

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170307002

超声冲击对 SMA490BW 钢焊接接头超高周疲劳性能的影响

何柏林¹, 邓海鹏¹, 魏康²

(1. 华东交通大学 材料科学与工程学院, 南昌 330013; 2. 中国中车南京浦镇车辆有限公司, 南京 210031)

摘要: 采用超声冲击工艺对转向架用 SMA490BW 钢对接接头焊趾表面进行冲击处理, 研究了超声冲击对接头超高周疲劳性能的影响。借助金相显微镜、SEM 和 TEM 研究了冲击层金相组织、冲击前后焊趾处的形貌及表层金属晶粒细化程度。运用有限元软件计算焊接接头的应力分布, 采用 X 射线应力仪对冲击前后焊趾表层的应力进行了测量和分析。结果表明, 在 5×10^6 循环周次下, 冲击态接头和焊态接头的疲劳强度分别为 206 MPa 和 153 MPa, 经冲击处理后疲劳强度提高了 34.6%。在 1×10^8 循环周次下, 冲击态接头的疲劳强度为 195 MPa, 与焊态接头的 141 MPa 相比提高了 38.3%。在 240 MPa 的应力水平下, 焊接接头经超声冲击处理后的疲劳寿命提高了 7 倍。经冲击处理的焊趾部位的应力集中系数下降了 19.1%, 其表面的残余拉应力得到消除, 并转变为有益的残余压缩应力, 焊趾表层组织得到明显细化, 这 3 个方面均对提高焊接接头疲劳性能起到了积极贡献。

关键词: 列车转向架; 焊接接头; 超声冲击; 超高周疲劳; 纳米晶

中图分类号: TG668; TG405

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)04-0064-07

Influence of UIT on VHCF Performance of SMA490BW Steel Welded Joints

HE Bo-lin¹, DENG Hai-peng¹, WEI Kang²

(1. College of Material Science and Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013; 2. CRRC Nanjing Puzhen Co. Ltd., Nanjing 210031)

Abstract: The welded toe surface of SMA490BW steel used to making bogie frame was treated using ultrasonic impact treatment (UIT) technology. The effect of UIT on the very high cycle fatigue (VHCF) properties of the welded joints were investigated. The microstructure of treated layer, geometrical morphology of weld toe before and after UIT, and grain refinement were analyzed by means of metallographic microscope, SEM and TEM. The stress distribution of the welded joint was calculated using finite element software, and the residual stress of weld toe surface area before and after UIT were measured and analyzed using X-ray stress tester. Results show that under the condition of 5×10^6 cycles, the fatigue strength of treated and as-welded joint is 206 and 153 MPa, respectively. The fatigue strength is increased by 34.6%. Under the condition of 1×10^8 cycles, the fatigue strength of treated joint is 195 MPa, and the fatigue strength is increased by 38.3% compared to 141 MPa of as-welded joint. Under the stress level of 240 MPa, the fatigue life of treated joint is enhanced to 7 times than that of as-welded. After UIT, the stress concentration factor of weld toe is decreased by 19.1%, and the residual tensile stress in the surface of the weld toe is eliminated, and it changes into the beneficial residual compressive stress, the surface microstructure is refined. The three aspects of stress concentration of the weld toe, residual stress distribution and surface grain refinement have played a positive contribution to improve the fatigue performance of welded joint.

Keywords: train bogie; welded joint; ultrasonic impact; VHCF; nanocrystalline

收稿日期: 2017-03-07; 修回日期: 2017-06-20

网络出版日期: 2017-06-21 10:27; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170621.1027.010.html>

通讯作者: 何柏林(1962—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 焊接结构强度与断裂; E-mail: hebolin@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(51365014); 江西省工业支撑重点项目(20161BBE50072)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51365014) and Key Project of Industrial Support of Jiangxi Province (20161BBE50072)

引文格式: 何柏林, 邓海鹏, 魏康. 超声冲击对 SMA490BW 钢焊接接头超高周疲劳性能的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(4): 64-70.

HE B L, DENG H P, WEI K. Influence of UIT on VHCF performance of SMA490BW steel welded joints[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(4): 64-70.

0 引 言

随着我国铁路运输朝着高速快捷的方向发展, 高速列车转向架实际经受的疲劳循环周次已达 10^8 周次, 甚至可达 10^9 周次, 各国学者和工程技术人员也日益重视金属材料在 10^7 循环周次以上的超高周疲劳性能^[1-3]。高速动车组转向架通常采用钢的焊接结构^[4-5], 由于焊接构件在接头处容易产生焊接缺陷(如气孔、未熔合、夹渣、熔渣等), 并形成有害的残余拉应力, 以及宏观与微观的应力集中, 在复杂交变载荷作用下, 宏观裂纹会在这些应力集中或缺陷处形核, 降低焊接接头的抗疲劳性能, 从而导致转向架焊接构架发生疲劳破坏^[6-8]。

超声冲击(Ultrasonic impact treatment, UIT)是近年来发展起来的金属材料表面纳米化技术, 材料表面在冲击载荷作用下产生塑性变形进而降低焊趾应力集中程度, 形成表面残余压缩应力, 表层组织得到明显细化, 其力学性能得到有效改善。该技术广泛应用于改善焊接接头疲劳性能, 冲击后接头的疲劳强度和疲劳寿命均得到显著提高^[9-10]。

目前, 关于 SMA490BW 钢焊接接头的研究主要集中在复合焊接对接头一般力学性能的影响^[11]和超声冲击对接头塑变层和组织的影响^[12-13], 研究超声冲击对焊接接头超高周疲劳性能的影响相对较少^[14]。面对铁路运输向更高速度的发展方向, 部分零部件服役期间承受的循环载荷已经达超高周范围, 有必要对其使用的材料及其焊接接头的超高周疲劳性能进行研究。故文中以现有的高速动车组转向架焊接构架常用材料 SMA490BW 钢为研究对象, 开展超声冲击对 SMA490BW 钢焊接接头超高周疲劳性能影响的研究。从焊接接头焊趾处的应力集中、残余应力场分布以及表层晶粒组织细化 3 个方面探讨超声冲击改善焊接接头疲劳性能的机理。

1 材料与方法

1.1 试验材料

所用材料为高速动车组 CRH2 转向架焊接构架常用材料 SMA490BW 钢, 是日本进口的低合金高强度热轧耐候钢, 其化学成分和力学性能分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 SMA490BW 钢的化学成分

Table 1	Chemical composition of SMA490BW steel (w/%)			
Element	C	Si	Mn	P
Content	≤0.18	0.15–0.65	≤1.40	≤0.035
Element	S	Cu	Ni	Cr
Content	≤0.006	0.30–0.50	0.05–0.30	0.45–0.70

表 2 SMA490BW 钢的力学性能

Table 2	Mechanical properties of SMA490BW steel	
Parameters	Values	
Modulus of elasticity / MPa	20 6000	
Yield strength / MPa	≥365	
Tensile strength / MPa	490–610	
Elongation / %	≥19	
AKV / J(–40 ℃)	≥27	

1.2 焊接试验及焊接接头试样尺寸

焊接接头的接头形式采用对接接头, 焊材采用直径 1.2 mm 的 TH550-NQ-II 焊丝, 焊接方式为 tMAG/135, 混合保护气体为 80%Ar+20%CO₂。焊接钢板厚度为 12 mm, 开 V 型坡口, 坡口角度为 60°, 组装间隙为 2~3 mm。焊接接头试样(以下简称焊态试样)选用含有较长等截面且焊缝位于正中部的薄板试样, 试样尺寸及实物如图 1 所示。

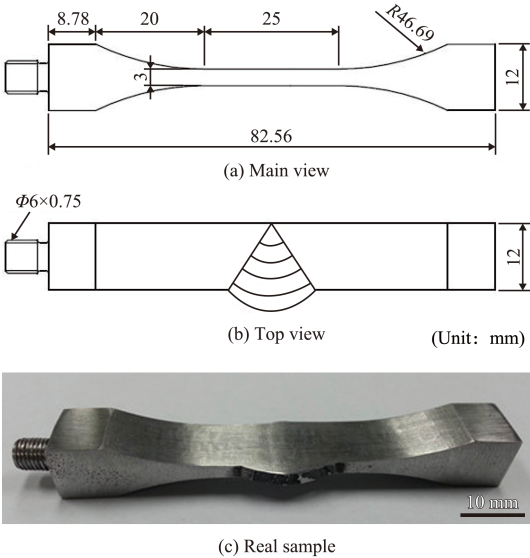


图 1 SMA490BW 焊接接头试样形状尺寸及实物
Fig.1 Dimensions and real sample of SMA490BW welded butt joint

1.3 超声冲击处理

超声冲击处理采用上海宣邦制造的 HJ-III 型超声冲击设备。冲击针的端部为半球形, 冲击针

采用 3 根。超声冲击针与钢板焊缝成一定角度,对准焊趾区域且沿焊缝方向移动,使冲击过程在其自重条件下完成,见图 2 所示。此外,为了保证获得理想的焊趾过渡圆弧外形,冲击枪可沿焊趾两侧做小幅度的摆动,每道焊趾均需多次来回冲击处理。超声冲击态焊接接头试样(以下简称冲击态试样)的尺寸与焊态试样相同。超声冲击参数分别为 1.5A/10min、2.0A/5min、2.0A/10min 和 2.0 A/20 min。

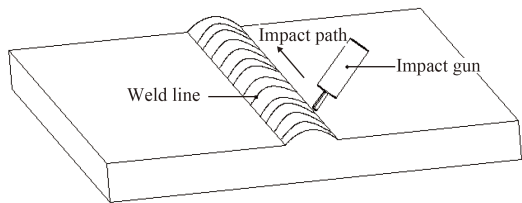


图 2 超声冲击示意图

Fig.2 Schematic diagram of ultrasonic impact treatment

1.4 金相组织观察

采用德国蔡司公司的 AxioVert.A1 型倒置万能金相显微镜对焊接接头焊趾及其附近区域表面金属经超声冲击处理后的组织进行了观察。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试验:先用线切割在冲击后样品的表面切下 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ 大小的金属薄片;将薄片粘在铁块上使线切割面朝下,然后样品依次用 200、600、1 000、2 000 号金相砂纸将样品磨薄,减薄至 $50\sim 60\text{ }\mu\text{m}$,然后用超声波切割机冲成直径为 3 mm 的圆片,最后使用离子减薄仪进行减薄。在透射电镜观察时,通过试样中间孔区域进行定位,使光斑和中心孔同轴。

1.5 残余应力测试

为了考察焊接残余应力和超声冲击引入的残余压应力对焊接接头超高周疲劳寿命的影响,文中对焊态疲劳试样以及冲击态疲劳试样焊趾区域的残余应力(包括横、纵向应力)进行测试。残余应力测试采用 Stresstech Oy 公司生产的 XSTRESS3000 便携式应力仪,测试采用 Cr 靶, $2\theta=156.4^\circ$ 。

1.6 超高周疲劳试验

将试样分为 3 组(每组 13~15 个试样),一组试样为焊态试样,另一组试样为冲击态试样,最后一组为母材试样(母材试样尺寸与焊接接头除去余高后的尺寸相同)。每个试验应力下测一个试样的

寿命。为了降低机械加工在试样表面留下的刀痕对试样疲劳性能的影响,试验前采用金相砂纸对超声冲击前后的疲劳试样线切割表面均进行了机械抛光。超高周疲劳试验在日本岛津生产的 USF-2000 超声疲劳试验机上进行,加载频率为 20 kHz ,应力比 R 为 -1 ,试验在室温($25\text{ }^\circ\text{C}$)下进行。

2 试验结果

2.1 焊态和冲击态试样的 S-N 曲线

焊态、冲击态和母材试样的 S-N 曲线如图 3 所示。由图 3 可以看出,母材的 S-N 曲线呈现出连续下降的趋势,不存在疲劳极限,焊态及超声冲击态试样的 S-N 曲线存在两个明显的阶段,高周阶段 S-N 曲线下下降迅速,超高周阶段下降较为缓慢,且焊态和冲击态试样的 S-N 曲线也无疲劳极限的存在。对于焊态试样,当 $10^5 < N < 6.45 \times 10^6$ 时,其 S-N 曲线方程为 $\lg N + 7.25 \lg \Delta \sigma = 22.54$;当 $6.45 \times 10^6 < N < 7.86 \times 10^8$ 时,其 S-N 曲线方程为 $\lg N + 45.02 \lg \Delta \sigma = 22.54$ 。对于冲击态试样,当 $10^5 < N < 4.86 \times 10^6$ 时,其 S-N 曲线方程为 $\lg N + 7.08 \lg \Delta \sigma = 23.03$;当 $4.86 \times 10^6 < N < 3.69 \times 10^8$ 时,其 S-N 曲线方程为 $\lg N + 57.11 \lg \Delta \sigma = 138.82$ 。

在 5×10^6 循环周次下,焊态试样的疲劳强度为 153 MPa ,而冲击态试样疲劳强度为 206 MPa ,焊接接头经冲击处理后高周疲劳强度提高了 34.6% 。在 1×10^8 循环周次下,焊态试样的疲劳强度为 141 MPa ,冲击态试样的疲劳强度为 195 MPa ,焊接接头经超声冲击处理后高周疲劳强度提高了 38.3% 。对比结果表明超声冲击处理可以大幅提高

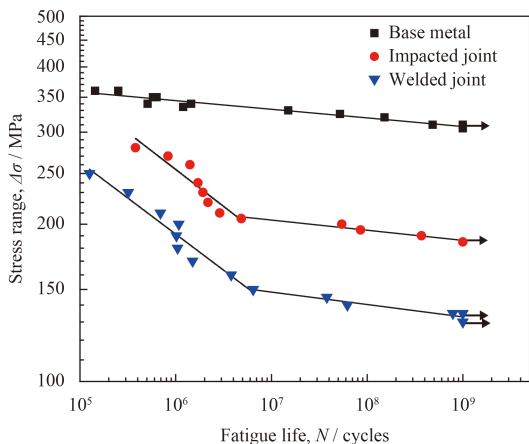


图 3 母材、焊态和冲击态试样的 S-N 曲线

Fig.3 S-N curves of base metal, welded joints and UIT joints

焊接接头的高周和超高周疲劳性能。在 240 MPa 的应力条件下, 焊态接头的疲劳寿命为 1.93×10^5 周次, 冲击态接头的疲劳寿命为 1.51×10^6 周次, 经超声冲击后的疲劳寿命提高了 7 倍多。

2.2 超声冲击对焊接接头焊趾处应力集中的影响

采用扫描电镜观察焊态及冲击态接头焊趾区的几何轮廓形状, 如图 4 所示。图 4(a)中焊态试样的焊趾过渡区域较为尖锐, 圆弧过渡半径较小; 图 4(b)中经过超声冲击处理后, 焊缝与母材之间实现了圆滑过渡, 且焊趾过渡半径显著增大。

根据超声冲击处理前后接头的实际几何轮廓建立模型, 不考虑残余应力和焊接缺陷的影响, 采用有限元软件 ABAQUS 对接头进行应力分析, 有限元计算时施加的载荷为 100 MPa 均匀拉伸载荷。图 5 为焊态和冲击态试样的主应力云图。焊趾处最大应力与平均应力(平均应力为试样中间平行段焊接接头之外位置的应力)之比为焊接接头的应力集中系数, 应力集中系数反映了缺口效应的

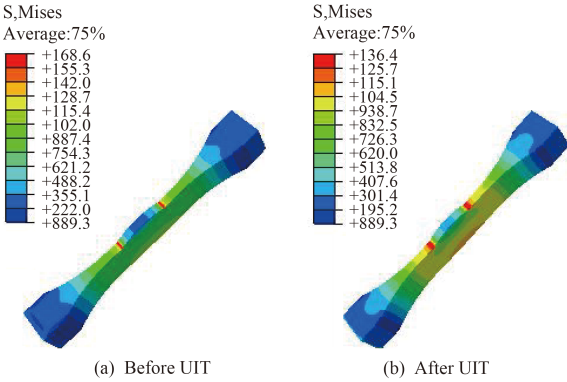


图 5 焊接接头主应力云图

Fig.5 Principal stress contours of welded joints

程度。通过计算得到焊态和冲击态焊接接头的应力集中系数依次为 $K_t=168.6/100=1.686$ 和 $K_t=136.4/100=1.364$ 。冲击态接头的应力集中系数降幅达到 19.1%。

超声冲击处理使焊接接头焊趾区域平滑过渡, 同时消除表面缺陷(如微小咬边、凹坑、鱼鳞纹等), 降低应力集中系数, 能显著提高接头的疲劳寿命和疲劳强度。另外, 根据焊态及冲击态疲劳试样的断裂位置来看, 它们均断裂于焊趾区域, 超声冲击虽然能较大幅度的提高焊接接头疲劳性能, 但接头焊趾处仍存在一定的应力集中。无论冲击与否, 焊趾均为疲劳破坏的薄弱环节。

2.3 超声冲击改善焊接接头焊趾处的残余应力

对焊态及冲击态试样焊趾区域的残余应力(包括横、纵向应力)进行测试, 测量的位置是接头焊趾表面的残余应力, 测量结果是多次取平均值。测试结果如表 3 所示。由于焊态试样是采用线切割机从焊态大板中切割所得, 切割过程中接头焊趾部位的变形约束去除, 残余应力得到大幅释放, 接头纵向残余应力数值为 20.32 MPa, 横向残余应力值为 11.13 MPa。冲击态疲劳试样是从冲击态大板中切割获取的, 也存在残余应力的释放, 但应力状态呈现为压应力, 数值为 -40.46 MPa。

表 3 试样焊趾区域的残余应力

Table 3 Residual stresses in the weld toe of specimen				
Specimen	Transverse residual stress / MPa	Error/ %	Longitudinal residual stress / MPa	Error/ %
Welded specimen	11.13	13.51	20.32	10.59
Impact specimen	-40.46	12.53	-23.59	10.78

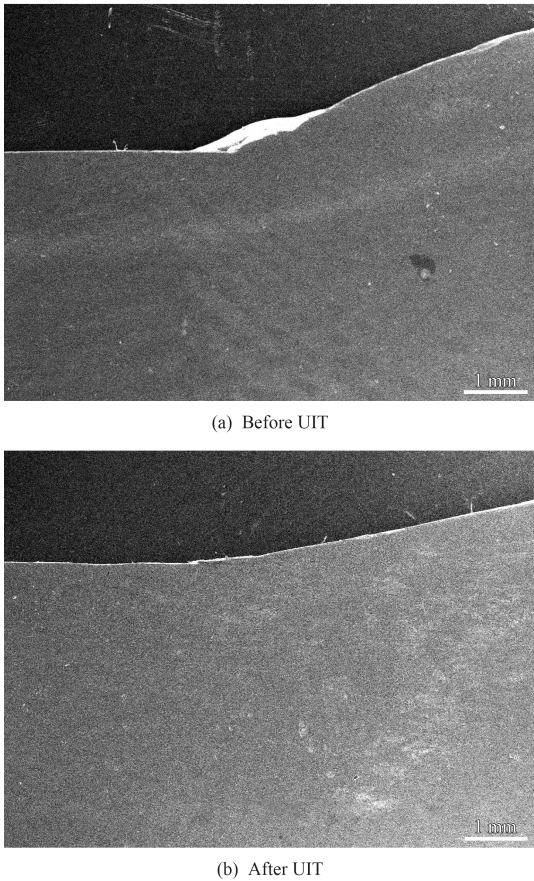


图 4 超声冲击前后焊趾处的几何形貌

Fig.4 Geometrical features at weld toe before and after ultrasonic impact treatment

在超声冲击针高频、高效的冲击作用下，焊趾表面塑性变形层内的应力状态转变为有益的残余压应力。

通常来讲，材料的临界应力强度因子 ΔK_{th} 值与自身的组织性能、外加载荷中的平均应力有关。在平均应力作用的条件下， ΔK_{th} 值的表达式为：

$$\Delta K_{th} = \frac{1.2(\Delta K_{th})_0}{1 + 0.2\left(\frac{1+R}{1-R}\right)} \tag{1}$$

当焊接接头承受循环交变载荷作用时，焊趾表层经超声冲击后形成的残余压应力与外加载荷中一部分拉应力相互作用，会降低接头试样实际承受的平均应力(即 R 值)，由式(1)可知， R 值的降低会提高裂纹尖端的临界应力强度因子 ΔK_{th} 值，抑制疲劳裂纹的早期扩展，从而有效提高焊接接头的疲劳寿命。

2.4 超声冲击细化焊接接头焊趾表层的微观组织

图 6 为 4 组冲击参数下横截面的金相组织，其中 4 组所对应的冲击参数分别为 1.5 A/10 min、

2.0 A/5 min、2.0 A/10 min、2.0 A/20 min，对应的变形层厚度分别为 305、270、360 和 435 μm 。在相同冲击时间的条件下，变形层厚度与冲击电流成正比关系，电流越大，对应的厚度也越深；当冲击电流相同时，变形层厚度随着冲击时间的增加而增加，但是增加的幅度在逐渐减小。

图 7 为 4 组不同冲击参数下的焊接接头焊趾表面 TEM 像，包括明场像及选区的电子衍射花样。图 7 表明，焊趾表层的晶粒得到明显的细化。选区电子衍射花样反映了所选区域的晶粒细化情况和晶粒取向分布。选区电子衍射花样表现为连续的同心圆环，如果同心环越连续，说明晶粒细化程度越高而且晶粒取向越随机。图 7(c)比图 7(a)衍射环更加连续，说明大电流下晶粒细化程度更高。另外，从图 7(b)(c)(d)还可以看出，纳米晶的尺寸会随着冲击时间的增加而减小。图 7(d)图的衍射环为非常连续的同心圆环，说明选区的组织为大小均匀的等轴状纳米晶。它是通过位错累积和亚晶的演变，原有的薄片状亚微晶或胞组织继续细

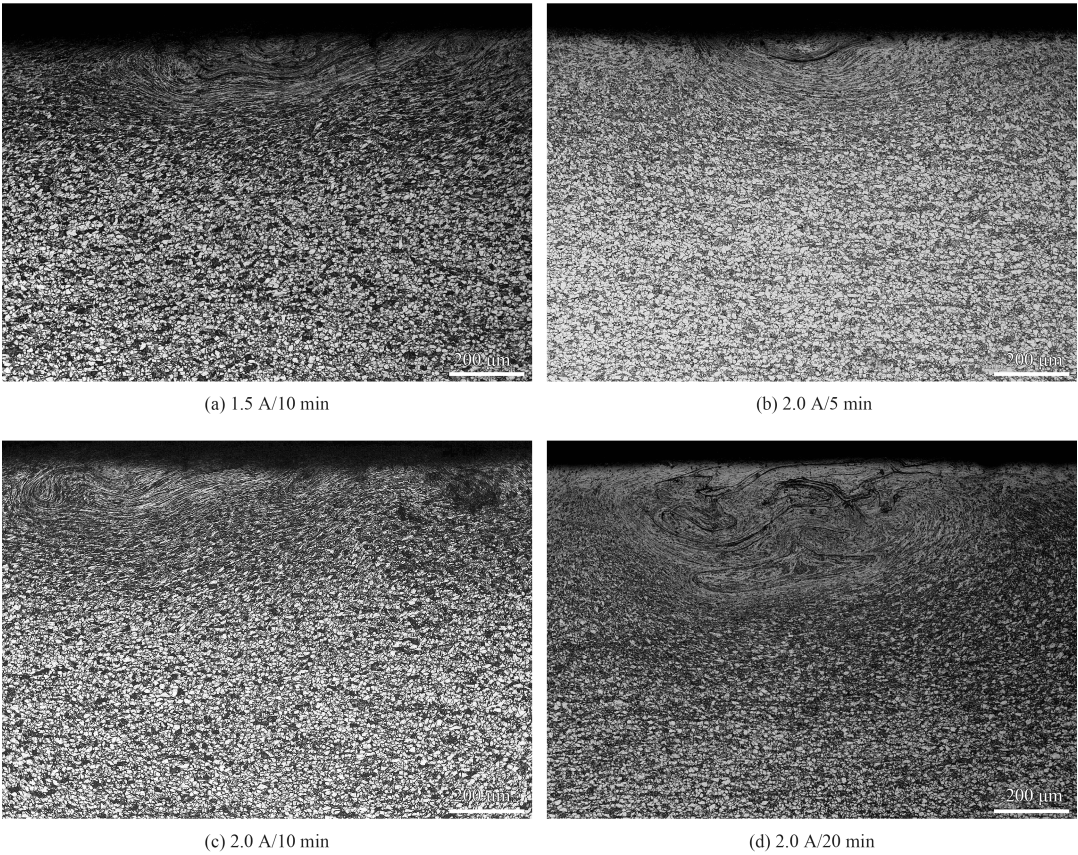


图 6 不同冲击参数下的焊趾横截面金相组织

Fig.6 Optical cross-section morphologies of weld toe under different impact parameters

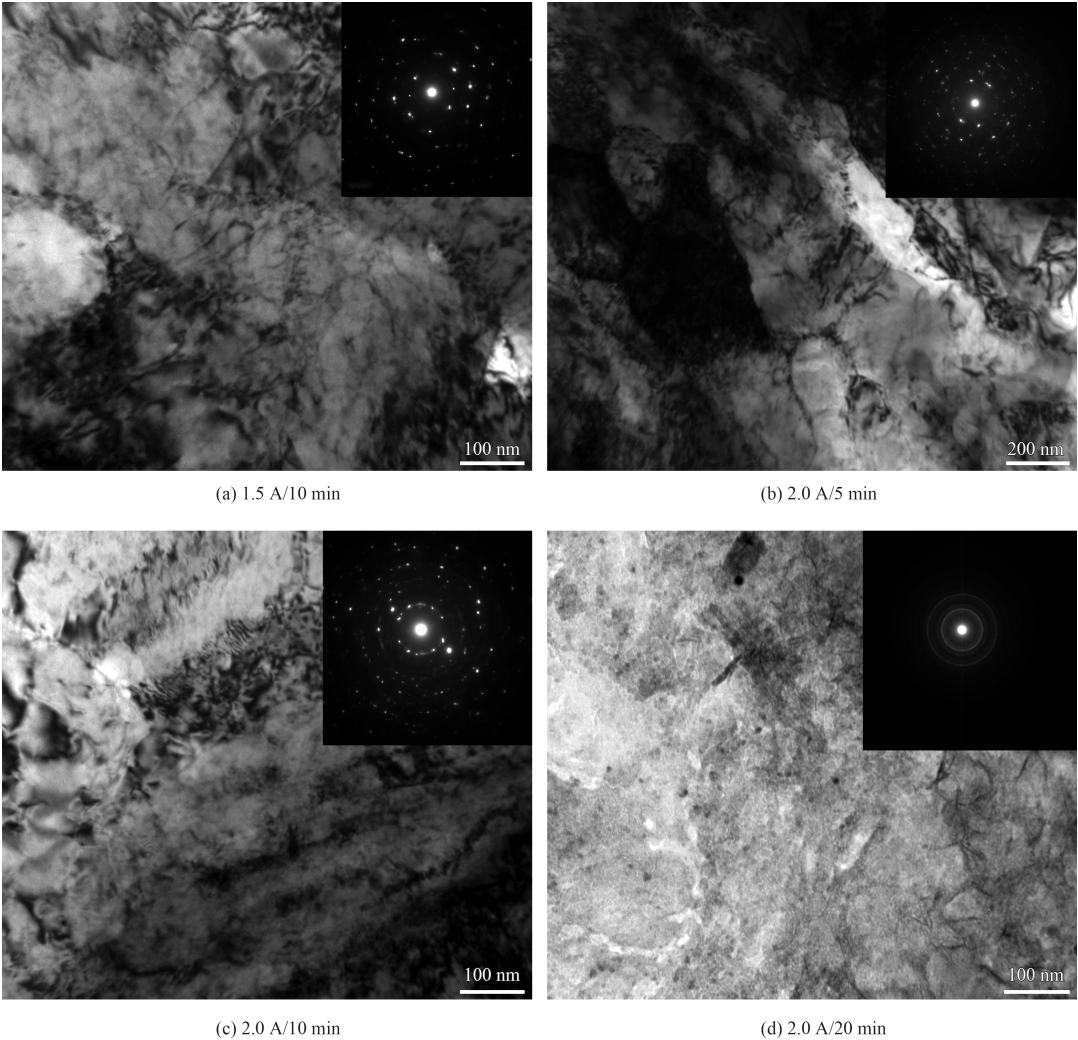


图 7 不同冲击参数下的焊接接头焊趾表面的 TEM 像
Fig.7 TEM images of the weld toe surface under different impact parameters

化而形成的；其衍射环比其它 3 个表现的更为连续和随机，说明相邻的纳米晶粒更为致密。其具体的纳米晶形成过程为：在冲击针高频冲击作用下，焊趾表面晶粒产生剧烈塑形变形，原始晶粒内部形成大量的位错，大量的杂乱无章的位错相互缠结，形成高密度的位错缠结。高密度的位错缠结随着变形过程的进行，逐渐演变成小角度亚晶界。小角度亚晶界处位错不断增殖和湮灭，两侧的晶体结构的取向不断增大，逐渐形成细小的亚晶结构。细小的亚晶结构通过进一步的位错缠结、位错墙和亚晶的演变，最终形成随机取向、晶界清晰的纳米等轴晶粒。

根据以上分析可以看出超声冲击可以使表面及近表面组织发生细化。晶粒的尺寸和其强度成一定关系，晶粒尺寸越小其强度越高。所以经过

超声冲击处理，焊趾处薄弱组织得到强化，从而延长了疲劳裂纹从焊趾处萌生的时间，从而提高了焊接接头的疲劳寿命。

3 结 论

(1) 焊态和冲击态试样的 S-N 曲线存在两个不同阶段，高周阶段下降较快，超高周阶段下降缓慢，且均无疲劳极限的存在。在相同循环周次下，冲击态试样的疲劳强度比焊态试样提高 35% 以上，在 240 MPa 的应力水平下，焊接接头经超声冲击处理后的疲劳寿命提高了 7 倍。

(2) SMA490BW 钢焊接接头焊趾表面经超声冲击处理后，焊缝与母材之间实现了圆滑过渡，且焊趾过渡圆弧半径显著增大，焊态接头的应力集中系数为 1.686，而冲击态接头为 1.364，下降

了 19.1%，对提高焊接接头的疲劳寿命起着决定性作用。

(3) 经过超声冲击处理后，接头焊趾处的残余拉应力得到消除，并转变为有益的残余压缩应力，增大了材料的疲劳裂纹扩展门槛值，抑制裂纹的早期扩展，对延长焊接接头的疲劳寿命有一定作用。

(4) SMA490BW 钢焊接接头在 4 种超声冲击工艺参数下，表层晶粒均得到明显细化，可获得随机取向分布的纳米晶组织。在相同冲击时间的条件下，变形层厚度与冲击电流成正比关系，电流越大，对应的厚度也越深；当冲击电流相同时，变形层厚度随着冲击时间的增加而增加，但是增加的幅度在逐渐减小。

参考文献

- [1] 吴良晨, 王东坡, 邓彩艳, 等. 超长寿命区间 16Mn 钢焊接接头疲劳性能[J]. 焊接学报, 2008, 29(3): 117-120.
WU L C, WANG D P, DENG C Y, et al. Fatigue properties of welded joints of 16Mn steel with ultra long service life[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(3): 117-120 (in Chinese).
- [2] 刘龙隆, 轩福贞, 朱明亮. 25Cr2Ni2MoV 钢焊接接头的超高周疲劳特性[J]. 机械工程学报, 2014, 50(4): 25-31.
LIU L L, XUAN F Z, ZHU M L. Ultra high cycle fatigue behavior of 25Cr2Ni2MoV steel welded joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(4): 25-31 (in Chinese).
- [3] 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(6): 1-14.
HE B L, ZHANG Z S, XIE X T, et al. Influence of the loading environment on ultra-high-cycle fatigue of alloy material[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016, 33(6): 1-14 (in Chinese).
- [4] 王伯铭. 高速动车组总体及转向架[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2009.
WANG B M. High speed EMUs and bogie [M]. Chengdu: Southwest Jiao Tong University press, 2009 (in Chinese).
- [5] 鲁二敬. 转向架构架材料及焊接接头组织与性能研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2013.
LU E J. Research on the microstructure and properties of the bogie frame materials and welded joints [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2007 (in Chinese).
- [6] YU Y X, HE B L, LIU J, et al. Surface plastic deformation and nanocrystallization mechanism of welded joint of 16MnR steel treated by ultrasonic impact[J]. Materials Science (medžiagotyra), 2015, 21(4): 612-615.
- [7] 何柏林, 魏康. 高强度钢超高周疲劳的研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(4): 134-137.
HE B L, WEI K. Research progress on high cycle fatigue of high strength steel[J]. Materials review, 2015, 29(4): 134-137 (in Chinese).
- [8] ZHANG W H, WU P B, WU X J, et al. An investigation into structure failures of Chinese high-speed trains[J]. Engineering Failures Analysis, 2006, 13(1): 427-441.
- [9] ZHAO X H, Wang D P, Huo L X. Analysis of the S-N curves of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment[J]. Materials & Design, 2011, 32(1): 88-96.
- [10] 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 D P, GONG B M, WU S P, 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 (in Chinese).
- [11] 单清群, 孙福庆, 朱善峰. SMA490BW 耐候钢激光-电弧复合焊接接头性能[J]. 电焊机, 2017, 47(3): 79-83.
SHAN Q Q, SUN F Q, ZHU S F. Properties of welded joint in laser-MAG hybrid welding of SMA490BW weather-resistance steel[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(3): 79-83 (in Chinese).
- [12] 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): 30-33.
LV Z M, HE B L, YU Y X. Effect of ultrasonic impact treatment parameters on plastic deformation layer of SMA490BW steel[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 39(2): 30-33 (in Chinese).
- [13] HE B L, XIONG L, JIANG M M. Surface grain refinement mechanism of SMA490BW steel cross joints by ultrasonic impact treatment[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2017, 24(4): 410-414.
- [14] 魏康. 超声冲击对 SMA490BW 钢对接接头超高周疲劳性能的影响研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2016.
WEI K. Study on very high cycle fatigue property for butt welded joints of SMA490BW Steel by ultrasonic impact treatment[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2016 (in Chinese).

(责任编辑: 陈茜)