

基于 Taguchi 方法和 PSO 算法的强力旋压参数分析与优化

王全景, 汤爱君, 赵文波

(山东建筑大学 机电工程学院, 山东 济南 250101)

摘要: 以强力旋压工艺加工的筒形件为研究对象, 首先, 利用 Taguchi 方法分析了旋轮成形角、减薄率、进给率、主轴转速和旋轮圆角半径对三向旋压力的影响, 得到以下结果: 对轴向旋压力的影响程度的大小顺序为主轴转速>旋轮成形角>进给率>旋轮圆角半径>减薄率; 对径向旋压力的影响程度的大小顺序为主轴转速>进给率>旋轮成形角>减薄率>旋轮圆角半径; 对切向旋压力的影响程度的大小顺序为主轴转速>旋轮成形角>进给率>减薄率>旋轮圆角半径。然后, 以壁厚差作为优化目标, 利用 PSO 算法对主轴转速、旋轮成形角和进给率的参数值进行优化, 获得了较优的参数值组合, 并与旋压试验结果进行对比, 结果表明, 所提方法能够有效地提高利用强力旋压工艺加工筒形件的精度。

关键词: 强力旋压; 筒形件; Taguchi 方法; PSO 算法; 三向旋压力; 壁厚差

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.04.020

中图分类号: TG376

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 04-0150-06

Analysis and optimization on power spinning parameters based on Taguchi method and PSO algorithm

Wang Quanjing, Tang Aijun, Zhao Wenbo

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China)

Abstract: For the cylinder formed by power spinning process, firstly, the influences of forming angle of spin wheel, thinning rate, feeding rate, fillet radius of spin wheel and spindle speed on three-axis spinning forces were analyzed by Taguchi method. The obtained results show that the order of the influence degree on the axial spinning force is spindle speed>forming angle of spin wheel>feeding rate>fillet radius of spin wheel>thinning rate, the order of the influence degree on the radial spinning force is spindle speed>feeding rate>forming angle of spin wheel>thinning rate>fillet radius of spin wheel, and the order of the influence degree on the tangential spinning force is spindle speed>forming angle of spin wheel>feeding rate>thinning rate>fillet radius of spin wheel. Then, taking wall thickness difference as the optimization target, the parameter values of spindle speed, forming angle of spin wheel and feeding rate were optimized by PSO algorithm to obtain the better combination of parameter values. Compared with the spinning test results, it shows that the proposed method can effectively improve the accuracy of cylinder formed by the power spinning process.

Key words: power spinning; cylinder; Taguchi method; PSO algorithm; three-axis spinning forces; wall thickness difference

强力旋压工艺能够加工得到高精度的薄壁筒形件, 还具有少切削、产品力学性能好等优点, 因此被广泛应用于筒形件的加工当中。筒形件的成形质量不仅受筒形件毛坯质量和尺寸的影响, 同时也与强力旋压工艺参数选取直接相关, 因此, 若强力旋压工艺参数选取不当, 可能导致其精度下降。故而非常有必要对强力旋压参数的选取进行优化, 从而提高筒形件的加工质量^[1-7]。孙新东等^[8]以主轴转

速、进给率和旋轮成形角为试验因素, 以三向旋压力和壁厚差为评价指标, 利用 Taguchi 方法进行了优化分析, 给出了上述 3 种因素对三向旋压力和壁厚差的影响程度的大小顺序和较优的参数组合; 李众等^[9]将布氏硬度和屈服强度等作为优化指标, 利用 Taguchi 方法对芯模与旋轮间距、热处理温度和进给率 3 个工艺参数的水平组合进行优化分析。虽然 Taguchi 方法能够比较便捷地给出多参数因素的影响程度的大小顺序和较优的参数值组合, 但参数组合的范围局限于正交试验表中的参数水平, 樊文欣等^[10]以旋轮圆角半径和进给率这两个强力旋压参数作为研究对象, 将扩径量与壁厚差作为优化目标, 利用遗传算法获得优化的工艺参数值, 可见智能优

收稿日期: 2021-01-11; 修订日期: 2021-04-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (51105233)

作者简介: 王全景 (1979-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: wqj338@163.com

化算法可以应用于强力旋压工艺参数优化的研究中，但遗传算法存在搜索速度较慢、算法结果受中间参数（交叉率、变异率等）影响较大等缺点。本文以旋轮成形角、旋轮圆角半径、减薄率、进给率和主轴转速这 5 个强力旋压工艺参数为试验因素，以三向旋压力为评价指标，利用 Taguchi 方法得到上述 5 个参数对三向旋压力的影响程度的大小顺序；并进一步利用粒子群优化算法（Particle Swarm Optimization Algorithm, PSOA），以壁厚差作为优化目标，对主轴转速、旋轮成形角和进给率 3 个主要参数进行优化，得到较优的参数值组合，并与旋压试验结果进行对比，验证了本文算法的有效性。

1 基于 Taguchi 方法的强力旋压参数分析

本文所研究的筒形件的材质为锡青铜合金（QSn7-0.2），它具有强度高、弹性和耐磨性好、易焊接和纤焊、耐蚀性强和可加工性好的优点。在本文强力旋压试验中，筒形件毛坯的规格参数为：内径尺寸为 $\Phi 42\text{ mm}$ 、外径尺寸为 $\Phi 50\text{ mm}$ 、尺寸公差为 IT14（0.62 mm）；对筒形件毛坯要求表面光洁，没有污垢和鳞皮，以免弄脏润滑剂和损伤制件；毛坯表面没有裂纹、毛刺、斑痕和加工印记等缺陷；毛坯内部不得有裂纹、夹杂、疏松和隔层等问题。

1.1 参数选取

强力旋压技术是目前筒形件加工的主流工艺。影响强力旋压成形的因素包括以下两个方面：旋轮几何参数和旋压工艺参数。旋轮几何参数主要分为旋轮成形角、旋轮圆角半径等；旋压工艺参数则包括减薄率、进给率、主轴转速、旋压方式、旋轮运动轨迹、坯料和芯模的间隙以及旋压道次（在本文研究中，旋压道次取为 1 道次）等，其中减薄率、进给率和主轴转速对强力旋压成形的质量有较大的影响^[1,2,4,7]，需要着重考虑。本文将对旋轮成形角、旋轮圆角半径、减薄率、进给率和主轴转速这 5 项参数对强力旋压成形的影响进行分析，每个参数选取 4 个水平，参数水平的具体选取情况如表 1 所示。

以旋轮的三向旋压力（轴向旋压力、径向旋压力和切向旋压力）和壁厚差作为筒形件质量的评价指标。强力旋压工艺中一般有 3 个旋轮，由于安装位置的旋转对称性，每个旋轮承受的旋压力基本一致，因此，在此只以一个旋轮所承受的三向旋压力作为评价指标。壁厚差的具体测量方法的描述如下：

表 1 影响强力旋压成形的因素水平设置

Table 1 Setting of factors and levels influencing power spinning forming

水平	参数				
	旋轮成形角 $\alpha/(\circ)$	旋轮圆角半径 ρ/mm	减薄率 $\varphi/\%$	进给率 $F/(\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$	主轴转速 $S/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$
1	20	6	25	0.10	350
2	25	9	30	0.25	450
3	30	12	35	0.40	550
4	35	15	40	0.55	650

从筒形件侧面等距选取 4 个位置（选取筒形件上距底部 1/4 高度、1/2 高度和 3/4 高度，共 3 个位置），在每个位置的筒形件截面上选择 4 个位置测量壁厚值（测量点之间均相隔 90° ），计算每个位置上 4 个位置测得的壁厚值的均值，并用每个位置处壁厚均值的最大值减去壁厚最小值，将该差值视为壁厚差^[1,8]。

1.2 正交试验设计

根据 1.1 节中选择的影响筒形件强力旋压成形质量的 5 个参数及参数水平，设计了 $L_{16}(4^5)$ 的正交试验，如表 2 所示。

表 2 正交试验方案

Table 2 Orthogonal test schemes

编号	α	ρ	φ	F	S
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	1	3	1
11	3	3	4	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

1.3 参数选择分析

在 Taguchi 方法中，信噪比是衡量指标的重要

手段。根据不同的要求,又可以将其分为以下 3 类:望小特性的信噪比、望目特性的信噪比和望大特性的信噪比^[8-9]。

(1) 望小特性的信噪比。设筒形件的质量特性 y 服从正态分布 $y \sim N(\mu_y, \delta_y^2)$, 望小特性即希望均值 μ_y 和方差 δ_y^2 可以同时尽量地小^[8-9]。望小特性信噪比 S/N 的定义如式 (1) 所示:

$$S/N = -10 \times \lg(\mu_y^2 + \delta_y^2) \quad (1)$$

y^2 的期望值 $(\mu_y^2 + \delta_y^2)$ 可以通过计算其无偏估计来确定, 因此可得:

$$S/N = -10 \times \lg\left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_k^2\right) \quad (2)$$

式中: y_k 为第 k 个筒形件的质量, 其中 $k=1, 2, \dots, N$; N 为筒形件的数量。

(2) 望目特性的信噪比。假设筒形件的质量特性 y 服从正态分布 $y \sim N(\mu_y, \delta_y^2)$, 望目特性希望 $\mu_y = y_0$ (y_0 是一个常值), 且 δ_y^2 可以尽量小。定义此时 μ_y^2 为信号、 δ_y^2 为噪声, 那么望目特性信噪比 η ^[8] 的计算公式如式 (3) 所示:

$$\eta = \mu_y^2 / \delta_y^2 \quad (3)$$

根据式 (3) 可知, 若噪声越小, 则 η 越大, 筒形件的质量也就越好。在实际计算中, 式 (3) 可以进一步用式 (4) 来计算。

$$S/N = 10 \times \lg\left(\frac{\mu_y^2}{\delta_y^2}\right) \quad (4)$$

(3) 望大特性的信噪比。望大特性是希望筒形件质量特性的实际值越大越好。假设筒形件质量特性 y 服从正态分布 $y \sim N(\mu_y, \delta_y^2)$, 那么应根据式 (5) 计算望大特性的期望值 E :

$$E = K \left[\frac{1}{\mu_y^2} \left(1 + 3 \frac{\delta_y^2}{\mu_y^2} \right) \right] \quad (5)$$

式中: K 为产品质量损失。

其中, $\frac{1}{\mu_y^2} \left(1 + 3 \frac{\delta_y^2}{\mu_y^2} \right)$ 的无偏估计值为 $\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{1}{y_k^2}$ 。

因此, 望大特性信噪比 S/N ^[1] 的计算公式如式 (6) 所示:

$$S/N = 10 \times \lg\left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{1}{y_k^2}\right) \quad (6)$$

在强力旋压过程中, 期望旋轮所受的三向最大旋压力越小越好, 所消耗的功率越小, 也不易发生振动等现象。故选用望小特性的信噪比来衡量旋轮所承受的三向旋压力。

根据表 2 中的正交试验方案, 逐一进行建模和

数值仿真, 统计得到不同参数组合下的三向旋压力, 并利用极差分析法对正交试验结果进行分析, 其目的是分析各参数对强力旋压成形效果的影响程度。极差 R 的计算公式如式 (7) 所示:

$$R = \max\{R_1, R_2, R_3, R_4\} - \min\{R_1, R_2, R_3, R_4\} \quad (7)$$

式中: R_j 为参数在 $j(j=1, 2, 3, 4)$ 水平下的平均值。

根据式 (7) 可以衡量各个参数对强力旋压成形产生影响的程度顺序, 得到表 3~表 5 所示的极差计算结果, 从而进一步得到三向旋压力的信噪比在不同参数和不同水平下的变化情况, 如图 1~图 3 所示。通过对各个参数极差值的大小顺序进行分析, 极差越大说明该参数对试验结果的影响越大, 该参数的重要性越大, 根据上述原则可以确定参数重要性的排序。根据表 3~表 5 和图 1~图 3 的试验结果可以得出: (1) 各参数对最大轴向旋压力的影响程度的大小排序为: $S > \alpha > F > \rho > \varphi$; (2) 各参数对最大径向旋压力的影响程度的大小排序为: $S > F > \alpha > \varphi > \rho$; (3) 各参数对最大切向旋压力的影响程度的大小排序为: $S > \alpha > F > \varphi > \rho$ 。根据图 1~图 3 可知, 当上述 5 个工艺参数为水平 1 时, 三向旋压力的信噪比最大, 即 $\alpha = 20^\circ$, $\rho = 6 \text{ mm}$, $\varphi = 25\%$, $F = 0.1 \text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$, $S = 350 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

表 3 最大轴向旋压力的极差计算结果 (N)

Table 3 Range calculation results of the maximum axial spinning force (N)

参数	α	ρ	φ	F	S
R_1	447.00	708.25	608.50	501.25	368.25
R_2	569.50	586.50	575.25	558.25	532.75
R_3	628.25	666.50	516.00	616.50	748.75
R_4	706.50	732.75	568.00	668.50	986.00
R	259.50	146.25	92.50	167.25	617.75
水平	2	4	5	3	1

表 4 最大径向旋压力的极差计算结果 (N)

Table 4 Range calculation results of the maximum radial spinning force (N)

参数	α	ρ	φ	F	S
R_1	1801.25	1808.50	1837.00	1608.25	1159.00
R_2	1758.25	1725.25	1769.50	1801.50	1532.75
R_3	1616.50	1656.00	1678.25	1866.50	2348.75
R_4	1788.50	1768.00	1736.25	1983.00	3086.25
R	184.75	152.50	158.75	374.50	1927.25
水平	3	4	5	2	1

表5 最大切向旋压力的极差计算结果 (N)

Table 5 Range calculation results of the maximum tangential spinning force (N)

参数	α	ρ	φ	F	S
R_1	17.50	19.50	18.75	19.25	18.00
R_2	22.25	20.25	32.25	26.50	20.50
R_3	29.50	25.50	27.00	34.50	31.75
R_4	36.50	32.50	20.25	23.00	44.25
R	19.00	13.00	13.50	15.25	26.25
水平	2	5	4	3	1

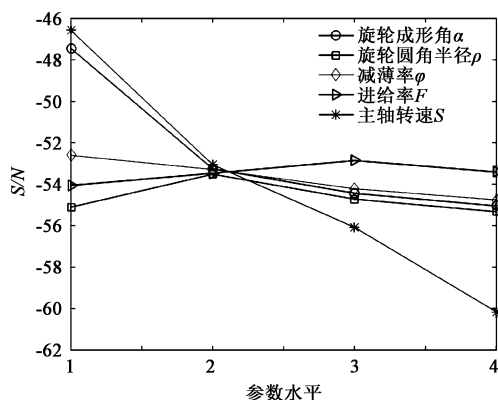


图1 最大轴向旋压力信噪比的变化情况

Fig. 1 Changing conditions for S/N of the maximum axial spinning force

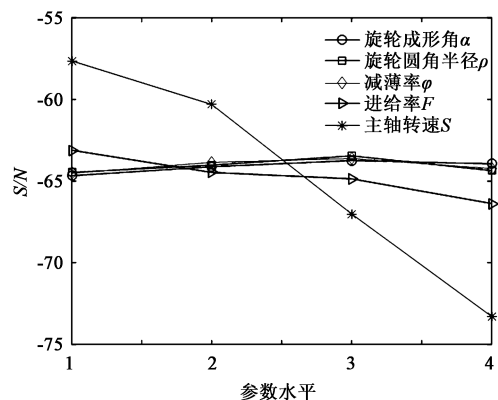


图2 最大径向旋压力信噪比的变化情况

Fig. 2 Changing conditions for S/N of the maximum radial spinning force

2 基于 PSO 算法的参数优化

根据以上对强力旋压参数的分析, 本文进一步对主轴转速 S 、旋轮成形角 α 和进给率 F 这 3 个影响较大的主要工艺参数进行选取, 并利用粒子群算法进行优化。

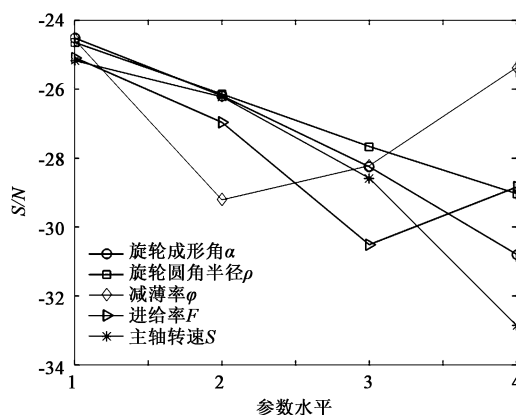


图3 最大切向旋压力信噪比的变化情况

Fig. 3 Changing conditions for S/N of the maximum tangential spinning force

2.1 PSO 算法的基本原理

粒子群算法是计算智能领域内, 除蚁群算法外的另外一种群智能算法。粒子群算法是受到鸟群捕食行为启发的仿生学算法, 其基本思想为: 假设区域内仅有一块食物, 一群鸟在该区域内随机地搜寻食物, 则搜寻目前离食物最近的鸟的周围区域是找到食物最简单、有效的策略^[11-14]。

采用粒子群算法对优化问题求解时, 一只鸟的位置相当于优化问题的一个解, 这些鸟被称为“粒子”, 或者被称为“主体”。每一个粒子有其各自的速度和位置 (决定其飞行方向和距离), 此外, 还有一个取决于被优化函数的适应度值。各个粒子能够记忆和追踪当前最优的粒子。每次的迭代过程并不完全是随机过程, 若得到更好解, 就以此作为依据寻找下一个解。粒子群算法的通用性很强, 且不需要问题的特殊信息, 因而, 粒子群算法的应用很广泛, 例如, 训练人工神经网络、解决多目标优化等问题。

设在一个 n 维的搜索空间中, 由 m 个粒子组成种群 $X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_m\}$, 其中第 i 个粒子的位置为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T$, 其速度为 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})^T$ 。当前代数下, 不妨设单个粒子的参数值 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})^T$ 、粒子群的全局优化参数值 $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gn})^T$ 。根据粒子群算法追随当前最优粒子的原则, 第 i 个粒子的状态参数的更新公式如式 (8) 和式 (9) 所示。

$$v_{id}^{(t+1)} = v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd}^t - x_{id}^t) \quad (8)$$

$$x_{id}^{(t+1)} = x_{id}^t + v_{id}^{(t+1)} \quad (9)$$

式中: d 为粒子的当前状态, $d = 1, 2, \dots, n$; t 为粒子当前迭代的次数; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 区间上

的随机数 (服从均匀分布); c_1 、 c_2 为常数, 表示加速度。

此外, 粒子的速度不可能无限大或者无限小, 故将粒子的速度设定在 $[-V_{\max}, V_{\max}]$ 区间内; v_{id}^t 为粒子的“旧”速度; $c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t)$ 为该粒子自身对下一次迭代速度的预测; $c_2 r_2 (p_{gd}^t - x_{id}^t)$ 为该粒子与其他粒子之间“沟通”之后对下一次迭代速度的预测, 这是粒子社会属性的体现^[11]。

基于 PSO 算法对主轴转速 S 、进给率 F 和旋轮成形角 α 这 3 个强力旋压工艺参数进行优化的主要步骤如下:

(1) 参数初始化。将上述 3 个工艺参数看作粒子位置参数, 这 3 项参数的取值范围可以根据实际情况确定, 那么在参数取值范围内, 随机给出每个粒子的初始位置, 比如, 粒子 q_i 的初始位置为 $\{S_i^0, \alpha_i^0, F_i^0\}^T$, 粒子 q_i 的初始速度 $\{v_1^0, v_2^0, v_3^0\}^T$ 随机产生, 组成位移变化矩阵 $V^t(t=0)$ 。初始种群 Q^0 可以表示为:

$$Q^0 = \{q_1^0, \dots, q_i^0, \dots, q_m^0\} \quad (10)$$

(2) 计算适应度函数。适应度函数实际上即为目标优化函数, 这里的优化目标是希望筒形件的壁厚差尽可能小, 因此, 适应度函数 G 可以用式 (11) 表示:

$$G(S, \alpha, F) = f(S, \alpha, F) \quad (11)$$

式中: $f(S, \alpha, F)$ 为壁厚差与上述 3 个强力旋压工艺参数之间的函数 (本文基于 BP 神经网络算法求解所得)。

(3) 粒子评价与更新。根据粒子当前的状态参数, 计算出在当前迭代次数下该粒子的适应度函数值。将当前的适应度函数值与该粒子之前的最优值进行比较, 如果适应度函数值小于该粒子之前的最优结果, 则用该粒子当前的适应度函数值代替之前的最优结果, 成为该粒子新的自身最优值, 否则该粒子的自身最优值仍为之前的最优值; 将该适应度函数值与粒子种群的全局最优值进行比较, 如果粒子的适应度函数值小于粒子群的全局最优值, 那么该粒子当前的适应度函数成为粒子群新的全局最优值, 否则粒子群仍保持原来的全局最优值。粒子状态的更新基于式 (8) 和式 (9) 来完成, 从而进行种群下一次的迭代。

(4) 判断算法终止条件。粒子群算法终止条件有两个, 满足其中任意一个则粒子群算法终止。这两个条件为: 达到粒子群算法的最大迭代次数 T_{\max} ; 适应度函数值稳定地小于事先所设定的精度阈值。

2.2 算法试验结果

本文中粒子数量设置为 16, 将表 2 中的试验数据作为初始种群的初始值, 最大迭代次数设置为 200 次, 适应度函数的给定精度设置为 0.05。利用 PSO 算法对上述 3 个强力旋压工艺参数进行优化, 经迭代后得到优化结果 (仅展示最优解及邻近的迭代值), 如表 6 所示。表 6 中第 5 组数据是本算法得到的最优参数值组合。

表 6 部分优化参数解集

Table 6 Partial optimized parameter set

序号	进给率 $F/$ (mm · s ⁻¹)	旋轮成形角 $\alpha/(^\circ)$	主轴转速 $S/(r \cdot \min^{-1})$	壁厚差/ mm
1	0.792	22.39	362.57	0.072
2	0.808	21.47	367.25	0.064
3	0.795	22.12	375.14	0.061
4	0.781	21.31	364.36	0.052
5	0.763	20.62	353.86	0.043

为了检验本文所提出的利用 PSO 算法所得的优化参数组合的有效性, 利用数控旋压机 (图 4) 并基于所得的优化参数进行筒形件的强力旋压试验。表 7 展示了根据试验测量得到的壁厚差与基于 PSO 算法计算所得的壁厚差, 从上述结果可知, 强力旋压试验的结果与基于 PSO 算法所得结果的差异很小, 验证了本文所提方法的有效性。



图 4 数控强力旋压机

Fig. 4 NC power spinning machine

表 7 所提算法结果与旋压试验结果对比

Table 7 Comparison between proposed algorithm and spinning test results

方法	壁厚差/mm				
本文算法	0.072	0.064	0.061	0.052	0.043
旋压试验	0.078	0.070	0.067	0.058	0.049

3 结语

本文以强力旋压加工的筒形件为研究对象, 利用 Taguchi 方法对筒形件强力旋压工艺参数 (包括主轴转速、进给率、减薄率、旋轮成形角和旋轮圆角半径 5 个参数) 进行了初步分析, 以三向旋压力作为评价指标, 分析得到了上述 5 个工艺参数的取值对三向旋压力的影响大小排序: (1) 对最大轴向旋压力影响程度的大小排序为: 主轴转速>旋轮成形角>进给率>旋轮圆角半径>减薄率; (2) 对最大径向旋压力影响程度的大小排序为: 主轴转速>进给率>旋轮成形角>减薄率>旋轮圆角半径; (3) 对最大切向旋压力影响程度的大小排序为: 主轴转速>旋轮成形角>进给率>减薄率>旋轮圆角半径。从而可知主轴转速、进给率、旋轮成形角是 3 个影响旋压力大小的主要工艺参数。从筒形件壁厚差这一评价指标考虑, 提出利用 PSO 算法对主轴转速、进给率、旋轮成形角这 3 个主要工艺参数进行了优化, 大大减小了壁厚差; 将本文算法得到的结果与旋压试验结果进行了对比, 结果也表明利用 PSO 算法对旋压工艺参数进行优化是可行的。

参考文献:

- [1] 陈实. 筒形件强力旋压成形关键参数对成形质量影响分析及优化 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
Chen S. The Analysis and Optimization of Key Parameters in Tube Spinning Process [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [2] 赵云豪, 李彦利. 旋压技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
Zhao Y H, Li Y L. Spinning Technology and Application [M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [3] 郭亚明, 徐恒秋, 薛秀琴, 等. 2A12 铝合金薄壁壳体强力旋压成形工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 143-150.
Guo Y M, Xu H Q, Xue X Q, et al. Power spinning process of thin-walled shell parts for 2A12 aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 143-150.
- [4] Zhao J S, Gu Y T, Feng Z G. Optimization of processing parameters of power spinning for bushing based on neural network and genetic algorithms [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2019, 28 (3): 606-616.
- [5] Kuss M, Buchmayr B. Analytical, numerical and experimental investigations of a ball spinning expansion process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 224 (5): 213-221.
- [6] 郭佩剑, 樊文欣, 李志伟, 等. 基于灰色关联度的筒形件二道次强力旋压工艺参数优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (4): 108-113.
Guo P J, Fan W X, Li Z W, et al. Optimization on two-pass power spinning process parameters for cylindrical parts based on grey correlation degree [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (4): 108-113.
- [7] 田野, 张海峰, 田维鑫. 金属强力旋压成形的数值模拟分析 [J]. 铸造技术, 2015, 36 (1): 191-194.
Tian Y, Zhang H F, Tian W X. Numerical simulation analysis of power spinning for metallic [J]. Foundry Technology, 2015, 36 (1): 191-194.
- [8] 孙新东, 刘广璞, 毛津, 等. 基于田口方法的筒形件强力旋压参数优化 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (11): 2701-2703.
Sun X D, Liu G P, Mao J, et al. Parametric optimization in tube power spinning based on taguchi method [J]. Foundry Technology, 2017, 38 (11): 2701-2703.
- [9] 李众, 樊文欣, 闫哲洋. Taguchi 方法在强力旋压参数优化中的应用 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (10): 2476-2479.
Li Z, Fan W X, Yan Z Y. Application of Taguchi method in optimization of power spinning parameters [J]. Foundry Technology, 2017, 38 (10): 2476-2479.
- [10] 樊文欣, 李众, 冯再新, 等. 基于遗传算法的强力旋压成形工艺参数优化 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (11): 2709-2712.
Fan W X, Li Z, Feng Z X, et al. Optimization of process parameters of power spinning based on genetic algorithms [J]. Foundry Technology, 2017, 38 (11): 2709-2712.
- [11] 汤可宗. 遗传算法与粒子群优化算法的改进及应用研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
Tang K Z. Modifications and Application Research on Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization Algorithm [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2011.
- [12] 董方. 粒子群算法研究及其在动态优化中的应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
Dong F. Researches on Particle Swarm Optimizer and Its Applications in Dynamic Optimization [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [13] 胡成玉. 面向动态环境的粒子群算法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
Hu C Y. On Particle Swarm Optimization in Dynamic Environments [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [14] 公茂果, 焦李成, 杨咚咚, 等. 进化多目标优化算法研究 [J]. 软件学报, 2009, 20 (2): 271-289.
Gong M G, Jiao L C, Yang D D, et al. Research on evolutionary multi-objective optimization algorithm [J]. Journal of Software, 2009, 20 (2): 271-289.