

激光深熔焊接等离子体发射光谱诊断研究*

Optical Emission Spectroscopic Measurement of Plasma During Laser Keyhole Welding

哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室 雷正龙 赵耀邦 陈彦宾
首都航天机械公司 马绍义 孙忠绍

[摘要] 综述了激光等离子体发射光谱诊断的基本假设;介绍了电子温度、密度光谱计算最常用的方法;同时综述了国内外激光焊接等离子体光谱诊断的研究进展。旨在对激光焊接等离子体光谱诊断基本理论和当前的研究进展进行全面的梳理,并对开展激光焊接等离子体光谱试验工作提供理论支持和技术参考。

关键词: 光谱诊断 等离子体 激光焊接 电子温度 电子密度

[ABSTRACT] The main assumptions of plasmas diagnosis by optical emission spectroscopy are introduced. The most common methods to determine the value of electron temperature and density are deduced. The research progress of plasmas diagnosis by optical emission spectroscopy is reviewed, which are provided as useful information for full acquaintance, and are also provided as theoretical backup and technologic reference for future experiment work.

Keywords: Spectroscopic measurement Plasma Laser welding Electron temperature Electron density

与普通的焊接方法相比,激光深熔焊接具有焊接速度快、焊缝深宽比大、热影响区和热变形小、焊缝强度高、易于实现自动化等优点,因而在现代制造业中得到越来越广泛的研究和应用^[1-2]。在激光深熔焊接过程中,功率密度较高($>10^6\text{W}/\text{cm}^2$)的激光照射到待焊工件的表面上,使工件表面迅速升温、熔化并发生剧烈的气化,巨大的金属蒸气膨胀压力使熔化的液态金属表面向下凹陷,形成凹坑,激光束直射至凹坑底部,产生新的蒸发,从而进一步加深凹坑,直至最后形成所谓的“匙孔”(keyhole)。匙孔孔内的金属蒸气继续在高功率密度的激光作用下产生电离,从而在小孔内部及上部形成一定浓度的高温等离子体。等离子体将对激光束产生吸收、

折射等作用,影响激光束与工件的能量耦合,从而导致熔深不足、过烧、焊缝形状波动不规则,甚至出现等离子体云对激光辐射的屏蔽,最终将导致小孔的崩溃和焊接过程的终止^[3-4]。因此就激光焊接等离子体展开研究,进而对等离子体进行控制对激光深熔焊接具有重大的意义。

温度和电子密度是等离子体最重要的2个参数,其他物性参数都可以表达为等离子体温度和电子密度的函数^[5]。与其他方法相比,光谱分析可以在不干扰等离子体原始态的情况下测量等离子体的参数,同时,关于光谱信息计算等离子体温度的相关理论已很完整,并可进行相应的误差分析,因此光谱分析法成为等离子体温度、密度测量最常用的方法^[6]。目前国内外对于等离子体电子温度、密度的光谱诊断主要集中在化学分析^[7-9]、托卡马克等离子体^[10]以及电弧放电领域^[11-12],而针对激光深熔焊接光致等离子体温度、密度测量的研究较少。因此,本课题鉴于在激光深熔焊接过程中等离子体控制的重要性,就激光焊接等离子体电子温度、密度的发射光谱诊断的基本原理进行了总结,并综述了国内外关于激光焊接等离子体光谱诊断的研究现状。

1 等离子体光谱诊断假设

1.1 局域热力学平衡假设

在等壁温为 T 的无泄漏空腔中,均匀等离子体的状态可用一定数量的宏观参量(温度、压力和成分浓度等)来描述,当不必知道等离子体中所发生的微观过程时,称这种等离子体处于完全热力学平衡态。对于处于完全热力学平衡态的等离子体,可用麦克斯韦定律规定粒子速度分布函数、玻耳兹曼分布确定激发态粒子的数密度、萨哈方程建立电离关系式、普朗克定律给出辐射的谱强度进行测定^[5]。但是要达到完全热力学平衡的苛刻条件是很不容易的。当电子数密度足够高时,使得在等离子体中发生激发、去激发以及电离、复合等过程,其中,电子碰撞起决定性作用,这时称等离子体处于局域热力学平衡态,上述方程仍然适用,从而问题就可以得

* 哈尔滨工业大学优秀青年教师培养计划课题(HITQNJ.S.2008.020),中国博士后科学基金(No.20090460885)资助。

到很大程度的简化。

激发态的粒子密度可以用波尔兹曼分布来确定:

$$\frac{N_m}{N_n} = \frac{g_m}{g_n} \cdot \exp\left(-\frac{E_m - E_n}{k \cdot T_e}\right), \quad (1)$$

式中, T_e 为电子温度, N_m 为 m 能级粒子数密度, N_n 为 n 能级粒子数密度, g_m 、 g_n 分别为上下能级的统计权重, E_m 、 E_n 分别为 m 、 n 能级的电离能。

把波尔兹曼公式推广到连续态能量,可得到萨哈方程。与完全热力学平衡时相比,用电子温度 T_e 代替热力学温度 T ,即:

$$S_z(T) = \frac{N_{z+1} + N_e}{N_z} = \frac{2Z_{z+1}(T)}{Z_z(T)} \frac{(2\pi m_e kT)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{E_{z\infty} - \Delta E_{zI}}{kT}\right), \quad (2)$$

式中, N_e 是等离子体的电子数密度, N_{z+1} 为 $Z+1$ 价的离子数密度, N_z 为 Z 价的离子数密度, $Z_{z+1}(T)$ 、 $Z_z(T)$ 相应为带电荷 $(Z+1)e$ 、 Ze 离子的配分函数, $E_{z\infty}$ 为 Z 价离子的电离能, ΔE_{zI} 为 Z 价离子电离能的降低量, h 为普朗克常数, k 为波尔兹曼常数, m_e 为电子的质量。

Griem^[13] 根据单位时间内电子碰撞引起的在第一激发态与基态的跃迁数应该 10 倍于自发发射而引起的在第一激发态与基态之间的跃迁数,由此,得出了局域热力学平衡的一个简单的判据,即以临界电子数密度来表示:

$$N_e^* \geq 1.6 \times 10^{12} T_e^{1/2} (\Delta E)^3, \quad (3)$$

式中, N_e 是电子密度 (cm^{-3}), ΔE 表示的第一激发态与基态的能量差值 (eV)。当等离子体的电子数密度 N_e 大于临界电子数密度 N_e^* 时,就可以认为此等离子体处于局部热力学平衡状态。此时,只要使用电子温度 T_e 代替热力学温度 T ,就可以应用玻耳兹曼分布和萨哈方程等来描述等离子体参数。

1.2 光学薄的假设

激光焊接等离子体作为一个开放的体系,较小的几何尺寸和较大的比表面积使大部分的能量向外界散失,辐射光谱的强度不再服从黑体辐射分布。同时,当辐射光谱自等离子体内部通过边缘区域时,有一部分能量会被低能态的同类粒子所吸收,使观测到的辐射强度减弱。也就是说,作为辐射的逆过程,当原子接受了辐射所给予的能量,从低能级跃迁到高能级时,吸收的波长由相应的能级差来决定。同时,吸收的程度则与处于低能级的原子浓度有关。这样就形成了等离子体的自吸收效应。但对于某一条谱线来说,就形成了谱线的自蚀效应。

但是,为了对激光焊接等离子体进行发射光谱诊

断,往往对这种现象加以忽略,认为等离子体满足光学薄,即辐射传递过程中的吸收可以忽略不计(辐射强度仅与等离子体厚度有关)^[14-15]。如果光学薄的条件不能得到满足而出现谱线自吸收,谱线轮廓将呈现失真的宽度和区域,导致对等离子体温度、密度错误的诊断。

在光学薄的条件下,等离子体的厚度满足下面关系式^[16-17]:

$$\tau_{mn}(\lambda) = K_{mn}(\lambda) L \ll 1, \quad (4)$$

式中, $\tau_{mn}(\lambda)$ 是等离子体光学厚度, $K_{mn}(\lambda)$ 是吸收系数, λ 表示从 m 能级到 n 能级的辐射波长, L 是等离子体的厚度。

吸收系数可由下面方程估算^[18-20]:

$$K_{mn}(\lambda) = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 m_e c} f_{mn} N_n \frac{1}{\Delta\lambda_{1/2}}, \quad (5)$$

式中, e 是电子电荷, ε_0 为真空介电常数, m_e 为电子静止质量, f_{mn} 是吸收振子强度, N_n 为 n 能级粒子数密度, $\Delta\lambda_{1/2}$ 是谱线的半高全宽 (FWHM)。

2 电子温度、密度光谱诊断计算

在等离子体发射光谱诊断中,光谱仪获得的只是等离子体谱线的强度和轮廓。需通过一系列的等离子体物理方程、统计物理方程、光谱理论方程以及热力学方程建立起等离子体光谱与等离子体参数的关系,从而获得等离子体电子的温度、密度。下面介绍通过光谱计算等离子体电子温度、密度的最常用方法。

2.1 电子温度计算

在光学薄的等离子体中,其自吸收对辐射能量损失可以忽略。所以,由基态 (m) 跃迁至高能级 (n) 的光发射谱线强度可以表示为:

$$I_{mn} = N_m A_{mn} h \nu_{mn}, \quad (6)$$

式中, N_m 为 m 能级的粒子数密度, A_{mn} 为 m 能级到 n 能级的跃迁几率, h 为普朗克常数, ν_{mn} 为 m 能级到 n 能级的谱线频率。

在满足局域热力学平衡假设下,激发态的原子满足波尔兹曼分布,如式(1)。把波尔兹曼分布写成粒子数密度的关系式:

$$N_m = \frac{N}{Z} g_m \exp\left(-\frac{E_m}{kT_e}\right), \quad (7)$$

式中, N_m 为粒子的总数密度, Z 为配分函数, g_m 为统计权重, E_m 为高能级激发能, k 为波尔兹曼常数, T_e 为电子温度。

联立式(6)、(7),再根据光速、波长、频率的关系可得:

$$\ln\left(\frac{I_{mn}\lambda_{mn}}{A_{mn}g_m}\right) = -\frac{E_m}{kT_e} + \ln\left(\frac{Nhc}{Z}\right), \quad (8)$$

式中, $\ln\left(\frac{Nhc}{Z}\right)$ 为常量,如果把 $\ln\left(\frac{I_{mn}\lambda_{mn}}{A_{mn}g_m}\right) = -\frac{E_m}{kT_e} +$

$\ln(\frac{Nhc}{Z})$ 、 E_m 分别视为因变量和自变量,可以获得 $-\frac{1}{kT_e}$ 为斜率的波尔兹曼图。通过该方法,可以获得电子的温度 T_e ,因此该方法也称为波尔兹曼图法。

为了减少波尔兹曼图法的误差,最好选择相同元素同一电离状态的谱线。同时谱线的选择满足高能态和激发态之间的能级差必须足够大,即应该满足:

$$E_m - E_n \gg kT_e \quad (9)$$

2.2 电子密度计算

Stark 效应是由于发射原子与电子、粒子碰撞引起的谱线的展宽和峰值波长的改变。它主要取决于粒子数密度和等离子体的压力,因此谱线的展宽是电子密度的函数,由此在等离子光谱诊断中可用来计算等离子体的密度,该方法在等离子体光谱诊断中已广泛使用^[5,21-22]。Stark 展宽计算电子密度基于如下的假设,与多普勒展宽和因与中性原子碰撞引起的其他压力展宽(如共振展宽和范德瓦尔展宽)相比,Stark 效应在展宽机制中起主导作用^[5]。Griem^[13] 给出了斯塔克展宽和电子密度的半高全宽表达式:

$$\Delta\lambda_{1/2}^s = 2\omega\left(\frac{N_e}{10^{16}}\right) + 3.5A\left(\frac{N_e}{10^{16}}\right)^{1/4} \cdot [1 - 1.2N_D^{-1/3}]\omega\left(\frac{N_e}{10^{16}}\right), \quad (10)$$

式中, ω 为电子碰撞展宽系数, N_e 为电子密度, A 为粒子碰撞展宽系数, N_D 为德拜球内的粒子数。准静态的粒子展宽(上式第二项),贡献约小于 4%,可以忽略。由此电子密度表达式可简化为:

$$N_e = \frac{\Delta\lambda_{1/2}^s}{2\omega} \times 10^{16} \quad (11)$$

3 光谱诊断技术研究现状

3.1 等离子体平均电子温度、密度

北京航空航天大学苏彦东^[23]对大功率 CO_2 激光焊接 1Cr18Ni9Ti 不锈钢等离子体某一点的温度和密度进行了光谱诊断,采用相对强度法计算了等离子体电子的温度、密度。研究表明电子密度随激光能量的增大而单调上升,而当电子密度较小的时候($<10^{16}/\text{cm}^3$),随着电子密度的增大激光焊接熔深增加;而当电子密度超过 $1.5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 时,等离子体严重地屏蔽了射入到工件的能量,这样的熔深与电子密度又逐渐呈下降的趋势。

与此同时,本课题对于在铝合金 CO_2 激光焊接过程中光致等离子体某点的温度变化规律进行了分析^[24]。当激光功率超过材料深熔焊接阈值功率后,激光功率对光致等离子体温度的影响不大,约为 6000K;而焊接速度对光致等离子体温度的影响呈现出“倒 U 形”曲线,即在焊接速度较高和较低情况下,光致等离子体温度均

呈现下降趋势。

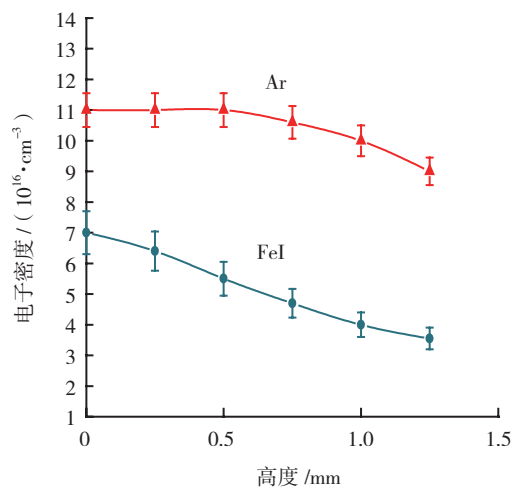
日本大阪大学焊接研究所 Kawahito^[25]对大功率光纤激光焊接 304 奥氏体不锈钢等离子体进行了光谱测量,谱线中主要是金属原子谱线,氩原谱线很少,并且强度很弱。通过波尔兹曼图法计算激光等离子体的温度约为 6000K,通过萨哈方程计算电离度约为 0.02,可见大功率光纤激光等离子体比较弱。这表明光纤激光具有优异的光束品质,焊接产生的激光等离子体比 CO_2 激光少,因而具有较好的工业应用前景。

上述测量都把激光焊接等离子体的温度、密度视为空间、时间不变的获得了单点的温度、密度。

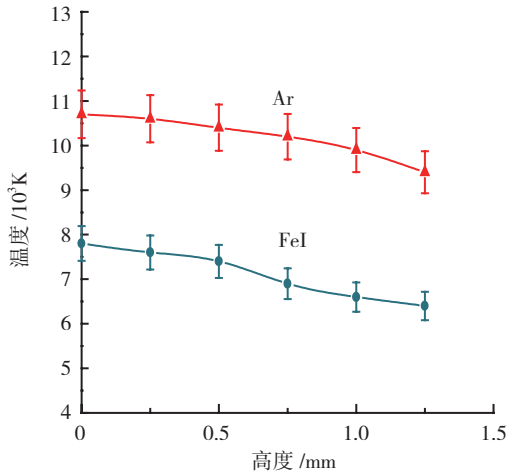
3.2 等离子体电子温度、密度空间分布

1997 年波兰基础科技研究院 Szymanski 等^[26]用光谱法研究了连续 CO_2 激光焊接不锈钢和钛合金等离子体,获得了随等离子体高度变化的电子温度、密度,即随着等离子体距离工件高度的增加,电子温度、密度都呈下降趋势,如图 1 所示^[26]。从 Ar 谱线获得的平均电子温度为 11500K,中心电子密度为 $1.2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$,匙孔上方的等离子体云由被保护气稀释的金属蒸气组成,并对其局部热力学平衡进行了验证。

2004 年波兰基础科技研究院 Jacek Hoffman 等^[27]用光谱法研究了连续 CO_2 激光焊接不锈钢等离子体,研究表明谱线的强度随时间变化而变化,当等离子体由铁等离子体和氩等离子体组成时,匙孔喷发少量蒸气,2 种等离子体并存;而当大量喷发,几乎只有金属等离子体存在。从氩谱线展宽获得的电子密度为 $(0.75\sim 1.05) \times 10^{29}/\text{cm}^3$,而从铁谱线展宽获得的电子密度为 $(0.6\sim 1) \times 10^{29}/\text{cm}^3$ 。采用 Ar 和 He 分别作为保护气,由于不同的电离能获得了不同的电子密度,如图 2 所示,2 种保护气下金属等离子体大量喷发时电子密度随高度的变化而发生变化。



(a) 平均电子密度



(b) 平均电子温度

图1 激光焊接速度2 m/min时不锈钢上方平均电子密度和温度的分布^[26]

Fig.1 Average electron density and electron temperature distributions over stainless steel surface for a welding speed of 2m/min

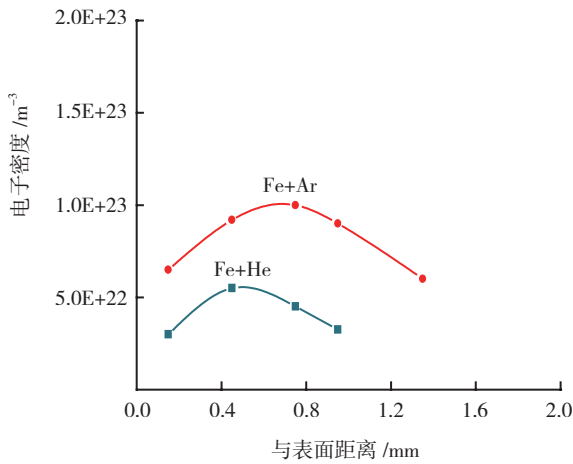


图2 Ar和He两种不同保护气体在等离子体喷发峰值时的空间平均电子密度^[27]

Fig.2 Space-averaged electron densities at peaks of metal plasma bursts for two different shielding gases argon and helium

激光焊接等离子体温度不仅在高度上存在梯度变化,而且在同一高度也存在径向梯度变化。湖南大学陈根余等^[28]基于快速傅里叶变换(FFT)和汉克耳变换的阿贝尔逆变换恢复了径向发射系数,通过光谱测量和计算获得了CO₂激光焊接等离子体二维温度场的分布,结果表明激光焊接等离子体温度场相对于光束中心呈四周低中间高的趋势。

3.3 匙孔内等离子体电子的温度、密度

测量匙孔内等离子体温度时,由于小孔周围

的不透光性而受到制约从而导致研究难度较大,针对这一问题,湖南大学的张屹^[29]利用单通道光谱仪对连续CO₂激光深熔焊接匙孔内等离子体的光谱进行了测量。试验采用了特别设计的“三明治”结构试件,即把铝箔夹在两块GG17玻璃中间,激光焊接铝箔时匙孔内的等离子体可以通过玻璃透射出来,图3所示为CCD拍摄的小孔等离子体^[30]。通过该方法获得了匙孔内等离子体的电子温度和电子密度,孔内电子温度在14000~18000K之间,电子密度从 $1.2 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 2.5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 之间变化。

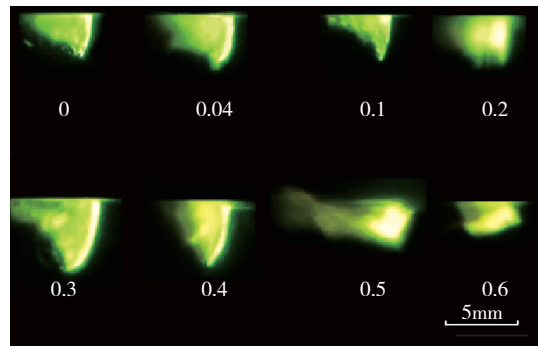


图3 不同夹层铝箔厚度时焊接熔深的匙孔形貌^[30]

Fig.3 Variation of keyhole profile with different thickness of aluminum films

3.4 等离子体光谱与焊接特征相关性

斯洛文尼亚国际激光中心J. Bmneko^[31]用光谱法获得了YAG激光焊接奥氏体不锈钢在不同离焦量下的谱线特征、焊接熔深。研究表明:当较小的离焦量时,谱线比较平稳,同时焊接熔深较大;而当离焦量较大时,谱线的波动较大,熔深减小。伊朗Paya Partov激光研究中心S.Dadras等^[32]对不同保护气、预热温度下铜合金焊接的等离子体进行光谱诊断。研究表明:当用O₂作为保护气时电子温度最高,获得熔深也最大。这是由于O₂与Cu反应生成了Cu₂O增加了材料对激光的吸收率,由于N₂的导热率比He的高,因而N₂作为保护气比He作为保护气的电子密度高,熔深也大,如图4所示;当预热温度小于150℃时,随着预热温度的增加,等离子体电子温度也随之增高,材料对激光的吸收率增加,因而熔深逐渐增加;当预热温度超过150℃后,电子温度随预热温度增加反而下降。这是由于较大的预热温度造成匙孔不稳定,熔深下降所造成的,同时也带来了飞溅等焊接缺陷。

4 结束语

发射光谱诊断作为获取等离子体电子温度、密度的一

(下转第81页)