

高功率 CO₂ 激光焊接等离子体控制实验研究

唐霞辉 朱海红 朱国富 李家熔 李再光

(华中理工大学激光加工国家工程研究中心 武汉 430074)

提要 采用精密的侧吹辅助气体调节和控制装置, 实验研究了等离子体控制的各种工艺参数; 采用光电晶体管检测熔池表面及小孔内等离子体光强变化; 从理论上分析了等离子体控制的机理. 结果表明: 当辅助气体流量变化时, 等离子体控制效果呈现三个区间. 无论采用何种气体, 只要辅助气体的操作压力稍大于金属蒸气压力, 等离子体即被最佳控制.

关键词 CO₂ 激光焊接, 等离子体控制, 辅助气体

1 引 言

在高功率 CO₂ 激光深熔焊接过程中, 当入射激光能量密度大于 10^6 J/cm^2 时, 金属表面不仅产生剧烈熔化而且产生瞬时气化, 金属蒸气中的一部分起始自由电子通过逆韧致辐射吸收激光能量而被加速, 直至有足够的能量来碰撞电离材料和周围气体, 电子密度从而雪崩式地增长, 形成致密的等离子体. 它对激光产生强烈的吸收和散射作用, 使激光能量受到极大损失, 导致焊缝变浅、深宽比减小, 形成“酒杯”状焊缝, 甚至使厚板激光焊接无法进行^[1].

等离子体控制是解决高功率激光焊接的关键技术之一, 国外从八十年代初期即进行这方面的研究工作, 并出现了各种具有等离子体控制的激光焊接头. 我国在等离子体控制方面主要局限于采用简单的侧吹喷嘴, 导致焊缝质量差, 缺乏重复性和稳定性. 本文通过采用精密调节装置及检测手段, 旨在系统地探索等离子体控制的最佳工艺参数, 较深入地研究等离子体控制的机理, 对于促进高功率激光焊接技术的发展及应用具有重要的理论意义和实用价值.

2 实验条件

采用国产 5 kW 横流 CO₂ 激光器, 低阶模(TEM₀₂模)输出额定功率 3 kW, 主要用于焊接, 聚焦透镜焦距 $f = 125 \text{ mm}$. 侧吹辅助气体装置固定在焊接头上, 采用紫铜管喷嘴将辅助气体吹向等离子体. 喷嘴能在 x, y, z 三维方向移动并在 y, z 平面上转动, 如图 1 所示. 由量程为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 的流量计监测辅助气体流量, 并用精密压力探头测量激光-工件作用点处的气体压力(操作压力). 将两支对蓝光敏感的光电二极管固定在焊接头上, 检测等离子体光强. 一支朝下对准激光作用点, 距工件高度为 30 mm; 另一支沿 x 方向平行于工件, 高度为 8 mm. 采用 40 MHz 双踪示波器观察检测信号波形.

试验材料为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 厚度有 3 mm, 4 mm 两种, 钢板表面扫描焊缝. 取激光功率 $P_L = 2 \text{ kW}$, 焊接速度 $V = 1 \text{ m/min}$, 离焦量 $\Delta f = -1 \text{ mm}$. 整个试验过程中, 焊接线能量保持一定, 使光致等离子体的原始状态具有重复性. 焊后分别沿横、纵向将焊缝剖开. 采用金相显微镜观察焊缝形貌及组织.

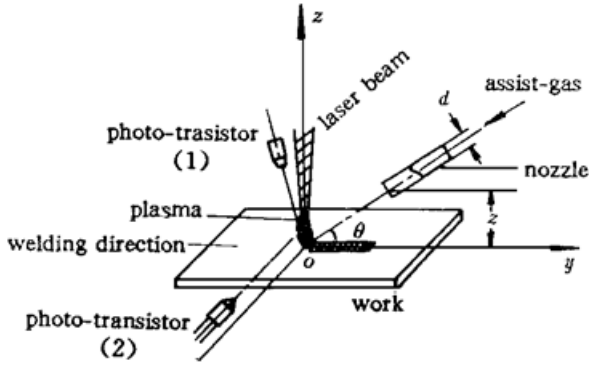


图 1 实验装置示意图
Fig. 1 Experimental setup

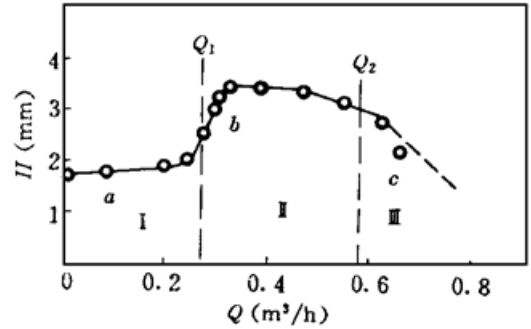


图 2 辅助气体流量 (Q) 对熔深(H) 的影响
Fig. 2 Effect of assist-gas flow quantity (Q) on penetration depth (H) ($H-Q$ curve)

3 等离子体控制实验参数及结果分析

3.1 喷嘴角度 θ

喷嘴角度是保证小孔中等离子体控制的前提^[2]. 试验表明: 当喷嘴平行于工件时, 辅助气体几乎不起作用; 在 $0^\circ < \theta < 30^\circ$ 范围内, 熔深 H 随 θ 增大而增加; 当 $\theta \geq 30^\circ$ 时, H 达到最大. 一般取 $30^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ 为最佳.

3.2 气体流量 Q

取喷嘴内径 $d = 1.8 \text{ mm}$, 角度 $\theta = 45^\circ$, 以 Ar 气作为辅助气体. 测得熔深 (H) - 流量 (Q) 曲线如图 2 所示, 采用 3 mm 板焊接时, 对应几个关键点的焊缝横截面金相照片如图 3 所示.

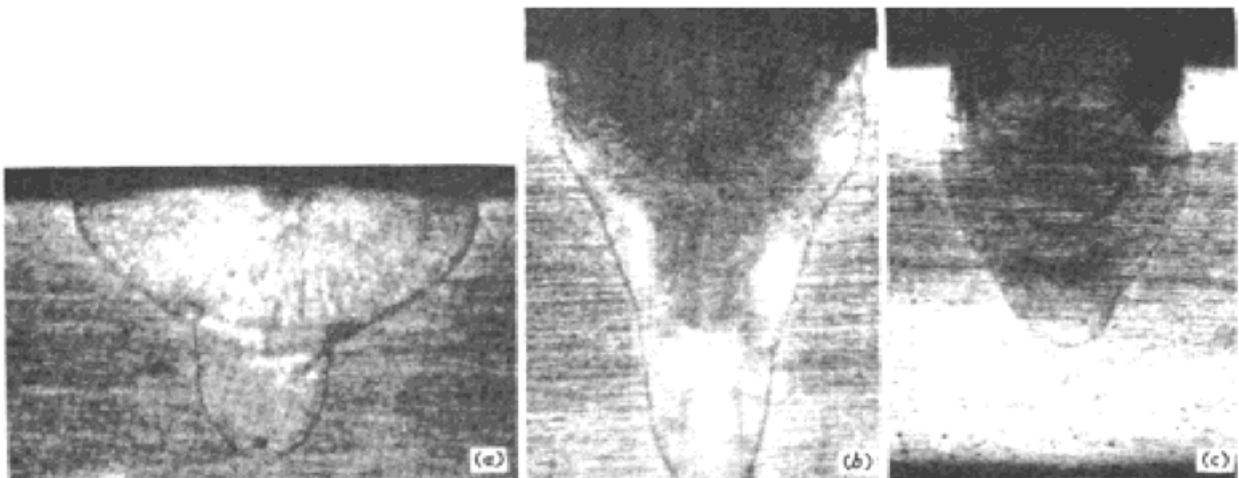


图 3 焊缝的金相照片(25×)
Fig. 3 Bead cross-sectional metallograph (25×)

实验发现 $H-Q$ 曲线可以分为三个区间: 第 I 区间: $Q < Q_1$ (Q_1 为最低临界气流量), 焊缝横

截面为典型“酒杯”状,熔深仅为 1.8 mm,深宽比很小;焊缝纵截面轮廓线平滑. H 随 Q 增加而变化很小,等离子体蓝光强烈. 第一区间: $Q_1 \leq Q \leq Q_2$ (Q_2 为最高临界气流量),焊缝熔深及深宽比陡然增加,其最大熔深比第一区间几乎增加一倍,并且 H 随着 Q 的增加而增大,最后达到最大. 焊缝纵截面产生细微的波动,此时等离子体控制效果最佳,蓝光变浅. 第二区: $Q > Q_2$,焊缝表面产生一波一波凸起和严重咬边,内部出现孔洞;纵向截面熔深变浅、起伏很大. 等离子体为红色羽焰,且不稳定.

3.3 喷嘴内径 d 及其与工件作用位置

3.3.1 喷嘴高度 Z 、内径 d

喷嘴倾角 θ 一定时, z 越大,喷嘴越后移. 当 $d = 1.8 \text{ mm}$ 时,取 $Z = 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 \text{ mm}$, 所得 $H-Q$ 曲线如图 4 所示. 可见 z 越大,曲线往右移,这是由于气体喷出后发散,作用到小孔内的气体压力减小. 同时可见 z 越大,第一区间缩小. 故一般情况下,取较小的 d, z 值,以减小气体消耗,并获得较宽流量区间以消除误差,保持控制过程的稳定性. 此外的实验表明,喷嘴内径 d 并非随激光功率增大而增加, d 取值主要与小孔的大小相匹配.

3.3.2 x, y 方向位移量

以激光-工件作用点为坐标原点,喷嘴中心线延长后与 xy 平面(工件表面)的交点所在的坐标值即为喷嘴在 x, y 方向的位移量(参见图 1). 当 $\theta = 45^\circ, d = 1.8 \text{ mm}, z = 4 \text{ mm}$ 时,取图 2 中最佳气流量 $Q = 0.3 \text{ mm}^3/\text{h}$, 调节喷嘴 x, y 方向的平行位移. 实验结果表明:当 $-0.6 \text{ mm} < x < +0.6 \text{ mm}, -0.8 \text{ mm} < y < +0.6 \text{ mm}$ 时为最佳焊缝区间,并且整个曲线变化趋势与图 2 相似. x, y 最佳取值范围几乎接近焊接小孔的尺寸. 当 $y = -0.4 \text{ mm}$ 时,熔深最大,此时气流正对小孔的前半部;当 $y < -0.6 \text{ mm}$ 时,出现“酒杯”状焊缝,相当于图 2 的第一区间;当 $y > 0.8 \text{ mm}$ 时,焊缝表面产生“蛇形”横向扭曲,熔深高低起伏很大,主要是由于气流对熔池的冲击所致^[3]. 故喷嘴最佳位置为 $x = 0, y = -0.4 \text{ mm}$, 最大容许范围为 $-0.6 \text{ mm} < x < +0.6 \text{ mm}, -0.8 \text{ mm} < y < +0.6 \text{ mm}$.

3.4 气体种类

当等离子体浓度不太高时,选择合适的主吹保护气体对于抑制等离子体具有一定效果,并且熔深与保护气体的电离势成正比. 在 He, CO₂,

N₂, Ar 等四种气体中,以 He 气的熔深最大, Ar 气最小^[4]. 比较以上四种气体作为侧吹辅助气体时,其试验结果如图 5 所示. 可见,每条曲线在三个流量区间上虽有不同,但其最大熔深无多大差别. 这说明辅助气体流量选择比其电离势的作用更重要,这样可以选用价廉的 CO₂, N₂, Ar 气来作为辅助气体,而 CO₂, N₂ 在高温熔池中与金属材料发生冶金反应,影响焊缝的性能,故绝大多数情况下,采用 Ar 气.

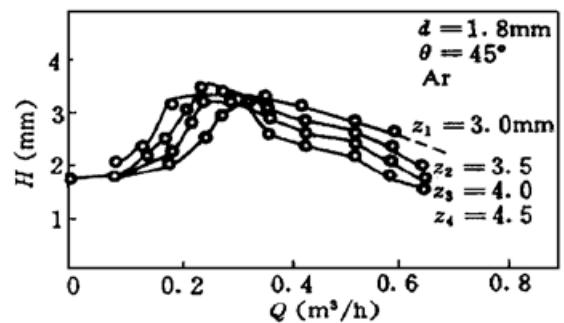


图 4 不同喷嘴高度时的 $H-Q$ 曲线

Fig. 4 $H-Q$ curve for various z heights

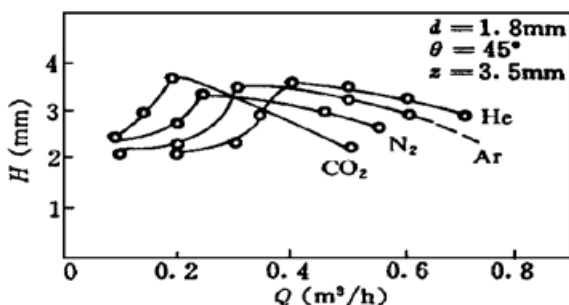


图 5 气体种类变化时的 $H-Q$ 曲线

Fig. 5 $H-Q$ curve for various gas species

4 等离子体光强检测

焊缝成型是评价等离子体控制好坏的最终依据,而等离子体光信号检测是监视等离子体动态过程的依据.尤其是小孔中的等离子体一般方法无法检测,实验表明,采用朝下设置的光电二极管极其有效,结果如图 6 所示.图 6 (a) 表示光强平均幅值的变化,可见第Ⅰ区间时,熔池表面等离子体光强很小,而小孔内尚有一定的等离子体,这种稀薄的等离子体有利于材料对激光的吸收^[5].图 6 (b), (c) 为等离子体光强的动态波形,可见等离子体未加控制时,波形幅值较高,但起伏很小,相当平稳;当控制最佳时,除起始点以外,波形幅值陡然下降,但起伏稍大,这是由于气体的作用使等离子体产生一定的扰动.

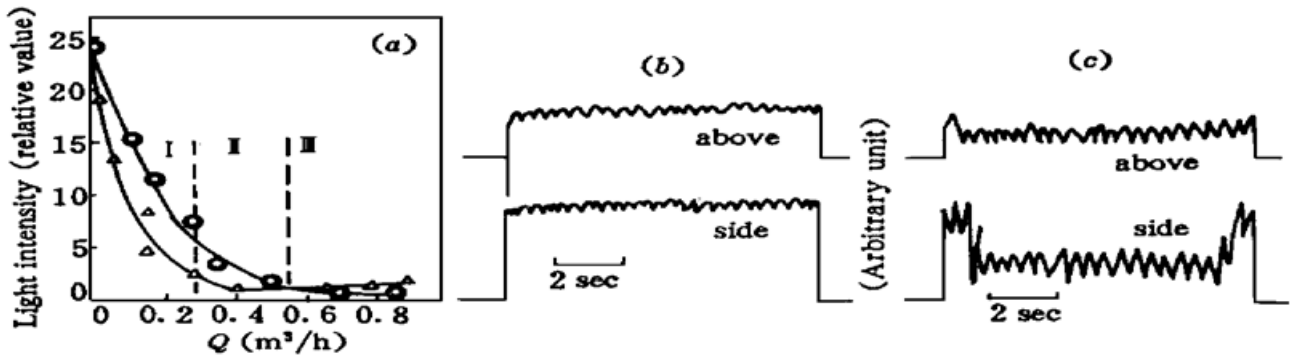


图 6 由上面及侧面光电管检测到的等离子体光强(2 kW, 1 m/min, Ar, 喷嘴 $d = 1.8$ mm, $\theta = 45^\circ$)
(a) 不同气体流量 Q 时的平均光强; (b) 等离子体没有控制时的瞬时光强; (c) 等离子体控制时的瞬时光强

Fig. 6 Top view and side view of plasma light intensity measured by phototransistors

(2 kW, 1 m/min, Ar, nozzle $d = 1.8$ mm, $\theta = 45^\circ$)

(a) Time-averaged light intensity for various Q values; (b) Transient light intensity for uncontrolled plasma;

(c) Transient light intensity for controlled plasma

5 辅助气体对等离子体作用的机理分析

5.1 小孔中的金属蒸气压力与表面张力

无外加气压时,焊接小孔中的金属蒸气压力应该平衡于液体金属的表面张力、重力以及液相材料抛出时的流动阻力,孔底气化强度表示为

$$P(Z) = \sigma/R_z + \rho gZ + P(f)^{[6]}$$

式中 σ 为孔底处液-气界面的表面张力, R_z 为孔底处的曲率半径, ρ 为液体材料密度, g 为重力加速度, Z 为孔深, $P(f)$ 为液体金属的流动阻力.

根据有关文献^[6], 1Cr18Ni9Ti 不锈钢在 2000°C 左右时的蒸气压为 2.8 kPa. 假设小孔为圆锥形, 孔底曲率半径 $R_z = 0.4$ mm, $\sigma = 1000$ dyne/cm, 则表面张力约为 $P_s = 2.5$ kPa. 由此可见, 第Ⅰ区间时, 辅助气体压力较小, 不足以压缩金属蒸气, 小孔中金属蒸气向上蒸发并进一步被激光热电离成致密的等离子体. 此时, 主要由金属蒸气压力与表面张力维持小孔的平衡状态, 并由于等离子体屏蔽导致焊缝熔深很浅.

5.2 辅助气体操作压力与金属蒸气压力

采用精密压力探头测量激光-工件作用点处的辅助气体压力 P (操作压力). 当 $Q_1 = 0.3$ m³/h, $Q_2 = 0.6$ m³/h 时, 测得对应操作压力 $P_1 = 2.9$ kPa, $P_2 = 5.8$ kPa, 并且气体操作压力

与流量成正比,结合图 2、图 3 可见,当 $P \geq P_1$,即辅助气体压力稍大于金属蒸气压力时,可获得最佳焊缝。据分析,此时的等离子体被压缩在小孔内并从小孔的后壁吹除,对激光束吸收损失极小,故可获得深而窄的焊缝。同时,由于辅助气体的作用,使小孔内蒸气压力及小孔直径产生周期性波动,故焊缝纵截面出现一定的起伏。

6 结束语

辅助气体对等离子体作用的微观机理非常复杂,本文仅在等离子体控制的工艺参数、宏观现象及理论分析上做了一部分工作。更深入的研究,如熔池行为、等离子体的动态过程、小孔压力的实时监测等有待以后进行。通过本文实验,可以得出如下结论:(1) 辅助气体流量变化时,等离子体控制效果出现三个区间,只要气体操作压力稍大于金属蒸气压力,即可获得最佳焊缝,而与辅助气体种类无关;(2) 采用光-电检测装置可以实时监测等离子体的光强变化,其中垂直朝下的光电晶体管对检测小孔中等离子体光强极其有效。

参 考 文 献

- 1 Carison K. W.. The role of heat input in deep penetration laser welding. *Welding Journal*, 1989, (3) : 49~ 57
- 2 Sutliff D. R., Mccay T. D., Mccay M. H. *et al.*. A laser welding nozzle for beam delivery optics protection. *Welding Journal*, 1992, (6) : 219~ 224
- 3 Metzbowler E. A.. Penetration depth in laser welding. *Welding Journal*, 1993, (8) : 403~ 407
- 4 Dixon R. D., Lewis G. K.. The influence of plasma during laser beam welding. International Congress on Lasers & Electro-optics '83, Proceedings of the Material processing symposium. Boston, USA, 1983, Published by Laser Institute of America, Boston, USA, 1983, **38** : 44~ 49
- 5 Phillips R. H., Metzbowler E. A.. Laser beam welding of HY80 and HY 100 steels by using hot welding wire addition. *Welding Journal*, 1992, **71**(6) : 201~ 208
- 6 Wei P. S., Giedt W. H.. Surface tension gradient-driven flow around an electron beam welding cavity. *Welding Journal*, 1985, **64**(9) : 251~ 259

Study of Plasma Control in High-power CO₂ Laser Welding

Tang Xiahui Zhu Haihong Zhu Guofu Li Jiarong Li Zaiguang
(National Engineering Research Center for Laser Processing, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074)

Abstract A series of technological parameters in controlling plasma in high-power CO₂ laser welding were investigated by using a precise declined-blow system for assist-gas regulating and controlling. The plasma light intensity above molten-pool and in key-hole was also measured by phototransistors. The plasma-control mechanism was theoretically analysed. The results show that plasma-control effect was divided into three regions with the change of assist-gas flow-quantity. No matter what gas species were used, plasma can be best controlled only was the assist-gas operation pressure slightly higher than the metallic vapour pressure.

Key words CO₂ laser welding, plasma control, assist gas