

文章编号:1671-6833(2020)02-0044-06

超声滚压 18CrNiMo7-6 齿轮钢表面变质层性能分析

刘治华, 张天增, 杨孟俭, 戴骐隆, 张银霞

(郑州大学 机械与动力工程学院,河南 郑州 450001)

**摘 要:**研究了 18CrNiMo7-6 齿轮钢超声滚压后表面变质层的性能和加工工艺。分别运用三维表面形貌测量系统、显微硬度计、超景深三维显微系统和高速大功率 X 射线残余应力分析仪等工具观察试样加工前后的表面变质层变化,并采用单因素试验分析试验数据,研究超声滚压工艺参数对试样表面变质层的影响。结果表明:经过超声滚压加工,表面粗糙度由未经超声滚压处理的 3.003  $\mu\text{m}$  减少到 0.468  $\mu\text{m}$ ,显著的加工硬化在该材料表面形成,表面显微硬度从最开始的 360.9 HV 升高到 442.9 HV,升高了 22.7%,高硬度层达到了 300  $\mu\text{m}$ ;平整的表面在超声滚压加工后出现;在距离表面 40  $\mu\text{m}$  处残余压应力形成峰值,其值约为-790.97 MPa。超声滚压技术显著提高了材料的变质层性能。  
**关键词:**超声滚压加工; 18CrNiMo7-6; 表面粗糙度; 硬度; 残余应力  
**中图分类号:** TG306      **文献标志码:** A      **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2020.03.016

0 引言

材料的表面质量是决定其使用寿命的重要因素<sup>[1]</sup>。基于材料塑性流动的无屑塑性变形问题正日益受到人们的关注,提高表面的完整性逐渐成为研究的热点<sup>[2-3]</sup>。

机械表面强化技术,如喷丸强化、激光冲击强化、球抛光、深冷轧等,在零件表面引起了塑性变形,形成残余压应力、加工硬化和表面形貌变化<sup>[4]</sup>。超声振动辅助加工可降低滚压力,延长工具寿命。超声滚压在加工难加工金属合金方面有很大的优势<sup>[5-7]</sup>。

杨健坤等<sup>[8]</sup>对超声滚压过程中的颤振对表面质量的影响进行了研究,发现超声滚压可以提高被加工件的硬度、降低表面粗糙度。王婷等<sup>[9]</sup>通过对 40Cr 材料进行研究,发现经过超声滚压过后的 40Cr 在表面形成了纳米层,产生了残余压应力层,降低了表面粗糙度。任学冲等<sup>[10]</sup>对车轴材料进行了超声滚压加工,研究发现滚压后材料的疲劳性能提高,表面质量得到了显著提高。Wu 等<sup>[11]</sup>对中碳钢 S45C 进行了超声滚压加工,研究发现加工后的试样表面形成了纳米层,19-11 性能有重要影响。Ye

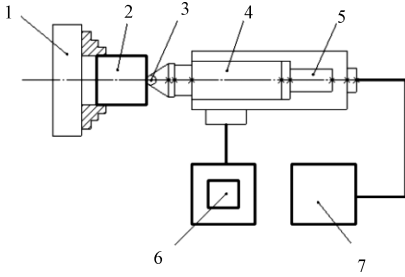
等<sup>[12]</sup>对 304 中碳不锈钢进行超声滚压加工,研究发现加工后试样的综合性能得到了提高、组织结构发生了变化。在现代机械工业中,18CrNiMo7-6 齿轮钢因其良好的机械性能和力学特性,在齿轮及齿轮轴等重载工件中被大量使用,目前对 18CrNiMo7-6 齿轮钢进行表面强化主要以表层渗碳热处理为主,笔者对经过锻压后的材料进行超声滚压初步研究。

超声滚压加工主要有主轴转速  $r$ 、进给量  $f$ 、静压力  $P_s$ 、滚压次数  $n$ 、振幅  $A$  等工艺参数,不同的工艺参数会产生不同的加工效果,它们相互影响,相互制约<sup>[13]</sup>。因此采用合理的工艺参数提高其表面质量显得至关重要<sup>[14]</sup>。笔者采用超声滚压技术对 18CrNiMo7-6 齿轮钢表面进行超声滚压加工处理,并分析不同工艺参数下工件的表面质量,以得到合理的工艺参数,为实际生产应用提供依据。

1 试验装置和试验方法

1.1 试验装置

试验装置安装在 CAK4085 数控机床上,其中超声滚压加工工具被夹持固定在车床刀架上,超声滚压装置如图 1 所示。



1-车床卡盘、2-工件、3-滚压头、4-变幅杆、  
5-换能器、6-刀架、7-超声波发生器

图1 超声滚压装置示意图

Figure 1 Diagrammatic sketch of ultrasonic rolling device

1.2 试验材料

本试验采用 18CrNiMo7-6 优质齿轮钢棒料,材料预处理为锻压但不进行热处理,经车削后,棒料端面的原始表面性能如下: $R_a$  为  $3.003\text{ }\mu\text{m}$ , $R_t$  为  $12\text{ }\mu\text{m}$ ,硬度为  $360.9\text{ HV}$ 。

1.3 试验方法

超声滚压试验之前,采用相同的加工参数对材料的端面进行精车加工,超声滚压完成后采用 DK7732 型线切割机将试样切割为  $5\text{ mm}$  厚。

采用 NPFLEX 型三维表面形貌测量系统测量表面粗糙度。在显微硬度计上测量滚压前后试样的显微硬度<sup>[15-16]</sup>。残余应力则采用 Proto 高速大功率 X 射线残余应力分析仪测量。在 VHX-2000 超景深显微镜上观察表面二维形貌,放大倍数为  $500$  倍。

2 结果与分析

2.1 工艺参数对表面粗糙度的影响

2.1.1 表面粗糙度解析模型

由文献[17]得到表面粗糙度的解析公式为:

$$R_t = R_{ti} - \delta + h, \delta < h, \quad (1)$$

$$R_t = h, \delta \geq h, \quad (2)$$

$$h = \frac{125f^2}{R_l}, \quad (3)$$

式中: $R_t$  为工件的表面粗糙度; $R_{ti}$  为超声滚压前试样的表面粗糙度; $\delta$  为压入深度。

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{9P_t^2}{16R^*E^{*2}}}. \quad (4)$$

$P_t$  为总作用力,可用下式得出:

$$P_t = P_s + P_d, \quad (5)$$

式中: $P_s$  为静压力; $P_d$  为动态力,其值可以表示为:

$$P_d = -\frac{16}{3}\rho\pi^3R^3Af'\sin(2\pi ft), \quad (6)$$

式中: $A$  为振幅; $f'$  为冲击频率; $t$  为时间; $\rho$  为滚压球的密度。

$R^*$  为相对曲率半径,可用下式得出:

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \quad (7)$$

式中: $R_1$  为滚压球的相对主曲率半径; $R_2$  为工件的相对主曲率半径。在滚压端面的情况下, $R_2$  为无穷大。

$E^*$  为等效弹性模量,可用下式得出:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - v_1^2}{E_1} + \frac{1 - v_2^2}{E_2}. \quad (8)$$

对超声滚压后试样表面进行测量发现  $R_t$  与  $R_a$  值呈一定的关系:

$$R_a = 0.5924R_t - 0.0531R_t^2 + 0.0017R_t^3 - 1.4429, \quad (9)$$

式(8)中:滚压头、工件的泊松比  $v_1$ 、 $v_2$  分别为  $0.21$ 、 $0.35$ ,弹性模量  $E_1$ 、 $E_2$  分别为  $710\text{ }000\text{ MPa}$ 、 $200\text{ }000\text{ MPa}$ 。

2.1.2 表面粗糙度值受主轴转速和进给量的影响

选择工艺参数  $P_s = 100\text{ N}$ ,  $A = 6\text{ }\mu\text{m}$ ,  $n = 3$ ,  $r = 200, 320, 500\text{ r/min}$ ,  $f = 0.07, 0.15, 0.22\text{ mm/r}$  时,分析主轴转速  $r$  以及进给量  $f$  对表面粗糙度的影响,如图 2 所示。

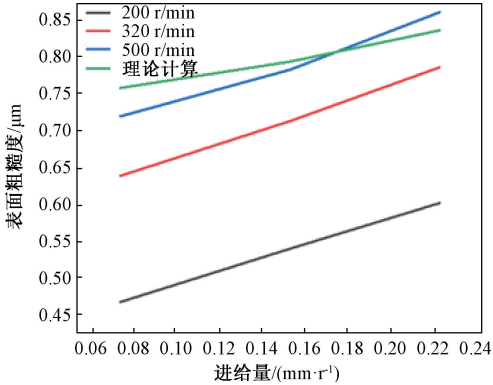


图2 表面粗糙度受主轴转速和进给量的影响曲线

Figure 2 Effect curves of spindle speed and feed on surface roughness

由图 2 可以得到,当其他加工参数不变,得到较低粗糙度值的转速和进给量分别是: $r = 200\text{ r/min}$ ,  $f = 0.07\text{ mm/r}$ ;理论计算表面粗糙度数值随进给量变化趋势和试验相一致,由于理论计算没有考虑转速的影响,因此表面粗糙度理论计算数值曲线只与转速  $r = 500\text{ r/min}$  时相一致。当进给量较小或  $r$  值较小时,被加工面单位时间内受到动态冲击次数增多,相应粗糙度值较低。

2.1.3 表面粗糙度值受静压力的影响

选择工艺参数  $r=320\text{ r/min}$ ,  $f=0.15\text{ mm/r}$ ,  $n=3$ ,  $A=6\text{ }\mu\text{m}$ ,  $P_s=30、40、50、150、200、250、300、350、450\text{ N}$ , 考察表面粗糙度受  $P_s$  的影响, 试验结果如图 3 所示。

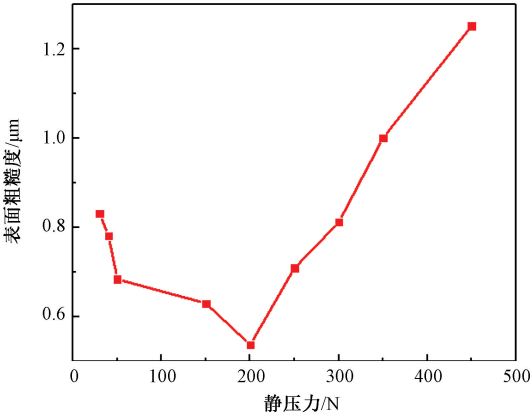


图 3 表面粗糙度受静压力影响的曲线

Figure 3 Effect curves of static pressure on surface roughness

由图 3 可以得到, 随着静压力从 30 N 到 450 N 变化, 表面粗糙度值先减小后增大。在该种加工条件下, 表面粗糙度值较小的最佳静态滚压力为 200 N。这是由于超声滚压振动能够对表面产生加工硬化的效果, 然而当静压力过大时, 过度的塑性变形出现在试样表面, 影响试样的表面质量; 另一方面, 过大的静压力会增加整个装置的负载, 加工过程的稳定性变差, 进而影响整体的加工效果。

2.1.4 表面粗糙度受滚压次数的影响

选择工艺参数  $r=320\text{ r/min}$ ,  $f=0.15\text{ mm/r}$ ,  $P_s=100\text{ N}$ ,  $A=6\text{ }\mu\text{m}$ ,  $n=2、4、6、8、10$  次时, 分析滚压次数对表面粗糙度的影响, 如图 4 所示。

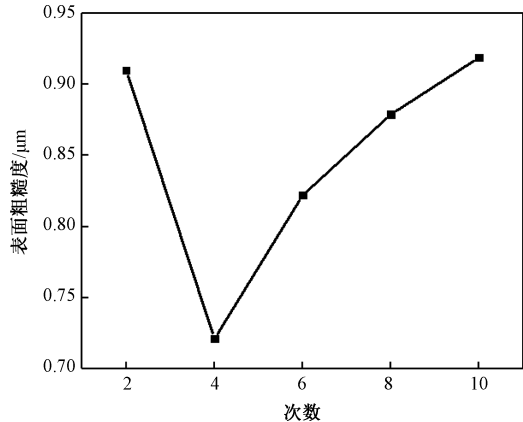


图 4 表面粗糙度受滚压次数影响的曲线

Figure 4 Effect curves of rolling times on surface roughness

图 4 中表明: 在  $r、f、P_s$  以及  $A$  都保持不变时, 随着滚压次数的增加, 表面粗糙度值先降低后增大。当滚压次数在 2 ~ 10 加工时, 表面粗糙度值较小的最佳滚压次数  $n=4$  次。因为在  $n\leq 4$  时, 适当的增加滚压的次数, 在试样表面会发生进一步的加工硬化, 试样表面的缺陷因此变少, 但是在  $n>4$  后滚压会破坏已加工好的表面。

2.1.5 表面粗糙度受振幅的影响

选择工艺参数  $r=320\text{ r/min}$ ,  $f=0.15\text{ mm/r}$ ,  $P_s=100\text{ N}$ ,  $n=3$ , 振幅分别为 4、6、10  $\mu\text{m}$  时, 振幅对表面粗糙度的影响如图 5 所示。

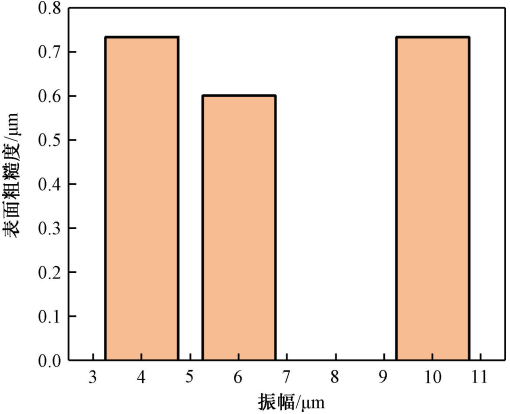


图 5 表面粗糙度受振幅影响

Figure 5 Effects of vibration amplitude on surface roughness

由图 5 能够看出, 在主轴转速、进给量、静压力以及滚压次数都保持不变时, 当振幅  $A=4\text{ }\mu\text{m}$  时, 表面粗糙度有了较大幅度改善; 当振幅  $A=6\text{ }\mu\text{m}$  时, 滚压加工后试样表面的粗糙度值达到了最小值, 滚压效果最好; 当振幅  $A=10\text{ }\mu\text{m}$  时, 表面粗糙度值不降反升。因此可以得出结论: 振幅  $A$  的适当增加可以使表面粗糙度值有效下降, 但是振幅过大时, 滚压试样的表面受到的冲击过大, 对试样表面构成损伤, 反而会增加试样表面的粗糙度值。

2.2 工艺参数对表面硬度的影响

2.2.1 表面硬度受主轴转速和进给量的影响

选择工艺参数  $P_s=100\text{ N}$ ,  $A=6\text{ }\mu\text{m}$ ,  $n=3$ , 考察  $r$  和  $f$  对表面硬度的影响, 试验结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 在  $P_s、n$  以及  $A$  都保持不变, 当  $r$  相同时, 随着  $f$  的增加, 试样表面硬度单调减小; 当  $f$  相同时, 随着  $r$  的增加, 试样表面硬度单调递增。在其他条件不变,  $r=500\text{ r/min}$ ,  $f=0.07\text{ mm/r}$  时, 滚压后 18CrNiMo7-6 钢将会达最大的表面硬度, 其值为 442.9 HV。这是因为在超声滚压加工

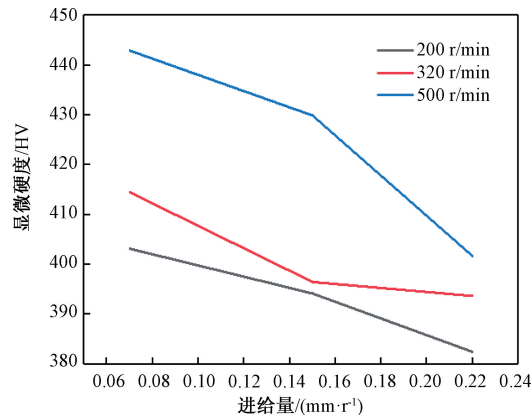


图 6 表面硬度受主轴转速和进给量的影响

Figure 6 Effect curves of spindle speed and feed on surface hardness

的过程中,当 $f$ 变大或 $r$ 减小时,会降低试样表面超声滚压加工的覆盖率,从而降低表层金属的塑性变形程度,进而造成表面硬度下降。

2. 2. 2 表面硬度受静压力的影响

选择工艺参数  $r = 320 \text{ r/min}$ ,  $f = 0.15 \text{ mm/r}$ ,  $n = 3$ ,  $A = 6 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $P_s = 50、150、200、250、300、350、450 \text{ N}$ ,  $P_s$  对表面硬度的影响试验结果如图 7 所示。

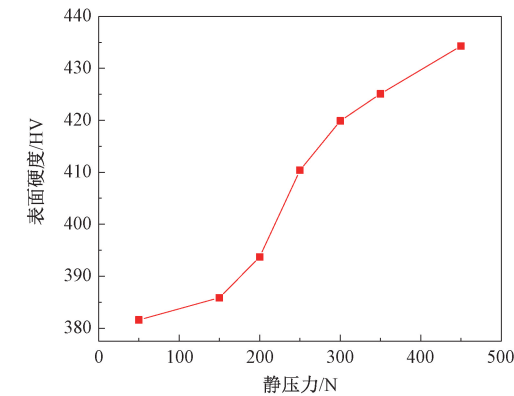


图 7 表面硬度受静压力的影响曲线

Figure 7 Effect curves of static pressure on surface hardness

由图 7 可知,在  $P_s$  数值增大后,滚压加工后的 18CrNiMo7-6 齿轮钢表面硬度也随之提高。这是由于加工过程中静压力的增大,引起加工硬化程度加剧,进而使得工件表面硬度值有所提高。

2. 2. 3 表面硬度受滚压次数的影响

选择工艺参数  $r = 320 \text{ r/min}$ ,  $f = 0.15 \text{ mm/r}$ ,  $P_s = 100 \text{ N}$ ,  $A = 6 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $n = 2、4、6、8、10$  时,  $n$  对表面硬度的影响如图 8 所示。

由图 8 可知,当滚压次数  $n$  增加时,表面硬度单调递增。这是因为滚压次数增加时,加工硬化的效果也在累加,虽然增加滚压次数可以增加其

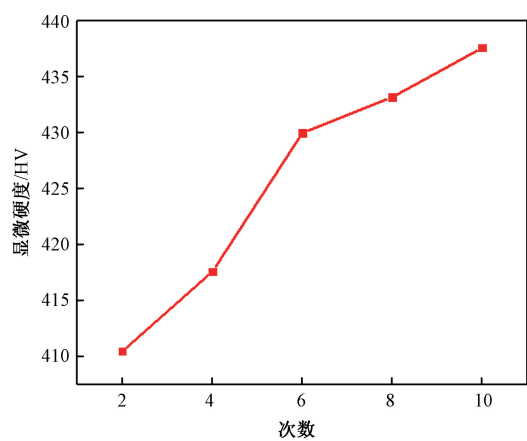


图 8 表面硬度受滚压次数的影响曲线

Figure 8 Effect curves of rolling times on surface hardness

硬度,但是试样的整体质量会有所下降。

2. 2. 4 表面硬度受振幅的影响

选择工艺参数  $r = 320 \text{ r/min}$ ,  $f = 0.15 \text{ mm/r}$ ,  $P_s = 100 \text{ N}$ ,  $n = 3$ , 振幅为 4、6、10  $\mu\text{m}$  时,振幅对表面硬度的影响如图 9 所示。

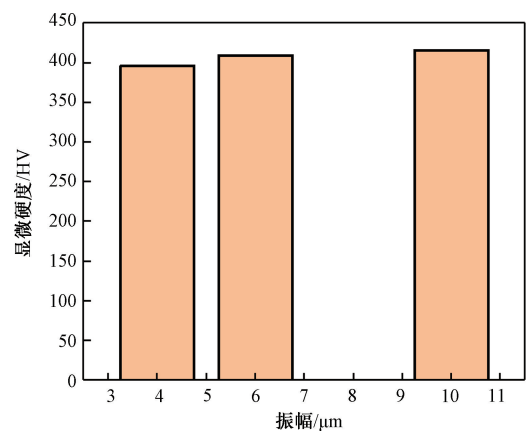


图 9 表面硬度受振幅的影响

Figure 9 Effects of amplitude on surface hardness

由图 9 可知,随着  $A$  增加,试样的表面硬度单调递增。其原因是当选用较小振幅,试样表面滚压区域受到的冲击较小,冲击效果较差。随着  $A$  的增大,试样受到的冲击开始增大,冲击效果改善,在金属试样的表层和近表层发生更多塑性变形,形成更加致密的组织,达到细化晶粒、提高表面硬度的效果。

2. 3 表层显微硬度

2. 3. 1 表层显微硬度受静压力的影响

选择工艺参数  $r = 320 \text{ r/min}$ ,  $f = 0.15 \text{ mm/r}$ ,  $n = 3$ ,  $A = 6 \text{ }\mu\text{m}$ 。图 10 为表层显微硬度受静压力变化影响的曲线。

由图 10 能够得出,未经超声滚压的试样表面硬度大约是 360.6 HV,加工后,表层硬度在



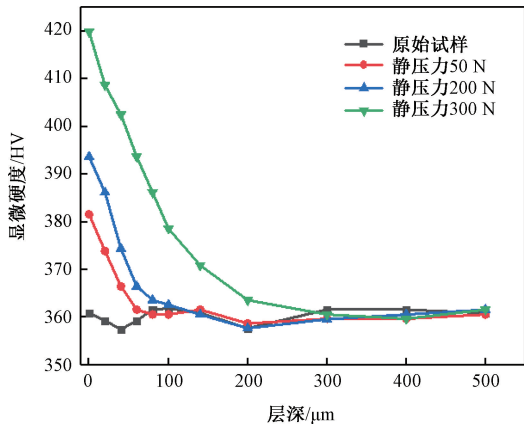


图 10 表层显微硬度受静压力的影响曲线  
Figure 10 Effect curves of static pressure on surface microhardness

一定程度上获得了提高,并且试样表面硬度最高,当 $P_s=300\text{ N}$ 时,表面硬度的最大值约为 $419.9\text{ HV}$ ,随着深度的增加,硬度值逐渐下降并最终稳定下来。当静压力采用 $50、200、300\text{ N}$ 时高硬度层分别为 $60、140、300\text{ }\mu\text{m}$ ,在深度大于这些数值后硬化效应不再显著。表明超声滚压处理,会在工件表面形成变质层,增加 $P_s$ 能显著提高工件表面变质层深度。这是因为在进行超声滚压加工时, $P_s$ 的提升会导致试样表层金属发生塑性变形的区域增大,进而导致位错密度的增加,晶粒更加细化,表面变质层深度增加。

2.3.2 表层显微硬度受滚压次数的影响

选择加工工艺参数 $r=320\text{ r/min}$ , $f=0.15\text{ mm/r}$ , $P_s=100\text{ N}$ , $A=6\text{ }\mu\text{m}$ 。图 11 为 $n$ 对表层显微硬度的影响曲线。

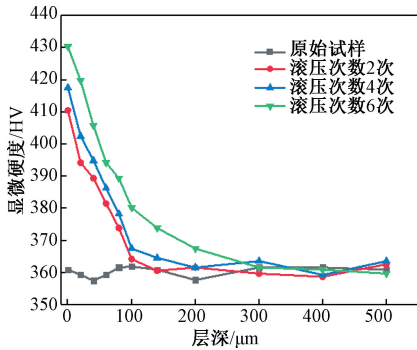


图 11 表层显微硬度受滚压次数的影响曲线  
Figure 11 Effect curves of rolling times on surface microhardness

从图 11 中可以看出,经超声滚压加工的试样表层硬度有了较大程度提高,并且试样表面硬度最高,当 $n=6$ 次时,表面的硬度值为最大值,约为 $430.4\text{ HV}$ ,随着深度的增加,硬度值下降并在一

定深度处稳定下来。随着 $n$ 从 2 次增至 4 次再增至 6 次,硬度趋于稳定的深度也从 $100\text{ }\mu\text{m}$ 增至 $200\text{ }\mu\text{m}$ 最终增至 $300\text{ }\mu\text{m}$ 。综合上述, $n$ 对加工效果有较大影响,随着 $n$ 的增加,表面硬度和变质层的深度也随之增加。这是由于随着 $n$ 增加,表层晶粒更加细化。

2.4 残余应力

2.4.1 残余应力受静压力的影响

选择的加工工艺参数 $r=320\text{ r/min}$ , $f=0.15\text{ mm/r}$ , $n=3$ , $A=6\text{ }\mu\text{m}$ 。图 12 为 $P_s$ 对表层残余应力的影响曲线。

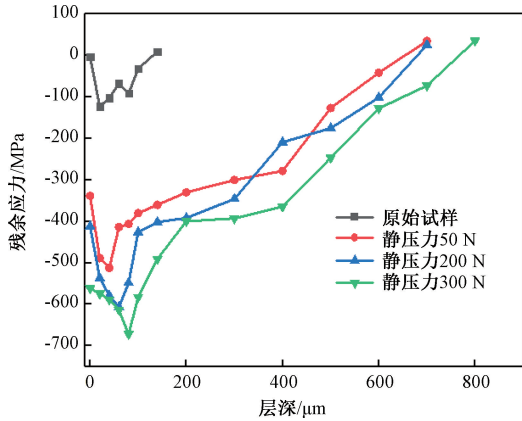


图 12 表层残余应力受静压力的影响曲线  
Figure 12 Effect curves of static pressure on surface residual stress

从图 12 中可以看出,原始试样表面的残余应力约为 $-3.10\text{ MPa}$ ,在 $160\text{ }\mu\text{m}$ 深度处,试样的残余应力值大于 0。随着 $P_s$ 从 $50\text{ N}$ 变为 $200\text{ N}$ 再变为 $300\text{ N}$ ,残余应力最大值从 $-512.40\text{ MPa}$ 增大到 $-606.76\text{ MPa}$ ,最终增至 $-672.04\text{ MPa}$ ,残余应力的层深也从 $700\text{ }\mu\text{m}$ 最终深至 $800\text{ }\mu\text{m}$ 。残余应力值由负变正。从以上可以得出,最大残余应力随着 $P_s$ 的增加,峰值与深度也在增加。

2.4.2 残余应力受滚压次数的影响

选择工艺参数 $r=320\text{ r/min}$ , $f=0.15\text{ mm/r}$ , $P_s=100\text{ N}$ , $A=6\text{ }\mu\text{m}$ 。图 13 为 $n$ 对表层残余应力的影响曲线。从图 13 可以看出,随着滚压次数从 2 次增加到 4 次再增加到 6 次,残余应力最大值从 $-584.56\text{ MPa}$ 增大至 $-753.16\text{ MPa}$ ,最终增至 $790.97\text{ MPa}$ ,残余应力的层深也从 $500\text{ }\mu\text{m}$ 加深至 $700\text{ }\mu\text{m}$ ,最终加深至 $800\text{ }\mu\text{m}$ 。

3 结论

(1)通过研究超声滚压加工的各个工艺参数对 $18\text{CrNiMo7-6}$ 钢的表面粗糙度的影响规律发

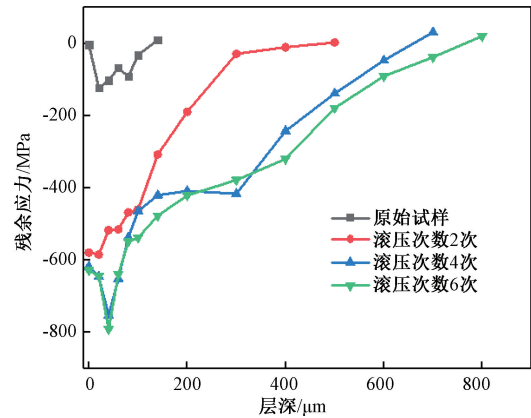


图 13 表层残余应力受滚压次数的影响曲线  
Figure 13 Effect curves of rolling times on surface residual stress

现:在合理的工艺参数条件下,表面粗糙度可以从原始试样的 3.003  $\mu\text{m}$  降低至 0.468  $\mu\text{m}$ 。

(2)通过研究超声滚压加工的各个工艺参数对 18CrNiMo7-6 钢的表面硬度的影响规律发现:在合理的工艺参数条件下,表面硬度可以由原来的 360.9 HV 提高至 442.9 HV,表面硬度提高了 22.7%,硬度值从工件表面至工件心部递减,最后趋于稳定,高硬度层深度达到了 300  $\mu\text{m}$ 。

(3)通过研究超声滚压加工的各个工艺参数对 18CrNiMo7-6 钢的残余应力的影响规律发现:在合理的工艺参数条件下,最大残余压应力出现在距离表面 40  $\mu\text{m}$  处,其值为-790.97 MPa,残余压应力层深度达到了 800  $\mu\text{m}$ 。

参考文献:

[1] BOUZID W, TSOUAREV O, SAÏ K. An investigation of surface roughness of burnished AISI 1042 steel [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2004, 24(1/2): 120-125.

[2] LIU Y, ZHAO X H, WANG D P. Determination of the plastic properties of materials treated by ultrasonic surface rolling process through instrumented indentation[J]. Materials science and engineering: A, 2014, 600: 21-31.

[3] WEI S L, ZHAO H, JING J T. Investigation on three-dimensional surface roughness evaluation of engineering ceramic for rotary ultrasonic grinding machining [J]. Applied surface science, 2015, 357: 139-146.

[4] TOLGA BOZDANA A, GINDY N N Z, LI H. Deep cold rolling with ultrasonic vibrations: a new mechanical surface enhancement technique[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2005, 45(6): 713-718.

[5] HUUKI J, LAAKSO S V. Integrity of surfaces finished with ultrasonic burnishing[J]. Proceedings of the in-

stitution of mechanical engineers, part B: journal of engineering manufacture, 2013, 227(1): 45-53.

[6] WANG H B, SONG G L, TANG G Y. Enhanced surface properties of austenitic stainless steel by electro-pulsing-assisted ultrasonic surface rolling process [J]. Surface and coatings technology, 2015, 282: 149-154.

[7] GOMEZ-GRAS G, TRAVIESO-RODRIGUEZ J A, JEREZ-MESA R, et al. Experimental study of lateral pass width in conventional and vibrations-assisted ball burnishing [J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2016, 87(1/2/3/4):363-371.

[8] 杨健坤, 孟繁萃, 赵洪博, 等. 超声滚压中颤振对零件表面质量的影响 [J]. 机械与电子, 2018, 36(9): 11-15.

[9] 王婷, 王东坡, 沈煜, 等. 超声表面滚压加工参数对 40Cr 表面粗糙度的影响 [J]. 天津大学学报, 2009, 42(2):168-172.

[10] 任学冲, 陈利钦, 刘鑫贵, 等. 表面超声滚压处理对高速列车车轴钢疲劳性能的影响 [J]. 材料工程, 2015, 43(12): 1-5.

[11] WU B, ZHANG J X, ZHANG L J, et al. Effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on surface and fatigue properties of quenching and tempering S45C steel[J]. Applied surface science, 2014, 321: 318-330.

[12] YE C, TELANG A, GILL A S, et al. Gradient nano-structure and residual stresses induced by ultrasonic nano-crystal surface modification in 304 austenitic stainless steel for high strength and high ductility [J]. Materials science and engineering: A, 2014, 613: 274-288.

[13] 宋锦春, 贾志强, 张敏鑫. 超声滚压光整加工参数对 45#钢表面粗糙度和硬度的影响 [J]. 制造技术与机床, 2016(11): 85-89.

[14] REVANKAR G D, SHETTY R, RAO S S, et al. Wear resistance enhancement of titanium alloy (Ti-6Al-4V) by ball burnishing process [J]. Journal of materials research and technology, 2017, 6(1): 13-32.

[15] 王栋, 刘昱范, 陈鑫. 18CrNiMo7-6 高速磨削条件下表面质量的试验研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(3): 78-81, 86.

[16] 张天增. 超声滚压装置及其工艺试验的研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2019.

[17] MAGALHÃES F C, ABRÃO A M, DENKENA B, et al. Analytical modeling of surface roughness, hardness and residual stress induced by deep rolling [J]. Journal of materials engineering and performance, 2017, 26(2): 876-884.

Optimization Method Based on Depth-first Search and Grey Wolf  
Optimization Algorithm for Reconfiguration of Microgrid

ZHANG Qinglin, XIN Xiaonan, CHENG Zhiping

(School of electrical engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of continuous load supply and stable operation of the system when the main network with unplanned faults and the microgrid shifted from grid-connected to the island mode, from a global perspective of coordinating and controlling the equipment in the power network, a microgrid reconfiguration model was established and a reconfiguration method combining depth first search and gray wolf optimization algorithm was proposed. This method took the switch state and the power of the adjustable equipment as the optimization variables. Aiming at the problem of nonradiative grid structure in the process of reconstruction and optimization, the method used depth first search to identify, analyze and process the grid structure. The method used forward and backward method to calculate the network power flow distribution, and took gray wolf optimization algorithm to obtain the reconstruction scheme. The simulation results showed that the proposed hybrid reconfiguration method had stronger global search ability, and its reconfiguration results were feasible and better. Moreover, it was more advantageous than the only switch state or power variables for system optimization and adjustment that the reconfiguration strategy took the combination of switch state and power as the optimization variables.

**Key words:** microgrid; reconfiguration; depth-first search; grey wolf optimization algorithm; network structure; radial structure

(上接第 49 页)

Performance Analysis of Surface Modification Layer of 18CrNiMo7-6 Gear  
Steel Treated by Ultrasonic Rolling

LIU Zhihua, ZHANG Tianzeng, YANG Mengjian, DAI Qilong, ZHANG Yinxia

(School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The performance and processing technology of surface modification layer of 18CrNiMo7-6 gear steel after ultrasonic rolling were studied. The measurement instructions, such as 3D surface topography measurement system, microhardness instrument, super depth of field 3D microscopy system and high power X-ray diffractometer were used respectively, to observe the variation of surface modification layer of the sample. The effects of ultrasonic rolling process parameters on surface modification layer were studied by single factor test. The results showed that after ultrasonic rolling, the surface roughness of the specimen is decreased from the untreated 3.003 $\mu\text{m}$  to 0.468 $\mu\text{m}$ . Significant work hardening formed on the surface of the material after ultrasonic rolling. Surface microhardness increased by 22.7% from 360.9 HV to 442.9 HV, and the high hardness layer reached 300  $\mu\text{m}$ . Flat surface appeared after ultrasonic rolling. The maximum residual compressive stress occurred at a distance of 40  $\mu\text{m}$  from the surface, which was about -790.97 MPa. Ultrasonic rolling technology significantly improved the properties of the modification layer.

**Key words:** ultrasonic rolling processing; 18CrNiMo7-6; surface roughness; hardness; residual stress