

# CO<sub>2</sub> 激光深熔焊接光致等离子体控制的研究\*

肖荣诗 左铁钊

(北京工业大学应用激光所 国家产学研激光技术中心 北京 100022)

**提要** 采用 2.5 kW CO<sub>2</sub> 激光器焊接不锈钢, 设计一个由两个同轴圆管组成的双层喷嘴, 研究了 Ar 和 He 的组合方式、流量、喷嘴角度等对光致等离子体控制效果的影响。当内管通 Ar, 外管通 He 且喷嘴角度大于 45° 时可将等离子体完全抑制在蒸发沟槽之内, 从而获得具有大的熔深和深宽比的焊缝。控制等离子体所需的 He 气流量与焊接速度有关, 焊接速度增加, He 气流量减小。

**关键词** 激光深熔焊接, 喷嘴, 等离子体, 焊缝成型

## 1 引言

CO<sub>2</sub> 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散射将显著降低焊接效率<sup>[1,2]</sup>, 为此人们进行了大量的关于等离子体行为的研究, 以期获得避免等离子体的这种不利影响的方法。例如, 采用侧吹气体以试图吹散熔池上方的等离子体<sup>[2,3]</sup>, 这是目前广泛采用的一种方法。但是等离子体不可能完全被吹散, 只能部分得到缩减。在众多的气体中, He 被认为是缩减等离子体效果最好的一种气体<sup>[3~7]</sup>。其它方法包括(1) 激光加工头沿焊接方向来回摆动 (“LSSW”焊接法) 使激光束避开等离子体<sup>[5]</sup>; (2) 采用脉冲激光焊接, 精心调整脉冲宽度和频率, 使激光的发射和等离子体的消散同步, 从而减小等离子体的影响<sup>[8]</sup>; (3) 在高真空条件下焊接<sup>[7,8]</sup> 等等。

另一方面, 激光与物质的相互作用的研究表明, 光致等离子体的形成可以显著改善材料对激光能量的耦合效率<sup>[9~12]</sup>, 在薄厚板对焊时也有人利用等离子体来改善接头成型<sup>[13]</sup>。可见深熔焊接过程中形成的光致等离子体具有两重性, 这取决于等离子体的存在状态。当等离子体处于蒸发沟槽之内或为表面薄层状时, 等离子体可以强化吸收, 而当等离子体变成云团时, 将阻碍激光与材料的耦合<sup>[14]</sup>。本文的目的就是采用合适的喷嘴结构和气流将等离子体控制在蒸发沟槽之内, 从而获得大的熔深和大的深宽比。这一观点完全不同于上述吹除或避免等离子体的观点。

## 2 实验条件

试验采用 RS2500 型 CO<sub>2</sub> 激光器, 光束直径为  $\phi 20$  mm, 模式为 TEM<sub>11</sub>\*, 激光束先经一铜

\* 国家自然科学基金资助项目。

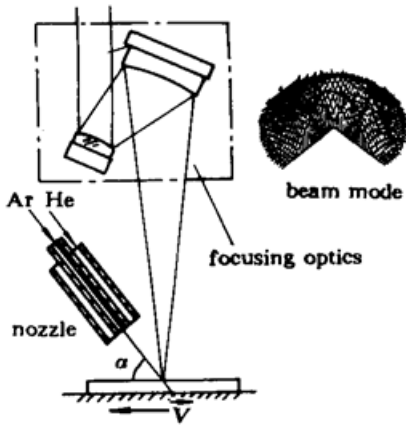


图 1 实验装置示意图  
Fig. 1 Experimental set-up

反射凸面镜 2.2 倍扩束后采用  $f = 400 \text{ mm}$  的旋转抛物镜聚焦, 聚焦光斑直径为  $0.53 \text{ mm}$ 。光束直径、模式、聚焦光斑大小及位置采用 Prometec UFF100 型光束光斑质量诊断仪测定。

设计一由两个同轴圆管组成的双层喷嘴, 内管内径  $\phi 1 \text{ mm}$ , 外径  $\phi 2.5 \text{ mm}$ , 外管内径  $\phi 5 \text{ mm}$ 。喷嘴侧向布置, 气流方向与焊接速度方向相同。由外层喷嘴供应 He 气, 用于缩减熔池上方的等离子体和保护焊接熔池; 从内层喷嘴吹送 Ar 气, 通过 Ar 气气流的作用将等离子体控制于蒸发沟槽之内。实验装置示意如图 1 所示。

试验材料为 1Cr18Ni9Ti, 板厚  $\delta = 10 \text{ mm}$ 。试验时激光功率固定为  $2 \text{ kW}$ , 聚点设置在试样表面以下  $2 \text{ mm}$

( $\Delta F = -2 \text{ mm}$ ), 改变气体的组合方式、流量以及喷嘴角度等在试样上进行扫描焊接, 观察熔池上方等离子体状况, 测量不同条件下的焊缝深度和宽度, 并分析焊缝截面几何形状。

### 3 试验结果

#### 3.1 He 气与 Ar 气的组合方式及气体流量对等离子体控制效果的影响

图 2 所示为外层喷嘴通  $30 \text{ l/min}$  的 He 气、喷嘴角度为  $60^\circ$ 、焊接速度为  $0.3 \text{ m/min}$  时, 焊缝熔深及深宽比与 Ar 气供给方式及流量的对应关系。当 Ar 和 He 直接混合后由外层喷嘴供给时, 随着 Ar 气流量的增加, 焊缝熔深缓慢增长, 但深宽比的变化极小。当 Ar 气从内层喷嘴吹送、流量大于  $6 \text{ l/min}$  时, 焊缝熔深和深宽比随着 Ar 气流量的增加显著增大, 当 Ar 气流量大于  $8 \text{ l/min}$  时, 实验时可以观察到焊接过程中形成的光致等离子体被完全控制在蒸发沟槽之内。对焊接试样进行解剖, 观察焊缝成型发现, 当等离子体被完全控制在蒸发沟槽之内时, 焊缝为“圆头钉”形, 与等离子体未被完全抑制于蒸发沟槽时上大下小的焊缝成型显著不同, 图 3 所示即为 Ar 气从内层喷嘴吹送、气流量分别为  $6 \text{ l/min}$  和  $8 \text{ l/min}$  时的焊缝成型。

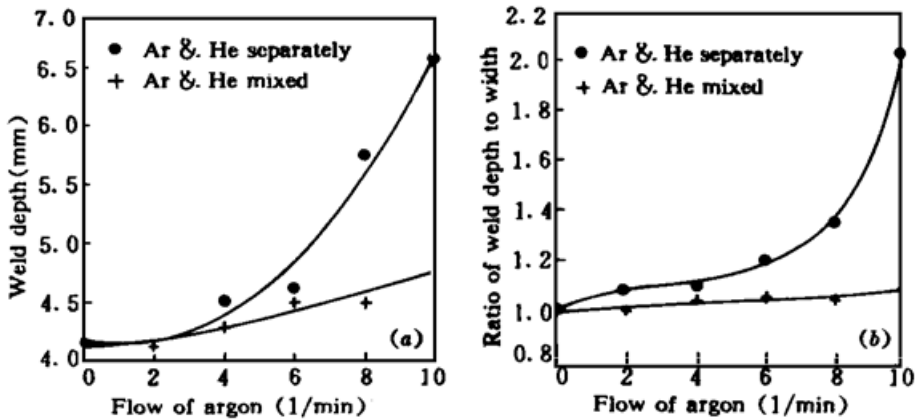


图 2 气体供应方式及氩气流量对焊缝深度及深宽比的影响

Fig. 2 The influence of gas supplying way and the flow of argon on weld depth and the ratio of weld depth to width

图 3 等离子体状态对焊缝成型的影响

(a) 6 l/min Ar, 等离子体未被完全抑制; (b) 8 l/min Ar, 等离子体被完全抑制。 $v = 0.3 \text{ m/min}$ ,  $\alpha = 60^\circ$ , 30 l/min 外管通 He 气, 内管通 Ar 气

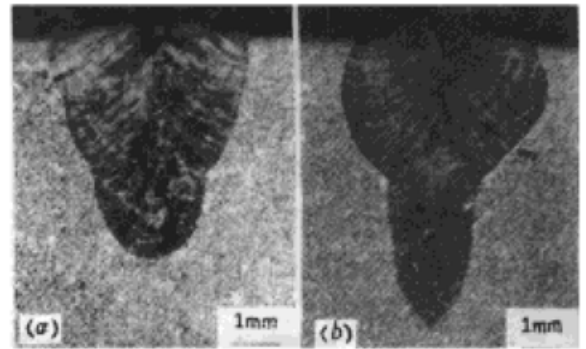


Fig. 3 The influence of plasma states on weld formation

(a) 6 l/min Ar, plasma suppressed incompletely; (b) 8 l/min Ar, plasma suppressed completely.  $v = 0.3 \text{ m/min}$ ,  $\alpha = 60^\circ$ , 30 l/min He through the outer pipe and argon through the inner one

图 4 所示为 Ar 气从内层喷嘴供应, He 气从外层喷嘴供应, Ar 气流量为 10 l/min, 喷嘴角度为 60°, 不同焊接速度时焊缝熔深及深宽比与 He 气流量的关系。当焊接速度为 0.3 m/min 时, 获得最大熔深及深宽比所需 He 气的流量为 30 l/min。当焊接速度提高到 0.9 m/min 和 1.8 m/min 时, 获得最大熔深及深宽比所需 He 气的流量分别降低至 20 l/min 和 10 l/min。可见, 焊接速度增加时, 获得最大熔深及深宽比所需 He 气的流量减小。

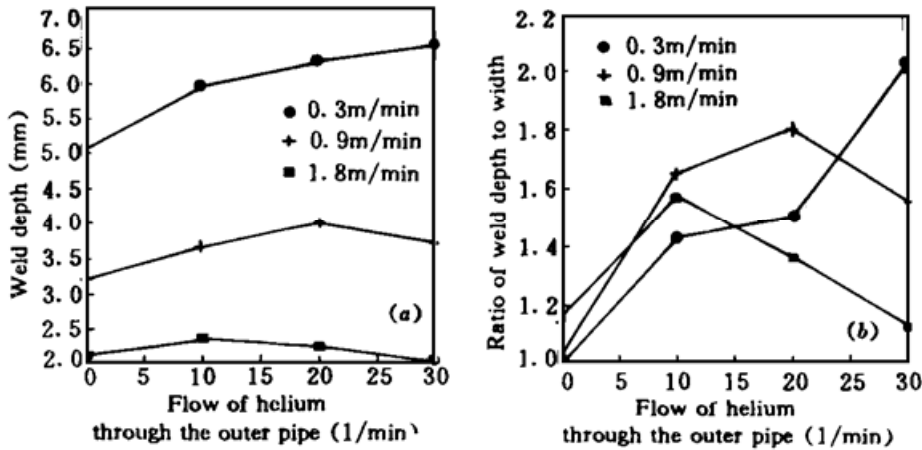


图 4 外层喷嘴氦气流量对焊缝深度及深宽比的影响

Fig. 4 The influence of the flow of helium through the outer pipe on weld depth and on the ratio of weld depth to width

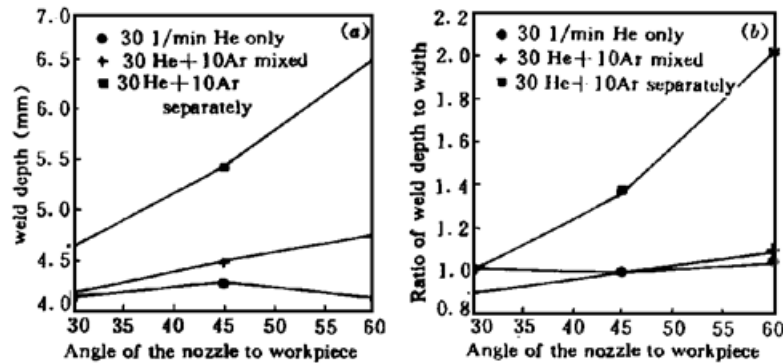


图 5 喷嘴角度对焊缝深度及深宽比的影响

Fig. 5 The influence of nozzle angle on weld depth and on the ratio of weld depth to width

### 3.2 喷嘴角度对等离子体控制效果的影响

当焊接速度为 0.3 m/min 时, 不同气体供应时焊缝熔深及深宽比与喷嘴角度的关系如图

5 所示。纯 He 时,喷嘴角度对焊缝深度及深宽比的影响极小。当 Ar 和 He 直接混合后从外层喷嘴供应时,随着喷嘴角度的增大,焊缝深度及深宽比缓慢增长。当 Ar 和 He 分别从内层喷嘴和外层喷嘴供应时,随着喷嘴角度的增大,焊缝熔深和深宽比明显增大。Ar 和 He 分别由喷嘴内管和外管供应,当喷嘴角度大于  $45^\circ$  时,实验过程中可以观察到等离子体被完全控制在焊接蒸发沟槽之内。图 6 所示为喷嘴角度  $45^\circ$  时,气体供应方式对焊缝成型的影响,与图 3 类似,当等离子体被完全控制在蒸发沟槽之内时,焊缝呈“圆头钉”形。

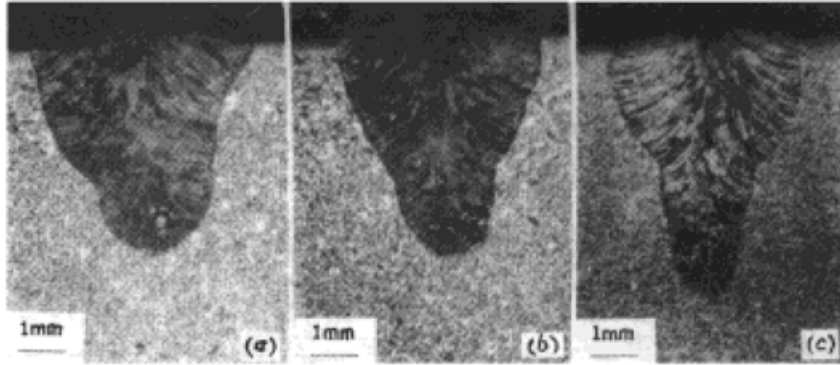


图 6 气体供应方式对焊缝成型的影响

(a) 30 l/min He 通过外管供应; (b) 30 l/min He 和 10 l/min Ar 混合气通过外管供应;

(c) 30 l/min He 气通过外管供应, 10 l/min Ar 气通过内管供应

Fig. 6 The influence of gas supplying way on weld formation

$v = 0.3 \text{ m/min}$ ,  $\alpha = 45^\circ$ , (a) 30 l/min He through the outer pipe, (b) 30 l/min He & 10 l/min Ar mixture through the outer pipe, (c) 30 l/min He through the outer pipe and 10 l/min Ar through the inner one

## 4 分析与讨论

如前言所述,  $\text{CO}_2$  激光深熔焊接过程中在熔池上方形成的光致等离子体对激光的吸收和散射将降低激光焊接的效率, 从而使焊缝熔深变浅。另一方面, 等离子体通过热传导和热辐射将其吸收激光能量的一部份传给工件, 使焊缝宽度增加, 从而使焊缝的深宽比减小。在低速焊接时, 由于等离子体过热, 等离子体的数量、电子浓度和温度增加, 等离子体的这种负面效应表现得更为明显, 以至于完全掩盖了激光深熔焊接所具有的大的深宽比这一基本特征。因此, 在低速焊接时需要更大的 He 气流量, 以缩减熔池上方的过热等离子体。

虽然在缩减等离子体方面, He 气具有最好的特性, 但由于其比重轻, 气流压力小, 因此在控制等离子体方面, 单一 He 气并不是最理想的气体。在 He 气中加入一定量的 Ar 气可以增加喷嘴气流的压力, 从而改善对等离子体的控制效果。但是 Ar 和 He 直接混合时, 由于气流分散, 达不到理想的控制效果。采用双层结构喷嘴, 利用外层喷嘴的 He 的分散气流缩减熔池上方的等离子体和保护焊接熔池, 利用内层喷嘴的 Ar 的集中气流控制等离子体上浮, 从而将等离子体完全抑制在蒸发沟槽之内。

当等离子体被完全抑制在蒸发沟槽之内时, 激光能量全部进入蒸发小孔, 提高了激光能量的利用率, 增大了焊缝熔深。另一方面, 由于小孔壁的拘束作用和冷却作用, 等离子体的体积缩小, 从而减小了由于等离子体的“热效应”对焊缝宽度的影响, 使焊缝的深宽比增大。图 7 所示为采用双层结构喷嘴、焊接速度为  $v = 0.9 \text{ m/min}$ 、喷嘴角度  $\alpha = 60^\circ$ 、内层喷嘴通 10 l/min

Ar、外层喷嘴通 He 时,不同 He 气流量时的焊缝成形。可见,随着 He 气流量的增加,焊缝宽度明显减小,焊接深度增大。因此,采用双层结构喷嘴,外层喷嘴通 He、内层喷嘴通 Ar,当等离子体被完全控制在蒸发沟槽之内时,可以增大焊缝熔深和深宽比。

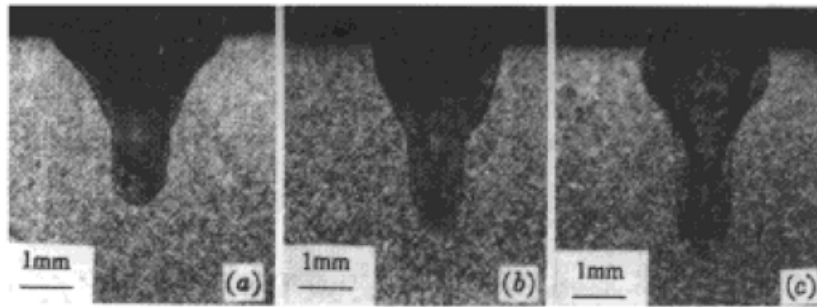


图 7 外层喷嘴氦气流量对焊缝成型的影响

(a) 无 He 气; (b) 10 l/min He; (c) 20 l/min He。  $v = 0.9$  m/min,  $\alpha = 60^\circ$ , 10 l/min Ar 通过内管供应

Fig. 7 The influence of the flow of helium through the outer pipe on weld formation

(a) without helium; (b) 10 l/min He; (c) 20 l/min He.  $v = 0.9$  m/min,  $\alpha = 60^\circ$ , Ar: 10 l/min through the inner pipe

## 5 结 论

5.1 在 He 气中加入 Ar 气可以改善对等离子体的控制效果,增加焊缝熔深和深宽比;

5.2 采用双层结构喷嘴,当喷嘴角度大于  $45^\circ$ ,外层喷嘴通 He、内层喷嘴通 Ar 时,可将等离子体完全控制在蒸发沟槽之内,获得具有大的熔深和深宽比的焊缝。He 流量与焊接速度有关,焊接速度增大,He 流量减小;

5.3 采用 He 和 Ar 联合控制等离子体时,焊缝熔深和深宽比随着喷嘴角度的增加而增大。

## 参 考 文 献

- 1 A. Matsunawa. Physical phenomena and their interpretation in laser materials processing. ICALEO, 1990, 313~ 324
- 2 E. Locke, E. Hoag, R. Hella. Deep penetration welding with high power CO<sub>2</sub> lasers. *Welding Research Supplement*, 1972, **51**(5) : 245~ 248
- 3 I. Norris. Laser welding developments. *Welding Research Abord*, 1991, **1**(1) : 16~ 17
- 4 Robert S. Arnot, Charles E. Albright. Plasma plume effects in pulsed carbon dioxide laser spot welding. ICALEO, 1983, 51~ 58
- 5 Y. Arata, N. Abe, T. Oda. Fundamental phenomena in high power CO<sub>2</sub> laser welding (report 7) — atmospheric laser welding. *Transaction of JWRI*, 1985, **14**(1) : 2~ 8
- 6 W. Sokolowski, G. Herziger, E. Beyer. Spectroscopic study of laser-induced plasma in the welding process of steel and aluminum. *SPIE*, 1989, **1132** : 288~ 294
- 7 M. Ono, K. Nakada, S. Kosuge. Effect of ambient pressure and gas on penetration depth and laser-induced plasma behavior — study on CO<sub>2</sub> laser welding phenomena. *Welding International*, 1993, **7**(1) : 15~ 20
- 8 T. Ishide, S. Shono, T. Ohmae *et al.*. Fundamental study of laser plasma reduction method in high power CO<sub>2</sub> laser welding. *Proceedings of LAMP'87*, 187~ 191
- 9 S. Marcus, J. E. Lowder, D. L. Mooney. Large-spot thermal coupling of CO<sub>2</sub> laser radiation to metallic surfaces. *J. Appl. Phys.*, 1976, **47** : 2966~ 2968
- 10 W. E. Maher, R. B. Hall. Experimental thermal coupling of laser beams. *J. Appl. Phys.*, 1978, **49** : 2254~ 2261
- 11 J. A. McKay, R. D. Bleach, D. J. Nagel *et al.*. Pulsed-CO<sub>2</sub>-laser interaction with aluminum in air:

- Thermal response and plasma characteristics. *J. Appl. Phys.*, 1979, **50** : 3231~ 3240
- 12 Z. Ljuboje, N. Konjevic, M. Popovic *et al.*. On plasma surface coupling of 10.6  $\mu\text{m}$  laser radiation with copper targets. *Opt. Commun.*, 1987, **63** : 248~ 252
- 13 K. Minamida, S. Yamaguchi, H. Sakurai *et al.*. CO<sub>2</sub> laser welding with plasma utilization. ICALEO, 1982, 65~ 67
- 14 E. Beyer. Einfluss des laserinduzierten Plasmas beim Schweißen mit CO<sub>2</sub>-Lasern, Ph. D. thesis (in German), DVS GmbH, Düsseldorf, 1985, 57~ 75

## Study of the Control of Laser Induced Plasma during CO<sub>2</sub> Laser Penetration Welding

Xiao Rongshi Zuo Tiechuan

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

**Abstract** A nozzle which consists of two co-axis pipes was designed to weld stainless steel with a 2.5 kW CO<sub>2</sub> laser. The influences of the supplying way and flow of argon and helium, and of the angle of nozzle on the control of laser induced plasma were studied. When the angle of the nozzle to the workpiece is greater than 45° with helium flowing through the outer pipe and argon through the inner one, the laser induced plasma is completely suppressed in the keyhole, and then a weld is obtained of great weld depth and great ratio of depth to width. The required flow of helium to control the plasma decreases with the increase of welding speed.

**Key words** laser penetration welding, nozzle, plasma, weld formation