

特种成形

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

任 雁^{1,2}, 刘 佳^{1,2}, 刘 斌^{1,2}, 王晓强³

(1. 河南省果园管理特种机器人工程技术研究中心, 河南 洛阳 471003;

2. 河南林业职业学院 信息与艺术设计系, 河南 洛阳 471003;

3. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 为了确定给定范围内的超声滚挤压风电轴承材料表面粗糙度加工参数的最优区间, 以 42CrMo 钢风电轴承材料试样为研究对象, 开展超声滚挤压表面粗糙度试验, 基于试验结果构建表面粗糙度指数函数预测模型, 分析加工参数对表面粗糙度及其灵敏度的影响, 确定加工参数的稳定域和非稳定域, 优选出最佳的超声滚挤压 42CrMo 钢表面粗糙度加工参数区间。研究表明: 加工参数对表面粗糙度的影响程度大小依次为静压力 F_s 、工件转速 n 、进给速度 f 、振幅 A 。其中, n 的优选区间为 $500 \sim 600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, f 的优选区间为 $35 \sim 45 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, A 的优选区间为 $15 \sim 20 \mu\text{m}$, F_s 的优选区间为 $400 \sim 500 \text{ N}$ 。

关键词: 超声滚挤压; 42CrMo 钢; 表面粗糙度; 指数函数预测模型; 参数敏感性; 加工参数区间

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.01.014

中图分类号: TH161

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 01-0098-08

Sensitivity study on surface roughness processing parameters for wind turbine bearing materials by ultrasonic rolling extrusion

Ren Yan^{1,2}, Liu Jia^{1,2}, Liu Bin^{1,2}, Wang Xiaoqiang³

(1. Henan Orchard Management Special Robot Engineering Technology Research Center, Luoyang 471003, China;

2. Department of Information and Art Design, Henan Forestry Vocational College, Luoyang 471003, China;

3. School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: In order to obtain the optimal range of surface roughness processing parameters for wind turbine bearing materials by the ultrasonic rolling extrusion within a given range, for wind turbine bearing materials sample made of 42CrMo steel, the ultrasonic rolling extrusion the surface roughness test was conducted, and the surface roughness exponential function prediction model was constructed based on the test result. Then, the influences of the processing parameters on the surface roughness and the sensitivity were analyzed, the stable and non-stable regions of processing parameters were determined, and the best ranges of surface roughness processing parameters for ultrasonic rolling extrusion 42CrMo steel were selected. The results show that the influence degree of the processing parameters on the surface roughness is static pressure F_s , rotate speed n of workpiece, feeding speed f and amplitude A , and the optimal range of n , f , A and F_s is $500 \sim 600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, $35 \sim 45 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, $15 \sim 20 \mu\text{m}$ and $400 \sim 500 \text{ N}$, respectively.

Key words: ultrasonic rolling extrusion; 42CrMo steel; surface roughness; exponential function prediction model; parameter sensitivity; processing parameter range

相比传统的滚挤压强化, 超声滚挤压强化表面处理技术利用超声波的特点, 再与传统强化技术相

结合, 通过超高频振动, 使金属材料表层晶体粒子发生变化, 可以进一步减小表面摩擦力和粗糙度, 由于其优势特点, 该新型技术被广泛应用在机械、医学、检测等各个行业领域^[1-3]。作为影响轴承表层性能重要表征参数之一的表面粗糙度, 轴承套圈的刚度、接触强度以及使用寿命都直接或间接地受其影响, 而在强化过程中, 如何对加工参数进行合理优化, 直接影响了风力发电用轴承套圈

收稿日期: 2021-01-22; 修订日期: 2021-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1804145)

作者简介: 任 雁 (1984-), 女, 硕士, 讲师

E-mail: 271804648@qq.com

通信作者: 刘 佳 (1992-), 女, 硕士, 助教

E-mail: 920828732@qq.com

的表面粗糙度。因此,对影响超声滚挤压风电轴承材料表面粗糙度的加工参数敏感性进行研究有重要意义。

目前,许多学者在超声强化领域进行了大量的研究并取得了丰富的研究成果。Lotfi Mohammad等^[4]通过仿真分析了超声振动对 Inconel 718 车削过程中各关键加工参数的影响,并进行了试验验证。Ren S 等^[5]研究了超声辅助深冷滚压技术对 Cr12MoV 钢材料晶相组织及表层性能的影响。Xu X C 等^[6]研究了超声表面滚压强化对 7B50-T7751 铝合金力学性能及腐蚀疲劳行为的影响。程明龙等^[7]通过超声振动滚挤压 45 钢金属材料试验,分析了超声振动滚挤压对改善表面微观组织的作用机理。刘宇等^[8]采用纳米压痕试验测定了 40Cr 钢材料表层的弹性模量、纳米硬度和残余应力,探究了超声表面滚压加工 40Cr 钢表层的力学性能。吕光义等^[9]采用扫描电镜、表面粗糙度仪分析了钛合金 TC4 试件超声深滚处理后的表面形貌及表面粗糙度,探究了超声深滚处理对 TC4 试件表面形貌和表面粗糙度的影响。郑建新等^[10]采用正交试验法研究了 7050 铝合金二维超声滚压加工表面完整性的评价指标,运用灰色关联分析法对表面粗糙度、表层硬度和残余应力进行综合评价。姚成霖等^[11]通过进行 6163 铝合金超声辅助滚压加工试验,分析了不同工艺参数对表面粗糙度的影响,并对切削参数进行了优选。崔凤奎等^[12]通过超声滚挤压试验,建立响应曲面和 BP 神经网络模型,研究了加工参数对超声滚挤压轴承套圈表面粗糙度的影响。王

晓强等^[13-14]通过正交试验、极差分析、方差分析探究了超声滚挤压强化各工艺参数对 42CrMo 钢风电轴承材料表面加工硬化程度的影响,并建立工件超声滚挤压过程的 DEFORM 数值模拟模型,研究了工件转速、进给速度、振幅及静压力对工件表面粗糙度的影响。

综上所述,学者们主要从超声强化的塑性变形作用机理、强化后材料力学性能变化、硬度变化以及构建仿真模型等方面进行了研究,但是,针对超声滚挤压强化风电轴承套圈方面的研究较少,尤其是关于其表面粗糙度加工参数敏感性的研究尚未见到公开报道。为此,本文以风电轴承套圈材料 42CrMo 钢为研究对象,开展超声滚挤压 42CrMo 钢表面粗糙度的正交试验,构建表面粗糙度指数函数预测模型,对建立的表面粗糙度预测模型进行显著性检验,验证其可行性,并根据预测模型分析加工参数对表面粗糙度及其灵敏度的影响规律,从而优选出超声滚挤压 42CrMo 钢的最优加工参数区间,提高工件表面质量。

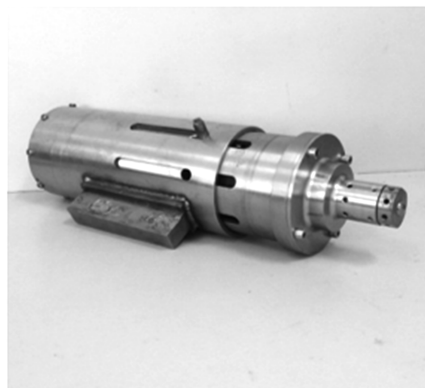
1 超声滚挤压表面粗糙度试验

1.1 试验设备

超声滚挤压强化试验装置如图 1 所示。超声波发生器采用型号 HJ-III 的功率超声试验中心,如图 1a 所示;超声冲击装置如图 1b 所示。超声滚挤压的加工过程如图 2 所示。接触式测量设备 TR200-1 表面粗糙度仪如图 3 所示。



(a)



(b)

图 1 超声滚挤压强化试验装置

(a) 超声波发生器 (b) 超声冲击装置

Fig. 1 Test device of ultrasonic rolling extrusion strengthening

(a) Ultrasonic generator (b) Ultrasonic shock device

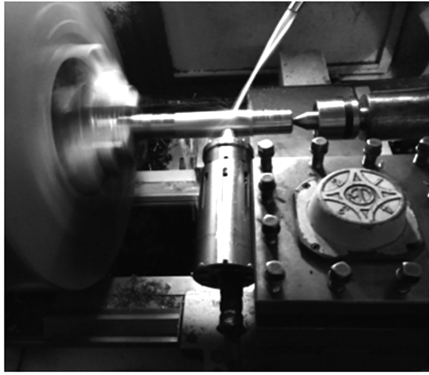


图 2 超声滚挤压加工过程
Fig. 2 Ultrasonic rolling extrusion process



图 3 表面粗糙度仪
Fig. 3 Surface roughness meter

1.2 试验材料

风电轴承套圈材料大多为 42CrMo 钢, 因此, 本次试验选用 42CrMo 钢, 试样直径为 $\phi 50$ mm、长度为 300 mm, 其材料经过淬火处理, 表面硬度约为 630 HV, 试样的原始粗糙度约为 $1.6\text{ }\mu\text{m}$ 。42CrMo 钢的化学成分如表 1 所示。

表 1 42CrMo 钢的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 42CrMo steel
(%, mass fraction)

C	Mn	Cr	Mo	Si	Ni	Fe
0.37	0.77	0.98	0.21	0.15	0.04	97.44

1.3 试验参数设置及结果

影响 42CrMo 钢表面粗糙度 Ra 的加工参数主要包括工件转速 n 、工具头进给速度 f 、超声滚挤压振动振幅 A 以及超声滚挤压所施加的静压力 F_s 。试验采用 4 因素 4 水平正交试验^[15], 各加工参数水平分布如表 2 所示, 超声滚挤压 42CrMo 钢表面粗糙度的正交试验结果如表 3 所示。

表 2 正交试验因素水平表

Table 2 Factors and levels of orthogonal test

水平	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$f/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	$A/\mu\text{m}$	F_s/N
1	300	15	5	200
2	400	25	10	300
3	500	35	15	400
4	600	45	20	500

表 3 正交试验结果

Table 3 Results of orthogonal test

序号	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$f/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	$A/\mu\text{m}$	F_s/N	$Ra/\mu\text{m}$
1	300	15	5	200	0.493
2	300	25	10	300	0.463
3	300	35	15	400	0.447
4	300	45	20	500	0.425
5	400	15	10	400	0.452
6	400	25	5	500	0.431
7	400	35	20	200	0.508
8	400	45	15	300	0.475
9	500	15	15	500	0.412
10	500	25	20	400	0.446
11	500	35	5	300	0.475
12	500	45	10	200	0.532
13	600	15	20	300	0.518
14	600	25	15	200	0.535
15	600	35	10	500	0.471
16	600	45	5	400	0.493

2 超声滚挤压风电轴承材料表面粗糙度加工参数区间敏感性分析

为了获得影响超声滚挤压 42CrMo 钢表面粗糙度变化的加工参数敏感性区间, 基于正交试验结果, 建立超声滚挤压 42CrMo 钢表面粗糙度指数函数预测模型, 分析各加工参数与表面粗糙度之间的灵敏度关系, 得到各加工参数对表面粗糙度影响的敏感性范围。

2.1 超声滚挤压 42CrMo 钢表面粗糙度指数函数预测模型

超声滚挤压 42CrMo 钢表面粗糙度指数函数经验模型 $z(n, f, A, F_s)$ 如式 (1) 所示。

$$Ra = z(n, f, A, F_s) = a_0 n^{a_1} f^{a_2} A^{a_3} F_s^{a_4} \quad (1)$$

式中: a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 为工件转速 n 、工具头进给速度 f 、超声滚挤压振动振幅 A 、超声滚挤压所施加的静压力 F_s 等加工参数的指数; a_0 为常数项。

根据式(1)和表3所示正交试验结果,利用最小二乘法建立超声滚挤压42CrMo钢表面粗糙度指数函数预测模型,如式(2)所示。

$$Ra = 0.60629n^{0.12487}f^{0.02034}A^{-0.0042}F_s^{-0.18374} \quad (2)$$

2.2 指数函数预测模型检验

根据方差来源(回归、残差)计算超声滚挤压42CrMo钢表面粗糙度指数函数预测模型的平方和、自由度、均方差及 F 值,其中 $F_{0.05}$ 表示模型显著程度($F \geq F_{0.05}$ 代表模型的拟合效果好),对建立的表面粗糙度指数函数预测模型进行显著性检验,结果如表4所示。

表4 显著性检验
Table 4 Significance test

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	$F_{0.05}$
回归	0.01855	4	0.0046375	20.242	3.357
残差	0.00252	11	0.0002291		
总计	0.02107	15			

运用式(3)计算表面粗糙度指数函数预测模型的复相关系数 R 。

$$R = \sqrt{1 - \frac{S_{\text{残}}}{S_{\text{残}} + S_{\text{回}}}} \quad (3)$$

式中: $S_{\text{残}}$ 为模型残差平方和; $S_{\text{回}}$ 为模型回归平方和。

由表4指数函数预测模型的显著性检验结果及式(3)的计算结果可知: F 值远远大于 $F_{0.05}$,表明构建的表面粗糙度指数函数预测模型在95%置信水平上;预测模型复相关系数 R 为93.8%,说明建立的预测模型能很好地反映超声滚挤压42CrMo钢表面粗糙度与各个加工参数之间的关系,构建的预测模型具有准确性和可靠性。

2.3 超声滚挤压42CrMo钢表面粗糙度加工参数灵敏度分析

指数函数预测模型各加工参数的指数为超声滚挤压42CrMo钢表面粗糙度各加工参数的相对灵敏度,从指数函数预测模型即式(2)可知,42CrMo钢表面粗糙度对 n 、 f 、 A 以及 F_s 的灵敏度为: $S_{Ra}^n = 0.12487$, $S_{Ra}^f = 0.02034$, $S_{Ra}^A = -0.0042$, $S_{Ra}^{F_s} = -0.18374$ 。其中, S_{Ra}^n 为 n 的灵敏度; S_{Ra}^f 为 f 的灵敏度; S_{Ra}^A 为 A 的灵敏度; $S_{Ra}^{F_s}$ 为 F_s 的灵敏度。

由表面粗糙度与加工参数之间的相对灵敏度可知,在超声滚挤压过程中,加工参数对42CrMo钢表面粗糙度的影响灵敏度大小依次为: $F_s > n > f > A$ 。

2.3.1 灵敏度模型

结合式(2),对影响42CrMo钢表面粗糙度的超声滚挤压各加工参数分别取偏导,得到超声滚挤压42CrMo钢表面粗糙度与各加工参数(n 、 f 、 A 、 F_s)的灵敏度模型,如式(4)所示。

$$\begin{cases} S_{Ra}^n = \frac{\partial z(\bar{n}, \bar{f}, \bar{A}, \bar{F}_s)}{\partial n} \\ S_{Ra}^f = \frac{\partial z(\bar{n}, \bar{f}, \bar{A}, \bar{F}_s)}{\partial f} \\ S_{Ra}^A = \frac{\partial z(\bar{n}, \bar{f}, \bar{A}, \bar{F}_s)}{\partial A} \\ S_{Ra}^{F_s} = \frac{\partial z(\bar{n}, \bar{f}, \bar{A}, \bar{F}_s)}{\partial F_s} \end{cases} \quad (4)$$

式中: \bar{n} 为 n 的平均数; \bar{f} 为 f 的平均数; \bar{A} 为 A 的平均数; \bar{F}_s 为 F_s 的平均数; $\partial z()$ 为求偏导数。

由于表3正交试验结果中超声滚挤压加工参数的取值不连续,而不连续的取值会影响数据处理的精度,所以,对于式(4)计算各加工参数灵敏度时,需对 n 、 f 、 A 、 F_s 取3水平的平均值。因此,运用加工参数灵敏度可以反映出各个加工参数在某一区间内表面粗糙度的变化情况,从而得到理想的区间范围。

基于式(2)、式(4),得到超声滚挤压加工参数 n 、 f 、 A 、 F_s 的灵敏度模型如式(5)所示。

$$\begin{cases} S_{Ra}^n = 0.0757n^{-0.87513}f^{0.02034}A^{-0.0042}F_s^{-0.18374} \\ S_{Ra}^f = 0.0123\bar{n}^{0.12487}\bar{f}^{-0.97966}\bar{A}^{-0.0042}\bar{F}_s^{-0.18374} \\ S_{Ra}^A = -0.0025\bar{n}^{0.12487}\bar{f}^{0.02034}\bar{A}^{-1.0042}\bar{F}_s^{-0.18374} \\ S_{Ra}^{F_s} = -0.1114\bar{n}^{0.12487}\bar{f}^{0.02034}\bar{A}^{-0.0042}\bar{F}_s^{-1.18374} \end{cases} \quad (5)$$

由表3正交试验结果可知,平均工件转速为450 r·min⁻¹,平均工具头进给速度为30 mm·min⁻¹,平均超声滚挤压振动振幅为12.5 μm,平均静压力为350 N,将式(5)进行简化,简化结果如式(6)所示。

$$\begin{cases} S_{Ra}^n = 0.02736n^{-0.87513} \\ S_{Ra}^f = 0.00889f^{-0.97966} \\ S_{Ra}^A = -0.00196A^{-1.0042} \\ S_{Ra}^{F_s} = -0.25316F_s^{-1.18374} \end{cases} \quad (6)$$

2.3.2 灵敏度曲线分析

由式(6)得到表面粗糙度对各加工参数(n 、 f 、 A 、 F_s)的灵敏度曲线如图4~图7所示。

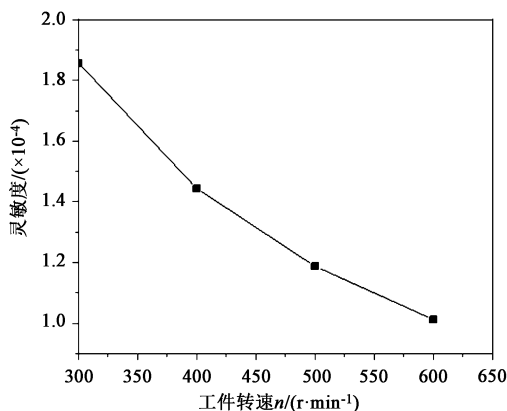


图4 表面粗糙度对 n 的灵敏度曲线

Fig. 4 Sensitivity curve of surface roughness to n

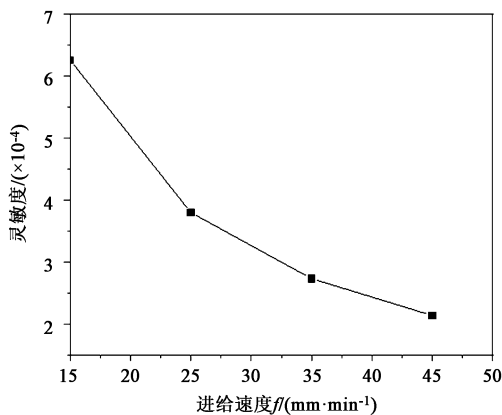


图5 表面粗糙度对 f 的灵敏度曲线

Fig. 5 Sensitivity curve of surface roughness to f

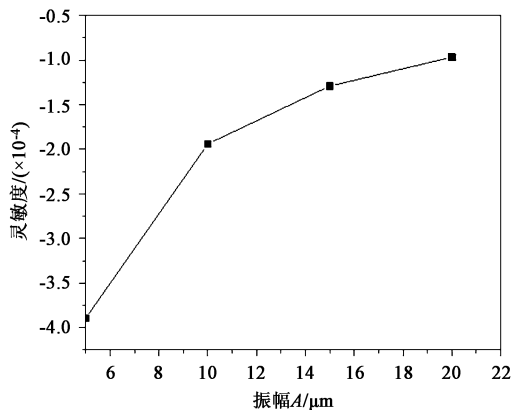


图6 表面粗糙度对 A 的灵敏度曲线

Fig. 6 Sensitivity curve of surface roughness to A

由图4可以看出, n 在 $[300 \text{ r} \cdot \min^{-1}, 400 \text{ r} \cdot \min^{-1}]$ 、 $[400 \text{ r} \cdot \min^{-1}, 500 \text{ r} \cdot \min^{-1}]$ 区间

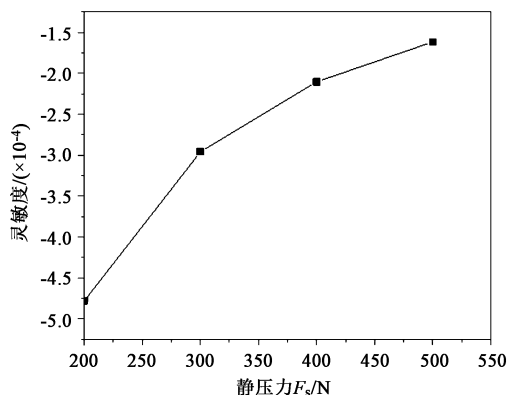


图7 表面粗糙度对 F_s 的灵敏度曲线

Fig. 7 Sensitivity curve of surface roughness to F_s

的灵敏度大于 $[500 \text{ r} \cdot \min^{-1}, 600 \text{ r} \cdot \min^{-1}]$ 区间的灵敏度, 即当 n 从 $500 \text{ r} \cdot \min^{-1}$ 变化到 $600 \text{ r} \cdot \min^{-1}$ 时, n 对表面粗糙度的影响较小。由图5可以看出, f 在 $[15 \text{ mm} \cdot \min^{-1}, 25 \text{ mm} \cdot \min^{-1}]$ 、 $[25 \text{ mm} \cdot \min^{-1}, 35 \text{ mm} \cdot \min^{-1}]$ 区间的灵敏度大于 $[35 \text{ mm} \cdot \min^{-1}, 45 \text{ mm} \cdot \min^{-1}]$ 区间的灵敏度, 即当 f 从 $35 \text{ mm} \cdot \min^{-1}$ 变化到 $45 \text{ mm} \cdot \min^{-1}$ 时, 表面粗糙度变化较小。由图6可知, A 在 $[5 \mu\text{m}, 10 \mu\text{m}]$ 、 $[10 \mu\text{m}, 15 \mu\text{m}]$ 区间的灵敏度大于 $[15 \mu\text{m}, 20 \mu\text{m}]$ 区间的灵敏度, 即当 A 从 $15 \mu\text{m}$ 增加到 $20 \mu\text{m}$ 时, 表面粗糙度波动较小。由图7可知, F_s 在 $[200 \text{ N}, 300 \text{ N}]$ 、 $[300 \text{ N}, 400 \text{ N}]$ 区间的灵敏度大于 $[400 \text{ N}, 500 \text{ N}]$ 区间的灵敏度, 即当 F_s 从 400 N 增加到 500 N 时, 表面粗糙度波动较小。

2.3.3 加工参数稳定域和非稳定域分析

加工参数变化对表面粗糙度的影响较小、变化不敏感的加工参数区间为加工参数的稳定域, 而非稳定域是指加工参数的变化对42CrMo钢表面粗糙度的影响较大、变化敏感的范围。分析图4~图7可知, n 、 f 、 A 、 F_s 的稳定域与非稳定域如表5所示。

表5 超声滚挤压42CrMo钢表面粗糙度加工参数稳定域与非稳定域

Table 5 Stable regions and non-stable regions of 42CrMo steel surface roughness processing parameters by ultrasonic rolling extrusion

加工参数	稳定域	非稳定域
工件转速 $n/(\text{r} \cdot \min^{-1})$	[500, 600]	[300, 500]
进给速度 $f/(\text{mm} \cdot \min^{-1})$	[35, 45]	[15, 35]
振幅 $A/\mu\text{m}$	[15, 20]	[5, 15]
静压力 F_s/N	[400, 500]	[200, 400]

3 超声滚挤压 42CrMo 钢加工参数区间优选

由式(2)表面粗糙度指数函数预测模型, 求取 n 、 f 、 A 、 F_s 同一水平下的平均值, 可以得到各加工参数在稳定域与非稳定域内表面粗糙度的变化情况, 如图8~图11所示。

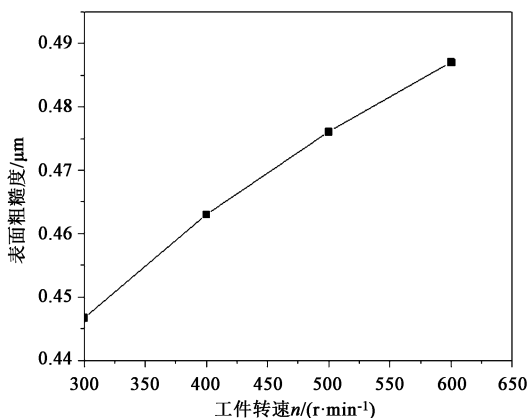


图8 n 对表面粗糙度的影响

Fig. 8 Influence of n on surface roughness

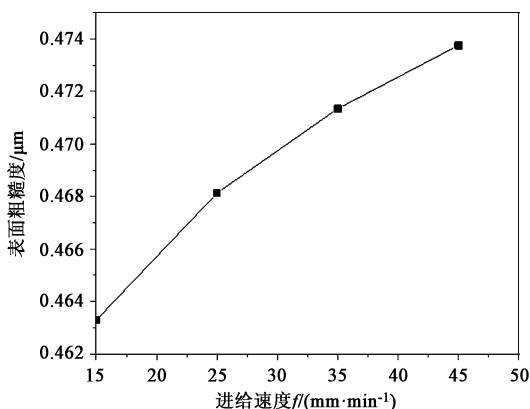


图9 f 对表面粗糙度的影响

Fig. 9 Influence of f on surface roughness

由图8可知: n 在非稳定域区间内表面粗糙度的变化大于在稳定域区间内的变化; 当其他加工参数保持不变、 n 较低时, 工具头在试样表面圆周方向上重复滚压次数相对较少, 对应的表面粗糙度值也较小, 但随着 n 逐渐增加, 工具头在试样表面圆周方向上的接触次数增多, 工具头多次高频振动滚挤压工件表面会使材料表层的金属流动加剧, 表面粗糙度值相对较高, 但 n 在稳定域区间内时表面粗糙度波动范围为 $0.476 \sim 0.487 \mu m$, 变化并不大。

由图9可知: f 在非稳定域区间内表面粗糙度的

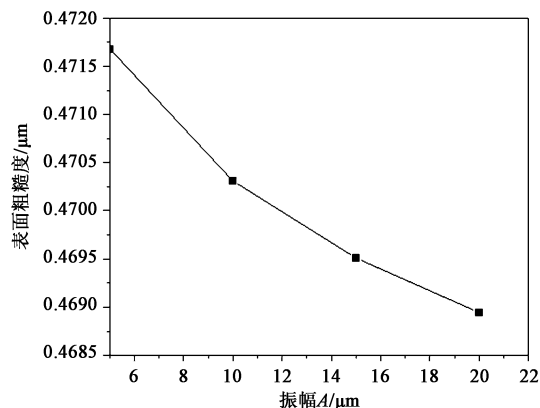


图10 A 对表面粗糙度的影响

Fig. 10 Influence of A on surface roughness

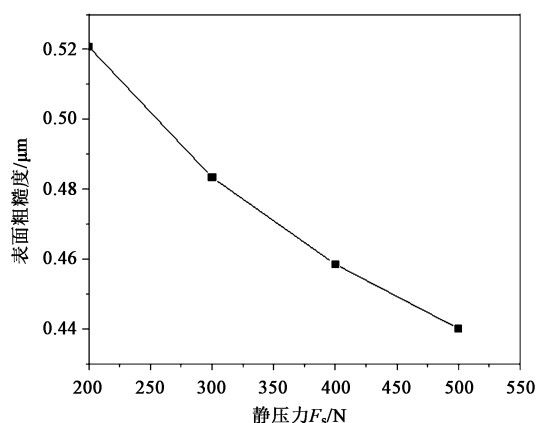


图11 F_s 对表面粗糙度的影响

Fig. 11 Influence of F_s on surface roughness

变化大于在稳定域区间内的变化; 当其他加工参数保持不变时, 随着 f 的增加, 表面粗糙度值也逐渐增高。由于机床主轴有转速, 工具头沿主轴水平方向做进给运动, 故工具头的合成运动轨迹为螺旋线。当 f 较小时, 上一道工序留下的波峰将会被滚压平整, 从而降低试样的表面粗糙度值; 当 f 逐渐增大时, 工具头速度增大, 其螺旋运动轨迹会使前一道加工工序留下的波峰、波谷在这一次未被滚压到, 接触次数增多、接触时间减少导致试样的表面粗糙度值升高, 但随着 f 的增加, 工具头进给速度在稳定域区间内时材料表面粗糙度在 $0.471 \sim 0.474 \mu m$, 波动并不大。

由图10可知: A 在非稳定域区间内表面粗糙度的变化大于在稳定域区间内的变化; 当其他加工参数保持不变时, 随着 A 的增大, 表面粗糙度值逐渐减小。 A 较小时, 由于超声波高频振动施加的能量不足以将试样加工前一道工序所产生的波峰、波谷完全压平, 故表面粗糙度较大; 当 A 逐

渐增大时, 超声波高频振动施加的能量足以使试样表层的金属塑性流动加剧, 使表面粗糙度值逐渐降低。因此, A 在稳定域内时材料表面粗糙度在 $0.470 \sim 0.468 \mu\text{m}$ 范围内变化。

由图 11 可知: F_s 在非稳定域区间内表面粗糙度的变化大于在稳定域区间内的变化; 当其他加工参数保持不变时, F_s 较小, 试样表面产生的塑性流动不足以将上一道工序遗留的加工痕迹的波峰完全

压入波谷, 因此, 表面粗糙度值较大; 随着 F_s 的逐渐增大, 试样表层的金属发生塑性流动, 促使波峰的材料流向波谷, 从而降低了试样表面粗糙度值。因此, 静压力在稳定域内时材料表面粗糙度在 $0.458 \sim 0.440 \mu\text{m}$ 范围内变化。

通过分析可知, 超声滚挤压加工参数在合理区间范围内可以保证 42CrMo 钢表面粗糙度的波动较小, 其优选区间如表 6 所示。

表 6 42CrMo 钢材料表面粗糙度加工参数优选区间

Tab. 6 Optimal ranges of surface roughness processing parameters for 42CrMo steel material

加工参数	加工参数优选区间	稳定、非稳定域	表面粗糙度变化范围/ μm
工件转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	[500, 600]	稳定域	0.476~0.487
进给速度 $f/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	[35, 45]	稳定域	0.471~0.474
振幅 $A/\mu\text{m}$	[15, 20]	稳定域	0.470~0.468
静压力 F_s/N	[400, 500]	稳定域	0.458~0.440

4 结 论

(1) 由表面粗糙度指数函数预测模型的显著性检验结果可知, F 值远远大于 $F_{0.05}$, 预测模型在 95% 置信水平上, 预测模型复相关系数为 93.8%, 表明了构建的表面粗糙度指数函数预测模型的可行性。

(2) 由建立的表面粗糙度指数函数预测模型可知, 加工参数对 42CrMo 钢表面粗糙度影响的灵敏度由高到低为: 静压力 $F_s >$ 工件转速 $n >$ 进给速度 $f >$ 振幅 A 。

(3) 超声滚挤压 42CrMo 钢材料加工参数范围内的优选区间为: 工件转速为 $500 \sim 600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 工具头进给速度为 $35 \sim 45 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 振幅为 $15 \sim 20 \mu\text{m}$, 静压力为 $400 \sim 500 \text{ N}$ 。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘佳. 精密轴承内圈超声滚挤压加工表面微观形貌研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017.
Liu J. Study on Micro-topography of Ultrasonic Rolling Extrusion Process of Precision Bearing Inner Ring [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2017.
- [3] 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 on prediction model of surface performance for ultrasonic roll extrusion bearing ring and optimization on process parameters [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 118-125.

- [4] Lotfi Mohammad, Amini Saeid. FE simulation of linear and elliptical ultrasonic vibrations in turning of Inconel 718 [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2018, 232 (4): 438-448.

- [5] Ren S, Zhao Y L, Yao J T, et al. Enhanced surface properties and microstructure evolution of Cr12MoV using ultrasonic surface rolling process combined with deep cryogenic treatment [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28 (2): 1132-1140.

- [6] Xu X C, Liu D X, Zhang X H, et al. Mechanical and corrosion fatigue behaviors of gradient structured 7B50-T7751 aluminum alloy processed via ultrasonic surface rolling [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 62: 156-169.

- [7] 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 J, et al. Investigations on effects of ultrasonic rolling process on surface microstructure of steel [J]. Tool Engineering, 2019, 53 (7): 73-76.

- [8] 刘宇, 王立君, 王东坡, 等. 超声表面滚压加工 40Cr 表层的纳米力学性能 [J]. 天津大学学报, 2012, 45 (7): 656-661.

Liu Y, Wang L J, Wang D P, et al. Nano mechanical properties of 40Cr surface layer after ultrasonic surface rolling processing [J]. Journal of Tianjin University, 2012, 45 (7): 656-661.

- [9] 吕光义, 朱有利, 李礼, 等. 超声深滚对 TC4 钛合金表面形貌和表面粗糙度的影响 [J]. 中国表面工程, 2007, (4): 38-41.

Lyu G Y, Zhu Y L, Li L, et al. The effect of ultrasonic deep rolling (UDR) on surface topography and surface roughness of TC4 titani-

- um alloy [J]. China Surface Engineering, 2007, (4): 38-41.
- [10] 郑建新, 任元超. 7050 铝合金二维超声滚压加工表面完整性综合评价 [J]. 中国机械工程, 2018, 29 (13): 1622-1626.
- Zheng X J, Ren Y C. Comprehensive assessment of surface integrity in two dimensional ultrasonic rolling 7050 aluminum alloys [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29 (13): 1622-1626.
- [11] 姚成霖, 童景琳, 焦锋, 等. 超声滚压加工 6163 铝合金的表面粗糙度研究 [J]. 工具技术, 2017, 51 (8): 87-89.
- Yao C L, Tong J L, Jiao F, et al. Experiment and study on surface roughness of ultrasonic auxiliary rolling on aluminum alloy 6163 [J]. Tool Engineering, 2017, 51 (8): 87-89.
- [12] 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.
- [13] 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 (2): 1923-1929.
- Wang X Q, Liu D Y, Ruan X L, et al. Study on work hardening degree of 42CrMo bearing steel by ultrasound rolling extrusion [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39 (2): 1923-1929.
- [14] 王晓强, 刘鑫, 姚国林, 等. 风电轴承材料超声滚挤压表面粗糙度数值模拟及参数优化 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (9): 20-26.
- Wang X Q, Liu X, Yao G L, et al. Numerical simulation and parameter optimization of surface roughness of ultrasonic rolling extrusion for wind power bearing material [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (9): 20-26.
- [15] 陈龙, 黄璞, 王炯, 等. 基于正交试验和灰色系统理论的拼焊板前纵梁成形优化 [J]. 塑性工程学报, 2012, 19 (4): 1-5.
- Chen L, Huang P, Wang J, et al. Optimization of tailor-welded front longitudinal forming based on orthogonal experiment and grey system theory [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19 (4): 1-5.

关于开展第十二期“锻压企业质量工程师”培训班 (有色金属及高温合金锻造工艺与标准)的通知(第二轮)

为促进我国锻压企业实行规范化生产,提高企业生产技术水平、管理水平和市场竞争能力,满足各企业对质量管理体系和安全生产管理体系的需求,同时,提高锻压企业技术人员和质量管理人员对相关国家与行业标准的理解和使用能力,全国锻压标准化技术委员会经研究决定,自2013年起,在全国范围内开展“锻压企业质量工程师”的培训与认证工作,以及锻压标准宣贯工作。为配合此项工作,本标委会将按“模锻”、“自由锻”、“特种成形”、“冲压”等专题陆续举办相关培训班,截止目前已成功举办十一期,取得了很好的效果,得到广大锻压企业认可和支持。

第十二期“‘锻压企业质量工程师’培训班——有色金属及高温合金锻造工艺与标准”将于2022年举办。请各单位尽快报名,有关事宜通知如下:

一、报名条件

具备中专及以上学历的企业负责人、质量主管、安全卫生主管、标准化工作人员和锻压专业技术人员。

符合报名条件的上述人员,须由本人填写报名表,并经单位审核同意后方可报名。

二、培训内容

(1) 有色金属及高温合金锻造技术、工艺、装备发展现状与发展趋势

(2) 锻造车间安全生产与环境保护

(3) 有色金属及高温合金锻造模拟技术及优化设计

(4) 高温合金锻件质量控制、工艺设计与实例分析

(5) 铝合金锻件质量控制、工艺设计与实例分析

(6) 镁合金、铝合金和铜合金锻件质量控制、工艺设计与实例分析

(7) 钛合金锻件质量控制、工艺设计与实例分析

(8) 有色金属及高温合金锻件的缺陷分析与控制

(9) 企业参观与讨论

(10) 考试与测评

三、主讲教师

我国锻压领域知名专家、企业负责人、高级工程师、现场管理人员、知名院校教授等。

四、培训时间及地点

培训时间: 2022年4月22-25日。

培训地点: 安徽省芜湖市。

五、报名方式

欲参加培训的学员,请您填好回执表(登陆网站 <http://www.fstjournal.net> 下载),通过E-mail发至全国锻压标准化技术委员会秘书处。

六、联络方式

全国锻压标准化技术委员会

联系人: 林玉彤、魏 巍、金 红

地 址: 北京市海淀区学清路18号709室(100083)

电 话: 010-62920652; 18811346037; 13439515704

E-mail: fst_linyutong@163.com; dyjsjournal@163.com;
duanya2005@126.com

全国锻压标准化技术委员会