

# 铝合金激光 - TIG 复合焊热输入对组织及性能的影响

马国龙<sup>1</sup>, 雷振<sup>2</sup>, 马寅<sup>1</sup>, 徐良<sup>2</sup>, 韩晓辉<sup>1</sup>

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 青岛 266111; 2. 哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨 150028)

**摘要:** 研究了激光 - TIG 复合焊在不同热输入下焊缝成形、接头拉伸性能、断口特征、接头硬度特征及接头金相特征。试验结果表明, 在文中试验条件下: +7 mm 离焦量的热输入是 +5 mm 离焦量的 1.6 倍, 大热输入下, 焊缝变得宽大; +7 mm 离焦量下焊缝背面宽度是 +5 mm 离焦量的 1.2 倍, 接头拉伸性能下降, +5 mm 离焦量和 +7 mm 离焦量下抗拉强度分别为母材的 88% 和 82%, 断后伸长率分别为母材的 96% 和 48%; 大热输入下, 断口处韧窝较为平浅, 显微硬度降低; 热输入较小时, 无论是焊缝还是熔合区, 第二相析出点数量多而细小而且呈弥散分布; 热输入较大时, 焊缝及熔合区的第二相质点数量较少且尺寸较大, 即焊缝及熔合区的第二相质点聚集长大。

**关键词:** 激光 - TIG 复合焊; 热输入; 铝合金; 组织; 性能

**中图分类号:** TG456.7

## 0 前言

5A06 铝合金是不可热处理强化的铝镁系合金, 具有较高的比强度, 良好的耐蚀性、塑性及优异的机械加工性能等一系列优点, 使其在高速列车、航空航天等领域有着广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。

钨极氩弧焊 (Tungsten inert gas welding, TIG) 电弧稳定, 能实现高品质焊接, 得到优良的焊缝, 但 TIG 作为电弧焊的一种, 具有着电弧焊所共有的缺点: TIG 焊接速度较低, 因而对接头的热输入较大, 容易导致较大的焊接变形, 造成焊接接头组织粗大、热影响区宽、性能弱化等一系列的缺点<sup>[3-5]</sup>。

激光 - TIG 复合填丝焊接工艺充分利用了激光和电弧的优势, 避免单激光和单 TIG 焊接的一些缺点, 大大提高了焊接过程的稳定性, 提高了接头的质量及焊接效率, 降低了工件加工、装配要求<sup>[6-7]</sup>, 在铝合金焊接结构方面应用越来越广泛。

焊接热输入是焊接工艺的一个很重要的概念, 关系着焊缝能否成形, 关系着焊缝的组织及焊缝最终的性能。热输入适当时, 则焊缝成形美观, 组织、性能优异; 热输入不当时, 焊缝往往是不成形的或者是焊接接头性能软化严重, 所以研究热输入对组织及性能的影响对于其焊接工艺有着重要的现实指导意义。为了提

升焊缝的强度, 国内外学者对激光 - TIG 复合填丝工艺进行了大量的研究, 大多集中于单激光或者单电弧的热输入对性能和组织的影响<sup>[8-9]</sup>, 对于激光 - TIG 复合焊接的热输入对铝合金性能及组织的影响较少, 该试验通过不同热输入对焊缝成形、性能及组织的影响, 为激光 - TIG 复合焊工艺的应用打下试验基础。

## 1 试验方法

试验采用自行设计的旁轴激光 - TIG 复合填丝焊接系统, 试验原理图如图 1 所示, 其中钨极与试验台面的夹角为 55°, 激光倾角为 15°, 钨极尖端距板材表面的高度为 3 mm, 试验所用激光器为 IPG 的 YLR - 6000 连续型输出 6 kW 光纤激光器, 其技术指标见表 1, 试验所用的电弧电源为 Fronius 的 MW4000 交直流 TIG 焊机, 钨极直径为 3.2 mm。

TIG 焊机选用交流模式, 电流采用纯矩形对称波

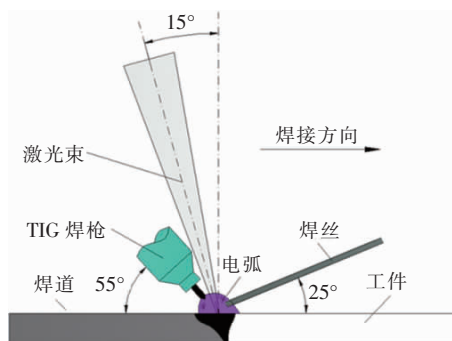


图 1 试验原理图

收稿日期: 2019 - 06 - 20

doi: 10.12073/j.hj.20190620003

表 1 光纤激光器的主要技术指标

型号	最大输出功率 $P_{\max}/\text{kW}$	波长 $\lambda/\mu\text{m}$	聚焦镜焦距 $f/\text{mm}$	光纤芯径 $d_1/\text{mm}$	光斑直径 $d_2/\text{mm}$
YLR-6000	6	1.06	300	0.4	0.4

形,频率为 60 Hz, 4 mm 厚铝合金板对接焊时,主保护气流量为 15 L/min,背面保护气流量为 15 L/min。试验材料为 5A06 铝合金,焊丝为  $\phi 1.2$  mm 的 ER5356,对接焊试板尺寸为 300 mm  $\times$  150 mm  $\times$  4 mm,采用 I 形坡口对接焊。

焊前对焊接位置进行去氧化膜处理:先用洗洁精去除试件表面的油污,再用清水冲洗干净;用 NaOH 浓溶液去除表面的氧化膜,再用清水冲洗干净;用稀硝酸

溶液清除表面的残留物,再用清水冲洗干净;吹干,施焊前对试件坡口及其附近采用丙酮擦拭。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 焊缝成形

对 4 mm 厚 5A06 铝合金进行激光-TIG 复合填丝焊接,激光在 +7 mm 离焦量和 +5 mm 离焦量下的优化工艺参数见表 2。

表 2 4 mm 厚 5A06 铝合金激光-TIG 复合填丝焊接工艺参数

离焦量 $\Delta l/\text{mm}$	激光功率 $P/\text{kW}$	焊接电流 $I/\text{A}$	焊接电压 $U/\text{V}$	焊接速度 $v/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	送丝速度 $v_f/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	光钨间距 $D/\text{mm}$
+7	5.2	150	25	1.0	7.5	3
+5	4.1	80	15	1.0	6.8	3

在该工艺下不仅能得到成形美观的焊缝,而且焊缝的 X 射线探伤结果基本无咬边、塌陷及气孔等缺欠,如图 2 和图 3 所示,达到 QJ 2698A—2011《铝及铝合金熔焊技术要求》I 级焊缝的标准。

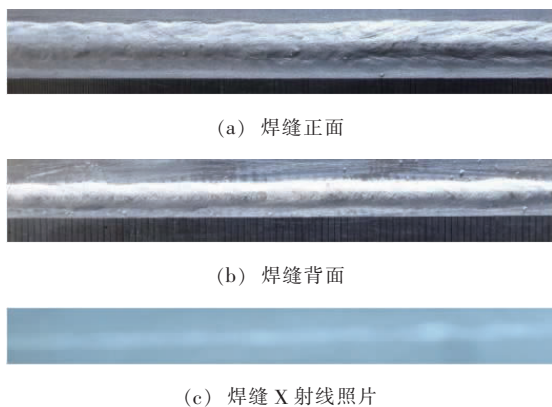


图 2 +5 mm 离焦量下激光-TIG 复合焊缝及 X 射线照片

焊接热输入可根据公式(1)求得:

$$E = P\eta/v \quad (1)$$

式中: $P$  为激光与 TIG 输出功率之和; $\eta$  为热效率; $v$  为焊接速度。

对于激光-TIG 复合焊,激光小孔效应会极大增加母材对焊接能量的吸收,激光-TIG 复合焊热效率近似于单激光深熔焊热效率,取  $\eta = 0.9$ ,由式(1)可得 +5 mm 离焦量下热输入约为  $2.9 \times 10^5$  J 和 +7 mm 离焦量下热输入约为  $4.8 \times 10^5$  J, +7 mm 离焦量下热输入约

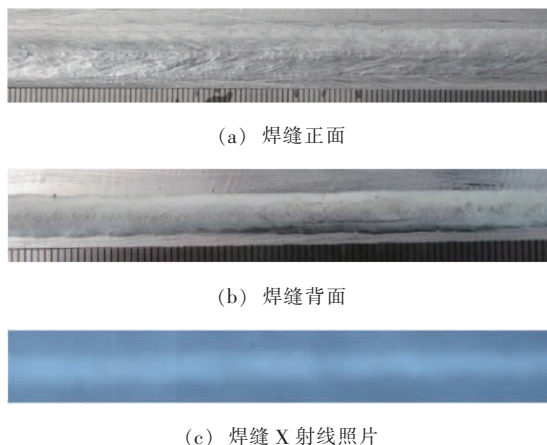


图 3 +7 mm 离焦量下激光-TIG 复合焊缝及 X 射线照片

为 +5 mm 离焦量的 1.6 倍。+7 mm 激光离焦量下,焊缝正、背面宽度较 +5 mm 激光离焦量下的宽大, +7 mm 离焦量下焊缝背面宽度约为 +5 mm 离焦量下的 1.2 倍,这是由于 +7 mm 激光离焦量条件下,激光斑点较大,在板材上形成的激光匙孔直径也相应较大,并且在 +7 mm 离焦量条件下,TIG 焊缝热输入也较大,形成的熔池较为宽大,所以最终焊缝较宽。

### 2.2 拉伸性能

+5 mm 离焦量和 +7 mm 离焦量两种不同热输入下复合焊接头拉伸性能如图 4 所示。从图 4 可以看出,母材抗拉强度为 352 MPa,断后伸长率为 25%; +5 mm 激光离焦量下抗拉强度为 311 MPa,断后伸长率为 24%, +7 mm 激光离焦量下抗拉强度为 291 MPa,断后

伸长率为 12% ;两种激光 - TIG 复合焊接头抗拉强度分别为母材的 88% 和 82% , +5 mm 激光离焦量下接头抗拉强度较 +7 mm 激光离焦量下接头抗拉强度高;两种激光 - TIG 复合焊接头断后伸长率分别为母材的 96% 和 48% , +5 mm 激光离焦量下接头断后伸长率较 +7 mm 激光离焦量下接头断后伸长率明显高。

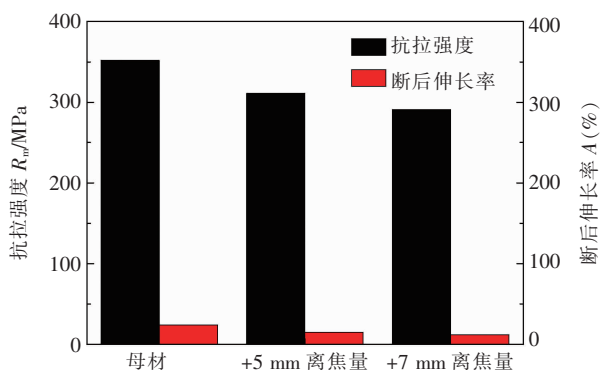
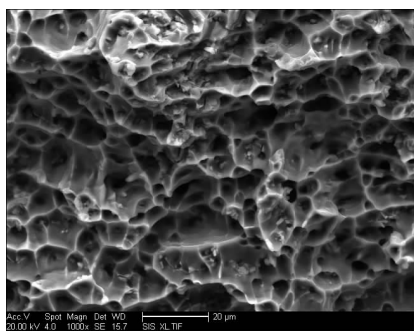
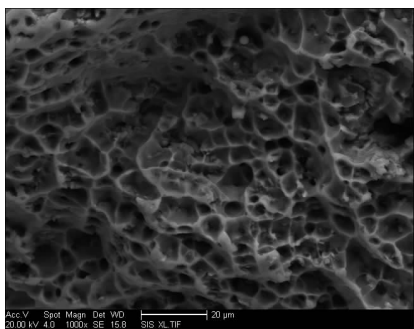


图4 两种热输入下激光 - TIG 复合焊接头拉伸性能

图 5a 和 5b 分别为 +5 mm 激光离焦量和 +7 mm 激光离焦量下激光 - TIG 复合焊缝拉伸断口形貌。可以看出,两种焊缝断裂均为典型的韧窝式塑性断裂方式; +5 mm 激光离焦量下,焊缝断口的韧窝的棱角更为分明,相对较深; +7 mm 激光离焦量下,韧窝棱角较为平滑,相对较浅,韧窝表征着塑性断裂。一般地,对



(a) +5 mm 激光离焦量下焊缝断口



(b) +7 mm 激光离焦量下焊缝断口

图5 两种热输入下激光 - TIG 复合焊缝拉伸断口形貌

于同种材料,韧窝越是细小、均匀的断口塑性越好,这一点和断后伸长率的结果是一致的。

### 2.3 硬度特征

两种热输入下接头硬度试验参照标准 GB/T 2654—2008《焊接接头硬度试验方法》,硬度测试位置如图 6 所示,接头的硬度分布曲线如图 7 所示。

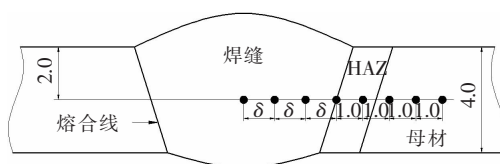


图6 硬度测试位置示意图

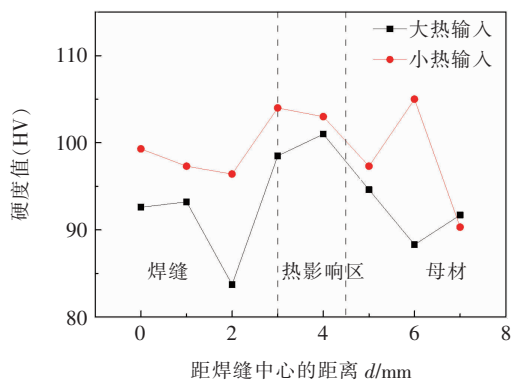


图7 两种热输入下激光 - TIG 复合焊接头硬度特征

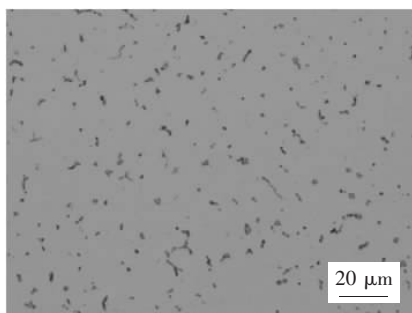
从图 7 可以看出,焊接热输入的大小对激光 - TIG 复合焊接头硬度有明显影响,焊接热输入越大,焊缝及热影响区硬度越小。还可以看出,焊接接头不同部位的硬度也有区别,母材与焊缝的硬度相近,均比较低,热影响区的硬度较高。此外,热影响区较窄,软化区的宽度小,减小了软化区的不利影响,接头的强度损失不明显。这是因为激光 - TIG 复合焊在高速焊接下热输入较小,因此对母材的热损伤较小,所以两种激光 - TIG 复合焊的抗拉强度均为母材的 80% 以上。

### 2.4 金相组织

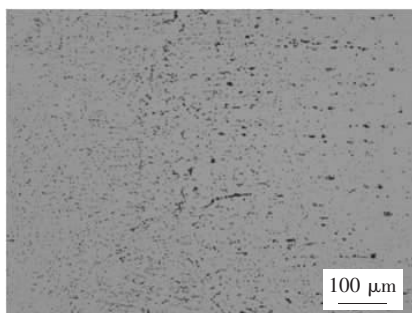
对两种热输入下的焊接接头取样后进行金相分析, +5 mm 离焦量和 +7 mm 离焦量下焊缝及熔合区的金相组织分别如图 8 和图 9 所示。

当离焦量为 +5 mm 时,此时热输入相对较小,无论是焊缝还是熔合区,第二相析出物数量多而细小且呈弥散分布。当离焦量为 +7 mm 时,热输入较大,焊缝及熔合区的第二相质点数量较少并且尺寸较大。这说明在焊接热输入较大时,焊缝及熔合区的第二相质点聚集长大,强化相质点的长大正是导致焊接接头软化的原因。因此,减小这样的不利因素,即采用较小的热输入,有利



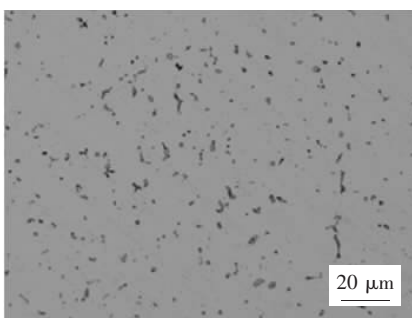


(a) +5 mm 离焦量下焊缝金相组织

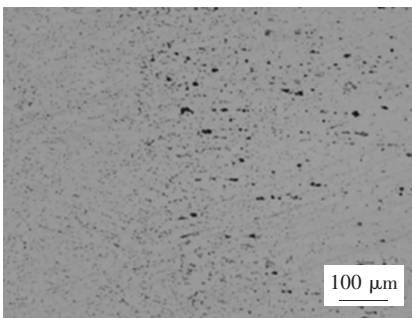


(b) +5 mm 离焦量下熔合区金相组织

图8 +5 mm 离焦量下焊缝及熔合区金相组织



(a) +7mm 离焦量下焊缝金相组织



(b) +7mm 离焦量下熔合区金相组织

图9 +7 mm 离焦量下焊缝及熔合区金相组织

于改善接头软化的问题,提高焊接接头的强度。

### 3 结论

(1)在文中试验条件下,+7 mm 离焦量为 +5 mm

离焦量热输入的 1.6 倍;大热输入下,焊缝变得宽大,+7 mm 离焦量为 +5 mm 离焦量焊缝背面宽度的 1.2 倍。

(2)热输入较大时,接头拉伸性能下降,+5 mm 离焦量为 +7 mm 离焦量下抗拉强度分别为母材的 88% 和 82%,断后伸长率分别为母材的 96% 和 48%;大热输入下,断口处韧窝较为平浅,热输入较小时,韧窝棱角较为明显。

(3)热输入增大时,接头显微硬度随之降低。

(4)热输入较小时,无论是焊缝还是熔合区,第二相析出点数量多而细小而且呈弥散分布;热输入较大时,焊缝及熔合区的第二相质点数量较少并且尺寸较大,即焊缝及熔合区的第二相质点聚集长大。

### 参考文献

- [1] 雷正龙,李颖,陈彦宾,等. 双光束激光填丝焊工艺对铝合金焊接气孔率的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 40-44.
- [2] 杨海锋. 铝合金高功率双光束激光及与 TIG 复合焊接特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨焊接研究所, 2016.
- [3] 杨海锋,梁小梅,王吉孝,等. 5A06 铝合金激光-TIG 电弧复合填丝焊的特性[J]. 焊接, 2016(6): 30-34.
- [4] Harooni M, Carlson B, Kovacevic R. Dual-beam laser welding of AZ31B magnesium alloy in zero-gap lap joint configuration [J]. Optics and Laser Technology, 2014, 56: 247-255.
- [5] 夏佩云,夏令,余海松,等. 6061 铝合金激光填丝焊接接头组织与性能[J]. 焊接, 2018(6): 51-54.
- [6] 张亚亮,刘佳,石岩,等. 电流/电压匹配对铝合金激光-TIG 复合焊接过程稳定性的影响[J]. 焊接学报, 2018, 39(1): 79-83.
- [7] 杨大伟,陈树海,黄继华,等. 6005A 铝合金激光-TIG 复合热源填丝焊接技术[J]. 焊接学报, 2017, 38(10): 51-54.
- [8] 黄瑞生,杨海锋,王君宇,等. 铝合金双光束/单光束激光-TIG 复合焊[J]. 焊接, 2017(1): 39-42.
- [9] 杨海锋,黄瑞生,常云峰,等. 双光束激光-TIG 复合焊电弧特性分析[J]. 焊接, 2016(12): 41-45.

**第一作者简介:** 马国龙,1987 年出生,博士,工程师;主要从事激光焊接及激光电弧复合焊接物理机制及工艺等开发研究;已发表论文 10 篇。

**通信作者简介:** 雷振,1981 年出生,博士研究生,高级工程师;主要从事激光焊及激光-电弧复合焊接技术、焊接自动化及智能化装备开发等方面的研究工作;已发表论文 45 篇。