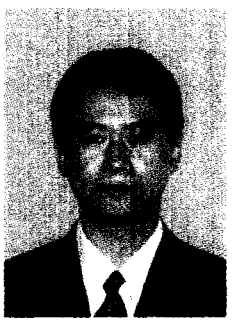
第31卷 第1期 焊 接 学 报 Vol. 31 No. 1
2010年1月 TRANSACTIONS OF THE CHINA WELDING INSTITUTION January 2010

激光辅助引燃TIG电弧机理分析

夏 源， 宋永伦， 冉国伟， 石里男
（北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院，北京 100124）



夏 源

摘 要：采用1 000 W半导体激光器实现了激光辅助引燃TIG电弧，并运用发射光谱分析方法观测了电弧引燃过程中不同时刻的光谱信息，同时运用Stark展宽法得到了电子密度在各瞬态的特征值，为研究激光辅助引弧的物理过程提供了科学的依据. 结果表明，在电弧引燃过程中，不同元素贡献电子的程度明显不同，在起弧初期，是由金属元素发生电离贡献电子，随着时间的递增，气体成分贡献电子能力逐渐增强，并由于电极间电场的存在，高温气体很快形成了串级电离而使电弧建立.

关键词：激光；TIG电弧；引弧；光谱诊断；机理
中图分类号：TG456.7 **文献标识码**：A **文章编号**：0253-360X(2010)01-0009-03

0 序 言

TIG焊是一种以钨极或钨的合金材料做电极，在惰性气体保护下进行的焊接. 引弧、焊接和收弧构成了TIG焊过程的三个环节. 引弧的成功与否不但会影响焊接过程的效率与质量，尤其是在自动化条件下，还直接影响到焊接过程能否顺利进行[1]. 好的引弧性能可以大大降低焊接成本、提高焊接质量. 因此，引弧作为焊接电弧的起始，一直得到工业界和学术界的关注[2,3]. 国内外很多学者提出了一些新的办法来提高引弧的性能，如采用激光来实现TIG引弧.

试验采用激光光束照射，来实现TIG电弧的引燃. 对引弧过程的观测与分析，一是有益于深化对电弧的建立条件及其物理特征的认识；二是在于探讨外部能量参与并建立电弧放电的可能性和可行性. 同时利用发射光谱分析方法观测了电弧引燃过程各时刻电子密度变化的瞬态特征，为实现激光辅助引弧提供了理论和试验的依据.

1 试验装置与条件

1.1 试验系统

试验采用WSM—160P型脉冲直流TIG氩弧焊机，工作时脉冲峰值电流为60 A. 空载电压为78 V. 保护气体为普莱克斯公司生产的氩氢混合气体（99%氩，1%氢），氢作为电子密度的诊断元素. 气体流量为15 L/min. 阴极为铈钨极，直径为1 mm，其尖角约为60°；工件采用2 mm厚铝合金板，电极到工件距离为2 mm. 所采用的半导体激光器的功率为1 000 W，波长在808~980 nm之间. 激光通过聚焦装置后，直径为0.3 mm. 激光束倾斜角为45°；焊枪倾斜角为30°. 试验中关闭了焊机自带的高频引弧系统.

工作所建立的发射光谱诊断系统的主要装置是ACTON公司的SpectrPro2750i型光谱仪和Princeton仪器公司的增强型CCD接收器件，并配有双透镜装置、电参数采集器、同步触发器以及用于过程监测的高速示波器等. 该系统可以捕捉瞬态光谱信号，最短曝光时间为25 ns. 观测示意图如图1所示.

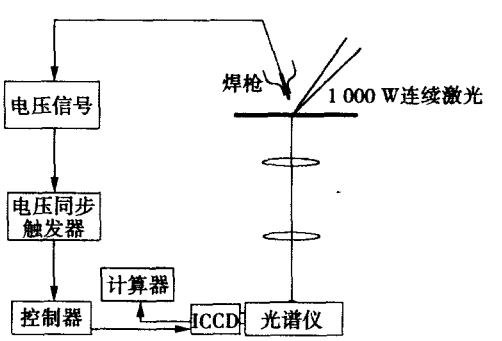


图1 激光辅助引弧过程观测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser-assisted TIG arc ignition

收稿日期：2009-09-21
基金项目：国家自然科学基金资助项目（50375005）

1.2 试验方法

研究激光的引弧过程，特别是对起弧过程的物理量进行时间观测，确定光谱同步信息是至关重要的. 这就要求光谱采集系统根据电弧电信号同步采集. 因此设计出触发电路，根据引弧瞬间电压下降沿产生触发信号，触发光谱仪对引弧不同时刻的光谱信息进行瞬态采样.

在试验中，为避免由于电压的抖动带来的误触发，采用高速示波器检测拍摄过程的电信号.

2 试验结果

2.1 激光引燃电弧不同时刻的光谱信息

引弧过程是实现气体热电离的一个过渡过程. 由于焊接电弧电极的特点，能够观测到在电弧点燃过程的不同时刻，由不同元素参与对电子的贡献. 表现在光谱信息上，就会出现相应元素的特征谱线.

图2是引弧前期当激光照射铝合金板时产生的金属等离子体的光谱特征.

图3是引弧后期金属和气体两种等离子体并存的光谱特征.

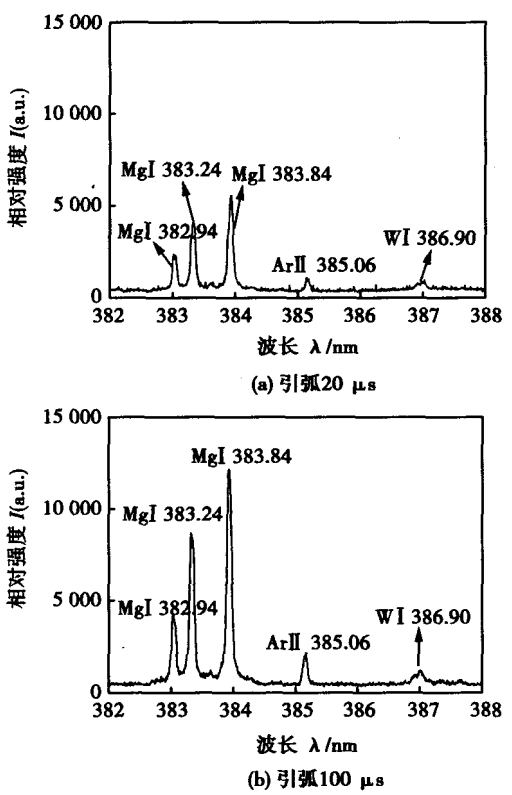


图2 起弧前期金属等离子体光谱特征

Fig. 2 Spectral characteristics of metal plasma in former period of arc ignition

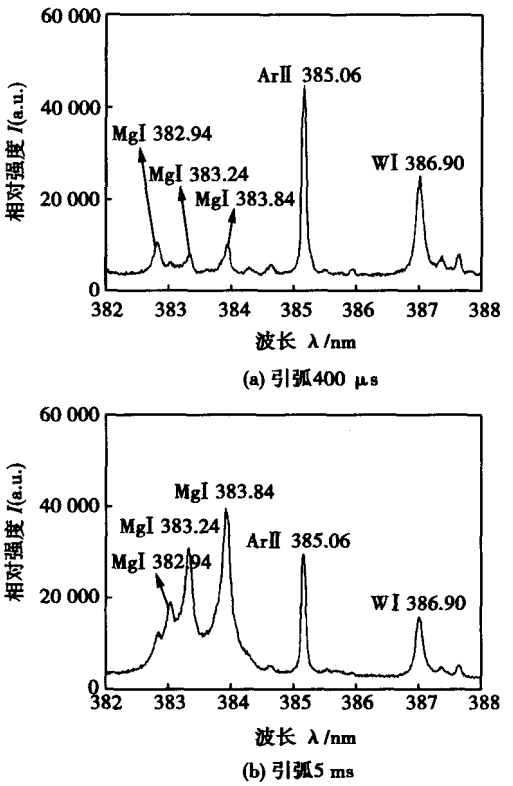


图3 起弧后期两种等离子体并存光谱特征

Fig. 3 Spectral characteristics of coexistence of two kinds of plasma in later period of arc ignition

2.2 激光引燃TIG电弧不同时刻电子密度观测

在试验中，利用Hα谱线Stark展宽法得到引弧过程各时刻的电子密度. 该方法对电子密度测量的有效范围达 $10^{20} \sim 10^{23}\,m^{-3}$[4,5]. Griem等人[4]用量子理论计算氢的斯塔克展宽效应产生的谱线轮廓半高全宽 $\Delta\lambda_{1/2}$ 与电子密度 N_e 的关系，即

$$\Delta\lambda_{1/2} = C(N_e, T_e) N_e^{2/3} \qquad (1)$$

式中：系数 $C(N_e, T_e)$ 可根据文中试验条件在文献[4]中查得. 实际测得的谱线展宽除了斯塔克展宽(Stark)之外，还包括了多普勒(Doppler)展宽、仪器展宽等其它的谱线展宽效应. 所以，实际测得谱线展宽后，在后续的电子密度计算中应扣除这两类影响较大的展宽值而对 $\Delta\lambda_{1/2}$ 作出修正. 分别拍摄起弧阶段0.02～20 ms过程11个时刻的Hα谱线，整理后如图4所示，根据上述方法得到的电子密度曲线如图5所示.

在起弧开始初期20 μs时刻，电子密度为 $0.67 \times 10^{22}\,m^{-3}$，100 μs时达到 $1.42 \times 10^{22}\,m^{-3}$，而在400 μs时，达到 $5.93 \times 10^{22}\,m^{-3}$，已经接近起弧稳定后的电子密度 $4.02 \times 10^{22}\,m^{-3}$，在1 ms时刻达到最大值为 $7.52 \times 10^{22}\,m^{-3}$. 随后开始逐步减小，最终在20 ms后达到稳定值. 在整个起弧过程中，两极空间

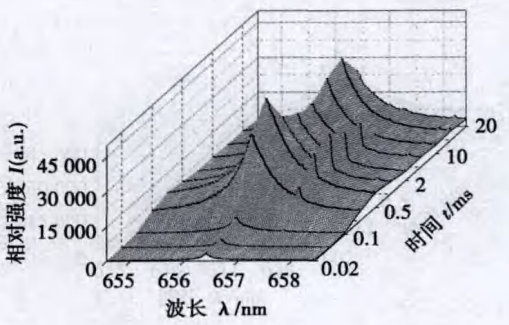


图 4　起弧过程的 Hα 谱线

Fig. 4　Hα spectral line in process of arc ignition

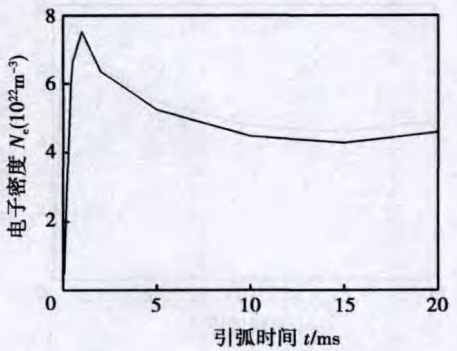


图 5　起弧过程电子密度变化曲线

Fig. 5　Variation diagram of electron density in process of arc ignition

等离子体的电子密度在开始的 1 ms 内成几何级数增长；即在初始 400 μs 内速率（dN_e/dt）为 $1.5\times10^{26}m^{-3}/s$，随后的 400 ~ 500 μs 内速率为 $7.1\times10^{25}m^{-3}/s$，在 0.5 ~ 1 ms，速率为 $1.8\times10^{25}m^{-3}/s$.

对观测结果进行统计处理与拟合得到电子密度随引弧时间变化的公式为

$$N_e = -8.33\exp(-t/0.324) + 8.33 \qquad (2)$$

式中：N_e 为电子密度（10^{22} m^{-3}）；t 为引弧时间（ms）.

3　分析与讨论

3.1　金属等离子体的形成机理

当功率密度超过 10^6 W/cm² 的激光束辐照在金属工件上，在金属表面形成强烈的汽化而产生金属蒸气. 由于金属蒸气是单原子分子，电离势能较低，例如 Al 原子电离势能为 6 eV，易在电极空间产生自由电子. 自由电子对激光能量的吸收机制主要是逆韧致吸收，即为处于粒子库仑场中的自由电子吸收激光能量，加速运动或者改变运动方向，并通过碰撞把激光能量转移给原子和离子，同时使电子密度雪崩式增长，从而在金属表面形成由激光激发的金属等离子体.

3.2　气体等离子体的形成机理

在激光产生的金属等离子体作用下，电子间的碰撞也导致保护气体原子的电离，并吸收部分激光能量，体积膨胀，发生光学击穿. 气体发生光学击穿时主要机制是多光子吸收和电子崩过程. 保护气体单纯的光学击穿所需要的激光功率密度阈值大约为 10^9 ~ 10^{12} W/cm²，比试验中激光的功率密度要高 2 ~ 3 个数量级. 因此，在两电极之间难以发生由激光束作用于保护气体的光学击穿.

形成气体等离子体的方式还有因粒子间碰撞产生的热电离和空载电压下的场致电离等. 如气体温度升高时，部分粒子由于碰撞运动而发生的电离；电子在电场中被加速后撞击中性粒子，而使中性粒子电离.

3.3　激光辅助引弧机理分析

在激光辅助引弧过程的光谱图中可以看到，在如图 2a，b 的开始时刻，主要以金属谱线为主，Ar Ⅱ 谱线很弱，因而此时金属等离子体占主导作用. 而在图 3a，b 中，Ar Ⅱ 谱线逐渐增强，已经超过金属谱线，表明此时气体等离子体已成为主导成分，此时形成金属等离子体与气体等离子体共存的二元等离子体结构. 从电子密度的特征来看，起弧开始时刻电子密度很小，此时自由电子主要由激光辐射激发的金属蒸气提供，并同时和保护气体原子形成碰撞电离，表现在光谱信息上，产生相应的 ArI 和 ArII 谱线.

保护气体温度低，电离势能高，发生光学击穿难度较大. 保护气体的种类对激光引弧过程有着重要的影响. 主要包括以下方面：一是保护气体原子的导热系数及其质量. 如质量轻的氦气向周边区域扩散速度快，所带走的热损失比氩气较大；二是对于氢气等双原子气体分子，其在电离前先由分子分解为原子，分子的分解时吸热反应，需要从能量上予以补偿；三是各种气体（原子或分子）的电离能不一样，电离能大的保护气体吸收的能量更多. 因而直接影响电弧等离子体中的电场强度[6,7].

综上所述，在激光的辅助引弧过程，首先借助激光在金属表面激发的金属蒸气而产生的自由电子，形成了金属等离子体；另一方面，自由电子将能量传递给保护气体，使保护气体温度升高. 同时，由于电极间电场的存在，高温气体很快形成了串级电离，并发生自持放电，击穿保护气体而使电弧建立[8].

[下转第 16 页]

钢焊接接头的硬度分布，结果表明焊接接头中熔合线附近硬度值最高，焊缝硬度高于母材硬度，从熔合线到母材硬度逐渐降低，并逐渐接近母材硬度. 焊接接头各处的硬度值都小于酸性介质中管线钢的硬度极限值250 HV.

(2) 采用楔形张开加载(WOL)试样，测试了X56，X65管线钢不同焊接工艺下焊接接头的焊缝金属和热影响区在H_2S介质中的抗应力腐蚀性能，试验结果表明，全部平行试样都发生了一定裂纹扩展，但扩展量不大，说明所加初始载荷恰好略高于材料本身K_{ISCC}，K随裂纹的扩展而下降，当裂纹发生一定扩展量后，K达到临界值(即K_{ISCC})，裂纹不再扩展.

(3) 研究中的X56钢和X65钢焊接接头，热影响区的抗H_2S应力腐蚀性能略强于焊缝金属，而热影线区和焊缝金属的抗H_2S应力腐蚀性能均略低于文献中介绍的母材性能，认为这是受焊缝金属和热影响区粗晶区的晶粒粗化、焊接缺陷、焊接残余应力和焊缝的高匹配等因素的影响所致.

参考文献：

[1] 杨祖佩. 关于管道钢的应力腐蚀开裂问题[J]. 管道技术与设备，1999(5)：12-13，19.
Yang Zupei. Several problems about stress corrosion cracking of pipeline steels[J]. Pipe Technology and Equipment, 1999(5): 12-13,19.

[2] Pourbaix M. Applications of electrochemistry in corrosion science and in practice[J]. Corrosion Science, 1974, 14(1): 121-125.

[3] 米秋占. 输气管道的硫化物应力腐蚀(SCC)问题[J]. 焊管，2000，23(5)：6-9.
Mi Zhanqiu. Sulfide stress corrosion (SCC) of gas pipe-lines[J]. Welded Pipe and Tube, 2000, 23(5): 6-9.

[4] NACE MR0175/ISO 15156-1. Petroleum and natural gas industries-materials for use in H_2S-containing Environments in oil and gas production: Part 1, Part 2[S]. NACE International, Houston, 2005.

[5] NACE TM 0177-2005. Laboratory testing of metals for resistance to sulfide stress cracking and stress corrosion cracking in H_2S environments[S]. NACE International, Houston, 2005.

[6] 孙新阁，霍立兴，张玉凤. 恒位移加载条件下X65管线钢H_2S应力腐蚀研究[J]. 腐蚀科学与防护技术，2006，18(3)：169-172.
Sun Xinge, Huo Lixing, Zhang Yufeng. H_2S induced stress corrosion for X65 pipe-line steel under loading with constant displacement[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2006, 18(3): 169-172.

作者简介： 徐连勇，男，1975年出生，博士，讲师. 主要从事焊接结构强度与断裂、电子封装与可靠性及热喷涂层界面断裂机理方面的研究. 发表论文20多篇.

Email： xulianyong@tju.edu.cn

[上接第11页]

4 结 论

(1) 观测到在激光辅助引弧过程中，在金属表面形成了金属等离子体，其自由电子将能量传递给保护气体粒子，使保护气体温度升高. 并由于电极间电场的存在，高温气体很快形成了串级电离而使电弧建立.

(2) 光谱观测证实了激光辅助引弧过程中电子的雪崩式增长和保护气体粒子逐步被激发的物理过程，为激光辅助引弧机理的认识提供了科学依据.

(3) 采用激光辐射实现TIG引弧. 与传统的TIG引弧方法相比，采用激光引弧可以避免高频引弧时电磁干扰的危害和接触引弧的缺点. 随着激光装置的进一步普及，能够发展成为一种新的引燃电弧的方法.

参考文献：

[1] 杨春利，林三宝. 电弧焊基础[M]，哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2003.

[2] 樱井茂行，高野悠敬. 由激光感生电弧的方法以及用此方法进行的电弧感生焊接与设备[P]. 专利号：CN 1296433A，2001.

[3] Tsukamoto M, Murai K. Pulsed laser focusing for triggering arc discharge in an arc welding system[J]. Welding International, 2006, 20(2): 106-110.

[4] Griem H R. Plasma spectroscopy[M]. New York: McGraw-hill, 1964.

[5] Griem H R. Spectral line broadening by plasmas[M]. NY: Academic, 1974.

[6] Reiche J, Konemann F, Mende W, *et al*. Diagnostics of discharge modes of a free-burning low-current argon arc[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 34 (21): 3177-3184.

[7] Lewis G K, Dixon R D. Effects of laser generated plasmas of laser welds[J]. Welding Journal, 1985, 64(2): 49-54.

[8] 安藤弘平，长谷川光雄. 焊接电弧现象[M]. 施雨湘译，北京：机械工业出版社，1985.

作者简介： 夏 源，男，1979年出生，博士研究生. 主要从事焊接电弧物理及焊接质量控制方面的研究. 发表论文4篇.

Email： xiay@emails.bjut.edu.cn