

静压力对超声滚压表层特性的影响

赵运才, 张飞

(江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: **目的** 研究不同静压力对试样表面形貌、粗糙度、晶粒细化程度、随表层深度变化的显微硬度和残余应力的影响。**方法** 运用超声滚压加工技术, 采用 HEU-II 系列的超声滚压设备和卧式车床对 AISI304 不锈钢进行处理, 改变静压力, 其余参数不变。利用综合扫描电子显微镜、触针式粗糙度仪、金相显微镜、显微硬度仪和 X 射线衍射分析仪等进行检测分析。**结果** 静压力在 300~800 N 时能获得较好表面质量, 超过 800 N 后会对表面产生损伤, 出现细纹。通过 XRD 分析, 静压力越大, 晶粒细化程度越高, X 衍射峰的宽化程度也越小。试样表层硬化层深度和硬度随静压力增大而增加, 600 N 时的硬化层比 200 N 时增加 150 μm , 硬度增加 35%, 残余应力在表面表现为压应力, 随着静压力增加而增加。当静压力增大到 600 N 时, 最大残余应力由表面转移至材料内部。**结论** 静压力参数在一定的范围内会产生很好的加工效果, 超过一定的范围则会带来不良影响, 这为运用超声滚压技术加工精密工件奠定了理论基础。

关键词: 超声滚压; 表面形貌; 显微硬度; 残余应力

中图分类号: TG372 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)05-0152-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.05.025

Effect of Static Pressure on Surface Characteristics of Ultrasonic Rolling

ZHAO Yun-cai, ZHANG Fei

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of different static pressures on surface topography, roughness, grain refinement degree, micro-hardness and residual stress variation with the surface depth. With static pressure changed and other parameters unchanged, AISI304 stainless steel was treated with HEU-II series ultrasonic rolling equipment and horizontal lathe by taking advantage of ultrasonic rolling processing technology. The above-mentioned purpose was investigated with a comprehensive scanning electron microscopy, contact pin type roughness meter, metallographic microscope, micro-hardness tester and X ray diffraction analyzer. Better surface quality could be obtained at the static pressure ranging from 300 N to 800 N, but damage and microgroove were produced at the static pressure of over 800 N. According to XRD analysis, the higher the static pressure was, the higher the grain refinement degree was, the narrower the X diffraction peak was. Depth and hardness of the surface hardening layer increased with the increase of static pressure, the hardening layer at 600 N increased by 150 μm and hardness by 35% compared with that at 200 N. The surface residual stress was presented as compressive stress, and increased as the static pressure increased. When the static pressure increased to 600 N, the maximum residual stress transferred from the surface to interior of the materials. The static pressure parameters will produce excellent processing effects in a certain range and bad influ-

收稿日期: 2016-12-03; 修订日期: 2017-02-16

Received: 2016-12-03; **Revised:** 2017-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(51565017); 高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室开放基金项目(201713); 江西省自然科学基金(2012BAB206026); 江西省教育厅资助项目(GJJ14424)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51565017), High-end Bearing Tribology Technology and Application of National Local Joint Engineering Laboratory Open-end Fund Project (201713), Jiangxi Province Natural Science Foundation of China (2012BAB206026), Science & Technology Plan Project of Jiangxi Province Education Department (GJJ14424)

作者简介: 赵运才(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事表面工程、再制造工程、摩擦磨损与抗磨技术等方面的研究。

Biography: ZHAO Yun-cai (1964—), Male, Ph.D, Professor, Research focus: surface engineering, remanufacture engineering, tribology and wear resistance technology.

ence beyond a certain range, which lays theoretical basis for processing precision workpieces by taking advantage of ultrasonic rolling technology.

KEY WORDS: ultrasonic rolling; surface morphology; microhardness; residual stress

材料表层特性对提高零件使用寿命、增加可靠性等有重要作用。传统的机械表面强化技术如喷丸、超声喷丸和高能喷丸等^[1-2],在一定程度上可以强化表面特性质量,但是冲击位置随机,相邻压痕间会产生重叠,在不适当的加工参数下会降低材料表层特性^[3]。基于机械表面纳米化改性的静态挤压技术比如深滚,可以更好控制加工工艺,减少表面特性的缺陷^[4],但强化过程中形成的滚动槽会产生堆积现象。随着超声技术的发展,将超声频振动应用到表面强化工艺中,即进行超声表面强化,是现阶段表面强化技术发展的新方向^[5]。超声振动引入静态挤压形成的超声表面滚压技术,是一种新型的机械表面纳米化改性技术,在材料表面可诱发强烈的微塑性变形,从而产生残余压应力,达到加工硬化效果,显著提高了机械零件的抗疲劳性、耐腐蚀和耐磨性^[6-9],很好地弥补了上述缺点且能够获取较好的表层特性。

超声滚压引入的动态冲击力对提高材料抗疲劳特性和改善表面质量方面^[10]具有独特的优势,近年来国内外学者对超声滚压强化机理和应用展开了广泛研究。陈力钦等^[11]对车轴钢进行了超声滚压处理,发现了静压力和进给速度对表面粗糙度、残余应力和表面硬度的影响是非线性的。李瑞峰等^[12]对高强度大直径内螺纹超声滚压后,发现工件疲劳寿命比未强化工件疲劳寿命提高到 5 倍以上。王东坡^[13]对 45 钢采用超声滚压处理后,发现样本表层晶粒得到细化,平均晶粒尺寸为 50 nm,并出现纳米晶粒和非晶粒的嵌套结构。这些研究表明超声滚压处理对材料表层特性有重要影响,但是目前关于超声滚压处理工艺对表层特性影响的研究不系统,在一定程度上限制了超声滚压的应用。此外,静压力作为超声滚压中最重要的工艺参数^[14],很大程度上决定了加工效果,但其对表层特性的影响研究也较少。

因此,本文利用超声滚压技术对 AISI304 不锈钢进行处理,采用不同静压力作为主要对比参数,通过对试样表面形貌、粗糙度、残余应力和加工硬化效果等研究分析,以期了解静压力对加工效果的影响,为实际应用生产提供依据。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验材料为工业常见的 AISI304 奥氏体不锈钢,化学成分(质量分数)为: C 0.06%, Mn 1.54%, Cr 18.47%, Mo 0.30%, Ni 8.3%, Cu \leq 0.37%, Si 0.48%,

Nb 0.027%, Fe 其余。常温下的材料性能为: $\sigma_b \geq 520$ MPa, $\sigma_s \geq 205$ MPa, $\delta_5 \geq 40\%$, $\psi \geq 50\%$, 表面粗糙度为 $2.3 \mu\text{m}$ 。

1.2 试验方法

所有试样车削加工成直径 20 mm、高 60 mm 的圆柱体。试样设备采用 HEU-II 系列的超声滚压设备和卧式车床,滚压头选择直径为 5 mm 的硬质合金球。超声滚压处理时,保持加工参数如加工次数、机床主轴转速、进给率、超声振动频率和输出振幅不变,分别为 3 次、246 r/min、20 mm/min、20 kHz 和 $8 \mu\text{m}$,改变静压力为 200、300、400、600、800、1000 N。试样经超声滚压后,线切割成 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 方块。为获取残余应力随深度的变化,采用电解抛光逐层去除。为观察金相组织,依次用 300[#]、800[#]、1500[#]、2500[#]的砂纸打磨,并用金相抛光机将试样表层抛光至光亮的镜面,随后用 4%硝酸酒精溶液腐蚀。

1.3 表征与分析

用 Empyrean 型 X 衍射仪测量表面残余应力, Cu 靶辐射,管电压 40 kV,管电流 250 mA,采用侧倾固定 ψ 法。用 TR-200 触针式表面粗糙度仪对表面粗糙度进行测量,用 MLA650F 型扫描电子显微镜观察表面形貌,在 Neophot-21 型金相显微镜下观察试样表面微观组织,用 CHV-1000A 显微硬度仪测量试样表层显微硬度随深度的变化,试验载荷为 50 g,作用时间为 15 s。

2 结果与讨论

2.1 静压力对表面形貌和粗糙度的影响。

图 1 为不同静压力下的超声滚压试样表面形貌。其中,图 1a 为未经超声滚压加工的试样表面,表面车削刀痕清晰,缺陷较多。图 1b 为静压力 100 N 时的超声滚压试样表面形貌,从图中可以看出,虽然车削留下的痕迹经过一次滚压过后,有一定程度上的减弱,但在较低静压力下,车削留下的刀痕并不会完全随着挤压滚动完全消除,还留有一定的缺陷,但明显比未加工试样的表面质量好。图 1c 和图 1d 分别是静压力为 300 N 和 600 N 时的加工表面形貌,相比前两图可以明显看到,车削刀痕已经明显被挤压平整,获得了光滑的表面质量。超声滚压过程中,滚球在静压力下和工件紧密接触,并且挤压工件。同时,超声波带来的超频振动为滚球提供动态冲击力,在静压力和

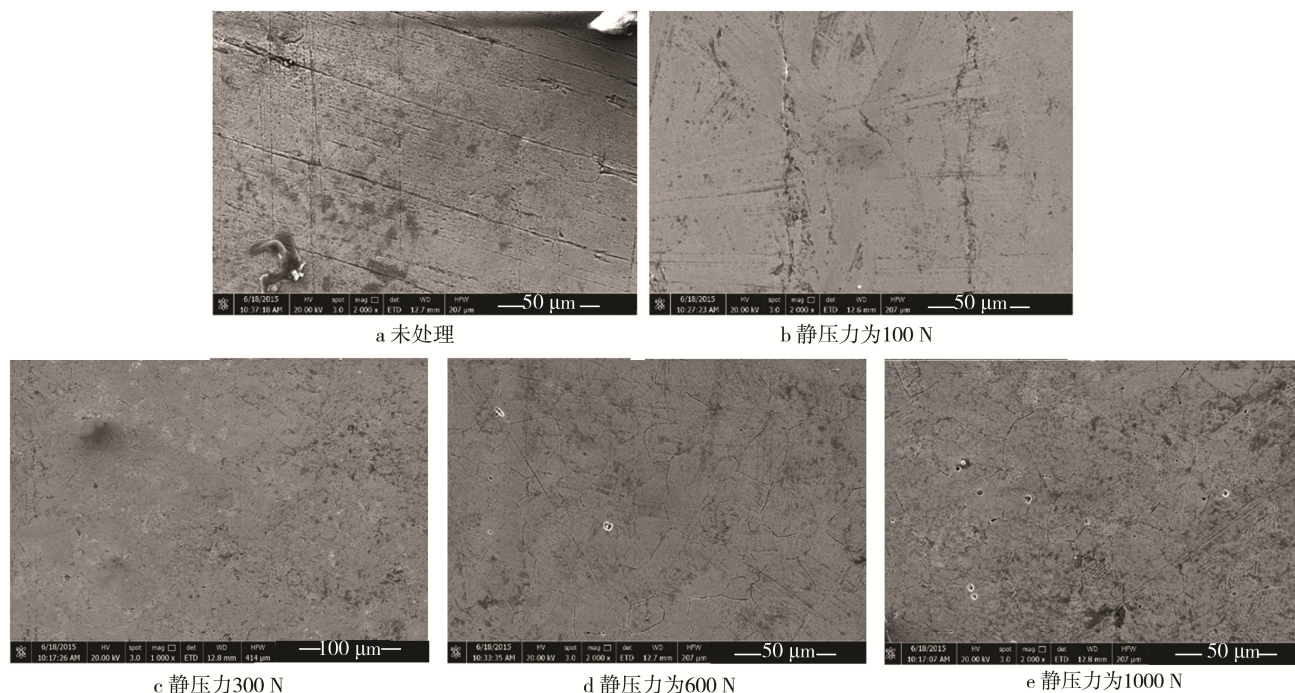


图1 不同静压力下超声滚压试样表面形貌

Fig.1 Surface morphology of ultrasonic rolling specimen with different static pressure: a) untreated, b) Static pressure is 100 N, c) Static pressure is 300 N, d) Static pressure is 600 N, e) Static pressure is 1000 N

冲击力的联合作用下,表层金属发生微塑性变形,出现波峰填波谷的现象,逐渐达到光滑镜面效果。图1e是静压力为1000 N时的试样表面形貌,由图可以看出,其表面比未施加静压力的样品表面光滑,但是和静压力分别为300、600 N时的样品表面相比,其表面有裂口及裂纹的产生,说明过大的静压力会对表面产生损伤,出现细纹缺陷。

图2为不同静压力下超声滚压试样表面粗糙度的变化。由图可知,静压力对表面粗糙度有重要的影响,而且对粗糙度的影响是非线性的,过小和过大的静压力都不能获取较好的表面质量。静压力过小时,适当增加静压力能明显降低表面粗糙度;当静压力过大时,材料表面出现不均匀的塑性变形,产生细纹(如图1d)。这是因为超声滚压的动态冲击,不仅能冲击

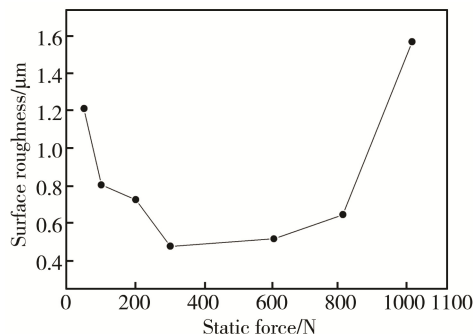


图2 不同静压力下超声滚压试样表面粗糙度

Fig.2 Surface roughness of ultrasonic rolling specimen with different static pressure

表面产生加工硬化效果和压缩残余应力,而且具有一定的减摩作用。振幅一定的情况下,当静压力过大时,减摩作用减弱,静压力就会对材料表面造成损伤。此外,过大静压力加重了超声滚压系统负载,使挤压过程极不平稳,从而影响加工表面质量。

2.2 静压力对表层微观组织的影响

在超声滚压过程中,静态挤压和动态的冲击力耦合作用于材料表面,在材料表层一定厚度范围内形成一个应力场,而应力场内的小体积单元将发生相应的塑性变形。当连续的耦合载荷力作用于材料表面不同位置时,形成的新应力场内的小体积单元又沿其他方向发生塑性变形,通过这种反复特殊塑性变形方式,晶粒被细碎化,甚至达到纳米量级^[15]。由图3可知,未经过静压力加工的材料表面晶粒组织较为宽大,当施加静压力200 N时,晶粒组织有明显的细化,而静压力为400、600 N时,晶粒细化程度差异并不明显。

这是由于超声滚压导致了加工硬化,形变程度并不会随着静压力增加而出现较大差异。但是,静压力为600 N时的晶粒细化程度比静压力为200 N时明显提高,当静压力达到800 N时,晶粒细化程度进一步加大。这是因为在不同的静压力下,材料表层发生的塑性变形量不同,静压力增大时,材料塑性变形量随之增加,导致位错密度增加,为降低系统能量,高密度位错将在位错缠结和位错墙附近发生湮灭和重排,从而形成新的亚晶界。随着静压力再次增加到1000 N

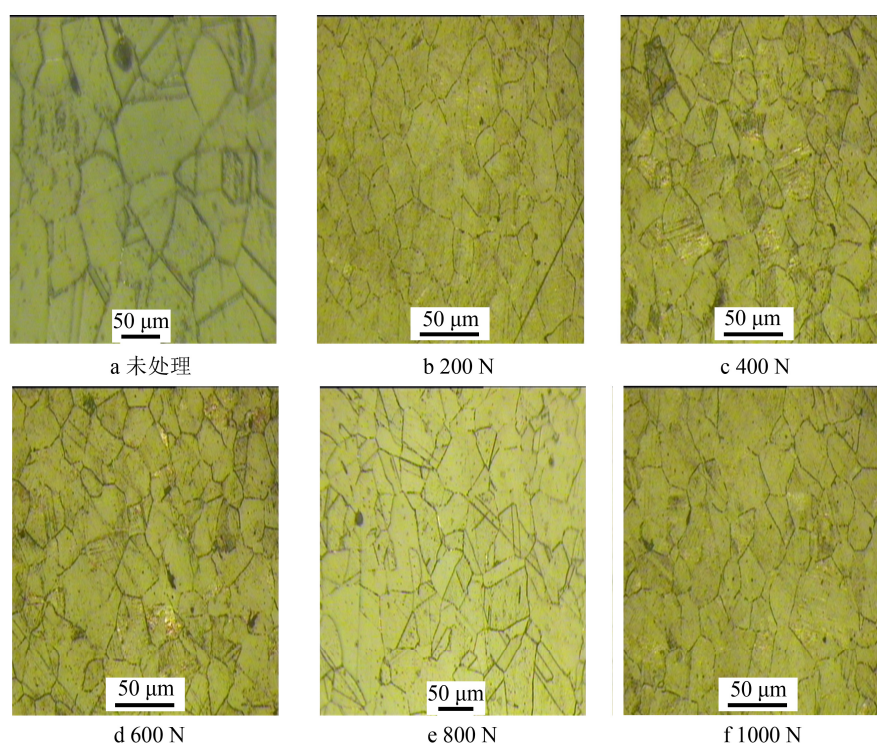


图 3 不同静压力下超声滚压试样金相组织

Fig.3 Surface microstructure of ultrasonic rolling specimen with different static pressure: a) untreated, b) Static pressure is 100 N, c) Static pressure is 300 N, d) Static pressure is 600 N, e) Static pressure is 1000 N

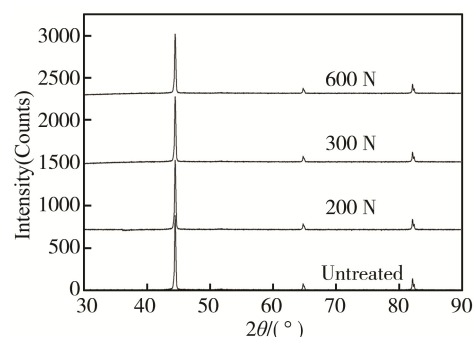
时 (图 3f), 后续塑性形变量也在增加, 位错在亚晶界附近不断产生和湮灭, 可能出现部分晶粒缠结, 使得晶界取向增大, 晶粒取向趋于随机分布, 由于部分缠结变宽大的晶粒与相邻细化的晶粒位向差大于 10° , 从而产生大角晶界现象。此外, 从图 3 对比可知, 晶粒细化后晶界取向是不同的, 不会出现相同类型的晶界。

RYBIN 提出材料经过大塑性变形后, 形变产生的最大晶界取向差 θ_{\max} 由公式 (1) 计算得出:

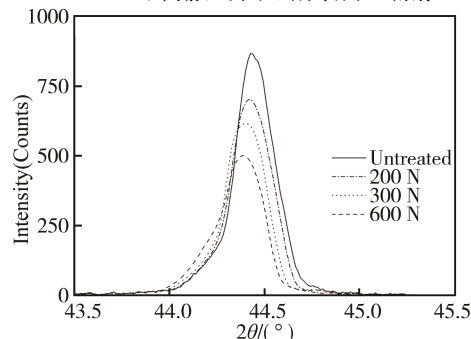
$$\theta_{\max} = \alpha(\varepsilon - \varepsilon_0) \quad (1)$$

式中, α 为相应试验测定的常数, ε 表示材料塑性变形量, ε_0 表示塑性变形导致亚晶界基本应变量。由公式可知, 形变诱导的晶界取向差值随着形变量增加而增加, 而图 3 试样中的大角晶界正是由于材料发生强烈塑性变形导致的。

图 4 是试样未经超声滚压处理和经不同静压力下超声滚压处理的 XRD 对比图谱。图 4a 中三个衍射峰分别为 AISI304 钢的(110)、(200)和(211)晶面。由图 4b 可以看出, 与未经超声滚压处理的试样相比, 静压力越大, 衍射峰的宽化现象就越不明显。原因主要有两方面: 一是经超声滚压的晶粒尺寸较小, 而且静压力越大, 晶粒细化程度越高; 二是存在微观应变较大的耦合作用。



a 不同静压力下试样表面 X 衍射



b 第一峰值放大宽化

图 4 不同静压力下试样表面 X 射线衍射图谱

Fig.4 XRD patterns of samples with different static pressure: a) X diffraction patterns of the surface under different static pressure, b) The first peak amplification

为更加客观地观察静压力对晶粒细化的影响程度,采用XRD方法对不同试样表层的晶粒尺寸进行计算。虽然该方法计算晶粒尺寸没有TEM准确,但用作分析对比时,更简单、经济。根据Bragg定律,当晶面间距发生变化,就会出现Bragg衍射峰的宽化现象^[16]。相关实验已经证明,引起X衍射Bragg衍射峰宽化线型的晶粒细化宽化峰和微观应变宽化峰分别符合Lorentz函数和Gauss函数^[17],而仪器本身宽化峰符合Gauss函数,实验中用经500℃下退火24h的SiO₂标准样品标定仪器宽化。根据Scherrer和Wilsoh公式^[18],除去仪器本身宽化效应,平均晶粒尺寸可以从物理宽化峰的积分宽度 β 求出,计算公式如式(2)所示:

$$\frac{\beta_{hkl}^2}{\tan^2 \theta_{hkl}} = \frac{\lambda \beta_{hkl}}{d_{hkl} \tan \theta_{hkl} \sin \theta_{hkl}} + 4(\varepsilon_{hkl}^2)^{1/2} \quad (2)$$

式中, θ_{hkl} 表示衍射角, λ 为 Cu_{hkl} 波长, d_{hkl} 和 $(\varepsilon_{hkl}^2)^{1/2}$ 表示沿晶面(hkl)垂直方向上的晶粒尺寸及平均原子微观畸变量。

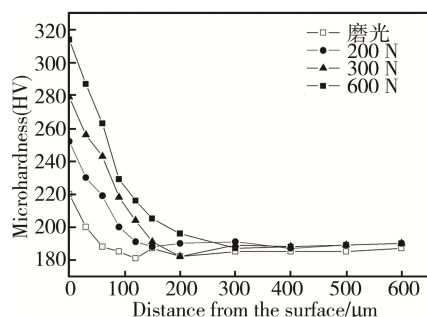
公式(2)计算结果显示:在静压力200、300、600 N下超声滚压处理,试样显微晶粒尺寸随表层深度的增加而增大,达到一定的深度趋于一致。但出现晶粒细化的表层深度不同,分别为150、400、300 μm 。此外,晶粒平均尺寸在同样表层深度下大小不同,在距表层100 μm 处,晶粒大小分别为50、15、35 μm ;距表层深度150 μm 处,晶粒大小分别为450、120、320 μm 。说明试样经不同静压力下超声滚压处理,晶粒会被细化,但沿试样表层一定的深度方向上细化程度明显不同。

2.3 静压力对随表层深度力学性能的影响

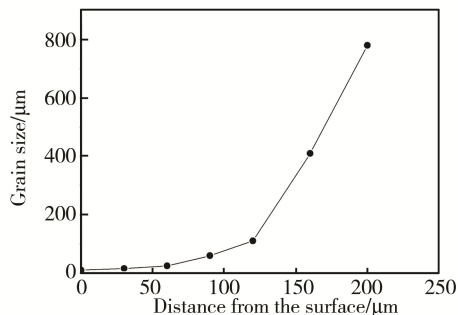
试样经超声滚压后,其塑性变形量随深度变化而变化,这必然导致其沿表层深度力学性能的变化。从图5a可以看出,随静压力的增加,试样的表面硬度整体呈增大趋势,而随表层深度的增加,表面硬度呈现逐渐递减趋势,在距离表层100 μm 左右时,显微硬度开始有明显降低,而且,随着表层深度的进一步增加,显微硬度逐渐趋于一个稳定值。

图5a显示:静压力为600 N的超声滚压试样表面,硬化层厚度为300 μm ,表层硬度比基体提高了80%;静压力为300 N的试样表面,硬化层约为300 μm ,表层硬度比基体提高了约56%;静压力为200 N的试样表面,硬化层为150 μm ,表面硬度比基体提高了45%;磨光试样,硬化层约为50 μm ,表面硬度比基体仅提高了22%。可见,表面硬化层随着静压力的减小而减小,超声滚压过后的表面硬化层远远好于磨光后的。分析认为,经过超声滚压的试样,表面硬度提高主要是由于加工硬化和晶粒细化两个因素,而晶粒细化程度与塑性变形量正相关,在试样表层深度

方向,晶粒细化程度必然呈现梯度分布。由TEM测试的静压力为600 N时晶粒尺寸随深度变化如图5b所示,由图可知,晶粒尺寸随表层深度的变化趋势和硬度的变化趋势是相对应的,晶粒尺寸随深度方向逐渐增加,而显微硬度则逐渐减小。



a 不同静压力下显微硬度随试样表层深度的变化



b 静压力为600 N时晶粒尺寸随试样表层深度的变化

图5 显微硬度和晶粒尺寸随试样表层深度变化

Fig.5 The microhardness and the grain size change with the sample thickness: a) microhardness along the depth of specimens with different static pressure, b) grain size along the depth of specimens with 600 N

将图5a中600 N静压力数据和图5b中晶粒尺寸数据相对应,绘制出晶粒尺寸($d^{-1/2}$)和显微硬度的对应关系图,如图6所示。由图可知,晶粒细化对于强化材料表层质量有重要的作用。

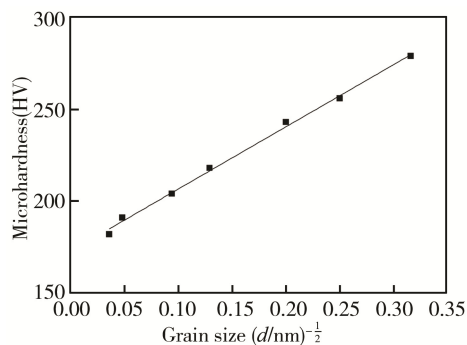


图6 静压力为600 N时试样显微硬度和晶粒尺寸关系
Fig.6 Relationship between microstructure hardness and grain size of samples with static pressure of 600 N

2.4 静压力对残余应力的影响

残余应力的存在对材料的力学性能有重大影响^[19],电解抛光逐层去除表层材料时,部分残余应力得以释

放, 将导致材料内部应力重新分布, 根据相关文献本实验采用校正公式^[20]为:

$$\sigma_z = \sigma'_z + \left[1/(\delta - z) \right] \int_0^z \sigma'(\xi) d\xi - \left[\frac{\sigma}{(\delta - z)^2} \right] \int_0^z \left[\frac{\delta - \xi}{2} \right] \sigma'(\xi) d\xi$$

式中, σ'_z 为剥除层到试样厚度 z 处用 X-衍射法测的残余应力值, σ_z 为校正后残余应力沿试样厚度方向的分布, δ 为试样总厚度, ξ 为积分变量, 校正后的残余应力随厚度方向的分布规律如图 7 所示。

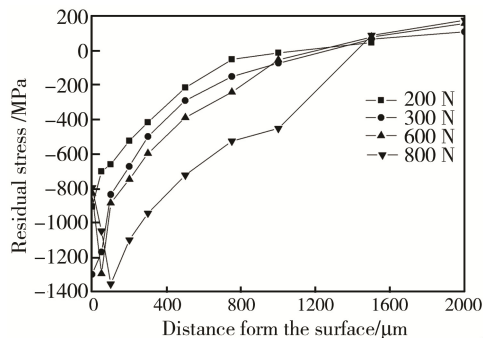


图 7 不同静压力下残余应力随表层深度变化

Fig.7 Variation of residual stress with different surface depth under different static pressure

从上图可以看出, 在较小静压力下, 最大残余应力出现在材料表层, 随着深度增加, 残余应力快速下降, 距表层 600 μm 后降低趋势减弱, 且残余应力逐渐转变为压应力, 和表层残余应力相平衡。当静压力达到 600 N 时, 最大残余应力出现在距离表层深度为 50 μm 处, 之后随着深度增加, 残余应力逐渐减小, 最终转变为拉应力。当静压力为 800 N 时, 最大残余应力值出现在距离表层深度为 100 μm 处。静压力越大, 最大残余应力值和其出现的深度越大, 而且后续的拉应力升幅也变快, 符合压应力和拉应力相互平衡的自然规律。

3 结论

1) 超声滚压过程中, 静压力与材料表面粗糙度的改善不是线性关系, 在一定范围内增大静压力能明显降低材料表面的粗糙度, 但过大的静压力反而会使材料表面出现细纹, 造成损伤。

2) 静压力对晶粒细化程度有重要影响, 随着静压力增大, 表面晶粒细化程度越高。通过 XRD 分析, 静压力增大时, X 衍射峰的宽化程度变小。

3) 超声滚压后材料表层硬度和残余应力明显提高, 在近表层 100 μm 范围内, 显微硬度明显提高很多, 静压力越大, 硬化层越深, 最大残余应力出现的距表层深度也越大, 静压力为 800 N 时, 最大残余应力出现的距表层深度达到 100 μm 。晶粒细化程度对硬度有重要作用, 两者随表层深度增加的变化趋势是相对应的。

参考文献:

- [1] BAGHERIFARD S, FERNANDEZ L, PARIENTE R G, et al. Fatigue Properties of Nanocrystallized Surfaces Obtained by High Energy Shot Peening[J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1): 1683—1690.
- [2] XING Y M, LU J. An Experimental Study of Residual Stress Induced by Ultrasonic Shot Peening[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 152(1): 56—61.
- [3] DAI K, SHAW L. Comparison between Shot Peening and Surface Nanocrystallization and Hardening Processes[J]. Materials Science and Engineering, 2007, 463(1—2): 46—53.
- [4] JUIJERM P, ALTENBERGER I. Fatigue Performance of High-temperature Deep-rolled Metallic Materials[J]. Journal of Metals, 2007, 17(2): 37—41.
- [5] 郑建新, 罗傲梅, 刘传绍. 超声表面强化技术的研究进展[J]. 特种加工技术, 2012, 10(10): 32—36.
ZHENG Jian-xin, LUO Ao-mei, LIU Chuan-shao. Development of Ultrasonic Surface Enhancement Technique[J]. Special Machining Technology, 2012, 10(10): 32—36.
- [6] WANG Ting, WANG Dong-po, LIU Gang, et al. Investigations on the Nanocrystallization of 40Cr Using Ultrasonic Surface Rolling Processing[J]. Applied Surface Science, 2008, 255: 1824—1829.
- [7] DAI K, SHAW L. Analysis of Fatigue Resistance Improvements Via Surface Severe Plastic Deformation[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(8): 1398—1408.
- [8] BAIUSAMY T, SATENDRA K, NARAYANAN T S N S. Effect of Surface Nanocrystallization on the Corrosion Behavior of AISI409 Stainless Steel[J]. Corrosion Science, 2010, 52(11): 3826—3834.
- [9] GOU Bin-li, JIE Chen-de, LIN Guan. Friction and Wear Behaviours of Nanocrystalline Surface Layer of Medium Carbon Steel[J]. Tribology International, 2010, 43(11): 2216—2221.
- [10] BRAIN V, CAROLINE R B, ADOLOFO B M, et al. Fatigue Behavior of Welded Coverplates Treated with Ultrasonic Impact Treatment and Bolting[J]. Engineering Structures, 2012, 34: 163—172.
- [11] 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): 1—7.
CHEN Lin-qin, XIANG Bin, REN Xue-chong, et al. Influences of Surface Ultrasonic Rolling Processing Parameters on Surface Condition of Axle Steel Sued on High Speed Train[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(5): 1—7.

- [12] 李瑞峰, 张德远, 程明龙. 高强钢大直径内螺纹超声滚压强化技术[J]. 中国表面工程, 2014, 27(2): 63—68.
LI Rui-feng, ZHANG De-yuan, CHENG Ming-long. High-strength Steel Large-diameter Internal Thread Strengthening by Ultrasonic Burnishing Technology[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(2): 63—68.
- [13] 王东坡, 宋宁霞, 王婷, 等. 纳米化处理超声金属表面[J]. 天津大学学报, 2007, 40(2): 228—233.
WANG Dong-po, SONG Ning-xia, WANG Ting, et al. Metal Surface Nanocrystallization by Ultrasonic Processing[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(2): 228—233.
- [14] 王义. 超声振动挤压强化工艺中的最佳挤压力问题[J]. 大连理工大学学报, 1997, 37(4): 450—453.
WANG Yi. Investigation on Problems of Optimum Extrusion Force in Ultrasonic Rolled-extrusion Technique[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1997, 37(4): 450—453.
- [15] LIU G, LU J, LU K. Surface Nanocrystallization of 316L Stainless Steel Induced by Ultrasonic Shot Peening[J]. Material Science and Engineering, 2000, 286: 91—95.
- [16] YAN Li, SONG Bo-wei, XIANG Qian-cheng, et al. Corrosion Behavior and Surface Characterization of Tantalum Implanted TiNi Alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(13): 3017—3022.
- [17] UNGAR T, LANGFORD I, CERNIK R J, et al. Microbeam X-ray Diffraction Studies of Structural Properties of Polycrystalline Metals by Means of Synchrotron Radiation[J]. Materials Science and Engineering, 1998, 247 (1—2): 81—87.
- [18] PATTERSON A L. X-ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials[M]. New York: Wiley, 1974.
- [19] 虞付进, 赵燕伟, 张克华. 超声检测表面残余应力的研究与发展[J]. 表面技术, 2007, 36(4): 72—75.
YU Fu-jin, ZHAO Yan-wei, ZHANG Ke-hua. Research and Development of Surface Residual Stress Testing Based on Ultrasonic[J]. Surface Technology, 2007, 36(4): 72—75.
- [20] 王婷. 超声表面滚压加工改善 40Cr 钢综合性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
WANG Ting. Improvement of Comprehensive Properties of 40Cr Steel by Ultrasonic Surface Rolling[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.