

超声滚压强化 7075 铝合金工件表面性能的研究

叶寒, 赖刘生, 李骏, 刘森忠, 熊晖

(南昌大学 机电工程学院, 南昌 330031)

摘要: **目的** 探究超声滚压强化技术对 7075 铝合金工件表面性能的影响。**方法** 对 7075 铝合金棒状试样精车加工后进行了超声滚压强化处理。综合使用粗糙度测量仪、表面显微硬度仪、金相显微镜以及 X 射线衍射应力分析仪, 研究了处理前后工艺参数中的压下量对试样的表面粗糙度、表面显微硬度、表面微观组织及表面残余应力等表面性能的影响。**结果** 超声滚压强化处理后, 试样表面粗糙度由 $0.976\ \mu\text{m}$ 降低至 $0.047\ \mu\text{m}$, 表面显微硬度由 $105.6\text{HV}_{0.2}$ 提高至 $119\text{HV}_{0.2}$, 显微硬度提高了 15%。精车加工后, 精车试样的表层组织与心部组织几乎无变化。超声滚压强化后, 相对心部组织而言, 表层晶粒组织得到显著细化, 表层均为残余压应力, 压应力深度为 1.75 mm。残余压应力最大值位于最表层, 最大为 $-174.0\ \text{MPa}$, 且距离最表层越远, 残余压应力总体呈减小趋势。**结论** 通过对比研究精车试样与超声滚压试样, 发现超声滚压强化工艺可以大大地降低试样表面粗糙度, 显著地细化表层试样晶粒与提高表面硬度, 改善残余应力的分布, 并引入一定深度的残余压应力。

关键词: 超声滚压强化; 7075 铝合金; 压下量; 表面粗糙度; 显微硬度; 残余压应力

中图分类号: TG6678 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)02-0008-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.02.002

Surface Properties of 7075 Aluminum Alloy Workpieces after Ultrasonic Burnishing Processing

YE Han, LAI Liu-sheng, LI Jun, LIU Sen-zhong, XIONG Hui

(School of Mechatronic Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

ABSTRACT: The work aims to explore effects of ultrasonic burnishing (UB) technology on surface properties of 7075 aluminum alloy workpieces. Finish turning and ultrasonic burnishing were applied to rotating bar specimens made from 7075 aluminum alloy successively. Effects of rolling reduction among process parameters on surface properties of the specimens including surface roughness, surface microhardness, surface microstructure and surface residual stress were investigated with roughness tester, microhardness tester, metalloscope and X-ray diffraction stress analyzer before and after the finish turning and UB. After finish turning, surface roughness of the specimens decreased from $0.976\ \mu\text{m}$ to $0.047\ \mu\text{m}$, surface microhardness of the specimens increased from $105.6\text{HV}_{0.2}$ to $119\text{HV}_{0.2}$ (increased by 15%). After UB, surface grain of the specimens was approximate the same as that of the central grain. The surface grain of the UB specimens was considerably refined compared to the central grain after UB. Residual compressive stress was all induced on the surface layer, the maximum value appeared on the surface and the residual compressive stress layer was 1.75 mm deep. The residual compressive stress on the top surface was up to $-174.0\ \text{MPa}$,

收稿日期: 2017-07-03; 修订日期: 2017-09-20

Received: 2017-07-03; Revised: 2017-09-20

基金项目: 江西省科技落地计划项目 (KJLD13005)

Fund: Supported by the Education Department of Jiangxi Province (KJLD13005)

作者简介: 叶寒 (1976—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为先进制造技术。

Biography: YE Han (1976—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: advanced manufacturing technology.

but it tended to decrease as a whole as distance from the top surface increased. By comparing the specimens receiving finish turning and UB, it can be concluded that UB can remarkably reduce surface roughness of the specimens, dramatically refine surface grain, noticeably improve surface microhardness, improve distribution of residual stress and introduce certain depth of residual compressive stress.

KEY WORDS: ultrasonic burnishing; 7075 aluminum alloy; rolling reduction; surface roughness; microhardness; residual comprehensive stress

现代工业中, 铝合金因具有密度低、抗疲劳性能较高、耐腐蚀性能好、易于成形、无低温脆性、比刚度和比强度较高等优点, 在航空航天、汽车、造船等领域得到广泛应用^[1-4]。在航天设备、车辆、船舶等结构中, 铝合金结构的服役环境恶劣, 往往会产生大量的腐蚀损伤^[5], 在较低的应力水平下会发生疲劳断裂, 给设备的安全性带来了隐患。提高铝合金的表面性能, 改善表面残余应力的分布, 提高铝合金的耐腐蚀性、耐磨性、抗疲劳性等具有重大意义。

超声表面滚压加工是工具头沿垂直于工件表面的方向施加高频冲击, 使工件表面产生弹塑性变形。在工具头高频冲击下, 工件表面上的“谷”被“峰”填满, 进而大大降低工件表面粗糙度。目前采用喷丸、改善约束层材料等传统技术可以强化表面, 提高疲劳寿命^[5-7], 但超声滚压强化质量和效率优于传统的表面强化技术^[8]。超声表面滚压加工作为国内新兴的表面自纳米化技术, 在细化晶粒和提高材料表面硬度的同时^[9-10], 能够极大地消除材料表面的残余拉应力, 并引入残余压应力^[11], 在 45[#]、40Cr、车轴钢 EA4T、高强钢内螺纹等零件上该工艺已经得到验证^[12-18], 但对于 7075 铝合金的研究较少。本文拟采用对 7075 铝合金进行表面超声滚压强化, 研究工艺对表面粗糙度、表面显微硬度、表面残余应力及表面微观组织等表面质量的影响。

1 超声滚压实验

1.1 实验装置

实验采用 HK30C 毫克能金属表面加工控制设备, 其示意图如图 1 所示。该装置由控制器和执行器组成, 其中控制器主要由超声波发生器组成, 执行器主要由换能器、变幅杆、工具头三部分组成^[9]。超声波发生器把 220 V/50 Hz 的交流电变换为电压可连续调节的直流电, 通过控制板变换为高频交流电, 经高频电感滤波后传送到刀具头, 使刀具头的输出频率为 30 kHz^[19], 最终转换为每秒对工件表面数万次的冲击。执行器直接连接控制器, 并且执行器还内置能量转换器和润滑传导介质。工具头设计为硬质合金材质的可滚动柱型球体, 直接与工件表面接触, 加工过程

中相对工件滚动, 从而降低工作过程中的摩擦力, 提高工具头的使用寿命^[9]。

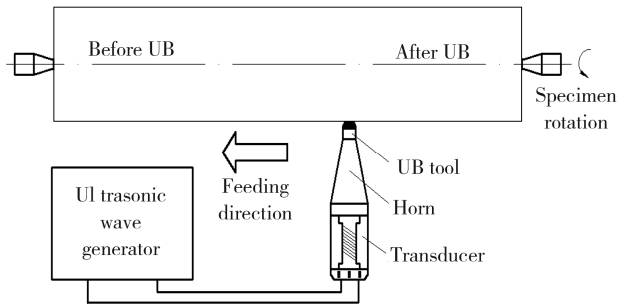


图 1 超声滚压强化装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic burnishing device

1.2 试验工艺参数

工具头半径 $R=7.5\text{ mm}$, 车床主轴转速为 200 r/min, 进给速度为 0.24 mm/r, 输出频率为 30 kHz, 振幅为 9 μm 。静压力由安装挤压头的支架变形产生, 便于生产时调节静压力, 压下量分别选取 0.08、0.12、0.15 mm, 对应于轴上三段不同位置。

1.3 实验材料及尺寸

实验材料为直径 40 mm 的调质态 7075 铝合金棒料, 其化学成分见表 1。

表 1 7075 铝合金化学成分
Tab.1 Chemical composition of 7075 aluminum alloy

wt%					
Element	Cu	Mg	Cr	Zn	Al
Content	1.6	2.5	0.23	5.6	Bal.

2 结果与分析

2.1 表面粗糙度对比分析

采用三丰 SJ210 型表面粗糙度测量仪, 对仪器取标准样块标定合格后, 对精车表面与超声滚压后的铝合金表面进行粗糙度测量。对已加工试样表面测量 3 次, 然后对测量数值取平均值, 结果如表 2 所示。将表 2 结果绘成曲线, 如图 2 所示, 其中横坐标滚压量“0”代表精车。从图 2 可以得出, 精车的表面粗糙度

表 2 精车与超声滚压强化表面粗糙度对比
Tab.2 Surface roughness of specimens receiving finish turning and UB

Time	The finished turning	The UB reduction 0.08 mm	The UB reduction 0.12 mm	The UB reduction 0.15 mm
1	0.982	0.061	0.044	0.043
2	0.933	0.045	0.046	0.048
3	1.012	0.053	0.060	0.049
Average	0.976	0.053	0.050	0.047

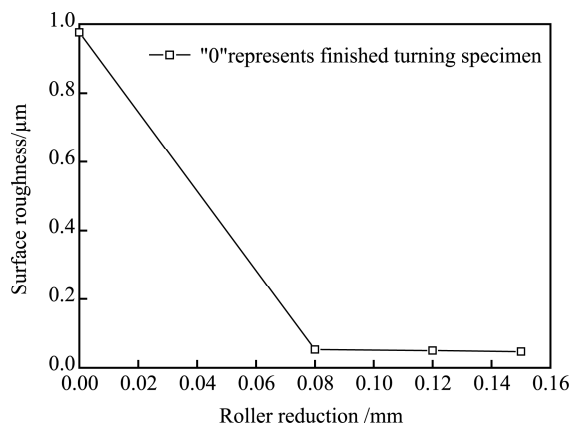
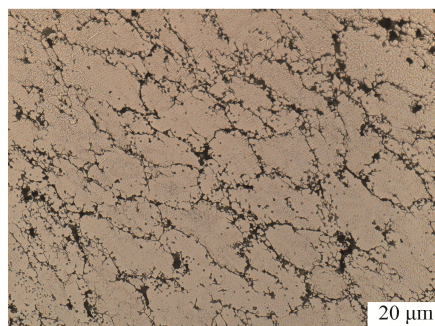


图 2 精车与超声滚压强化的表面粗糙度
Fig.2 Surface roughness of specimens receiving finish turning and UB

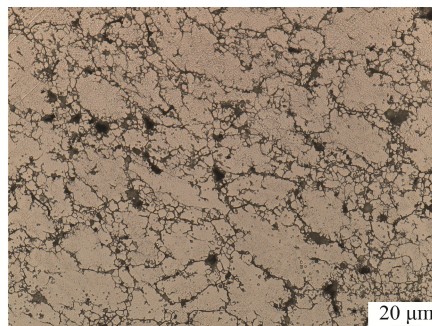
$Ra=0.976 \mu\text{m}$, 而超声滚压最大表面粗糙度 $Ra=0.053 \mu\text{m}$, 超声滚压最小表面粗糙度 $Ra=0.047 \mu\text{m} \leq 0.05 \mu\text{m}$, 达到近镜面。

2.2 表面金相实验对比分析

实验利用德国蔡司显微镜观察工件表面的金相组织结构,将相同工艺参数下压下量分别为 0.08、0.12 mm 的超声滚压试样和精车试样镶嵌完后,将镶嵌试样经砂纸打磨,抛光成镜面效果。选用 Keller 试剂滴蚀,约 15 s 后,用水清洗被腐蚀表面,最后干燥处理。观测试样表层与心部横断面表面形貌,精车试样金相图如图 3,超声滚压强化试样金相图如图 4 所示,均放大 500 倍。



a 精车试样表层组织



b 精车试样心部组织

图 3 精车试样表层与心部组织对比

Fig.3 Surface and central grain of specimens receiving finish turning: (a) surface grain of specimens receiving finish turning, (b) central grain of specimens receiving finish turning

从图 3 和图 4 可以得出,精车试样的表层组织与心部组织几乎无变化;超声滚压强化试样心部组织相对精车试样的心部组织无明显变化,但其表层组织晶粒得到显著细化。超声滚压强化试样在工具头高频冲击下,表层组织晶粒通过位错和滑移的作用产生塑性变形。随着塑性变形量的增加,晶粒的破碎程度逐步加大,位错缠结越来越严重,位错能密度加大,最终晶粒呈纤维化拉长,伴随流线形组织的出现。与此同时,晶粒之间随机分布,原本清晰的晶界被打破,晶界之间模糊不清,晶粒呈流线形分布。

2.3 表面显微硬度对比分析

选用莱州华银试验仪器有限公司 HV-1000A 型维氏显微硬度计,对精车表面与超声滚压后的铝合金表面进行显微硬度测量,对已加工试样表面测量 3 次,然后对测量数值取平均值,结果如表 3 所示。

将表 3 结果绘成曲线,如图 5 所示,其中横坐标的超声滚压量“0”代表精车试样。从图 5 可以得出,精车加工的硬度为 $105.6\text{HV}_{0.2}$,而压下量为 0.12 mm 的硬度为 $119\text{HV}_{0.2}$ 。对比精车加工,超声滚压加工的显微硬度提高了约 15%。超声滚压过程中,表层组织晶粒产生塑性变形,随着塑性形变量的累积,位错能密度增加,导致一定程度的加工硬化,加上表层晶粒的细化作用,最终改善表面硬度。但是过大的压下量反而使工件表面的加工硬化效果不显著,硬度几乎无变化。

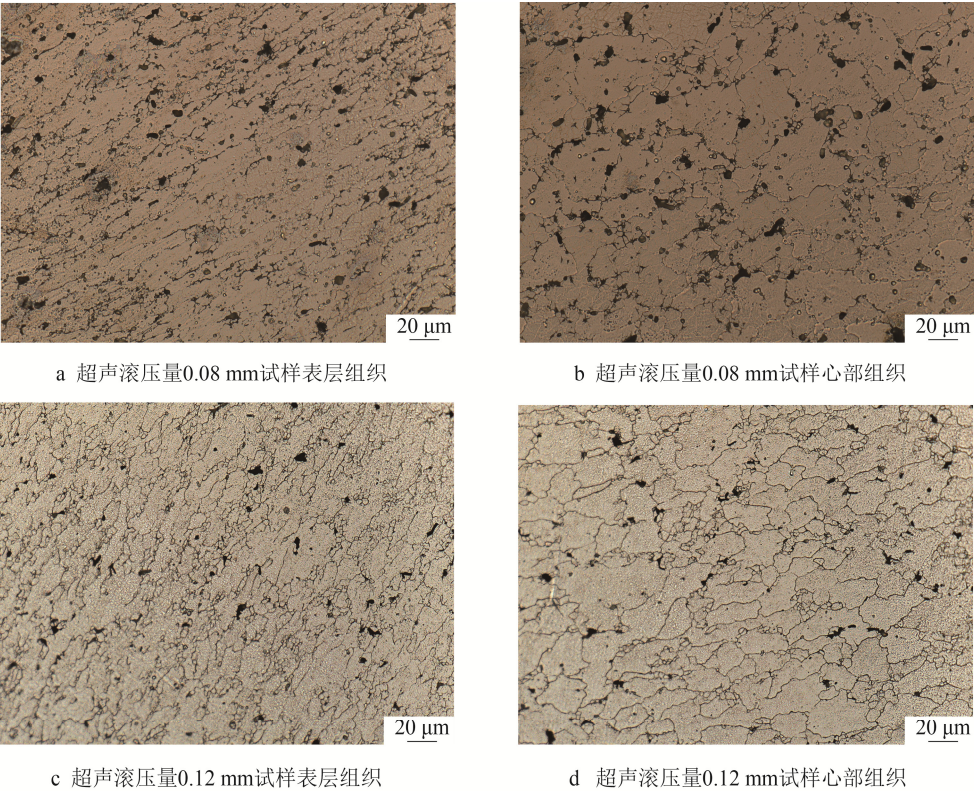


图 4 超声滚压强化不同压下量的试样表层与心部组织对比

Fig.4 Surface and internal grain of specimens receiving UB with different roller reductions: (a) surface grain of UB reduction 0.08 mm, (b) internal grain of UB reduction 0.08 mm, (c) surface grain of UB reduction 0.12 mm, (d) internal grain of UB reduction 0.12 mm

表 3 精车与超声滚压强化表面显微硬度（HV_{0.2}）对比分析

Tab.3 Surface microhardness of specimens receiving finish turning and UB

Time	The finished turning	The UB reduction 0.08 mm	The UB reduction 0.12 mm	The UB reduction 0.15 mm
1	106.7	119	115	104.2
2	106.2	112.7	120.7	105.3
3	104	121.1	121.3	106.7
Average	105.6	117.6	119	105.4

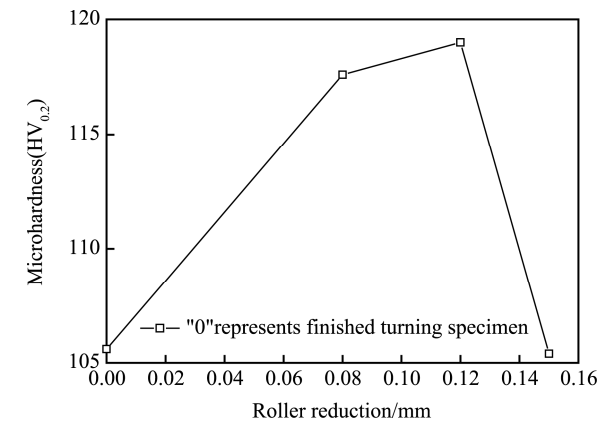


图 5 精车与超声滚压强化试样的表面显微硬度

Fig.5 Surface microhardness of specimens receiving finish turning and UB

2.4 超声滚压强化工件表面残余应力分析

采用型号 XSTRESS3000 的便携式 X 射线应力分

析仪对超声滚压量为 0.08 mm 的试件进行测试。X 射线应力测定仪的基本原理依据布拉格定律，计算公式如式（1）所示，测定衍射角 2θ ，便可以计算出衍射晶面间距 d ，再结合弹性理论导出 $\sin^2\psi$ 的应力测定公式，计算公式如式（2）和式（3）所示。

$$2d \sin \theta = n\lambda \tag{1}$$

$$\sigma = K \cdot M \tag{2}$$

$$M = \frac{\partial 2\theta}{\partial \sin^2 \psi} \tag{3}$$

式中： d 为衍射晶面间距； θ 为入射角； n 为反射级数； λ 为波长； σ 为应力； K 为应力常数； M 为斜率； 2θ 为对应于各 ψ 角的衍射角测量值。

实验测试条件：Cr Ka 靶，管压 20 kV，管流 2 mA，曝光时间 5 s。采用固定 ψ 法，选取 ψ 角为 0.0° 、 $\pm 20.7^\circ$ 、 $\pm 30.0^\circ$ 、 $\pm 37.8^\circ$ 、 $\pm 45.0^\circ$ 。使用无应力粉末对应力仪标定合格后，对压下量为 0.08 mm 的试样进

行测定。测完表层应力后,用电化学方法对试样腐蚀剥层,并逐层测试,直至测定应力完全释放,实验结果如图6所示。

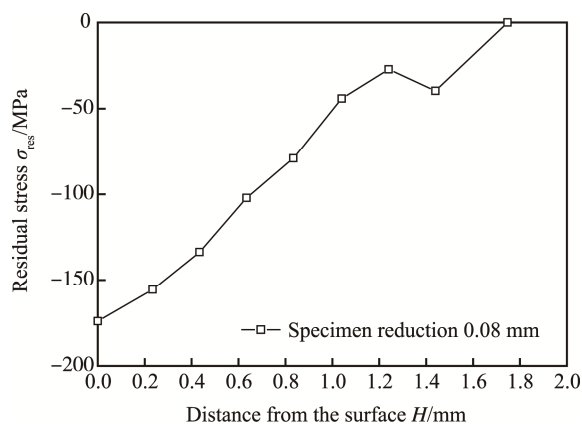


图6 距表层不同距离处的残余应力实验结果

Fig.6 Experimental results of residual stress at different distance from surface

从图6可以得出,试样表层产生-174.0 MPa的压应力,而且表层值为最大。随着距表层距离的逐渐增大,残余压应力值大体呈均匀减小的趋势,最终在距离表层约1.75 mm处残余压应力完全释放。工具头对试样的冲击最先发生在表层,表层塑形变形最严重,加上表层晶粒显著细化的作用,最表层残余压应力达到最大。工具头打入试件内部的能量由表层向里逐渐减弱,塑形变形量和位错密度逐渐减小,晶粒细化程度也慢慢降低,随着距离表层越远,残余压应力也越来越小。

3 结论

1) 研究和对比分析了超声滚压加工和精车加工的7075铝合金试件的表面粗糙度、金相显微组织、表面显微硬度等性能的差异。精车加工试件的表面粗糙度 $Ra=0.976\ \mu\text{m}$, 表面显微硬度为 $105.6\ \text{HV}_{0.2}$, 表层组织与心部组织几乎无变化。在适当的工艺参数下, 超声滚压加工试件的表面粗糙度 $Ra=0.047\ \mu\text{m}$, 表面显微硬度为 $119\ \text{HV}_{0.2}$, 表面硬度比精车加工试样提高约15%, 表层晶粒组织比心部得到显著细化。

2) 超声滚压加工的铝合金试件表层存在残余压应力, 残余压应力的影响深度为-1.75 mm。最大残余压应力位于最表层, 最大值为-174.0 MPa。距最表层距离越远, 残余压应力总体呈减小趋势。

参考文献:

[1] 刘兵, 彭超群, 王日初, 等. 大飞机用铝合金的究现状 & 展望[J]. 中国有色金属学报, 2010(9): 1705-

1715.

LIU Bing, PENG Chao-qun, WANG Ri-chu, et al. Recent Development and Prospects for Giant Plane Aluminum Alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010(9): 1705-1715.

[2] 王祝堂, 张新华. 汽车用铝合金[J]. 轻合金加工技术, 2011(2): 1-14.

WANG Zhu-tang, ZHANG Xin-hua. Aluminum Alloy for Automobile Usage[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2011(2): 1-14.

[3] 石其年, 熊惟皓. 铝合金在汽车中的应用与发展[J]. 新技术新工艺, 2006(12): 55-58.

SHI Qi-nian, XIONG Wei-hao. Application and Development of Aluminium Alloys in Automobile Industry[J]. New Technology & New Process, 2006(12): 55-58.

[4] 齐忠原, 巫瑞智, 王国军, 等. 铝合金在船舶和海洋工程中的应用[J]. 轻合金加工技术, 2016, 44(1): 12-18.

QI Zhong-yuan, WU Rui-zhi, WANG Guo-jun, et al. Application of Aluminum Alloys in Shipping and Ocean Engineering[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2016, 44(1): 12-18.

[5] 吴江, 程秀全, 夏琴香, 等. 约束层材料对7075铝合金激光喷丸表面强化的实验研究[J]. 表面技术, 2017(3): 124-129.

WU Jiang, CHENG Xiu-quan, XIA Qin-xiang, et al. Experimental Research on Influence of Restraint Layer Material on Surface Strengthening of 7075 Aluminum Alloy Laser Shot Peening[J]. Surface Technology, 2017(3): 124-129.

[6] 邓红华, 夏琴香, 程秀全, 等. 喷丸对预腐蚀后铝合金疲劳性能的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 118-123.

DENG Hong-hua, XIA Qin-xiang, CHENG Xiu-quan, et al. Effect on Anti-corrosion Fatigue Property of Aluminum Alloy after Shot Peening[J]. Surface Technology, 2016, 45(1): 118-123.

[7] 李卫, 严世榕, 张乐. 表面喷丸强化处理对TC11钛合金疲劳性能的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(3): 172-176.

LI Wei, YAN Shi-rong, ZHANG Le. Effects of Surface Shot Peening Strengthening on Fatigue Property of TC11 Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2017, 46(3): 172-176.

[8] FAN Z, XU H, LI D, et al. Surface Nanocrystallization of 35# Type Carbon Steel Induced by Ultrasonic Impact Treatment (UIT)[J]. Procedia Engineering, 2012, 27: 1718-1722.

[9] 王婷, 王东坡, 刘刚, 等. 40Cr 超声表面滚压加工纳米化[J]. 机械工程学报, 2009(5): 177-183.

WANG Ting, WANG Dong-po, LIU Gang, et al. 40Cr Nano-crystallization by Ultrasonic Surface Rolling Extrusion Processing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009(5): 177-183.

[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.
- REN Xue-chong, CHEN Li-qin, LIU Xing-gui, et al. Effect of Surface Ultrasonic Rolling Processing on Fatigue Properties of Axle Steel Used on High Speed Train[J]. Journal of Material Engineering, 2015, 43(12): 1-5.
- [11] 刘宇, 王立君, 王东坡, 等. 超声表面滚压加工 40Cr 表层的纳米力学性能[J]. 天津大学学报, 2012(7): 656-661.
- LIU Yu, WANG Li-jun, WANG Dong-po, et al. Nano Mechanical Properties of 40Cr Surface Layer after Ultrasonic Surface Rolling Processing[J]. Journal of Tianjin University, 2012(7): 656-661.
- [12] 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 Li-qin, XIANG Bin, REN Xue-chong, et al. Influence 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.
- [13] 李瑞锋, 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(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(2): 63-68.
- [14] 刘宇. 金属表面超声滚压加工理论及表层力学性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- LIU Yu. Research on the Theory of Ultrasonic Surface Rolling Processing and Mechanical Properties of Metal Surface [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [15] LIU Y, WANG L, WANG D. Finite Element Modeling of Ultrasonic Surface Rolling Processing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(12): 2016-2029.
- [16] YEKTA R T, GHahremani K, WALBRIDGE S. Effect of Quality Control Parameter Variations on the Fatigue Performance of Ultrasonic Impact Treated Welds[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 55 (10): 245-256.
- [17] YANG X, ZHOU J, LING X. Study on Plastic Damage of AISI 304 Stainless Steel Induced by Ultrasonic Impact Treatment[J]. Materials & Design, 2012, 36: 477-481.
- [18] CHAISE T, LI J, NELIAS D, et al. Modelling of Multiple Impacts for the Prediction of Distortions and Residual Stresses Induced by Ultrasonic Shot Peening (USP)[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(10): 2080-2090.
- [19] 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.