

挤压与拉拔

基于交互作用的超声滚挤压轴承套圈加工参数优化

付浩然, 徐红玉, 王晓强, 田英健

(河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 以 42CrMo 钢为研究对象进行超声滚挤压正交试验, 实现加工参数的优化控制。利用基于熵权理论建立的加工参数与表层性能之间的隶属函数评价关系, 分析了加工参数对表层性能的显著性; 根据交互作用最大隶属度原则, 分析了加工参数间的交互作用, 得出最优加工参数组合, 并通过建立指数回归模型进行验证。结果表明: 加工参数对表层性能的影响程度依次为: 进给速度>静压力>振幅>转速; 进给速度与静压力之间的交互作用的影响最大, 进给速度与振幅、振幅与静压力次之, 转速与进给速度、振幅、静压力的影响最小; 最优加工参数为转速为 $550 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、进给速度为 $55 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、振幅为 $5 \mu\text{m}$ 、静压力为 480 N , 对比验证误差均控制在 5% 以下, 实现了表层性能的全局最优。

关键词: 超声滚挤压; 加工参数; 交互作用; 隶属度; 表层性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.07.016

中图分类号: TG376.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 07-0115-08

Optimization on machining parameters for ultrasonic rolling extrusion bearing rings based on interaction

Fu Haoran, Xu Hongyu, Wang Xiaoqiang, Tian Yingjian

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

Abstract: For 42CrMo steel, the orthogonal experiments of ultrasonic rolling extrusion were conducted to achieve the optimal control of machining parameters, and the significance of machining parameters on surface performance was analyzed using affiliation function evaluation relationship between machining parameters and surface performance established by the entropy weight theory. Then, according to the principle of maximum affiliation degree of interaction, the interaction among machining parameters was analyzed to obtain the optimal combination of machining parameters, and the results were verified by establishing an exponential regression model. The results show that the degree of influence for machining parameters on surface performance is as follows: feed speed>static pressure>amplitude>rotational speed. The interaction between feed speed and static pressure has the greatest influence, followed by feed speed and amplitude, amplitude and static pressure, and the influence of rotational speed and feed speed, amplitude and static pressure is the smallest. The optimal machining parameters are the rotation speed of $550 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, the feed speed of $55 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, the amplitude of $5 \mu\text{m}$ and the static pressure of 480 N , and the comparison verification errors are controlled below 5%, which realizes the global optimization of surface performance.

Key words: ultrasonic rolling extrusion; process parameters; interaction; affiliation degree; surface performance

轴承作为机械领域的基础零部件, 在长时间承受载荷进行工作时, 轴承套圈极易发生疲劳破坏, 从而影响轴承的综合性能。为有效提高轴承套圈

的表面质量与疲劳强度, 利用表面强化技术改变材料的微观形貌以及物理力学性能, 从而增强轴承的整

体服役寿命^[1]。

在表面强化领域, 国内外专家学者进行了大量的试验研究以及理论分析。张建斌等^[2]通过采用滚压、喷丸两种强化方式对材料表面的微观组织以及残余应力进行研究分析, 并对表面机械强化的机理做出解释。陶思伟等^[3]通过对渗碳钢进行不同热处理方式的表面强化, 由对比试验观察出渗碳热处理下的表面加强效果显著。徐庆泽等^[4]根据现有电火花加工结合喷丸强化的原理与特点, 分析了材料表面的喷丸加工对电火花加工后表面的影响。金江等^[5]通过对铝合金复合镀层强化, 测试了镀层表面的力学性能与磨损性能, 结果表明, 镀层硬度较大且有较好的

收稿日期: 2022-09-14; 修订日期: 2022-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1804145); 国家重点研究计划 (2018YFB2000405)

作者简介: 付浩然 (1995-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1375525941@qq.com

通信作者: 徐红玉 (1972-), 男, 博士, 教授

E-mail: xuhongyu@haust.edu.cn

耐磨性。Wang N 等^[6]通过二次硬化渗碳钢以获得超高硬度,并对其进行渗碳和回火处理以确定其硬度响应,表征了基体强度水平接近模型预测水平。

随着超声辅助加工技术的发展,其高效率、低成本的特点亦是目前众多专家学者关注的重点,尤其超声辅助滚挤压强化在航空航天、运输、能源领域应用广泛。文献[7]~文献[9]通过超声辅助滚挤压风电轴承套圈正交试验数据,分析了超声滚挤压加工参数对轴承套圈表层性能(表面粗糙度、残余应力和加工硬度)的影响规律,建立相应的表层性能预测模型并验证其准确性。崔凤奎等^[10]为改善超声滚动挤压轴承套圈的表面性能,以套圈为对象,采用试验和统计方法研究了加工参数对表面粗糙度的影响。苏涌翔^[11]研究了超声滚挤压加工参数对轴承套圈表面完整性的影响,采用熵权理论与田口算法分析加工参数的显著性,建立了表面完整性预测模型并进行计算寻优。陈捡等^[12]通过研究超声滚挤压加工参数对表面粗糙度的敏感程度,运用极差分析、指数预测模型法及灰色关联分析法得出影响程度依次为工件转速、静压力和进给速度。朱其萍等^[13]为提高轴承套圈的表面质量,根据 BP 神经网络建立加工参数与加工硬化程度的预测模型,利用粒子群算法对神经网络进行优化并进行试验验证。刘志飞等^[14]为实现加工参数优化控制,通过正交试验数据建立轴承套圈表层性能的径向基函数(Radical Basis Function, RBF)预测模型,采用极差分析与田口算法得出最优加工参数组合。程明龙等^[15]通过对 45 钢进行超声滚挤压试验研究,观察了加工材料的表面微观结构,并分析了改善材料表层性能的作用机理。

综上所述,研究学者对表面强化技术进行了一定的研究,但考虑到超声滚挤压加工参数之间的交互作用,及加工参数优化方面对轴承套圈表面质量的影响较为明显,且理论研究尚不完善。本文通过熵权理论建立加工参数与表层性能之间隶属函数的评价关系,分析加工参数对表层性能的影响程度和在各水平内的影响程度,根据交互效应与最大隶属度原则,分析加工参数之间的交互作用,并得出最佳加工参数组合,进一步提高轴承套圈的表面质量。

1 超声滚挤压试验

1.1 试验原理

超声滚挤压是在传统滚挤压过程中引入超声振动的一种复合加工方式。试验原理简图如图 1 所示,

其中 n 为工件转速方向, s 为工件轴向加工方向, p 为工件径向加工方向。通过调节电流大小控制换能器产生同频率的高频振动,由变幅杆作用到工具头上。在超声动载荷与预紧静载荷的作用下,对材料进行撞击而发生塑性变形,这时工件表层产生高强度的加工硬化层,并且表层的塑性变形阻碍其恢复,产生一定的残余压应力,工件表面的波峰、波谷被碾平,降低了粗糙度。

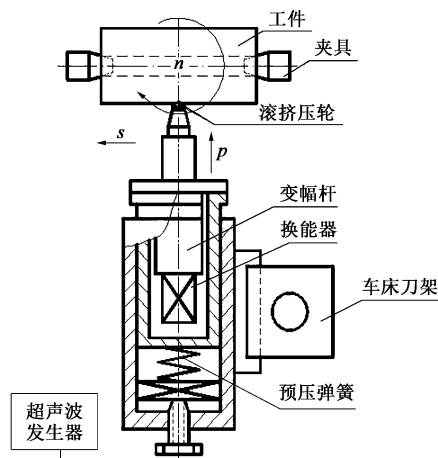


图 1 超声滚挤压加工简图

Fig. 1 Machining schematic diagram of ultrasonic rolling extrusion

1.2 试验材料及设备

选取淬火及低温回火处理的 42CrMo 钢棒料进行等效超声滚挤压加工试验,其长度为 300 mm,直径为 $\Phi 50$ mm。42CrMo 钢材料的主要力学性能如表 1 所示。

表 1 42CrMo 钢材料的主要力学性能

Table 1 Main mechanical properties of 42CrMo steel material

参数	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 R_{eL} /MPa	伸长率 A /%	断面收缩率 Z /%	硬度/HB
数值	1080	≥ 930	≥ 12	≥ 45	≤ 217

超声滚挤压试验是在 CKJ6142 数控车床上进行试验的,其中超声试验过程如图 2 所示,超声加工执行装置如图 3 所示。采用粗糙度测量仪测量工件的表面粗糙度,采用 X 射线衍射仪测量工件的残余压应力,采用数显显微硬度计测量工件的加工硬度。

1.3 试验设计及结果

选定超声滚挤压主要的加工参数为:转速、进给速度、振幅、静压力,根据田口正交试验表设定 4 因素 5 水平的正交试验。加工参数设置如表 2 所示,正交试验结果如表 3 所示。

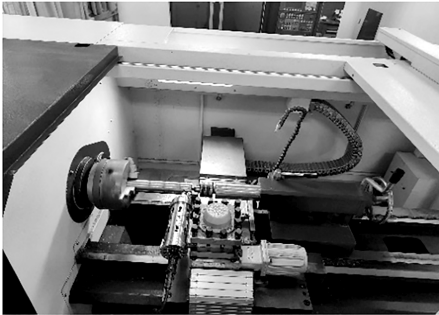


图 2 超声滚挤压加工过程

Fig. 2 Ultrasonic rolling extrusion machining process



图 3 超声加工执行装置

Fig. 3 Ultrasonic machining actuator

表 2 正交试验工艺参数设置

Table 2 Process parameter setting of orthogonal test				
水平	转速 $n/$ ($r \cdot \min^{-1}$)	进给速度 $f/$ ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	振幅 $A/$ μm	静压力 F/N
1	250	15	5	180
2	350	25	10	280
3	450	35	15	380
4	550	45	20	480
5	650	55	25	580

2 综合评价参数的建立

建立超声滚挤压的加工参数与轴承套圈表面粗糙度、残余压应力、加工硬度之间的多目标隶属函数，因轴承套圈表层性能的评价指标单位互不相同，需要对评价指标进行无量纲化处理。考虑到轴承套圈受力将产生塑性变形，提高硬度能够抵抗局部变形；增加残余应力能够改善工件的疲劳强度；表面粗糙度使工件产生应力集中，影响疲劳强度^[11]。因此，对表面粗糙度进行望小处理；对残余压应力进行望大处理；对加工硬度进行望大处理，如式(1)和

表 3 正交试验结果

Table 3 Results of orthogonal test							
方 案	转速 $n/$ ($r \cdot \min^{-1}$)	进给速度 $f/$ ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	振 幅 $A/\mu\text{m}$	静压力 F/N	粗糙度 R_a	残余压 应力 $\sigma/$ 度 MPa HV	加工硬 度 $H/$
1	250	15	5	180	0.487	831	685
2	250	25	10	280	0.465	932	700
3	250	35	15	380	0.462	1029	711
4	250	45	20	480	0.479	1102	720
5	250	55	25	580	0.514	1189	726
6	350	15	10	380	0.456	989	706
7	350	25	15	480	0.485	1057	717
8	350	35	20	580	0.534	1121	726
9	350	45	25	180	0.519	890	718
10	350	55	5	280	0.304	1049	689
11	450	15	15	580	0.531	1070	722
12	450	25	20	180	0.516	870	715
13	450	35	25	280	0.494	967	722
14	450	45	5	380	0.301	1067	693
15	450	55	10	480	0.314	1137	707
16	550	15	20	280	0.480	962	718
17	550	25	25	380	0.490	1030	724
18	550	35	5	480	0.315	1069	696
19	550	45	10	580	0.368	1120	709
20	550	55	15	180	0.402	948	707
21	650	15	25	480	0.509	1067	726
22	650	25	5	580	0.339	1056	697
23	650	35	10	180	0.372	895	696
24	650	45	15	280	0.375	1000	707
25	650	55	20	380	0.397	1066	710

式(2)所示。

望大隶属度函数的表达式为：

$$x_{ij} = \frac{a_{ij} - \min a_{ij}(k)}{\max a_{ij}(k) - \min a_{ij}(k)} \tag{1}$$

望小隶属度函数的表达式为：

$$x_{ij} = \frac{\max a_{ij}(k) - a_{ij}}{\max a_{ij}(k) - \min a_{ij}(k)} \tag{2}$$

式中： k 为评价指标试验数据； x_{ij} 为无量纲化后的第 j 次试验第 i 个评价指标的试验数据， $i=1, 2, \cdots, z, j=1, 2, 3, \cdots, t; z$ 为评价指标个数，本文取 $z=3; t$ 为试验次数，本文取 $t=25; a_{ij}$ 为第 j 次试验第 i 个评价指标值； $\max a_{ij}(k)$ 为第 j 次试验第 i 个评价指标值中的最大值； $\min a_{ij}(k)$ 为第 j 次试验第 i 个评价指标值中的最小值。

通过超声滚挤压试验数据构建表层性能的评价矩阵 $D_{m \times q}$ ，如式 (3) 所示。

$$D_{m \times q} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1q} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mq} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： d_{mq} 为评价指标构成评价矩阵中的元素； q 评价水平数目， $q = 1, 2, 3 \cdots, 25$ ； m 为评价指标， $m = 1, 2, 3$ 。

将 $D_{m \times q}$ 中的试验结果代入式 (1)、式 (2) 中进行隶属度归一化，得到轴承套圈表层性能的规划

$$\text{矩阵 } X_{3 \times 25} = \begin{bmatrix} 0.2017 & 0.2961 & \cdots & 0.5880 \\ 0.0000 & 0.2821 & \cdots & 0.6564 \\ 0.0000 & 0.3689 & \cdots & 0.6098 \end{bmatrix}。$$

根据实践经验得到轴承套圈表层性能的主观权重，将规划矩阵代入式 (4)、式 (5)、式 (6) 和式 (7) 中进行主观权重修正，得到如表 4 所示的综合熵权^[16]。

$$L_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{j=1}^t X_{ij}} \quad (4)$$

$$H_i = \frac{-1}{\ln n} \sum_{j=1}^t L_{ij} \ln L_{ij} \quad (5)$$

$$\omega_i = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^z H_i} \quad (6)$$

$$W_i = \frac{\tau_i \omega_i}{\sum_{i=1}^z \tau_i \omega_i} \quad (7)$$

式中： L_{ij} 为第 i 个评价指标在第 j 次试验时的权重， $L_{ij} \in [0, 1]$ ； H_i 为第 i 个评价指标的熵权， $H_i \in [0, 1]$ ； ω_i 为第 i 个评价指标的客观熵权， $\omega_i \in [0, 1]$ ； τ_i 为第 i 个评价指标的主观熵权； W_i 为第 i 个评价指标的综合熵权， $\sum W_i = 1$ 。

表 4 表层性能熵值

Table 4 Surface performance entropy values

熵权	表面粗糙度	残余压应力	硬度
H_i	0.8954	0.9575	0.9548
ω_i	0.5349	0.2211	0.2350
τ_i	0.2850	0.3900	0.3250
W_i	0.4880	0.2715	0.2405

在评价集中引入一个综合权重的子集 B ，它的综合评价为 $B = \{b_1, b_2, \cdots, b_\lambda\}$ ，其由矩阵 D 与

综合权重的重新分配集经过变换得到，即 $B = Q \cdot D$ ，其中 b_λ 为加权后的第 λ 个表层性能的数值， $\lambda = 1, 2, 3$ ， Q 为综合熵值构建的矩阵。经过矩阵代换，得到综合评价子集 B 的隶属度，即综合评价值。由此分别计算出轴承套圈表层性能（表面粗糙度、残余应力、加工硬度）的隶属度 r_1 、 r_2 、 r_3 以及综合评价隶属度^[17]，如表 5 所示。

表 5 试验结果隶属度

Table 5 Affiliation degree of test results

试验次数	隶属度 r_1	隶属度 r_2	隶属度 r_3	综合隶属度
1	0.2017	0.0000	0.0000	0.0984
2	0.2961	0.2821	0.3659	0.3091
3	0.3090	0.5531	0.6341	0.4535
4	0.2361	0.7570	0.8537	0.5261
5	0.0858	1.0000	1.0000	0.5539
6	0.3348	0.4413	0.5122	0.4064
7	0.2103	0.6313	0.7805	0.4617
8	0.0000	0.8101	1.0000	0.4604
9	0.0644	0.1648	0.8049	0.2697
10	0.9871	0.6089	0.0976	0.6705
11	0.0129	0.6676	0.9024	0.4046
12	0.0773	0.1089	0.7317	0.2433
13	0.1717	0.3799	0.9024	0.4040
14	1.0000	0.6592	0.1951	0.7139
15	0.9442	0.8547	0.5366	0.8219
16	0.2318	0.3659	0.8049	0.4060
17	0.1888	0.5559	0.9512	0.4718
18	0.9399	0.6648	0.2683	0.7037
19	0.7124	0.8073	0.5854	0.7076
20	0.5665	0.3268	0.5366	0.4942
21	0.1073	0.6592	1.0000	0.4718
22	0.8369	0.6285	0.2927	0.6494
23	0.6953	0.1788	0.2683	0.4524
24	0.6824	0.4721	0.5366	0.5902
25	0.5880	0.6564	0.6098	0.6118

3 加工参数显著性分析

设超声滚挤压轴承套圈表层性能的加工因素为 C_g ，论域为 X_g ，则有 $X_{gh} = \{C_{gh}\}$ 。在研究加工参数 C_{gh} 对轴承套圈表层性能的显著性时，为了便于各参数水平的比较，将各水平的表层性能综合评价之和 $\sum b_{gh}$ 归一化，得到 $0 \leq (\sum b_{gh})' \leq 1$ ，其中， g 为各加工参数， $g = 1, 2, 3, 4$ ， h 为试验水平， $h = 1, 2$ ，

3, 4, 5。如表6所示, 说明了加工参数在该水平时表层性能的影响程度, 因为 $(\sum b_{gh})'$ 代表了加工参数在 h 水平处的隶属度, 可以将其表示为 X_g 上的综合子集, 则有: $C_1 = [(\sum b_{11})', (\sum b_{12})', (\sum b_{13})', (\sum b_{14})', (\sum b_{15})']$, $C_2 = [(\sum b_{21})', (\sum b_{22})', (\sum b_{23})', (\sum b_{24})', (\sum b_{25})']$, $C_3 = [(\sum b_{31})', (\sum b_{32})', (\sum b_{33})', (\sum b_{34})', (\sum b_{35})']$, $C_4 = [(\sum b_{41})', (\sum b_{42})', (\sum b_{43})', (\sum b_{44})', (\sum b_{45})']$ 。

表6 各水平的加工参数影响程度

Table 6 Influence degrees of machining parameters at each level

水平	各水平影响之和	转速	进给速度	振幅	静压力
1	$\sum b_{g1}$	1.9410	1.7872	2.8359	1.5580
	$(\sum b_{g1})'$	0.1571	0.1446	0.2295	0.1261
2	$\sum b_{g2}$	2.2687	2.1353	2.6974	2.3798
	$(\sum b_{g2})'$	0.1836	0.1728	0.2183	0.1926
3	$\sum b_{g3}$	2.5877	2.4740	2.4042	2.6574
	$(\sum b_{g3})'$	0.2094	0.2002	0.1946	0.2151
4	$\sum b_{g4}$	2.7833	2.8075	2.2476	2.9852
	$(\sum b_{g4})'$	0.2253	0.2272	0.1819	0.2416
5	$\sum b_{g5}$	2.7756	3.1523	2.1712	2.7759
	$(\sum b_{g5})'$	0.2246	0.2551	0.1757	0.2247

这时超声滚挤压轴承套圈表层性能各水平的综合子集分别为: $C_1 = [0.1571, 0.1836, 0.2094, 0.2253, 0.2246]$, $C_2 = [0.1446, 0.1728, 0.2002, 0.2272, 0.2551]$, $C_3 = [0.2295, 0.2183, 0.1946, 0.1819, 0.1757]$, $C_4 = [0.1261, 0.1926, 0.2151, 0.2416, 0.2247]$ 。

由最大隶属度原则可知, 超声滚挤压加工参数的影响程度分别为: $C_1=0.2253$, $C_2=0.2551$, $C_3=0.2295$, $C_4=0.2416$, 即 $C_2 > C_4 > C_3 > C_1$, 此时影响程度依次为进给速度>静压力>振幅>转速。

结合表6可得到, 每个水平内加工参数对表层性能的影响程度为: 第1水平: 振幅>转速>进给速度>静压力; 第2水平: 振幅>静压力>转速>进给速度; 第3水平: 静压力>转速>进给速度>振幅; 第4水平: 静压力>进给速度>转速>振幅; 第5水平: 进给速度>静压力>转速>振幅。

4 交互作用多目标优化

4.1 交互效应分析

超声滚挤压加工参数之间的交互作用对轴承套圈表面质量的影响较为明显, 因此, 需要对其进行分析, 进一步提高其表层性能。

(1) 在进行两因素交互作用分析时, 超声滚挤压的4个加工参数各有5个水平, 两两因素各水平共有6种可能的搭配方式。

$$C_1^T \times C_2 = \begin{bmatrix} (\sum b_{11})' \\ (\sum b_{12})' \\ (\sum b_{13})' \\ (\sum b_{14})' \\ (\sum b_{15})' \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} (\sum b_{21})', (\sum b_{22})', (\sum b_{23})', \\ (\sum b_{24})', (\sum b_{25})' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} & r_{55} \end{bmatrix} = R_{lp} \quad (8)$$

式中: R_{lp} 为论域上加工参数的综合关系; l 为论域中的行数, $l=1, 2, 3, 4, 5$; p 为论域中的列数, $p=1, 2, 3, 4, 5$; 矩阵中 r_{lp} 为两因素不同水平搭配的综合评价的联合影响。

以 C_1 和 C_2 之间的交互作用为例, 它们之间的综合评价矩阵为:

$$C_1^T \times C_2 = \begin{bmatrix} 0.1571 \\ 0.1836 \\ 0.2094 \\ 0.2253 \\ 0.2246 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.1446, 0.1728, 0.2002, 0.2272, 0.2551 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1446 & 0.1571 & 0.1571 & 0.1571 & 0.1571 \\ 0.1446 & 0.1728 & 0.1836 & 0.1836 & 0.1836 \\ 0.1446 & 0.1728 & 0.2002 & 0.2094 & 0.2094 \\ 0.1446 & 0.1728 & 0.2002 & 0.2253 & 0.2251 \\ 0.1446 & 0.1728 & 0.2002 & 0.2246 & 0.2246 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由 R_{12} 可见, 如果仅考虑 C_1 和 C_2 之间的搭配, 则 C_{14} 和 C_{25} 的组合最佳, R_{lp} 值可达到 0.2253。同

理可计算出其他加工参数两两之间的最佳组合和隶属度,如表 7 所示。

表 7 试验结果隶属度

Table 7 Affiliation degree of test results

序号	交互因素	最佳组合	隶属度
1	C_1 和 C_2	C_{14} 和 C_{25}	0.2253
2	C_1 和 C_3	C_{14} 和 C_{31}	0.2253
3	C_1 和 C_4	C_{14} 和 C_{44}	0.2253
4	C_2 和 C_3	C_{25} 和 C_{31}	0.2295
5	C_2 和 C_4	C_{25} 和 C_{44}	0.2416
6	C_3 和 C_4	C_{31} 和 C_{44}	0.2295

由此得出,进给速度与静压力的交互作用影响最大,其次是进给速度与振幅、振幅与静压力之间的交互作用,而转速与进给速度、振幅、静压力之间的交互作用影响最小。

(2) 在分析全部加工参数各水平搭配时的交互作用时,按照最大隶属度原则,4 个加工参数的最佳组合为 C_{ij} 种隶属度最大的水平搭配。这时最佳加工参数组合的隶属度为: $\max[(\sum b_{ij})'] \wedge \max[(\sum b_{2j})'] \wedge \max[(\sum b_{3j})'] \wedge \max[(\sum b_{4j})']$ 。

在全部可能的 4 个加工参数的水平搭配中,最佳加工参数组合为: $C_{14}C_{25}C_{31}C_{44}$, 其隶属度为 $0.2253 \wedge 0.2551 \wedge 0.2295 \wedge 0.2416 = 0.2253$ 。在考虑交互作用的情况下,超声滚挤压轴承套圈最佳加工参数组合为: 转速为 $550 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 进给速度为 $55 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 振幅为 $5 \text{ } \mu\text{m}$, 静压力为 480 N , 此时轴承套圈的表层性能达到最优。

4.2 预测模型分析

通过超声滚挤压加工参数与轴承套圈之间的非线性函数关系,以转速、进给速度、振幅、静压力等加工参数为自变量,建立多元回归的表层性能的指数回归数学模型^[18],如式(10)所示。

$$\begin{cases} Ra = K_1 \times n^{b_1} \times f^{b_2} \times F^{b_3} \times A^{b_4} \\ \sigma = K_2 \times n^{d_1} \times f^{d_2} \times F^{d_3} \times A^{d_4} \\ H = K_3 \times n^{e_1} \times f^{e_2} \times F^{e_3} \times A^{e_4} \end{cases} \quad (10)$$

式中: K_1 、 K_2 、 K_3 为常数; b_1 、 d_1 、 e_1 , b_2 、 d_2 、 e_2 , b_3 、 d_3 、 e_3 , b_4 、 d_4 、 e_4 分别为转速、进给速度、振幅、静压力的指数。

结合正交试验数据拟合轴承套圈的指数回归数学模型,表面粗糙度的指数回归模型为:

$$Ra = 10^{0.2980} n^{-0.2143} f^{-0.1980} A^{0.2463} F^{-0.0310} \quad (11)$$

残余压应力的指数回归模型为:

$$\sigma = 10^{2.3782} n^{0.0086} f^{0.06698} A^{0.00896} F^{0.1948} \quad (12)$$

加工硬度的指数回归模型为:

$$H = 10^{2.79164} n^{-0.00054} f^{-0.0034} A^{0.02738} F^{0.01394} \quad (13)$$

经方差分析,表面粗糙度的相关系数 $R^2 = 93.39\%$, 调整相关系数 $R_{\text{adj}}^2 = 92.86\%$, 检验水平 $P < 0.0001$; 残余压应力的相关系数 $R^2 = 94.76\%$, 调整相关系数 $R_{\text{adj}}^2 = 93.71\%$, 检验水平 $P < 0.0001$; 加工硬度的相关系数 $R^2 = 96.20\%$, 调整相关系数 $R_{\text{adj}}^2 = 95.44\%$, 检验水平 $P < 0.0001$, 说明指数回归模型具有较高的相关性。图 4~图 6 为表层性能的残差分布图,试验数据均靠近对角线的预测值,说明

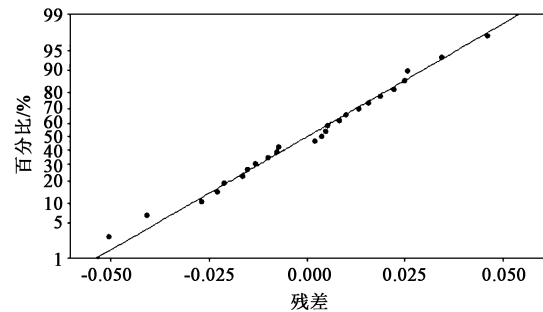


图 4 表面粗糙度正态概率图

Fig. 4 Normal probability diagram of surface roughness

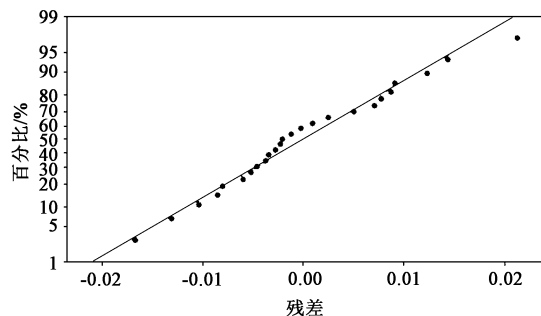


图 5 残余压应力正态概率图

Fig. 5 Normal probability diagram of residual compressive stress

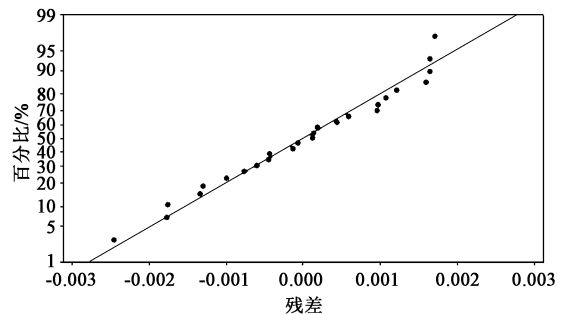


图 6 硬度正态概率图

Fig. 6 Normal probability diagram of hardness

残差的分布符合正态分布。以上说明指数回归模型的拟合效果较好，具有较精确的预测能力。

4.3 试验验证

由交互作用优化结果设置 6 组对比试验设计，并带入指数回归模型进行对比，如表 8 所示。

由表 8 可得出，表面粗糙度的试验值与预测值误差分别为：1.04%、2.30%、2.81%、3.26%、-2.11%、-2.13% 和 3.07%；残余压应力的试验值与预测值误差分别为：0.54%、-1.46%、-1.36%、-0.83%、1.84%、1.30% 和 -1.32%；加工硬度的试验值与预测值误差分别为：2.39%、2.12%、-1.17%、

2.94%、-1.88%、1.71% 和 -0.72%，综上，试验误差均控制在 5% 以下，证明了预测的准确性。表 8 中第 3 组、第 6 组的表面粗糙度试验值比优化组合结果优，但残余压应力与硬度的试验值没有优化组合结果优；第 5 组、第 7 组的残余压应力试验值比优化组合结果优，但表面粗糙度与硬度值没有优化组合结果优；第 4 组的硬度试验值比优化组合结果优，但表面粗糙度与残余压应力没有优化组合结果优；第 2 组的试验值表层性能均没有优化组合结果优。综上，优化组合得到的试验值实现了表层性能的全局最优，改善了表面质量。

表 8 试验验证结果
Table 8 Test verification results

试验	序号	转速 $n/$ ($r \cdot \min^{-1}$)	进给速度 $f/$ ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	振幅 $A/$ μm	静压力 F/N	粗糙度		残余压应力/MPa		硬度/HV	
						试验值	预测值	试验值	预测值	试验值	预测值
优化组合	1	550	55	5	480	0.288	0.285	1120	1114	711	694
	2	450	55	5	480	0.305	0.298	1096	1112	708	693
	3	650	55	5	480	0.284	0.276	1100	1115	685	693
对比试验	4	550	45	5	480	0.307	0.297	1090	1099	715	694
	5	550	55	10	480	0.331	0.338	1141	1120	693	706
	6	550	55	5	380	0.282	0.288	1078	1164	703	691
	7	550	55	5	580	0.293	0.284	1140	1155	700	695

5 结论

(1) 基于熵权理论建立了轴承套圈表层性能与超声滚挤压加工参数的隶属函数以及综合评价关系，通过综合评价分析加工参数对表层性能的影响程度为：进给速度>静压力>振幅>转速；各水平内加工参数对表层性能的影响程度分别为：第 1 水平：振幅>转速>进给速度>静压力；第 2 水平：振幅>静压力>转速>进给速度；第 3 水平：静压力>转速>进给速度>振幅；第 4 水平：静压力>进给速度>转速>振幅；第 5 水平：进给速度>静压力>转速>振幅。

(2) 通过交互效应分析加工参数之间的交互作用得到，进给速度与静压力的交互作用影响最大，进给速度与振幅、振幅与静压力之间的交互作用影响较小，而转速与进给速度、振幅、静压力之间的交互作用影响最小。

(3) 通过分析加工参数与表层性能之间的非线性关系，建立多目标指数回归预测模型，并由方差分析和残差概率图分布，证明了指数回归模型的拟

合效果较好，具有较精确的预测能力。

(4) 通过交互作用的最大隶属度原则，得出超声滚挤压的最佳加工参数组合为：转速为 $550\text{ r} \cdot \min^{-1}$ ，进给速度为 $55\text{ mm} \cdot \min^{-1}$ ，振幅为 $5\text{ }\mu\text{m}$ ，静压力为 480 N ，并由试验值与预测值的对比验证了最佳加工参数下工件表层性能实现了全局最优，改善了表面质量。

参考文献：

[1] 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.

[2] 张建斌, 马勤, 季根顺, 等. 表面机械强化工业纯钛疲劳性能的研究 [J]. 航空材料学报, 2001, (3): 46-50.
Zhang J B, Ma Q, Ji G S, et al. Study on fatigue properties of surface mechanical strengthening industrial pure titanium [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2001, (3): 46-50.

[3] 陶思伟, 张鑫. 20CrMnTi 钢有无稀土渗碳热处理表面强化层的组织及性能研究 [J]. 中国金属通报, 2021, (1): 211-212.

- Tao S W, Zhang X. Study on microstructure and properties of surface strengthening layer of 20CrMnTi steel with or without rare earth carburizing heat treatment [J]. China Metal Bulletin, 2021, (1): 211-212.
- [4] 徐庆泽, 蔡晋, 孟庆勋, 等. 喷丸强化对电火花加工表面影响的研究进展 [J]. 航空精密制造技术, 2020, 56 (5): 1-5, 25.
- Xu Q Z, Cai J, Meng Q X, et al. Research progress on the effect of shot peening on EDM surface [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2020, 56 (5): 1-5, 25.
- [5] 金江, 刘燕, 王艺. 用于铝合金零件表面强化的 Ni-SiO₂-MoS₂ 复合镀层的研究 [J]. 电镀与环保, 2019, 39 (1): 10-12.
- Jin J, Liu Y, Wang Y. Research on Ni-SiO₂-MoS₂ composite coating for surface strengthening of aluminum alloy parts [J]. Electroplating & Pollution Control, 2019, 39 (1): 10-12.
- [6] Wang N, Zhu J L, Liu B, et al. Influence of ultrasonic surface rolling process and shot peening on fretting fatigue performance of Ti-6Al-4V [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34 (6): 63-75.
- [7] 王晓强, 荣莎莎, 刘佳, 等. 超声滚挤压轴承套圈表面粗糙度响应曲面预测模型 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (3): 54-59.
- Wang X Q, Rong S S, Liu J, et al. Surface roughness response prediction model of ultrasonic roll extrusion bearing ring [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (3): 54-59.
- [8] 徐红玉, 黄焱焱, 崔凤奎. 超声滚挤压轴承套圈表层残余应力模型 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (5): 205-211.
- Xu H Y, Huang Y Y, Cui F K, et al. Residual stress model of bearing ring surface by ultrasonic rolling extrusion [J]. Journal of Plastic Engineering, 2018, 25 (5): 205-211.
- [9] 王晓强, 阮孝林, 崔凤奎, 等. 超声滚挤压表面硬度预测模型研究 [J]. 机械强度, 2020, 42 (4): 811-816.
- Wang X Q, Ruan X L, Cui F K, et al. Study on prediction model of surface hardness of ultrasonic roll extrusion [J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42 (4): 811-816.
- [10] 崔凤奎, 苏涌翔, 荣莎莎, 等. 超声滚挤压轴承套圈表面粗糙度数学模型对比分析 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (5): 199-204.
- Cui F K, Su Y X, Rong S S, et al. Comparative analysis of mathematical model for surface roughness of ultrasonic rolling extrusion bearing rings [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (5): 199-204.
- [11] 苏涌翔. 超声滚挤压轴承套圈表面完整性研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2019.
- Su Y X. Study on Surface Integrity of Bearing Ring by Ultrasonic Rolling Extrusion [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2019.
- [12] 陈捡, 刘飞, 王晓强. 超声滚挤压强化 7050 铝合金的表面粗糙度 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (12): 148-153.
- Chen J, Liu F, Wang X Q. Surface roughness of 7050 aluminum alloy strengthened by ultrasonic rolling extrusion [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (12): 148-153.
- [13] 朱其萍, 徐红玉, 王晓强, 等. 基于 PSO-BP 的超声滚挤压轴承套圈表面加工硬化程度预测 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 190-196.
- Zhu Q P, Xu H Y, Wang X Q, et al. Prediction of surface work hardening degree of ultrasonic rolling extrusion bearing rings based on PSO-BP [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 190-196.
- [14] 刘志飞, 王晓强, 朱其萍, 等. 超声滚挤压轴承套圈的表层性能预测模型建立及工艺参数优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 118-125.
- Liu Z F, Wang X Q, Zhu Q P, et al. Establishment of surface performance prediction model and optimization of process parameters for bearing rings by ultrasonic roll extrusion [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 118-125.
- [15] 程明龙, 肖勇, 刘康宁, 等. 超声振动滚挤压对金属表面微观组织的影响 [J]. 工具技术, 2019, 53 (7): 73-76.
- Cheng M L, Xiao Y, Liu K N, et al. Effect of ultrasonic vibration rolling extrusion on Microstructure of metal surface [J]. Tool Engineering, 2019, 53 (7): 73-76.
- [16] 张甜, 阎红灿. 基于熵权法的多属性决策算法优化及应用 [J]. 华北理工大学学报: 自然科学版, 2022, 44 (1): 82-88.
- Zhang T, Yan H C. Optimization and application of multi-attribute decision-making algorithm based on entropy weight method [J]. Journal of North China University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2022, 44 (1): 82-88.
- [17] 朱常安, 胡文华, 郭宝峰, 等. 基于熵权法和组合隶属函数的雷达质量评估方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (6): 302-307.
- Zhu C A, Hu W H, Guo B F, et al. Research on radar quality assessment method based on entropy weight method and combined membership function [J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30 (6): 302-307.
- [18] 余婷, 裴莉莉, 李伟, 等. 基于随机森林算法的路面状况指数预测 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (10): 16-23.
- Yu T, Pei L L, Li W, et al. Prediction of pavement condition index based on random forest algorithm [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (10): 16-23.

