

焊接接头表面改性的研究进展

滕诚信, 左松, 赵琨, 兰绪文, 朱海洋, 张元彬

(山东建筑大学 材料科学与工程学院, 济南 250101)

摘要: 概述了高能喷丸、表面机械研磨处理、超音速微粒轰击、超声冲击、激光冲击改性等表面改性方法的基本原理,重点分析了其对不同材料焊接接头表面进行改性的效果。这些改性方法可以细化焊接接头表面的晶粒,甚至使晶粒尺寸达到纳米级;提高焊接接头表面的显微硬度,从而提高焊接构件的强度;消除接头处的残余拉应力,使拉应力转变为残余压应力,从而抑制焊接接头裂纹源的产生,提高焊接接头的抗疲劳断裂能力,进一步提高焊接构件的寿命。了解了现有表面改性处理方法应用的领域范围及其优缺点,并对焊接接头表面改性处理方法的发展及研究方向进行了展望。

关键词: 焊接接头; 表面改性; 残余应力; 抗疲劳断裂

中图分类号: TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2014)04-0149-09

Progress in Surface Modification of Welded Joints

TENG Cheng-xin, ZUO Song, ZHAO Kun, LAN Xu-wen, ZHU Hai-yang, ZHANG Yuan-bin

(School of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

ABSTRACT: In this paper, the basic principles of high-energy shot blasting, surface mechanical attrition treatment, supersonic particles bombarding, ultrasonic peening, laser shock modified were overviewed. And the results of the modification treatments on the surfaces of welded joints of different materials were emphatically analyzed. These modification methods can make the surface grain of welded joints refinement, and the surface grain size of welded joints can even reach the nanoscale. At the same time, it can also improve the surface hardness of welded joints, and improve the strength of welded components. The residual tensile stress of the joints will disappear, and make the tensile stress change to the residual compressive stress, which can restrain the generation of welded joints crack source, improve the ability of anti-fatigue fracture of welded joints, and further prolong the life span of welding components. It helps us acquire a further understanding of the application domain range as well as the advantages and disadvantages of existing surface modification treatment methods. And this paper also prospected the development and research direction of the welded joints surface modification methods.

KEY WORDS: welded joints; surface modification; residual stress; anti-fatigue fracture

在焊接过程中,焊接技术本身存在的集中加热和快速冷却过程以及添加不同的焊接材料,都会造成焊接接头组织及性能的不均匀,这种不均匀使焊接接头成为构件的薄弱环节和易失效区域^[1]。如何使焊接

接头组织及性能均匀化,提高焊接接头的强度、硬度、抗疲劳断裂、耐腐蚀^[2-3]等性能,已经得到许多焊接研究者的重视。通过对材料进行表面改性处理,如热处理^[4-5]、化学处理^[6-8]及机械处理,可以提高材料

收稿日期: 2014-03-08; 修订日期: 2014-04-15

Received: 2014-03-08; Revised: 2014-04-15

作者简介: 滕诚信(1990—),男,山东潍坊人,硕士生,主要研究焊接接头的表面改性。

Biography: TENG Cheng-xin(1990—), Male, from Weifang, Shandong, Graduate, Research focus: surface modification of welded joints.

的抗疲劳性能。目前,许多研究者采用高能喷丸、表面机械研磨处理、超音速微粒轰击、超声冲击、激光冲击等方法对焊接接头进行表面改性处理,使焊接接头表面晶粒得到细化,其力学性能也得到不同程度的改善。

1 高能喷丸

高能喷丸是利用直径小于 15 mm 的刚性丸粒,在高频作用下从各个方向撞击材料表面,使得材料表面产生严重的塑性变形,表面晶粒通过位错增殖、运动、湮灭、重排等过程,尺寸得以细化,并且表面层与材料的整体成分保持不变^[9]。目前,高能喷丸技术已经应用在纯铁^[10]、不锈钢^[11-12]、低碳钢^[13-14]、合金钢^[15-16]、铝合金^[17-19]、纯钛^[20]等材料的表面改性处理中,细化了材料表面晶粒,提高了材料的耐磨性、耐腐蚀以及抗疲劳性能。

对于焊接接头的高能喷丸表面改性处理,人们也进行了一些研究。李东等人^[21]对 SS400 钢对接接头的表面进行高能喷丸处理后,对残余应力及疲劳强度进行了分析,发现对接接头的表面形成了尺寸均匀、晶粒随机分布的纳米晶组织,消除了组织的不均匀性。同时,纳米结构表层的硬度明显高于心部,内部残余应力为压应力,这种压应力可以明显提高对接接头的疲劳性能。除此之外,高能喷丸表面处理可以提高 SS400 钢焊接接头抗硝酸盐溶液应力腐蚀的性能^[22]。

逯瑶等人^[23]对 7A52 铝合金焊接接头进行高能喷丸处理,并对处理前后材料的表面微观组织、晶粒尺寸、变形层厚度、显微硬度和耐磨性进行了对比分析。发现经过高能喷丸处理后,母材、焊缝以及热影响区的表面平均晶粒尺寸达到纳米级,焊接接头表面变形层厚度达到 36.5 μm ,各区域的表面硬度有所提高,磨损率是高能喷丸处理前的 29.9%。

张翌等人^[24]对 16MnR 压力容器钢气体保护焊接接头进行了高能喷丸表面改性处理,并分析了不同喷丸处理时间的表层组织形貌、变形层硬度以及晶粒尺寸。发现焊接接头的焊缝、热影响区和母材随着喷丸时间的延长,晶粒得到细化,表层硬度提高,硬化层深度也逐渐增加,显微硬度随着深度的增加而降低。当喷丸时间为 120 min 时,焊缝、热影响区、母材表层硬度达到最高值。

高能喷丸表面改性除了能对焊后材料的焊接接

头进行处理外,还可以在焊前对待焊材料接头端面进行处理,提高焊接质量。在钛合金和不锈钢的扩散焊接中^[25-27],通过高能喷丸对待焊接头端面进行表面改性处理,提高了扩散焊的速度,并强化了焊接后接头的性能,在实际生产中有一定的应用。

2 表面机械研磨处理

表面机械研磨处理与高能喷丸的原理相似,图 1 是一种表面机械研磨处理设备^[28]。

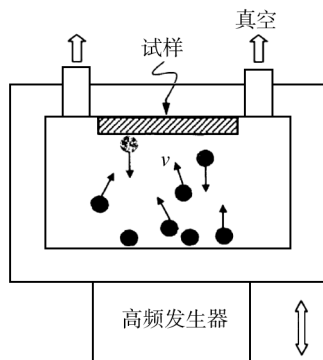


图1 表面机械研磨处理设备简图

Fig. 1 Surface mechanical attrition treatment equipment diagram

王宇等人^[29]采用内焊双丝、外焊双丝的埋弧自动焊对 X80 管线钢的螺旋焊管进行焊接,利用表面机械研磨处理技术对 X80 管线钢焊接接头试样进行了表面纳米化处理,研究了处理时间对 X80 管线钢焊接接头的显微组织、晶粒尺寸、表面粗糙度及显微硬度的影响。发现处理不同时间后,X80 管线钢焊接接头表面均可获得一定厚度的塑性变形层,且随着时间的延长,塑性变形层厚度逐渐增加,实现了焊接接头的表面组织均匀化。同时,焊接接头表面粗糙度有所改善,随处理时间的延长,表面粗糙度逐渐减小。此外,焊接接头表面的显微硬度显著提高,并呈梯度分布。

张淑兰等人^[30]采用钨极氩弧单面焊焊接工业纯钛后,利用机械研磨法对工业纯钛焊接接头的表面进行处理,其表面晶粒尺寸达到了 50 nm 左右,处理深度约为 30 ~ 40 μm ,表面硬度得到很大提高,焊缝和热影响区的硬度实现了均匀化,耐盐酸腐蚀性能也有所提高。

高能喷丸和表面机械研磨处理设备复杂,需在密闭容器中进行,因而一些管材焊接接头及不规则形状焊接接头的处理就很难实现,使得这两种表面改性处理方法的应用范围受到了限制。

3 超音速微粒轰击

超音速微粒轰击是利用压缩气体携带硬质微粒($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, SiO_2 , BN, WC), 通过超音速喷嘴轰击金属材料表面, 气体加速可以达到 $300 \sim 1200 \text{ m/s}$, 硬质微粒以很高的动能连续轰击金属表面引起表面发生严重塑性变形并产生大量位错、孪晶或亚晶结构, 从而导致晶粒细化, 最终形成纳米晶粒^[31]。这种处理方法已经在不锈钢、钛合金、铝合金等材料的表面改性中得到应用。图 2 是一种超音速微粒轰击装置示意图^[32]。

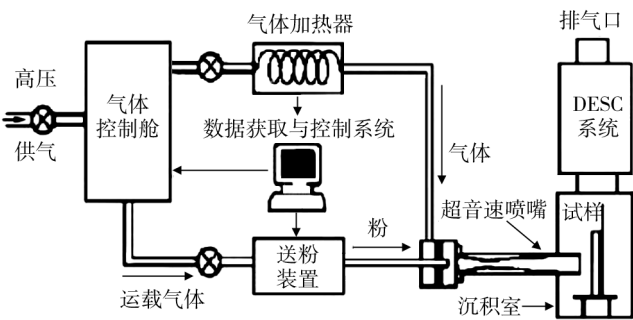


图 2 超音速微粒轰击装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the supersonic particle bombardment

为了提高不锈钢焊接接头的组织均匀性及其抗 H_2S 应力腐蚀性能, 熊天英等人^[33]对 0Cr18Ni9Ti 不锈钢焊接接头表面进行了超音速微粒轰击处理, 发现表层晶粒得到细化, 晶粒尺寸平均为 10.4 nm , 表层组织也得到均一化; 焊接接头残余拉应力变为压应力, 深度达到约 $360 \text{ }\mu\text{m}$; 抗 H_2S 应力腐蚀性能也得到显著提高。根据分析, 超音速微粒轰击处理使焊接接头表层形成了超细等轴晶以及压应力, 在二者的协同作用下, 抗应力腐蚀性能大大提高。

王吉孝等人^[34]采用超音速微粒轰击技术对 16MnR 低合金钢焊接接头表面进行处理, 并对焊接接头表面的微观组织进行分析。发现经超音速微粒轰击处理后, 样品表层晶粒细化至纳米量级, 表层晶粒尺寸平均为 12.6 nm , 同时表层组织得到均匀化; 处理后的焊接接头抗 H_2S 应力腐蚀性能也得到了显著提高^[35]。

王志平等人^[36]对 0Cr18Ni9Ti 不锈钢焊接接头表面进行了超音速微粒轰击处理, 分析了焊接接头表面的微观组织, 研究了焊接接头表面处理后的抗

应力腐蚀情况。发现经超音速微粒轰击处理后, 样品表层以下 $60 \text{ }\mu\text{m}$ 区域的晶粒细化至纳米量级, 并且表层组织得到均一化。在较低应力情况下, 300 h 以上应力腐蚀后试样仍未出现断裂, 可见经超音速微粒轰击处理后, 样品的抗 H_2S 应力腐蚀性能得到显著提高。

超音速微粒轰击的应用较为广泛, 适合多种材料, 具有设备操作简单, 成本低, 能耗少, 处理效率高等优点。对于材料焊接接头的表面改性处理, 主要集中在合金钢和不锈钢等广泛应用的金属材料上。

4 超声冲击

超声冲击改性处理是通过结合超声频机械振动和传统表面压光工艺进行工作的。超声冲击的工作原理是将超声冲击工作头垂直于工件表面, 在一定静压力和进给速度作用下, 冲击头将压力和超声冲击振动传递给处于旋转状态的机械零部件表面, 使材料表面产生弹、塑性变形^[37]。图 3 是超声冲击原理示意图^[38]。

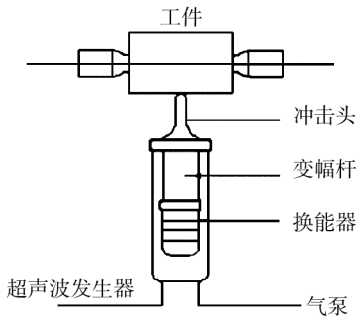


图 3 超声冲击原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ultrasonic impact

李东等人^[39]对 J507 堆焊层进行超声冲击改性处理, 并对超声冲击处理前后表面层显微组织和显微硬度的变化进行了分析。发现在超声冲击作用下, 粗晶粒内部形成了高密度的位错墙和位错缠结, 在不断的冲击作用下逐渐演变成小角度亚晶界, 继续吸收位错进而转变成大角度晶界, 上述过程不断重复, 晶粒尺寸就不断减小, 最终形成纳米级的晶粒, 同时表面纳米晶层比中心区域的显微硬度提高 1.4 倍。

为了研究超声冲击工艺对 Q235 钢结构箱型柱焊接残余应力的影响, 饶德林等人^[40]对埋弧焊焊缝进行了超声冲击改性处理, 并分别采用了全覆盖冲击和焊趾冲击两种冲击工艺进行分析试验。超声冲击工

艺可以使焊缝表面产生较高的压应力,而对焊趾的冲击不但使焊趾表面产生压应力,同时也降低了焊缝的残余应力。

综合许多研究可以看出,超声冲击改性处理能够提高材料的疲劳强度,延长材料的疲劳寿命^[41-44]。除此之外,对焊接接头进行超声冲击改性处理也可以大幅提高其疲劳强度,使疲劳寿命增加十几倍以上^[45-50]。

为了研究超声冲击提高焊接接头疲劳强度的机理,王东坡等人^[51]对超声冲击处理前后焊趾区的几何形状及硬度的变化进行了测量,并研究了超声冲击造成的焊趾区几何形状变化及残余压缩应力对接头疲劳性能改善的影响行为。对于低中强钢来说,超声冲击处理焊接接头疲劳性能的改善主要源于焊趾部位形成的残余压应力及改善焊趾几何外形这两个因素,硬化的作用相比次之。研究还证明,超声冲击处理通过增加焊趾区过渡半径,使得焊接接头应力集中程度降低。

李占明等人^[52]对2A12铝合金焊接接头进行了超声冲击处理,发现超声冲击处理可以使焊缝表面形成深度约300 μm左右的塑性变形层,处理层的晶粒平均尺寸为123 nm,平均微观应变为0.134%^[53-54]。通过超声冲击处理,发现焊缝中气孔、缩松等缺陷明显减少,焊接接头表面和断面显微硬度明显提高,同时消除了焊接接头表面残余拉应力,形成了最大约为-285 MPa的残余压应力。除此之外,超声冲击处理使2A12铝合金焊接接头疲劳强度由40.5 MPa提高到56.1 MPa,提高了38.5%^[55]。

叶雄林等^[56]研究了超声冲击处理对22SiMn2TiB钢焊接接头疲劳性能的作用,分析了处理前后样品的残余应力分布,并对疲劳样品断口形貌进行了观察分析,确定了裂纹形核机制。他们发现超声冲击处理可以延长22SiMn2TiB钢焊接接头的疲劳寿命。超声冲击处理改变了裂纹形核机制,从焊趾处的表面形核演变为次表面形核,而超声冲击处理消除了焊趾处的微缺陷,并引入残余压应力,减少了焊趾表面开裂,使得焊接接头具有更长的疲劳寿命。

超声冲击设备具有操作简单、方便灵活的特点,对一些结构复杂的焊接接头也能够进行表面改性处理,可以适应于各种施工工况,因此超声冲击表面改性处理方法应用比较广泛,不仅适用于钢结构,还在铝合金、钛合金及镁合金等材料的焊后处理中具有广泛的应用。

5 激光冲击改性

激光冲击改性处理是利用强激光诱导冲击波来强化金属表面的一种新技术。其工作原理是利用激光辐射金属表面,使得金属表面吸收层(涂覆层)吸收激光能量而升华,产生高压等离子体,该等离子体受到约束层的约束而发生爆炸,同时产生高压冲击波作用于金属表面并向内部进行传播^[57]。强烈的冲击作用使材料表面形成大量的位错结构,进而使材料表层产生应变硬化,形成较大的压应力,显著提高材料的抗疲劳和抗应力腐蚀等性能^[58-60]。激光冲击改性处理具有非接触、无热影响区和强化效果显著等优势,用于焊接接头的表面改性处理具有更好的效果,同时效率更高,操作更方便。图4是激光冲击改性原理示意图^[57]。

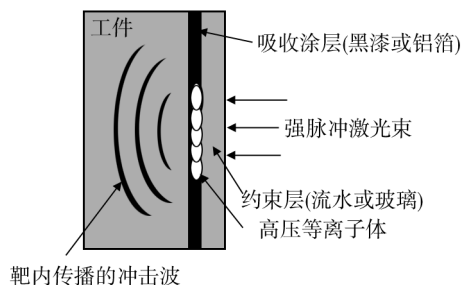


图4 激光冲击改性原理示意

Fig. 4 Schematic diagram of laser impact modified

孔德军等人^[61]利用激光冲击波对X70管线钢焊接接头进行了表面改性处理,对处理后的焊接接头组织结构及显微硬度进行了测试与分析。发现激光冲击波可以使焊接接头表面形成塑性变形层,而且显微硬度明显提高,组织均匀性也得到了明显改善,激光冲击消除了焊接接头表面残余拉应力,形成了残余压应力。

为提高焊接接头的力学性能,周磊等人^[62]对12Cr2Ni4A钢的等离子弧焊接接头进行了激光冲击改性处理。发现处理后,接头拉伸强度由815 MPa提高到867 MPa,焊缝硬度提高了51.4%,热影响区硬度提高了28.2%,焊接后残余应力由134 MPa转变为-237 MPa。同时热影响区晶粒明显细化,粗大马氏体分解,粗晶组织得以消除,从而材料的抗疲劳强度提高,裂纹难于萌生,疲劳寿命延长,焊缝的抗疲劳断裂性能提高。除此之外,对焊接接头进行双面激光冲击改性处理的效果优于单面处理。

周留成等人^[63]利用激光冲击强化对 12C2Ni4A 不锈钢焊接接头进行处理,比较了激光冲击一次和二次前后焊接接头的拉伸性能、显微硬度和表面残余应力。发现 12C2Ni4A 焊接试件经过二次激光冲击强化后,显微硬度提高了 50%,抗拉强度由 818.5 MPa 提升至 863.8 MPa,断裂区域由焊接热影响区转移至基体处,焊接试件的拉伸性能显著提高。分析原因是激光冲击改性处理消除了焊接残余拉应力,使焊接接头拉伸性能得到提高。

激光冲击改性处理作为一种比较先进的表面改性处理方法,在航空航天、核工业、船舶制造业、汽车工业等一些领域具有广泛的应用前景,但由于激光冲击强化技术成本太高,目前很难形成工业化生产,只能用于科学研究及军用技术开发。

6 结语

对各种材料焊接接头进行表面改性处理可采用表面机械研磨、高能喷丸、超音速微粒轰击、超声冲击、激光冲击等多种方法,能够细化焊接接头表面晶粒尺寸,提高焊接接头表面的硬度,消除残余拉应力,并形成残余压应力,提高焊接接头的抗疲劳断裂能力,进一步提高焊接构件的寿命。

随着对焊接质量的要求越来越严格,一些表面改性处理方法在焊接接头表面改性及相关领域的应用越来越普遍,一些简便且更加适合焊接接头表面改性的新方法也将会成为主要的研究方向。

参考文献

- [1] 张文钺. 金属冶金学[M]. 北京:北京机械工业出版社, 1997.
ZHANG Wen-yue. Metal Metallurgy[M]. Beijing: Beijing Machinery Industry Press, 1997.
- [2] 赵兵兵,张慧霞,贾瑞灵,等. 低合金钢焊接接头腐蚀性研究进展[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 60—63.
ZHAO Bing-bing, ZHANG Hui-xia, JIA Rui-ling, et al. Research Progress on the Corrosion Behavior of Low Alloy Steel Weldments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6): 60—63.
- [3] 贾思洋,李超,韩东锐. B610E 不同焊接接头在石油沉积水中的耐蚀性研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 7—9.
JIA Si-yang, LI Chao, HAN Dong-rui. Study on Corrosion-

- resistant Performance of Different Welded Joints of B610E in the Deposited Water of Petroleum[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(6): 7—9.
- [4] 徐峰,李文虎,艾桃桃,等. Q235 钢表面氩弧熔覆 TiC 复合涂层的组织与性能[J]. 表面技术, 2012, 41(5): 17—19.
XU Feng, LI Wen-hu, AI Tao-tao, et al. The Microstructure and Property of TiC Composite Coating Deposited by Argon Arc Cladding on Q235 Steel Surface[J]. Surface Technology, 2012, 41(5): 17—19.
- [5] 曹艳,李涌泉,褚芳芳. 45 钢表面 Ni20 合金激光熔覆层的组织及抗高温氧化性能[J]. 表面技术, 2012, 41(3): 54—56.
CAO Yan, LI Yong-quan, CHU Fang-fang. Microstructure and High Temperature Oxidation Resistance of Laser Cladding Ni20 Alloy on 45 Steel[J]. Surface Technology, 2012, 41(3): 54—56.
- [6] 闻勃,郭兴伍,陈洁,等. 2024 铝合金表面微弧氧化及封孔处理对其疲劳性能的影响[J]. 表面技术, 2012, 41(5): 14—16.
WEN Bo, GUO Xing-wu, CHEN Jie, et al. Effect of Micro-arc Oxidation Coatings and Micro-arc Oxidation Coatings after Sealing Treatment on Fatigue Properties of 2024 Aluminium Alloys[J]. Surface Technology, 2012, 41(5): 14—16.
- [7] 李旭东,穆志韬,刘治国,等. LY12CZ 航空铝合金腐蚀疲劳断口研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 9—12.
LI Xu-dong, MU Zhi-tao, LIU Zhi-guo, et al. Corrosion Fatigue Fracture Analysis of LY12CZ Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(4): 9—12.
- [8] 王雁涛,杨钿. 铝合金结构件应力腐蚀裂纹机理分析[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 53—56.
WANG Yan-tao, YANG Tian. Analysis on Stress Corrosion Crack Mechanisms of Aluminum Alloy Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 53—56.
- [9] 卢柯,吕坚. 一种金属材料表面纳米层的制备方法: 中国, 99122670. 4[P]. 1999-12-24.
LU Ke, LYU Jian. Method for Preparing Nano-layer Metal Surface: China, 99122670. 4[P]. 1999-12-24.
- [10] TAO N R, SUI M L. Surface Nanocrystallization of Iron Induced by Ultrasonic Shot Peening[J]. Nanostructured Materials, 1999, 11(4): 433—440.
- [11] LIU G, LU J, LU K. Surface Nanocrystallization of 316L Stainless Steel Induced by Ultrasonic Shot Peening[J]. Mater Sci Eng, 2000, A286: 91—99.
- [12] 王天生,于金库,董冰峰,等. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的喷丸表面纳米化及其对耐蚀性的影响[J]. 机械工程学报, 2005, 41(9): 51—54.

- WANG Tian-sheng, YU Jin-ku, DONG Bing-feng, et al. 1Cr18Ni9Ti Stainless Steel Shot Peening Surface Nanocrystallization and Effect on Corrosion Resistance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(9): 51—54.
- [13] 刘莉莉, 揭晓华, 于能, 等. 45 钢表面增压喷丸纳米化及其耐磨性研究[J]. 热加工工艺, 2009(14): 36—39.
- LIU Li-li, JIE Xiao-hua, YU Neng, et al. Study on Surface Nano-crystallization by Adding Pressure Shot Peening and Its Effect on Wear Resistance[J]. Material & Heat Treatment, 2009(14): 36—39.
- [14] 刘阳, 吕晓仁, 刘刚, 等. Q235 钢高能喷丸纳米化表面的摩擦磨损行为[J]. 摩擦学学报, 2010(5): 10—13.
- LIU Yang, LYU Xiao-ren, LIU Gang, et al. Wear Behaviors of Nanocrystallization Surface of Q235 Steel by High Energy Peening[J]. Tribology, 2010(5): 10—13.
- [15] 田峰, 杨辉. 40Cr 钢表面高能喷丸纳米化及其耐磨性能[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 15—17.
- TIAN Feng, YANG Hui. Experimental Study on Wear Behavior of Nano-crystallization Surface of 40Cr[J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 15—17.
- [16] 冯帅, 赵秀娟, 陈春焕, 等. GH4169 高能喷丸表面纳米化的研究[J]. 新技术新工艺, 2008(6): 89—91.
- FENG Shuai, ZHAO Xiu-juan, CHEN Chun-huan, et al. Research of GH4169 Energy Shot Surface Nanocrystallization[J]. New Technologies & New Process, 2008(6): 89—91.
- [17] 杨祥伟, 揭晓华, 郑向新, 等. 7050 铝合金表面亚微米化及其显微硬度的研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(4): 110—111.
- YANG Xiang-wei, JIE Xiao-hua, ZHENG Xiang-xin, et al. Study on Surface Micro-crystallization of 7050 Al Alloy and Its Microhardness[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(4): 110—111.
- [18] 胡兰青, 李茂林, 王科, 等. 铝合金表面纳米化处理及显微结构特征[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(12): 2016—2020.
- HU Lan-qing, LI Mao-lin, WANG Ke, et al. Microstructure and Characterization of Surface Nanocrystallization of Aluminum Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(12): 2016—2020.
- [19] DAI K, VILLEGAS J, SHAW L. An Analytical Model of the Surface Roughness of an Aluminum Alloy Treated with a Surface Nanocrystallization and Hardening Process[J]. Scripta Materialia, 2005(52): 259—263.
- [20] 温爱玲, 陈春焕, 郑德有, 等. 高能喷丸表面纳米化对工业纯钛组织性能的影响[J]. 表面技术, 2003, 32(3): 16—18.
- WEN Ai-ling, CHEN Chun-huan, ZHENG De-you, et al. Effects of Surface Nanocrystallization Induced by High Energy Shot Peening on Commercial Pure Titanium[J]. Surface Technology, 2003, 32(3): 16—18.
- [21] 李东, 陈怀宁, 刘刚, 等. SS400 钢对接接头表面纳米化及其对疲劳强度的影响[J]. 焊接学报, 2002, 23(2): 18—21.
- LI Dong, CHEN Huai-ning, LIU Gang, et al. Surface Nanocrystallization of SS400 Steel Butt Welded Joint and Its Effect on the Fatigue Strength[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(2): 18—21.
- [22] 李东, 陈怀宁, 徐宏. 表面纳米化对 SS400 钢焊接接头应力腐蚀性能的影响[J]. 焊接学报, 2009, 30(3): 65—69.
- LI Dong, CHEN Huai-ning, XU Hong. Effect of Surface Nanocrystallization on Stress Corrosion Cracking of SS400 Welded Joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(3): 65—69.
- [23] 逯瑶, 陈芙蓉, 解瑞军. 7A52 铝合金焊接接头表面纳米化前后的性能分析[J]. 焊接学报, 2011, 32(1): 57—60.
- LU Yao, CHEN Fu-rong, XIE Rui-jun. Properties of 7A52 Aluminum Alloy Welded Joint before and after Surface Nanocrystallization[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(1): 57—60.
- [24] 张罡, 孙苑, 赵秀娟, 等. 16MnR 焊接接头高能喷丸表面强化的研究[J]. 新技术新工艺, 2010(8): 80—83.
- ZHANG Gang, SUN Yuan, ZHAO Xiu-juan, et al. Research on HESP Surface Enhancement of 16MnR Welded Joints[J]. New Technology & New Process, 2010(8): 80—83.
- [25] 韩靖, 盛光敏, 周小玲, 等. 表面纳米化钛合金与不锈钢扩散连接[J]. 稀有金属材料与工程, 2010(1): 9—11.
- HAN Jing, SHENG Guang-min, ZHOU Xiao-ling, et al. Diffusion Bonding of Titanium Alloy and Stainless Steel with Surface Nanocrystallization[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010(1): 9—11.
- [26] 韩靖, 盛光敏, 周小玲, 等. 表面纳米化钛合金与不锈钢脉冲加压扩散连接[J]. 焊接学报, 2008, 29(10): 37—39.
- HAN Jing, SHENG Guang-min, ZHOU Xiao-ling, et al. Impact Pressure Diffusion Bonding on Surface Nanocrystallization Titanium Alloy Stainless Steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(10): 37—39.
- [27] 周小玲, 盛光敏, 韩靖, 等. 表面自纳米化对钛合金与不锈钢的扩散焊接的影响[J]. 核动力工程, 2009, 30(1): 78—81.
- ZHOU Xiao-ling, SHENG Guang-min, HAN Jing, et al. Effect of Surface Self-nanocrystallization on Diffusion Bonding between Titanium Alloy and Stainless Steel[J]. Nuclear Power Engineering, 2009, 30(1): 78—81.
- [28] 张洪旺, 刘刚, 黑祖昆, 等. 表面机械研磨诱导 AISI304 不锈钢表层纳米化 I. 组织与性能[J]. 金属学报, 2003, 39

- (4):342—346.
- ZHANG Hong-wang, LIU Gang, HEI Zu-kun, et al. Surface Nanocrystallization of AISI304 Stainless Steel Induced by Surface Mechanical Attrition Treatment I. Structure and Property[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2003, 39(4):342—346.
- [29] 王宇, 黄敏, 高惠临, 等. 表面机械研磨处理对 X80 管线钢焊接接头组织与性能的影响[J]. *机械工程材料*, 2009(8):50—53.
- WANG Yu, HUANG Min, GAO Hui-lin, et al. Influence of Surface Mechanical Attrition Treatment on Microstructure and Properties of X80 Pipeline Steel Welded Joints[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2009(8):50—53.
- [30] 张淑兰, 陈怀宁, 林泉洪, 等. 工业纯钛焊接接头的表面纳米化及其性能[J]. *焊接学报*, 2005, 26(3):73—76.
- ZHANG Shu-lan, CHEN Huai-ning, LIN Qun-hong, et al. Surface Nanocrystallization of Commercial Pure Titanium Welded Joints and Its Influence on Properties[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 26(3):73—76.
- [31] 熊天英, 李铁藩, 吴杰, 等. 超音速微粒轰击金属材料表面纳米化方法: 中国, 01128225. 8[P]. 2001-12-08.
- XIONG Tian-ying, LI Tie-fan, WU Jie, et al. Method of Supersonic Particle Bombardment for Metal Surface Nanocrystallization: China, 01128225. 8[P]. 2001-12-08.
- [32] 熊天英, 刘志文, 李智超, 等. 超音速微粒轰击金属表面纳米化新技术[J]. *材料导报*, 2003, 17(3):69—71.
- XIONG Tian-ying, LIU Zhi-wen, LI Zhi-chao, et al. Supersonic Fine Particles Bombarding a Novel Surface Nanocrystallization Technology[J]. *Materials Review*, 2003, 17(3):69—71.
- [33] 熊天英, 王吉孝, 金花子, 等. 0Cr18Ni9Ti 钢焊接接头表面纳米化及接头抗 H₂S 应力腐蚀性能的研究[J]. *材料保护*, 2005, 38(1):13—16.
- XIONG Tian-ying, WANG Ji-xiao, JIN Hua-zi, et al. Surface Nanocrystallization of 0Cr18Ni9Ti Stainless Steel Welding Joint and Its Resistance to Stress Corrosion of Hydrogen Disulfide[J]. *Materials Protection*, 2005, 38(1):13—16.
- [34] 王吉孝, 王志平, 霍树斌, 等. 16MnR 钢焊接接头表面纳米化及接头抗 H₂S 应力腐蚀性能[J]. *焊接*, 2005(2):13.
- WANG Ji-xiao, WANG Zhi-ping, HUO Shu-bin, et al. Surface Nanocrystallization of 16MnR Low Alloy Steel Welded Joints and Investigation on Resisting H₂S Stress Corrosion of Welding Joint[J]. *Welding and Joining*, 2005(2):13.
- [35] 谭晓明, 金平, 蔡增杰, 等. 腐蚀损伤对典型铝合金结构疲劳寿命的影响研究[J]. *装备环境工程*, 2013, 10(6):9—11.
- TAN Xiao-ming, JIN Ping, CAI Zeng-jie, et al. Relationship between the Corrosion Influencing Factor of Fatigue Life and the Corrosion Damage Size of Aircraft Airframe Critical Structure[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2013, 10(6):9—11.
- [36] 王志平, 王吉孝, 纪朝辉, 等. 表面纳米化 0Cr18Ni9Ti 焊接接头抗应力腐蚀性能[J]. *焊接学报*, 2007, 28(1):5—8.
- WANG Zhi-ping, WANG Ji-xiao, JI Zhao-hui, et al. Surface Nanocrystallization of 0Cr18Ni9Ti Steel Welded Joints and Its Stress Corrosion Resistance[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, 28(1):5—8.
- [37] 曹凤国. 超声加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005:236—240.
- CAO Feng-guo. *Ultrasonic Machining Technology*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005:236—240.
- [38] 何柏林, 余皇皇. 超声冲击表面纳米化研究的发展[J]. *材料热处理技术*, 2010(18):34—36.
- HE Bai-lin, YU Huang-huang. Development of Ultrasonic Peening Surface Nano-crystallization[J]. *Material & Heat Treatment*, 2010(18):34—36.
- [39] 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 Li-bao, et al. Fabrication and Characterization of Nanocrystallized Surface Layer of J507 Weld by Ultrasonic Impact Peening[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(1):101—104.
- [40] 饶德林, 陈立功, 倪纯珍, 等. 超声冲击对焊接结构残余应力的影响[J]. *焊接学报*, 2005, 26(4):48—50.
- RAO De-lin, CHEN Li-gong, NI Chun-zhen, et al. Effects on the Welding Structure Residual Stress by Ultrasonic Impact[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 26(4):48—50.
- [41] HAAGENSEN P J, STATNIKOV E S, LOPEZ-MARTINEZ L. Introductory Fatigue Tests on Welded Joint in High Strength Steel and Aluminum Improved by Various Methods Including Ultrasonic Impact Treatment (UIT) [J]. *International Institute of Welding*, 1998, 13:1748—1758.
- [42] GALTIER A, STATNIKOV E S. The Influence of Ultrasonic Impact Treatment on Fatigue Behavior of Welded Joints in High-strength Steel[J]. *Welding in the World*, 2004, 48:61—66.
- [43] 刘超. 超声冲击强化 AISI304 奥氏体不锈钢实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- LIU Chao. Study on Strengthening of AISI304 Austenite Stainless Steel by Ultrasonic Impact Treatment[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [44] 何柏林, 史建平, 颜亮, 等. 超声冲击对钢轨钢组织与性

- 能的影响[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(4): 58—62.
- HE Bo-lin, SHI Jian-ping, YAN Liang, et al. The Influence of the Ultrasonic Properties Impact on the Microstructure and Performance of Rail Steel[J]. China Railway Science, 2009, 30(4): 58—62.
- [45] 杨秋林. 超声冲击对含缺陷焊接接头疲劳性能的影响[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- YANG Qiu-lin. The Effect of the Ultrasonic Impact Peening on Fatigue Performance of the Joints with Weld Defect[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [46] 王东坡, 尹丹青. 超声冲击法提高 T 型焊接管接头疲劳性能[J]. 天津大学学报, 2006, 39(6): 757—762.
- WANG Dong-po, YIN Dan-qing. Improvement of the Fatigue Performance of Welded T-shape Tubular Joints by Ultrasonic Peening[J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(6): 757—762.
- [47] ZHANG Jin-wang, WANG Wen-xian, ZHANG Lan, et al. Improving the Fatigue Property of Welded Joints for AZ31 Magnesium Alloy by Ultrasonic Peening Treatment [J]. China Welding, 2008(2): 20—26.
- [48] 何柏林. 超声冲击对镁合金焊接接头疲劳性能的研究现状[J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(3): 73—76.
- HE Bo-lin. Researching Status and Developing Trend of the Effect of Ultrasonic Impact on Fatigue Properties of Magnesium Weld Joints[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2011, 28(3): 73—76.
- [49] HUO Li-xing, WANG Dong-po, ZHANG Yu-feng. Investigation of the Fatigue Behaviors of the Welded Joints Treated by TIG Dressing and Ultrasonic Peening under Variable-amplitude Load [J]. International Journal of Fatigue, 2005(27): 95—101.
- [50] ROY S, FISHER J W, BEN T Y. Fatigue Resistance of Welded Details Enhanced by Ultrasonic Impact Treatment (UIT) [J]. International Journal of Fatigue, 2003(25): 1239—1247.
- [51] 王东坡, 周达. 超声冲击法提高焊接接头疲劳强度的机理分析[J]. 天津大学学报, 2007, 40(5): 623—628.
- WANG Dong-po, ZHOU Da. Mechanism Analysis of Fatigue Strength Improvement of Welded Joints by Ultrasonic Peening Method [J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(5): 623—628.
- [52] 李占明, 朱有利, 王侃, 等. 2A12 铝合金焊接接头超声冲击强化机理分析[J]. 焊接学报, 2008, 29(9): 55—58.
- LI Zhan-ming, ZHU You-li, WANG Kan, et al. Analysis of Strengthening Mechanism of Ultrasonic Impact Treatment of 2A12 Aluminum Alloy Weld Joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(9): 55—58.
- [53] 朱有利, 李占明, 何嘉武, 等. 超声冲击处理 2A12 铝合金焊缝表层微观组织结构变化[J]. 材料工程, 2009(7): 21—24.
- ZHU You-li, LI Zhan-ming, HE Jia-wu, et al. Microstructure Changes of 2A12 Aluminum Alloy Weld Bead Surface Layer by Ultrasonic Impact Treatment [J]. Journal of Materials Engineering, 2009(7): 21—24.
- [54] 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.
- [55] 李占明, 朱有利, 王侃. 超声冲击处理对 2A12 铝合金焊接接头组织的影响[J]. 金属热处理, 2008, 33(7): 53—56.
- LI Zhan-ming, ZHU You-li, WANG Kan. Influence of Ultrasonic Impact Treatment on Microstructure of 2A12 Aluminum Alloy Welded Joint [J]. Heat Treatment of Metals, 2008, 33(7): 53—56.
- [56] 叶雄林, 朱有利, 马丽丽, 等. 超声冲击处理改善 22SiMn2TiB 钢焊接接头的疲劳性能[J]. 机械工程学报, 2009, 30(1): 101—104.
- YE Xiong-lin, ZHU You-li, MA Li-li, et al. Fatigue Performance Improvement of 22SiMn2TiB Steel Welded Joint by Ultrasonic Impact Treatment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 30(1): 101—104.
- [57] 毕凤琴, 张春成, 李红翠, 等. 激光冲击强化技术的发展及应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(1): 101—104.
- BI Feng-qin, ZHANG Chun-cheng, LI Hong-cui, et al. Development and Application of Laser Shock Processing [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(1): 101—104.
- [58] 肖红军, 彭云, 马成勇, 等. 激光表面改性[J]. 表面技术, 2005, 34(5): 10—11.
- XIAO Hong-jun, PENG Yun, MA Cheng-yong, et al. Surface Modification of Laser [J]. Surface Technology, 2005, 34(5): 10—11.
- [59] 钱绍祥, 殷苏民, 张凤霞, 等. 搭接率对 AISI202 焊接接头激光冲击应力分布的影响[J]. 表面技术, 2013, 41(6): 15—17.
- QIAN Shao-xiang, YIN Su-min, ZHANG Feng-xia, et al. Effects of Overlapping Rate on Stress Distribution of AISI202 Welding Joint by Laser Shock Processing [J]. Surface Technology, 2013, 41(6): 15—17.
- [60] 孙凯, 赵琳, 张莹莹, 等. 激光扫描速度对镁合金改性层

- 组织的影响[J]. 表面技术, 2012, 41(2): 53—54.
- SUN Kai, ZHAO Lin, ZHANG Ying-ying, et al. Influence of Laser Scanning Speed on Modified Layer Organization of Magnesium Alloy [J]. Surface Technology, 2012, 41(2): 53—54.
- [61] 孔德军, 周朝政, 胡爱萍. 激光冲击处理对 X70 管线钢焊接接头力学性能的影响[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(5): 1507—1512.
- KONG De-jun, ZHOU Chao-zheng, HU Ai-ping. Effect of Laser Shock on the Mechanical Properties of Weld Joint of X70 Steel Pipeline [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2011, 41(5): 1507—1512.
- ~~~~~
- (上接第 63 页)
- [3] CARLOS E, RESTREP O, JEFFREY S. Causes, Cost Consequences, and Risk Implications of Accidents in US Hazardous Liquid Pipeline Infrastructure [J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2009, 2(1/2): 38—50.
- [4] 张明奇. 埋地输油管道外防腐层的检测与评估[J]. 管道技术与设备, 2003(6): 26—28.
- ZHANG Ming-qi. Detection and Assessment of Outer Corrosion Resistant Layer of Buried Oil Pipeline [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2003(6): 26—28.
- [5] 宋光铃, 曹楚南, 林海潮, 等. 土壤腐蚀性评价方法综述[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1993, 5(4): 268—277.
- SONG Guang-ling, CAO Chu-nan, LIN Hai-chao, et al. Review on the Evaluation Methods of Soil Corrosivity [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1993, 5(4): 268—277.
- [6] 吴锡合. 西气东输新疆段压气站埋地管道腐蚀与防腐技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2010.
- WU Xi-he. Research on Corrosion and Anti-corrosion Technology of Buried Pipelines of Compressor Stations in Xinjiang Section of West-east Gas Pipeline [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2010.
- [7] 黄亮亮, 孟惠民, 黄晓林, 等. X60 管线钢在盐碱性土壤中的腐蚀行为与机理[J]. 油气储运, 2013, 32(3): 257—262.
- HUANG Liang-liang, MENG Hui-min, HUANG Xiao-lin, et al. Corrosion Behaviors and Mechanism of X60 Pipe Steel in Saline and Alkali Soil [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(3): 257—262.
- [8] 冯佃臣. Q235 钢和 X70 管线钢在包头土壤中的腐蚀规律研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2005.
- FENG Dian-chen. Study of Corrosion Behavior of Q235 and X70 Steels in Baotou Soils [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2005.
- [62] 周磊, 汪诚, 周留成, 等. 激光冲击表面强化对焊接接头力学性能的影响[J]. 中国表面工程, 2010(5): 10—13.
- ZHOU Lei, WANG Cheng, ZHOU Liu-cheng, et al. The Effect of Laser Shock Surface Processing on Mechanical Properties of Welded Joints [J]. China Surface Engineering, 2010(5): 10—13.
- [63] 周留成, 周磊, 李应红, 等. 激光冲击强化对不锈钢焊接接头拉伸性能的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(4): 52—54.
- ZHOU Liu-cheng, ZHOU Lei, LI Ying-hong, et al. Effect of Laser Shock Processing on Tensile Strength of Welded Joints [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(4): 52—54.
- [9] XIN Su, YIN Zhen-xing. Corrosion of 16Mn Line Pipe Steel in a Simulated Soil Solution and the Implication on Its Long-term Corrosion Behavior [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(2): 498—504.
- [10] LIANG P. Effects of Microstructure on Corrosion of X70 Pipe Steel in an Alkaline Soil [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009, 18(2): 216—220.
- [11] HEMBARAI O V, ANDREIKIV O E. Effect of Hydrogenation of the Walls of Oil-and-Gas Pipelines on Their Soil Corrosion and Service Life [J]. Materials Science, 2012, 47(5): 598—607.
- [12] 胥聪敏, 陈勇, 王玉柱, 等. X80 管线钢在东南酸性土壤环境中的电化学腐蚀特征研究[J]. 热加工工艺, 2009, 38(24): 1—4.
- XU Cong-min, CHEN Yong, WANG Yu-zhu, et al. Study on Electrochemical Corrosion Characteristics of X80 Pipeline Steel in Simulated Medium of Southeastern Acid Soil [J]. Hot Working Technology, 2009, 38(24): 1—4.
- [13] 席艳君, 孙成, 李洪锡, 等. 酸性土壤腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(4): 27—28.
- XI Yan-jun, SUN Cheng, LI Hong-xi, et al. Corrosivity of Acidic Soil [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1993, 2002, 14(4): 27—28.
- [14] LIU Zhi-yong, DU Cui-wei, ZHANG Xin, et al. Effect of pH Value on Stress Corrosion Cracking of X70 Pipeline Steel in Acidic Soil Environment [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2013, 26(4): 489—496.
- [15] XIAO Kui, ZHANG Xin, DONG Chao-fang, et al. Localized Electrochemical Impedance Spectroscopy Study on the Corrosion Behavior of Fe-Cr Alloy in the Solution with Cl^- and SO_4^{2-} [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 27(1): 27—32.