

挤压与拉拔

基于综合评分与响应曲面法超声滚挤压加工参数优化

石青松, 徐红玉, 王晓强, 田英健, 付浩然, 张旭, 卢邑彪

(河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 为综合改善轴承套圈的表面质量, 以表面粗糙度、残余应力、显微硬度为评价指标, 对 42CrMo 钢进行超声滚挤压正交试验。通过对加工参数各水平进行极差分析, 得到其对 42CrMo 钢各表层性能评价指标的影响规律; 基于熵权理论确定表面粗糙度、残余应力、显微硬度的权重, 构建轴承表层性能综合评价体系, 得出加工参数对综合表层性能的影响程度以及最优加工参数组合; 通过响应曲面优化得到最优加工参数组合, 与综合加权优化后的加工参数组合进行对比, 并通过试验验证其准确性。结果表明: 表面粗糙度、残余应力和显微硬度占综合表层性能的权重分别为: 0.525、0.334 和 0.141, 加工参数对综合表层性能的影响程度为: 转速>静压力>振幅>进给速度; 两种优化方式的对比试验结果表明, 响应曲面的优化效果较好, 其最优加工参数组合为: 转速为 $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、进给速度为 $38.8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、振幅为 $21 \mu\text{m}$ 、静压力为 539.4 N , 实现了加工参数多目标优化的全局最优。

关键词: 超声滚挤压; 表层性能; 轴承套圈; 综合评价体系; 响应曲面优化

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.02.015

中图分类号: TG376.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 02-0119-09

Optimization on ultrasonic roll extrusion processing parameters based on comprehensive scoring and response surface method

Shi Qingsong, Xu Hongyu, Wang Xiaoqiang, Tian Yingjian, Fu Haoran, Zhang Xu, Lu Yibiao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: In order to comprehensively improve the surface quality of bearing rings, taking surface roughness, residual stress and microhardness as the evaluation indicators, the orthogonal test of ultrasonic roll extrusion was conducted on 42CrMo steel, and through the range analysis of various levels of processing parameters, the influence rules of the processing parameters on the evaluation indicators of each surface performance for 42CrMo steel were obtained. Then, based on the entropy weight theory, the weights of surface roughness, residual stress and microhardness were determined, and a comprehensive evaluation system of surface performance for bearing was constructed to obtain the impact of the processing parameters on the comprehensive surface performance and the optimal combination of processing parameters. Furthermore, the optimal combination of processing parameters was obtained by response surface optimization, and compared with the combination of processing parameters after comprehensive weighting optimization, its accuracy was verified by experiments. The results show that the weights of surface roughness, residual stress and microhardness in the comprehensive surface performance are 0.525, 0.334 and 0.141, respectively, and the influence degree of processing parameters on the comprehensive surface performance is rotation speed> static pressure> amplitude > feeding speed. The comparative test verification of the two optimization methods shows that the response surface optimization effect is better, and the optimal processing parameters are the rotation speed of $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, the feeding speed of $38.8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, the amplitude of $21 \mu\text{m}$ and the static pressure of 539.4 N , and the global optimization for the multi-objective optimization of processing parameters is realized.

Key words: ultrasonic roll extrusion; surface performance; bearing ring; comprehensive evaluation system; response surface optimization

轴承作为机械领域的基础零部件, 当其长时间

处于工况复杂的环境中时, 轴承套圈的材料孔洞、磨削烧伤、环境腐蚀等是导致轴承失效的主要原因^[1]。轴承套圈的主要作用是支撑旋转体, 降低机械载荷摩擦因数, 对整个轴承或机器的服役寿命有很大影响。为了提高轴承套圈的表层性能, 使其具有较好的耐磨性能和抗疲劳强度, 采用表面强化技术改善微观组织和力学性能, 从而提高轴承套圈表面质量^[2-3]。

收稿日期: 2023-03-26; 修订日期: 2023-06-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1804145); 国家重点研发计划 (2018YEB2000405)

作者简介: 石青松 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: 2964593482@qq.com

通信作者: 徐红玉 (1972-), 男, 博士, 教授

E-mail: xuhongyu@haust.edu.cn

近年来,随着表面强化改性技术的发展和轴承套圈表面强化的研究,相较于其他表面强化技术,超声滚挤压加工作为一种新兴的无切屑近净成形技术,在传统滚挤压技术的基础上复合超声振动,可以综合改善表层性能。国内外专家和学者对超声复合加工这一领域进行了大量的研究,并取得一定的成就。Ahmad S 等^[4]通过研究加工参数对超声旋转加工切削力以及表面质量的影响,进行了单因素和多因素的正交试验,结果表明:切削深度对切削力的影响最大,切削力与进给量、切削深度呈正相关,与主轴转速、振幅呈负相关。Basem M A A 等^[5]为解决激光加工与超声旋转加工的局限,提出了激光旋转超声加工(Laser Rotary Ultrasonic Maching, LRUM)的复合工艺,其优势在于高效率、微生产、精加工等,并研究了加工参数对表面质量的影响,结果表明表面粗糙度、深度误差和宽度误差均有显著下降。尹龙等^[6]通过超声辅助磨削轴承套圈来提高其表面质量,并基于试验结果分析了加工参数对表面质量的影响,建立了表面粗糙度的预测模型,并验证了该模型的准确性。Zheng J X 等^[7]基于正交试验,研究了不同工艺参数下 45 钢轴的超声挤压,分析了各种工艺参数对轴表面粗糙度和显微硬度的影响,并与常规挤压进行相比,证明超声挤压可显著降低零件表面的粗糙度,提高表面显微硬度。王明海等^[8]通过研究超声铣削加工参数对钛合金材料表面质量的影响,进行正交试验、方差分析和响应曲面法,分析加工参数之间的交互作用对表层性能的影响。张飞等^[9]通过对 45 钢进行超声表面滚压强化处理,进行旋转弯曲疲劳试验,观察处理前后的材料表层特性和疲劳性能。Alkhalefah H^[10]根据旋转超声钻孔在氧化铝陶瓷上进行钻孔加工,通过采用四变量三水平中心组合设计试验分析了加工参数对钻孔尺寸精度的影响以及对旋转超声钻孔显著性的影响。文献[11]~文献[13]通过对风电轴承套圈进行超声滚挤压强化正交试验,建立了工艺参数与轴承套圈表层性能之间的预测模型,并验证了其准确性,通过分析工艺参数对表层性能的影响规律对预测模型做进一步优化,得到了最优加工参数。

综上所述,国内外学者对超声辅助加工进行了一定的研究,但对超声滚挤压轴承套圈加工参数优化方面的研究还较少。本文通过对 42CrMo 钢进行超声滚挤压正交试验,并对加工参数各水平进行极差分析,得到加工参数对轴承套圈各表层性能的影响;基于熵权理论确定各表层性能的权重,构建综

合评价体系,得出加工参数对综合表层性能的影响程度以及最优加工参数组合;通过响应曲面优化得到最优加工参数组合,与综合加权优化后的加工参数组合进行对比,并通过试验验证其准确性,实现了对超声滚挤压轴承套圈加工参数的合理控制,为轴承套圈表层性能优化提供了新方法。

1 超声滚挤压试验

1.1 试验原理

超声滚挤压是一种将传统滚挤压与超声振动相结合的新型加工工艺,它通过超声波发生器将交流电转化为超声频率的振动电信号,再经换能器和变幅杆将其转变为合适振幅的同频机械振动,并将其传递到滚挤压工具头。在超声振动冲击作用下,调整预紧弹簧对工件施加一定的静压力 F ,滚挤压工具头进给时能够实现纵向超声频率的振动。由于动载荷与静载荷的双重作用,工件表面会产生剧烈的塑性变形,其微观波峰、波谷被碾平,微观形貌得到改善。超声滚挤压实验的优势是提供预留残余压应力,提高材料表层的疲劳强度,形成加工硬化层,从而提高轴承套圈的强度、显微硬度以及耐磨性。

超声滚挤压加工原理示意图如图 1 所示,其中, f 为进给速度, v 为转速。

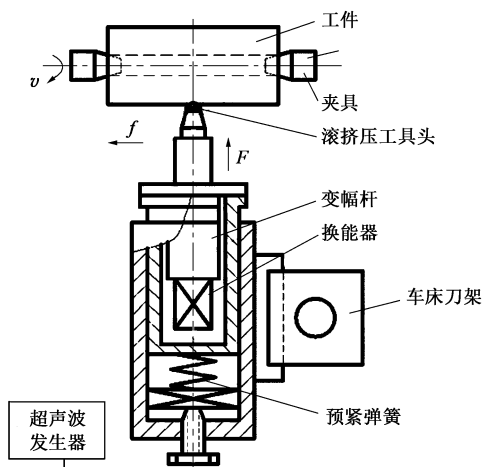


图 1 超声滚挤压加工原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of machining principle for ultrasonic rolling extrusion

1.2 试验材料及设备

超声滚挤压强化集中在轴承套圈的外表层,实际应用中加工轴承套圈外表面时需套圈内增加 1 个芯轴,与直接强化实心棒料是等效的。故本文选用淬火处理和磨削加工后的 42CrMo 钢棒料作为等效

加工对象，选取棒料长度为 350 mm，直径为 $\Phi 50$ mm，棒料的初始显微硬度为 630 HV，初始粗糙度为 $0.98\text{ }\mu\text{m}$ ，初始残余压应力为 780 MPa，棒料如图 2 所示。

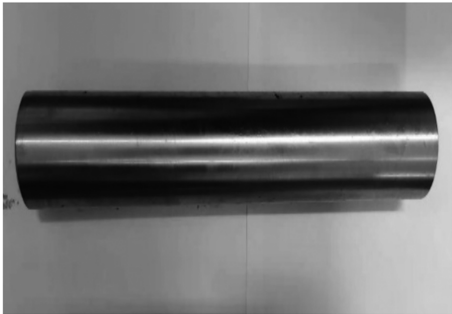
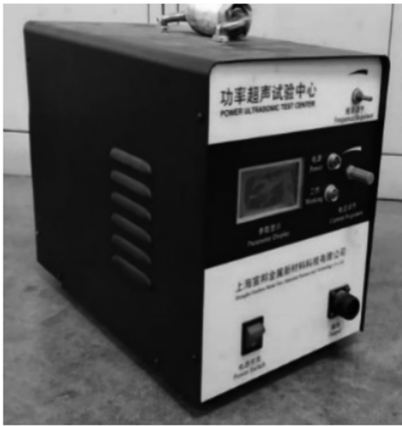


图 2 试验材料实物图
Fig. 2 Real picture of test material

超声滚挤压执行设备由超声波发生器和滚挤压冲击装置组成，如图 3 所示。超声滚挤压试验在 CKJ6142 数控车床进行，加工过程如图 4 所示。



(a)

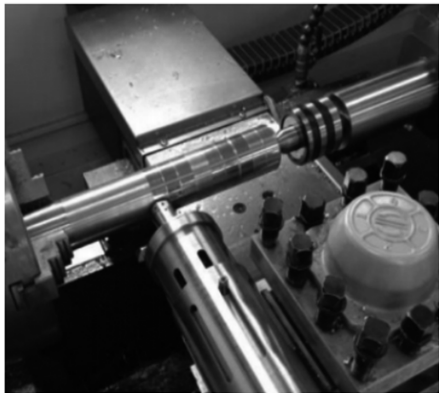


(b)

图 3 超声滚挤压执行设备
(a) 超声波发生器 (b) 滚挤压冲击装置
Fig. 3 Execution equipment for ultrasonic rolling extrusion
(a) Ultrasonic generator (b) Impact device for rolling extrusion



(a)



(b)

图 4 试验加工过程
(a) 数控车床 (b) 超声滚挤压过程
Fig. 4 Test machining process
(a) CNC lathe (b) Ultrasonic rolling extrusion process

数控机床通过卡盘和顶尖固定棒料，主轴带动卡盘进行旋转，刀架固定超声冲击装置，通过操作面板进行编程，完成超声滚挤压加工过程。

在对工件表层性能进行测量时，选用 TR200-1 型表面粗糙度测量仪测量其表面粗糙度；选用 HVS-1000A 型显微硬度计测量其显微硬度；选用 LXR D 型 X 射线应力测量仪测量其残余应力，如图 5 所示。

1.3 试验设计及结果

考虑到试验设备的操作安全性以及加工效率等实际情况，例如转速和进给速度需要在车床允许的范围内选取，转速过低容易导致机床工作的不稳定，过小的进给速度也会大大降低加工效率，本试验选取转速、滚压头直径、滚压次数、进给速度等因子，进行显著效应因子的筛选。最终选用转速 v 、进给速度 f 、振幅 A 、静压力 F 共 4 个主要加工参数作为试验变量。正交实验可以满足实验对于真实性的要求，是一种高效率、快速、经济的试验设计方法。故设计 4 因素 5 水平的正交试验对表层性能（表面



(a)



(b)

图 5 工件表层性能测量设备

(a) 1000 A 型显微硬度计 (b) X 射线应力测量仪

Fig. 5 Equipment of surface performance measurement for part

(a) 1000 A microhardness tester (b) X-ray stress measurement instrument

粗糙度 Ra 、残余压应力 σ 和显微硬度) 的评价指标进行研究。加工参数设置水平如表 1 所示, 试验结果如表 2 所示。

表 1 正交试验加工参数设置

Table 1 Setting of processing parameters for orthogonal test

水平	转速 $v/$ ($r \cdot \min^{-1}$)	进给速度 $f/$ ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	振幅 $A/\mu\text{m}$	静压力 F/N
1	160	15	6	200
2	260	25	12	300
3	360	35	18	400
4	460	45	24	500
5	560	55	30	600

2 加工参数显著性分析

对超声滚挤压试验数据各水平的极差 R 进行分析, 结果如表 3、表 4、表 5 所示, 可以得到加工参数对轴承套圈表面粗糙度的影响程度依次为: 转速>静压力>振幅>进给速度, 加工参数对轴承套圈残余压应力的影响程度依次为: 静压力>进给速度>振幅>转速, 加工参数对轴承套圈显微硬度的影响程度依次为: 振幅>静压力>进给速度>转速。

在超声滚挤压加工前, 磨削后表面产生波纹, 增大静压力使波峰、波谷完全压平, 表面粗糙度降低; 工件表面塑性变形程度更加明显, 使残余压应

表 2 正交试验方案及结果

Table 2 Schemes and results of orthogonal test

方案	转速 $v/$ ($r \cdot \min^{-1}$)	进给速度 $f/$ ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	振幅 $A/$ μm	静压力 F/MPa	表层性能		
					粗糙度/ μm	残余压应力/ MPa	显微硬度/ HV
1	160	15	6	200	0.408	853	692
2	160	25	12	300	0.395	958	708
3	160	35	18	400	0.428	1044	718
4	160	45	24	500	0.506	1112	725
5	160	55	30	600	0.610	1169	731
6	260	15	12	400	0.429	987	711
7	260	25	18	500	0.471	1070	720
8	260	35	24	600	0.560	1137	727
9	260	45	30	200	0.622	936	720
10	260	55	6	300	0.560	1008	693
11	360	15	18	600	0.545	1075	723
12	360	25	24	200	0.558	900	717
13	360	35	30	300	0.602	998	724
14	360	45	6	400	0.548	1059	696

续表 2

方案	转速 $v/$ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	进给速度 $f/$ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	振幅 $A/$ μm	静压力 F/MPa	表层性能		
					粗糙度/ μm	残余压应力/ MPa	显微硬度/ HV
15	360	55	12	500	0.564	1127	710
16	460	15	24	300	0.557	944	722
17	460	25	30	400	0.632	1035	728
18	460	35	6	500	0.576	1090	698
19	460	45	12	600	0.595	1155	713
20	460	55	18	200	0.602	949	709
21	560	15	30	500	0.671	1050	732
22	560	25	6	600	0.624	1103	701
23	560	35	12	200	0.568	919	703
24	560	45	18	300	0.580	1015	714
25	560	55	24	400	0.628	1091	722

表 3 表面粗糙度极差分析结果 (μm)

Table 3 Range analysis results of surface roughness (μm)

水平	转速 v	进给速度 f	振幅 A	静压力 F
1	2.347	2.610	2.716	2.136
2	2.642	2.680	2.551	2.694
3	2.817	2.734	2.626	2.033
4	2.962	2.851	2.809	2.788
5	3.171	2.964	3.137	2.834
极差 R	0.824	0.354	0.586	0.801

表 4 残余压应力极差分析结果 (MPa)

Table 4 Range analysis results of residual compressive stress (MPa)

水平	转速 v	进给速度 f	振幅 A	静压力 F
1	5136	4909	5113	4557
2	5138	5066	5146	4923
3	5159	5188	5153	5215
4	5173	5277	5183	5449
5	5177	5343	5188	5639
极差 R	41	434	75	1081

表 5 显微硬度极差分析结果 (HV)

Table 5 Range analysis results of microhardness (HV)

水平	转速 v	进给速度 f	振幅 A	静压力 F
1	3574	3580	3480	3541
2	3571	3574	3545	3561
3	3570	3570	3584	3575
4	3570	3568	3613	3585
5	3572	3565	3635	3595
极差 R	4	15	155	54

力不断增大,工件表面的显微硬度也逐渐增大。较低的转速可确保工件在圆周方向上加工的均匀性,表面质量更好,粗糙度值降低;工件表面受到频繁冲击,塑性变形明显,残余压应力增大;提高滚压工具头与被加工工件的接触频率,显微硬度提高。适当的振幅会产生有效冲击力以压平刀痕,表面粗糙度减少;工件表面的塑性变形程度更大,使残余压应力和显微硬度增大。适当的进给速度加强了工件轴向上的表面连续度,表面粗糙度降低,显微硬度提高;滚压头在轴向上的接触频率越大,塑性变形明显,残余压应力增大。

3 加工参数优化分析

3.1 综合加权评分及寻优

本文对超声滚挤压正交试验的分析属于定量分析,但是由于实际使用工况的不同,需要根据实际需求进行定性和定量表征,以解决多目标优化问题。引入权值使综合评分法具有更科学、更量化的优点。熵权理论可以深刻反应指标的区分能力,具有较高的可信度和精确度。所以,引入熵权理论进行综合加权评分,旨在得到较好的表面质量。

根据轴承套圈表层性能评价指标构建判断矩阵 A ,如式(1)所示。

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: a_{ij} 为第 i 个和第 j 个指标重要性标度表对比判断结果, $i, j=1, 2, \dots, n$, 且 $a_{ij}>0$, $a_{nn}=1$; n 为指标数量, 本文 $n=3$ 。

对评价矩阵 A 中的元素进行归一化处理, 如式 (2) 所示, 得到矩阵 B :

$$B = (b_{ij})_{n \times n} = \left(\frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \right)_{n \times n} \quad (2)$$

式中: b_{ij} 为归一化后的元素。

将矩阵 B 中元素按行相加, 再进行归一化处理, 得到各表层性能的权重向量, 如式 (3)、式 (4) 所示:

$$c_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \quad (3)$$

$$w_i = \frac{c_i}{\sum_{i=1}^n c_i} \quad (4)$$

式中: c_i 为按列归一化处理后的成对比较矩阵再按行求和的结果; w_i 为由 c_i 归一化处理后得出的结果。

由于轴承套圈表层性能的评价指标单位各不相同, 需要进行无量纲化处理。轴承套圈超声滚挤压会显著提高表层强度, 在轴承套圈表层局部应力超过材料的屈服极限时, 会产生塑性变形, 显微硬度会增大, 这将抵抗局部变形; 残余应力能够进一步减少轴承套圈表面裂纹的产生, 从而改善其疲劳强度; 表面粗糙度的增大将会造成应力集中, 将影响轴承套圈的疲劳强度。综上所述, 对表面粗糙度进行望小处理 x_{ij} , 如式 (5) 所示, 对残余压应力和显微硬度进行望大处理 y_{ij} , 如式 (6) 所示。

$$x_{ij} = \frac{\max g_{ij}(k) - g_{ij}(k)}{\max g_{ij}(k) - \min g_{ij}(k)} \quad (5)$$

$$y_{ij} = \frac{g_{ij}(k) - \min g_{ij}(k)}{\max g_{ij}(k) - \min g_{ij}(k)} \quad (6)$$

式中: $g_{ij}(k)$ 为评价矩阵第 i 行第 j 列元素; $\max g_{ij}(k)$ 为矩阵 j 列中的最大值; $\min g_{ij}(k)$ 为矩阵 j 列中的最小值。

综合表层性能的权重, 对正交试验结果进行综合评价, 如式 (7) 所示, 综合评价函数 Y 值越大, 表明其表层性能越优。

$$Y = \sum_{i=1}^n w_i x_{ij} \quad (7)$$

结合熵权理论求得表层性能的权重向量 $w = (0.525, 0.334, 0.141)$, 由此得知表面粗糙度、残余应力和显微硬度在综合评价体系中的权重分别为 0.525、0.334 和 0.141。

依据式 (5)、式 (6) 将表层性能评价指标标准化, 并结合权重代入到式 (7) 中, 得到综合评分, 如表 6 所示, 加工参数在各水平的均值如表 7 所示。

表 6 综合评分结果

Table 6 Comprehensive score results

方案	标准化后			综合得分	排名
	表面粗糙度 R_a	残余压应力 σ	显微硬度		
1	0.953	0.000	0.000	0.499	11
2	1.000	0.332	0.400	0.692	4
3	0.880	0.604	0.650	0.755	1
4	0.598	0.820	0.825	0.704	3
5	0.221	1.000	0.975	0.588	7
6	0.877	0.424	0.475	0.669	5
7	0.725	0.687	0.700	0.709	2
8	0.402	0.899	0.875	0.635	6
9	0.178	0.263	0.700	0.281	25
10	0.402	0.491	0.025	0.378	20
11	0.420	0.703	0.775	0.565	8
12	0.409	0.149	0.625	0.353	21
13	0.214	0.459	0.800	0.379	19
14	0.446	0.652	0.100	0.466	12
15	0.388	0.867	0.450	0.557	9
16	0.413	0.288	0.750	0.419	16
17	0.141	0.576	0.900	0.394	17
18	0.344	0.750	0.150	0.452	13
19	0.275	0.956	0.525	0.538	10
20	0.236	0.304	0.425	0.286	24
21	0.000	0.623	1.000	0.350	22
22	0.170	0.791	0.225	0.385	18
23	0.373	0.209	0.275	0.304	23
24	0.330	0.513	0.550	0.422	15
25	0.156	0.750	0.750	0.439	14

结合综合加权后的加工参数水平响应, 比较分析极差大小, 得到加工参数对综合表层性能的影响程度依次为: 转速>静压力>振幅>进给速度。用综合评价这一单项指标去衡量加工参数的优劣, 加工参数的综合评价均值在哪一个水平内最大, 则说明加工参数在该水平内的响应影响最大, 此时该水平为超声滚挤压加工参数的最优水平。由表 8 可知, 各加工参数分别第 1 水平、第 2 水平、第 2 水平 (未重复)、第 4 水平时, 即转速为 $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、

表 7 综合评价后的加工参数水平响应

Table 7 Level response of processing parameter after comprehensive evaluation

水平	转速 v	进给速度 f	振幅 A	静压力 F
1	3. 238	2. 502	2. 180	1. 723
2	2. 672	2. 533	2. 760	2. 290
3	2. 320	2. 525	2. 737	2. 723
4	2. 089	2. 411	2. 550	2. 772
5	1. 900	2. 248	1. 992	2. 711
极差	1. 338	0. 289	0. 752	1. 042
排序	1	4	3	2

进给速度为 $35\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、振幅为 $18\text{ }\mu\text{m}$ 、静压力

为 500 N ，各自的综合评价均值最大，从而得到最优的超声滚挤压加工参数最优组合。

3. 2 响应曲面法优化分析

响应面优化法的优势是考虑了试验的随机误差，用一次或二次多项式模型来拟合，所获得的拟合方程是连续的。根据正交试验结果初步得到加工参数对轴承套圈表层性能的影响效果，这时选用 Minitab 软件建立 Box-Behnken 试验设计，再利用响应优化器进行优化。Box-Behnken 试验设计如下：每个加工参数选取最高水平和最低水平，即转速 $[160, 560]$ 、进给速度 $[15, 55]$ 、振幅 $[6, 30]$ 、静压力 $[200, 600]$ ，试验共有 27 组，中心点数位为 3，利用响应曲面法分析加工参数对轴承套圈表层性能的影响，响应曲面试验设计如表 8 所示。

表 8 响应曲面试验设计及结果

Table 8 Design and results for response surface test

方案	转速 $v/$ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	进给速度 $f/$ ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	振幅 $A/$ μm	静压力 $F/$ N	表层性能		
					粗糙度/ μm	残余压应力/ MPa	显微硬度/ HV
1	160	15	18	400	0. 404	986	720
2	160	35	6	400	0. 449	1034	696
3	360	35	30	600	0. 681	1143	731
4	360	35	18	400	0. 495	1051	717
5	560	55	18	400	0. 613	1088	716
6	360	55	6	400	0. 587	1073	695
7	560	35	18	200	0. 592	922	710
8	360	15	6	400	0. 471	984	698
9	360	55	30	400	0. 654	1089	726
10	360	35	18	400	0. 495	1051	717
11	360	15	18	200	0. 485	868	712
12	160	35	30	400	0. 557	1049	728
13	360	15	18	600	0. 555	1075	723
14	160	35	18	200	0. 459	912	711
15	160	55	18	400	0. 479	1076	716
16	360	35	6	600	0. 595	1127	700
17	360	35	18	400	0. 495	1051	717
18	560	35	18	600	0. 630	1142	721
19	560	35	30	400	0. 690	1060	727
20	560	35	6	400	0. 582	1045	696
21	160	35	18	600	0. 496	1130	722
22	360	35	30	200	0. 665	923	720
23	360	35	6	200	0. 535	910	689
24	560	15	18	400	0. 537	997	719
25	360	15	30	400	0. 620	998	729
26	360	55	18	200	0. 593	947	709
27	360	55	18	600	0. 598	1173	720

通过响应曲面回归方差分析轴承套圈表层性能的失拟值 P 分别为 0.655、0.632 和 0.718，均大于显著性水平 α ， α 一般取值为 0.05^[14]，说明所采用数据没有失拟现象。利用响应优化器对轴承套圈表层性能评价指标进行预测，其中表面粗糙度为最小化，而残余压应力和显微硬度为最大化，优化预测结果如图 6 所示。其中，复合合意性 (D) 表示评估设置对一组响应的整体优化程度；单个合意性 (d) 表示评估设置对单一响应的优化程度。通过图 6 可以看出，表面粗糙度优化的合意性 d 为 0.71290，残余压应力优化的合意性 d 为 0.82264，显微硬度优化的合意性 d 为 0.83623，说明匹配效果较好。当转速为 $160\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、进给速度为 $38.8\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、振幅为 $21\text{ }\mu\text{m}$ 、静压力为 539.4 N 时，轴承套圈表层性能分别为：表面粗糙度值为 $0.486\text{ }\mu\text{m}$ ，残余压应力值为 1119 MPa ，显微硬度值为 724 HV 。

4 优化结果分析及验证

对两种优化组合进行试验验证，如表9所示，

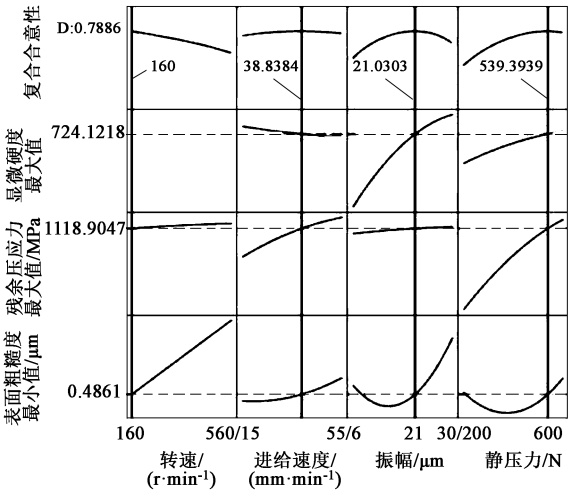


图 6 响应曲面优化图

Fig. 6 Response surface optimization diagram

发现综合加权优化后的表面粗糙度试验值、残余压应力试验值和显微硬度试验值均没有响应曲面优化后的试验值优。产生此结果的主要原因为：试验验证值优并不能做到全局最优，而响应曲面法拟合方程是连续的，可以实现全局最优。

表 9 试验验证结果

Table 9 Test verification results

类别						表层性能		
						表面粗糙度 试验值/ μm	残余压应力 试验值/MPa	显微硬度试验值/ HV
响应曲面 优化组合	1	160	35.0	18	500.0	0.482	1085	720
	2	160	38.8	21	539.4	0.480	1122	728
对比验证	1	260	38.8	21	539.4	0.519	1116	723
	2	160	25.0	21	539.4	0.474	1080	719
	3	160	45.0	21	539.4	0.496	1127	720
	4	160	38.8	18	539.4	0.478	1105	716
	5	160	38.8	24	539.4	0.513	1112	730
	6	160	38.8	21	500.0	0.476	1099	723
	7	160	38.8	21	600.0	0.514	1139	721

将响应曲面优化组合试验值与响应曲面优化预测值进行对比，发现表面粗糙度、残余压应力和显微硬度的误差分别为 1.25%、0.27% 和 0.55%，这证明了优化模型的精确性。结合响应曲面优化组合，设置 7 组对比试验进一步进行验证。

由表 9 发现，第 1 组的表层性能的试验值均劣于响应曲面优化组合的试验值；第 2 组、第 4 组、第 6 组的表面粗糙度的试验值较优，但这 3 组的残余压应力和显微硬度试验值均劣于响应曲面优化组合试验值；第 3 组、第 7 组的残余压应力试验值较

优,但其表面粗糙度和显微硬度试验值均劣于响应曲面优化组合试验值;第5组的显微硬度试验值较优,但表面粗糙度和残余压应力试验值均劣于响应曲面优化组合试验值。综上,该优化组合实现了轴承套圈表层性能的全局最优,提高了其表面质量。

5 结论

(1) 通过对超声滚挤压加工参数各水平进行极差分析,得到加工参数对轴承套圈表面粗糙度的影响程度依次为:转速>静压力>振幅>进给速度;加工参数对轴承套圈残余压应力的影响程度依次为:静压力>进给速度>振幅>转速;加工参数对轴承套圈显微硬度的影响程度依次为:振幅>静压力>进给速度>转速。

(2) 通过熵权理论确定综合评价体系中各表层性能的权重分别为0.525、0.334和0.141,结合加工参数各水平响应,得到加工参数对综合表层性能的影响程度依次为:转速>静压力>振幅>进给速度。利用综合评价这一单项指标得到加工参数的最优水平为:转速为 $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、进给速度为 $35 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、振幅为 $18 \mu\text{m}$ 、静压力为 500 N 。

(3) 通过响应曲面优化设计得到的最优加工参数组合为:转速为 $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、进给速度为 $38.8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、振幅为 $21 \mu\text{m}$ 、静压力为 539.4 N ,优于综合加权得到的加工参数组合,并设置对比试验验证了其精确性,实现了多目标优化的全局最优结果,进一步提高了轴承套圈的表面质量。

参考文献:

- [1] 刘恒三,王森辉,葛学元,等. 加工过程中轴承套圈断裂失效分析[J]. 金属加工(热加工), 2015, (11): 50-52.
Liu H S, Wang M H, Ge X Y, et al. Fracture failure analysis of bearing rings during machining [J]. MW Metal Forming, 2015, (11): 50-52.
- [2] 巩立超,潘永智,刘彦杰,等. 超声滚压轴承套圈表面强化的研究综述[J]. 表面技术, 2022, 51 (8): 203-213.
Gong L C, Pan Y Z, Liu Y J, et al. Summary of research on surface strengthening of ultrasonic rolling bearing rings [J]. Surface Technology, 2022, 51 (8): 203-213.
- [3] 赵波,姜燕,别文博. 超声滚压技术在表面强化中的研究与应用进展[J]. 航空学报, 2020, 41 (10): 42-67.
Zhao B, Jiang Y, Bie W B. Research and application progress of ultrasonic rolling technology in surface strengthening [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41 (10): 42-67.
- [4] Ahmed S, Zhang J F, Feng P F, et al. Experimental study on ro-

- tary ultrasonic machining (RUM) characteristics of Nomex honeycomb composites (NHCs) by circular knife cutting tools [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58: 524-535.
- [5] Basem M A A, Syed H M, Abdualziz E T, et al. Micromachining of biolox forte ceramic utilizing combined laser/ultrasonic processes [J]. Materials, 2020, 13 (16): 3505-3527.
- [6] 尹龙,赵波,郭星辰,等. 超声辅助内圆磨削40Cr15Mo2VN轴承套圈的试验研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32 (10): 1172-1180.
Yin L, Zhao B, Guo X C, et al. Experimental study on ultrasonic assisted internal grinding of 40Cr15Mo2VN bearing rings [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32 (10): 1172-1180.
- [7] Zhang J X, Liu C S, Zhang Y M. Basic research on ultrasonic extrusion for 45 steel shaft [J]. Key Engineering Materials, 2011, 1024: 288-292.
- [8] 王明海,李世永,郑耀辉. 超声铣削钛合金材料表面粗糙度研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45 (6): 341-346, 340.
Wang M H, Li S Y, Zhang Y H. Study on surface roughness of titanium alloy material by ultrasonic milling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45 (6): 341-346, 340.
- [9] 张飞,赵运才. 超声表面滚压改善45#钢表层特性及疲劳性能的研究[J]. 表面技术, 2017, 46 (9): 185-190.
Zhang F, Zhao Y C. Study on ultrasonic surface rolling to improve surface properties and fatigue properties of 45# steel [J]. Surface Technology, 2017, 46 (9): 185-190.
- [10] Alkhalefah H. Precise drilling of holes in alumina ceramic (Al_2O_3) by rotary ultrasonic drilling and its parameter optimization using MOGA-II [J]. Materials, 2020, 13 (5): 1059.
- [11] 任雁,刘佳,刘斌,等. 超声滚挤压风电轴承材料表面粗糙度加工参数敏感性研究[J]. 锻压技术, 2022, 47 (1): 98-105.
Ren Y, Liu J, Liu B, et al. Study on the sensitivity of machining parameters of surface roughness of wind turbine bearing materials by ultrasonic rolling extrusion [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (1): 98-105.
- [12] 王晓强,刘东亚,阮孝林,等. 42CrMo轴承钢超声滚挤压表面加工硬化程度研究[J]. 机械科学与技术, 2020, 39 (12): 1923-1929.
Wang X Q, Liu D Y, Ruan X L, et al. Study on the surface work hardening degree of 42CrMo bearing steel by ultrasonic rolling extrusion [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39 (12): 1923-1929.
- [13] 刘志飞,王晓强,朱其萍,等. 超声滚挤压轴承套圈表面残余应力预测模型建立[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021, (4): 61-64, 69.
Liu Z F, Wang X Q, Zhu Q P, et al. Establishment of prediction model for surface residual stress of bearing ring by ultrasonic rolling extrusion [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021, (4): 61-64, 69.
- [14] Kennedy S L. Before $p < 0.05$ to Beyond $p < 0.05$: Using history to contextualize p -values and significance testing [J]. American Statistician, 2019, 73 (1): 82-90.