

挤压与拉拔

基于多目标 FAST 算法的超声滚挤压工艺参数优化

徐诗博, 王晓强, 田英健, 王 彪, 石青松

(河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 为提升轴承套圈的表层性能, 以 42CrMo 高强度钢为研究对象, 开展 4 因素 5 水平正交试验, 基于正交试验数据建立表层性能的指数回归预测模型, 并利用方差分析验证了模型的可靠性。通过多目标 FAST 算法对指数回归预测模型进行优化, 得到超声滚挤压的最优工艺参数范围及其表层性能的最优取值范围, 并进行了试验验证。结果表明: 当迭代次数达到 900 时, 表层性能随迭代次数的增加无明显改善, 优化后 42CrMo 高强度钢表层性能的试验值与预测值的误差均控制在 10% 以内, 转速最优为 $140 \sim 210 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、进给速度为 $12 \sim 20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、振幅为 $20 \sim 25 \text{ } \mu\text{m}$ 、静压力为 $450 \sim 600 \text{ N}$; 表面粗糙度最优为 $0.43 \sim 0.49 \text{ } \mu\text{m}$ 、残余压应力为 $950 \sim 1050 \text{ MPa}$ 、硬度为 $700 \sim 720 \text{ HV}$ 。研究内容对实际的工程应用具有一定的指导意义。

关键词: 超声滚挤压; 正交试验; 表层性能; 指数回归; 多目标 FAST 算法

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.04.009

中图分类号: TG376.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2025) 04-0069-08

Process parameters optimization for ultrasonic rolling extrusion based on multi-objective FAST algorithm

Xu Shibo, Wang Xiaoqiang, Tian Yingjian, Wang Biao, Shi Qingsong

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

Abstract: In order to improve the surface performance of bearing rings, for 42CrMo high-strength steel, a four-factor and five-level orthogonal test was conducted, and an exponential regression prediction model of surface performance was established based on the orthogonal test data. Then, the reliability of the model was verified by variance analysis. Furthermore, the exponential regression prediction model was optimized by the multi-objective FAST algorithm, the optimal process parameters range of ultrasonic rolling extrusion and the optimal value range of its surface performance were obtained, and the reliability was verified by tests. The results show that when the number of iteration times reaches 900, there is no significant improvement in the performance with the increasing of iteration times. The errors between the test and predicted values of the surface performance for 42CrMo high-strength steel after optimization are controlled within 10%. The optimal rotation speed is $140 \sim 210 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, the feeding speed is $12 \sim 20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, the amplitude is $20 \sim 25 \text{ } \mu\text{m}$, and the static pressure is $450 \sim 600 \text{ N}$. The optimal surface roughness is $0.43 \sim 0.49 \text{ } \mu\text{m}$, the residual compressive stress is $950 \sim 1050 \text{ MPa}$, and the hardness is $700 \sim 720 \text{ HV}$, which has certain guiding significance for practical engineering applications.

Key words: ultrasonic rolling extrusion; orthogonal test; surface performance; exponential regression; multi-objective FAST algorithm

轴承是机械设备的核心部件, 广泛应用于机械领域。风电轴承由于持续承受周期性载荷, 易发生疲劳损坏。为延长其使用寿命并提升耐磨与抗疲劳性能, 需对轴承套圈进行表面强化处理^[1]。超声滚挤压作为一种新兴近净成形加工技术, 与其他传统

表面强化技术相比, 结构简单、加工效率高、操作简单, 能够提升轴承套圈的疲劳寿命和表面质量。

近年来, 随着先进制造技术的不断发展, 国内外众多专家学者对超声滚挤压表面强化技术进行了广泛的研究。Xu G M 等^[2]为提高 7B85-T6 合金的表面性能, 对超声滚挤压时合金显微硬度和表面粗糙度的影响进行了分析, 结果表明: 合金的表面粗糙度有所下降, 显微硬度有所增强, 同时其抗腐蚀性也有所提升。宋锦春等^[3]以 45 钢为研究对象, 通过超声滚压加工对 45 钢进行了表面强化处理, 结果表明: 超声滚压加工能降低 45 钢的表面粗糙度, 提高表面硬度。Zhu X T 等^[4]为了提高 TC4 钛合金表面

收稿日期: 2024-03-25; 修订日期: 2024-06-18

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 (2018YFB2000405, 2022YFC2805702)

作者简介: 徐诗博 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 17630784520@163.com

通信作者: 王晓强 (1972-), 男, 博士, 教授

E-mail: wang_xq2002@163.com

的物理性能，通过超声滚挤压进行表面处理，结果表明：钛合金表面粗糙度显著下降，同时，随着静压力的增大残余压应力和硬度也随之增大，钛合金试样表面完整性得到了极大的改善。石青松等^[5]以 42CrMo 钢轴承套圈为研究对象进行超声滚挤压有限元数值模拟，研究了不同参数下力学性能的影响规律，结果表明，硬度与振幅和静压力为正比例关系。Ren Z H 等^[6]以 Ti-6Al-4V 钛合金为试验材料进行超声滚压加工，结果表明：经过超声滚压后，钛合金表面性能得到显著改善。Huuki J 等^[7]研究了超声滚挤压后两种不同硬度回火钢所产生的残余应力，结果表明：超声滚挤压能使铝合金表层组织更加致密，且在其表层产生残余压应力有效提高显微硬度。李翔等^[8]以 DZ2 车轴钢为研究对象进行超声滚挤压试验，研究发现，DZ2 钢试样的表面状态得到显著改善，表面完整性得到显著提高。郑建新等^[9]采用单因素法研究 7050 铝合金在经过超声滚挤压后表面质量的变化情况，结果表明：超声滚挤压能使铝合金表层组织更致密，有效提高显微硬度，并产生残余压应力。

在多目标优化方面，专家学者们也开展了大量研究。黄鹏程等^[10]以 GCr15 钢材料为研究对象进行超声滚压试验，采用响应曲面法构建出 GCr15 钢材料表层性能的预测模型，并对得到的预测模型进行多目标复合优化，获取了最优工艺参数，结果表明：采用多目标优化模型获得的最优工艺参数，能够得到 GCr15 钢的最优表层性能。王靖等^[11]针对激光熔化成形工艺参数对 Ti6Al4V 钛合金样件成形质量的影响问题，通过响应面法建立多目标优化模型，并利用响应面方差分析法得到成形质量的最佳工艺参数，结果表明：优化后样件成形质量的预测值与试验值基本吻合，说明该方法可以对激光熔化成形工艺参数进行优化。Gao G F 等^[12]以 12Cr2Ni4A 齿轮钢为研究对象，通过层次分析法建立了残余应力、硬度和表面粗糙度的多目标优化模型，并应用改进的加工参数灰色关联分析法对模型进行多目标优化，结果表明：合理选择最佳工艺参数有利于提高加工表面的完整性。

综上所述，关于超声滚挤压强化技术，国内外的学者已经进行了一些研究，并且在多目标优化方面也有了一定的进展。但是，在轴承套圈表层性能的多目标优化研究领域，现有的成果尚显稀缺。鉴于此，本研究选取 42CrMo 钢等效替换轴承套圈进行超声滚挤压试验，构建其表层性能的指数回归预测模型，并运用多目标 FAST 算法对该模型进行多目标优化，从而确定最佳的工艺参数区域，并验证其精确性。

1 超声滚挤压试验

1.1 超声滚挤压试验材料

由于 42CrMo 钢为超高强度钢，选用经过淬火和磨削加工的 42CrMo 钢等效替换轴承套圈，进行超声滚挤压表面强化试验，其中钢件的尺寸为 $\Phi 50\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 。表 1 为 42CrMo 钢的主要力学性能。

表 1 42CrMo 钢的主要力学性能

Table 1 Main mechanical properties of 42CrMo steel

参数	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	断面收缩 率/%	硬度/HV
数值	1080	≥ 930	≥ 12	≥ 45	≤ 630

1.2 超声滚挤压试验原理

超声滚挤压作为一种新型无切削的塑性成形新工艺技术，其加工原理简图如图 1 所示，其中， n 为转速， f 为进给速度， F 为静压力。首先，交流电在超声波发生器的作用下转为成超声频电能量，在换能器的作用下超声频电能量转换为超声机械振动，变幅杆将超声机械振动放大，驱动滚压工具头进行滚压加工。材料经过塑性变形和弹性变形，表层显微组织因超声滚挤压冷硬化，晶粒细化，形成了密集的纤维状纹理，材料的表层性能得到提升。

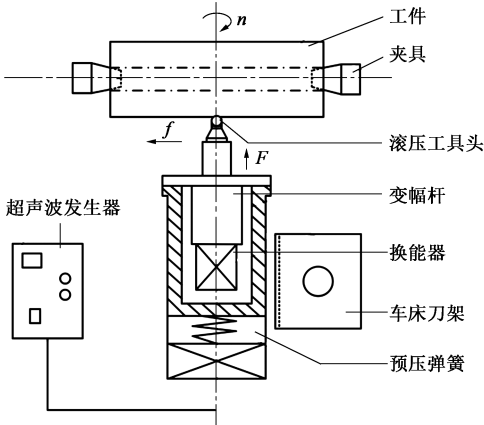


图 1 超声滚挤压加工原理图

Fig. 1 Principle diagram of ultrasonic rolling extrusion processing

超声滚挤压加工试验在 HK30F-HKD 金属构建波动式高质抗疲劳加工设备上进行，如图 2 所示。超声滚挤压加工装备由两个主要组件构成：超声波发生器和超声滚挤压执行装置。在本次试验中分别使用 TR200-1 型号的粗糙度仪、PROTO-LXRD 型 X 射线衍射仪、HVS-1000A 型维氏硬度计来测量样件的表面粗糙度、残余压应力和硬度。

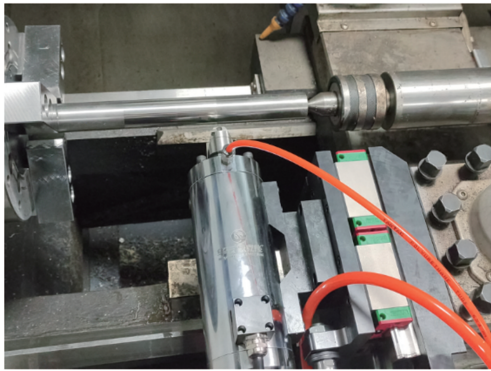


图 2 超声滚挤压加工试验过程

Fig. 2 Process for ultrasonic rolling extrusion processing test

1.3 正交试验设计及结果

通过全因子试验分析确定超声滚挤压的关键参

数指标，其中转速 n 、进给速度 f 、振幅 A 及静压力 F 共 4 个参数的影响程度最大^[13]，因此，以这 4 个参数为因素指标，以表面粗糙度、残余压应力和硬度为优化目标设计 4 因素 5 水平正交试验。表 2 和表 3 分别为正交试验因素水平设置和正交试验结果。

表 2 正交试验因素水平

Table 2 Factors and levels of orthogonal test

水平	转速 n / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	进给速度 f / ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	振幅 A / μm	静压力 F / N
1	140	12	5	130
2	260	24	10	240
3	380	32	15	370
4	500	45	20	480
5	620	60	25	600

表 3 正交试验方案和结果

Table 3 Schemes and results of orthogonal test

序号	因素				结果		
	转速 n /($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	进给速度 f /($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	振幅 A / μm	静压力 F /N	表面粗糙度/ μm	残余压应力/MPa	硬度/HV
1	140	12	5	130	0.41	805	675
2	140	24	10	240	0.45	935	687
3	140	32	15	370	0.48	997	701
4	140	45	20	480	0.50	1001	709
5	140	60	25	600	0.52	1025	714
6	260	12	10	370	0.50	868	692
7	260	24	15	480	0.54	935	703
8	260	32	20	600	0.56	992	711
9	260	45	25	130	0.50	895	699
10	260	60	5	240	0.53	734	679
11	380	12	15	600	0.56	894	705
12	380	24	20	130	0.51	810	694
13	380	32	25	240	0.55	881	705
14	380	45	5	370	0.58	719	675
15	380	60	10	480	0.60	805	692
16	500	12	20	240	0.54	818	701
17	500	24	25	370	0.58	870	710
18	500	32	5	480	0.60	715	675
19	500	45	10	600	0.61	781	695
20	500	60	15	130	0.57	725	687
21	620	12	25	480	0.59	862	713
22	620	24	5	600	0.61	708	680
23	620	32	10	130	0.57	701	679
24	620	45	15	240	0.60	736	693
25	620	60	20	370	0.62	795	704

2 超声滚挤压表层性能预测模型

2.1 指数回归预测模型的建立

在超声滚挤压加工中，通过正交试验设计来确

定不同加工参数对表面粗糙度、残余压应力和硬度的影响，进而使每个指标相互独立，从而不会影响输出结果^[14]，本文采用表面粗糙度、残余压应力以及硬度作为输出评价指标，并建立表层性能预测模型。

指数回归预测模型因其灵活性和对非线性数据处理的能力,已经应用于超声滚挤压工艺参数和表层性能之间的数学模型的建立^[15],构建了超声滚挤压工艺参数与 42CrMo 钢表层性能之间的指数回归预测模型,如式 (1) 所示,硬度 H 和残余压应力 σ 表达式与 R_a 一致。

$$R_a = Cn^b f^d A^u F^z \quad (1)$$

式中: R_a 为表面粗糙度; C 为常数项; b 、 d 、 u 、 z 分别为工件转速 n 、进给速度 f 、振幅 A 、静压力 F 的指数。

将式 (1) 左右两边同时求对数,如式 (2) 所示。

$$\lg R_a = \lg C + b \lg n + d \lg f + u \lg A + z \lg F \quad (2)$$

令 $y = \lg R_a$, $m = \lg C$, $x_1 = \lg n$, $x_2 = \lg f$, $x_3 = \lg A$, $x_4 = \lg F$, 则式 (2) 可转化为多元线性回归方程,线性化处理后的结果如式 (3) 所示。

$$y = m + bx_1 + dx_2 + ux_3 + zx_4 \quad (3)$$

在构建表面粗糙度的指数回归预测模型时,通过 Minitab 软件对式 (3) 进行多元线性回归分析,结果如式 (4) 所示。

$$R_a = 10^{-0.9600} n^{0.16109} f^{0.05848} A^{0.00738} F^{0.07757} \quad (4)$$

同理,可得硬度 H 与残余压应力 σ 的指数回归预测模型,如式 (5) 和式 (6) 所示。

$$H = 10^{2.79081} n^{-0.00391} f^{-0.00206} A^{0.02841} F^{0.01295} \quad (5)$$

$$\sigma = 10^{3.0426} n^{-0.15534} f^{-0.02963} A^{0.12685} F^{0.06935} \quad (6)$$

2.2 模型分析

由于超声滚挤压加工轴承套圈表层性能的多元非线性指数回归模型是一种经验公式,因此,必须结合正交试验值来对指数回归模型进行拟合计算。为验证超声滚挤压轴承套圈表层性能的指数回归预测模型的可信度与精确度,可以运用方差分析法对模型进行验证。在方差分析法中,本文以 M 表示方差分析中的统计量,可置信水平 P 值代表对一个模型的可信程度, P 值越低表明该模型的结果可信程度越高,通常情况下 P 值低于 0.05 即被当作是可以接受的误差情况。根据这种方法,基于正交试验结果对表层性能指数回归预测模型分别进行方差分析,预测模型的方差分析最终结果如表 4 所示。可以看出,表面粗糙度、残余压应力和硬度的指数回归预测模型 M 值分别为 453.98、239.62 和 222.37, P 值均低于 0.0001。结果表明:表层性能和工艺参数之间的相关性可用指数回归方法建立的预测模型来反映,验证了该指数回归预测模型的可靠性。

表 4 表层性能方差分析

Table 4 Variance analysis for surface performance

表层性能	来源	自由度	平方和	均方	M 值	P 值
表面粗糙度/ μm	回归模型	4	0.047202	0.011801	453.98	<0.0001
	误差	20	0.000520	0.000026	—	—
	总和	24	0.047722	—	—	—
残余压应力/MPa	回归模型	4	0.063896	0.015974	239.62	<0.0001
	误差	20	0.001333	0.000067	—	—
	总和	24	0.065229	—	—	—
硬度/HV	回归模型	4	0.001489	0.000372	222.37	<0.0001
	误差	20	0.000033	0.000002	—	—
	总和	24	0.001523	—	—	—

3 基于多目标 FAST 算法的多目标优化

3.1 多目标 FAST 算法

FAST (Features from Accelerated Segment Test) 算法被初步尝试用于求解多目标问题,作为优化工具帮助确定影响产品性能的关键工艺参数,而指数回归预测模型则用来评估这些参数对产品性能的具体影响,两者相结合以达到工艺参数优化的目的。在多目标 FAST 算法中,利用 Pareto 优势的理论概念来求解多目标问题,多目标 FAST 算法基于对角的特征检测,得到的结果更加快速和准确。与传统算法相比,多目标 FAST 算法最突出的优点为计算效率高、优化结果可靠。因此,本文对超声滚挤压表层性能指数回归预测模型进行多目标优化,并采用多目标 FAST 算法。

3.2 算法步骤

多目标 FAST 算法是一种专门针对多目标优化问题的启发式算法,其主要理念是将快速非支配排序和进化算法相融合,以解决多目标优化问题。

图 3 为多目标 FAST 算法的流程,具体步骤如下。

(1) 初始化种群,创建初始的解决方案个体,表示为 x_i , 其中下角标 i 表示个体的索引。

(2) 计算目标函数值,对于每个个体 x_i , 计算多个目标函数的值。这些目标函数表示为 $f_j(x_i)$, 其中下角标 j 表示目标函数的索引,可以有多个目标函数,通常需要最小化或最大化的不同目标。

(3) 建立 Pareto 最优集合,通过比较个体之间的目标函数值,确定哪些解在某些目标上优于其他解,从而创建 Pareto 最优集合。 x_i 在所有目标函数上不被解 x_j 支配,其中 $j \neq i$, 即: $f_j(x_i) \leq f_j(x_j)$

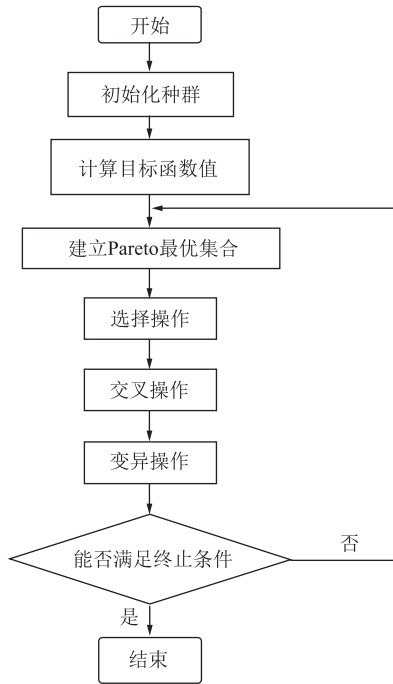


图3 多目标 FAST 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of multi-objective FAST algorithm

$\forall j \neq i$.

(4) 选择操作，从 Pareto 最优集合中挑选出个体，以此来培育下一代。然后执行交叉操作，以通过组合两个或多个个体的信息创建新个体，通过变异操作，新的个体能够增加其多样性。

(5) 确认是否已经达到终止条件：实现最大的迭代次数，若未能达成，则需要对步骤 2 和步骤 3 的迭代重新开始，一直持续至找到 Pareto 的最优解。

3.3 目标函数与约束函数

为了得到更优的轴承套圈表层性能，本文在构建多目标函数的过程中，结合轴承套圈应用环境求取最小表面粗糙度、最大残余压应力以及最大硬度作为优化目标构建多目标函数。具体表达形式如式 (7) 所示。

$$\begin{cases} \min R_a(n, f, A, F) \\ \max \sigma(n, f, A, F) \\ \max H(n, f, A, F) \end{cases} \quad (7)$$

在确保操作安全的前提下，并考虑到加工设备的性能限制，超声滚挤压工艺参数应当按照式 (8) 所界定的范围进行设定。

$$\begin{cases} 140 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \leq n \leq 620 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \\ 12 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \leq f \leq 60 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \\ 5 \mu\text{m} \leq A \leq 25 \mu\text{m} \\ 130 \text{ N} \leq F \leq 600 \text{ N} \end{cases} \quad (8)$$

3.4 优化过程及结果分析

为了满足实际加工过程中的不同需求，进一步探讨金属材料的硬度和残余压应力、表面粗糙度之间的互相平衡关系。通过 modeFRONTIER 软件中的多目标 FAST 算法进行轴承套圈超声滚挤压工艺参数优化研究，获得了相应表层性能的最优取值范围。图 4 为 500 ~ 1000 次迭代后的 Pareto 前沿图优化结果。

由图 4 可知：迭代 500 次时，生成的粒子群体向可行解空间聚集，但不是连续的；迭代 600 次时，与 500 次迭代相比，粒子具有更优的连续性；迭代 700 和 800 次时，与 600 次的迭代结果相比，粒子表现出逐步的收敛性，最优解的数目也具有较大的增长，并且分布更加均匀；迭代 900 次时，粒子具有更好的收敛性，Pareto 前沿图更为光滑，分布更加均匀；迭代 1000 次时，粒子的性能提高并不显著。当目标函数随迭代次数趋于稳定时，随迭代次数的增加，性能并无显著的改善，因此，为加快运算效率，本文选择 900 次作为最优的迭代次数。

由于各项性能指标之间存在相互制约，实现表面粗糙度、残余压应力和硬度的同步最优表现具有一定难度，只能寻求三者之间的相对最优作为最优结果。依据多目标 FAST 算法的优化结果确定了最优参数范围，具体数据可见表 5。

4 试验验证

为验证多目标 FAST 算法对超声滚挤压工艺参数优化后结果的精确性与可靠性，在最优加工范围内随机选出 5 组数据：[140 r · min⁻¹, 12 mm · min⁻¹, 25 μm, 590 N]、[150 r · min⁻¹, 13 mm · min⁻¹, 24 μm, 530 N]、[160 r · min⁻¹, 15 mm · min⁻¹, 23 μm, 500 N]、[170 r · min⁻¹, 14 mm · min⁻¹, 21 μm, 480 N]、[180 r · min⁻¹, 13 mm · min⁻¹, 22 μm, 520 N]。通过对比分析试验结果和预测结果，获得了试验材料各表面性能的试验值与预测值之间的误差，详见表 6。

表面粗糙度的最大误差的绝对值为 8.90%，残余压应力的最大误差的绝对值为 4.13%，硬度的最大误差的绝对值为 4.20%，以上最大误差的绝对值均小于 10%^[16]，验证了多目标 FAST 算法在超声滚挤压加工参数优化的可靠性，对于实际的工程应用领域具有重大的指导意义。

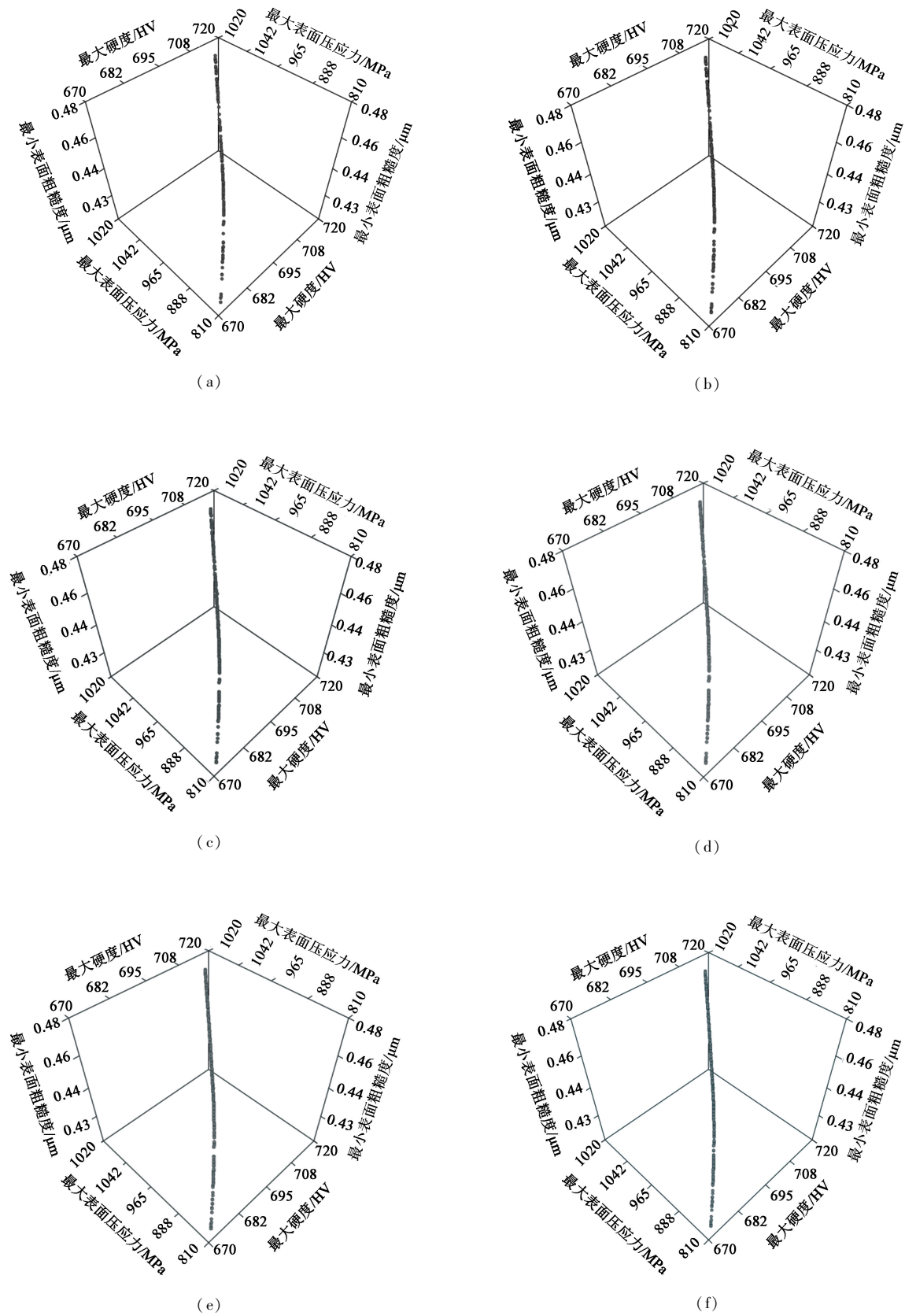


图 4 不同迭代次数下的优化结果

(a) 500 (b) 600 (c) 700 (d) 800 (e) 900 (f) 1000

Fig. 4 Optimization results after different iteration times

表 5 最优参数范围

Table 5 Optimal parameter ranges

参数	转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	进给速度 $f/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	振幅 $A/\mu\text{m}$	静压力 F/N	表面粗糙度 $/\mu\text{m}$	残余压应力 $/\text{MPa}$	硬度 $/\text{HV}$
数值	140~210	12~20	20~25	450~600	0.43~0.49	950~1050	700~720

表 6 试验结果与预测结果对比分析

Table 6 Comparative analysis of test and predicted results

参数	试验值	预测值	误差 $/\%$
表面粗糙度 $/\mu\text{m}$	0.44	0.47	-6.81
	0.47	0.43	8.51
	0.46	0.45	2.17
	0.48	0.46	4.17
	0.45	0.49	-8.90
残余压应力 $/\text{MPa}$	1162	1114	4.13
	1140	1105	3.07
	1110	1101	0.81
	1079	1097	-1.11
	1083	1104	-1.93
硬度 $/\text{HV}$	709	717	-1.12
	690	719	-4.20
	710	716	-0.85
	702	715	-1.85
	721	706	2.64

5 结论

(1) 轴承套圈表层性能的各个评估指标相互制约、相互作用，基于多目标 FAST 算法，优化轴承套圈表层性能的指数回归预测模型，求解出超声滚挤压轴承套圈的最优工艺参数范围。

(2) 经过计算优化后，表面粗糙度、残余压应力和硬度的试验值和预测值的最大误差的绝对值分别为 8.90%、4.13% 和 4.20%，证实多目标 FAST 算法应用于超声滚挤压轴承套圈具有一定的可行性，在实际工程应用中具有重要的指导作用。

参考文献：

[1] 尹龙, 赵波, 郭星晨, 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 research on ultrasonic assisted internal grinding of 40Cr15Mo2VN bearing rings [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32 (10): 1172~1180.

[2] Xu G M, Wang C M, Li Q L, et al. Effects of ultrasonic rolling

on surface performance of 7B85-T6 alloy [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2020, 35 (3): 250~257.

[3] 宋锦春, 贾志强, 张敏鑫. 超声滚压光整加工参数对 45 钢表面粗糙度和硬度的影响 [J]. 制造技术与机床, 2016 (11): 85~89.

Song J C, Jia Z Q, Zhang M X. Influence of ultrasonic rolling and finishing processing parameters on surface roughness and hardness of 45 steel [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016 (11): 85~89.

[4] Zhu X T, Liu P T, Zhang C, et al. Study on surface integrity and fatigue properties of TC4 titanium alloy by surface ultrasonic rolling [J]. Materials, 2023, 16 (2): 485~485.

[5] 石青松, 徐红玉, 王晓强, 等. 42CrMo 钢超声滚挤压力学性能研究及参数优化 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (3): 75~85.

Shi Q S, Xu H Y, Wang X Q, et al. Study on mechanical properties and parameter optimization for 42CrMo steel ultrasonic rolling extrusion [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (3): 75~85.

[6] Ren Z H, Li Z H, Zhou S H, et al. Study on surface property of Ti-6Al-4V titanium alloy by ultrasonic rolling [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2022, 121: 102643.

[7] Huuki J, Laakso V S. Integrity of surfaces finished with ultrasonic burnishing [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2013, 227 (1): 45~53.

[8] 李翔, 吴毅, 尹鸿祥, 等. 表面超声滚压工艺参数对车轴钢表面性能的影响 [J]. 高速铁路新材料, 2022, 1 (1): 113~118.

Li X, Wu Y, Yin H X, et al. Effect of ultrasonic surface rolling processing parameters on surface property of DZ2 axle steel [J]. Advanced Materials of High Speed Railway, 2022, 1 (1): 113~118.

[9] 郑建新, 刘宏伟, 蒋书祥, 等. 7050 铝合金高速二维超声滚压对表面质量的影响 [J]. 金属热处理, 2019, 44 (6): 187~192.

Zheng J X, Liu H W, Jiang S X, et al. Effect of high-speed two-dimensional ultrasonic rolling on surface quality of 7050 aluminum alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44 (6): 187~192.

[10] 黄鹏程, 王燕霜, 程勇杰, 等. 超声滚压 GCr15 表面性能模型建立及工艺参数优化 [J]. 表面技术, 2024, 53 (5): 156~165.

Huang P C, Wang Y S, Cheng Y J, et al. Establishment of surface property model and optimization of process parameters for ultrasonic rolling GCr15 [J]. Surface Technology, 2024, 53

- (5): 156-165.
- [11] 王靖, 曾寿金, 魏青天, 等. 选区激光熔化 Ti6Al4V 梯度多孔结构工艺优化 [J]. 精密成形工程, 2023, 15 (9): 17-27.
- Wang J, Zeng S J, Wei Q T, et al. Process optimization of selective laser melting for Ti6Al4V gradient porous structure [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15 (9): 17-27.
- [12] Gao G F, Wang Y, Zhao B, et al. Multi-objective optimization of processing parameters for ultrasonic surface rolling 12Cr2Ni4A gear steel based on an improved gray correlation analysis [J]. Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, 2022, 6 (1): 165-177.
- [13] 王排岗. 基于 DOE 的超声滚挤压成形表层力学性能形成机理研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2022.
- Wang P G. Study on Formation Mechanism of Surface Mechanical Properties of Ultrasonic Roll Extrusion Based on DOE [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2022.
- [14] 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. Research on Surface Integrity of Bearing Steel by Ultrasonic Roll Extrusion [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2019.
- [15] 付浩然, 徐红玉, 王晓强, 等. 基于 MOABC 算法的超声滚挤压轴承套圈工艺参数优化 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (3): 15-23.
- Fu H R, Xu H Y, Wang X Q, et al. Optimization of process parameters of ultrasonic rolling extrusion for bearing ring based on MOABC algorithm [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (3): 15-23.
- [16] 王浩杰, 王晓强, 朱其萍, 等. 基于模拟退火的超声滚挤压工艺参数多目标优化 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (4): 14-22.
- Wang H J, Wang X Q, Zhu Q P, et al. Multi-objective optimization of ultrasonic rolling extrusion process parameters based on simulated annealing [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (4): 14-22.

《锻压技术》杂志征稿简则

1 征稿范围

《锻压技术》(月刊)于 1958 年创刊,由中国机械总院集团北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会共同主办,是学会会刊。《锻压技术》是全国中文核心期刊,被以下检索系统收录:中文核心期刊要目总览(北京大学)、中国科学引文数据库(CSCD)、中国科技期刊引证报告(核心版, CJKR)、中国学术期刊文摘数据库(核心版, CSAD-C)、中国学术期刊文摘数据库(英文版)、中国学术期刊综合评价数据库、中国学术期刊(光盘版)、中国知网、万方数字化期刊群、RCCSE 中国核心学术期刊、美国剑桥科学文摘(CSA)、美国化学文摘(CA)、日本科学技术振兴机构数据库(JST)、俄罗斯文摘杂志(AJ)等。

《锻压技术》主要报道金属塑性成形理论、工艺与装备,模具设计与制造技术、材料与成形性能、工业加热技术及设备、摩擦与润滑、测试技术、计算机应用、标准等方面的科研成果、实验研究、现场经验、技术革新等,同时,还辟有综合评述、专题讲座及行业信息等栏目。

2 来稿格式及要求

(1) 摘要选用小 5 号字,正文选用 5 号字,单倍行距;页面设置选用 A4 纸,上下左右页边距均选用 2 cm。

(2) 格式(按下列顺序排列,要求内容齐全)

● 论文的中文题目(不超过 30 字)、作者姓名、单位的全称(应包括院、系、科室等二级单位)、省名、城市名、邮政编码。

● 中文摘要:约 300 字,主要表达文章中有创新意义的内容,应含有研究目的、过程和方法、结果、结论 4 个层次;摘要中不要重复题目中已经表述过的信息,也不使用评论性语言。

● 中文关键词(5 个以上),中图分类号 1~2 个(参见《中国图书馆分类法(第四版)》一书)。

● 论文的英文题目、作者姓名(如 Zhang Yahong)、单位的全称(不得用缩写,应包括院、系、科室等二级单位)、城市名、邮政编码、国家名。

● 英文摘要:务必与中文摘要完全对应;摘要中涉及文章研究、阐述、设计、试验等内容时宜选用过去时、被动语态撰写(例

如: A die was designed……),结果、结论宜选用一般现在时撰写(例如: The results show that……),不要使用“ The paper studies……”或“ The author studies……”这类语句。

● 英文关键词(5 个以上),要求与中文关键词完全对应。

● 首页页脚需注明以下内容:

收稿日期:年-月-日(例如: 2007-01-01);修订日期:此项可空缺,由编辑部填写

基金项目:省部以上基金资助项目及批准号(此项非常重要,请勿遗漏)

作者简介:第一作者姓名(出生年—),性别,学位,职称

E-mail: xx@xx

通讯作者:姓名(出生年—),性别,学位,职称(第一作者不是通讯作者时,请增加此项。)

E-mail: xx@xx

● 正文的“引言”部分不编号,亦不列出“引言”二字,直接陈述即可;一级标题用“1, 2, ……”排序;二级标题用“1.1, 1.2, ……”, 2.1, 2.2, ……排序;三级标题用“1.1.1, 1.1.2, ……”排序。

● 图片、表格、公式、定理等的序号均要按其在正文中引用、的顺序,分别用阿拉伯数字顺序编码,例如:图 1、图 2……,表 1、表 2……。

● 图片、表格应随文给出,先见文后见图、表。

● 图题(包括(a)、(b)等分图题)、表题要求同时用中、英文标注。

● 照片或灰度图应反差适当,鲜明可见;金相照片放大倍数均用比例尺表示,如 $5\mu\text{m}$ 。

● 双栏排图片的宽度应控制在 7.8 cm 左右;通栏排图片宽度应控制在 16 cm 左右。

● 表格使用三线表,必要时可加横线,但一般不得有竖线;表格的宽度最好设计成 25 个汉字(相当于 48 个字符)以内;表中所有文字一律左齐。

(下转第 96 页)