

# 基于原位 SEM 的激光-MIG 复合焊接 7075-T6 铝合金疲劳裂纹扩展行为

常丽艳<sup>1</sup>, 宋西平<sup>1</sup>, 张 敏<sup>1</sup>, 吴圣川<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学 新金属国家重点实验室, 北京 100083; 2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 成都 610031)

**摘 要:** 通过扫描电镜原位观察激光复合焊接头各区裂纹的扩展行为。结果表明, 焊缝各区组织的不同使得疲劳裂纹扩展行为发生明显改变, 疲劳裂纹位于焊缝中心时, 裂纹总体沿着垂直于载荷主轴的方向扩展; 疲劳裂纹位于热影响区时, 裂纹大致成“Z”字型路径进行扩展; 疲劳裂纹在焊缝中心和热影响区扩展时都存在二次裂纹; 疲劳裂纹在母材区扩展时, 呈现出单一和典型的裂纹扩展模式。此外, 通过原位 SEM 观察获得不同循环周期下的裂纹扩展长度, 进而推算得到 7075-T6 铝合金接头各区内疲劳裂纹扩展速率的 Paris 公式。

**关键词:** 7075-T6 铝合金; 焊接接头; 疲劳裂纹; 原位 SEM 观察; 激光复合焊接

**中图分类号:** TG 405 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)05-0085-04

## 0 序 言

7075-T6 合金属于超高强度铝合金, 具有密度小、易加工、比强度高特点, 在交通运输领域具有广阔应用前景。铝合金结构件在使用过程中, 一般用焊接进行连接。激光-MIG (metal inert gas arc welding) 复合焊接是一种全新的焊接方法, 相对于普通电弧熔化焊具有变形小、热影响区窄和焊接速度快等优点; 相较于单独的激光焊也有能够调节焊缝成分、提高焊接效率和熔深大等优点, 是具有广阔发展潜力的轻合金熔焊技术<sup>[1]</sup>。

目前对激光复合焊接铝合金的研究主要集中在接头微观组织、软化机理、腐蚀行为及疲劳寿命等方面<sup>[2-5]</sup>, 而通过扫描电镜原位观察的方法对复合焊铝合金的疲劳裂纹扩展行为鲜有研究。此方法克服了传统研究手段无法实时追踪短裂纹萌生与扩展的缺点, 能够实时观察到小范围疲劳载荷下裂纹的扩展。文中采用扫描电镜原位观察了 7075-T6 铝合金复合焊接头的疲劳裂纹萌生与扩展过程, 记录疲劳试样在一定循环周期下的裂纹长度, 得到裂纹扩展数据, 推算出 7075-T6 铝合金接头各区内疲劳裂纹扩展速率的 Paris 公式。重点观察裂纹扩展路径, 并对裂纹扩展过程中的停滞和偏转行为进行分析。

## 1 试验方法

试验材料为 2 mm 厚 7075-T6 铝合金轧制板材, 选用 ER5356 焊丝, 采用对接方式进行焊接, 主要化学成分如表 1, 激光为光纤 YLR-4000 系统, 最大输出功率为 4 kW, MIG 焊机为 TPS4000。试验焊接工艺: 激光功率  $P=3.5$  kW, 电流  $I=140$  A, 焊接速度  $v=9$  m/min, 送丝速度  $v_1=8.3$  m/min, 离焦量 -1 mm, 氩气流量 150 L/min。为防止铝合金表面反射出的激光对光纤的损伤, 激光束偏移试板法线约 10°。

表 1 7075-T6 与 ER5356 的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of 7075-T6 and ER5356

材料	Zn	Mg	Cu	Ti	Mn	Cr	Fe	Si	Al
7075-T6	5.54	2.43	1.30	0.05	0.10	0.19	0.25	0.20	B 余量
ER5356	0.10	4.80	0.10	0.12	0.15	0.10	0.40	0.20	B 余量

在焊接接头横截面上取金相试样, 对接头各区的显微组织进行观察。原位疲劳试样尺寸如图 1 所示, 通过线切割切取焊缝中心和热影响区分别位于试样中心的疲劳试样, 并在中心位置用线切割制备 U 形的单边缺口, 对于用来观察裂纹在母材中扩展情况的疲劳试样则是在母材上直接取样, 同样在中心位置处制备相同缺口。为减少应力集中, 试样打磨去掉余高, 并进行双面磨抛。使用 SEM-SERVO 原位疲劳试验机在室温下进行疲劳试验, 工作频率为 10 Hz, 动态观察频率为 0.01 Hz。试验采用应力控

制方式,应力比为 0.1,正弦波加载. 测量裂纹长度时,取垂直于加载轴方向的投影长度为有效值.

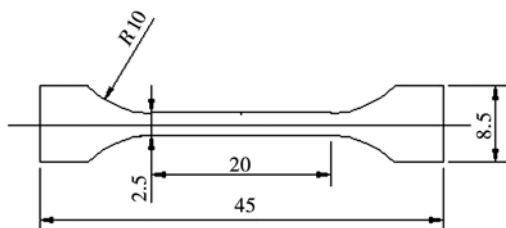


图 1 试样形状及尺寸图 (mm)

Fig. 1 Dimension of specimens for tests

## 2 试验结果

### 2.1 显微组织

由于焊接热循环的作用,焊接接头显微组织会发生变化. 图 2 为 7075-T6 铝合金焊接接头金相照片及组织示意图,焊缝 (fusion zone, FZ) 的结晶组织呈典型的急冷铸态组织,为树枝状晶 (图 2a). 此外,在铝合金的焊接中,易产生气孔,形态如图 2b 所示. 熔合线靠近焊缝部位呈柱状组织,热影响区 (heat affect zone, HAZ) 与母材 (base metal, BM) 相比没有明显的区别,仍保持轧制组织形态,只是晶粒有轻微的长大. 母材离焊缝较远,几乎不受热循环的影响,晶粒保持原来的轧制组织.

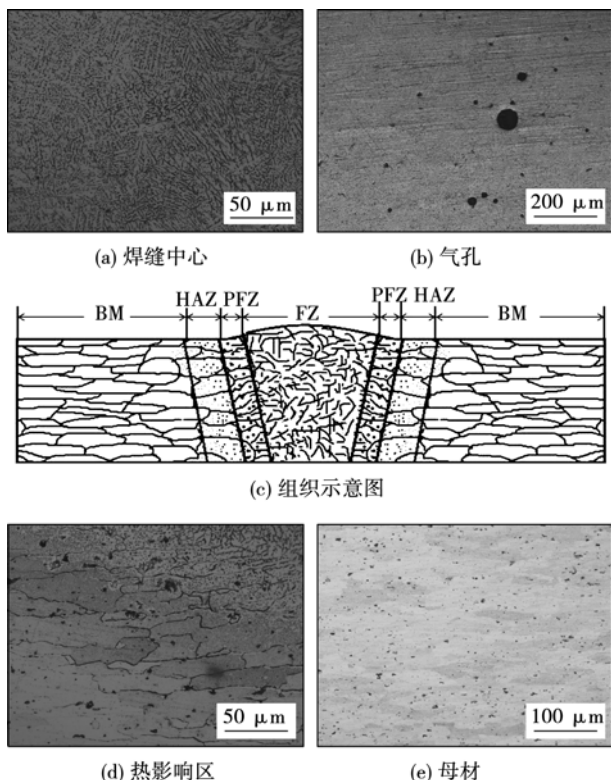


图 2 7075-T6 铝合金焊接接头金相及组织示意图

Fig. 2 Optical micrographs and chart of hybrid welded 7075-T6 joint

### 2.2 疲劳裂纹扩展路径的原位观察

图 3 ~ 图 5 为疲劳裂纹分别在 7075-T6 焊接接头的焊缝、热影响区和母材扩展时的原位观察结果. 三种情况下疲劳主裂纹均萌生于缺口根部,这是由于缺口处引起的应力集中,材料容易发生局部的塑性变形开裂导致裂纹萌生. 当疲劳裂纹在焊缝扩展时 (图 3),微裂纹沿垂直于加载方向扩展,并与图中红色箭头所示的气孔相连 (图 3b). 从图 3b 中还可以观察到在主裂纹扩展的过程中伴随着二次裂纹 (白色箭头所示) 产生,这是由于材料近表面的焊接气孔造成应力集中而产生的. 随着循环周次的增加,主裂纹绕过气孔,继续沿垂直于载荷方向扩展,二次裂纹并未与主裂纹连通,而是自身扩展到一定长度后停止. 疲劳裂纹分别在热影响区 (图 4) 和母材 (图 5) 扩展时,都是与载荷方向呈约  $45^\circ$  向内扩展. 如图 4a 所示,在热影响区内的疲劳裂纹整体上呈“Z”字形路径向前扩展. 从图 4a 的局部放大图 4b 中还可以看到裂纹倾向于沿红色箭头指示的第二相粒子与基体的界面扩展,并且在界面处发生较大的偏转而改变扩展方向,而非直线向前扩展. 主裂纹在扩展过程中还会次生一些二次裂纹,但这些二次裂纹只扩展很短距离便会中止,如图 4b 和图 4c 中黑色箭头所示. 图 4c 为  $N=172\ 104$  时,裂纹尖端附近的原位照片,由此可以看出,主裂纹前端的析出相与基体已经脱离,产生微孔. 而后,微孔长大,主裂纹向前扩展,相互连接. 母材试样的疲劳裂纹开始以纯剪切方式扩展,但长度相对于热影响区要大 (图 4a 和图 5a). 疲劳裂纹先呈“Z”字形扩展 (图 5b),而后垂直于载荷方向扩展 (图 5c). 在整个裂纹扩展的过程中,并没有见到二次裂纹,整体呈单一裂纹扩展模式.

### 2.3 疲劳裂纹扩展速率

图 6 为通过原位疲劳测得不同周期下的裂纹长度计算得到的 7075-T6 焊接接头各区疲劳裂纹扩展速率 ( $da/dN$ ) 与应力强度因子范围 ( $\Delta K$ ) 的关系曲线. 对于金属材料,一般把对应  $da/dN = 10^{-10}$  m/周次的  $\Delta K$  值定义为门槛值  $\Delta K_{th}$ ,图中可以看出焊缝处和热影响区疲劳裂纹扩展门槛值  $\Delta K_{th}$  分别为  $5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  和  $6.5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  左右. 近门槛区通常指  $da/dN$  低于  $10^{-8}$  m/周次的区域,从裂纹在焊缝和热影响区扩展得到的数据可以看到,当  $\Delta K$  分别在  $6.5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ,  $7.2\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  以下时处于近门槛区,为裂纹扩展第 I 阶段;此后,  $\lg(da/dN)$  和  $\lg\Delta K$  基本呈线性关系,处于稳定扩展区,为裂纹扩展第 II 阶段,符合 Paris 公式:  $da/dN = C(\Delta K)^m$ ,  $C, m$  与材料本身有关. 用最小二乘法拟合出各区的  $C, m$  如表 2

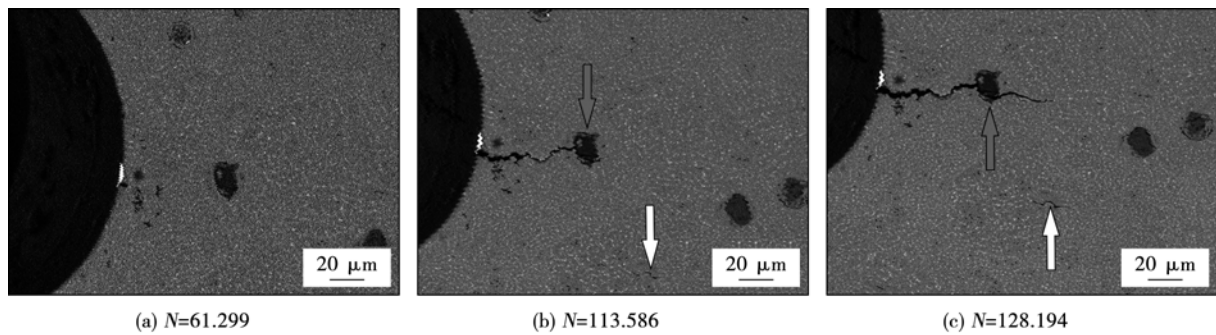
图 3 7075-T6 铝合金焊缝处疲劳裂纹原位观察照片 ( $\sigma_{\max}=200$  MPa)

Fig. 3 Fatigue crack propagation behavior of 7075-T6 fusion zone under different cycles

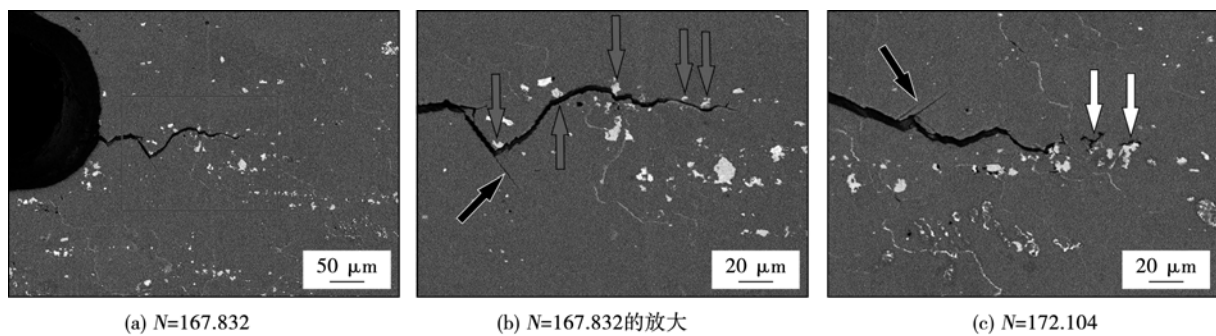
图 4 7075-T6 铝合金焊缝热影响区疲劳裂纹原位观察照片 ( $\sigma_{\max}=200$  MPa)

Fig. 4 Fatigue crack propagation behavior of 7075-T6 HAZ under different cycles

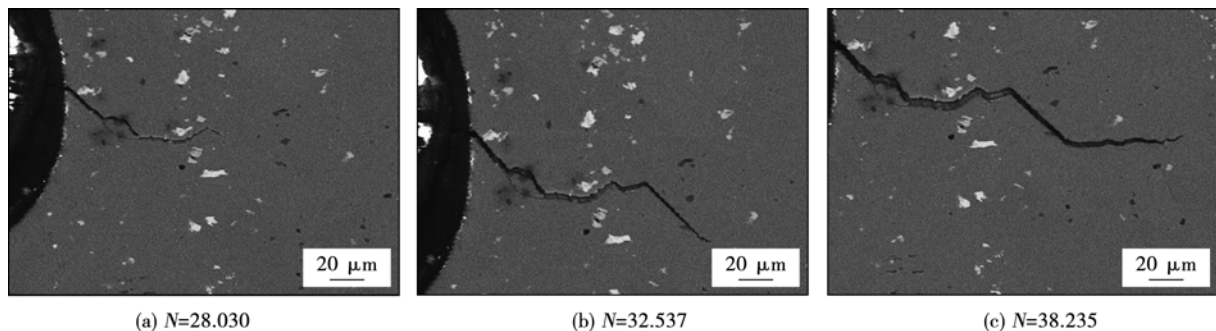
图 5 7075-T6 铝合金焊缝热影响区疲劳裂纹原位观察照片 ( $\sigma_{\max}=310$  MPa)

Fig. 5 Fatigue crack propagation behavior of 7075-T6 base metal under different cycles

表 2 7075-T6 铝合金焊接接头各区 Paris 公式中的  $C, m$  值  
Table 2 Fitting parameters for Paris

试验材料	$C$	$m$
焊缝中心	$1.41 \times 10^{-13}$	5.37
热影响区	$3.89 \times 10^{-13}$	4.57
母材	$1.70 \times 10^{-12}$	3.45

所示. 7075-T6 焊接接头各区的 Paris 公式分别为

- (1) 焊缝中心:  $da/dN = 1.41 \times 10^{-13} (\Delta K)^{5.37}$ .
- (2) 热影响区:  $da/dN = 3.89 \times 10^{-13} (\Delta K)^{4.57}$ .
- (3) 母材:  $da/dN = 1.70 \times 10^{-12} (\Delta K)^{3.45}$ .

图 6 中还可看出在相同的应力强度因子范围

$\Delta K$  条件下, 裂纹扩展速率为焊缝中心 > 热影响区 > 母材.

### 3 讨 论

疲劳裂纹萌生和扩展是多种因素共同作用的结果. 焊接接头各区疲劳裂纹扩展行为的差异与其显微组织有关. 文献[3]中测得了 7075-T6 复合焊接头内部气孔分布图, 如图 7 所示<sup>[5]</sup>, 焊缝处存在大量微气孔. 疲劳裂纹位于焊缝中心扩展时, 这些气孔是影响裂纹扩展行为的重要因素. 裂纹开始扩展时

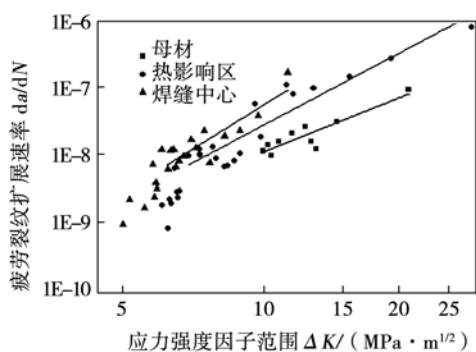


图 6 7075-T6 焊接接头疲劳裂纹扩展速率

Fig. 6 Fatigue crack growth behavior of base metal, HAZ and fusion zone of welded 7075-T6 aluminium alloy

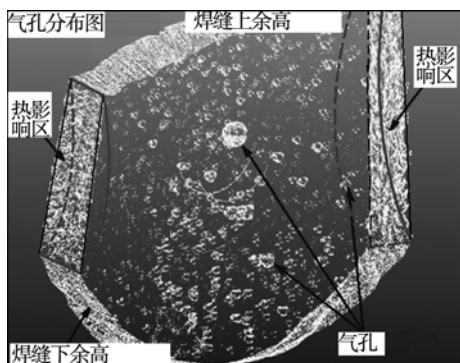


图 7 7075-T6 铝合金焊接接头内部气孔三维透视图

Fig. 7 X-ray microtomography mapping of 3D porosity

气孔间的相互连接加快裂纹的扩展,使裂纹整体垂直于载荷方向扩展,而不是以剪切的方式开始扩展;当裂纹尺寸大于气孔时,气孔影响较小,裂纹稳定扩展. 试样表面和近表面的气孔在循环载荷作用下产生应力集中本身易萌生微裂纹,呈现多裂纹相互连接的扩展模式. 气孔的存在也就降低了疲劳裂纹扩展阻力,使门槛值减小,疲劳裂纹扩展速率增大.

疲劳裂纹位于热影响区时,循环载荷作用下,当铝合金基体与第二相粒子受到的应力水平超过基体屈服强度时,基体会发生屈服而产生较大的塑性变形,而粗大第二相是脆性的,二者变形的不协调会使粗大第二相与基体分离(图 4c). 这就为疲劳裂纹提供了优先的扩展路径. 这些扩展路径的出现降低了疲劳裂纹扩展所需的能量,使裂纹更易于沿粗大的第二相与基体的界面扩展. 当裂纹改变扩展路径时会衍生出一些二次裂纹(图 4b,c),这也说明裂纹尖端通过粗大的第二相时产生强烈的应力集中,从而引起裂纹分叉或发生偏转. 粗大第二相在裂纹尖端分布的不均匀性,使裂纹尖端不能形成对称的流变带,裂纹前沿不对称的塑性变形也促进了裂纹的

偏转. 母材与热影响区的疲劳裂纹在裂纹萌生后以纯剪切的方式沿与加载方向呈  $45^\circ$  方向,主要为晶粒内部滑移带扩展. 与母材相比,热影响区的晶粒有所长大,降低了滑移变形抗力,从而减小裂纹扩展的阻力,使裂纹扩展速率增加.

## 4 结 论

(1) 疲劳裂纹位于焊缝中心时,裂纹沿垂直于载荷轴向扩展,气孔间的相互连接有促进作用. 疲劳裂纹位于热影响区扩展时,裂纹成“Z”字型路径扩展. 疲劳裂纹在焊缝中心和热影响区扩展时都存在二次裂纹. 母材试样为单裂纹扩展模式.

(2) 7075-T6 铝合金焊接接头各区的 Paris 公式为:焊缝中心  $da/dN = 1.41 \times 10^{-13} (\Delta K)^{5.37}$ ;热影响区  $da/dN = 3.89 \times 10^{-13} (\Delta K)^{4.57}$ ;母材  $da/dN = 1.70 \times 10^{-12} (\Delta K)^{3.45}$ .

(3) 焊缝处和热影响区疲劳裂纹扩展门槛值  $\Delta K_{th}$  分别为  $5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  和  $6.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

## 参考文献:

- [1] 王炎金. 铝合金车体焊接工艺[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
- [2] Hu B, Richardson I M. Microstructure and mechanical properties of AA7075 (T6) hybrid laser/GMA welds[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 459(1): 94-100.
- [3] Wu S C, Yu X, Zuo R Z, et al. Porosity element loss and strength model on softening behavior of hybrid laser arc welded Al-Zn-Mg-Cu alloy with synchrotron radiation analysis[J]. Welding Journal, 2013, 92(3): 64-71.
- [4] 吴圣川, 周鑫淼, 张卫华, 等. 激光-电弧复合焊接 7075-T6 铝合金裂纹扩展分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 5-8.  
Wu Shengchuan, Zhou Xinmiao, Zhang Weihua, et al. Fatigue life prediction of laser-MIG hybrid welded 7075-T6 Al alloy joints [J]. Transactions of the China Welding Institution. 2013, 34(2): 5-8.
- [5] 常丽艳, 宋西平, 李宏良, 等. 7075 铝合金激光-MIG 复合焊接接头组织及性能的分析[J]. 热加工工艺, 2014, 43(9): 25-28.  
Chang Liyan, Song Xiping, Li Hongliang, et al. Microstructures and mechanical properties of laser-MIG hybrid welded joint of 7075-T6 Al alloy[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(9): 25-28.

**作者简介:** 常丽艳,女,1986 年出生,硕士研究生. 研究方向为铝合金焊接接头疲劳性能分析. 发表论文 1 篇. Email: changliyan0703@126.com

**通讯作者:** 宋西平,男,博士,教授,博士研究生导师. Email: xp-song@skl.ustb.edu.cn