

# A7N01 铝合金光纤激光-变极性 TIG 复合填丝 焊接工艺研究

王启明 乔俊楠 邹江林 吴世凯 肖荣诗

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

**摘要** 采用光纤激光-变极性 TIG 复合填丝焊接 4 mm 厚的 A7N01 铝合金,研究了焊接电流、焊接速度对焊缝成形及气孔的影响规律,同时分析了优化工艺参数条件下焊接接头的显微组织和力学性能。结果表明,随着焊接电流的增加,焊缝正面熔宽增加,背面熔宽基本不变;而焊接速度降低,焊缝正面和背面熔宽均增加,焊缝内部气孔减少;且在激光功率为 6 kW、焊接电流为 180 A、焊接速度为 4 m/min、送丝速度为 4 m/min 时,获得成形良好内部无缺陷的焊接接头;焊缝横截面呈典型的上宽下窄的特征,从熔合线至焊缝中心,焊缝显微组织依次为细小等轴晶、柱状晶、等轴树枝晶形态,且焊缝中心的等轴树枝晶晶粒尺寸自上而下逐渐减小,二次枝晶逐渐弱化;焊缝区的硬度值低于母材,存在接头软化现象,其接头抗拉强度均值为 369.8 MPa,约为母材的 83%,延伸率约为 4.0%,拉伸断裂于焊缝区,拉伸断口呈典型的韧性断裂特征。

**关键词** 激光光学;激光技术;变极性 TIG;复合焊接;A7N01 铝合金;气孔;显微组织和力学性能

**中图分类号** TN249; TG456.7

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0602004

## Fiber Laser-Variable Polarity TIG Hybrid Welding of A7N01 Aluminum Alloy with Filler Wire

Wang Qiming Qiao Junnan Zou Jianglin Wu Shikai Xiao Rongshi

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

**Abstract** A7N01 aluminum alloy with the thickness of 4 mm is welded by using fiber laser-variable polarity TIG hybrid welding with filler wire. The effects of both welding current and welding speed on weld formation and porosities are discussed. The microstructure and mechanical properties of the joint obtained at optimal welding parameters are investigated. Experimental results show that the top weld width increases and the bottom weld width is unchanged with the increase of the welding current. With the welding speed decreasing, both the top and the bottom width increase, and the internal porosities decreases. Under the condition of laser power of 6 kW, welding current of 180 A, welding speed of 4 m/min and wire feeding rate of 4 m/min, the joint with good formation and few welding defects is obtained. Weld cross section is characterized by the wide top weld width and narrow bottom weld width. The microstructure of the joint is composed of equiaxed grain zone, columnar zone and equiaxed dendrite zone from the fusion line to the center of weld. The sizes of the grains and equiaxed dendrites from the top to the bottom are gradually reduced along the weld centerline. The fusion zone hardness is lower than that of the base metal, which indicates that the soften zone is occurred in the joint. The average tensile strength of joints is 369.8 MPa, which is approximately 83% of the base metal. And the extension rate is about 4%. The tensile fracture occurs in the weld zone, and the fracture morphology is distinctly ductile characteristics.

**Key words** laser optics; laser technique; variable polarity TIG; hybrid welding; A7N01 aluminum alloy; porosity;

**收稿日期:** 2016-01-18; **收到修改稿日期:** 2016-03-02

**基金项目:** 国家自然科学基金(51275013)、北京市自然科学基金(3142006)

**作者简介:** 王启明(1987—),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: wqm570168@126.com

**导师简介:** 吴世凯(1976—),男,博士,硕士生导师,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)

microstructure and mechanical property

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

## 1 引 言

采用轻质铝合金代替传统钢铁材料是实现轨道列车轻量化的有效途径。A7N01 铝合金是一种专门为高速列车研发的新型铝合金,属于 Al-Zn-Mg 系热处理强化铝合金,具有良好的成型性、焊接性及综合力学性能,大量应用于高速列车铝合金车体生产制造<sup>[1]</sup>。当前,铝合金车体的焊接主要采用传统的电弧焊,但焊后容易产生严重的焊接变形及接头软化等问题<sup>[2]</sup>。激光焊接具有能量密度高、焊接速度快、焊后热影响区窄等优点,因此铝合金的激光焊接受到越来越多的关注<sup>[3]</sup>。但 A7N01 铝合金含有大量的低熔点、低沸点 Mg、Zn 等合金元素,激光焊接过程中合金元素的烧损、蒸发容易导致焊接过程不稳定,造成焊缝表面成形差及气孔等缺陷,带来接头力学性能的恶化<sup>[3-4]</sup>。

激光电弧复合焊接技术利用了激光焊的能量密度高、焊接速度快、热输入低的优点,同时电弧的加入提高了焊接接头的间隙适应性及焊接过程的稳定性<sup>[5-6]</sup>,可有效改善铝合金激光焊接表面成形差及气孔等缺陷<sup>[7-8]</sup>。黎硕等<sup>[9]</sup>研究了光纤激光-MIG 复合焊接 5754 铝合金,发现复合焊接头中氢气孔产生倾向较单电弧焊接大,工艺性气孔产生倾向较单激光焊小。陈彦宾等<sup>[10]</sup>研究了铝合金激光-钨极氩弧(TIG)双面焊接特性,获得了稳定可靠的焊接过程与美观焊缝,焊缝气孔数量较激光焊下降。李飞等<sup>[11]</sup>研究了光纤激光-变极性 TIG 复合焊接 4 mm 厚 5083 铝合金,采用激光在前电弧在后的焊接方向,获得了稳定的焊接过程及成形良好的焊缝,且焊缝无气孔、裂纹等缺陷。研究结果<sup>[11-12]</sup>表明光纤激光-变极性 TIG 复合焊接铝合金具有明显的技术优势,一方面光纤激光光束质量更高,热输入更少,同时光纤激光的波长短,和电弧耦合时对电弧的形态影响较小,能进一步提高电弧的稳定性;另一方面变极性 TIG 电源的正、负半波电流幅值和作用时间均可调,在满足阴极清理作用的同时能最大限度地降低钨极的烧损,同时变极性 TIG 电流过零的速度较快,避免了交流变极性时电弧易熄灭现象,提高了电弧的稳定性。

本文采用光纤激光-变极性 TIG 填丝复合焊接 A7N01 铝合金,主要研究了焊接电流、焊接速度等复合焊接工艺参数对焊缝表面成形及焊缝内部气孔的影响规律,探讨了复合焊接过程气孔得到抑制的原因。通过工艺参数优化,获得了成形良好内部无缺陷的复合焊接接头,在此基础上对复合焊接接头的显微组织和力学性能进行了分析。

## 2 试验材料及方法

### 2.1 试验材料

采用厚度为 4 mm 的 A7N01 铝合金,其热处理状态为 T4 态,所有试验均采用对接焊,焊接试样尺寸为 200 mm×100 mm×4 mm,填充焊丝为直径 1.2 mm 的 ER5356 焊丝,母材(BM)和焊丝的化学成分如表 1 所示。

表 1 A7N01 铝合金及 ER5356 焊丝化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition 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

### 2.2 试验方法

试验采用光纤激光-变极性 TIG 旁轴复合方式,复合焊接装置示意图如图 1 所示,焊接方向采用激光在前电弧在后,KUKA 焊接机械手实现焊接运动过程。激光器选用 IPG YLS-6000 光纤激光器,波长为 1060~1070 nm,光纤传输芯径为 200 μm,输出耦合准直镜的焦距为 200 mm,聚焦镜焦距为 250 mm。焊接时焦点位于母材表面,光斑直径为 0.25 mm,激光功率为 6 kW。焊接电源选用为福尼斯 Magic Wave3000job 焊机,变极性 TIG 参数为带圆角的矩形方波,频率为 60 Hz,占空比为 68%,基值电流为 30%。钨极选用直径为 2.4 mm 钨钨极(2% Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),干伸长度约 3~5 mm,钨极尖端距工件表面距离约为 2.5 mm。激光和电弧的热源间距约为

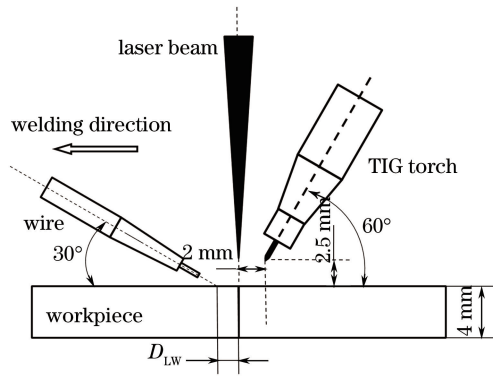


图 1 复合焊接装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hybrid welding

2 mm, 光丝间距  $D_{LW}$  约为 1 mm, 焊接保护气体为 Ar 气, 正面和背面保护气流量均为 10 L/min。

焊前采用化学清洗方法去除母材表面氧化膜, 依次采用饱和氢氧化钠溶液碱洗、水洗、30% 硝酸水溶液酸洗、水洗, 化学清洗后 24 h 内施焊。焊接前用刮刀刮削试样焊接区, 直至试样表面露出金属光泽。焊后对试样进行 X 光无损检测。截取焊缝横截面, 制备金相试样, 采用 Keller 试剂腐蚀焊缝横截面。采用 OLYMPUS SZ61 体视镜采集焊缝横截面形貌, OLYMPUSGX51 金相显微镜及日立 S-3400N 型扫描电镜 (SEM) 观察分析接头微观组织形貌。采用 FM-300e 型硬度仪测试接头显微硬度, 载荷为 100 g, 加载 15 s。采用 MTS 370 Load Frame 型材料试验机测试接头拉伸性能, 拉伸试样尺寸如图 2 所示。并用扫描电镜观察分析拉伸断口。

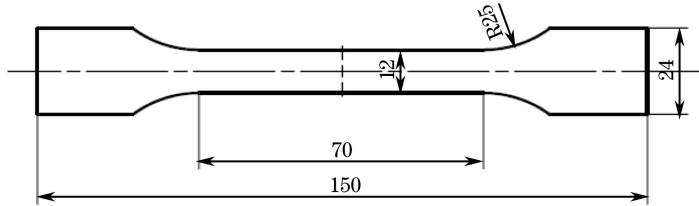


图 2 拉伸试样的尺寸

Fig. 2 Size of the tensile sample

### 3 试验结果和分析

#### 3.1 焊接工艺参数对焊缝成形的影响

影响复合焊接焊缝成形的工艺参数主要有激光功率  $P$ 、焊接速度  $V$ 、送丝速度  $V_s$ 、焊接电流  $I$ 、光丝间距  $D_{LW}$ 。前期实验研究发现焊接电流和焊接速度对焊缝成形影响较大, 因此下面主要讨论焊接电流和焊接速度对焊缝成形的影响。

焊接速度 ( $V=V_s=6$  m/min) 固定不变时, 焊接电流改变对焊缝成形的影响如图 3(a) 所示。从图中可以看出, 当焊接电流为 90 A 时, 焊缝表面较粗糙, 焊缝成形质量不高; 随着焊接电流的增大, 焊缝表面成形质量逐渐改善, 焊缝余高减小; 当焊接电流增大到 180 A 时, 此时形成的焊缝表面具有明亮的金属光泽和均匀的鱼鳞纹, 焊缝成形质量较好。同时随着焊接电流的增加, 焊缝正面熔宽明显增大, 焊缝背面熔宽变化不大。分析认为复合焊接过程中, 电弧热源作用于焊件表面, 焊件上部温度高, 电弧热量更多的作用于上部金属的熔化, 因此焊接电流对焊缝正面熔宽影响显著。

而焊接电流 ( $I=180$  A) 固定不变时, 焊接速度改变对焊缝成形的影响如图 3(b) 所示。从图中可以看出, 随焊接速度的降低, 焊缝背部越来越光滑均匀, 焊缝正面和背面熔宽均明显增大; 但当焊接速度达到 3 m/min 时, 焊接熔池过宽, 金属溶液在重力作用下产生下塌, 焊后焊缝正面出现凹陷。

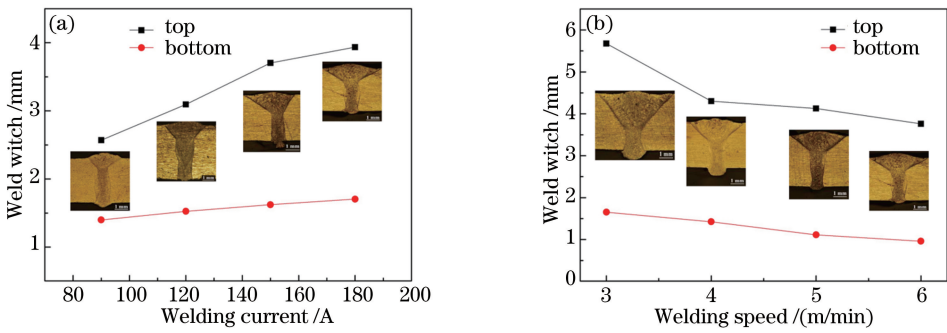


图 3 (a)焊接电流和(b)焊接速度对焊缝熔宽的影响

Fig. 3 Influence of (a) welding current and (b) welding speed on weld width

### 3.2 焊接速度对焊缝气孔的影响

工艺试验过程中发现气孔是 A7N01 铝合金激光焊接的突出问题,气孔的存在对接头力学性能产生不利影响。其气孔特征主要分为氢气孔和工艺性气孔,其中氢气孔的产生主要与熔池中氢的析出、聚集和合并有关,减少氢的来源可以有效抑制氢气孔的产生<sup>[13]</sup>。试验中通过严格清理母材表面的氧化膜可以有效抑制焊缝中氢气孔的产生。而工艺性气孔的形成主要与焊接过程中小孔的失稳有关<sup>[14]</sup>。

图 4 为实验中 A7N01 铝合金焊缝中工艺性气孔的典型特征及分布。从图中可以看出,工艺性气孔形状不规则、内壁较粗糙,一般分布于焊缝中、下部,尺寸较大,通常大于 0.5 mm。分析认为焊接过程中,小孔根部失稳,熔池中金属溶液在重力及表面张力作用下产生塌陷,小孔上部开口闭合,小孔下部金属蒸气、保护气及少量侵入小孔的空气被保留下来,形成气泡,而复合焊接速度快,熔池冷却凝固快,气泡来不及逸出,从而在焊缝的中下部形成不规则的工艺性气孔。尺寸较大的工艺性气孔对焊缝力学性能影响很大。前期试验研究发现焊接速度与焊缝中工艺性气孔的形成有较大的相关性。

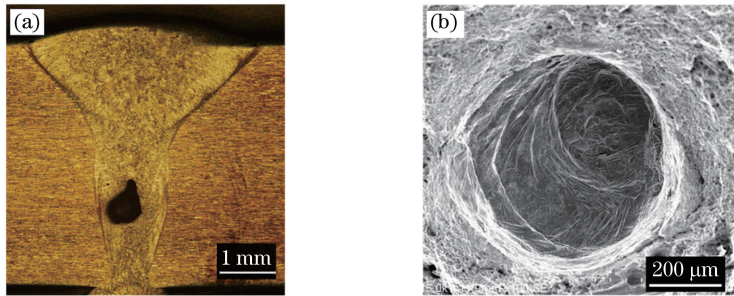


图 4 焊缝气孔。(a) 宏观特征;(b) 内部形貌

Fig. 4 Weld porosity. (a) Macro feature; (b) internal morphology

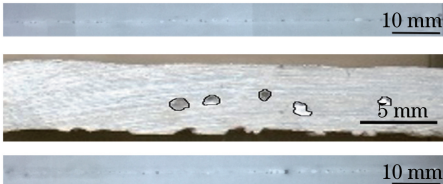


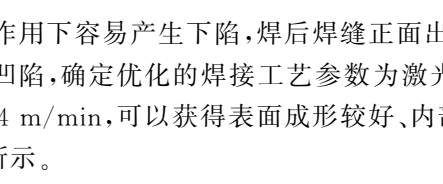
表 2 为当其他工艺参数不变且  $V=V_s$  时,焊缝中气孔随焊接速度变化的规律。对比表中不同焊接速度下焊缝 X 射线无损探伤底片可以看出,随着焊接速度的降低,焊缝中的气孔数量减小。为了进一步研究焊缝中气孔的大小及分布规律,截取不同焊接速度下焊缝纵截面各 6 组,每组长约 30 mm,通过 Photoshop 软件对焊缝纵截面进行图像处理,计算纵截面中气孔总面积占焊缝总面积的百分比。表 2 中焊缝纵截面为不同焊接速度下气孔数最多、尺寸最大截面及气孔率平均值。从表中可以看出,随着焊接速度的降低焊缝平均气孔率减小,焊缝中工艺性气孔的数量及大小都有减小趋势。

分析认为,在焊缝完全焊透的条件下,形成稳定的穿透焊小孔,有利于减小焊缝中的工艺性气孔<sup>[15-16]</sup>。从图 3 可以看出,随着焊接速度降低,焊缝背部熔宽逐渐增加。当焊接速度为 6 m/min 时,焊缝背部熔宽较窄,此时还没有形成稳定的穿透焊,表 2 中 X 光底片显示焊缝中存在较多的气孔。随着焊接速度的降低,焊缝背部熔宽增加,小孔穿透程度逐渐增加,小孔由未完全穿透或临界穿透变为完全穿透。当小孔完全穿透时,金属蒸气同时从上下表面喷发,形成稳定的喷发通道,从而提高小孔的稳定性和焊接过程的稳定性,有利于消除焊缝中工艺性气孔。且背部熔宽越大,小孔穿透越充分,金属蒸气逸出的通道越大,焊接过程越稳定,工艺性气孔越少。因而在本实验条件下,焊接速度降低,焊缝中工艺性气孔减少,焊缝气孔率减小。



表 2 焊接速度对焊缝气孔的影响

Table 2 Influence of welding speed on weld porosity

Welding speed /(m/min)	X-ray inspection and vertical section of bead	Average porosity rate /%
$V=V_s=6$		1.86
$V=V_s=5$		1.44
$V=V_s=4$		0.34
$V=V_s=3$		0

但背部熔宽过大,熔池在重力作用下容易产生下陷,焊后焊缝正面出现凹陷。因此在焊接工艺参数优化过程中,综合考虑抑制气孔和消除凹陷,确定优化的焊接工艺参数为激光功率为 6 kW、焊接电流为 180 A、焊接速度为 4 m/min、送丝速度为 4 m/min,可以获得表面成形较好、内部无气孔缺陷的复合焊接接头,焊缝表面成形及 X 光探伤结果如图 5 所示。

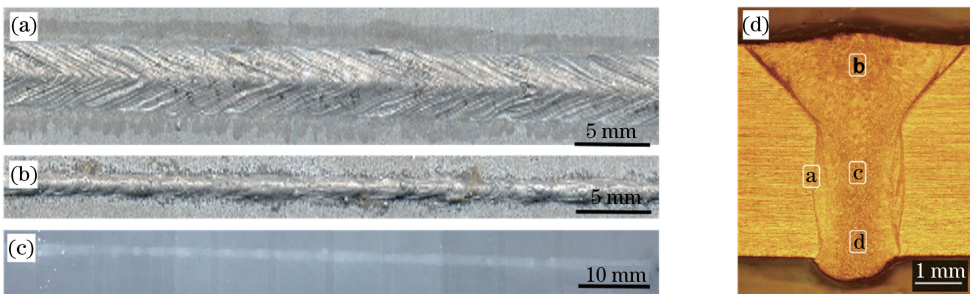


图 5 优化参数条件下的焊缝形貌。(a) 焊缝正面; (b) 焊缝背面; (c) X 光探伤底片; (d) 焊缝横截面  
Fig. 5 Weld morphology with optimized parameters. (a) Face of weld; (b) back of weld;  
(c) X-ray inspection; (d) cross section

### 3.3 接头显微组织分析

图 5(d)为优化工艺参数下焊缝横截面的宏观形貌,焊缝呈上宽下窄的典型特征。焊缝上部与单 TIG 焊缝形貌相似,呈漏斗状,焊缝中下部分则与单激光焊接的焊缝形貌相似。这是由于电弧作用于熔池表面,电弧的热量更多地作用于焊缝上部分,使得焊缝上部熔宽增加,而焊缝中下部的熔透则更多依靠激光能量完成,故焊缝呈现上宽下窄的特征。

观察焊缝金相组织,母材为典型的轧制组织,晶粒沿轧制方向呈条状分布。从熔合线至焊缝中心,焊缝组织形态依次为细小等轴晶(EQZ)、柱状晶、等轴树枝晶,如图 6 所示。熔合线附近的细小等轴晶区的形成主要是母材中未熔化的第二相颗粒在凝固过程中提供了大量的异质形核点,且熔合线处冷却速度快,大量异质形核的晶粒生长受到抑制,从而形成了细小的等轴晶区。同时这种细小等轴晶阻碍了外延柱状晶的生长,柱状晶以联生结晶的方式向焊缝中心生长,直到大量溶质元素向熔池中心聚集,熔池成分过冷增加,柱状晶生长受到抑制,大量柱状晶转变为树枝晶<sup>[17]</sup>。

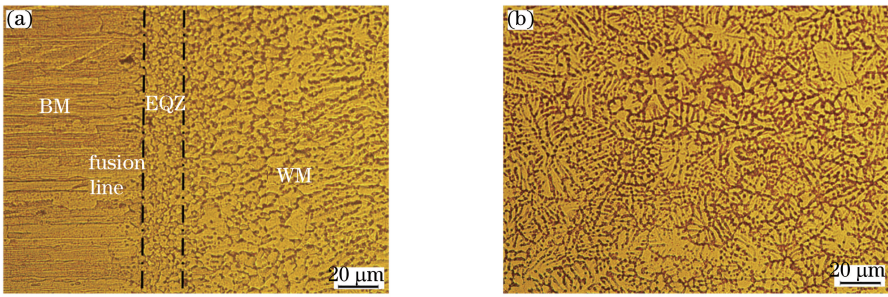


图 6 复合焊接接头显微组织。(a) 熔合线附近；(b) 焊缝中心

Fig. 6 Microstructure of the hybrid welding joint. (a) Near the fusion line; (b) weld center

对比焊缝中心线上、中、下不同部位组织特征,如图 7 所示。结果显示,焊缝中心线处组织自上而下,等轴树枝晶晶粒尺寸逐渐减小,且二次枝晶逐渐弱化。焊缝上部等轴树枝晶的二次枝晶粗大,焊缝中部等轴树枝晶的二次枝晶有所弱化,而下部等轴树枝晶区晶粒明显细化,基本没有二次枝晶。由于 TIG 电弧的能量主要作用于熔池上部,从而造成复合热源的能量分布不均,焊缝上、下部分受热和冷却条件存在差异,焊缝从上至下所受热输入逐渐减小,冷却速度加快,冷却梯度增大,从而导致焊缝晶粒尺寸逐渐减小。

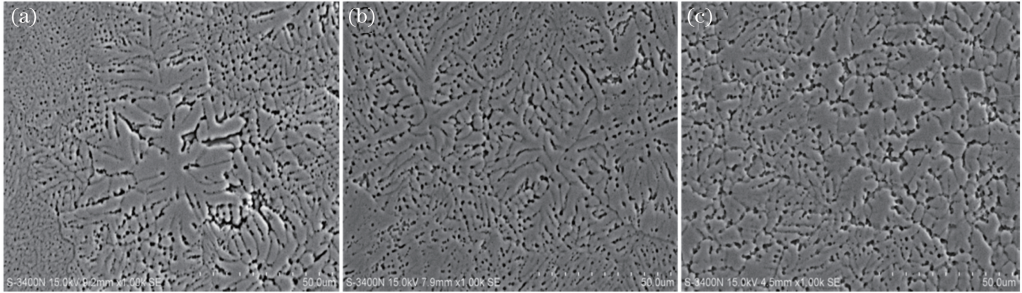


图 7 焊缝中心线处组织。(a) 焊缝上部；(b) 焊缝中部；(c) 焊缝下部

Fig. 7 Microstructure around the weld centerline. (a) Top zone; (b) center zone; (c) bottom zone

### 3.4 接头力学性能分析

#### 3.4.1 接头显微硬度

焊接接头横截面上下不同部位的显微硬度分布如图 8 所示。接头硬度以焊缝中心线呈对称分布,且焊缝区(WM)硬度最低,热影响区(HAZ)次之,母材硬度最高,存在明显的接头软化现象。同时,由于电弧热的加入,焊缝两侧的热影响区较宽,约为 5 mm。分析认为母材为 T4 态,经固溶处理后自然时效,焊接过程使得原热处理强化效果消失。同时,焊缝中的 Mg、Zn 等合金元素的熔点和沸点较低,焊接过程中发生严重的烧损,焊缝中主要强化相  $MgZn_2$  的来源减少,导致焊缝区出现明显的软化<sup>[4]</sup>。而热影响区的软化则主要是该区域发生了过时效<sup>[4]</sup>。

同时,从图 8 可以看出,接头上部电弧作用区硬度分布要低于下部激光作用区硬度,焊缝上部的热影响

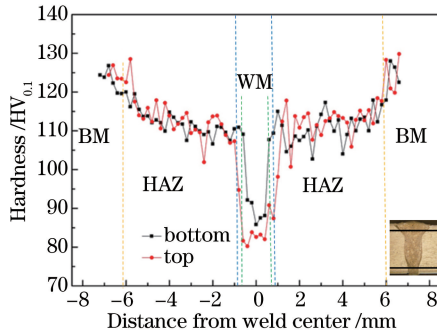


图 8 接头显微硬度分布

Fig. 8 Micro-hardness profile of welding joint

区范围较下部大。由于电弧更多地作用于焊缝上部,焊缝上部的热输入大于焊缝下部,且通过图 7 的组织分析可看出,焊缝上部晶粒尺寸明显大于焊缝下部,所以焊缝上部硬度低于焊缝下部。

### 3.4.2 接头拉伸性能

分别对接头和母材进行拉伸试验,接头拉伸试样和母材拉伸试样各取 4 组,拉伸数据取平均值。拉伸试验结果表明,母材抗拉强度在 439.2~441.3 MPa 范围内,母材平均抗拉强度约为 439.9 MPa。接头抗拉强度在 366.9~375.1 MPa 范围内,接头平均抗拉强度约为 369.8 MPa,约为母材的 83%,延伸率约为 4%。接头均断裂于焊缝位置,断口轮廓与拉伸轴线方向近似成 45°,焊缝在断裂位置处发生了明显的缩颈现象,如图 9(a)所示。受到晶界偏析的影响,晶界处能量较低,断裂路径优先选择在焊缝内部发生晶间断裂,焊缝区为接头薄弱位置。对拉伸试样断口进行 SEM 观察,焊缝断口存在大量等轴韧窝,且韧窝底部含有第二相颗粒状物质,表现出明显的微孔聚集性韧性断裂特性,如图 9(b)所示。

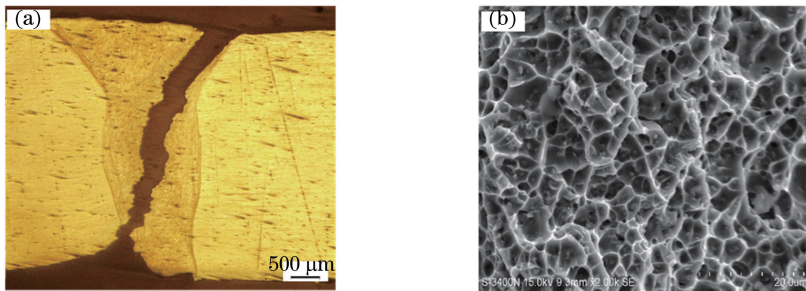


图 9 复合焊接拉伸断口。(a) 断裂横截面; (b) 断口形貌

Fig. 9 Fracture of hybrid welding joint. (a) Cross section; (b) fracture morphology

## 4 结 论

采用光纤激光-变极性 TIG 复合填丝焊接 A7N01 铝合金,可有效改善焊缝表面成形。在合适的工艺窗口范围内,焊缝中工艺性气孔得到了消除。在激光功率为 6 kW、焊接电流为 180 A、焊接速度为 4 m/min、送丝速度为 4 m/min 时,获得了成形良好、内部无缺陷的焊接接头,接头抗拉强度均值为 369.8 MPa,约为母材的 83%,延伸率约为 4.0%。接头拉伸均断裂于焊缝位置,焊缝区为接头薄弱位置,焊缝断口存在大量等轴韧窝,表现出明显的韧性断裂特性。焊缝组织主要熔合线附近细小等轴晶、柱状晶和位于焊缝中心的等轴树枝晶构成,焊缝中心的等轴树枝晶晶粒尺寸自上而下逐渐减小,且二次枝晶逐渐弱化。

## 参 考 文 献

- Liu Juncheng, Jin Longbing, 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.
- Shang L Y, Qing L L. Microstructures and properties of the Al-4.5Zn-1.5Mg-0.5Mn aluminum alloy welding joints[J]. Advanced Materials Research, 2011, 148-149: 640-643.
- Katayama S, Nagayama H, Mizutani M, *et al.*. Fibre laser welding of aluminium alloy[J]. Welding International, 2009, 23(10): 744-752.
- Katayama S, Ogawa K. Laser weldability and ageing characteristics of welds: Laser weldability of commercially available A7N01 alloy (1)[J]. Welding International, 2013, 27(3): 172-183.
- Chen Yang, Wu Shikai, Xiao Rongshi. Microstructure and performance of CO<sub>2</sub>-MIG hybrid welding of SUS301L stainless steel[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0103004.  
陈 洋, 吴世凯, 肖荣诗. SUS301L 不锈钢 CO<sub>2</sub> 激光-MIG 复合焊接接头组织性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0103004.
- Lei Zhenglong, Tan Caiwang, Chen Yanbin, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of X80 pipeline steel backing welded joint by fiber laser-MAG hybrid welding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0403002.  
雷正龙, 檀财旺, 陈彦宾, 等. X80 管线钢光纤激光-MAG 复合焊接打底组织及性能[J]. 中国激光, 2013, 40(4):



0403002.

- 7 Xiao Rongshi, Wu Shikai. Progress on laser-arc hybrid welding[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1680-1685.  
肖荣诗, 吴世凯. 激光-电弧复合焊接的研究进展[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1680-1685.
- 8 Fujinaga S, Ryoji O, Seiji K, *et al.*. Improvements of welding characteristics of aluminum alloys with YAG laser and TIG arc hybrid system[C]. Proceeding of SPIE. 2003, 4831: 301-306.
- 9 Li Shuo, Wang Jun, Yang Shanglu, *et al.*. Study on porosity defects of aluminum alloy in laser-MIG hybrid welding[J]. Applied Laser, 2013, 33(6): 595-600.  
黎 硕, 王 军, 杨上陆, 等. 铝合金激光-MIG 复合焊接气孔缺陷研究[J]. 应用激光, 2013, 33(6): 595-600.
- 10 Chen Yanbin, Miao Yugang, Li Liqun, *et al.*. Characteristics of laser-TIG double-side welding for Aluminum alloys[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(12): 1716-1720.  
陈彦宾, 苗玉刚, 李俐群, 等. 铝合金激光-钨极氩弧双面焊的焊接特性[J]. 中国激光, 2007, 34(12): 1716-1720.
- 11 Li Fei, Kong Xiaofang, Wu Shikai, *et al.*. Study on fiber laser-VPTIG hybrid welding process of 5083 Aluminum alloy with filler wire[J]. Applied Laser, 2014, 34(3): 222-227.  
李 飞, 孔晓芳, 吴世凯, 等. 5083 铝合金光纤激光-变极性 TIG 复合填丝焊接工艺研究[J]. 应用激光, 2014, 34(3): 222-227.
- 12 Li Fei, Zou Jianglin, Kong Xiaofang, *et al.*. Experimental research on high power fiber laser-TIG hybrid welding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0503004.  
李 飞, 邹江林, 孔晓芳, 等. 高功率光纤激光-TIG 复合焊接试验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0503004.
- 13 Yao W, Gong S L. Porosity formation mechanisms and controlling technique for laser penetration welding[J]. Advanced Materials Research, 2011, 287-290: 2191-2194.
- 14 Matsunawa A, Kim J D, Seto N, *et al.*. Dynamics of keyhole and molten pool in laser welding [J]. Journal of Laser Application, 1998, 10(6): 247-254.
- 15 Yu Y C, Wang C M, Hu X Y, *et al.*. Porosity in fiber laser formation of 5A06 aluminum alloy[J]. J Mechanical Science and Technology, 2010, 24(5): 1077-1082.
- 16 Wang Jun. Study on the technology and plasma behavior during the fiber laser and laser hybrid welding of aluminum alloy [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.  
王 军. 铝合金光纤激光及其复合焊接的等离子体行为与工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- 17 Xu Lianghong, Tian Zhiling, Peng Yun, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of high strength Aluminum alloy laser welds[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(3): 456-461.  
许良红, 田志凌, 彭 云, 等. 高强铝合金的激光焊接头组织及力学性能[J]. 中国激光, 2008, 35(3): 456-461.