

文章编号: 0258-7025(2010)10-2667-05

高功率 CO₂ 及 Yb:YAG 激光与 TIG 电弧 相互作用特性对比

吴世凯 肖荣诗 杨武雄 陈 锐

(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机,对比研究了 CO₂ 激光及 YAG 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,CO₂ 激光穿过 TIG 电弧后,激光功率显著衰减,光束散焦,能量分布状态严重劣化,而且电弧电压降低,体积膨胀,甚至产生激光支持的燃烧波;而对于 Yb:YAG 激光,电弧基本不吸收激光能量,电弧对激光特性的影响可以忽略,同时电弧电压及电弧形态也没有明显变化。试验条件下,计算得 TIG 电弧对 CO₂ 激光和 YAG 激光的逆韧致吸收系数分别为 14.14~26.29 m⁻¹ 和 1.1~2.03 m⁻¹。同时, TIG 电弧对 CO₂ 激光和 YAG 激光的折射率分别为 0.99249~0.99454 和 0.99992~0.99994。TIG 电弧对 CO₂ 激光的逆韧致吸收系数远高于对 YAG 激光的吸收率,同时, TIG 电弧对 YAG 激光的折射率与大气相比较差异很小。这是 CO₂ 激光及 YAG 激光与电弧相互作用存在很大差异的根本原因。

关键词 激光技术;CO₂ 激光;Yb:YAG 激光;TIG 电弧;电弧形态;逆韧致辐射吸收;折射

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103710.2667

Characteristics Comparison of Laser-TIG Arc Interaction Using High Power CO₂ and Yb:YAG Laser

Wu Shikai Xiao Rongshi Yang Wuxiong Chen Kai

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract The characteristics of both laser beam and TIG arc are investigated during the interaction between the vertical incident laser and TIG arc by using a laser power meter, a beam quality diagnosis instrument and a high speed camera. The experimental results demonstrate that, when CO₂ laser beam passes through TIG arc, the laser power is attenuated dramatically, the beam is defocused and even a laser supported combustion wave is generated. In this case, the beam quality is seriously worsened. On the other hand, the arc voltage is dropped and the arc column is expanded. However, the beam power, beam diameter, arc voltage and arc column seldom change during TIG arc interacted with Yb:YAG laser. Under the experimental conditions, the inverse bremsstrahlung absorption coefficient calculated is 14.14~26.29 m⁻¹ for CO₂ laser, 1.1~2.03 m⁻¹ for YAG laser and the refractive index is 0.99249~0.99454 for CO₂ laser, 0.99992~0.99994 for YAG laser, respectively. The inverse bremsstrahlung absorption coefficient for YAG laser is two orders of magnitude lower than that for CO₂ laser. Meanwhile, there is less difference between the refractive index of YAG laser-TIG and YAG laser-air, so there is no obvious refraction of the TIG arc to the YAG laser, which is the main reason for the great difference between the CO₂ laser-TIG and YAG laser-TIG interaction.

Key words laser technique; CO₂ laser; Yb:YAG laser; TIG arc; arc configuration; inverse bremsstrahlung absorption; refraction

收稿日期: 2010-01-19; 收到修改稿日期: 2010-04-12

基金项目: 北京市教委科技发展计划(KZ200710005003)重点资助课题。

作者简介: 吴世凯(1976—),男,博士研究生,主要从事激光材料加工方面的研究。E-mail: wushikai@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 肖荣诗(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光与材料相互作用,先进材料激光加工,激光加工新工艺、新方法 & 外围技术与系统等方面的研究。E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

激光-电弧复合焊接是将两种物理性质、能量传输机制截然不同的热源复合,作用在同一熔池而形成焊缝,它充分发挥了激光和电弧焊接的优势,弥补了单一热源焊接的不足,并产生了‘1+1>2’的“协同效应”。在提高焊接效率的同时,改善激光焊接的桥接性,降低间隙敏感度。近年来,激光-电弧复合焊接得到了广泛关注和积极研究^[1,2]。

在激光-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^[3]。激光-电弧相互作用时的电弧特性及光束特性的变化将对焊接过程、能量耦合等产生重要影响。目前复合焊接中主要采用CO₂激光和YAG激光。当激光与电弧复合后,激光束对电弧具有吸引和压缩作用,同时电弧电压降低,电弧也变得稳定^[4]。Paulini等^[5]的理论计算结果表明同样条件下,激光穿过1 cm长度的电弧后,约40%的CO₂激光能量被电弧吸收,而对YAG激光仅为0.3%。Hu等^[6]使用功率计测量了500 W Nd:YAG激光垂直穿过100 A直流氩弧焊(TIG)电弧后的功率衰减,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。Bibik等^[7]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%,陈彦宾等^[8,9]对CO₂激光与TIG电弧相互作用时的电弧形态及电弧对激光束的吸收和散焦情况进行了研究,结果显示TIG电弧对CO₂激光存在严重的吸收作用,同时电弧吸收激光能量后,电弧体积发生膨胀。刘黎明等^[10]对低功率YAG激光-熔化极气体弧焊(GMAW)复合焊接过程中的电弧形态、电压特点及局部电子温度、密度变化进行了研究。试验表明,低功率YAG激光吸引、压缩GMAW电弧,提高电弧局部区域的电子温度及电子数密度,同时降低了GMAW热源输出电压。

近年来,随着激光技术的不断进步,高功率、高光束质量激光束与电弧的复合焊接逐渐成为研究的主流方向^[11,12]。但是关于高功率激光束与电弧相互作用后的电弧形态、能量分布及光束形态、功率密度及能量传输等缺乏系统深入的研究。本文采用激光功率计、光束光斑质量诊断及彩色高速摄像机,对比研究了CO₂激光及Yb:YAG激光垂直作用于TIG电弧时的电弧特性及光束特性。

2 试验方法及条件

试验采用Rofin DC035 Slab CO₂ ($\lambda=10.6 \mu\text{m}$, 3.5 kW)及DS040HQ DISC Yb:YAG ($\lambda=1.03 \mu\text{m}$, 4 kW)激光器,弧焊电源为Fronius TS5000数字焊机,实验布置如图1所示。光束经焦距 $f=300 \text{ mm}$ 的聚焦镜聚焦后,垂直作用于直流TIG电弧,焦点位于电弧轴线,其中CO₂激光的聚焦光斑直径是0.27 mm,最大功率密度为 $6.12 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$,YAG激光的聚焦光斑直径是0.3 mm,最大功率密度为 $5.66 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 。电弧电极为钨钨极,阴极与阳极直径分别为2.5 mm和30 mm,电极间距为6 mm。电弧气氛为15 L/min的氩气。Molelectron 3sigma功率计布置于电弧后方,分别测量穿过电弧前、后的激光功率,并用数字电压计记录电弧电压。同时使用PHOTRON Fastcam 1024R2彩色高速摄像机(拍摄频率 $f=8000 \text{ frame/s}$)记录电弧形态变化。

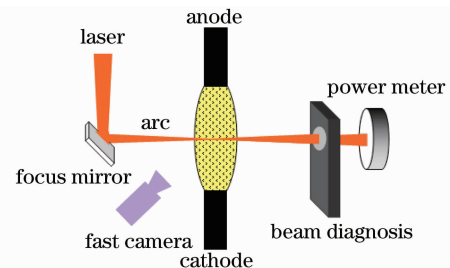


图1 实验布置示意图

Fig. 1 Experimental setup

3 试验结果

3.1 激光功率

图2为电弧电流为100 A时,激光穿过电弧中间位置后,激光能量传输率(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

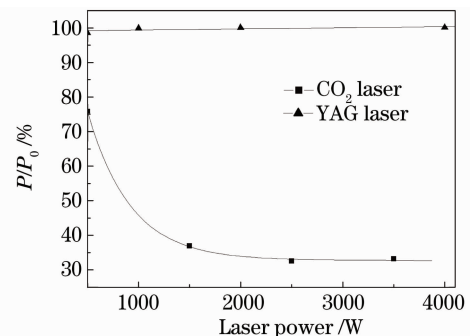


图2 激光功率对激光能量传输率的影响

Fig. 2 Effect of laser power on laser power transmission rate

的激光功率。由图可见,对于 CO₂ 激光,随激光功率的增加,能量传输率大幅下降,在激光功率超过 2500 W 时,衰减接近 70%;而对于 YAG 激光,即使激光功率为 4000 W 时,其功率也都基本没有衰减,能量传输率接近 100%。

3.2 光斑形态及能量密度分布

图 3 为激光功率 500 W,电弧电流 100 A 时,激光束穿过 TIG 电弧前后的光斑半径变化率(R/R_0)与激光作用位置的关系,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,CO₂ 激光穿过 TIG 电弧后,其光斑明显扩大,激光作用位置距离阳极越近,光斑扩大越明显;而对于 YAG 激光,电弧的散焦作用不明显。

图 4 为电弧电流 100 A,激光功率 500 W 时,激光束穿过 TIG 电弧后的光斑形状及能量分布状态,图中箭头所示为激光的作用位置。从图中可以看

出,CO₂ 激光穿过电弧后,光斑形态发生明显变化,随激光作用位置靠近阳极,光斑形态由圆形逐步变为椭圆形,同时中心功率密度显著下降。当激光功率达到 1500 W 时,中心功率密度的降低接近 90%,同时功率密度分布状态严重恶化。而 YAG 激光穿过电弧后,光斑形态及能量分布状态没有明显变化。

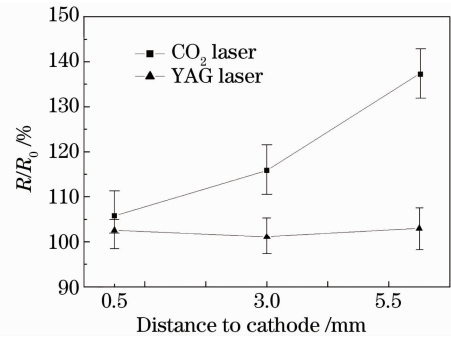


图 3 激光作用电弧不同位置时光斑半径的变化率
Fig. 3 Effect of laser incident position on the beam radius

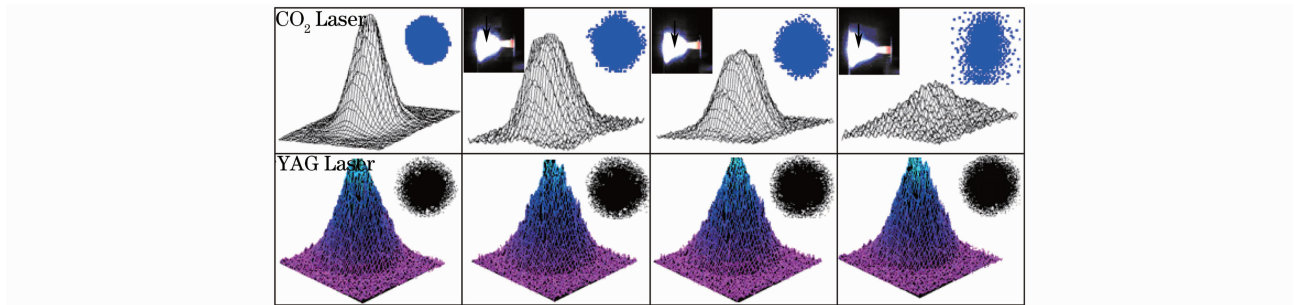


图 4 激光作用电弧不同位置时光斑形状及能量分布状态
Fig. 4 Beam configuration and power density distribution when CO₂ and YAG laser beam pass through TIG arc from different arc regions

3.3 电弧伏安特性

图 5 为激光作用于 TIG 电弧中间位置时的电弧伏安特性曲线。由图可知,在 CO₂ 激光作用下,电弧伏安特性曲线向下移动,其下移程度随电弧电流的增强而逐渐减小;激光功率越高,电弧电压特性

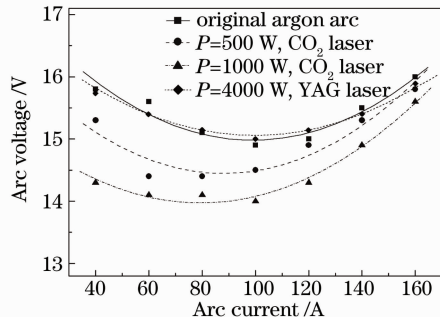


图 5 激光作用后的电弧伏安特性
Fig. 5 Effect of laser incidence on the voltage-current characteristic of TIG arc

曲线下移幅度越大。而在 YAG 激光作用下,电弧伏安特性则几乎没有变化。

3.4 电弧形态

图 6 为激光作用于 TIG 电弧中心时,激光作用位置处的电弧直径变化率(D/D_0)随激光功率的变

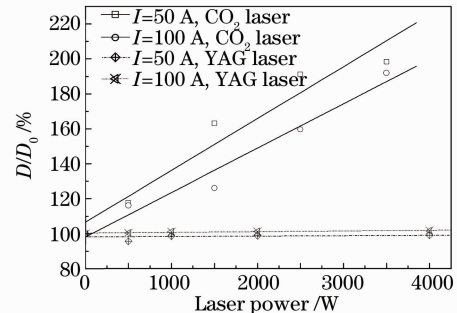


图 6 激光穿过电弧后的电弧直径变化率
Fig. 6 Local arc diameter expansion rate when laser beam passes through TIG arc from the middle region

化曲线,其中 D_0, D 分别为激光作用前后,激光作用位置处的电弧直径。可以看出,CO₂ 激光穿过电弧后,激光作用位置处的电弧直径明显增大,电弧发生膨胀,其膨胀程度随电弧电流的增大而减小,随激光功率的增大而加剧,在激光功率为 3500 W 时,电弧直径几乎增加了 1 倍。而 YAG 激光穿过电弧后,即使在激光功率为 4000 W 时,电弧没有发生明显膨胀。

试验中还发现,对于 CO₂ 激光作用 TIG 电弧后,在激光功率超过 1500 W(功率密度为 2.62×10^6 W/cm²)时,将产生激光支持的燃烧波。燃烧波逆着激光束的入射方向运动,并脱离电弧而熄灭,随后该过程周期性地重复产生。实验测得燃烧波的频率为 500~1000 Hz,上升速度可达 15 m/s。对于 YAG 激光,即使激光功率为 4000 W(功率密度为 5.66×10^6 W/cm²)时,激光穿过电弧后也没有产生燃烧波。

4 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播时,激光场中高频振荡的电子在和离子碰撞时会将其相应的振动能变成无规则运动能,激光能量部分被等离子体吸收,激光强度逐渐减弱,这就是逆韧致吸收过程,它是等离子体吸收激光能量的主要机制。根据经典的电子-离子碰撞理论,等离子体对电磁波的逆韧致吸收系数为^[1,13,14]

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

式中 Z 为离子价数, n_e, n_i 分别为电子和离子数密度, 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 为玻尔兹曼常数, $h = h_p/(2\pi)$ (h_p 为普朗克常量), ϵ_0 为真空介电常数, ω 为激光光波圆频率, μ 为折射率, T_e 为等离子体温度。

对于高频的激光束来说,由于 $h\omega \ll k T_e$, (1) 式可近似为

$$K_a \approx \frac{Z^2 n_e n_i e^6 \lambda^2}{6 \sqrt{3} \epsilon_0^3 c^2 m_e^{3/2} (2\pi)^{5/2}} (k T_e)^{-3/2}, \quad (2)$$

式中 λ 为激光波长。

等离子体的折射率为^[1,14]

$$\mu = \left(1 - \frac{n_e}{n_{cr}} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

式中 $n_{cr} = \frac{\epsilon_0 m_e \omega^2}{e^2}$ 为临界电子密度。 n_{cr} 对于 CO₂ 激光为 9.92×10^{24} m⁻³, YAG 激光为 9.84×10^{26} m⁻³。

在局部热力学平衡条件下,等离子体密度由 Saha 方程描述^[14]

$$\frac{n_e n_i}{n_0} = \frac{(2\pi m_e k T_e)^{3/2}}{h_p^3} \frac{2g_i}{g_0} \exp\left(-\frac{eU_i}{k T_e}\right), \quad (4)$$

式中 n_0 为中性原子的数密度, 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 为电离次数。

(2) 式表明激光作用电弧等离子体后,电弧等离子体对激光的吸收与等离子体密度的平方成正比,与激光波长的平方成正比,和等离子体温度的 $3/2$ 次方成反比。实验条件下,激光作用 TIG 电弧后,作用位置处的局部温度在 14000~15000 K^[15], 此时电弧等离子体主要为一次电离,即 $Z=1, n_e = n_i$ 。根据(2)式计算得到电弧的电子数密度为 $1 \times 10^{23} \sim 1.5 \times 10^{23}$ m⁻³。由(1)式计算的 TIG 电弧对 CO₂ 激光和 YAG 激光的吸收系数分别为 $14.14 \sim 26.29$ m⁻¹ 和 $1.1 \sim 2.03$ m⁻¹, TIG 电弧对 CO₂ 激光的线性吸收系数远高于 YAG 激光。这是 CO₂ 激光穿过电弧后,激光功率快速衰减,而 YAG 激光穿过电弧后,其功率衰减可以忽略的主要原因。

电弧吸收 CO₂ 激光能量后,导致激光作用位置处的电弧温度升高,体积膨胀;同时电子浓度增加,导电性增强,电压降低。激光功率越高,作用位置越靠近阳极,电弧吸收的激光能量越多,激光功率的衰减幅度越大,中心功率密度的降低幅度越大。当激光功率密度超过 1500 W 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^[15]。此时,吸收的激光能量主要维持燃烧波的波动,能量传输率达到平衡。

根据上述计算结果,由(3)式计算得, TIG 电弧对 CO₂ 激光和 YAG 激光的折射率分别为 0.99249~0.99454 和 0.99992~0.99994。由于 TIG 电弧对 CO₂ 激光的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较强。而对于 YAG 激光,电弧等离子体对光束的折射率与大气折射率的差异很小,因此其折射效应不明显。此外,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,相当于一个负透镜,从而导致入射激光束散焦,光束直径扩大。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。激光束在等离子体中传输时的偏转角 $\Delta\theta=z\cdot\nabla n_e/(2n_{cr})$,其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^[16,17],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。

对于 YAG 激光穿过 TIG 电弧时,由于其折射率基本与大气折射率相当,同时由于电弧不吸收激光能量,YAG 激光对 TIG 电弧特性的影响很小。此时,电弧对 YAG 激光透明,几乎不影响激光束的传输特性。

5 结 论

研究表明 CO₂ 激光穿过 TIG 电弧后,激光功率衰减,光束散焦,功率密度分布恶化;同时电弧电压降低,体积膨胀,甚至产生激光支持的燃烧波。对于 YAG 激光,电弧基本不吸收激光能量,电弧对激光特性的影响可以忽略,同时电弧电压及电弧形态也没有明显变化。TIG 电弧对 CO₂ 激光的吸收和折射效应强,而对 YAG 激光的吸收和折射效应很弱是 CO₂ 及 YAG 激光与电弧相互作用差异的主要原因。

参 考 文 献

- 1 A. Mahrle, E. Beyer. Hybrid laser beam welding-classification, characteristics, and applications [J]. *J. Laser Appl.*, 2006, **18**(3): 169~180
- 2 B. Ribic, T. A. Palmer, T. DebRoy. Problems and issues in laser-arc hybrid welding [J]. *Int. Mater. Rev.*, 2009, **54**(4): 223~244
- 3 W. M. Steen. Arc augmented laser processing of materials [J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(11): 5636~5641
- 4 Xiao Rongshi, Wu Shikai. Progress on laser-arc hybrid welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1680~1685
肖荣诗, 吴世凯. 激光电弧复合焊接的研究进展 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1680~1685
- 5 J. Paulini, G. Simon. A theoretical lower limit for laser power in laser-enhanced arc welding [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1993, **26**: 1523~1527
- 6 B. Hu, G. D. Ouden. Laser induced stabilization of the welding arc [J]. *Sci. Technol. Weld. Joi.*, 2005, **10**(1): 76~80
- 7 O. B. Bibik, V. N. Brodyagin, Y. P. Rokladov. 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
- 8 Y. B. Chen, Z. L. Lei, L. Q. Li *et al.*. Experimental study on welding characteristics of CO₂ laser TIG hybrid welding process [J]. *Sci. Technol. Weld. Joi.*, 2006, **11**(4): 403~411
- 9 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
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
- 10 Liu Liming, Huang Ruisheng, Cao Yunming. Behavior analysis of low power YAG laser-gas metal arc welding hybrid welding arc plasma [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3167~3173
刘黎明, 黄瑞生, 曹运明. 低功率 YAG 激光-熔化极气体弧焊复合焊接电弧等离子体行为研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3167~3173
- 11 R. Michael, Gook Sergej, Lammers Marco *et al.*. Laser-hybrid welding of thick plates up to 32 mm using a 20 kW fiber laser [J]. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 2009, **27**(2): 74s~79s
- 12 C. Li, K. Muneharua, S. Takao *et al.*. Fiber laser-GMA hybrid welding of commercially pure titanium. [J]. *Matet. Design*, 2009, **30**(1): 109~114
- 13 T. P. Hughes. Plasmas and Laser Light [M]. London: Adam Hilger, 1975. 24~81
- 14 M. H. Glowacki. The effects of the use of different shielding gas mixtures in laser welding of metals [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1995, **28**: 2051~2059
- 15 Wu Shikai. Investigation on Laser Interaction and Novel Laser-TIG Arc Hybrid Welding Processes [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010. 51~54
吴世凯. 激光-电弧相近作用及激光-TIG 复合焊接新工艺研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2010. 51~54
- 16 A. Poueyo-Verxaerde, R. Fabbro, G. Deshors. Experimental study of laser induced plasma in welding conditions with continuous CO₂ laser [J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(9): 5573~5580
- 17 C. F. Michael, C. S. David. Ignition and maintenance of subsonic plasma waves in atmospheric pressure air by CW CO₂ laser radiation and their effect on laser beam propagation [J]. *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**(1): 138~150