

CO₂ 激光焊接光致等离子体屏蔽机制的实验研究 *

肖荣诗 陈 铠 陈继民 左铁钊

(北京工业大学国家产学研激光技术中心, 北京, 100022)

摘要: 采用 20kW CO₂ 激光器, 设计了一组试验方法, 研究光致等离子体对焊接深度和聚焦光束的影响, 探讨高功率 CO₂ 激光焊接时光致等离子体的屏蔽机制。研究表明, 光致等离子体显著改变了聚焦光束的形态, 使其焦点下移、光斑扩大, 等离子体的这种透镜效应随着等离子体的上升而增强。相对于等离子体吸收, 等离子体的透镜效应是等离子体屏蔽的主要机制。

关键词: CO₂ 激光焊接 等离子体透镜效应 等离子体吸收

Experimental research of the plasma shielding mechanism in the process of CO₂ laser welding

Xiao Rongshi, Chen Kai, Chen Jimin, Zuo Tiechuan

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

Abstract: A 20kW CO₂ laser was applied to explore the plasma shielding mechanism by studying the effect of plasma height on the welding depth and the focusing laser beam. On the basic phenomenon that the laser induced plasma would sustain for a while even after the laser beam passed through out of the workpiece during high power CO₂ laser welding, a simple and effective method is developed to record the effect of plasma on the focusing laser beam. It is found that the laser-induced plasma enlarges the diameter of the focused laser beam and the focus shifts downward significantly. This "lensing effect" of the laser-induced plasma becomes more serious with the increase of the plasma height. Compared with the absorption of plasma, the "lensing effect" is the main mechanism for plasma shielding in the process of high power CO₂ laser welding.

Key words: CO₂ laser welding lensing effect of plasma plasma absorption

引 言

大功率 CO₂ 激光焊接时, 当激光功率密度达到某一临界值后, 出现所谓的等离子体对激光的屏蔽现象, 激光深熔焊接过程完全中断, 1972 年, E. Locke 等人首先发现并报道了这一现象^[1]。不同气体条件下, 等离子体屏蔽的临界功率密度存在很大差异。一般认为, 等离子体对激光的吸收是等离子体屏蔽的主要原因。Gren^[2]采用 8.8kW ±400W CO₂ 激光击穿 Ar 以及 Ar 和 N₂ 混合气体, 研究等离子体对激光的吸收, 发现等离子体对激光的吸收最高仅为 40%。Pouego^[3]和 Fabbro^[4]则报道, 当激光功率为 15kW, 采用 Ar, N₂ 作辅助气体进行焊接时, 出现等离子体对激光的屏蔽现象, 等离子体实际只吸收 50% 左右的激光能量。据此, Fabbro 认为主要原因是等离子体的作用使入射激光束强烈散焦。

作者采用 20kW CO₂ 激光器, 实验研究 CO₂ 激光焊接光致等离子体的屏蔽机制。

* 国家自然科学基金重点项目及北京市科技新星计划资助。

1 实验条件及实验方法

试验采用德国 Rofin-Sinar 公司生产的 RS20000 射频激励轴流 CO₂ 激光器,额定输出功率 20kW,多模。配德国 Arnold 公司生产的龙门式 5 轴联动加工机,采用 $f = 300\text{mm}$ 的旋转抛物镜聚焦。聚焦焦点大小和位置采用 UFF100 光束光斑质量诊断仪测定,当激光功率为 10kW 时,聚焦光斑直径约为 1.1mm。

实验布置如图 1 所示。试验采用内径为 $\varnothing 0\text{mm}$ 的喷管,水平布置,喷管内通以 60L/min 的 He,气流方向与焊接方向垂直。由于 He 具有很好的控制等离子体的能力,通过改变喷管高度控制等离子体的上升高度,研究不同激光功率、不同离焦状态时,焊接深度与等离子体高度的关系。焊接材料为 st37-2 钢(相当于 A3 钢),焊接速度 $v = 2\text{m/min}$ 。

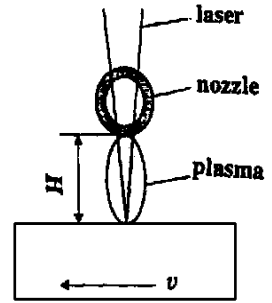


Fig. 1 Experimental setup

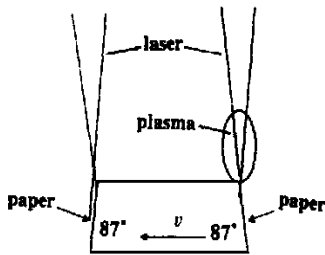


Fig. 2 The experimental setup for studying the effect of plasma on the focusing laser beam

同时,根据高功率激光焊接时,即使当激光束移出试样之后,等离子体仍能继续维持这一基本事实,设计以下实验来研究光致等离子体对激光束聚焦形态的影响。实验布置与图 1 类似,此时,试样的两个端面与上下表面稍微倾斜,并在两个端面上贴一层薄纸,如图 2 所示。当激光束快速从试样前端切入和从后端移出时,试样两个端面上所贴的一层薄纸在激光束的作用下被汽化,从而记录下激光束的形态。当激光束从前端切入,此时等离子体尚未形成,记录下来的为激光束的原始聚焦形态;当激光束作用在试样上面表后产生等离子体,并且在激光束移出试样后等离子体仍继续维持,因此,当激光束试样从后端移出时,记录下来的为受等离子体影响后的聚焦激光束的形态。基体材料为 AlSi9Mg,厚度 25mm,扫描速度 $v = 10\text{m/min}$ 。

2 实验结果

2.1 等离子体高度对焊接深度的影响

激光功率为 10kW 和 18kW 时,不同离焦状态下的焊接深度随喷嘴高度的变化曲线如图 3 所示。可见,随着喷嘴高度的增加,焊接深度减小,当喷嘴高度达到某一值时,焊接深度降至最低。随后,随着喷嘴高度的增加,焊接深度反而有所增大,但基本维持在一个很小的值。分析这两组曲线,还可以发现以下两条规律:(1) 焦点位于试样表面之上(正离焦)时,焊接深度

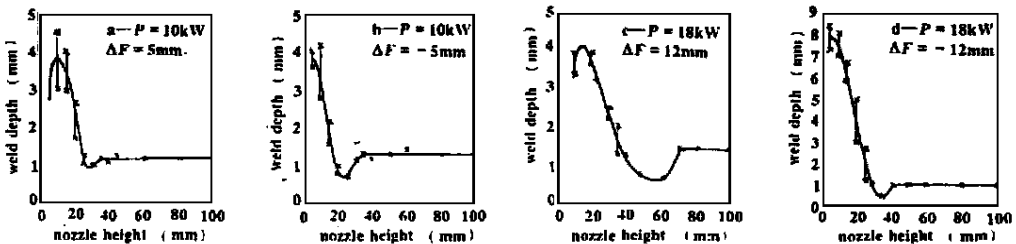


Fig. 3 The relationships of weld depth vs plasma height

降到谷底所对应的喷嘴高度大于焦点位于试样表面之下(负离焦)时所对应的喷嘴高度。当激光功率为 10kW 时,最浅焊接深度所对应的喷嘴高度在离焦量 $F = -5\text{mm}$ 和 $F = 5\text{mm}$ 时分别为 25mm 和 30mm。当激光功率为 18kW 时,焊接深度的谷底所对应的喷嘴高度在离焦量 $F = -12\text{mm}$ 和 $F = 12\text{mm}$ 时则分别为 35mm 和 60mm。(2) 正离焦状态时,喷嘴高度降低至某一值之后,随着喷嘴高度的再进一步降低,焊接深度有减小的趋势。

2.2 等离子体对聚焦光束的影响

激光功率 $P = 18\text{kW}$ 、焦点置于试样表面以下 12mm、扫描速度 $v = 10\text{m/min}$ 时,等离子体对激光束聚焦形态的影响如图 4 所示。当喷嘴高度为 50mm 和 80mm 时,由于等离子体的影响,激光束聚焦斑点扩大、焦点下移,而此时试样表面没有任何激光作用的痕迹,出现了等离子体对激光的屏蔽现象。当喷嘴高度为 20mm 时,聚焦激光束受等离子体的影响较小,此时则可以进行焊接。由于等离子体的热辐射的影响,激光束移出试样一端,纸面留下烧焦痕迹。

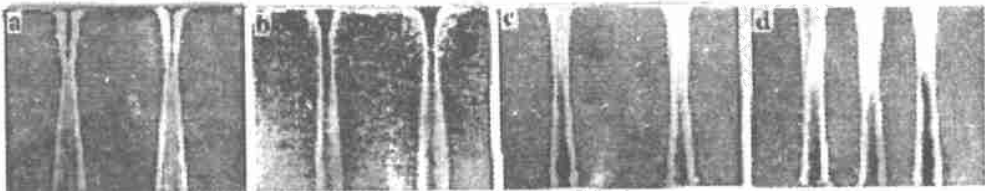


Fig. 4 Effect of laser-induced plasma on the focusing laser beam
 a - without plasma(original) b - plasma height $H = 20\text{mm}$ c - plasma height $H = 50\text{mm}$ d - plasma height $H = 80\text{mm}$

3 分析与讨论

在高功率 CO_2 激光焊接过程中,光致等离子体将通过逆韧致辐射吸收部分激光能量,从而使到达工件的能量降低。随着喷嘴高度的增大,等离子体的扩展距离增大,等离子体将吸收更多的激光能量。也就是说,由于等离子体对激光的吸收,焊接深度必然将随着喷嘴高度的增大而减小。

然而,如引言中所述,人们发现,当激光功率为几千瓦至十几千瓦出现所谓的等离子体对激光的屏蔽现象时,光致等离子体实际上最高只吸收入射激光能量的 50% 左右。即意味着在本实验条件下,至少还有 5~9kW 的激光功率能够作用于工件上,这足以获得深熔焊接。实际上,当喷嘴高度大于某一值后,焊接深度很浅(1mm 左右)。另外,以下事实也是用等离子体的吸收机制无法解释的,即:负离焦时等离子体屏蔽的喷嘴高度低于正离焦,且正离焦时,当等离子体缩减至位于焦点之下后,焊接深度反而减小。

实际上,光致等离子体除了吸收部分激光能量之外,等离子体对激光的折射还将引起入射激光束聚焦形态的变化。如果忽略等离子体中带电粒子的碰撞的影响,等离子体的折射率 n_r 可由下式计算:

$$n_r^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

式中, $\omega_p = n_e e^2 / \epsilon_0 m_e$, ω_p 为等离子体的振荡频率, ω 为入射激光的圆频率, n_e , m_e 分别为电子数密度和电子质量。可见,等离子体的折射率与等离子体的振荡频率有关,而等离子体的振荡频率是等离子体电子密度的函数。 CO_2 激光焊接时,光致等离子体的振荡频率小于入射激光束的圆频率,因此,光致等离子体的折射率总是实数,且恒小于 1,光致等离子体是一个光疏介质。

由于光致等离子体中存在很大的电子密度梯度,电子密度的差异导致折射率的变化。当

入射激光束穿过等离子体时将引起激光束传播方向的改变,其偏转角与等离子体的电子密度梯度和等离子体长度有关,几千瓦至十几千瓦 CO₂ 激光诱导的等离子体对激光束的偏转角为 10^{-2} rad 数量级^[3,5]。

在实验中观察到了光致等离子体对激光束聚焦形态的影响,由于光致等离子体的折射作用,激光束聚焦斑点扩大,焦点向下移动。即光致等离子体实际上相当于一个负透镜,因此,当光致等离子体处于聚集光束的不同位置时,等离子体的透镜效应对聚焦光束的影响是不同的。我们的分析研究表明^[6,7],随着等离子体上升高度的增加,等离子体的透镜效应对光束聚集状态的影响加剧,且负离焦时,等离子体的透镜效应对聚焦光束形态的影响强于正离焦。这就是为什么正离焦时,焊接深度降到谷底所对应的喷嘴高度大于负离焦时所对应的喷嘴高度的真正原因。另外,正离焦时,当等离子体位于焦点之下时,等离子体的这种负透镜效应将使作用于工件表面上光斑直径扩大,从而导致焊接深度减小。

从以上分析我们认为:CO₂ 激光深熔焊接时光致等离子体的屏蔽是由于等离子体对激光的吸收和等离子体透镜效应共同作用的结果,等离子体对激光的吸收使作用于工件上的激光功率降低,而等离子体的透镜效应使激光光斑直径扩大,当等离子体扩展到一定高度后,两者的共同作用使得作用于工件上的激光功率密度大幅降低,从而出现所谓的光致等离子体对激光的屏蔽,且等离子体的透镜效应对等离子体屏蔽的贡献强于等离子体吸收。限于篇幅,有关光致等离子体透镜效应数值模拟的研究结果将另文发表。

4 结 论

(1) 光致等离子体显著改变了激光束的聚焦形态,使聚焦激光束光斑直径扩大、焦点下移。随着等离子体高度增加,等离子体的这种“透镜效应”增强。

(2) 高功率 CO₂ 激光焊接时,光致等离子体对激光的吸收和等离子体的透镜效应的共同作用导致作用于工件上的激光功率密度降低,这是等离子体屏蔽的真正原因,其中,等离子体的透镜效应的影响强于等离子体的吸收。

本文中的实验研究工作在德国宇航院技术物理所完成,作者感谢德国教育、科学、研究与技术部提供奖学金。

参 考 文 献

- 1 Locke E, Hoag E, Hella R. Weld J, 1972;51(5):245~249
- 2 Gren B G. J A P,1991;(24):1086~1087
- 3 Pueyo A, Deshors G, Fabbro R *et al.* Study of laser induced plasma in welding conditios with continuous high power CO₂ lasers. LAMP '92,1992:323~328
- 4 Fabbro R. Beamplasma coupling in laser material processing. LAMP '92,1992:305~310
- 5 Fowler M C, Smith D C. J A P,1975;46:138~150
- 6 Xiao R S, Zuo T C, Volz R. Chinese Journal of Lasers,1998;B7(6):550~554
- 7 肖荣诗. CO₂ 激光深熔焊接光致等离子体行为研究. 北京工业大学博士学位论文,1997

*

*

*

作者简介:肖荣诗,男,1965年出生。博士,副研究员。主要从事激光与物质相互作用及激光材料加工方面的研究。