

文章编号: 1004 - 0609(2003) 06 - 1456 - 05

超声冲击法对钛合金焊接接头疲劳性能的改善^①

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)

摘 要: 利用自行研制的 HJ-II 型超声冲击装置, 研究了超声冲击处理对 BT20 钛合金焊接接头的疲劳性能的影响, 并对 TIG 焊与电子束焊接接头的焊态及冲击处理态进行了对比疲劳试验。结果表明: 超声冲击处理使 BT20 钛合金 TIG 焊接接头(拉伸载荷)的疲劳强度提高了 27%, 寿命延长了 3~10 倍; 而电子束焊接接头的疲劳强度提高了 38%, 寿命延长了 29~40 倍。

关键词: 钛合金; 疲劳性能; 电子束焊; 超声冲击; TIG 焊

中图分类号: TG 404

文献标识码: A

近年来, 钛合金焊接结构应用越来越广泛, 其中一些是用来承受交变载荷的重要结构, 尤其是在航空领域。超声冲击法能够显著提高钢制焊接接头的疲劳强度已被试验所证实^[1~6], 但有关使用该方法改善钛合金焊接接头疲劳强度的工作尚未开展。本文作者对 BT20 钛合金焊接接头的疲劳性能进行了试验, 并利用自行研制的 HJ-II 型超声冲击装置, 研究了超声冲击法对改善钛合金焊接接头疲劳性能的效果。

1 实验

使用电子束焊及 TIG 焊^[7~9] 2 种焊接工艺制备试件, 试样形状和几何尺寸如图 1 所示。

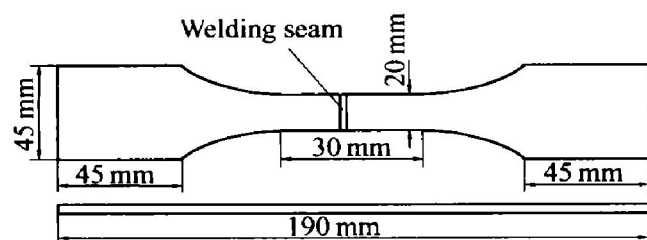


图 1 试样形状及几何尺寸示意图
Fig. 1 Dimensions of specimen

实验材料为 BT20 钛合金, 板厚为 2.5 mm, 化学成分如表 1 所示, 其抗拉强度为 1 125 MPa, 延伸率为 15%。

表 1 BT20 钛合金化学成分

Table 1 Chemical composition of BT20 titanium alloy (mass fraction, %)

Al	V	Mo	Zr	Fe
6.90	1.75	1.75	2.25	< 0.25
N	C	Si	H	O
< 0.05	< 0.10	< 0.05	0.001 7	0.080

电子束焊接试件制备过程如下: 将尺寸为 200 mm × 200 mm × 2.5 mm 的钛合金板沿长度方向使用电子束熔透形成对接接头。焊前经酸洗去除表面油污和氧化层后再用清水洗净、烘干, 用夹具将板料放入真空室内。电子束焊接具体工艺如表 2 所示, 采用 3 ПУ-К₁ 中压动枪式真空电子束焊机进行焊接。使用的 TIG 焊接工艺参数如表 3 所示。

疲劳试验在 10⁵ N 高频疲劳试验机上进行, 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%。

将试样分成 5 组: 第 1 组是母材试样; 第 2 组是采用电子束焊接的原始焊态试样; 第 3 组是采用电子束焊接的超声冲击态试样; 第 4 组是 TIG 焊接的原始焊态试样; 第 5 组是 TIG 焊接的超声冲击处理态试样。载荷类型均为拉伸载荷, 应力比 $R = 0.1$ 。

超声冲击枪对准试件焊缝部位且基本垂直于焊缝, 将冲击头的冲击针阵列沿焊缝方向排列, 施加一定的压力使冲击处理基本在 2 倍于冲击枪自重的

① 基金项目: 教育部博士点基金资助项目(1999005605)

收稿日期: 2003 - 02 - 20; 修订日期: 2003 - 08 - 06

作者简介: 王东坡(1972 -), 男, 副教授, 博士。

通讯联系人: 王东坡, 博士; 电话: 022 - 27405889; 传真: 022 - 27407022; E-mail: wangdp@eyou.com

表 2 电子束焊接和修饰工艺参数

Table 2 Parameters of electronic beam welding and dressing

Condition	Voltage for acceleration/ kV	Electronic beam current/ mA	Welding rate/ (m•min ⁻¹)	Focusing current/ mA	Operating distance/ mm	Degree of vacuum/ Pa
Welding process	60	18	0.6	785	200	1.0×10 ⁻²
Dressing process	60	12	0.6	835	200	1.0×10 ⁻²

表 3 TIG 焊接工艺参数

Table 3 TIG welding parameters

Kind of current	Diameter of electrode/ mm	Welding current/ A	Welding voltage/ V	Welding rate/ (m•min ⁻¹)	Welding heat input/ (kJ•cm ⁻¹)	Shield gas
Direct current	3.2	150~ 160	15~ 17	0.16	18~ 23	Ar

条件下进行。

处理电子束焊接试样按以下方法进行: 处理接头正面时, 超声冲击枪沿垂直于焊缝方向以 1.0~ 1.5 m/min 的处理速度往复冲击 6 次, 激励电流为 2.8 A; 处理接头反面时, 将超声冲击枪对准接头焊趾沿焊缝方向以 1.0~ 1.5 m/min 的速度往复冲击 4 次, 且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。

处理 TIG 焊接试样时, 正反面均采用相同的处理工艺, 即使用超声冲击枪沿垂直于焊缝方向以 1.0~ 1.5 m/min 的处理速度往复冲击处理 6 次, 激励电流为 2.8 A。

2 结果与讨论

BT20 钛合金母材试件疲劳试验结果如表 4 所示; 电子束焊原始焊态试件的疲劳试验结果如表 5 所示; 表 6 所示为电子束焊超声冲击态试件的疲劳试验结果; 表 7 所示为 TIG 焊原始焊态试件的疲劳试验结果; TIG 焊超声冲击处理态试件的疲劳试验结果如表 8 所示。

2.1 疲劳试验数据的统计方法

根据国际焊接学会(IIW)的有关文件^[9~11], 采用如下统计方法对各种焊接接头的相应疲劳试验数据进行处理, 该统计处理方法的特点是在假设疲劳试验结果符合对数正态分布的前提下, 用具有相同斜率 m 且分别对应 K 倍正负标准差的 2 条标称 $S-N$ 曲线形成一数据分散带。这样处理的结果使试验数据在某一置信度下以一定的概率落在此分散带内。其中 K 为与试验数据的数量落在分散带

表 4 母材 BT20 疲劳试验结果

Table 4 Fatigue test results of base material BT20

No.	Cycle number/ 10 ⁶	$\Delta\sigma$ / MPa
1	0.324	360
2	0.291	342
3	0.710	315
4	0.679	288
5	0.491	270
6	0.485	270
7	7.106	243
8	10.000	225

表 5 电子束焊态试验结果

Table 5 Electronic beam welding test results for as welded

No.	Cycle number/ 10 ⁶	Fracture position	$\Delta\sigma$ / MPa
1	0.050	Weld toe	288
2	0.043	Weld toe	270
3	0.062	Weld toe	270
4	0.134	Weld toe	243
5	0.323	Weld toe	225
6	0.776	Weld toe	216
7	1.323	Weld toe	207
8	1.476	Base material weld	198
9	2.434	Base material	180

表 6 电子束焊超声冲击态试验结果

Table 6 Electronic beam welding test results of ultrasonic peening

No.	Cycle number/ 10 ⁶	Fracture position	$\Delta\sigma$ / MPa
1	0.197	Base material	315
2	0.310	Base material	297
3	0.954	Base material	279
4	1.647	Base material	270
5	2.543	Base material	261

表 7 TIG 焊态试验结果

Table 7 TIG welding test results for as welded

No.	Cycle number/10 ⁶	Fracture position	Δσ/MPa
1	0.150	Weld toe	300
2	0.413	Base material	270
3	0.502	Weld toe	240
4	1.341	Weld toe	220
5	2.233	Weld toe	200

表 8 TIG 焊超声冲击处理态试验结果

Table 8 TIG welding test results of ultrasonic peening

No.	Cycle number/10 ⁶	Fracture position	Δσ/MPa
1	0.103	Base material	365
2	0.313	Base material	335
3	0.369	Base material	295
4	1.089	Base material	280
5	2.301	Base material	260

内的概率及相应置信度密切相关的一个参量,称之为特征值。

国际焊接学会指定的存活概率为 95%,置信度为 75%。不同试验数量在 75% 置信水平下,95% 存活概率相对应的特征值 K 由文献[10]给出。

标称值可通过下述步骤计算:

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

2) 采用幂函数模型回归计算指数 m 和常数 $\lg C$ 值:

$$m \lg \Delta\sigma + \lg N = \lg C \tag{1}$$

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 v_{st} :

$$C_m = \frac{\sum C_i}{n} \tag{2}$$

$$v_{st} = \sqrt{\frac{\sum (C_m - C_i)^2}{n - 1}} \tag{3}$$

4) 计算特征值 C_k :

$$C_k = C_m - K \cdot v_{st} \tag{4}$$

2.2 疲劳试验数据的统计处理结果

按上述统计方法处理 2 种焊接工艺下钛合金接头试件的相应疲劳试验数据,统计结果如表 9 所示。

2.3 超声冲击处理电子束焊接接头疲劳性能

根据疲劳试验结果(表 4~6),按方程 $S^m N =$

C 分别拟合出原始焊态试件与超声冲击处理态试件以及母材试件的相应 $S-N$ 曲线(见图 2)。

表 9 $S-N$ 曲线的参数表

Table 9 C_m and m value of $S-N$ curve

Condition	Welding method	m	C_m	v_{st}
As welded	Electronic beam welding	10	0.134×10^{30}	0.14
Peening treatment		14.5	0.281×10^{42}	0.063 4
As welded	TIG welding	6.8	0.115×10^{23}	0.107
Peening treatment		9	0.117×10^{29}	0.156
BT20 titanium alloy		10	0.477×10^{31}	0.389

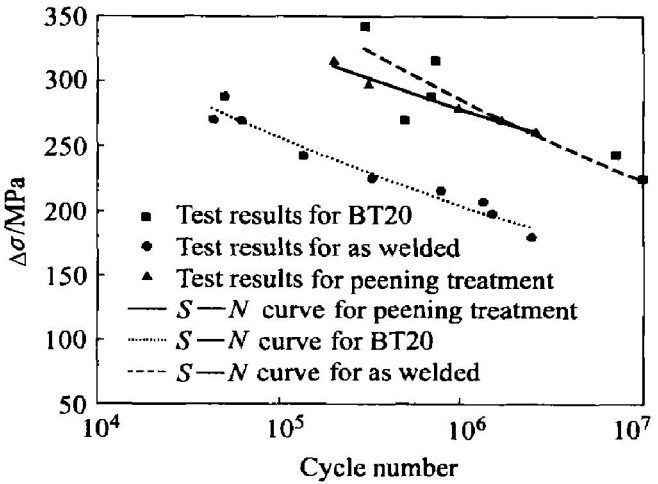


图 2 电子束焊态与冲击处理态对比 $S-N$ 曲线

Fig. 2 $S-N$ curves for as welded and peening treatment by electronic beam welding

对比图 2 中相应的 $S-N$ 曲线,可以明显看出:未经超声冲击处理的电子束焊态试件的疲劳寿命在相同应力水平下,低于经过超声冲击处理的电子束焊试件;在相同疲劳寿命下,冲击处理试件的疲劳强度均高于未处理试件。超声冲击处理原始焊态试件与 BT20 钛合金母材相比,二者在长寿命区疲劳强度相当,只是在短寿命区内,超声冲击试件的疲劳强度略低于钛合金母材试件。

根据表 4~6 的相关试验结果,按疲劳强度的常规测试方法确定了电子束焊原始焊态试件和超声冲击处理试件以及母材试件在循环周次为 2×10^6 时的疲劳强度,结果如表 10 所示。

对比表 10 中超声冲击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,可见:BT20 钛合金单面电子束焊接接头超声冲击处理试件与原始焊态试件相比疲劳强度的改善程度高达 38% 左右,显然超声冲击能够一定程度提高钛

表 10 循环周次为 2×10^6 时疲劳强度及对比结果

Table 10 Fatigue strength comparison for TIG and electronic beam welding with cycle number of 2×10^6

Condition	Welding method	Fatigue strength/MPa	Increase ratio of fatigue strength/%
Peening treatment	TIG welding	260	27
As welded		204	
Peening treatment	Electronic beam welding	265	38
As welded		192	

合金电子束焊接接头的疲劳强度。

为了获得在相同应力水平下超声冲击处理前后试件的疲劳寿命的变化情况, 根据表 9 中各种情况下的 $S-N$ 曲线方程 $S^mN=C$ 的拟合结果, 得出超声冲击处理钛合金电子束焊接接头试件在疲劳寿命为 10^7 次时所对应应力范围下原始焊态试件疲劳寿命, 以及焊态试件在疲劳寿命为 10^5 次所对应应力范围下的超声冲击处理试件的疲劳寿命, 结果如表 11 所示。

表 11 疲劳寿命对比

Table 11 Fatigue life of welded joints before and after peening treatment

Condition	$\Delta\sigma_1/\text{MPa}$	N_1	$\Delta\sigma_2/\text{MPa}$	N_2
As welded	256	1.0×10^5	235	2.5×10^5
Peening treatment	256	29×10^5	235	1.0×10^7
As welded	323	1.0×10^5	224	1.07×10^6
Peening treatment	323	3.05×10^5	224	1.0×10^7

对比表 11 中相应原始焊态与超声冲击处理态试件在相同应力范围下的疲劳寿命, 粗略估计钛合金电子束焊接接头经过冲击处理后, 疲劳寿命被延长的情况, 可见: 经过超声冲击处理的钛合金电子束焊接接头试件与原始焊态试件相比, 其疲劳寿命被延长达 29~ 40 倍。

2.4 超声冲击处理 TIG 焊接头的疲劳性能

根据表 7~ 8 所示的相关试验结果, 按疲劳强度的常规测试方法确定了 TIG 焊^[12~14] 原始焊态试件和超声冲击处理试件以及母材试件在循环周次为 2×10^6 时的疲劳强度, 结果如表 10 所示。

对比表 10 中超声冲击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, 可见: BT20 钛合金 TIG 焊接接头超声冲击处理试

件与原始焊态试件相比疲劳强度的改善程度高达 27% 左右, 显然超声冲击也能够一定程度改善 TIG 焊接接头的疲劳强度。

为了获得在相同应力水平下超声冲击处理前后试件的疲劳寿命的变化情况, 将表 7~ 8 中的相应试验数据分别按方程 $S^mN=C$ 拟合($S-N$ 曲线的参数见表 9), 得出超声冲击处理 TIG 焊接接头试件在疲劳寿命为 10^7 次时所对应应力范围下焊态试件的疲劳寿命以及焊态试件在疲劳寿命为 10^5 次所对应应力范围下的超声冲击处理试件的疲劳寿命, 结果列于表 11 中。

对比表 11 中相应原始焊态与超声冲击处理态试件在相同应力范围下的疲劳寿命, 粗略估计钛合金 TIG 焊接接头经过冲击处理后, 疲劳寿命被延长的情况, 可见: 经过超声冲击处理的钛合金 TIG 焊接接头试件与原始焊态试件相比, 其疲劳寿命被延长达 3~ 10 倍。

3 结论

- 1) 经过超声冲击处理的钛合金电子束焊接接头试件与原始焊态试件相比, 疲劳强度的改善程度高达 38% 左右, 其疲劳寿命被延长达 29~ 40 倍。
- 2) 经过超声冲击处理的钛合金 TIG 焊接接头试件与原始焊态试件相比, 疲劳强度的改善程度高达 27% 左右, 其疲劳寿命被延长达 3~ 10 倍。
- 3) 可以使用超声冲击处理技术改善钛合金焊接接头的疲劳性能。

REFERENCES

[1] Mikheev P P, Nedoseka A Y. Effectiveness of ultrasonic treatment in improving the fatigue strength of welded joints[J]. Automatic Welding, 1984, 34(3): 37-40.

[2] Kravtsov T G . Improving the fatigue strength of deposited beads by ultrasonic treatment [J]. Automatic Welding, 1981, 31(1): 35-38.

[3] 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[J]. Welding in the World, 1996, 37(1-2): 72-82.

[4] Statnikov E S, Muktepavel V O, Troufiakov V J, et al. Comparison of ultrasonic impact treatment and other fatigue life improvement methods [J]. Welding in the World, 2002, 46(3/4): 20-32.

[5] WANG Dong-po, HUO Li-xing, ZHANG Yufeng. In-

- vestigation of improving fatigue strength of welded joints on low carbon steel by ultrasonic peening method[J]. Journal of Mechanical Strength, 1999, 21(4): 289 - 291.
- [6] HUO Lixing, WANG Dong-po, ZHANG Yufeng, et al. Investigation on improving fatigue properties of welded joints by ultrasonic peening method[J]. Welding in the World, 2001, 45(3-4): 12 - 16.
- [7] 王东坡, 霍立兴, 张玉凤. 提高焊接接头疲劳强度超声冲击法[J]. 焊接学报, 1999, 20(4): 158 - 164.
WANG Dong-po, HUO Lixing, ZHANG Yufeng. Investigation of improving fatigue strength of welded joints by ultrasonic peening method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1999, 20(4): 158 - 164.
- [8] 王东坡, 霍立兴, 张玉凤. 超声冲击法改善 LF21 铝合金焊接接头的疲劳性能[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(5): 754 - 759.
WANG Dong-po, HUO Lixing, ZHANG Yufeng. Improving fatigue properties of welded joints for LF21 aluminum alloy by ultrasonic peening method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(5): 754 - 759.
- [9] Ohta A. Fatigue strength of butt welded Al-Mg aluminum alloy tests with maximum stress at yield strength[J]. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 1990, 13(1): 53 - 58.
- [10] Ohta A, Maeda Y, Suzuki N. Effect of yield strength on the basic fatigue strength of welded joints[J]. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 1993, 16(5): 473 - 479.
- [11] Bertini L, Fontanari V, Straffelini G. Influence of post weld treatments on the fatigue behavior of Al alloy welded joints[J]. Int J Fatigue, 1998, 20(10): 749 - 755.
- [12] Horn A M, Huther I H, Lieurade H P. Fatigue behavior of T-joints improved by TIG dressing[J]. Welding in the World, 1998, 41(3-4): 273 - 280.
- [13] Branco C M, Maddox S J, Infante V I, et al. Fatigue performance of tungsten inert gas (TIG) and plasma welds in thin sections[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(4): 587 - 601.
- [14] Zaczek Z. Improvement in the fatigue strength of butt welded joints by TIG remelting of weld reinforcements [J]. Metal Construction, 1984, 20(2): 143 - 145.

Improvement of fatigue properties of welded joints for titanium alloy by ultrasonic peening method

WANG Dong-po, HUO Lixing, ZHANG Yufeng

(College of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The fatigue property improvement of welded joints for titanium alloy treated by ultrasonic peening was studied. The contrast test between Tungsten inert gas(TIG) welding and electronic beam welding joints treated by ultrasonic peening was conducted. The results show that, as contrasted with the specimens under as welded condition, the fatigue strength of the TIG welding BT20 titanium alloy specimens treated by ultrasonic peening is increased by about 27%, and the fatigue life is prolonged by 3~ 10 times; as contrasted with the specimens in as welded condition, the fatigue strength of the electronic beam welding BT20 titanium alloy specimens treated by ultrasonic peening is increased by about 38%, and the fatigue life is prolonged by 29~ 40 times.

Key words: titanium alloy; fatigue properties; electronic beam welding; ultrasonic peening; TIG welding

(编辑 李向群)