

焊接残余应力对超声波冲击处理 焊接接头疲劳性能的影响*

王东坡 霍立兴 张玉凤

(天津大学材料科学与工程学院 天津 300072)

葛智海

(深圳赤湾胜宝旺工程有限公司质检部 深圳 518068)

摘要: 采用含高值焊接残余应力的非承载纵向角接接头进行了 Q235B 钢焊态与超声波冲击态的疲劳对比试验, 研究了焊接残余应力对超声冲击处理焊接接头疲劳性能的影响规律。结果表明: 焊接残余应力对超声波冲击处理后焊接接头疲劳性能的影响较小。使用不含高值焊接残余应力的小试件来评估超声波冲击处理对相同接头形式及板厚的大型焊接结构疲劳性能的改善程度可能是偏于安全的。

关键词: 超声波冲击 焊接接头 疲劳性能 焊接残余应力

中图分类号: TG404

0 前言

疲劳断裂是焊接结构失效的主要形式。由于接头存在应力集中和焊接残余应力等因素的影响而导致一些焊接结构因疲劳问题而过早失效。因此, 焊接接头的疲劳研究一直是国际上有关领域的研究热点之一。

在实际焊接结构中焊缝附近的焊接残余拉应力数值很大, 往往能够达到甚至超过母材的屈服强度, 这是焊接接头疲劳强度研究中一个较为特殊的问题。正是由于一些焊接结构含有高数值的焊接残余拉应力, 目前国内外几乎所有的疲劳设计规范均以循环应力范围为设计依据而不以最大应力水平为基准。然而, 当一个原始焊接接头经过某些改善工艺方法处理后所含的焊接残余应力对其疲劳强度是否依然有较大影响需要进行详细研究。而在众多的改善工艺中, 超声冲击技术由于其执行机构轻巧、噪声小、效率高、成本低且节能等诸多优势而成为一种理想的焊后改善接头疲劳性能措施。因此, 采用非承载纵向角接接头研究了焊接残余应力对超声冲击处理焊接接头疲劳性能的影响规律。

1 试验条件

1.1 试验材料与试件的制备

试验材料为 Q235B 板材, 力学性能见表 1。采

用非承载纵向角接接头形式, 试件形状及几何尺寸见图 1, 使用的焊接工艺参数见表 2。

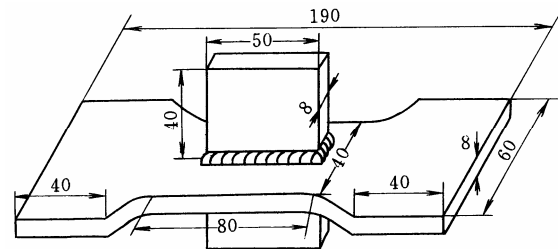


图 1 试件几何形状与尺寸

表 1 Q235B 钢的力学性能

材料	屈服点 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	断后伸长率 δ /%
Q235B	272	435	26

表 2 焊接工艺参数

焊条直径 D/mm	焊接速度 v /(mm · min ⁻¹)	焊接电流 I/A	焊接电压 U/V
3.2	31	180~200	22~38

试件的制备: 将接头试件的圆弧过渡处全部打磨光滑, 防止过早地从该处断裂。使用 J427 焊条进行焊接。

1.2 消应力热处理工艺

采用如下热处理工艺对某些试件进行消除焊接残余应力处理。加热上升时间约 45 min, 保温时间 2 h、保温温度 400 °C, 然后随炉缓冷约 24 h 至室温。

1.3 疲劳试验方法

试验是在 100 kN 高频疲劳试验机上进行的, 试验机静载精度为满量程 $\pm 0.2\%$, 动载振幅波动度满量程为 $\pm 2\%$ 。

试验方法: 将试件分成四组, 第一组为消应力

* 国家自然科学基金资助项目(59575061)。20030610 收到初稿, 20030906 收到修改稿

热处理试件并采用超声波冲击处理; 第二组为采用消应力热处理的焊态试件; 第三组试件只进行超声波冲击处理, 第四组为原始焊态试件。载荷类型为拉伸载荷, 分别采用三种应力循环比进行对比试验, 即 $R=0.1$ 、 $R=-1$ 及 $R=0.45$ 。

1.4 超声波冲击处理的实施方法

超声波冲击枪对准试件焊趾部位, 基本垂直于焊缝, 且冲击头的冲击针阵列沿焊缝方向排列。略施加一定的压力, 使其基本在执行机构(冲击枪)自重的条件下进行冲击处理。

以 1.2 m/min 的处理速度冲击处理 2 次, 激励电流为 1.3 A。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。

2 疲劳试验结果及分析

应力比 $R=0.1$ 情况下的焊态试验结果见表 3; 超声波冲击处理试件的试验结果见表 4。应力比 $R=-1$ 情况下的焊态试验结果见表 5; 超冲击处理试件的试验结果见表 6。应力比 $R=0.45$ 情况下的焊态试验结果见表 7; 超声波冲击处理试件的试验结果见表 8。

表 3 焊态试验结果($R=0.1$)

试件编号	处理类型	疲劳寿命 $N/10^6$	断裂位置	应力范围 $\Delta\sigma/\text{MPa}$
1	热处理	0.403	焊趾	180
2	热处理	0.501	焊趾	162
3	热处理	0.806	焊趾	144
4	热处理	1.566	焊趾	126
5	热处理	2.083	焊趾	117
6	未热处理	0.275	焊趾	180
7	未热处理	0.437	焊趾	163
8	未热处理	0.530	焊趾	153
9	未热处理	0.673	焊趾	144
10	未热处理	1.017	焊趾	135
11	未热处理	0.887	焊趾	126
12	未热处理	1.104	焊趾	117
13	未热处理	5.000	焊趾	108

表 4 冲击处理态试验结果($R=0.1$)

试件编号	试件类型	疲劳寿命 $N/10^6$	断裂位置	应力范围 $\Delta\sigma/\text{MPa}$
1	热处理	0.123	焊趾	245
2	热处理	0.362	焊趾	230
3	热处理	0.624	焊趾	217
4	热处理	1.472	焊趾	205
5	热处理	3.282	焊趾	195
6	未热处理	10.17	未断	180
7	未热处理	3.464	母材	189
8	未热处理	1.897	母材	198
9	未热处理	1.358	母材	207
10	未热处理	1.105	焊趾	216
11	未热处理	0.585	焊趾	225

表 5 焊态试验结果

试件编号	试件类型	疲劳寿命 $N/10^6$	断裂位置	应力范围 $\Delta\sigma/\text{MPa}$
1	热处理	0.464	焊趾	207
2	热处理	0.710	焊趾	189
3	热处理	0.974	焊趾	162
4	热处理	1.375	焊趾	153
5	热处理	1.648	焊趾	144
6	热处理	2.404	焊趾	135
7	未热处理	0.361	焊趾	180
8	未热处理	0.497	焊趾	162
9	未热处理	0.618	焊趾	144
10	未热处理	1.270	焊趾	117
11	未热处理	4.074	焊趾	108

表 6 冲击处理态试验结果($R=-1$)

试件编号	试件类型	疲劳寿命 $N/10^6$	断裂位置	应力范围 $\Delta\sigma/\text{MPa}$
1	热处理	1.676	母材	295
2	热处理	1.185	母材	303
3	热处理	0.867	母材	315
4	热处理	0.456	焊趾	330
5	热处理	0.429	焊趾	350
6	未热处理	2.997	母材	270
7	未热处理	2.014	母材	280
8	未热处理	1.430	母材	300
9	未热处理	1.045	焊趾	300
10	未热处理	0.647	焊趾	320
11	未热处理	0.498	焊趾	340

表 7 焊态试验结果($R=0.45$)

试件编号	处理类型	疲劳寿命 $N/10^6$	断裂位置	应力范围 $\Delta\sigma/\text{MPa}$
1	热处理	0.353	焊趾	163
2	热处理	0.651	焊趾	144
3	热处理	1.134	焊趾	126
4	热处理	1.355	焊趾	117
5	热处理	2.067	焊趾	108
6	未热处理	0.503	焊趾	163
7	未热处理	0.716	焊趾	144
8	未热处理	1.087	焊趾	126
9	未热处理	1.147	焊趾	117
10	未热处理	2.621	焊趾	108

表 8 冲击处理态试验结果($R=0.45$)

试件编号	试件类型	疲劳寿命 $N/10^6$	断裂位置	应力范围 $\Delta\sigma/\text{MPa}$
1	热处理	0.253	焊趾	188
2	热处理	0.411	焊趾	180
3	热处理	0.641	焊趾	171
4	热处理	1.189	焊趾	165
5	热处理	2.299	焊趾	157
6	未热处理	0.371	焊趾	188
7	未热处理	0.507	焊趾	179
8	未热处理	1.001	焊趾	170
9	未热处理	1.434	焊趾	161
10	未热处理	3.989	焊趾	152

将未经 400 °C 消应热处理的原始焊态试件在应力比 $R=0.1$ 、 $R=-1$ 及 $R=0.45$ 三种加载条件下的疲

劳试验结果进行比较发现：所有试件结果均落在同一分散带内。由此可见：未经消应热处理的焊态试件疲劳强度与应力比无关，可以将三组试验结果统一进行统计处理。至于疲劳强度与应力比无关的原因显然是由于接头试件中含有高值焊接残余拉伸应力所致。

将未经消应热处理的超声波冲击处理试件与经过 400 °C 消应热处理的超声冲击处理试件在三种加载应力比条件下($R=0.1$ 、 $R=-1$ 及 $R=0.45$)的疲劳试验结果分别绘于图 2、3 及图 4 中，同时在图 2、3 及图 4 中绘出未经 400 °C 消应热处理的焊态试件在三种加载条件下应力比的疲劳试验结果及三者统一的 $S-N$ 曲线。此外，将经过 400 °C 消应热处理的焊态试件的疲劳试验结果及所对应的 $S-N$ 曲线也分别绘于图 2、3 及图 4 中，以便进行分析比较。需要说明的是：以上所有 $S-N$ 曲线均按方程 $S^m N=C$ 拟合。

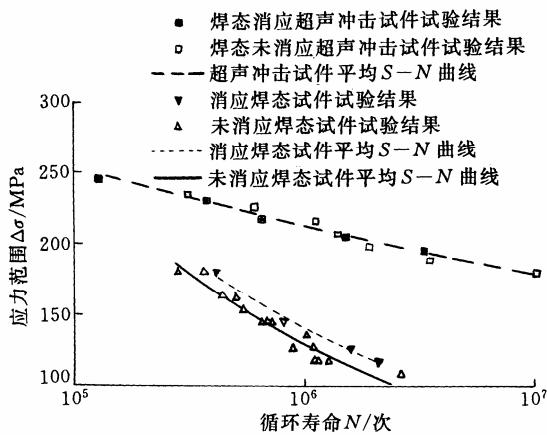


图 2 S-N 曲线对比($R=0.1$)

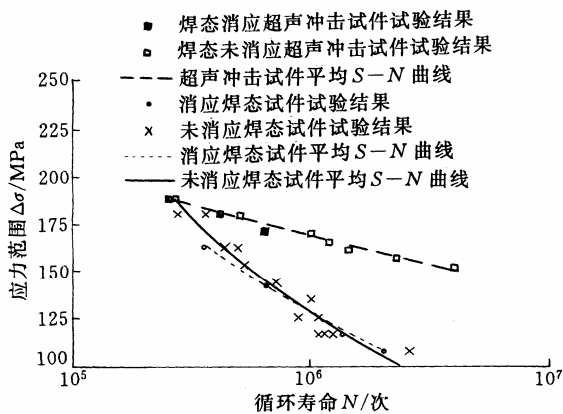


图 3 S-N 曲线对比($R=0.45$)

对比图 2、3 及图 4 中消应与未消应的超声波冲击处理试件的疲劳试验结果可以发现：在相同的应力比 R 条件下，消应与未消应的超声波冲击处理试件的疲劳试验结果均落在同一分散带内。可以将相同应力比 R 条件下消应与未消应的超声波冲击处理试件试验结果放在一起统一进行统计处理。 $S-N$ 曲

线也均按方程 $S^m N=C$ 进行拟合，分别绘于图 2、3 及图 4。由此可见：超声冲击处理前对原始焊态所进行的 400 °C 左右的消应热处理并不影响超声冲击处理后试件的疲劳性能。同样可见：无论超声波冲击处理前的原始焊态是否含有高值焊接残余应力，其超声波冲击处理后同样接头的疲劳性能变化不大，即焊接残余应力对超声波冲击处理接头疲劳性能影响不大。

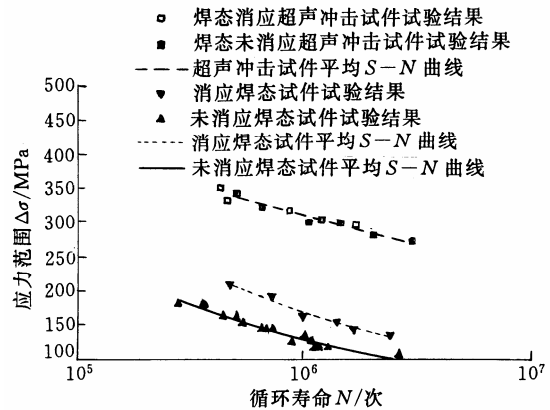


图 4 S-N 曲线对比($R=-1$)

根据表 3~8 的相关试验结果，按疲劳强度的常规测试方法确定了各种试件在循环周次为 2×10^6 时的疲劳强度，结果列于表 9。

表 9 疲劳强度对比

应力比 R	疲劳强度(2×10^6) $\Delta\sigma$ /MPa		提高程度 r / %
	焊态	冲击处理态	
-1		287	170
0.45	106	158	50
0.1		201	90
-1	140(热处理)	287	105
0.1	118(热处理)	201	70
0.45	110(热处理)	158	44

分别对比图 2、3 及图 4 中消应与未消应的试件疲劳试验结果发现：应力比 $R=0.45$ 的条件下，消应与未消应的焊态试件疲劳试验结果均落在同一分散带内；而在应力比 $R=0.1$ 及 $R=-1$ 的条件下，消应的焊态试件疲劳试验结果明显落在未经消应的焊态试件疲劳试验结果之上。通过对比表 9 中消应的焊态试件与未经消应的焊态试件在循环寿命为 2×10^6 条件下获得的疲劳强度值发现：在应力比 $R=0.1$ 的情况下，400 °C 的消应热处理使接头疲劳强度提高了 11% 左右；在应力比 $R=-1$ 的情况下，改善程度高达 35% 左右。可见，对原始焊态所进行的 400 °C 左右的消应热处理能够在一定的应力比范围内影响焊态试件的疲劳性能。

为了比较方便，将应力比 $R=0.1$ 、 -1 及 $R=0.45$ 条件下的消应焊态试件疲劳试验结果及未消应焊态

试件的疲劳试验结果统一绘于图5中。可明显看出: 应力比 $R=0.1$ 的消应焊态试件平均 $S-N$ 曲线位于应力比 $R=-1$ 的超声波冲击处理接头试件 $S-N$ 曲线之下(用应力范围表示); 而应力比 $R=0.45$ 的消应焊态试件平均 $S-N$ 曲线又位于应力比 $R=0.1$ 的消应焊态试件 $S-N$ 曲线之下。由此可见: 含有高值焊接残余应力的原始焊态试件经过消应处理后其疲劳强度不再与所外加的平均应力无关而是随着应力比 R 的增加接头所能够承受的应力范围有所降低。这样, 证实了本文所进行消应热处理的效果是显著的, 基本上消除了原始焊接接头所含的高值焊接残余应力。

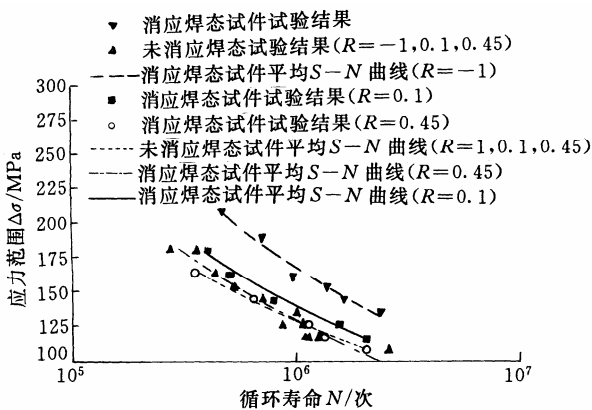


图5 焊态 $S-N$ 曲线对比($R=-1$)

对比图2、3及图4中的相应 $S-N$ 曲线, 可以明显看出: 在各应力比 R 的条件下, 未经冲击处理的原始焊态试件(无论其是否经过消应热处理)疲劳寿命在相同应力水平下均远低于经过超声冲击处理的试件(无论其超声波冲击处理前的焊态是否经过消应热处理); 在相同疲劳寿命下冲击处理试件, 无论其超声波冲击处理前是否经过消应热处理, 其疲劳强度也均远远高于未处理试件(无论其是否经过消应热处理)。

通过对比表9中超声波冲击处理试件(包含超声波冲击处理前的焊态进行过消应热处理试件和未经过消应热处理的试件)与焊态试件在循环寿命为 2×10^6 条件下获得的疲劳强度值发现: 与未经过消应热处理的原始焊态试件相比, 在应力比 $R=0.1$ 的情况下超声波冲击处理试件疲劳强度的改善程度为90%左右; 在应力比 $R=-1$ 的情况下改善程度高达170%左右; 在应力比 $R=0.45$ 的情况下, 程度为50%左右。而与经过消应热处理的焊态试件相比, 在应力比 $R=0.1$ 的情况下超声波冲击处理试件疲劳强度的改善程度为70%左右; 在应力比 $R=-1$ 的情况下改善程度为105%左右; 在应力比 $R=0.45$ 的情况下改善程度为44%左右。由此可见, 在一定的应力比 $R(-1 \leq R < 0.45)$ 范围内, 超声波冲击处理试件与未

经过消应热处理的原始焊态试件相比的疲劳强度改善程度高于与经过消应热处理的焊态试件相比的疲劳强度改善程度, 而且随着应力比 R 的减小这种差距也越大。

换一个角度来考虑这个问题: 上述结论源于以下几个事实, 首先是所使用的试件的焊接工艺、材料以及试件的几何形状与尺寸完全相同, 差别在于经过消应热处理的焊态试件中对接头疲劳性能不利的焊接残余应力被基本消除, 而未经过消应热处理的焊态试件所含焊接残余应力数值较高, 导致其疲劳强度比经过消应热处理的焊态试件低, 使其与超声冲击处理试件比较时的基点变低。另外, 无论超声波冲击处理前的原始焊态是否含有高值焊接残余应力, 其超声冲击处理后同样接头的疲劳性能变化不大。显然, 以上两方面导致了超声波冲击处理试件与未经过消应热处理的原始焊态试件相比的疲劳强度改善程度高于其与经过消应热处理的焊态试件相比的疲劳强度改善程度。

众所周知, 为了评估大型焊接结构的疲劳性能而使用全尺寸试件进行疲劳试验在大多数情况下是不现实的。为了解决问题往往采用焊接工艺、制造材料以及接头形式与板厚与结构件完全相同只是某些尺寸缩小的所谓小尺寸试件来进行疲劳试验。这些小试件与之模拟的大型焊接结构的主要差异在于大型焊接结构的焊接接头部分往往含有高值焊接残余应力, 而小尺寸试件由于尺寸减小导致所含焊接残余应力被部分或完全释放。即大多数小尺寸试件不能考虑焊接残余应力对结构疲劳性能的影响。因此, 对于原始焊接构件来说, 直接采用小尺寸试件的疲劳试验结果来进行评定和设计是危险的, 需要对这些由小试件得到的试验结果进行修正, 来考虑焊接残余应力对结构疲劳性能可能带来的不利影响。然而, 根据本文的试验结果, 超声波冲击处理前原始焊态是否含有焊接残余应力对超声波冲击处理后同样接头疲劳性能的影响不大。即可以直接使用小试件来模拟经过超声波冲击处理的大型焊接结构的疲劳性能而不需要修正。此外, 使用不含高值焊接残余应力的小试件来评估超声波冲击处理对相同接头形式及板厚的大型焊接结构疲劳性能的改善程度还可能是偏于保守的。因此, 推荐使用小试件来评估超声波冲击处理焊接结构的疲劳性能以及与焊态结构相比的改善程度。

3 结论

(1) 焊接残余应力对超声波冲击处理后的焊接

接头疲劳性能的影响较小。

(2) 使用不含高值焊接残余应力的小试件来评估超声波冲击处理对相同接头形式及板厚的大型焊接结构疲劳性能的改善程度可能偏于保守。

参 考 文 献

- 1 Statnikov E S, Muktepavel V O, Troufiakov V J, et al. Comparison of ultrasonic impact treatment and other fatigue life improvement methods. *Welding in the World*, 2002, 46(3/4): 20~32
- 2 Wang D P, Huo L X, Zhang Y F. Investigation of improving fatigue strength of welded joints on low carbon steel by ultrasonic peening method. *Journal of Mechanical Strength*, 1999, 21(4): 289~291
- 3 Huo L X, Wang D P, Zhang Y F, et al. Investigation on improving fatigue properties of welded joints by ultrasonic peening method. *Welding in the World*, 2001, 45(3/4): 12~16
- 4 Janosch J, Koneczny H, Debiez S, et al. Improvement of fatigue strength in welded joints(in HSS and in aluminum alloys)by ultrasonic hammer peening. *Welding in the World*, 1996 (37): 72~81

EFFECT OF WELDING RESIDUAL STRESS ON FATIGUE PERFORMANCE OF THE WELDED JOINTS TREATED BY ULTRASONIC PEENING

Wang Dongpo Huo Lixing Zhang Yufeng
(School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Ge Zhihai
(Department of Quality Inspection, Shenzhen Chiwan Shengbaowang Engineering Company Limited, Shenzhen 518068)

Abstract: The fatigue contrast tests of Q235B steel unload longitudinal fillet welded joints containing high welding residual stress and in two different state: ultrasonic peening and as welded condition are directed. And the effect on fatigue performance of the welded joints treated by ultrasonic peening from welding residual stress is studied. Test results showed that: the effect on fatigue performance of the welded joints treated by ultrasonic peening from welding residual stress is small. It is safe that use the small specimens which are treated by ultrasonic peening and don't contain high welding residual stress to appraise the fatigue performance improvement on large-scale welded structures which are as the same junction style and thickness as the small.

Key words: Ultrasonic peening Welded joint

Fatigue performance Welding residual stress

作者简介: 王东坡, 男, 1972 年出生, 博士, 副教授。发表论文 20 余篇, 获教育部发明二等奖 1 项。

E-mail: wangdp@eyou.com