

42CrMo 钢超声滚挤压表面硬度有限元分析及参数优化

王排岗^{1,2}, 王晓强^{1,2}, 王浩杰^{1,2}, 曹丽茹^{1,2}

(1. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003; 2. 机械装备先进制造河南省协同创新中心, 河南 洛阳 471003)

摘要: 为了提高 42CrMo 钢零件的耐腐蚀性和抗疲劳性, 基于 ABAQUS 建立了超声滚挤压有限元仿真模型, 通过单因素试验和响应曲面法, 分析了工艺参数对 42CrMo 钢表面硬度的作用规律和影响程度, 同时对所建立的二阶响应曲面模型进行了显著性检验和工艺参数优化。结果表明, 42CrMo 钢的表面硬度随转速和进给速度的提高呈现先增加后下降的趋势, 随着振幅和静压力的增大而增大。由响应曲面分析可知, 振幅对表面硬度的影响最大, 优化得到最优工艺参数组合为: 转速为 $418 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、进给速度为 $15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、振幅为 $25 \mu\text{m}$ 、静压力为 600 N 。对优化结果进行超声滚挤压试验, 将仿真优化结果和试验结果进行对比, 误差在 5% 以内, 验证了超声滚挤压仿真模拟对 42CrMo 钢的表面硬度进行预测的可行性。

关键词: 超声滚挤压; 42CrMo 钢; 表面硬度; 本构模型; 有限元分析

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.03.021

中图分类号: TG376.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 03-0152-07

Finite element analysis and parameter optimization on surface hardness of ultrasonic rolling for 42CrMo steel

Wang Paigang^{1,2}, Wang Xiaoqiang^{1,2}, Wang Haojie^{1,2}, Cao Liru^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;

2. Collaborative Innovation Center of Advanced Manufacturing of Mechanical Equipment, Luoyang 471003, China)

Abstract: To improve the corrosion resistance and fatigue resistance of 42CrMo steel parts, a finite element simulation model of ultrasonic rolling was established based on ABAQUS, and through single factor test and response surface method, the effect rules and influence degrees of process parameters on the surface hardness of 42CrMo steel were analyzed. At the same time, the significance test and process parameters optimization of the established second-order response surface model were carried out. The results show that the surface hardness of 42CrMo steel increases first and then decreases with the increasing of rotational speed and feeding speed, and increases with the increasing of amplitude and static pressure. From the response surface analysis, it can be seen that the amplitude has the greatest impact on the surface hardness, and the optimal process parameters combination obtained by optimization is the rotation speed of $418 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, the feeding speed of $15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, the amplitude of $25 \mu\text{m}$ and the static pressure of 600 N . The ultrasonic rolling test was carried out on the optimization results, and the simulation optimization results were compared with the test results, and the error is within 5%, which verifies the feasibility of the ultrasonic rolling simulation to predict the surface hardness of 42CrMo steel.

Key words: ultrasonic rolling; 42CrMo steel; surface hardness; constitutive model; finite element analysis

42CrMo 钢作为一种高强度钢, 经过调质处理后, 具有良好的抗疲劳特性和抗多次冲击能力, 被广泛应用于风电轴承套圈的生产与制造^[1]。由于风电轴承套圈的工作比较恶劣, 并且长期承受较大的

周期载荷, 因此, 要求其表面具有较低的粗糙度和较高的硬度。但由于 42CrMo 钢的密度大、导热性差、硬度高等特性, 在加工过程中难以保证表面精度, 是典型的难加工材料^[2]。超声滚挤压技术是一种近净成形工艺, 与抛光、磨削、喷丸等表面强化加工工艺相比, 超声滚挤压的加工效率不仅很大程度上有所提高, 而且可以在加工表面产生加工硬化现象, 进而提高零件的耐腐蚀性和抗疲劳性能。在超声滚挤压加工过程中, 选取合理的工艺参数对加工结果有着很大的影响, 因此, 研究超声滚挤压加工过程中工艺参数对 42CrMo 钢零件表面硬度的影

收稿日期: 2022-05-01; 修订日期: 2022-08-17

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: 王排岗 (1994-), 男, 硕士

E-mail: 1395055213@qq.com

通信作者: 王晓强 (1972-), 男, 博士, 教授

E-mail: wang_xq2002@163.com

响,并对工艺参数进行优化,对于提高零件的疲劳寿命有着非常重要的意义。

近年来,随着先进制造技术的发展,许多学者对超声滚挤压技术进行了大量研究。张飞等^[3]采用超声滚压技术对 45 钢进行加工,并对其表面质量进行分析。结果表明,滚压后的试样表面产生了晶粒细化,表面粗糙度降低了 $2.97\text{ }\mu\text{m}$,残余压应力提高了 352 MPa ,疲劳极限值增加了 107 MPa 。Tolga Bozdana A 等^[4]利用超声深冷滚压技术对 Ti-6Al-4V 钛合金进行加工。试验结果显示,超声深冷滚压可有效提高材料表层的残余压应力,在层深 0.2 mm 处,残余压应力可以达到 900 MPa 。Liu Y 等^[5]采用压痕试验和仿真模拟法探究超声滚压表面的力学特性,分析了工艺参数对评价指标的影响,得到了工件表层的屈服强度和硬化指数。Li F Q 等^[6]为深入研究超声滚压加工对 Ti-6Al-4V 钛合金表面特性的影响,利用 ABAQUS 软件模拟了不同超声滚压力对表层残余应力的作用。仿真结果表明,表面残余应力随着滚压压力的增加而降低,并且残余压应力在滚压压力为 600 N 时最大。刘治华等^[7]采用超声滚压技术对 18CrNiMo7-6 钢进行加工,发现试样表面经过超声滚压后粗糙度明显降低,显微硬度明显提高。

在塑性成形领域,国内外学者采用有限元模拟和试验设计相结合的方法对加工硬化行为进行了大量研究。武民等^[8]对 TC4 钛合金进行了不同振动方向的超声侧铣试验。结果表明,法向方向得到的显微硬度最大,显微硬度随着转速的提高逐渐增大。Shinya Kanou 等^[9]采用试验和仿真相结合的方法,研究了冲击速度和冲击尺寸对喷丸处理的多晶体金属表面加工硬化的影响。结果表明,在大的冲击载荷作用下,变形优先沿着晶界而不是在晶粒内部进行。王晓强等^[10]对 GCr15 钢进行超声滚挤压强化试验,结果表明,经过超声滚挤压处理的 GCr15 钢,其表面硬化层深度可达 $250\text{ }\mu\text{m}$,其表面硬度随静压力的增大而提高,随进给速度的增大而降低,随工件转速的增大先提高后降低。韩璐等^[11]设计了超声磨削和普通磨削对比试验,分析了超声振动和磨削参数对表面完整性的影响。结果表明,与普通磨削相比,超声辅助磨削提高了表层硬度、残余压应力和晶粒细化层厚度。Lu X 等^[12]根据镍基高温合金硬度和应变的关系,利用有限元软件构建了微铣削槽三维仿真模型,分析了加工表面显微硬度的分布,为提高镍基高温合金的表面完整性提供了参考。

综上所述,国内外众多学者对超声滚挤压技术做了大量的研究,然而采用有限元分析和试验设计相结合的方法对 42CrMo 钢超声滚挤压表面硬度进行研究的文献较少。因此,本文首先通过 ABAQUS 建立超声滚挤压有限元仿真模型,分析工艺参数对 42CrMo 钢棒料表面硬度的影响;其次在仿真试验数据的基础上,运用响应曲面法建立工艺参数和表面硬度的预测模型,并对其进行优化求解;最后对最优参数组合进行试验验证,对比仿真优化和试验结果,验证有限元分析的可行性,对提高金属零件的表面性能具有重要的理论意义。

1 仿真试验设计

1.1 试验材料

试验材料选用强度高和韧性好的 42CrMo 钢棒料,其化学元素成分(%,质量分数)为: C 0.37, Mn 0.77, Cr 0.98, Mo 0.21, Si 0.15, Ni 0.04, Fe 97.44。直径为 $\Phi 50\text{ mm}$ 、长度为 320 mm 的 42CrMo 钢棒料经调质处理后,其基本物理参数如表 1 所示。

表 1 42CrMo 钢的物理参数
Table 1 Physical parameters of 42CrMo steel

参数	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服强度/ MPa	热膨胀系数
数值	7850	212	0.28	930	1.24×10^{-5}

1.2 试验原理

超声滚挤压技术作为新型的无切屑表面近净成形技术,加工原理简图如图 1 所示。交流电首先在超声波发生器的作用下转变为超声频电能,随后再由换能器将超声频电能转换为超声频振动,超声频振动经由变幅杆进行放大,驱动工具头振动加工。金属零件在进行超声滚挤压强化后,表层发生金属流动和塑性变形,使内部结构的晶粒发生位错和滑移,导致零件表面出现加工硬化现象,从而使零件的表面硬度得到提高。

1.3 42CrMo 钢材料的本构模型

Johnson-Cook 本构模型的结构形式比较简单,多应用于描述金属的应力、应变关系。在超声滚挤压加工过程中,高应变率会使材料局部产生大量的热量,进而对材料的表层特性产生影响。为了更加真实有效地反映材料特性,改进后的 J-C 本构模型如式(1)所示。改进后的 J-C 本构模型参数如表 2 所示^[13]。

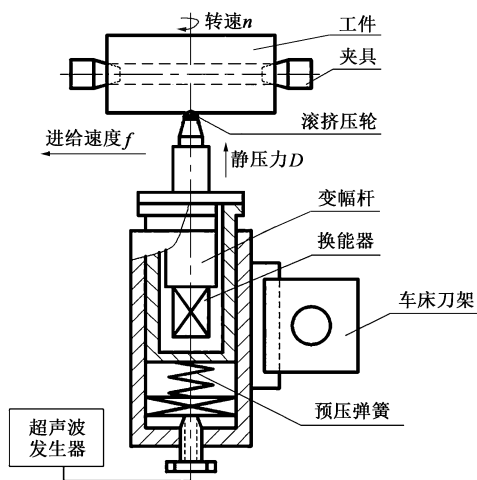


图 1 超声滚挤压加工原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of principle for ultrasonic rolling process

$$\sigma = (Q + B\varepsilon^s)(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}) \left[1 - \left(\frac{\Delta T(\varepsilon)}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中： σ 为流动应力； ε 为材料的应变； $\dot{\varepsilon}$ 为材料的应变率； $\dot{\varepsilon}_0$ 为材料的参考应变率； T_m 为熔化温度； T_r 为过滤温度； $\Delta T(\varepsilon)$ 为绝对温升； Q 、 B 、 C 、 m 、 s 为材料参数。

表 2 42CrMo 钢的改进 J-C 本构模型参数

Table 2 Improved J-C constitutive model parameters of 42CrMo steel

参数	Q/MPa	B/MPa	C	s	m	温度/K	
						T_m	T_r
数值	1059	528	0.008	0.211	1	1668	20

1.4 超声滚挤压仿真模型建立

采用 ABAQUS 有限元软件中的 Explicit 模块对超声滚挤压过程进行仿真数据分析，分析流程大致包括前处理、分析计算、后处理 3 个部分^[14]。在建立超声滚挤压仿真模型时，忽略温度升高对材料的影响作用，默认 42CrMo 钢加工材料的各向同性。

八节点线性六面体单元 (C3D8R) 网格可以解决工件过度变形导致的沙漏和自锁现象，在接触区域进行网格细化，尺寸设置为 0.05 mm，共划分 57750 个网格。滚压头为高强度钨钢，将其视为理想刚体，不用进行网格划分，仿真模型如图 2 所示。

为了减小超声滚挤压仿真加工和试验加工的误差，采用震荡的方法模拟零件的表面粗糙度，设置仿真材料的初始粗糙度为 1 μm 。设置滚压头与工件

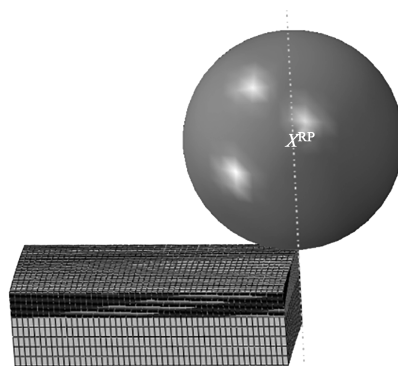


图 2 超声滚挤压仿真模型

Fig. 2 Simulation model of ultrasonic rolling

表面的相互作用关系为表面与表面接触，摩擦因数为 0.02。根据超声滚挤压加工过程，对滚压头和工件表面设置参考点和运动耦合绑定，设定转速、滚压头振幅和频率以及进给速度，同时预置静压力，最后将工件和滚压头的剩余自由度进行约束。

1.5 超声滚挤压仿真模型建立

硬度在测量上比较困难，在 ABAQUS 可视化模块中也不能直接对加工表面硬度进行提取，因此，需要通过有限元仿真和试验相结合的方法来获取仿真加工表层的硬度。以超声滚挤压仿真中已加工表面的残余应变为自变量，构建残余应变与硬度间的数学模型，从而为 42CrMo 钢棒料表面硬度的提取提供一个十分有效的方法。残余应变根据 ABAQUS 中的等效塑性应变进行输出，由文献 [15] 可知，42CrMo 钢棒料的表面硬度 H 与残余应变的关系如式 (2) 所示：

$$H = G \times 181.48678(\varepsilon_{\text{res}} + 0.08)^{0.16843} \quad (2)$$

式中： ε_{res} 为残余应变； G 为比例常数，通过仿真和试验相结合的方法确定，通过测定可得 $G=5.31$ 。

2 单因素结果分析

根据超声滚挤压仿真试验结果，采用单因素分析对工艺参数的取值范围进行简单寻优，并分析转速、进给速度、振幅和静压力某一因素变化对 42CrMo 钢棒料表面硬度的影响，结果如图 3 所示。

图 3a 为保持进给速度为 22 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、振幅为 15 μm 、静压力为 350 N 时，转速对表面硬度的影响结果，随着转速的提高，表面硬度呈现先增加后下降的趋势；图 3b 为保持转速为 380 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、振幅为 15 μm 、静压力为 350 N 时，进给速度对表面硬度的影响结果，随着进给速度的增加，表面硬

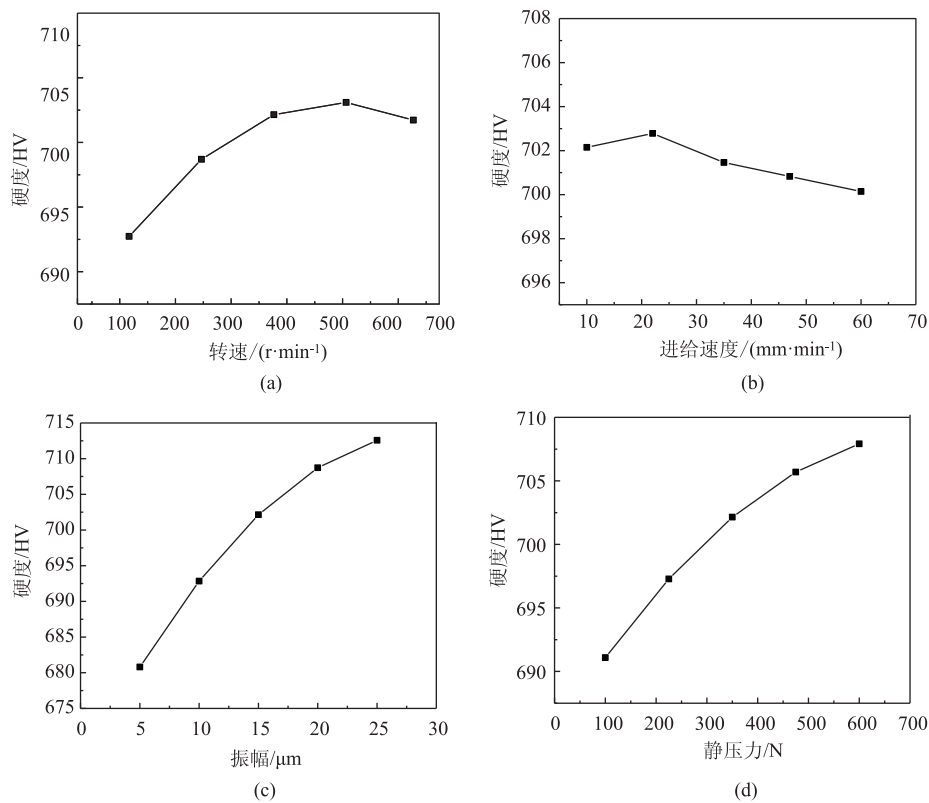


图3 不同工艺参数对表面硬度的影响

(a) 转速 (b) 进给速度 (c) 振幅 (d) 静压力

Fig.3 Effects of different process parameters on surface hardness

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

度呈现先增大后下降的趋势；图 3c 为保持转速为 $380\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、进给速度为 $22\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、静压力为 350 N 时，振幅对表面硬度的影响结果，当振幅增大时，滚压头对工件表面的冲击力增大，工件的表面硬度得以提高；图 3d 为保持为转速为 $380\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、进给速度为 $22\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 、振幅为 $15\text{ }\mu\text{m}$ 时，静压力对表面硬度的影响结果，随着静压力的提高，表面硬度随之提高。

3 响应曲面分析

3.1 Box-Behnken 仿真试验设计及结果分析

响应曲面法（Response Surface Methodology）是采用多元二次回归方程来拟合因素与响应间的函数关系，解决多变量问题的一种统计方法^[16]。Box-Behnken 设计是响应曲面设计的一种类型，采用该方法可建立连续变量曲面模型，确定最佳水平范围。由于试验次数相对较少，所以，在各种优化过程中有着广泛的应用。由单因素分析结果，设置的响应曲面分析工艺参数范围如表 3 所示。

表 3 工艺参数设置

Table 3 Setting of process parameters

范围	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 $D/$ N
下限	200	15	10	200
上限	600	50	25	600

将 Box-Behnken 试验设计数据代入 ABAQUS 中进行仿真计算，使用 ABAQUS 后处理模块对等效应变数据进行提取，并代入式（2）求解表面硬度，仿真试验结果如表 4 所示。

表 4 仿真试验数据

Table 4 Simulation test data

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 D/N	表面硬度 H/HV
400	32.5	25.0	200	706.283
200	15.0	17.5	400	702.632
600	32.5	10.0	400	693.869
200	32.5	10.0	400	689.252
200	50.0	17.5	400	697.750
400	32.5	17.5	400	707.058

续表 4

转速 $n/$ ($r \cdot \min^{-1}$)	进给速度 $f/$ ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	振幅 $A/$ μm	静压力 D/N	表面硬度 H/HV
600	32.5	25.0	400	708.608
600	50.0	17.5	400	705.294
400	50.0	10.0	400	693.143
200	32.5	17.5	600	706.385
400	50.0	25.0	400	712.882
400	32.5	25.0	600	713.053
400	15.0	17.5	200	700.459
400	15.0	10.0	400	695.097
400	32.5	10.0	600	698.314
400	32.5	17.5	400	707.058
400	50.0	17.5	200	698.505
600	32.5	17.5	200	699.231
400	32.5	10.0	200	686.543
600	32.5	17.5	600	711.002
200	32.5	17.5	200	694.614
200	32.5	25.0	400	708.991
400	32.5	17.5	400	707.058
400	15.0	25.0	400	714.836
600	15.0	17.5	400	708.321
400	15.0	17.5	600	712.230
400	50.0	17.5	600	710.276

为探究工艺参数变化对输出目标响应的作用规律,以输入参数的水平为横坐标,将目标响应的均值作为纵坐标,做出 42CrMo 钢棒料表面硬度的主效应图,如图 4 所示。

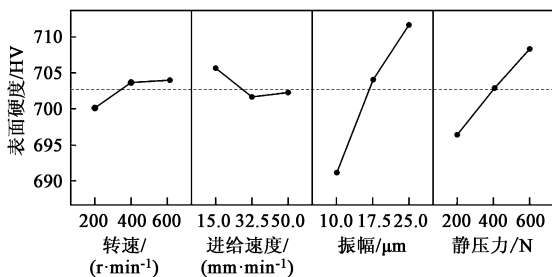


图 4 表面硬度均值的主效应图

Fig. 4 Main effect diagram of surface hardness mean value

由图 4 可知,振幅的影响最大,42CrMo 钢棒料表面硬度的大小与塑性变形相关。当振幅增大时,滚压头对工件表面的冲击力增大,表面金属发生剧烈流动,位错密度不断增加,使得工件表面产生更大程度的塑性变形,工件表面硬度得以提高;在转速不断增大的过程中,提高转速可以提高滚压头与

工件的接触频率,使工件表面进行多次滚压,进而使工件的表面硬度得到提高;进给速度增大,工件的表面硬度呈现先降低再趋于平稳的趋势,这是由于进给速度的增大,使得轴向加工密度减小,导致工件表面塑性变形不充分,进而使表面硬度呈现下降的趋势,然而进给速度和其他工艺参数间存在交互作用,并非单调递减;在逐渐增加静压力的过程中,工件的表面硬度也不断提高,静压力变大,滚压头对工件的挤压力也增大,工件表面的塑性变形量增加,表面硬度随之提高。

3.2 回归模型的建立及显著性检验

为了对影响超声滚挤压 42CrMo 钢棒料表面硬度的工艺参数进行优化,采用二次响应曲面法构建工艺参数与表面硬度间的数学关系^[17]。二次多项式类型如式(3)所示:

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon_e \quad (3)$$

式中: \hat{y} 为预测值; x_i 、 x_j 为超声滚挤压加工工艺参数; i 、 j 代表不同的工艺参数, $i, j = 1, 2, 3, 4$, 且 $i < j$; β_0 为常数项系数; β_i 为一次项系数; β_{ij} 为交互项系数; β_{ii} 为二次项系数; ε_e 为误差。

根据表 4 所示仿真试验数据,由最小二乘法拟合得到表面硬度的响应曲面模型,如式(4)所示。

$$H = 623.7 + 0.0834n - 0.146f + 4.196A + 0.0766D + 0.000132nf - 0.000833nA - 0.000833AD - 0.000078n^2 + 0.00027f^2 - 0.0664A^2 - 0.000043D^2 \quad (4)$$

为了评估拟合模型的准确性,对响应曲面模型进行显著性检验。表面硬度方差的分析结果如表 5 所示,正态残差图如图 5 所示。

表 5 表面硬度的方差分析结果

Table 5 Variance analysis result of surface hardness

来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值
回归模型	14	1548.74	110.625	50.57	<0.0001
误差	12	26.25	2.625		
总和	26	1574.99			
$R-sq = 98.33\%$		$R-sq(adj) = 96.39\%$			

$F_{0.05}$ 表示显著检验水平为 5%, F 值 $\geq F_{0.05}$ 代表方程显著; P 值 < 0.01 , 表示两组的差异极其显著。由表 5 所示,硬度的回归方程方差分析可以看出, $F = 50.57 > F_{0.05}$, $P < 0.0001$, 说明所建立的回归模型是显著有效的; $R-sq$ 代表回归模型误差占总

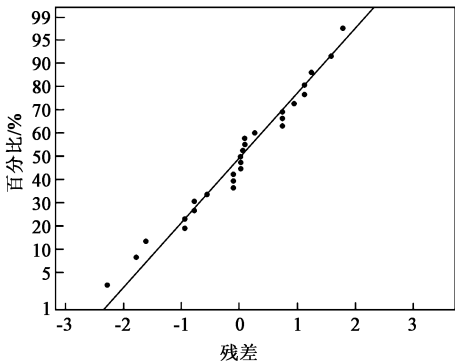


图5 表面硬度正态残差图
Fig.5 Normal residual diagram of surface hardness

误差的百分比， $R-sq(adj)$ 代表调整后的回归模型误差占总误差的百分比， $R-sq(adj)=96.39\%$ ，表明预测模型与试验数据的吻合度好，且 $R-sq$ 和 $R-sq(adj)$ 非常接近，表明所建立的回归模型非常可靠。由图5可以看出，大部分数据点分布在接近于对角线的位置，满足正态分布，说明所建立的回归模型的拟合效果良好。

3.3 超声滚挤压工艺参数优化

以经过超声滚挤压强化后的42CrMo钢棒料表面的最大硬度为目标函数，以4个工艺参数为自变量，根据表3设置超声滚挤压工艺参数，建立如式(5)所示的多目标优化模型。

$$Max(H) = \begin{cases} 200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \leq n \leq 600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1} \\ 15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \leq f \leq 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \\ 10 \mu\text{m} \leq A \leq 25 \mu\text{m} \\ 200 \text{ N} \leq D \leq 600 \text{ N} \end{cases} \quad (5)$$

通过Minitab软件中的响应优化器对所建立的表面硬度预测模型进行计算求解，优化结果如图6所示。当转速为 $418 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、进给速度为 $15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、振幅为 $25 \mu\text{m}$ 、静压力为 600 N 时，超声滚挤压42CrMo钢棒料的表面硬度最大，为 716.26 HV 。

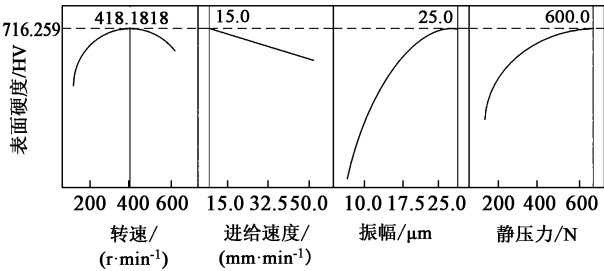


图6 优化结果图
Fig.6 Optimized result diagram

4 试验验证

超声滚挤压设备主要由超声波发生装置和执行装置组成。在ZAK4085D1型数控车床上进行超声滚挤压试验加工，加工过程如图7所示。

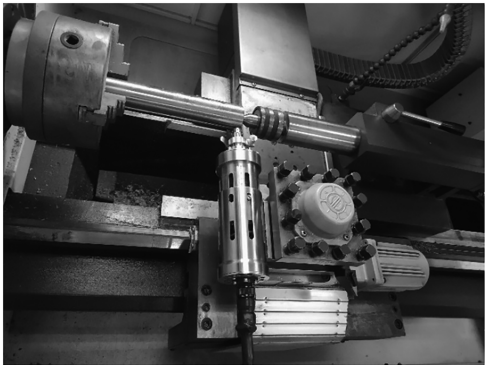


图7 超声滚挤压加工过程
Fig.7 Ultrasonic rolling process

为了验证响应曲面法优化结果的可靠性和有效性，对Minitab响应优化器的优化结果进行试验验证。在超声滚挤压42CrMo钢棒料上沿轴向方向等间距取5个点，采用HVS-1000A型维氏硬度计对表面硬度进行测量，优化结果和试验结果的对比如表6所示。

表6 表面硬度测量结果对比			
Table 6 Comparison of surface hardness measurement results			
试验序号	试验值/HV	优化值/HV	相对误差/%
1	695.32	716.26	3.01
2	700.56	716.26	2.24
3	706.59	716.26	1.37
4	685.34	716.26	4.51
5	692.87	716.26	3.38

由表6可知，最优工艺参数下的表面硬度试验值与仿真优化值的最大相对误差为4.51%，误差控制在5%以下，从而证明了建立的仿真模型和优化模型的准确性。

5 结论

(1) 由单因素仿真分析结果可知，42CrMo钢棒料超声滚挤压表面硬度随着转速的提高呈现先增加后下降的趋势，随着进给速度的增加呈现先增大后缓慢下降的趋势，随着振幅和静压力增大而增大。

(2) 由主效应图可知, 振幅对表面硬度的影响最大, 响应曲面法优化得到的最优工艺参数组合为: 转速为 $418 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、进给速度为 $15 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、振幅为 $25 \mu\text{m}$ 、静压力为 600 N , 优化后的 42CrMo 钢棒料的表面硬度为 716.26 HV 。

(3) 对最优工艺参数组合进行试验验证, 将表面硬度的仿真优化结果和试验结果进行对比, 最大相对误差为 4.51% , 说明可以通过仿真分析和响应曲面相结合的方法, 确定最优的超声滚挤压工艺参数。

参考文献:

- [1] 唱佳林, 李安海. 42CrMo 钢多工步车削加工表面完整性研究 [J]. 工具技术, 2021, 55 (7): 49-53.
Chang J L, Li A H. Research on the surface integrity of 42CrMo steel multi-step turning machining [J]. Tool Engineering, 2021, 55 (7): 49-53.
- [2] 于浩, 赵军, 盖少磊, 等. 42CrMo 钢车削表面完整性研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021, (7): 137-140.
Yu H, Zhao J, Gai S L, et al. Research on surface integrity of 42CrMo steel turning [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021, (7): 137-140.
- [3] 张飞, 赵运才. 超声表面滚压改善 45# 钢表层特性及疲劳性能的研究 [J]. 表面技术, 2017, 46 (9): 185-190.
Zhang F, Zhao Y C. Study on the improvement of surface properties and fatigue properties of 45# steel by ultrasonic surface rolling [J]. Surface Technology, 2017, 46 (9): 185-190.
- [4] Bozdana Ali Tolga, Gindy Nabil N Z, Li H. Deep cold rolling with ultrasonic vibrations-A new mechanical surface enhancement technique [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 45 (6): 713-718.
- [5] Liu Y, Zhao X, Wang D. Determination of the plastic properties of materials treated by ultrasonic surface rolling process through instrumented indentation [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 600 (32): 21-31.
- [6] Li F Q, Zhao B, Lan S L, et al. Experiment and simulation of the effect of ultrasonic rolling on the surface properties of Ti-6Al-4V [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106 (5): 1893-1900.
- [7] 刘治华, 张天增, 杨孟俭, 等. 超声滚压 18CrNiMo7-6 齿轮钢表面变质层性能分析 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2020, 41 (2): 44-49.
Liu Z H, Zhang T Z, Yang M J, et al. Performance analysis of surface modified layer of ultrasonic rolled 18CrNiMo7-6 gear steel [J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2020, 41 (2): 44-49.
- [8] 武民, 马利杰, 王占奎, 等. 工艺参数对钛合金超声振动铣削表面显微硬度的影响 [J]. 机械科学与技术, 2020, 39 (10): 1587-1592.
Wu M, Ma L J, Wang Z K, et al. Influence of process parameters on the surface microhardness of titanium alloy by ultrasonic vibration milling [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39 (10): 1587-1592.
- [9] Shinya Kanou, Masaaki Nishikawa, Hitoshi Soyama. Analysis of the formation of plastic deformation layer on the surface of polycrystalline metals subjected to a micro-size high-rate shot impact [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 75 (3): 316-323.
- [10] 王晓强, 徐少可, 崔凤奎, 等. 轴承套圈表面超声滚挤压加工硬化模型 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (3): 231-237.
Wang X Q, Xu S K, Cui F K, et al. Ultrasonic rolling extrusion work hardening model of bearing ring surface [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (3): 231-237.
- [11] 韩璐, 康仁科, 张园, 等. GH4169 超声辅助磨削表面完整性研究 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 41 (5): 46-51.
Han L, Kang R K, Zhang Y, et al. Research on the surface integrity of GH4169 ultrasonic-assisted grinding [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2021, 41 (5): 46-51.
- [12] Lu X, Jia Z, Yang K, et al. Analytical model of work hardening and simulation of the distribution of hardening in micro-milled nickel-based superalloy [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97: 1-9.
- [13] 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. Research on dynamic constitutive relation of 42CrMo steel based on improved J-C model [J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering: Natural Science Edition, 2016, 29 (3): 61-65.
- [14] 汤井田, 公劲喆. 基于 GiD 的有限元前处理和后处理可视化 [J]. 地球物理学进展, 2010, 25 (1): 186-195.
Tang J T, Gong J Z. Visualization of finite element preprocessing and postprocessing based on GiD [J]. Progress in Geophysics, 2010, 25 (1): 186-195.
- [15] 姚国林. 风电轴承材料超声滚挤压表层物理力学性能研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2020.
Yao G L. Research on the Physical and Mechanical Properties of the Surface Layer of Wind Power Bearing Materials by Ultrasonic Rolling [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2020.
- [16] 刘惠, 刘腾飞, 陈宗强, 等. 基于试验设计和响应曲面法的大型带筋薄壁铝型材挤压工艺优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (5): 144-152.
Liu H, Liu T F, Chen Z Q, et al. Optimization on extrusion process for large reinforced thin-walled aluminum profile based on experimental design and response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (5): 144-152.
- [17] 李志山, 史耀耀, 辛红敏, 等. 灰色关联度优化钛合金盘铣开槽工艺参数 [J]. 西北工业大学学报, 2018, 36 (1): 139-148.
Li Z S, Shi Y Y, Xin H M, et al. Optimization of slotting process parameters for titanium alloy disc milling by grey correlation degree [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36 (1): 139-148.