

文章编号:1000-6893(2003)02-0183-06

变幅载荷下改善焊接接头疲劳性能的 超声冲击与 TIG 熔修方法之比较

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 焊接研究所, 天津 300072)

Comparison of Ultrasonic Peening Method on Improving the Fatigue Behavior of Welded Joints with TIG Dressing under Variable-Amplitude Load

WANG Dong-po, HUO Li-xing, ZHANG Yu-feng, JING Hong-yang, YANG Xin-qi
(Welding Graduate School, College of Material Science and Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

摘要: 在恒幅和变幅两种加载条件下,对 16Mn 钢原始焊态和经过超声冲击及 TIG 熔修处理的焊接接头进行了对比疲劳试验。结果表明:(1)在恒幅载荷作用下,TIG 熔修试件与焊态试件相比,疲劳强度提高 37%左右,疲劳寿命延长 2.5 倍;而在变幅载荷作用下,TIG 熔修试件与焊态试件相比,疲劳强度提高 34%左右,疲劳寿命延长 1.7~1.9 倍。(2)在恒幅载荷作用下,超声冲击处理试件与焊态试件相比,疲劳强度提高 84%左右,疲劳寿命延长 3.5~27 倍;而在变幅载荷作用下,超声冲击处理试件与焊态试件相比,疲劳强度提高 80%左右,疲劳寿命延长 2.5~17 倍。(3)在低中应力水平、中长寿命区域内,无论是在恒幅载荷作用下还是在变幅载荷作用下,使用超声冲击法提高焊接接头疲劳强度较 TIG 熔修法的效果更好。

关键词: 变幅载荷; 超声冲击; TIG 熔修; 疲劳性能

中图分类号: V261.3⁺4; TG457.1 **文献标识码:** A

Abstract: Treated by ultrasonic peening or TIG dressing, the fatigue performance of welded joints and structures is to be improved significantly. This has been verified by many constant amplitude fatigue tests. Subjected to variable amplitude loads, the fatigue performance of the structures will be affected, so that the fatigue contrast tests of 16Mn steel welded joints with fillet welds in three different conditions: TIG dressing, ultrasonic peening and as welded condition were performed. Test results indicated that: (1) Contrasted with the specimens in as welded condition the fatigue strength of the specimens treated by TIG dressing is increased by about 37% and the fatigue life is prolonged by 2.5 times when acted by constant amplitude load. When acted by variable amplitude load, contrasted with the specimens in as welded condition the fatigue strength of the specimens treated by TIG dressing is increased by about 34% and the fatigue life is prolonged by 1.7~1.9 times. (2) When acted by constant amplitude load, contrasted with the specimens in as welded condition the fatigue strength of the specimens treated by ultrasonic peening is increased by about 84% and the fatigue life is prolonged by 3.5~27 times. But when acted by variable amplitude load, contrasted with the specimen in as welded condition the fatigue strength of the specimens treated by ultrasonic peening is increased by about 80% and the fatigue life is prolonged by 2.5~17 times; (3) Whether acted by constant amplitude loads or by variable amplitude loads, in the low-medium stress level and medium-long life states the improvement of fatigue strength of the welded joints created by ultrasonic peening is larger than that created by TIG dressing.

Key words: variable amplitude load; ultrasonic peening; TIG dressing; fatigue performance

经超声冲击或 TIG 熔修处理后,焊接接头和结构的疲劳性能能够得到显著改善,这已被相关的疲劳试验所证实^[1~10],但目前国内外一般均将原始焊态和超声冲击或 TIG 熔修处理后的焊接

接头进行恒幅疲劳对比试验,得出对比处理前后焊接接头疲劳强度或寿命的变化,即超声冲击或 TIG 熔修处理对所研究接头形式疲劳性能的改善情况。这些试验数据是评价超声冲击和 TIG 熔修等方法改善焊接接头疲劳性能的最基本依据。

然而实际结构往往承受的是变幅载荷,此时其应力幅与平均应力均随时可能发生一定的变

收稿日期:2002-04-12; 修订日期:2002-09-02
文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2003/02/0183/>

化,显然这将对焊接接头与结构的疲劳性能产生一定的影响。本文采用常用的 16Mn 钢非承载纵向角接焊接接头,在变幅载荷作用下,对超声冲击及 TIG 熔修处理焊接接头的疲劳行为进行了研究,并将超声冲击方法与 TIG 熔修方法进行了比较。

1 试验条件

1.1 试验材料及试件的制备

试验材料为 16Mn 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。

表 1 16Mn 钢的力学性能

Table 1 Mechanical properties of 16Mn steel

材料	屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	延伸率 / %
16Mn	390	590	24

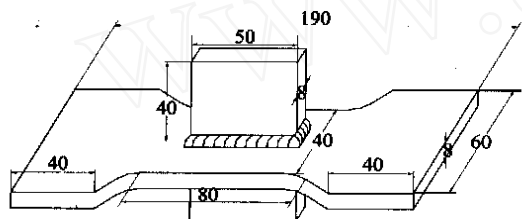


图 1 试件几何形状与尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Geometrical characteristics of specimen

试件的制备:焊接工艺参数如表 2 所示,使用 J507 焊条进行焊接,此外将试件两端圆弧过渡处全部打磨光滑,防止过早地从该处断裂。

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

焊条直径 / mm	焊接速度 / (mm · min ⁻¹)	焊接电流 / A	焊接电压 / V
4.0	130	160	24 ~ 26

1.2 超声冲击处理的实施方法

超声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 1.2 m/min 的处理速度,冲击处理 2 次,激励电流为 1.3A。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 熔修工艺规范

根据相关文献^[1~5]及 IIW 所推荐的 TIG 重熔工艺进行 TIG 熔修。因材料强度不高而没有进行预热处理,TIG 重熔是在室内进行的,只重熔一遍。熔修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 3。

表 3 TIG 熔修工艺

Table 3 Parameters of TIG dressing

电流类型	电极直径 / mm	电流 / A	电压 / V	移动速度 / (m · min ⁻¹)	热输入 / (kJ · cm ⁻¹)	保护气体
直流	3.2	140 ~ 160	15 ~ 20	0.1	20 ~ 30	氩气

1.4 疲劳试验方法

试验是在 10⁴kg 高频疲劳试验机上进行的,试验机静载精度满量程 ±0.2%,动载振幅波动度满量程 ±2%。

试验方法:将试件分成 3 组,第 1 组为原始焊态原始试件,分别在恒幅和变幅载荷作用下进行疲劳试验;第 2 组试件进行超声冲击处理,也在恒幅和变幅载荷作用下进行疲劳试验;第 3 组试件 TIG 熔修后进行恒幅和变幅疲劳试验。

施加载荷情况:拉伸载荷,恒幅载荷应力比为 $R = 0.1$ 。

1.5 变幅疲劳试验的载荷谱

变幅疲劳试验采用载荷单元程序加载的方式。作用于试件上的载荷谱由周期性重复的应力幅子序列组成,每个子序列又由 3 级具有固定循环次数的恒应力幅单元组成,且在变幅疲劳试验过程中平均应力始终保持不变,所设计的载荷单元加载应力幅序列如图 2 所示。规定在应力幅子序列中最大级应力与中级应力之间差值约为 27MPa;中级应力与最小级应力之间差值约为

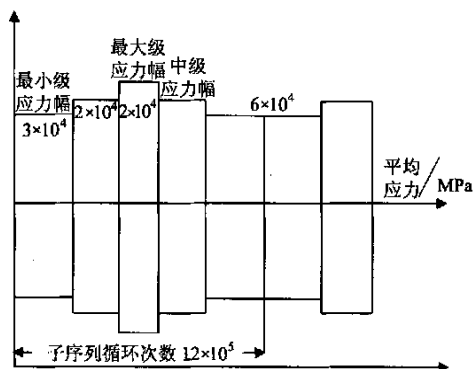


图 2 载荷单元加载应力幅序列

Fig. 2 Subsequence of the designed block programmed loading

表 4 变幅疲劳试验的加载条件

Table 4 The loading conditions of variable amplitude fatigue test

状态	冲击处理态					TIG 熔修态						原始焊态						
试件编号	1	2/3	4	5/6	7	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7
最大应力范围 / MPa	252	243	234	225	216	279	252	225	207	189	171	247	220	193	166	148	130	121
中级应力范围 / MPa	225	216	207	198	189	252	225	198	180	171	144	220	193	166	139	121	103	94
最小应力范围 / MPa	207	198	189	180	171	234	207	180	162	153	126	202	175	148	121	103	85	76

18MPa;平均应力恒为最大级应力的 0.55(应力比 $R = 0.1$)。将变幅疲劳试验时所承受的载荷情况分别列于表 4。

2 恒幅疲劳试验结果及分析

恒幅加载条件下的焊态试件的试验结果见表 5,超声冲击处理试件的试验结果见表 6,TIG 熔修试件的试验结果见表 7。

表 5 恒幅加载条件下焊态试件的试验结果

Table 5 Test results of as welded specimens under constant amplitude loading

试件编号	疲劳寿命 $N/10^6$	断裂位置	应力范围 / MPa
1	0.329	焊趾	198
2	0.463	焊趾	180
3	0.549	焊趾	162
4	0.963	焊趾	144
5	1.085	焊趾	144
6	1.207	焊趾	131
7	1.318	焊趾	131
8	1.782	焊趾	117
9	2.897	焊趾	108

表 6 恒幅加载条件下冲击处理试件的试验结果

Table 6 Test results of specimens by ultrasonic peening treatment under constant amplitude loading

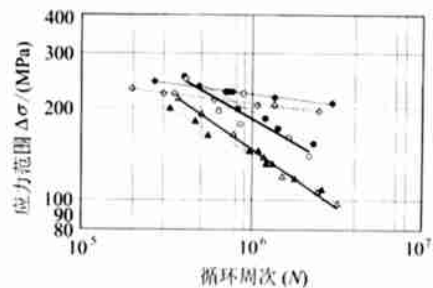
试件编号	疲劳寿命 $N/10^6$	断裂位置	应力范围 / MPa
1	2.943	母材	207
2	1.347	母材	216
3	0.763	焊趾	225
4	0.696	焊趾	225
5	0.484	焊趾	234
6	0.297	焊趾	243

表 7 恒幅加载条件下 TIG 熔修试件的试验结果

Table 7 Test results of TIG dressing specimens under constant amplitude loading

试件编号	疲劳寿命 $N/10^6$	断裂位置	应力范围 / MPa
1	0.397	焊趾	252
2	0.724	焊趾	225
3	0.818	焊趾	198
4	1.188	焊趾	185
5	1.410	焊趾	171
6	2.293	焊趾	153

根据对比疲劳试验结果(表 5 ~ 表 7),按方程 $S^m N = C$ 分别拟合出恒幅加载条件下原始焊态试件与超声冲击处理态试件以及 TIG 熔修试件的 $S-N$ 曲线,拟合结果列于表 8 中,且将各条 $S-N$ 曲线绘于图 3 中。根据表 5 ~ 表 7 的相关试验结果,按疲劳强度的常规测试方法确定了恒幅加载条件下原始焊态试件和超声冲击处理试件以及 TIG 熔修试件在循环周次为 2×10^6 时的疲劳强度,结果列于表 9。



- 恒幅 TIG 熔修试件试验结果 — 恒幅原始焊态试件平均 $S-N$ 曲线
- 变幅 TIG 熔修试件试验结果 — 恒幅超声冲击试件平均 $S-N$ 曲线
- ◆ 恒幅超声冲击试件试验结果 — 变幅原始焊态试件平均 $S-N$ 曲线
- ▲ 恒幅原始焊态试件试验结果 — 变幅超声冲击试件平均 $S-N$ 曲线
- 恒幅 TIG 熔修试件平均 $S-N$ 曲线
- 变幅超声冲击试件试验结果
- 变幅 TIG 熔修试件平均 $S-N$ 曲线
- ▲ 变幅原始焊态试件试验结果

图 3 $S-N$ 曲线的对比

Fig. 3 Comparison of $S-N$ curves

对比 $S-N$ 曲线,可以看出:未经超声冲击处理的原始焊态试件疲劳寿命在相同应力水平下,明显低于经过超声冲击处理的试件。通过对比表 9 中超声冲击处理及 TIG 熔修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 FAT 值发现: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 37% 左右,无论应力水平高低,均断于焊趾。而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 84% 左右,在高应力水平下断于焊趾,在较低应力水平下断于母材。显然,在恒幅加载条件下 TIG 熔修对焊接接头疲劳强度的改善效果不如超声冲击方法显著。

表8 S-N 曲线方程的参数

Table 8 Parameters for equation of S-N curves

状态	恒幅			变幅		
	原始焊态	冲击处理态	TIG 熔修态	原始焊态	冲击处理态	TIG 熔修态
m	3.4	14.6	3.4	2.65	15.5	3.1
C_m	0.205×10^{14}	0.177×10^{41}	0.509×10^{14}	0.527×10^{12}	0.81×10^{42}	0.107×10^{14}
标准差	0.0364	0.0463	0.409	0.0310	0.0595	0.12

表9 疲劳强度对比(循环寿命为 2×10^6)

Table 9 The fatigue strength of as welded and treated joints

状态	恒幅			变幅		
	原始焊态	冲击处理态	TIG 熔修态	原始焊态	冲击处理态	TIG 熔修态
/MPa	115	212	158	110	198	147
提高程度/%	-	84	37	-	80	34

为了获得在相同应力水平下,超声冲击及 TIG 熔修处理后焊接试件疲劳寿命的变化情况。根据表 9 中恒幅加载条件试验数据的拟合方程,分别得出对应超声冲击处理试件在寿命为 10^7 次时应力水平下,焊态试件及 TIG 熔修试件的疲劳寿命以及焊态试件在寿命为 3×10^5 所对应应力水平下的超声冲击处理试件与 TIG 熔修试件的疲劳寿命,将结果列于表 10 中。

表10 疲劳寿命对比

Table 10 The fatigue life of as welded and treated joints

状态	恒幅			变幅		
	原始焊态	冲击处理态	TIG 熔修态	原始焊态	冲击处理态	TIG 熔修态
应力水平 1 /MPa		227			203	
寿命 1 $N/10^6$	0.20	0.47	0.50	0.40	1.39	0.75
应力水平 2 /MPa		189			178	
寿命 2 $N/10^6$	0.372	10.0	0.925	0.57	10.0	1.13

结果表明:经过超声冲击处理后,非承载纵向角接接头的疲劳寿命,在恒幅加载条件下被延长多达 2.4~27 倍;而经过 TIG 熔修处理后,该接头的疲劳寿命则被延长约为 2.5 倍。可见,在恒幅加载条件下 TIG 熔修对焊接接头疲劳寿命的改善效果远不如超声冲击方法明显。

3 变幅疲劳试验结果分析与比较

对于变幅载荷作用下的原始焊态、超声冲击及 TIG 熔修试件的试验结果采用 Palmgren-Miner 准则进行累积损伤计算,即

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots = \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

式中: n_i 为载荷谱中应力范围为 σ_i 时的循环次数; N_i 为在恒幅载荷条件下获得的 S-N 曲线上当应力范围为 σ_i 时所对应的循环次数。

将得到的变幅疲劳试验结果按下列公式转化为当量的恒幅应力范围 E

$$E = \sqrt[m]{\frac{n_i \sigma_i^m}{N_i}} \quad (2)$$

式中: m 为恒幅载荷条件下 S-N 曲线的斜率。

变幅加载条件下的焊态试验结果见表 11,超声冲击处理试件的试验结果见表 12, TIG 熔修试件的试验结果见表 13。根据对比疲劳试验结果(表 11~13),按方程 $S^m N = C$ 拟合出 16Mn 原始焊态试件、超声冲击处理态试件以及 TIG 熔修试件的 S-N 曲线,其拟合结果列于表 8 中,对比 S-N 曲线绘于图 3 中。

表11 变幅加载条件下原始焊态试件的试验结果

Table 11 Test results of as welded specimens under variable amplitude loading

试件编号	疲劳寿命 $N/10^6$	断裂位置	累积损伤程度 D	等效应力范围 E/MPa
1	0.367	焊趾	1.54	213
2	0.503	焊趾	1.35	190
3	0.774	焊趾	1.24	168
4	1.173	焊趾	1.04	137
5	1.508	焊趾	0.84	119
6	2.437	焊趾	0.774	106
7	3.193	焊趾	0.75	97

表12 变幅加载条件下冲击处理试件的试验结果

Table 12 Test results of specimens by UPT under variable amplitude loading

试件编号	疲劳寿命 $N/10^6$	断裂位置	累积损伤程度 D	等效应力范围 E/MPa
1	0.197	焊趾	0.386	230
2	0.348	焊趾	0.346	222
3	0.301	焊趾	0.30	222
4	0.596	焊趾	0.294	212
5	1.074	焊趾	0.323	204
6	1.345	焊趾	0.40	204
7	2.458	焊趾	0.263	195

表 13 变幅加载条件下 TIG 熔修试件的试验结果

Table 13 Test results of TIG dressing specimens under variable amplitude loading

试件 编号	疲劳寿命 $N/10^6$	断裂 位置	累积损伤 程度 D	等效应力范围 σ/MPa
1	0.407	焊趾	0.94	248
2	0.884	焊趾	1.39	222
3	0.634	焊趾	0.64	195
4	0.849	焊趾	0.62	177
5	1.641	焊趾	0.85	160
6	2.169	焊趾	0.75	139

根据表 11 ~ 表 13 的相关试验结果,按疲劳强度的常规测试方法确定了变幅加载条件下原始焊态试件和超声冲击处理试件在循环周次为 2×10^6 时的疲劳强度,结果列于表 9。

对比图 3 中 $S-N$ 曲线,可以看出:在变幅加载条件下,相同应力水平的原始焊态试件的疲劳寿命仍然低于经过超声冲击或 TIG 熔修处理试件的疲劳寿命;在相同的疲劳寿命下,超声冲击或 TIG 熔修处理试件的疲劳强度也远高于未处理试件。可见,在变幅加载条件下超声冲击或 TIG 熔修也能够较好地提高焊接接头的疲劳性能。

对比表 9 中超声冲击、TIG 熔修处理试件与原始焊态试件在循环寿命为 2×10^6 时的疲劳强度值发现:在变幅加载条件下,TIG 熔修试件与原始焊态试件相比疲劳强度提高 34% 左右;超声冲击处理试件与原始焊态试件相比,疲劳强度提高 80% 左右,与恒幅加载条件下的改善程度基本相当。可以看出,在变幅加载条件下 TIG 熔修提高焊接接头疲劳强度的效果不如超声冲击处理方法明显。

根据表 9 中变幅疲劳试验数据的拟合方程可分别得出超声冲击处理试件在寿命为 10^7 次所对应应力水平下的焊态试件和 TIG 熔修试件的疲劳寿命及焊态试件在寿命为 4×10^5 次所对应应力水平下的超声冲击处理试件和 TIG 熔修处理试件的疲劳寿命,同样将结果也列于表 10 中。对比表 10 中超声冲击处理试件以及 TIG 熔修处理试件在与焊态试件相同应力水平下的疲劳寿命。结果表明:超声冲击处理箱型焊接接头的疲劳寿命在变幅加载条件下被延长多达 2.5 ~ 17 倍,TIG 熔修箱型焊接接头的疲劳寿命在变幅加载条件下被延长 1.7 ~ 1.9 倍,二者均稍低于在恒幅加载条件下对接头疲劳寿命的改善程度。

表 10 还表明:在原始焊态试件循环周次为 4×10^5 时所对应应力范围下,超声冲击处理及

TIG 熔修试件的疲劳寿命分别延长 2.5 倍和 1.7 倍,在该应力水平下超声冲击处理试件的疲劳寿命略高于 TIG 熔修试件的疲劳寿命。在超声冲击处理试件循环周次为 1×10^7 时所对应应力范围下,超声冲击处理与 TIG 熔修试件的疲劳寿命分别延长 1.9 倍和 1.7 倍,因此可以认为在低中应力水平、中长寿命区域,在变幅加载作用下,使用超声冲击法提高焊接接头的疲劳寿命较 TIG 熔修法效果更好。

另外,由表 11 ~ 表 13 可知:在变幅加载条件下,超声冲击处理试件的累积损伤程度与在恒幅加载条件情况时相比大幅度降低,其累积损伤系数 D 介于 0.27 ~ 0.4 之间,约为恒幅加载时的 1/3 左右。在变幅加载条件下,TIG 熔修试件累积损伤程度与在恒幅加载条件情况时相比较也有所改变,其累积损伤系数 D 介于 0.62 ~ 1.39 之间,低应力条件下约为恒幅加载时的 2/3 左右。因此,当采用恒幅加载条件下得到的试验数据对超声冲击处理及 TIG 熔修焊接接头进行疲劳设计时,应充分估计变幅加载可能带来的不利影响,确保所设计结构的安全使用。

4 结 论

(1) 在恒幅加载条件下,超声冲击处理试件与原始焊态试件相比,疲劳强度提高 84% 左右,疲劳寿命延长 3.5 ~ 27 倍;而在变幅加载作用下,超声冲击处理试件与原始焊态试件相比,疲劳强度提高 80% 左右,疲劳寿命延长 2.5 ~ 17 倍,疲劳寿命约为恒幅加载时的 1/3 左右。

(2) 在恒幅加载条件下,TIG 熔修试件与原始焊态相比疲劳强度的改善程度高达 37% 左右,疲劳寿命延长约为 2.5 倍;而在变幅加载条件下,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,寿命延长 1.7 ~ 1.9 倍,疲劳寿命约为恒幅加载时的 2/3 左右。

(3) 在低中应力水平、中长寿命区域内,无论是在恒幅载荷作用下还是在变幅载荷作用下,使用超声冲击法提高焊接接头疲劳强度较 TIG 熔修法的效果更好。

参 考 文 献

- [1] Wataru H H. Fatigue limit of welded high strength steel and its improvement due to TIG treatment [J]. 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 [J]. Welding 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 [J]. *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 [J]. *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 [J]. *International Journal of Fatigue*, 1998,20(9):677 - 681.
- [6] 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 [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 1999,21(4):289 - 291.
- [7] Huo L X, Wang D P, Zhang Y F, *et al.* Investigation on improving fatigue properties of welded joints by ultrasonic peening method [J]. *Welding in the World*, 2001(3/4):16 - 21.
- [8] Janosch J 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*, 1996,37:72 - 83.
- [9] Gurney T R. *Fatigue of welded structures* [M]. Cambridge University Press, 1979.
- [10] Statnikov E S, Muktepavel V O, Troufiakov V J, *et al.* Comparison of ultrasonic impact treatment and other fatigue life improvement methods[Z]. IIW Doc XIII-1817-00 (IIS/IIW-1506-00).

作者简介:



王东波(1972 -) 男,黑龙江省肇东市人,天津大学材料科学与工程学院副教授,博士,2000年毕业于天津大学材料科学与工程学院,同年至2002年在天津大学机械学院博士后流动站工作,主要从事焊接结构疲劳及功率超声技术方面的研究,电话:27405889。



霍立兴(1936 -) 男,山东省固城人,天津大学材料科学与工程学院教授,博士生导师,60年毕业于前苏联乌拉尔工学院,1979~81年在比利时根特大学进修并获博士学位,主要从事焊接结构强度断裂与疲劳方面的研究。电话:27405889, Email:Lxhuo@tju.cn。

(责任编辑:蔡斐)