

超声波冲击与 TIG 熔修复合强化改善 高强钢焊接接头的疲劳性能

王东坡 霍立兴 张玉凤 荆洪阳 杨新岐

(天津大学材料科学与工程学院 天津 300072)

摘要: 研究表明超声波冲击方法与 TIG 熔修方法在提高焊接接头疲劳性能机理方面存在着很强的互补性。提出一种对接头焊趾先进行一遍 TIG 熔修处理, 然后再实施超声波冲击的复合处理新方法用来改善焊接接头的疲劳性能。对比疲劳试验结果显示: ①在一定的应力范围内, 超声波冲击处理试件与原始焊态试件相比, 疲劳强度提高 95% 左右, 疲劳寿命延长 3.6~62 倍。②TIG 熔修试件与原始焊态试件相比, 疲劳强度的改善程度高达 34% 左右; 在较高应力范围内, 疲劳寿命没有提高; 在低应力范围内, 延长疲劳寿命约为 0.4~1.3 倍。③超声波冲击+TIG 熔修复合强化试件与原始焊态试件相比, 疲劳强度提高 120% 左右, 疲劳寿命延长 28~125 倍。④TIG 熔修+超声波冲击复合处理能够在 TIG 熔修和超声波冲击处理的基础上, 进一步改善焊接接头的疲劳性能; 与单纯的超声波冲击相比, 在高应力区域内, TIG 熔修+超声波冲击复合处理一定程度上克服了单纯的超声波冲击对所处理的焊接接头疲劳性能改善程度大幅度降低的缺点。

关键词: 超声波冲击 TIG 熔修 超声波冲击+TIG 熔修复合处理 疲劳性能

中图分类号: TP12

0 前言

经超声波冲击或 TIG 熔修处理后, 焊接接头及结构的疲劳性能改善十分显著, 这已被大量的疲劳试验所证实^[1~10]。然而, 超声波冲击法与 TIG 熔修法在提高焊接接头疲劳性能的机理方面却存在较大的差异。

研究表明: 超声波冲击法能够在接头焊趾区形成较大数值的压缩应力, 这是该方法改善焊接接头疲劳性能的最主要原因。此外, 超声波冲击法可以在一定程度上改善焊趾区的几何外形, 对焊趾区材料产生硬化, 以上两点对超声波冲击法提高接头疲劳性能也能够带来一定的有利作用。而 TIG 熔修提高焊接接头疲劳性能的原因最主要是能够大幅度地改善焊趾区的几何外形, 降低接头的应力集中程度, 而且 TIG 熔修还可以大幅度增加焊趾区硬度。从对接头焊趾区几何外形的改善程度来看, TIG 熔修法较超声波冲击法改善程度更大。对一些材料制成的接头, TIG 熔修能够比超声波冲击更大程度地增加焊趾区硬度。然而, TIG 熔修毕竟是一种局部加热焊接的方法, 在焊趾区所产生的残余应力不是有利的压缩应力, 而是不利的拉伸应力。可以看

出两种方法之间存在着很强的互补性。如果将焊接接头先进行一遍 TIG 熔修处理, 获得一高硬度、没有显微缺陷且更为平滑过渡的焊趾区, 然后再对该部位进行超声波冲击处理, 用来获得高数值的残余压缩应力, 则焊接接头的疲劳性能可能会得到更大程度的改善。采用某高强钢对接接头, 对这种 TIG 熔修+超声波冲击的复合处理的新工艺方法进行了研究。

1 试验条件

1.1 试验材料及接头形式与力学性能

采用对接接头, 制备试件的材料为 SS800 高强钢, 试件的几何形状与尺寸如图 1 所示, 试件母材的力学性能见表 1。

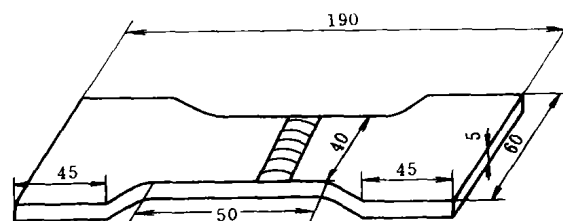


图 1 对接接头试件的几何形状与尺寸

表 1 材料力学性能

材料	屈服点 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	断后伸长率 δ /%
高强钢 SS800	700	830~840	22

1.2 超声波冲击的实施方法

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。

为了获得较好的改善疲劳强度的效果进行多次冲击。以 1.0~1.5 m/min 的处理速度，冲击处理 2 次，激励电流为 2.2 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，以便使焊趾部位获得更好的光滑过渡外形。

1.3 TIG 熔修方法与规范

根据参考文献[1~5]及 IIW 所推荐的 TIG 熔修工艺进行，没有进行预热处理。TIG 熔修是在室内进行的，只熔修一遍。熔修处理时试件位于水平位置，操作时没有出现熄弧问题，具体工艺规范见表 2。

表 2 TIG 熔修工艺

电流 类型	电极直径 D/mm	电流 I/A	电压 U/V	移动速度 v/(m·min ⁻¹)	热输入 Q/(kJ·cm ⁻¹)	保护 气体
直流	3.2	100~110	10~12	0.1	7.5~10	氩气

1.4 TIG 熔修处理+超声波冲击复合处理方法

将焊态试件四道焊趾按表 2 所示的工艺规范进行一次 TIG 熔修处理，然后再按第 1.2 节所示的处理方法实施超声波冲击处理。

1.5 疲劳性能测试方法

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

试验方法：将该接头的所有试件分成四组，第一组为原始焊态试件；第二组试件四道焊趾全部进行超声波冲击处理；第三组为 TIG 熔修处理试件；第四组试件进行 TIG 熔修处理+超声波冲击复合处理。

施加载荷情况：载荷类型为拉伸载荷，应力比 $R=0.1$ 。

2 试验结果

焊态试件的疲劳试验结果见表 3，TIG 熔修及超声波冲击试件的疲劳试验结果见表 4，TIG 熔修+超声波冲击复合处理试件的疲劳试验结果见表 5。

3 试验结果与分析

3.1 试验数据统计方法

目前，在国际焊接学会所制定的循环载荷下焊

表 3 焊态试件的疲劳试验结果

试件 编号	疲劳寿命 N/10 ⁶	断裂 位置	应力范围 Δσ/MPa
1	0.237	焊趾	257
2	0.287	焊趾	257
3	0.179	焊趾	257
4	0.330	焊趾	219
5	0.518	焊趾	219
6	0.319	焊趾	219
7	0.525	焊趾	200
8	0.487	焊趾	200
9	0.661	焊趾	200
10	0.862	焊趾	171
11	1.060	焊趾	171
12	0.916	焊趾	171
13	1.481	焊趾	152
15	1.676	焊趾	152
16	2.930	焊趾	152
17	0.095	焊趾	314
18	0.134	焊趾	314
19	0.087	焊趾	314
20	0.045	焊趾	380
21	0.039	焊趾	380
22	0.025	焊趾	380

表 4 超声波冲击及 TIG 熔修接头的疲劳试验结果

试件 编号	类别	疲劳寿命 N/10 ⁶	断裂位置	应力范围 Δσ/MPa
1	TIG 熔修	0.398	熔修焊趾	266
2		0.347	熔修焊趾	247
3		1.024	原始焊趾	228
4		1.287	熔修焊趾	219
5		0.687	原始焊趾	205
6		2.018	熔修焊趾	200
7	超声波 冲击	3.182	原始焊趾	285
8		1.907	母材	295
9		1.062	原始焊趾	304
10		0.584	原始焊趾	314
11		0.160	原始焊趾	352

表 5 超声波冲击+TIG 熔修复合强化疲劳试验结果

试件 编号	类别	疲劳寿命 N/10 ⁶	断裂位置	应力范围 Δσ/MPa
1	TIG 熔修 +	1.478	母材	342
2		2.486	母材	323
3		0.632	熔修焊趾	361
4	超声波 冲击	0.434	母材	380
5		0.339	熔修焊趾	395
6		1.704	熔修焊趾	333

接钢结构的疲劳设计规范中，对焊接接头的相应疲劳试验数据的统计处理方法进行了规定，现介绍如下。

该统计处理方法首先假设焊接接头的相关疲劳试验结果符合对数正态分布，然后在一定存活概率及置信度下，用具有相同斜率 m 且分别对应 K 倍正负标准差的两条标称 $S-N$ 曲线形成所需的数据分

散带, 其中 K 为特征值。国际焊接学会指定的存活概率为 95%, 置信度为 75%。

疲劳设计所需的标称值可通过下述程序获得。

(1) 计算所有疲劳试验数据点的应力范围 $\Delta\sigma$ 、循环次数 N 以 10 为底的对数值。

(2) 采用幂函数模型回归得出指数 m 和常数 $\lg C$ 值

$$m \lg \Delta\sigma + \lg N = \lg C \quad (1)$$

(3) 设 C_i 是试验数据的对数值, 利用所获得的 m 值, 计算 $\lg C$ 的平均值 C_m 和标准偏差 S

$$C_m = \frac{\sum C_i}{n} \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (C_m - C_i)^2}{n - 1}} \quad (3)$$

(4) 计算特征值 C_k

$$C_k = C_m - KS \quad (4)$$

3.2 数据统计处理结果与分析

根据对比疲劳试验结果(表 3~5), 按第 3.1 节所介绍的统计处理方法分别获得原始焊态试件、超声波冲击处理试件、TIG 熔修试件以及超声波冲击+TIG 熔修复复合处理试件的相应 $S-N$ 曲线, 拟合结果列于表 6 中。将所有存活概率为 50% 平均 $S-N$ 曲线绘于图 2 中; 存活概率为 95% 标称 $S-N$ 曲线绘于图 3 中。

表 6 疲劳试验数据的统计处理结果

处理状态	m	C_m	C_k	S
原始焊态	4.4	0.68×10^{16}	0.125×10^{16}	0.294 0
TIG 熔修	6.4	0.11×10^{22}	0.298×10^{21}	0.163 0
超声波冲击	14.3	0.37×10^{42}	0.218×10^{42}	0.063 1
超声波冲击+TIG 熔修	10.0	0.29×10^{32}	0.198×10^{32}	0.049 6

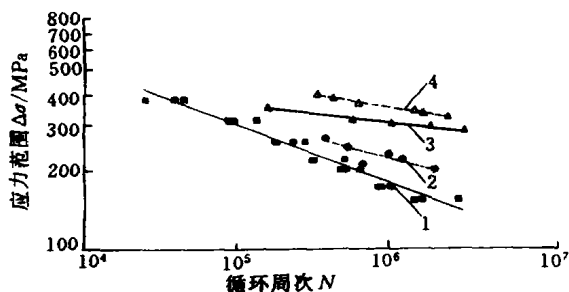


图 2 对比 $S-N$ 曲线

1. 焊态试件平均 $S-N$ 曲线
2. TIG 熔修试件平均 $S-N$ 曲线
3. 超声波冲击试件平均 $S-N$ 曲线
4. 超声波冲击+TIG 熔修试件平均 $S-N$ 曲线
- 焊态试件试验结果
- TIG 熔修试件试验结果
- ▲ 超声波冲击试件试验结果
- △ 超声波冲击+TIG 熔修试件试验结果

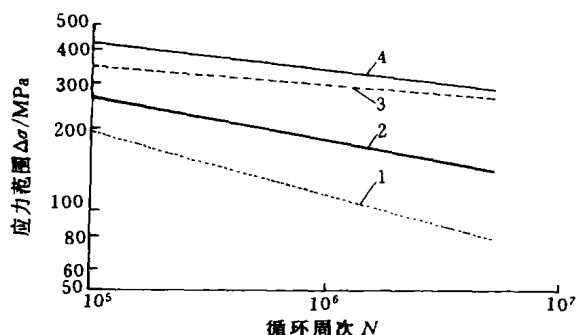


图 3 标称 $S-N$ 曲线对比

1. 焊态试件标称 $S-N$ 曲线
2. TIG 熔修试件标称 $S-N$ 曲线
3. 超声波冲击试件标称 $S-N$ 曲线
4. 超声波冲击+TIG 熔修试件标称 $S-N$ 曲线

根据表 6 所列平均 $S-N$ 曲线的拟合结果, 按疲劳强度的常规测试方法确定了 50% 存活率情况下焊态试件、超声波冲击处理试件、TIG 熔修试件以及 TIG 熔修+超声波冲击复合处理试件在循环周次为 2×10^6 时的疲劳强度, 将结果列于表 7。

表 7 疲劳强度(2×10^6)(50% 存活率)的改善结果

处理状态	焊态	TIG 熔修+ 冲击处理	TIG 熔修	冲击 处理
疲劳强度(2×10^6) $\Delta\sigma$ /MPa	150	330	201	293
提高程度(%)	0	120	34	95

对比图 2 中各条平均 $S-N$ 曲线可以看出: 原始焊态试件的疲劳寿命在相同应力水平下, 明显低于超声波冲击处理试件。

通过对比表 7 中超声波冲击处理、TIG 熔修试件以及超声波冲击处理+TIG 熔修复复合处理试件与原始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: 在不考虑试验数据分散性的情况下, TIG 熔修试件与原始焊态试件相比疲劳强度的改善程度可达 34% 左右, 且无论应力水平高低均断于焊趾; 超声波冲击处理试件与原始焊态试件相比其疲劳强度的改善程度达 95% 左右, 在高应力水平下断于焊趾而在较低应力水平下有个别试件断于母材; TIG 熔修+超声波冲击复合处理试件与原始焊态试件相比疲劳强度的改善程度可达 120% 左右, 在高应力水平下断于焊趾, 在较低应力水平下试件断于母材。可见, TIG 熔修+超声波冲击复合处理能够在 TIG 熔修和超声波冲击处理的基础上进一步改善焊接接头的疲劳强度。

为了获得在相同应力水平下, 超声波冲击、TIG 熔修以及 TIG 熔修+超声波冲击复合处理后焊接试件疲劳寿命的变化情况, 根据表 6 中的平均 $S-N$ 曲线的拟合方程, 分别得出对应超声波冲击处理试件在寿命为 1×10^7 次时应力水平下, 焊态试件、TIG

熔修试件以及 TIG 熔修+超声波冲击复合处理试件的疲劳寿命, 以及焊态试件在寿命为 5×10^4 所对应应力水平下的超声波冲击处理试件、TIG 熔修试件和 TIG 熔修+超声波冲击复合处理试件的疲劳寿命, 将结果列于表 8 中。

表 8 疲劳寿命对比

状态	应力范围 $\Delta\sigma_1$ / MPa	寿命 N_1	应力范围 $\Delta\sigma_2$ / MPa	寿命 N_2
焊态	340	5.0×10^4	261	1.59×10^5
冲击处理态	340	2.3×10^5	261	1×10^7
TIG 熔修	340	6.8×10^4	261	3.7×10^5
TIG 熔修+冲击处理	340	1.45×10^6	261	2×10^7

通过对比表 8 中焊态试件、超声波冲击处理试件、TIG 熔修试件以及 TIG 熔修+超声波冲击复合处理试件在相同应力水平下的疲劳寿命可知: 若不考虑试验数据的分散性, 在一定的应力范围内, 经过超声波冲击处理后高强钢对接焊接接头的疲劳寿命被延长多达 3.6~62 倍; 经过 TIG 熔修处理后焊接接头的疲劳寿命则被延长约为 0.4~1.3 倍; 而当经过 TIG 熔修+超声波冲击复合处理后, 接头的疲劳寿命则被延长约为 28~125 倍。由此可见, TIG 熔修+超声波冲击复合处理能够在 TIG 熔修和超声波冲击处理的基础上进一步改善焊接接头的疲劳寿命。

从图 2 及表 8 还可以看出: 在原始焊态试件循环周次为 5×10^4 时所对应的应力范围下, 超声波冲击试件及 TIG 熔修+超声波冲击复合处理试件的疲劳寿命分别延长 3.6 倍和 28 倍。在该应力水平下 TIG 熔修+超声波冲击复合处理试件的疲劳寿命远高于单纯进行超声波冲击试件的疲劳寿命。可见, 在高应力区域内采用 TIG 熔修+超声波冲击复合处理方法提高焊接接头的疲劳性能还是很有必要的, 它在一定程度上克服了在高应力区域内单纯的超声波冲击对所处理的焊接接头疲劳性能改善程度大幅度降低的缺点。虽然, 复合处理方法实施起来较为复杂, 但在一个重要焊接结构的关键部位, 进行这种处理依然是非常有意义的。当超声波冲击处理试件在循环周次为 1×10^7 时所对应应力范围下, 超声波冲击与 TIG 熔修+超声波冲击试件的疲劳寿命分别延长 62 倍和 125 倍, 在该应力水平下 TIG 熔修+超声波冲击复合处理试件的疲劳寿命略高于单纯进行超声波冲击试件的疲劳寿命。因此可以认为: 在低中应力水平、中长寿命范围内, TIG 熔修+超声波冲击复合处理对焊接接头疲劳性能的改善程度与单纯的超声波冲击相比优势不大。考虑到复合处理方法实施起来较为复杂, 而超声波冲击已经能够对焊接接头的疲劳性能提供足够甚至是惊人的改善

效果, 所以在这种情况下依旧推荐使用超声波冲击方法对焊接接头进行处理。

如果考虑试验数据分散性, 根据表 6 所列 95% 存活率条件下的 $S-N$ 曲线拟合结果, 确定了 95% 存活率(75%置信度)情况下原始焊态试件、超声波冲击处理试件、TIG 熔修试件以及 TIG 熔修+超声波冲击复合处理试件在循环周次为 2×10^6 时的疲劳强度, 将结果列于表 9。对比表 9 中的相应结果可知: 在 95% 存活率的情况下, TIG 熔修试件与原始焊态试件相比疲劳强度的改善程度可达 68% 左右; 超声波冲击处理试件与原始焊态试件相比其疲劳强度的改善程度达 190% 左右; TIG 熔修+超声波冲击复合处理试件与原始焊态试件相比疲劳强度的改善程度可达 225% 左右。可见: 在考虑试验数据分散性的情况下, 仍然能够充分地证实 TIG 熔修+超声波冲击复合处理方法可以在 TIG 熔修和超声波冲击处理的基础上进一步改善高强钢焊接接头的疲劳性能这一结论。

表 9 疲劳强度(2×10^6)(95%存活率)的改善结果

处理状态	焊态	TIG 熔修+ 冲击处理	TIG 熔修	冲击 处理
疲劳强度(2×10^6) $\Delta\sigma$ / MPa	150	315	163	282
提高程度(%)	0	225	68	190

4 结论

(1) 若不考虑试验数据分散性, 超声波冲击处理试件与原始焊态相比疲劳强度提高 95% 左右, 疲劳寿命延长 3.6~62 倍; TIG 熔修试件与原始焊态相比疲劳强度的改善程度高达 34% 左右, 在一定的应力范围内疲劳寿命延长 0.4~1.3 倍; 而超声波冲击+TIG 熔修复合强化试件与原始焊态试件相比疲劳强度提高 120% 左右, 疲劳寿命延长 28~125 倍。

(2) TIG 熔修+超声波冲击复合处理能够在 TIG 熔修和超声波冲击处理的基础上进一步改善焊接接头的疲劳性能。

(3) 在高应力区域内, TIG 熔修+超声波冲击复合处理一定程度上克服了单纯的超声波冲击对所处理的焊接接头疲劳性能改善程度大幅度降低的缺点, 因此在实际应用中具有一定优势。

参 考 文 献

- Hironobu, Hiroyuki, Wataru. Fatigue limit of welded high strength steel and its improvement due to TIG treatment. Transactions of Japan Welded Society, 1986, 17(2): 3~7

- 2 Horn A M, Huther I, Lieurade H P. Fatigue behavior of T-joints improved by TIG dressing. *Welded in the World*, 1998, 41(4): 273~280
- 3 Branco C M, Maddox S J, Infante V, et al. Fatigue performance of tungsten inert gas (TIG) and plasma welds in thin sections. *International Journal of Fatigue*, 1999, 21(6): 587~601
- 4 Zaczek Z. Improvement in the fatigue strength of butt welded joints by TIG remelting of weld reinforcements. *Metal Construction*, 1984, 19(2): 143~145
- 5 Dahle T. Design fatigue strength of TIG-dressed welded joints in high-strength steels subjected to spectrum loading. *International Journal of Fatigue*, 1998, 20(9): 677~681
- 6 Wang Dongpo, Huo Lixing, Zhang Yufeng. 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
- 7 Huo Lixing, Wang Dongpo, Zhang Yufeng, et al. Investigation on improving fatigue properties of welded joints by ultrasonic peening method. *Welding in the World*, 2001(3/4): 12~16
- 8 Janosch J J, Konecny H, Debiez S(France), 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): 72~83
- 9 Gurney T R. *Fatigue of welded structures*. Cambridge University Press, 1979
- 10 Statnikov E S (Russia), Muktepavel V O, Troufiakov V J, et al. Comparison of ultrasonic impact treatment and other fatigue life improvement methods. IIW.Doc.XIII-1817-00 (IIS/IIW-1506-00)

IMPROVING FATIGUE BEHAVIOR OF THE HIGH-STRENGTH WELDED JOINTS COMPOUND TREATED BY TIG DRESSING AND ULTRASONIC PEENING

*Wang Dongpo Huo Lixing Zhang Yufeng
Jing Hongyang Yang Xinqi
(Tianjin University)*

Abstract: Studies show that considering the mechanism of improving the fatigue performance, ultrasonic peening and TIG dressing are complementary. A new compound treating method of improving fatigue performance of high-strength welded joint is that firstly treated the welded toe by TIG-dressing and then performed ultrasonic peening. Test results indicated that: (1) In the given range of stress level, contrasted with the specimens in as welded condition the fatigue strength of the specimens treated by ultrasonic peening is increased by about 95% and the fatigue life is prolonged by 3.6~62 times. The fatigue strength of the specimens treated by TIG-dressing is increased by about 34% and the fatigue life is prolonged by 0.4~1.3 times. And while the fatigue strength of the specimens treated by compound treating by TIG-dressing adding ultrasonic peening is increased by about 120% and the fatigue life is prolonged by 28~125 times. (2) The fatigue strength can be even improved by compound treating ultrasonic peening adding TIG dressing on the basis of ultrasonic peening or TIG dressing. In the range of high stress, contrasted with simple ultrasonic peening treating TIG dressing adding ultrasonic peening compound treating has definitive predominance because compound treating overcome the decreasing of fatigue performance improvement of welded joint treated by simple ultrasonic peening.

Key words: Ultrasonic peening TIG dressing

Compound treating by ultrasonic peening

adding TIG dressing Fatigue performance

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