

承载超声冲击下焊接接头疲劳性能的改善

邓彩艳， 牛亚如， 龚宝明， 王东坡*
(天津大学 材料科学与工程学院,天津 300072)

摘 要: 采用承载超声冲击处理的方法对 20 号钢 T 形管接头进行处理,并与原始焊态、非承载冲击处理态试件进行了对比. 结果表明,在高应力比 $R=0.75$ 的加载条件下,与原始焊态接头相比,非承载超声冲击和承载超声冲击的疲劳强度分别提高了 23% 和 70%,疲劳寿命分别延长了 1.4 倍和 5.6~8.5 倍. 从超声冲击处理区域表层组织、接头焊趾区表层硬度、焊接接头残余应力等方面比较了承载和非承载超声冲击提高焊接接头疲劳性能的异同,并采用有限元软件 ABAQUS 模拟了两种超声冲击处理下焊接接头的应力分布,与非承载冲击处理试件相比,承载冲击处理试件表面压缩应力值大,压缩应力层深.

关键词: 焊接接头; 疲劳性能; 承载超声冲击

中图分类号: TG 405 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20150713001

0 序 言

焊接接头承受静载的能力一般不低于母材,但由于接头应力集中和焊接残余应力等因素其承受交变动载荷的能力与母材相差甚远,是结构的薄弱环节. 疲劳断裂是接头失效的主要形式^[1],因此采取有效工艺提高焊接接头的疲劳强度是十分重要的.

锤击、喷丸处理是目前改善焊接接头疲劳性能最为普遍的方法. 但普通锤击法效率低、噪声大、可控性差且劳动强度大、效果不稳定;喷丸处理设备庞大、不适合野外和高空作业,安全防护和丸粒回收存在很大问题^[2]. 超声冲击执行机构轻巧、使用灵活方便、效率高、噪音小、成本低、适用性强^[3-4]. 超声冲击提高疲劳强度在低应力比下已被广泛应用,目前在高应力比下,超声冲击改善疲劳强度的机理研究尚未深入^[5].

通常情况构件服役之前使用超声冲击技术对焊接接头实施处理,对处于承载状态采用超声冲击方法改善其焊接接头疲劳性能机理的研究在国内外还很少^[6-7]. 因此,研究超声冲击在承载状态、高应力比加载条件下改善焊接接头疲劳性能对于指导实际应用有重大的意义. 文中对比超声冲击在非承载、承载状态下提高疲劳强度的能力,并对承载冲击提高焊接接头疲劳强度进行了分析.

1 超声冲击试验

1.1 试验材料

试验材料为 20 号钢,母材力学性能如表 1. 采用 T 形管接头形式,接头形式如图 1 所示. 采用手工电弧焊,焊接材料为 J422 焊条,焊接工艺参数见表 2.

表 1 20 号钢的力学性能

Table 1 Chemical compositions of steel 20

屈服强度 R_{el}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$
270	443	37

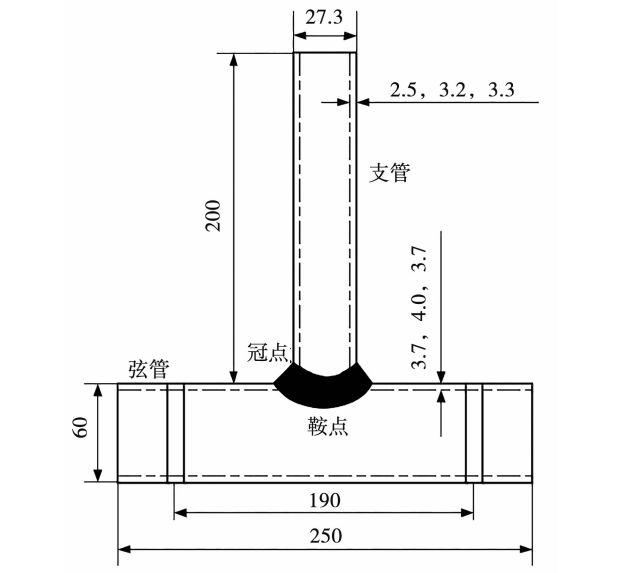


图 1 管接头试件的几何形状与尺寸 (mm)
Fig. 1 Geometrical characteristics of T-joint specimen

表 2 焊接工艺参数
Table 2 GMAW welding parameters

焊条直径 <i>d</i> /mm	焊接速度 <i>v</i> /(mm·min ⁻¹)	焊接电流 <i>I</i> /A	电弧电压 <i>U</i> /V
3.2	110 ~ 130	88 ~ 100	20 ~ 21

1.2 超声冲击处理

试验采用天津大学自行研制的 HJ-Ⅲ型超声冲击处理装置,冲击枪对准试件焊趾部位,冲击针排列方向平行于焊缝,处理过程略施加一定的压力,在略大于冲击枪自重的条件下进行. 移动速度 1.0 ~ 1.5 m/min,激励电流 2 A,摆动角度 0° ~ 10°,反复冲击 3 次. 超声冲击处理时将冲击枪在垂直于焊缝的方向做一定角度的摆动,使焊趾部位获得光滑过渡外形.

1.3 疲劳试验方法

试验在 100 kN 高频疲劳试验机上进行,加载频率 101 Hz,载荷类型为拉伸载荷,应力循环比 $R = 0.75$. 试样分为三组: A 组试样未经任何处理(焊态), B 组试样承载前每道焊趾均进行超声冲击(非承载冲击态), C 组承载后再对焊趾部位实施超声冲击处理(承载冲击态).

2 试验结果及分析

2.1 疲劳寿命结果分析

20 号钢焊态、非承载冲击处理态及承载冲击态试件的疲劳试验结果如表 3 所示.

表 3 疲劳试验结果 ($R=0.75$)
Table 3 Fatigue testing results

试件 编号	试件 类型	断裂 位置	疲劳寿命 <i>N</i> (10 ⁶ 周次)	应力范围 $\Delta\sigma$ /MPa
1	A	弦管鞍点	0.158	86
2	A	弦管鞍点	0.223	75
3	A	弦管鞍点	0.418	65
4	A	弦管鞍点	0.687	58
5	A	弦管鞍点	0.883	50
6	A	弦管鞍点	0.967	50
7	A	弦管鞍点	2.44	43
8	B	弦管鞍点	0.128	86
9	B	支管鞍点	0.228	75
10	B	弦管冠点	0.975	65
11	B	弦管鞍点	0.885	65
12	B	弦管鞍点	1.12	58
13	B	弦管冠点	1.52	50
14	C	未断	4.28	65
15	C	支管鞍点	3.07	70
16	C	支管鞍点	2.20	75
17	C	支管鞍点	0.71	86
18	C	未断	6.23	50

按照国际焊接学会钢结构循环加载疲劳设计规范规定的统计方法处理试验中相应疲劳数据,三组试样的 S-N 曲线如图 2 所示.

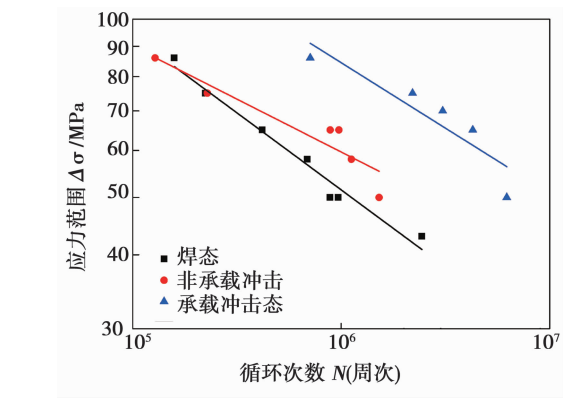


图 2 S-N 曲线对比情况 ($R=0.75$)
Fig. 2 Contrast S-N curves of welded joints

按疲劳强度的常规测试方法确定了原始焊态试件、非承载冲击处理态及承载冲击态试件在循环周次为 2×10^6 时的疲劳强度如表 4 所示.

表 4 2×10^6 周次下疲劳强度 ($R=0.75$)
Table 4 Contrast results of fatigue strength

试样编号	疲劳强度 R' /MPa	提高比率 η (%)
A	43	
B	53	23
C	73	70

由表 4 可知,在高应力比(0.75)加载条件下承载超声冲击处理工艺改善 20 号钢管焊接接头疲劳强度效果明显,在高应力水平和低应力水平下,承载超声冲击处理试件疲劳强度都高于原始焊态试件和非承载冲击试件. 循环寿命为 2×10^6 周次下焊态试件疲劳强度为 43 MPa,非承载实施超声冲击处理的试件疲劳强度 53 MPa,承载冲击处理试件疲劳强度为 73 MPa,承载冲击疲劳强度较焊态试件提高了 70%,较非承载冲击试件提高了 38%;对于非承载冲击试件,超声冲击处理改善焊接接头疲劳强度提高了 23%. 同时由文献[8]中可知,应力比 $R = 0.5$ 时,承载超声冲击处理条件下的疲劳强度较焊态接头提高了 66%,所以应力比由 0.5 提高到 0.75,承载冲击提高疲劳强度的效果没有明显变化.

为获得相同应力水平下承载超声冲击处理试件、非承载超声冲击处理试件及焊态试件疲劳寿命的变化情况,文中研究了承载冲击试件寿命为 1×10^7 周次时所对应应力范围下焊态、非承载冲击态试

件的疲劳寿命,以及焊态、非承载冲击态试件寿命为 1×10^5 周次时所对应应力范围下承载冲击态试件的疲劳寿命,结果如表 5 所示.

表 5 疲劳寿命对比

Table 5 Contrast results of fatigue life

试样 编号	应力范围 $\Delta\sigma_1/\text{MPa}$	疲劳寿命 $N_1/(10^5 \text{ 周次})$	应力范围 $\Delta\sigma_2/\text{MPa}$	疲劳寿命 $N_2/(10^6 \text{ 周次})$
A	85	1.45	50	1.05
B	85	1.45	50	2.47
C	85	9.57	50	1.0

由表 5 可知,在高应力比 $R=0.75$ 加载条件下,应力范围为 50 MPa 时,与原始焊态试件的疲劳寿命相比,非承载冲击处理试件寿命延长了 1.4 倍,承载冲击处理试件寿命延长了 8.5 倍,可见在中低应力水平下,非承载冲击、承载冲击都可以提高试件疲劳寿命,且承载冲击效果更好. 同时由文献[8]可知应力比 $R=0.5$ 时超声冲击处理条件下的疲劳寿命较焊态接头延长了 3.8~4.0 倍,由此可见应力比由 0.5 提高到 0.75 时,承载冲击可以进一步提高疲劳寿命. 应力范围为 85 MPa 时,与原始焊态试件的疲劳寿命相比,非承载冲击处理试件寿命没有提高,承载冲击处理试件延长了 5.6 倍,可见在高应力水平下,在承载条件下使用超声冲击处理试件仍能够在较大范围内提高焊接 T 形管接头的疲劳寿命.

2.2 超声冲击处理区域表层组织

使用金相显微镜观察焊态、非承载冲击态、承载冲击态试件,所得金相显微形貌如图 3 所示.

从图 3 可以看出,与焊态金相组织相比,冲击态试件焊缝的显微组织发生了明显的变化,焊缝表面都存在较大的塑性变形区,塑性变形层深度大约 80 μm ,晶粒的形状发生了明显的变化,柱状晶被打碎,晶粒细化,焊缝组织更加致密,且承载超声冲击塑性变形区晶粒尺寸明显小于承载前超声冲击处理后塑性变形区晶粒. 表面组织在超声冲击和外载荷拉力共同作用下晶粒取向趋于一致.

2.3 超声冲击接头焊趾区表层硬度

使用 MHV2000 显微硬度计对 20 号钢三种试验焊接接头的焊趾部位进行了维氏硬度测试,施加载荷 0.49 N,加载时间 10 s,测量结果如表 6 所示.

硬度表征了金属的塑性变形抗力及应变硬化能力. 由表 6 可知,对于 20 号钢焊接接头,非承载冲击处理试件焊趾区的硬度提高了 19.5%,承载冲击处理试件硬度提高了 49.7%. 这是由于随着变形程度的增加,产生加工硬化,金属的强度和硬度得到提高,这对改善焊接接头的力学性能具有积极的作用.

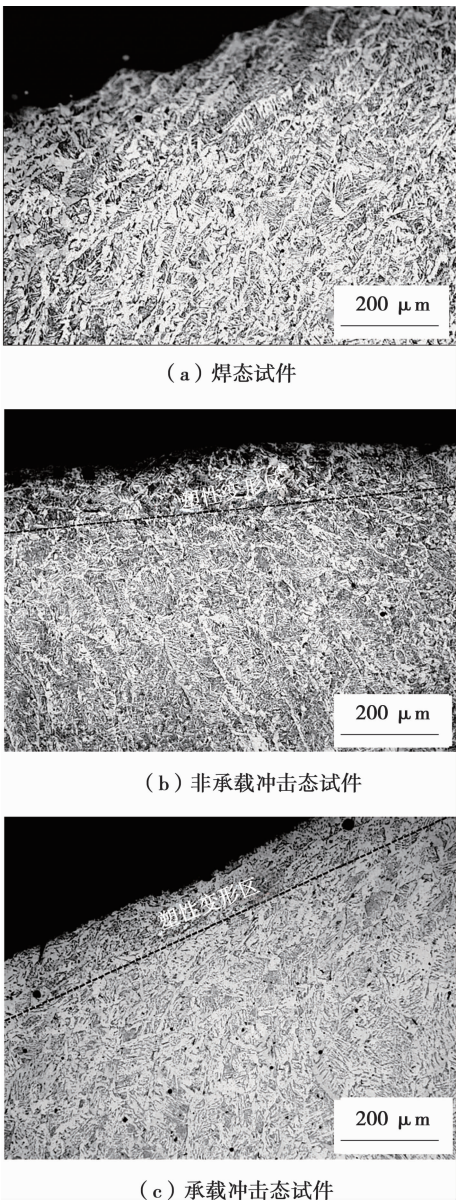


图 3 焊趾金相显微形貌
Fig. 3 Microstructure of weld toes

表 6 焊趾部位硬度试验结果统计
Table 6 Hardness of welded toes

试样	焊趾区各点硬度 $H(\text{HV})$					平均值
A	193	184	190	190	188	189
B	232	204	198	210	282	225
C	305	292	276	278	263	283

2.4 残余应力测试

使用 X 射线衍射法对焊接接头在焊态、非承载冲击及承载超声冲击处理前后的焊趾区表层残余应力进行了测定. 结果显示 20 号钢焊接接头焊趾区表面横向最大拉伸残余应力约为 170 MPa,而非承载超声冲击处理后转变为压缩残余应力为 140 MPa 左右,承载超声冲击处理后压缩残余应力 160 MPa

左右. 可见,经非承载超声冲击、承载超声冲击处理的接头焊趾区表面残余应力均由拉伸应力转变为压缩应力且承载超声冲击获得较大的压缩残余应力. 但是非承载超声冲击处理试样的疲劳性能比承载冲击低很多,这是因为焊接接头疲劳性能的改善效果取决于超声冲击形成的表面压缩应力与外加拉伸静载荷叠加之后的数值. 对于非承载超声冲击试件,超声冲击引起的表面压缩应力与拉伸静载荷叠加后形成的最终压缩应力较小;对于承载超声冲击,冲击前施加拉伸载荷,随着承载冲击的不断进行,最终在接头焊趾区表面仍然会产生接近屈服强度的表面残余压应力,这个应力是试件最终承受的真实工作静应力^[7].

2.5 残余应力数值模拟

采用有限元软件 ABAQUS 对 20 号钢 T 形管接头进行分析,接头尺寸、加载位置及施加的边界条件与实际试验中一致. 生成整体模型后,进行不均匀划分,冲击处网格进行细化. 单个冲击针以 10 m/s 的速度进行冲击,分别进行非承载情况和承载拉应力 180 MPa 的超声冲击模拟. 承载冲击前后 T 形管沿冲击方向的残余应力分布如图 4 所示.

为 1.22 mm. 在相同冲击速度和冲击针质量条件下,承载超声冲击产生更大的压应力值和压应力深度.

超声冲击处理使以焊趾为中心的一定区域内的焊接接头表面产生残余压缩应力和一定深度的塑性变形区,残余压缩应力的存在能够显著提高焊接接头的疲劳寿命. 在低应力水平,非承载时,表面层金属强烈塑性变形产生的压缩应力与外加载荷叠加,焊趾区表面压缩应力一部分被松弛,对改善疲劳寿命仍有较大作用,随着应力水平的提高,残余应力进一步被释放,超声冲击处理的焊趾区残余压缩应力数值上减小,疲劳寿命改善程度减小;承载冲击时,施加静载荷之后在进行冲击,无论是在高应力水平还是在低应力水平下,其接头焊趾区域应力均为接近屈服强度的残余压缩应力,在随后的动载作用下试件在高、低应力水平下表现出不同的疲劳寿命,承载超声冲击处理在高、低应力水平下都可以显著提高试件的疲劳性能.

3 结 论

(1) 在高应力比 $R = 0.75$ 加载条件下,较原始焊态焊接接头的疲劳强度,非承载超声冲击处理疲劳强度提高了 23%;承载超声冲击处理疲劳强度提高了 70%.

(2) 高应力水平下,非承载超声冲击处理试件较原始焊态试件疲劳寿命没有提高,中低应力水平下,疲劳寿命延长了 1.4 倍;承载超声冲击处理试件在高应力水平延长了 5.6 倍,在低应力水平延长了 8.5 倍.

(3) 模拟结果表明,承载冲击处理试件表面压应力值约 100 MPa,最大压缩应力值 380 MPa 左右,压应力层深度 1.22 mm,与非承载冲击处理试件相比,表面压缩应力值大,压缩应力层深.

参考文献:

[1] 崔维成,蔡新刚,冷建兴. 船舶结构疲劳强度校核研究现状及我国的进展[J]. 船舶力学, 1998, 2(4): 63-81.
Cui Weicheng, Cai Xingang, Leng Jianxing. A state of the art review for the fatigue strength assessment of ship structures[J]. Journal of Ship Mechanics, 1998, 2(4): 63-81.

[2] Abdullah A, Malaki M, Eskandari A. Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening[J]. Materials and Design, 2012, 38(3): 7-18

[3] 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.

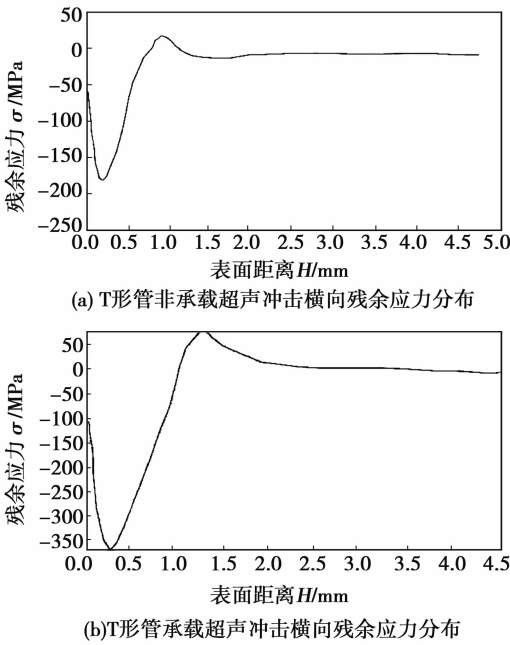


图 4 残余应力分布

Fig. 4 Distribution of residual stress

由图 4 可知,非承载冲击后表面压应力值 65 MPa 左右;最大压缩应力值约 180 MPa,出现在距表面 0.15 mm 处,压应力层深度为 0.76 mm;承载冲击后表面压应力值约 100 MPa;最大压缩应力值 380 MPa 左右,出现在距表面 0.25 mm 处;压应力层深度

Rao Delin, Chen Ligong, Ni Chunzhen, *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.

[4] Malaki M, Ding H. A review of ultrasonic peening treatment[J]. Materials and Design, 2015, 87(8): 1072–1086.

[5] 王东坡, 王 婷, 霍立兴, 等. 超声冲击处理管接头疲劳设计曲线[J]. 焊接学报, 2006, 27(3): 34–38.

Wang Dongpo, Wang Ting, Huo Lixing, *et al.* Fatigue design curve of tubular joints treated by ultrasonic peening[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(3): 34–38.

[6] Mori T, Shimanuki H, Tanaka M. Effect of UIT on fatigue strength of web-gusset welded joints considering service condition of steel structures[J]. Welding in the World, 2012, 56(9/10): 141–149.

[7] 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): 57–60.

Zhao Xiaohui, Wang Dongpo, Wang Xibao, *et al.* Improvement of fatigue performance of TC4 Ti alloy welded joint by loading ultrasonic peening[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(11): 57–60.

[8] 王东坡, 曹军辉, 霍立兴, 等. 承载超声冲击方法改善高应力比加载条件管接头疲劳性能[J]. 机械工程学报, 2006, 42(5): 144–148.

Wang Dongpo, Cao Junhui, Huo Lixing, *et al.* Improvement of ultrasonic peening treatment on tubular joints under high stress ratio Loading[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(5): 144–148.

作者简介: 邓彩艳, 女, 1979 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师. 主要研究方向为焊接结构断裂及疲劳行为. 发表论文 50 余篇. Email: dengcy@tju.edu.cn

通讯作者: 龚宝明, 男, 讲师. Email: gongbm@tju.edu.cn

[上接第 66 页]

[5] Zhang L, Liu X S, Wang L S, *et al.* A model of continuum damage mechanics for high cycle fatigue of metallic materials[J]. Transaction of Nonferrous Metals Social of China, 2012, 22: 2777–2781.

[6] Lemaitre J. How to use damage mechanics[J]. Nuclear Engineering and Design, 1984, 80(2): 233–245.

[7] Yang X H, Li N, Jin Z H, *et al.* A continuous low cycle fatigue damage model and its application in engineering materials[J]. International Journal Fatigue, 1997, 1900: 687–692.

[8] 周胜田. 航空发动机叶片疲劳损伤力学研究及外物损伤影响[D]. 沈阳: 东北大学, 2007.

[9] 李聪成, 荆洪阳, 徐连勇, 等. 蠕变疲劳交互作用下裂纹萌生的有限元模拟[J]. 焊接学报, 2016, 37(8): 5–8.

Li Chongcheng, Jing Hongyang, Xu Lianying, *et al.* Finite element simulation of crack initiation under creep-fatigue interaction[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(8): 5–8.

[10] 林有智, 傅高升, 李 雷, 等. TC4 钛合金焊接结构连续非线性疲劳损伤[J]. 焊接学报, 2013, 34(8): 92–95.

Lin Youzhi, Fu Gaosheng, Li Lei, *et al.* Continuous nonlinear fatigue damage of TC4 titanium alloy welded structure[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(8): 92–95.

作者简介: 幸 杰, 男, 1991 年出生, 硕士研究生. 主要从事高低温复合疲劳方面的研究. Email: hitxingjie@163.com

通讯作者: 徐连勇, 男, 教授. Email: xulianying@tju.edu.cn