

辅助气体对 CO₂ 激光焊接光致等离子体屏蔽的影响*

肖荣诗 梅汉华 左铁钊

(北京工业大学应用激光研究所国家产学研激光技术中心 北京 100022)

提要 采用 20 kW CO₂ 激光加工系统焊接低碳钢,研究了辅助气体对等离子体屏蔽临界功率密度的影响。研究表明,辅助气体不同时等离子体屏蔽临界功率密度由小到大的排列顺序为: Ar → N₂ → CO₂ → He。Ar 作为辅助气体时,等离子体屏蔽的临界功率密度可以低至 1.85×10^6 W/cm²。辅助气体对等离子体屏蔽临界功率密度的影响主要取决于气体的导热性和解离能,相比而言,气体电离能的影响是次要的。采用 Ar 作为辅助气体时,等离子体屏蔽临界功率密度低的原因主要在于 Ar 的导热性能差,激光支持的燃烧波(Laser-supported Combustion Waves—LSC)波容易过热和扩展。

关键词 CO₂ 激光深熔焊接, 辅助气体, 光致等离子体屏蔽

1 引 言

高功率 CO₂ 激光深熔焊接过程中形成的光致等离子体对激光的吸收和折射将降低加工效率,甚至使深熔焊接过程中断,出现等离子体对激光的屏蔽现象^[1-4]。

光致等离子体对激光的屏蔽与等离子体的形态有关,环境气体对光致等离子体的形态有很大影响。Ishide 等^[5]采用 20 kW CO₂ 激光焊接不锈钢,在 5~13 kW 功率范围内,当环境气氛为 Ar 时,形成的等离子体飘浮在工件上方;当气体为 He 时,等离子体稳定存在于工件表面。当采用 N₂ 时,功率为 5 kW 时等离子体稳定在工件表面,而功率为 7~13 kW 时,等离子体的产生和消失出现周期性振荡,周期为 3~4 ms。Arata 等^[6]采用 15 kW CO₂ 激光器在空气中焊接低碳钢,使用功率为 7.5 kW 和 9 kW,和 Ishide 等在 N₂ 气氛下观察到的现象一样,等离子体的产生和消失出现周期性现象,这或许是由于空气的主要成份为 N₂ 之故。Ono 等^[7]采用 5 kW CO₂ 激光焊接不锈钢,激光功率为 4 kW,气氛为 Ar 时,等离子体是周期性产生的,当气氛为 He 和 N₂ 时,形成的等离子体处在工件表面。

一般认为气体对等离子体形态的影响取决于气体的电离能和导热性,He 具有较好的抑制等离子体的作用是由于其高的电离能和良好的导热性,等离子体不易形成和过热^[5,7]。但是, Beyer 等^[8]采用 10 kW CO₂ 激光焊接 304 不锈钢时,在 He 中加入 10% 的 H₂ 后,焊接深度较纯 He 时增大,原因认为是加入 H₂ 后对等离子体的抑制作用增强之故,而 H₂ 的电离能(H₂—

* 国家自然科学基金资助项目,实验研究工件在德国宇航院技术物理所完成。

15.5 eV, H—13.5 eV) 比 He 的电离能(He—24.46 eV) 低得多。

本文采用 20 kW CO₂ 激光器焊接低碳钢, 分别使用 Ar, He, N₂ 和 CO₂ 作为辅助气体, 研究气体种类对等离子体屏蔽临界功率密度的影响。

2 实验条件与步骤

实验采用德国 Rofin-Sinar 公司制造的 RS 20000 RF 射频激励快速轴流 CO₂ 激光器和德国 Arnold 公司生产的龙门式五轴联动激光加工机, 聚焦镜为 $f = 300$ mm 的旋转抛物镜。激光器额定输出功率为 20 kW, 多模。激光束聚焦光斑大小和功率密度分布采用 Prometec UFF100 光束光斑质量诊断仪测定。激光功率为 10 kW 时, 光斑直径与离焦量的关系及焦点功率密度分布如图 1 所示, 聚焦光斑直径约为 1.1 mm。

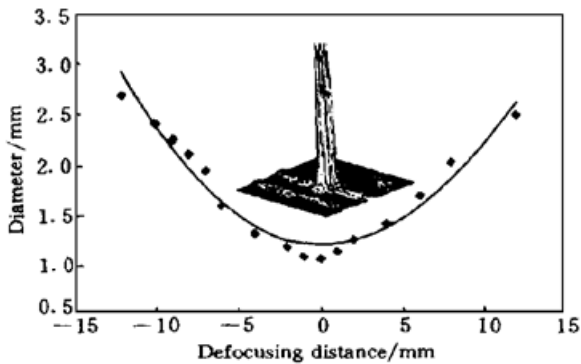


图 1 光斑直径与离焦量的关系曲线

Fig. 1 The relationship between the beam diameter and the defocusing distance

◇: measured values; —: fitted curve

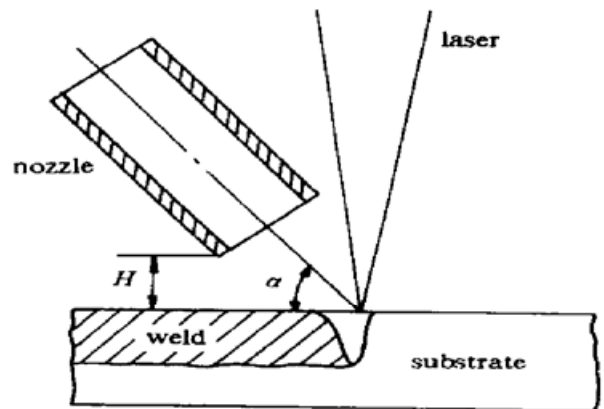


图 2 实验布置

Fig. 2 The experimental setup

实验材料为 st37-2 结构钢, 试样长度为 60 mm, 板厚 $\delta = 25$ mm。使用 Ar, N₂, He 和 CO₂ 作为辅助气体, 气体通过一个内径为 $\phi 6$ mm, 与激光束轴线成 45° 布置的圆管供应, 气流方向与焊接速度方向相同。实验装置原理如图 2 所示。

实验时聚点设置在试样表面, 焊接速度恒定为 2 m/min。改变激光功率在试样表面进行扫描焊接, 测量不同条件下的焊接深度, 绘制不同气体时焊接深度与激光功率的对应关系曲线, 即可得出相应条件下等离子体屏蔽的临界功率及临界功率密度。

3 实验结果

不同辅助气体条件时焊缝深度随激光功率的变化如图 3 所示。辅助气体流量为 30 L/min Ar 时, 等离子体屏蔽的临界功率为 5 kW 左右。采用 50 L/min 的 N₂ 时, 等离子体屏蔽的临界功率为 8 kW 左右。

当辅助气体为 30 L/min 的 CO₂ 时, 激光功率达到 9 kW 左右时开始出现等离子体对激光的屏蔽现象。但是, 与采用 Ar 和 N₂ 时不同, 采用 CO₂ 时, 一般在焊接开始的一段时间内均能够获得深熔焊接过程, 而后才出现等离子体的屏蔽现象, 大多数情况下甚至在整個焊接过程

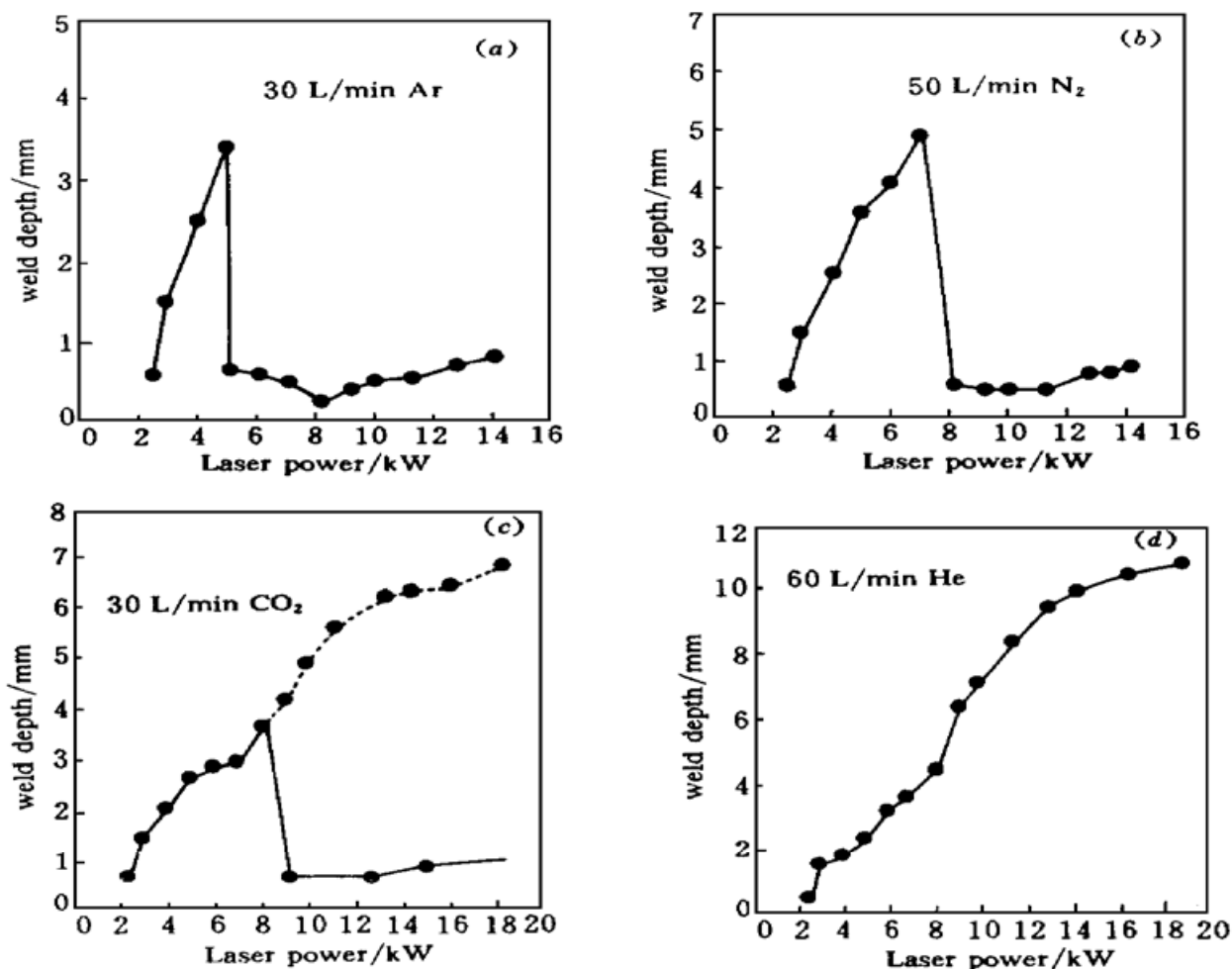


图3 焊缝深度与激光功率的关系

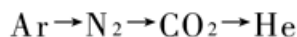
Fig. 3 The relationship between weld depth and laser power

中,也不出现等离子体的屏蔽现象。

气体为 60 L/min 的 He 时,在本实验条件下,即使激光功率高达 19 kW,也没有出现等离子体的屏蔽现象。

上述结果是在不同气体采用不同流量时得到的。由于气体流量不同时,等离子体屏蔽的临界功率密度是不同的,随着辅助气体流量的增加,等离子体屏蔽的临界功率密度将提高^[4]。因此,为了便于比较,进行了以下实验:焊接条件保持不变,激光功率分别为 10 kW 和 18 kW,采用不同流量的 He 进行焊接,结果表明,在流量为 20~60 L/min 时均未出现等离子体的屏蔽现象;而当激光功率为 8 kW 时,采用 Ar 作为辅助气体,即使流量增加至 60 L/min,等离子体的屏蔽现象依然存在。

由以上实验结果可知,不同辅助气体时,等离子体屏蔽的临界功率(密度)存在很大差异,其由小到大的排列顺序为



当激光功率为 5 kW 时,采用 Prometec UFF100 光束光斑质量诊断仪测量焦点处的功率密度分布,结果表明此时的峰值功率密度为 $1.85 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 。也就是说,在本实验条件下,Ar 作为辅助气体时,等离子体屏蔽的临界功率密度可以低至 $1.85 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 。

另外,在实验过程中观察到当激光功率大于 10 kW 时,无论采用何种辅助气体,激光束移

出试样后,等离子体仍然能够继续维持,这一现象表明此时无论采用何种气体均已发生击穿。

4 分析与讨论

CO₂ 激光焊接时,在表面金属蒸气等离子体的作用下,环境气体击穿转变为 LSC 波等离子体后,才可能出现等离子体对激光的屏蔽^[4]。气体的电离能越大,意味着气体越不易电离形成 LSC 波等离子体,因此等离子体屏蔽的临界功率密度应该越高。表 1 为本实验中所使用的几种气体的电离能。在 4 种实验气体中,He 的电离能最高,等离子体屏蔽的功率密度也最高。比较两种惰性气体 Ar 和 He,也可以发现 Ar 的电离能比 He 的电离能低得多,其等离子体屏蔽的功率密度也低得多。然而,比较两种多原子气体 N₂ 和 CO₂,可以发现,虽然 CO₂ 气体的电离能比 N₂ 的低得多,但采用 CO₂ 时,等离子体屏蔽的临界功率(密度)却比气体为 N₂ 时高。比较 Ar 和 CO₂ 以及 Ar 和 N₂ 同样可以发现,CO₂ 的电离能比 Ar 的电离能低得多,采用 CO₂ 时,等离子体屏蔽的临界功率(密度)却比气体为 Ar 时高得多;而 N₂ 和 Ar 的电离能相当,但辅助气体为 N₂ 时,等离子体屏蔽的临界功率(密度)比气体为 Ar 时高。这些现象是无法用气体电离能的大小来解释的。另外,当激光功率大于 10 kW 时,无论采用何种辅助气体,环境气体均已发生击穿,而辅助气体为 He 时,却没有出现等离子体的屏蔽现象。可见,等离子体屏蔽不能以环境气体击穿为标志。

表 1 辅助气体的电离能^[9]

Table 1 Ionization energies of assistant gases

Assistant gas	Ar	N ₂	CO ₂	He
Ionization energy/eV	15.69	15.6	13.7	24.46

实际上,用 CO₂ 激光焊接时,只有当等离子体的高度达到某一特征值时,才出现等离子体对激光的屏蔽^[4],而等离子体的高度是由等离子体的维持条件决定的。等离子体的维持条件是指等离子体吸收的激光能量足以补偿因热传导、热辐射和对流等所造成的能量损失。在静止气氛中,如果只考虑能量的热传导和热辐射损失,等离子体的维持条件可由下式表示^[10]

$$\frac{d}{dr} \left[r \lambda \frac{dT}{dr} \right] + \Phi = I \alpha \quad (1)$$

式中, r 为距等离子体中心的径向距离, λ , T , Φ , α 分别为热传导率、温度、热辐射功率密度和等离子体对入射激光的吸收率, I 为激光功率密度。以上参数在激光光斑半径 r_F 内取平均值,方程(1) 可改写为^[10]

$$\lambda T / r_F^2 + \langle \Phi \rangle = I_m \alpha \quad (2)$$

式中尖括号 $\langle \rangle$ 代表求平均值, I_m 为 LSC 波的维持阈值强度。

式(2)清楚地表明,等离子体的维持阈值与气体的导热性有关,气体的导热性越好,能量的热传导损失越大,等离子体的维持阈值越高,在聚焦状态下就意味着等离子体高度越低,越不易出现等离子体的屏蔽。当辅助气体为多原子气体时,这些气体分子在高温下将发生热分解,因此等离子体吸收的能量还必须用来补偿气体分子热解离的能量损失,从而使等离子体的维持阈值提高^[12],亦即使等离子体屏蔽的临界功率密度提高。考虑能量的对流损失时,可以预计

随着气体流量的增加, 等离子体屏蔽的临界功率密度将提高, 这已为实验所证实^[1,4]。

图 4 所示为不同气体的导热系数与温度的关系。可见, 在几种辅助气体中, He 具有最好的导热性能, 而 Ar 的导热性能最差, 同时 CO₂ 的导热性优于 N₂。不同辅助气体导热性能的顺序与出现等离子体屏蔽的临界功率(密度)的排列顺序是一致的。因此, 辅助气体为 He 时, 等离子体屏蔽的临界功率密度高不仅在于 He 具有高的电离能, 而且在于 He 具有良好的导热性能。而 CO₂ 和 N₂ 以及 CO₂ 和 Ar 相比, 虽然 CO₂ 气体的电离能比 N₂ 和 Ar 的低得多, 但由于 CO₂ 的导热性能优于 N₂ 和 Ar, 因此等离子体屏蔽的临界功率密度比采用 N₂ 和 Ar 时高。N₂ 和 Ar 相比, 尽管 N₂ 和 Ar 的电离能相当, 但由于 N₂ 的导热性能好于 Ar, 因此辅助气体为 N₂ 时, 等离子体屏蔽的临界功率密度比气体为 Ar 时高。CO₂ 和 Ar 以及 N₂ 和 Ar 相比, 采用 CO₂ 和 N₂ 气体时, 等离子体屏蔽的临界功率密度较高的另一个原因还在于 CO₂ 和 N₂ 都是多原子气体, 其高温解离吸热也将使等离子体屏蔽的临界功率密度提高。由图 4 也可以发现, H₂ 的导热性能明显优于 He 的导热性能, 如引言中所述, 虽然 H₂ 的电离能比 He 的电离能低得多, 但在 He 中加入少量 H₂ 后, 对等离子体的抑制作用反而增强, 即是由于 H₂ 良好的导热性能及其高温解离吸热增强了对等离子体的冷却之故。由以上分析我们认为, 辅助气体对等离子体屏蔽临界功率密度的影响主要取决于气体的导热性和解离能, 相比而言, 气体电离能的影响是次要的。当辅助气体为 Ar 时, 等离子体屏蔽临界功率密度低的原因不仅在于 Ar 的电离能较低容易形成 LSC 波, 更主要的是在于 Ar 的导热性能差, LSC 波容易过热和扩展。

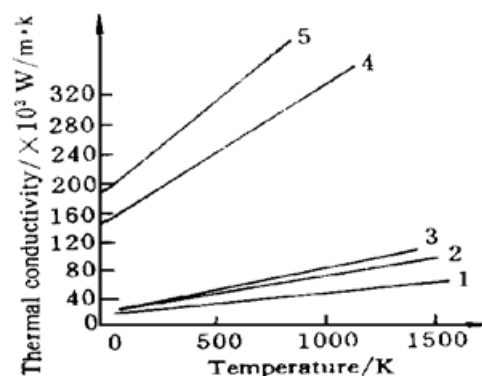


图 4 不同气体的导热系数与温度的关系

Fig. 4 The relation between the conductivity of different gases and temperature^[13]

1: Ar; 2: N₂; 3: CO₂; 4: He; 5: H₂

参 考 文 献

- 1 Locke E., Hoag E., Hella R.. Deep penetration welding with high power CO₂ lasers. *Weld. J.*, 1972, **5**(5): 245s~ 249s
- 2 Funk M., Kœhler U., Behler K. *et al.*. Welding of steel with a CO₂-laser of 20 kW. *SPIE*, 1989, **1132**: 174~ 180
- 3 Matsunawa A.. Physical Phenomena and Their Interpretation in Laser Materials Processing. ICALEO (1990), 313~ 324
- 4 Zuo T. C., Xiao R. S., Volz R.. The Behavior of Laser Induced Plasma of High Power CO₂ Laser Welding of Aluminium Alloy. In: Geiger M., eds: Key Technology Laser: Challenge for the Factory 2000, Proc. of 12th Inter. Cong. (LASER'95). Bamberg: Meisenbach. 1995. 380~ 381
- 5 Ishide T., Shono S., Ohmae T. *et al.*. Fundamental Study of Laser Plasma Reduction Method in High Power CO₂ Laser Welding. *Proc. of LAMP'87*, 187~ 191
- 6 Arata Y., Abe N., Oda T.. Fundamental phenomena in high power CO₂ laser welding (Report 7) — Atmospheric laser welding. *Transaction of JWRI*, 1985, **14**(1): 2~ 8
- 7 Ono M., Nakada K., Kosuge S.. Effect of ambient pressure and gas on penetration depth and laser-induced plasma behavior — study on CO₂ laser welding phenomena. *Welding International*, 1993, **7**(1): 15~ 20
- 8 Beyer E., Behler K., Herziger G.. Plasma absorption effects in welding with CO₂ lasers. *SPIE*, 1988, **1020**: 84~ 95

- 9 Alov A. A.. Phenomena of Welding Arc. Shi Y. X. trans.. Beijing: Mechanical Industry Press, 1985. 22~ 30 (in Chinese)
- 10 Fowler M. C., Smith D. C.. Ignition and maintenance of subsonic plasma waves in atmospheric pressure air by cw CO₂ laser radiation and their effect on laser beam propagation. *J. Appl. Phys.*, 1975, **46** (1): 138~ 150
- 11 Keefer D. R.. Laser-sustained plasma. In: Radziemski L. J., Cremers D. A., eds. Laser-Induced Plasmas and Applications. New York: Marcel Dekker Inc., 1989. 169~ 206
- 12 Jiang H. Z.. Arc Welding and Electroslag Welding. Beijing: Mechanical Industry Press, 1988. 27 (in Chinese)

Influence of Assistant Gases on the Shielding Thresholds of Laser Induced Plasma During High Power CO₂ Laser Penetration Welding

Xiao Rongshi Mei Hanhua Zuo Tiechuan

(Beijing Polytechnic University, National Center of Laser Technology, Beijing 100022)

Abstract The influence of assistant gases on the thresholds of laser induced plasma shielding was studied by using a 20 kW CO₂ laser processing system to weld low carbon steel. The results demonstrate that the critical power densities of laser induced plasma shielding for different assistant gases are in the order from low to high values as following: Ar→N₂→CO₂→He. The plasma shielding threshold could be as low as 1.85×10^6 W/cm² when argon was used as the assistant gas in our experiment. The influence of gas on the threshold of plasma shielding depends mainly on the thermal conductivity and dissociation energy of gas, while the influence of ionization energy is the secondary compared to the thermal conductivity and dissociation energy. The low power density of plasma shielding in argon is dominantly due to the poor thermal conductivity of argon which causes that the LSC wave can easily overheat and propagate.

Key words CO₂ laser penetration welding, assistant gas, shielding of laser induced plasma