

轴孔超声冲击强化及有限元模拟研究

唐亮¹, 刘忠伟¹, 王文健¹, 颜力¹, 朱有利²

(1. 中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏 常州 213011;

2. 装甲兵工程学院 装备维修与再制造工程系, 北京 100072)

摘要: **目的** 提高渗碳淬火轴使用寿命。**方法** 针对渗碳淬火轴关键部位孔口, 采用超声冲击处理工艺对其进行表面强化处理, 利用电子显微镜、硬度计结合有限元模拟对处理后的微观组织、硬度、残余应力等进行分析。**结果** 在孔口处理区, 材料产生了明显的加工硬化, 形成了梯度硬化层, 硬化层厚度达到 80 μm , 表层硬度约 60HRC。对超声冲击孔口部分的表面残余应力值进行测量, 最小残余应力值为 -374 MPa, 最大残余应力值为 -530 MPa, 采用上述超声冲击处理后, 样品的残余应力平均值在 -450 MPa。利用有限元模拟了孔口附近沿轴向深度的残余应力分布, 其残余压应力层深约 1.4 mm, 最大残余应力 -891 MPa, 疲劳危险点处的残余应力平均值约 -760 MPa。轴孔边缘第三主应力基本上沿轴线方向。**结论** 通过超声冲击处理工艺对渗碳淬火轴孔口进行处理后, 在孔角处形成硬化层, 同时产生残余压应力, 上述处理后可有效降低工作应力造成的疲劳载荷幅。

关键词: 轴; 超声冲击; 残余应力; 有限元模拟

中图分类号: U260.332 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2018)08-0084-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.08.013

Ultrasonic Shock Treatment and Finite Element Simulation of Shaft Hole

TANG Liang¹, LIU Zhong-wei¹, WANG Wen-jian¹, YAN Li¹, ZHU You-li²

(1. CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd, Changzhou 213011, China; 2. Department of Equipment Maintenance and Remanufacture Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the service life of carburized& quenched shaft. The hole on the key part of the carburized& quenched shaft was treated by ultrasonic impact. The microstructure, hardness and residual stress after treatment were analyzed by electron microscope, hardness tester and finite element simulation. The material became hardened obviously in the hole processing area and then formed the gradient hardening layer which reached the thickness of 80 μm including 60HRC surface hardness. The residual stress on the hole by ultrasonic impact was measured and the minimum value was -374 MPa and the maximum value was -530 MPa. After the above ultrasonic impact treatment, the average residual stress of sample was -50 MPa. The finite element method was used to simulate the residual stress distribution of the depth along the axial, and the residual compressive stress layer depth was about 1.4 mm, the residual stress was -891 MPa, and the average residual stress in the fatigue dangerous spot was about -760 MPa. The third principal stress on the edge of the gear shaft near the hole was basically along the axis of the gear shaft. After the carburized& quenched shaft hole is treated by ultrasonic impact, the hardening layer is formed in the hole angle and the residual stress can be generated. Therefore, the above treatment can effectively reduce the fatigue load caused by the working stress.

收稿日期: 2017-05-19; 修订日期: 2018-07-09

Received: 2017-05-19; Revised: 2018-07-09

作者简介: 唐亮 (1983—) 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向表面强化。

Biography: TANG Liang (1983—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: gear design and surface strength.

KEY WORDS: shaft; ultrasonic shock; residual stress; finite element simulation

轴是各种机械产品中用得最多、最重要的零件之一,其工作条件较为复杂,失效事故时有发生。小至仪器仪表的微型轴件,大至大型水轮及汽轮发电机组的主轴,其失效将导致严重的损失。现代工程中的轴,由于结构等各方面的要求,往往要设计有油孔、油槽、键槽、螺纹等等,从而使其几何形状复杂化^[1]。几何形状的复杂会造成应力集中,而这也是很多轴失效的根源,在具体的工艺过程中就需要对孔口及附近进行强化,以防止轴的失效。

超声冲击处理是一种新型表面机械强化技术,利用功率超声换能器驱动冲击针,高速大动量冲击被处理材料表面,使其表层材料产生剧烈的塑性变形,卸载后形成残余压应力。同时,剧烈塑性变形使被处理表层材料晶粒细化,可提高材料的抗疲劳性能^[2-3]。该技术最初主要用于改善焊接接头的抗疲劳性能,但近年来经不断的研究发展,超声冲击处理技术已在提高零部件的抗腐蚀疲劳、抗应力腐蚀、耐磨性、抗微动疲劳和抗接触疲劳性能等方面显示出优越性,并在轴、轮、制动鼓、叶片以及其他一些机加工和铸造零部件的表面强化中得到了良好的应用效果^[4-8]。与喷丸强化处理技术相比,超声冲击处理可以使被处理材料表层产生更深和更大的残余压应力,所产生的晶粒细化或纳米化层更深,用于局部处理可以得到较高的表面光洁度^[9-10]。另外,冲击处理设备简单、操作方便、噪音小、无污染、工艺可控性好、成本低,方便在机加工生产线上实现,因此在航空、汽车、桥梁和军工等领域得到迅速的发展和应用。文中主要探讨了轴孔超声冲击强化处理,并结合有限元模拟,对其微观组织、显微硬度及残余应力等进行了分析研究。

1 试验

轴为一种 Cr-Ni-Mo 系低碳合金钢,其抗拉强度为 1200~1350 MPa。轴主体进行渗碳淬火回火工艺,轴孔部分加工后硬度约为 48HRC。结构如图 1 所示。

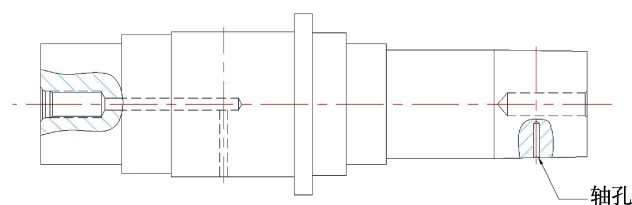


图 1 轴示意图

Fig.1 Schematic diagram of shaft

图 2 为超声冲击处理示意图,超声冲击设备主要包括三个关键部件:超声波电源、超声冲击枪、冲击针。试验采用 WC 圆形冲击针(硬度>64HRC),静/

动电流比 0.45/0.77 A,冲击时间为 35 s。对轴孔进行超声冲击有限元模拟,其中有关几何尺寸、材料参数和工艺参数如下:孔直径为 5 mm,孔槽深度为 1 mm,孔边倒圆。模型材料模型与参数:轴(弹塑性材料)弹性模量为 206 MPa,屈服模量为 955 MPa,冲击针(弹性体)弹性模量为 210 MPa,超声变幅杆(弹性体)弹性模量为 210 MPa,超声波频率为 20 kHz。考虑到大变形动态冲击碰撞的工艺特点,分析时采用 LS-Dyna 的 SOLID164 显式动力学分析单元,在显式动力学分析结束后考虑卸载回弹,得到最终残余应力和变形。

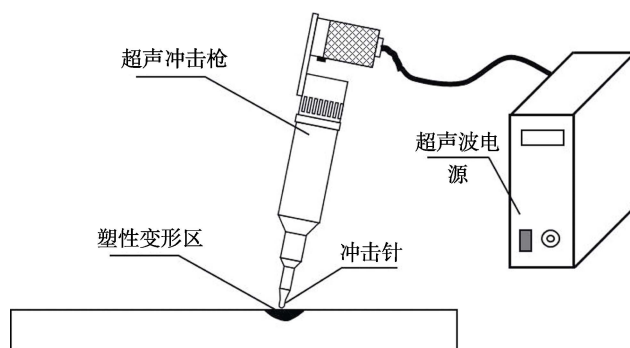


图 2 超声冲击处理

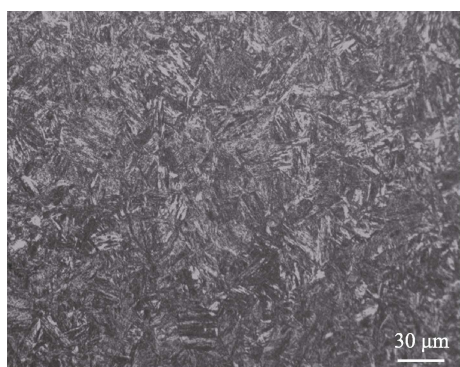
Fig.2 Schematic diagram of ultrasonic impact treatment

依据 GB/T 2975—1998《钢及钢产品力学性能试验取样位置和试样制备》对齿轮轴断口处切取试样,进行镶样、磨样、抛光,并用 4%硝酸酒精进行腐蚀,利用电子显微镜对原始材料微观组织进行表征。按照 GB/T 4340.1—2009《金属材料维氏硬度试验》在经超声冲击强化处理后的齿轮轴孔角附近切取试样,由表面向深度方向测量截面显微硬度,相邻两点间距为 0.3 mm,试验载荷为 9.807 N,加载时间为 15 s。根据 GB7704—2008《无损检测 X 射线应力测定方法》,采用 X-350A 型应力仪进行残余应力测试。

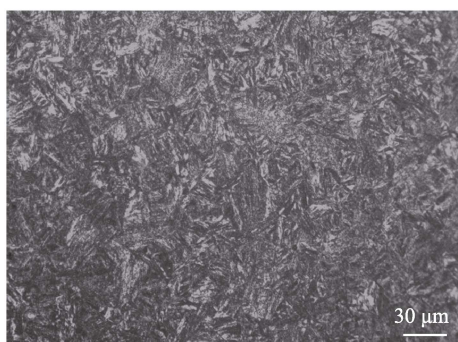
2 结果与分析

图 3 为该轴表层及心部原始显微组织。该轴材料含有 Cr、Ni 和 Mo 等合金元素,可提高心部和表层的性能。其中 Cr 有利于在渗层获得细小的碳化物, Ni 有利于提高心部的强韧性,而 Mo 的作用是阻止奥氏体晶粒长大,细化晶粒,降低晶界氧化,提高心部性能,尤以 Ni 的作用最好,提高了材料的抗过载能力。另外, Cr、Ni、Mo 元素可极大地提高钢的淬透性,因此该轴经过渗碳淬火、回火后,心部几乎能完全转变为低碳马氏体,且 Cr、Mo 为碳化物形成元素,能使淬火加热时奥氏体晶粒不易长大粗化。因此,该

轴经淬火+低温回火后, 渗层能得到细小针状的马氏体组织+少量残余奥氏体, 而心部得到低碳马氏体组织。研究表明^[11], 该系列低碳合金钢经渗碳缓冷淬火回火后, 渗层能够得到细小针状的马氏体组织+少量残余奥氏体, 而心部得到低碳马氏体组织。获得的隐针马氏体和一定量的合金碳化物组织使其表层具有高的硬度、耐磨性和接触疲劳强度, 而板条马氏体的形成则大大增加了其心部的强度、塑性和韧性, 从而使零件既能承受磨损和较高的表面接触应力, 又能承受弯曲应力及冲击负荷作用, 兼顾了零件表面和心部不同的性能要求。



a 表层



b 心部

图 3 轴显微组织

Fig.3 Microstructure of the shaft: a) surface; b) core

图 4 为轴孔超声冲击后的宏观形貌。孔口在经过超声冲击处理后, 由于表层材料的高应变速率导致剧烈塑性变形, 穿透次表面材料的超声应力波叠加和材料局部大转动速率等因素的联合作用, 会使被处理表层产生高位错密度, 形成位错胞或位错墙。随着变形量的继续增大, 位错胞数增加, 尺寸减少, 胞壁的位错密度提高, 不断向晶界运动。最终胞壁位错缠结不断集聚, 形成小角度的织构界面, 晶内出现大量亚微米量级的亚结构^[12-13]。在剪应力作用下, 小角度织构发生旋转, 成为大角度的亚晶粒。这些细分结构由于显微带的形成可以发生在更细尺寸晶粒上, 使新形成的亚晶粒进一步应变, 导致超细晶和纳米级晶粒的生成^[14-15]。图 5 是孔口处理区斜面附近材料的金相照片。可以清楚地观察到, 被处理区表层有约 80 μm 厚

的一层已难以分辨组织的光亮层, 表明该层材料因冲击强化处理产生了超细晶和纳米晶。晶粒细化是金属材料的强化机制之一, 细晶强化不仅会提高材料的强度, 同时会改善材料的韧性。因此, 在经超声冲击处理后, 孔口材料的综合强韧性会有较大的提高, 有益于提高材料的抗疲劳裂纹萌生性能。



图 4 轴超声冲击后宏观形貌图

Fig.4 Macroscopic appearance of the shaft after the ultrasonic impact

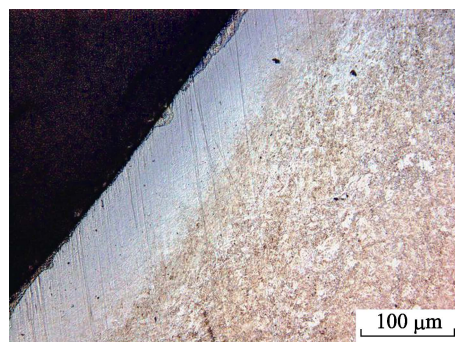


图 5 孔口超声处理区的金相形貌

Fig.5 Metallographic morphology of the hole in the ultrasonic treatment area

经超声冲击强化处理后, 不仅使表层产生了超细晶和纳米晶层, 而且在孔口附近引入了残余压应力, 这两种效果的联合作用有利于大幅改善轴的抗疲劳性能。轴超声冲击后的截面硬度如图 6 所示, 同种工艺下不同批次样品的表面残余应力值如图 7 所示。硬度测量表明, 经超声冲击强化处理后, 孔口处理区材料产生了明显的加工硬化, 表层硬度约 60HRC。这是位错增殖、位错缠结和晶粒细化的结果, 表明材料的强度得到了提高。对超声冲击油孔的孔角部分表面残余应力值进行测量, 最小残余应力值为-374 MPa, 最大残余应力值为-530 MPa, 采用上述超声冲击处理后, 样品的残余应力平均值为-450 MPa。可见利用冲击实验可在孔疲劳危险点引入较大残余压应力, 避免轴服役的早期失效。

XRD 残余应力测试只能测量处理后孔边之外处的残余应力, 不能全面表征处理区的残余应力分布。为全面了解孔角超声冲击强化处理后的处理区应力

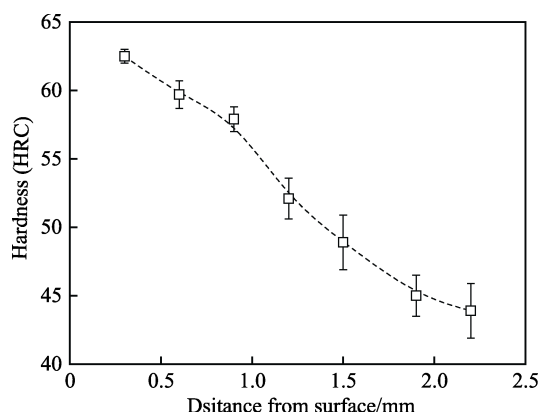


图 6 样品截面洛氏硬度随深度变化规律图

Fig.6 Change rules of Rockwell hardness on the cross section of sample along with the depth

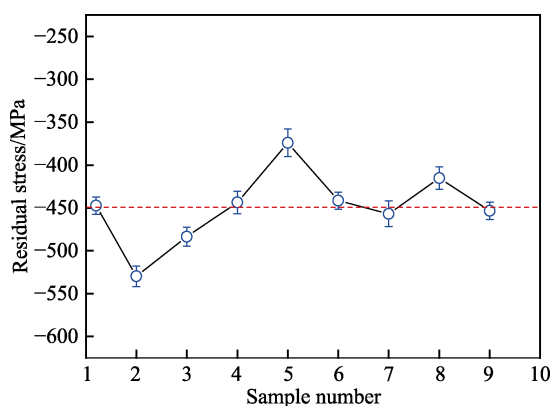


图 7 不同样品残余应力值

Fig.7 Residual stress of different samples

应变分布以及塑性变形情况,特别是掌握残余应力分布细节,以克服 XRD 测试的不足,对轴的孔口超声冲击强化处理工艺进行了动力学有限元仿真分析。

为了保证被处理区域的计算精度,对孔口区和冲击头进行了单元网格细化。局部网格如图 8 所示。卸载后孔口附近的残余应力分布如图 9 所示,经超声冲击处理后孔口附近材料产生了较大的残余压应力。孔口附近沿深度的残余应力(轴向)分布曲线如图 10 所示,其残余压应力层深约 1.4 mm,最大残余压应力为 891 MPa,疲劳危险点处的残余应力平均值约 -760 MPa。由于受到设备限制,实际残余应力测试时,实测点在位于图 9 中大箭头所示位置,而这两处并不是最大压残余应力所在点。另外,在处理区的边缘有深度很浅的局部残余拉应力,可以通过磨抛工艺去除。

图 11 是卸载后孔口附近的等效塑性应变分布云图。最大等效塑性应变为 60%,处于孔角边缘,等效塑性应变平均值约 30%。塑性变形层的深度约 0.7 mm,表明孔口区域材料产生了加工硬化。孔口的塑性变形使材料沿轴向被“拉长”,卸载后底层材料的弹性恢复导致表层产生了较大的残余压应力。由于塑性变形孔口附近材料产生了明显的宏观变形,并产生了塑性挤出飞边。可以看出,孔口附近区域均产生了

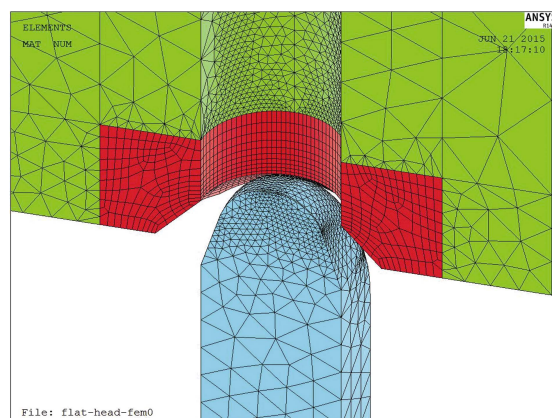


图 8 孔口区和冲击头的局部网格细化情况

Fig.8 Local grid refinement of hole and impact head

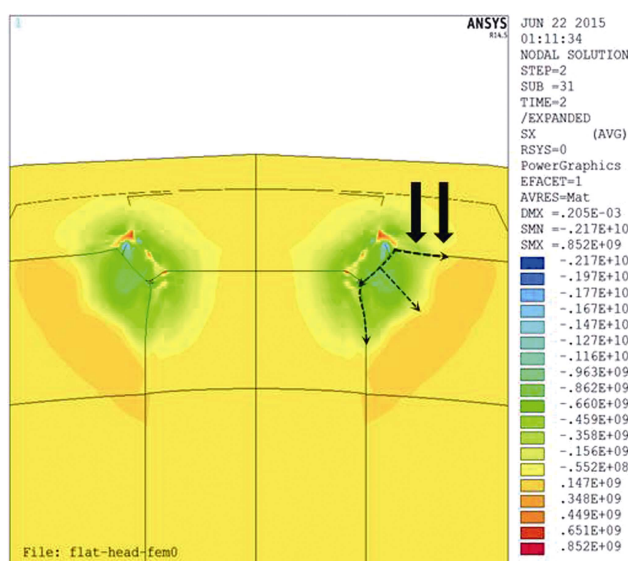


图 9 超声冲击处理后孔口附近的残余应力分布

Fig.9 Residual stress distribution near the hole after ultrasonic impact treatment

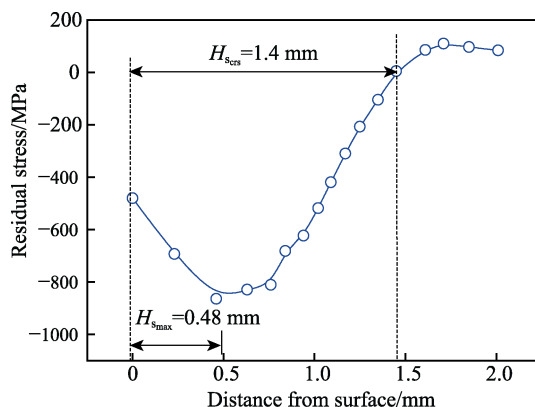


图 10 孔口附近沿深度(轴向)的残余应力分布曲线

Fig.10 Distribution curve (axial) of residual stress near the orifice along the depth

塑性挤出现象。对于挤出的飞边可以通过磨抛工艺来去除,但材料去除量不可过大,特别是孔壁,由于不影响配合,适当去除局部残余拉应力即可,过多的去

除会损失残余压应力。图 12 是轴孔边缘附近的主应力矢量图,可以看出,在轴孔边缘附近,特别是孔边倒角面上,第三主应力基本上沿轴线方向分布,而该方向是最大工作应力方向。这说明经超声冲击处理后,孔边的最大残余压应力可以有效降低工作应力造成的疲劳载荷幅。

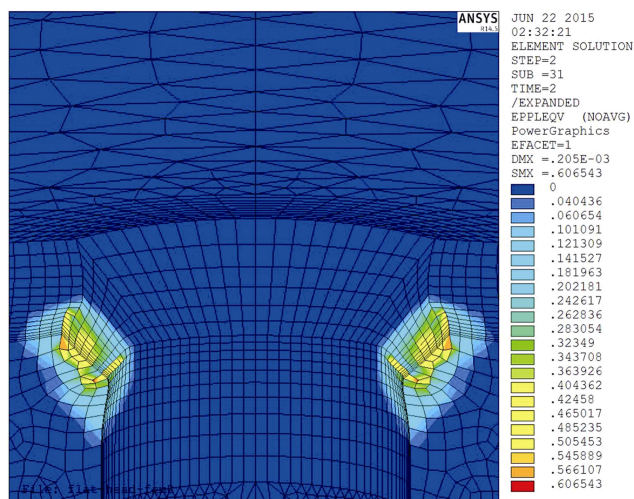


图 11 卸载后孔口附近的等效塑性应变分布
Fig.11 Equivalent plastic strain distribution near the hole after unloading

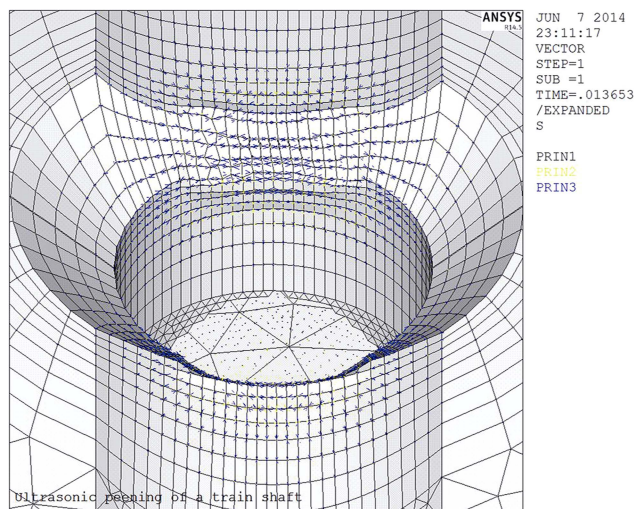


图 12 轴孔边缘附近的主应力矢量图
Fig.12 Main stress vector diagram near the edge of the shaft hole

3 结论

1) 对渗碳淬火轴失效关键部位孔口进行了超声处理,孔口在经过超声冲击处理后,由于表层材料的高应变速率导致剧烈塑性变形,在其表层产生了超细晶和纳米晶,厚度约为 80 μm 。

2) 孔口处理区材料产生了明显的加工硬化,表层硬度约 60HRC,材料的强度得到大幅提高。

3) 利用有限元模拟了孔口附近沿深度(轴向)的残余应力分布曲线,其残余压应力层深约 1.4 mm,最大残余应力为 -891 MPa,疲劳危险点处的残余应力平均值约 -760 MPa。

4) 对轴孔边缘主应力矢量图进行分析可知,在轴孔边缘附近,特别是孔边倒角面上,第三主应力基本上沿齿轮轴轴线方向,而该方向是最大工作应力方向。

5) 经超声冲击处理后,孔边的最大残余压应力可以有效降低应力造成的疲劳载荷幅。

参考文献:

- [1] 王大伦, 赵德寅, 郑伯芳. 轴及紧固件的失效分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 17-19.
WANG Da-lun, ZHAO De-yan, ZHENG Bo-fang. Failure analysis of shaft and fastener[M]. Beijing: China Mechanical Industry Press, 1988: 17-19.
- [2] 黄廷尊, 杨中娜, 吴文烈, 等. 超声冲击处理对大厚度高强钢焊接接头抗拉强度的影响[J]. 机械工程材料, 2016, 40(11): 106-110.
HUANG Ting-zun, YANG Zhong-na, WU Wen-lie, et al. Effect of ultrasonic impact treatment on tensile strength of large thickness high-strength steel welded joint[J]. Materials for mechanical engineering, 2016, 40(11): 106-110.
- [3] ZHANG Hai, WANG Dong-po, DENG Cai-yan. Behaviors of ultrasonic peening treatment induced effects near the edges[J]. Surface engineering, 2017, 34(1): 1-8.
- [4] 朱有利, 李占明, 韩志鑫, 等. 超声冲击处理对 2A12 铝合金焊接接头表层组织性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39 (1): 130-133.
ZHU You-li, LI Zhan-ming, HAN Zhi-xin, et al. Effect of ultrasonic impact treatment on microstructure and properties of surface layer of 2A12 aluminum alloy weld joint[J]. RARE metal materials and engineering, 2010, 39(1): 130-133.
- [5] 王桂阳, 王海斗, 张玉波, 等. 超声冲击法提高焊接接头疲劳特性研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(9): 87-94.
WANG Gui-yang, WANG Hai-dou, ZHANG Yu-bo, et al. Development of research in improving fatigue properties of welded joints by ultrasonic impact treatment[J]. Materials review A, 2016, 30(9): 87-94.
- [6] FENG Yan-yan, HU Sheng-sun, WANG Dong-po, et al. Formation of short crack and its effect on fatigue properties of ultrasonic peening treatment S355 steel[J]. Materials & design, 2016, 89: 507-515.
- [7] MORDYUK B N, PROKOPENKO G I, VASYLYEV M A, et al. Effect of structure evolution induced by ultrasonic peening on the corrosion behavior of AISI-321 stainless steel[J]. Materials science & engineering A, 2007, 458(1): 253-261.
- [8] HUO Li-xing, WANG Dong-po, ZHANG Yu-feng, et al. Investigation on improving fatigue properties of welded joints by ultrasonic peening method[J]. Key engineering

- materials, 2000, 187: 1315-1320.
- [9] PANIN AV, KAZACHENOK M S, KOZELSKAYA A I, et al. Mechanisms of surface roughening of commercial purity titanium during ultrasonic impact treatment [J]. Materials science & engineering A, 2015, 647: 43-50.
- [10] YANG Xin-jun, LING Xiang, WANG Dong-xiang, et al. Deformation behavior and formability of gradient nano-grained AISI 304 stainless steel processed by ultrasonic impact treatment[J]. Journal of Wuhan University of technology—Mater sci ed, 2017, 32(5): 1147-1155.
- [11] 廉海强, 杨卯生, 孙世清. 新型 Cr-Ni-Mo 渗碳轴承钢旋转变曲疲劳性能研究[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(7): 779-793.
- LIAN Hai-qiang, YANG Mao-sheng, SUN Shi-qing. Rotating bending fatigue properties of carburized Ni-Cr-Mo bearing steel[J]. Chinese journal of vacuum science and technology, 2016, 36(7): 779-793.
- [12] 吕宗敏, 何柏林, 于影霞. 超声冲击诱发表面纳米化及其对表面完整性的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2017, 35(2): 311-315.
- LV Zong-min, HE bo-ling, YU ying-xia. Ultrasonic impact induced surface nanocrystallization and influence on surface integrity[J]. Journal of materials science & technology, 2017, 35(2): 311-315.
- [13] 张聪惠, 解钢, 王耀勉. 表面纳米化 TC4 合金微观组织的演化[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(11): 2682-2686.
- ZHANG Cong-hui, XIE Gang, WANG Yao-mian. Microstructure evolution of TC4 alloy during nanocrystallization process[J]. Rare metal materials and engineering, 2014, 43(11): 2682-2686.
- [14] ZHAO Shi, HAHN E N, KAD B. Amorphization and nanocrystallization of silicon under shock compression[J]. Acta materialia, 2016, 103: 519-533.
- [15] 李东, 樊钊, 廖礼宝, 等. J507 堆焊层超声冲击表面纳米化[J]. 焊接学报, 2009, 30(1): 101-104.
- LI Dong, FAN Zhao, LIAO Libao, et al. Fabrication and characterization of nanocrystallized surface layer J507 weld by ultrasonic impact peening[J]. Transactions of the China welding institution, 2009, 30(1): 101-104.