

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

王利达, 李敏, 邹江林*, 郭士慧, 肖荣诗

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

摘要 利用高速摄像机自带的多重成像镜头观测了 CO₂ 激光-钨极稀有气体(TIG)电弧复合焊接等离子体的多重成像特征。结果表明:采用多重成像技术可同时获得同一个等离子体的三个面积逐渐减小、光强逐渐增大的区域形态;氩气保护复合焊接等离子体的颜色由蓝白色逐渐变为红色,不能区分金属和氩弧等离子体;在氦气保护下,自第二次成像开始,氦弧等离子体几乎不可见,仅余仍为亮白色的金属等离子体;等离子体中的氦在可见光区辐射的线状谱较少(光强相对弱),是氦气保护下能明显区分出金属等离子体的主要原因;复合焊接中金属等离子体与保护气等离子体没有充分混合,电弧等离子体对金属等离子体的形态具有显著影响。

关键词 激光技术;复合焊接;等离子体;多重成像;光强;动态行为

中图分类号 TG403

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0302008

Multiple Imaging Characteristics of Plasma in Laser-Tungsten Inert Gas Arc Hybrid Welding

Wang Lida, Li Min, Zou Jianglin*, Guo Shihui, Xiao Rongshi

High-Power and Ultrafast Laser Manufacturing Laboratory, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract The multi-imaging characteristics of CO₂ laser-tungsten inert gas (TIG) arc hybrid welding plasma are observed by a high-speed camera with a self-made multi-imaging system. The research results show that three regions of the same plasma with decreasing area and increasing light intensity can be obtained at the same time by multiple imaging technology. The color of plasma gradually changes from blue and white to red in argon shielded hybrid welding, and the metal vapor plasma and argon arc plasma can't be distinguished. Since the second imaging, helium arc plasma is almost invisible, and the remaining metal plasma is still bright white. The less linear spectrum of helium radiation in the visible region (relatively weak light intensity) is the main reason why metal plasma can be distinguished clearly in helium protection; the metal plasma and shielding gas plasma are not fully mixed in hybrid welding. And the morphology of the metal plasma can be obvious influenced by the arc plasma.

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

OCIS codes 140.3390; 350.5400; 110.4190

1 引言

激光-电弧复合焊接技术始于 20 世纪 70 年代末,它是一种综合了激光与电弧各自特点的先进的连接技术^[1-2],它并不是两种热源的简单叠加,而是通过激光与电弧的相互作用产生“1+1>2”的热源协同增强效应^[3]。在激光焊接中引入电弧不但可以

提高焊接效率,还可以改善激光焊接的桥接性,降低间隙敏感度。因此,激光-电弧复合焊接技术在造船、管道连接与汽车等领域中获得了广泛关注^[4-5]。研究激光与电弧之间的相互作用对于理解这两种热源间的协同增强效应及优化该技术具有重要的理论指导意义。

近年来,国内外开展了大量关于激光与电弧相

收稿日期: 2018-10-23; 修回日期: 2018-11-16; 录用日期: 2018-12-04

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1107801),北京市教委科技计划一般项目(KM201710005014)

* E-mail: zoujianglin1@163.com

互作用的研究工作;Natio 等^[6]在 YAG 激光-钨极稀有气体(TIG)复合焊接过程中,通过利用电荷耦合器件(CCD)采集小孔前沿一定角度的反射光线来计算电弧对激光的散射、折射作用,结果表明,复合焊接时电弧对 YAG 激光的散射、折射、吸收都较小;陈彦宾等^[7-8]采用激光烧蚀有机玻璃的方法定性得出,以较低功率 CO₂ 激光垂直穿过电弧时,电弧阴极区域对激光的吸收较小,阳极区域的吸收较大;Sibillano 等^[9-10]利用一种在线监测焊接过程的方法对连续 CO₂ 激光和脉冲 Nd:YAG 激光焊接多种不锈钢过程的等离子体特征进行了研究,结果发现,激光功率的提高会导致等离子体电子温度的降低;本课题组^[11-12]前期采用测量的方法对 CO₂ 激光与 TIG 电弧复合焊接中电弧与激光的相互作用进行研究,结果表明,激光穿过 TIG 电弧时,电弧等离子体的折射效应使光束散焦、变形并向阴极方向偏转。

现阶段复合焊接中关于激光与电弧相互作用的研究主要包括两种方法,一是采用测量法测量等离子体对激光传输特性的影响,二是采用光谱诊断法诊断复合焊接等离子体的温度、电子浓度。采用可视化的方式同步观察等离子体不同光强区域的形态,可以更直观地理解等离子体的特性行为,但相关的研究尚未见报道。本文采用多重成像法,基于两片非平行反射式衰减片间光的多次反射和透射对等离子体低光强区域实现层层剥离,研究了 CO₂ 激光-TIG 电弧复合焊接等离子体的多重成像特征。

2 实验方法

采用德国通快公司生产的 Rofin DC035 CO₂ 激光器进行实验,激光器发射激光的波长为 10.6 μm,最大功率为 3.5 kW,经焦距为 300 mm 的聚焦系统聚焦后获得的焦斑直径为 0.27 mm,焊接中的离焦量为 0 mm。采用美国 GALIL 公司生产的 DMC-B140-M 控制系统控制的移动平台作为运动系统。采用日本松下生产的 YC-315TX 直流 TIG 焊机进行焊接,直流正接,选用直径为 2.4 mm 的钨极,其尖端距工件表面保持 2 mm,采用固定与激光束夹角为 45°、激光在前的旁轴复合方式,钨极距激光作用位置的水平距离为 3 mm。采用上海 Photron 公司生产的 FASTCAM Mini UX100 高速摄像机拍摄电弧形态,拍摄帧率为 1×10⁴ frame/s。实验装置示意图如图 1 所示。

成像系统内部光路图如图 2 所示,可以看出,成像系统由两面非平行放置的反射式衰减片组成,当

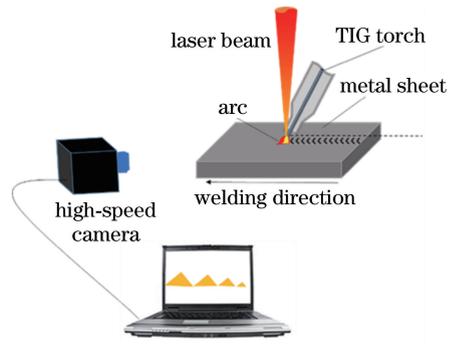


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

等离子体辐射的光透射进入第一片反射式衰减片后,继续透射穿过第二片反射式衰减片形成第一重像,此像与一般观察方法得到的图像相同,而后在非平行的两片衰减片之间发生一系列的透射和反射,经过第二片衰减片透射的光被高速摄像机记录一次,形成一系列不同光强区域的复合焊接等离子体的图像。

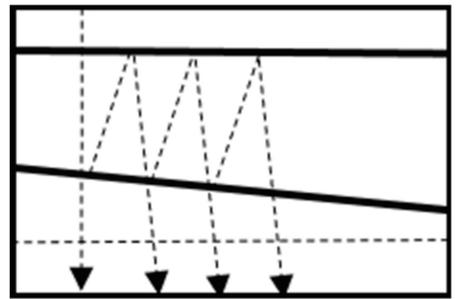


图 2 成像系统内部光路图

Fig. 2 Optical path map of imaging system

焊接模式为激光在前,电弧在后。高速摄像机配置自制的多重成像镜头,镜头内部使用的两片反射式衰减片(镀金属基膜)直径均为 50 mm,透过率分别为 50%和 10%,衰减片间的夹角约为 2°。高速摄像机垂直于焊接方向进行拍摄。保护气为氩气或氦气,以 15 L/min 的流速于焊枪喷嘴送出,焊接速度设定为 2 m/min。实验所用材料为低碳钢,尺寸为 100 mm×50 mm×10 mm。焊接前采用磨削方法对低碳钢表面进行处理,并用丙酮擦拭,以去除其表面的杂质。

3 实验结果

3.1 不同激光功率下氩弧的多重成像特征

当保护气为氩气,电弧电流 I 为 150 A 时,高速摄像机获得的复合焊接等离子体的多重成像特征随激光功率的变化如图 3 所示。可见,采用自制的多重成像镜头可以清晰地获得同一个复合焊接等离子

体的三重像;对比图中的第一重像可以发现,随着激光功率增加,复合焊接等离子体的体积逐渐增大,在激光功率 P 为 2.5 kW 时,出现了激光支持的燃烧波;经过多重衰减后,复合焊接等离子体的面积越来越小,其颜色由亮白色逐渐变为黄色(见第三重像);

第二重与第三重图像除了颜色变化和面积减小以外,其形态与第一重图像并无明显差别;多重衰减后并没有将复合焊接等离子体分割成金属等离子体与氩弧等离子体;复合焊接等离子体的形态与电弧等离子体形态较为相似。

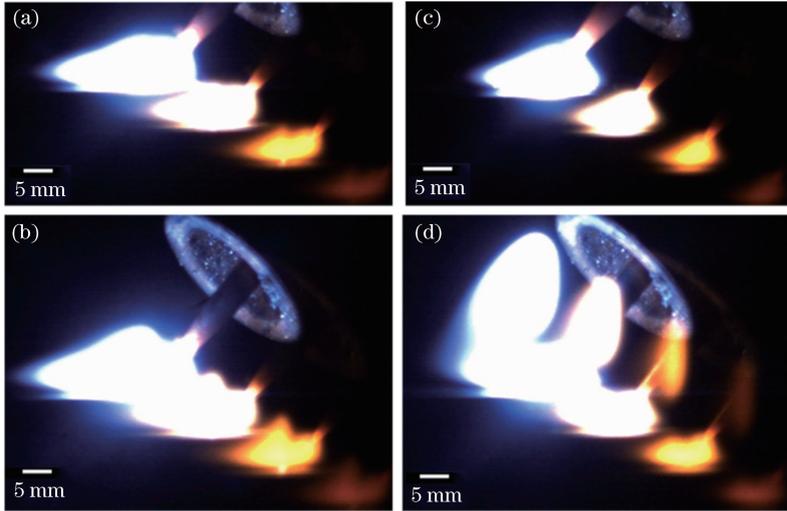


图 3 保护气体为氩气时复合焊接等离子体的形态。(a) $P=1$ kW; (b) $P=1.5$ kW; (c) $P=2$ kW; (d) $P=2.5$ kW

Fig. 3 Plasma morphology in hybrid welding with argon shielding gas.

(a) $P=1$ kW; (b) $P=1.5$ kW; (c) $P=2$ kW; (d) $P=2.5$ kW

图 4(a)是功率为 3 kW 时激光支持的燃烧波动态行为(t 为初始时间),可以发现:随着时间延长,燃烧波逐渐变大,且有微小向上移动的趋势,而后又突然变小;在燃烧波达到最大时,复合焊接等离子体的亮度最低,且从小孔中喷出的金属等离子体最弱,如($t+2$) ms 图像凸起部分最低;在燃烧波最小时,复合焊接等离子体最强大,如($t+4$) ms 图像所示。测量图 4(a)中第三重图像的面积,并分别为燃烧波

和复合焊接等离子体两部分进行作图,两部分面积随时间的变化规律如图 4(b)所示。根据波动曲线可以看出:燃烧波与复合焊接等离子体存在相反的波动情况,即当燃烧波面积最大时,对应的复合焊接等离子体的面积最小,燃烧波面积最小时,复合焊接等离子体的面积达到最大,二者呈现相反的波动趋势;燃烧波和复合焊接等离子体的波动周期基本相同,均约为 4 ms。

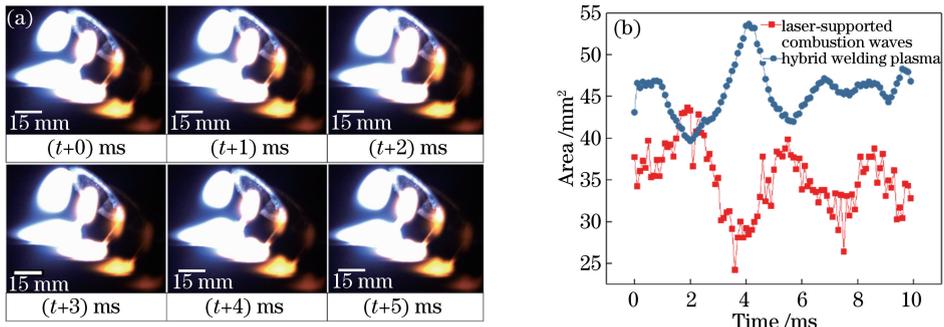


图 4 功率为 3 kW 时的结果。(a)激光支持燃烧波的特征;(b)第三重图像的面积波动

Fig. 4 Results obtained at power of 3 kW. (a) Characteristic of combustion wave supported by laser;

(b) area fluctuation of the third image

3.2 不同激光功率下氩弧的多重成像特征

图 5 所示为当保护气为氩气,电弧电流固定在 150 A 时,不同激光功率下的复合焊接等离子体形

态,可见:其形态与氩气保护情况下的相同,同一个等离子体采用多重成像后,可以获得 3 个清晰的等离子体形态;随着激光功率增加,复合焊接等离子体

的面积和亮度均有所增加;氦气保护下的等离子体形态明显不同于氩气保护下的等离子体形态,在氦气保护下,高功率激光电弧复合焊接时无激光支持的燃烧波产生,而且,氦气保护下的多重成像颜色与

氩气保护下的不同。第二重和第三重成像中将复合焊接等离子体分为氦弧等离子体与金属等离子体两部分,且氦弧的等离子体几乎不可见,像中主要为亮白色的金属等离子体。

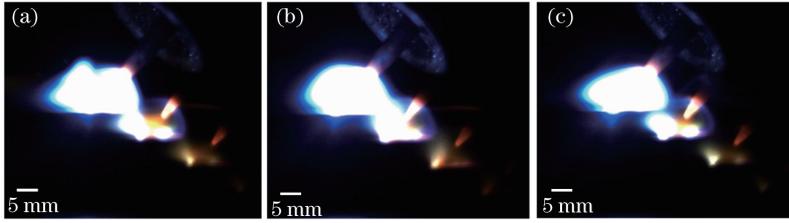


图 5 氦气保护下的复合焊接等离子体形态。(a) $P=2\text{ kW}$; (b) $P=2.5\text{ kW}$; (c) $P=3\text{ kW}$

Fig. 5 Plasma morphology in hybrid welding with helium shielding gas. (a) $P=2\text{ kW}$; (b) $P=2.5\text{ kW}$; (c) $P=3\text{ kW}$

在氦气保护下,一系列连续的等离子体形态如图 6 所示。从第三重像中可以发现,复合焊接等离子体中的金属等离子体部分呈现左右摆动的趋势。

通过观察第二重像和第三重图像可以发现,不同激光功率的金属等离子体在整个波动过程内均没有连接到钨极,且钨极尖端在整个过程中始终为暗红色。

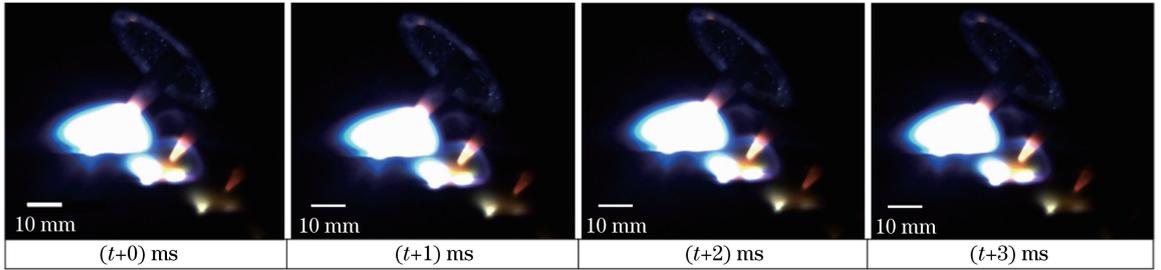


图 6 当 $P=3\text{ kW}$, $I=150\text{ A}$ 时,氦气保护下的复合焊接等离子体的动态行为

Fig. 6 Dynamic behavior of plasma in hybrid welding with helium shielding gas when $P=3\text{ kW}$ and $I=150\text{ A}$

3.3 不同电流下氦弧的多重成像特征

图 7 是氦气保护下激光功率固定在 3 kW 时,不同电弧电流下的复合焊接等离子体形态,可见:随着电流 I 增加,等离子体体积逐渐变大。根据第二

重像和第三重像可知,金属等离子体亮度也随电弧电流的增加而增大,金属等离子体主要存在于小孔口附近。此外,电流越大,金属等离子体呈现为变形越大的趋势。

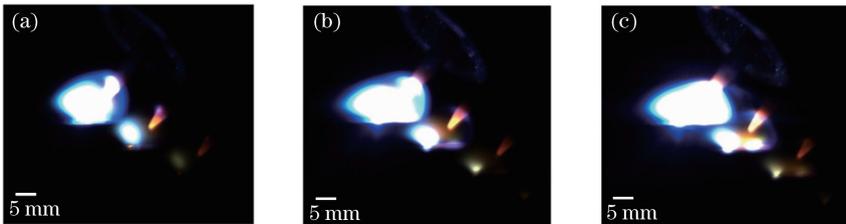


图 7 氦气保护下的复合焊接等离子体形态($P=3\text{ kW}$)。(a) $I=50\text{ A}$; (b) $I=100\text{ A}$; (c) $I=150\text{ A}$

Fig. 7 Plasma morphology in hybrid welding with helium shielding gas. (a) $I=50\text{ A}$; (b) $I=100\text{ A}$; (c) $I=150\text{ A}$

4 分析与讨论

燃烧波的出现与两种保护气的物理性质密切相关。一方面,氩气的一次电离能(15.75 eV)远低于氦气的一次电离能(24.56 eV)。常压下,当电流小于 200 A 时,氩弧温度为 $12000\sim 15000\text{ K}$,而氦弧的温度则为 $15000\sim 18000\text{ K}$ ^[13]。利用 Saha 方程计算可知,在 $15000\sim 18000\text{ K}$ 之间,氦弧等离子体

中的电子浓度与氩弧相比低一个数量级,即氦弧的自由电子密度达不到产生燃烧波的临界值。另一方面,氦气的热导率远大于氩气的热导率。在两方面因素的共同影响下,氦气没有燃烧波生成。另外,燃烧波的产生与激光功率密度也有关。随着燃烧波逆光束传输,对应位置光束的功率密度逐渐减小,故而燃烧波到达其最大传播距离时将会熄灭。此时,激光束重新照射到试件上,又重新形成燃烧波,等离子

体周期性地产生和消失^[14]。当燃烧波熄灭时,激光能量全部作用在试件上,故而此时的金属等离子体最强,复合焊接等离子体的面积最大。反之,金属等离子体最弱,复合焊接等离子体的面积最小。

在同一图像中可以看到,复合焊接等离子体呈现三个面积逐渐减小的像,在成像系统中两面反射式衰减片是非平行放置的,等离子体辐射的光进入第一片反射式衰减片后,在非平行的两片衰减片之间发生一系列的透射和反射,每经过第二片衰减片透射的光被高速摄像机记录一次,形成一系列不同光强区域的复合焊接等离子体图像。由于两片衰减片之间的等离子体辐射的光每次通过第一片和第二片衰减片时,光强均会被透射和吸收一次,即等离子体辐射的光均被剥离一次。因此,被记录的图像中较弱的光强被逐渐衰减掉,剩下的光强越来越强,图像中的弱光强部分被过滤掉后,图像的面积变得越来越小(光强越高,对应面积越小)。

当电流小于 200 A 时,氩弧的温度为 12000~15000 K,而氦弧的温度则为 15000~18000 K^[13]。可推测,当采用氦气保护时,复合焊接等离子体的温度更高。根据热力学三大定律可知,某一物体的温度越高,其发光频率越大,发光波长越短。这是氦气保护时,复合焊接等离子体第一重像为蓝亮色(波长更短),而氩气保护时复合焊接等离子体第一重像为亮白色的主要原因。根据文献的光谱诊断可知^[15-17],复合焊接等离子体光谱中金属原子辐射的特征线状谱远强于氩或氦辐射的线状谱强度,并且金属原子辐射的线状谱富集在 300~600 nm 之间(可见光短波长区域,即蓝色区域),氩辐射的线状谱富集在 800 nm 附件,而氦辐射的线状谱在整个可见光区域均较少。本实验中所使用的衰减片为镀铝膜的反射式衰减片,铝膜对激光的吸收率随波长的增加而减小,这就导致经过多次衰减后被铝膜吸收的短波长光越来越多(金属辐射的线状谱),而铝膜吸收的长波长光(氩辐射的线状谱)相对较少。因此,经过多重成像以后观察到的颜色就偏向可见光波段范围内的长波长区域,即黄色与暗红色,这是在氩气保护中,经过多重衰减后的等离子体的颜色由亮白色逐渐转变为黄色或暗红色的原因。

在氦气保护的复合焊中,氦的电离能高,铁的电离能(7.78 eV)低,约为氦的 1/3。铁原子更容易导电,这就使得只有很少的氦原子被电离或被激发,且氦辐射的线状谱本身就较少。这是复合焊中氦原子在整个可见光区辐射的线状谱均较少,氦气保护下

的复合焊接等离子体的光强主要由金属原子辐射光强(主要分布在 300~600 nm 之间)所决定的主要原因。在传统的光学观测方法中只经过一次衰减或不衰减,因此电离度较弱的氦弧等离子体的发光仍然可见,如实验结果中第一重图像所示。而本实验采用的多重成像技术是经过多次衰减得到第二、第三重像,所以可以过滤掉电离程度较弱的部分,将复合焊接等离子体分为氦弧等离子体与金属等离子体两部分,且氦弧等离子体的发光少。因此,在多次衰减的第二、第三重像中几乎看不到氦等离子体,只剩下发光亮度和面积均明显减小的金属等离子体。随着电流增大,复合热源对铁原子的电离能力增加,被电离的铁原子变多,金属等离子体的体积、亮度均随电弧电流的增加而增大。

从氦气保护下的第二和第三重像中可以发现,复合焊接中金属等离子体与保护气等离子体并没有充分混合,金属等离子体主要分布于小孔口附近。由于氩的相对原子质量远大于氦的相对原子质量,可推测知,在氩气保护中下,氩气对金属蒸汽的力学效应更明显,即在氩气保护下,金属等离子体主要分布于小孔口附近。在复合焊接过程中,激光与电弧两种热源相互作用是通过金属等离子体与电弧等离子体之间的能量转化与吸收完成的。因此,激光与电弧的协同增强效应可能与金属等离子体的位置以及电弧对金属等离子体的影响有关。在以后的研究中可以从该方向入手,进一步揭示激光电弧复合焊接中两种热源间的协同增强机理。

5 结 论

使用了一种不同于其他可视化观察方法的多重成像观察方法来观测 CO₂ 激光-TIG 电弧复合焊接等离子体,利用此方法可清晰地获得同一个复合焊接等离子体的三个光强逐渐增大、面积逐渐减小的区域。采用氩气保护时,经过多重衰减后的复合焊接等离子体面积逐渐减小,颜色由亮白色逐渐转变为红黄色,不能区分金属等离子体和氩弧等离子体,出现了激光支持的燃烧波。采用氦气保护时,没有燃烧波产生,第二和第三重像中的氦弧等离子体几乎不可见,金属等离子体为亮白色,同时可实现金属等离子体和保护气等离子体的原位同步观察。

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] Wang Q M, Qiao J N, Zou J L, *et al.* Fiber laser-variable polarity TIG hybrid welding of A7N01 aluminum alloy with filler wire[J]. Chinese Journal of 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.
- [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): 0602005.
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): 0602005.
- [4] Jasnau U, Hoffmann J, Seyffarth P. Nd:YAG-laser-GMA-hybrid welding in shipbuilding and steel construction [C]. Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2004, 299: 14-24.
- [5] Gu S Y, Liu Z J, Zhang P L, *et al.* Appearances and formation mechanism of welds in high-strength steels by high speed laser-arc hybrid welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1202007.
顾思远, 刘政君, 张培磊, 等. 高速激光电弧复合焊接高强钢焊缝的形貌及成形机理[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1202007.
- [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] Chen Y B, Li L Q, Wu L. Quantitative measurement of absorption and defocusing of laser beam by electric arc [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(3): 56- 58.
陈彦宾, 李俐群, 吴林. 电弧对激光吸收与散焦的定量测量[J]. 焊接学报, 2003, 24(3): 56-58.
- [8] 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.
- [9] Sibillano T, Ancona A, Rizzi D, *et al.* Study on the correlation between plasma electron temperature and penetration depth in laser welding processes [J]. Physics Procedia, 2010, 5: 429-436.
- [10] Sibillano T, Rizzi D, Ancona A, *et al.* Spectroscopic monitoring of penetration depth in CO₂ Nd:YAG and fiber laser welding processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(4): 910-916.
- [11] Zhang H Z, Wu S K, Xiao R S. Influence of TIG arc on characteristics of high power CO₂ laser beam[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(7): 29-32.
张寰臻, 吴世凯, 肖荣诗. TIG 电弧对高功率 CO₂ 激光光束特性的影响[J]. 焊接学报, 2009, 30(7): 29-32.
- [12] Zhang H Z, Wu S K, Xiao R S. Characteristics of DC TIG arc with the action of a vertically incident CO₂ laser beam [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(3): 97-100.
张寰臻, 吴世凯, 肖荣诗. CO₂ 激光作用下直流 TIG 电弧特性分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(3): 97-100.
- [13] Ando H, Hasegawa K. Welding arc phenomenon [M]. Shi Y X, Transl. Beijing: Mechanical Industry Press, 1985: 56- 57.
安藤弘平, 长谷川光雄. 焊接电弧现象[M]. 施雨湘, 译. 北京: 机械工业出版社, 1985: 56- 57.
- [14] Zuo T C. Laser materials processing of high-strength aluminum alloy [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
左铁钊. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [15] Zou J L, Xiao R S, Huang T, *et al.* Plume temperature diagnosis with the continuous spectrum and Wien's displacement law during high power fiber laser welding [J]. Laser Physics, 2014, 24(10): 106007.
- [16] Liu L M, Hao X F. Study of the effect of low-power pulse laser on arc plasma and magnesium alloy target in hybrid welding by spectral diagnosis technique[J]. Applied Physics, 2008, 41(20): 205202.
- [17] Wu S K. Investigation on laser-arc interaction and novel laser-TIG arc hybrid welding processes [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010.
吴世凯. 激光-电弧相互作用及激光-TIG 复合焊接新工艺研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.