

焊接方向对光纤激光-MIG 复合焊接钛合金 焊缝成形的影响

崔 丽 贺定勇 李晓延 蒋建敏 王智慧

(北京工业大学材料学院, 北京 100124)

摘要 新型光纤激光器具有光束质量好、电光转换效率高、维护费用低、抽运寿命长、可光纤传输及体积小等显著优势,并且由于波长短,几乎可以被大多数的金属和合金吸收,因此可适用于各种材料的焊接和切割,受到工业界广泛的关注。采用光纤激光与惰性气体保护(MIG)电弧复合热源进行了 TC4 钛合金的焊接工艺试验,研究了激光引导电弧(LL)和电弧引导激光(AL)两种焊接方向对钛合金焊缝表面成形、横截面形貌、熔深、熔宽和余高的影响。试验结果表明,与 AL 方向焊接获得的焊缝相比,LL 方向焊接获得焊缝的表面成形较好,焊缝的熔宽较宽,但熔深较小,而改变焊接方向对焊缝的余高影响很小。

关键词 激光技术;焊接工艺;光纤激光-MIG 复合焊接;焊接方向;焊缝成形;钛合金

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0103002

Effects of Welding Direction on Weld Shape of Fiber Laser-MIG Hybrid Welded Titanium Alloys

Cui Li He Dingyong Li Xiaoyan Jiang Jianmin Wang Zhihui

(College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract With excellent beam quality, high wall-plug efficiency, low maintenance costs, long lifetime of pump diodes, flexible beam delivery and compact size, the new fiber lasers are very attractive for welding and cutting various kinds of materials in industrial applications since the short wavelength laser beams can be absorbed by almost all metals and alloys. Fiber laser-metal inert gas (MIG) hybrid welding is carried out onto TC4 alloy. The effects of laser-leading (LL) and arc-leading (AL) welding direction on top bead appearance, cross section, penetration depth, width and reinforcement of welds are investigated. The results show that the fiber laser-MIG hybrid welding in LL welding direction leads to better top bead appearance, wider weld width and shallower penetration depth, than those in AL welding direction. The weld direction has little influence on the reinforcement of the welds.

Key words laser technique; welding processes; fiber laser-MIG hybrid welding; welding direction; weld shape; titanium alloys

OCIS codes 140.0140; 140.3510; 350.0350; 350.3390

1 引 言

近年来,光纤激光器以其光束质量好、电-光转换效率高、加工性能好、维护费用低、长抽运寿命及可光纤传输等显著优势,受到广泛的关注,得到了飞速的发展^[1,2]。单模光纤激光器在波长 1.07 μm 输出的激光功率可从几瓦到上千瓦,但通过光纤激光集聚,可以输出满足工业加工的高功率激光,目前最

高功率可达 50 kW^[2]。光纤激光的波长短,几乎可以被大多数金属和合金吸收,因此高功率光纤激光器适用于各种材料的焊接和切割。

激光-电弧复合热源焊接是将激光焊接和电弧焊接结合起来,具有焊接效率高、间隙适应性好、焊缝成分和性能可控等优点,正在成为工业生产中最重要激光焊接方法之一^[3~5],具有广阔的市场应

收稿日期: 2010-04-15; 收到修改稿日期: 2010-07-12

基金项目: 航空科学基金(20085475003)和北京市教育委员会科技计划(00900054R5004)资助课题。

作者简介: 崔 丽(1972—),女,博士,副研究员,主要从事轻金属材料激光焊接方面的研究。E-mail: cuili@bjut.edu.cn

用前景和很强的竞争力,是当前国际上的一项热门技术和研究热点^[6,7]。但是,由于该焊接方法结合了激光焊和常规电弧焊两种焊接方法,因此影响焊接过程的因素较多,焊接工艺相对复杂^[8]。在焊接工艺参数中,当激光与电弧旁轴复合时,根据激光与电弧的相对位置,形成了两种焊接方向:1)激光在前,电弧在后,称为激光引导电弧(LL)焊;2)电弧在前,称为电弧引导激光(AL)焊^[9]。目前国内外针对焊接方向对复合焊接焊缝成形的影响有一定的研究,但是研究的结果却有所不同。一些学者认为,同等焊接工艺参数下,仅改变焊接方向,LL焊缝的熔深较深^[10~12]。与此相反,另一些学者认为,AL焊接时焊缝熔深较深,且这种差异的大小与激光-电弧间距密切相关^[13~16]。此外,E. Beyer等^[17]认为在CO₂激光-MIG复合焊接时,AL焊接与LL焊接的焊缝熔深差别很小。Y. Naito等^[18]认为在YAG激光-TIG复合焊接不锈钢过程中,焊接方向对焊缝的熔深没有明显的影响。由上述的文献可以看出,这些争议与CO₂或YAG激光器的类型及试验材料的差异(低碳钢、不锈钢和铝合金等)无关,而是取决于复合焊接的工艺参数。特别是,上述的文献都只限定在某一个参数条件(如焊接速度)下焊接方向对焊缝成形的影响,缺乏系统的研究。针对这些问题,本文系统研究了不同工艺参数(主要包括激光-电弧间

距、激光功率和离焦量)下,焊接方向对光纤激光复合焊接焊缝熔深、熔宽及余高的影响,力图澄清激光-电弧复合焊接工艺研究中存在的一些问题。

钛合金具有优良的耐蚀性、小的密度、高的比强度及较好的韧性和焊接性,在航空、航天、造船和化工等工业部门中得到了广泛应用^[19]。随着钛合金的应用日益增多,它的焊接性能也受到了人们的广泛关注和研究。与常规电弧焊接方法相比,激光焊接能量密度高,加热集中,对材料热损伤小,焊缝深宽比大,接头残余应力低,焊接精度高,可显著减少焊后加工量,焊接接头质量可与电子束焊媲美,却无需真空环境^[20]。但是,激光焊接对工件的焊接装配精度要求高、坡口搭桥能力弱,这给实际应用带来很大的困难。为此,本文采用光纤激光与MIG电弧复合焊接钛合金,目的是提高钛合金激光焊接的适应性,为激光复合焊在钛合金焊接中的应用提供一定的指导。

2 试验方法

焊接母材为TC4钛合金,板厚2.2 mm,填充焊丝为日本大同特殊钢公司生产的TC4钛合金焊丝,直径1.2 mm,干伸长15 mm。母材与焊丝的化学成分如表1所示。

表1 母材和填充焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of base material and filler wire (mass fraction, %)

| Materials | N | C | H | Fe | Al | V | O | Ti |
|-------------|-------|-------|---------|-------|-----------|-----------|-------|---------|
| Ti-6Al-4V | 0.05 | 0.007 | 0.015 | — | 5.50~6.75 | 3.50~4.50 | 0.20 | Balance |
| Filler wire | ≤0.05 | ≤0.10 | ≤0.0125 | ≤0.30 | 5.50~6.75 | 3.50~4.50 | ≤0.20 | Balance |

激光器为IPG公司YLR-2000光纤激光器,最大输出功率2000 W,输出波长为1.07 μm的连续波激光,由直径为100 μm的光纤传输,聚焦透镜焦

距为200 mm,焦点直径为0.2 mm,光束质量参数(BPP)为5.4 mm·mrad,如图1所示。焊机为日本DM350数字自动MIG焊机,焊枪与工件表面有45°

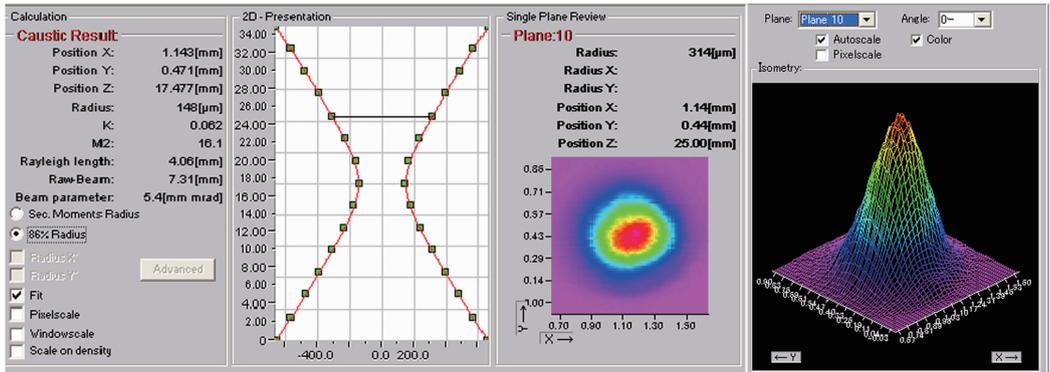


图1 试验中的光纤激光束质量分析

Fig. 1 Beam analysis of laser beam used in experiments

的夹角,激光头与焊枪都固定在一个可以六轴转动的机器人手上,构成复合焊机头(见图 2)。焊接时,保护气为体积分数 99.99% 的高纯度氩气,采用自制焊接夹具实现对焊缝背面保护,利用焊枪的保护气及气体保护拖罩对焊接熔池和焊缝正面后端高温区的保护。

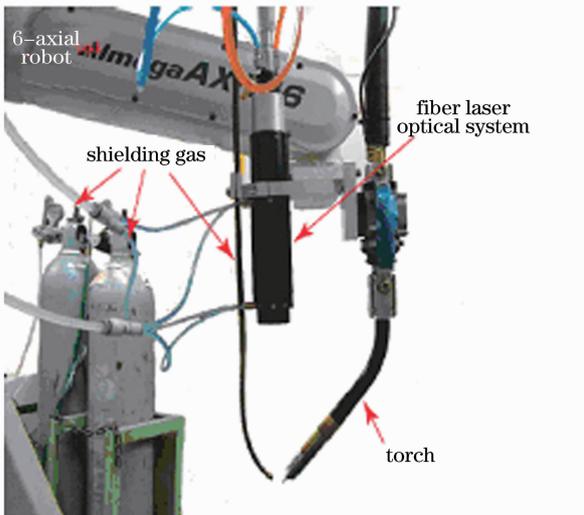


图 2 光纤激光-MIG 复合焊接系统

Fig. 2 Fiber laser-MIG hybrid welding system

试验采用板面堆焊方法。采用直流 MIG 电源,为了保持电弧的稳定性,经过初步试验,熔滴过渡形式设定为喷射过渡,因而焊接电压和电流较高,分别为 $U=28\text{ V}$, $I=320\text{ A}$ 。在此焊接电压和电流下,采用 LL 和 AL 两种焊接方向,改变激光功率、焊接速度、离焦量和激光-电弧间距的大小,获得一系列的焊缝。焊后将接头进行切割,经过镶样、研磨、抛光和腐蚀,制成金相试样。在低倍显微镜下观察焊缝

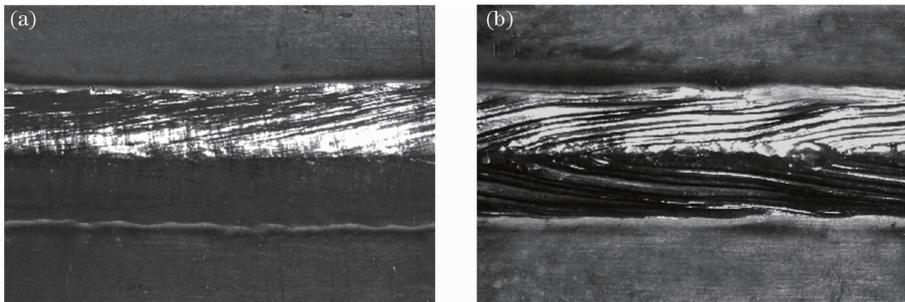


图 4 光纤激光-MIG 复合焊接焊缝表面成形。(a) LL 方向, (b) AL 方向

Fig. 4 Top bead appearance of fiber laser-MIG hybrid weld. (a) LL direction, (b) AL direction

此外,由图 4 还可以看出,与 AL 焊缝的鱼鳞纹相比,LL 焊缝的鱼鳞纹更加细密光滑,可见 LL 焊缝的焊缝成形更好。这两种焊缝鱼鳞纹的差别可以用熔滴过渡频率的高低来解释,当熔滴过渡频率较低时,即熔滴过渡周期较长,焊缝的鱼鳞纹较粗^[21]。AL

横截面宏观形貌,并以焊缝熔深(D)、熔宽(W)及余高(R)来表征焊缝截面,如图 3 所示。

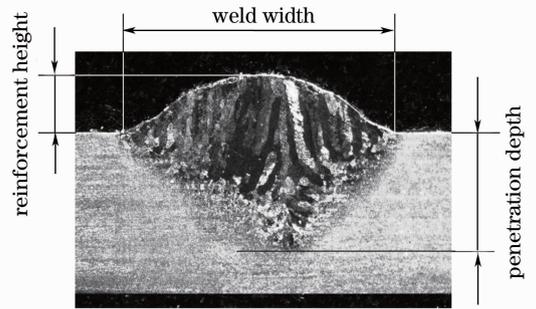


图 3 典型的焊缝横截面

Fig. 3 Typical cross section of fiber laser-MIG hybrid weld

3 试验结果和讨论

3.1 焊缝的表面成形

在焊接速度 $v=4\text{ m/min}$,激光功率 $P_{\text{laser}}=1500\text{ W}$,离焦量 $\Delta Z=0$,激光-电弧距离 $D_{\text{LA}}=1\text{ mm}$ 条件下,LL 方向与 AL 方向的光纤激光-MIG 复合焊接 TC4 钛合金焊缝的表面成形如图 4 所示。可见,两种焊缝的表面成形都呈银亮色,焊缝的鱼鳞纹规则、光滑,无可见气孔,无飞溅。这是因为在光纤激光-MIG 电弧复合焊接过程中,选择了较高的焊接电流和电压($U=28\text{ V}$, $I=320\text{ A}$),在激光能量作用下,焊丝较稳定地熔化,形成熔滴以射滴过渡方式进入熔池,熔池沿着焊接方向不断推进,并在后端形成鱼鳞状焊缝。并且射滴熔滴过渡频率较快,促进熔池流动,促使熔池中气孔的逸出和焊缝鱼鳞纹的细密化。

方向焊接过程中,激光作用在熔池后部。LL 方向焊接时与之相反,激光主要辐射在熔池前沿。当激光束辐射在熔池后方时,与激光束辐射在熔池前方相比,熔滴过渡频率稍微偏低^[22]。因此,AL 方向焊接的熔滴过渡频率稍微偏低,因而焊缝的鱼鳞纹稍粗。

3.2 对焊缝的熔深、熔宽及余高的影响

3.2.1 激光-电弧间距

在实际焊接过程中电弧受到激光的强烈吸引,无法准确测量电弧与激光作用的距离, D_{LA} 一般以激光光斑中心到未起弧时焊丝延长线与工件交点的距离表示。 D_{LA} 的大小决定了激光与电弧是否共同形成熔池产生协同作用的关键,因此是复合焊中一个重要的工艺因素。

图5为两种焊接方向时 D_{LA} 对焊缝横截面形貌的影响,其他的焊接参数为 $P_{Laser} = 1500\text{ W}$, $v = 4\text{ m/min}$, $\Delta Z = 0$ 。由图5可知,在 $D_{LA} = 0 \sim 6\text{ mm}$ 之间,LL方向焊缝横截面均为“V”型,表明此时复合焊

接为深熔小孔焊,并且随着 D_{LA} 的变化,焊缝截面形状变化较小;AL方向焊接在 $D_{LA} = 0 \sim 4\text{ mm}$ 之间获得了横截面为“V”型的深熔焊,但在 $D_{LA} = 6\text{ mm}$ 时焊接转变为横截面为半球形的热导焊。可见,与AL方向焊接相比,LL方向焊接时获得深熔焊的 D_{LA} 值大于AL焊接的 D_{LA} 值。AL方向焊接热导焊的形成是因为随着 D_{LA} 增大,激光等离子体与电弧等离子体相互作用减弱^[23],与LL复合焊接相比,AL复合热源焊接的能量密度降低较多,激光能量对熔深的贡献较小,从而使焊接转变为热导焊。因此,为了获得较好的协同作用, D_{LA} 应该在一定的范围内。

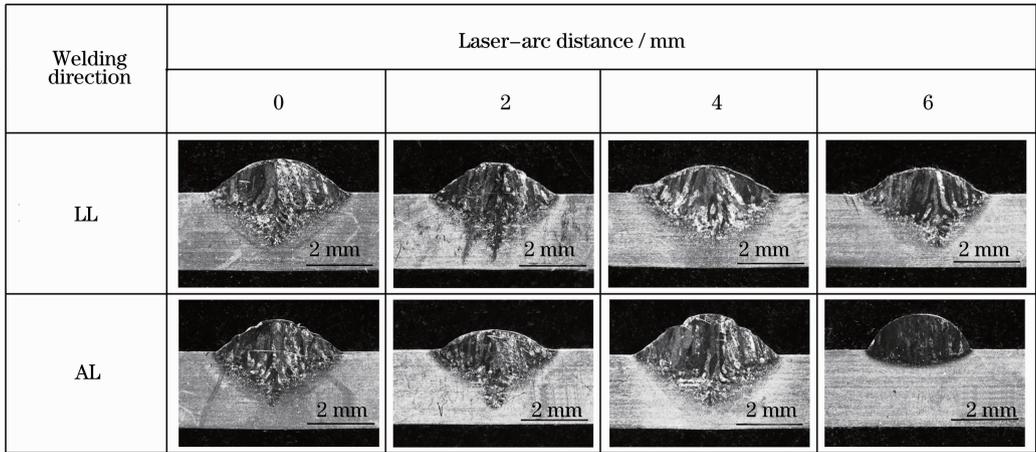


图5 激光-电弧间距对焊缝横截面形貌的影响($P_{Laser} = 1500\text{ W}$, $v = 4\text{ m/min}$, $\Delta Z = 0$)

Fig. 5 Effect of laser-arc distance on cross section of weld ($P_{Laser} = 1500\text{ W}$, $v = 4\text{ m/min}$, $\Delta Z = 0$)

图6为两种方向焊接时 D_{LA} 对熔宽、熔深及余高的影响。由图6可知,在 D_{LA} 相同时,LL焊接时熔宽均大于AL焊缝熔宽;在 $D_{LA} = 0 \sim 4\text{ mm}$ 之间,随着 D_{LA} 的增加,AL焊接熔深稍大于LL焊缝的熔深;在 $D_{LA} = 6\text{ mm}$ 时,由于AL焊接未能形成小孔深熔焊,因而焊缝的熔深降低很多。无论LL焊接还是AL焊接,当 $D_{LA} = 2\text{ mm}$ 时复合焊的熔深达到最大值。这是因为激光电弧旁轴复合焊时, D_{LA} 对激光电弧复合焊的焊缝成形有较大的影响^[24]。 $D_{LA} = 0$ 时,AL焊接与LL焊接的激光都辐射作用在弧柱上,随着热源的移动,反而使电弧产生滞后,扩大了阳极斑点的飘移范围,电弧电阻增大,因此 $D_{LA} = 0$ 不利于增大熔深^[25]。在 $D_{LA} = 2\text{ mm}$ 附近,两种方向焊接的激光作用在电弧弧根,激光稳弧作用最强,且激光作用点位于电弧形成熔池的最低处,因此导致最大熔深的形成。当 D_{LA} 大于 2 mm 时,激光作用在熔池液面较高处,且远离弧根,对电弧的稳定作用减弱,则获得的熔深较小。 D_{LA} 大于 4 mm

时激光基本作用在电弧形成熔池的边缘,复合焊过程实际上形成两分离的熔池。

由图6还可知,在 $D_{LA} = 0 \sim 2\text{ mm}$ 时,两种焊缝

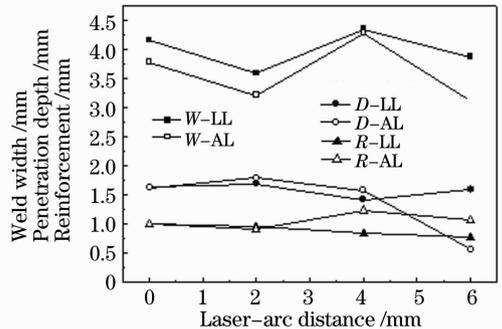


图6 激光-电弧间距对焊缝熔宽、熔深及余高的影响

($P_{Laser} = 1500\text{ W}$, $v = 4\text{ m/min}$, $\Delta Z = 0$)

Fig. 6 Effect of laser-arc distance on weld width, penetration depth and reinforcement ($P_{Laser} = 1500\text{ W}$, $v = 4\text{ m/min}$, $\Delta Z = 0$)

的余高差别很小,但在 D_{LA} 较大 ($D_{LA} = 3 \text{ mm}$ 和 $D_{LA} = 4 \text{ mm}$) 时,AL 焊缝的余高较大。这是因为随着 D_{LA} 增大,激光等离子体与电弧等离子体相互作用减弱,与 LL 复合焊接相比,AL 复合热源焊接的能量密度降低较多,焊缝熔深减小。对于平板堆焊缝的余高来说,在电弧加热不变的情况下,焊丝熔化量的增多,意味着更多的熔化焊丝在平板上堆积,所以 AL 焊缝的余高增加。可见,在较小的 D_{LA} ($D_{LA} = 0 \sim 2 \text{ mm}$) 时,焊接方向对复合热源焊缝表面余高的影响不大。

3.2.2 激光功率

图 7 为两种焊接方向时激光功率对焊缝横截面形貌的影响,其他的焊接参数为 $v = 4 \text{ m/min}$, $\Delta Z = 0$, $D_{LA} = 1 \text{ mm}$ 。由图 7 中可知,在 LL 方向焊接时,随着激光功率的增加,焊缝形状由半球状变为“V”型,表明焊接由热导焊向深熔焊转变,并且熔深和熔宽均明显增加,横截面面积增大。在 AL 方向焊接时,焊缝的形状均为“V”型深熔焊。可见,与 LL 焊接相比,AL 焊接在较小的激光功率下就可以实现激光深熔焊,AL 焊接更易于获得较深的熔深。

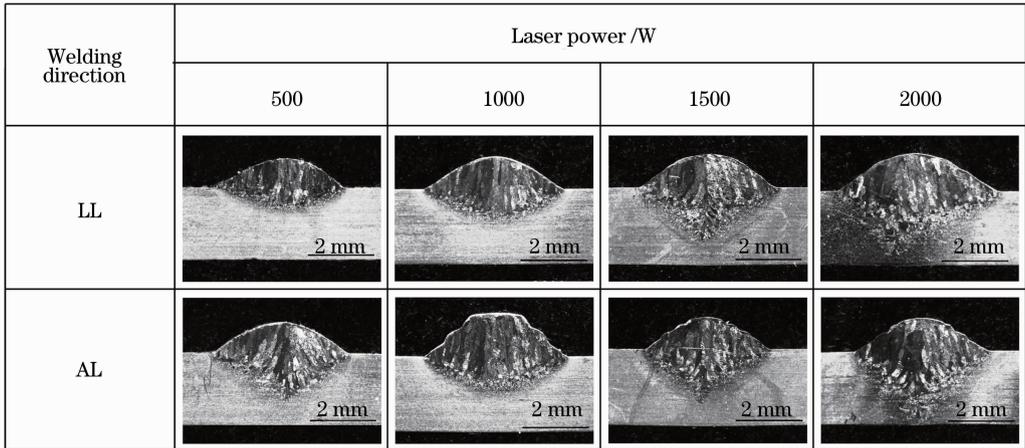


图 7 激光功率对焊缝横截面形貌的影响 ($v = 4 \text{ m/min}$, $\Delta Z = 0$, $D_{LA} = 1 \text{ mm}$)

Fig. 7 Effect of laser power on cross section of weld ($v = 4 \text{ m/min}$, $\Delta Z = 0$, $D_{LA} = 1 \text{ mm}$)

图 8 为两种方向焊接时激光功率对熔深、熔宽及余高的影响。随激光功率的增加,两种焊缝熔宽和熔深均增大,余高变化较小。这是由于随着激光功率的增加,焊接线能量增加,导致了焊缝熔深及熔宽的增加。余高变化较小与秦国梁等^[26]的研究结果一致,对于在较大焊接电流下,激光功率对复合热

源焊缝余高影响不大。在相同的激光功率时,LL 焊缝熔宽均大于 AL 焊缝的熔宽,两种方向焊接时焊缝熔深的差别较小,特别是在高功率 ($P_{Laser} = 2000 \text{ W}$) 时,熔深几乎相同。因此,在激光功率相同时,仅改变焊接方向对焊缝的熔深、余高影响均较小,对焊缝的熔宽影响很大。

3.2.3 离焦量

离焦量是指激光焦点偏离工件表面的距离,离焦量有两种:一般当焦点位于工件表面上方为正离焦,反之为负离焦。

图 9 为两种方向焊接时离焦量对焊缝横截面形貌的影响,其他焊接参数为 $P_{Laser} = 1500 \text{ W}$, $v = 4 \text{ m/min}$, $D_{LA} = 1 \text{ mm}$ 。从图 9 可知,在 $\Delta Z = -3 \text{ mm}$ 时,即激光的焦点在工件以下 3 mm 时,焊缝横截面为半球形,表明此时焊接为热导焊。当 $\Delta Z = -1 \sim 3 \text{ mm}$ 之间时,焊缝横截面的形状均为“V”型,表明获得了深熔焊焊缝。激光焦点位置的改变,使激光在工件表面的焦斑直径发生了变化,导致了激光功率密度的变化。

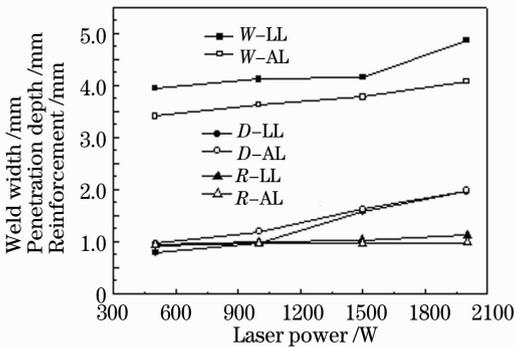


图 8 激光功率对焊缝的熔深、熔宽及余高的影响 ($v = 4 \text{ m/min}$, $\Delta Z = 0$, $D_{LA} = 1 \text{ mm}$)

Fig. 8 Effect of laser power on weld width, penetration depth and reinforcement ($v = 4 \text{ m/min}$, $\Delta Z = 0$, $D_{LA} = 1 \text{ mm}$)

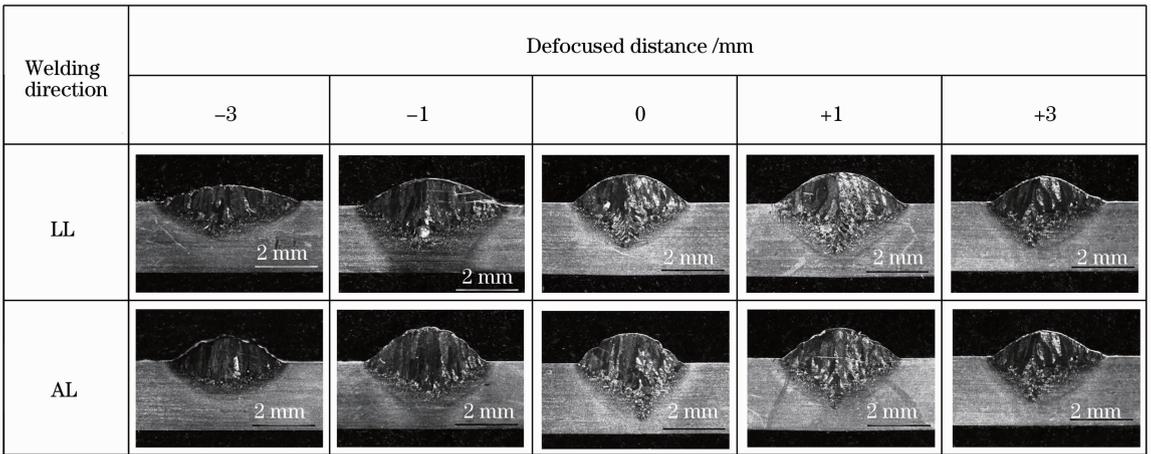


图 9 离焦量对焊缝横截面形貌的影响 ($P_{\text{Laser}}=1500\text{ W}$, $v=4\text{ m/min}$, $D_{\text{LA}}=1\text{ mm}$)

Fig. 9 Effect of defocused distance on cross section of weld ($P_{\text{Laser}}=1500\text{ W}$, $v=4\text{ m/min}$, $D_{\text{LA}}=1\text{ mm}$)

图 10 为两种方向焊接时离焦量对熔宽、熔深及余高的影响。从图 10 可知, LL 焊缝的熔宽均大于 AL 焊缝的熔宽, 而熔深略小于 AL 焊缝熔深, 且在 $\Delta Z=0$ 时 AL 焊缝熔深最大, 这是因为在 $\Delta Z=0$ 时激光的焦点在工件表面, 工件获得的功率密度最大, 因此可以获得最大的熔深。在相同的离焦量时, 对比焊缝的余高发现, 焊接方向在正负离焦时对余高的影响不同: 负离焦时, AL 焊缝余高大于 LL 焊缝余高; 正离焦时, LL 焊缝的余高大于 AL 的余高。

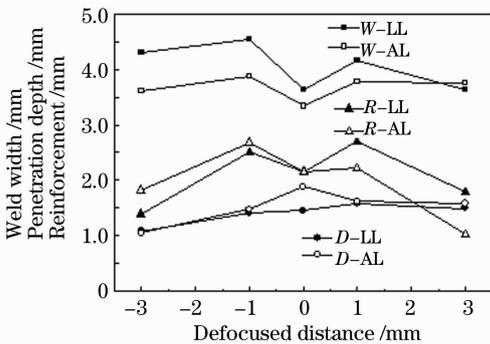


图 10 离焦量对焊缝的熔深、熔宽及余高的影响 ($P_{\text{Laser}}=1500\text{ W}$, $v=4\text{ m/min}$, $D_{\text{LA}}=1\text{ mm}$)

Fig. 10 Effect of defocused distance on width, penetration depth and reinforcement of weld ($P_{\text{Laser}}=1500\text{ W}$, $v=4\text{ m/min}$, $D_{\text{LA}}=1\text{ mm}$)

3.3 讨论

在光纤激光-MIG 电弧复合焊接 TC4 钛合金时, 焊接方向对焊缝的熔宽、熔深和余高的影响的主要结果是: 与 LL 方向焊接相比, AL 方向焊接获得焊缝的熔宽较窄而熔深较深。

在 MIG-活性气体保护焊(MAG)中, 电极倾角对焊缝成形和熔深的影响大于电弧电压及焊接速度的影响。一般来说, 电弧电极(焊丝)前倾, 电弧力后

排熔池金属的作用力减弱, 熔池底部液态金属增厚, 熔深减小; 同时电弧对熔池前方工件的预热作用加强, 熔宽增大。电极(焊丝)后倾时, 情况与前述相反。在光纤激光-MIG 复合焊接时发现, LL 方向焊接(电极前倾)获得焊缝的熔宽较大, 但熔深较小, 这与单独电弧焊接时电极前倾对焊缝熔宽和熔深的影响趋势一致。因此, 在光纤激光-MIG 复合焊接时, 电弧前置与后置(即焊接方向)对焊缝熔深、熔宽的影响与单独电弧焊接时电极前倾与后倾对焊缝成形的影响一致。

在激光电弧复合焊接过程中, 激光和电弧之间存在强烈的相互作用, 这种相互作用对工艺稳定性和焊缝成形具有决定性的影响。激光与电弧等离子体的作用表现为激光对电弧形态的影响, 一方面表现为激光对电弧的压缩、吸引、稳定作用, 另一方面, 电弧等离子体会吸收激光能量, 造成激光能量的大幅衰减, 同时电弧等离子体的“负透镜效应”使激光束产生散焦和偏折^[27]。由于等离子体对激光能量的吸收与激光束的波长成正比^[28], 所以 CO₂ 激光穿过电弧后的能量损失要比 YAG 激光高得多, 这已是公认的事实。在光纤激光的情况下, 由于其波长与 YAG 激光的波长很接近, 这样电弧对光纤激光功率的损失影响也较小。目前国内外在光纤激光与电弧的相互作用方面的报道很少, Liu^[23] 观察了采用 2 kW 光纤激光与 MAG 电弧复合焊接时不同 D_{LA} 时的电弧形态, 如图 11 所示。由图 11 可知, 光纤激光对电弧有强烈的吸引、压缩作用, 但随着 D_{LA} 的增加, 电弧等离子体体积增大, 激光与电弧的协同作用减弱。此外还发现, 在 D_{LA} 间距相同时, 仅仅改变焊接方向, AL 方向焊接时电弧等离子体体积均小于 LL 方向焊接时的电弧体积。由于 LL 方向焊

接时电弧等离子体体积较大,使得液态熔池的宽度也较大,更容易向四周铺展,因此焊缝熔宽较大。但

是,目前无法证实等离子体体积的大小对焊缝熔深的影响规律,还需进一步深入的研究。

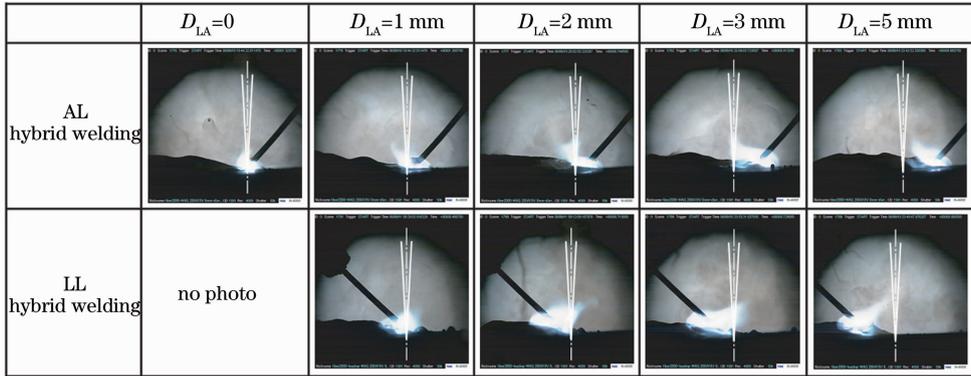


图 11 AL 方向与 LL 方向不同 D_{LA} 下的 MAG 电弧等离子体的形态 ($P_{Laser}=2000\text{ W}$, $\Delta Z=-2\text{ mm}$, $I=200\text{ A}$, $U=19\text{ V}$, $v=4.8\text{ m/min}$)

Fig. 11 Plasma induced by metal active gas welding arc in AL and LL hybrid welding ($P_{Laser}=2000\text{ W}$, $\Delta Z=-2\text{ mm}$, $I=200\text{ A}$, $U=19\text{ V}$, $v=4.8\text{ m/min}$)

4 结 论

1) 两种方向焊接获得的焊缝表面的鱼鳞纹规则、光滑,LL 方向焊接获得焊缝的鱼鳞纹更细密光滑,有更好的焊缝成形。

2) LL 方向焊接时,在 $D_{LA}=0\sim 6\text{ mm}$ 之间,为“V”型焊缝的深熔焊,焊缝截面形状变化较小;AL 焊接在 $D_{LA}=0\sim 4\text{ mm}$ 之间为深熔焊。在 $D_{LA}=0\sim 2\text{ mm}$ 之间,与 AL 焊缝相比,LL 焊缝的熔宽较宽,熔深略小,余高差别很小。

3) 随激光功率的增加,两种焊缝熔宽和熔深均增大,余高变化较小。在相同的激光功率时,与 AL 方向焊接获得的焊缝相比,LL 方向获得焊缝的熔宽较宽、熔深较浅,余高无差别。

4) 在相同的离焦量时,与 AL 方向的焊接相比,LL 方向焊接获得焊缝的熔宽较宽、熔深较浅,在 $\Delta Z=0$ 时 AL 焊缝熔深最大,正负离焦量对余高的影响不同。

参 考 文 献

- 1 F. Vollertsen, C. Thomy. Welding with fiber laser from 200 to 17000W[C]. Section D-ICALCO, Miami, Florida, USA, 2005; 254~263
- 2 IPG Photonics Corporation. High power fiber lasers for industrial application [EB/OL]. http://www.ipgbeijing.com/Collateral/Documents/English-US/HP_Brochure.pdf(2002-12-14 /2010-04-08)
- 3 M. H. Cho, D. Farson, Y. C. Lim *et al.*. Hybrid laser/arc welding process for controlling bead profile [J]. *Sci. Technol. Weld. Joining*, 2007, **12**(8): 677~687
- 4 G. L. Qing, Z. Lei, S. Y. Lin. Effects of Nd:YAG laser pulsed MAG arc hybrid welding parameters on its weld shape [J]. *Sci. Technol. Weld. Joining*, 2007, **12**(1): 79~86

- 5 Lei Zhenglong, Chen Yanbin, Song Guoxiang *et al.*. Weld appearance of CO₂ laser-gas metal arc hybrid welding for ultra-low carbon bainitic steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3068~3073
- 雷正龙, 陈彦宾, 宋国祥等. 超低碳贝氏体钢 CO₂激光-气体金属弧焊复合焊接成形特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3068~3073
- 6 Liu Liming, Huang Ruisheng, Cao Yunming. Behavior analysis of low power YAG laser-gas metal arc welding hybrid welding arc plasma [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3167~3173
- 刘黎明, 黄瑞生, 曹运明. 低功率 YAG 激光-熔化极气体弧焊复合焊接电弧等离子体行为研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3167~3173
- 7 Gao Ming, Xiong Zheng, Zeng Xiaoyan *et al.*. Experimental study on critical speed of laser-arc hybrid welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2438~2442
- 高明, 熊征, 曾晓雁等. 激光-电弧复合焊接临界速度规律研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2438~2442
- 8 C. Bagger, F. O. Olsen. Review of laser hybrid welding [J]. *J. Laser Appl.*, 2005, **1**(17): 2~14
- 9 Liu Zhongjie, Xu Guojian, Kutsuna Muneharu. Laser and laser-MAG hybrid welding of high strength steel using fiber laser and CO₂ laser [J]. *Welding International*, 2008, **22**(1): 254~260
- 10 S. E. Nilsen, M. M. Andersen, J. K. Kristensen. Hybrid welding of thick section C/Mn steel and aluminium [R]. International Institute of Welding, 2002, IIW Doc., XII-1731-02
- 11 Chen Li, Dong Chunlin, Lü Gaoshang. Research on YAG laser/MAG arc hybrid welding [J]. *Weld. Technology*, 2004, **33**(4): 21~23,35
- 陈俐, 董春林, 吕高尚. YAG/MAG 激光电弧复合焊工艺研究[J]. *焊接技术*, 2004, **33**(4): 21~23,35
- 12 Lei Zhen, Qin Guoliang, Lin Shangyang. Development of laser-MIG/MAG arc hybrid welding technology [J]. *Weld. and Joining*, 2005, (9): 9~13
- 雷振, 秦国梁, 林尚扬. 激光与 MIG/MAG 复合热源焊接工艺发展概况[J]. *焊接*, 2005, (9): 9~13
- 13 Wang Wei, Wang Xuyou, Zhao Ziliang. Influential factors in laser-MAG hybrid welding process [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, **27**(2): 6~11
- 王威, 王旭友, 赵子良. 激光-MAG 电弧复合热源焊接过程的影响因素[J]. *焊接学报*, 2006, **27**(2): 6~11

- 14 Gao Zhiguo, Huang Jian, Li Yaling *et al.*. Effect of relative position of laser beam and arc on formation of weld in laser-MIG hybrid welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, **29**(12): 70~73
高志国, 黄 坚, 李亚玲 等. 激光-MIG 复合焊中激光与电弧前后位置对焊缝成形的影响[J]. 焊接学报, 2008, **29**(12): 70~73
- 15 Y. Naito, M. Mizutani, S. Katayama. Penetration characteristics in YAG laser and TIG arc hybrid welding, and arc and plasma/plume behavior during welding [J]. *Quarterly J. Japan Weld. Society*, 2006, **24**(1): 32~38
- 16 Katayama Seiji, Uchiumi Satoru, Briand Francis. Production of sound deep-penetration hybrid weld in aluminum alloy with YAG laser and MIG arc[C]. Section D-ICALEO, Scottsdale, AZ, USA, Laser Institute of America, October 30, November 2, 2006, 953~959
- 17 E. Beyer, U. Diltthey, R. Imhoff *et al.*. New aspects in laser welding with an increased efficiency [C]. Section D-ICALEO, Orlando, USA, Laser Institute of America, 1994, **79**: 183~192
- 18 Y. Naito, S. Katayama, A. Matsunawa. Keyhole behavior and liquid flow in molten pool during laser-arc hybrid welding [C]. *SPIE*, 2003, **4831**: 357~362
- 19 V. Balasubramanian, V. Jayabalan, M. Balasubramanian. Effect of current pulsing on tensile properties of titanium alloy [J]. *Mater. Des.*, 2008, **29**(7): 1459~1466
- 20 Chen Li. A Study on Full Penetration Stability and Physical Metallurgy of the Laser Welding of Aeronautic Titanium Alloys [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2005. 1~22
陈 俐. 航空钛合金激光焊接全熔透稳定性及其焊接物理冶金研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005. 1~22
- 21 Lei Zhenglong, Chen Yanbin, Li Liqun *et al.*. Characteristics of droplet transfer in CO₂ laser-MIG hybrid welding with projected mode [J]. *Applied Laser*, 2004, **24**(6): 361~364
雷正龙, 陈彦宾, 李俐群 等. 激光-MIG 复合焊接射滴过渡的熔滴特性[J]. 应用激光, 2004, **24**(6): 361~364
- 22 Wang Xuyou, Wang Wei, Lin Shangyang *et al.*. Two factors influencing welding process stability of Nd:YAG laser-short circuit arc MAG hybrid welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, **31**(3): 17~20
王旭友, 王 威, 林尚扬 等. 激光-短路 MAG 复合热源焊接过程稳定性的影响因素[J]. 焊接学报, 2010, **31**(3): 17~20
- 23 Liu Zhongjie. Study on Laser-Arc Hybrid Welding of High Strength Steel [D]. Nagoya: Nagoya University, 2007. 110~112
- 24 Ruisheng Huang, Liming Liu, Fan Zhang. Influences of laser in low power YAG laser-MAG hybrid welding process [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(1): 47~50
- 25 Dong Chunlin, Chen Li, Lü Gaoshang *et al.*. The hybrid YAG-MAG laser arc welding technology of stainless steel [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2005, (3): 69~71, 95
董春林, 陈 俐, 吕高尚 等. 不锈钢 YAG-MAG 激光电弧复合焊接工艺[J]. 航空制造技术, 2005, (3): 69~71, 95
- 26 Qin Guoliang, Lei Zhen, Wang Xuyou *et al.*. Influences of Nd:YAG laser+pulsed MAG arc hybrid welding parameters on its weld appearance[J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(2): 97~100, 130
秦国梁, 雷 振, 王旭友 等. Nd:YAG 激光+脉冲 MAG 电弧复合热源焊接规范参数对焊缝表面成形的影响[J]. 应用激光, 2006, **26**(2): 97~100, 130
- 27 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
- 28 B. Ribic, T. A. Palmer, T. DebRoy. Problems and issues in laser-arc hybrid welding [J]. *Int. Mater. Rev.*, 2009, **54**(4): 223~244