回归模型进行全局寻优, 最终得到内螺纹管芯轴的最优参数为: 螺纹长度 $L=11\text{ mm}$ 、螺纹升角 $\varphi_1=30^\circ$ 以及芯轴迎角 $\varphi_2=96^\circ$ 。优化后的 VRD_1 减小了50.38%, VRD_2 减小了44.81%, F 值减小了5.10%, 采用最优芯轴结构参数进行模具加工并进行挤压试验, 得到了质量合格的TA1钛合金内螺纹管。结果表明, 采用响应面法优化后的芯轴结构可以提高挤压过程中金属的流动性, 减小模具的最大成形载荷, 提高内螺纹管的成形质量。

关键词: 内螺纹管; 芯轴; 挤压; 响应面法; 粒子群算法

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.09.019

中图分类号: TG379

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940(2022)09-0126-09

Optimization on structural parameters of mandrel for TA1 titanium alloy internal thread pipe based on response surface

Li Huajie¹, Li Xudong¹, Xiong Zhen¹, Zhang Zhenghao¹, Huang Dongnan^{1,2}

(1. College of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Aluminum Corporation of China Limited, Beijing 102200, China)

Abstract: In order to obtain the optimal structural parameters of mandrel, taking thread length L , thread lift angle φ_1 and attack angle of mandrel φ_2 as the design variables, and taking velocity relative difference VRD_1 of material head tooth in thread pipe, velocity relative difference VRD_2 of pipe wall and maximum load F of extrusion forming as the optimization target parameters, the multi-response regression model was established. Then, the established multi-response regression model was globally optimized by particle swarm algorithm, and the optimal parameters of internal thread pipe mandrel were finally obtained as the thread length $L=11\text{ mm}$, the thread lift angle $\varphi_1=30^\circ$, and the attack angle of mandrel $\varphi_2=96^\circ$. Furthermore, after optimization, VRD_1 was reduced by 50.38%, VRD_2 was reduced by 44.81%, and F value was decreased by 5.10%. Finally, the mold was processed by the optimal structure parameters of mandrel, and the extrusion test was conducted to obtain the qualified TA1 titanium alloy internal thread pipe. The results show that the mandrel structure optimized by the response surface method can improve the fluidity of metal in the extrusion process, reduce the maximum forming load of mold, and improve the forming quality of internal thread pipe.

Key words: internal thread pipe; mandrel; extrusion; response surface method; particle swarm algorithm

近年来, 我国对海洋石油工业领域的发展更加重视^[1], 这就会使用大量涉及换热器、冷凝器、蒸发器的热交换管^[2-4]。钛合金被誉为“海洋金属”,

可以在大量氯化物、硫酸盐等盐类的工作环境中使用而不易被腐蚀^[5-6]。相比于光管, 内螺纹管^[7]的换热效率更高, 但钛合金的塑性成形比较困难, 传统的用于加工钢、铜、铝合金内螺纹管的加工方法不适用于钛合金。因此, 中铝材料应用研究院有限公司黄东男教授等^[8]基于多年国内外研究, 提出一种基于被动旋转螺纹芯轴的内螺纹管挤压方法。

采用这种模具虽然挤出了内螺纹管, 但齿形并不饱满, 判断是螺纹芯轴的结构不够合理, 需要对其进行优化。王勇等^[9]为了提高花键套的成形质

收稿日期: 2021-12-26; 修订日期: 2022-04-03

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金资助项目 (5186050063)

作者简介: 黎华杰 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1679860680@qq.com

通信作者: 黄东男 (1979-), 男, 博士, 教授

E-mail: huangdongnan@cmari.com

量，以降低花键套振动冷挤压的最大成形载荷和提升齿形晶粒度为优化目标，建立了辅助振动工艺参数与优化目标之间的响应面模型，在优化范围内得到最优的辅助振动工艺参数组合，即振动频率为 12.59 Hz，振幅为 1 mm，凸模的挤压速度为 13.54 mm · s⁻¹；方华^[10]以挤压成形能耗与型材出口面的温度均方差为优化目标，构建多目标优化模型，采用粒子群算法对优化模型进行求解，得到了最优解集，温度均方差降低了 21.6%，挤压成形能耗降低了 1.6%，实现了工艺参数的优化。以上说明了响应面法以及人工智能算法在挤压工艺以及挤压模具的优化设计中是可以应用的，本文将采用这种方法对芯轴进行多目标优化。

1 优化模型

在本课题之前的研究中，确定内螺纹管芯轴（图 1，其中 H 为挤压模工作带的长度， Δh 为挤压时螺纹管仅受工作带作用力的长度）的螺纹升角 φ_1 、螺纹长度 L 及芯轴迎角 φ_2 均会对钛合金内螺纹管的变形产生影响，因此，将此 3 组参数作为结构优化设计的变量参数。考虑到实际挤压生产情况， φ_1 不应超过 30°， L 不宜超过 15 mm， φ_2 不应小于 90°，综合考虑了内螺纹管芯轴的结构合理性及工作强度，确定了螺纹升角 φ_1 、螺纹长度 L 及芯轴迎角 φ_2 的取值范围如表 1 所示。

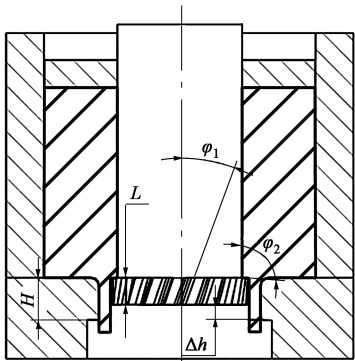


图 1 影响内螺纹管成形的模具结构参数

Fig. 1 Mold structure parameters affecting forming of internal thread pipe

表 1 设计变量的取值范围

Table 1 Value ranges of design variables

设计变量	取值范围
螺纹长度 L/mm	5~15
螺纹升角 $\varphi_1/(\text{°})$	10~30
芯轴迎角 $\varphi_2/(\text{°})$	90~100

内螺纹管从挤压模具挤出时，若内螺纹管的截面流速不均，则会造成齿充填不完整、螺纹管偏心弯曲等缺陷。因此，选择模具出口处螺纹管截面上的金属流速均匀性作为模具结构参数优劣的评价指标。为了准确地描述金属的流速分布，选择速度相对差值（Velocity Relative Difference, VRD）分别衡量螺纹管料头齿部和管壁的速度均匀性（分别记为 VRD_1 与 VRD_2 ），其数学表达式如式（1）所示：

$$VRD = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|v_i - v_\alpha|}{v_\alpha}}{n} \tag{1}$$

式中： v_i 为在考察截面上第 i 个节点处的流动速度， $i=1, 2, 3, \dots, n$ ； n 为考察节点总数目； v_α 为所有考察节点的平均速度。

VRD 值可以较好地代表速度的均匀程度， VRD 值越大，速度的均匀程度越低。挤压成形最大荷载 F 也是评价模具结构是否合理的重要指标，因此， F 被选做第 3 个目标函数，用来衡量内螺纹管芯轴结构参数的合理性。根据 Box-Behnken 试验设计方法（简称 BBD），对所选的设计变量 L 、 φ_1 以及 φ_2 的取值进行分组，如表 2 所示。通过调整内螺纹管芯轴的结构，进行 17 组挤压数值模拟试验。

表 2 BBD 试验方案
Table 2 BBD test schemes

序号	L/mm	$\varphi_1/(\text{°})$	$\varphi_2/(\text{°})$	$VRD_1/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$VRD_2/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	F/kN
1	5	10	95	0.017001	0.018183	1560.31
2	15	10	95	0.001896	0.009839	1626.13
3	5	30	95	0.009192	0.009481	1598.31
4	15	30	95	0.005863	0.006717	1745.25
5	5	20	90	0.151123	0.016143	1614.11
6	15	20	90	0.005861	0.006784	1679.86
7	5	20	100	0.010541	0.011288	1590.31
8	15	20	100	0.006098	0.007951	1633.21
9	10	10	90	0.012812	0.013665	1585.23
10	10	30	90	0.007168	0.008311	1698.12
11	10	10	100	0.010234	0.011025	1568.31
12	10	30	95	0.005642	0.006528	1646.44
13	10	20	95	0.008328	0.008497	1620.11
14	10	20	95	0.009588	0.009807	1655.56
15	10	20	95	0.010942	0.011489	1626.35
16	10	20	95	0.008027	0.008417	1634.12
17	10	20	95	0.009321	0.009677	1614.51

2 基于响应曲面模型分析

2.1 响应曲面模型的建立

在获得挤压试验的仿真结果后,将目标参数与设计变量的关系进行拟合,利用三维响应面分析方法在设计变量的取值范围内,对各设计变量及其之间的相互作用对目标参数的影响规律进行定量分析。本文选择二阶线性方程来拟合不同设计变量组合下的函数关系,其表达式如式(2)所示:

$$y = \beta_0 + \sum_{u=1}^w \beta_u x_u^2 + \sum_{p < u} \sum \beta_{pu} x_p x_u + \varepsilon \quad (2)$$

式中: β_0 、 β_u 、 β_{pu} 均为待定系数; x_u 为设计变量; x_p 为 $p < u$ 时的设计变量; ε 为残余误差; $u = 1, 2, 3, \dots, w$; w 为实数。

根据表 2 中的试验数据结果对 3 个优化目标选用相应的回归模型进行定量分析,使用最小二乘法进行拟合,分别得出 VRD_1 、 VRD_2 和 F 的响应函数,如式(3)~式(5)所示:

$$\begin{aligned} VRD_1 = & 0.0092 - 0.0032 \times L + 0.0028 \times \varphi_1 - \\ & 0.0011 \times \varphi_2 + 0.0011 \times L \times \varphi_1 - 0.0012 \times \\ & L \times \varphi_2 - 0.0001 \times \varphi_2 \times \varphi_1 + 0.0007 \times \\ & L^2 - 0.0002 \times \varphi_1^2 + 0.0006 \times \varphi_2^2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} VRD_2 = & 0.0096 - 0.0031 \times L + 0.0027 \times \varphi_1 - \\ & 0.0001 \times \varphi_2 + 0.0012 \times L \times \varphi_1 - 0.00016 \times \\ & L \times \varphi_2 - 0.0002 \times \varphi_2 \times \varphi_1 + 0.0001 \times L^2 - \\ & 0.0004 \times \varphi_1^2 + 0.0001 \times \varphi_2^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} F = & 1630.13 - 40.18 \times L - 43.52 \times \varphi_1 - 17.38 \times \varphi_2 + \\ & 20.28 \times L \times \varphi_1 - 5.71 \times L \times \varphi_2 - 5.71 \times \varphi_2 \times \varphi_1 + \\ & 3.6 \times L^2 - 1.24 \times \varphi_1^2 - 4.37 \times \varphi_2^2 \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 模型的可靠性检验

根据二阶回归方程建立的响应曲面模型可以用来预测不同芯轴结构时 VRD_1 、 VRD_2 和 F 的近似值。为了验证所建立的多响应关系的可靠性,将建立的 3 组多响应模型在不同试验方案下的实际模拟值与预测值进行对比,如图 2 所示,实际模拟值均匀分布在预测值直线的两侧且与预测值的变化趋势相一致,说明此数学模型具有较高的准确性。

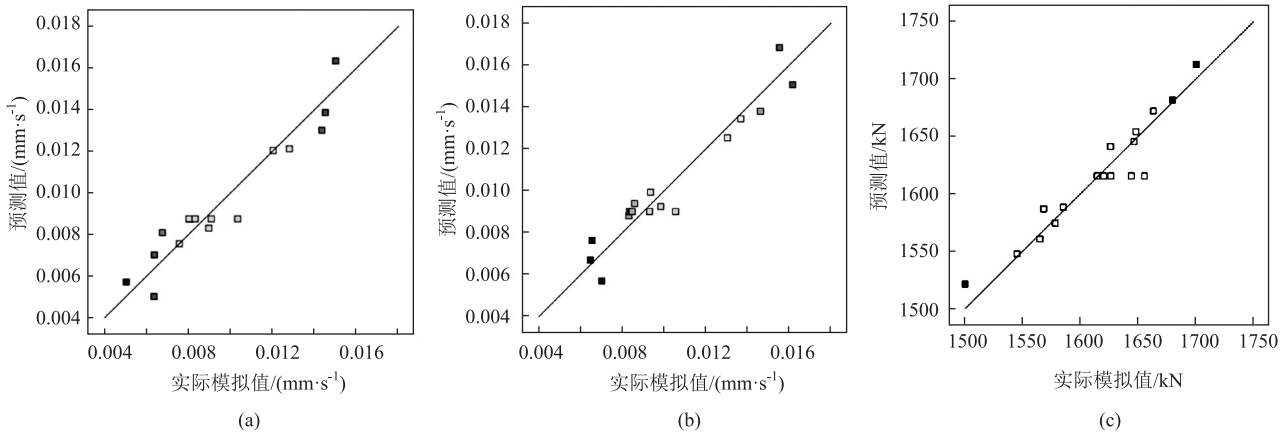


图 2 3 组多响应模型的实际模拟值与预测值对比

(a) VRD_1 (b) VRD_2 (c) F

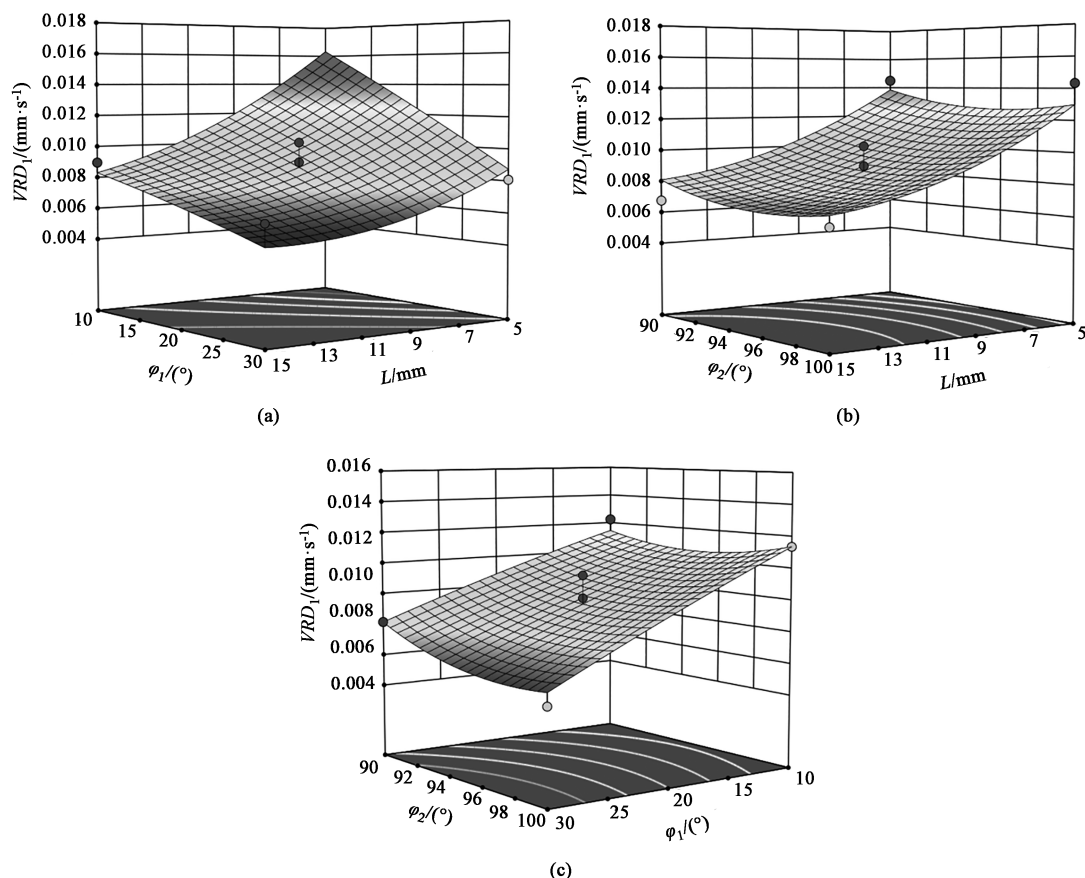
Fig. 2 Comparisons of actual simulation values and predicted values for three sets of multi-response models

2.3 目标参数响应面分析

采用三维响应曲面分析内螺纹管芯轴的 3 个关键参数对于内螺纹管 VRD_1 、 VRD_2 以及 F 这 3 组目标参数的影响规律。

图 3 为螺纹升角 φ_1 、螺纹长度 L 及芯轴迎角 φ_2 对螺纹管料头部齿部速度相对差值 VRD_1 的影响。其中,图 3a 为 φ_2 为 95° 时, L 与 φ_1 对 VRD_1 的交互作用的响应曲面图,可以发现随着 φ_1 与 L 的增大, VRD_1 值减小,当 φ_1 为曲面坐标最小值 10° 时,随着 L 的增大, VRD_1 迅速减小,由 $0.017 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 减小

至 $0.008 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; 而当 L 为曲面坐标值最小值 5 mm 时,随着 φ_1 的增大, VRD_1 值将由 $0.017 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 减小至 $0.0082 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,这说明单一改变螺纹升角或者改变螺纹长度均有利于改进金属流速;当 φ_1 为 30° 时,随着 L 的增加, VRD_1 值逐渐减小,其中,在 L 由 5 mm 减小至 11 mm 时其减小幅度最小,若继续增加芯轴的长度,则 VRD_1 值的变化幅度不是很大。得出增加螺纹升角 φ_1 及螺纹长度 L 将会使得金属流速减慢,起到缓流及平衡整体流速的作用,但当 L 超过 11 mm 后, φ_1 和 L 对平衡流速的贡献不是很

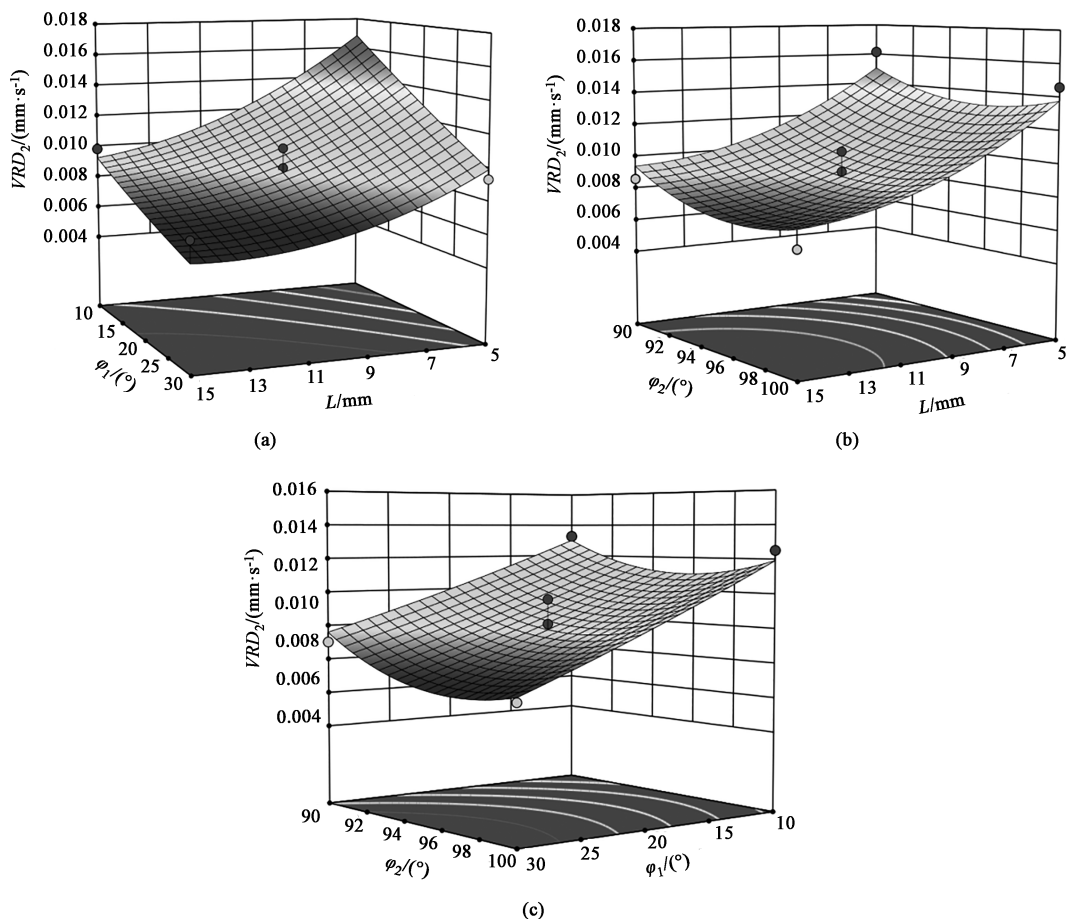
图3 ϕ_1 、 L 及 ϕ_2 对 VRD_1 的影响(a) ϕ_1 与 L 的交互关系 (b) ϕ_2 与 L 的交互关系 (c) ϕ_1 与 ϕ_2 的交互关系Fig. 3 Influences of ϕ_1 , L and ϕ_2 on VRD_1 (a) Interaction relationship between ϕ_1 and L (b) Interaction relationship between ϕ_2 and L (c) Interaction relationship between ϕ_1 and ϕ_2

大。图3b为 ϕ_1 为 20° 时, ϕ_2 与 L 对 VRD_1 的交互作用的响应曲面图,当 ϕ_2 为定值时, VRD_1 值将会随 L 的增加逐渐减小;当 L 为定值时,随着 ϕ_2 的变化, VRD_1 将会减小但变化幅度不是很大,说明 ϕ_2 对螺纹管料头齿部的流速均匀性有一定的影响。图3c为 L 为 10 mm 时, ϕ_1 与 ϕ_2 对 VRD_1 的钛合金交互作用的响应曲面图,当 ϕ_2 为定值时, VRD_1 将会随着 ϕ_1 的增大而减小,但 ϕ_2 对 VRD_1 的作用很小。以上分析可以说明, ϕ_1 与 L 对螺纹管料头齿部的流速均匀性有重要的作用, ϕ_2 对于螺纹管料头齿部流速均匀性的影响程度的贡献不是很大。

图4为螺纹升角 ϕ_1 、螺纹长度 L 及芯轴迎角 ϕ_2 对管壁速度相对差值 VRD_2 的影响。图4a为当 ϕ_2 为 95° 时, L 与 ϕ_1 对 VRD_2 的交互作用的响应曲面图。 VRD_2 随着 ϕ_1 和 L 的增大而持续增大,当 ϕ_1 和 L 均达到最大时, VRD_2 达到最小;当 ϕ_2 不变时,调整内螺纹管芯轴的 ϕ_1 和 L 将会使金属流动受到的阻力

增加,进而对流速均匀性产生影响。图4b为 ϕ_1 为 20° 时, L 与 ϕ_2 对 VRD_2 的交互作用的响应曲面。可以看出,随着 L 的增加, VRD_2 将会减小,由 5 mm 增大至 11 或 12 mm 时,减小幅度最大,当超过 12 mm 时,减幅逐渐降低,说明 L 在 5 mm 的调整范围内对 VRD_2 的影响程度最显著; ϕ_2 由 100° 减小至 94° 时, VRD_2 会减小,若 ϕ_2 继续减小则 VRD_2 会增加,这说明芯轴迎角的调整会对管壁的流速均匀性产生影响,但如果芯轴迎角太小则会引起坯料在芯轴前端的堆积而造成管壁流动紊乱。图4c为 L 为 10 mm 时, ϕ_1 与 ϕ_2 对 VRD_2 的交互作用的响应曲面图。可以发现,螺纹升角 ϕ_1 对于 VRD_2 有显著的影响,芯轴迎角 ϕ_2 同样是在 $100^\circ \sim 90^\circ$ 范围内时, VRD_2 先减小后增大。但其显著性与图4b相比较弱,说明当螺纹升角 ϕ_1 为定值时,改变芯轴迎角 ϕ_2 将会对 VRD_2 起到更大的作用。

图5为螺纹升角 ϕ_1 、螺纹长度 L 及芯轴迎角 ϕ_2

图 4 φ_1 、 L 及 φ_2 对 VRD_2 的影响(a) φ_1 与 L 的交互关系 (b) φ_2 与 L 的交互关系 (c) φ_1 与 φ_2 的交互关系Fig. 4 Influences of φ_1 , L and φ_2 on VRD_2 (a) Interaction relationship between φ_1 and L (b) Interaction relationship between φ_2 and L (c) Interaction relationship between φ_1 and φ_2

对内螺纹管最大成形载荷 F 的影响。图 5a 为 φ_2 为 95° 时, L 与 φ_1 对成形最大载荷的交互影响作用的响应曲面图。 L 和 φ_1 增大均会引起 F 的增大, 这是因为螺纹长度增加将会使坯料与其接触面积增大, 使得成形载荷增加, 螺纹升角的增加将会使坯料的扭矩增加, 导致了挤压成形载荷增加。图 5b 显示, 当 φ_1 为定值时, 设计变量在一定范围内时, F 值将会随着 φ_2 的减小和 L 的增大而增大。图 5c 显示, 当 L 为定值时, 设计变量在一定范围内时, F 值将会随 φ_2 的减小和 φ_1 的增大而增大。但对比两者来看, 当 φ_1 为定值时, L 的增大将会对最大成形载荷 F 值的影响最大。从整体来看, 当设计变量的取值在一定范围内时, 增大内螺纹管芯轴的螺纹长度以及增加螺纹升角, 均将导致金属流动阻力大幅增加。在一定范围内适当调整芯轴迎角的大小将不会引起挤压成形载荷的大幅上升。

对内螺纹管芯轴的结构参数进行优化, 需对本试验所需要调整的结构参数范围及试验所需要优化的 3 个响应值的愿望目标进行选择, 如表 3 所示。

3 基于粒子群算法优化

对上文由 BBD 试验构建的关于 VRD_1 、 VRD_2 以及 F 值的多元回归关系, 基于粒子群算法^[11]的优点, 采用粒子群算法求解模具最优结构。根据前文对模拟结果的分析以及多响应变异数的分析说明了多元回归关系的可靠性强, 可用其构建粒子群算法的目标函数。根据响应面的分析, 最优解应为 VRD_1 、 VRD_2 以及 F 值目标函数最小值所对应的内螺纹管芯轴的螺纹长度 L 、螺纹升角 φ_1 以及芯轴迎角 φ_2 。采用理想点法^[12-13]将多目标优化问题进行归一化, 以便能够快速、准确地得到优化结果, 建立

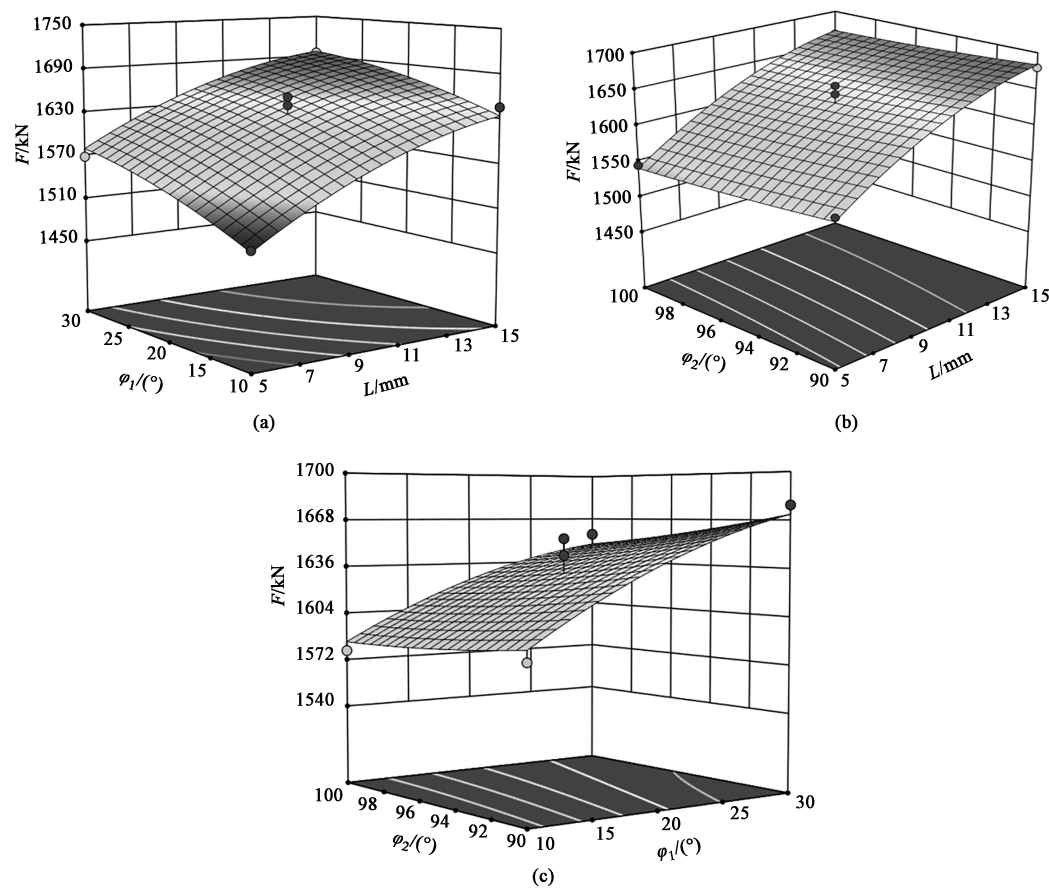


图 5 φ_1 、 L 及 φ_2 对最大成形载荷 F 的影响
(a) φ_1 与 L 的交互关系 (b) φ_2 与 L 的交互关系 (c) φ_1 与 φ_2 的交互关系

Fig. 5 Influences of φ_1 , L and φ_2 on maximum forming load F

(a) Interaction relationship between φ_1 and L (b) Interaction relationship between φ_2 and L (c) Interaction relationship between φ_1 and φ_2

表 3 结构参数及愿望目标

Table 3 Structural parameters and desire goals

参数	L / mm	φ_1 / ($^{\circ}$)	φ_2 / ($^{\circ}$)	VRD_1	VRD_2	F
范围或目标	5~10	10~30	90~100	最小值	最小值	最小值

最优目标函数，其表达式如式 (6) 所示：

$$\min U(x) = \left(\sum_{j=1}^m \lambda_j |f_j(x) - f_j^*|^m \right)^{\frac{1}{m}} \quad (6)$$

式中： x 为优化变量，分别为螺纹长度 L 、螺纹升角 φ_1 以及芯轴迎角 φ_2 ； λ_j 为优化变量的特征值； $f_j(x)$ 为目标函数，即 VRD_1 、 VRD_2 以及 F ； f_j^* 为理想函数，分别为 BBD 试验中 VRD_1 值、 VRD_2 值以及 F 值的最小值； $j=1, 2, 3, \dots, m$ ； m 为决策目标数，本文取为 3。

将式 (6) 与式 (5)、式 (4) 以及式 (3) 采用理想点法进行拟合，并编写程序代码，如图 6 所示。

```
n=3;
L=x(1);
phi1=x(2);
phi2=x(3);
% VRD1=0.0092-0.0032*L-0.0028*phi1-0.0011*phi2...
% +0.0011*L*phi1+0.0012*L*phi2+0.0001*phi1*phi2...
% +0.0007*L^2+0.0002*phi1^2 -0.0006*phi2^2;
% VRD2=0.0096-0.0031*L-0.0027*phi1-0.001*phi2...
% +0.0012*L*phi1+0.0016*L*phi2+0.0002*phi1*phi2...
% +0.0001*L^2+0.0004*phi1^2 -0.0001*phi2^2;
% F=1630.13-40.18*L-43.52*phi1-17.38*phi2+20.28*L*phi1...
% -5.71*L*phi2-5.71*phi1*phi2+3.6*L^2-1.24*phi1^2-4.37*phi2^2;
% E=(abs(VRD1-0.0056))^n+(abs(VRD2-0.0065))^n+(abs(F-1650))^n;
%
% out=E.^(1/n);
```

图 6 程序代码
Fig. 6 Program code

将上述优化问题视为粒子搜索空间，计算每个粒子的函数目标值最优位置和种群最优位置，并连

续跟踪、更新最优位置,通过不断迭代达到全局最优。将其追踪速度与位置分别用式(7)与式(8)表示:

$$v_k(t+1) = \tau v_k(t) + c_1 r_1 [p_q - x_k(t)] + c_2 r_2 [p_h - x_k(t)] \quad (7)$$

$$x_k(t+1) = x_k(t) + v_k(t+1) \quad (8)$$

式中: t 为当前步数; p_q 为个体极值; p_h 为全局极值; $v_k(t+1)$ 为粒子更新的速度; $v_k(t)$ 为粒子现在的速度; $x_k(t)$ 为粒子现在所在的位置; $x_k(t+1)$ 为粒子更新后的位置; r_1 和 r_2 为 0 到 1 之间的随机数; c_1 和 c_2 为学习因子,能够平衡局部与全局的搜索速度,通常取值为 2; τ 为惯性权重,可增加全区域的搜索能力,取为 0.729。初始的粒子数设定为 50,最大迭代次数为 100。

图 7 为进化数与适应度的关系图,当程序进化数为 20 时,曲线的适应度值收敛,即得到函数最优解。将粒子群算法得到的优化结果进行取整后得到内螺纹管芯轴的最优结构,即螺纹长度 $L = 11 \text{ mm}$ 、螺纹升角 $\varphi_1 = 30^\circ$ 以及芯轴迎角 $\varphi_2 = 96^\circ$ 。

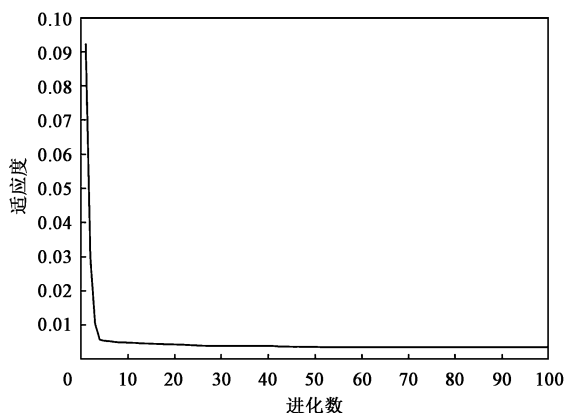


图 7 进化数与适应度的关系

Fig. 7 Relationship between evolution number and fitness

依据优化结果建立内螺纹管芯轴的三维模型,如图 8 所示,并与其他模具结构进行装配,导入有限元仿真软件 Deform-3D 中,进行数值模拟(图 9,其中 $-Z$ 为挤压方向)。粒子群算法得到的最佳模具结构参数所对应的预测结果与模拟结果的对比如表 4 所示。从表 4 可以看出,螺纹管料头齿部的相对速度差值 VRD_1 与螺纹管出口管壁相对速度差值 VRD_2 的预测值和模拟值的偏差分别为 2.35% 和 1.90%。螺纹管成形的最大载荷 F 的预测值和模拟值相差 1.81%,预测值和数值模拟得到的试验值的符合程度较高。

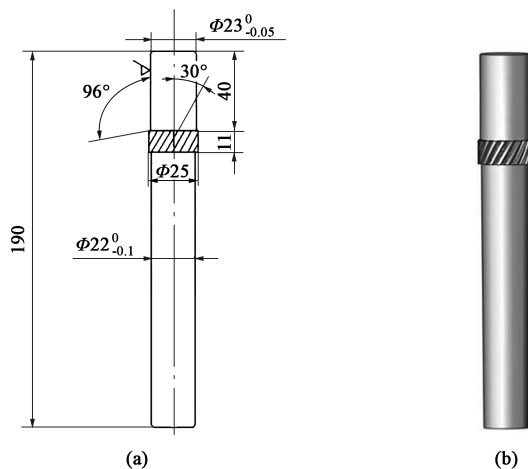


图 8 内螺纹管芯轴的结构图(a)与三维模型(b)

Fig. 8 Structure diagram (a) and three-dimensional model (b) of internal thread pipe mandrel

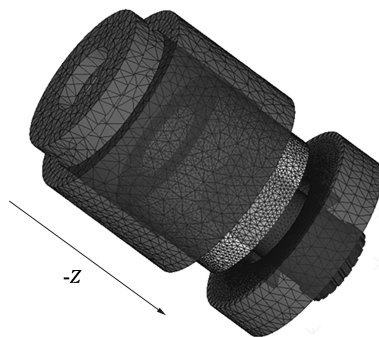


图 9 挤压模拟视图

Fig. 9 Extrusion simulation view

表 4 模拟结果与预测结果

Table 4 Simulation and prediction results

结果	$VRD_1 /$ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	$VRD_2 /$ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	F / kN
模拟结果	0.00523	0.00623	1667.13
预测结果	0.00511	0.00635	1637.58
偏差/%	2.35	1.90	1.81

如图 10a 所示,初始方案中螺纹管出口截面的流速均匀性较差,其中,管壁和螺纹管料头齿部的流速差较大,且螺纹管料头齿部与管壁的流速相对不均匀,流速的最小值为 $3.65 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,而最大值达到 $4.38 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 10b 所示的优化方案中,螺纹管出口截面的流速均匀性较好,螺纹管截面上管壁流速的最大值为 $4.12 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 及螺纹管料头齿部的流速最小值为 $3.86 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,整体流速得到了平衡,且齿之间的流速差别很小。由图 11a 与表 5 可

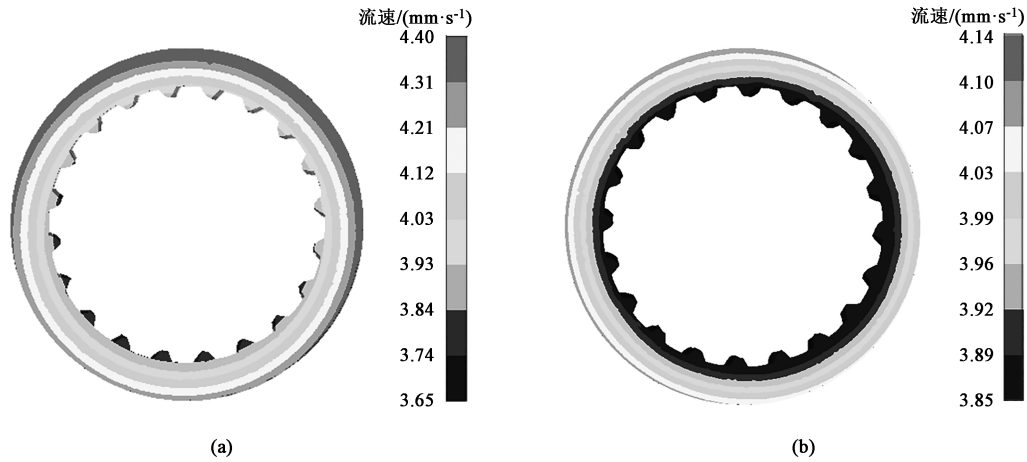


图 10 初始方案 (a) 与优化方案 (b) 的截面流速场的模拟结果对比

Fig. 10 Comparison of simulation results for cross-sectional flow velocity field between initial scheme (a) and optimized scheme (b)

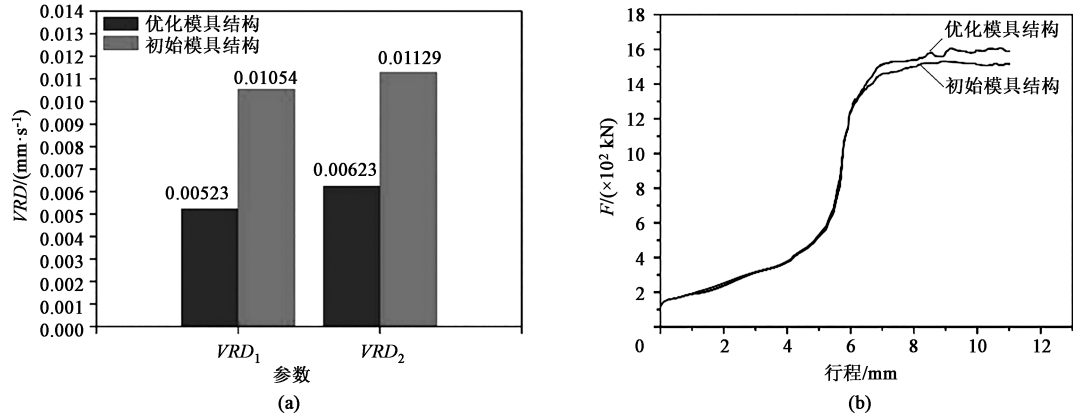


图 11 优化模具结构与初始模具结构的模拟结果对比

(a) VRD 值 (b) F 值

Fig. 11 Comparison of simulation results for optimized die structure and initial die structure

(a) VRD value (b) F value

表 5 优化模具结构与初始模具结构的模拟结果对比
Table 5 Comparison of simulation results between optimized die structure and initial die structure

结果	$VRD_1/(mm \cdot s^{-1})$	$VRD_2/(mm \cdot s^{-1})$	F/kN
优化模具结构	0.00523	0.00623	1667.13
初始模具结构	0.01054	0.01128	1585.31
偏差/%	50.38	44.81	5.10

知，其 VRD 值与初始螺纹管芯轴结构的设计方案相比，螺纹管料头齿部的 VRD₁ 值减小了 50.38%，管壁的 VRD₂ 减小了 44.81%，这说明模具得到了优化。如图 11b 所示，优化后模具的挤压成形载荷将增大至 1667.13 kN，与初始芯轴结构的挤压成形载荷 1585.23 kN 相比，增加了 5.1%，这不会影响对挤压设备的选型以及引起模具超负荷工作。

4 试验验证

将优化后的内螺纹管芯轴进行钛合金内螺纹管的挤压试验，挤压钛合金螺纹管件如图 12 所示。螺纹管壁未发生弯曲变形，螺纹管内齿充填完整，未出现断齿或者螺纹管壁与螺纹齿流速不一致的缺陷，其中内齿螺纹升角为 19.8°，与设计理想值 (20°)

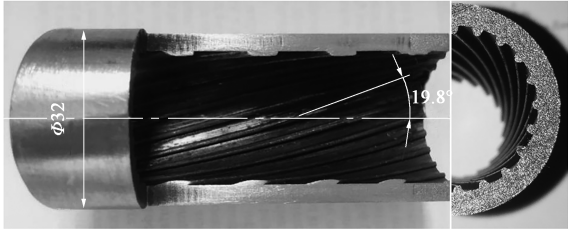
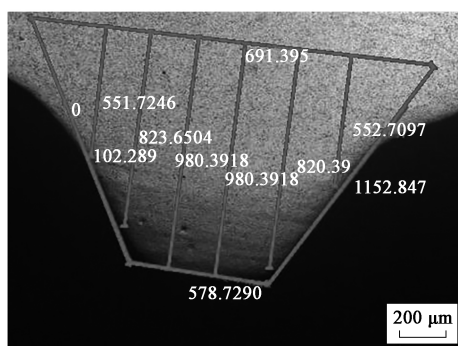
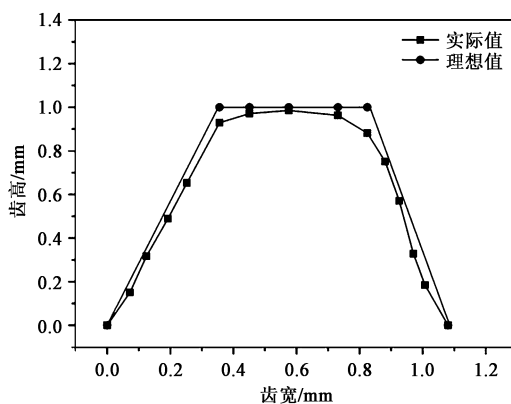


图 12 钛合金内螺纹管

Fig. 12 Titanium alloy internal thread pipe



(a)



(b)

图 13 螺纹齿的实际尺寸 (a) 与理想尺寸 (b) 对比

Fig. 13 Comparison of actual sizes (a) and ideal sizes (b) for thread teeth

相差不大。对齿部的测量结果如图 13 所示, 其中图 13a 中的数字为实际挤压成形后齿部的尺寸, 发现采用优化的芯轴结构的内螺纹管齿部充填饱满, 实际齿高接近理想值 (1 mm), 尺寸为 0.98 mm, 这说明优化后的内螺纹管芯轴使得螺纹管壁轴向的流速减慢, 且平衡了螺纹齿间的流速, 使得内螺纹管的齿部及管壁的流速更加均匀, 这将有利于螺纹齿的充填。

5 结论

(1) 采用响应面设计方法建立内螺纹管挤压成形过程中成形参数与主要评价指标之间的响应面模型, 得到拟合函数。采用粒子群优化算法对拟合函数求最优解, 优化后的芯轴结构参数为: 螺纹长度 $L=11$ mm, 螺纹升角 $\varphi_1=30^\circ$ 以及芯轴迎角 $\varphi_2=96^\circ$, VRD_1 与 VRD_2 的预测值和模拟值的偏差分别为 2.35% 和 1.90%, F 的预测值和模拟值相差 1.81%, 其 VRD 值与初始螺纹管芯轴结构设计方案相比, VRD_1 减小了 50.38%, VRD_2 减小了 44.81%,

(2) 采用优化后的芯轴进行挤压试验, 得到质量合格的 TA1 钛合金内螺纹管, 内齿螺纹升角为 19.8° , 内螺纹管齿部充填饱满, 齿高接近理想值尺寸, 为 0.98 mm。这说明了采用响应面法对模具进行多目标优化是可行的, 具有使用价值。

参考文献:

- [1] Searle M, Black J, Straub D, et al. Heat transfer coefficients of additively manufactured tubes with internal pin fins for supercritical carbon dioxide cycle recuperators [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 181: 116030.
- [2] Lin S S, Zhao H Y, Zhu L P, et al. Seawater desalination technology and engineering in China: A review [J]. Desalination, 2021, 498: 114728.
- [3] Wake H, Takahashi H, Takimoto T, et al. Development of an electrochemical antifouling system for seawater cooling pipelines of power plants using titanium [J]. Biotechnology and Bioengineering-

ing, 2010, 95 (3): 468-473.

- [4] 熊从贵, 林通, 王昕光, 等. 船用冷凝器换热管的失效分析 [J]. 机电工程, 2014, 31 (6): 753-756.
Xiong C G, Lin T, Wang X G, et al. Failure analysis of heat exchange tubes for marine condensers [J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2014, 31 (6): 753-756.
- [5] Zhou B H, Zhai Z Q. Failure probabilistic analysis of steam generator heat-transfer tubing with pitting corrosion [J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18 (5): 1333-1340.
- [6] Gong Y, Yang C, Yao C, et al. Acidic/caustic alternating corrosion on carbon steel pipes in heat exchanger of ethylene plant [J]. Materials and Corrosion, 2011, 62 (10): 967-978.
- [7] Kuboki T, Ishikawa M, Kajikawa S, et al. An extrusion method of tube with spiral inner fins by utilizing generation of spiral outer fins/grooves [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2018, 67 (1): 305-308.
- [8] 黄东男, 申浩辰, 杜赵新, 等. 一种内螺纹管的挤压设备及加工方法 [P]. 中国: CN111036809A, 2020-04-21.
Huang D N, Shen H C, Du Z X, et al. An extrusion equipment and processing method for an internally threaded pipe [P]. China: CN111036809A, 2020-04-21.
- [9] 王勇, 张鹏, 张晔, 等. 基于响应面法的花键套振动冷挤压参数多目标优化 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (4): 7-13.
Wang Y, Zhang P, Zhang Y, et al. Multi-objective optimization of vibration cold extrusion parameters of spline bushes based on response surface method [J]. Chinese Journal of Plastic Engineering, 2022, 29 (4): 7-13.
- [10] 方华. 基于粒子群算法的等温挤压能耗优化 [D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
Fang H. Energy Consumption Optimization of Isothermal Extrusion Based on Particle Swarm Optimization [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.
- [11] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [A]. In: 95th International Conference on Neural Networks [C]. IEEE, 1995.
- [12] JM Sánchez-Lozano, ON Rodríguez. Application of fuzzy reference ideal method (FRIM) to the military advanced training aircraft selection [J]. Applied Soft Computing, 2020, 88: 106061.
- [13] Chen X, Huang J, Yi M. Development cost prediction of general aviation aircraft using combined estimation technique [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34 (4): 32-41.