

文章编号: 1004-0609(2004)11-1895-06

焊缝几何特征对 5A30 铝合金焊接接头疲劳性能的影响^①

李敬勇¹, 李标峰², 冯刚宪²

(1. 江苏科技大学 材料科学与工程学院, 镇江 212003; 2. 洛阳船舶材料研究所, 洛阳 471039)

摘 要: 通过 5A30 铝合金不同焊缝形式、几何尺寸对接接头疲劳试验, 以及焊缝余高存在时焊趾处的应力集中系数的测定和理论计算, 研究了焊缝几何特征对铝合金焊接接头疲劳性能的影响。结果表明: 单面焊双面成型和双面焊对接接头的疲劳性能相当, 在循环次数为 $(1.7 \sim 1.8) \times 10^6$ 时, 疲劳强度约为 100 MPa; 焊缝余高的存在使接头的疲劳性能明显降低, 增大焊缝余高, 接头疲劳性能显著下降, 去除余高, 则可使接头的疲劳寿命提高 2~3 倍; 厚度为 4 mm 板材对接接头, 焊缝余高为 1~2 mm 时, 焊趾处的应力集中系数较其他部位增大 50% 左右, 焊缝余高大于 3 mm, 焊趾处的应力集中系数可超过 1.70。

关键词: 铝合金; 焊接接头; 焊缝余高; 疲劳性能

中图分类号: TG 404

文献标识码: A

Effect of weld geometrical features on fatigue properties of 5A30 aluminum alloy welded joints

LI Jing-yong¹, LI Biao-feng², FENG Gang-xian²

(1. School of Materials Science and Engineering,

Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;

2. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China)

Abstract: Based on the fatigue testing of 5A30 aluminum alloy welded butt joints which have different weld types and geometrical dimensions, the measurement and calculation of stress concentration coefficients (K_t) at the toes of weld, the influence of weld geometrical features on fatigue properties of 5A30 aluminum welded joints was studied. The results show that the fatigue properties of single welded butt joints and double welded butt ones are matched and the fatigue strength of theirs at $(1.7 \sim 1.8) \times 10^6$ cycle is about 100 MPa. The presence of weld reinforcements (WRs) reduces the fatigue properties of welded joints. Heightening WRs can greatly lower the fatigue properties of welded joints and wiping out WRs can increase fatigue life twice or three times as much. When the weld reinforcements change between 1~2 mm, K_t at toes of weld of 4 mm thick plates are increased 50% comparing with other parts, and if the WRs is higher than 3 mm, K_t at weld toes of joints may exceed 1.70.

Key words: aluminum alloy; welded joint; weld reinforcement; fatigue property

随着运载工具日益向轻量化、高速化发展, 铝合金在汽车、铁路车辆、地铁、高速船舶和舟桥、坦克等结构和产品中的应用越来越引起人们的兴趣。在上述各种情况下, 焊接往往是最基本的连接方式^[1]。不同焊接结构的统计数字表明^[2], 50%~

90% 的失效是由于疲劳破坏引起的, 而承受交变载荷的焊接接头处则多为疲劳裂纹的源头, 因此, 焊接接头的抗疲劳性能受到国内外学者, 尤其是国际焊接学会疲劳专业委员会的普遍关注^[3~10]。在大量疲劳试验与工程实践的基础上焊接结构设计规范不

① 收稿日期: 2004-03-15; 修订日期: 2004-07-12

作者简介: 李敬勇(1963-), 男, 副教授。

通讯作者: 李敬勇; 电话: 0511-4401184; E-mail: 13305284685@163.com

断出台,而且逐渐形成以标称应力和热点应力表征和评定焊接结构和接头疲劳强度的方法^[1, 11]。但与钢制构件相比,铝合金相关的工作还显滞后。

焊接接头焊趾处的应力集中被认为对焊接接头的疲劳强度大幅度低于基体金属有极其重要的作用,而焊缝的几何形状直接决定了焊趾处的应力集中系数。尤其是对于高强铝合金,其焊接接头的疲劳强度则强烈地依赖于焊缝的几何特征^[12]。从几何形状的连续性和载荷作用下应力线的分布情况分析,焊缝余高的存在无疑导致了焊接接头焊趾处的应力集中,再加上焊接缺陷及复杂残余拉应力的存在,势必使焊趾处成为疲劳性能最薄弱的位置。尽管人们对焊趾处的应力集中以及焊缝过渡半径和过渡角等对焊接接头疲劳性能的影响给予关注,并采取诸如超声锤击、机械加工、TIG 重熔和低相变点填充材料等措施来改善焊趾处的应力分布,以提高焊接接头的疲劳性能^[5-7, 9, 11, 12],但对焊缝几何特征对焊趾处应力集中和铝合金焊接接头疲劳性能的影响的内容尚欠详尽。本文作者采用我国研制的 5A30 船用铝合金,通过不同焊缝余高和焊缝形式对接接头焊趾处应力集中系数的分析和理论计算,研究了焊缝几何形状对铝合金焊接接头疲劳性能的影响,为铝合金焊接结构的设计、焊接工艺的制定和焊缝质量的控制提供了理论依据。

1 实验材料及试样的几何特征

本研究实验材料为我国研制的 Al-Mg 系铝合金 5A30,试板厚度为 4 mm。采用的填充材料为配套研制的 5A30 焊丝。5A30 合金及其配套填充材料的化学成分列于表 1。表 2 所列为 5A30 铝合金母材及其焊接接头常规力学性能。

实验采用的接头形式为对接接头,焊接工艺方法为手工钨极氩弧焊(TIG)。疲劳试样的焊缝包括单面焊双面成形、双面焊正常余高(GWR)、双面焊增大余高(EWR)、双面焊去除余高(NWR)等4种形式。增大焊缝余高在焊接过程中通过多加填充丝

表 2 5A30 铝合金母材及其焊接接头的常规力学性能

Table 2 Mechanical properties of 5A30 aluminum base material (BM) and its welded joint

Material	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
BM	333.2	225.4	12
Joint	313.6	171.5	—

来实现,去除焊缝余高则是采用机械方法将余高加工至与母材表面齐平,加工方向与实验加载方向一致。图 1 所示为对接接头疲劳试样示意图。

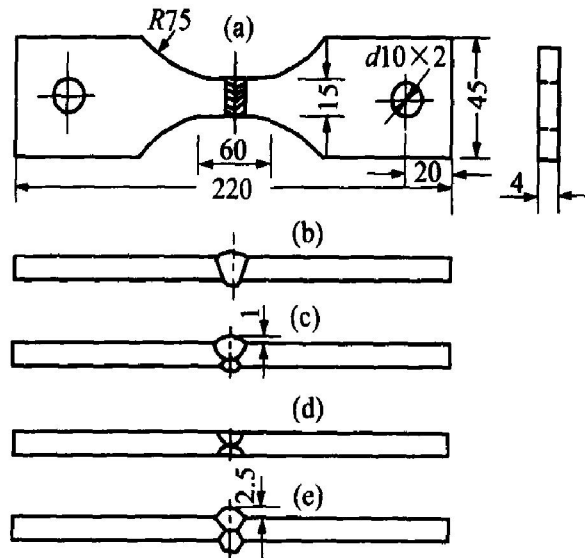


图 1 疲劳试样示意图

Fig. 1 Sketch map of fatigue testing samples (mm)

- (a) —Shape and dimensions of samples;
- (b) —Single-welded butt joint;
- (c) —Double-welded butt joint with GWR;
- (d) —Double-welded butt joint with NWR;
- (e) —Double-welded butt joint with EWR

分别对单面焊双面成形接头、双面焊正常余高接头和双面焊增大余高接头任意取 3 根试样,进行两个侧面的焊缝尺寸测定,取平均值作为其焊缝的几何尺寸,焊缝几何特征尺寸的标注符号如图 2 所示。其中, t 为焊接试板厚度, B 为焊缝宽度, h 为焊缝余高, r 为焊趾处过渡半径, θ 为焊缝过渡角。测试结果列于表 3。实验之前,对试样进行逐根

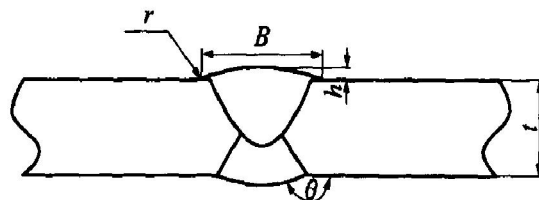


图 2 焊缝几何特征参数示意图

Fig. 2 Sketch map of weld geometrical dimensions

表 1 5A30 铝合金及其配套填充材料的化学成分

Table 1 Chemical compositions of 5A30 aluminum alloy and welding wire (mass fraction, %)

Material	Si+ Fe	Mn	Mg	Cr	Ti
5A30	≤ 0.4	0.5 ~	4.7 ~	0.1 ~	0.08 ~
		1.0	5.5	0.2	0.15
Welding wire	≤ 0.4	0.5 ~	4.7 ~	0.1 ~	0.1 ~
		1.0	5.5	0.2	0.2

表 3 焊缝几何尺寸统计平均值

Table 3 Statistical arithmetic mean of weld geometrical dimensions

Type of join	$t/$ mm	$h/$ mm	$B/$ mm	$r/$ mm	$\theta/$ ($^{\circ}$)
Single welded butt joint (face of weld)	4	1.35	10.80	2.40	155.7
Single welded butt joint (rear of weld)	4	1.20	4.50	1.00	155.2
Double welded butt joint with GWR	4	1.87	10.45	1.03	144.1
Double welded butt joint with EWR	4	3.61	10.78	0.63	124.0

X 射线探伤检验。除双面焊正常余高焊缝个别试样有缺陷外, 其他试样均无缺陷。

2 实验及结果

2.1 疲劳实验及结果

疲劳实验在 20 kN 高频万能疲劳试验机上进行, 实验环境为室温空气, 加载方式为轴向加载, 控制方式为载荷控制, 载荷波形为正弦波。应力比 $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0.1$, 加载频率 $f = 110 \sim 120$ Hz。实验采用成组的方法, 每组接头选用 4 个应力水平, 每级应力水平下, 分别取 6~10 个试样。5A30 铝合金母材及其对接接头轴向疲劳实验参数、试样数量及实验结果列于表 4。根据疲劳实验结果, 拟合出 5A30 铝合金母材及其 4 种不同焊缝特征焊接接头存活率为 50% 时的 $S-N$ 曲线, 见图 3。

从表 4 数据及图 3 可以看出, 随着实验应力的增大, 5A30 铝合金母材及其焊接接头的疲劳寿命均明显降低; 5A30 铝合金母材在循环次数为 $9.7 \times$

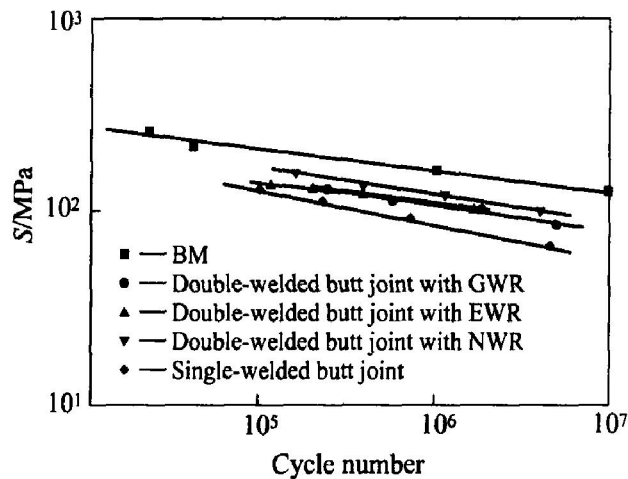


图 3 5A30 合金及其焊接接头的疲劳曲线
Fig. 3 Fatigue curves of 5A30 BM and welded joints

表 4 5A30 合金母材及其对接接头疲劳实验参数及结果

Table 4 Fatigue testing parameters and results of BM and its welded joints

Type of specimen	Number of specimen	Stress/MPa	Fatigue life/Cycle	Frequency/Hz
BM	6	125	9.72×10^6	16.7
	6	160	1.02×10^6	
	9	220	0.042×10^6	
	10	260	0.024×10^6	
Single welded butt joints	10	85	4.98×10^6	116 - 119
	10	100	1.88×10^6	
	10	110	0.607×10^6	
Double welded butt joints with GWR	10	130	0.254×10^6	100 - 120
	10	100	1.71×10^6	
	10	120	0.385×10^6	
Double welded butt joints with NWR	10	130	0.203×10^6	116 - 118
	10	135	0.117×10^6	
	10	160	0.162×10^6	
Double welded butt joints with EWR	10	65	4.62×10^6	116 - 119
	10	90	0.73×10^6	
	10	110	0.234×10^6	
	10	130	0.10×10^6	

10^6 时的极限疲劳强度为 125 MPa; 单面焊双面成形接头的疲劳寿命与双面焊正常余高接头基本相当, 在循环次数为 $(1.7 \sim 1.8) \times 10^6$ 时, 疲劳强度约为 100 MPa; 双面焊接头中, 去除余高接头的疲劳寿命明显高于有余高的其他 2 种接头, 其寿命比正常余高接头长约 2~3 倍, 增大余高接头的疲劳寿命显著降低。

对焊接接头疲劳断裂试样的观察发现, 试样几乎全部断于焊趾处。在保持焊缝余高的情况下, 即使焊缝中存在缺陷, 试样仍然是断在焊趾处。

2.2 光弹性应力实验及结果

为了分析焊趾处断裂的原因, 本研究进行了光弹应力分析实验。试样分正常余高和加大余高 2 种, 光弹模型尺寸比实际焊接试样放大 1.5 倍。

光弹应力分析实验在 409-2 光弹仪上进行, 试样宽度 $b = 10$ mm, 实验载荷 $F = 196$ N, 光弹材料应力条纹值每条为 $f_0 = 11$ N/mm。焊接接头拉伸及压缩时应力光图示于图 4。实验测定出正常余

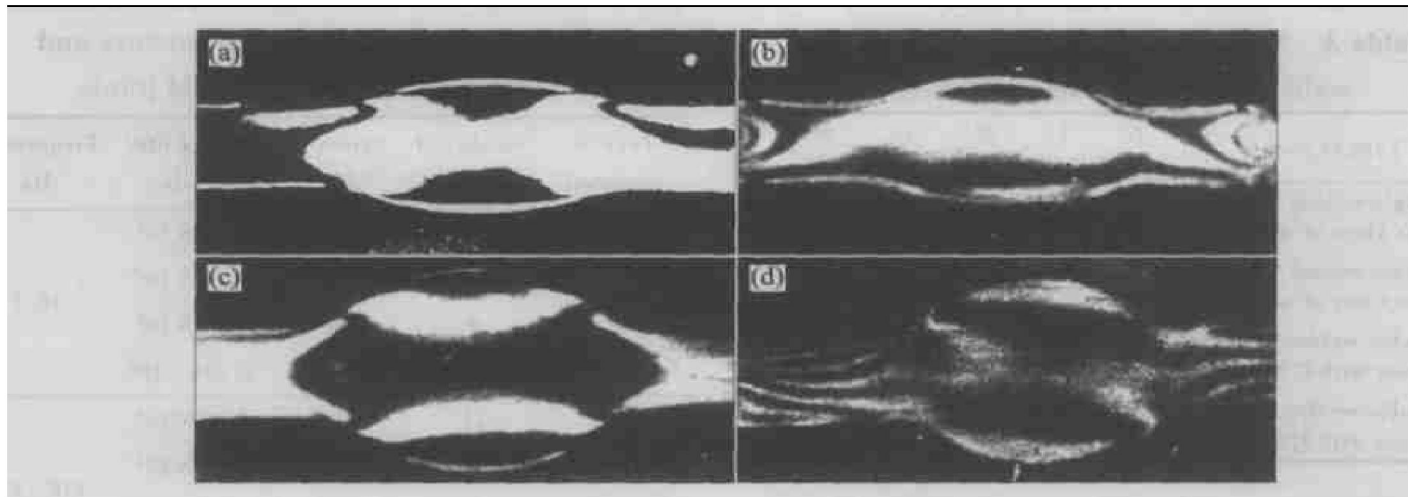


图 4 对接接头拉伸与压缩时应力光图

Fig. 4 Stress optical trajectory of elongated and compressed butt joints

(a) —Elongated joint with GWR; (b) —Compressed joint with GWR;
(c) —Elongated joint with EWR; (d) —Compressed joint with EWR

高接头和增大余高接头模型内最大条纹级数 $N_{\max}$ 分别为 2.75 条、3.20 条, 经计算所得焊趾处应力集中系数值列于表 5。

表 5 铝合金对接接头焊趾处应力集中系数

Table 5 Stress concentration coefficients (K_t) at weld toes of 5A30 aluminum alloy joints

Elongated joint with GWR	Compressed joint with GWR	Elongated joint with EWR	Compressed joint with EWR
1.51	1.51	1.76	1.76

从全场应力条纹随外加载荷增加的走向趋势观察分析, 焊趾处是明显的应力集中区, 因此是最危险的截面。

3 分析与讨论

3.1 理论应力集中系数计算

焊接接头焊趾处的应力集中程度一般受两方面因素的影响: 一是接头的结构因素, 包括接头形式、焊缝外形尺寸和未焊透等; 一是加载方式, 如拉伸载荷和弯曲载荷。文献[13, 14]综合各种因素, 根据有限元计算并结合实验结果进行修正提出焊接接头应力集中系数理论计算公式:

$$K_t = \{1 + f(\theta)[g(r) - 1]\} C(a/t) \quad (1)$$

式中 K_t 为应力集中系数, a 为未焊透长度, $f(\theta)$ 、 $g(r)$ 和 $C(a/t)$ 分别是焊缝过渡角 θ 、焊趾处过渡半径 r 以及未焊透长度 a 对应力集中的影响系数, 分别表示为

$$f(\theta) = \frac{1 - \exp\left[-0.90 \sqrt{W/(2h(\pi - \theta))}\right]}{1 - \exp\left[-0.90 \sqrt{W/(2h(\pi/2))}\right]} \quad (2)$$

$$g(r) = a_t g_t(r) + a_b g_b(r) \quad (3)$$

$$C(a/t) = 1 + 0.64 \frac{(a/t)^2}{2hr/t} - 0.12 \frac{(a/t)^4}{(2hr/t)^2} \quad (4)$$

式(2)中 W 是与接头型式有关的等效长度, 对于对接接头

$$W = t + 2h + 0.6B \quad (5)$$

式(3)中 a_t 、 a_b 是与加载方式有关的参数, 拉伸载荷下, $a_t = 1$, $a_b = 0$; $g_t(r)$ 为与拉伸相关的过渡半径影响系数, $g_b(r)$ 为与弯曲相关的焊趾过渡半径影响系数, 且

$$g_t(r) = 1 + \beta_t \left| (h/r) \frac{1}{2.8(W/t) - 2} \right| \quad (6)$$

对于对接接头, $\beta_t = 2.0$ 。

由于本实验所有焊缝均未发现未焊透, 且加载方式只有拉伸, 所以 $C(a/t) = 1$ 。

将表 3 中的焊缝几何特征尺寸统计平均值代入式(5)、(6)、(2)、(3)、(1), 则可分别计算出不同焊缝几何特征焊接接头的应力集中系数, 计算结果列于表 6。

3.2 单面焊双面成形接头应力集中系数的确定

从表 6 中的应力集中系数计算结果可以看出, 单面焊双面成形对接接头的理论应力集中系数出现两个值。这是由于该接头的焊接面和非焊接面的焊缝外形不对称所致。该类接头的应力集中系数的确

表 6 不同焊接接头的理论应力集中系数计算结果

Table 6 Calculated results of stress concentration coefficients of different joints

Double welded butt joint with EWR	Double welded butt joint with GWR	Single welded butt joint (Face of weld)	Single welded butt joint (Rear of weld)
2. 13	1. 55	1. 23	1. 49

定,可以通过对比来获得,峰值应力大者所对应的理论应力集中系数应作为该类接头的应力集中系数。

假定焊缝外形为一个理想的圆弧,如图 5 所示。由于 BB 截面因非对称引起了偏心,故该截面上在非焊接面一侧的最大名义应力应由拉伸应力 σ_L 和弯曲应力 σ_w 两部分叠加而成。而 AA 截面上的名义应力仅为拉伸应力 σ_L 。

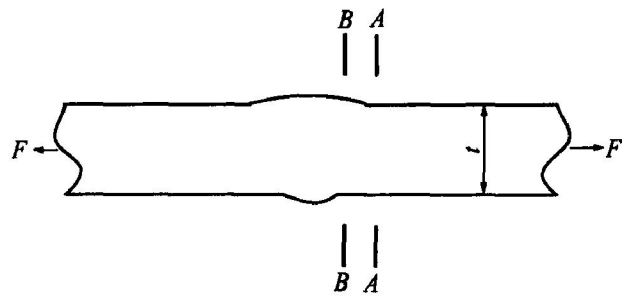


图 5 单面焊双面成型对接接头简化示意图

Fig. 5 Sketch map of butt joint welded by single side

通过受力分析,并将表 3 所测焊缝几何尺寸统计平均值代入,可求得 AA、BB 截面上的名义应力分别为

$$\sigma_{AA} = \frac{1}{60} F$$
$$\sigma_{BB} = \frac{1}{33.5} F$$

式中 F 为拉伸载荷。考虑到应力集中的影响,则 AA、BB 截面上的最大应力分别为

$$(\sigma_{AA})_{\max} = K_t \sigma_{AA} = 1.23 \times \frac{1}{60} F = \frac{1}{48.8} F$$
$$(\sigma_{BB})_{\max} = K_t \sigma_{BB} = 1.49 \times \frac{1}{33.5} F = \frac{1}{22.5} F$$

可见, $(\sigma_{AA})_{\max} < (\sigma_{BB})_{\max}$ 。

尽管上述计算过程中作了焊缝外轮廓为理想圆弧的假设,可能引入一定的误差,但作为定性分析,仍是有意义的。

上述计算结果显示,单面焊双面成型对接接头在承受拉伸载荷条件下,其在非焊接面过渡处对应的理论应力集中系数应作为该类接头的实际应力集

中系数,本实验结果为 1.49。

3.3 焊缝几何特征对对接接头疲劳性能的影响

对比表 5 中光弹性应力分析实验结果和表 6 的理论计算结果可以发现,双面焊正常余高和增大余高焊缝焊趾处的实验应力集中系数与理论计算系数存在一定的偏差,尤其是增大焊缝余高时。分析认为,这是由于实验采用的焊缝形状与理论计算采用的数学模型存在一定的偏差所致。无论是实验测定结果,还是理论计算结果均表明,焊缝余高的存在使得焊趾处出现明显的应力集中。

从表 5 中的数据可见,焊缝正常余高对接接头焊趾处应力集中系数高达 1.51(表 6 中理论计算为 1.55),即此处应力值比其他地方高约 50%。随着余高的增大,焊趾处应力集中系数也进一步增高。实验增大焊缝余高接头的应力集中系数达 1.67(理论计算则达 2.13)。

文献[15]采用 X 射线对焊接接头进行残余应力测定的结果显示,在垂直于焊缝方向的残余应力水平达 70~80MPa,如果此应力值与焊趾处的局部应力集中叠加,则接近或达到材料的屈服强度,再加上焊接热循环在焊趾处产生的局部软化效应,必将使焊趾处成为焊接接头的最薄弱区,从而成为疲劳破坏的策源地。

5A30 铝合金不同焊缝余高焊接接头常规力学性能测定结果表明,焊缝有无余高,焊接接头的屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 值仅相差 10~15 MPa,增大焊缝余高, $\sigma_{0.2}$ 值不会继续增大,因此,根据研究及多年的实践,铝合金焊缝余高一般控制在 1~2 mm 较为适宜。否则,增大余高虽然可以有限地提高焊接接头的静载强度及承受静载荷的能力,却因引起应力集中,大大降低了焊接接头的疲劳性能。

焊接接头疲劳实验的结果还显示,即使焊缝中存在一定的焊接缺陷,焊缝几何特征的影响依然是主要的。因此,制定合理的焊接工艺,获取理想的焊缝成形,对于有效提高焊接接头的疲劳性能极为重要。

4 结论

1) 5A30 铝合金母材及其焊接接头的疲劳寿命均随实验应力的增大而明显降低;5A30 铝合金母材在循环次数为 9.7×10^6 时的极限疲劳强度为 125 MPa;单面焊双面成型接头的疲劳寿命与双面

焊正常余高接头基本相当, 在 $(1.7 \sim 1.8) \times 10^6$ 循环次数时, 疲劳强度约为 100 MPa; 去除余高接头的疲劳寿命明显高于有余高的其他接头, 其寿命比正常余高接头长 2~3 倍, 增大余高接头的疲劳寿命显著降低。

2) 实验及理论计算均表明, 铝合金焊缝余高的存在, 可使焊接接头焊趾处在轴向应力作用下的应力集中系数明显提高。厚度为 4 mm 的对接接头, 焊缝余高为 1~2 mm 时, 焊趾处的应力较其他部位可提高 50% 左右。增大焊缝余高, 应力集中系数进一步增大。

REFERENCES

- [1] Maddox S J. Review of fatigue assessment procedures for welded aluminum structures [J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25: 1359 - 1378.
- [2] Maurice L S, Glenn E N, Craig C M. Fatigue Design of Aluminum Component and Structure [M]. The McGraw-Hill Com, 1996.
- [3] Pinho da Cruz J A M, Ferreira J A M, Costa J D M, et al. Fatigue analysis of thin AlMgSi welded joints under constant and variable amplitude block loadings [J]. *Thin-Walled Structures*, 2003, 41: 389 - 402.
- [4] Eibl M, Sonsino C M, Kaufmann H, et al. Fatigue assessment of laser welded thin sheet aluminium [J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25: 719 - 731.
- [5] 王东坡, 霍立兴, 张玉凤, 等. 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 Li-xing, ZHANG Yu-feng, et al. Fatigue properties improvement of welded joints for LF21 aluminum alloy by ultrasonic peening method[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2001, 11(5): 754 - 759.
- [6] Seto A, Soya I. Fatigue strength of welded joints with weld metal of low elastic modulus [J]. *Welding in the World*, 1996, 37(2): 47 - 54.
- [7] 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(2): 72 - 83.
- [8] Gnell T R. 焊接结构的疲劳[M]. 周殿群译. 北京: 机械工业出版社, 1988. 90 - 101.
Gnell T R. *Fatigue of Welded Structures*[M]. ZHOU Dian-qun transl. Beijing: China Machine Press, 1998. 90 - 101.
- [9] HUO Li-xing, WANG Dong-po, ZHANG Yu-feng, 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.
- [10] Janosch J J, Debiez S. Influence of the shape of undercut on the fatigue strength of fillet welded assemblies - application of the local approach [J]. *Welding in the World*, 1998, 41: 350 - 360.
- [11] 霍立兴. 焊接结构的断裂行为及评定[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 88 - 120.
HUO Li-xing. *Fractural Behavior and Assessment of Welded Structures*[M]. Beijing: China Machine Press, 2000. 88 - 120.
- [12] Wohlfahrt H, Witschke-Pagel Th, Zinn W. Improvement of the fatigue strength of welded joints by post-weld treatment methods - a comparison of the results strength structural steels and high strength aluminium alloys [J]. *Welding in the World*, 1996, 38: 307 - 316.
- [13] Osamu U, Eiji N. Stress concentration at welded joints [J]. *Ishikawajima-Harima Engineering Review*, 1983, 23(4): 351 - 355.
- [14] Ushirokawa O. Stress concentration at welded joints^{4/} 2nd report probabilistic approach [J]. *Ishikawajima-Harima Engineering Review*, 1984, 24(2): 98 - 103.
- [15] Polmear I J, Wilkinson D R. Effects of GTA dressing on the fatigue properties of aluminum alloy welded butt jointed and fillet welded plates[J]. *Welding Journal*, 1983, 3: 78s - 81s.

(编辑 龙怀中)