

加载频率及焊接缺陷对 5A06 铝合金 TIG 焊接头超高周疲劳性能的影响

邓彩艳, 王 红, 龚宝明, 王东坡
(天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072)

摘 要: 采用自行研制的 TJU-HJ-I 型超声疲劳试验系统及常规疲劳试验系统对 5A06 铝合金 TIG 焊接头的疲劳性能进行研究. 通过扫描电子显微镜对超声疲劳断口形貌进行观察. 结果表明, 加载频率对 5A06 铝合金 TIG 焊接头的疲劳性能影响不大, 超声疲劳试验结果可以用于表征其机械结构长期使用的安全性. 当焊接接头中气孔作为裂纹源时, 不考虑气孔尺寸, 气孔中心距表面的距离越近, 疲劳寿命越低. 焊接过程导致的焊缝内的夹杂类型为氧化物, 其密度较大, 对疲劳性能产生影响.

关键词: 焊接接头; 超高周疲劳; 缺陷

中图分类号: TG 405 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)12-0061-04

0 序 言

众多试验研究表明, 材料在服役疲劳寿命超过 10^7 周次后疲劳断裂仍会发生^[1-3], 并不存在传统意义上的疲劳极限. 鉴于许多工程结构在低应力水平下需要承受 10^8 甚至超过 10^{10} 的疲劳寿命, 研究材料在超长寿命区间的疲劳性能逐渐得到重视. 然而依靠常规疲劳试验设备进行研究需要消耗大量的时间和成本, 超声疲劳试验的发展使这一问题得到解决. 由于常用工程结构的工作频率在 10 ~ 150 Hz 之间, 用超声疲劳试验方法研究材料疲劳性能时, 确定频率是否对其产生影响是十分必要的.

近年来铝及铝合金以其一系列的优点在航空航天以及汽车等领域得到广泛应用. 但由于其化学性质活泼, 易于氧化, 且导热性强, 其焊接存在较大困难. 铝合金熔焊接头内部不可避免的存在各种缺陷, 如气孔, 夹渣等, 导致其疲劳性能的降低^[4]. 现有的关于铝合金超长寿命区间疲劳性能的研究多集中于母材, 而焊接结构代替铆接工序在航空航天以及高速列车领域的研究应用使得焊接结构超高周疲劳性能的研究成为设计的重点. 文中采用超声疲劳试验系统及常规疲劳试验系统对铝合金 TIG 焊接头的疲劳性能进行研究, 以得到频率及焊接缺陷对其疲劳性能的影响.

1 两种类型疲劳试验过程

1.1 试件制备

所用试验材料为 5A06 铝合金, 其力学性能和化学成分见表 1 和表 2. 焊接方法为钨极氩弧焊, 焊接工艺参数见表 3. 填充材料为 5A06 常用的 ER5356 焊丝.

表 1 5A06 铝合金的力学性能
Table 1 Mechanical properties of 5A06 Aluminum alloy

密度	屈服强度	抗拉强度	弹性模量
$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	R_{el}/MPa	R_m/MPa	E/GPa
2.7	160	315	72

表 2 5A06 铝合金的化学成分(质量分数, %)
Table 2 Chemical compositions of 5A06 Aluminum alloy

Mg	Mn	Ti	Fe	Si	Zn	Cu	Al
5.8	0.50	0.02	0.4	0.4	0.2	0.1	余量

表 3 焊接工艺参数
Table 3 Welding parameters

填充金属	直流反接 I_N/A	直流正接 I_P/A	频率 f/Hz	占空比 $D(\%)$	氩气流量 $q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$
ER5356	255	320	100	80	15

为避免焊接余高对疲劳性能的影响, 从板厚中间位置取样. 焊缝区域位于试件的中间以保证接头各部位处于同一应力水平. 文中制备试件类型均为

中间等截面圆柱状,超声疲劳试件尺寸设计参照文献[5]。两种疲劳试件具体形状和尺寸见图 1。

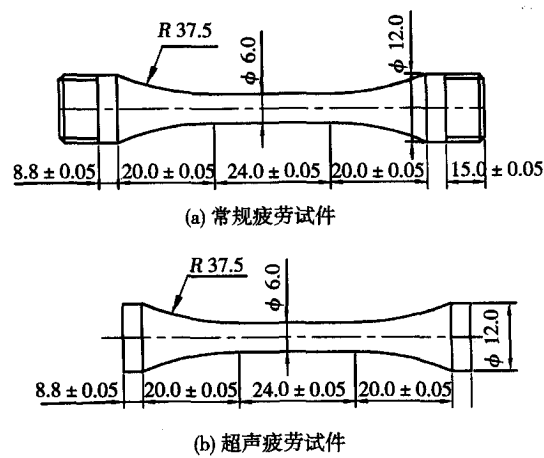


图 1 试件的几何形状和尺寸 (mm)

Fig. 1 Geometrical shape and size of specimens

1.2 疲劳试验

文中设计的超声疲劳试件的谐振频率为 19.63 kHz,常规疲劳试件的谐振频率为 92 Hz,应力比相同为 $R=0.1$,分别在超高周疲劳试验装置和 100 kN 常规疲劳试验机上进行对称拉压疲劳试验。试验前用不同型号的砂纸依次对试件进行打磨,以去除表面加工痕迹的影响。试验在室温下进行,采用循环水冷方式避免由于试件谐振而导致的温度上升。

试验过程中改变不同试件的电流达到控制应力的效果,并记录试件的断裂时间。通过应力幅计算公式得到试件的应力范围,并绘制 $S-N$ 曲线。

2 两种类型疲劳试验结果

超声疲劳与常规疲劳试验数据及结果见表 4。TIG 焊接头超声疲劳与常规疲劳试件的 $S-N$ 曲线对比如图 2 所示。由于试验时间的限制,常规疲劳未给出 10^7 周次以上的 $S-N$ 曲线。由图 2 可知,在 10^7 周次以下两种类型的疲劳试验结果较为接近。通过文献[6]可知铝合金 $S-N$ 曲线呈连续下降趋势,且其连续下降型特征与试验方法无关。因此将所得常规疲劳试件的 $S-N$ 曲线延伸至图 2 虚线所示,得到 5A06 铝合金在超长寿命范围内的近似常规疲劳 $S-N$ 曲线。由图 2 得出,超声疲劳与常规疲劳试验在 $10^6, 10^7$ 以及 10^8 周次对应的应力范围分别为 (154, 152), (127, 128) 和 (104, 108) MPa,即两条 $S-N$ 曲线在 $10^6 \sim 10^8$ 周次应力范围相差小于 5%,偏离程度不大,因此加载频率对 5A06 铝合金焊接接

表 4 5A06 焊接接头超声疲劳与常规疲劳试验数据
Table 4 Experimental data of ultrasonic fatigue and conventional fatigue testing of 5A06 welded joint

序号	超声疲劳			常规疲劳		
	应力范围 $\Delta\sigma/\text{MPa}$	疲劳寿命 $N(10^5 \text{ 周次})$	最终 状态	应力范围 $\Delta\sigma/\text{MPa}$	疲劳寿命 $N(10^4 \text{ 周次})$	最终 状态
1	74.6	16 740	未断	100	346.0	断裂
2	82.0	93.65	断裂	110	690.7	断裂
3	89.4	813.1	断裂	120	31.76	断裂
4	96.9	2 130	断裂	130	497.7	断裂
5	104.4	105.4	断裂	140	1 301	断裂
6	111.8	296.1	断裂	150	19.05	断裂
7	119.2	1 495	断裂	160	264.7	断裂
8	126.7	128.3	断裂	160	133.5	断裂
9	134.2	58.83	断裂	170	22.07	断裂
10	141.7	729.1	断裂	180	4.305	断裂
11	149.2	35.19	断裂	190	230.2	断裂
12	164.3	1.938	断裂	200	4.401	断裂
13	179.5	11.63	断裂	210	64.01	断裂
14	193.8	5.814	断裂	220	3.146	断裂

头疲劳性能的影响可忽略,可以用超声疲劳试验方法研究此种材料超长寿命区间的疲劳性能。

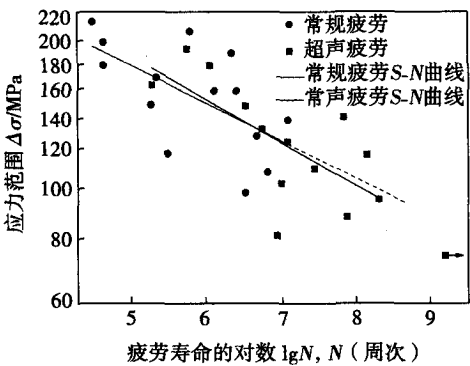


图 2 超声疲劳与常规疲劳 $S-N$ 曲线对比

Fig. 2 $S-N$ curves of ultrasonic fatigue and conventional fatigue

3 焊接缺陷对超高周疲劳性能的影响

图 3 为疲劳试件断口形貌。当焊接接头内部无明显缺陷时,试件表面的粗糙度起主要作用。试件倾向于从表面打磨状态不合格的位置起裂,即表面裂纹源,见图 3a。铝及铝合金 TIG 焊具有保护好、焊缝质量高、电弧稳定、热量集中、操作技术容易且便于实现焊接自动化的优点,但由于铝及铝合金有易于氧化、导热性高、熔点低以及高温强度低等特点,焊接过程中易产生焊接缺陷,焊接缺陷的存在对超高周疲劳性能产生影响。

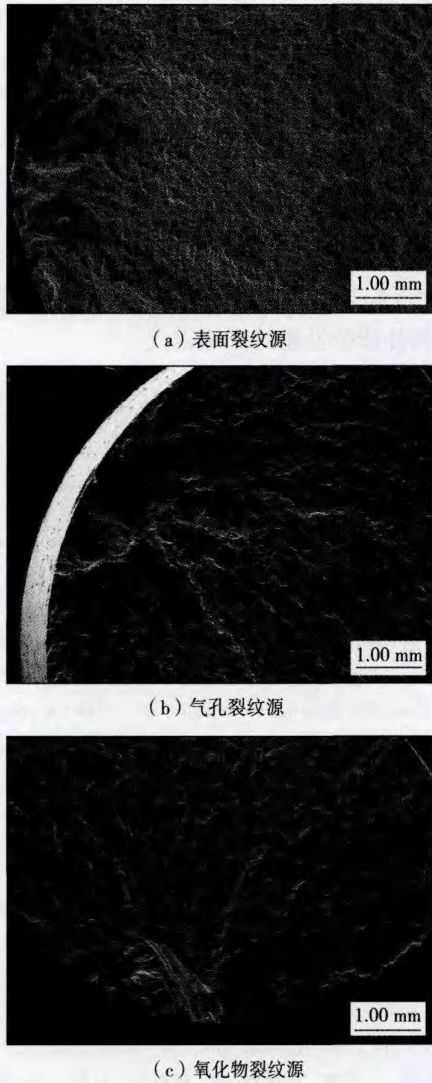


图 3 疲劳试件断口形貌

Fig. 3 Fracture morphology of specimen

3.1 气孔

液态铝可以溶解大量氢(0.69 mL/100 g),固态铝却几乎不溶解氢(0.036 mL/100 g),两者相差 20 倍. 因此焊接完成后快速冷却凝固时,极易产生气孔. 此外母材或焊丝氧化膜清理不干净,供气系统不干燥,焊接工艺参数选择不当,焊接过程气体保护不良等原因都会促使气孔的产生. 如图 3b 所示为焊接接头中气孔为裂纹源的断口. 焊接接头中气孔的存在会严重降低铝合金的疲劳寿命. 文中在应力范围 130 和 170 MPa 下进行超声疲劳试验,当裂纹源为气孔缺陷时,统计其距试件表面的距离及其寿命,如表 5 所示.

图 4 为不同应力水平下失效疲劳寿命与气孔中心距表面距离的关系. 由数据点的分布可知,不考虑气孔尺寸的情况下,气孔距离表面越近,失效疲劳

表 5 气孔缺陷

Table 5 Pore defects

序号	应力范围 130 MPa		应力范围 170 MPa	
	距离 <i>d</i> /mm	疲劳寿命 <i>N</i> (10 ⁶ 周次)	距离 <i>d</i> /mm	疲劳寿命 <i>N</i> (10 ⁶ 周次)
1	0.328 2	531.9	0.912 1	290.8
2	0.304 5	398.3	0.602 6	271.9
3	0.180 6	378.2	0.459 2	212.8
4	0.473 4	283.7	0.301 7	143.2
5	0.411 9	212.8	0.104 2	88.65
6	0.428 7	159.6	0.113 9	54.37
7	0.136 4	82.74	0.378 5	3.546
8	0.926 2	53.19	0.031 8	2.364
9	0.334 3	29.55	0.054 2	1.182
10	0.136 4	21.28	0	0.197
11	0.320 5	16.55	—	—
12	0	10.64	—	—
13	0	2.364	—	—

寿命越低,即疲劳性能越差. 这是由于气孔距离表面越近,应力强度因子越大且其扩展速率更快. 此外环境对表面缺陷的影响比对内部缺陷的影响更大.

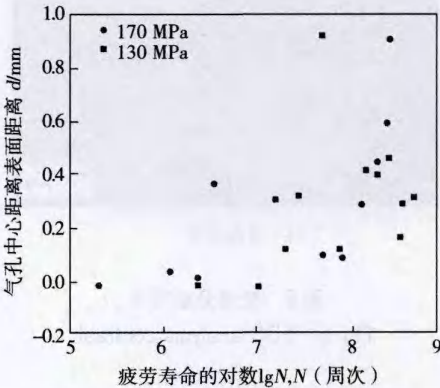


图 4 不同应力水平气孔深度与失效疲劳寿命关系

Fig. 4 Relationship between pore depth and failure cycle under different stress levels

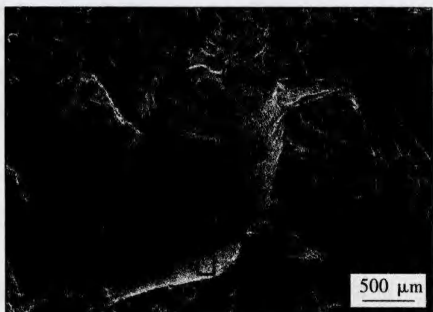
气孔是典型的体积缺陷,因而难以采用断裂力学方法进行评定. 气孔缺陷的存在使得有效承载截面尺寸减小,从而导致疲劳强度降低. 对于相同尺寸的缺陷,起裂于内部气孔的试件的疲劳寿命相对高于起裂于表面的试件.

3.2 氧化物

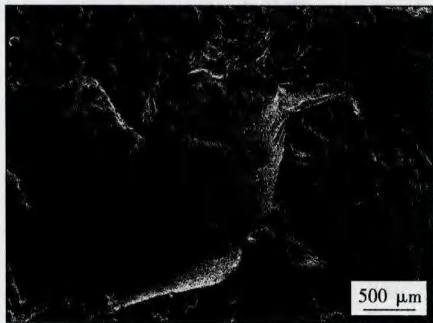
铝在空气中极易与氧结合产生致密而结实的 Al₂O₃ 薄膜,这类氧化膜由于具有熔点高(2 050 ℃)、密度大的特点,在焊接过程中会对金属之间的良好结合引发不良影响^[7]. 图 3c 所示为接头中氧

化物为裂纹源的断口。

对氧化物及其周围基体金属进行能谱分析,位置见图 5。由表 6 能谱分析结果中可明显看出,基体金属为铝、镁合金,影响金属间良好结合的为 Al_2O_3 及 MgO 等氧化物,这些氧化物的存在导致对接面上存在非致密结合,在承受循环载荷作用时易成为裂纹源引发断裂。因此焊前彻底清理氧化膜并在有效时间内焊接是改善焊接质量提高构件疲劳寿命的有效措施。



(a) 夹杂物



(b) 基体金属

图 5 能谱分析对比

Fig. 5 EDS analysis contrast

表 6 能谱分析结果(质量分数,%)

Table 6 Results of EDS analysis

位置	Al	Mg	O
夹杂物	64.15	12.72	23.13
基体金属	94.27	5.73	—

4 结 论

(1) 加载频率对 5A06 铝合金 TIG 焊接头的疲

劳性能影响不大,超声疲劳试验结果可以用于表征机械结构长期使用的安全性。

(2) 焊接接头内气孔的存在导致疲劳性能恶化。不考虑气孔尺寸,气孔中心距表面的距离越近,疲劳寿命越低。

(3) 能谱分析表明,焊接接头试件内部的夹杂物类型为氧化物。氧化物的存在导致对接面非致密结合,从而易于成为裂纹源引发断裂。焊接质量的控制对构件疲劳性能的影响很大。

参考文献:

- [1] Naito T, Ueda H, Kikuchi M. Fatigue behavior of carburized steel with internal oxides and nonmartensitic microstructure near the surface[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1984, 15A(7): 1431 - 1436.
- [2] 何 超, 崔仕明, 刘永杰, 等. 气孔对铝合金焊接接头超长疲劳寿命的影响[J]. *焊接学报*, 2014, 35(11): 18 - 22.
He Chao, Cui Shiming, Liu Yongjie, *et al.* Effect of pore on super long fatigue life of aluminum alloy welded joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(11): 18 - 22.
- [3] Bach J, Höppel H W, Prell M, *et al.* Crack initiation mechanism in AA6082 fatigued in the VHCF-regime[J]. *International Journal of Fatigue*, 2014, 60: 23 - 27.
- [4] 李艳军, 康 举, 吴爱萍, 等. TIG 焊工艺对 LD10 铝合金接头气孔的影响[J]. *焊接学报*, 2014, 35(4): 37 - 40.
Li Yanjun, Kang Ju, Wu Aiping, *et al.* Influence of TIG welding parameters on porosity in LD10 aluminum alloy joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(4): 37 - 40.
- [5] 吴良晨, 王东坡, 邓彩艳, 等. 超长寿命区间 16Mn 钢焊接接头疲劳性能[J]. *焊接学报*, 2008, 29(3): 117 - 120.
Wu Liangchen, Wang Dongpo, Deng Caiyan, *et al.* Fatigue properties of welded joints of 16Mn steel in super long life region[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(3): 117 - 120.
- [6] Stanzl-Tschegg S E, Mayer H. Fatigue and fatigue crack growth of aluminum alloys at very high numbers of cycles[J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23 (Suppl. 1): S231 - S237.
- [7] 黄旺福, 黄金刚. 铝及铝合金焊接指南[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2004.

作者简介: 邓彩艳,女,1979 年出生,博士,副教授,硕士研究生导师。主要研究方向为焊接结构的强度和断裂及安全评估。发表论文 50 余篇。Email: dengcy@tju.edu.cn

通讯作者: 龚宝明,男,博士,讲师。Email: gong_bm@tju.edu.cn