

电弧气氛对 CO₂ 激光与 TIG 电弧相互作用的影响

吴世凯, 肖荣诗, 张寰臻

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

摘要: 采用激光功率计、光束光斑质量诊断及高速摄像仪, 对比研究了氩和氦气氛下 CO₂ 激光与直流 TIG 电弧垂直相互作用时的光束特性和电弧特性。结果表明, 氩气氛时, 激光功率显著衰减, 光束散焦, 功率密度分布严重劣化; 与此同时, 电弧电压降低, 体积膨胀, 甚至产生激光支持的燃烧波; 而氦气氛时, 激光电弧相互作用时光束特性及电弧特性变化很小。不同气氛时激光电弧相互作用的差异源于气体的电离能不同, 电弧等离子体的电子数密度存在很大差异: 氦弧的电子数密度较氩弧低一个数量级, 因而氦弧对 CO₂ 激光的逆韧致吸收系数比氩弧低两个数量级。同时, 氦弧的折射率与大气相比较差异很小, 因而对激光束的折射效应弱。

关键词: CO₂ 激光; TIG 电弧; 电弧气氛; 逆韧致辐射吸收; 折射

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2009)10-0081-05



吴世凯

0 序 言

作为一种最具发展潜力的先进连接技术, 激光电弧复合焊接日益得到重视与发展。它综合了激光和电弧的优势, 在工业发达国家已应用于汽车、船舶、航空航天等工业领域。但是由于激光与电弧相互作用的复杂性及研究手段的限制, 激光与电弧相互作用物理机制的研究还很不深入^[1]。

Naito 等人^[2]对 TIG 与 YAG 激光复合焊接的基本现象进行了研究。Ishide 等人^[3]在研究 TIG 与 YAG 同轴复合焊接时, 测量了 TIG 电弧对 YAG 激光的吸收。Hu 等人^[4]使用功率计测量了 500 W Nd:YAG 激光垂直穿过 100 A 直流 TIG 电弧后的功率衰减。研究结果表明, YAG 激光穿过电弧空间的能量损耗非常低, 可以忽略不计, 同时电弧对激光的散射作用也不明显。

Bibik 等人^[5]使用 0.3~3 W 可调 CO₂ 激光垂直穿过 TIG 电弧时发现, 随电弧电流的增大, 激光的传输系数明显减小, 当电弧电流大于 200 A 时, 电弧对激光能量的吸收接近 30%, 试验中还观察到穿过电弧后光束中心功率密度严重下降甚至低于边缘。陈

彦宾等人^[6]采用激光烧蚀有机玻璃方法研究了电弧对脉冲 CO₂ 激光吸收及散焦情况, 结果显示 TIG 电弧对 CO₂ 激光存在严重的吸收作用, 激光穿过电弧后的功率衰减最大可达 35%, 另外激光穿过电弧时, 电弧等离子体的负透镜效应导致电弧对光束有一定的散焦作用, 从而降低了激光能量密度。

可见, 在 CO₂ 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。文中采用激光功率计、光束光斑质量诊断及彩色高速摄像仪, 研究 CO₂ 激光垂直作用于不同气氛直流 TIG 电弧时的电弧特性及光束特性。

1 试验方法

试验采用 Rofin DC035 Slab CO₂ 激光器, 光束模式为 TEM₀₀ 模, 经焦距 $f = 300$ mm 的旋转抛物反射镜聚焦, 聚焦光斑直径 0.27 mm。弧焊电源为 Fronius TS5000 数字焊机。试验布置如图 1 所示。聚焦激光束垂直作用于直流 TIG 电弧, 焦点位于电弧轴线。电弧电极为钨钨极, 阴极与阳极直径分别为 2.5 和 30 mm, 电极间距为 6 mm。电弧气氛分别为氩(15 L/min)和氦(25 L/min)气。Prometec UFF100 光束光斑质量诊断仪和 Molelectron 3sigma 功率计放置在电弧后方, 分别测量穿过电弧后的激光光斑直径及激光功率。同时使用 PHOTRON Fastcam 1024R2 彩色高速摄

收稿日期: 2008-07-01

基金项目: 北京市教委科技发展计划重点项目(KZ200710005003); 国家教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0204); 北京工业大学 111 人才工程资助项目

像仪(拍摄频率 $f = 8\,000$ 帧/秒)观测电弧形态变化.

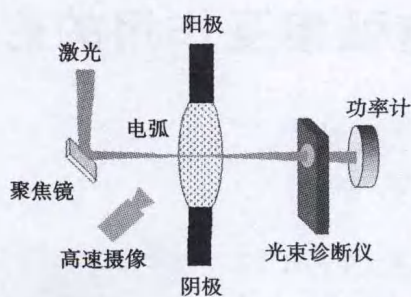


图1 试验布置示意图

Fig. 1 Experimental setup

2 试验结果

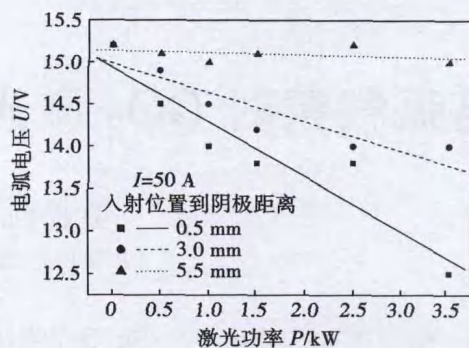
2.1 电弧电压

图2所示为电弧电流50 A时,激光作用于电弧不同位置时电弧电压的变化曲线.从图中可以看出,在氩气氛时,激光作用TIG电弧引起电弧电压的下降,激光作用距离阴极较近时,电压下降明显;作用位置越远离阴极,电压降低越少;激光作用靠近阳极时,电压几乎不变.而在氦气氛时,电弧电压没有明显变化.

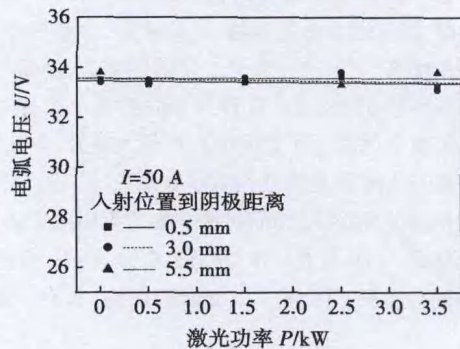
2.2 电弧形态

在氩气氛时,激光作用电弧后引起电弧体积膨胀,且膨胀主要发生在激光作用位置到阳极之间^[7].图3所示为激光作用于电弧中心时,激光作用位置处的电弧直径随激光功率的变化曲线.可以看出,在氩气氛时,随激光功率的增加,电弧膨胀加剧,在激光功率为3 500 W时,电弧直径膨胀了约100%.而在氦气氛时,激光对电弧形态的影响要小的多,在激光功率为3 500 W时,电弧直径仅扩大了约5%.

试验还发现,氩气氛时,当激光功率超过1 500 W时,将产生激光支持的燃烧波.燃烧波以一定的频率点燃、上升、熄灭,如图4所示($I = 100$ A,时间间隔:0.125 ms).试验测得燃烧波的频率约为500~1 000 Hz,上升速度可达15 m/s.而在氦气氛时,



(a) 氩弧



(b) 氦弧

图2 激光作用位置对电弧电压的影响

Fig. 2 Effect of laser-arc interaction position on arc voltage

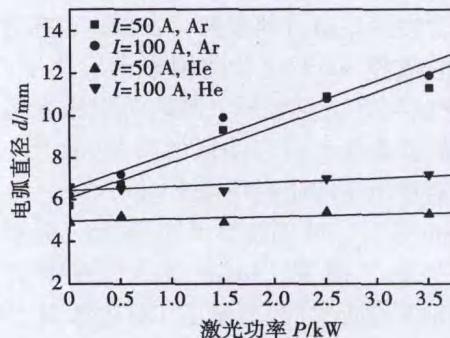


图3 激光功率对电弧直径的影响

Fig. 3 Effect of laser power on arc diameters

没有产生燃烧波.

2.3 激光能量传输率

图5所示为激光作用电弧中心时,激光能量传



图4 激光支持的燃烧波

Fig. 4 Laser-supported combustion waves at Ar atmosphere

即使在激光功率达到 3 500 W 时,也输率(P/P_0)随激光功率的变化曲线. 其中 P_0 为原始激光功率, P 为穿过电弧后的激光功率. 可见,在电弧气氛为氩气时,随激光功率的增加,能量传输率大幅下降,激光功率在 3 500 W 时,衰减接近 70%. 而在氦气氛时,激光能量的衰减非常小,在激光功率 3 500 W 时,其功率损耗仅为 3.5%.

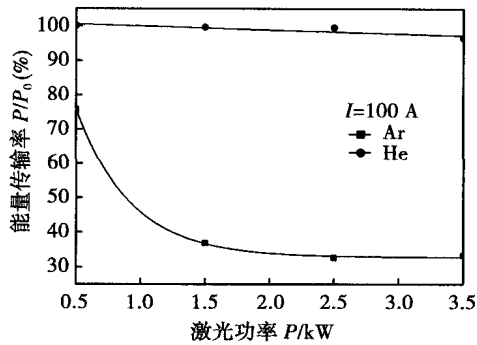


图 5 不同激光功率时的激光能量传输率

Fig. 5 Laser power transmission rate as a function of laser power

2.4 光束直径

图 6 所示为激光功率 500 W、电弧电流 100 A 时,激光穿过电弧后距离焦点 100 mm 处测得的光斑半径变化率(R/R_0)与激光作用电弧位置的关系,其中 R_0 为原始光斑半径, R 为穿过电弧后的光斑半径. 可见,在氩气氛下,激光穿过电弧后,光斑明显扩大,激光作用位置距离阳极越近,光斑扩大越明显. 而在氦气氛时,激光光斑基本没有变化.

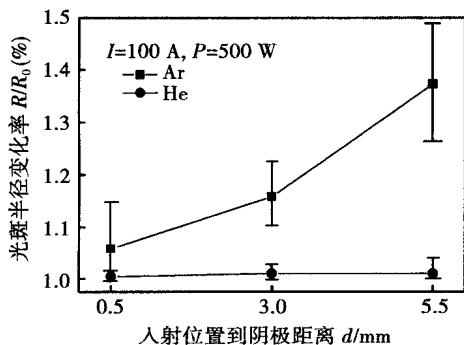


图 6 激光作用电弧不同位置时光斑半径的变化

Fig. 6 Relationship between beam radius and laser-arc interaction position

2.5 功率密度分布

图 7 所示为激光功率 2.5 kW 时,穿过不同气氛

后电弧功率密度分布状态. 从图中可以看出,氩气氛时,功率密度分布严重恶化. 而氦气氛时,光斑能量密度分布状态没有明显变化.

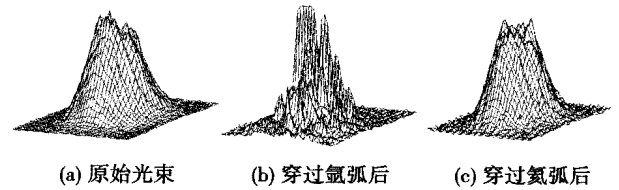


图 7 不同气氛时的功率密度分布 ($P=2.5$ kW, $I=100$ A)
Fig. 7 Powder density distribution at different arc atmosphere

3 分析与讨论

激光与电弧的相互作用可归结为激光与等离子体的相互作用.

激光在等离子体中传输时,其能量将部分被等离子体吸收,激光强度逐渐衰减. 逆韧致吸收是等离子体吸收的主要机制,其线性吸收系数为^[8,9]

$$K_a = \frac{Z^2 n_e n_i e^6 \bar{g}}{6\sqrt{3}\mu\epsilon_0^3 c h m_e^2 \omega^3} \left(\frac{m_e}{2\pi k T_e} \right)^{1/2} \times \left[1 - \exp\left(-\frac{h\omega}{k T_e} \right) \right] \quad (1)$$

式中: Z 为离子价数; n_e 和 n_i 分别为电子、离子密度; e 为电荷电量; $\bar{g}$ 为量子力学平均 Gaunt 因子; m_e 为电子质量; c 为光速; k 为波尔兹曼常数; $h = h_p/2\pi$, h_p 为普朗克常量; ϵ_0 为介电常数; ω 为激光光波圆频率 ($\omega_{\text{CO}_2} = 1.78 \times 10^{14}$ /s, $\omega_{\text{YAG}} = 1.78 \times 10^{15}$ /s); μ 为折射率; T_e 为等离子体温度.

等离子体的折射率为^[8,9]

$$\mu = \left(1 - \frac{n_e}{n_{cr}} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中: n_{cr} 为临界电子密度,对于 CO₂ 激光 n_{cr} 为 9.92×10^{18} /cm³.

在局部热力学平衡条件下,等离子体密度由 Saha 方程描述^[9] 为

$$\frac{n_e n_i}{n_0} = \frac{(2\pi m_e k T_e)^{3/2}}{h_p^3} \frac{2g_i}{g_0} \exp\left(-\frac{eU_i}{k T_e} \right) \quad (3)$$

式中: n_0 为中性原子数的密度; g_i , g_0 分别为离子基态和原子基态的统计权重; U_i 为电离能, i 为 1, 2, ..., n 次电离.

Glowacki^[9] 计算了氩和氦等离子体的电子浓度对 CO₂ 激光的吸收系数及折射率随温度的变化,如图 8~图 10 所示^[9]. 对于常压下自由燃烧电弧,在电流小于 200 A 时,氩弧温度在 12 000~15 000 K 左

右,而氦弧的温度在 15 000 ~ 18 000 K 范围^[10]. 在此温度范围内,氦电弧的电子数密度为 $10^{17}/\text{cm}^3$ 量级,氦弧与氩弧相比低一个数量级,这是由于氦的电离能低,而氩的电离能高. 相应地,氦弧对 CO_2 激光的线性吸收系数为 0.2 ~ 0.7/cm,而氩弧的吸收系数很小,不到氦弧的百分之一,因此激光穿过氦弧后功率衰减非常小. 由于氦弧对激光的吸收小,且氦的

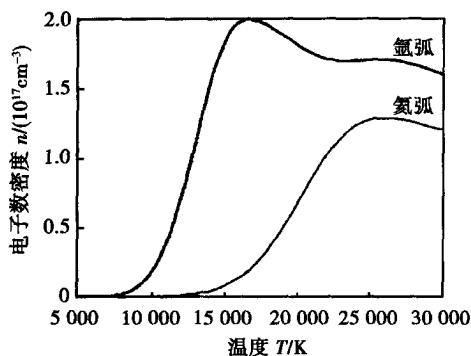


图 8 不同电弧气氛时,电子数密度随温度的变化

Fig. 8 Electron number density as a function of electron temperature for Ar and He atmosphere

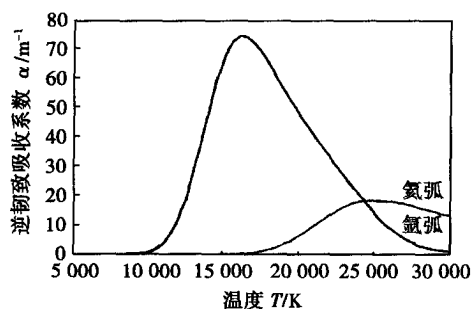


图 9 不同电弧气氛时,逆韧致吸收系数随温度的变化

Fig. 9 Inverse bremsstrahlung absorption coefficient as a function of electron temperature for Ar and He atmosphere

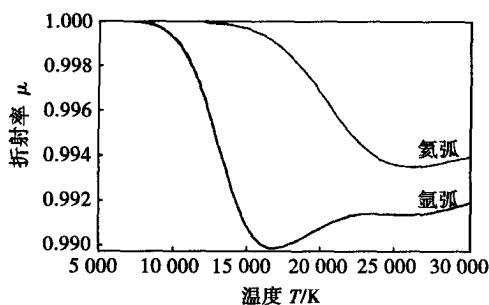


图 10 不同电弧气氛时,电弧等离子体折射率随温度的变化

Fig. 10 Refractive index as a function of electron temperature for Ar and He atmosphere

电离能高,激光作用对氦弧特性的影响小.

氩气氛时,电弧吸收激光能量,导致激光作用区电弧温度升高,体积膨胀,同时电子浓度增加,导电性增强,电压降低^[7]. 当激光功率密度超过某一临界值时,激光诱导产生的等离子体脱离电弧逆着激光束的入射方向运动,其机理与激光材料相互作用时形成激光支持的燃烧波相同^[11]. Bibik 等人^[5]在试验中测得电弧对小功率 CO_2 激光的吸收率可达 30%,而文中测得的吸收率可达 65% 以上,其原因是大功率激光作用下,电弧特性的变化,导致吸收的增强.

不同气氛时,电弧对光束直径及功率密度分布的不同影响源于几方面的原因:其一,如图 10 所示,氩弧与氦弧相比,其折射率与大气折射率的差异相对较大,因而对激光的折射效应相对较强;其二,等离子体对激光的吸收与电子密度的平方成正比,折射与电子密度梯度成正比^[12]. 氩气氛时,电弧吸收激光能量而使局部电子密度及电子密度梯度增加,因而吸收和折射效应进一步增强;其三,等离子体对激光的吸收和折射随激光在等离子体中的传播距离增加而增大. 氩气氛时,在高功率激光作用下产生燃烧波,因而对激光的吸收和折射效应进一步增强.

4 结 论

(1) CO_2 激光与氩弧相互作用时,激光功率衰减,可达 65% 以上,光束散焦,功率密度分布恶化,电弧电压降低,体积膨胀,甚至产生激光支持的燃烧波.

(2) CO_2 激光与氦弧相互作用时,在文中试验条件下,光束特性及电弧特性的变化很小:在激光功率为 3 500 W 时,电弧对激光吸收率仅为 3.5%,而光束直径、能量密度分布及电弧特性没有明显的改变.

(3) 不同气氛时,激光与电弧相互作用差异的主要原因是气体的电离能不同,导致电弧等离子体电子数密度不同.

参考文献:

- [1] Claus B, Flemming O O. Review of laser hybrid welding[J]. Journal of Laser Applications, 2005, 17(1): 2 - 14.
- [2] Naito Y, Mizutani M, Katayama S. Penetration characteristics in YAG laser and TIG arc hybrid welding, and arc and plasma/plume behavior during welding: welding phenomena in hybrid welding using YAG laser and TIG arc (first report)[J]. Welding International, 2006, 20(10): 777 - 784.

- [3] Ishide T, Tsubota S, Nayama M, *et al.* 10 kW class YAG laser application for heavy components [C]// *Proceedings of SPIE*. Osaka Japan, 2000: 543 – 550.
- [4] Hu B, Ouden G D. Laser induced stabilisation of the welding arc [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2005, 10(1): 76 – 80.
- [5] Bibik O B, Brodyagin V N, Rokladov Y P. Special features of interaction of laser radiation with the electric welding arc in the combined laser-arc welding [J]. *Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 1990, 24(2): 176 – 178.
- [6] 陈彦斌, 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.
Chen Yanbin, Li Liqun, Wu Lin. Measurement of laser absorption and defocusing by arc [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2003, 24 (3): 56 – 58.
- [7] 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.
Zhang Huanzhen, Wu Shikai, Xiao Rongshi. 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.
- [8] Mahrie A, Beyer E. Hybrid laser beam welding-classification, characteristics and applications [J]. *Journal of Laser Applications*, 2006, 18(3): 169 – 180.
- [9] Glowacki M H. The effects of the use of different shielding gas mixtures in laser welding of metals [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1995, 28(6): 2051 – 2059.
- [10] 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.
- [11] 左铁钊. 高强铝合金的激光加工 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [12] Poueyo-Verxaerde A, Fabbro R, Deshors G, *et al.* Experimental study of laser-induced plasma in welding conditions with continuous CO₂ laser [J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 74(9): 5773 – 5780.

作者简介: 吴世凯,男,1976 年出生,博士研究生.主要从事激光材料加工、复合焊接方面的研究工作.发表论文 10 篇.

Email: wushikai@emails.bjut.edu.cn