

TIG 电弧对高功率 CO₂ 激光光束特性的影响

张寰臻, 吴世凯, 肖荣诗

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

摘 要: 采用功率计、光束光斑质量诊断仪及高速摄像仪等先进手段, 研究了直流 TIG 电弧对垂直作用的 CO₂ 激光光束特性的影响。结果表明, 电弧将吸收部分激光能量, 吸收率随电弧电流及激光功率的增加而增加, 且作用位置越靠近阳极吸收率越高。与此同时, 电弧等离子体的折射效应使激光光束散焦、变形并向阴极方向偏转。入射的激光功率越高、电弧电流越大、激光作用位置越靠近阳极, 光束散焦和变形越明显。电弧对激光的吸收和散焦的共同作用, 使穿过电弧的激光功率密度显著降低。

关键词: CO₂ 激光; 电弧; 吸收; 折射; 负透镜

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2009)07-0029-04



张寰臻

0 序 言

激光-电弧复合焊接是一种先进的连接技术, 它综合了两种热源各自的优势, 在改善激光焊接桥联性的同时, 进一步提高了焊接效率, 成为当今焊接领域的前沿研究热点之一^[1]。

国内外很多学者对激光-电弧复合焊接机理进行了研究。Kutsuna 等人^[2]在对 CO₂ 激光-MAG 复合焊中光致等离子体与电弧相互作用研究中指出: 随激光与电弧间距的减小, 激光会入射到电弧内部, 此时焊接熔深相对减小; 为了获得较大熔深, 最佳间距是在激光恰好辐照于电弧边缘, 但仍处于电弧等离子体云之内; 当光致等离子体与电弧分开时, 焊接熔深会减小。

一般来说激光与电弧间距要取决于电弧和熔池的体积大小, 它们又受到电弧电流、电压和焊接速度的影响。此外在电弧对激光光束的影响方面, Hu 等人^[3]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, 计算出电弧对 YAG 激光的吸收系数为 $1.03 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$, 激光通过电弧的能量损失仅为 0.7%。Bibik 等人^[4]使用 0.3~3 W 可调 CO₂ 激光垂直穿过 TIG 电弧得出, 随电

弧电流的增大, 激光的传输系数明显减小, 穿过电弧后光束中心功率密度严重下降甚至低于边缘。文献[5]采用激光烧蚀有机玻璃方法定性研究了电弧对脉冲 CO₂ 激光吸收及散焦情况, 结果显示在激光功率较高时电弧不同区域对激光的吸收基本相同, 激光功率较低时电弧阴极区对激光吸收较弱, 阳极区吸收较强, 电弧对激光的散焦作用随激光功率、电弧电流增大而增强。

文中采用激光功率计和光束光斑质量诊断等仪器设备, 系统研究 CO₂ 激光垂直作用于直流 TIG 电弧时光束特性的变化规律。

1 试验方法

试验采用 Rofin DC035 Slab CO₂ 激光器, 光束模式为准 TEM₀₀ 模, 经焦距 $s = 300 \text{ mm}$ 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。电弧气氛为流量 15 L/min 的氩气。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大小及激光功率。使用美国 PHOTRON Fastcam 1024R2 彩色高速摄像仪(拍摄频率 $f = 2\,000 \text{ 帧/s}$)观测电弧形态变化。

收稿日期: 2008-06-25

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)及北京工业大学 111 人才工程资助项目

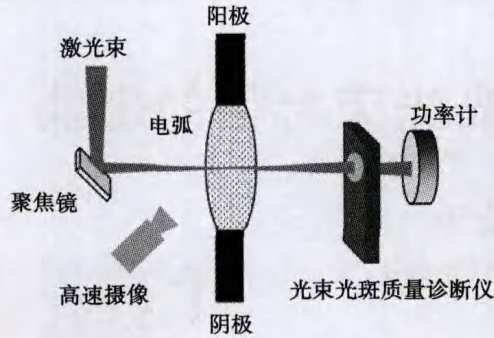


图 1 试验布置示意图
Fig.1 Experimental setup

2 试验结果

2.1 电弧对激光能量的吸收

图 2 和图 3 分别为不同电弧电流和激光功率条件下,激光穿过电弧时的激光能量传输率 P/P_0 随作用位置的变化曲线, P_0 为原始激光功率, P 为穿过电弧后的激光功率。可见,激光穿过电弧后,激光功率衰减,电弧电流越大、激光功率越高,激光功率衰减越明显。同时,激光作用位置越靠近阳极,激光

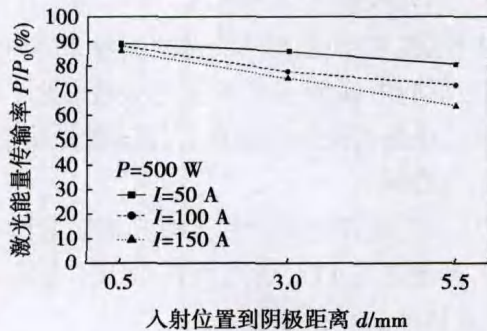


图 2 不同电弧电流时激光能量传输率与作用位置的关系
Fig.2 Relationship of laser power transmission rate and laser-arc interaction position with different arc currents

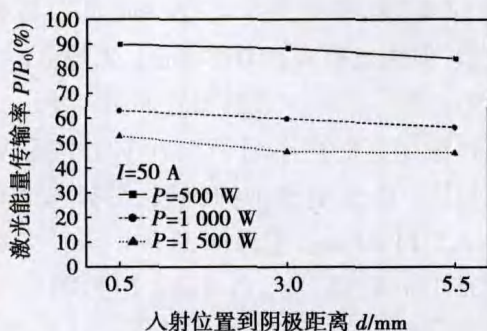


图 3 不同激光功率时激光能量传输率与作用位置的关系
Fig.3 Relationship of laser power transmission rate and laser-arc interaction position with different laser powers

功率的衰减越大。在激光功率达到 1 500 W 时,电弧对激光能量的吸收超过 50%。

激光在电弧等离子体中传输,能量的衰减遵从 Beer-Lambert 定律。通过高速摄像拍摄电弧形态,计算得到不同电流和不同激光功率时的平均吸收系数 K_a 与激光作用于电弧位置的关系见图 4,图 5。可见,在电弧电流小于 80 A 时,随着电流的增加,电弧对 CO_2 激光的吸收系数增加,但幅度不大。当电弧电流大于 80 A 时,吸收系数不再随电流变化。而随着激光功率的增加,吸收系数明显增大。

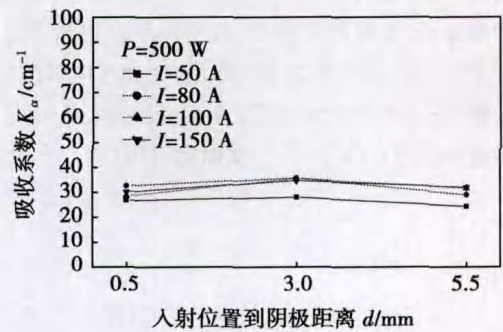


图 4 不同电弧电流时的吸收系数与激光作用位置的关系
Fig.4 Relationship of absorption coefficient and laser-arc interaction position with different arc currents

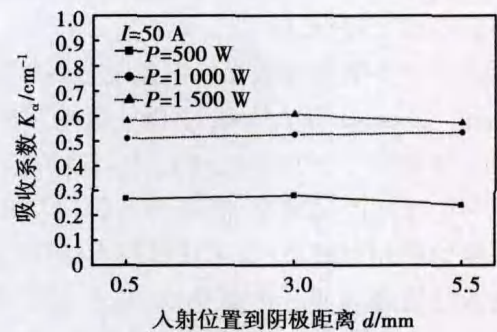


图 5 不同激光功率时的吸收系数与激光作用位置的关系
Fig.5 Relationship of absorption coefficient and laser-arc interaction position with different laser powers

2.2 电弧对光束的偏折

图 6 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与激光作用电弧位置的关系, R_0 为原始光斑半径, R 为穿过电弧后的光斑半径。可见,激光穿过电弧后,光斑扩大,激光作用位置距离阳极越近,光斑扩大越明显。

试验还发现,激光穿过电弧后,光束向阴极偏折。图 7 为激光作用电弧不同位置时,光斑中心位置偏离原始光束轴线的距离随光束传输距离的变

化. 图7中箭头所示为激光的作用位置,可以看出,激光作用位置越靠近电弧阳极,光束偏折角度越大.

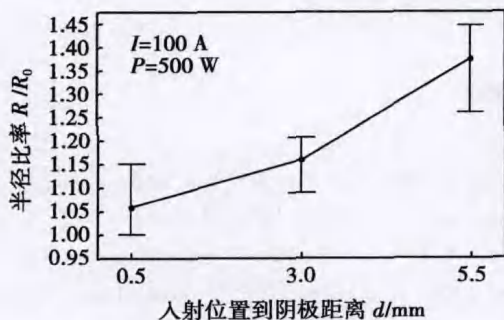


图6 激光作用电弧不同位置时光斑半径的变化

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

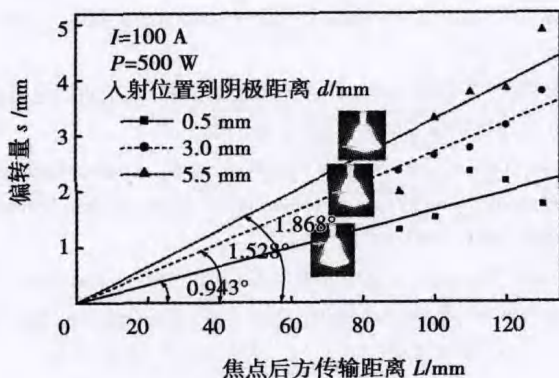


图7 激光不同作用位置时光束传输方向的变化

Fig.7 Beam path deviation at different laser-arc interaction position

2.3 电弧对光斑形态和功率密度分布的影响

图8为电弧电流100 A,激光功率500 W时,激

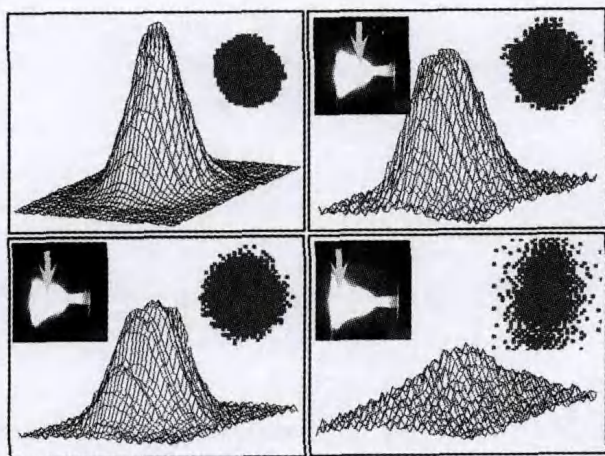


图8 激光不同作用位置时光斑形态及功率密度分布

Fig.8 Beam configuration and powder density distribution at different laser-arc interaction position

光穿过电弧后的光斑形态及功率密度分布,图8中箭头所示为激光的作用位置.可见,激光穿过电弧后,不仅光斑尺寸扩大,而且形态发生变化.

激光作用越靠近阳极,光斑形态变化越显著,由圆形逐步变为椭圆形.与此同时,中心功率密度显著下降,并且当激光功率达到1500 W时,中心功率密度的降低接近90%,如图9所示.

激光功率密度的降低是电弧对激光能量的吸收和散焦共同作用的结果.

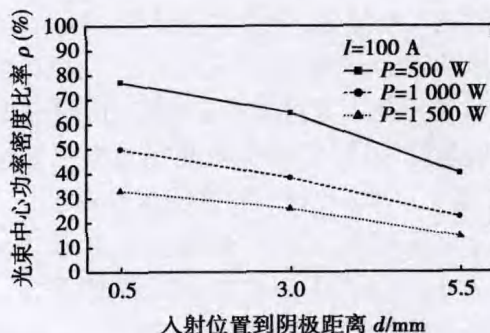


图9 功率密度与激光作用位置的关系

Fig.9 Relationship of power density and laser-arc interaction position

3 分析与讨论

作为一种等离子体,电弧的折射率可表示为

$$n_r = (1 - \frac{n_e}{n_{cr}})^{1/2}$$

式中: n_e 为电弧电子密度,常压下一般TIG电弧的电子密度为 $10^{16} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; n_{cr} 为光波在等离子体中传播的临界电子密度,与波长的关系可表示为 $n_{cr} = \epsilon_0 m_e \omega^2 / e^2 = 10^{21} / \lambda^2$,其中, ϵ_0 , m_e , ω 和 e 分别为真空介电常数、电子质量、激光圆频率、基本电荷.对于CO₂激光, $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, $n_{cr} = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.可见,对于CO₂激光,一般TIG电弧的折射率为实数且小于1.这意味着,一方面激光可以在电弧中传播,另一方面电弧是一个光疏介质.激光在电弧中传播时,电弧等离子体将通过逆韧致辐射吸收部分激光能量,从而导致激光功率衰减.激光功率的衰减与电弧温度、电子浓度和激光在电弧中的传播距离有关.在电弧电流较小时,随着电弧电流的增加,电弧温度和电离度增大,同时电弧体积膨胀,因而电弧对激光的吸收增强.在电弧电流较大时,虽然电弧对激光的吸收系数不再随电流的增大而变化,但是,电弧体积将随着电弧电流的增加而进一步膨胀,因而电弧对激光的吸收仍将继续增加.激光作用位置越

靠近阳极,电弧断面越大,吸收的激光能量越多,激光能量的衰减越明显.

激光作用电弧时,电弧吸收激光能量将使电弧温度升高、电离度增大,并引起电弧体积膨胀. 激光功率越高,电弧吸收的激光能量越多,电弧温度和电子浓度越高,等离子体对激光的吸收系数越大,同时电弧体积膨胀也越显著,因此激光功率的衰减幅度越大.

由于电弧中心温度高,电子浓度大,电弧中心的折射率比电弧边缘更小,类似于一个负透镜,从而导致入射激光束的散焦,光束直径扩大. 同时,由于电弧靠近阴极尺寸小,靠近阳极尺寸大,而电弧的折射率小于 1,类比光束穿过普通三棱镜(折射率大于 1)时向厚端偏折,很容易理解激光穿过电弧时会向阴极方向(电弧尺寸小的一端)偏转这一现象.

激光束在等离子体中传输时的偏转角 $\Delta\theta = z \times \nabla n_e / 2n_e$ 与等离子体的电子密度梯度 ∇n_e 及光束在等离子体中传输距离 z 成正比^[6,7]. 电弧电流越大、激光功率越高、激光作用位置越靠近阳极,光束在电弧中传输路径越长,散焦现象越明显. 另一方面,由于电弧中心部位径向电子密度梯度大于轴向电子密度梯度,造成在垂直于电弧轴线方向光束散焦大于沿电弧轴向的光束的散焦,使得光斑变形.

4 结 论

(1) CO₂ 激光穿过 TIG 电弧时,激光功率衰减. 入射激光功率越高、电弧电流越大、激光作用位置越靠近阳极,激光功率的衰减越大.

(2) CO₂ 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. 入

射的激光功率越高、电弧电流越大、激光作用位置越靠近阳极,光束散焦、变形和偏转越明显.

(3) 电弧对激光的吸收和折射的共同作用,使激光功率密度显著降低.

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] Kutsuna M, Chen L. Interaction of both plasmas in CO₂ laser-MAG hybrid welding of carbon steel[C]// Osaka Japan, Proceeding of SPIE, 2003: 341-346.
- [3] 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.
- [4] Bibik O B, Brodyagin V N, Pokladov Y P. Special features of interaction of laser radiation with the electric welding arc in the combined laser-arc welding[J]. Fizikai Khimiya Obrabotki Materialov, 1990, 24(2): 95-98.
- [5] 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.
- [6] Poueyo-Verxaerde A, Fabbro R, Deshors G. Experimental study of laser-induced plasma in welding conditions with continuous CO₂ laser[J]. Journal of Applied Physics, 1993, 74(9): 5573-5780.
- [7] Michael C F, David C S. Ignition and maintenance of subsonic plasma waves in atmospheric pressure air by cw CO₂ laser radiation and their effect on laser beam propagation[J]. Journal of Applied Physics, 1975, 46(1): 138-150.

作者简介: 张寰臻,女,1982 年出生,硕士研究生. 主要从事激光—电弧相互作用研究. 发表论文 2 篇.

Email: huanwozhengzhen@gmail.com