

挤压与拉拔

42CrMo 钢超声滚挤压力学性能研究及参数优化

石青松, 徐红玉, 王晓强, 李 昭, 王排岗

(河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 为提高 42CrMo 钢轴承套圈的力学性能, 基于超声滚挤压加工过程中滚压头的运动学分析和改进的 J-C 本构模型, 对不同参数下 42CrMo 钢轴承套圈的超声滚挤压加工过程进行了有限元数值模拟, 建立了响应曲面预测模型及交互响应曲面图, 并研究了不同参数对力学性能的影响规律。结果表明: 残余压应力随着转速和进给速度的增大先增大后减小, 与振幅和静压力为正比例关系; 硬度与振幅和静压力为正比例关系, 与进给速度为反比例关系, 而随着转速的增大先增大后减小。使用自适应模拟退火算法对仿真预测模型进行优化, 得到了最优加工参数解集为: 转速为 $290\sim 360\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、进给速度为 $18\sim 24\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、振幅为 $19\sim 22\text{ }\mu\text{m}$ 、静压力为 $580\sim 650\text{ N}$, 最优力学性能参数解集为: 残余压应力为 $1002\sim 1033\text{ MPa}$ 、硬度为 $773\sim 793\text{ HV}$ 。最后通过实验验证了仿真模型以及优化结果的准确性。

关键词: 42CrMo 钢; 超声滚挤压; J-C 本构模型; 残余压应力; 硬度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.03.011

中图分类号: TG376.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 03-0075-11

Study on mechanical properties and parameter optimization for 42CrMo steel ultrasonic rolling extrusion

Shi Qingsong, Xu Hongyu, Wang Xiaoqiang, Li Zhao, Wang Paigang

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

Abstract: In order to improve the mechanical properties of 42CrMo steel bearing rings, based on the kinematic analysis of rolling extrusion head during ultrasonic rolling extrusion process and the improved J-C constitutive model, a finite element numerical simulation of the ultrasonic rolling extrusion process for 42CrMo steel bearing rings under different parameters was carried out, the response surface prediction model and interactive response surface diagram were established, and the influence laws of different parameters on the mechanical properties were studied. The results show that the residual compressive stress increases first and then decreases with the increasing of rotational speed and feeding speed, which is proportional to the amplitude and static pressure. The hardness is proportional to the amplitude and static pressure, and inversely proportional to the feeding speed. With the increasing of rotational speed, the hardness increases first and then decreases. Furthermore, the simulation prediction model was optimized by adaptive simulated annealing (ASA) algorithm. The obtained solution set of optimal processing parameters is the rotational speed of $290\sim 360\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, the feeding speed of $18\sim 24\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, the amplitude of $19\sim 22\text{ }\mu\text{m}$, the static pressure of $580\sim 650\text{ N}$, and the obtained solution set of optimal mechanical property parameters is the residual compressive stress of $1002\sim 1033\text{ MPa}$ and the hardness of $773\sim 793\text{ HV}$. Finally, the accuracy of the simulation model and optimization results is proved by experiment.

Key words: 42CrMo steel; ultrasonic rolling extrusion; J-C constitutive model; residual compressive stress; hardness

精密轴承的发展推动了我国先进工业的进步,

但是由于轴承常常处于复杂多变的工作环境, 其表层易产生疲劳损伤和裂纹, 会影响轴承的服役寿命, 故需使用表面强化技术来提高轴承套圈表层的力学性能, 进而增强轴承的耐磨性和强韧性以及延长服役寿命。

超声滚挤压是一种冷塑性加工的复合表面强化工艺, 与喷丸、激光、热处理等相比, 其优势在于: 力学性能提高较大、加工效率较高, 能够提高轴承套

收稿日期: 2023-07-21; 修订日期: 2023-10-26

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: 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

圈的抗疲劳强度、稳定性和使用寿命等。但超声滚挤压工艺的操作复杂,对于工艺参数的选取和优化尤为重要。因此,本文对超声滚挤压后 42CrMo 钢的力学性能进行有限元仿真及参数优化具有重要意义。

国内外学者对于超声滚挤压技术及其有限元仿真进行了研究。超声滚挤压技术方面,王晓强等^[1]使用不同工艺参数的超声滚挤压技术对 42CrMo 钢进行实验,得到其表层性能指标,并分析了不同的预测模型对指标的误差,结果表明,多元回归模型的预测误差小。任雁等^[2]对风电轴承材料进行超声滚挤压加工,分析了加工参数对表面粗糙度的敏感性,得到静压力对粗糙度的影响程度最大。阮孝林等^[3]对 42CrMo 钢进行超声滚挤压加工,并对实验数据进行极差分析,通过对比预测模型发现逐步回归法具有较高的预测精度。肖友谱^[4]使用超声滚挤压对 ZG20SiMn 钢进行加工,并研究了加工后表面粗糙度、硬度和摩擦因数等的变化,结果表明,超声强化处理后,摩擦因数降低了 37.75%,但硬度与耐磨性能得到提高。程明龙等^[5]对 45 钢金属进行超声滚挤压加工,并研究其微观组织,结果表明,微观组织出现纤维化效果,抗疲劳性能提高。Lan S L 等^[6]对 12Cr2Ni4A 钢齿轮进行超声滚挤压强化,确定了残余应力、硬度、硬化层深度和弯曲疲劳寿命的关系,结果表明,强化技术可以提高齿轮的弯曲疲劳强度与疲劳寿命。Zhu X T 等^[7]对 TC4 钛合金进行超声滚挤压,并研究其表面强化改性机理,结果表明,加工后的试样表面完整性得到改善,疲劳寿命提高。Ren Z H 等^[8]对 Ti-6Al-4V 钛合金进行超声滚挤压,并分析了粗糙度与残余应力的变化,结果表明,加工后的试样表面光整效果好,表面性能得到了改善。Wang J T 等^[9]对激光熔覆涂层进行超声滚挤压加工,结果表明,试样的硬度和残余压应力提高,缺陷减少。有限元仿真方面,于月民等^[10]对快速伺服刀架进行有限元分析,其研究内容对于二维快速伺服刀架的设计有一定的指导作用。张正礼^[11]对飞机尾翼抗鸟撞进行了仿真分析与实验验证,结果表明,有限元仿真的模拟效果好,能够满足数值仿真预测尾翼前段性能的需要。

综上所述,众多国内外学者对超声滚挤压强化技术以及不同模型的有限元仿真进行了研究,但是,对超声滚挤压模型的有限元分析和加工参数优化的研究还较少。因此,本文使用有限元软件 ABAQUS 对轴承套圈的超声滚挤压过程进行仿真,模拟得到轴承套圈的力学性能(残余压应力、硬度)在不同

加工参数下的数值;基于正交仿真实验,得到预测模型以及交互响应曲面图,并研究其影响规律;使用自适应模拟退火(Adaptive Simulated Annealing, ASA)算法优化超声滚挤压工艺参数,改善轴承套圈的力学性能。

1 超声滚挤压仿真实验

1.1 加工原理

超声滚挤压是一种通过超声振动和滚压来实现高精度和高效率的表面强化技术。超声滚挤压加工原理如图 1 所示,加工时,超声波发生器将交流电变为超声波电能,然后换能器将其转化为超声振动,再经变幅杆放大超声振动后通过滚挤压头对工件表面进行强化。通过调节振幅及静压力并作用于滚挤压头,工件表面出现塑性流动,压平表面微观波峰。在其发生塑性变形过程中,晶粒细化以及纳米化,使工件的硬度提高、残余压应力增大,工件的力学性能提高,晶粒细化层如图 1 所示。滚挤压头与棒料的动态点接触,有助于提高滚挤压后的光洁度、表面形貌及力学性能,从而提高试件的耐磨性和抗疲劳强度。

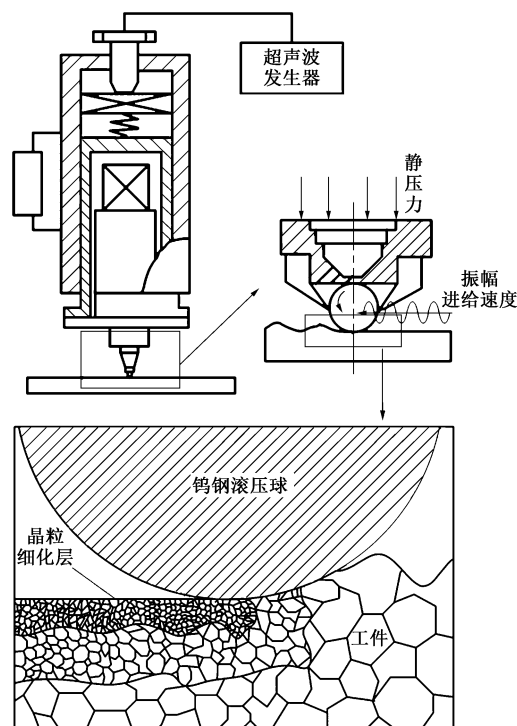


图 1 超声滚挤压加工原理图

Fig. 1 Principle diagram of ultrasonic rolling extrusion processing

1.2 仿真实验材料模型

超声滚挤压强化集中于工件表面,实际加工需

要在轴承套圈内加芯轴，故本文选用淬火及车削后的 42CrMo 钢作为等效加工对象。棒料直径为 $\Phi 50$ mm、长度为 300 mm，因棒料经过车销加工，故需要强化其力学性能，42CrMo 钢的力学性能如表 1 所示，其化学成分如表 2 所示。

表 1 42CrMo 钢的力学性能
Table 1 Mechanical properties of 42CrMo steel

参数	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	屈服强 度/MPa	弹性模 量/GPa	抗拉强 度/MPa	硬度/ HV
数值	7850	0.28	930	212	1080	630

表 2 42CrMo 钢的化学成分（%，质量分数）
Table 2 Chemical compositions of 42CrMo steel
(%, mass fraction)

P	Cu	C	Mn	Cr	Mo	Si	Ni	Fe
0.03	0.03	0.37	0.77	0.98	0.21	0.15	0.04	97.4

Johnson-Cook (J-C) 本构模型主要用于预测金属材料在高应变、高温和大应变条件下的力学行为。在仿真中，高应变条件下，工件的塑性变形会产生高温，从而影响金属的力学性能。为了使仿真加工过程能够准确地反映材料的力学特性，对 42CrMo 钢材材料的 J-C 本构模型进行改进，如式（1）所示。

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma &= (M + N\varepsilon^a)(1 + P\ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})(1 - T^{*m}) \\ T^* &= \frac{\Delta T(\varepsilon)}{T_m - T_r} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中： σ 为流动应力； M 为初始屈服应力； N 为应变硬化模量； ε 为应变； a 为硬化系数； P 为应变率强化系数； m 为软化系数； $\dot{\varepsilon}$ 为材料实际应变率； $\dot{\varepsilon}_0$ 为材料理论应变率； T^* 为温差； $\Delta T(\varepsilon)$ 为绝热升温； T_m 为熔化温度； T_r 为室温温度。

改进 J-C 模型的关键在于 T^* 的含义由实验温度与室温的温差改为绝热升温控温的温差，实验求得本构模型参数^[12]，如表 3 所示。

表 3 42CrMo 钢的改进 J-C 模型参数

参数	M/MPa	N/MPa	P	a	m	T_m/K	T_r/K
数值	1059	528	0.008	0.21	1	1668	20

1.3 仿真模型建立

分析超声滚挤压加工运动学，钨钢滚压球的路径公式如式（2）所示，实际速度如式（3）所示。

$$\begin{cases} x = vt \\ y = A\sin(2\pi ft + \varphi) \end{cases} \quad (2)$$

$$v_s = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2} = \sqrt{v^2 + [2\pi f A \cos(2\pi ft + \varphi)]^2} \quad (3)$$

式中： x 、 y 分别为滚压球径向和轴向行进的长度； v 为进给速度； t 为时间； A 为超声振幅； f 为超声频率； φ 为相位角； v_s 为实际速度。

仿真实验在 ABAQUS/Explicit 模块进行数据分析，建立滚压头与棒料间的三维仿真模型，使用单道滚压进行仿真。将钨钢滚压球定义为解析刚体，设置滚压头与棒料为点接触，为提高有限元仿真效率，选用 1/72 的厚度为 2 mm 的空心圆柱体进行仿真，建立的有限元仿真模型如图 2 所示。

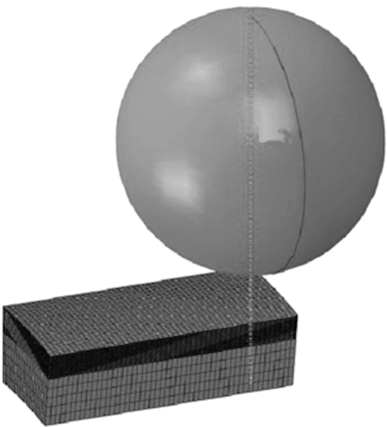


图 2 有限元仿真模型
Fig. 2 Finite element simulation model

设置仿真材料的初始粗糙度为 $0.98\ \mu\text{m}$ ，基于超声滚挤压加工原理以及滚压头运动学分析，选用转速、进给速度、振幅和静压力作为参数进行有限元仿真。由于滚压头运动为正弦函数，静压力的表达式如式（4）所示。

$$F = A_0 + b_1 \sin(2\pi ft) \quad (4)$$

式中： F 为静压力； A_0 为初始振幅； b_1 为简谐波振幅； f 为超声频率，此处为 20 kHz。

1.4 力学性能计算方法

ABAQUS 软件后处理模块中，选用“min principal mises”作为材料内部的残余应力，沿层深方向设置节点路径，选用 20 个点，间隔为 0.1 mm，选择最小的“min principal mises”数值作为加工后的残余应力。由文献 [13] 可得，42CrMo 钢材材料的硬度与残余应变关系如式（5）所示。

$$H = G \times 181.48678 \times (\varepsilon_{\text{res}} + 0.08)^{0.16843} \quad (5)$$

式中： H 为硬度； ε_{res} 为残余应变； G 为比例常数，为 5.31。

残余应变等于仿真后的等效塑性应变，等效塑性应变越大，则塑性变形越大，沿层深方向设置节点路径，选用 20 个节点，间隔为 0.03 mm，选择最大残余应变带入式 (5)，得到 42CrMo 钢的硬度。对建立的有限元模型，设置参数如下：转速为 $250\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、进给速度为 $13\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、振幅为 $6\text{ }\mu\text{m}$ 、静压力为 250 N，得到的残余应力以及等效塑性应变沿层深分布情况分别如图 3 和图 4 所示。由图 3 可知，随着层深的增大，从残余压应力（负值）变为残余拉应力（正值），其中残余压应力先增大后减小，最大残余应力在距离表面约 0.24 mm 处。由图 4 可知，随着层深的增大，等效塑性应变先增大后逐渐降低趋于 0，最大值在距离表面 0.03 mm 处。

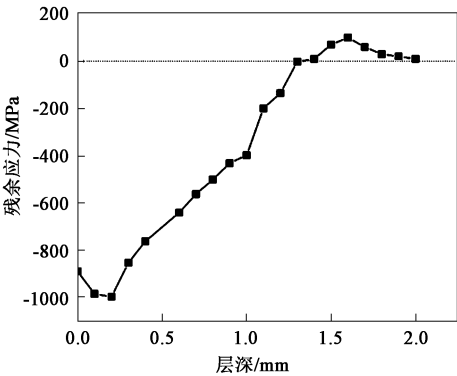


图 3 残余应力沿层深分布图
Fig. 3 Distribution diagram of residual stress along layer depth

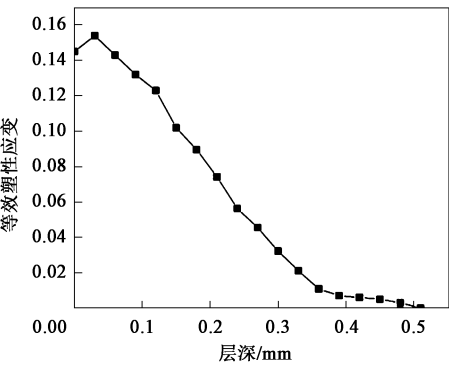


图 4 等效塑性应变沿层深分布图
Fig. 4 Distribution diagram of equivalent plastic strain along layer depth

1.5 仿真实验设计及结果

以转速 n 、进给速度 v 、振幅 A 、静压力 F 为加工参数，使用 Minitab 软件设计 4 因素 5 水平的正交仿真实验，加工参数设置及正交仿真实验结果分别如表 4 和表 5 所示。

表 4 正交仿真实验加工参数设计
Table 4 Design of processing parameters for orthogonal simulation experiment

水平	转速 n / ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	进给速度 v / ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	振幅 A / μm	静压力 F/N
1	250	13	6	250
2	350	24	10	350
3	450	35	14	450
4	550	46	18	550
5	650	57	22	650

表 5 正交仿真实验结果
Table 5 Results of orthogonal simulation experiment

序号	转速 n / ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	进给速度 v / ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	振幅 A / μm	静压力 F/N	残余压应 力/MPa	硬度/ HV
1	250	13	6	250	998	748
2	250	24	10	350	999	759
3	250	35	14	450	1044	766
4	250	46	18	550	1046	767
5	250	57	22	650	1036	762
6	350	13	10	450	996	761
7	350	24	14	550	1035	776
8	350	35	18	650	1049	786
9	350	46	22	250	1162	773
10	350	57	6	350	1219	761
11	450	13	14	650	985	798
12	450	24	18	250	1109	777
13	450	35	22	350	1150	776
14	450	46	6	450	1209	769
15	450	57	10	550	1218	792
16	550	13	18	350	1044	783
17	550	24	22	450	1098	791
18	550	35	6	550	1159	788
19	550	46	10	650	1180	799
20	550	57	14	250	1296	772
21	650	13	22	550	994	797
22	650	24	6	650	1067	798
23	650	35	10	250	1200	763
24	650	46	14	350	1249	784
25	650	57	18	450	1286	795

2 超声滚挤压力学性能模型分析

2.1 二阶响应曲面模型建立与分析

响应曲面法 (Response Surface Methodology ,

RSM) 是一种统计设计和分析方法, 它通过建立数学模型来描述因素与响应变量之间的关系, 以预测和优化系统的性能。基于各加工参数对 42CrMo 钢力学性能的影响规律, 建立二次多项式模型, 如式 (6) 所示。

$$Z = c_0 + \sum_{i=1}^4 c_i q_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^4 c_{ij} q_i q_j + \sum_{i=1}^4 c_{ii} q_i^2 + \varepsilon_c \quad (6)$$

式中: Z 为预测值; c_0 为常数; ε_c 为误差; q_i 、 q_j 为超声滚挤压的不同加工参数; i 、 j 代表不同的工艺参数, i 、 $j=1, 2, 3, 4$, 依次对应 n 、 v 、 A 、 F ; c_i 、 c_{ii} 、 c_{ij} 分别为一次项系数、二次项系数和交互项系数。

根据表 5 所示的正交仿真数据分别建立残余应力 R_s 、硬度 H 与超声滚挤压工艺参数之间的响应曲面预测模型, 分别如式 (7) 和式 (8) 所示。

残余压应力 R_s 的预测模型为:

$$R_s = 829.96 + 0.8n + 4.262v + 0.012F - 6.173A - 0.000904n^2 - 0.03056v^2 + 0.0685A^2 - 0.000212F^2 + 0.006443nv + 0.000047nF + 0.005678nA - 0.000737vF \quad (7)$$

硬度 H 的预测模型为:

$$H = 707.8 + 0.1073n + 0.539v + 5A - 0.1123F - 0.000198n^2 - 0.00456v^2 - 0.1583A^2 + 0.000018F^2 - 0.000381nv + 0.00068nA + 0.000322nF + 0.000169vF \quad (8)$$

单因素实验即控制其他加工参数水平不变, 研究单一加工参数的影响规律。本文采用单因素实验研究转速、进给速度、振幅和静压力对残余应力和硬度的影响规律, 结果如图 5 和图 6 所示。单因素实验加工参数取中间水平, 即转速为 $450 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、进给速度为 $35 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、振幅为 $14 \mu\text{m}$ 、静压力为 450 N 。

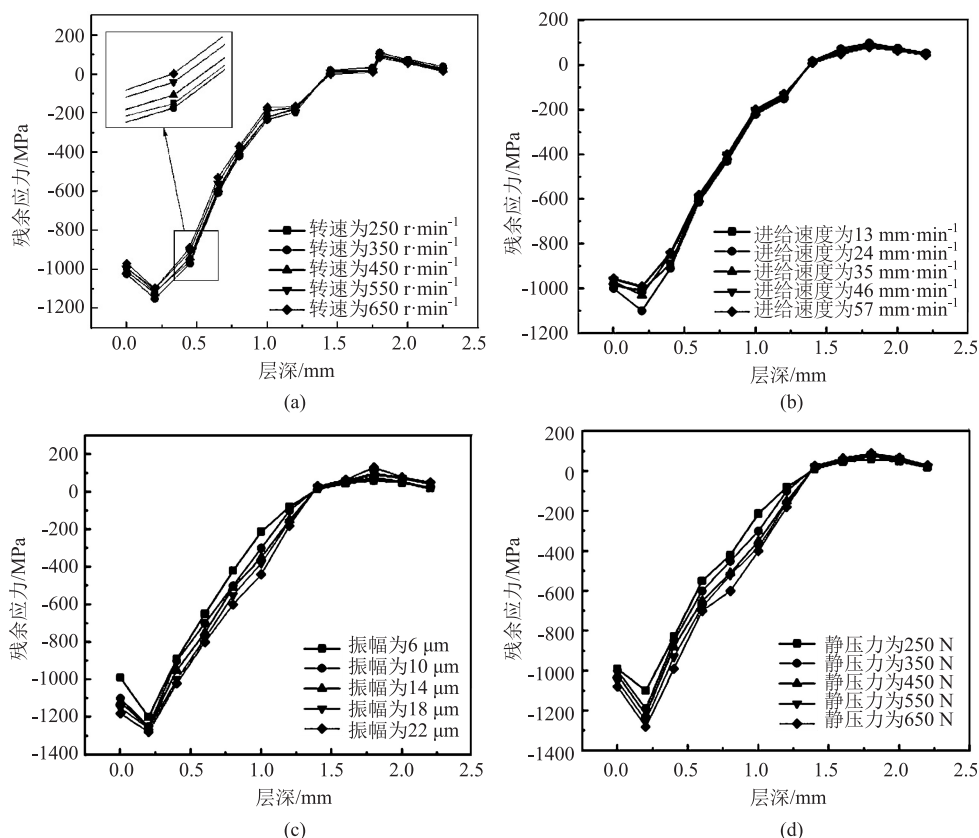


图 5 加工参数对残余应力的影响

(a) 转速 (b) 进给速度 (c) 振幅 (d) 静压力

Fig. 5 Effects of processing parameters on residual stress

(a) Rotational speed (b) Feeding speed (c) Amplitude (d) Static pressure

由图 5 和图 6 分析可知: 残余压应力随着转速和进给速度的增大先增大后减小, 随着振幅和静压力的增大而增大; 硬度与振幅和静压力呈正相关,

与进给速度呈负相关, 并且随着转速的增加, 硬度先增大后减小。

根据所建立的转速 n 、进给速度 v 、振幅 A 及静

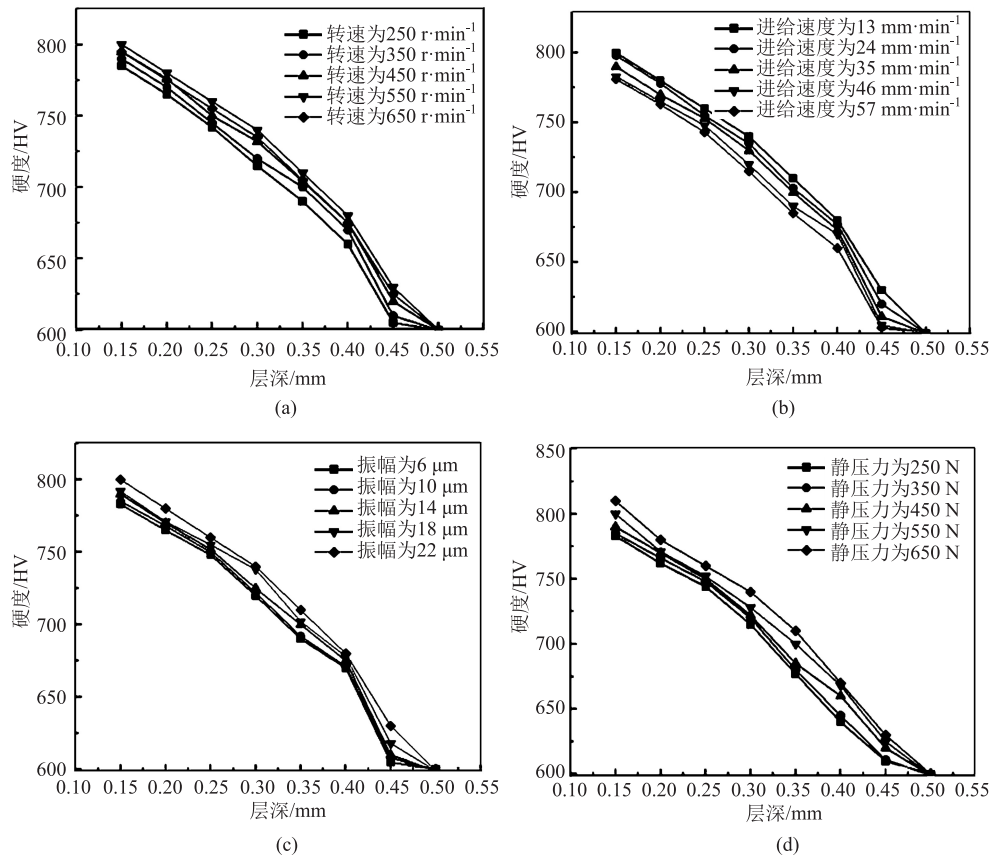


图 6 加工参数对硬度影响

(a) 转速 (b) 进给速度 (c) 振幅 (d) 静压力

Fig. 6 Effects of processing parameters on hardness

(a) Rotational speed (b) Feeding speed (c) Amplitude (d) Static pressure

压力 F 与 42CrMo 钢轴承套圈力学性能的多元线性回归模型, 可得任意两因素为变量时对力学性能的交互响应曲面图, 如图 7 所示。

由图 7a 可知, 响应曲面呈现右端高三端低的特点, 当转速和进给速度均取最大值时, 残余压应力最大, 且进给速度对残余压应力的影响程度大于转速。由图 7b 可知, 转速对残余压应力的影响程度大于振幅。由图 7c 可知, 转速对残余压应力的影响程度大于静压力。

由图 7d 可知, 当转速取最大值、进给速度取最小值时, 硬度最大, 转速对硬度的影响程度大于进给速度。由图 7e 可知, 振幅对硬度的影响程度大于转速。由图 7f 可知, 静压力对硬度的影响程度大于转速。

多因素交互响应曲面图分析结果与仿真实验数据影响规律吻合, 故多因素交互影响作用具有意义。

超声滚挤压力学性能指标在加工参数的影响下具有不同的变化规律, 因此, 要保证轴承套圈表面

质量的同时, 增大其残余压应力和硬度。

2.2 响应曲面预测模型准确性检验

为验证模型是否有一定的预测价值和有效性, 依次取表 5 中的第 2、7、12、17、22 组仿真数据与预测数据进行对比分析, 如图 8 和图 9 所示。

计算可得, 5 组对比数据的残余压应力误差绝对值分别为 0.03%、0.10%、0.18%、0.09% 和 0.09%, 硬度误差绝对值分别为 0.26%、0.13%、0.13%、0.38% 和 0.25%, 故响应曲面模型的预测误差较小, 拟合度较高, 具有一定的预测能力, 可用于超声滚挤压力学性能加工参数的优化。

3 仿真预测模型优化

3.1 ASA 算法描述

ASA 算法是 Dkhichi F 等^[14]提出的一种改进模拟退火算法。模拟退火算法 (Simulated Annealing, SA) 源自金属热加工, 用于模拟金属热力学退火过

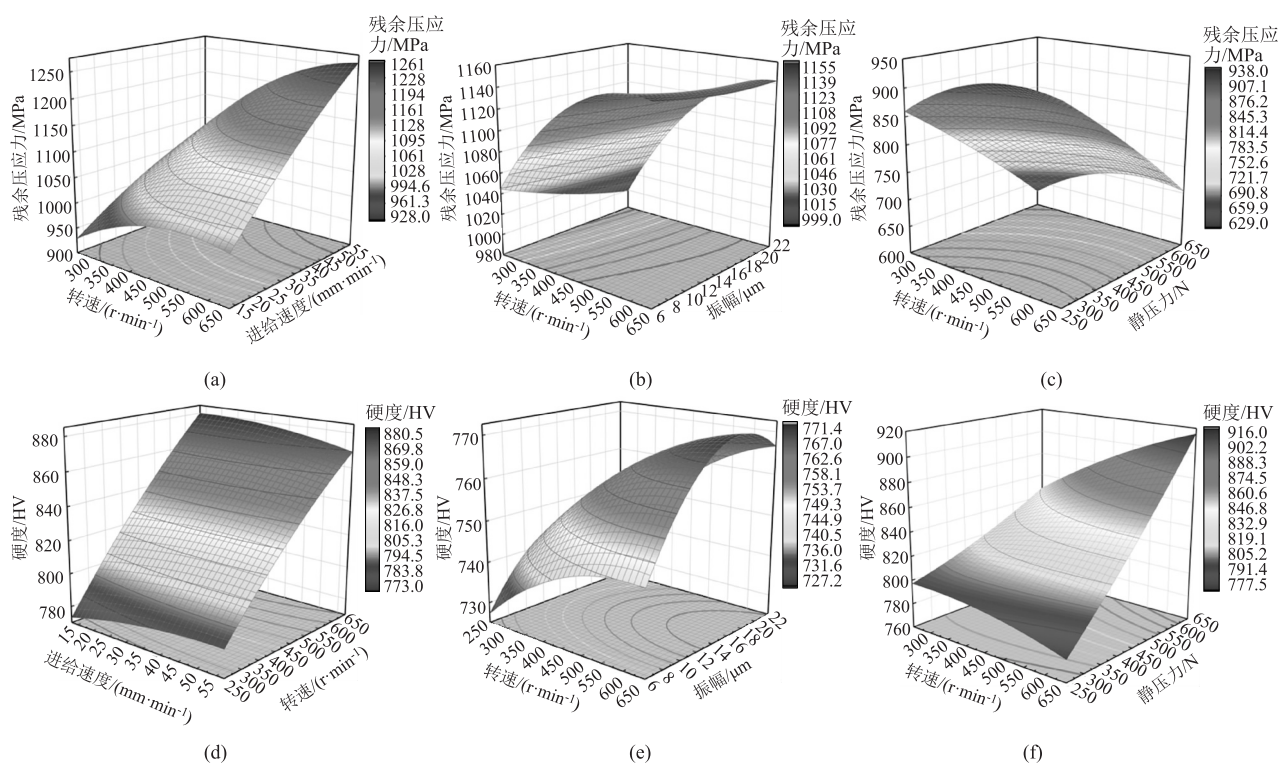


图7 力学性能多因素交互响应曲面图

- (a) n 和 v 对残余压应力的响应曲面 (b) n 和 A 对残余压应力的响应曲面 (c) n 和 F 对残余压应力的响应曲面
(d) n 和 v 对硬度的响应曲面 (e) n 和 A 对硬度的响应曲面 (f) n 和 F 对硬度的响应曲面

Fig. 7 Surface diagrams of multi-factor interaction response for mechanical properties

- (a) Response surface of n and v to residual compressive stress (b) Response surface of n and A to residual compressive stress
(c) Response surface of n and F to residual compressive stress (d) Response surface of n and v to hardness
(e) Response surface of n and A to hardness (f) Response surface of n and F to hardness

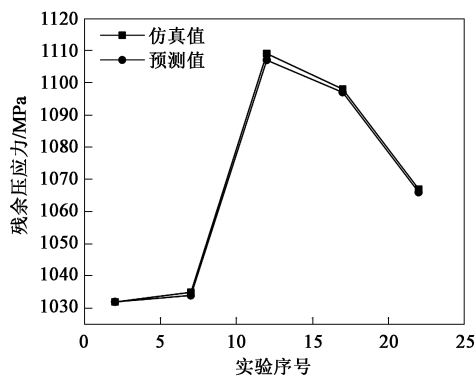


图8 残余压应力的仿真值与预测值对比

Fig. 8 Comparison of residual compressive stress between simulated and predicted values

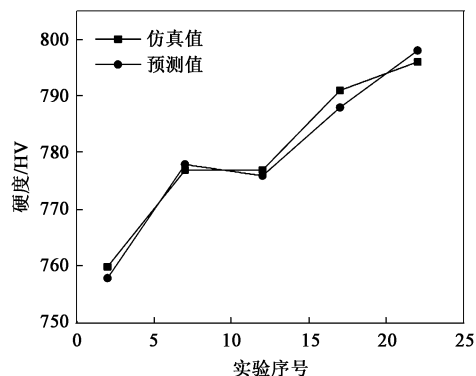


图9 硬度的仿真值与预测值对比

Fig. 9 Comparison of hardness between simulated and predicted values

程。模拟退火算法的鲁棒性好、精确度高,但在优化实验变量较多和组合优化问题中,SA算法参数调节困难,收敛速度慢,控制参数下降速度的指数函数较为不合理。ASA算法则提高了算法的执行效率和更优的求解能力。

3.2 ASA 算法基本理论及步骤

SA算法新模型的建立是对原模型的高斯分布进行扰动所得,接受概率使用Metropolis准则,而ASA算法使用柯西分布产生的函数,如式(9)所示。

$$o = r + \gamma m_u \quad (9)$$

式中: o 为扰动后新变量; r 为原始变量; m_u 为扰动步长; γ 为随机扰动。

γ 服从柯西分布, 则有式 (10):

$$G_c(b) = \frac{T(t)}{T^2(t) + b^2} \quad (10)$$

式中: $G_c(b)$ 为增益调节函数; $T(t)$ 为采样周期; b 为带状宽度。

柯西分布是一种重尾分布, 其具有比高斯分布更大的尾部, 因此, 可有效增加数据集中出现极值的概率, 从而避免出现拟合情况。

接受概率使用 Metropolis 准则, 当交换后的距离值 $f(j)$ 小于交换前的距离值 $f(i)$ 时 (即移动后得到更优解), 则总是接受该移动新解; 相反, 新解的接受概率 D 如式 (11) 所示。

$$D = \exp \left[-\frac{f(j) - f(i)}{T_k} \right] \quad (11)$$

式中: D 为接受概率; T_k 为下降后的温度, 即迭代后的温度。

ASA 算法运行时, D 值较大, 会较大概率接受恶化解, 但在运行后期, 当前最优解接近全局最优解, D 值变小, 最终算法收敛于全局最优解。

ASA 算法的降温方式如式 (12) 所示。

$$T_k = T_0 \exp(-CK^{\frac{1}{U}}) \quad (12)$$

式中: T_0 为初始温度; C 为常系数; K 为温度迭代次数; U 为参数数量。

依据文献 [15], 式 (12) 变形为式 (13), 其中 α 为常数, 一般取值为 $[0.7, 1.0]$ 。

$$T_k = T_0 \alpha^{K^{\frac{1}{U}}} \quad (13)$$

本文使用 ASA 算法对二阶响应曲面回归预测模型进行优化, 收敛检查的误差范数为 5, 失败设计的最大误差范数为 5, 阈值幂指数为 2, 阈值放大倍数为 1000。ASA 算法有内部和外部两个循环: 内部循环保证在每个温度下对空间样本的搜索和迭代能力, 外部循环保证算法温度不断下降, 其步骤如下。

第 1 步: 定义初始参数。确定初始解和初始温度 T_0 ; 设计概率函数和退火次数。

第 2 步: 使用柯西分布的新模型产生新解。

第 3 步: 重新退火。根据参数的敏感度, 在退火过程中周期性改变退火时间。

第 4 步: 有条理的淬火。结合启发式策略, 提高问题求解的能力和鲁棒性。

第 5 步: 算法收敛到全局最优值或者迭代次数

达到上限。

3.3 目标函数与约束函数

残余压应力在增强材料耐磨性和疲劳寿命方面要求最大, 增加残余压应力可以通过抵消材料表面张力来改善材料性能, 从而提高材料的疲劳寿命和强度。且硬度在增强材料的强度和耐久性方面也要求最大。故在优化目标函数时, 取残余压应力和硬度的最大值, 如式 (14) 所示, 并结合加工效率及设备安全的考虑来设置超声滚挤压加工参数范围。

$$\begin{aligned} & \begin{cases} \text{Max } R_s(n, v, A, F) \\ \text{Max } H(n, v, A, F) \end{cases} \\ \text{s. t. } & \begin{cases} 250 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \leq n \leq 650 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \\ 13 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \leq v \leq 57 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \\ 6 \mu\text{m} \leq A \leq 22 \mu\text{m} \\ 250 \text{ N} \leq F \leq 650 \text{ N} \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

3.4 优化结果分析

采用 ASA 算法对轴承套圈超声滚挤压加工参数进行优化, 获得对应 R_s 和 H 的最优加工参数解集, 不同迭代次数下 Pareto 前沿图如图 10 所示。图 10a 为算法迭代 500 次的 Pareto 前沿图, 粒子收敛于较小的空间, 有收敛趋势但不连续; 图 10b 和图 10c 分别为迭代 1000 和 1500 次的 Pareto 前沿图, 最优解在空间个数增多并逐渐收敛, 分布较为均匀; 图 10d 为迭代 2000 次的 Pareto 前沿图, 收敛趋势很好且前沿平滑, 但是粒子个别不收敛; 图 10e 和图 10f 为迭代 2500 和 3000 次的 Pareto 前沿图, 粒子收敛效果提高并不大。因此, 为了提高算法计算效率, 设置最大迭代次数为 2500。

由图 10 可以看出, 在算法迭代过程中, 轴承套圈的残余压应力与硬度呈现反比例增长, 两者无法同时取得最大值, 只能优中选优。基于 ASA 算法优化后的结果, 得到轴承套圈加工参数及力学性能的最优参数解集如表 6 所示。

4 实验验证

4.1 仿真实验验证

为了验证算法优化结果的可靠性与准确性, 在最优参数解集中随机选取 5 组数据进行仿真验证, 优化结果与仿真结果进行对比并计算误差, 如表 7 所示。基于仿真实验数据, 残余压应力最大误差为 5.40%, 硬度最大误差为 1.70%, 误差基本控制在 10% 以下, 验证了优化模型的准确性。

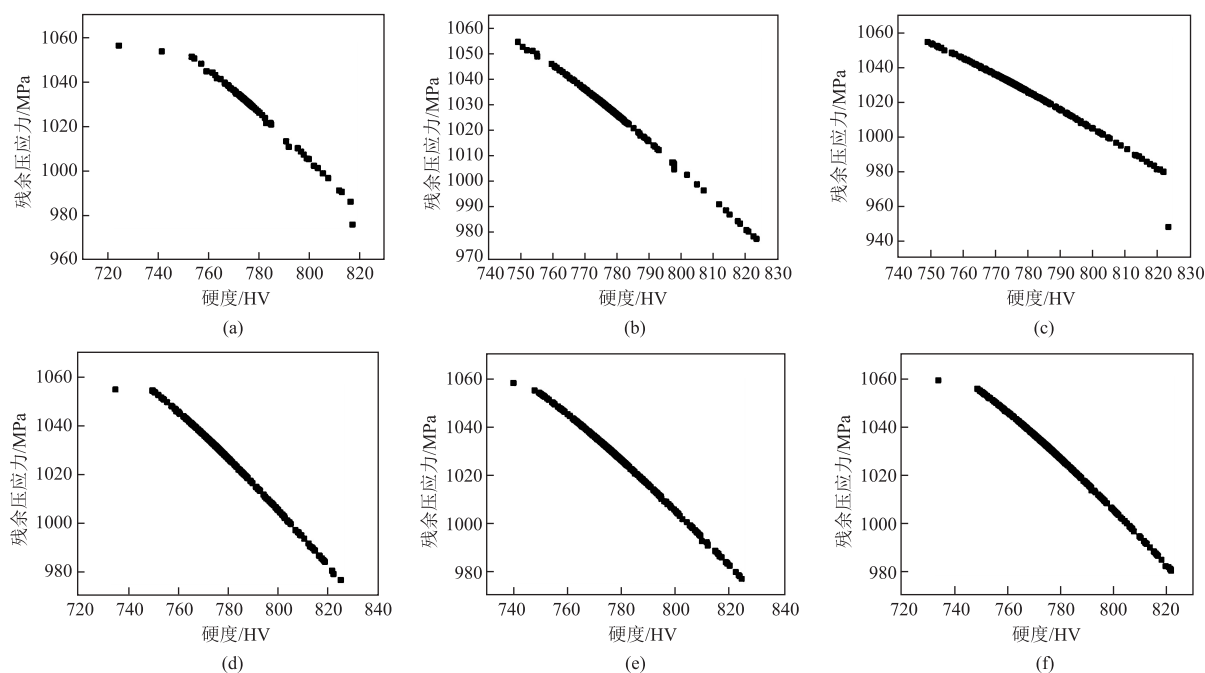


图 10 ASA 算法迭代后的 Pareto 前沿图

(a) 迭代 500 次 (b) 迭代 1000 次 (c) 迭代 1500 次 (d) 迭代 2000 次 (e) 迭代 2500 次 (f) 迭代 3000 次

Fig. 10 Pareto frontier diagrams after ASA algorithm iteration

(a) 500 iterations (b) 1000 iterations (c) 1500 iterations (d) 2000 iterations (e) 2500 iterations (f) 3000 iterations

表 6 最优参数解集

Table 6 Solution set for optimal parameter

参数	转速/($r \cdot \min^{-1}$)	进给速度/($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	振幅/ μm	静压力/N	残余压应力/MPa	硬度/HV
数值	290~360	18~24	19~22	580~650	1002~1033	773~793

表 7 力学性能仿真结果与优化结果对比

Table 7 Comparison of mechanical properties between simulated and optimized results

序号	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	进给速度/ ($r \cdot \min^{-1}$)	振幅/ μm	静压力/ N	残余压应力/MPa			硬度/HV		
					优化值	仿真值	误差绝对值/%	优化值	仿真值	误差绝对值/%
1	290	18	19	580	1002.36	961	5.40	791.36	779	1.50
2	308	19	19	597	1005.29	971	5.10	790.29	777	1.70
3	324	20	20	635	1022.96	973	5.20	784.15	773	1.40
4	336	23	20	641	1028.37	991	3.80	780.23	770	1.30
5	360	24	22	650	1032.84	1001	3.20	773.86	766	1.00

4.2 超声滚挤压加工实验

本文选用上海宣邦金属新材料科技有限公司的超声滚挤压设备进行超声滚挤压加工，图 11a 为超声波发生器，图 11b 为滚挤压执行设备。在 BM650T 型数控机床上进行超声滚挤压加工，如图 11c 所示，加工过程如图 11d 所示。使用 Xstress3000 型 X 射线应力仪测量 42CrMo 钢棒料的残余应力，使用 HVS-1000A 型显微硬度计测量棒料

的硬度。

为了验证超声滚挤压仿真模型以及加工参数对力学性能的影响规律，依次进行 25 组正交实验，对实验数据进行方差分析，验证超声滚挤压仿真实验得到的加工参数变化规律的准确性。选取正交实验表中第 1、6、11、16 和 21 组数据进行对比，计算误差，结果如表 8 所示。

由表 8 可得，残余压应力最大误差为 5.1%，硬

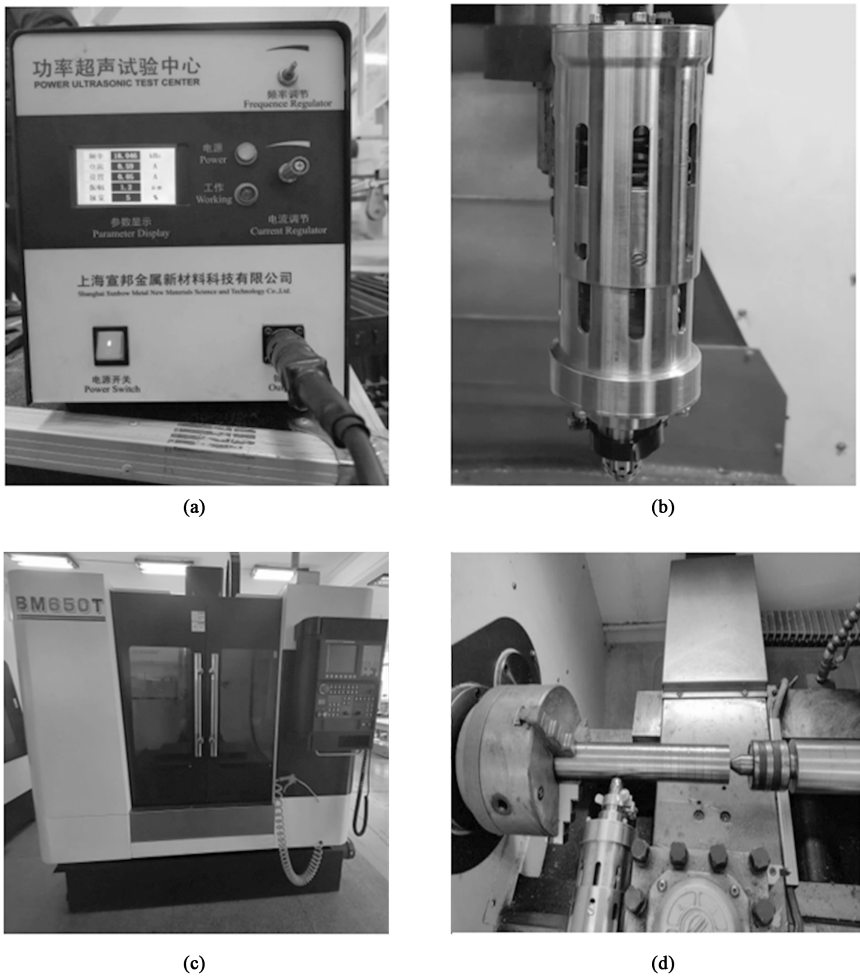


图 11 超声滚挤压加工设备及加工过程

(a) 超声波发生器 (b) 滚挤压执行设备 (c) BM650T 型机床 (d) 加工过程

Fig. 11 Processing equipment and process for ultrasonic rolling extrusion

(a) Ultrasonic generator (b) Rolling extrusion execution equipment (c) BM650T machine tool (d) Processing process

表 8 力学性能仿真结果与实验结果对比

Table 8 Comparison of mechanical properties between simulation and experimental results

序号	残余压应力/MPa			硬度/HV		
	仿真值	实验值	误差/%	仿真值	实验值	误差/%
1	998	973	-2.6	748	721	-3.7
6	996	948	-5.1	761	736	-3.4
11	985	1003	1.8	798	745	-7.1
16	1044	1021	-2.3	783	739	-5.9
21	994	1015	2.1	797	753	-5.8

度最大误差为 7.1%，误差均控制在 10% 以下。综上，超声滚挤压建立的有限元仿真模型以及优化结果有较高的可靠性和准确性，其结果对实际生产加工具有参考作用，可以选用较大的进给速度以提高加工效率。

5 结论

(1) 基于仿真实验数据，结合单因素实验结果与响应曲面图，研究超声滚挤压加工参数对力学性能的影响规律：残余压应力随着转速、进给速度的增大先增加后减小，与振幅、静压力呈正相关；硬度与振幅、静压力呈正相关，与进给速度呈负相关，随着转速的增大先增大后减小。

(2) 使用自适应模拟退火算法优化超声滚挤压加工参数，可得轴承套圈的加工参数最优参数解集为：转速为 $290 \sim 360 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、进给速度为 $18 \sim 24 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、振幅为 $19 \sim 22 \text{ }\mu\text{m}$ 、静压力为 $580 \sim 650 \text{ N}$ ；力学性能最优参数解集为：残余压应力为 $1002 \sim 1033 \text{ MPa}$ 、硬度为 $773 \sim 793 \text{ HV}$ 。计

算残余压应力和硬度的仿真值与优化值、仿真值与实验值之间的最大误差分别为 5.4% 和 1.7%、5.1% 和 7.1%，该算法和仿真模型具有较高的准确性。

参考文献:

- [1] 王晓强, 张彪, 崔凤奎, 等. 超声滚挤压轴承套圈表面性能预测模型建立 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (6): 25-32.
Wang X Q, Zhang B, Cui F K, et al. Construction of surface performance prediction model of ultrasonic roll extruded bearing ring [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (6): 25-32.
- [2] 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. Sensitivity study on surface roughness processing parameters for wind turbine bearing materials by ultrasonic rolling extrusion [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (1): 98-105.
- [3] 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 in ultrasound rolling extrusion [J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42 (4): 811-816.
- [4] 肖友谱. 超声滚挤压对 ZG20SiMn 钢表面性能的影响 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2021.
Xiao Y P. Effect of Ultrasonic Roller Extrusion on Surface Properties of ZG20SiMn Steel [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2021.
- [5] 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. Investigations on effects of ultrasonic rolling process on surface microstructure of steel [J]. Tool Engineering, 2019, 53 (7): 73-76.
- [6] Lan S L, Qi M, Zhu Y F, et al. Ultrasonic rolling strengthening effect on the bending fatigue behavior of 12Cr2Ni4A steel gears [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 279: 109024.
- [7] 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.
- [8] Ren Z H, Li Z H, Zhou S H, et al. Study on surface properties of Ti-6Al-4V titanium alloy by ultrasonic rolling [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2022, 121: 102643.
- [9] Wang J T, Zhang C S, Shen X H, et al. A study on surface integrity of laser cladding coatings post-treated by ultrasonic burnishing coupled with heat treatment [J]. Materials Letters, 2022, 308: 131136.
- [10] 于月民, 盖芳芳, 丁元柱. 三种二维快速伺服刀架仿真分析 [J]. 广东石油化工学院学报, 2022, 32 (6): 44-45, 49.
Yu Y M, Gai F F, Ding Y Z. Simulation analysis of three 2-DOF fast servo tool [J]. Journal of Guangdong University of Petrochemical Technology, 2022, 32 (6): 44-45, 49.
- [11] 张正礼. 尾翼前缘结构抗鸟撞仿真分析 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (12): 69-72, 164.
Zhang Z L. Numerical simulation for bird impact resistance of tail leading edge structure [J]. Computer Simulation, 2022, 39 (12): 69-72, 164.
- [12] 卢也森, 朱志武, 谢奇峻. 基于改进 J-C 模型的 42CrMo 钢动态本构关系研究 [J]. 四川理工学院学报: 自然科学版, 2016, 29 (3): 61-65.
Lu Y S, Zhu Z W, Xie Q J. Study on dynamic constitutive relation of 42CrMo steel based on Johnson-Cook model [J]. Journal of University of Science & Engineering: Natural Science Edition, 2016, 29 (3): 61-65.
- [13] 路彦君. 镍基高温合金 Inconel718 微铣削残余应力与加工硬化研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
Lu Y J. Researches on Residual Stress and Work Hardening on Micro-milling Nickel-base Superalloy Inconel718 [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [14] Dkhichi F, Oukarfi B, Fakkar A, et al. Parameter identification of solar cell model using Levenberg-Marquardt algorithm combined with simulated annealing [J]. Solar Energy, 2014, 110: 781-788.
- [15] 史贵连, 李凯扬, 叶福丽. 基于自适应模拟退火算法的生物体三维温度场重构研究 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (6): 166-173.
Shi G L, Li K Y, Ye F L. Research on 3D temperature field in biological tissue based on adaptive simulated annealing algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (6): 166-173.

更正

《锻压技术》2024 年 49 卷第 1 期, “CFRP 叠层横向超声振动辅助铆接技术”一文中 (页码为 154-164) 做如下更正: (1) 由于论文的部分实验是作者王星星在南京航空航天大学完成的, 相关知识产权属于南京航空航天大学, 现将论文的作者王星星的单位增加第 2 工作单位 “南京航空航天大学机电学院”, 原第 2 单位顺延至第 3; (2) 表 3 中的振幅为 21 μm 和 26 μm 的铆钉高度 H 改为 8.64 mm 和 8.63 mm; (3) 由于作者疏忽, 3.3 节中, 拉伸实验参数 “2.5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ” 修改为 5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

《锻压技术》编辑部