

超声滚压 12Cr2Ni4A 齿轮钢残余压应力 特性研究及参数优化

焦锋, 兰帅领, 王毅, 赵波

(河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要: **目的** 实现高效率、低表面粗糙度和大残余压应力制造。**方法** 利用 ANSYS 软件建立 12Cr2Ni4A 齿轮钢外圆超声滚压有限元模型, 分析超声滚压加工后, 残余应力场的分布规律。搭建 12Cr2Ni4A 齿轮钢试验平台, 研究工艺参数对工件表层残余应力的影响规律。同时对有限元模型进行验证。运用非线性曲线拟合方法, 构建超声滚压工件表面残余应力及其表面粗糙度预测模型, 基于赫兹接触理论和压痕几何关系, 建立外圆超声滚压加工效率理论模型。**结果** 经过超声滚压加工后, 12Cr2Ni4A 齿轮钢表层残余压应力显著提升, 且沿滚压深度方向, 呈现先增大后减小趋势。最大残余压应力随着初始静压力的增加, 峰值点逐渐从表层向次表层移动, 最大残余压应力值为 -654 MPa, 此时硬化层深度约为 0.8 mm。经优化得到最优参数为: $F=315\text{ N}$, $v_f=0.32\text{ mm/min}$, $n=269\text{ r/min}$ 。**结论** 12Cr2Ni4A 齿轮钢表层残余压应力随静压力的增大, 呈线性增加趋势, 随主轴转速和进给量的增大略微减小。参数优化后, 加工效率得到进一步提升, 工件能够获得良好的表面状态。

关键词: 超声滚压; 12Cr2Ni4A 齿轮钢; 残余应力; 表面粗糙度; 加工效率; 参数优化

中图分类号: TG302 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)11-0334-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.11.039

Residual Stress Characteristics and Parameters Optimization of Ultrasonic Rolling 12Cr2Ni4A Gear Steel

JIAO Feng, LAN Shuai-ling, WANG Yi, ZHAO Bo

(School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

ABSTRACT: The work aims to realize the high efficiency, low surface roughness and large residual compressive stress manufacturing. The finite element model for cylindrical ultrasonic rolling of 12Cr2Ni4A gear steel was established with ANSYS software. After the ultrasonic rolling was analyzed, the test platform was built according to the distribution laws of residual stress field to study the effect of processing parameters on residual stress of workpiece. Meanwhile, the finite model was

收稿日期: 2019-12-18; 修订日期: 2020-10-23

Received: 2019-12-18; Revised: 2020-10-23

基金项目: 国家自然科学基金 (U1604255)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (U1604255)

作者简介: 焦锋 (1971—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密超精密加工技术与装备。

Biography: JIAO Feng (1971—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision and ultra-precision machining technology and equipment.

通讯作者: 赵波 (1956—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密超精密加工技术与装备。邮箱: zhaob@hpu.edu.cn

Corresponding author: ZHAO Bo (1956—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision and ultra-precision machining technology and equipment. E-mail: zhaob@hpu.edu.cn

引文格式: 焦锋, 兰帅领, 王毅, 等. 超声滚压 12Cr2Ni4A 齿轮钢残余压应力特性研究及参数优化[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 334-341.
JIAO Feng, LAN Shuai-ling, WANG Yi, et al. Residual stress characteristics and parameters optimization of ultrasonic rolling 12Cr2Ni4A gear steel[J]. Surface technology, 2020, 49(11): 334-341.

confirmed. The prediction models of surface residual stress and surface roughness were established by the multiple nonlinear regression method. Based on the Hertz contact theory and indentation geometry, the theoretical model of cylindrical ultrasonic rolling was established. After ultrasonic rolling, the surface residual compressive stresses firstly increased and then decreased along the direction of rolling depth after. As the static forces increased, the peak of compressive residual moved from surface to substrate, the maximum residual compressive stress was -654 MPa, and the thickness of hardness layer was about 0.8 mm. The optimal parameters were obtained as $F=315$ N, $v_f=0.32$ mm/min and $n=269$ r/min. The residual compressive stress increases linearly with the increase of static force, and decreases slightly with the increase of spindle speed and feed rate. The machining efficiency is further improved after optimization, and a good workpiece surface can be obtained.

KEY WORDS: ultrasonic rolling; 12Cr2Ni4A gear steel; residual stress; surface roughness; machining efficiency; parameters optimization

12Cr2Ni4A 齿轮钢作为一种优良的低合金马氏体不锈钢, 具有高淬透性、高表面硬度和高基体强度等, 广泛应用于高性能齿轮加工领域^[1]。高性能齿轮制造通常需要对齿面进行精加工, 获得较高的表面质量^[2]。然而, 在零件加工过程中, 特别是磨削加工, 通常会产生残余拉应力, 残余拉应力的存在一定程度上缩短了零件的使用寿命^[3-4]。为了提高齿轮的使用寿命, 通常需要引入一定程度的残余压应力, 目前, 常用的引入残余压应力的方法有表面淬火、喷丸、激光强化以及超音速微粒子轰击等^[5]。传统的强化方法虽然在一定程度上能够改变材料的表面应力状态, 但是由于工艺处理不合理, 会造成齿轮表面粗糙度增大和应力集中^[6-7]。随着超声加工技术的发展, 超声振动加工已成为材料强化工艺发展的新方向。文献[8-13]指出, 在保持预加工的精度下, 超声滚压加工可以大幅度提高工件表面光洁度, 表面硬度可提高 25% 左右, 形成一定的残余压应力层, 表面微观形貌得到进一步的改善, 使工件表层金属组织纤维化和纳米化, 从而提高材料的使用寿命。

综上所述, 相关学者^[14-15]研究工艺参数对工件表面残余应力的影响较多, 且获得理想残余压应力时的工艺参数表现为滚压力大、主轴转速低和进给速度小。然而, 这种参数组合一定程度上影响了工件的加工效率以及表面粗糙度。为了提高工件的加工效率, 同时获得较大的残余压应力以及较小的表面粗糙度, 本文从高效率、大残余压应力、低表面粗糙度等参数优化方面做了一定的研究。选择齿轮钢 12Cr2Ni4A 材料, 对超声外圆滚压强化后的残余应力场进行分析。首先, 采用 ANSYS 软件建立了 12Cr2Ni4A 齿轮钢超声滚压加工有限元模型; 然后搭建了超声滚压 12Cr2Ni4A 齿轮钢试验平台, 对有限元模型进行验证, 并分析了工艺参数对超声滚压残余应力的影响; 最后, 采用非线性曲线拟合方法, 建立了超声滚压加工 12Cr2Ni4A 齿轮钢表面残余应力以及表面粗糙度预测模型, 基于赫兹接触理论, 建立外圆超声滚压加工效率理论模型, 运用量子遗传算法给出了超声外圆滚压的最优工艺参数。通过对超声滚压 12Cr2Ni4A

齿轮钢残余应力特性进行研究及其参数优化, 拟为齿轮材料强化方面提供一定的参考价值。

1 超声滚压加工原理

超声滚压加工原理如图 1 所示, 超声滚压工具头通过静压力 F 和超声冲击力作用在工件表面, 工件以转速 n 做旋转运动, 工具头以一定的进给速度 v_f 沿着工件轴线做直线运动。在超声滚压加工过程中, 换能器将超声波发生器的电能转化为机械能, 并通过变幅杆放大, 超声工具头将放大后的机械能沿着工件表面垂直方向, 以一定振幅 A_0 作用于工件表层, 使工件表面发生大幅度的弹性变形, 表面材料微观波峰被压入波谷, 工件表层及其亚表层组织产生一定的硬化层, 阻止材料内部弹性恢复, 使材料表面产生一定深度的残余压应力层。

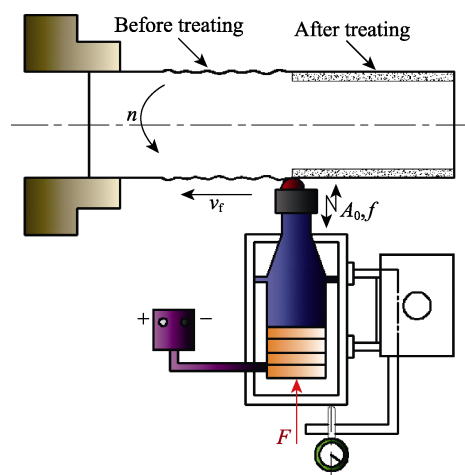


图 1 超声滚压加工原理图
Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic rolling

2 超声滚压有限元仿真

2.1 有限元模型建立

图 2 所示为采用 ANSYS 软件中冲击动力学 LS-

DYNA 模块建立的超声滚压加工有限元模型。在模型建立过程中,将超声滚压工具头设定为长度 8 mm、两端直径 6 mm、母线曲率半径 40 mm 的弧形圆柱,工件设定为直径为 60 mm、长 10 mm 的半圆柱体。划分工件和超声滚压工具头的单元类型均采用 SOLID164。根据文献^[14]可得,考虑到最大等效塑性应变和单元尺寸的关系以及计算的成本,将单元尺寸设定为压痕直径尺寸的 1/20,通过单点冲压赫兹接触理论计算可得,最小单元尺寸为 0.04 mm。

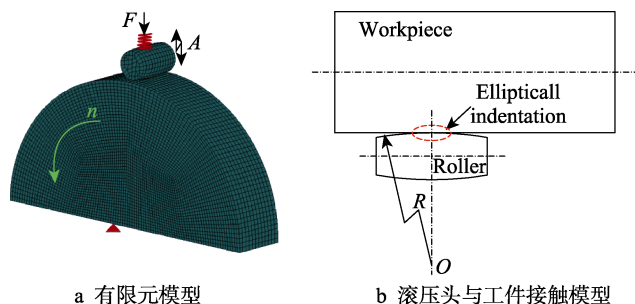


图2 超声滚压有限元模型

Fig.2 Finite element model of ultrasonic rolling: a) finite element model; b) contact model between rolling head and workpiece

供货态 12Cr2Ni4A 齿轮钢经过超声冲击后,表层材料发生剧烈弹塑性变形,材料各向异性效应愈加显著。为了能够很好地描述这种高度非线性关系,根据文献^[15],选择多线性弹塑性材料模型,其具体表达式为:

$$\sigma = \left[1 + \left(\frac{\varepsilon'}{C} \right)^{1/P} \right] (\sigma_0 + f_n(\varepsilon_{\text{eff}}^P)) \quad (1)$$

其中, ε' 为应变率, C 和 P 为相应的参数, σ_0 为屈服应力, $f_n(\varepsilon_{\text{eff}}^P)$ 为硬化函数。

超声滚压装置中工具头材料为 YG8 硬质合金,被强化材料为供货态 12Cr2Ni4A 齿轮钢,供货态 YG8 硬质合金和 12Cr2Ni4A 齿轮钢硬度分别约为 1600、603HV。由于 YG8 硬质合金硬度高于 12Cr2Ni4A 齿轮钢,所以在超声滚压中,可将超声滚压工具头定义为刚体。二者的力学性能如表 1 所示。

表 1 材料力学性能参数

Tab.1 Mechanical performance parameters of material

Material	Density (/kg·m ⁻³)	Modulus /GPa	Poisson ratio	Tangent modulus /MPa	Yield stress /MPa
YG8	14 500	600	0.21		
12Cr2Ni4A	7850	211	0.30	230	785

对超声滚压工具头施加初始静压力及周期性纵向振动的振幅,这一连续的加载方式可以离散为相邻的超声冲击加上从一点到另外一点的滚动过程^[16]。在有限元仿真时,一个自由度上同时加载两个载荷力和

位移冲突,通过文献^[17-18],将动态冲击力简化为按照正弦函数变化的规律进行加载,具体表达式如下:

$$F(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2)$$

式中, A_0 为初始幅值; n 为简谐波数; a_n 、 b_n 为简谐波幅值; ω 为超声波圆频率。由于超声振动是正弦的间歇振动,所以取 $n=1$ 、 $a_n=0$ 。静压力转化成初始幅值 A_0 直接定义,此时动态冲击力转化成简谐波振幅 b_1 和超声波圆频率 ω 的函数,具体表达式如下:

$$F(t) = A_0 + b_1 \sin(\omega t) \quad (3)$$

根据机床装夹方式,约束工件的两个端面自由度,只保留工件沿轴线旋转,超声滚压工具头以一定的进给速度 v_f 沿工件外表面轴向移动。

2.2 仿真结果与分析

图 3 为沿滚压深度方向的应力云图。由图 3 可得,当静压力 F 为 350 N,进给速度 v_f 为 0.2 mm/r,主轴转速 n 为 125 r/min 时,最大残余压应力在距离工件表面一定深度的次表面,且由表及里,残余压应力呈现先增大后减小的趋势。图 4 为不同静压力下残余应力沿深度变化曲线。从图 4 可以看出,当进给速度 v_f 为 0.2 mm/r,主轴转速 n 为 125 r/min,静压力 F 分别为 200、250、300、350 N 时,最大残余压应力峰值距离工件表面分别为 0.19、0.21、0.25、0.30 mm,

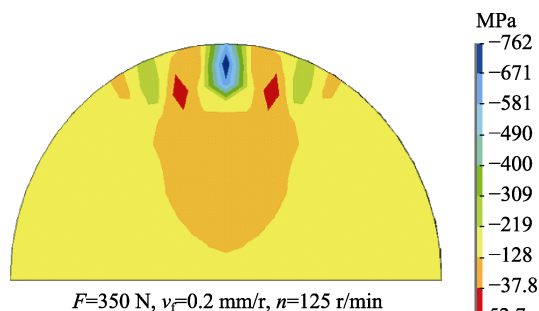


图3 沿滚压深度方向的应力云图

Fig.3 Distribution of residual stress along the rolling depth direction

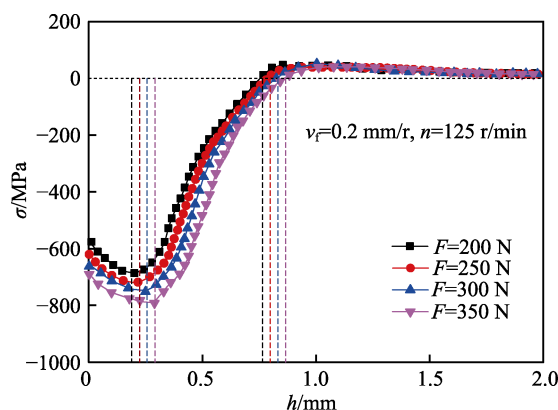


图4 不同静压力下残余应力沿深度变化曲线

Fig.4 Curves of residual stress along the depth under different static force

硬化层厚度分别为 0.72、0.75、0.78、0.80 mm。所以，随着静压力的增加，最大残余压应力峰值逐渐向次表层移动，硬化层厚度基本呈线性增加。

3 试验设计与分析

3.1 试验设计

超声滚压实验平台搭建在 CA6140 车床，如图 5 所示。超声振动滚压系统由超声波发生器、28 kHz 的换能器和锥形变幅杆以及工具头组成，工件的初始表面粗糙度 Ra 为 6.8 μm ，振幅 A_0 为 2 μm 。具体结构请参考课题组已发表文献[19]。

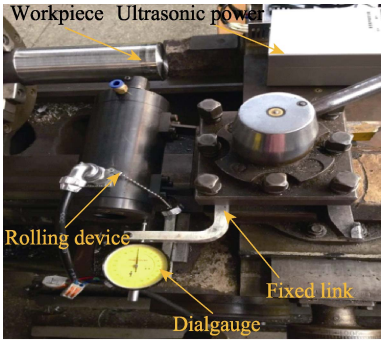


图 5 超声滚压实验
Fig.5 Ultrasonic rolling experiment

在实验过程中，沿着工件轴线方向，每隔 3 mm 以不同工艺参数进行加工，其加工工件的长度为 10 mm，沿着圆周方向对每一个加工工艺参数选取 5 个测试点进行测量。采用由加拿大生产的 PROTO-LXRD X 射线衍射仪测量残余应力，具体测量条件

为：管电压为 30 kV，管电流为 25 mA，靶材选用 Cu 靶，测量宽度为 18.5°，测量深度约为 15 μm ，辐射表面积为 1 mm^2 。测试方法为 $\text{Sin}2\psi$ 。采用 Taylor Hobson 表面粗糙度仪，分别对超声滚压后工件表面沿着垂直方向的残余应力状态和沿着进给方向的表面粗糙度进行测量，其测试现场如图 6 所示。

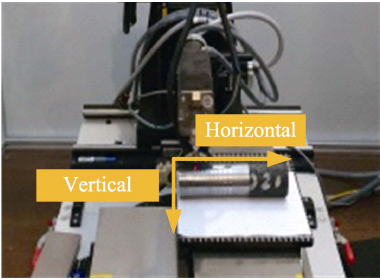


图 6 残余应力检测
Fig.6 Test of the residual stress

3.2 试验方案与结果

为了分析静压力 F 、进给速度 v_f 和主轴转速 n 对超声滚压后工件表面残余应力的影响，在超声滚压过程中选取的试验参数和试验方案分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 试验参数
Tab.2 Experimental parameters

Static force F/N	Feed rate $v_f/(\text{mm}\cdot\text{r}^{-1})$	Spindle $n/(\text{mm}\cdot\text{r}^{-1})$
200	0.20	125
250	0.25	160
300	0.33	250
350	0.40	320

表 3 试验方案与结果
Tab.3 Experimental scheme and results

No.	Static force F/N	Feed rate $v_f/(\text{mm}\cdot\text{r}^{-1})$	Spindle speed $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	Residual stress σ/MPa			$Ra/\mu\text{m}$
				Experiment	Simulation	Error/%	
1	200	0.20	125	-527	-567	7.6	0.40
2	250	0.25	160	-568	-512	-9.8	0.43
3	300	0.33	250	-629	-576	-8.4	0.57
4	350	0.40	320	-664	-610	-8.2	0.63
5	200	0.25	250	-504	-544	7.9	0.76
6	250	0.20	320	-562	-520	-7.5	0.49
7	300	0.40	125	-621	-604	-2.7	0.48
8	350	0.33	160	-679	-638	-6.1	0.36
9	200	0.33	320	-493	-513	4.1	1.21
10	250	0.40	250	-558	-510	-8.6	0.92
11	300	0.20	160	-603	-631	4.6	0.32
12	350	0.25	125	-681	-627	-7.9	0.24
13	200	0.40	160	-498	-529	6.2	0.98
14	250	0.33	125	-575	-596	3.7	0.51
15	300	0.25	320	-589	-554	-5.9	0.48
16	350	0.20	250	-678	-654	-3.5	0.26
17	—	—	—	-86	—	—	3.60

从表3可得,经超声滚压加工后,12Cr2Ni4A 齿轮的表面残余压应力相对于初始残余应力(No.17)显著上升。有限元仿真获得的残余压应力值与试验获得的残余压应力值具有一定的误差,主要由于有限元仿真未考虑初始残余应力以及表面粗糙度对加工后表面残余应力场的影响。但是,有限元仿真值与试验值趋势一致,且最大误差在10%以内,表明有限元模型具有一定的可靠性。经过超声滚压后,工件表面粗糙度提高了约两个等级。

3.3 工艺参数对残余应力的影响规律

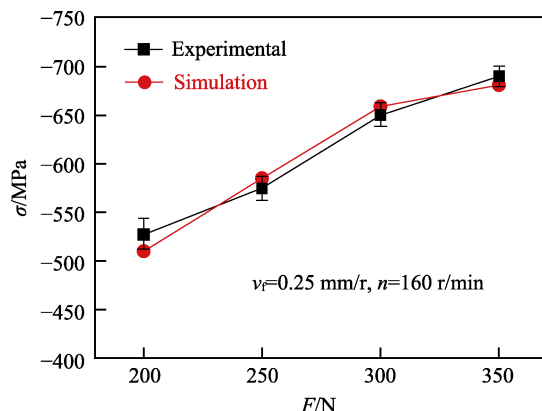
图7所示为静压力、进给速度、主轴转速等工艺参数对残余应力的影响规律。从图7a中可得,随着静压力的增大,工件表面残余压应力呈线性增加趋势。一方面根据文献^[20-21]可知,由于静压力增大,超声滚压头传递给工件的塑性应变能增加,材料塑性变形程度增大,表层晶粒细化和内部晶粒位错密度增加,使晶粒发生重新排列,表面形成一层致密的残余压应力层。另一方面,随着静压力的增大,沿着轴线方向,滚压头与工件表面接触半径增大,当进给速度不变时,相邻两个滚压头在工件表面压痕重叠面积增大,导致工件表面冲击次数增加。文献^[22-23]指出,冲击次数与残余压应力呈正相关性。因此增大静压力能够有效地提高残余压应力值。

由图7b和7c可以看出,增大主轴转速和进给量,工件表层残余应力均呈减小趋势,但影响并不显著。由于进给量和转速直接决定超声滚压工具头对工件的作用面积和滚压频率。当进给速度从0.2 mm/r增加至0.4 mm/r时,在单位时间内,沿着圆周方向的相邻两个滚压头中心距离增大,作用于单位面积上的超声冲击次数有所降低。所以,提高主轴转速和进给速度,工件表层残余应力值降低。从静压力、进给速度和主轴转速对表面残余应力的影响可得,当加工参数选择 $F=350\text{ N}$ 、 $v_f=0.2\text{ mm/r}$ 和 $n=125\text{ r/min}$ 时,残余压应力值最大。然而,大的静压力势必会导致工件表面接触半径增大,使得沿着轴线方向的表面粗糙度增大,同时小的进给速度和主轴转速也会对加工效率有一定影响。所以,需要进一步研究工艺参数,使得既能提高加工效率又能满足大残余压应力和低表面粗糙度的加工要求。

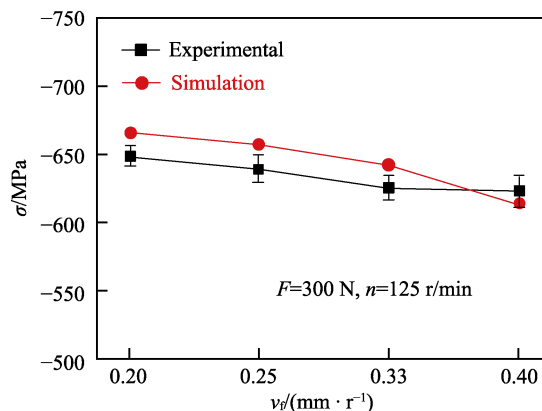
3.4 预测模型建立

根据表3数据,采用非线性曲线拟合方法构建超声滚压12Cr2Ni4A 齿轮钢残余应力和表面粗糙度预测模型。定义初始静压力 $F=x_1$,进给速度 $v_f=x_2$,主轴转速 $n=x_3$,则残余应力预测模型 $\sigma(x_1, x_2, x_3)$ 和表面粗糙度预测模型如式(4)和(5)所示。

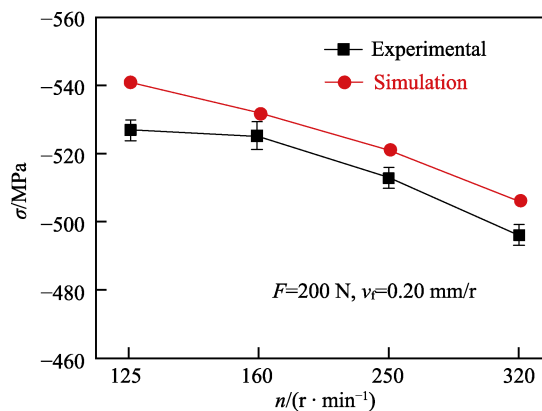
$$\sigma(x_1, x_2, x_3) = -448.97 - 0.00127x_1^2 + 416.79x_2^2 + 3.3692 \times 10^{-4}x_3^2 - 1.0444x_1x_2 - 4.72876 \times 10^{-4}x_1x_3 + 0.25914x_2x_3 \quad (4)$$



a 静压力对残余应力的影响



b 进给速度对残余应力的影响



c 主轴转速对残余应力的影响

图7 工艺参数对残余应力的影响

Fig.7 Effects of process parameters on residual stress: a) effects of static force on residual stress; b) effects of feed rate on residual stress; c) effects of spindle speed on residual stress

$$Ra(x_1, x_2, x_3) = 0.48673 + 5.73094 \times 10^{-6}x_1^2 + 5.66145x_2^2 + 3.72449 \times 10^{-6}x_3^2 - 0.01292x_1x_2 - 1.149 \times 10^{-5}x_1x_3 + 0.01003x_2x_3 \quad (5)$$

通过方差分析和 F 检验,得到残余应力和表面粗糙度方程相关系数 $R^2=96.8\%$ 、 $F=5945.38$ 与 $R^2=97.9\%$ 、 $F=6945.38$,表明拟合曲线具有较高的相关性。为了进一步对预测模型进行验证,将试验数据作为验证样本带入模型进行计算,并对试验数据与预测结果进行比对,其结果如图8所示。

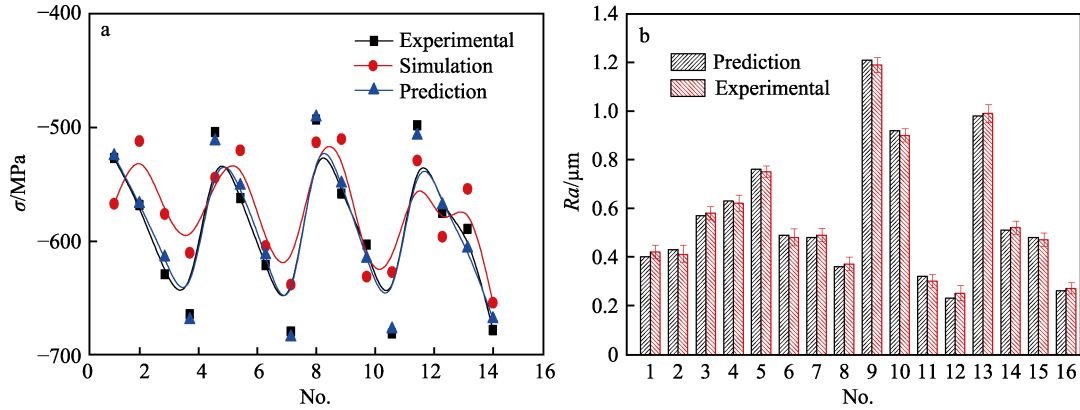


图 8 预测值与实验值比较

Fig.8 Comparison of experiment value and predicted value of residual stress

从图 8a 中可得, 残余应力有限元仿真和预测模型最大误差分别在 No.2 和 No.15, 最大误差值为 9.8% 和 3%。预测值与试验结果接近, 有限元仿真与预测模型都具有较高的预测精度, 从而为可控的超声滚压 12Cr2Ni4A 齿轮钢残余压应力的研究提供了一定的参考。图 8b 所示粗糙度预测值和试验值误差最大 7%, 预测模型具有较高的匹配度。

4 外圆超声滚压加工效率理论模型

超声滚压时, 工具头作用在外圆表面的形状为椭圆, 其具体的展开图如图 9 所示。从图 9 中可得, 工具头在单位进给速度下形成的理论面积为:

$$S_U = v_f \times \pi D \quad (6)$$

超声作用下, 工具头在工件表面形成的面积为:

$$S_C = 2a \times \pi D \left(\sec \varphi - \frac{1}{4} \tan \varphi \sin \varphi - \frac{3}{64} \tan \varphi \sin^3 \varphi \right) \quad (7)$$

其中, φ 为最大倾斜角, 即超声滚压加工时, 滚轮的运动轨迹与进给量的螺旋线之间的最大夹角, 可由式(8)算得。

$$\varphi = \arctan \left(\frac{60Af}{Dn} \right) \quad (8)$$

将超声作用下工具头在工件表面形成的面积与单位进给速度下形成的理论面积之比, 定义为超声外圆滚压加工效率 W , 如式(9)所示。

$$W = \frac{2a}{v_f} \left(\sec \varphi - \frac{1}{4} \tan \varphi \sin \varphi - \frac{3}{64} \tan \varphi \sin^3 \varphi \right) \quad (9)$$

结合图 9 与式(9)可知, 当 W 等于 1 时, 即第 2 种情况 $L=2a$, 相邻两道滚压压痕重叠面积为 0。此时是连续加工条件下效率最高的加工方式, 但是表面粗糙度和残余压应力未必达到最佳。当 W 大于 1 时, 即第 1 种情况 $L < 2a$, 相邻两道滚压压痕具有一定的重叠面积, 当寻求到最佳重叠面积时, 工件表面残余压应力和表面粗糙度最佳, 但是加工效率未必最高。当 W 小于 1 时, 工件表面形成断续加工, 不予考虑。为了寻求最优加工参数组, 需要对工件表面压痕半径与静压力之间的关系进行研究。

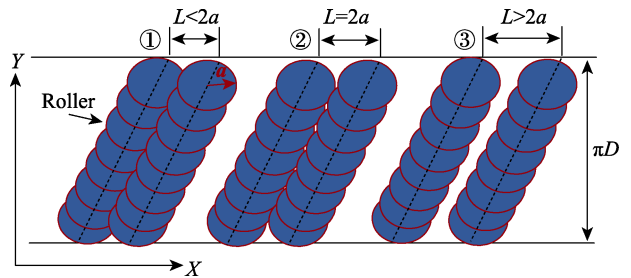


图 9 超声滚压工具球运动轨迹

Fig.9 Track of roller in ultrasonic rolling

5 外圆超声滚压加工力学-数学关系

5.1 外圆超声滚压力学模型

图 10 为工具头与工件表面接触的力学模型。其中, F 为静压力; N 为工件对滚压头施加的压力; f 为工件对滚压头施加的摩擦力; R_T 为工具头半径; θ 和 φ 分别为工具头与工件在 $Y-Z$ 平面和 $X-Y$ 平面上的接触角。根据赫兹接触理论^[24], 工具头和工件的接触形状近似球冠。为了获得作用在接触区内工具头上的压力 N , 将接触区划分为 i 个离散单元。每个区间面积很小, 所以假设压力 N_i 在第 i 个区间近似为常数。 dN 作用在工具头上的压力通过对接触区的积分来计算, 如式(10)所示。

$$\vec{N} = \iint d\vec{N} \quad (10)$$

其中, $dN = P_m dA = P_m R_T^2 \sin \theta d\theta d\varphi$, P_m 为接触区域的平均应力。将压力 N 沿着轴线方向分解:

$$\vec{N} = \vec{N}_x + \vec{N}_y + \vec{N}_z \quad (11)$$

$$\vec{N}_x = - \iint dN \sin \theta \sin \varphi = - P_m R_T^2 \int_0^\alpha \sin^2 \theta d\theta \int_0^\pi \sin \varphi d\varphi \quad (12)$$

$$\vec{N}_y = - \iint dN \cos \theta = - P_m R_T^2 \int_0^\alpha \sin \theta \cos \theta d\theta \int_0^\pi d\varphi \quad (13)$$

$$\vec{N}_z = 0 \quad (14)$$

其中, 负号表示方向与 X 轴和 Y 轴正方向相反。根据库伦定理, 沿轴线方向的摩擦力为:

$$\vec{f} = \iint d\vec{f} \quad (15)$$

$$\vec{f} = \vec{f}_x + \vec{f}_y \quad (16)$$

$$\vec{f}_x = \mu \vec{N}_y = -\mu P_m R_T^2 \int_0^\alpha \sin \theta \cos \theta d\theta \int_0^\pi d\varphi \quad (17)$$

$$\vec{f}_y = \mu \vec{N}_x = -\mu P_m R_T^2 \int_0^\alpha \sin^2 \theta d\theta \int_0^\pi \sin \varphi d\varphi \quad (18)$$

此处, $d\vec{f} = \mu dN$, $d\vec{f}$ 和 $d\vec{N}$ 垂直, μ 是滚压头与工件之间的摩擦系数。根据力学关系, 沿着 Y 轴的合力为 0:

$$\vec{F} + \vec{N}_y + \vec{f}_y = 0 \quad (19)$$

将式(13)和式(18)带入式(19)得式(20):

$$F = \frac{1}{4} \pi R_T^2 P_m \left[(1 - \cos 2\alpha) - \frac{2}{\pi} \mu (2\alpha - \sin 2\alpha) \right] \\ \approx \pi R_T P_m h_0 \left[1 - \mu \sqrt{\frac{h_0}{2R_T}} \right] \quad (20)$$

其中, h_0 为滚压深度。由于 h_0 远小于 $2R_T$, 因此 $\frac{h_0}{R_T}$ 近似为 0, μ 值很小, 且 P_m 近似设定为工件表面显微硬度 HV, 则式(20)可简化为式(21)。

$$F = \pi R_T P_m h_0 = \pi R_T H_V h_0 \quad (21)$$

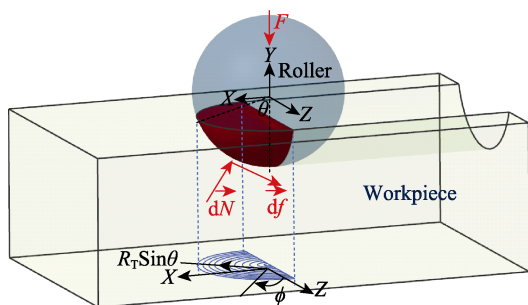


图 10 工具头与工件力学模型
Fig.10 Mechanical model of roller and workpiece

5.2 超声外圆滚压数学模型

当工具头与工件表面接触时, 其几何接触模型如图 11 所示。

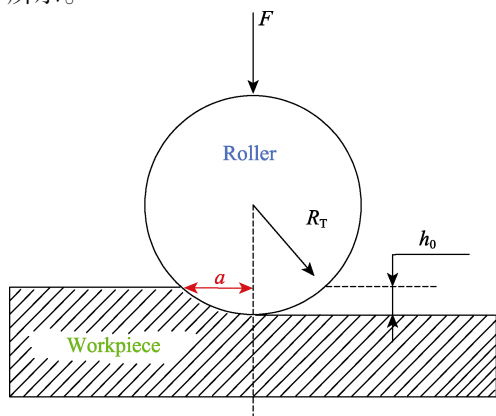


图 11 工具头与工件几何接触模型
Fig.11 Geometric contact model of roller and workpiece

通过工具头与工件几何接触模型可得:

$$R_T^2 = a^2 + (R_T - h_0)^2 \quad (22)$$

考虑 h_0 的二次方属于高阶无穷小, 故化简可得:

$$a = \sqrt{2R_T h_0} \quad (23)$$

所以, 联立式(21)和式(23), 可以得到静压力与接触半径关系。

6 工艺参数优化

结合前文理论分析, 为获高效率、大残余压应力和低表面粗糙度, 采用 MATLAB 软件编写量子遗传算法程序, 对式(4)、式(5)、式(9)寻求最优解。设定参数为: 种群大小 50, 遗传代数 200。计算出最优参数组为: $F=315$ N, $v_f=0.32$ mm/min, $n=269$ r/min。表 4 为 4 组试验结果的对比, 其中第 1 组为残余压应力最大时的加工参数, 第 2 组为效率最高时的加工参数, 第 3 组为表面粗糙度最小时的加工参数, 第四组为优化参数。

表 4 试验结果对比
Tab.4 Comparison of experimental results

No.	F/N	$v_f/(mm \cdot r^{-1})$	$n/(r \cdot min^{-1})$	σ/MPa	W	$Ra/\mu m$
1	350	0.2	125	-670	7.8	0.51
2	200	0.4	320	-476	2.8	0.39
3	270	0.2	125	-604	6.3	0.32
4	315	0.32	269	-632	3.6	0.35

从表 4 中可得, 优化后, 表面残余应力相比于第 2 组中的残余应力提高了 32.8%, 相比于第 1 组加工效率提高了 1.79 倍, 其表面粗糙度基本在同一等级。所以, 经优化后的工艺参数既保证了残余压应力和表面粗糙度的大小, 又提高了加工效率, 为高效率、低表面粗糙度、大残余压应力制造提供了一种行之有效的方法。

7 结论

1) 超声滚压强化后, 工件表层残余压应力随静压力的增大, 呈线性增大趋势, 且影响显著; 随主轴转速和进给速度的提高而逐渐减小, 但影响程度较小。

2) 有限元仿真得到的残余应力分布规律与相同工艺参数下的试验值基本相同, 沿滚压深度方向, 残余压应力呈现先增大后减小的趋势, 随着静压力的增加, 残余压应力峰值点逐渐从表层向次表层移动, 硬化层厚度基本呈线性逐渐增加, 最大残余压应力为 -654 MPa, 此时硬化层厚度约为 0.8 mm。

3) 获得大残余压应力、低表面粗糙度和高效率加工的工艺参数为: $F=253$ N, $v_f=0.4$ mm/min, $n=197$ r/min。在保证表面粗糙度处于同一等级下, 表面

残余压应力提高了 32.8%, 加工效率提高了 1.79 倍。

参考文献:

- [1] ALHAIK M S, SAVRAN A, GARMESTANI H. Explicit and implicit viscoelastic models for polymeric composite [J]. *International journal of plasticity*, 2004, 20(10): 1875-1907.
- [2] 赵玉良, 林树国, 王宇航. 高性能齿轮关键制造技术现状及发展建议[J]. *重型机械*, 2013(2): 5-8.
ZHAO Yu-liang, LIN Shu-guo, WANG Yu-hang. Current situation and development suggestion for key manufacturing technologies of high-performance gears[J]. *Heavy machinery*, 2013(2): 5-8.
- [3] 何少杰, 杨文玉, 郭步鹏, 等. 机加工表面残余应力及其疲劳寿命评价的研究进展[J]. *表面技术*, 2015, 44(6): 120-126.
HE Shao-jie, YANG Wen-yu, GUO Bu-peng, et al. Research progress on evaluation of surface residual stress and fatigue life of machined products[J]. *Surface technology*, 2015, 44(6): 120-126.
- [4] 李友国, 康国政, 汪长安, 等. 残余应力对接触疲劳裂纹萌生寿命的影响[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2005, 45(12): 1664-1667.
LI You-guo, KANG Guo-zheng, WANG Chang-an, et al. Effect of residual stresses on the crack initiation life for rolling contact fatigue[J]. *Journal of Tsinghua University (science and technology)*, 2005, 45(12): 1664-1667.
- [5] 孙希泰. 材料表面强化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
SUN Xi-tai. *Material surface reinforcement technology* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [6] DAI K, SHAW L. Comparison between shot peening and surface nano crystallization and hardening processes[J]. *Materials science & engineering A*, 2007, 463(1): 46-53.
- [7] SHAW L L, TIAN J W, ORTIZ A L, et al. A direct comparison in the fatigue resistance enhanced by surface severe plastic deformation and shot peening in a C-2000 super alloy[J]. *Materials science & engineering*, 2010, 527(4-5): 986-994.
- [8] BOZDANA A T, GINDY N N Z, LI H. Deep cold rolling with ultrasonic vibrations—A new mechanical surface enhancement technique[J]. *International journal of machine tools & manufacture*, 2005, 45(6): 713-718.
- [9] ROY S, FISHER J W, YEN B T. Fatigue resistance of welded details enhanced by ultrasonic impact treatment (UIT)[J]. *International journal of fatigue*, 2003, 25(9-11): 1239-1247.
- [10] MORDYUK B N, IEFIMOV M O, PROKOPENKO G I, et al. Structure, micro-hardness and damping characteristics of Al matrix composite reinforced with AlCuFe or Ti using ultrasonic impact peening[J]. *Surface & coatings technology*, 2010, 204(9-10): 1590-1598.
- [11] MOUSAVI S A A, FEIZI H, MADOLIAT R. Investigations on the effects of ultrasonic vibrations in the extrusion process[J]. *Journal of materials processing technology*, 2007, 187-188(12): 657-661.
- [12] JIANG J J, ZHENG J X, LIU C S. Research on surface roughness of ultrasonic polishing without abrasive based on orthogonal experiments[J]. *Key engineering materials*, 2009, 416(8): 133-136.
- [13] WANG T, WANG D, LIU G, et al. Investigations on the nano crystallization of 40Cr using ultrasonic surface rolling processing[J]. *Applied surface science*, 2008, 255(5): 1824-1829.
- [14] 黄诗翘, 曹国兵, 彭敏, 等. SUS304 钢的振动滚压加工表面粗糙度的推算[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 1990, 51(3): 1-8.
HUANG Shi-qiao, CAO Guo-bing, PENG Min, et al. Experimental calculating the surface roughness of SUS304 steel produced by the vibratory ball burnishing process[J]. *Journal of Sichuan University (science and technology)*, 1990, 51(3): 1-8.
- [15] 郑建新, 蒋书祥. 7050 铝合金二维超声滚压加工残余应力场研究[J]. *表面技术*, 2017, 46(12): 265-269.
ZHENG Jian-xin, JIANG Shu-xiang. Residual stress field in the process of 2D ultrasonic rolling 7050 aluminum alloy[J]. *Surface technology*, 2017, 46(12): 265-269.
- [16] 赵运才, 温春彬. 超声滚压三维残余应力场的有限元模拟[J]. *机械强度*, 2017, 39(4): 875-881.
ZHAO Yun-cai, WEN Chun-bin. Simulation of 3D residual stress field of ultrasonic surface rolling by dynamic finite element analysis[J]. *Journal of mechanical strength*, 2017, 39(4): 875-881.
- [17] LIU Y, WANG L, WANG D. Finite element modeling of ultrasonic surface rolling process[J]. *Journal of materials processing technology*, 2011, 211(12): 2106-2113.
- [18] 王琰. 超声波滚压光整加工技术的实验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
WANG Yan. Experimental research of ultrasonic rolling and finishing processing technology[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [19] 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 Cheng-lin, TONG Jing-lin, JIAO Feng, et al. Experiment and study on surface roughness of ultrasonic auxiliary rolling on aluminum alloy 6163[J]. *Tool engineering*, 2017, 51(8): 87-89.
- [20] 徐红玉, 黄焱焱, 崔凤奎. 超声滚挤压轴承套圈表层残余应力模型[J]. *塑性工程学报*, 2018, 25(5): 205-211.
XU Hong-yu, HUANG Yan-yan, CUI Feng-kui. A model for surface residual stress of ultrasonic rolling extrusion bearing ring[J]. *Journal of plasticity engineering*, 2018, 25(5): 205-211.
- [21] 赵运才, 张飞. 静压力对超声滚压表层特性的影响[J]. *表面技术*, 2017, 46(5): 152-158.
ZHAO Yun-cai, ZHANG Fei. Effect of static pressure on surface characteristics of ultrasonic rolling[J]. *Surface technology*, 2017, 46(5): 152-158.
- [22] 孔志营. 齿轮齿面超声滚压强化技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
KONG Zhi-ying. Research on ultrasonic rolling hardening of gear[D]. Dalian: Dalian University of technology, 2014.
- [23] 李进一, 凌祥, 周建新. 超声冲击残余应力场的有限元模拟[J]. *航空材料学报*, 2012, 32(1): 84-88.
LI Jin-yi, LING Xiang, ZHOU Jian-xin. Finite element simulation of residual stress field induced by ultrasonic impact treatment[J]. *Journal of aeronautical materials*, 2012, 32(1): 84-88.