

5A06 铝合金及其焊接接头的疲劳断裂行为

张红霞, 吴广贺, 闫志峰, 裴飞飞, 李晋永, 王文先, 李永莲

(太原理工大学 材料科学与工程学院, 太原 030024)

摘要: 对 5A06 防锈铝合金及其焊接接头疲劳性能断裂行为进行研究, 采用疲劳试验、光学显微镜、扫描电子显微镜等手段对 5A06 铝合金的疲劳性能、金相组织、裂纹扩展特征和疲劳断口进行分析。结果表明: 在循环次数为 2×10^6 时, 铝合金母材、对接接头、横向十字、侧面连接和纵向十字接头的疲劳性能分别为 99.97、70.96、57.48、48.20 和 41.80 MPa; 铝合金母材疲劳裂纹起裂于截面最小部位, 对接接头和横向十字接头裂纹起裂于焊趾等应力集中部位, 裂纹沿着热影响区扩展; 侧面连接接头裂纹起裂于两板连接处应力集中部位, 纵向十字接头裂纹起裂于热影响区; 微观裂纹为沿晶和穿晶混合的扩展特征。对母材及其焊接接头的宏观断口呈暗灰色纤维状, 具有一定的塑性; 接头的微观断口具有准解理特征, 断口中存在球状孔洞、疲劳条纹和韧窝, 并存在二次裂纹。

关键词: 5A06 铝合金; 焊接接头; 疲劳断口; 二次裂纹

中图分类号: TG146.2; TG113.25

文献标志码: A

Fatigue fracture behavior of 5A06 aluminum alloy and its welded joint

ZHANG Hong-xia, WU Guang-he, YAN Zhi-feng, PEI Fei-fei, LI Jin-yong, WANG Wen-xian, LI Yong-lian

(College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Fatigue testing fracture behavior was researched on 5A06 antirust aluminum alloy and its welded joints. The fatigue properties, microstructure, fatigue crack propagation character and fatigue fracture were investigated by fatigue test, optical microscopy (OM) and scanning electronic microscopy (SEM). Under cycle times of 2×10^6 , the fatigue strengths of base metal (BM), butt joint (BJ), transverse cross joint (TJ), lateral connection joint (LJ) and longitudinal cross joint(LCJ) are 99.97, 70.96, 57.48, 48.20 and 41.80 MPa, respectively. The fatigue crack initiation site is in the smallest section for base metal, the crack initiation is in the weld toe and the crack propagates along the HAZ for the BJ and TJ, the crack initiation is in the fillet weld leg for the LJ, the crack initiation is in HAZ for the LCJ, the micro-crack propagates for transgranular and intergranular. The fatigue macro-fracture shows a dark gray fibrous fracture patterns and has some plasticity, the micro-fracture surface consists of quasi-cleavage patterns, spherical hole, fatigue striation and dimple, and numerous secondary cracks are observed.

Key words: 5A06 aluminum alloy; welded joint; fatigue fracture; secondary crack

5A06 铝合金是 Al-Mg 系防锈铝, 具有较高的强度、良好的腐蚀稳定性和焊接性等特点^[1], 在高强度的轻型结构中得到广泛应用, 用其代替钢铁材料, 可大大减轻构件的质量, 是节能、环保的最佳备选材料。目前, 铝合金焊接结构广泛应用于航空航天^[2-3]、汽车、

轨道客车等交通运输工具以及相关的技术领域, 这些结构离不开焊接技术的支持, 并且都承受疲劳载荷的作用。

疲劳断裂是金属结构尤其是焊接结构失效的一种主要形式。在焊接结构的失效中, 因交变载荷引起的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175364)

收稿日期: 2012-03-29; 修订日期: 2012-09-10

通信作者: 李永莲, 高级实验师; 电话: 0351-6010076; E-mail: liyonglian0916@yahoo.com.cn

疲劳断裂事故占机械结构失效总数的 80%~90%^[4-5], 一旦发生疲劳破坏事故, 往往给人们的生命财产带来灾难性的损失。随着科技的发展, 人们对金属材料的性能要求变得更高, 使得材料的疲劳性能研究变得尤为重要^[6]。

目前, 国内外对于铝合金的研究主要集中在先进焊接方法研究^[7-8]、铝合金疲劳性能^[9-10]、铝合金疲劳行为^[11-12]和裂纹扩展速率^[13]等方面; 研究发现影响铝合金及其焊接接头疲劳性能的因素有: 微观组织^[14]、焊缝几何特征^[4]、焊接参数^[15]、机械处理方法^[16]和焊接残余应力^[17]等。这些研究主要分析了铝合金及其对接接头的疲劳性能和相关的影响因素, 而针对 5A06 防锈铝合金不同焊接接头疲劳断裂行为的研究涉足较少。由于防锈铝合金结构件的结构形式多样, 并且多用于循环载荷加载的情况下, 因此, 研究动载荷作用下铝合金及其焊接接头的疲劳断裂行为具有的理论价值和现实意义。

本文作者对 5A06 防锈铝合金母材及其对接、横向十字、侧面连接和纵向十字接头形式的焊接接头进行疲劳试验, 并分析母材及其接头的疲劳性能、裂纹启裂部位及扩展特征, 对疲劳断裂机理进行初步探讨。

1 实验

1.1 试验材料

试验采用 10 mm 厚的挤压成型 5A06 H112 铝合金板, 焊接材料选用直径 3.2 mm 的 ER5356 焊丝, 其化学成分见表 1, 室温力学性能见表 2。

1.2 焊接工艺

铝合金焊接接头均采用手工 TIG 焊进行焊接, 焊接设备为联合汇力的 300GP 型 AC/DC TIG 电焊机。焊丝在焊前用砂纸打磨, 去除表面氧化膜, 焊接工艺参数如表 3 所示。

表 1 5A06 铝合金和 ER5356 焊丝化学成分
Table 1 Chemical compositions of 5A06 and ER5356 (mass fraction, %)

Alloy	Mg	Mn	Zn	Fe	Si
5A06	6.0	0.70	0.20	0.40	0.40
ER5356	5.44	0.147	0.011	0.151	0.064
Alloy	Cu	Ti	Be	Others	
5A06	0.10	0.03	0.000 2	0.10	
ER5356	0.007 9	0.129		0.102	

表 2 5A06 铝合金和 ER5356 板材室温力学性能
Table 2 Mechanical properties of 5A06 and ER5356 at room temperature

Alloy	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation/%
5A06	220~250	110~250	7~8
ER5356	230	180	8

表 3 焊接工艺参数
Table 3 Welding process parameters

Joint type	Welding current, I/A	Welding voltage, U/V	Welding speed, v/(mm·s ⁻¹)
BJ	170~180	12~15	2.8~3.0
TJ	170~180	12~15	2.4~2.9
LJ	180~190	12~15	2.4~2.9
LCJ	170~180	12~15	2.5~2.9

1.3 试验过程

铝合金母材的疲劳试样经机械加工直接成型; 对接接头和横向十字接头试样先焊接然后再机械加工成型, 侧面连接和纵向十字接头试样先机械加工成型后进行焊接。铝合金母材及焊接接头的试样形状和尺寸如图 1 所示。

1.4 试验设备

本试验使用 PLG-200D 数字化高频拉压疲劳试验机进行试验, 室温条件下进行, 最大交变负荷为 100 kN, 静负荷示值相对误差≤±1%, 交变负荷波动度为 0.5%FS, 平均负荷波动度为 0.5%FS。采用的载荷类型为拉-拉载荷, 加载频率 $f=111\sim116$ Hz, 应力比 $r=0$ 。

2 结果与分析

2.1 显微组织观察

采用光学显微镜对 5A06 铝合金及其焊接接头进行金相组织分析。图 2 所示为母材横截面的金相分析结果。由图 2 可发现材料晶粒为混晶组织, 在晶内和晶界有析出物存在。

图 3(a)所示为对接接头焊缝中心金相照片, 图 3(b)所示为焊缝热影响区金相照片。由图 3 可以看出, 焊缝及其热影响区在冷却时晶界上均有析出相产生, 且由于焊接加热过程中热作用的影响, 焊接热影响区组织比较粗大, 并且晶粒大小不均匀。

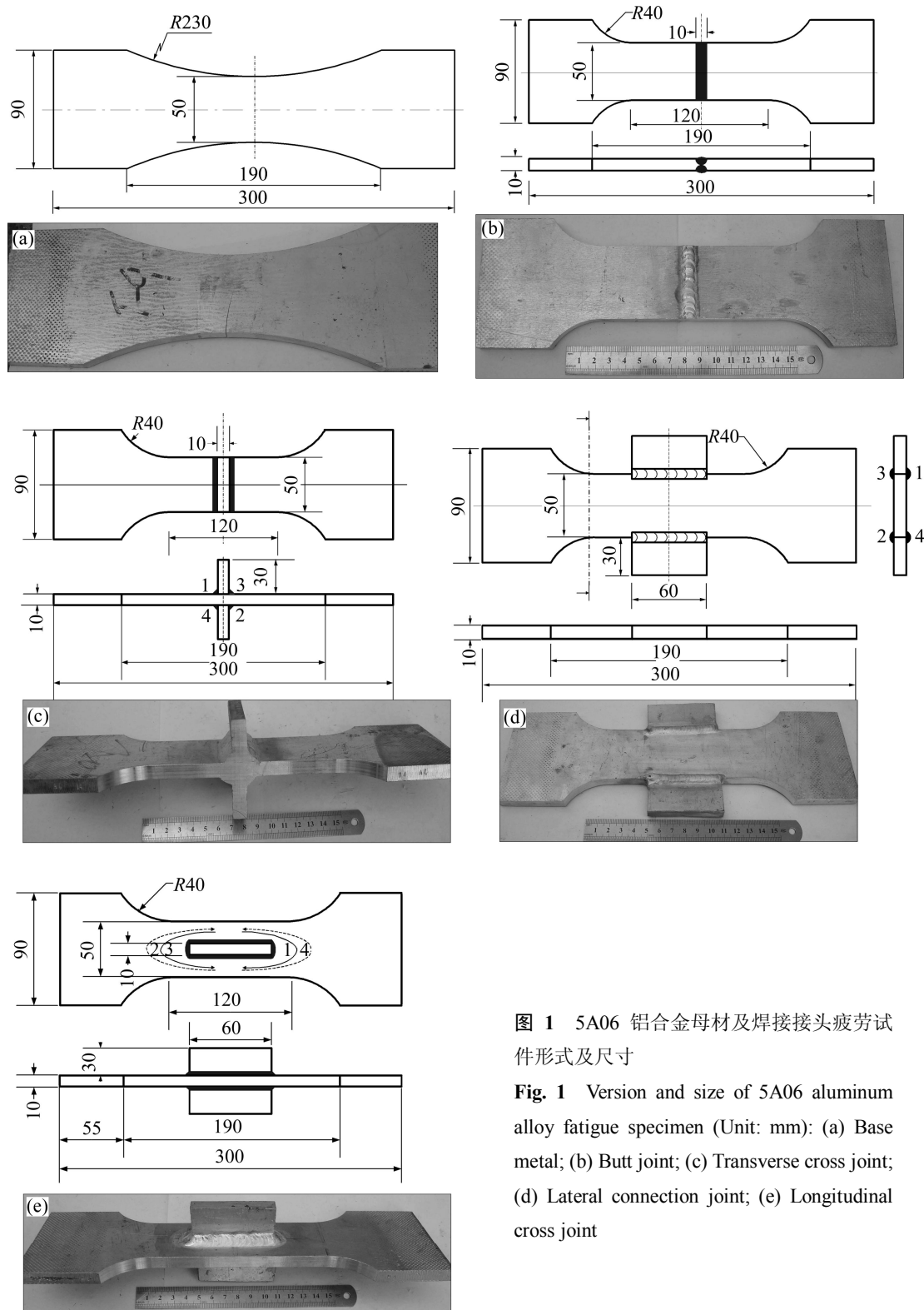


图 1 5A06 铝合金母材及焊接接头疲劳试件形式及尺寸

Fig. 1 Version and size of 5A06 aluminum alloy fatigue specimen (Unit: mm): (a) Base metal; (b) Butt joint; (c) Transverse cross joint; (d) Lateral connection joint; (e) Longitudinal cross joint

2.2 疲劳试验结果

疲劳强度与循环次数之间的关系, 即疲劳 $S-N$ 曲线以指数形式表示为

$$S^m N = C \quad (1)$$

以对数形式表示为

$$\lg N = \lg C - m \lg S \quad (2)$$

式中: S 为疲劳强度, 在本实验中用应力范围 $\Delta\sigma$ 表示; N 为循环次数; m 和 C 为拟合的常数。对疲劳数据可用最小二乘法拟合得出上述表达式, 并求出 $N=2 \times 10^6$ 循环次数下相应的疲劳强度和不同应力水平下

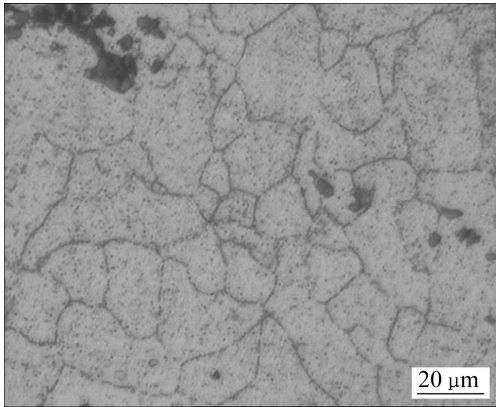


图 2 5A06 铝合金母材金相组织

Fig. 2 Metallograph of 5A06 base metal

的疲劳寿命，然后进行比较分析。

5A06 铝合金母材及焊接接头的疲劳试验结果见表 4。由表 4 可知，母材试样 1~6 疲劳断裂部位均在试件中部标段内，试样 8~9 经过 5×10^6 次循环后未发生断裂；4 种焊接接头试样 1~7 疲劳断裂部位为焊趾部位，试样 8~9 经过 5×10^6 次循环后未发生疲劳断裂。

根据表 4 的疲劳数据绘出 5A06 铝合金母材及其焊接接头的名义应力中值 $S-N$ 曲线，如图 4 所示，其曲线参数见表 5。由图 4 中可知，对应于 50% 存活率母材的疲劳强度为 99.79 MPa，对接接头、横向十字接头、侧面连接接头和纵向十字接头的疲劳强度分别为 70.96、57.48、48.20 和 41.80 MPa，焊接接头的疲劳性能低于母材的。

由表 5 和图 4 的 $S-N$ 曲线可以看出，铝合金焊接接头的疲劳性能依赖其接头型式，不同焊接接头型式疲劳性能差别较大，对接接头疲劳性能为母材的

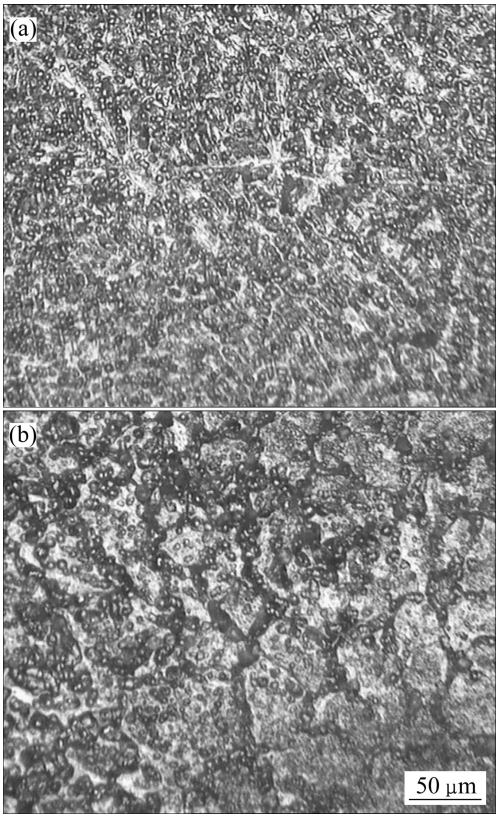


图 3 铝合金对接接头金相组织

Fig. 3 Metallographs of 5A06 aluminum alloy butt joint: (a) Weld center; (b) HAZ

71.1%，横向十字接头、侧面连接接头和纵向十字接头的疲劳强度分别为母材的 57.6%、48.3%和 41.9%。造成这种结果的原因是由于焊接接头中存在应力集中和焊接残余应力，不同接头形式的应力集中程度不同，最终导致不同接头形式的疲劳性能差别较大。

表 4 5A06 铝合金疲劳及其接头的试验结果

Table 4 Fatigue test results of 5A06 aluminum alloy and its welded joints

Sample No.	Nominal stress range, $\Delta\sigma_{\text{nom}}$ /MPa					Cycle number/ 10^6					Disabled position	
	Base metal	BJ	TJ	LJ	LCJ	Base metal	BJ	TJ	LJ	LCJ	Base metal	Welded joint
1	120	90	80	75	80	0.635	0.392	0.311	0.582	0.192	In gage length	Weld toe
2	115	85	75	70	70	1.177	0.652	0.339	0.687	0.410	In gage length	Weld toe
3	110	80	70	65	65	0.682	1.032	0.685	0.545	0.359	In gage length	Weld toe
4	105	75	65	60	60	1.050	3.078	0.733	0.735	0.594	In gage length	Weld toe
5	100	70	60	55	55	1.958	1.576	0.899	0.848	0.570	In gage length	Weld toe
6	90	65	55	50	50	2.958	2.043	2.389	1.589	0.605	In gage length	Weld toe
7				45	45				2.132	1.198	In gage length	Weld toe
8	95	60	50	40	40	5.104	5.000	7.511	5.000	1.584	Unfaulted	Unfaulted
9	85				35	5.038				5.300	Unfaulted	Unfaulted

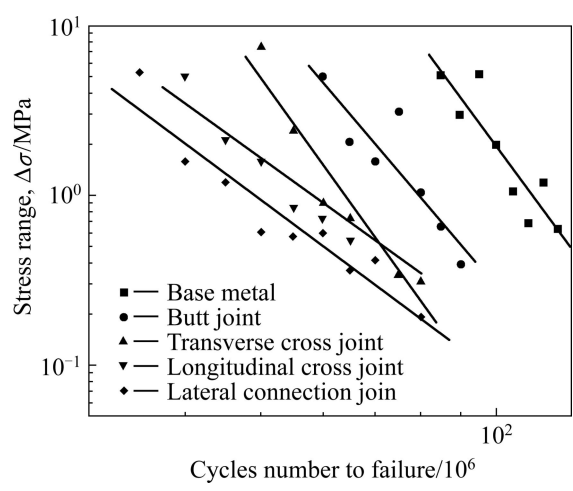


图 4 铝合金 5A06 焊接接头的 $S-N$ 曲线

Fig. 4 $S-N$ curves of 5A06 Al alloy and its welded joints

表 5 5A06 铝合金焊接接头名义应力 $S-N$ 曲线参数

Table 5 Parameters of $S-N$ curves for 5A06 aluminum alloy and its welded joints

Joint type	Material constant, m		Material constant, C_m	Fatigue stress range, $\Delta\sigma_m/\text{MPa}$	Correlation coefficient, r
	Result	Deviation			
Base metal	7.69	0.17	4.78×10^{21}	99.97	0.901
BJ	6.78	0.19	7.01×10^{18}	70.96	0.895
TJ	6.96	0.15	3.52×10^{18}	57.48	0.958
LJ	3.78	0.14	4.60×10^{12}	48.20	0.953
LCJ	3.77	0.13	2.45×10^{12}	41.80	0.937

2.3 裂纹起裂和扩展特征

2.3.1 宏观裂纹起裂和扩展特征

对 5A06 铝合金母材及其焊接接头的疲劳起裂位置进行分析, 结果如图 5 所示。

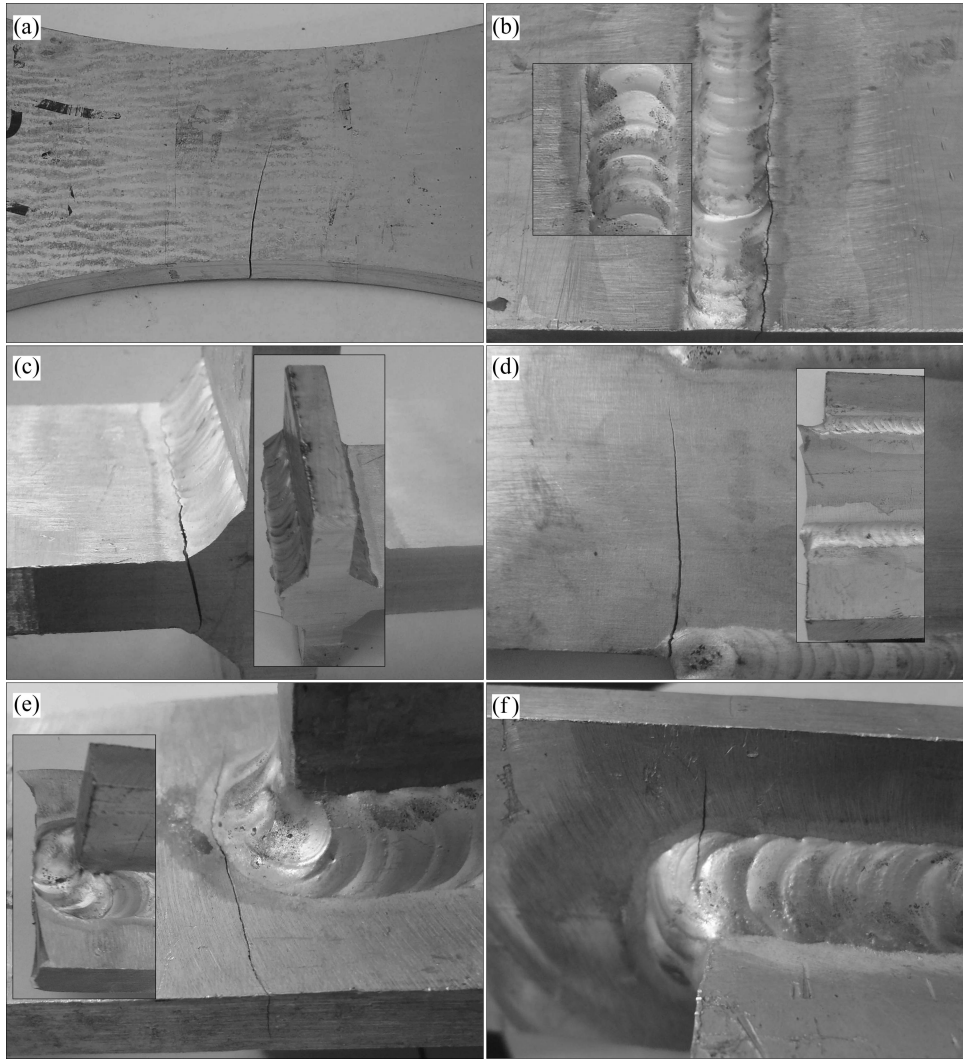


图 5 铝合金及其焊接接头疲劳断裂位置

Fig. 5 Fatigue fracture position of aluminum alloy and its welded joint: (a) Base metal; (b) Butt joint; (c) Transverse cross joint; (d) Lateral connection joint; (e), (f) Longitudinal cross joint

图 5(a)所示为母材疲劳试验后疲劳裂纹的产生部位照片,由图 5(a)可以发现,母材起裂于疲劳试件的最小截面部位,然后沿垂直于载荷的方向扩展。图 5(b)所示为对接接头裂纹起裂位置,图 5(c)所示为横向十字接头裂纹起裂位置,可以发现两种接头裂纹均沿焊趾部位起裂,裂纹在试件表面均沿熔合线方向扩展,在横截面沿着热影响区扩展;对接接头焊缝有的裂纹起裂于试件中间热影响区部位;图 5(d)所示为侧面连接接头裂纹起裂位置,裂纹启裂于两试板连接处的应力集中部位,并沿垂直于载荷的方向扩展;图 5(e)和(f)所示为纵向十字接头裂纹的起裂部位和扩展方向,裂纹起裂于热影响区部位,沿着垂直于载荷方向扩展。

2.3.2 微观裂纹扩展特征

对 5A06 铝合金母材及其对接接头的疲劳裂纹微观扩展特征进行分析,其结果如图 6 和 7 所示。

图 6(a)所示为母材疲劳裂纹扩展微观照片,图 6(b)所示为疲劳裂纹尖端扩展特征,图 6(c)所示为图 6(b)中局部的放大照片,可以发现裂纹宏观观察时为平滑扩展,但在微观下疲劳裂纹扩展曲曲弯弯,在裂纹的扩展过程中沿着与主裂纹不同方向有二次裂纹,但这些二次裂纹扩展的距离比较短,主裂纹以垂直于载荷的方向扩展;裂纹扩展为沿晶和穿晶的混合特征。

图 7 所示为对接接头裂纹扩展照片,可以发现疲劳裂纹沿着焊缝生长方向扩展,呈弯曲的扩展特征。

材料中夹杂物或第二相粒子的存在能够阻碍裂纹的扩展,改变裂纹的扩展途径,增加了裂纹扩展的曲折度从而阻碍裂纹的扩展^[6]。

2.4 断口分析

2.4.1 宏观断口分析

铝合金母材及其焊接接头的宏观断口如图 8 所示。图 8(a)和(b)所示为对接接头宏观断口,裂纹起裂于焊缝热影响区(图 8(a))或板材横断面棱角部位(图 8(b)),裂纹扩展为弧形扩展特征;图 8(c)和(d)所示为侧面连接接头的宏观断口,裂纹起源于主板和侧板连接的焊接接头应力集中部位或者焊接缺陷部位,然后呈弧形扩展;图 8(e)所示为纵向十字接头的宏观断口,可以发现裂纹起裂于承载板与非承载板相连的焊缝热影响区部位,然后沿着垂直于载荷方向扩展。由图 8 可以发现,铝合金断口呈暗灰色纤维状,宏观断口具有一定的塑性特征。

2.4.2 微观断口分析

对铝合金焊接接头的疲劳断口进行 SEM 电镜扫描观察,结果如图 9 所示。

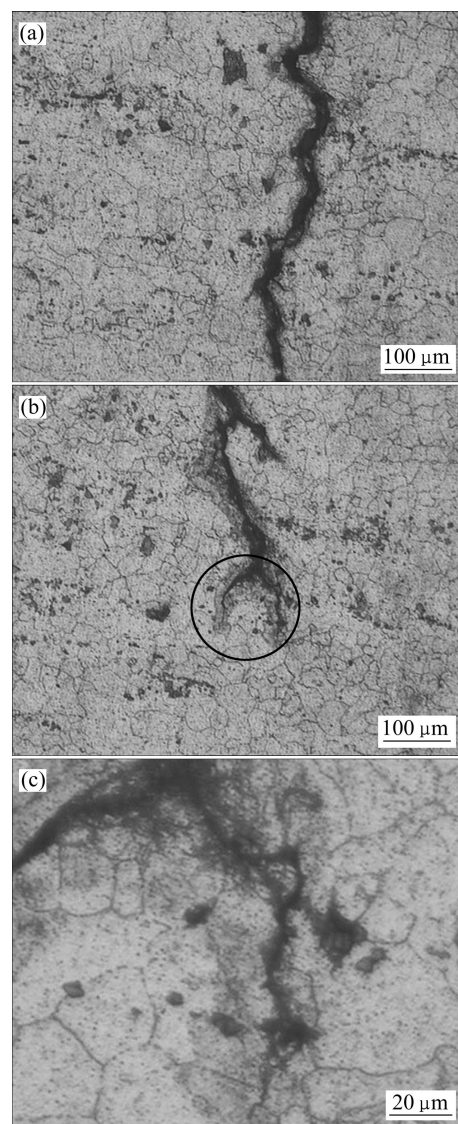


图 6 铝合金疲劳裂纹扩展微观照片

Fig. 6 Microstructure showing fatigue crack propagation of aluminum alloy: (a) Crack; (b) Crack tip; (c) Partially enlarged image of Fig. 6(b)

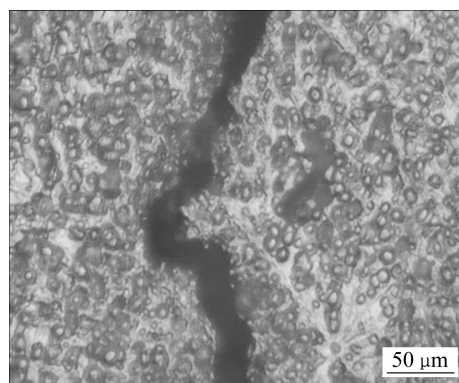


图 7 铝合金对接接头疲劳裂纹扩展微观照片

Fig. 7 Microstructure showing fatigue crack propagation of aluminum alloy butt joint

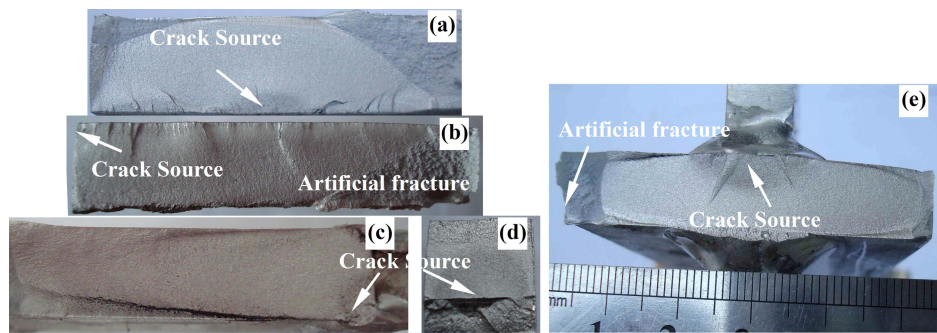


图 8 铝合金焊接接头疲劳断口宏观形貌

Fig. 8 Macrostructure of fatigue fractures of aluminum alloy welding joint: (a) Butt joint; (b) Transverse cross joint; (c), (d) Lateral connection joint; (e) Longitudinal cross joint

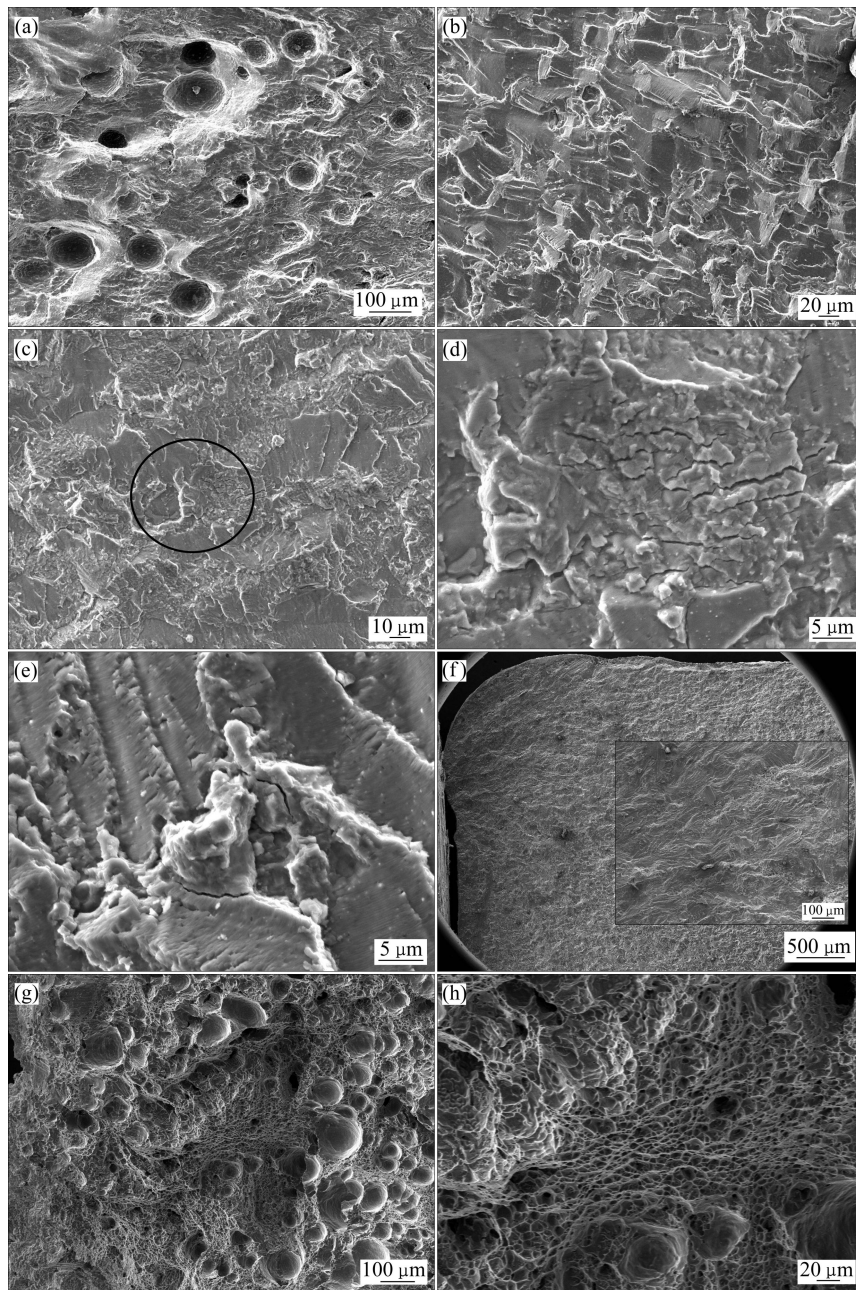


图 9 铝合金焊接接头的疲劳断口 SEM 像

Fig. 9 SEM images of fatigue fracture sections of aluminum alloy joints: (a) Butt joint; (b), (c), (d), (e) Transverse cross joint; (f) Lateral connection joint; (g), (h) Longitudinal cross joint

图 9(a)所示为对接接头疲劳断口,断口中存在较多的球状孔洞,其孔洞周围分布着疲劳变形过程中留下的龟裂组织,少量孔洞中存在着夹杂相,断口为解理特征断口。图 9(b)~(e)所示为横向十字接头的疲劳断口,由图 9(b)中可以看出,断口上存在解理台阶。由图 9(d)可以看出,断口中存在二次裂纹,在循环应力加载过程中,产生许多尺寸较小的二次裂纹,在最终的疲劳断口上体现为龟裂形貌。图 9(e)所示的断口中发现在裂纹扩展区中存在疲劳条纹,条纹基本上垂直于裂纹扩展方向,它的出现是疲劳裂纹稳定扩展的重要特征;另外,断口中还存在少量二次裂纹。图 9(f)所示为侧面连接接头的微观疲劳断口,可以发现裂纹起源于材料棱角部位;由图中可以看出,疲劳裂纹萌生后,由源区出发向前扩展的裂纹,由于裂纹前沿的阻力不同,而发生扩展方向上的偏离,此后裂纹开始在各自的平面上继续扩展,不同的断裂面相交而形成台阶,这些台阶在断口上构成了放射状。图 9(g)和(h)所示为纵向十字接头微观断口,对其放大后发现,断口由细小的韧窝组成,铝合金焊接接头在外部拉应力的作用下,材料在微区范围内塑性变形产生的显微空洞,经形核、长大、聚集,最后相互连接导致断裂后在断口表面形成韧窝。断口中存在许多球状孔洞。

由以上分析可以发现,铝合金焊接接头的断口具有准解理断裂的特征,断口中存在球状孔洞、疲劳条纹、韧窝,并有二次裂纹存在。

3 结论

1) 5A06 铝合金母材及其焊接接头的疲劳试验结果为母材的疲劳强度为 99.97 MPa;对接接头、横向十字接头、侧面连接接头和纵向十字接头的疲劳强度分别为 70.96、57.48、48.20 和 41.80 MPa。

2) 5A06 铝合金母材疲劳试验裂纹起裂部位为段标内截面最小部位,对接接头和横向十字接头裂纹起裂于焊趾部位,侧面连接接头裂纹起裂于两板连接处的应力集中部位,纵向十字接头裂纹起裂于热影响区部位,微观裂纹扩展过程为沿晶和穿晶混合特征。

3) 铝合金的疲劳断口中存在球状孔洞、疲劳条纹、韧窝和二次裂纹,具有准解理断裂的特征。

REFERENCES

[1] 彭 非, 楚 浩, 杨 兵. 5A06 铝合金油箱氩弧焊热影响区裂纹分析及预防措施[J]. 电焊机, 2007, 37(7): 34-37.

PENG Fei, CHU Hao, YANG Bing. Analysis and preventive of fracture in 5A06 aluminium alloy fuel tank with manual TIG welding technology[J]. Electric Welding Machine, 2007, 37(7): 34-37.

[2] 周万盛, 姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 3-4.

ZHOU Wan-sheng, YAO Jun-shan. Welding of aluminum and aluminum alloy[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 3-4.

[3] ZHAO Tian-wen, JIANG Yan-yao. Fatigue of 7075-T651 aluminum alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30: 834-849.

[4] 李敬勇, 李标峰, 冯刚宪. 焊缝几何特征对 5A30 铝合金焊接接头疲劳性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(11): 1895-1900.

LI Jing-yong, LI Biao-feng, FENG Gang-xian. Effect of weld geometrical features on fatigue properties of 5A30 aluminum alloy welded joints[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(11): 1895-1900.

[5] 方洪渊. 焊接结构学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 217.

FANG Hong-yuan. Welded structure[M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 217.

[6] 王 燕, 黄 晖, 高坤元, 文胜平, 张萍萍, 聂祚仁. 冷轧 5E06 和 5E83 铝合金板的疲劳断裂行为研究[J]. 稀有金属, 2011, 35(6): 791-798.

WANG Yan, HUANG Hui, GAO Kun-yuan, WEN Sheng-ping, ZHANG Ping-ping, NIE Zuo-ren. Fatigue fracture behavior of cold rolled 5E06 and 5E83 aluminum alloy plate[J]. Chinese Journal of Rare Metal, 2011, 35(6): 791-798.

[7] CHEN Yan-bin, MIAO Yu-gang, LI Li-qun, WU Lin. Joint performance of laser-TIG double-side welded 5A06 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(1): 26-31.

[8] 汪兴均, 黄文荣, 魏齐龙, 沈显峰. 电子束焊接 5A06 铝合金接头 Mg 元素蒸发烧损行为分析[J]. 焊接学报, 2006, 27(11): 61-64.

WANG Xing-jun, HUANG Wen-rong, WEI Qi-long, SHEN Xian-feng. Evaporation loss of Mg element in 5A06 aluminium alloy electron beam welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(11): 61-64.

[9] 杜凤山, 闫 亮, 戴圣龙, 杨守杰. 高强铝合金疲劳特性研究[J]. 航空材料学报, 2009, 29(1): 96-100.

DU Feng-shan, YAN Liang, DAI Sheng-long, YANG Shou-jie. Study on fatigue performance of high strength aluminum alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 29(1): 96-100.

[10] 吴 华. 5A06 铝合金焊接接头的疲劳性能[J]. 热处理技术与焊接装备, 2011, 32(2): 22-25.

WU Hua. The fatigue property of 5A06 aluminum alloy welding joint[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2011, 32(2): 22-25.

[11] UENO A, MIYAKAWA S, YAMADA K, SUGIYAMA T.

- Fatigue behavior of die casting aluminum alloys in air and vacuum[J]. *Procedia Engineering*, 2009, 2: 1937–1943.
- [12] LEE E U, TAYLOR R E. Fatigue behavior of aluminum alloys under biaxial loading[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, 78: 1555–1564.
- [13] CHEN Jun-zhou, ZHEN Liang, YANG Shou-jie, DAI Sheng-long. Effects of precipitates on fatigue crack growth rate of AA 7055 aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 20(5): 2209–2214.
- [14] 闫 亮, 杜凤山, 戴圣龙, 杨守杰. 微观组织对 2E12 铝合金疲劳裂纹扩展的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(7): 1275–1281.
- YAN Liang, DU Feng-shan, DAI Sheng-long, YANG Shou-jie. Effect of microstructures on fatigue crack propagation in 2E12 aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(7): 1275–1281.
- [15] MALARVIZHI S, BALASUBRAMANIAN V. Effect of welding processes on AA2219 aluminium alloy joint properties[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(5): 962–973.
- [16] 李占明, 朱有利, 辛 毅. 超声冲击处理对 2A12 铝合金焊接接头疲劳性能的影响[J]. *航空材料学报*, 2011, 31(2): 28–32.
- LI Zhan-ming, ZHU You-li, XIN Yi. Influence of ultrasonic impact treatment on fatigue properties of 2A12 aluminum alloy welded joints[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2011, 31(2): 28–32.
- [17] LILJEDAHL C D M, BROUARD J, ZANELATO O, LIN J, TAN M L, GANGULY S, IRVING P E, FITZPATRICK M E, ZHANG X, EDWARDS L. Weld residual stress effects on fatigue crack growth behaviour of aluminium alloy 2024-T351[J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31: 1081–1088.

(编辑 龙怀中)