

超声冲击工艺对 16MnR 十字接头表面质量的影响

于影霞^a, 柳依帆^a, 何柏林^b

(华东交通大学 a.运输学院, b.机电学院, 南昌 330013)

摘要:目的 提高焊接接头的表面质量。方法 采用超声冲击方法对 16MnR 十字接头焊趾处进行冲击处理, 对原始焊态及不同冲击工艺参数下的焊趾表面质量进行了对比测试及比较分析。结果 冲击后, 焊接接头焊趾处过渡半径增大, 母材与焊缝过渡趋于平缓。焊趾表面组织得到明显细化, 细化层深度及细化程度随冲击工艺参数的变化而变化。冲击后焊趾处由焊态的拉应力状态转变为压应力状态, 表面显微硬度大幅提高。在 1.5 A/20 min 冲击工艺下, 焊趾处的残余压应力最大(为 269.8 MPa), 表面显微硬度最高(为 340.5HV)。同时, 经超声冲击后, 表面粗糙度有增大的趋势, 而且不当的冲击会使接头表层出现不同类型的缺陷, 从而影响焊接接头整体的表面质量。结论 接头表面质量不仅取决于冲击时间、冲击电流, 还取决于单道冲击过程中冲击点与冲击点之间及多道往复冲击过程中冲击道与冲击道之间的位置及连接的紧密程度, 而且并不是所有表面质量指标都与超声冲击参数正相关或线性相关。

关键词: 超声冲击工艺; 十字接头; 表面质量; 表面组织; 残余应力; 显微硬度

中图分类号: TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)08-0295-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.08.041

Effects of Ultrasonic Impact Technology on Surface Quality of 16MnR Cross Joint

YU Ying-xia^a, LIU Yi-fan^a, HE Bo-lin^b

(a.School of Transportation and Logistics, b.School of Mechanical and Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

ABSTRACT: The work aims to improve surface quality of welded joints. Ultrasonic impact treatment (UIT) was applied to weld toes of 16 MnR cross joint, and comparison test and comparative analysis were applied to surface quality of weld toes as-welded and treated under different UIT parameters. After UIT, transition radius at weld toes of welded joint increased, and transition from base metal to weld became smooth. Surface microstructure of weld toes was significantly refined, and refined depth and refining degree varied with UIT parameters. Tensile stress state of the weld toe as-welded transformed compressive stress state, surface microhardness increased greatly after UIT. The compressive stress was the maximum (269.8 MPa) and surface microhardness was also the maximum (340.5HV) under the effect of 1.5 A/20 min UIT. Meanwhile, surface roughness tended to increase after UIT, and improper UIT would lead to different kinds of defects on the surface of welded joint, thus affecting overall surface quality of welded joint. Surface quality of joint depends on not only impact time and impact current, but also location among impact points during single-channel impact and impact channels during multi-channel reciprocating impact as well as tightness of connection. Not all surface quality indicators

收稿日期: 2018-02-05; 修订日期: 2018-05-21

Received: 2018-02-05; Revised: 2018-05-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51365014); 江西省工业支撑重点项目(20161BBE40072)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51365014); Key Projects of Industrial Support in Jiangxi Province (20161BBE40072)

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

Biography: YU Ying-xia (1964—), female, Professor, Research focus: surface quality development of welded joints.

are positively related to or linearly dependent on ultrasonic impact parameters.

KEY WORDS: UIT technology; cross joint; surface quality; surface microstructure; residual stress; microhardness

焊接是许多大结构、复杂结构的重要制造技术和连接方法。但由于焊接工艺的特殊性,使得焊接接头在成分、组织和性能上都是一个不均匀体,而且常常存在各类焊接缺陷,从而使接头处成为整个焊接结构的薄弱环节。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,因此改善焊接构件接头表面质量,对保证结构安全运行,延长服役寿命,具有重要意义^[1]。焊接接头表面质量不仅包括接头几何形状(如焊趾过渡半径及过渡角等)、粗糙度、表面缺陷(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^[2-6]。超声冲击是一种接头表面处理工艺,通过在接头处产生一定的塑变层而使接头表面质量发生改变,从而有效地提高耐磨、耐腐蚀、抗疲劳等性能^[7-13]。但是,迄今为止这种技术并没有得到广泛应用,还有许多制约实际应用的问题没有解决。国内目前的相关研究多停留在实验室阶段,研究超声冲击对焊接接头各种性能的影响机理,很少涉及冲击工艺参数变化对接头质量的具体影响,而且缺少对接头整体表面质量的系统研究。

优化冲击工艺参数是超声冲击方法推广应用的关键,也是实验室研究向实际应用转化的关键,而研究超声冲击处理对焊接接头表面质量的影响规律是优化超声冲击工艺参数的基础。作为普通低合金结构钢,16MnR焊接性能较好,在焊接构件中得到了广泛应用。本文较系统地研究了超声冲击工艺变化对16MnR十字接头表面质量的影响。

1 试验

1.1 材料

母材为10 mm厚的16MnR板材,其化学成分及室温力学性能如表1和表2所示。

表1 16MnR材料的化学成分
Tab.1 Chemical composition of 16MnR

Element	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Ti
Content/ wt%	0.18	1.40	0.35	0.023	0.017	0.06	0.07	0.018

表2 16MnR材料室温力学性能
Tab.2 Mechanical properties of 16MnR

E/MPa	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ /%	ν	Ψ /%	HB
2.1×10^5	360	580	27	0.28	58	172

1.2 十字接头试样的焊接

将16MnR板材机加工成500 mm×200 mm×10 mm的主板和500 mm×30 mm×10 mm的腹板,然后将一块主板和两块腹板焊接。焊接前先将主板刨削加工出双单边V型坡口,再利用手工电弧焊进行四道船形焊接(具体工艺见表3)。为减小和防止试样在焊接过程中出现角变形和错位,需要在四个角进行定位焊,校正纠偏后再继续其余位置的焊接,焊接后对十字接头过渡处进行打磨处理,再利用线切割加工成见图1所示(试样形状的确定考虑到其他试验)。

表3 16MnR的焊接工艺参数
Tab.3 Welding parameters of 16MnR

Welding joint type	Groove type	Welding-current/A	Electrode type	Electrode diameter/mm
Cross joint	Double uni-lateral "V"	220~280	J507	5

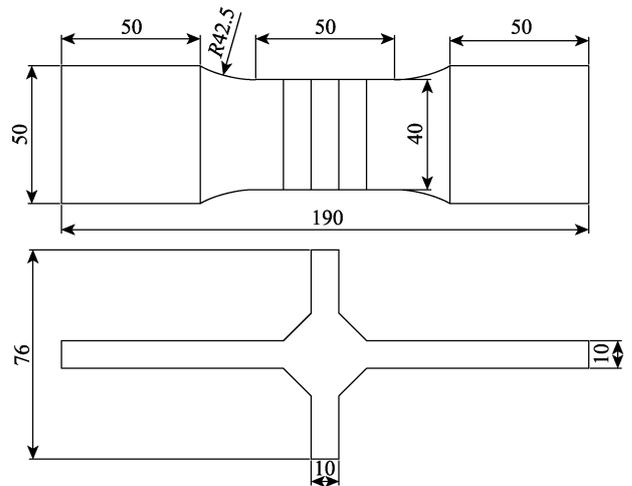


图1 十字接头试样形状与尺寸
Fig.1 Shape and dimension of 16MnR cross joints

1.3 十字接头试样的超声冲击试验

将试样分为6个小组,每组2个,如表4所示。使用HJ-III型额定功率为600 W的超声冲击设备,冲击头为单头,半圆直径为3.0 mm。将冲击头垂直对准接头焊趾部位,在1.2 A/16 μ m和1.5 A/20 μ m(由于冲击振幅的作用与冲击电流同步,本研究只考查电流的作用)下沿焊缝方向分别实施10、20、30 min/道的3道往复冲击(“道”指与焊缝平行的冲击头运动轨迹,理论上每道的最大宽度为冲击头直径3.0 mm)。

表 4 试验分组
Tab.4 Divided test groups

Sample number	Impact current/A	Impact amplitude/ μm	Impact time/min
1 [#] 、2 [#]	1.2	16	10
3 [#] 、4 [#]	1.2	16	20
5 [#] 、6 [#]	1.2	16	30
7 [#] 、8 [#]	1.5	20	10
9 [#] 、10 [#]	1.5	20	20
11 [#] 、12 [#]	1.5	20	30

1.4 接头表面质量测试方法

对 1[#]、3[#]、5[#]、7[#]、9[#]、11[#]冲击试样和原始接头试样，沿垂直焊缝的方向，线切割切取带有焊缝和热影响区的试样。将试样依次在 100[#]—6[#]砂纸上打磨，最后用金刚石研磨膏抛光处理。用 4% HNO₃ 溶液腐蚀试样，并用酒精清洗截面。利用 SJM-6360LA 扫描电镜观察 7 个试样的塑变组织。

利用 JEM-2100 透射电子显微镜对超声冲击处理后的接头试样进行组织分析。先用线切割在冲击后样品的表面切下 10 mm×10 mm×0.5 mm 大小的金属薄片，然后依次用 200[#]、600[#]、1000[#]、2000[#]金相砂纸将样品磨薄，减薄至 30~40 μm ，再冲出 $\phi 3$ mm 大小的圆片，最后对 $\phi 3$ mm 的小薄片进行离子减薄。

使用最大功率 300 W、管电压 30 kV、电流 2~10 mA 的 PSF/MSF-3M 型 X 射线应力仪，对 2[#]、4[#]、6[#]、8[#]、10[#]、12[#]等 6 个冲击试样进行残余应力测试，每个试样测试 3 个点，取其平均值。原始焊态试样焊趾处以拉应力为主，未进行测试。

采用 XHV-1000Z 型数显显微硬度计，对 2[#]、4[#]、6[#]、8[#]、10[#]、12[#]冲击试样和原始接头试样，从表面沿深度方向进行硬度测试，测点间距为 10~30 μm ，直至硬度与基体硬度接近。每个深度测 5 个点，去掉最大值和最小值后取平均值。

2 结果与讨论

2.1 焊趾表面宏观形貌

通常情况下，焊缝存在焊接缺陷（如裂纹、咬边等），再加上不合理的焊缝外形（如凸出形的角焊缝），会使焊接接头处形成较大的应力集中，从而影响接头的性能。通过角焊缝连接而成的十字接头传递外力时，力流线的偏转大，应力分布不均匀，对于实验中开坡口焊透的十字接头，由于消除了根部间隙，使得根部的应力集中大大降低，其应力集中主要存在于焊趾处。

图 2 为超声冲击处理前后十字接头焊趾处的形貌，超声冲击处理（UIT）后，除去了焊趾表面油污、

锈层等。利用 GX-51OLYMPUS 分析仪测算、记录冲击前后试样焊趾处的信息，并将其导入 AUTOCAD 软件中，从而获得冲击前后焊趾处的具体轮廓形状（如图 3），以及冲击前后接头的几何参数（见表 5）。可见几何外形发生了明显的变化：焊趾处过渡半径 ρ 增大，母材与焊缝之间的过渡趋于平缓（ θ 减小），从而降低了接头的应力集中现象。

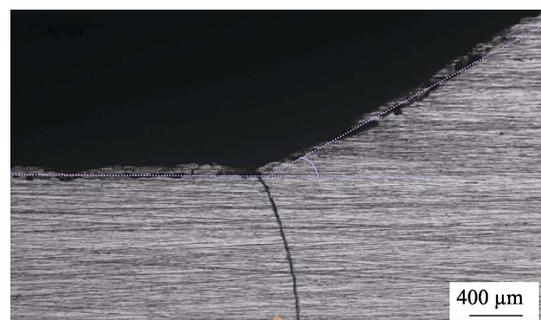


a 未处理

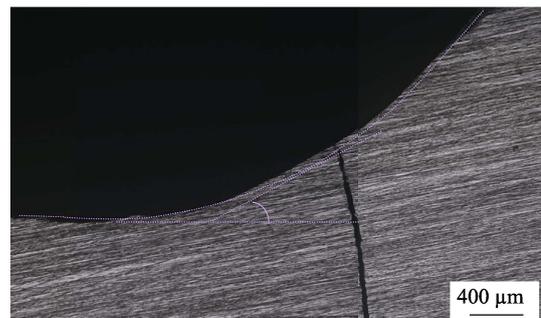


b 超声处理

图 2 接头焊趾冲击前后表面形貌
Fig.2 Surface morphology of weld toes:(a) untreated; (b) UIT



a 未处理



b 超声处理

图 3 超声冲击前后焊趾处形状参数测量
Fig.3 Shape parameter measurement for treated and un-treated weld toes: (a) untreated; (b) UIT

表5 焊接接头几何形状参数
Tab.5 Geometric shape parameters of welded joints

State	ρ/mm	$\theta/(\text{°})$
As-welded	0.83	36.0
Treated	4.40	30.0

试样冲击前后的表面粗糙度如图4所示。冲击后,试样表面可见明显的冲击“微坑”,随着冲击强度的增大(时间长,电流大),表面粗糙度有增大的趋势。另外采用1.5 A/30 min冲击工艺时,试样个别区域发现了“叠形缺陷”^[14]和“空洞状缺陷”(图

4g);采用1.5 A/10 min与1.5 A/20 min冲击工艺时,试样个别区域发现了“沟壑缺陷”(图4e、f)。其中“叠形缺陷”可能是由于过度的冲击(时间长、电流大,尤其是二者兼而有之时)引起的,也可能是由于单道冲击过程中冲击点与冲击点之间反复重叠,以及多道往复冲击过程中冲击道与冲击道之间反复重叠造成的。而单道冲击过程中,冲击点与冲击点之间连接不紧密会造成“空洞状缺陷”。“沟壑缺陷”是由于多道往复冲击过程中,冲击道与冲击道之间连接不紧密造成的。

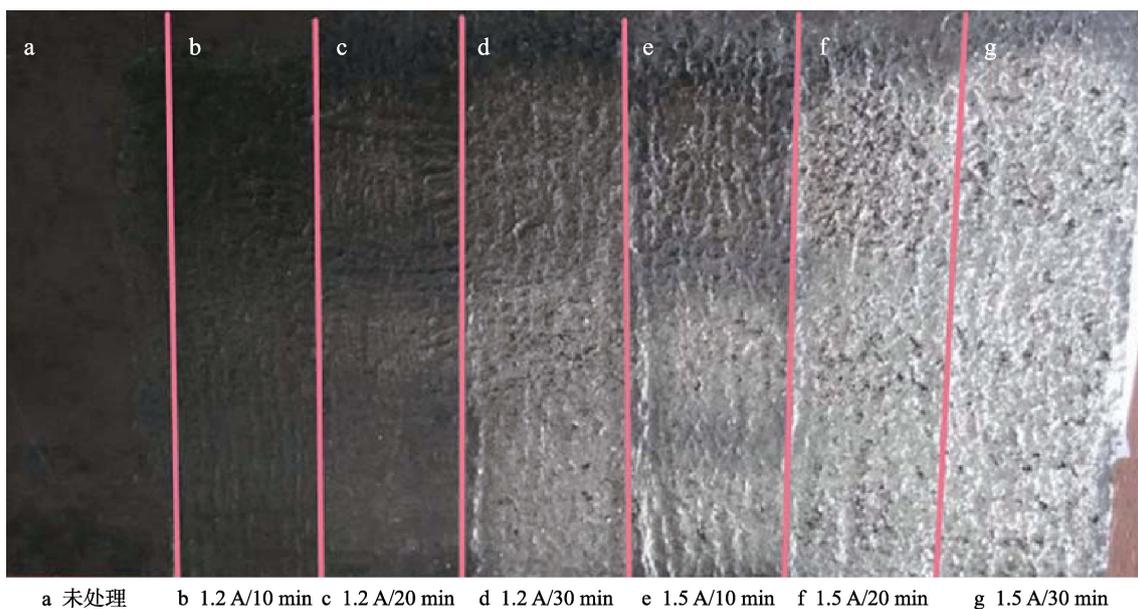


图4 冲击前后表面粗糙度宏观形貌变化

Fig.4 Surface roughness and macroscopic morphology of treated and un-treated surfaces

2.2 焊接接头表面组织

图5为1[#]、3[#]、5[#]、7、9[#]、11[#]试样焊趾及其附近区域截面的微观组织。可见超声冲击后,焊趾表面发生了严重的塑性变形,组织得到细化。超声冲击工艺不同,表面变形程度和变形层的厚度也不同。随着冲击时间的延长及冲击电流的增大(即输入能量的增大),焊趾表面的变形层增厚,塑性变形越严重,组织越细化,而且冲击电流的影响比冲击时间的影响要小,这也说明冲击时间可能是影响接头表面质量的一个主要因素。但随着变形层厚度的加深,塑性变形的程度逐渐减弱直至稳定。此外,即便是同一表面的不同位置,在相同的超声冲击工艺参数下,塑性变形表现也不尽相同,可能是由于不同取向晶粒间晶界的阻碍作用,造成了晶粒塑性变形的不均匀性^[15]。在超声冲击初期,塑性变形首先在那些取向容易产生滑移的晶粒中进行,随着冲击的持续塑性变形,由材料表层逐步递延至内部,变形层的厚度增加。但冲击强度较大时,表层金属开始开裂(如5c),起裂的金属被压合,但压合不紧密使试样的次表面出现微裂纹(如

5d)。

母材组织如图6a,主要由小带状、粒状珠光体和粒状铁素体组成,平均晶粒尺寸约为20 μm。图6b、c、d分别是1[#]、3[#]、5[#]试样的透射电镜明场像及各对应选区的电子衍射花样,衍射斑点为连续同心圆环,这是典型的纳米组织特征,且纳米组织取向呈随机分布。在冲击电流皆为1.2 A的情况下,采用往复冲击10、20、30 min/道后,分别获得约50、20、30 nm大小的纳米组织,说明超声冲击使接头表面组织细化,而且在相同冲击电流(1.2 A)下,20 min/道的细化效果最佳。

2.3 接头表面残余应力

表6为不同超声冲击工艺处理后,6个试样焊趾表面残余应力测试结果。超声冲击后,焊趾表面由残余拉应力转变为压应力^[16]。冲击时间和电流都会影响残余应力的大小,冲击电流越大,产生的残余压应力越大,而且冲击时间越短,电流的效果越明显。当电流一定时,残余应力先随冲击时间的增加而增加,随后随冲击时间的增加而减小。可能的原因是焊趾表面

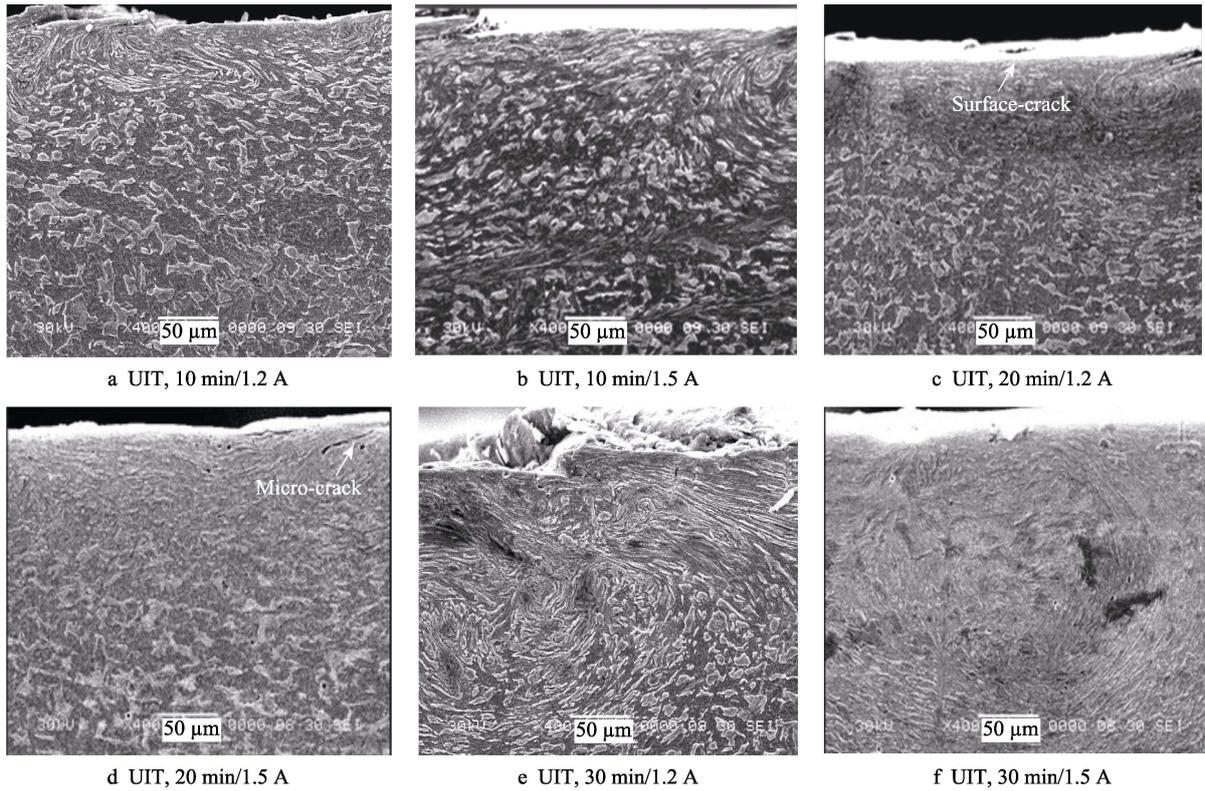


图 5 经不同超声冲击处理后试样的 SEM 形貌
Fig.5 Cross-sectional SEM morphology of samples after different UITs

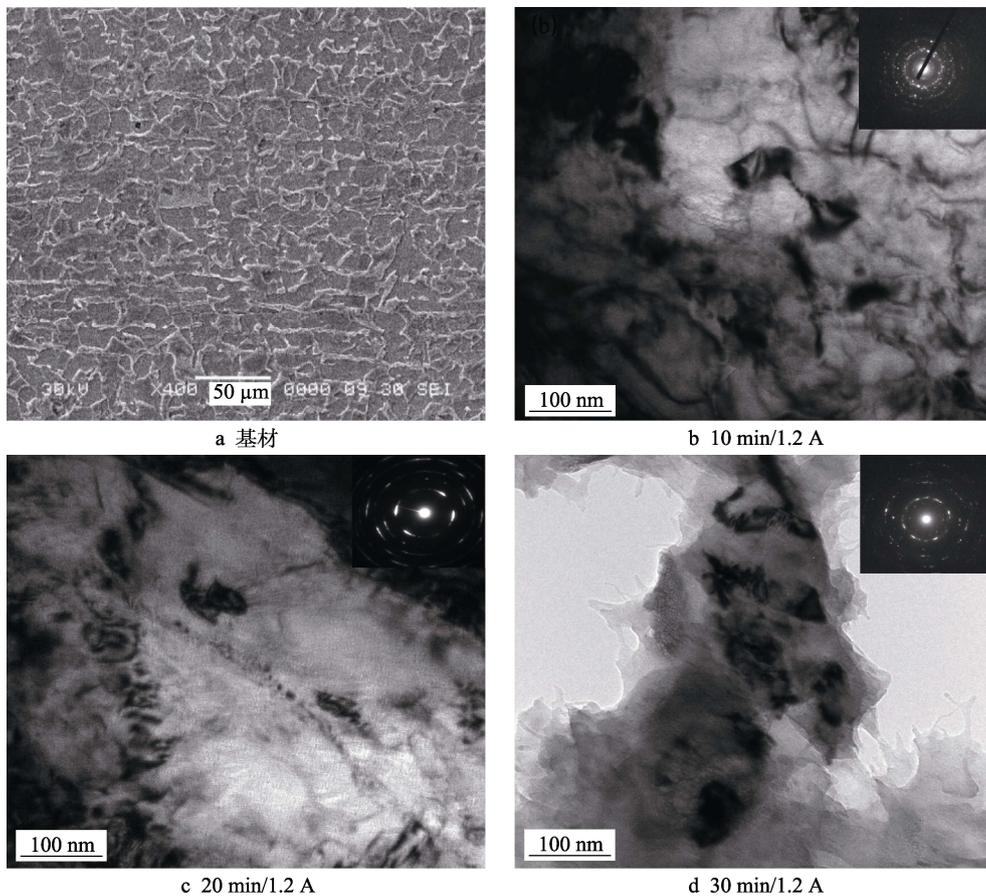


图 6 母材及超声冲击处理后 16MnR 十字接头焊趾表面的明场 TEM 像和相应的选区电子衍射花样
Fig.6 A bright-field TEM image and a corresponding SAED pattern of surface layer on 16MnR cross joint weld toe after UIT: (a) base metal microstructure, (b)10 min/1.2 A, (c) 20 min/1.2 A, (d) 30 min/1.2 A

表6 超声冲击处理后 16MnR 十字接头
焊趾表面的残余应力值

Tab.6 Surface residual stress of weld toe of
16MnR cross joint after UIT

Sample number	Impact time/current	Residual stress/MPa			
		Point 1	Point 2	Point 3	Average
2 [#]	10 min/1.2 A	-148.7	-173.5	162.0	-161.4
4 [#]	20 min/1.2 A	-199.8	-201.1	180.2	-193.7
6 [#]	30 min/1.2 A	-169.0	-187.2	197.9	-184.7
8 [#]	10 min/1.5 A	-183.5	-167.8	180.3	-177.2
10 [#]	20 min/1.5 A	-237.7	-273.2	298.5	-269.8
12 [#]	30 min/1.5 A	-188.0	-197.1	178.3	-187.8

残余压应力场对冲击时间的变化比较敏感。残余应力本质上是由于塑性变形的不均匀性所致,即已发生塑性变形部分和未发生塑性变形部分相互牵制形成的弹性应力场^[17]。

表7 各超声冲击工艺参数下 16MnR 十字接头焊趾表面的显微硬度

Tab.7 Microhardness of weld toe of 16MnR cross joint provided with different UIT parameters

Sample number	Impact time/min	Current/A	Microhardness (HV)					
			Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Average
2 [#]	10	1.2	290.5	300.6	286.3	303.4	298.4	296.5
4 [#]	20	1.2	337.7	339.8	337.9	340.8	338.5	338.7
6 [#]	30	1.2	324.5	336.4	310.6	315.7	329.8	323.1
8 [#]	10	1.5	304.6	310.9	302.3	300.7	312.5	305.9
10 [#]	20	1.5	340.6	342.5	356.2	346.3	339.5	340.5
12 [#]	30	1.5	336.8	334.4	325.4	339.4	337.4	336.2
	Base metal		182.5	184.5	180.6	182.9	183.6	182.82
	Untreated		178.3	191.9	189.4	180.7	185.2	185.1

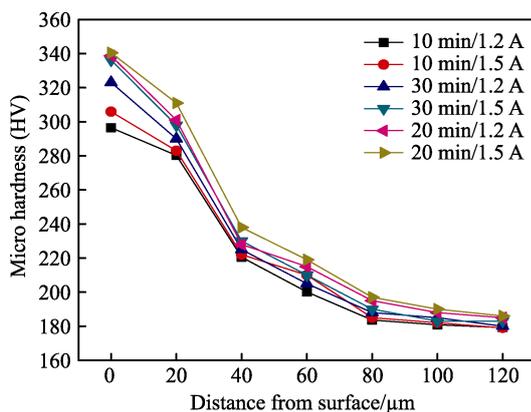


图7 不同超声工艺后 16MnR 十字接头
焊趾表面至心部的显微硬度

Fig.7 Microhardness from weld toe surface to core
of 16MnR cross joint after different UITs

3 结论

超声冲击处理 16MnR 十字接头的焊趾表面后,

2.4 焊接接头表面显微硬度

表7为6个冲击试样焊趾表面的显微硬度,图7为不同工艺参数下显微硬度沿深度方向的变化趋势。经超声冲击处理后,材料的表面硬度与基体和原始焊态相比,提高了60%以上,而且显微硬度随深度的加深而逐渐降低,直至与基体基本相同。另外,冲击电流对试样表面显微硬度的影响不大,小于冲击时间的影响。从实验数据看,采用20 min/1.5 A的冲击工艺处理后,表面显微硬度高于其余5组。表面显微硬度提高归因于晶粒细化和加工硬化两种效应的共同作用。超声冲击使接头表面及附近的晶粒组织细化,根据Hall-Petch关系,硬度随着晶粒的细化而增大。而加工硬化与位错的交互作用有关,随着超声冲击的进行,接头表面塑性变形越来越严重,导致位错密度不断增加,位错运动时的相互交割加剧,并形成一种阻碍位错运动的固定割阶,造成位错缠结等,使位错运动的阻力增大,引起变形抗力的增加。

可使表面质量发生以下变化:

1) 接头几何外形发生了明显的变化,焊趾处过渡半径增大,母材与焊缝之间的过渡趋于平缓,降低了接头的应力集中现象。

2) 表面粗糙度有增大的趋势。冲击过程中会形成“叠形缺陷”、“空洞状缺陷”和“沟壑缺陷”,严重影响接头的表面质量,从而影响接头的整体性能。

3) 接头表面发生塑性变形,组织得到细化,变形层厚度及组织细化程度随冲击工艺而变化。冲击电流对变形层厚度的影响比冲击时间的影响小,说明冲击时间可能是影响接头表面质量的主要因素。

4) 超声冲击后,焊趾处由原始焊态的残余拉伸应力状态转为残余压应力状态。引入的残余压应力甚至可接近于16MnR材料的屈服强度,当冲击工艺为1.5 A/20 min时,焊趾处的残余压应力最大,达到269.8 MPa。

5) 超声冲击后焊趾表面硬度与基体和原始焊态相比,提高了60%以上,而且显微硬度随着深度的加

深呈梯度变化, 并逐渐降低直至与基体硬度基本相同。表面硬度的提高随冲击工艺参数的不同而不同, 冲击电流对试样表面显微硬度的影响不大, 小于冲击时间的影响。其中, 冲击工艺为 1.5 A/20 min 时, 焊趾表面的显微硬度最高, 达到 340.5HV。

参考文献:

- [1] 何柏林, 张枝森, 谢学涛, 等. 加载环境对合金超高周疲劳行为的影响[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(5): 51-57.
HE Bo-lin, ZHANG Zhi-sen, XIE Xue-tao, et al. Influence of loading environment on ultra-high-cycle fatigue of alloy material[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016, 33(5): 51-57.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] TSENG P O, LIN C H. Impacts of mold material and pattern size for ultrasonic nanoimprint lithography[J]. Microelectronic engineering, 2012, 98: 112-116.
- [10] 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 & coatings technology, 2010, 204: 1590-1598.
- [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] 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.
- [13] LIU Yu, ZHAO Xiao-hui, WANG Dong-po. Determination of the plastic properties of materials treated by ultrasonic surface rolling process through instrumented indentation [J]. Materials science & engineering A, 2014, 600: 21-31.
- [14] LIU Yang, WANG Dong-po, DENG Cai-yan, et al. Influence of re-ultrasonic impact treatment on fatigue behaviors of S690QL welded joints[J]. International journal of fatigue, 2014, 66: 155-160.
- [15] PETROV Y N, GAVRILJUK V G, BERNS H, et al. Surface structure of stainless and had field steel after impact wear[J]. Science and technology information center national science council, 2006, 269(6): 687-691.
- [16] 王东坡, 龚宝明, 吴世品, 等. 焊接接头与结构疲劳延寿技术研究进展综述[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(6): 1-14.
WANG Dong-po, GONG Bao-ming, WU Shi-pin, et al. Research review on fatigue life improvement of welding joint and structure[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016, 33(6): 1-14
- [17] 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): 99-101.
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): 99-101.