超声冲击处理工艺对 Q345 焊接热影响区残余应力的影响

马国[1]，张立平[2]，刘夕[1]，孟庆禹[1]，吴斌[1]，王勇[3]，张升霞[3]，杨超[2]

（1.江苏徐州工程机械研究院，江苏 徐州 221004；2.徐工集团工程机械有限公司 高端工程机械智能制造国家重点实验室，江苏 徐州 221004；3.徐州徐工挖掘机械有限公司，江苏 徐州 221004）

摘 要：目的 降低 Q345 焊接热影响区的残余应力。**方法** 假设 Q345 对接焊缝两侧热影响区对称位置的表面残余应力一致，并采用盲孔法测量进行验证。采用超声冲击设备对焊缝一侧热影响区进行不同工艺参数的冲击处理，并测量焊缝两侧的残余应力值。对比焊缝两侧残余应力大小，并以消减率评价残余应力的消除效果。**结果** 焊缝两侧热影响区对称位置的表面残余应力差值不超过最大主应力值的 7.5%。超声冲击处理使热影响区的表面拉应力转变为压应力，消减率达到 88%~130%。冲击时间一定，冲击电流的增大使残余应力消减率增大，但消减率增加的趋势变小。冲击电流一定，冲击时间增大时，残余应力的消减率变化不明显。**结论** 可以认为焊缝两侧热影响区对称位置的应力值相等。提高冲击电流能够提高冲击力，使热影响区发生更大的塑性变形及位错结构变化，进而提高残余应力的消减率。但由于加工硬化的影响，消减率增加的趋势减小。超声冲击电流一定时，冲击力是一定的，提高冲击时间对消除率并没有明显的影响。

关键词：焊接残余应力；超声冲击处理；盲孔法；消减率；热影响区表面

中图分类号：TG404 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2017)07-0208-05

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.07.035

Effect of Ultrasonic Impact Treatment Technology on Residual Stress of Q345 HAZ

MA Guo[1], *ZHANG Li-ping*[2], *LIU Xi*[1], *MENG Qing-yu*[1], *WU Bin*[1], *WANG Yong*[3], *ZHANG Sheng-xia*[3], *YANG Chao*[2]

(1.Jiangsu Xuzhou Engineering Machinery Research Institute, Xuzhou 221004, China; 2.State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Advanced Construction Machinery, XCMG Construction Machinery Co., Ltd, Xuzhou 221004, China; 3.XCMG Excavator Machinery Co., Ltd, Xuzhou 221004, China)

ABSTRACT: The work aims to reduce residual stress of Q345 HAZ. The residual stresses of the HAZ symmetrical position on both weld sides were assumed to be consistent, then residual stresses were measured in blind-hole method for verification. HAZ on one side of weld was subject to shock treatment using ultrasonic impact machine with different technological parameters, then residual stresses on both sides were measured and compared. Removal rate was used to evaluate elimination effect. Difference between residual stresses on both sides of weld fell within 7.5% of maximum principal stress. Surface tensile stress of HAZ could be transformed into compressive stress by UIT, removal rate was 88%~130%. When impact time was unvarying, as removal rate of impact current increased, but the trend became slower. When impact current was unvarying, impact time had slight

收稿日期：2017-02-22；修订日期：2017-04-12

Received：2017-02-22；**Revised**：2017-04-12

作者简介：马国（1987—），男，硕士，工程师，主要研究方向为焊接工艺及表面工程。

Biography：MA Guo (1987—), Male, Master, Engineer, Research focus: welding technology and surface engineering.

effects on removal rate. The stresses in HAZ symmetrical position on both sides of weld can be deemed to be equal. Impact current increase can bring about UIT impact increase, leading to further plastic deformation and dislocation motion on HAZ surface, and further improve removal rate of residual stress. Work hardening slowed down the increase trend of removal rate. UIT impact is unvarying when current is unvarying, increasing impact time don't affect removal rate significantly.

KEY WORDS: welding residual stress; ultrasonic impact treatment (UIT); blind-hole method; removal rate; HAZ surface

在工程机械结构件的生产制造过程中，主要采用焊接连接的方法。由于焊接过程中，热输入对母材金属进行了不均匀的加热，形成了热影响区，该区的存在降低了焊接接头的力学性能，特别是靠近焊缝金属的粗晶区。热影响区对焊接接头性能的影响主要体现在两个方面[1]：一是热影响区组织的变化，包括晶粒长大、脆化等；另一方面是热影响区残余应力的存在。对于工程机械结构件，在工作过程中，可能会发生残余拉应力与工作应力叠加，导致材料发生屈服，进而变形，甚至断裂，发生车毁人亡事故。超声冲击利用大功率的能量推动冲击头，以每秒约 2 万次的频率冲击金属物体表面，高频、高效和聚焦下的大能量使金属表层产生较大的压缩塑性变形，同时超声冲击改变了原有的应力场，产生了压应力，进而改善工程机械结构件热影响区的性能[2—6]。

1　试验方法与过程

本文采用 HY2050G 超声冲击设备，对工程机械常用 Q345 材料对接接头热影响区进行超声冲击试验，并采用盲孔法测量超声冲击处理前后热影响区的应力，研究不同超声冲击处理工艺下，热影响区残余应力的变化规律，进而指导工程机械结构件的生产制造。

在试验过程中，假设焊接完成后，焊缝两侧热影响区对称位置的表面残余应力一致，并进行试验验证。焊接试板尺寸为 400 mm×250 mm×10 mm，焊接方法采用气体保护焊。对焊接试板焊缝一侧的热影响区进行全覆盖超声冲击处理，如图 1 所示。超声冲击处理过程中，冲击频率一定，为 20 kHz，采用 3 个冲击电流值（I_1、I_2、I_3）及 3 个冲击时间值（t_1、t_2、t_3），共 9 组冲击处理工艺参数，如表 1 所示，其中，$10^{\#}$ 试验组中不对试板进行冲击处理。

超声冲击处理后，采用型号为 HK21A 的盲孔法应力测试仪分别测试焊道两侧热影响区对称位置的残余应力[7—11]，测试点距离焊趾 2 mm。每种超声冲击处理工艺参数下的试板测试 3 个应力点 1*、2*、3*，相邻测试点之间的距离大于 20 mm。相应的，另一侧未冲击热影响区在对称位置测试 3 个点 1、2、3，如图 1 所示。测试过程包括：应变片的粘贴；接线；钻孔前对准找正；钻孔测量。

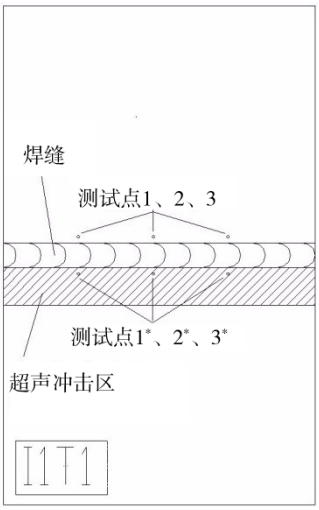


图 1　焊接试板超声冲击处理示意

Fig.1 Sketch map of UIT for welding sample board

表 1　冲击处理工艺参数

Tab.1 Technological parameters of UIT

Experiments	Current I/A	Time t/s
$1^{\#}$（I_1t_1）	2.2（I_1）	106（t_1）
$2^{\#}$（I_2t_1）	2.7（I_2）	106（t_1）
$3^{\#}$（I_3t_1）	3.3（I_3）	106（t_1）
$4^{\#}$（I_1t_2）	2.2（I_1）	251（t_2）
$5^{\#}$（I_2t_2）	2.7（I_2）	251（t_2）
$6^{\#}$（I_3t_2）	3.3（I_3）	251（t_2）
$7^{\#}$（I_1t_3）	2.2（I_1）	408（t_3）
$8^{\#}$（I_2t_3）	2.7（I_2）	408（t_3）
$9^{\#}$（I_3t_3）	3.3（I_3）	408（t_3）
$10^{\#}$（I_0t_0）	0（I_0）	0（t_0）

2　结果与分析

2.1　无超声冲击处理试板应力测试

无超声冲击处理的 $10^{\#}$试板焊道两侧的应力值及应变值如表 2 所示。σ_1 表示最大主应力，σ_2 为最小主应力，θ 为最大主应力与应变 ε_1 的夹角，应变 ε_1、应变 ε_2、应变 ε_3 分别是 0°、45°、90°方向的应变值。由于影响材料或焊接结构性能的主要因素是最大主应力，因此在分析中以最大主应力为研究对象。

表 2　无超声冲击焊接热影响区测试结果

Tab.2 Residual stress measured results of non-UIT HAZ

Measure points	Stress /MPa		Angle θ/(°)	Strain/($\times10^6$)		
	σ_1	σ_2		ε_1	ε_2	ε_3
1	317.61	66.20	7.60	−274.17	−52.33	74.71
1*	305.75	97.63	−5.79	−251.42	−134.87	41.78
2	305.91	−28.05	−15.37	−278.59	−194.95	134.19
2*	328.99	−53.60	−8.76	−333.90	−154.35	190.78
3	310.95	84.61	7.28	−260.30	−61.88	54.74
3*	313.96	35.89	−13.14	−270.18	−179.44	88.37

从表 2 可以看出，在测量点 1 位置，焊缝两侧的最大主应力值相差 11.86 MPa,约为该处最大主应力值的 3.9%。在测量点 2 位置，焊缝两侧的最大主应力值相差 23.08 MPa，约为该处最大主应力值的 7.5%。在测量点 3 位置，焊缝两侧的最大主应力值相差 3.01 MPa，约为该处最大主应力值的 1%。由于焊缝两侧应力差值不超过最大主应力值的 10%，可以近似认为未冲击处理的焊缝两侧对称点的应力值相等，以便对比超声冲击处理前后焊缝两侧的应力值。

2.2　超声冲击处理前后应力测试

采用不同超声冲击工艺参数对试板进行超声冲击处理后，焊缝两侧热影响区的应力值如图 2 所示。每种处理工艺测试 3 个点的应力。

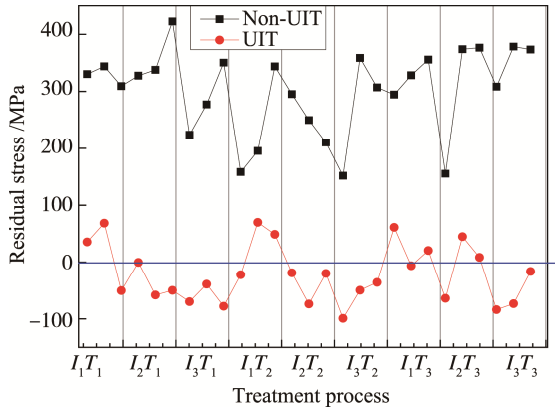


图 2　超声冲击处理前后残余应力对比

Fig.2 Comparison photograph of residual stress before and after UIT

从图 2 可以看出，未冲击处理时，焊接热影响区的最大主应力值均为正值，即拉应力，不同测试位置的应力值有所不同，最大应力达到 350 MPa 以上。超声冲击处理后，热影响区最大主应力主要为负值，即压应力。产生这种现象的机理可以从宏观的应力应变与微观的位错理论进行解释。焊接热影响区由于焊接过程中不均匀加热和冷却产生了残余应力，这种残余应力在微观上是一种位错结构的宏观构造，它们不同的排列组合形态对应着不同的宏观残余应力分布。焊接热影响区的位错结构形态处于不稳定的高能形态，在超声冲击作用下，宏观上热影响区表面产生塑性变形，微观上位错结构发生改变，在应力上表现为拉应力变小或转变为压应力[12—14]。

为说明超声冲击不同工艺参数对残余应力去除的影响，采用“消减率 ψ”来表征这一问题，消减率公式为：

$$\psi=(\sigma_{前}-\sigma_{后})/\sigma_{前}\times100\% \quad (1)$$

式中：$\sigma_{前}$为超声冲击处理前最大主应力，即 1、2、3 测试点的最大主应力；$\sigma_{后}$为超声冲击处理后最大主应力，即 1*、2*、3*测试点的最大主应力。不同参数超声冲击后，残余应力的消减率如表 3 及图 3 所示。

表 3　残余应力消减率

Tab.3 Removal rate of residual stress　　%

Samples	1	2	3	Average
1# (I_1t_1)	89.2	80.0	116.3	95.2
2# (I_2t_1)	100.1	117.2	111.8	109.7
3# (I_3t_1)	131.2	114.0	122.2	122.5
4# (I_1t_2)	114.0	64.2	85.8	88.0
5# (I_2t_2)	106.4	129.5	109.5	115.1
6# (I_3t_2)	165.3	113.8	111.6	130.2
7# (I_1t_3)	79.2	102.0	94.2	91.8
8# (I_2t_3)	141.1	88.0	97.8	109.0
9# (I_3t_3)	127.2	119.4	104.4	117.0

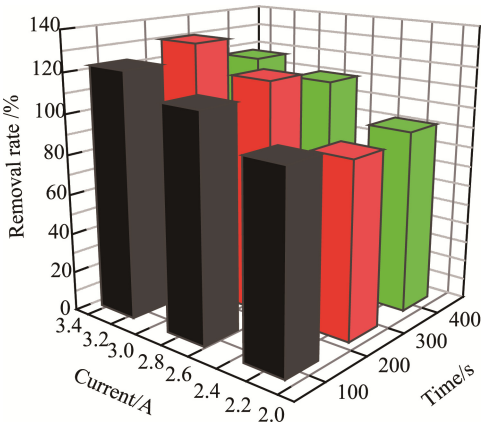


图 3　超声冲击处理工艺对残余应力消减率的影响

Fig.3 Effects of UIT technological parameters for removal rate of residual stress

从表 3 及图 2 中看出，Q345 钢焊接热影响区经过超声冲击处理后，残余应力消减率可以达到 88%~130%，说明超声冲击处理对残余应力的去除具有良好的效果。同时，从图 3 可以看出，当冲击时间 t 一定，改变冲击电流 I 时，随着冲击电流的增大，残余应力的消减率 ψ 增大，并且消减率增加的趋势变小；而当冲击电流 I 一定，冲击时间 t 增大时，残余应力的消减率 ψ 变化不明显。

从上述分析可知，可以将残余应力消减的原因归结为宏观上的应力应变及微观上的位错结构变化。在宏观上，超声冲击力作用于焊接热影响区表面，与近表面残余应力叠加，当大于材料的屈服强度时，材料表面发生塑性变形，如图 4 所示，同时微观位错结构发生改变，导致残余应力发生变化[15—16]，即：

$$\sigma_{冲}+\sigma_{残}>\sigma_{s} \tag{2}$$

式中：$\sigma_{冲}$为超声冲击力，随冲击电流的增大而增加；$\sigma_{残}$为残余应力；σ_{s}为材料的屈服强度。

当冲击时间 t 一定时，随着冲击电流 I 的增大，超声冲击力 $\sigma_{冲}$增大，焊接热影响区表面发生的塑性变形越大，微观位错结构的变化也越大，最终残余应力的消减率 ψ 增大。

焊接热影响区表面发生塑性变形的同时，必然发生材料的加工硬化现象，导致表面微区屈服强度 σ_{s} 提高，当冲击力 $\sigma_{冲}$与残余应力 $\sigma_{残}$之和与微区屈服强度 σ_{s}平衡时，表面不再发生塑性变形，残余应力的消减率 ψ 达到饱和状态。只有当继续提高冲击电流 I，提高超声冲击力 $\sigma_{冲}$时，才能打破这一平衡状态，满足式（2）。继续发生塑性变形，微观位错结构变化，导致残余应力继续消减。但由于加工硬化的程度加大，残余应力消减率 ψ 增加的趋势变小。

当冲击电流 I 一定时，超声冲击力 $\sigma_{冲}$是一定的，随着冲击时间 t 的增加，焊接热影响区表面塑性变形逐渐稳定及饱和，当继续增加冲击时间 t 时，并不会导致塑性变形，微观位错结构也不会发生明显变化，因此残余应力消减率 ψ 也不再变化。因此本文中，选用的 3 个冲击时间 t_1、t_2、t_3对残余应力消减率 ψ 的影响不明显。

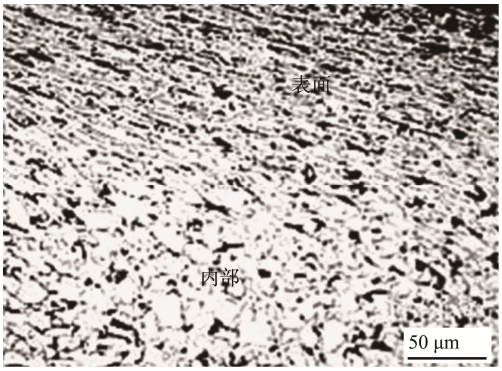


图 4　超声冲击后微观形貌

Fig.4 Micro morphology after UIT

3　结论

1）通过试验验证，可以认为未冲击处理的焊缝两侧热影响区对称点的应力值相等。

2）超声冲击处理能够将 Q345 对接板热影响区残余拉应力转变为压应力，对焊接残余应力具有良好的消除效果，消除率可以达到 88%~130%，从宏观的应力应变与微观的位错理论能够解释这种现象。

3）当超声冲击时间一定时，提高冲击电流能够提高冲击力，使焊接热影响区发生更大的塑性变形及位错结构变化，进而提高残余应力消除率。但由于加工硬化的影响，消除率增加的趋势减小。

4）当超声冲击电流一定时，冲击力是一定的，提高冲击时间对消除率并没有明显的影响。

参考文献：

[1] 周振丰, 张文钺. 焊接冶金与金属焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 160—165.
ZHOU Zhen-feng, ZHANG Wen-yue. Welding Metallurgy and Metal Weldability[M]. Beijing: China Machine Press, 1988: 160—165.

[2] 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.

[3] SUZUKI T, OKAWA T, SHIMANUKI H, et al. Effect of Ultrasonic Impact Treatment(UIT) on Fatigue Strength of Welded Joints[J]. Advanced Materials Research, 2014, 996: 736—742.

[4] 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.

[5] 肖昌辉, 贺文雄. 焊接接头超声冲击处理的研究进展[J]. 焊接技术, 2012, 41(9): 1—5.
XIAO Chang-hui, HE Wen-xiong. Effections and Research Progress of Welded Joint Treated by Ultrasonic Impact Treatment[J]. Welding Technology, 2012, 41(9): 1—5.

[6] 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. Effect of Ultrasonic Impact Treatment on Residual Stress of Welded Structure[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(4): 48—50.

[7] 宋俊凯, 黄小波, 高玉魁. 残余应力测试分析技术[J].

表面技术, 2016, 45(4): 75—82.
SONG Jun-kai, HUANG Xiao-bo, GAO Yu-kui. Test and Analysis Technology of Residual Stress[J]. Surface Technology, 2016, 45(4): 75—82.

[8] 蒋刚, 谭明华. 残余应力测量方法的研究现状[J]. 机床与液压, 2007, 35(6): 213—220.
JIANG Gang, TAN Ming-hua. Present Research Status of Measuring Residual Stress[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2007, 35(6): 213—220.

[9] 虞付进, 华云松, 张克华, 等. 轧辊表面残余应力测试方法的对比试验研究[J]. 表面技术, 2008, 37(6): 44—46.
YU Fu-jin, HUA Yun-song, ZHANG Ke-hua, et al. Contrast Experimental Study on Residual Stress Measurement of Roller [J]. Surface Technology, 2008, 37(6): 44—46.

[10] 王庆明, 孙渊. 残余应力测试技术的进展及动向[J]. 机电工程, 2011, 28(1): 11—15.
WANG Qing-ming, SUN Yuan. Research Development on the Test Methods of Residual Stress[J]. Journal of Mechanical&Electrical Engineering, 2011, 28(1): 11—15.

[11] 陈尧, 陈昌华, 汤志贵, 等. 锻件表面残余应力的盲孔法测试与分析[J]. 物理测试, 2015, 33(6): 24—30.
CHEN Yao, CHEN Chang-hua, TANG Zhi-gui, et al. Test and Analysis of Residual Stress on Forging Surface by Blind Hole Method [J]. Physics Examination and Testing, 2015, 33(6): 24—30.

[12] AN X, RODOPOULOS C A, STATNIKOV E S, et al. Study of the Surface Nanocrystallization Induced by the Esonix Ultrasonic Impact Treatment on the Near-surface of 2024-T351 Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2006, 15(3): 355—364.

[13] PRASK H J, GNAUPEL-HEROLD T, FISHER J W, et al. Residual Stress Modification by Means of Ultrasonic Impact Treatment[M]. New York: Springer, 2001: 551—554.

[14] RAO D, CHEN L, NI C, et al. Effect of Ultrasonic Impact Treatment on Residual Stress of Welded Structure[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(4): 4—12.

[15] 王者昌. 关于焊接残余应力消除原理的探讨[J]. 焊接学报, 2000, 21(2): 55—58.
WANG Zhe-chang. Discuss on Principle of Relieving Welding Residual Stress [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2000, 21(2): 55—58.

[16] 汪建华, 陆皓. 焊接残余应力形成机制与消除原理若干问题的讨论[J]. 焊接学报, 2002, 23(3): 75—79.
WANG Jian-hua, LU Hao. Some Discussions on Principle of Causing and Relieving Welding Residual Stress [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(3): 75—79.