

网络出版时间 2014/9/9 14:38

网络出版地址 <http://www.cnki.net/kcms/detail/33.1331.TJ.20140909.1438.003.html>

# 焊趾 TIG 熔修跟随超声冲击处理对焊接接头残余应力及疲劳强度的影响

姚鹏<sup>1</sup>, 张志毅<sup>2</sup>, 吴向阳<sup>2</sup>, 齐维闯<sup>2</sup>, 史春元<sup>1</sup>

(1.大连交通大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116028;

2.南车青岛四方机车车辆股份有限公司 技术工程部, 山东 青岛 266111)

**摘要** 采用焊趾 TIG 熔修跟随超声冲击处理工艺对 SMA490BW 钢超微弧焊接头进行处理, 对超声冲击前后焊趾熔修区残余应力以及接头 4 点弯曲疲劳性能进行研究。结果表明: 超声冲击后, 焊趾熔修区残余应力由拉应力转变为对疲劳强度有利的双向压应力, 纵向与横向残余应力平均消除率分别达到 116% 和 158%, 超声冲击通过增大焊趾角与焊趾半径, 使焊趾熔修区应力集中程度降低 22%, 超声冲击可使接头疲劳强度提高 70%。

**关键词** SMA490BW 钢; 焊趾 TIG 熔修; 超声冲击; 残余应力; 疲劳强度

中图分类号 TG441.8

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2014)05-0094-04

## Influence of ultrasonic impact following TIG remelting at weld toe on residual stress and fatigue strength of welding joints

YAO Peng<sup>1</sup>, ZHANG Zhiyi<sup>2</sup>, WU Xiangyang<sup>2</sup>, QI Weichuang<sup>2</sup>, SHI Chunyuan<sup>1</sup>

(1. Institute of Material Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;

2. Department of Technology Engineering, CSR Qingdao Sifang Locomotive and Rolling Stock Limited Company, Qingdao 266111, China)

**Abstract** The SMA490BW steel joints welded by forceArc welding process were treated by ultrasonic impact following TIG remelting at weld toe. The four-point bending fatigue performance of joints and the residual stress of remelting zone before and after ultrasonic impact were investigated. The results indicate that the residual stress is transformed to biaxial compress stress which is beneficial to the improvement of fatigue strength after the ultrasonic impact of remelting zone. The average elimination rate of longitudinal and horizontal stress is 116% and 158%, respectively. The level of the stress concentration of weld toe is declined by 22% for the reason that both the weld toe angle and the weld toe radius are increased by ultrasonic impact. The four-point bending fatigue strength of joints is raised by 70% because of ultrasonic impact.

**Key words** SMA490BW steel; TIG remelting at weld toe; ultrasonic impact; residual stress; fatigue strength

转向架是机车车辆走行部的主要构件, 承担着车辆高速运行时所受到的交变冲击载荷<sup>[1]</sup>。构架作为转向架最为重要的组成部分, 通常采取焊接方法进行组装。随着车辆运行速度的不断提高, 人们越来越多地关注转向架焊接构架的疲劳问题, 如何改善焊接接头的疲劳强度, 成为亟需解决的一个技术问题。

焊趾 TIG 熔修处理是改善接头疲劳强度的一种常用工艺方法, 它以钨极氩弧为热源将焊趾重新熔化, 清除可能存在的一些焊接缺陷, 并形成圆滑过渡的熔

修区, 接头疲劳性能因此得到改善<sup>[2-3]</sup>。但研究发现, 经 TIG 熔修处理后, 接头熔修区残余应力状态仍呈对疲劳强度不利的拉应力状态<sup>[4]</sup>。

作者提出了焊趾 TIG 熔修跟随超声冲击处理工艺, 尝试通过对焊趾 TIG 熔修区进行超声冲击处理, 抵消熔修区残余拉应力场, 甚至形成双向压应力场。并且, 通过对比超声冲击前后接头疲劳强度的变化, 为焊趾 TIG 熔修跟随超声冲击处理工艺在转向架焊接构架制造中的应用提供实验依据。

收稿日期 2013-10-22; 修回日期 2014-01-25

作者简介 姚鹏, 硕士研究生, 研究方向为先进焊接与连接技术。E-mail yaopeng3778@126.com。

通信作者 史春元, 博士, 博士研究生导师, 教授, 研究方向为现代轨道车辆焊接生产技术。E-mail shicy@sina.com。

# 1 试验

## 1.1 材料

试验用钢为SMA490BW钢板材(厚为12 mm),其化学成分(质量分数)为:  $C \leq 0.18\%$ 、 $0.15\% \sim 0.65\%$  Si、 $Mn \leq 1.4\%$ 、 $S \leq 0.035\%$ 、 $P \leq 0.035\%$ 、 $0.30\% \sim 0.50\%$  Cu、 $0.45\% \sim 0.75\%$  Cr、 $0.05\% \sim 0.30\%$  Ni;力学特性:  $R_{el} \geq 365$  MPa、 $R_m$ 为490~610 MPa、 $A \geq 15\%$ 、弯曲180°( $d=2a$ )合格、 $A_{kv} \geq 27$  J(-40 °C)。焊丝选用编号为CHW-55CNH的实芯焊丝,其中 $\phi 1.2$  mm的焊丝配以80%Ar+20%CO<sub>2</sub>用于超微弧焊, $\phi 2.5$  mm焊丝配以100%Ar用于焊趾TIG熔修处理,保护气体流量为20 L/min。

## 1.2 方法

由于转向架焊接构架出现的疲劳破坏多集中于T型接头,因此选用T型接头,焊接工艺参数见表1。其中,超微弧焊接设备用德国EWM公司研制的PHOENIX521EXPERTPULS forceArc新型MAG焊机。TIG熔修处理采用YC-400PX3型钨极氩弧焊机,钨极采用钍钨极,直径为2.0 mm。焊后接头均进行(590±15)°C/2h退火处理,后进行焊趾TIG熔修处理,最后对熔修区进行超声冲击处理,超声冲击处理采用HY2050型豪克能超声波冲击设备,超声冲击工艺参数:激励电流*I*为1.8~2.0 A、振幅为50 μm、输出频率*F*为18~22 kHz。

### 1.2.1 焊趾熔修区残余应力测试

表1 接头焊接工艺参数

Table 1 Process parameters of welding joints

焊道数	焊接方法	焊接电流		电压/V
		种类极性	电流/A	
1	超微弧	DCEN	180~220	23~26
其余			280~320	31~34
	TIG熔修	DCEP	120~130	13~14

采用盲孔法测定焊趾熔修区在超声冲击前后的残余应力。三向电阻应变计型号为BE120-2CA-K,灵敏系数为2.16。用CCZ-1型测钻设备钻 $\phi 2$  mm×2 mm的盲孔。通过YJ-25型应变仪测量释放应变,应用弹性理论计算出该部位的残余应力。焊趾熔修区残余应力测点位置,见图1。测试点的编号从左到右依次为①到⑤。

### 1.2.2 4点弯曲疲劳试验

4点弯曲疲劳试验参照JB/T 7716—1995在MTSNEW810电液伺服万能试验机上完成,4点弯曲疲

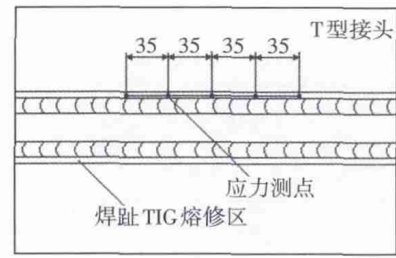


图1 熔修区残余应力测点位置

Fig.1 Position of residual stress of remelting zone

劳试样的形状及尺寸,如图2所示。加载点间距为100 mm,支撑点间距为160 mm。应力波形为正弦波,应力比*R*为0.1,试验频率为20 Hz,指定疲劳寿命为10<sup>7</sup>。

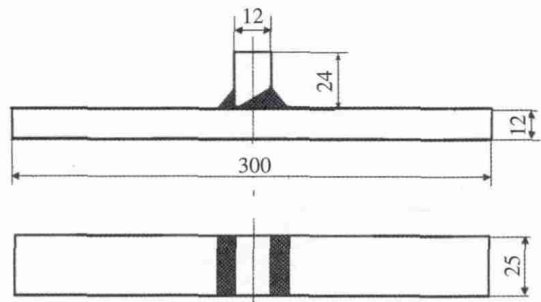


图2 4点弯曲疲劳试样(mm)

Fig.2 Four-point bending fatigue specimens(mm)

## 2 结果与分析

### 2.1 焊趾熔修区残余应力测试

表2、3为超声冲击前后焊趾熔修区的残余应力。可知,超声冲击前熔修区残余应力仍呈拉应力状态。其中,纵向残余应力 $\sigma_x$ 平均值为267.66 MPa,横向残余应力 $\sigma_y$ 平均值为86.37 MPa。可见,焊趾TIG熔修并不能调整焊趾残余应力场,这与文献[4]研究结果一致。这是因为,对焊趾进行TIG熔修,焊趾相当于进行了一次TIG焊,由于焊接热源作用以及加热温度远高于金属材料的力学熔点(约700 °C),导致其体积膨胀受周围低温金属的限制而产生压缩塑性变形。冷却过程中,当温度高于力学熔点时,TIG熔修焊缝及其附近金属的体积收缩受其周围先冷金属的限制而产生拉伸塑性变形。当温度降低至力学熔点以下时,其恢复弹性,TIG熔修焊缝及其附近金属此时因收缩受限产生弹塑性变形。因此,当冷却到室温时,熔修区保留了不可恢复的压缩塑性变形,残余应力状态仍为拉应力。

表2 超声冲击前后焊趾TIG熔修区纵向残余应力  $\sigma_x$

Table 2 Longitudinal residual stress  $\sigma_x$  of TIG remelting zone before and after ultrasonic impact

测点 编号	冲击前 $\sigma_x$ /MPa		冲击后 $\sigma_x$ /MPa		消除量/MPa	平均消除量/MPa	消除率/%	平均消除率/%
	应力值	平均值	应力值	平均值				
①	249.22		-48.42		297.64		119.43	
②	200.74		-51.56		252.3		125.69	
③	343.68	267.66	-47.56	-43.36	391.24	311.02	113.84	116
④	329.54		-49.01		378.55		114.87	
⑤	215.13		-20.27		235.4		109.42	

表3 超声冲击前后焊趾TIG熔修区横向残余应力  $\sigma_y$

Table 3 Horizontal residual stress  $\sigma_y$  of TIG remelting zone before and after ultrasonic impact

测点 编号	冲击前 $\sigma_y$ /MPa		冲击后 $\sigma_y$ /MPa		消除量/MPa	平均消除量/MPa	消除率/%	平均消除率/%
	应力值	平均值	应力值	平均值				
①	107.63		-23.81		131.44		122.12	
②	73.74		-60.02		133.76		181.39	
③	91.26	86.37	-20.92	-50.35	112.18	136.72	122.92	158
④	77.91		-51.31		129.22		165.86	
⑤	81.3		-95.68		176.98		217.69	

进行超声冲击处理后,焊趾TIG熔修区纵向残余应力  $\sigma_x$  平均值为-43.36 MPa, 横向残余应力  $\sigma_y$  平均值为-50.35 MPa。与超声冲击前相比,纵向和横向残余应力平均消除率分别达到116%和158%,这表明对熔修区进行超声冲击处理,可抵消熔修区残余拉应力场,形成双向压应力场,与文献[5-6]结论一致。

对于超声冲击处理使残余应力由拉应力转为压应力,可从宏观的应力应变和微观的位错理论进行解释<sup>[7]</sup>。焊接残余应力在微观上是一种位错结构的宏观构造,当位错组合形态处于不稳定的高能态时,对应着残余拉伸应力状态。超声冲击处理时,高频的能量和宏观冲击应力作用于表面金属使其产生塑性变形,残余拉应力由于屈服而降低。与此同时,在微观上必然伴随着位错结构的改变,在冲击使表面金属发生塑性变形的同时,位错会从不稳定的高能态运动到相对稳定的低能态,既金属晶体通过位错运动产生的塑性变形又会使残余拉应力变小,最终直至更稳定的压应力。此外,还有研究者认为受到输入的高频能量作用后,金属表层的相组织由奥氏体变为马氏体,相变突变伴随着体积的突变和膨胀,体积的膨胀必然引起高幅值压缩应力的产生<sup>[8]</sup>。

2.2 4点弯曲疲劳试验

按照幂函数模型  $S^m \cdot N = C$  对疲劳试验数据进行处理,得到超声处理前后接头疲劳S-N曲线,见图3。接头在指定寿命  $1 \times 10^7$  次下的疲劳强度,见表4。

由图3和表4可知,超声冲击处理可使接头疲劳强度提高70%。显然,疲劳强度的提高与熔修区残余应力状态、焊趾应力集中程度有关。

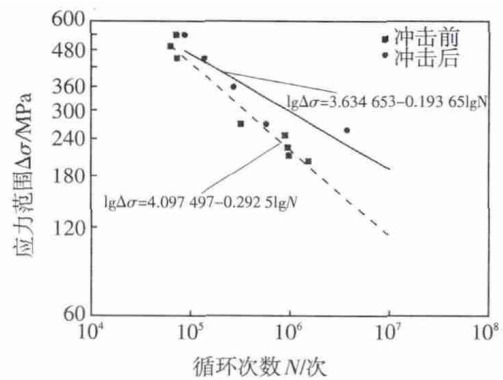


图3 接头S-N曲线

Fig.3 S-N curve of joints

表4 两种接头的疲劳强度

Table 4 Fatigue strength of two kinds of joints

处理状态	疲劳强度 $\Delta\sigma$ /MPa	疲劳改善程度/%	相关系数 $r$
冲击前	112		-0.980
冲击后	190	70	-0.904

2.2.1 焊趾熔修区残余应力状态

通过熔修区残余应力测试可知,经超声冲击处理,熔修区残余应力转变为双向压应力状态。显然,残余压应力对提高疲劳强度有利,这可利用 $\sigma_a-\sigma_m$ 疲劳图(图4)加以解释。曲线ACB上各点的横、纵坐标之和就等于材料的疲劳极限 $\sigma_R=\sigma_a+\sigma_m$ , $\sigma_m$ 为平均应力, $\sigma_a$ 为应力幅。没有残余应力时,假设构件受交变载荷工作在曲线上的 $D_0$ 点。在同样的载荷下,若存在残余压应力 $\sigma_{m0}$ 减小为 $\sigma_{m2}$ ,而 $\sigma_{a0}$ 不变,工作点变为 $D_2$ , $\sigma_{max}<\sigma_R$ ,不会发生疲劳破坏,说明叠加残余压应力对提高疲劳强度有利。

2.2.2 焊趾应力集中

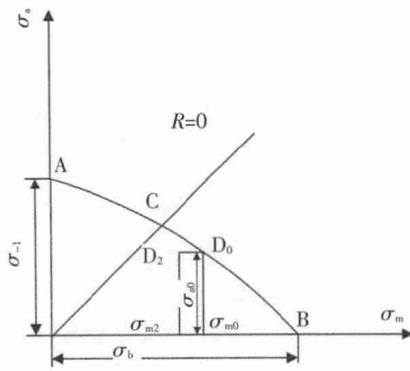


图4  $\sigma_a-\sigma_m$ 疲劳图

Fig.4 Fatigue chart of  $\sigma_a-\sigma_m$

研究表明,焊趾应力集中是决定接头疲劳强度的主要因素。通常,应力集中程度通过应力集中系数进行表征。焊趾应力集中程度越大,越易产生疲劳裂纹,接头疲劳强度越低。相关文献表明,若接头类型和板厚一定,焊趾应力集中系数的大小主要受焊缝几何参数的影响<sup>[9-10]</sup>。焊趾应力集中系数计算公式<sup>[11]</sup>:

$$kt = 1 + \frac{1 - \exp\left[-0.9 \sqrt{\frac{B}{h}} \cdot (\pi - \theta)\right]}{1 - \exp\left[-0.9 \sqrt{\frac{B}{h}} \cdot \frac{\pi}{2}\right]} \cdot \left[\frac{1}{2.8} \frac{B}{b-2} \cdot \frac{h}{R}\right]^{0.65} \quad (1)$$

其中  $h$  为焊脚尺寸  $b$  为钢板厚度一半  $B=(h+b)$ ;  $\theta$  为焊趾角  $R$  为焊趾半径。

接头几何形状参数示意图与超声冲击前后焊趾宏观形貌,分别见图5和图6。通过测量得到相关数据,利用上述公式计算超声冲击前后焊趾处应力集中系数,结果见表5。可知,超声冲击处理后,焊趾熔修区应力集中系数由冲击处理前的1.37减小为1.07,降幅达22%。由此可知,超声冲击可使焊趾熔修区应力

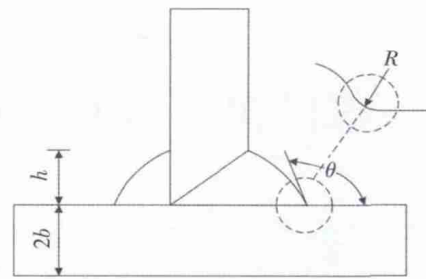


图5 焊接接头几何形状参数示意图

Fig.5 Schematic diagram of geometric parameters of joints

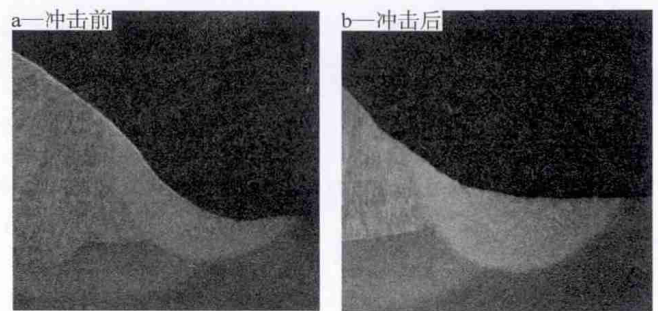


图6 焊趾处宏观形貌

Fig.6 Macrostructures of weld toe

表5 焊趾应力集中系数

Table 5 Stress concentration factor of weld toe

处理状态	$h/mm$	$b/mm$	$B/mm$	$\theta/rad$	$R/mm$	$kt$
冲击前	10.5	6	16.5	$0.61\pi$	3.6	1.37
冲击后	10.5	6	16.5	$0.88\pi$	12.0	1.07

集中程度减小22%。这是因为,超声冲击处理将超声频率的机械振动传递给熔修区,使熔修区表面产生足够深度的塑变层,焊趾角与焊趾半径显著增大,进而降低了应力集中程度。

因此,采用焊趾TIG熔修跟随超声冲击处理工艺,可在焊趾TIG熔修的基础上通过超声冲击缓解焊趾熔修区应力集中程度,并将焊趾熔修区残余应力由拉应力状态转变为双向压应力状态,因而接头疲劳强度得到提高。

3 结论

1) 对于SMA490BW钢超微弧焊接头,焊趾TIG熔修处理后,熔修区残余应力仍为拉应力。熔修区经超声冲击后,其残余应力呈对疲劳强度有利的双向压应力,纵向与横向残余应力平均消除率分别达到116%和158%。

2) 焊趾熔修区经超声冲击处理后,其应力集中程度降低了22%。

网络出版时间 2014/8/29 13:07

网络出版地址 <http://www.cnki.net/kcms/detail/33.1331.TJ.20140829.1307.006.html>

## 烧结温度对Ti<sub>2</sub>SnC导电陶瓷摩擦磨损性能的影响

邢健<sup>1</sup>, 刘可心<sup>1</sup>, 程艳艳<sup>2</sup>

(1.东北电力大学 工程训练教学中心,吉林 吉林 132012 2.吉林工业职业技术学院 化工机械系,吉林 吉林 132013)

**摘要** 采用Ti粉、Sn粉和C粉为反应物原料,通过机械合金化和放电等离子(SPS)烧结进行Ti<sub>2</sub>SnC导电陶瓷的制备,探讨烧结温度对机械合金化产物和烧结块体的相组成及微观形貌的影响,同时对烧结块体的硬度、摩擦磨损性能进行分析。研究表明:温度为600~1 000 ℃,块体的硬度和摩擦因数随着烧结温度的提升而逐渐降低;温度为1 000 ℃,块体具有较低的硬度和较小的摩擦因数;温度超过1 000 ℃,高温导致部分Ti<sub>2</sub>SnC开始分解,块体的硬度开始增加,摩擦磨损性能下降。

**关键词** Ti<sub>2</sub>SnC;制备;放电等离子烧结

中图分类号 TG148

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2014)05-0098-04

### Effect of sintering temperature on friction and wear properties of Ti<sub>2</sub>SnC conductive ceramics

XING Jian<sup>1</sup>, LIU Kexin<sup>1</sup>, CHENG Yanyan<sup>2</sup>

(1.School of Engineering Training Center, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2.Department of Chemical Machinery, Jilin Vocational College of Industry and Technology, Jilin 132013, China)

**Abstract** Ti<sub>2</sub>SnC conductive ceramics were prepared by mechanical alloying and spark plasma sintering using Ti, Sn and C as starting powders. The effect of sintering temperature on the phases, microstructure, hardness, friction and wear properties of sintered block was investigated. The results demonstrate that when the temperature is from 600 ℃ to 1 000 ℃, with the increase of sintering temperature, hardness and friction coefficient are decreasing; The sintered block sintered at 1 000 ℃ has lowest hardness and smallest friction coefficient; Ti<sub>2</sub>SnC begins to decompose when the temperature is higher than 1 000 ℃, hardness begins to increase and friction coefficient decreases.

**Key words** Ti<sub>2</sub>SnC; fabrication; spark plasma sintering

收稿日期 2014-05-15, 修回日期 2014-06-13

作者简介 邢健,男,硕士研究生,实验师,主要从事板料成形及金属基复合材料方向研究。E-mail:13843225230@163.com。

3) 4点弯曲疲劳试验表明,熔修区经超声冲击可使接头疲劳强度提高70%。

## 4 参考文献

- [1] 张志毅,韩永彬,王心红,等. 转向架构架补焊残余应力数值模拟[J]. 电焊机, 2012, 42(4): 82-86.
- [2] 霍立兴. 焊接结构的断裂行为及评定[M]. 北京:机械工业出版社, 2000: 358-363.
- [3] Horn A M, Hunter I, Lieurade H P. Fatigue behaviour of T-joints improved by TIG dressing[J]. Welding in the World, 1998, 41: 273-280.
- [4] Dahle T. Design fatigue strength of TIG-dressed welded joints in high-strength steels subjected to spectrum loading[J]. Fatigue, 1998, 20(9): 677-681.
- [5] 王东坡. 改善焊接接头疲劳强度超声冲击方法实验装置的研制[D]. 天津:天津大学, 1997.

- [6] 王东坡,周达. 超声波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.
- [7] 陈佳伟. 超声冲击处理消除16MnR焊件残余应力的研究[D]. 吉林:吉林大学, 2010.
- [8] 董师润,顾晓波,徐秉汉,等. 提高舰艇重要构件疲劳寿命的工艺措施-超声冲击技术[J]. 中国造船, 2004, 45(3): 38-41.
- [9] 徐济民,阎炳义,史永吉,等. TIG重熔工艺及其对角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.
- [10] 西田正孝. 应力集中[M]. 北京:机械工业出版社, 1986: 504-509.
- [11] 朱梅五,陈德彪,汪微,等. TIG熔修改善船体钢焊接接头使用性能原因分析[J]. 海军工程学院学报, 1994(5): 35-36.