

## 表面质量控制及检测

## 超声冲击对焊接接头表面质量的影响

邓海鹏, 于影霞

(华东交通大学, 南昌 330013)

**摘要:** 焊接是船舶、飞机、汽车、火车、压力容器、起重设备等大结构、复杂结构的重要加工方法。焊接结构的失效尤其是疲劳失效大多起始于焊接接头表面, 因此对焊接接头表面质量的优化可改善焊接结构的性能, 延长使用寿命。综述了超声冲击在焊接接头表面质量改进中的研究现状。分析了超声冲击对焊接接头表面几何形状的影响, 指出超声冲击增大焊趾处圆弧过渡半径、降低应力集中系数和减小缺口效应的作用。总结了超声冲击对焊接接头表面残余应力的影响, 指出超声冲击通过宏观塑性变形引发微观位错运动和增殖的机制, 由此在焊接接头表面和次表面产生有益的残余压应力。阐述了超声冲击对焊接接头表面组织形态的影响, 指出超声冲击在产生宏观织构和细化晶粒方面的作用。简述了超声冲击对提高焊接接头显微硬度和消除表面缺陷等方面的有利影响, 同时指出合理的超声冲击参数才能降低焊接接头的表面粗糙度。最后, 分析了目前研究存在的问题并对未来研究方向进行了展望。

**关键词:** 焊接接头; 疲劳; 表面质量; 超声冲击; 焊趾; 表面强化

**中图分类号:** TG407 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)02-0208-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.02.035

## Effect of Ultrasonic Impact on the Surface Quality of Welded Joint

DENG Hai-peng, YU Ying-xia

(East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**ABSTRACT:** Welding is an important processing method for ships, aircraft, automobiles, trains, pressure vessels, lifting equipment, and other large structures and complex structures. The failure of welded structure, especially the fatigue failure, starts from the surface of welded joint, so the optimization of surface quality of welded joint can improve the performance of welded structure and prolong its service life. The research status of ultrasonic impact treatment on the surface quality improvement of welded joint was reviewed. The influence of ultrasonic impact treatment on the surface geometry of welded joint was analyzed, and the effect of ultrasonic impact on the increase of arc transition radius, the decline of stress concentration factor and the reduction of notch effect were pointed out. The effect of ultrasonic impact treatment on surface residual stress was summarized. It was found that ultrasonic impact treatment caused microscopic dislocation motion and proliferation through macroscopic plastic deformation, resulting in beneficial compressive residual stress in the welding joint surface and sub surface. The influence of ultrasonic impact treatment on the surface micro structure of welded joint was described. The effect of ultrasonic impact on the macro texture and grain size was proposed. The advantages of ultrasonic impact on improving the micro hardness of welded joint and eliminating the surface defects were put forward, and the reasonable ultrasonic impact parameters were pointed out to reduce the surface roughness of the welded joint. Finally, the existing problems were analyzed and the future re-

收稿日期: 2016-06-28; 修订日期: 2016-08-25

**Received:** 2016-06-28; **Revised:** 2016-08-25

**基金项目:** 国家自然科学基金(51265013); 江西省工业支撑重点项目(20161BBE40072); 江西省自然科学基金(20151BAB206007)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China(51265013), Key Projects of Industrial Support in Jiangxi Province(20161BBE40072), Natural Science Foundation of Jiangxi(20151BAB206007)

**作者简介:** 邓海鹏(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为焊接结构与疲劳。

**Biography:** DENG Hai-peng(1992—), Male, Master graduate student, Research focus: welded structure and fatigue.

**通讯作者:** 于影霞(1964—), 女, 副教授, 主要研究焊接接头的表面质量改进。

**Corresponding author:** YU Ying-xia(1964—), Female, Associate professor, Research focus: surface quality development of welded joints.

search directions were prospected.

**KEY WORDS:** welded joint; fatigue; surface quality; ultrasonic impact treatment; weld toe; surface strengthening

焊接是船舶、飞机、汽车、火车、压力容器、起重设备等大结构、复杂结构的重要加工方法。由于在焊接接头处常常存在各类焊接缺陷、应力集中与拉伸残余应力,从而使接头处成为整个焊接结构的薄弱环节,因此焊接接头的质量对于焊接结构运行的可靠性和使用寿命起着决定性的作用。许多研究表明,焊接结构的失效尤其是疲劳失效大多起始于接头表面,因此对接头表面质量的优化可改善焊接结构性能,延长使用寿命。焊接接头表面质量不仅包括接头几何形状(如余高、焊趾过渡角及过渡半径等)、粗糙度、表面缺陷(气孔、咬边、裂纹等)等表面形貌特征,也包含接头表面的残余应力、显微硬度、塑性变形、组织形态等特征<sup>[1-6]</sup>。

超声冲击(Ultrasonic impact treatment, UIT)以较大功率的超声作为驱动能量,通过压电陶瓷等把电能转变为机械能,并驱动冲击头撞击接头表面。经过超声冲击后,接头表面产生较大的塑性变形,接头及其附近表层组织细化,并且表面细化组织沿厚度方向呈梯度变化,在使用过程中不会发生剥层和脱落。同时,焊趾或焊缝表面引入残余压应力,改善焊趾几何形状,减少应力集中程度,对焊接接头的性能产生重要的影响<sup>[7-12]</sup>。目前 UIT 技术主要用于改善焊接接头的疲劳强度。早期的研究如 HAAGENSEN 和 STATNIKOV 等<sup>[13]</sup>对高强钢和铝合金焊接接头超声冲击处理后的 S-N 曲线进行了试验测定,王东坡等<sup>[14]</sup>在国内最早开始超声冲击设备的相关研究,随后许多研究者<sup>[15-23]</sup>就 UIT 对焊接接头表面质量的影响展开了相关研究。

## 1 超声冲击对焊接接头表面几何形状的影响

焊接工艺产生的接头余高会引起构件接头截面形状突变,导致突变处的应力集中较大,尤其是焊趾部位表现更为突出,对接头性能产生不利的影响。另外,焊缝金属与母材金属间的表面过渡连接形状对接头性能也有重要影响。

超声冲击可以改善焊接接头的表面形貌。经过超声冲击处理,改变了原始焊态接头表面的鱼鳞纹状的形貌特征,焊接接头的表面变得相对平坦。在母材与焊缝连接处可以形成形状相对良好、连续而且均匀的圆弧过渡,同时过渡圆弧的半径变大<sup>[14,16]</sup>。接头应力集中是决定焊接接头性能的重要因素。焊趾应力集中

程度越大,越容易产生裂纹,接头强度也就越低。通常情况下,可以通过应力集中系数对接头的应力集中程度来进行表征。研究与实验表明,在接头类型和有效尺寸一定的条件下,焊接接头处应力集中系数的大小主要与接头表面的几何参数有关<sup>[24]</sup>。以对接接头为例,其接头应力集中系数的大小主要取决于焊缝余高和焊趾区的过渡半径以及夹角。在一定范围内,减小余高和焊缝向母材的过渡角、增加焊趾区过渡半径,都会使应力集中系数减小,从而使缺口效应也减小。

对 16Mn 钢焊接接头进行超声冲击的试验表明,接头处的过渡半径从原始焊态的 0.2~0.4 mm 增加为超声冲击之后的 1.6~2.0 mm;十字接头和对接接头的有效应力集中系数分别比原始焊态下降了 25%和 23%<sup>[15]</sup>。TC4 钛合金焊接接头在经过超声冲击处理后,接头处的过渡半径从原始焊态的 0.12~0.96 mm 增大到 1.3~3.3 mm,有效应力集中系数下降了近 32.0%,由 4.1 减小为 2.79<sup>[25]</sup>。Q370qE 钢焊接接头经超声冲击处理后,焊缝宽度变化不明显,余高有所降低,焊趾区过渡半径明显增大 66%,过渡角由 38°减为 27°<sup>[26]</sup>。超声冲击处理把超声频的机械振动传递给焊接接头,使接头表面产生一定深度的塑变层,使余高变小,同时可通过冲击头的冲击调整焊趾与母材连接处的过渡,使焊趾角与焊趾半径增大,进而降低了应力集中程度。增大过渡半径和减小过渡角使焊趾平滑过渡是超声冲击改善接头表面形貌、降低应力集中的主要表现形式。

## 2 超声冲击对焊接接头表面残余应力的影响

焊接后的接头在三维空间产生冷却收缩,因此在接头中也应存在 3 个方向的残余应力。在厚度相对较小的焊接结构中,厚度方向的残余应力很小,一般不予考虑,因此在超声冲击试验研究中,一般只考虑由于焊缝纵向收缩而形成的纵向残余应力和垂直于焊缝方向产生的横向残余应力。一般而言,残余拉应力对焊接结构的性能(尤其是疲劳性能)产生不利影响,而残余压应力往往是有利的。由于在焊接接头中可能既存在残余拉应力又存在残余压应力,倘若能将残余压应力调整到位于接头表面或应力集中区,就会非常有利;如果在接头表面或应力集中区存在着残余拉应力,则应想方设法消除。

超声冲击过程是高频能量和冲击应力作用于焊

接头表面,使其产生塑性变形,从而在接头内残余应力的峰值处产生局部的屈服而迫使应力峰值降低的过程<sup>[27]</sup>。伴随着冲击过程的持续进行,在接头表面和次表面内产生有益的残余压应力。许多学者<sup>[28—32]</sup>对超声冲击调整接头残余应力场进行了研究。

饶德林等<sup>[31]</sup>对 Q235 钢埋弧焊接头全范围冲击和焊趾冲击 2 种超声冲击工艺的对比试验表明,超声冲击能够在焊接接头表面形成较高的压应力以抵消焊接过程产生的拉应力;对接头处的冲击不但影响了接头表面,使其产生残余压应力,而且也影响了邻近的热影响区,使得热影响区的残余应力降低。吕宗敏等<sup>[33]</sup>研究表明,16MnR 焊接接头焊趾表面经超声冲击后在不同方向残余压应力的变化不同:在冲击时间为 6 min 时纵向残余压应力达到最大值,延长冲击时间,表面残余压应力减小并在接近最大值的 1/2 处趋于稳定;随着冲击时间的延长,横向残余压应力增大,在冲击时间为 3 min 时残余压应力达到最大值,随后焊趾表面残余压应力呈阶梯式降低。李进一等<sup>[34]</sup>建立了 AISI304 奥氏体不锈钢板材超声冲击残余应力场的三维有限元模型,分析表明,冲击速度和冲击针头直径的变化与残余应力及应力层深度的变化具有明显的正相关,并且随着冲击次数的增加,残余压应力层深度增厚,但形成的最大残余压应力值减小。

关于超声冲击处理对焊接接头残余应力的影响机制,多数研究者认为是由于宏观塑性变形引起的微观位错运动与增殖所诱发。要完成由高能态的不稳定状态到低能态的稳定状态的转变,必然引发微观塑性变形,从而使得焊接接头处的残余拉应力得以释放、降低或消除<sup>[35]</sup>。

### 3 超声冲击对焊接接头表面组织形态的影响

对普通低碳钢、高强钢、铝合金、钛合金<sup>[36—41]</sup>等焊接接头超声冲击处理的试验表明,剧烈的塑性变形使冲击区金属表层的显微组织发生了显著变化,晶粒尺寸明显减小,形成了细晶强化层。如 22SiMn2TiB 超高强钢焊接接头超声冲击处理后,组织细化层深达到 50  $\mu\text{m}$ ,表层晶粒尺寸平均值在 63 ~ 82 nm 范围<sup>[39]</sup>;16MnR 焊接接头焊趾经超声冲击处理后,在焊趾及其附近表面区域获得 100 nm 以下的纳米组织,晶粒趋向呈随机分布<sup>[36]</sup>。2A12 铝合金焊接接头经超声冲击处理后,接头的熔合区变窄,并形成了致密的塑变层,塑变层深达 300  $\mu\text{m}$  (距接头表面),同时产生了平行于接头表面的宏观织构,显微组织细化<sup>[40]</sup>。

超声冲击焊接接头表面晶粒细化的实质是超声冲击处理诱发接头表面发生剧烈塑性变形,使大尺寸晶粒“碎裂”并形成细小晶粒的过程。这种“碎裂”是在

位错、孪晶等不同的微观变形方式下逐渐进行的,先是在大尺寸晶粒内部转变成小角亚晶界,然后小角晶界继续吸收位错逐渐发展成大角晶界,如此循环往复,从而碎化成小晶粒的过程<sup>[42]</sup>。在超声处理工艺及参数一定的情况下,接头的塑性变形方式和晶粒细化机理主要与其层错能和滑移系数目有关<sup>[43—44]</sup>,二者的差异决定了不同材料晶粒细化的具体过程。

### 4 超声冲击对焊接接头显微硬度、粗糙度及表面缺陷的影响

原始焊态接头的焊缝区、热影响区及母材区的显微硬度虽有差异,但各区域硬度沿厚度方向的变化均比较平缓。但是经超声冲击处理后,焊接接头表层形成了一层致密的塑性变形层,并产生加工硬化效应,整个焊接接头的表层及次表层显微硬度得到了显著提高,而且硬度沿厚度方向呈梯度变化。李东等<sup>[45]</sup>对 J507 堆焊层及 SS400 钢对接接头超声冲击处理前后显微硬度的变化进行的测定表明,表面细晶层比中心区域的显微硬度提高约 1.4 倍。陈芙蓉等<sup>[46]</sup>研究表明 7A52 铝合金焊接接头经过超声冲击处理后,与未处理相比热影响区与焊缝区的最高显微硬度提高了 21.5%。

在接头部位存在着许多不同类型的缺陷,导致疲劳裂纹早期开裂,使性能急剧下降。焊接缺陷大体上可分为两大类:面状缺陷(如裂纹等)和体积型缺陷(气孔、夹渣等)。焊接缺陷对接头性能的影响与缺陷的种类、方向和位置有关。超声冲击引起的塑性变形还可以改善焊接接头焊缝中的部分表面微缺陷(未焊透、咬边、气孔、缩松、微裂纹等),同时引入残余压应力,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,减少了焊趾表面开裂<sup>[47—49]</sup>。

尽管超声冲击处理具有以上优点,但经 UIT 处理后的接头表面多数情况下会因冲击形成的塑性压痕使被处理工件表面比较粗糙<sup>[50]</sup>,并且塑变层深度并不会随超声冲击强度的提高而无限增加;冲击强度相对较高时,接头表层开始出现微观缺陷(表面微裂纹等),使表面质量劣化<sup>[51—52]</sup>。尹丹青<sup>[49]</sup>的研究也证实了以上观点:原始焊态接头中的疲劳裂纹主要起源于焊趾表面或次表面的夹杂物处。超声冲击处理态的接头,裂纹部分起源于夹杂物或夹渣微小缺陷,部分起源于由于超声处理的冲击挤压作用造成的表层或次表层微裂纹。

### 5 总结与展望

超声冲击工艺作用于焊接接头不仅能够改善接头表面的几何外形、降低接头处的应力集中程度;还

能调节接头及其附近的残余应力场,在接头表面形成对接头性能有益的压应力;同时又能使接头表层组织细化,消除部分焊接微缺陷,提高焊接接头的性能,并且设备轻巧、使用方便、效率高、成本低,适用于各种接头各种场合。

虽然国内外就超声冲击处理对焊接接头表面质量的影响进行了大量的研究和探索,但仍存在一些亟待解决的问题:

1) 现有研究中,超声冲击对焊接接头表面残余应力影响的研究比较多,而超声冲击对接头(包括焊缝、熔合区及热影响区)微观组织结构以及接头缺陷的影响机理的研究比较少。虽然现有研究表明超声冲击诱发的接头表面塑性变形是由于位错、孪晶的增殖及运动引起,但不同结构金属中这种增殖及运动具有很大的差异,尤其是镁合金等密排六方结构金属,因此超声冲击对该类材料焊接接头表面质量的作用机理有待于进一步加深研究。系统研究接头表面超声冲击处理后,应全面考虑焊接残余应力、接头应力集中、微观组织、表面硬度、表面微缺陷等因素的接头综合质量变化情况,为超声冲击工艺优化奠定理论基础。

2) 现有研究对超声冲击工艺参数的优化问题很少涉及。这也是制约超声冲击技术应用于实际焊接结构生产的关键所在。超声冲击技术可通过调整其工艺参数(冲击电流、冲击时间、冲击方式、冲击头形状与尺寸)来改善残余应力的分布、表面组织、硬度、粗糙度、微缺陷。已有的研究表明,工艺参数的变化与接头表面质量的变化不是永远正相关的。当冲击电流或冲击时间达到某个临界值后,残余应力、应力集中、表面硬度等数值变化很少甚至基本无变化,此时,反而会产生微裂纹等新的缺陷。由于不同类型晶体结构材料内部的位错、孪晶要克服各种阻力(点阵阻力、界面阻力、溶质原子阻力),故运动所需能量不同,所以冲击电流和冲击时间的临界值也会有差异,因此应针对不同材料焊接接头,进行超声冲击工艺参数的优化试验,为将超声冲击工艺应用于焊接结构的实际生产中奠定基础。

3) 由于受限于残余应力测试仪器、测试方法及测试手段等,目前关于超声冲击处理对接头残余应力变化的影响情况还不是很准确,部分研究得到的结果差别很大,这给超声冲击工艺优化工作带来了困难,尤其是当焊接结构受到腐蚀介质、高温等环境因素的影响时,因此,与超声冲击技术相适应的残余应力的测量技术和测试手段也应同步发展和提高。

4) 在以上研究的基础上,开展有关超声冲击技术应用的工艺标准、设备标准和质量控制标准的研究,推动超声冲击表面强化技术在焊接结构制造及维修中的应用。

## 参考文献:

- [1] 何柏林, 邓海鹏. 表面完整性研究现状及发展趋势[J]. 表面技术, 2015, 44(9): 140—146.  
HE Bo-lin, DENG Hai-peng. Research Status and Development Trend of Surface Integrity[J]. Surface Technology, 2015, 44(9): 140—146.
- [2] STATNIKOV E V, KOROLKOV O V. Physics and Mechanism of Ultrasonic Impact[J]. Ultrasonics, 2006, 44: 533—538.
- [3] RAJMOHAN T, PALANIKUMAR J P. Analysis of Surface Integrity in Drilling Metal Matrix and Hybrid Metal Matrix Composites[J]. Journal of Material Science and Technology, 2012, 28(8): 761—768.
- [4] CAO Z W, XU H Y, ZOU S K, et al. Investigation of Surface Integrity on TC17 Titanium Alloy Treated by Square-spot Laser Shock Peening[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25: 650—656.
- [5] SU H H, LIU P, FU Y C, et al. Tool Life and Surface Integrity in High Speed Milling of Titanium Alloy TA15 with PCD/PCBN Tools[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25: 784—790.
- [6] CHENG X H, FISHER J W, PRASK H J, et al. Residual Stress Modification by Post-weld Treatment and Its Beneficial Effect on Fatigue Strength of Welded Structures[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25: 1259—1269.
- [7] SOUGATA R, JOHN W F, YEN B T. Fatigue Resistance of Welded Details Enhanced by Ultrasonic Impact[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(12): 1239—1247.
- [8] TSENG P O, LIN C H. Impacts of Mold Material and Pattern Size for Ultrasonic Nanoimprint Lithography[J]. Microelectronic Engineering, 2012, 98: 112—116.
- [9] MORDYUK B N, IEFIMOV M O, PROKOPENKO G I, et al. Structure, Microhardness and Damping Characteristics of Al Matrix Composite Reinforced with AlCuFe or Ti Using Ultrasonic Impact Peening[J]. Surface & Coating Technology, 2010, 204: 1590—1598.
- [10] MORDYUK B N, IEFIMOV M O, GRINKEVYCH K E, et al. Structure and Wear of Al Layers Reinforced with AlCuFe Particles Using Ultrasonic Impact Peening: Effect of Different Particle Sizes[J]. Surface & Coating Technology 2011, 205: 5278—5284.
- [11] YASUOKA M, WANG P P, ZHANG K Y, et al. Improvement of SUS304 Austenite Stainless Steel Using Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification[J]. Surface & Coating Technology, 2013, 218: 93—98.
- [12] YANG X J, ZHOU J X, LING X. Study on Plastic Damage of AISI 304 Stainless Steel Induced by Ultrasonic Impact Treatment[J]. Materials and Design, 2012, 36: 477—481.
- [13] HAAGENSEN P J, STATNIKOV E S, LOPEZMARTINEZ L. Introductory Fatigue Tests on Welded Joints in High Strength Steel and Aluminum Improved by Various Methods Including Ultrasonic Impact Treatment (UIT)[R]. Oslo, Norway: International Institute of Welding, 2008.

- [14] 王东坡, 霍立兴, 荆洪阳, 等. 改善焊接接头疲劳强度超声冲击装置的研制及应用[J]. 机械强度, 2000, 22(4): 249—252.  
WANG Dong-po, HUO Li-xing, JING Hong-yang, et al. Investigation and Application of the Ultrasonic Peening Equipment Used for Improving Fatigue Strength of Welded Joints[J]. Journal of Mechanical Strength, 2000, 22(4): 249—252.
- [15] YILDIRIM H C, MARQUIS G B. Fatigue Strength Improvement Factors for High Strength Steel Welded Joints Treated by High Frequency Mechanical Impact[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 44: 168—176.
- [16] 何柏林, 宋燕. 超声冲击改善焊接接头疲劳性能的研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(5): 125—128.  
HE Bo-lin, SONG Yan. Research Progress in Improving Fatigue Properties of Welded Joints by Ultrasonic Impact Treatment[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2013, 36(5): 125—128.
- [17] ZHANG J W, WANG W X, ZHANG L, et al. Improving the Fatigue Property of Welded Joints for AZ31 Magnesium Alloy by Ultrasonic Peening Treatment[J]. China Welding, 2008, 2: 20—26.
- [18] VILHAUER B, CAROLINE R B, ADOLFO B M, et al. Fatigue Behavior of Welded Cover Plates Treated with Ultrasonic Impact Treatment and Bolting[J]. Engineering Structures, 2012, 34: 163—172.
- [19] GANDRA J, VIFARINHO P, PEREIRA D, et al. Wear Characterization of Functionally Graded Al-Si Composite Coatings Produced by Friction Surface[J]. Materials and Design, 2013, 52: 373—383.
- [20] MORDYUK B N, PROKOPENKO G I. Fatigue Life Improvement of  $\alpha$ -Titanium by Novel Ultrasonically Assisted Technique[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 437: 396—405.
- [21] ROY S, FISHER J W, YEN B T. Fatigue Resistance of Welded Details Enhanced by Ultrasonic Impact Treatment (UIT)[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25: 1239—1247.
- [22] BAGHERIFARD S, PARIENTE I F, GHELICHI R, et al. Fatigue Properties of Nanocrystallized Surfaces Obtained by High Energy Shot Peening[J]. Procedia Engineering, 2010, 2: 1683—1690.
- [23] VILLEGAS J C, SHAW L L. Nanocrystallization Process and Mechanism in a Nickel Alloy Subjected to Surface Severe Plastic Deformation[J]. Acta Materialia, 2009, 57: 5782—5795.
- [24] 徐济民, 阎炳义, 史永吉, 等. TIG 重熔工艺及其对接头疲劳强度的改善[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1990(5): 30—33.  
XU Ji-min, YAN Bing-yi, SHI Yong-ji, et al. TIG Remelting and Its Effects on Improving Fatigue Strength of Fillet Welded Joints[J]. Journal of Tsinghua University, 1990(5): 30—33.
- [25] 赵小辉, 王东坡, 王惜宝, 等. 承载超声冲击提高 TC4 钛合金焊接接头的疲劳性能[J]. 焊接学报, 2010, 31(11): 58—60.  
ZHAO Xiao-hui, WANG Dong-po, WANG Xi-bao, et al. Improvement of Fatigue Performance of TC4 Ti-alloy Welded Joints by Loading Ultrasonic Peening[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(11): 58—60.
- [26] 向学建, 黄元林, 朱有利, 等. 超声冲击对 Q370qE 钢焊接接头性能的影响[J]. 金属铸锻焊技术, 2011, 40(13): 96—98.  
XIANG Xue-jian, HUANG Yuan-lin, ZHU You-li, et al. Effects of Ultrasonic Impact Treatment on Properties of Q370qE Welded Joints[J]. Casting Forging Welding, 2011, 40(13): 96—98.
- [27] LASSE S, MANSOOR K, JARI P. Residual Stresses in Welded Components Following Post Weld Treatment Methods[J]. Procedia Engineering, 2013, 66: 181—191.
- [28] 黄丽婷, 陈明和, 谢兰生, 等. 超声冲击载荷对 CP3 钛合金焊接接头残余应力的影响[J]. 航空材料学报, 2014, 34(1): 52—55.  
HUANG Li-ting, CHEN Ming-he, XIE Lan-sheng, et al. Influence of Ultrasonic Impact Load on Residual Stresses Distribution of Welded Joints for CP3 Titanium Alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(1): 52—55.
- [29] RODOPOULOS C A, PANTELAKIS S G, PAPADOPOULOS M P. The Effect of Ultrasonic Impact Treatment on the Fatigue Resistance of Friction Stir Welded Panels [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009, 18(9): 1248—1257.
- [30] 黄加强, 万正权, 卞如冈, 等. 高强钢焊接接头超声冲击效果对比试验研究[J]. 船舶力学, 2012, 16(10): 1164—1171.  
HUANG Jia-qiang, WAN Zheng-quan, BIAN Ru-gang, et al. Comparative Experiment on the Effects of Ultrasonic Impact Treatment on Butt-weld of High Tensile Strength Steel[J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, 16(10): 1164—1171.
- [31] 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.
- [32] CHENG X H, FISHER J W, PRASK H J, et al. Residual Stress Modification by Post Weld Treatment and Its Beneficial Effect on Fatigue Strength of Welded Structures[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(3): 1259—1262.
- [33] 吕宗敏, 何柏林, 于影霞, 等. 超声冲击调整焊接接头残余应力的试验研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(3): 99—102.  
LYU Zong-min, HE Bo-lin, YU Ying-xia, et al. Residual Stress of Welded Joint Adjusted by Ultrasonic Impact Treatment[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 39(3): 99—102.
- [34] 李进一, 凌祥, 周建新. 超声冲击残余应力场的有限元模拟[J]. 航空材料学报, 2011, 32(1): 84—88.

- LI Jin-yi, LING Xiang, ZHOU Jian-xin. Finite Element Simulation of Residual Stress Field Induced by Ultrasonic Impact Treatment[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 32(1): 84—88.
- [35] 陈佳伟. 超声波冲击处理消除 16MnR 焊件残余应力的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- CHEN Wei-jia. Study on Residual Stress Modification of Welded 16MnR Parts by Means of Ultrasonic Impact Treatment[D]. Changchun: University of Jilin, 2010.
- [36] 何柏林, 于影霞, 余皇皇, 等. 超声冲击对转向架焊接十字接头表层组织及疲劳性能的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(8): 51—54.
- HE Bo-lin, YU Ying-xia, YU Huang-huang, et al. Effect of Ultrasonic Impact on the Surface Microstructure and Fatigue Properties of Welded Cross Joint for Train Bogie [J]. Transactions of the China Welding Instruction, 2013, 34(8): 51—54.
- [37] GAO H, DUTTA R K, HUIZENGA R M, et al. Stress Relaxation due to Ultrasonic Impact Treatment on Multi-pass Welds[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(6): 505—513.
- [38] 何柏林, 于影霞, 史建平, 等. 超声冲击对 16MnR 钢焊接接头疲劳性能的影响[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(5): 96—99.
- HE Bo-lin, YU Ying-xia, SHI Jian-ping, et al. The Effect of Ultrasonic Impact on the Fatigue Properties of 16MnR Steel Welded Joints for Bogie[J]. China Railway Science, 2011, 32(5): 96—99.
- [39] 叶雄林, 朱有利. 超声冲击细化 22SiMn2TiB 超高强焊接接头晶粒研究[J]. 热加工工艺, 2006, 35(23): 12—14.
- YE Xiong-lin, ZHU You-li. Investigation on Fining Grain of Ultra-high Strength Steel Welding Joint by Ultrasonic Impact Treatment[J]. Hot Working Technology, 2006, 35(23): 12—14.
- [40] 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.
- [41] BEREZINA A L, MONASTYRSKA T O, PROKO-PENKO G I, et al. Effect of Ultrasonic Impact Treatment on the Structure and Properties of Al-Mg-Si Alloy[J]. Proc. Int. Conf. Nano Materials and Properties, 2013, 2(1): 1—4.
- [42] 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.
- [43] ELIEZER D, AGHION E, FROES F H. The Science and Technique of Magnesium Alloy[J]. Advanced Performant Materials, 1998, 5: 201—203.
- [44] TAO N R, WANG Z B, TONG W P, et al. An Investigation of Surface Nanocrystallization Mechanism in Fe Induced by Surface Mechanical Attrition Treatment[J]. Acta Materialia, 2002, 50: 4603—4616.
- [45] 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 Effects on Fatigue Strength[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(2): 18—21.
- [46] 陈芙蓉, 赵永胜, 邱小明, 等. 超声冲击处理对 7A52 铝合金焊接接头表层组织及性能的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(6): 49—53.
- CHEN Fu-rong, ZHAO Yong-sheng, QIU Xiao-ming, et al. Influence of Ultrasonic Impact Treatment on Microstructure and Properties of Surface Layer of 7A52 Aluminum Alloy Welded Joint[J]. Surface Technology, 2015, 44(6): 49—53.
- [47] OKAWA T, SHIMANUKI H, FUNATSU Y, et al. Effect of Preload and Stress Ratio on Fatigue Strength of Welded Joints Improved by Ultrasonic Impact Treatment[J]. Welding in the World, 2013, 57(2): 235—241.
- [48] 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.
- [49] 尹丹青. 改善焊接接头性能的超声冲击方法若干问题的研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- YIN Dan-qing. Research on Some Aspects of Welded Joints Properties Improvement Method of Ultrasonic Peening Treatment[D]. Tianjin: University of Tianjin, 2010.
- [50] 朱有利, 王燕礼, 边飞龙, 等. 金属材料超声表面强化技术的研究与应用进展[J]. 机械工程学报, 2014, 50(20): 35—40.
- ZHU You-li, WANG Yan-li, BIAN Fei-long, et al. Progresses on Research and Application of Metal Ultrasonic Surface Enhancement Technologies[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(20): 35—40.
- [51] 吕宗敏, 何柏林, 于影霞. 超声冲击工艺参数对 SMA490BW 钢塑变层的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(2): 30—32.
- LYU Zong-min, HE Bo-lin, YU Ying-xia. Effect of Ultrasonic Impact Parameters on Plastic Deformation Layer of SMA490BW Steel[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 39(2): 30—32.
- [52] 周威佳, 刘洪伟, 叶知春, 等. 高强钢分区热冲压 U 形件梯度性能[J]. 精密成形工程, 2016, 8(6): 44—48.
- ZHOU Wei-jia, LIU Hong-wei, YE Zhi-chun, et al. Gradient Properties of High Strength Steel U Shape Parts with Partition Hot Stamping[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(6): 44—48.