

# 超声滚压 GCr15 表面性能模型 建立及工艺参数优化

黄鹏程<sup>1</sup>, 王燕霜<sup>1\*</sup>, 程勇杰<sup>1</sup>, 王高峰<sup>2</sup>, 袁锡铭<sup>3</sup>

(1. 齐鲁工业大学(山东省科学院) 机械工程学院, 济南 250353; 2. 洛阳轴研科技有限公司, 河南 洛阳 471039; 3. 山东金帝精密机械科技股份有限公司, 山东 聊城 252035)

**摘要:** **目的** 基于超声滚压后 GCr15 试样表面粗糙度和表面硬度与工艺参数之间的数学模型, 获取超声滚压 GCr15 的最佳工艺参数。**方法** 首先, 通过单因素试验筛选 4 个工艺参数的取值范围; 其次, 建立基于响应曲面的超声滚压 GCr15 表面硬度及表面粗糙度预测模型; 再次, 基于遗传算法对 2 个预测模型进行多目标复合优化, 得到最佳工艺参数; 最后, 针对多目标优化结果进行试验验证。**结果** 在超声滚压处理 GCr15 时, 滚压静压力及滚压次数对试样表面硬度及表面粗糙度的影响极显著, 转速的影响不显著; 进给量对表面硬度有显著影响, 对表面粗糙度的影响不显著。粗糙度模型受到静压力和滚压次数双因子交互作用的影响, 硬度模型不受交互作用的影响。基于遗传算法进行多目标优化得到的最佳工艺参数如下: 转速为 207 r/min, 进给量为 0.34 mm/r, 静压力为 0.49 MPa, 滚压次数为 3。在最佳工艺参数下得到试样的最低表面粗糙度为 0.34  $\mu\text{m}$ 、最高硬度为 60.5HRC。**结论** 基于响应曲面法的 GCr15 超声滚压表面性能预测模型准确有效。采用最优工艺参数能够获得最优表面质量。

**关键词:** 超声滚压; 轴承钢; 响应曲面法; Box-Behnken 设计; 遗传算法; 工艺参数优化

**中图分类号:** TG176 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)05-0156-10

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.05.016

## Establishment of Surface Property Model and Optimization of Process Parameters for Ultrasonic Rolling GCr15

HUANG Pengcheng<sup>1</sup>, WANG Yanshuang<sup>1\*</sup>, CHENG Yongjie<sup>1</sup>, WANG Gaofeng<sup>2</sup>, YUAN Ximing<sup>3</sup>

(1. Mechanical Engineering Department, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, China; 2. Luoyang Bearing Research Technology Co., Ltd., Henan Luoyang 471039, China; 3. Shandong Jindi Precision Machinery Technology Co., Ltd., Shandong Liaocheng 252035, China)

**ABSTRACT:** In recent years, in order to improve the surface quality of bearings, there has been a research on the surface ultrasonic rolling technology of bearing rings and various samples made of GCr15 bearing steel in bearing manufacturing. In these studies, the analysis of the impact of rolling parameters on rolling results mostly focuses on a single surface performance index. There is a lack of analysis and summary of the impact of ultrasonic rolling parameters on the comprehensive surface

收稿日期: 2023-03-13; 修订日期: 2023-05-20

Received: 2023-03-13; Revised: 2023-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(52075274); 山东省重大创新工程(2022CXGC010304)

Fund: National Natural Science Foundation of China(52075274); Major Innovation Project of Shandong Province(2022CXGC010304)

引文格式: 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 Pengcheng, WANG Yanshuang, CHENG Yongjie, et al. Establishment of Surface Property Model and Optimization of Process Parameters for Ultrasonic Rolling GCr15[J]. Surface Technology, 2024, 53(5): 156-165.

\*通信作者 (Corresponding author)

quality of bearings. This paper aims to analyze the impact of rolling process parameters during ultrasonic rolling on the dual response of surface roughness and surface hardness of GCr15 specimens. Through genetic response composite optimization, the optimal combination of process parameters for ultrasonic surface rolling of GCr15 specimens was obtained. In this article, first, a single factor test was used to determine the value range for multiple impact factors. Secondly, through response surface modeling, two mathematical models of ultrasonic rolling process parameters and surface roughness and hardness of GCr15 specimens were obtained for the first time. After performing variance analysis on the mathematical models, the significance ranking of the two mathematical models and the process parameters for the two response models was obtained. Finally, this paper applied genetic algorithm to multi-objective composite optimization of two mathematical models for the first time, and obtained the optimal combination of rolling process parameters based on the two mathematical models. At the same time, this paper conducted validation tests on the parameters obtained, confirming the reliability of the optimization results. After the analysis in this article, the main results were as follows: The expressions of two second-order mathematical prediction models for surface roughness and surface hardness were determined, and the maximum error between the predicted values of the two models and the actual measured values was 9.7%. It was proved that the two models were accurate and effective, and could be used to predict the surface roughness and surface hardness of GCr15 samples after ultrasonic rolling treatment. The effects of ultrasonic rolling process parameters on the surface quality of GCr15 samples were obtained as follows: the static rolling pressure and rolling times had a significant impact on surface hardness and roughness; Feed rate had a significant impact on surface hardness, but had no significant impact on surface roughness; The effect of rotational speed on both responses was not significant. The roughness model was affected by the interaction of static pressure and rolling times, while the hardness model was not affected by the interaction of these two factors. The optimal process parameters obtained by multi-objective optimization based on genetic algorithm were as follows: rotational speed=207 r/min, feed rate=0.34 mm/r, static pressure=0.49 MPa, and rolling times=3 times. After verification tests, it was confirmed that the minimum surface roughness of the sample was 0.34 under the optimal parameters  $\mu$ . The maximum hardness was 60.5HRC. According to the process parameters obtained by genetic algorithm, surface ultrasonic rolling of GCr15 sample could obtain the optimal surface in the comparative test. This article has important significance for the application of ultrasonic rolling technology in the optimization of bearing surface quality, and can be used as a reference for the rolling process parameters when ultrasonic rolling bearing surfaces.

**KEY WORDS:** ultrasonic rolling; bearing steel; response surface method; Box-Behnken design; genetic algorithm; optimization of process parameters

轴承作为重要的基础零部件,在工业领域得到了广泛应用。轴承套圈表面质量的提升对保证机器稳定运转、延长机器使用寿命有着重要意义。轴承常见的失效形式有磨损、疲劳及断裂<sup>[1-3]</sup>。对轴承套圈表面进行强化处理是减缓轴承失效、保障轴承正常运转的必要措施。

传统轴承制造工艺主要通过热处理+磨削的工艺组合提升轴承的表面质量。热处理可以消除轴承套圈内应力,增强其硬度,磨削工艺可以完善轴承的形位精度<sup>[4]</sup>。但热处理后的材料容易产生表面脱碳和尺寸变形等现象;磨削可能导致表面烧伤和残余拉应力提升<sup>[5]</sup>。其他常用的表面强化技术有喷丸、激光冲击和涂层等。喷丸加工能够使材料表面形成残余压应力层,提升表面硬度<sup>[6]</sup>。但喷丸处理后的工件表面粗糙度会增大,减小表面粗糙度需要光整处理<sup>[7-8]</sup>。激光冲击和涂层可以提升表面性能,提高材料耐磨性<sup>[9]</sup>。但是,当涂层与基体的结合强度达不到理想状态时容易产生剥落<sup>[10-11]</sup>。上述现象限制了表面强化技术在轴承实际精加工领域的进一步应用<sup>[12-15]</sup>。

相比于上述表面强化手段,超声滚压技术因其独特的加工原理在轴承等较硬材料的表面处理中具有良好的应用前景。首先,因为超声滚压过程中的滚压头受到静压力、超声振动和连续滚压的共同作用,所以试样表面在滚压头的复合冲击下能够发生更加均匀的表面变形,从而细化晶粒组织、增加微观晶粒位错、提高被滚压工件的表面完整性<sup>[16]</sup>。其次,滚压时超声振动系统的运动学能量可以转化为塑性变形能量存储在处理过的表面上,由此产生的塑性变形会产生应变硬化现象。此外,在静态挤压和动态冲击的共同作用下试样表面产生的强化层和材料本身连续过渡,所以被处理试样没有任何剥落,其表面光洁度和外观可以得到较好的保证。

超声表面滚压技术因其表面强化效果好、表面加工质量高及对工件的损伤较小等一系列优点<sup>[17]</sup>,近年来在不同的领域得到了广泛研究与应用<sup>[18-19]</sup>。刘森忠<sup>[20]</sup>对 GCr15 试样进行了超声表面滚压加工,发现经过超声滚压处理的试样晶粒细化明显,硬度与粗糙度等表面性能指标大幅提升。Meng 等<sup>[21]</sup>分析了

超声滚压对 AISI 1045 钢摩擦磨损性能的影响,发现超声滚压处理后的材料摩擦因数与磨损率均得到优化。Liu 等<sup>[22]</sup>研究了超声滚压对体心立方结构 TB8 合金微观组织、残余应力和表面形貌演变的影响,研究表明,经过超声滚压处理后, TB8 合金的微观结构、压缩残余应力均得到了优化,试样疲劳性能得到了改善。一部分学者针对轴承表面超声滚压工艺参数的研究也取得了一定进展。崔凤奎等<sup>[23]</sup>对轴承套圈表面进行了超声滚压处理,通过 BP 神经网络模型与响应曲面模型分析了滚压过程中的工艺参数对轴承套圈表面粗糙度的影响规律。王晓强等<sup>[24]</sup>通过 CCD 设计建立了超声滚压处理轴承套圈的粗糙度预测模型。

现有针对超声滚压工艺参数的研究大部分只考虑了工艺参数对试样单响应的影响,并以此建立了各种数学模型进行分析。鲜有学者针对超声滚压处理后轴承表面的多个响应进行建模分析和多目标优化研究。基于此,建立轴承超声滚压处理的表面完整性多响应预测模型、分析超声滚压工艺参数与轴承表面多响应目标之间的规律并进行多目标优化,对通过调节超声滚压参数控制滚压过程中的轴承表面质量具有重要意义。

本文以轴承表面性能提升为研究背景,采用响应曲面法,以试样表面粗糙度  $Ra$  和试样表面硬度  $H$  为响应变量,以滚压工艺参数中的转速  $n$ 、进给量  $f$ 、静压力  $p$  和滚压次数  $T$  为影响因子,分别建立了关于表面粗糙度  $Ra$  和表面硬度  $H$  的二阶响应预测模型。通过引入方差分析,确定了进行超声表面滚压处理时不同因素对不同响应结果的影响程度并进行了排序。其次,本文通过遗传算法对 2 个预测模型进行了多目标复合优化,得到了在轴承表面进行超声滚压加工的最佳工艺参数,为轴承的超声滚压加工提供了可靠的数据支撑。

## 1 试验

### 1.1 超声滚压加工设备

超声滚压装置如图 1 所示。超声滚压设备主要由刀具滚压部分和车床驱动部分组成。车床驱动部分的主体为数控车床,它通过三爪卡盘固定和旋转工件。刀具滚压部分被安装在车床的刀架上,它主要包括内置于控制柜的超声波发生器、压电换能器、变幅杆和滚压头。

超声滚压原理如图 2 所示,车床主轴带动工件实现匀速转动,滚压头将静压力和超声冲击力产生的复合力传递到工件表面,并在刀架进给力推动下以滚动的方式完成整个平面的强化滚压处理。滚压头的反复滚动使材料发生了塑性变形,滚压运动形成的累积应变细化了变形层组织,形成了表面强化层,并在表层形成了残余压应力,提高了工件的疲劳寿命。

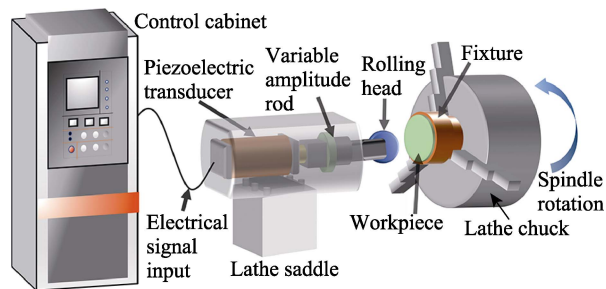


图 1 超声滚压装置

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic rolling device

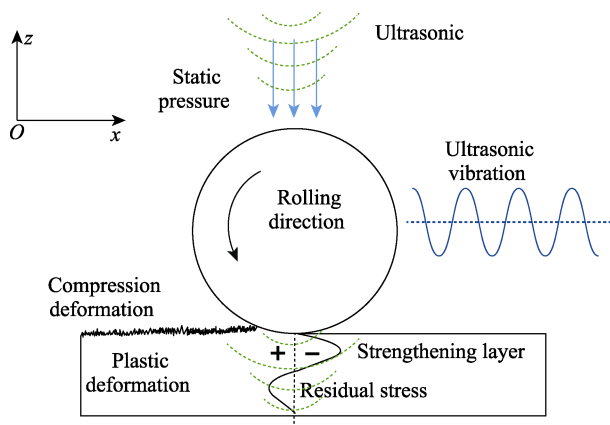


图 2 超声滚压原理

Fig.2 Schematic diagram of rolling mechanism

### 1.2 材料特性

本文研究的轴承钢 GCr15 的化学成分如表 1 所示。GCr15 棒料经过锻造、退火、粗车、淬火、回火和精车后再进行磨削加工。磨削后试样的直径应保证为  $(24 \pm 0.02)$  mm,厚度为  $(7.88 \pm 0.05)$  mm,试样的平面度和平行度均为 0.005 mm,试样的表面粗糙度  $Ra$  为 0.8  $\mu$ m,表面硬度为 57HRC。

表 1 GCr15 钢的主要化学成分

Tab.1 Main chemical composition of GCr15 steel

wt. %				
C	Mn	Si	S	Cr
0.95-1.05	0.20-0.40	0.15-0.35	$\leq 0.020$	1.30-1.65

试样表面硬度使用 HR-150AS 洛氏硬度计(广东中特)测量。试样表面粗糙度使用 SJ-210 表面粗糙度仪(日本三丰)测量。使用 Contour Elite K 材料表面三维织构形貌采集系统(德国布鲁克)进行试样表面三维微观形貌采集。在经过试样表面圆心的直径线上设置 5 个数据采集点,每个数据点间隔 4 mm,用于采集试样表面硬度和粗糙度数据,每点采集 3 组数据。文中用于试验的数据均为多点平均值。

### 1.3 单因素试验

本文选取超声滚压过程中的转速  $n$ 、进给量  $f$ 、

静压力  $p$  和滚压次数  $T$  4 个关键工艺参数作为研究对象。通过单因素试验确定每个试验因子的取值范围。试验时保证其他工艺参数不变。

4 个影响因子对试样表面粗糙度和表面硬度的单因素试验结果如图 3 所示。可知, 所选的 4 个工艺参数对表面粗糙度和硬度的单因素影响较为明显, 且影响趋势均呈现出非线性波动状态。随着单因素变量的增大, 表面粗糙度先下降, 在达到最低值后呈现出上

升趋势; 表面硬度值随着变量的增大先上升到最高值后再下降。

结合每个单因素变量参数区间对表面粗糙度最低值和表面硬度最高值的影响, 在 4 个参数中各自选取了具有较优响应值的代表性区域作为响应曲面试验的因子取值域。响应曲面分析的因子取值区间如下: 转速  $n$  为 100~300 r/min, 进给量  $f$  为 0.1~0.4 mm/r, 静压力  $p$  为 0.2~0.7 MPa, 滚压次数  $T$  为 1~5。

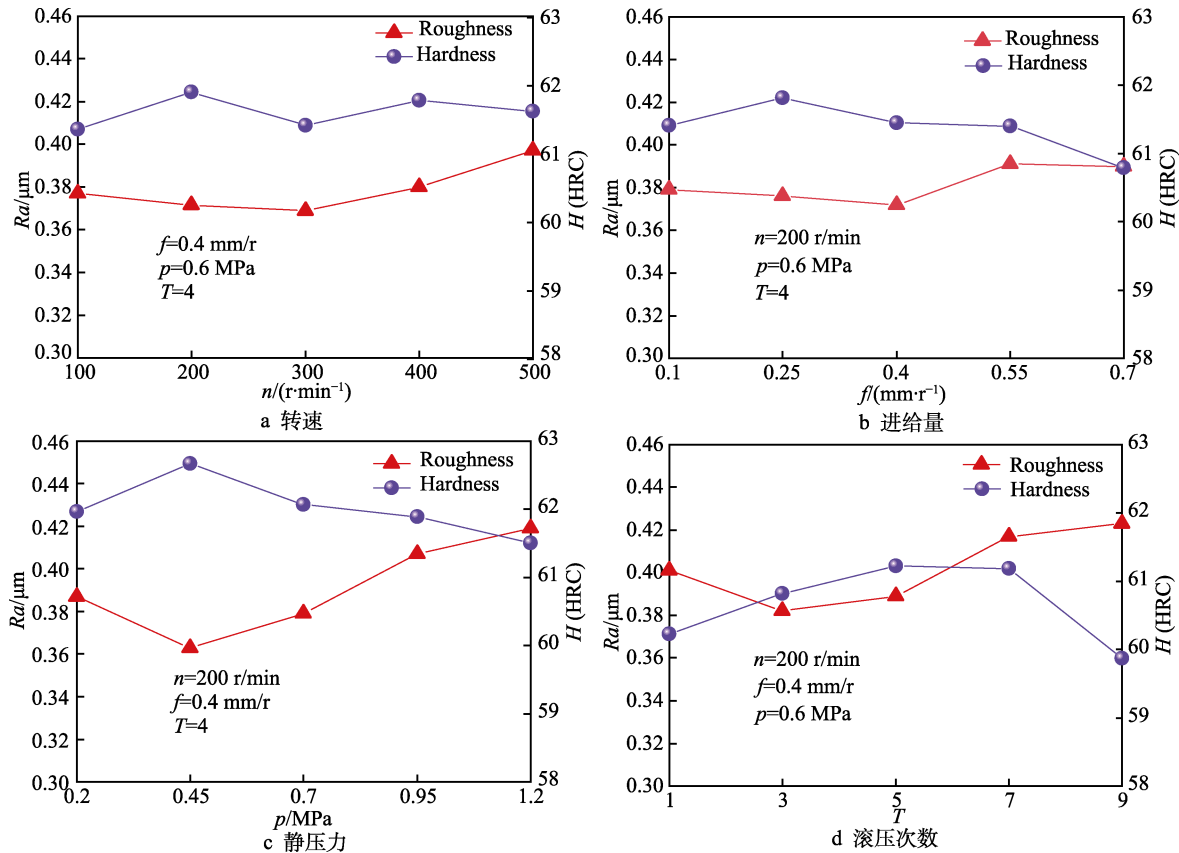


图 3 单因素对硬度和粗糙度的影响  
Fig.3 Analysis of effect of single factor on hardness and roughness: a) rotational speed; b) feed; c) static pressure; d) rolling number

1.4 响应曲面试验

本文的响应曲面法 (Response Surface Methodology, RSM) 采用 BBD 设计方案 (Box-Behnken Design) 进行试验设计<sup>[25]</sup>。根据 BBD 原则<sup>[26]</sup>, 将上述 4 个关键工艺参数设为试验自变量, 将试样表面粗糙度  $Ra$  和试样表面硬度  $H$  设为响应曲面试验的响应值。设计四因素三水平的仿真方案如表 2 所示。

表 2 响应曲面不同因素与水平  
Tab.2 Different factors and levels of response surface

Levels	$n/(r \cdot min^{-1})$	$f/(mm \cdot r^{-1})$	$p/MPa$	$T$
-1	100	0.1	0.2	1
0	200	0.25	0.45	3
1	300	0.4	0.7	5

根据 BBD 设计方案得到 27 组工艺参数组合及结果, 如表 3 所示。

2 结果讨论

2.1 模型建立及方差分析

为了确定 4 个工艺参数与 2 个响应之间的关系, 分析超声滚压过程中滚压工艺参数对试样表面粗糙度  $Ra$  及表面硬度  $H$  的影响。采用响应曲面法建立的二阶数学模型如式 (1) 所示。

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

式中:  $y$  和  $x$  分别为响应值和设计变量;  $\beta_0$ 、 $\beta_j$ 、 $\beta_{jj}$  和  $\beta_{ij}$  分别为常数项系数、线性项系数、二次项系



表 3 BBD 试验方案及试验结果  
Tab.3 BBD test scheme and test results

Order number	Factor value				Respond	
	$n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$f/(\text{mm}\cdot\text{r}^{-1})$	$p/\text{MPa}$	$T$	$H$ (HRC)	$Ra/\mu\text{m}$
1	200	0.25	0.2	1	57.69	0.497
2	200	0.25	0.45	3	64.02	0.296
3	200	0.25	0.2	5	57.76	0.403
4	100	0.25	0.7	3	59.91	0.363
5	100	0.25	0.2	3	57.79	0.476
6	200	0.1	0.2	3	58.31	0.437
7	100	0.25	0.45	1	61.39	0.401
8	200	0.1	0.45	5	62.73	0.330
9	300	0.25	0.45	1	61.67	0.386
10	300	0.25	0.7	3	60.19	0.361
11	200	0.4	0.7	3	61.11	0.345
12	100	0.25	0.45	5	62.33	0.332
13	200	0.1	0.45	1	62.08	0.378
14	300	0.4	0.45	3	63.45	0.316
15	100	0.4	0.45	3	63.02	0.314
16	200	0.25	0.45	3	63.86	0.309
17	300	0.1	0.45	3	63.03	0.310
18	300	0.25	0.2	3	57.89	0.463
19	200	0.25	0.7	5	59.62	0.367
20	100	0.1	0.45	3	62.91	0.317
21	200	0.1	0.7	3	60.25	0.352
22	200	0.25	0.7	1	59.23	0.379
23	200	0.4	0.45	5	62.86	0.327
24	200	0.4	0.2	3	58.53	0.435
25	200	0.4	0.45	1	62.27	0.371
26	200	0.25	0.45	3	63.76	0.310
27	300	0.25	0.45	5	62.66	0.320

数和交互项系数。

根据 RSM 原则，将影响不显著的因子剔除后，试样表面粗糙度  $Ra$  与表面硬度  $H$  的响应值预测模型分别如式（2）和式（3）所示。

$$Ra = 0.906\,2 - 0.000\,736n - 1.489\,5p - 0.083\,22T + 0.000\,002n^2 + 1.316\,9p^2 + 0.008\,48T^2 + 0.041pT \quad (2)$$

$$H = 42.424 + 0.026\,82n + 1.072f + 63.64p + 1.850T - 0.000\,064n^2 - 66.14p^2 - 0.283\,1T^2 \quad (3)$$

为了检验各参数及模型在响应值上的显著性，对  $Ra$  和  $H$  的测量值进行方差分析（ANOVA）。在方差分析中，使用  $P$  值进行显著性检验：如果某项  $P$  值  $\leq 0.000\,1$ ，则该项为高度显著项；若某项  $P$  值  $\leq 0.05$ ，则该项为显著项。使用  $F$  值进行方差检验，分析各因素对响应值的影响程度。某因素  $F$  值越高，表明该因素对响应值的影响越大。去除影响不显著的因子后，表面粗糙度  $Ra$  和表面硬度  $H$  的回归方程的方差分析统计结果分别如表 4 和表 5 所示。

表 4 粗糙度  $Ra$  模型方差分析  
Tab.4 Variance analysis of roughness  $Ra$  model

Source	Free degree	SS(Adj)	MS(Adj)	F-value	P-value
Model	7	0.077 779	0.011 111	75.25	<0.000 1
Linear	3	0.034 086	0.011 362	76.95	<0.000 1
$p$	1	0.024 661	0.024 661	167.02	<0.000 1
$T$	1	0.009 241	0.009 241	62.58	<0.000 1
Square	3	0.042 012	0.014 004	94.84	<0.000 1
$n^2$	1	0.001 823	0.001 823	12.35	0.002
$p^2$	1	0.040 645	0.040 645	275.27	<0.000 1
$T^2$	1	0.006 908	0.006 908	46.78	<0.000 1
Interaction	1	0.001 681	0.001 681	11.38	0.003
$p*T$	1	0.001 681	0.001 681	11.38	0.003
Error	19	0.002 805	0.000 148		
Incoherence	17	0.002 683	0.000 158	2.59	0.315
Pure error	2	0.000 122	0.000 061		
Amount to	26	0.080 585			
Model summary		$R^2=96.52\%$	$R^2_{\text{adj}}=95.24\%$		

表 5 硬度  $H$  模型方差分析  
Tab.5 Variance analysis of hardness  $H$  model

Source	Free degree	SS(Adj)	MS(Adj)	F-value	P-value
Model	7	118.018	16.860	346.91	<0.000 1
Linear	4	14.296	3.574	73.54	<0.000 1
$f$	1	0.310	0.310	6.39	0.021
$p$	1	12.690	12.690	261.11	<0.000 1
$T$	1	1.098	1.098	22.59	<0.000 1
Square	3	103.722	34.574	711.41	<0.000 1
$n^2$	1	2.446	2.446	50.33	<0.000 1
$p^2$	1	102.514	102.514	2109.35	<0.000 1
$T^2$	1	7.692	7.692	158.26	<0.000 1
Error	19	0.923	0.049		
Incoherence	17	0.889	0.052	3.04	0.276
Pure error	2	0.034	0.017		
Amount to	26	118.942			
Model summary		$R^2=99.22\%$	$R^2_{\text{adj}}=98.94\%$		

由表 4 和表 5 可知， $Ra$  回归模型和  $H$  回归模型均极具显著性。两模型失拟项  $P$  值均  $>0.05$ ，故两模型可信；两模型中的线性项、平方项对试样表面粗糙度和表面硬度都具有极其显著的影响。 $Ra$  模型交互项对试样表面粗糙度具有显著影响， $H$  模型交互项对试样表面硬度无显著影响。此外，2 个回归模型的误差占总误差的百分比（ $R^2$ ）均大于 85%；调整后的误差占总误差的百分比（ $R^2_{\text{adj}}$ ）均小于  $R^2$  且非常相近，故两模型的预测值与试验值具有较高的相关性且表面去除非显著项后的模型拟合效果得到优化。

考虑最大效应到最小效应的标准化效应的绝对值生成的 Pareto 图如图 4 和图 5 所示, 结合表 4 和表 5 可知: 静压力  $p$ 、滚压次数  $T$  以及二次项  $p^2$  和  $T^2$  对试样表面粗糙度和表面硬度的影响均极具显著性; 二次项  $n^2$  对表面硬度的影响极其显著, 对表面粗糙度的影响较小, 为显著影响状态。交互项  $p*T$  只对表面粗糙度有显著影响。试验自变量中的单因素转速  $n$  对表面粗糙度和表面硬度的影响均不显著; 进给量  $f$  对硬度有显著影响, 对粗糙度无显著影响。 $Ra$  模型中各显著影响因子按对表面粗糙度的影响程度由大到小的顺序依次为  $p^2$ 、 $p$ 、 $T$ 、 $T^2$ 、 $n^2$ 、 $p*T$ ;  $H$  模型中各显著影响因子按对硬度的影响程度由大到小的顺序依次为  $p^2$ 、 $p$ 、 $T^2$ 、 $n^2$ 、 $T$ 、 $f$ 。

对比 2 个模型的方差分析结果可知: 超声滚压时的静压力与滚压次数对试样表面硬度和表面粗糙度的影响均极为显著; 进给量在超声滚压过程中对表面硬度值有一定的影响, 对表面粗糙度的影响不显著; 转速在 2 个模型中对 2 个不同响应值的影响均不显著。此外,  $H$  模型交互项对硬度值的影响不显著, 这表明静压力和滚压次数这 2 个单因素作为交互项出现后对表面粗糙度的影响大于对表面硬度的影响, 且这 2 个因素交互项对表面硬度的影响较小。

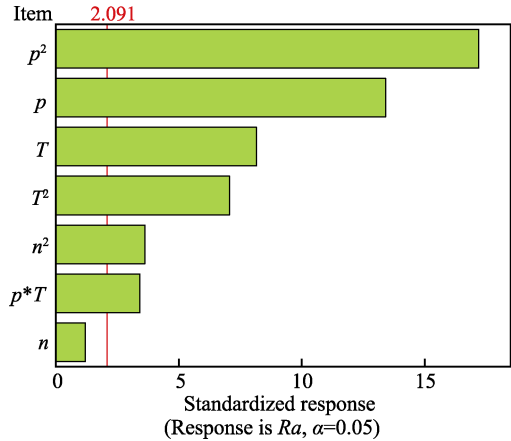


图 4  $Ra$  模型标准化效应的 Pareto 图  
Fig.4 Pareto diagram of standardization effect of  $Ra$  model

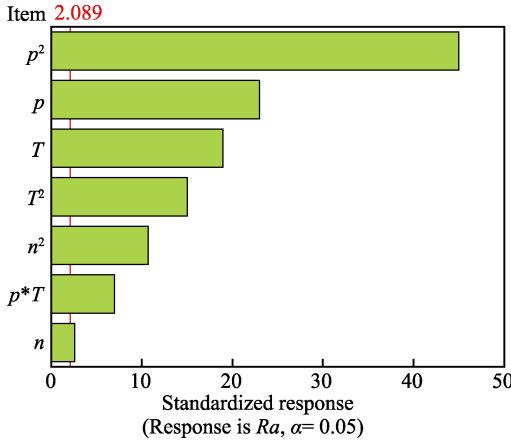


图 5  $H$  模型标准化效应的 Pareto 图  
Fig.5 Pareto diagram of normalization effect of  $H$  model

2.2 交互项响应曲面

为了分析  $p*T$  交互作用对表面粗糙度的影响趋势, 建立了  $Ra$  模型中  $p*T$  交互因子的三维响应曲面图及等高线图, 如图 6 所示。三维曲面图的曲线陡峭程度反映了交互因子之间的交互程度, 三维曲面越陡峭说明因子交互作用越强烈。从图 6 可以看出, 当静压力为 0.2~0.4 MPa 时, 表面粗糙度  $Ra$  随着静压力  $p$  的增大而降低; 当静压力  $p$  为 0.6~0.7 MPa 时, 表面粗糙度  $Ra$  随着静压力  $p$  的增大而提高; 当静压力  $p$  为 0.4~0.6 MPa 时, 表面粗糙度  $Ra$  出现最小值。与静压力相似, 当滚压次数为中位区间时, 表面粗糙度最低。此外, 图 6 中的响应曲面在静压力  $p$  方向的斜率大于滚压次数  $T$  方向的斜率, 这也证实了静压力对表面粗糙度的影响最大。

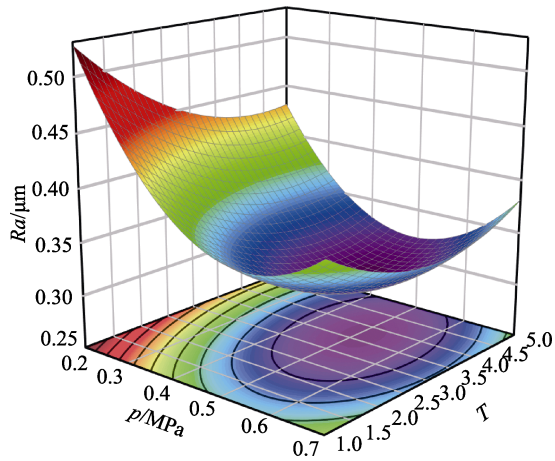


图 6 表面粗糙度相对于静压力和滚压次数的  
响应曲面及等高线图  
Fig.6 Response surface and contour map of surface  
roughness to static pressure and rolling times

图 6 底部等高线图 中的等高线形状反映了交互效应的高低, 椭圆形等高线表示两因子具有强烈的交互效应, 圆形则表明两因子的交互效应不显著。通过图 6 可以看到静压力与滚压次数之间存在明显的交互作用。

2.3 基于遗传算法的多响应目标复合优化

遗传算法是模拟生物进化过程的一种随机搜索算法<sup>[27]</sup>, 其原理如下: 根据生物进化过程中的优胜劣汰和适者生存原理, 经过初始种群的迭代演化进行个体的选择、交叉和变异, 最终生成目标问题的最优解<sup>[28]</sup>。遗传算法因具有较强的全局寻优能力和较快的求解速度而被广泛用于多目标的优化过程<sup>[29-30]</sup>。

本文涉及 的表面性能优化以 2.1 节得到的表面粗糙度和表面硬度数学模型为目标函数; 以转速、进给量、静压力和加工次数为变量; 以单因素试验得到的变量范围为变量的取值域, 得到 GCr15 轴承钢的滚压参数优化的数学描述, 如式 (4) 所示。

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \min Ra \\ \max H \end{pmatrix} \\ \text{s.t. } x = \begin{cases} (x^1 x^2 x^3 x^4) | x^1 \in [100, 300] \\ x^2 \in [0.1, 0.4], x^3 \in [0.2, 0.7] \\ x^4 \in [1, 5] \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $x^1$ 、 $x^2$ 、 $x^3$ 和 $x^4$ 分别为转速、进给量、静压力和加工次数； $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 分别为粗糙度的最小值和硬度的最大值。

利用遗传算法优化轴承套圈表面性能模型的流程如图 7 所示。本次优化计算的目标为粗糙度最小化和硬度最大化。遗传算法中的参数设置如下：种群规模为 100，交叉概率为 0.6，变异概率为 0.05。经过 100 次迭代后完成遗传算法优化计算，经过换算后的参数优化结果见表 6。

2.4 试验验证

为了验证  $H$  和  $Ra$  两模型的准确性及遗传算法多目标优化结果的准确性，在 2 个模型适用参数范围内选取 5 组工艺参数进行验证试验，其中，第 3 组试验参数采用 2.3 节多目标优化得到的结果。除本文研究的 4 个主要工艺参数外，保持验证试验的其他工艺参数与进行响应曲面分析时的参数一致。

验证试验测量值  $H_M$ 、 $Ra_M$  与响应模型预测值  $H_F$ 、 $Ra_F$  的汇总如表 7 所示。

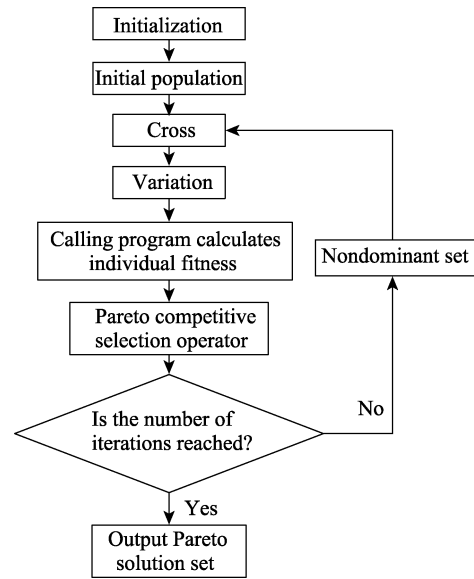


图 7 遗传算法优化计算流程  
Fig.7 Genetic algorithm optimization calculation process

表 6 遗传算法得到的优化结果  
Tab.6 Optimization results obtained by genetic algorithm

$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$f/(\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$	$p/\text{MPa}$	$T$
207	0.34	0.49	3

表 7 验证试验与模拟结果汇总  
Tab.7 Summary of verification test and simulation results

Samples	Process parameters				$H$			$Ra$		
	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$f/(\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$	$p/\text{MPa}$	$T$	$H_M(\text{HRC})$	$H_F(\text{HRC})$	Error/%	$Ra_M/\mu\text{m}$	$Ra_F/\mu\text{m}$	Error/%
1	180	0.2	0.4	2	59.98	62.83	4.5	0.381	0.353	7.9
2	190	0.25	0.45	4	59.83	63.59	5.9	0.341	0.311	9.6
3	207	0.34	0.49	3	60.52	63.9	5.2	0.341	0.312	9.2
4	220	0.36	0.55	2	61.84	63.17	2.1	0.361	0.332	8.7
5	230	0.28	0.6	4	59.61	62.75	5	0.355	0.324	9.5

对表 7 中的数据分析得到  $H$ 、 $Ra$  的实测值与回归方程预测值之间的对比如图 8 和图 9 所示。可知，试样表面粗糙度、表面硬度的实测值与模型方程模拟值的走向一致，2 个数值之间的最大误差出现在第 2 组的粗糙度值处，其误差值为 9.6%。这表明 2 个响应模型的预测值和实测值高度吻合， $H$  和  $Ra$  两模型准确、有效。此外，硬度的最大值与粗糙度的最小值在实际测量和模型预测中都出现在第 3 组试样中，这表明基于遗传算法得到的多目标优化结果是可靠的。

对按照验证试验滚压参数加工的 5 组试样以及未进行滚压加工的试样进行三维表面形貌检测，结果如图 10 所示。采集三维形貌时要保证用于验证试验的 5 组试样的数据采集点都位于试样表面被滚压部

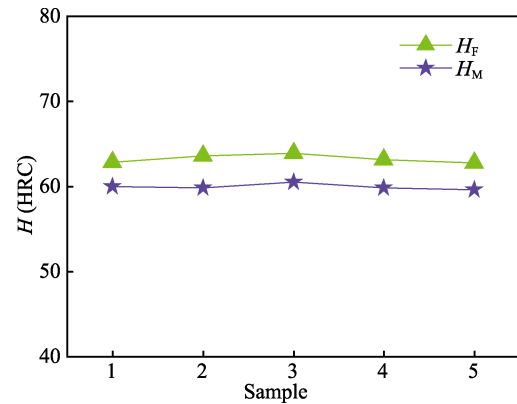


图 8 表面硬度预测值和实测值的对比  
Fig.8 Comparison of predicted and measured surface hardness

分。每个试样表面应采集多处三维形貌数据，用于对比的表面形貌应具有代表性。

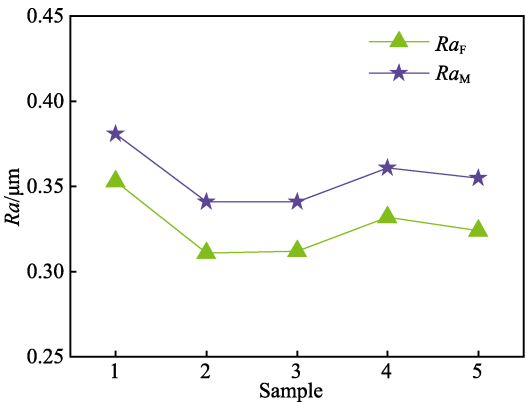


图 9 表面粗糙度预测值和实测值的对比  
Fig.9 Comparison of predicted and measured surface roughness

对比图 10a 与图 10b~f 可以发现, 未经滚压处理的试样表面形貌起伏较大, 表面磨痕明显, 与之相比, 经过超声滚压处理的 1 号~5 号试样的表面起伏变小, 表面磨痕变浅, 表面质量均有不同程度的显著提升。超声滚压工艺提升 GCr15 表面质量的主要原因是滚压过程中滚压工具头的复合冲击力带给试样表面的“削峰填谷”效应<sup>[31-32]</sup>。

在经过超声滚压处理的 5 组试样中, 3 号试样(见图 10d) 表面形貌最为平坦, 表面落差最小且磨痕基本消失; 1 号试样和 2 号试样相对于未滚压试样的表

面磨痕减小, 但与 3 号试样表面相比仍存在较为明显的磨削梨沟。4 号和 5 号试样的表面梨沟基本消失, 但是试样出现了滚压痕迹。此外, 3 号试样表面落差值也为 6 组试样中的最低值。总体来说, 3 号试样的表面形貌是 6 组对比试验组中最优的。

结合 2.1 节中的方差分析结果可知,  $p$  和  $T$  的取值在很大程度上决定了被滚压试样表面粗糙度和表面硬度, 因此, 3 号试样表面质量最优主要是因为工艺参数中的静压力和滚压次数的取值范围较合适<sup>[33]</sup>。静压力的大小与被滚压材料的塑性变形程度成正比, 塑性变形引起的晶粒细化现象与材料硬度密切相关。静压力的增大首先会提高表层材料的塑性变形量, 增大材料表层的微观组织位错, 细化 GCr15 内部晶粒组织, 提高表层材料的硬度。如图 8 所示, 验证试验组的硬度值随着静压力的增大先增大后减小。随着静压力的逐步提高, 表面材料会发生更大的塑性变形、产生更多的晶粒位错现象, 晶粒组织会随着静压力的增大而发生融合, 导致晶粒尺寸增大, 进而影响表层材料硬度分布。此外, 随着静压力的提高, 滚压工具头与表层材料的接触压入深度会增大, 滚压头的这种压入现象会影响试样表面粗糙度的分布。当材料表面形貌较为粗糙、表面起伏较大时, 适当的静压力会降低表面轮廓的起伏程度, 减小表面粗糙度。

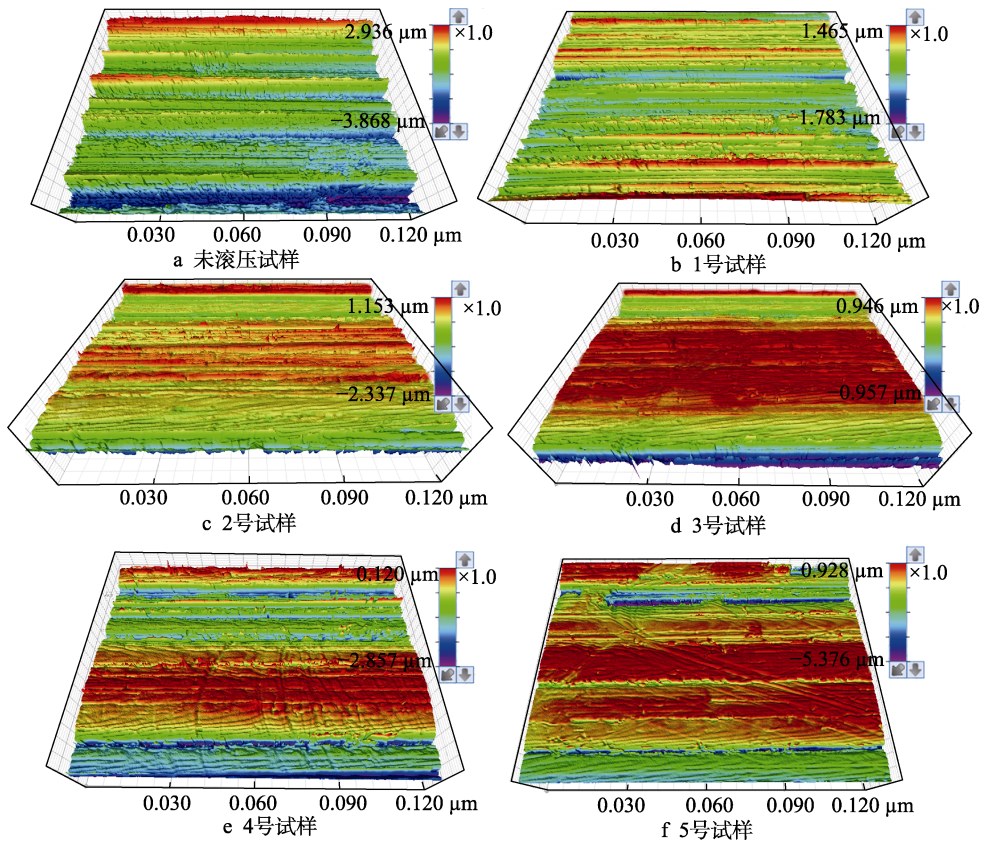


图 10 试样表面三维形貌  
Fig.10 Three dimensional morphology of sample surface: a) unrolled; b) sample 1; c) sample 2; d) sample 3; e) sample 4; f) sample 5



滚压次数在一定范围内增长,可以完善由静压力引起的滚压过程对试样表面性能的改善效果,使被滚压表面的受力更加均匀,增大内部晶粒的位错、滑移,进一步提升滚压后的试样表面硬度与粗糙度。如图9中的试样3所示,当加工次数为3时,试样的表面粗糙度为最低值。但是,过多的加工次数会使被滚压试样受到多次往复挤压,导致试样表面材料发生周向延展现象,引起表面粗糙度上升。图10e和图10f表面均出现了过度挤压导致的滚压痕迹。过多反复的挤压还会增大表层晶粒的尺寸,影响试样表层的硬度。

综上可知,2个响应模型的预测值具有较高的准确性;基于遗传算法优化得到的超声滚压最佳工艺参数可以得到较好的滚压效果,其表面硬度和表面粗糙度均取得最优值且表面形貌明显优于其他对比组试样的。

### 3 结论

1) 采用 BBD 试验方案建立了超声滚压后的 GCr15 试样表面粗糙度  $Ra$  和表面硬度  $H$  的二阶响应曲面预测模型,模型预测值与实际测量值的最大误差为 9.7%,该模型准确、有效,可用于 GCr15 试样被超声滚压处理后表面粗糙度及表面硬度的预测。

2) 采用遗传算法进行多目标优化获得的超声滚压最佳工艺参数如下:  $n=207$  r/min,  $f=0.34$  mm/r,  $p=0.49$  MPa,  $T=3$ 。在该参数下可以得到试样表面粗糙度最低值为  $0.34\text{ }\mu\text{m}$ 、试样表面硬度最大值为 60.5HRC。

3) 静压力和滚压次数在超声滚压过程中对表面粗糙度和表面硬度均有极其显著的影响;进给量对表面硬度有显著影响,对表面粗糙度无显著影响;转速对表面粗糙度和表面硬度均无显著影响。

4) 由交互作用在 2 个模型中的不同显著性可知,静压力和滚压次数这 2 个单因素作为交互项对表面粗糙度的影响大于对表面硬度的影响,且这 2 个因素交互项对表面硬度的影响较小。

#### 参考文献:

- [1] WANG C B, YU X, WENG L J, et al. Investigation of Failure Mechanism and Modification for Film-Lubricated Precise Angular-Contact Ball Bearing[J]. Vacuum, 2005, 77(2): 187-193.
- [2] SHEN X J, LIU Y F, CAO L, et al. Numerical Simulation of Sliding Wear for Self-Lubricating Spherical Plain Bearings[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2012, 1(1): 8-12.
- [3] 胡远培, 洪友士. 加载频率对高强钢 GCr15 超高周疲劳行为的影响[C]// 第十八届全国疲劳与断裂学术会议, 郑州, 2016.
- [4] 董凤奎, 刘年富, 廖卓文, 等. 热处理工艺对 GCr15 轴承钢淬火裂纹的影响[J]. 金属材料与冶金工程, 2020, 48(6): 46-50.
- [5] DONG F K, LIU N F, LIAO Z W, et al. Effects of Heat Treatment Processes on Quenching Cracks of GCr15 Bearing Steel[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2020, 48(6): 46-50.
- [6] 邹龙江, 周全, 高路斯. GCr15 钢轴承外套圈磨削开裂失效分析[J]. 金属热处理, 2013, 38(9): 99-100.
- [7] ZOU L J, ZHOU Q, GAO L S. Failure Analysis on Grinding Cracking of GCr15 Steel Bearing Outer Ring[J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(9): 99-100.
- [8] YAO B, HAN Z, LU K. Dry Sliding Tribological Properties and Subsurface Structure of Nanostructured Copper at Liquid Nitrogen Temperature[J]. Wear, 2013, 301(1/2): 608-614.
- [9] KHAJEIAN A, MAHMOUDI A, MEHMANPARAST A. Shot Peening Effects on Residual Stresses Redistribution of Offshore Wind Monopile Multi-Pass Weldments[J]. Marine Structures, 2019, 66: 106-120.
- [10] 黄向明, 周志雄, 杨军, 等. 淬硬轴承钢 GCr15 磨削白层结构特性的实验研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(9): 1119-1123.
- [11] HUANG X M, ZHOU Z X, YANG J, et al. Experimental Study on Characterization of White Layer Formed in Grinding Process of Harden Bearing Steel[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(9): 1119-1123.
- [12] YE C, SUSLOV S, KIM B J, et al. Fatigue Performance Improvement in AISI 4140 Steel by Dynamic Strain Aging and Dynamic Precipitation During Warm Laser Shock Peening[J]. Acta Materialia, 2011, 59(3): 1014-1025.
- [13] D'ERRICO F. Micropitting Damage Mechanism on Hardened and Tempered, Nitrided, and Carburizing Steels[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2011, 26(1): 7-13.
- [14] WANG F, ZHONG L J, TANG X H, et al. A Homogeneous Focusing System for Diode Lasers and Its Applications in Metal Surface Modification[J]. Optics Laser Technology, 2018, 102: 197-206.
- [15] ZHANG Y L, QU S G, LU F, et al. Microstructures and Rolling Contact Fatigue Behaviors of 17Cr<sub>2</sub>Ni<sub>2</sub>MoVNb Steel under Combined Ultrasonic Surface Rolling and Shot Peening[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 141: 105867.
- [16] VISCUSI A, ASTARITA A, DELLA GATTA R, et al. A Perspective Review on the Bonding Mechanisms in Cold Gas Dynamic Spray[J]. Surface Engineering, 2018, 35(1): 1-29.
- [17] QIAN L, ZHAN L, ZHOU B, et al. Effects of Electro-



- plastic Rolling on Mechanical Properties and Microstructure of Low-Carbon Martensitic Steel[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2021, 812: 141144.
- [15] GUO X Z, LIU W, LI X Q, et al. Fatigue Resistance and Failure Behavior of Penetration and Non-Penetration Laser Welded Lap Joints[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 34(1): 39.
- [16] WANG H B, SONG G L, TANG G Y. Effect of Electropulsing on Surface Mechanical Properties and Microstructure of AISI 304 Stainless Steel during Ultrasonic Surface Rolling Process[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2016, 666: 10.
- [17] NALLA R, ALTENBERGER I, NOSTER U, et al. On the Influence of Mechanical Surface Treatments-Deep Rolling and Laser Shock Peening-on the Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V at Ambient and Elevated Temperatures[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 355(1/2): 216-230.
- [18] YE H, SUN X, LIU Y, et al. Effect of Ultrasonic Surface Rolling Process on Mechanical Properties and Corrosion Resistance of AZ31B Mg Alloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 372(1): 288-298.
- [19] LIU C S, LIU D X, ZHANG X H, et al. On The Influence of Ultrasonic Surface Rolling Process on Surface Integrity and Fatigue Performance of Ti-6Al-4V Alloy[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2019, 370.
- [20] 刘森忠. 超声滚压对 GCr15 材料的表面性能影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- LIU S Z. Effect of Ultrasonic Rolling on Surface Properties of Gcr15 Material[D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
- [21] MENG Y, DENG J X, ZHANG Y, et al. Tribological Properties of Textured Surfaces Fabricated on AISI 1045 Steels by Ultrasonic Surface Rolling under Dry Reciprocating Sliding[J]. *Wear*, 2020, 460/461: 203488.
- [22] LIU D, LIU D X, GUAGLIANO M, et al. Contribution of Ultrasonic Surface Rolling Process to the Fatigue Properties of TB8 Alloy with Body-Centered Cubic Structure[J]. *Journal of Material Science and Technology*, 2020, 61: 63-74.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] MYERS R H, MONTGOMERY D C. *Response Surface Methodology: Process and Product in Optimization Using Designed Experiments*[M]. New York: Wiley, 1995.
- [26] 王立原. 响应面法在结构优化应用上的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
- WANG L Y. *Research on Application of Response Surface Method in Structural Optimization*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.
- [27] HOLLAND J. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: Ductoryanalysis with Applications to Biology, Control and Artificial*[M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975: 183.
- [28] 马永杰, 云文霞. 遗传算法研究进展[J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(4): 1201-1206.
- MA Y J, YUN W X. *Research Progress of Genetic Algorithm*[J]. *Application Research of Computers*, 2012, 29(4): 1201-1206.
- [29] 阳光灿, 熊禾根. 改进遗传算法求解柔性作业车间调度问题[J]. *计算机仿真*, 2022, 39(2): 221-225.
- YANG G C, XIONG H G. Improved Genetic Algorithm for Flexible Job Shop Scheduling Problem[J]. *Computer Simulation*, 2022, 39(2): 221-225.
- [30] 张邦成, 夏奇, 鲁冠宏, 等. 针对车间平衡性能的工位布局优化研究[J]. *制造技术与机床*, 2021(10): 105-109.
- ZHANG B C, XIA Q, LU G H, et al. Research on Station Layout Optimization of Job Shop Balancing Problem[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2021(10): 105-109.
- [31] 赵建. Ti-6Al-4V 旋转超声滚压表面强化机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- ZHAO J. *Study on Surface Strengthening Mechanism of Ti-6Al-4V Rotary Ultrasonic Rolling*[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [32] HUANG P C, WANG Y S, LIN J H, et al. Effect of Ultrasonic Rolling on Surface Integrity, Machining Accuracy, and Tribological Performance of Bearing Steels under Different Process Schemes[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2023, 43: 143-157.
- [33] 张飞. 超声表面滚压工艺参数对 45 钢摩擦磨损性能的影响研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2018.
- ZHANG F. *Study on the Influence of Ultrasonic Surface Rolling Process Parameters on the Friction and Wear Properties of 45 Steel*[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Technology, 2018.