

[文章编号] 1004- 0609(2001)05- 0754- 06

超声冲击法改善 LF21 铝合金焊接接头的疲劳性能^①

王东坡, 霍立兴, 张玉凤, 陈俊梅, 刘允辉

(天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072)

[摘要] 利用自行研制的超声冲击实验装置, 对提高 LF21 铝合金焊接接头的疲劳强度进行了研究, 进行了 TIG 焊 LF21 铝合金非承载十字与 T 型接头的焊态及冲击处理态对比疲劳试验。结果表明: 使用 TIG 焊获得的 LF21 铝合金原始焊接接头的疲劳强度与其它焊接方法得到的同样接头的疲劳强度基本相当, 试图采用更高强度级别的 S-N 曲线对其进行设计时应持慎重态度。在应力比 $R = 0.5$ 时, 超声冲击处理使 LF21 铝合金非承载十字焊接接头(拉伸载荷)的疲劳强度提高了 26%, 接头寿命延长了 2~ 4 倍。在应力比 $R = 0.1$ 时, 超声冲击处理使 T 型接头(三点弯曲载荷)的疲劳强度提高了 37%, 接头寿命延长了 4~ 8 倍。在应力比 $R = -1$ 时, 超声冲击处理使 T 型接头(三点弯曲载荷)疲劳强度提高了 44%, 接头寿命延长了 5~ 10 倍。

[关键词] 铝合金; 疲劳强度; 焊接接头; 超声冲击

[中图分类号] TG 404

[文献标识码] A

近年来铝合金焊接结构应用的范围越来越广, 其中一些是用来承受交变载荷的重要结构。因此国内外对合金焊接结构及接头抗疲劳性能的研究工作十分重视, 但与对钢结构的疲劳问题所进行的研究相比仍存在诸多不足。铝合金焊接接头的疲劳强度仅为钢制相同接头的三分之一左右, 与母材相比其比强度高的特性并不明显, 因此改善铝合金焊接接头疲劳性能的研究工作有重要的实用价值。超声冲击法能够显著提高钢制焊接接头的疲劳强度已被有关试验所证实^[1~ 4], 但有关使用该方法改善铝合金焊接接头疲劳强度的工作进行得很少, 只有法国焊接研究所进行过少量研究^[3]。作者对国产 LF21 防锈铝合金 TIG 焊接非承载十字与 T 型接头的疲劳性能进行了试验, 分析了 TIG 铝合金焊接接头疲劳强度的特点, 并利用自行研制的 HJ-I 型超声冲击装置对 LF21 铝合金两种形式的接头进行了处理, 研究了超声冲击法对提高铝合金焊接接头疲劳性能的适用情况与处理效果, 为今后制定相应超声冲击处理铝合金焊接接头的疲劳设计规范及工程应用提供参考。

试件的主板和联接板材料均为防锈铝合金 LF21, 焊接材料采用同一材质的焊丝, 其力学性能见表 1, 试件的几何形状与尺寸如图 1~ 2 所示。

两种接头形式: 一种为非承载的 T 型接头形式(图 1), 另一种为十字接头形式(图 2)。

表 1 LF21 铝合金的力学性能

Table 1 Mechanical properties of LF21 aluminum alloy

Material	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ /%
LF21	159	367	21

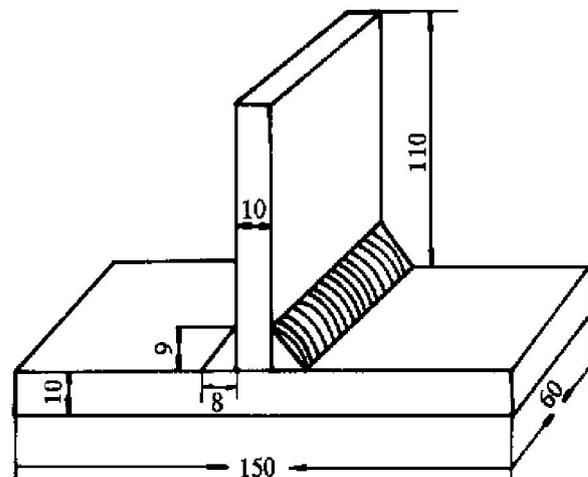


图 1 T 型接头试件的几何形状与尺寸

Fig. 1 Geometrical characteristics of T joints(unit: mm)

1 实验

1.1 试验材料、接头形式与力学性能

① [基金项目] 教育部博士点基金资助项目(1999005605)

[收稿日期] 2000- 12- 05; [修订日期] 2001- 05- 01

[作者简介] 王东坡(1972-), 男, 博士.

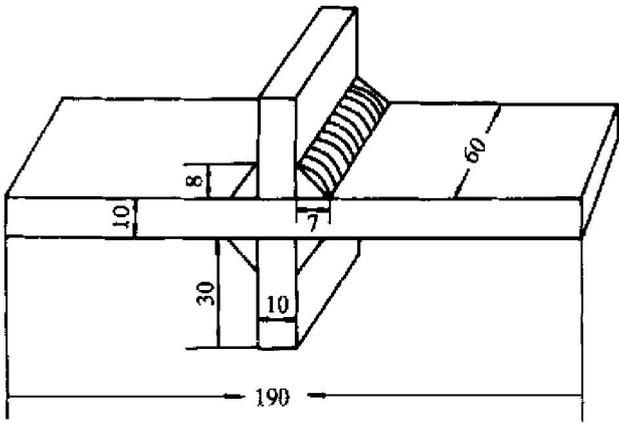


图 2 十字接头试件的几何形状与尺寸

Fig. 2 Geometrical characteristics of cruciform joints (unit: mm)

1.2 试件的制备过程

焊接试件在室内进行。第一道不添加焊丝预熔一遍, 然后采用 3.2 mm 的铝合金焊丝再施焊一道。焊接时试件位于水平位置, 由于试件较窄操作时基本没有出现熄弧问题, 具体的焊接工艺参数见表 2。

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

Kind of current	Diameter of electrode/mm	Welding current/A	Welding voltage/V
Direct current	3.2	145	13
Welding rate / ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	Welding heat input / ($\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Shield gas	
0.1	9.36	Ar	

为了防止和减小焊接试件时出现角变形和错位, 先进行定位焊, 校直纠偏后再进行焊接, 此外将十字接头试件的圆弧过渡处全部打磨光滑, 防止从该处断裂。

1.3 疲劳试验

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

施加载荷情况: 十字接头试件的载荷类型为拉伸载荷, 应力比 $R = 0.5, 0$; T 型接头的载荷类型为三点弯曲载荷, 应力比 $R = 0.1, -1$ 。

1.4 超声冲击处理工艺

超声冲击枪对准试件焊趾部位, 基本垂直于焊缝, 将冲击针阵列(含冲击针 3 根, 冲击针直径 2.7 mm)沿焊缝方向排列。略施加一定的压力, 使冲击处理过程基本在执行机构(冲击枪)的自重(3.5 kg)

条件下进行。

对十字接头与 T 型接头施以不同的处理规范: 激励电流均为 0.6 A, 但对十字接头以 0.6 m/min 的速度来回冲击处理 2 次(同处理低合金钢相同); T 型接头以 1.2 m/min 的速度来回冲击处理 3 次。冲击处理过程中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过渡外形。

2 疲劳试验结果

非承载十字接头原始焊态试件及超声冲击处理试件在应力比 $R = 0.5$ 情况下的疲劳试验结果见表 3, 原始焊态试件在应力比 $R = 0$ 情况下的疲劳试验结果见表 4。根据疲劳对比试验结果, 分别拟合出 3 种状态下存活率为 50% 的平均 S-N 曲线。应力比 $R = 0.5$ 及 $R = 0$ 时, 原始焊态试件的 S-N 曲线见图 3; 应力比 $R = 0.5$ 时, 超声冲击处理态试件与原始焊态试件的对比 S-N 曲线见图 4。

表 3 十字接头试验结果

Table 3 Test results of cruciform joint ($R = 0.5$)

No.	Condition	Fatigue life (N)/Cycle	Fracture position	Stress range ($\Delta\sigma$)/MPa
1	As welded	3.474×10^6	Fracturing in weld toe	29
2	As welded	2.466×10^6	Fracturing in weld toe	34
3	As welded	1.300×10^6	Fracturing in weld toe	38
4	As welded	0.383×10^6	Fracturing in weld toe	47
5	As welded	0.345×10^6	Fracturing in weld toe	54
6	Peening treatment	0.483×10^6	Fracturing in weld toe	56
7	Peening treatment	0.743×10^6	Fracturing in weld toe	52
8	Peening treatment	0.816×10^6	Fracturing in weld toe	50
9	Peening treatment	1.654×10^6	Fracturing in weld toe	44
10	Peening treatment	2.896×10^6	Fracturing in base material	40

T 型接头原始焊态试件及超声冲击处理试件在应力比 $R = 0.1$ 情况下的疲劳试验结果见表 5, T 型接头原始焊态试件及超声冲击处理试件在应力比 $R = -1$ 情况下的疲劳试验结果见表 6。

表4 十字接头原始焊态试验结果

Table 4 Test results of as welded cruciform joints ($R = 0$)

No.	Fatigue life (N)/Cycle	Fracture position	Stress range ($\Delta\sigma$)/MPa
1	1.100×10^6	Fracturing in weld toe	50
2	6.920×10^6	Fracturing in weld toe	45
3	0.991×10^6	Fracturing in weld toe	60
4	0.821×10^6	Fracturing in weld toe	55
5	0.272×10^6	Fracturing in weld toe	70

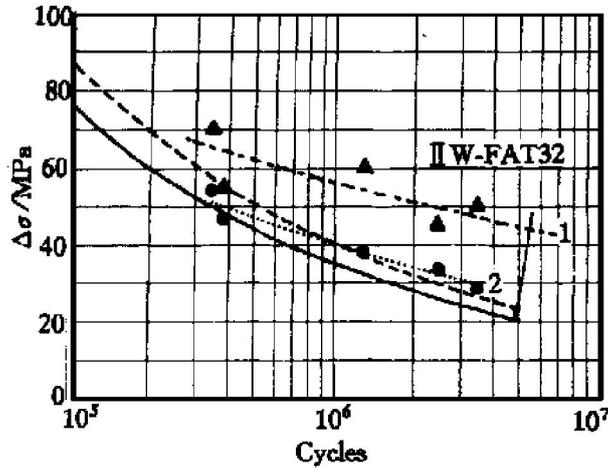


图3 十字接头焊态 S-N 曲线对比

Fig. 3 S-N curves of cruciform joints of as welded

- Test results ($R = 0$);
- ▲—Test results ($R = 0.5$);
- 1—Mean S-N curve of as welded ($R = 0$);
- 2—Mean S-N curve of as welded ($R = 0.5$)

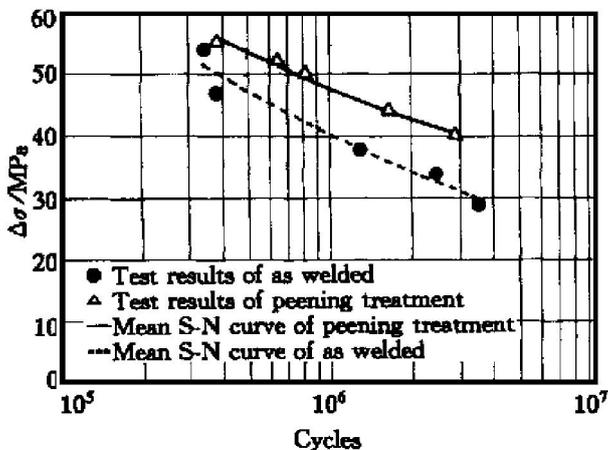


图4 十字接头焊态与冲击处理态 S-N 曲线对比

Fig. 4 S-N curves of cruciform joints of as welded and peening treatment

对比疲劳试验结果(表5, 6), 分别拟合出焊态与冲击处理态存活率为50%的相应S-N曲线。T型接头试件在应力比 $R = 0.1$ 情况下的S-N对比曲线见图5, 为了比较, 将应力比 $R = -1$ 情况下的

表5 T型接头试验结果

Table 5 Test results of T-shape joints ($R = 0.1$)

No.	Condition	Fatigue life (N)/Cycle	Fracture position	Stress range ($\Delta\sigma$)/MPa
1	Peening treatment	0.275×10^6	Fracturing in weld toe	112
2	Peening treatment	0.679×10^6	Fracturing in weld toe	105
3	Peening treatment	1.047×10^6	Fracturing in weld toe	100
4	Peening treatment	1.453×10^6	Fracturing in weld toe	97
5	Peening treatment	2.745×10^6	Fracturing in weld toe	93
6	As welded	0.60×10^6	Fracturing in weld toe	84
7	As welded	0.273×10^6	Fracturing in weld toe	122
8	As welded	1.80×10^6	Fracturing in weld toe	72
9	As welded	4.15×10^6	Fracturing in weld toe	63
10	As welded	0.910×10^6	Fracturing in weld toe	84
11	As welded	1.37×10^6	Fracturing in weld toe	76

表6 T型接头试验结果

Table 6 Test results of T-shape joints ($R = -1$)

No.	Condition	Fatigue life (N)/Cycle	Fracture position	Stress range ($\Delta\sigma$)/MPa
1	As welded	1.069×10^6	Fracturing in weld toe	72
2	As welded	3.45×10^6	Fracturing in weld toe	68
3	As welded	0.3×10^6	Fracturing in weld toe	100
4	As welded	0.74×10^6	Fracturing in weld toe	84
5	As welded	0.5×10^6	Fracturing in weld toe	92
6	As welded	0.79×10^6	Fracturing in weld toe	77
7	Peening treatment	0.426×10^6	Fracturing in weld toe	116
8	Peening treatment	1.589×10^6	Fracturing in weld toe	100
9	Peening treatment	0.662×10^6	Fracturing in weld toe	107
10	Peening treatment	5.389×10^6	Fracturing in weld toe	95
11	Peening treatment	0.603×10^6	Fracturing in weld toe	112

S-N曲线对比也一同绘于图5。

3 分析与讨论

图3~5中相应S-N曲线的拟合结果见表7, 同

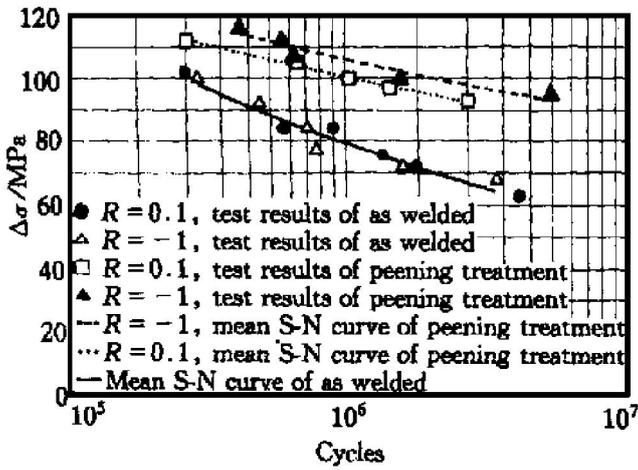


图 5 T 型接头原始焊态与冲击处理态的 S-N 曲线对比

Fig. 5 S-N curves of T-shape joints of as welded and peening treatment

时给出了两种接头形式在各应力比下的循环基数为 2×10^6 周次时的疲劳强度, 结果列于表 8。

3.1 TIG 焊态试验结果分析

对比图 3 中应力比 $R = 0$ 及 $R = 0.5$ 两种情况下的 S-N 曲线及表 8 中循环寿命为 2×10^6 周次条件下获得的疲劳强度值。可以明显看出: 在应力比为 $R = 0.5$ 情况下试件的疲劳寿命在相同应力水平下, 都远低于应力比 $R = 0$ 情况下试件的寿命; 在

相同的疲劳寿命下, 应力比 $R = 0$ 情况下试件的疲劳强度均远远高于应力比为 $R = 0.5$ 情况下的试件。这表明: 使用 TIG 焊制备的 LF21 铝合金非承载十字焊接接头, 在一定的应力比范围内其疲劳性能对平均应力较为敏感。

为了对比, 将国际焊接学会推荐的铝合金非承载十字接头应采用的疲劳强度设计级别为 FAT28 的标准设计 S-N 曲线绘于图 3 中, 同时将高一个强度级别的标准设计 S-N 曲线也绘于图 3。根据国际焊接学会的焊接结构疲劳设计规范的规定^[5, 6]: 将应力比为 $R = 0.5$ 情况下获得的疲劳试验结果与级别为 FAT28 的标准设计 S-N 曲线进行比较。结果表明: 对 LF21 铝合金非承载十字 TIG 焊接头, 采用疲劳强度级别为 FAT28 (2×10^6 周次时的疲劳强度) 的 S-N 曲线进行设计是合理的。

将应力比为 $R = 0.5$ 情况下获得的疲劳试验结果与级别为 FAT32 的标准设计 S-N 曲线进行比较后发现: 在较高的应力水平区域内, 一些疲劳试验结果落在了设计 S-N 曲线下面。这意味着: 对于 LF21 铝合金非承载十字 TIG 焊接头, 对其进行疲劳强度设计时采用级别 FAT28 级别 (2×10^6 周次时的疲劳强度) 的 S-N 曲线进行设计是不合适的, 这样可能导致较为危险的设计结果。

表 7 S-N 曲线的参数表

Table 7 C and m values

Kind of joints	Condition	Stress ratio R	m	C_m	Standard deviation
T-shape joints	As welded	0.1	3.92	1.069×10^{14}	0.12
	Peening treatment	0.1	12.00	0.110×10^{31}	0.033 1
T-shape joints	As welded	- 1	5.80	0.105×10^{18}	0.147
	Peening treatment	- 1	12.70	0.570×10^{32}	0.132
Cruciform joints	As welded	0	7.00	0.194×10^{39}	0.222
	As welded	0.5	4.40	0.115×10^{14}	0.029 8
	Peening treatment	0.5	6.30	0.386×10^{17}	0.063 2

表 8 疲劳强度及对比结果

Table 8 Fatigue strength of LF21(FAT28)

Kind of joints	Condition	Stress ratio R	Fatigue strength ($\Delta\sigma$)/MPa	Improvement of fatigue strength/%
T-shape joints	Peening treatment	$R = - 1$	101	44
	As welded	$R = - 1$	70	
T-shape joints	Peening treatment	$R = 0.1$	96	37
	As welded	$R = 0.1$	70	
Cruciform joints	Peening treatment	$R = 0.5$	42	26
	As welded	$R = 0.5$	34	

对于钢材^[7~10], 由于 TIG 焊接头往往会获得较好的焊趾几何外形, 从而比通常的手工电弧焊、CO₂ 气体保护焊及 MIG 焊等焊接方法制备的相同形式接头具有更高的疲劳强度, 因此可以采用更高强度级别的标准设计 S-N 曲线。然而对 LF21 铝合金非承载十字 TIG 焊接接头所进行的疲劳试验结果却没有反映出 TIG 焊接头的更高的疲劳强度, 因为国际焊接学会推荐的铝合金非承载十字焊接所采用的疲劳强度设计级别 FAT28 的标准设计 S-N 曲线是主要根据 MIG 焊接头的疲劳试验结果统计分析得到的^[5, 6]。该焊接方法由于具有更高的生产效率而在铝合金结构的制作中广泛使用。所以可以较为保守地认为: 使用 TIG 焊接方法制备的 LF21 铝合金非承载十字焊接接头的疲劳强度与由其它焊接方法(如 MIG 焊)获得的同样接头的疲劳强度相当, 试图采用更高强度级别的 S-N 曲线对其进行疲劳强度设计应慎重。

3.2 超声冲击处理效果

通过对比图 4, 5 中的相应 S-N 曲线, 可以明显看出: 未经超声冲击处理的 LF21 铝合金原始焊态试件的疲劳寿命在相同应力水平下, 均低于经过超声冲击处理的相同类型试件。超声冲击处理使十字接头试件的疲劳寿命延长 2~4 倍(与焊态相比), 使 T 型接头在应力比 $R = 0.1$ 时的疲劳寿命延长了 4~8 倍(与焊态相比), 使 T 型接头在应力比 $R = -1$ 时的疲劳寿命延长了 5~10 倍。

LF21 铝合金十字接头的超声冲击处理试件与原始焊态试件在循环寿命为 2×10^6 周次条件下的疲劳强度的对比结果表明(表 7): 应力比 $R = 0.5$ 时, 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 26%。

由图 5 可见, 将 T 型接头原始焊态在应力比 $R = 0.1$ 与应力比 $R = -1$ 两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: 此时 T 型焊接接头的疲劳强度与应力比无关, 可以统一进行统计分析。至于疲劳强度与应力比无关的原因, 显然是由于 T 型接头试件中含有高值焊接残余拉伸应力所致^[11~15]。

LF21 铝合金 T 型接头的超声冲击处理试件与原始焊态试件在循环寿命为 2×10^6 周次的条件下获得的疲劳强度的对比结果表明(表 10): 与原始焊态的试件相比, 在应力比 $R = 0.1$ 时, 超声冲击处理使接头疲劳强度提高了 37%; 在应力比 $R = -1$ 时, 超声冲击处理使接头疲劳强度提高了约 44%。

从图 5 中可见: 应力比 $R = 0.1$ 时超声冲击处理的 T 型接头的平均 S-N 曲线位于应力比 $R = -1$ 时超声冲击处理的接头试件的 S-N 曲线之下(用应力幅表示)。由此可见: 超声冲击处理后的接头疲劳强度不再与所外加的平均应力无关, 而随着应力比 R 增加, 接头所能够承受的疲劳应力幅度有所降低, 因此设计经过超声冲击处理的焊接接头时需考虑所施加载荷的静载成分, 而无论接头中是否含有高值焊接残余应力。

4 结论

1) 使用 TIG 焊方法获得的 LF21 铝合金非承载十字焊接接头的疲劳强度与其它焊接方法获得的相同接头的疲劳强度相当, 试图采用更高强度级别的 S-N 曲线对其进行设计时应持慎重态度。

2) 在一定的应力比范围内, LF21 铝合金非承载十字焊接接头的疲劳性能对平均应力较为敏感。

3) 超声冲击处理后, 十字接头疲劳强度(2×10^6 循环周次)提高了 26% 左右, 疲劳寿命延长 2~4 倍; T 型接头疲劳强度提高了 37%~44%, 疲劳寿命延长了 4~10 倍。

4) 对超声冲击处理焊接接头进行疲劳设计时, 需考虑所施加载荷的静载成分。

[REFERENCES]

- [1] Mikheev P P, Nedoseka A Y. Effectiveness of ultrasonic treatment in improving the fatigue strength of welded joints [J]. Automatic Welding, 1984, 3: 37-40.
- [2] Kravtsov T G. Improving the fatigue strength of deposited beads by ultrasonic treatment [J]. Automatic Welding, 1981, 10(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): 72-82.
- [4] WANG Dong-po (王东坡), HUO Li-xing (霍立兴), ZHANG Yu-feng (张玉凤). 提高焊接接头疲劳强度超声波冲击法 [J]. Transactions of the China Welding Institution(焊接学报), 1999, 20(4): 158-164.
- [5] Doc IW/ IIS- 693- 81(ex DOC. XIII- 998- 81/ XV- 494- 81). Design recommendations for cyclic loaded welded steel structures [J]. Welding in the World, 1982, 20(7/8): 153-166.
- [6] Doc IIS/ IHW - 875- 86(ex DOC. XIII- 1184- 85). Statistical analyses of fatigue data by various methods

- [J]. *Welding in the World*, 1996, 24(9/10): 209–219.
- [7] 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): 273–280.
- [8] 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.
- [9] Zaczek Z. Improvement in the fatigue strength of butt welded joints by TIG remelting of weld reinforcements [J]. *Metal Construction*, 1984, 2: 143–145.
- [10] 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.
- [11] Ohta A. Fatigue strength of butt welded AlMg aluminum alloy-tests with maximum stress at yield strength [J]. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 1990, 13(1): 53–58.
- [12] Ohta A, Maeda Y, Suzuki N. Effect of yield strength on the basic fatigue strength of welded joints [J]. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 1993, 16(5): 473–479.
- [13] Ohta A, Suzuki N, Maeda Y. Effective means for improving the fatigue strengths of welded structures [J]. *Welding in the World*, 1996, 38(1): 84–89.
- [14] Bertini L, Fontanari V, Straffelini G. Influence of post weld treatments on the fatigue behavior of Al alloy welded joints [J]. *Int J Fatigue*, 1997, 20(10): 749–755.
- [15] Wohlfahrt H, Nitschke-pagel T, Zinn W. Improvement of the fatigue strength of welded joints by post-weld treatment methods—a comparison of the results of high strength structural steels and high strength aluminum alloys [J]. *Welding in the World*, 1996, 38(3): 307–316.

Fatigue properties improvement of welded joints for LF21 aluminum alloy by ultrasonic peening method

WANG Dong-po, HUO Li-xing, ZHANG Yu-feng, CHEN Jun-mei, LIU Yur-hui
(College of Materials Science and Engineering, Tianjin University,
Tianjin 300072, P. R. China)

[Abstract] The ultrasonic peening method was used to improve the fatigue strength of welded joints of aluminum. The S-N curves and fatigue limits of TIG cruciform and T-shape joints of LF21 aluminum were obtained at both as welded and peening conditions. The results show that it should be more careful to design according to high strength classic S-N curves, for the tests reveal little difference of the fatigue strength between TIG and other welding methods as in the same form of welded joints. The fatigue strength of cruciform joints of LF21 by ultrasonic peening treatment have been increased by 26% (tension) under the stress ratio $R = 0.5$ and the fatigue life is 2~4 times longer than that of the as welded ones. When the stress ratio $R = 0.1$, the fatigue strength of T-shape joints have been improved by 37% and fatigue life is 4~8 times longer. When $R = -1$, the fatigue strength of T-shape joints have improved by 44% and fatigue life is 5~8 times longer.

[Key words] aluminum alloy; fatigue strength; welded joints; ultrasonic peening

(编辑 黄劲松)