

机械滚压对 A473M 钢疲劳性能的影响

Effect of mechanical rolling on fatigue properties of A473M steel

刘也川¹, 张 松¹, 谭俊哲², 关 锰², 陶邵佳², 张春华¹

(1 沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870; 2 沈阳鼓风机集团 核电泵业有限公司, 沈阳 110869)

LIU Ye-chuan¹, ZHANG Song¹, TAN Jun-zhe², GUAN Meng²,
TAO Shao-jia², ZHANG Chun-hua¹

(1 School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2 Nuclear Power Pump Industry Co., Ltd., Shenyang Blower Works Group Corporation, Shenyang 110869, China)

摘要: 采用机械滚压对 A473M 马氏体不锈钢轴套材料进行表面处理, 研究滚压工艺对其力学性能的影响。采用 SEM、白光干涉仪、X 射线衍射仪、显微硬度计、EBSD、拉伸试验机和疲劳试验机分别对试样表面形貌、表面粗糙度、残余应力、显微硬度、拉伸性能和疲劳性能进行系统表征。结果表明: 滚压加工试样表面的粗糙度明显降低, 仅为车削加工的 1/5; 滚压加工在材料近表面引入残余压应力, 其值最高可达 946 MPa, 沿深度方向逐渐减小, 残余压应力层深度约为 200 μm , 表面硬度提高 30% 左右, 硬度影响层深度可达 200 μm ; 抗拉强度、屈服强度和伸长率分别提升了 40%, 22% 和 8%, 疲劳寿命由基体材料的 5.4×10^4 周次提高到 1×10^7 周次。采用滚压加工后材料的力学性能明显提升, 疲劳寿命显著增加。

关键词: 滚压; 力学性能; 残余应力; 拉伸性能; 疲劳寿命

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2019.000131

中图分类号: TG142.1⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2020)03-0163-07

Abstract: The surface treatment was carried out on the surface of materials of A473M martensitic stainless steel axle sleeve by rolling technology, aiming to investigate the effect on its mechanical properties. The surface morphology and roughness, residual stress, microhardness, tensile and fatigue property were systematically studied using the SEM, white light interferometer, X-ray diffractometer, microhardness tester, EBSD, tensile tester and fatigue tester. The results show that the surface roughness of rolling specimen reduces significantly, which is about 1/5 of that of turning surface. The residual compression stress is induced near surface by rolling processing, the maximum value can reach up to 946 MPa and the residual compression stress decreases along with the depth. The thickness of the residual compression stress layer is about 200 μm . In addition, the rolling surface microhardness can be improved by 30% compared with that of turning surface and the hardened layer can be about 200 μm . As for mechanical properties, the tensile strength, yield strength and elongation of rolling specimens increase about 40%, 22% and 8% respectively compared with that of turning specimens. The fatigue life increases from 5.4×10^4 cycles to 1×10^7 cycles after rolling processing. The mechanical properties of the rolled material significantly improve, and the fatigue life significantly increases.

Key words: rolling; mechanical property; residual stress; tensile property; fatigue life

核主泵是保障核电站系统安全运行的关键设备之一,更是被誉为核电站的心脏^[1]。核主泵由三部分构

成:水力机械部分、轴封系统和电机部分^[2]。其中轴封系统为核主泵最外层的工件,是核主泵工作系统最重要的一道保护系统,承担着保护其他部件的作用,但是轴套也会受外部环境的影响而破坏、失效。轴套的失效形式有以下三种:(1)疲劳破坏,在核主泵工作过程中疲劳损坏是最常见的,导致轴套表面产生裂纹,材料的疲劳寿命决定了轴承的工作时长;(2)摩擦磨损,轴套的振动是产生摩擦磨损的主要原因,摩擦磨损会导致轴套表面发生剥落;(3)腐蚀点蚀,磨蚀也是轴套主要的失效方式,主要是受轴套工作环境的影响,摩擦磨损后暴露的表面更容易发生磨蚀点蚀。

滚压加工可以显著提高材料的力学性能,如表面硬度、表面残余应力、耐磨性、强度和韧性等^[3-5]。材料滚压加工后会形成一层与基体材料无明显界面、结合紧密的强化层^[6-7],强化层厚度因材料和滚压工艺的差异而不同。滚压加工使工件表面产生加工硬化和残余压应力,有效地抑制疲劳裂纹的萌生和扩展^[8]。郑建新等^[9]对 7050 铝合金轴件进行超声滚压加工有限元分析,研究了滚压工艺参数对铝合金表面残余应力的影响。巴德玛等^[10]研究了滚压加工对焊接修复层的影响,滚压加工后渗硫层的承载力、耐磨性和减摩性能均有不同程度的提高。Nakata 等^[11]研究了热轧制对材料织构弱化和拉伸性能的影响。滚压处理还有很多亟待解决的问题,如探究不同材料的滚压最佳工艺参数及其组织和力学性能的变化;研究滚压加工聚合物材料的重复性问题;加强滚压强化机理的研究等。

本工作主要研究 A473M 马氏体不锈钢滚压前后力学性能的变化,探究表面硬度、残余压应力、强度对不锈钢疲劳寿命的影响,直观地反映滚压加工对轴套力学性能的影响,为工程实际应用奠定理论基础。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料及加工方法

实验所用材料为 ASTM A473M 不锈钢圆盘,直径为 150 mm,厚度为 50 mm,其化学成分(质量分数/%)为 0.05 C,0.50~1.00 Mn,0.03 P,0.06 Si,11.5~14.0 Cr,3.50~5.50 Ni,0.40~0.80 Mo,余量为 Fe。使用 CTXGAMMA2000 型数控卧式车床进行滚压加工,实验中恒定滚压力为 1.5 MPa,进给量为 0.1 mm/r,压下量为 0.1 mm,主轴转速为 80 r/min,滚压道次为 1 次,滚珠尺寸为 5 mm。

1.2 检测方法

采用 GNR-STRESS-X 型 X 射线衍射应力分析仪对滚压加工后的圆盘样件表面进行残余应力测定,X

射线衍射条件:辐射线为 $\text{CrK}\alpha$,波长 0.2290 nm,测试晶面为 (211),衍射角为 156° ,管电压为 25 kV,管电流为 4 mA,定峰方法为高斯拟合。滚压后线切割成尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的试样,使用超声波丙酮溶液清洗仪清洗 5 min,去除表面油渍及杂质。采用 SU8010 型 SEM 对试样进行表面形貌观察,然后采用 MicroXAM-3D 型表面轮廓仪进行表面粗糙度测量。试样截面采用 60#~2000# SiC 耐水砂纸依次进行打磨,然后用 2.5 μm 金刚石水溶性研磨膏进行机械抛光。采用 HVS-1000 型维氏硬度计进行显微硬度测量,法向载荷 0.1 N,加载时间 10 s。拉伸和疲劳试样示意图如图 1 所示,线切割面用 60#~2000# 砂纸进行打磨,在 E44.304 型微机控制电子万能试验机上进行室温拉伸实验,加载速率为 1 mm/r,每一组样品进行 3 次平行实验,测试结果取平均值。拉伸试样断口的车削和滚压面采用 1500#,2000# 砂纸进行打磨,用颗粒为 1.5 μm 的研磨膏进行机械抛光,最后用纳米 SiO_2 悬浮液抛光 2 h,去除表面机械抛光应力层,采用 NordlysNano 型 EBSD 分析仪进行检测分析。疲劳实验在 M-3000 型微机控制疲劳试验机上进行,采用的波形为正弦波,如图 2 所示,应力平均值 σ_m 为 262.5 MPa,幅值 σ_a 为 237.5 MPa,频率为 20 Hz,初始相位为 270° 。每一组样品进行 3 次平行疲劳实验,取平均值。

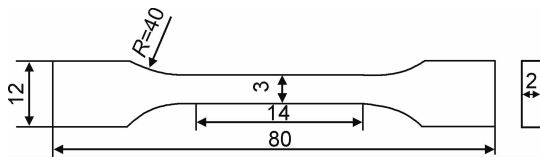


图 1 拉伸及疲劳试样示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of tensile and fatigue specimens

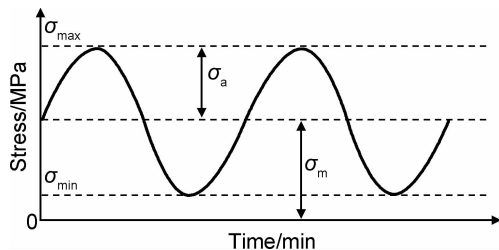


图 2 疲劳载荷波形示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fatigue load waveform

2 结果与分析

2.1 表面形貌及粗糙度

滚压加工可显著降低工件表面粗糙度,提高尺寸

精度和适配性^[12-13]。材料表面粗糙度对疲劳性能的影响尤为显著^[14],与试样的疲劳寿命成反比。图 3 为车削和滚压加工试样表面形貌。由图 3(a)可以看出,经过磨削加工后的试样表面有清晰的车削刀痕,峰、谷密

集,峰多呈尖锐状。经过滚压加工后的试样表面形貌明显光滑,刀痕消失,仅有些许犁沟,如图 3(b)所示。这是由于在滚压过程中,在外界压力作用下材料的塑性流动使得峰谷之间平衡互补,从而降低表面粗糙度。

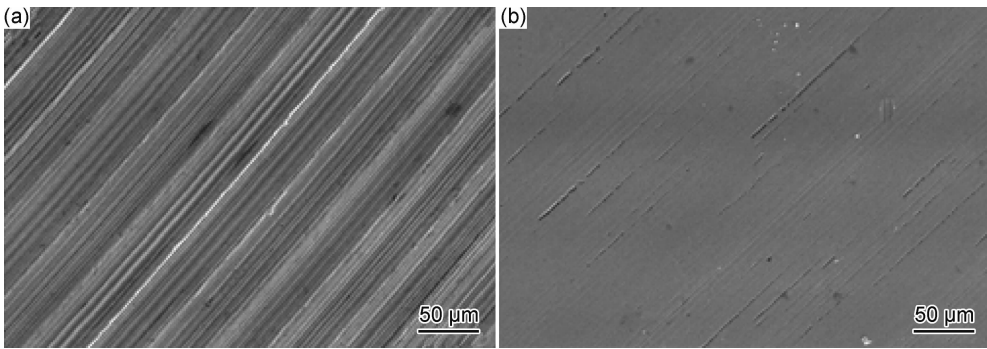


图 3 车削(a)和滚压(b)加工试样的表面形貌
Fig. 3 Surface morphologies of turning(a) and rolling(b) samples

表 1 为车削和滚压加工试样的表面几何形貌参数。其中, R_q 为轮廓方均根值, R_z 为轮廓最大高度, R_t 为最大峰谷值, R_a 为表面粗糙度。由表 1 可知,滚压加工后的表面粗糙度明显降低。EI-Haddad 等^[15]研究得到表面粗糙度和疲劳极限应力的关系式为:

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta K_{th}}{y[\pi(R_a + a_c)]^{0.5}} \tag{1}$$

式中: $\Delta\sigma$ 为疲劳极限应力; ΔK_{th} 为裂纹的阈值应力强度因子; y 为微谷的形状因子; a_c 为材料的临界裂纹长度。由式(1)可知,在满足某型轴套 $R_a \leq 400\text{ nm}$ 的前提下,表面粗糙度越大, y 和 R_a 值越大,疲劳极限应力 $\Delta\sigma$ 越小,越容易产生疲劳断裂,疲劳寿命越小。A473M 不锈钢滚压加工后的表面粗糙度仅为 62.7 nm ,是车削加工的 $1/5$,表面粗糙度明显降低,说明滚压加工可以达到提高材料疲劳寿命的目的。

表 1 车削和滚压加工试样的表面几何形貌参数
Table 1 Surface geometry parameters of turning and rolling samples

Process	R_a/nm	R_q/nm	R_z/nm	R_t/nm
Turning	383	477	2399	2663
Rolling	62.7	84.2	522	709

2.2 表面残余应力

残余压应力层深度是表征滚压加工试样内部裂纹扩展速率的重要指标。图 4 为车削和滚压加工试样残余应力沿深度方向变化拟合曲线。可以看出,滚压加工的试样表现为残余压应力,表层最大残余压应力可达 946 MPa ,其残余压应力层深度可达 $200\text{ }\mu\text{m}$,残余压应力值随深度的增加不断减小,直到与基体残余应

力值相近,此现象主要是由加工硬化和组织细化共同作用产生的^[16]。而车削加工试样表现为拉应力,深度为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 左右。残余应力和疲劳寿命的关系可用 Walker 公式^[17]表述:

$$N_c = \int_0^{N_c} dN = \frac{\int_{a_0}^{a_c} (Y\Delta\sigma \sqrt{\pi a})^{-n} da}{C(1-R)^q} \tag{2}$$

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \tag{3}$$

$$R = \frac{\sigma_{\min} + K_\sigma \sigma_R}{\sigma_{\max} + K_\sigma \sigma_R} \tag{4}$$

式中: N_c 为疲劳裂纹扩展寿命; $\Delta\sigma$ 为应力幅; R 为应力比; $K_\sigma=0.466$,为残余应力影响系数^[18]; a 为裂纹长度; σ_R 为平均残余应力; $a_0=0.1\text{ mm}$,为初始裂纹长度; $a_c=1\text{ mm}$,为临界裂纹长度; $Y=0.41$,为应力强度因子;根据文献^[19]可知, q 为常数, $q=(m-1)n$, $m=0.5$, $n=4.16$, $C=3.31 \times 10^{-17}$ 。取距表面 $50\text{ }\mu\text{m}$ 处的平均残余应力,得出的疲劳寿命为 1.6×10^6 周次。工件工作时疲劳裂纹多萌生于材料表面,表面残余拉应力的存在会加速裂纹的扩展,所以降低或消除材料表面残余拉应力可有效提高材料疲劳寿命。滚压加工工艺不仅可以消除表面残余拉应力,使疲劳裂纹在材料内部产生,增加裂纹萌生的难度,而且将残余压应力引入材料内部,从而抑制疲劳裂纹的扩展,进而提高材料抗裂纹扩展能力,降低缺口敏感性^[20]。

2.3 显微硬度

显微硬度是反映材料的结合强度、抵抗变形能力和抗破坏能力。图 5 为车削和滚压加工试样截面显微硬度分布曲线。可以看出,滚压加工的硬化层深度在 $200\text{ }\mu\text{m}$ 左右,与残余压应力层深度吻合,最大显微硬

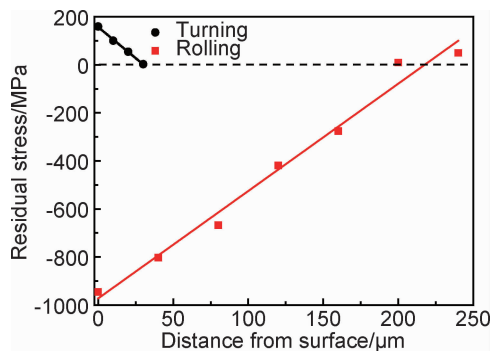


图4 车削和滚压加工试样残余应力沿深度方向变化拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of residual stress along the reverse direction of turning and rolling samples

度可达 $396\text{HV}_{0.1}$ 。车削加工显微硬度的影响深度比滚压加工浅很多,仅为 $20\text{ }\mu\text{m}$,且递减率更大,最大显微硬度为 $301\text{HV}_{0.1}$ 。滚压加工后显微硬度的提高对疲劳性能的影响也很大,如式(5)^[21]所示。

$$\Delta K_{\text{th}} = C_1 (H_v + C_2) (\sqrt{\text{area}})^{1/3} \quad (5)$$

式中: C_1, C_2 为与材料无关的常数; H_v 为显微维氏硬度; $\sqrt{\text{area}}$ 为硬度压痕投影到垂直于应力水平面上的面积平方根。结合式(3)得出,滚压加工后的近表面显微硬度高于车削加工,在其他外界条件相同的情况下, ΔK_{th} 越大,滚压加工后显微硬度值越大,疲劳极限应力和疲劳寿命越高。核电主轴轴套不仅对材料的疲劳性能有明确要求,而且工作过程中的磨损同样重要,表面显微硬度的提高对轴套表面耐磨性能的改善有益。

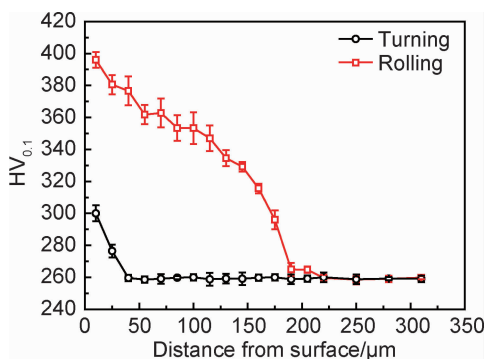


图5 车削和滚压加工试样截面显微硬度分布曲线

Fig. 5 Microhardness distribution curves of cross-section of turning and rolling samples

2.4 拉伸性能

图6为车削和滚压加工试样应力-应变曲线。滚压加工后A473M不锈钢抗拉强度明显提高,由车削加工的714 MPa提高到1010 MPa,提高了40%;屈服强度由566 MPa提高到692 MPa,提高了22%;伸长率由22.6%提高到30.0%,提高了8%。这是由于滚

压加工后硬化层组织晶粒细化,板条马氏体宽度由 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 降低至 $0.15\text{ }\mu\text{m}$,根据 Hall-Petch 公式^[22]可知,金属材料的晶粒尺寸越细小,材料的抗拉强度越大,韧性提高,伸长率随之增加。材料的拉伸性能也与疲劳寿命有一定关系,关系式如式(6)所示^[23]。

$$(\Delta\sigma_{\text{eqv}})_{\text{th}} = \sqrt{E\sigma_f\epsilon_f} \left(\frac{\Delta\sigma_c}{2E\epsilon_f} \right)^{(1+n)/2} \quad (6)$$

式中: $(\Delta\sigma_{\text{eqv}})_{\text{th}}$ 为当量应力下的疲劳裂纹起始门槛值; E 为弹性模量; σ_f, ϵ_f 分别为抗拉强度和断裂延性; n 为应变硬化指数; $\Delta\sigma_c$ 为理论应力疲劳极限。与车削加工相比,滚压加工后A473M不锈钢的弹性模量、抗拉强度和断裂延性均有很程度的增加,采用极限法分析可知,疲劳裂纹起始门槛值增大,疲劳寿命增加。

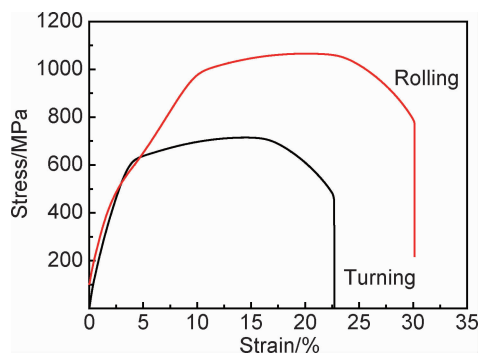


图6 车削和滚压加工试样应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of turning and rolling samples

图7为车削和滚压加工试样拉伸区域的反极图, X 为滚压力方向, Y 为拉伸方向。图7中不同颜色代表材料的不同织构强度,蓝色最小,绿色次之,红色最大。由图7(a)可以看出,沿拉伸方向 Y 上,平行于 $\langle 101 \rangle$ 方向的织构强度约为2.73,总体的织构强度相对较弱,图7(b)中同方向的织构强度最大约为3.64,可见滚压加工后的织构强度增加。但是两种加工方法处理后的试样,在拉伸过程中均会形成沿 $\langle 101 \rangle$ 方向的织构,且织构均是在拉伸方向 Y 上形成。这主要是由于A473M不锈钢属于BCC结构金属,可能的滑移面是 $\{110\}, \{112\}$ 和 $\{113\}$ ^[24],材料在拉伸过程中产生塑性变形,在微观机制上主要是晶粒的旋转和位错滑移共同作用的结果,晶粒易于朝向外载荷作用的方向,位错易于在 $\{110\} \langle 111 \rangle$ 方向上产生滑移。材料在受外力作用的情况下,内部的压应力得以释放,滚压后试样表面产生的晶粒细化和位错塞积将阻碍晶粒的旋转,抵抗外部变形。在图7(b)中,垂直于拉伸方向的 X 方向上,沿 $\langle 111 \rangle$ 方向滚压加工织构强度相对于车削加工明显增强,滚压加工起到了阻碍晶粒在 $\{110\} \langle 111 \rangle$ 方向的滑移。

2.5 高周疲劳性能

疲劳实验采用成组对比法,实验应力 $\sigma_{\text{max}} = 480\text{ MPa}$,

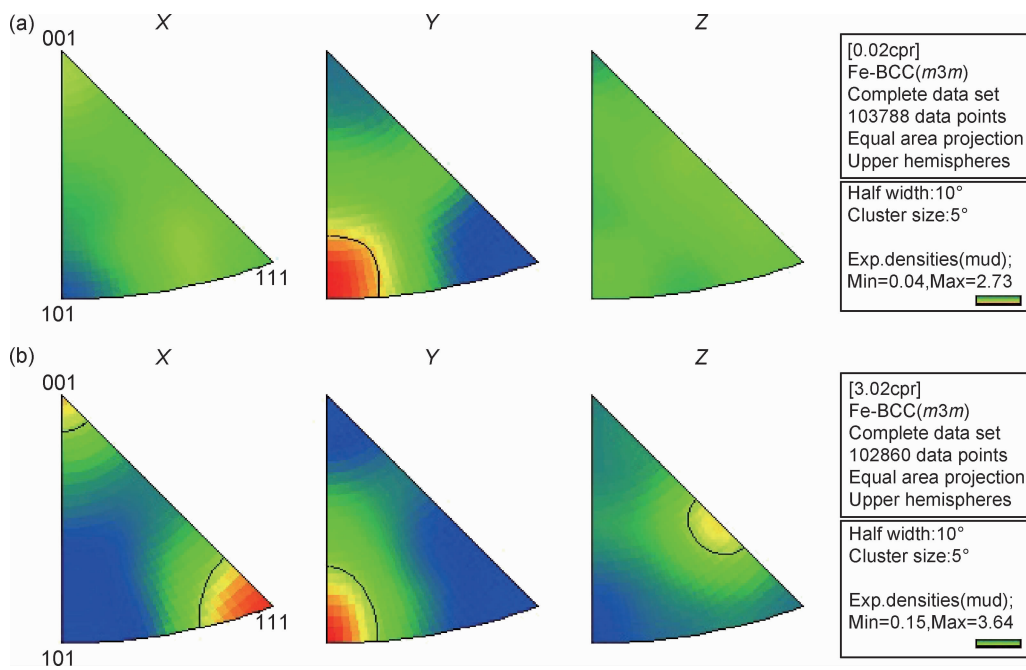


图 7 车削(a)和滚压(b)加工试样拉伸区域的反极图

Fig. 7 Inverse pole figures of the stretched area for turning(a) and rolling(b) samples

实验温度为室温。每种类型的试样各 12 件,每 4 件为一组,取疲劳寿命的平均值,置信度 90% 以上,依据 GB/T 24176—2009 对实验数据进行对比分析。图 8 为车削和滚压加工试样疲劳寿命柱状图。在同一应力实验条件下,滚压加工后试样的疲劳寿命明显提高,达到了疲劳极限 1×10^7 周次,相对于车削加工试样提高了 3 个数量级。这是由于在滚压加工过程中,材料近表面区域发生明显塑性变形,导致近表面发生组织细化、晶面间距变化、位错密度增大、缺陷紧缩等^[25]。疲劳实验过程中,裂纹形成主要在位错滑移层,滚压加工后提高了表面钉扎位错和阻碍位错滑移的能力,减缓了裂纹萌生。

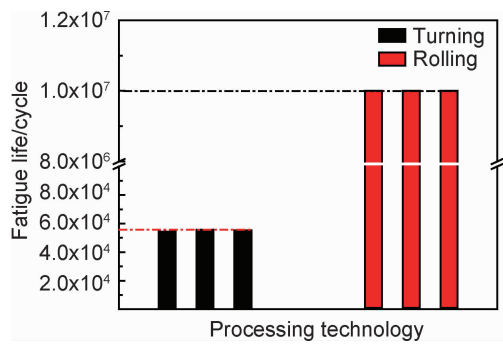


图 8 车削和滚压加工试样疲劳寿命柱状图

Fig. 8 Fatigue life histogram of turning and rolling samples

由以上分析可知,样品表面形貌及力学性能对疲劳寿命产生影响。通过表面残余应力对样品的疲劳寿

命进行计算,得出疲劳寿命在 1.6×10^6 周次左右,虽然计算结果大于基体材料的疲劳寿命 5.4×10^4 周次,但是却小于实验测量值 1×10^7 周次,理论的疲劳寿命相对保守,主要原因:(1)计算采用的残余应力是距表面 $50 \mu\text{m}$ 处的平均残余应力值,小于整个硬化层残余应力综合作用的结果;(2)残余应力只是疲劳寿命的影响因素之一,二次裂纹及晶粒细化后晶界面积增加等因素均有利于疲劳寿命的提高。

综上所述,滚压加工可以降低 A473M 不锈钢表面粗糙度,在近表面引入较高的残余压应力,减少了疲劳过程中表面的应力集中,抵消了疲劳实验过程中部分拉应力,使疲劳寿命显著提高;滚压加工导致材料表面塑性变形,产生加工硬化,近表面组织发生细化,阻碍位错滑移,表面硬度提高,从而提高材料的疲劳性能;材料的强度增加,抑制了裂纹的萌生,进而提高了材料的疲劳寿命。因此,A473M 马氏体不锈钢滚压加工后疲劳性能提升是材料表面各个性能改善的共同作用。

3 结论

(1)与车削加工相比,A473M 不锈钢滚压加工后的表面粗糙度降低,仅为 62.7 nm 。残余压应力、显微硬度、抗拉强度和疲劳寿命都有不同程度的提升,残余压应力最大为 946 MPa ,显微硬度可达 $396 \text{ HV}_{0.1}$,抗拉强度,屈服强度和伸长率分别提升了 40% , 22% 和

8%,疲劳寿命可达 1×10^7 周次。

(2) A473M 不锈钢滚压加工后疲劳寿命提高是材料综合性能改善共同作用的结果,表面粗糙度、残余压应力、显微硬度、抗拉强度均对疲劳寿命有不同程度的影响。

参考文献

- [1] 马腾跃,王鹏飞,许忠斌,等. 蒸汽发生器换热管流量分配及其对核主泵入口流场的影响[J]. 核动力工程,2018,39(4):58-62.
MA T Y, WANG P F, XU Z B, et al. Flow distribution of heat exchanger tubes in a steam generator and its effect on flow field at entrance of reactor coolant pump[J]. Nuclear Power Engineering, 2018, 39(4): 58-62.
- [2] 张丽平,蔡龙. 国内小型压水堆核电站核主泵技术[J]. 水泵技术, 2018(5):1-4.
ZHANG L P, CAI L. Nuclear main pump technology for domestic small pressurized water reactor nuclear power plant[J]. Pump Technology, 2018(5): 1-4.
- [3] 胡期翔,赵秀明,毛向阳,等. 紧固件用 MFT8 非调质钢的冷作滚压形变工艺[J]. 金属热处理,2016,41(4):137-141.
HU Q X, ZHAO X M, MAO X Y, et al. Cold rolling process on MFT8 non quenched and tempered steel surface for fasteners[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(4): 137-141.
- [4] MISHRA V D, RAO B C, MURTHY H. Enhancement of mechanical properties by cold-rolling of Al6061[J]. Materials Today Proceedings, 2018, 5(2): 8263-8270.
- [5] 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.
REN X C, CHEN L Q, LIU X G, et al. Effects of surface ultrasonic rolling processing on fatigue properties of axle steel used on high speed train[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(12): 1-5.
- [6] NAGARAJAN B, KUMAR D, FAN Z, et al. Effect of deep cold rolling on mechanical properties and microstructure of nickel-based superalloys[J]. Materials Science and Engineering, A, 2018, 728: 196-207.
- [7] 叶寒,赖刘生,李骏,等. 超声滚压强化 7075 铝合金工件表面性能的研究[J]. 表面技术,2018,47(2):8-13.
YE H, LAI L S, LI J, et al. Surface properties of 7075 aluminum alloy workpieces after ultrasonic burnishing processing[J]. Surface Technology, 2018, 47(2): 8-13.
- [8] 高玉魁. 孔挤压强化对 23Co14Ni12Cr3MoE 钢疲劳性能的影响[J]. 金属热处理,2007,32(11):34-36.
GAO Y K. Influence of cold hole expansion on fatigue property of 23Co14Ni12Cr3MoE steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32(11): 34-36.
- [9] 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 J X, JIANG S X. Residual stress field in the process of 2D ultrasonic rolling 7050 aluminum alloy[J]. Surface Technology, 2017, 46(12): 265-269.
- [10] 巴德玛,孙晓峰,邱骥,等. 基于纳米晶的低温离子渗硫层润滑油条件下摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程,2017,30(6):140-148.
BA D M, SUN X F, QIU J, et al. Tribological behavior of low temperature ion sulphurizing layer based on nanocrystalline under oil lubrication[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(6): 140-148.
- [11] NAKATA T, XU C, UEHARA Y, et al. Origin of texture weakening in a rolled ZEX4101 alloy sheet and its effect on room temperature formability and tensile property[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 782: 304-314.
- [12] 柳阳,王东坡,邓彩艳,等. Ti-6Al-4V 表面超声滚压制备 Al_2O_3 膜层的微观组织及性能研究[J]. 材料工程,2015,43(7):8-13.
LIU Y, WANG D P, DENG C Y, et al. Microstructure and properties of Al_2O_3 films on Ti-6Al-4V using ultrasonic surface rolling processing[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(7): 8-13.
- [13] KONG X, DING S, YANG H, et al. Effects of sizes and mechanical properties of fuel coupon on the rolling simulation results of monolithic fuel plate blanks[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2018, 50(8): 1330-1338.
- [14] 陈利钦,项彬,任学冲,等. 表面超声滚压处理工艺对高速列车车轴钢表面状态的影响[J]. 中国表面工程,2014,27(5):96-101.
CHEN L Q, XIANG B, REN X C, et al. Influences of surface ultrasonic rolling processing parameters on surface condition of axle steel used in high speed trains[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(5): 96-101.
- [15] EI-HADDAD M H, POOK L P, TOPPER K J. Metal fatigue [M]. London: Oxford University, 1974: 130-195.
- [16] 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. Research on surface characteristics and fatigue properties of 45# steel by ultrasonic surface rolling[J]. Surface Technology, 2017, 46(9): 185-190.
- [17] 吴上生,孙韩磊,杨琪. 基于冷滚压工艺的谐波减速器柔轮疲劳寿命分析[J]. 机械传动,2019,43(1):131-135.
WU S S, SUN H L, YANG Q. Fatigue life analysis of harmonic reducer flexspline based on cold rolling process[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(1): 131-135.
- [18] 喻钟鸣. 谐波减速器柔轮冷滚压成形关键技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2017:66-67.
YU Z M. Research on key technologies of cold rolling for flexspline of harmonic reducer[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017: 66-67.
- [19] 俞必强,李威,薛建华,等. 基于动载荷谱的齿轮弯曲疲劳寿命预测[J]. 北京科技大学学报,2013,35(6):813-817.
YU B Q, LI W, XUE J H, et al. Prediction of bending fatigue life for gears based on dynamic load spectra[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(6): 813-817.
- [20] 邵成伟,陈思联,赵晓丽,等. 一种高钒中碳非调质钢的高周疲劳性能[J]. 金属热处理,2014,39(2):19-22.
SHAO C W, CHEN S L, ZHAO X L, et al. High-cycle fatigue property of high vanadium medium-carbon microalloyed steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(2): 19-22.
- [21] 张素颖,周智敏,吴晓苏,等. 大螺距异型螺纹牙根的微滚压强化

技术[J]. 金属热处理, 2015, 40(4): 135-138.

ZHANG S Y, ZHOU Z M, WU X S, et al. Trace rolling strengthening technology of steep-pitch nonstandard thread[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 40(4): 135-138.

[22] SUN J, JIANG T, WANG Y, et al. Effect of grain refinement on high-carbon martensite transformation and its mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 726: 342-349.

[23] 郑修麟. 屈服强度与疲劳裂纹起始寿命间的关系[J]. 机械强度, 1989, 11(1): 35-39.

ZHENG X L. On the relationship between fatigue crack initiation life and yield stress of metals[J]. Mechanical Strength, 1989, 11(1): 35-39.

[24] 李言荣, 恽正中. 材料物理学概论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

LI Y R, YUN Z Z. Materials physics introduction[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.

[25] 张飞, 上官绪超. 表面超声滚压处理对 AISI304 不锈钢疲劳性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(16): 144-148.

ZHANG F, SHANGGUAN X C. Effect of surface ultrasonic rolling processing on fatigue properties of AISI304 austenite stainless steel[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(16): 144-148.

基金项目: 辽宁省重点研发计划(2018106004); 沈阳市科技局计划项目(Z18-5-012)

收稿日期: 2019-02-19; 修订日期: 2019-12-05

通讯作者: 张松(1963—), 女, 教授, 博士, 主要从事激光增材制造及材料表面工程方面的工作, 联系地址: 辽宁省沈阳市沈阳经济技术开发区沈辽西路 111 号沈阳工业大学材料学院(110870), E-mail: songzhang_sy@163.com

(本文责编: 王 晶)