

# 波长对激光-CMT 复合焊熔滴过渡行为的影响

雷正龙<sup>1\*\*</sup>, 黎炳蔚<sup>1\*</sup>, 朱平国<sup>2</sup>, 陆韡<sup>2</sup>, 邢希学<sup>2</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

<sup>2</sup>上海航天动力技术研究所, 上海 201109

**摘要** 通过激光-CMT 复合焊试验,研究了激光波长对熔滴过渡行为的影响。结果表明,激光通过改变熔池形态和加热焊丝影响了熔滴过渡过程,激光-CMT 复合焊过程比 CMT 焊接过程稳定。CO<sub>2</sub> 激光对熔滴体积的影响较大,当 CO<sub>2</sub> 激光功率较小时,激光可以促进熔滴过渡;当 CO<sub>2</sub> 激光功率增大后激光会阻碍熔滴过渡。光纤激光对焊丝加热的作用较小,但可以增大熔滴过渡频率。CO<sub>2</sub> 激光和光纤激光等离子体温度均随激光功率的增大而升高,但 CO<sub>2</sub> 激光等离子体呈团状喷发,而光纤激光等离子体几乎不喷发。

**关键词** 激光技术; 熔滴过渡; 高速摄像; 等离子体

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1002006

## Effect of Wavelength on Droplet Transition Behaviors in Laser-CMT Hybrid Welding Process

Lei Zhenglong<sup>1\*\*</sup>, Li Bingwei<sup>1\*</sup>, Zhu Pingguo<sup>2</sup>, Lu Wei<sup>2</sup>, Xing Xixue<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

<sup>2</sup>Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Shanghai 201109, China

**Abstract** The effect of laser wavelength on the droplet transition behaviors is studied in the laser-CMT hybrid welding process. The results show that, the droplet transfer process is influenced when the molten pool shape and wire-heating are changed by the laser, and the laser-CMT hybrid welding process is more stable than the CMT welding process. The CO<sub>2</sub> laser has a relatively strong influence on the droplet volume. When the CO<sub>2</sub> laser power is relatively low, the laser can promote the droplet transition. However, the laser prevents the droplet transition process when the laser power increases. The fiber laser has a less effect on the wire-heating, but can increase the transition frequency of droplets. The plasma temperatures from the CO<sub>2</sub> laser and fiber laser increase with the increase of the laser power. The plasma by the CO<sub>2</sub> laser presents a lump-like eruption but that by the fiber laser shows no eruption.

**Key words** laser technique; droplet transfer; high-speed camera; plasma

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 300.6170

## 1 引言

激光及其复合焊技术具有能量密度高、焊接热输入小、焊缝成形与性能良好、焊接效率高等特点,被广泛应用于航天航空、汽车、造船以及石油管线等领域。从热源看,激光-电弧复合焊的研究主要集中在激光与非熔化极稀有气体保护电弧(TIG)或熔化极活性气体保护电弧(GMA)的复合;从应用看,主要集中在中、厚板的焊接<sup>[1-2]</sup>。相对于 TIG,熔化极

稀有气体保护电弧(MIG)具有送丝功能,可以改善焊缝成形和冶金性能,提高焊缝装配适应性,而冷金属过渡焊接技术(CMT)在 MIG 基础上发展而来,具有热输入小、电弧更稳定、无飞溅等优点<sup>[3-4]</sup>。因此,激光-CMT 复合焊可能是一种更适用于薄板焊接的方法<sup>[5]</sup>。

复合焊的研究主要集中于激光-MIG 复合焊<sup>[6-7]</sup>,而有关激光-CMT 复合焊的研究鲜有报道。Lamas 等<sup>[8]</sup>研究发现,虽然激光-CMT 复合焊的热

收稿日期: 2018-04-24; 修回日期: 2018-05-23; 录用日期: 2018-06-04

\* E-mail: 282033441@qq.com; \*\* E-mail: leizhenglong@hit.edu.cn

输入小于激光-MAG 复合焊的,填充量也较少,但其得到的焊缝更稳定。Frostevarg 等<sup>[9]</sup>研究发现,CMT 电弧通过功率调制和送丝控制,热输入量小于脉冲 MIG 和标准 MIG 电弧的,飞溅量显著减少,热影响区范围也更小。雷振等<sup>[10-11]</sup>研究发现,激光与 CMT 复合后,原本不稳定的 CMT 焊接过程变得更加稳定,并且焊缝成形得到改善,激光-CMT 复合焊的热输入量明显减小。高明等<sup>[12-13]</sup>认为,激光-CMT 复合焊的低热输入量不仅细化了 AA6061 铝合金对接头的等轴晶,而且抑制了柱状晶的生成。

激光使得激光-CMT 复合焊的熔滴过渡行为发生了改变,但目前的研究主要集中于工艺优化、组织及力学性能分析等方面,而针对激光-CMT 熔滴过

渡行为的研究鲜有报道。本文采用平板堆焊的方式,进行了激光-CMT 复合焊试验,研究了焊接过程中熔滴过渡行为的变化,分析了不同波长的激光对熔滴过渡行为的影响,为激光-CMT 复合焊技术的应用提供了试验依据。

## 2 试验材料及方法

以 S355J2W+N 耐候钢为母材进行焊接试验,试件尺寸为 300 mm×200 mm×6 mm,碳的质量分数约为 0.07%,属于低碳低合金钢,焊接性能较好。焊丝采用直径为 1.2 mm 的 BÖHLER NiCu 1-IG 焊丝,母材及焊丝的化学成分见表 1。焊前需对试件表面进行适当的切削加工、清洗。

表 1 母材及焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of base metal and welding wire (mass fraction, %)

Element	C	Mn	Si	S	P	Cr	Cu	Ni	Mo
S355J2W+N	0.070	1.280	0.360	0.0014	0.010	0.400	0.270	0.200	0.009
NiCu 1-IG	0.101	1.09	0.470	0.012	0.004	-	0.360	0.870	-

激光-CMT 焊接系统包括:美国 IPG 公司生产的 YLS-5000 型光纤激光器,激光波长为 1070~1080 nm,最小光斑直径为 0.36 mm;德国 Rofin 公司生产的 DC030 型 CO<sub>2</sub> 激光器,激光波长为 10.6 μm,最大输出功率 P 为 3000 W,最小聚焦直径为 0.2 mm,并配合计算机数字化控制实现多自由度的焊接;奥地利 Fronius 公司生产的 CMT2700 型 CMT 焊机,最大焊接电流为 270 A。同时,德国 Optronis 公司生产的 CR5000 型高速摄像机对焊接过程进行拍摄,采集熔滴过渡过程的图像特征。

激光-CMT 复合焊的装置及示意图如图 1 所示。激光倾角 α 为 80°,焊枪角度 β 为 45°,光纤间距 D 约为 1.5 mm。选择熔滴投影面积、熔滴过渡频率作为熔滴过渡行为的主要表征参数。CMT 为短路过渡,熔滴随电流的增大呈不同的形态变化,因此,以其在拍摄平面上的投影面积表征其体积变化,测量时刻为其接近熔池但并未过渡且呈规则形态的

某一时刻。熔滴投影面积测量示意图如图 2 所示,其中白色区域为熔滴面积。运用软件测量图像电弧区域的亮度即灰度值变化,统计时间为 2 s,共 10000 frame。熔滴平均过渡频率的计算公式为

$$f = \frac{N}{2}, \quad (1)$$

式中 N 为过渡的熔滴个数;f 为平均过渡频率。

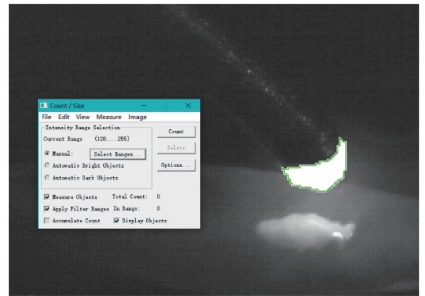


图 2 熔滴投影面积测量示意图

Fig. 2 Schematic of projection area measurement of droplet

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 激光-CMT 复合焊接特性

不同焊接方法下的焊缝表面面貌如图 3 所示。可以看出,激光-CMT 复合焊的过程比 CMT 焊接更加稳定、可靠。当电流 I 为 40 A 时,激光-CMT 复合焊中的激光促进了稳定连续的熔池形成,使得焊缝从不连续变为连续,并且熔宽明显增大;当电流为 80 A 时,激光-CMT 复合焊中的激光使焊缝余高减小,熔宽增大,焊缝出现明显的铺展现象。不同焊

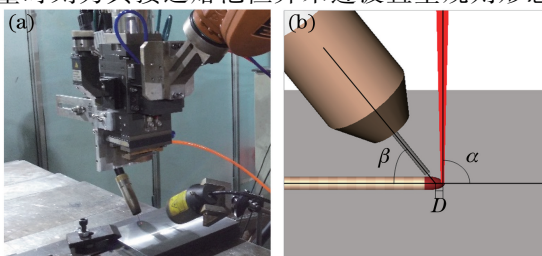


图 1 激光-CMT 复合焊。(a)装置;(b)示意图

Fig. 1 Laser-CMT hybrid welding.

(a) Equipment; (b) schematic

接方法下的焊缝横截面如图 4 所示。通过测量可知,激光-CMT 复合焊的熔深比单激光焊接的增大

了 9.6%,熔宽比 CMT 焊接的增大了 49.2%,表面余高比 CMT 焊接的减小了 22.9%。

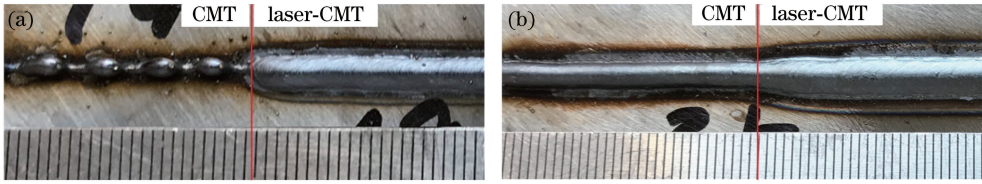


图 3 不同焊接方法下的焊缝表面形貌。(a)  $I=40\text{ A}$ ,  $P=1500\text{ W}$ ; (b)  $I=80\text{ A}$ ,  $P=1500\text{ W}$

Fig. 3 Weld surface morphologies under different welding methods.

(a)  $I=40\text{ A}$ ,  $P=1500\text{ W}$ ; (b)  $I=80\text{ A}$ ,  $P=1500\text{ W}$

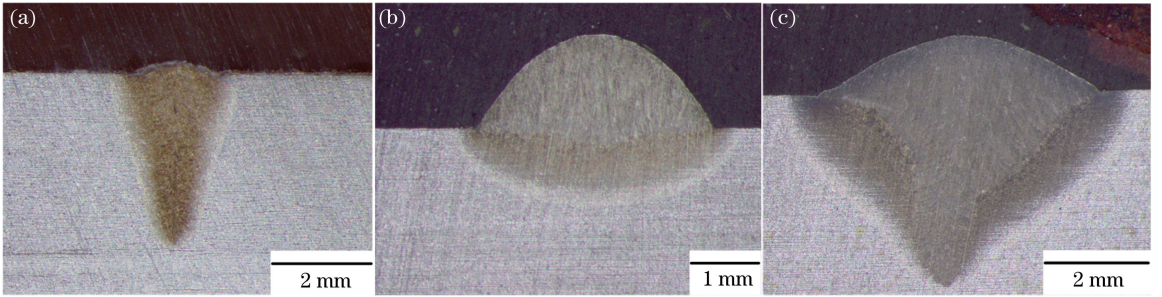


图 4 不同焊接方法下的焊缝横截面。(a)单激光;(b) CMT;(c)激光-CMT

Fig. 4 Weld cross sections under different welding methods. (a) Laser; (b) CMT; (c) laser-CMT

不同焊接方法下的熔滴过渡过程及相应的图像亮度曲线分别如图 5、6 所示。可以看出,CMT 焊接的过渡位置在熔池前面,熔滴在母材表面的润湿性较差,无法铺展形成连续的熔池,导致焊缝成形不连续。焊丝直接撞击在母材上,缩短了焊丝送进至回抽的缓冲时间,但当熔池不连续且起伏较大时,起弧及收弧时均会产生明显的偏吹现象,电弧形态不稳定。当加入激光后,激光促使连续稳定的熔池的形成,保证了 CMT 过渡的稳定性,并且熔池向两侧润湿铺展、高度减小,过渡位置变为熔池中部,焊丝完成回抽缓冲的过程,导致短路时间略有增大;同时,能量输入的增大可能会使焊丝持续熔化为液态金属,液桥断开时间增大,因此,激光-CMT 复合焊的

过渡时间相对较长,最终过渡频率减小约 9%。激光-CMT 复合焊中的激光起到了吸引电弧的作用,使电弧方向偏转向激光方向,避免了电弧的偏吹,有利于电弧形态的扩张且形态更加稳定,电弧体积变化较小,图像亮度的平均峰值增大并趋于一致,熔深比单激光和 CMT 焊接都有所增大。不同焊接方法下的熔滴过渡周期分布如图 7 所示。可以看出,激光-CMT 复合焊的熔滴过渡周期中位数与平均值都相对较高,表明其周期较慢,但其箱体范围(25%~75%)较小,说明分布更为集中。CMT 焊接的过渡周期数据在内限(1.5IQR)外存在较多异常值,且距离箱体较远,相比激光-CMT 复合焊过程更不稳定。

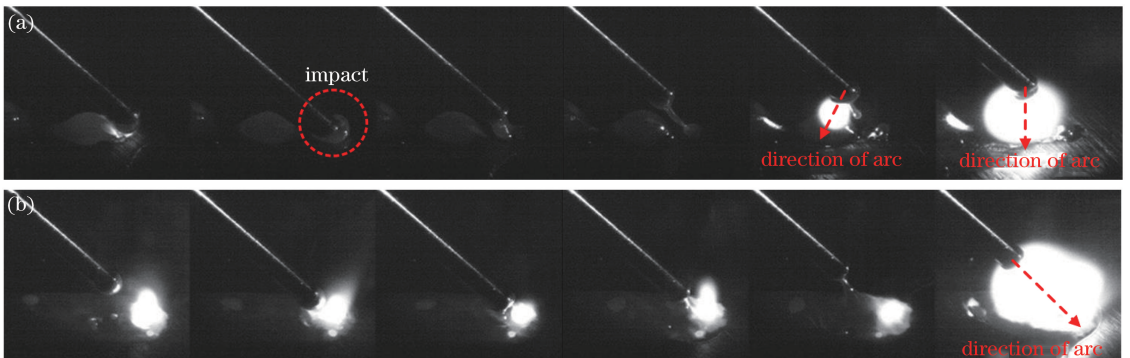


图 5 不同焊接方法下的熔滴过渡过程。(a) CMT;(b)激光-CMT

Fig. 5 Droplet transition processes under different welding methods. (a) CMT; (b) laser-CMT

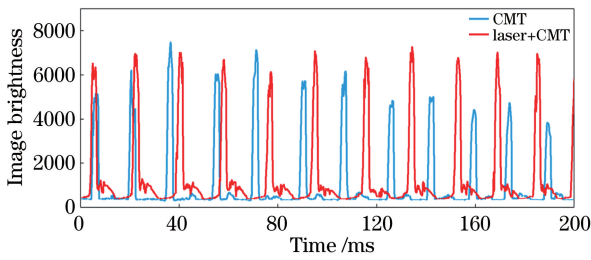


图 6 不同焊接方法下的熔滴过渡亮度曲线

Fig. 6 Brightness curves of droplet transition processes under different welding methods

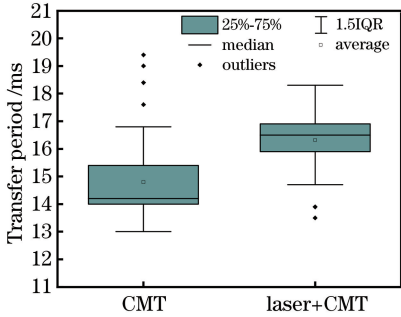


图 7 不同焊接方法下的熔滴过渡周期分布

Fig. 7 Transfer period distribution of droplets under different welding methods

### 3.2 不同波长对激光-CMT 复合焊接熔滴过渡行为的影响

不同波长激光对激光-CMT 复合焊熔滴过渡行为的影响不同。短波长激光对熔滴体积的影响较小,但起到了促进熔滴过渡的作用;长波长激光功率较小时可促进熔滴过渡,而激光功率过大会阻碍熔滴过渡。

激光功率对激光-CMT 复合焊熔滴过渡的影响如图 8 所示。激光的加入使得熔池铺展,熔滴过渡频率增大。当激光功率较小时,激光等离子体的热作用较小,熔滴体积增大较小。当激光功率大于

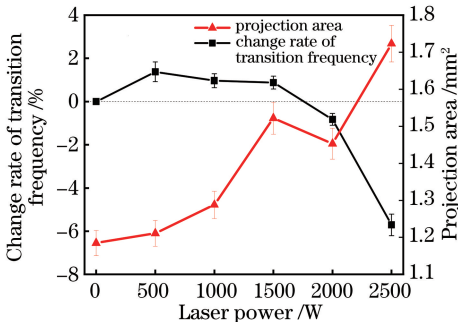


图 8 激光功率对激光-CMT 复合焊熔滴过渡的影响

Fig. 8 Effect of laser power on droplet transition in laser-CMT welding process

1500 W 时,激光匙孔较稳定,等离子体喷发导致的热作用增强,熔滴体积增大,熔滴过渡频率减小。当激光功率增大到 2500 W 时,熔池形态改变且铺展的效果更好,不同激光功率下熔池的形态如图 9 所示,可以看到,激光的热作用十分显著,熔滴过渡频率平均减小了约 5.7%。

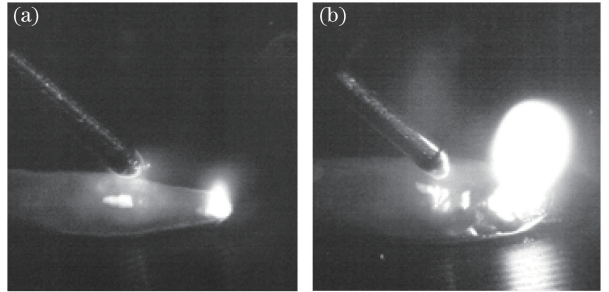


图 9 不同激光功率下熔池的形态。(a) 1500 W; (b) 2500 W

Fig. 9 Molten pool shapes under different laser powers.

(a) 1500 W; (b) 2500 W

不同波长的激光功率对熔滴过渡的影响如图 10 所示。可以看出,光纤激光对熔滴体积的影响较小,熔滴投影面积约为 1.2 mm<sup>2</sup>。CO<sub>2</sub> 激光在正交试验范围内的熔滴过渡频率呈无规律的波动,并且均值小于 2%。光纤激光起到了加快熔滴过渡的作用,由于光纤激光的波长较短,因此,母材和熔池对光纤激光的吸收率较大;当光纤激光的功率为 500 W 时,热输入增加,熔池形态发生改变,进而熔滴过渡频率增大。而母材和熔池对 CO<sub>2</sub> 激光的吸收率较小,且 CO<sub>2</sub> 激光对激光功率、离焦量的变化较为敏感。因此,当 CO<sub>2</sub> 激光的功率为 500 W 时,焊接过程中可能不产生匙孔,熔滴过渡频率没有改变。随着激光功率的增大,熔滴过渡频率迅速增大后趋于稳定,当激光功率大于 1000 W 时,使用光纤激光焊接的熔滴过渡频率平均增大约 12%。光纤激光-CMT 复合焊过程如图 11 所示。可以看出,使

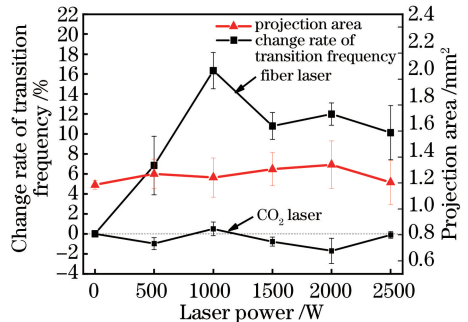


图 10 不同波长的激光功率对熔滴过渡的影响

Fig. 10 Effects of laser power on droplet transition under different laser wavelengths

用光纤激光进行复合焊时,匙孔上方等离子体的体积明显减小,甚至看不到等离子体呈团状喷发,因此,其对熔滴的热作用小于 CO<sub>2</sub> 激光的。

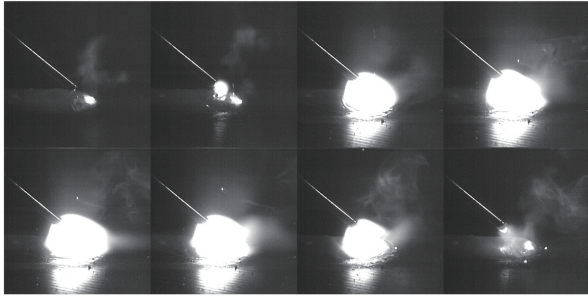


图 11 光纤激光-CMT 复合焊过程

Fig. 11 Fiber-laser-CMT hybrid welding process

熔滴体积的变化主要受激光热作用的影响,等离子体和熔滴体积随着激光功率的增大而增大,表现为熔滴过渡频率受熔滴体积的影响并与其呈负相关。短波长激光的等离子体体积较小,对熔滴加热作用不明显,因此,短波长激光促进熔池铺展、增大熔滴过渡频率。不同波长激光的熔滴过渡频率随电流的变化如图 12 所示。光纤激光的加入一直增大熔滴过渡频率,而 CO<sub>2</sub> 激光只有在电流为 140 A 时才起到促进过渡的作用。对于 CO<sub>2</sub> 激光,当电弧电流为 40 A 时,激光形成熔池促使过渡加快的作用与使焊丝端头熔化导致过渡减慢的作用接近平衡,因此熔滴过渡频率基本一致;而当电弧电流增大后,稳定熔池的作用减弱,激光等离子体热作用使其频率减小,但随着电流逐渐增大,激光等离子体热作用占

比逐渐减小,阻碍熔滴过渡的作用减弱;当电弧电流达到 140 A 时,激光等离子体的热作用使得熔滴体积增大并且提前出现了颈缩现象,有时会导致熔滴在短路瞬间直接脱落,焊丝立即回抽并再次起弧,其间可能会伴有少量飞溅,这种状态介于短路过渡与滴状过渡之间,熔滴过渡加快。对于光纤激光,等离子体热作用的减弱对熔滴体积的影响较小,主要作用为熔池铺展作用,明显加快了熔滴过渡;当电流较大时,激光等离子体带来的加快作用呈逐渐减弱的趋势。当电弧电流为 60 A 时,熔滴过渡频率出现了较大的波动,这是因为其增大效果受到硬件条件的限制。

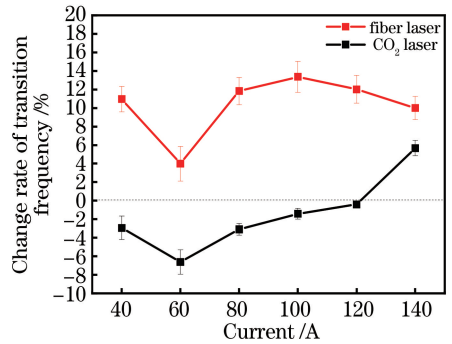


图 12 不同波长激光的熔滴过渡频率变化率随电流的变化

Fig. 12 Change rate of transition frequency of droplet versus current under different laser wavelengths

### 3.3 不同波长对激光-CMT 复合焊接等离子体的影响

当激光功率为 2000 W 时,CO<sub>2</sub> 激光等离子体光谱测量数据如图 13 所示,在此基础上,采用玻尔兹曼图法进行了激光焊接等离子体温度的计算。

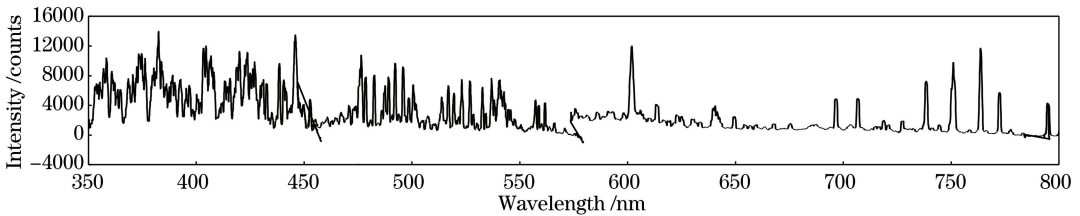


图 13 CO<sub>2</sub> 激光等离子体光谱测量数据

Fig. 13 Spectral measurement data of CO<sub>2</sub> laser plasma

选取了 Fe I 谱线进行计算,根据采集到的光谱信息,避开部分交叉光谱,选取的谱线见表 2,其中  $g_i$  为能级简并度,  $A_i$  为跃迁几率,  $E_i$  为跃迁能级间的能量。

利用玻尔兹曼法进行电子温度的计算。读取各个波长对应的强度峰值,计算各个波长  $\lambda$  对应的  $\ln[I_i \lambda / (g_i A_i)]$ , 并以其为纵坐标,以  $E_i$  为横坐标,其中  $I_i$  为光谱强度,得到的等离子体玻尔兹曼图如图 14 所示。将图中各点进行直线拟合,得到直线的

斜率就是  $-1/(kT_e)$ , 其中  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T_e$ 。

表 2 选取的谱线信息

Table 2 Selected spectral information

Wavelength / nm	$g_i$	$A_i / (10^7 \text{ s}^{-1})$	$E_i / \text{eV}$
382.5402	5	0.0647	3.25
392.80827	9	0.564	3.16
452.8613	7	0.544	2.74
452.7783	7	0.013	2.59
478.6088	5	0.103	1.91
523.1388	11	0.19	2.37

为等离子体温度,  $R$  为决定系数,  $R^2 = 0.4$ 。因此, 当  $\text{CO}_2$  激光功率为 2000 W 时, 等离子体的温度约为 5174 K。

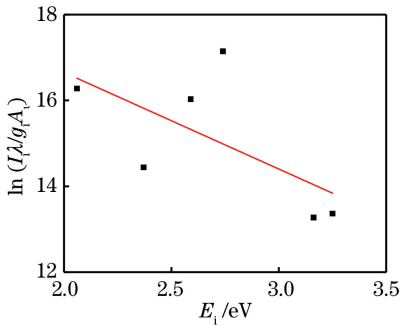


图 14 等离子体玻尔兹曼图

Fig. 14 Boltzmann graph of plasma

不同波长激光等离子体的温度变化曲线如图 15 所示。可以看出, 采用两种激光进行焊接时, 等离子体温度均随激光功率的增大而增大, 但温度并不相等。当激光功率较小时, 光纤激光等离子体的温度较大; 当激光功率大于 1500 W 时,  $\text{CO}_2$  激光产生的等离子体温度相对光纤激光的更高一些; 当激光功率为 2500 W 时, 两者温度差距达到 1000 K 以上。

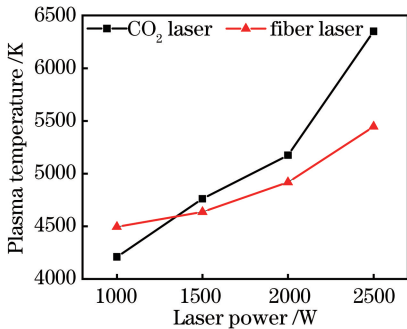


图 15 不同波长激光等离子体的温度变化

Fig. 15 Temperature change of laser plasma under different wavelengths

当激光功率较大时, 光纤激光在匙孔上方喷发出的等离子体电子密度小于  $\text{CO}_2$  激光的, 这可能是因为光纤激光等离子体临界密度远大于  $\text{CO}_2$  激光的, 光纤激光难以形成大量的等离子体, 尤其是发生电子崩后, 悬浮在匙孔表面的团状等离子体, 其能量主要以金属蒸气喷发的形式逸出<sup>[14-15]</sup>。当激光功率为 2500 W 时, 不同波长激光匙孔喷发的高速摄像图如图 16 所示。可以看出,  $\text{CO}_2$  激光等离子体喷发剧烈, 形成明显的团状等离子体, 而光纤激光被母材吸收较多, 喷发形式类似于气体喷发, 未见到团状等离子体, 因此其对熔滴的加热作用较小。

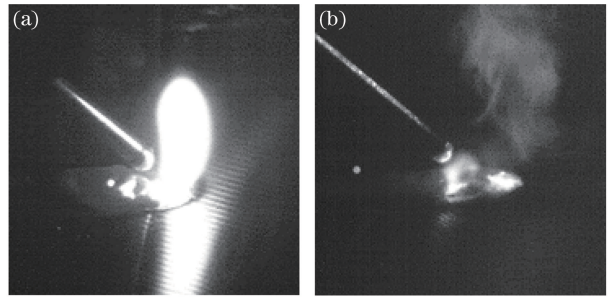


图 16 不同波长激光匙孔喷发的高速摄像图。

(a)  $\text{CO}_2$  激光; (b) 光纤激光

Fig. 16 High speed camera shooting of keyhole eruption by lasers with different laser wavelengths.

(a)  $\text{CO}_2$  laser; (b) fiber laser

## 4 结 论

通过激光-CMT 复合焊试验, 研究了不同波长激光对熔滴过渡行为的影响, 得出结论: 激光-CMT 复合焊的过程比 CMT 焊接过程更加稳定可靠, 熔池稳定连续, 电弧体积更加稳定, 熔滴过渡周期分布更加集中。  $\text{CO}_2$  激光在激光功率较小时可促进熔滴过渡, 光纤激光对熔滴体积的影响较小, 增大了熔滴过渡频率。不同波长激光进行激光-CMT 复合焊时, 等离子体温度均随激光功率的增大而增大。

## 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] Cui X M, Li L H, Zhang Y H. Welding with laser-arc compound heat source [J]. *Welding Technology*, 2003, 32(2): 19-21.  
崔旭明, 李刘合, 张彦华. 激光-电弧复合热源焊接 [J]. *焊接技术*, 2003, 32(2): 19-21.
- [3] Pinto H, Pyzalla A, Hackl H, *et al.* A comparative study of microstructure and residual stresses of CMT-, MIG- and laser-hybrid welds [J]. *Materials Science Forum*, 2006, 524/525: 627-632.
- [4] Pickin C G, Young K. Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy [J]. *Science & Technology of Welding & Joining*, 2006, 11(5): 583-585.
- [5] Zhu Y H, Geng Z Q. Limitation of sheet metal welding: CMT cool metal transition technique [J]. *Electric Welding Machine*, 2011, 41(4): 69-71.  
朱宇虹, 耿志卿. 薄板焊接的极限: CMT 冷金属过渡焊接技术 [J]. *电焊机*, 2011, 41(4): 69-71.
- [6] Li M, Zhang W, Hua X M, *et al.* Investigation of plasma and metal transfer dynamic behavior during

- fiber laser GMAW-P hybrid welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402008.
- 李敏, 张旺, 华学明, 等. 光纤激光与 GMAW-P 复合焊接等离子体及熔滴过渡动态特征研究[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402008.
- [7] 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.
- [8] Lamas J, Frostevarg J, Kaplan A F H. Gap bridging for two modes of laser arc hybrid welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 224: 73-79.
- [9] Frostevarg J. Comparison of three different arc modes for laser-arc hybrid welding steel[J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(2): 022407.
- [10] Lei Z, Lin S Y, Wang X Y, *et al.* A welding technology of laser-digital controlled short circuiting transfer arc hybrid welding: A new high-efficient welding technology replaced TIG welding filler wire [J]. Welding & Joining, 2009(5): 23-26.
- 雷振, 林尚扬, 王旭友, 等. 激光-数字化精确控制短路过渡电弧复合热源焊接技术: 一种可取代 TIG 填充丝焊的高效焊接新方法[J]. 焊接, 2009(5): 23-26.
- [11] Lei Z, Wang X Y, Wang W, *et al.* Laser-CMT hybrid welding with argon as shielding gas for 304 stainless steel[J]. Welding & Joining, 2010(8): 18-22.
- 雷振, 王旭友, 王威, 等. 基于纯氩保护气体的 304 不锈钢激光-CMT 电弧复合热源焊接试验研究[J]. 焊接, 2010(8): 18-22.
- [12] Gao M, Chen C, Gu Y Z, *et al.* Microstructure and tensile behavior of laser arc hybrid welded dissimilar Al and Ti alloys [J]. Materials, 2014, 7(3): 1590-1602.
- [13] Zhang C, Li G, Gao M, *et al.* Microstructure and process characterization of laser-cold metal transfer hybrid welding of AA6061 aluminum alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(5/6/7/8): 1253-1260.
- [14] Guo L. Characteristics of the vapor/plasmas induced during laser welding of typical aeronautical materials [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- 国莉. 激光焊接典型航空材料金属蒸汽/等离子体特征[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [15] Singh N, Razafinimanana M, Gleizes A. The effect of pressure on a plasma plume: Temperature and electron density measurements[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1998, 31(20): 2921-2928.