

文章编号: 0258-7025(2002)05-0471-04

激光焊接时等离子体电流的产生机制 及其数学模型

姜 平, 陈武柱, 夏侯荔鹏, 张旭东

(清华大学机械工程系, 北京 100084)

田志凌

(北京钢铁研究总院, 北京 100081)

摘要 通过对激光焊接时等离子体产生机理的分析,从等离子体物理理论的角度出发,建立了适应于激光焊接等离子体电特性的数学模型。该模型能够较好地解释等离子体电信号随喷嘴-工件距离的增加而单调减小的规律。

关键词 激光焊接, 等离子体, 数学模型, 电信号

中图分类号 TG 456.7 **文献标识码** A

Mechanism and Mathematical Model of the Laser-induced Plasma Current in Laser Welding

JIANG Ping¹, CHEN Wu-zhu¹, XIAHOU Li-peng¹, ZHANG Xu-dong¹, TIAN Zhi-ling²

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

Abstract This paper analyses the mechanism of the laser-induced plasma current and establishes a mathematical model for laser welding. The model satisfyingly interprets the regularity of the plasma charge signal decreasing monotonously with the increase of the nozzle-workpiece distance, which coincides well with the experimental results.

Key words laser welding, laser-induced plasma, mathematical model, plasma charge signal

1 引 言

在稳定的 CO₂ 激光深熔焊时,有蓝色等离子体产生,会在喷嘴和工件之间产生电势差,如果外接负载,喷嘴和工件间构成回路,将有等离子体电流向外输出,在负载电阻上产生压降。本文的等离子电荷传感器(PCS)信号就反映了这一电流的大小。研究表明,PCS 检测信号随喷嘴与工件间距离 h 的增加单调减小^[1]。近年来在激光导致等离子体的模型方面虽然已经发表了不少文章,但有关等离子体电流模型还是一个空白。为了实现激光焊接喷嘴-工件距离的闭环控制,本文从等离子体的一般分布规律出发,

在对等离子体状况进行合理简化的基础上,用等离子体物理理论建立了等离子体电信号随喷嘴-工件距离单调变化的电流模型,从而为进一步实现闭环控制打下理论基础。

2 等离子体电流形成机制

工件上方等离子体中的带电粒子来源可以考虑两种物质:工件金属和焊接喷嘴中喷向熔池的轴向气体。以用氩气作轴向气体的低碳钢焊接为例,由于铁的电离能(7.9 eV)远小于氩的电离能(15 eV),铁的电离在等离子体中起主要作用,而氩原子的电离

收稿日期:2001-02-12; 收到修改稿日期:2001-05-17

基金项目:国家重点基础研究发展规划(G1998061500),国家自然科学基金(50175061)和清华大学 985 基金(No. 012-101050)资助项目。

作者简介:姜平(1973—),男,清华大学机械工程系博士研究生,主要从事激光加工机理和过程控制的研究。E-mail: arethusa@263.net

可以忽略不计。因此等离子体中的带电粒子主要是金属原子电离产生的。

在工件上方小孔出口处附近, 等离子体温度很高, 通常认为处于局部热力学平衡状态, 只考虑金属原子的一次电离, 可以认为其中自由电子的浓度 n_{e0} 和正离子浓度 n_{i0} 相同, 电子温度 T_{e0} 和正离子温度 T_{i0} 相等, 即

$$n_{e0} = n_{i0} \quad (1)$$

$$T_{e0} = T_{i0} \quad (2)$$

令喷嘴附近电子密度为 n_e , 正离子密度为 n_i , 电子温度为 T_e , 正离子温度为 T_i , 喷嘴前端正对等离子体的面积为 A_p , 则在等离子体扩散到喷嘴的瞬间, 到达喷嘴表面的电子流 I_{e0} 和离子流 I_{i0} 分别为

$$I_{e0} = \frac{1}{4} en_{e0} A_p v_e \quad (3)$$

$$I_{i0} = \frac{1}{4} en_{i0} A_p v_i \quad (4)$$

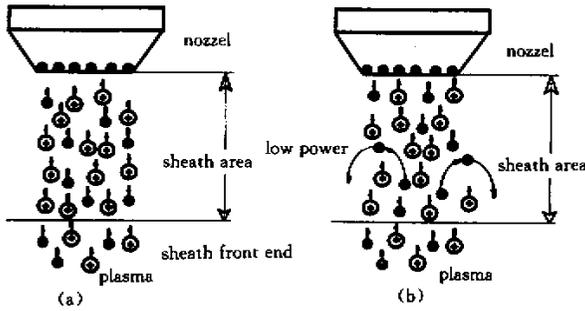


图 1 鞘层带电粒子分布及流动

(a) 鞘层带电粒子的不均匀分布; (b) 鞘层带电粒子的流动

Fig. 1 Distribution and flow of charged particle in sheath area

(a) uneven distribution of charged particle; (b) flow of charged particle

的电势差为 V_q (V_q 为负, 即与 I_e 方向相反), 那么, 在 V_q 的作用下, 通过鞘层进入喷嘴的电子流 I_e 为

$$I_e = I_{e0} \exp\left(\frac{eV_q}{kT_e}\right)$$

即

$$I_e = \frac{1}{4} en_{e0} A_p v_e \exp\left(\frac{eV_q}{kT_e}\right) \quad (5)$$

如果在工件上加入一个 $0 \sim -15$ V 的附加电源 V_w , 在喷嘴与工件间就加了一个外加电压 V_f

$$V_f = V_w - IR_w$$

式中, I 为负载电阻 R_w 上流过的电流 (mA)。

在前文电子密度和正离子密度相等的假设下等离子体是等电位的, 则 V_f 全部加在了鞘层上, 即喷嘴与鞘层边缘的电势差就变为 $V_q + V_f$, 当 $V_q + V_f$

式中, v_e 为电子平均热运动速度 (m/s), v_i 为正离子平均热运动速度 (m/s)。

由于 v_e 远高于 v_i , 单位时间内到达喷嘴的电子数总高于正离子数。也就是说, 在喷嘴出现了负电荷的积累, 喷嘴相对于其前端呈现负电势。在这个负电势的作用下, 电子到达喷嘴的速率减小, 正离子到达喷嘴的速率增加。这个过程达到平衡后, 喷嘴上的负电荷数量不再变化, 同时, 喷嘴前端附近的一个小区域内正离子数量高于电子数量, 出现一个正电荷积聚区。这个区域就是所谓的等离子鞘层^[2,3]。由于这种情况下形成的鞘层是正离子的积聚区, 因此也叫离子鞘。在鞘层附近带电粒子的分布如图 1(a) 所示。

在鞘层附近的带电粒子运动达到平衡后, 令喷嘴到鞘层边缘 (即鞘层区域与等离子体之间的地带)

≤ 0 时, 到达喷嘴的电子流 I_{e1} 可写为

$$I_{e1} = I_{e0} \exp\left[\frac{e(V_q + V_f)}{kT_e}\right] = \frac{1}{4} en_{e0} A_p v_e \exp\left[\frac{e(V_q + V_f)}{kT_e}\right] \quad (6)$$

根据式 (3), 假定电子温度 T_e 和喷嘴前端接收电流的面积 A_p 不变, 即电子的热运动速度 v_e 和 A_p 不变, 则 I_{e0} 主要决定于鞘层边缘的电子密度 n_{e0} 。当 n_{e0} 较高时, 鞘层电流 I_{e0} 较大, PCS 接收电路负载电阻 R_w 上的电压降也就越大, 即 PCS 信号越强。

由于等离子体在工件上方要从浓度高的空间向浓度低的空间扩散, 下面分析当喷嘴与工件距离 h 变化时 n_{e0} 的变化, 进一步推出等离子体电流 (鞘层电流) 随 h 变化的数学模型。

3 等离子体电流信号的数学模型

在研究工作上方等离子体中电子密度时,将等离子体的形成和扩散分为以下几个过程加以讨论。

3.1 金属蒸气扩散过程

不考虑带电粒子的复合,由一个微元平面的等离子体出发,微元平面面积为 dA ,等离子体电子均匀沿径向扩散,可以知道离微元平面圆心距离 r 处的电子扩散通量由下式给出

$$\Phi_r = -\lambda \cdot \frac{\partial n}{\partial r} \cdot 2\pi r^2 \quad (7)$$

其中 λ 为扩散系数, $\frac{\partial n}{\partial r}$ 为 r 处的电子浓度梯度。

该电子扩散通量应该全部由通过微元平面并向上扩散的电子提供

$$\Phi_0 = \frac{1}{4} n_0 v_0 dA \quad (8)$$

其中 n_0 为微元的电子密度, v_0 为微元处的电子平均热运动速度。

而在电子扩散达到平衡时有

$$\Phi_r = \Phi_0 \quad (9)$$

因此得到
$$\frac{\partial n}{\partial r} = -\frac{n_0 v_0 dA}{8\pi \lambda r^2} \quad (10)$$

解出得
$$n = \frac{n_0 v_0 dA}{8\pi \lambda r} + c \quad (11)$$

其中 c 为积分常数,考虑边界条件

$$r = \infty \text{ 时, } n = 0 \quad (12)$$

代入(11)式,可得 $c = 0$,于是

$$n = \frac{n_0 v_0 dA}{8\pi \lambda r} \quad (13)$$

(13)式是一个微元表面的电子向外扩散时对空间任意一点的电子密度的贡献量。下面考虑等离子体小孔整个面积对中心轴线上一点的影响。设小孔半径为 R ,则距离小孔平面高度为 h 处的电子密度可以由下面的双重积分式给出

$$n(h) = \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{n_0 v_0}{8\pi \lambda} \cdot \frac{1}{\sqrt{r^2 + h^2}} \cdot r d\phi dr \quad (14)$$

积分得到

$$n(h) = \frac{n_0 v_0}{4\lambda} (\sqrt{R^2 + h^2} - h) \quad (15)$$

$$I \approx \begin{cases} \frac{e A_p v_e n_{e0}}{8} \left(\frac{R}{h}\right)^{9/20} \left\{ \frac{v_0}{\lambda} (\sqrt{R^2 + h^2} - h) \exp \left[-\frac{E_I}{kT_0} \left(\frac{h}{R}\right)^{3/5} + \frac{E_I}{kT_0} \right] \right\}^{1/2} \exp \left[\frac{e(V_q + V_f)}{kT_e} \right] & (V_q + V_f < 0) \\ \frac{e A_p v_e n_{e0}}{8} \left(\frac{R}{h}\right)^{9/20} \left\{ \frac{v_0}{\lambda} (\sqrt{R^2 + h^2} - h) \exp \left[-\frac{E_I}{kT_0} \left(\frac{h}{R}\right)^{3/5} + \frac{E_I}{kT_0} \right] \right\}^{1/2} & (V_q + V_f \geq 0) \end{cases} \quad (21)$$

3.2 金属蒸气绝热膨胀过程

高温高密度的金属蒸气向外急速膨胀,由于这个过程进行得很快,使热量来不及与周围交换,因此可近似地看作绝热过程^[4]。在绝热膨胀过程中,金属蒸气对外做功,造成蒸气温度降低。由绝热过程方程可得

$$T = T_0 \left(\frac{V_0}{V} \right)^{\gamma-1} \quad (16)$$

其中 T_0 和 T 分别为膨胀前后的蒸气温度, V_0 和 V 分别为膨胀前后的蒸气体积,对单原子金属蒸气, $\gamma = 6/5$ 。

由于膨胀在工件表面上方进行,假定蒸气为半球形,膨胀前后的半径分别为 R 和 h ,则膨胀后高度为 h 处的蒸气温度为

$$T = T_0 \left(\frac{R}{h} \right)^{3/5} \quad (17)$$

3.3 金属蒸气的电离

密度为 n_0 ,温度为 T_0 的金属蒸气,其平衡电离度服从 Saha 方程^[5,6]

$$n_{e0}^2 = 2n_0 (g_1/g_0) (m_e k T_0 / 2\pi \eta^2)^{3/2} \times \exp(-E_I/kT_0) \quad (18)$$

式中, g_1, g_0 分别为电离态和中性态的统计权重, E_I 为电离能, k 为 Boltzmann 常数, η 为 Planck 常数。

由 Saha 方程,可以得到高度为 h 处的电子密度

$$n_e(h)^2 = 2n(h) (g_1/g_0) (m_e k T / 2\pi \eta^2)^{3/2} \times \exp(-E_I/kT) \quad (19)$$

由(17)~(19)式得

$$n_e(h)^2 = \frac{v_0 n_{e0}^2}{4\lambda} (\sqrt{R^2 + h^2} - h) \left(\frac{R}{h} \right)^{9/10} \times \exp \left\{ -\frac{E_I}{kT_0} \left[\left(\frac{h}{R} \right)^{3/5} - 1 \right] \right\} \quad (20)$$

在 PCS 喷嘴和工件上外加电压 V_f 后,当 $V_q + V_f < 0$ 时喷嘴前端有鞘层存在;当 $V_q + V_f \geq 0$ 时鞘层消失。由于我们假设等离子体电信号主要由电子提供,而忽略正离子的影响,所以流过喷嘴底面 A_p 的电流可以写成下式

式(21)就给出了等离子体电流信号 I 的数学模型。其中 A_p, v_e, n_{e0} 可实测或给出估计值, V_f 由 PCS

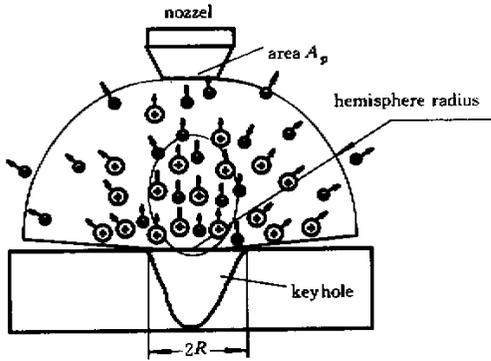


图2 带电粒子向整个空间扩散示意图

Fig. 2 Charged particle diffuse to all direction

信号接收电路确定。这个电流 I 在外接负载电阻 R_w 上产生压降 V_p 为

$$V_p = IR_w \quad (22)$$

由此可以看出,在一定的焊接规范下,若给定附加电源电压 V_w ,则 PCS 电路接收负载 R_w 上的电流变化随 h 的增加单调减小。而在 h 一定时,若附加电源电压 V_w 提高,则加在喷嘴和工件间的电压 V_f 也高, I 增加,负载 R_w 上的信号电压 V_p 相应提高。

下面以激光功率 1 kW,焊接速度 1 m/min 和入焦量为 0.5 mm 的焊接规范为例,计算不同 h 时 PCS 接收信号 V_p 的变化曲线,并与实测值进行比较。

令 $T_e = 8000$ K, $A_p = 7.8 \times 10^{-5}$ m², $\lambda_i = 0.25 \times 10^{-6}$ m²/s, $R = 0.09$ mm, $R_w = 20$ k Ω ,取 $V_w = -15$ V。则 V_p 随 h 的变化理论曲线和实测曲线如图 3 所示。

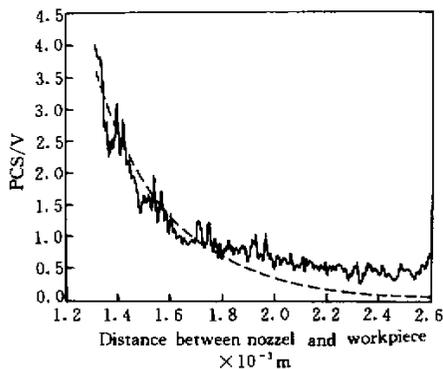


图3 数学模型计算值与实测值的对比

Fig. 3 Comparison between the calculation value and the measured value

图 3 表明,根据数学模型所得的计算结果与实测的不同喷嘴-工件距离下的电信号值具有相同的变化趋势,在一定范围内十分吻合。当 h 较大时,计算值比实测值小,这主要有以下两个原因:一是由于等离子体膨胀并不是完全的绝热过程,等离子体在迅速膨胀的同时还要吸收一定的激光能量,实际温度比模型假定的绝热情况高,对应的等离子体中电离的自由电子浓度比计算值大。二是检测的电信号受电荷传感器线性区间的影响,即信号输入为零时,传感器输出并不为零,而存在一个死区。

4 结 论

1) 激光深熔焊接过程中金属蒸气受热电离而产生等离子体,对于其中带电粒子向工件上方(喷嘴方向)的扩散,由于电子的扩散速度高于离子的扩散速度,在喷嘴附近形成鞘层,在喷嘴和工件通路的情况下就会有等离子体电流向外输出,并在外接负载电阻上产生压降。在没有外加电压时,等离子体电流很小,本文实验条件下仅为 0.03 mA。

2) 当喷嘴和工件间有外加电压时,等离子体中离子流变化不大,等离子体电荷传感器接收等离子体电流的大小 I 取决于等离子体中电子流的变化大小。在鞘层电势 V_q 和外加电压 V_f 之和小于 0 时,等离子体电荷传感器接收信号随外加电压的增加而增大,当 $V_q + V_f = 0$ 时等离子体电流接近饱和。

3) 在外加电压一定时,等离子体电流 I 的变化大小取决于喷嘴前端鞘层附近的电子密度 n_{e0} ,与喷嘴到工件距离 h 的关系由式(21)给出。

参 考 文 献

- 1 Bao Jiangcheng. Study on optimization and control in penetration laser welding; master degree thesis [D]. Dept. of Mechanical Engineering, Tsinghua Univ., Beijing, 1997 (in Chinese)
- 2 Jin Youmin, Fan Yousan. Physical Basis of Plasma at Low Temperature [M]. Beijing: Tsinghua University Publishing Company, 1983 (in Chinese)
- 3 B. E. Grant. Physical Basis of Plasma [M]. Beijing: Atomic Energy Publishing Company, 1983 (in Chinese)
- 4 M. Von Orman. Physical Theory and Applications of the Interaction between the Laser Beam and the Materials [M]. Beijing: Science Publishing Company, 1994 (in Chinese)
- 5 Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. Physics of Interactions between Laser and Materials [M]. Beijing: Publishing Company of Mechanical Industry, 1996. 50~53 (in Chinese)
- 6 Chen Xi. Heat Transition and Motion of Plasma at Temperature [M]. Beijing: Science Publishing Company,