

万瓦级光纤激光焊接过程中小孔内外 等离子体研究*

李时春 陈根余[†] 周聪 陈晓锋 周宇

(湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

(2013年12月9日收到; 2014年1月28日收到修改稿)

为了进一步深入了解超高功率光纤激光深熔焊接过程中等离子体特征, 试验拍摄了深熔小孔内外等离子体形态, 并采用光谱仪检测分析了光纤激光致等离子体光谱信号. 利用检测得到的等离子体光谱信号, 计算研究了等离子体的电子温度、电子密度、电离度以及等离子体压力特征, 并分析了在小孔内不同深度处及孔外等离子体的变化规律. 结果表明, 孔内等离子体呈现不均匀分布特征, 孔外金属蒸气远多于等离子体. 等离子体光谱分析显示, 光纤激光致等离子体辐射出的谱线较少, 即电离程度较低. 进一步的计算结果同样证实了光纤激光致等离子体处于弱电离状态, 但等离子体电子密度仍然处于较高水平, 且等离子体瞬态压力可达到数百个大气压.

关键词: 光纤激光, 深熔焊接, 等离子体, 压力

PACS: 42.62.-b, 42.55.Wd, 52.38.-r

DOI: 10.7498/aps.63.104212

1 引言

在激光深熔焊接过程中, 激光致等离子体对维持稳定的焊接过程起着重要作用. 激光致等离子体对激光具有逆韧致辐射吸收作用, 同时高温等离子体可作为第二热源加热材料, 等离子体的瞬态变化与小孔稳定性关系十分密切. 不同的激光波长产生的等离子体特征差异明显. 大量研究^[1-6]表明, 在CO₂激光焊接过程中, 激光致等离子体温度在5000—20000 K, 电子密度可达到 10^{23} m^{-3} 量级, 等离子体对CO₂激光(波长为10.64 μm)衰减作用明显. Kawahito等^[7]对高功率光纤激光焊接过程中孔外等离子体进行了研究, 结果表明, 光纤激光焊接过程中等离子体温度相对较低, 等离子体对光纤激光(波长为1.07 μm)吸收率相对较低, 等离子体呈现弱电离状态. 目前对于高功率光纤激光深熔焊接过程中小孔内等离子体特征的研究尚未

见报道, 但孔内等离子体特征与焊接过程的稳定性关系密切, 孔内物态力学特征直接关系到小孔的稳定存在.

等离子体产生时伴随的冲击波增加了深熔小孔内压力, 从而影响小孔内的力学平衡. Kulish等^[8]采用特殊试验方法对电弧放电产生的等离子体的压力进行检测, 结果表明, 等离子体瞬时压力在 $3 \times 10^6 \text{ Pa}$ — $6 \times 10^8 \text{ Pa}$ 范围变化, 最高可达 10^8 Pa . Bedenko等^[9]通过理论模型计算得到激光致等离子体压力在0.9 MPa以下. Fuerschbach等^[10]研究发现激光产生的蒸气压力在1.2 MPa以下. 目前对激光深熔焊接过程中等离子体压力的试验研究尚未有报道, 有待进一步深入研究以获取更多数据.

本文对万瓦级光纤激光深熔焊接过程中孔内外等离子体进行了高速摄像观察研究, 并采集分析了焊接过程中等离子体的光谱信号. 利用检测得到的等离子体光谱信号计算了等离子体的温度和电

* 国家自然科学基金(批准号: 51175165)和国家科技重大专项基金(批准号: 2013ZX04001131)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: hdgychen@163.com

子密度, 对比分析了孔内外等离子体特征. 借助现有等离子体理论和试验所得数据, 对激光深熔焊接过程中等离子体压力进行了计算研究.

2 试验方法和理论背景

2.1 试验方法

试验采用 IPG Photonics 公司生产的 YLS-10000 型光纤激光器, 额定输出功率为 10 kW, 工作模式为连续, 发射激光波长为 $1.07 \mu\text{m}$, 通过焦距为 300 mm 的透镜聚焦后激光焦斑直径为 0.40 mm, 瑞利长度为 5.3 mm. 10 kW 激光输出时, 焦斑处激光束功率密度高达 $7.96 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$. 试验过程中采集光谱信号选用的是美国 Princeton 仪器公司生产的光栅光谱仪, 配置 PIXIS400F 型高性能面阵电荷耦合元件探测器 (像素数为 1340×400), 试验中选用 600 线/mm 的衍射光栅, 单次测量宽度为 130 nm, 光学分辨率约为 0.1 nm. 试验中采用 Photron 公司生产的 SA4 型高速相机对激光深熔焊接过程进行高速摄像观察, 选用的拍摄频次为 5000 s^{-1} . 在拍摄等离子体时, 相机前加滤光片 (透射波段为 350—650 nm) 滤光, 可观察到清晰的蓝色等离子体; 在拍摄孔外蒸气特征时不加滤光片, 可观察到完整的蒸气轮廓.

图 1 所示为孔内等离子体观察装置及其光谱检测试验装置示意图. 试验中将 5 mm 厚 304 奥氏体不锈钢板与 6 mm 厚 GG17 玻璃夹紧, 激光沿靠近玻璃一侧的不锈钢边缘表面扫描, 形成玻璃与不锈钢混合焊接熔池. 从玻璃的侧面观察拍摄孔内等离子体并采集等离子体光谱信号. 采集光谱信号时, 选择多通道信号检测方式, 并在焊接处与光纤探头间放置一个成像放大透镜, 以精确对应深熔小孔内不同深度处的光谱信号. 图 2 所示为孔外等离子体观察装置及其光谱检测试验装置示意图. 试验采用 12 mm 厚 304 不锈钢板. 等离子体光谱采集装置采用单通道采集方式, 光纤探头前不加成像放大透镜, 光纤探头倾斜放置, 与激光束夹角 θ 约为 45° . 试验过程中激光功率设置为 10 kW, 焊接速度为 1.8 m/min, 离焦量为 -5 mm. 孔内等离子体拍摄时焊接速度设为 1.5 m/min.

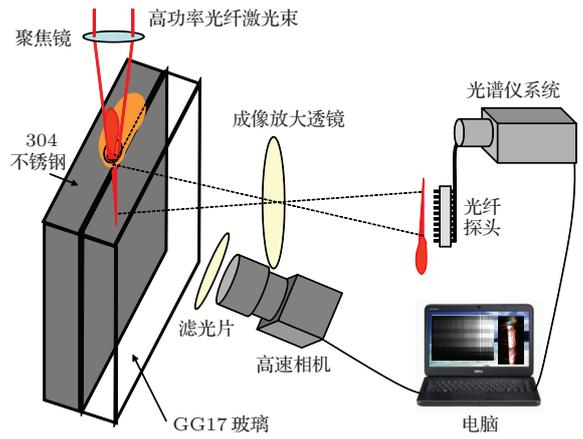


图 1 孔内等离子体观察装置及其光谱检测装置示意图

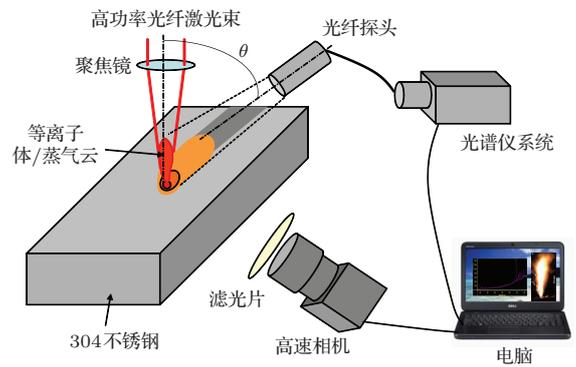


图 2 孔外等离子体观察装置及其光谱检测装置示意图

2.2 理论背景

采集等离子体光谱信号后, 利用现有等离子体理论对光谱信号进行处理, 并计算出等离子体的电子温度、电子密度、电离度和压力. 在激光深熔焊接过程中, 激光致等离子体具有光学薄特征, 且处于局部热力学平衡状态^[11]. 局部热力学平衡状态判据如下式所示:

$$n_e \geq 1.6 \times 10^{12} \sqrt{T_e} (\Delta E)^3, \quad (1)$$

其中, n_e 为电子密度, 单位为 cm^{-3} ; T_e 为电子温度, 单位为 K; ΔE 为谱线产生时的上下跃迁能级差, 单位为 eV. 本文结果显示, 试验中等离子体温度在 6000 K 以下, 所测得的谱线能级差低于 3 eV, 对应的最低电子密度为 $3.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 而实测电子密度均在 10^{16} cm^{-3} 以上, 因此本实验中等离子体处于热力学平衡状态. 在此平衡条件下, 等离子体的其他物理属性即可根据光谱信号计算得出.

等离子体电子温度可采用计算精度较高的玻

尔兹曼图法获得, 计算式如下^[11]:

$$\ln \left(\frac{I_{pq} \lambda_{pq}}{A_{pq} g_p} \right) = \ln \left(\frac{hcn}{Z} \right) - \frac{E_p}{k_B T_e}, \quad (2)$$

其中, I_{pq} 为实测谱线强度, A_{pq} 为谱线跃迁概率, g_p 为上能级统计权重, λ_{pq} 为谱线波长, h 为普朗克常数, c 为光速, E_p 为上能级能量, n 为总粒子数, Z 为配分函数, k_B 为玻尔兹曼常数. (2) 式中 $\ln \left(\frac{I_{pq} \lambda_{pq}}{A_{pq} g_p} \right)$ 与 E_p 呈线性关系, 且具有线性变化斜率. 通过实测多根谱线的相对强度, 可得到斜率 $-1/(k_B T_e)$, 从而获得电子温度 T_e .

等离子体电子密度可通过谱线展宽原理获得. 而谱线的展宽主要由斯塔克展宽贡献^[11,12], 斯塔克展宽可由实测谱线拟合成的 Lorentz 型谱线的半高全宽得到. 斯塔克展宽与等离子体电子密度的简化关系式如下^[11,13]:

$$\Delta \lambda_{1/2} = 2\omega \frac{n_e}{10^{16}}, \quad (3)$$

其中, $\Delta \lambda_{1/2}$ 为谱线半高全宽, 单位为 Å; ω 为展宽系数^[14], 单位为 Å.

在局部热力学平衡条件下, 气体的电离满足下列萨哈电离方程^[11,12]:

$$\frac{n_e n_i}{n_0} = \frac{2Z_1}{Z_0} \left(\frac{2\pi m_e k_B T_e}{h^2} \right)^{3/2} \times \exp \left(- \frac{E_\infty^i - \Delta E_\infty^i}{k_B T_e} \right), \quad (4)$$

其中, n_i 为离子密度, 局部热力学平衡条件下, $n_i = n_e$; n_0 为电离后的金属原子密度; Z_0 和 Z_1 分别为基态和离子态配分函数; m_e 为电子质量; E_∞^i 为一级电离能(假设焊接过程中等离子体为一级电离状态); ΔE_∞^i 为电离能修正系数, $\Delta E_\infty^i = 0.223$ eV. 当获得等离子体的电子温度和

电子密度后, 电离后的金属原子密度 n_0 可由 (4) 式计算得到. 此时, 等离子体的电离度 x 和压力 p 可由下列公式计算得出^[15]:

$$x = \frac{n_e}{n_e + n_0}, \quad (5)$$

$$p = (n_e + n_i + n_0) k_B T_e = (2n_e + n_0) k_B T_e. \quad (6)$$

3 结果及讨论

3.1 孔内外等离子体观察

图 3 所示为孔外等离子体及蒸气拍摄结果, 其中图 3(a) 为在摄像头前加滤光片(只透过 350—650 nm 波长的光)后的拍摄结果. 从图 3 可清晰地观察到孔外蓝色等离子体, 高亮度等离子体通常出现在距小孔出口处 2 mm 以下, 超过此高度的等离子体迅速减弱, 从而变得非常稀薄. 图 3(b) 为不加滤光片的拍摄结果, 偏红色金属蒸气高度超过 15 mm. 对比图 3 中加滤光片与不加滤光片的拍摄结果可知, 光纤激光焊接过程中孔外蒸气量远大于等离子体量, 孔外蒸气被电离的量相对较少.

图 4 所示为孔内等离子体的拍摄结果. 从图 4 可以看出, 在超过 10 mm 深的细长小孔内等离子体分布不均, 且随着时间的增加, 等离子体分布变化明显. 高亮度的孔内等离子体通常出现在小孔上部的某一小范围内. 由此得出光纤激光致等离子体产生的量少, 持续时间短. 同时, 从图 4 还可观察到亮度随时间变化的孔外等离子体. 比较孔内外等离子体可知, 孔内等离子体最高亮度高于孔外等离子体最高亮度.

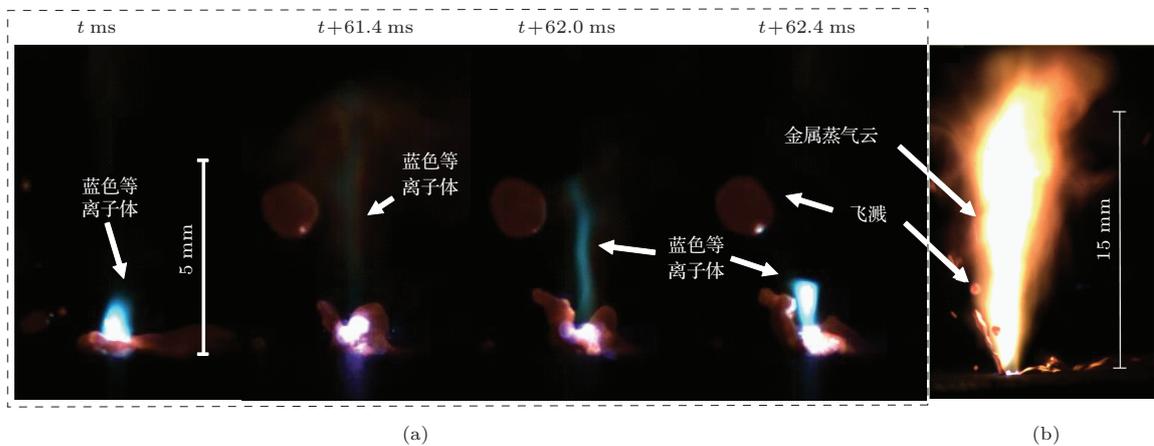


图 3 (网刊彩色) 孔外等离子体和蒸气拍摄结果 (a) 等离子体; (b) 蒸气

3.2 孔内外等离子体光谱

图5所示为孔外等离子体光谱. 高波段的谱线强度及可分辨的谱线数量明显高于低波段的谱线强度及数量. 从低波段到高波段, 谱线的基础值逐渐增加. 此现象是由于孔外等离子体蒸气辐射出的光大多位于近红外及红外区域, 低波段的谱线相对较少, 从而导致低波段光谱基础强度相对较弱. 图6所示为孔内等离子体光谱. 从图6可以看出, 在整个检测范围内孔内等离子体的可分辨谱线数量明显多于孔外等离子体的可分辨谱线数量. 对比图5和图6可知, Fe谱线和Mn谱线的孔内等离子体谱线相对强度明显高于孔外等离子体谱线相对强度, 表明孔内等离子体被电离的程度大于孔外等离子体被电离的程度. 图7所示为文献[16, 17]检测得到的CO₂激光焊接过程中等离子体光谱的试验结果, CO₂激光功率在2.5 kW以下, 光斑直径为0.2 mm. 在图7所示波长范围内, 可分辨谱线

分布密集, 且图中Fe谱线和Mn谱线明显突出. 由图6和图7可以看出, 图7中低波段谱线相对于高波段谱线的相对强度高于图6中低波段谱线相对于高波段谱线的相对强度. 本实验中采用的光纤激光功率为10 kW, 远高于文献[16, 17]中的CO₂激光功率, 即更高功率的光纤激光仍然不能产生与较低功率的CO₂激光致等离子体的光谱一致的结果. 由此可知, CO₂激光焊接过程中等离子体电离程度远高于光纤激光焊接过程中等离子体电离程度.

3.3 等离子体温度、密度、电离度及压力计算

由图6可知, 光纤激光焊接过程中等离子体辐射光谱主要为Fe, Mn和Cr三种元素对应的谱线. 本文选取表1所列的7根Fe谱线参数[18], 采用玻尔兹曼图法计算等离子体温度, 结果如图8(a)所示. 从图6可以看出, Fe I 492.05 nm 谱线独立, 左右无其他谱线与之重叠, 该谱线展宽不受其他谱线

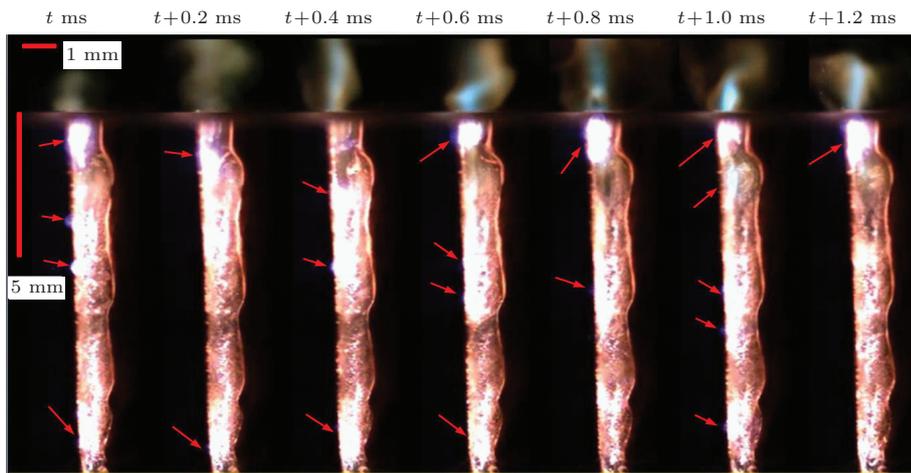


图4 孔内等离子体拍摄结果

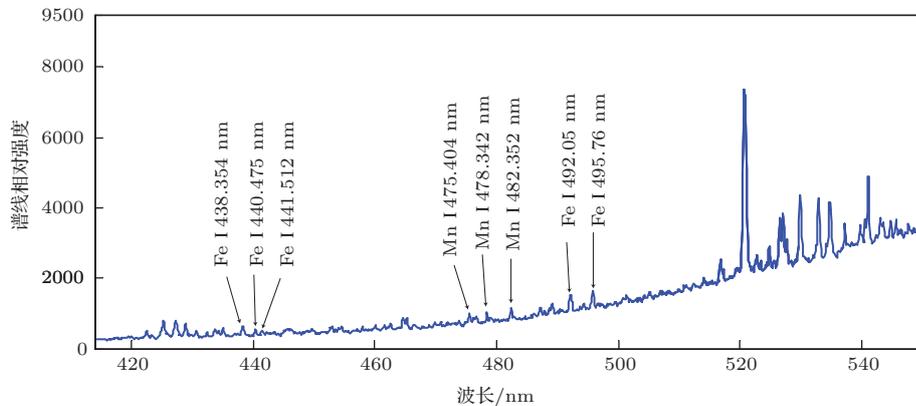


图5 孔外等离子体光谱

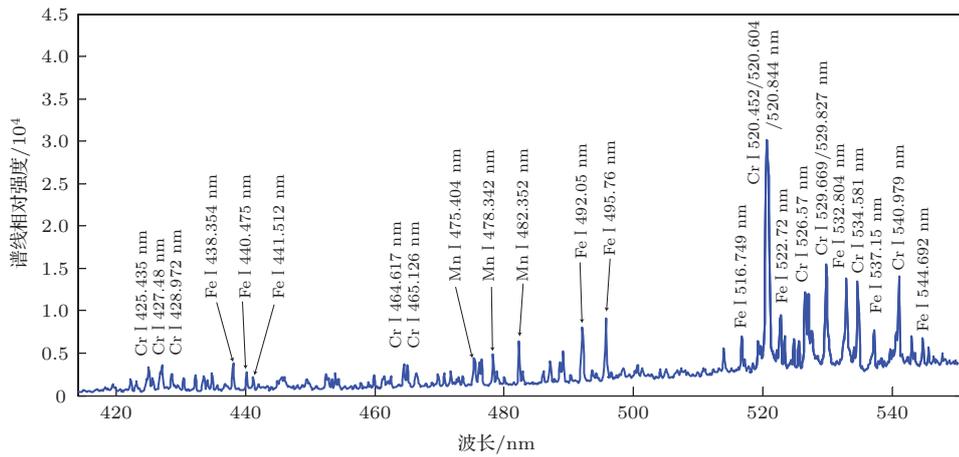


图6 孔内等离子体光谱

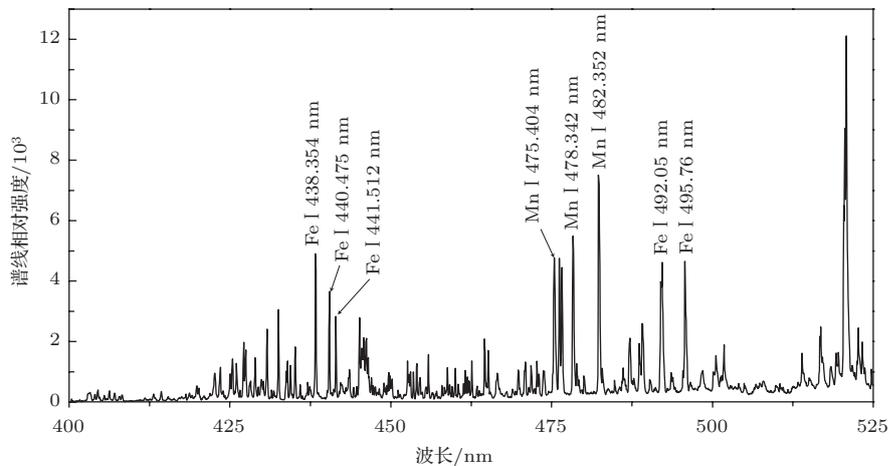


图7 CO₂激光致等离子体光谱 [16,17]

影响, 所以选其进行 Lorentz 拟合以获得谱线半高全宽, 从而计算得到电子密度, 结果如图 8 (b) 所示. 在得到等离子体电子温度和电子密度后, 依据 (4), (5) 和 (6) 式计算出等离子体的压力和电离度.

表1 Fe 谱线参数 [18]

波长/nm	跃迁概率/s ⁻¹	上能级激发能/eV	统计权重
492.05	3.58 × 10 ⁷	5.3516	9
495.76	4.22 × 10 ⁷	5.3085	11
516.75	2.72 × 10 ⁶	3.8835	7
522.72	2.89 × 10 ⁶	3.9286	5
532.80	1.15 × 10 ⁶	3.2410	7
537.15	1.05 × 10 ⁶	3.2657	5
544.69	5.48 × 10 ⁵	3.2657	5

在 10 kW 激光功率及 1.8 m/min 速度条件下, 计算得到等离子体电子温度为 4500—5600 K, 电子密度为 5 × 10²² m⁻³—1.25 × 10²³ m⁻³, 压力为

5 × 10⁵ Pa—8 × 10⁷ Pa (这与文献 [8] 所得结果处于同一水平, 但远低于文献 [19, 20] 中高能激光致等离子体压力), 电离度为 0.0001—0.006, 等离子体处于弱电离状态, 具体结果如图 9 和图 10 所示. 与 CO₂ 激光焊接过程中所得等离子体特征 [6] 相比 (电子温度为 5000—20000 K, 电子密度为 1.8 × 10²² m⁻³—2.5 × 10²³ m⁻³), 本试验光纤激光致等离子体温度低于 CO₂ 激光致等离子体温度, 而等离子体密度与 CO₂ 激光致等离子体密度接近. 这是因为等离子体对 CO₂ 激光 (长波长) 的吸收率高于对光纤激光 (短波长) 的吸收率, 因此光纤激光致等离子体温度较低. 而金属材料对 CO₂ 激光 (长波长) 的吸收率低于对光纤激光 (短波长) 的吸收率, 光纤激光焊接过程中材料的汽化率高于 CO₂ 激光焊接的情形, 因此即使等离子体处于弱电离状态, 在高密度金属蒸气粒子基数的条件下仍可产生较高密度的等离子体. 同时由于高密度的蒸气粒子

以及等离子体产生时的冲击波, 从而使得光纤激光焊接过程中等离子体的瞬态压力达到 8×10^7 Pa.

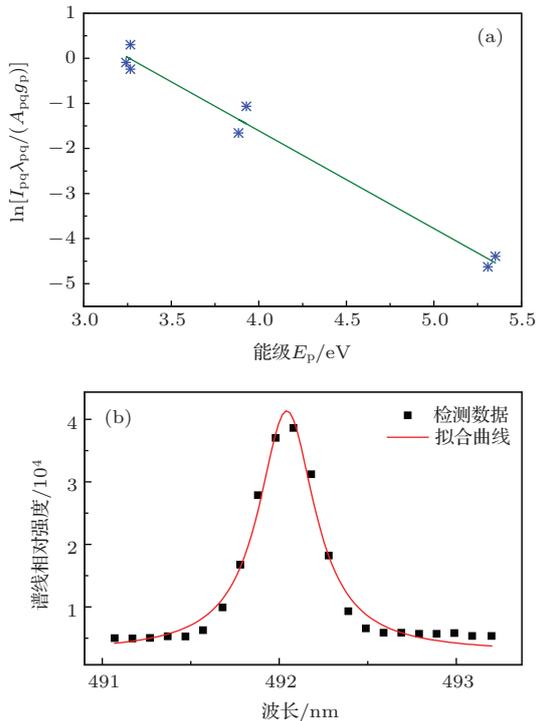


图8 Fe 谱线的玻尔兹曼图及 Fe I 492.05 nm 谱线的拟合曲线 (a) Fe 谱线的玻尔兹曼图; (b) Fe I 492.05 nm 谱线的拟合曲线

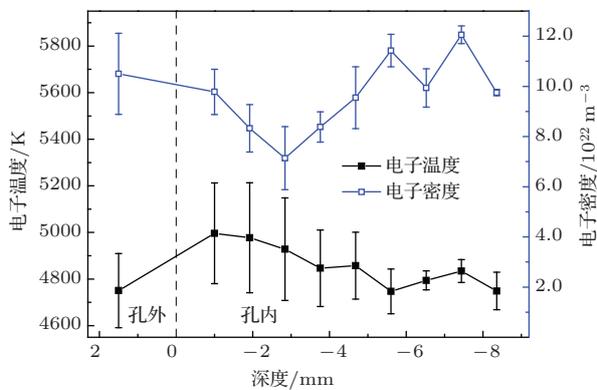


图9 孔内外等离子体电子温度和电子密度

从图9可以看出, 随孔深的增加, 孔内等离子体温度有减小的趋势, 小孔上部温度高于孔底温度. 此结果可以从图4所示的孔内等离子体亮度分布得到证实, 高亮等离子体通常出现在小孔上部. 相比之下, 孔外等离子体温度低于孔内高温等离子体的温度. 等离子体密度变化显示, 孔内等离子体在小孔上部的密度低于孔底等离子体密度. 导致此结果有以下两方面的原因: 一是孔底材料的汽化量更大, 以至于密度更高; 另一方面是在小孔上部高

温等离子体产生时伴随的冲击波将等离子体周围的粒子推向孔底及小孔出口处, 从而使得孔底及小孔出口处等离子体电子密度相对较高. 从图9还可以看出, 孔外等离子体密度与小孔出口处及孔底等离子体密度接近. 这是因为试验中孔外等离子体光谱信号检测探头处于小孔上方, 所检测的信号受到小孔内等离子体信号的影响, 因此得到的等离子体密度稍高于孔内最低值. 由图9和10所示的孔外等离子体及孔内不同深度处等离子体的参数变化规律可知, 等离子体电子温度与电离度变化一致, 电子密度与压力变化规律一致^[21]. 由此可知: 焊接过程中金属蒸气温度与电离度关系密切, 温度越高, 对应的粒子电离程度越大; 蒸气等离子体的压力则与粒子密度关系密切, 更大的粒子密度对应更高的压力. 焊接过程中孔内外蒸气等离子体压力波动剧烈, 剧烈波动的压力必然会对焊接过程产生影响. 由于实验条件的限制, 本文暂时没有对不同参数下等离子体特征做深入研究. 我们将继续深入研究在不同焊接速度及离焦量条件下万瓦级高功率激光焊接过程中等离子体特征的变化, 以及蒸气等离子体特征与焊接过程和小孔行为的关系.

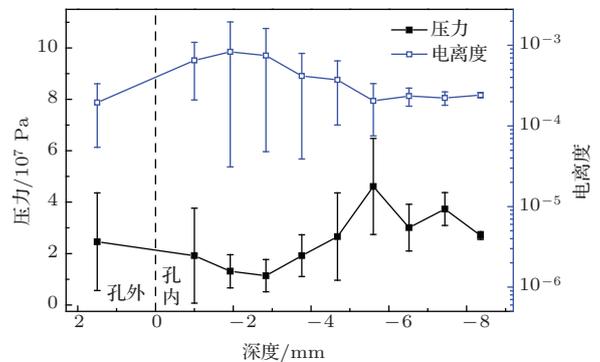


图10 孔内外等离子体压力和电离度

4 结 论

本文试验研究了万瓦级光纤激光焊接过程中深熔小孔内外等离子体的特征. 结果显示: 孔内等离子体并未充满小孔, 而是随机不均匀地分布在不同孔深处; 孔外等离子体尺寸远小于金属蒸气团, 光纤激光焊接只有少部分金属蒸气被电离. 通过比较孔内外光谱谱线分布特征, 并对比文献中 CO_2 激光焊接时的等离子体光谱可知, 光纤激光致等离子体辐射出的谱线明显少于 CO_2 激光致等离子体辐

射出的谱线. 进一步研究计算得到光纤激光致等离子体的电子温度、电子密度、电离度及压力, 虽然光纤激光致等离子体处于弱电离状态, 但是由于光纤激光致金属蒸气粒子密度较高, 从而使得等离子体电子密度及等离子体瞬态压力处于较高水平. 万瓦级光纤激光深熔焊接过程中的蒸气特征与焊接过程及小孔行为的关系有待进一步深入研究.

参考文献

- [1] Tang X H, Zhu H H, Zhu G F, Li S M 2000 *China Mech. Eng.* **11** 741 (in Chinese) [唐霞辉, 朱海红, 朱国富, 李适民 2000 中国机械工程 **11** 741]
- [2] Su Y D 2000 *China Mech. Eng.* **11** 1389 (in Chinese) [苏彦东 2000 中国机械工程 **11** 1389]
- [3] Zhang Y, Chen G Y, Li L J 2008 *Manuf. Technol. Machine Tool* **3** 98 (in Chinese) [张屹, 陈根余, 李力钧 2008 制造技术与机床 **3** 98]
- [4] Zhao Q, Wu Q B, Wang W 2006 *Infrared Laser Eng.* **35**(S3) 70 (in Chinese) [赵强, 吴清彬, 王伟 2006 红外与激光工程 **35**(S3) 70]
- [5] Zhang Y, Li L J, Zhang G 2005 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38** 703
- [6] Greses J, Hilton P A, Barlow C Y, Steen W M 2003 *Proceedings International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics* (Orlando: Laser Institute of America) p546
- [7] Kawahito Y, Matsumoto N, Mizutani M, Katayama S 2008 *Sci. Technol. Weld. Joining* **13** 744
- [8] Kulish M, Fertman A, Golubev A, Tauschwitz A, Turtikov V 2011 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 2294
- [9] Bedenko D V, Kovalev O B, Krivtsun I V 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 105501
- [10] Fuerschbach P W, Norris J T, He X, DebRoy T 2003 *Understanding Metal Vaporization from Laser Welding* (Albuquerque: Sandia National Laboratories) p69
- [11] Griem H R 1964 *Plasma Spectroscopy* (New York: McGraw-Hill) p580
- [12] Lacroix D, Jeandel G, Boudot C 1997 *J. Appl. Phys.* **81** 6599
- [13] Ribic B, Burgardt P, DebRoy T 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 083301
- [14] Konjević N, Dimitrijević M S, Wiese W L 1984 *J. Phys. Chem. Ref. Data* **13** 619
- [15] Jin X Z 2002 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: Hunan University) (in Chinese) [金湘中 2002 博士学位论文 (长沙: 湖南大学)]
- [16] Sibillano T, Rizzi D, Ancona A, Saludes-Rodil S, Nieto J R, Chmelíčková H, Šebestová H 2012 *J. Mater. Process. Technol.* **212** 910
- [17] Rizzi D, Sibillano T, Calabrese P P, Ancona A, Lugará P M 2011 *Opt. Laser Eng.* **49** 892
- [18] National Institute of Standards and Technology 2013 *Atomic Spectra Database Lines Form* (Gaithersberg: National Institute of Standards and Technology)
- [19] Lu J Y, Wang J, Ma Y G, Chen B 2004 *Opt. Precis. Eng.* **12** 550 (in Chinese) [鲁建业, 王军, 马玉刚, 陈波 2004 光学精密工程 **12** 550]
- [20] Li S X, Bai Z C, Huang Z, Zhang X, Qin S J, Mao W X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 115201 (in Chinese) [李世雄, 白忠臣, 黄政, 张欣, 秦水介, 毛文雪 2012 物理学报 **61** 115201]
- [21] Wang Y N, Liu Y, Zheng S, Lin G Q 2012 *Chin. Phys. B* **21** 075202

Plasma inside and outside keyhole during 10 kW level fiber laser welding*

Li Shi-Chun Chen Gen-Yu[†] Zhou Cong Chen Xiao-Feng Zhou Yu

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

(Received 9 December 2013; revised manuscript received 28 January 2014)

Abstract

In order to understand in depth plasma behavior during ultra-high power fiber laser deep penetration welding, the plasma inside and outside the keyhole is observed, and the spectrum of fiber laser-induced plasma is measured and analyzed. Based on the measured data of plasma, the electron temperature and electron density, ionization degree and pressure are calculated, and the characteristics of plasma parameters at different values of keyhole depth and outside the keyhole are investigated. The results indicate that the distribution of plasma inside the keyhole is uneven, and the vapor plume is much bigger outside the keyhole. The spectrum of plasma show that the fiber laser-induced plasma is weakly ionized and radiates a few spectral lines. The further calculation results also confirm that the plasma induced by fiber laser is in a weakly ionized state. However, the electron density of plasma still stays in a high level, and the transient pressure of plasma is up to hundreds of times as large as atmospheric pressure.

Keywords: fiber laser, deep penetration welding, plasma, pressure

PACS: 42.62.-b, 42.55.Wd, 52.38.-r

DOI: [10.7498/aps.63.104212](https://doi.org/10.7498/aps.63.104212)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51175165) and the Special Foundation of National Science and Technology Major Program of China (Grant No. 2013ZX04001131).

[†] Corresponding author. E-mail: hdgychen@163.com