

# 光纤激光-变极性 TIG 复合填丝焊接 A7N01 铝合金接头的组织与力学性能

乔俊楠 王启明 邹江林 吴世凯

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

**摘要** 采用光纤激光与变极性钨极惰性气体复合填丝焊接 A7N01 铝合金, 经工艺参数优化, 得到了成形良好、无缺陷的焊接接头。研究了这些接头的显微组织、拉伸和疲劳性能, 并分析了疲劳断裂特征及断口形貌。研究结果表明, 接头主要由细晶区、柱状晶和等轴树枝晶组成; 焊态下接头抗拉强度均值为 320 MPa, 约为母材的 75%; 自然时效 30 天后, 抗拉强度均值提高到 369 MPa, 达到母材的 83%; 断裂位置位于焊趾应力集中处, 拉伸断口呈明显的韧窝状, 为典型的韧性断裂; 接头的疲劳极限为 115 MPa。

**关键词** 光学制造; 光纤激光; A7N01 铝合金; 复合焊接; 显微组织; 疲劳性能

**中图分类号** TN249; TG 456.7

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0902001

## Microstructure and Mechanical Property of A7N01 Aluminum Alloy Joints by Fiber Laser-Variable Polarity TIG Hybrid Welding with Filler Wire

Qiao Junnan Wang Qiming Zou Jianglin Wu Shikai

*Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

**Abstract** By the hybrid technique of fiber laser and variable polarity tungsten inert gas, A7N01 aluminum alloy is welded with filler wire. After optimizing process parameters, joints with good formation and without defects are obtained. The microstructure, tensile and fatigue properties of these joints are investigated, and the fatigue-fracture characteristic and fracture morphology are examined. The research results indicate that these joints are mainly composed of fine-grained zone, columnar grains, and equiaxed dendrites. The average tensile strength of these as-welded joints is 320 MPa, around 75% of that of base metals. After natural aging of 30 days, the average tensile strength increases to 369 MPa, around 83% of that of base metals. Fractures locate at the stress concentration zone of the weld toe, and the fracture shows an obvious dimple shape, which is the unique characteristic of ductile fracture. The fatigue limit of these joints is 115 MPa.

**Key words** optical fabrication; fiber laser; A7N01 aluminum alloy; hybrid welding; microstructure; fatigue property

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3390

## 1 引言

为实现高速列车轻量化, 密度相对较小且综合力学性能优良的高强度铝合金成为了高速列车车体的主要材料之一。A7N01 铝合金属于 Al-Zn-Mg 系热处理强化铝合金, 具有较好的焊接性和综合力学性能, 广泛应用于轨道交通领域, 是列车车体常用的铝合金材料之一<sup>[1-3]</sup>。传统的铝合金车体焊接技术是熔化极

收稿日期: 2016-04-25; 收到修改稿日期: 2016-05-09

基金项目: 北京市自然科学基金(3142006)

作者简介: 乔俊楠(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事铝合金激光电弧复合焊方面的研究。

E-mail: 1216726646@qq.com

导师简介: 吴世凯(1976—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事激光电弧复合焊接机理及工艺技术方面的研究。

E-mail: wushikai@bjut.edu.cn(通信联系人)

惰性气体(MIG)焊接,但由于电弧焊接的热输入较大,焊接过程中容易产生气孔、裂纹以及变形等焊接缺陷,同时焊接接头软化严重<sup>[4]</sup>。而激光焊接因能量密度较集中、焊接速度快、热影响区窄等优点,成为铝合金焊接的重要技术手段<sup>[5-7]</sup>之一。但铝合金激光焊接也存在材料反射率较高,装配精度要求高,快速冷却凝固容易产生裂纹等问题。

激光电弧复合焊接的发展为克服电弧焊接和铝合金激光焊接的不足提供了可行性。相比于激光焊接,激光电弧复合焊接间隙适应性较强,焊接接头质量和疲劳性能得到明显改善;相比于电弧焊接,复合焊接速度较快、效率较高,焊接过程更加稳定<sup>[8-10]</sup>。Vaidya等<sup>[11]</sup>通过对比AA6013航空铝合金母材CO<sub>2</sub>激光焊接接头及钇铝石榴石(YAG)-MIG复合焊接接头的疲劳性能发现,激光焊接和激光电弧复合焊接接头的疲劳强度均低于母材,但复合焊接接头的疲劳强度大于激光焊接接头。Yan等<sup>[12]</sup>对比了5083铝合金MIG和激光-MIG复合焊接接头的疲劳性能,发现激光-MIG复合焊接接头的疲劳性能高于MIG焊接接头。Ghosh等<sup>[13]</sup>采用MIG焊接Al-Zn-Mg合金,研究焊接接头的疲劳性能,发现造成疲劳断裂的主要原因是电弧焊接过程中在焊缝中产生的气孔。激光焊接虽然热输入较小,但焊接过程不稳定,极易产生气孔、咬边等焊接缺陷,这些缺陷为应力集中部位,往往成为疲劳裂纹源。相比于常用的激光-MIG复合焊接技术,激光-变极性钨极惰性气体(TIG)复合焊接技术可以通过阴极雾化将铝合金表面氧化膜清除干净,并最大限度地降低钨极烧损。在前期研究中,本课题组利用5083铝合金进行激光-变极性TIG复合焊接,焊接接头抗拉强度为331 MPa,达到母材的97%<sup>[14]</sup>;对A7N01铝合金采用激光-变极性TIG复合填丝焊接工艺,也获得了良好无缺陷的焊接接头<sup>[15]</sup>;同时通过添加填充材料,降低了焊接的装配精度,补充了焊接过程中烧损的合金元素,改善了焊缝成形质量,提高了焊接接头的力学性能<sup>[16]</sup>。

在前期优化的焊接工艺参数的基础上,采用高功率光纤激光-变极性TIG复合填丝焊接A7N01铝合金,得到表面成形良好、无气孔及裂纹等缺陷的焊接接头。深入研究了复合焊接接头的显微组织演变、静载抗拉强度及疲劳性能,并分析了疲劳断裂特征及断口形貌。

## 2 试验材料与方 法

试验材料为A7N01铝合金,其热处理态为T4态。焊接试样尺寸为200 mm×100 mm×4 mm,填充焊丝是直径为1.2 mm的ER5356焊丝,母材和焊丝的化学成分见表1。母材为典型轧制状组织,晶粒沿着轧制方向拉长,如图1所示。

表1 A7N01铝合金和ER5356焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of A7N01 aluminum alloy and ER5356 filler wire (mass fraction, %)

	Zn	Mg	Si	Mn	Fe	Cu	Cr	Ti	V	Zr	Al
A7N01	4.0~5.0	1.0~2.0	≤0.3	0.2~0.7	≤0.35	≤0.2	≤0.3	≤0.2	≤0.1	≤0.1	Bal.
ER5356	≤0.1	4.5~5.5	≤0.25	0.05~0.2	≤0.4	≤0.1	0.05~0.2	0.06~0.20	—	—	Bal.

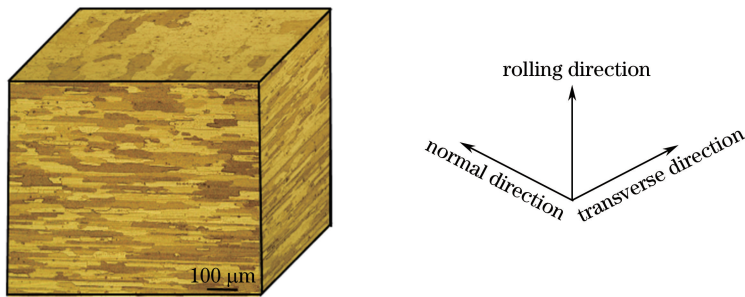


图1 A7N01铝合金三维金相组织

Fig. 1 Three dimensional metallographic structure of A7N01 aluminum alloy

采用激光在前、电弧在后的复合对接焊方式,焊丝从激光前方送入,其中光丝间距约为1 mm,激光和电弧间距约为2 mm,焊接试验装置原理如图2所示。采用光纤激光器(YLS-6000,IPG公司,美国),最大输出功率为6000 W,波长为1060~1070 nm,光纤传输芯径为200 μm,准直镜焦距为200 mm,聚焦镜焦距为

250 mm,光斑直径为 0.25 mm。焊接电源选用电焊机(Magic Wave 3000 Job,福尼斯公司,奥地利),变极性 TIG 焊接参数为带圆角的矩形方波,频率为 60 Hz,基值电流为 30%,占空比为 68%。焊接保护气体为氩气,正、背面保护气流量均为 10 L/min。根据前期试验结果,确定复合焊接工艺参数为:激光功率 6000 W,电弧电流 180 A,焊接速度及送丝速度 4 m/min。

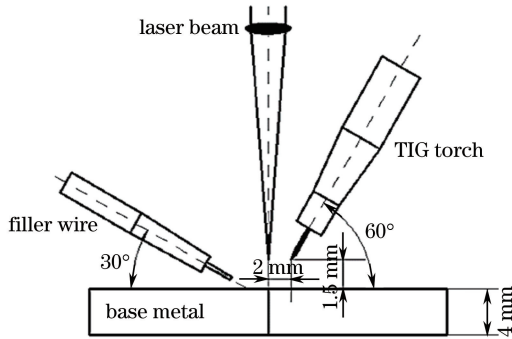


图 2 焊接试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of welding experimental setup

焊前先用饱和氢氧化钠溶液和体积分数为 30% 的硝酸溶液对焊板进行化学清洗,焊接时用刮刀刮掉焊缝纵截面的氧化膜,焊接后对试板进行 X 射线无损检测。将焊板加工成金相试样,用 Keller 试剂腐蚀试样,采用金相显微镜观察焊接接头的显微组织;采用透射电镜(TEM)观测焊缝析出相;采用显微硬度计测量焊接接头的显微硬度;采用疲劳试验机(MTS810,MTS 公司,美国)进行拉伸试验和疲劳试验,并用扫描电镜(SEM)观测拉伸断口,拉伸试样的尺寸如图 3 所示,其中  $R_1$  为圆弧半径。疲劳试验的尺寸如图 4 所示,其中  $R_2$  为圆弧半径。疲劳加载频率为 20 Hz,应力比为 0.1,最大应力为 165 MPa。

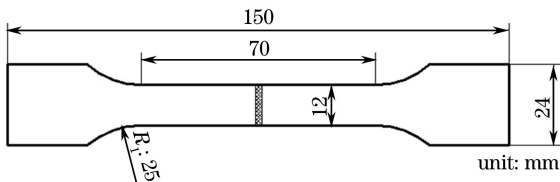


图 3 拉伸试样尺寸

Fig. 3 Tensile specimen size

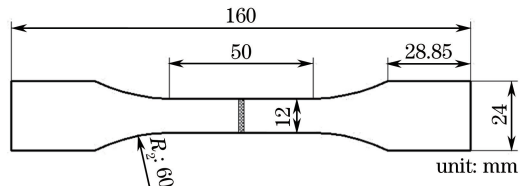


图 4 疲劳试样尺寸

Fig. 4 Fatigue specimen size

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 焊接接头显微组织

在优化后的焊接工艺参数条件下,铝合金表面氧化膜得到有效清理,焊接过程稳定,得到表面光亮且均匀分布的鱼鳞纹形态的焊缝,如图 5(a)所示。焊缝经射线照相检测技术(RT)检验,无气孔、裂纹等焊接缺陷,如图 5(b)所示。

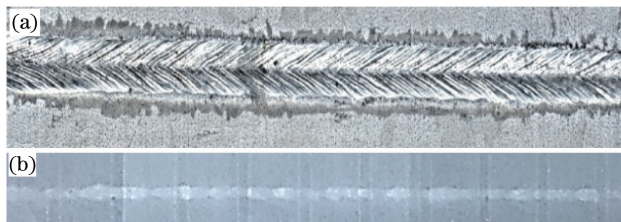


图 5 (a)焊缝表面形貌;(b)X射线检测

Fig. 5 (a) Surface morphology of weld; (b) X-ray inspection

复合焊接接头的横截面及显微组织如图 6 所示。图 6(a)所示为焊缝横截面宏观形貌,呈上宽下窄钉子形,上部主要为激光与电弧热源共同作用的结果,下部为激光热源作用结果。图 6(b)所示为焊缝熔合线上



部组织,该位置为电弧热源与激光热源共同作用区域,主要由母材(BM)、热影响区(HAZ)、细晶区(EQZ)、柱状晶和焊缝(WM)中心的等轴树枝晶组成。热影响区组织和母材组织的结构都为典型的轧制结构,但是热影响区的晶粒比母材粗大。而在靠近熔合线的焊缝中,存在一个厚度约为  $10\ \mu\text{m}$  的细晶区,在随后的凝固过程中,由于母材温度较低,所以晶体沿着垂直于熔合线的方向长成柱状晶组织。图 6(c)所示为焊缝熔合线下部组织,该位置为激光热源作用区域,主要由柱状晶、等轴树枝晶组成,细晶区减小。图 6(d)所示为焊缝上部中心粗大树枝晶组织,主要为电弧热源作用的结果。电弧热量较为发散,熔池冷却速度较慢,使得晶粒较为粗大,存在较粗大的二次枝晶。相比于电弧区,激光区焊缝中心的组织为细小的等轴树枝晶,且二次枝晶弱化,如图 6(e)所示。在电弧区和激光区之间为两者的过渡区,如图 6(f)所示,过渡区的组织与电弧区和激光区的组织不同,没有等轴树枝晶,主要为狭长的柱状晶组织。

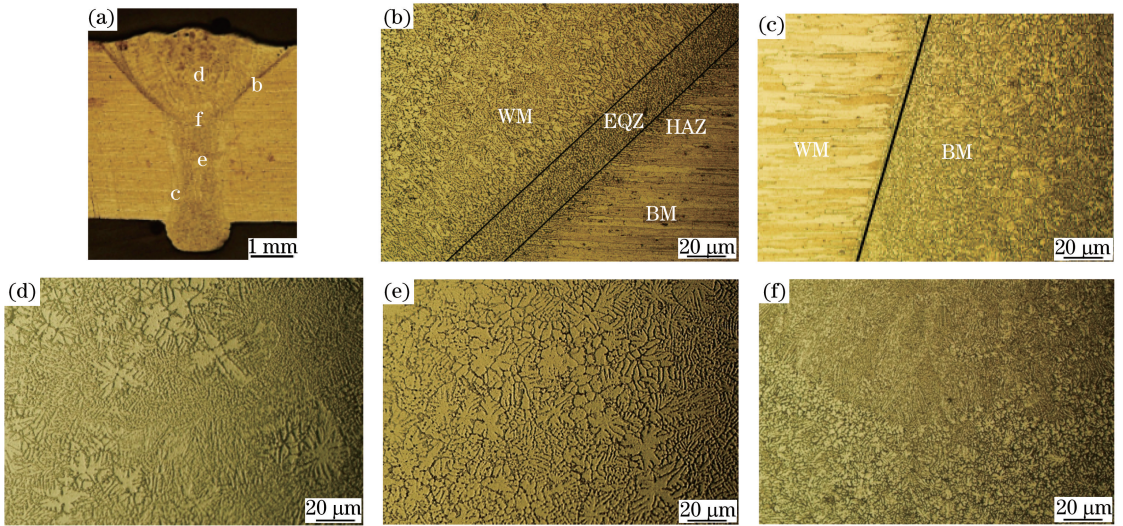


图 6 复合焊接接头显微组织。(a)焊缝横截面形貌;(b)熔合线上部组织;(c)熔合线下部组织;  
(d)焊缝中心上部组织;(e)焊缝中心下部组织;(f)焊缝中部组织

Fig. 6 Microstructures of hybrid welded joint. (a) Cross sectional morphology of weld; (b) upper part of fusion line; (c) bottom part of fusion line; (d) upper part of weld center; (e) bottom part of weld center; (f) central part of weld

对于 Al-Mg-Zn 系合金,由于 Mg、Zn 为主要强化元素,主要析出的强化相为  $\text{MgZn}_2$  [17-19]。在焊态及自然时效 30 天条件下,焊缝 TEM 图如图 7 所示。在焊态条件下,焊缝区的析出相较少,主要分布在晶界处,且在晶界处存在位错条的缠结,如图 7(a)所示。图 7(b)所示为焊态条件下的晶界析出相的局部放大图,利用能谱仪(EDS)对析出相进行分析发现,其主要组成元素为 Mg、Zn,如图 7(f)所示,主要为条状的纳米级  $\text{MgZn}_2$  相。自然时效 30 天后,焊缝中析出相数量增多,位错密度增大,同时观察到较窄的无沉淀相的析出带(PFZ),如图 7(c)、(d)、(e)所示。

### 3.2 焊接接头抗拉强度

图 8 所示为复合焊接接头的室温拉伸试验结果,复合焊接接头的平均抗拉强度为 320 MPa,约为母材的 73%,存在明显的接头软化行为。自然时效 30 天后,焊接接头抗拉强度提高到 369 MPa,达到了母材的 83%。这是由于 A7N01 铝合金属于热处理强化型铝合金,焊接接头抗拉强度的高低主要取决于焊缝中析出相的形态、尺寸、数量以及位错密度。自然时效 30 天后的焊缝析出相的数量较焊态增多,阻碍了位错的移动,位错密度增大,出现 PFZ,因此焊接接头的力学性能得到提高,如图 7(c)~(e)所示。图 9 所示为拉伸试样断裂横截面的宏观形貌及断口形貌,断口轮廓线与拉伸方向成  $45^\circ$ ,焊接试样断裂在焊缝处。断口呈韧窝状,为典型的韧性断裂。

### 3.3 焊接接头疲劳性能

对 A7N01 铝合金激光-变极性 TIG 填丝复合焊接接头进行了 4 个应力等级的疲劳性能测试,由于纯铝及铝合金材料没有明显的疲劳极限 [20],所以将循环次数  $N$  为  $10^7$  时对应的循环载荷作为焊接接头的疲劳极限。图 10 所示为根据试验所得数据拟合的焊接接头 S-N 曲线,其中 S 为应力。由图可知,S 随循环次数  $N$



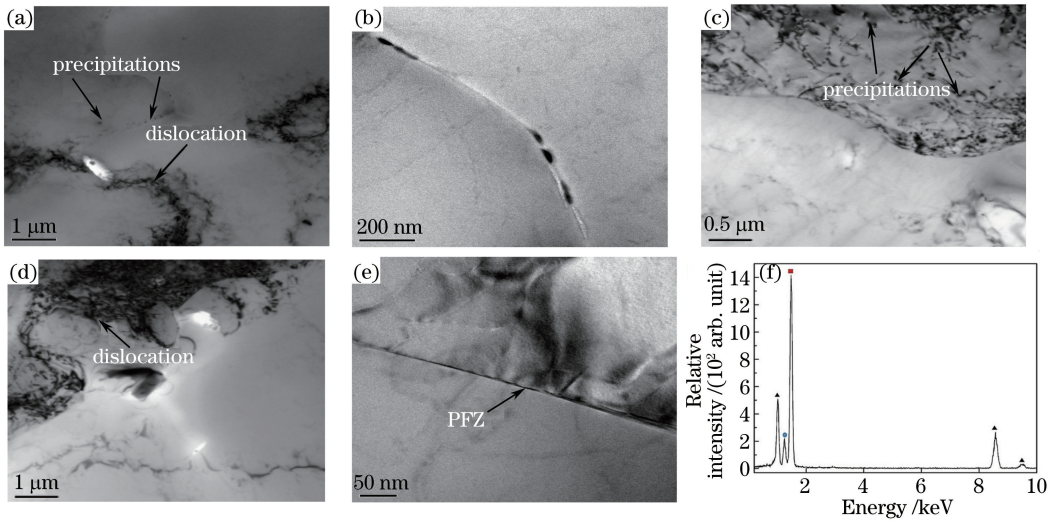


图 7 (a)焊态条件下 TEM 图;(b)焊态晶界的局部放大图;(c)自然时效 30 天后的 TEM 图;(d)自然时效 30 天后的位错缠结;(e)自然时效 30 天后的 PFZ;(f)焊态条件下的析出相的 EDS

Fig. 7 (a) As-welded TEM image; (b) local magnification of as-welded grain boundaries; (c) TEM image after natural aging of 30 days; (d) dislocation after natural aging of 30 days; (e) PFZ after natural aging of 30 days; (f) EDS of as-welded precipitation

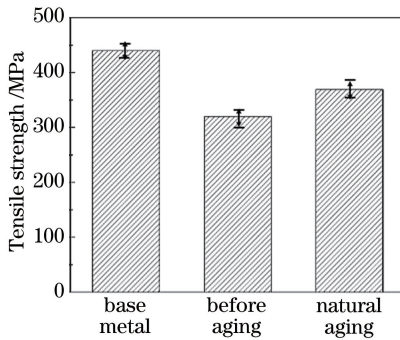


图 8 母材与焊接接头的拉伸强度

Fig. 8 Tensile strength of base metal and welded joint

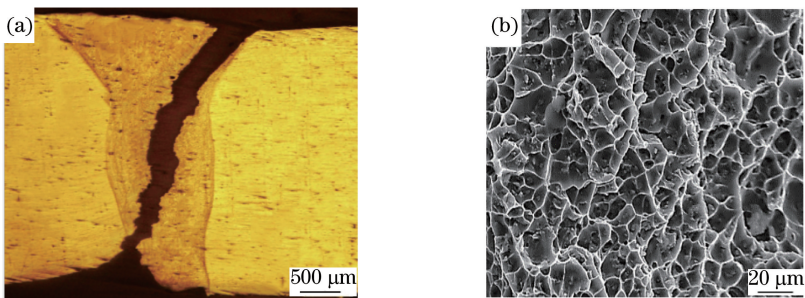


图 9 焊接接头拉伸断口。(a)断裂焊缝横截面;(b)断口形貌

Fig. 9 Tensile fracture of welded joint. (a) Cross section of fractured weld seam; (b) fracture morphology

的增加而降低。在 115 MPa 的载荷下,试样没有发生断裂的循环次数超过  $10^7$ ,可以确定 A7N01 铝合金激光-变极性 TIG 填丝复合焊接接头的疲劳强度为 115 MPa。

由于疲劳破坏主要包括裂纹萌生、裂纹扩展和断裂三个阶段,为确定疲劳破坏的特征及断裂行为,对疲劳破坏后的试样进行金相分析,如图 11 所示。图 11(a)所示为焊接接头疲劳裂纹横截面的宏观形貌,裂纹从焊缝上表面焊趾应力集中处萌生,并沿着垂直于加载方向扩展。图 11(b)所示为裂纹萌生处的显微组织形貌,裂纹萌生处组织为较粗大的柱状晶组织,同时也是焊接接头较为薄弱的区域。疲劳裂纹扩展方式为沿

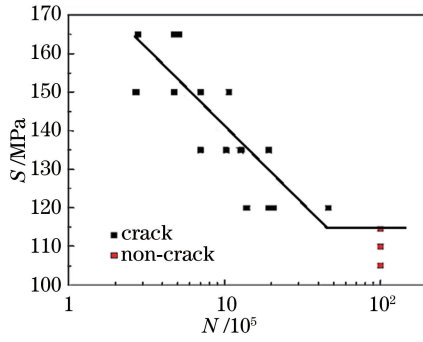


图 10 复合焊接接头 S-N 曲线

Fig. 10 S-N curve of hybrid welded joint

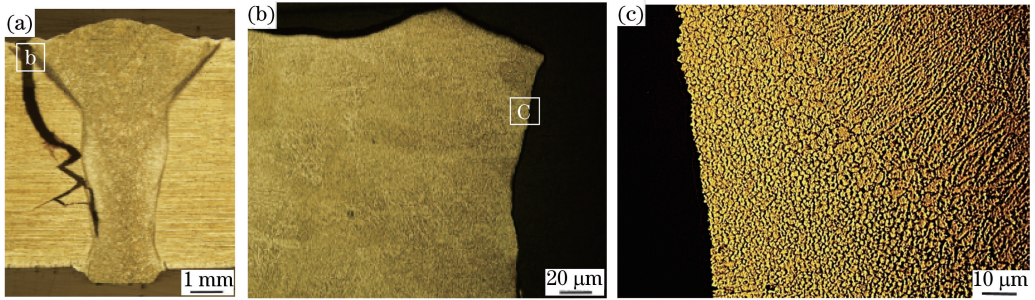


图 11 疲劳破坏后试样的金相分析。(a)焊接接头疲劳裂纹横截面宏观形貌;(b)裂纹萌生处显微组织;(c)疲劳裂纹扩展区显微组织

Fig. 11 Metallographic analysis of specimen after fatigue crack. (a) Cross-sectional morphology of fatigue crack of welded joint; (b) microstructure at crack initiation position; (c) microstructure at fatigue crack growth zone

晶扩展,疲劳裂纹扩展区显微组织如图 11(c)所示。

焊接接头疲劳断口区域主要包括疲劳裂纹萌生区、疲劳裂纹扩展区和瞬断区。通过 SEM 观测疲劳断口,发现裂纹萌生在焊缝上表面,图 12(a)所示为疲劳裂纹萌生区,萌生位置存在向四周扩散的放射棱线,为典型的疲劳裂纹源形貌。图 12(b)为裂纹进入扩展区后出现的疲劳条带与二次裂纹,且二次裂纹平行于疲劳条带。瞬断区的断口形貌与图 9(b)所示的拉伸断裂断口形貌一致,为典型的韧窝状,如图 12(c)所示。

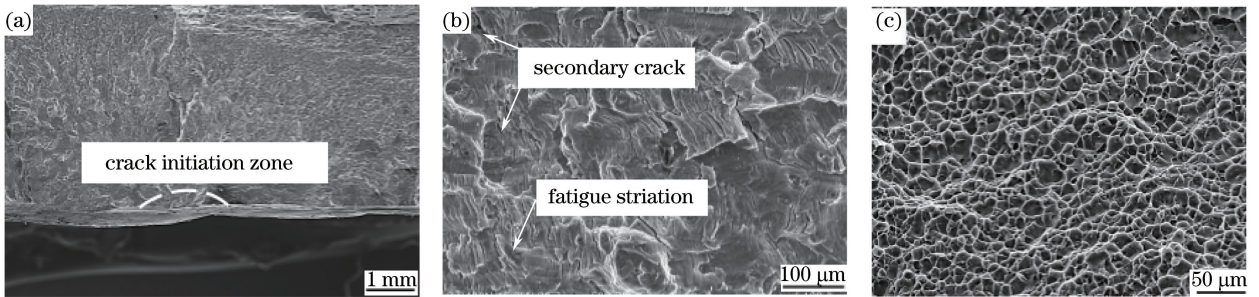


图 12 疲劳断口形貌 SEM 图。(a)疲劳裂纹萌生区;(b)疲劳裂纹扩展区;(c)瞬断区

Fig. 12 SEM image of fatigue fracture morphology. (a) Fatigue crack initiation zone;

(b) fatigue crack growth zone; (c) transient zone

## 4 结 论

采用光纤激光-变极性 TIG 复合填丝焊接工艺焊接 A7N01 铝合金,通过使用优化的焊接工艺参数,得到成形较好的焊缝,焊接接头无明显的气孔、裂纹等缺陷。焊态条件下的接头抗拉强度均值约为 320 MPa,为母材的 75%,自然时效 30 天后,抗拉强度提高到母材的 83%。拉伸试样断裂于焊缝处,断口轮廓线与拉伸方向成 45°,断口呈韧窝状,为典型韧性断裂。复合焊接接头的疲劳极限为 115 MPa。疲劳裂纹萌生在焊

缝上表面的焊趾应力集中处,裂纹沿晶扩展。深入研究复合焊接接头的显微组织演变、抗拉强度、疲劳性能及疲劳断裂特征形貌,对提高激光-变极性 TIG 复合填丝焊接铝合金工艺的焊接质量有一定指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 Nakai M, Eto T. New aspects of development of high strength aluminum alloys for aerospace applications[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2000, 285(1): 62-68.
- 2 Deng Bo, Zhong Yi, Qi Huarong, *et al.* Experiment on high speed reverse-extrusion of 7N01 aluminum alloy[J]. *Yunnan Metallurgy*, 2006, 35(4): 50-52.  
邓 波, 钟 毅, 起华荣, 等. 7N01 铝合金高速反向挤压实验研究[J]. *云南冶金*, 2006, 35(4): 50-52.
- 3 Liu Juncheng, Jin Longbin, He Zhenbo, *et al.* Hot deformation behavior of 7N01 aluminum alloy[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2011, 35(6): 812-817.  
刘君城, 金龙兵, 何振波, 等. 7N01 铝合金热压缩流变行为研究[J]. *稀有金属*, 2011, 35(6): 812-817.
- 4 Kalita S J. Microstructure and corrosion properties of diode laser melted friction stir weld of aluminum alloy 2024 T351 [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(9): 3985-3997.
- 5 Zuo Tiechuan. Laser materials processing of high strength aluminum alloys [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.  
左铁钊. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- 6 Zhu Jialei, Xu Shilong, Jiao Xiangdong, *et al.* Study on laser lap welding of 304 stainless steel sheet [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 071404.  
朱加雷, 徐世龙, 焦向东, 等. 304 不锈钢薄板激光搭接焊工艺研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 071404.
- 7 Liu Dongyu, Li Dong, Li Kaibin, *et al.* Influence of laser with same line energy on the microstructure and properties of welded [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 101404.  
刘东宇, 李 东, 李凯斌, 等. 相同激光光线能量对焊缝组织和性能的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 101404.
- 8 Gao M, Zeng X Y, Yan J, *et al.* Microstructure characteristics of laser-MIG hybrid welded mild steel [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(18): 5715-5721.
- 9 Tao Chuanqi, Wang Ren, Cui Yunlong. Comparison of 15 mm thick A7N01 aluminum alloy MIG with laser-MIG composite welding [J]. *Electric Welding Machine*, 2015, 45(1): 108-110.  
陶传琦, 汪 认, 崔云龙. 15 mm 厚 A7N01 铝合金 MIG 与激光-MIG 复合焊接对比[J]. *电焊机*, 2015, 45(1): 108-110.
- 10 Wang Xiaonan, Chen Changjun, Zhu Guangjiang, *et al.* Research progress on laser-arc hybrid welding of steel [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(3): 030008.  
王晓南, 陈长军, 朱广江, 等. 钢铁材料激光-电弧复合焊接技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(3): 030008.
- 11 Vaidya W V, Angamuthu K, Koçak M, *et al.* Strength and fatigue resistance of laser-MIG hybrid butt welds of an airframe aluminium ally AA6013 [J]. *Welding in the World*, 2006, 50(11): 88-97.
- 12 Yan S H, Nie Y, Zhu Z T, *et al.* Characteristics of microstructure and fatigue resistance of hybrid fiber laser-MIG welded Al-Mg alloy joints [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 298(15): 12-18.
- 13 Ghosh P K, Gupta S R, Gupta P C, *et al.* Fatigue characteristics of pulsed MIG welded Al-Zn-Mg alloy [J]. *Journal of Materials*, 1991, 26(22): 6161-6170.
- 14 Li Fei. Study on the technology and mechanism of 5083 aluminum alloy fiber laser TIG hybrid welding [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.  
李 飞. 5083 铝合金光纤激光-变极性 TIG 复合焊接工艺及机理研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- 15 Wang Qiming, Qiao Junnan, Zou Jianglin, *et al.* Fiber laser-VPTIG hybrid welding of A7N01 aluminum alloy with filler wire [J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(6): 0602004.  
王启明, 乔俊楠, 邹江林, 等. A7N01 铝合金光纤激光-变极性 TIG 复合填丝焊接工艺研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0602004.
- 16 Kong Xiaofang, Li Fei, Lü Junxia, *et al.* Welding process of 5083 aluminum alloy fiber laser with filler wire [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1003007.  
孔晓芳, 李 飞, 吕俊霞, 等. 5083 铝合金光纤激光填丝焊接工艺[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1003007.



- 17 Berg L K, Gjønnes J, Hansen V, *et al.* GP-zones in Al-Zn-Mg alloys and their role in artificial aging [J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(17): 3443-3451.
- 18 Zhang Jianbo, Zhang Yong'an, He Zhenbo, *et al.* Effect of natural aging on microstructure and properties of 7N01 aluminum alloy[J]. *Rare Metals*, 2012, 36(2): 191-195.  
张建波, 张永安, 何振波, 等. 自然时效对 7N01 铝合金组织和性能的影响[J]. *稀有金属*, 2012, 36(2): 191-195.
- 19 Wu Peiqing. Effect of heat treatment on the properties of 7N01 aluminum alloy[D]. Changsha: Central South University, 2000.  
邬沛卿. 热处理制度对 7N01 铝合金性能的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2000.
- 20 Srivatsan T S, Kolar D, Magnusen P. The cyclic fatigue and final fracture behavior of aluminum alloy 2524[J]. *Material & Design*, 2002, 23(2): 129-139.