

光纤激光-TIG 电弧复合焊接等离子体形态的 可视化观察

邹江林^{1*}, 王利达¹, 祝宝琦¹, 肖荣诗¹, 武强¹, 郑凯²

¹北京工业大学激光工程研究院高功率及超快激光先进制造实验室, 北京 100124;

²中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111

摘要 基于可视化观察,研究了光纤激光-TIG 电弧复合焊接等离子体的多重形貌特征。结果表明:基于等离子体光强的非均匀分布特性,利用多重成像法可同时观测出复合焊接等离子体的三重像和四重像,并可区分出金属等离子体和电弧等离子体,而且采用氦气保护比采用氩气保护更易于区分;在相同的电弧电流和成像条件下,复合焊接等离子体的面积明显大于单电弧焊接等离子体的面积;TIG 电弧-激光复合焊接等离子体的面积明显大于激光-TIG 电弧复合焊接等离子体的面积;复合焊接等离子体中金属等离子体与保护气并未充分混合,金属等离子体对复合焊接等离子体的形貌、稳定性等方面具有重要影响。

关键词 激光技术; 光纤激光; 复合焊接; 等离子体; 多重成像; 光强

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1202007

Visual Observation of Plasma Morphology During Fiber Laser-TIG Arc-Hybrid Welding

Zou Jianglin^{1*}, Wang Lida¹, Zhu Baoqi¹, Xiao Rongshi¹, Wu Qiang¹, Zheng Kai²

¹High-Power and Ultrafast Laser Manufacturing Laboratory, Institute of Laser Engineering,

Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

²CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China

Abstract In this study, various morphological features of plasma were studied by using the visual observation during fiber laser-TIG arc hybrid welding. The results show that based on the non-uniform distribution of light intensity of plasma, approximately 3-4 images of plasma can be obtained simultaneously by using the multi-imaging method and the metal and arc plasma can be distinguished. Compared with the Ar shielding gas, the metal and arc plasma can be distinguished more easily under the He atmosphere. Under the same arc current and imaging conditions, the area of the hybrid welding plasma is obviously larger than that of the single arc plasma, and the area of the plasma in hybrid welding with an TIG arc-laser mode is obviously larger than that of the plasma in hybrid welding with a laser-TIG arc mode. Further analysis shows that the metal vapor and shielding gas are not fully mixed during the hybrid welding. In addition, metal plasma significantly affect the morphology and stability of the hybrid-welding plasma.

Key words laser technique; fiber laser; hybrid welding; plasma; multiple imaging; light intensity

OCIS codes 140.3380; 350.5400; 110.4190

1 引言

激光-电弧复合焊接是一种综合激光与电弧的优点,同时又互补激光与电弧不足的先进连接技术^[1-2],

具有焊接过程稳定性高、间隙适应性强和焊缝表面成形好等优势。此外,在复合焊接中,激光与电弧这两种热源可产生协同增强效应,达到“1+1>2”的焊接效果^[3]。激光-电弧复合焊接等离子体是复合焊接过

收稿日期: 2019-07-15; 修回日期: 2019-07-22; 录用日期: 2019-08-13

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1107801)、北京市教育委员会科技计划一般项目(KM201710005014)

* E-mail: zoujianglin1@163.com

程中最直观的物理现象,与复合热源间的协同增强效应密切相关^[4]。因此,研究激光-电弧复合焊接等离子体的行为,对理解这两种热源间的协同增强效应及优化复合焊接技术具有重要的指导意义。

可视化观察等离子体的形态是认识等离子体行为的重要方式之一。陈彦宾等^[5]在 CO₂ 激光-TIG (tungsten inert gas) 电弧复合焊接中采用高速摄像机进行观察,发现激光对电弧存在压缩现象。Naito 等^[6]在 Nd:YAG(钕铝石榴子石)激光-TIG 电弧复合焊接中发现,激光致深熔小孔内喷出的金属蒸气与电弧等离子体发生了剧烈的相互作用,导致电弧等离子体的形态发生快速变化。Liu 等^[7]在脉冲 Nd:YAG 激光-TIG 电弧复合焊接 Mg 合金过程中,利用配置相应窄带滤波片的高速摄像机分别观察了 Mg 等离子体和 Ar 弧等离子体,然后根据脉冲激光的出光时间,建立了 Mg 等离子体形态和 Ar 弧等离子体形态的同步变化关系。王利达等^[8]采用多重成像法观察了 CO₂ 激光-TIG 电弧复合焊接等离子体的多重成像特征,发现可同时观察等离子体的 4 个不同光强区域。

相比于传统的激光器,光纤激光器以功率高、光束质量好、结构紧凑、运行成本低等优势,吸引了焊接领域中众多学者的关注^[9-13]。在光纤激光-TIG 电弧复合焊接中,电弧对光纤激光的散射、折射、吸收均可忽略不计,但复合焊接的熔深比单光纤激光

焊接的熔深提高了 20% 以上^[14]。初步推测,这种协同增强效应与复合焊接中电弧等离子体和光纤激光焊接羽辉间的相互作用有关^[14],但其机制尚需进行进一步研究。本文在光纤激光-TIG 电弧复合焊接中,采用配置多重成像镜头的高速摄像机观察复合焊接等离子体不同光强区域的形貌特征,并对比了激光致金属蒸气、焊接模式、保护气等参数对光强区域随时间变化规律的影响。

2 实验条件和方法

采用 IPG 公司生产的 YLS-6000 型光纤激光器以及 Arnold 公司生产的六轴联动加工机床进行实验。激光器的最大输出功率为 6 kW,光束模式为多模耦合,光束质量参数 K_1 约为 8 mm·mrad。光束通过芯径为 200 μm 的光纤进行传输,光束经焦距为 200 mm 的输出耦合准直镜输出后,采用焦距为 300 mm 的透镜聚焦,获得的焦斑直径为 0.32 mm。利用松下 YC-315TX 型直流 TIG 焊机,并采用直流正接的方式进行焊接实验。钨极直径为 2.4 mm,钨极尖端与工件表面的距离为 2 mm,钨极轴线与激光束间的夹角为 45°,且钨极与激光作用位置的水平距离为 3 mm。采用 FASTCAM Mini UX100 型高速摄像机在焊接方向的侧面观察复合焊接等离子体,拍摄帧率设定为 10⁴ frame/s。复合焊接实验装置如图 1 所示。

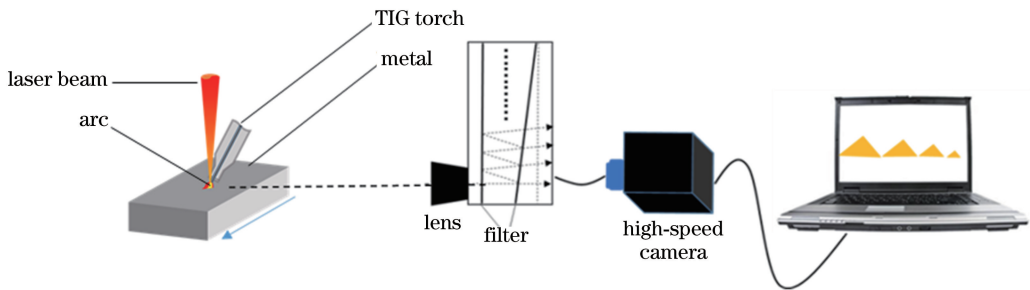


图 1 复合焊接实验装置示意图

Fig. 1 Diagram of hybrid welding experiment

定义激光在前、电弧在后的复合焊接模式为激光-电弧模式,反之则定义为电弧-激光模式。实验中焊枪与激光头静止,机床运动。具体焊接参数如表 1 所示。保护气采用体积分数分数为 99.99% 的氩气或氦气,体积流量设定为 15 L/min,通过焊枪喷嘴中送出,以保护熔池。焊接材料为低碳钢,牌号为 Q235,尺寸为 100 mm×50 mm×10 mm,化学成分(质量分数)如下:0.12% C,0.33% Mn,≤0.30% Si,≤4.50% S,≤4.50% P,其余为铁,板材表面无涂层。

在焊接前,采用磨削的方法对低碳钢表面进行处理,并用丙酮溶液进行擦拭,以除去其表面杂质。

多重成像镜头由两片透光率分别为 50% 和 10% 的反射式中性衰减片组成,两片衰减片之间的夹角约为 2°,衰减片的参数详见文献^[15]。等离子体辐射的光经由第一片衰减片进入成像系统后,将在非平行的两片衰减片之间发生多次反射和透射。采用高速摄像机记录每次经过第二片衰减片后透射的光,以便达到层层剥离等离子体低光强区域的目的,

表 1 焊接参数
Table 1 Welding parameters

No.	Laser power P /kW	Arc current I /A	Welding speed v /($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	Shielding gas	Welding mode
1	3	150	2	Ar	Laser-TIG arc mode
2	0	150	2	Ar	Laser-TIG arc mode
3	3	150	2	Ar	TIG arc-laser mode
4	3	150	2	He	Laser-TIG arc mode

从而获得一系列等离子体光强逐渐升高、面积逐渐减小的像。

3 实验结果

3.1 复合焊接等离子体的形貌特征

采用表 1 中编号为 1 的参数进行焊接,利用镜头未配置衰减片的高速摄像机进行观察,获得了典型的复合焊接等离子体形貌,如图 2 所示。由图 2 可知,复合焊接等离子体的形态相对较大,底部(沿焊接前方的区域)呈现为自由摆动状态。等离子体的外围区域为亮白色,中心区域则呈黑色。等离子体的外部空间中弥漫着大量的烟雾,同时存在少量的飞溅颗粒。将图 2 进行二值化处理并测量面积,获得等离子体的面积约为 700 mm^2 。

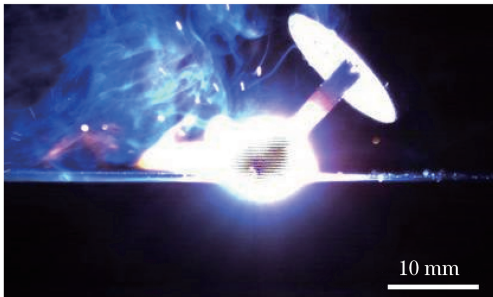


图 2 典型的复合焊接等离子体形貌

Fig. 2 Typical morphology of hybrid welding plasma

采用表 1 中编号为 1 的焊接参数进行实验,利用配置多重成像镜头的高速摄像机进行观察,获得了典型的复合焊接等离子体的多重成像形貌,如图 3 所示,其中 1~4 为复合焊接等离子体成像编号。由图 3 可知,基于多重成像法可以获得 4 个颜色逐渐从亮白色变为黄色、发光亮度逐渐减弱、面积逐渐减小的等离子体像。在复合焊接等离子体的第一重像中,等离子体的形貌与未使用衰减片时的形貌基本一致(图 2),但等离子体的面积明显小于未使用衰减片时的面积。复合焊接等离子体边沿区域的颜色为蓝白色,中心位置并未出现如图 2 所示的黑色部分,而复合焊接等离子体的外围空间区域也未见烟雾和飞溅颗粒。

在复合焊接等离子体的第三重像中,左侧激光

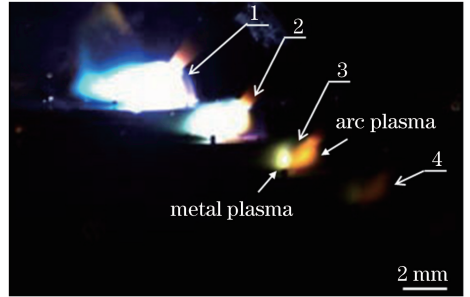


图 3 激光-TIG 电弧复合焊接等离子体的多重成像特征
Fig. 3 Multi-imaging features of plasma during hybrid welding with laser-TIG arc mode

作用位置处的一团发光体明显不同于电弧等离子体(图 3),它比电弧等离子体更明亮。根据该发光体所处的位置及其形态,可推测该发光体为深熔小孔内喷发出的激光致金属等离子体。该现象表明,在采用氩气保护的光纤激光-TIG 电弧复合焊接中,采用剥离低光强区域的方法可在高光强区域内大致区分金属等离子体和电弧等离子体,这与氩气保护的 CO_2 激光-TIG 电弧复合焊接情况下不能区分这两种等离子体不同^[8]。在第四重像中,等离子体较模糊。

3.2 不同因素对复合焊接等离子体多重成像形貌的影响

3.2.1 激光致金属蒸气

通过高速摄像机观察到的等离子体的形态为其可见光区域,测量该区域的面积,观察面积随时间的变化规律,可以获得等离子体形态的稳定性、大小等信息。选择图 3 对应焊接参数条件下连续 50 帧的等离子体照片进行二值化处理,测量复合焊接等离子体前三重图像的面积,获得了前三重图像面积随时间的变化规律,如图 4 所示。由图 4 可知,随着成像次数增加,等离子体前三重像的面积分别约为 $65.5, 27.8, 5.4 \text{ mm}^2$ 。前三重图像的面积随时间的变化规律并非时刻同步,但整体趋势近似同步,细微差别如下:第一重像面积的变化频率相对较小,而第三重像面积的变化频率相对较大。例如,第一重像中面积随时间的变化曲线约有 3 个峰值,而第三重像中面积的峰值与峰谷几乎交替出现,即第三重像中面积的波动周期很小(交替频率较大)。由此可

见,前三重像的面积随时间的变化规律整体相近,但第三重像面积的变化频率相对较大。

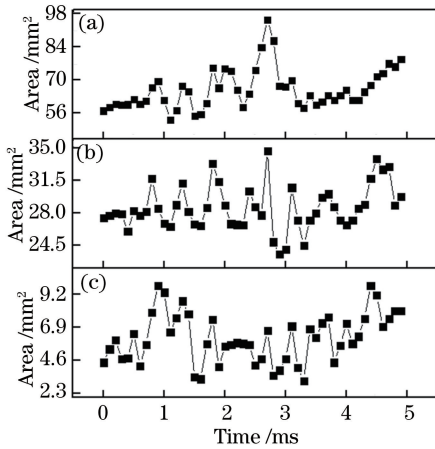


图4 激光-TIG电弧复合焊接等离子体前三重图像面积随时间的变化规律。(a)第一重像;(b)第二重像;(c)第三重像
Fig. 4 Time-dependent areas of first three images during hybrid welding with laser-TIG arc mode. (a) The first image; (b) the second image; (c) the third image

为了揭示图4中前三重像面积波动的原因,采用表1中编号为2的焊接参数进行实验,观察单电弧焊接时等离子体的多重成像特征(该条件下无激光致金属蒸气)。测得了单电弧焊接等离子体前三重图像的面积随时间的变化规律,如图5所示。由图5可知,随着成像次数增加,单电弧焊接等离子体前三重像的面积分别为42.5,20.5,4.3 mm²,面积的波动幅度分别为2.6,1.1,0.35 mm²。该结果表明,单电弧等离子体同一次成像的面积和面积波动幅度均远小于复合焊接等离子体。由此可见,激光致金属蒸气对复合焊接等离子体的形貌、稳定性均有重要影响。

3.2.2 热源布置形式

采用表1中编号为3的焊接参数进行实验,获得了TIG电弧-激光复合焊接等离子体的多重成像形貌,如图6所示。将图6与图3进行对比后可以发现,TIG电弧-激光复合焊接等离子体的多重成像规律与激光-TIG电弧复合焊接等离子体的形貌一致,但TIG电弧-TIG激光复合焊接等离子体的底部比激光-TIG电弧复合焊接时的更长。此外,TIG电弧-激光复合焊接等离子体的面积也比激光-TIG电弧复合焊接时的更大。在第三重像中同样可区分金属等离子体和电弧等离子体,而第四重像较模糊。

测量得到了TIG电弧-激光复合焊接等离子体前三重图像面积随时间的变化规律,如图7所示。

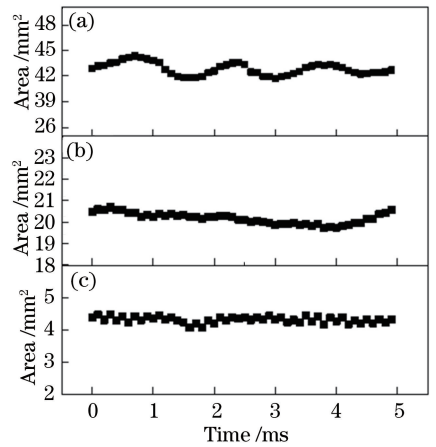


图5 单电弧等离子体前三重图像面积随时间的变化规律。(a)第一重像;(b)第二重像;(c)第三重像
Fig. 5 Time-dependent areas of first three images with single arc mode. (a) The first image; (b) the second image; (c) the third image

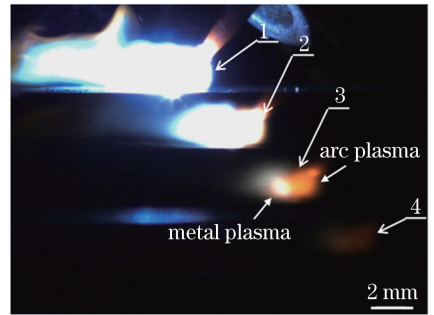


图6 TIG电弧-激光复合焊接等离子体的多重成像特征
Fig. 6 Multi-imaging features of plasma during hybrid welding with TIG arc-laser mode

通过对比图4与图7中复合焊接等离子体面积随时间的变化规律可以发现,两种焊接模式下等离子体前三重图像的面积随时间的变化规律一致。激光-TIG电弧、TIG电弧-激光复合焊接等离子体第一重像的面积分别为65.5 mm²和99.2 mm²,可见TIG电弧-激光复合焊接等离子体的面积明显大于激光-TIG电弧复合焊接等离子体的面积。

3.2.3 保护气

采用表1中编号为4的焊接参数进行实验,获得了氦气保护下典型的复合焊接等离子体多重成像形貌,如图8所示。由图8可知,氦气保护下的复合焊接等离子体经过多重衰减后,可获得3个等离子体像。随着成像次数增加,复合焊接等离子体的面积逐渐减小,该规律与氩气保护下复合焊接的结果基本相同。与氩气保护时的明显不同之处如下:在第二重像中便可将复合焊接等离子体区分为金属等离子体与电弧等离子体,氦弧等离子体则几乎不可

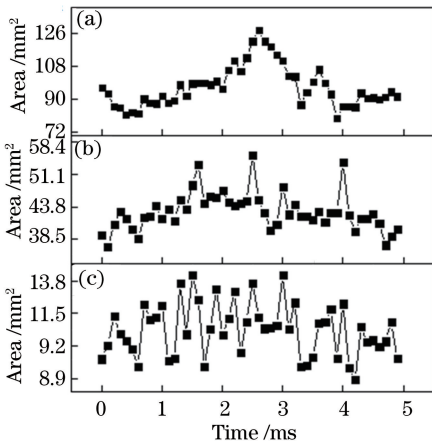


图7 TIG电弧-激光复合焊接等离子体前三重像面积随时间的变化规律。(a)第一重像;(b)第二重像;(c)第三重像
Fig. 7 Time-dependent areas of first three images during hybrid welding with TIG arc-laser mode. (a) The first image; (b) the second image; (c) the third image

见;在第三重图像中,氦弧等离子体已经不可见,但仍然可见金属等离子体的轮廓;氦气保护下未发现第四重像。

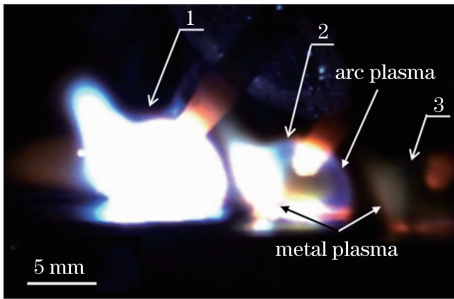


图8 氦气保护下复合等离子体的多重成像形貌
Fig. 8 Multi-imaging morphology of plasma during hybrid welding with He shielding gas

4 分析与讨论

当等离子体的光强超过高速摄像仪的感光阈值时,高速摄像过度曝光后获得的图像即为黑色状态。这是图2中复合焊接等离子体中心区域呈黑色的原因,也是基于多重成像法进行最后一次成像观察获得的区域。复合焊接等离子体外部空间中弥漫的大量烟雾为等离子体辐射的强光辐照空间中弥漫的微小颗粒^[16-17],经过多重成像镜头过滤复合焊接等离子体的低光强区域后,等离子体外部空间的烟雾和飞溅颗粒便不可见。

在高光强区域,采用多重成像法可将氦气保护下的复合焊接等离子体大致区分为金属等离子体和

电弧等离子体。一方面,等离子体中氦元素辐射的线状谱主要集中在700~850 nm^[18],而铁元素的线状谱主要集中在350~500 nm^[14],因此,金属等离子体和电弧等离子体的发光存在色彩差异。另一方面,在高功率光纤激光焊接中,大量的金属等离子体(羽辉)从激光致深熔小孔内喷出,并富集于激光致小孔上方,这是存在色彩差异的两团发光体经过多重衰减后在高光强区域可被区分的原因。等离子体经过多重成像后颜色的变化规律,以及氦气保护特征详见文献^[8]。

在近似相同的工艺条件下,光纤激光焊接羽辉的高度和体积均明显大于CO₂激光焊接等离子体的高度和体积,且光纤激光焊接中还存在大量飞溅颗粒^[19]。这说明在激光功率大致相同的复合焊接中,光纤激光焊接羽辉和飞溅颗粒在电弧的作用下变为金属等离子体,数量远多于CO₂激光焊接金属等离子体的数量。因此,光纤激光-TIG电弧复合焊接中金属等离子体的发光比CO₂激光-TIG电弧焊接中金属等离子体的发光更强,这可能是在光纤激光-TIG电弧复合焊接中,采用氦气保护也能在等离子体的高光强区域区分金属等离子体与电弧等离子体的原因。

光纤激光焊接羽辉是剧烈波动的,波动周期约为0.5 ms^[20]。复合焊接中激光致金属等离子体(光纤激光焊接羽辉)的波动势必会导致复合焊接等离子体也出现波动,这是复合焊接等离子体比单电弧焊接等离子体波动更剧烈的主要原因。采用多重成像法观察时,在第三重像中可观察到金属等离子体,因此第三重像面积的波动实际上为金属等离子体的波动,这是复合焊接等离子体第三重像面积的波动频率比第一重像波动频率更高的原因。该现象表明,在光纤激光-TIG电弧复合焊接中,金属等离子体与电弧等离子并未充分混合,金属等离子体的波动对复合焊接等离子体的稳定性有重要影响。

采用激光-TIG电弧、TIG电弧-激光模式复合焊接时,等离子体的多重成像特征基本一致,但TIG电弧-激光复合焊接等离子体的同一次成像面积均比激光-TIG电弧复合焊接等离子体的更大。复合焊接时,金属蒸气受到与焊接方向相反的力,而两种不同的复合焊接模式使得金属蒸气的受力方向不同,这可能是TIG电弧-激光复合焊接等离子体面积比激光-TIG电弧复合焊接等离子体面积更大的原因。基于多重成像法所获得的等离子体面积实际上是等离子体的不同光强区域的面积,等离子体

的光强与温度存在一定的对应关系,因此,激光-TIG电弧、TIG电弧-激光复合焊接等离子体面积差异体现了这两种复合焊接中等离子体热能的差异,这可能是采用这两种模式进行焊接时所得焊接结果存在差异的原因之一。

5 结 论

本文利用多重成像法和采用高速摄像机进行观察,研究了光纤激光-TIG电弧复合焊接等离子体的成像特征,得到以下主要结论:基于可视化观察获得了等离子体高光强区域,可将复合焊接等离子体区分为电弧等离子体和金属等离子体,且采用氦气比采用氩气作为保护气体时更易于区分;在相同的电弧电流和成像条件下,复合焊接等离子体的面积明显大于单电弧焊接等离子体的面积;TIG电弧-激光复合焊接等离子体的面积明显大于激光-TIG电弧复合焊接等离子体的面积;复合焊接中激光致金属等离子体富集于激光致小孔上方,金属等离子体是复合焊接等离子体形貌和波动程度均大于单电弧焊接等离子体形貌和波动程度的主要原因。

参 考 文 献

- [1] Steen W M. Arc augmented laser processing of materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(11): 5636-5641.
- [2] He S, Chen H, Cai C, *et al.* Influence of He-Ar mixed shielding gas on laser-MIG hybrid welding characteristic of aluminum alloys[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1202005.
何双, 陈辉, 蔡创, 等. 氦-氩混合保护气体对铝合金激光-MIG复合焊接特性的影响[J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1202005.
- [3] Hu L H, Huang J, Wu Y X, *et al.* Study on coupling mechanism and metal transfer in laser double-wire MIG arc hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0602004.
胡连海, 黄坚, 吴毅雄, 等. 激光-双MIG电弧复合焊耦合机制及熔滴过渡研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0602004.
- [4] Tang G, Chen H, Yang X Y, *et al.* Effects of different welding process on the electronic temperature of plasma and weld shape during laser-MIG hybrid welding of A7N01P-T4 aluminum alloy [J]. *Journal of Laser Applications*, 2018, 30(2): 022002.
- [5] Chen Y B, Chen J, Li L Q, *et al.* Properties of arc and weld in laser-TIG hybrid process [J].

- Transactions of the China Welding Institution*, 2003, 24(1): 55-56, 60.
陈彦宾, 陈杰, 李俐群, 等. 激光与电弧相互作用时的电弧形态及焊缝特征[J]. *焊接学报*, 2003, 24(1): 55-56, 60.
- [6] Naito Y, Mizutani M, Katayama S. Penetration characteristics in YAG laser and TIG arc hybrid welding, and arc and plasma/plume behaviour during welding. *Welding phenomena in hybrid welding using YAG laser and TIG arc*[J]. *Welding International*, 2006, 20(10): 777-784.
- [7] Liu L M, Chen M H. Effect of laser pulse on recovery delay of arc plasma based on ion migration behavior in the pulsed laser-arc hybrid welding process[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(2): 96-103.
- [8] Wang L D, Li M, Zou J L, *et al.* Multiple imaging characteristics of plasma in laser-tungsten inert gas arc hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0302008.
王利达, 李敏, 邹江林, 等. 激光-钨极稀有气体电弧复合焊接等离子体的多重成像特征[J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 0302008.
- [9] Cai C, Chen H, Zhang W H. Research status and development prospects of laser welding under vacuum [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(10): 945-952, 1034.
蔡创, 陈辉, 张卫华. 真空激光焊接技术研究现状与展望[J]. *光电工程*, 2017, 44(10): 945-952, 1034.
- [10] Luo Y, Tang X H, Lu F G, *et al.* Effect of subatmospheric pressure on plasma plume in fiber laser welding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 215: 219-224.
- [11] Shcheglov P Y, Uspenskiy S A, Gumenyuk A V, *et al.* Plume attenuation of laser radiation during high power fiber laser welding [J]. *Laser Physics Letters*, 2011, 8(6): 475-480.
- [12] Wang J, Wang C M, Meng X X, *et al.* Study on the periodic oscillation of plasma/vapour induced during high power fibre laser penetration welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(1): 67-70.
- [13] Gao M, Chen C, Hu M, *et al.* Characteristics of plasma plume in fiber laser welding of aluminum alloy [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 326: 181-186.
- [14] Zou J L, Wu S K, Xiao R S, *et al.* Effects of a paraxial TIG arc on high-power fiber laser welding [J]. *Materials & Design*, 2015, 86: 321-327.
- [15] Li M, Xiao R S, Zou J L, *et al.* A multiple synchronous imaging method for strong illuminants induced during a hot working process [J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(6): 066003.

- [16] Shcheglov P Y, Gumenyuk A V, Gornushkin I B, *et al.* Vapor-plasma plume investigation during high-power fiber laser welding[J]. *Laser Physics*, 2013, 23(1): 016001.
- [17] Miyazaki Y, Katayama S. Influence of laser-induced plume on penetration in laser welding [J]. *Welding International*, 2015, 29(5): 349-355.
- [18] Ma R. Investigation on technology and mechanism of fiber laser TIG hybrid welding of titanium sheet[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014: 30-37.
马然. 薄板钛合金光纤激光-TIG 电弧复合焊接工艺及机理研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014: 30-37.
- [19] Li M. Synchronized observation of plume and keyhole behavior during fiber laser deep penetration welding by multiple imaging[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019: 46.
李敏. 光纤激光深熔焊接羽辉和小孔行为的多重成像同步观察研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2019: 46.
- [20] Kawahito Y, Matsumoto N, Mizutani M, *et al.* Characterisation of plasma induced during high power fibre laser welding of stainless steel[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008, 13(8): 744-748.