

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0529-03

激光焊接等离子体的扩散行为及电磁场 对其作用的研究*

陈武柱¹ 彭云¹ 王成¹ 包刚¹ 张旭东¹ 田志凌²

(¹ 清华大学机械工程系, 北京 100084)
(² 钢铁研究总院, 北京 100081)

提要 激光深熔焊时,产生的等离子体降低激光能量效率。等离子体中电子与正离子热运动速度的差别,导致喷嘴和工件间形成一电位差。将喷嘴和工件短路则可产生一等离子体电流。如在该回路中串联一外加电源,等离子体电流将随外加电源电压增大呈线性增大。加入一垂直于激光束方向的磁场,则带电粒子受电磁力作用而产生偏离激光束的运动。实验采用焊接过程中提升喷嘴的方法,使深熔焊模式转变为热导焊。加入辅助电磁场可使深熔焊焊缝长度增加,表明驱除熔池上方等离子体后激光对工件的耦合效率提高。随磁场强度增大,深熔焊长度增大。在外加电压为 25 V 时,深熔焊长度最大,过低和过高的外加电压都减小深熔焊长度的增加量。

关键词 激光, 焊接, 等离子体, 电磁场

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

Diffusion of Plasma and Effect of Electric and Magnetic Fields in Laser Welding

CHEN Wu-zhu¹ PENG Yun¹ WANG Cheng¹ BAO Gang¹
ZHANG Xu-dong¹ TIAN Zhi-ling²

(¹ Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)
(² Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract The plasma produced during deep penetration laser welding decreases the efficiency of laser energy. The difference of thermal movement speed between electrons and ions results in a voltage between the nozzle and the workpiece, and an electric current occurs if the nozzle and the workpiece are short circuited. The current increases with the increase of external voltage. The charged particles can be driven away by electric and magnetic fields if the magnetic field is applied in the direction transversal to the laser beam. In the experiment the nozzle is elevated during welding so that the welding mode changes from deep penetration welding to heat conduction welding. The increment of bead length by applying electric and magnetic fields indicates the improvement of energy efficiency if plasma above the melt pool is driven away. With stronger magnetic field, longer bead length is produced. The length of deep penetration weld reaches largest value at 25 V external voltage and decreases when higher or lower external voltage is adopted.

Key words laser, welding, plasma, electric and magnetic fields

1 引言

高功率激光深熔焊时,深孔中的金属蒸气在高温下部分电离并向上扩散。在等离子体中,激光能量密度有以下三方面的损失:吸收、折射和散射。在等离子体中,径向温度梯度极大,引起电子密度的差

别,从而产生强烈的折射,激光由高电子密度区向低电子密度区偏折,引起散焦^[1,2]。等离子体由于反韧致辐射吸收部分激光能量并向周围传导,从而引起激光能量的损失。激光波长为 10.6 μm 时,散射的影响可忽略不计。减小和克服等离子体的影响,可提高激光束与工件的耦合效率。

本文讨论了等离子体的热运动和扩散速度,分析了等离子体电流的产生机理及外加电磁场对等离

* 国家重点基础研究发展规划(973)(G19980615000)、清华大学 985 基金(012-101050)资助课题。

子体和激光效率的影响。

2 等离子体电流及其控制

激光深熔焊时,工件上方小孔出口处等离子体的密度比周围大得多,由于浓度差的驱动,等离子体粒子将向工件以上范围产生辐射式扩散,包括向喷嘴扩散。粒子的扩散速度与浓度梯度和热运动速度有关。在扩散初始阶段,电子与正离子的浓度与浓度差均相同,他们之间扩散速度的差别仅取决于他们的热运动速度,后者与粒子质量的平方根成反比^[3]。按等离子体温度为 5300~7000 K 考虑^[4],可计算得到平均电子速度为 $(4.5 \sim 5.2) \times 10^5$ m/s,而最轻的正离子运动速度也仅为 $(9.0 \sim 10.0) \times 10^3$ m/s,为电子速度的 1/50^[5]。激光焊接中大量存在的金属正离子质量更大的多,其运动速度与电子相比差别更大,这将导致这两种带有相反电荷粒子的分离,靠近喷嘴以电子为主,靠近工件以正离子占优势,这将在喷嘴和工件间形成一电位差 V_i ,它可以等效为一具有内阻的直流电源,如图 1 所示。若将喷嘴和工件连通,将产生一电流(称为等离子体电流 I)。但在自由扩散状态下,等离子体电流很小,实验测得该电流仅为 10^{-1} mA 数量级。

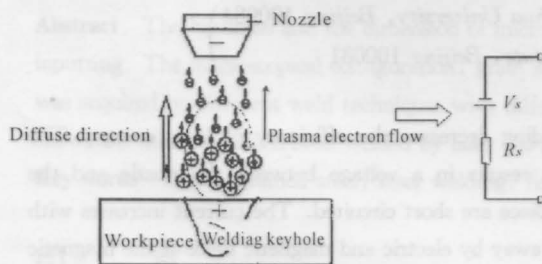


图 1 由于电子和正离子扩散速度不同产生电位差
Fig.1 The formation of voltage caused by the different diffuse speeds of electrons and ions

为了增大等离子体电流,可在喷嘴和工件间串

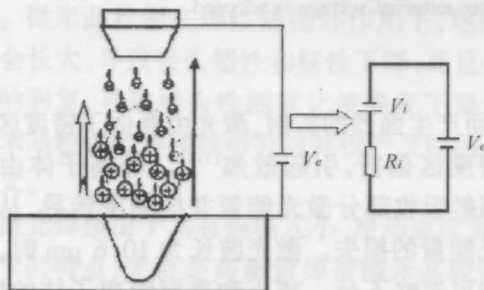


图 2 串联一外加电源以增大等离子体电流
Fig.2 Adding an external power to increase the plasma current

联一反极性电源,如图 2 所示。设 R_i 为等离子体内阻, V_e 为外加反极性电源电压,则等离子体电流为:

$$I = V_i/R_i + V_e/R_i \quad (1)$$

图 3 为实验测得的等离子体电流与外加电压的关系曲线。从图可以看到,随外加电压增大,等离子体电流呈线性增大。

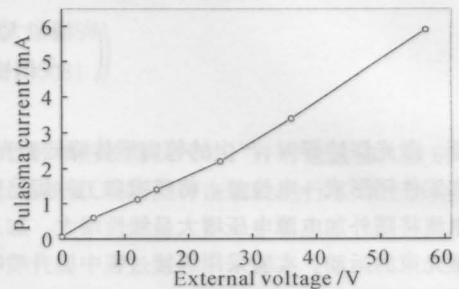


图 3 等离子体电流与外加电压的关系
Fig.3 The relationship between plasma current and external voltage

产生等离子体电流后,再施加一如图 4 所示的横向磁场,则等离子体将受到一洛伦兹力作用而产生偏离激光束的运动。综合考虑外加电场和磁场的作用,所产生的速度增量 V_{Lz} 为:

$$V_{Lz} = \int_0^{t_i} \frac{F}{m} dt = \frac{1}{m} \int_0^{t_i} \left(\frac{V_i + V_e}{R_i} + \mathbf{u} \times \mathbf{B} \right) dt \quad (2)$$

式中 m 为带电粒子质量, \mathbf{u} 为其速度, t_i 为连续两次碰撞的时间间隔。

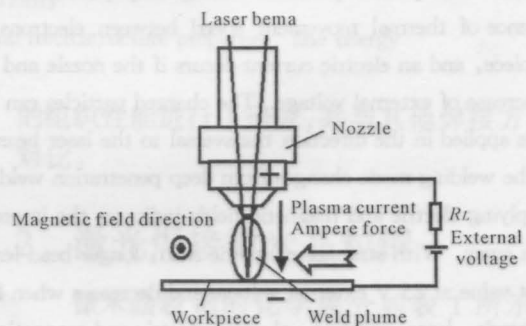


图 4 在电磁场作用下等离子体所受的力
Fig.4 The force acted on plasma under the effect of electric and magnetic fields

3 实验原理和方法

激光束的直径随离开焦点的距离增大而增大。如果在焊接过程中均匀地提高喷嘴高度,则工件表面激光能量密度逐渐减小,焊接模式将由深熔焊向

热导焊过度^[6]。测量加电磁场和不加电磁场情况下深熔焊长度的差值,可判断等离子体偏离激光束后提高激光对工件耦合效率的效果。

先将喷嘴预置于产生最大熔深的高度,在150 mm的焊接距离将喷嘴均匀提高15 mm,然后测量深熔焊长度。实验采用额定功率为3 kW的CO₂激光,激光模式为TEM₀₀ + TEM₀₁^{*},激光焦距长度为127 mm,Ar用作保护气体。焊接功率采用1800 W,焊接速度1 m/min。

4 实验结果和讨论

实验结果表明,施加电磁场后,深熔焊长度增加了,表明采用外加电磁力作用于等离子体后,激光效率提高了。实验中磁场由激磁电流产生,激磁电流越大,磁场强度越大。图5为深熔焊长度增量与激磁电流的关系。实验时外加电压为25V。结果表明随磁场强度增大,深熔焊长度增加,即等离子体偏离激光束的效果显著,激光效率提高。图6为外加电压与深熔焊长度增量的关系,实验时激磁电流为3.5 A。随外加电压增大,深熔焊长度增量先增大后减小。在外加电压为25 V时深熔焊长度增量最大。

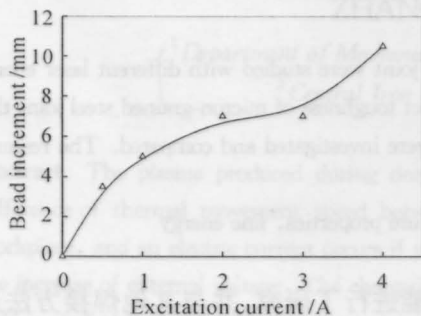


图5 深熔焊长度增量与激磁电流的关系

Fig. 5 The relationship between bead length increment and excitation current

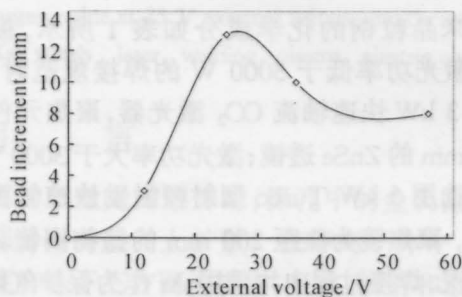


图6 深熔焊长度增量与外加电压的关系

Fig. 6 The relationship between bead length increment and external voltage

深熔焊长度增量与外加电压之间呈最大值曲线变化的规律解释如下:随着外加电压的增加,一方面使等离子体电流增大,等离子体受到的洛伦兹力增强,有利于促使等离子体偏离激光束;但另一方面,电场强度的加大会增加喷嘴下方的电子密度,增加等离子体对激光的吸收,这是不利的。综合考虑上述两方面因素,外加电压存在一最佳值,此时激光束对工件的耦合效率最高,深熔焊长度增量最大。

5 结 论

1) 激光深熔焊时产生的等离子体,由于浓度梯度的驱动,而产生由工件向喷嘴的扩散运动;由于电子和正离子扩散速度的巨大差别,形成了工件和喷嘴间的电位差。连通喷嘴和工件,将产生等离子体电流。串联反极性直流电源,可增加等离子体电流。

2) 喷嘴和工件间的等离子体可等效为具有内阻的电源,等效电阻与等效电源电压随激光焊接参数变化。

3) 对等离子体电流施加横向磁场,可使等离子体产生偏离激光束的横向运动,提高激光与工件的耦合效率。采用焊接时提升喷嘴比较深熔焊缝长度的方法,可精确评估激光与工件耦合效率的变化。

4) 激光与工件的耦合效率随外加磁场强度增大而提高;而外接电源电压(即喷嘴和工件间的电场强度)则存在一最佳值,此时耦合效率最大。

参 考 文 献

- 1 M. Beck, P. Berger, H. Hugel. The effect of plasma formation on beam focusing in deep penetration welding with CO₂ lasers. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1995, **28**: 2430~2442
- 2 R. Ducharme, P. Kapadia. A mathematical model of the defocusing of laser light above a workpiece in laser material processing. *ICALEO' 92* (Orlando: Laser Institute of America), 1992. 187~197
- 3 王 勇. 激光深熔焊控制技术及其原理研究. 博士学位论文. 北京:清华大学, 1996
- 4 B. R. Finke, B. D. Kapadia, J. M. Dowden. A fundamental plasma based model for energy transfer in laser material processing. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1990, **23**: 643~654
- 5 L. Li, D. J. Brookfield, W. M. Steen. Plasma charge sensor for in-process, non-contact monitoring of the laser welding process. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**: 615~626
- 6 陈武柱等. 激光焊接时焊接模式转变规律及焊接过程稳定性的研究. *中国激光*, 1996, **A23**(7): 657~661