

文章编号: 0258-7025(2010)07-1873-06

激光等离子体引燃 TIG 电弧的试验研究

雷正龙 陈彦宾

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 针对钨极氩弧焊(TIG)电弧高频引弧存在易破坏其周围设备、危害人体健康等问题,提出了采用激光等离子体引燃 TIG 电弧的新方法。以峰值时间为 10 ms 的 CO₂ 脉冲激光进行 TIG 电弧的引弧试验,并采用高速摄像观察了激光等离子体引燃 TIG 电弧过程中的等离子体形态。试验结果表明,激光等离子体的形态和大小是引弧成功与否的关键因数之一,只有当激光等离子体接触到钨极导致电极与工件之间的间隙被导通产生电子发射并形成自持放电时才能引燃电弧。在此基础上,进一步研究了保护气体成分、工件材料、激光束离焦量以及保护气体流量等因数对激光等离子体引弧性能的影响规律。

关键词 激光技术;激光等离子体;钨极氩弧焊;引弧;等离子体形态

中图分类号 TG456.7 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103707.1873

Experimental Study of Laser Induced Plasma Triggering Arc Discharge in TIG Arc Welding

Lei Zhenglong Chen Yanbin

(State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The high-frequency method may possibly disrupt operation of peripheral equipments and is harm to human body in tungsten inert gas (TIG) arc welding process, so a new method that the laser induced plasma ignites the TIG arc is presented. In this paper, a pulsed CO₂ laser with pulsed width of 10 ms is used to ignite the TIG arc. A high-speed visual sensing system is established to detect the process of laser induced plasma triggering arc discharge and the shape of plasma. The experimental results show that the shape and volume of laser plasma are ones of the key factors. And only when the laser plasma contacts the tungsten rod, which therefore results in producing electron emission and forming self-maintaining discharge, the TIG arc can be ignited. Furthermore, the influence of main factors, such as shielding gas, workpiece materials, defocusing distance, and flow of shielding gas etc., on the shape, the volume and the performance for triggering arc discharge of laser plasma are studied.

Key words laser technique; laser induced plasma; tungsten inert gas; igniting; plasma shape

1 引 言

目前传统引燃钨极氩弧焊(TIG)方法主要分为接触引弧和非接触引弧两大类,其中接触引弧存在钨极烧损、粘钨极、工件表面擦伤和焊缝夹杂等一系列问题,通常应用于手工电弧焊或者对焊接质量要求不高的焊接过程;而非接触引弧主要包括高频引

弧和高压脉冲引弧两大类,其中高频引弧由于结构简单、成本低而得到了广泛应用和研究,特别是随着自动化程度的提高,高频引弧越来越普遍。然而在自动 TIG 焊接设备中,采用高频引弧有时也不能保证在期望的地方引燃。另外,高频容易击穿焊接电源和焊接回路中的其他电气元件,干扰无线电接收

收稿日期: 2009-10-13; 收到修改稿日期: 2009-11-12

基金项目: 哈尔滨工业大学优秀青年教师培养计划(HITQNJS. 2008. 020)和现代焊接生产技术国家重点实验室自主探索项目资助课题。

作者简介: 雷正龙(1977—),男,博士,讲师,主要从事激光-电弧复合焊接、特种材料激光焊接以及激光焊接质量检测等方面的研究。E-mail: leizhenglong@hit.edu.cn

或其他电子仪器的正常工作;并且在引弧过程中产生的高频通常对人体有非常大的危害^[1~5]。

从引弧机理来看,无论是接触式引弧还是非接触式引弧,都是通过强电场击穿电极与工件之间的间隙,瞬间产生大量能参与导电的带电粒子,而后由焊接电源提供后续电流来进行引燃电弧的^[6],因此,如何产生大量的带电粒子是引燃 TIG 电弧的前提。传统的引弧方法主要是靠阴极的电子发射以及气体间隙中中性粒子的电离来产生大量的带电粒子;而本文提出采用由激光束与工件作用产生的激光等离子体来引燃 TIG 电弧。目前,关于激光焊接等离子体研究主要集中在激光等离子体的抑制、等离子体电子密度的测量以及等离子体分布特征等方面^[7~10],而关于利用激光焊接等离子体中大量带电粒子来引燃电弧的研究还未见报道。因此,针对激光等离子体引燃 TIG 电弧,本文通过高速摄像分析了 CO₂ 激光等离子体引燃 TIG 电弧的引弧特性,并

研究了激光焊接保护气体成分、焊接工件、激光束离焦量和保护气体流量等对激光等离子体引燃 TIG 电弧的引弧规律。

2 试验条件

试验采用最大输出功率为 3.0 kW 的扩散冷却式 CO₂ 激光器(德国 ROFIN-SINAR)和松下 WX300 逆变氩弧焊机为主要设备,其激光波长为 10.6 μm,焦距为 190 mm,激光等离子体引燃 TIG 电弧的示意图及其试验装置如图 1 所示。试验过程中,采用一个单脉冲激光来引燃电弧,脉冲持续时间为 10 ms,激光入射角度 β 为 45°;焊接电极选用直径为 3.0 mm 的钨钨电极,钨极尖端被磨成了圆锥形,其夹角为 60°,保护气体流量 L 为 10 L/min 不变,钨极尖端与工件之间间隙 H 保持 3 mm 不变。引弧时,采用高速摄像监测引弧过程中钨极尖端等离子体形态的变化,采样频率为 1000 frame/s。

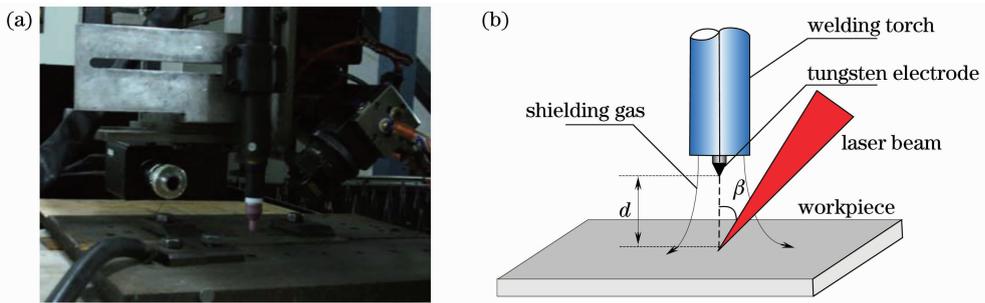


图 1 激光等离子体引燃 TIG 电弧试验。(a)装置图;(b)原理图

Fig. 1 Experimental setup (a) and principle (b) of igniting TIG arc by laser induced plasma

3 激光等离子体引燃 TIG 电弧的引弧特性

众所周知,电弧引燃过程实际上是由不稳定的非自持放电向稳定的自持放电转变的过程。对于传统的引弧方法而言,电弧的引燃过程包括如下几个阶段:1)自由电子进入钨极附近的强电场区,在电场作用下产生电子崩;2)当所加击穿电压较高时,在钨极附近的电子崩区会产生强烈的电离而形成等离子体,即所谓的流注;3)在外电压的作用下,流注不断向前扩展达到工件,导致整个间隙完全被击穿;4)由焊接电源提供的后续电流引燃电弧并维持电弧燃烧,实现自持放电。

与传统的引弧方法不同,激光等离子体引弧主要是通过高能激光束与物质(包括工件和环境气体)相互作用形成激光等离子体,为电弧放电提供大量的带电粒子,图 2 所示为等离子体引燃 TIG 电弧的

物理过程。从图 2 可以看出,激光等离子体的引弧过程包括如下几个阶段:1)高能量密度的激光束与工件作用形成金属蒸气,见图 2(a);2)金属蒸气以及保护气体的一部分起始自由电子通过吸收光子能量而被加速,直至有足够的能量来碰撞蒸气粒子和保护气体使其电离,此时电子密度便雪崩式地增长形成致密的等离子体,见图 2(b);3)在激光的进一步作用下,等离子体迅速长大并接触到钨极,见图 2(c)。由于等离子体是一种高度电离的气体,其中含有大量的带电粒子,并且其温度能够达到几千度甚至上万度,这就为钨极电子发射提供了有利条件;4)由于等离子体填充了电极之间的间隙,整个焊接电路被导通,钨极在等离子体以及外加电场的作用下产生电子发射并形成自持放电,引燃 TIG 电弧,见图 2(d);5)撤去激光源,焊接电源提供的后续电流进一步稳定并维持电弧燃烧。同时,根据最小

电压原理,电弧形态也有所收缩,见图 2(e)。从上面的分析结果也可以看出,要成功引燃 TIG 电弧必

须使激光等离子体接触到钨极,导致钨极与工件之间的间隙被导通产生电子发射并形成自持放电。

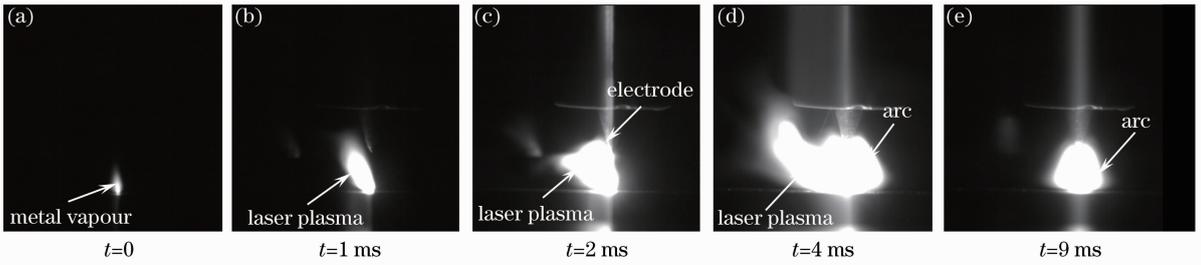


图 2 等离子体引燃 TIG 电弧成功的物理过程

Fig. 2 Physical processes of laser plasma triggering arc discharge successfully

图 3 显示了 TIG 电弧引燃失败时的激光等离子体形态。由于等离子体与钨极的夹角较大,等离子体在向上扩张时没有接触到钨极尖端,此时钨极

与工件之间的间隙不能被导通,不满足 TIG 的引燃条件,因此 TIG 电弧引燃失败。

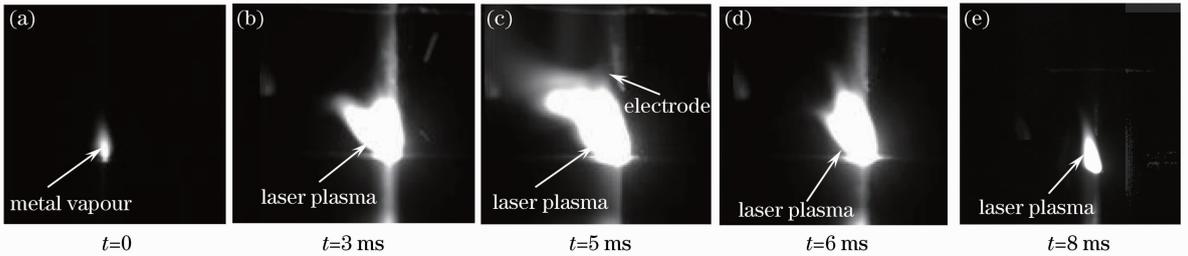


图 3 等离子体引燃 TIG 电弧失败过程

Fig. 3 Physical processes of laser plasma triggering arc discharge unsuccessfully

4 影响激光等离子体引燃 TIG 电弧的主要因素

从激光等离子体引燃 TIG 电弧的引弧特性来看,激光等离子体的形态和大小是引弧成功与否的主要影响因素之一。而工件材料、保护气体成分以及激光束离焦量又极大地影响着激光等离子体的形态和大小,因此,本文研究了工件材料、保护气体成分以及激光束离焦量等对激光等离子体引燃 TIG 电弧的影响规律。此外,为了评价激光等离子体引燃 TIG 电弧的引弧性能,引入了引弧成功率这个概念,即在保证其他参数不变的情况下,重复一定次数的引弧试验,将 TIG 电弧成功引燃的次数与总的引弧次数的比值作为激光等离子体在该条件下的引弧成功率。

4.1 保护气体成分的影响

图 4 和图 5 分别显示了不同保护气体时激光焊接等离子体引燃 TIG 电弧所需的最小激光功率及其激光功率为 1700 W 时的引弧成功率。从图 4 可以看出,采用 Ar 气和少量 He 气组成的混合保护气

体产生的激光焊接等离子体引燃电弧所需的激光功率最小,这也表明 Ar,He 混合保护气体的引弧特性最好,这一结果也从引弧成功率得到了证实,其引弧成功率达 90% 以上,如图 5 所示。出现这种现象的原因可能主要是:虽然 Ar 气的电离能较低,但是采用 Ar 保护气体焊接过程中产生的等离子体偏向激光入射处,导致等离子体与钨极尖端之间距离较远。而在 Ar 保护气体中加入少量 He 气时,激光等离子

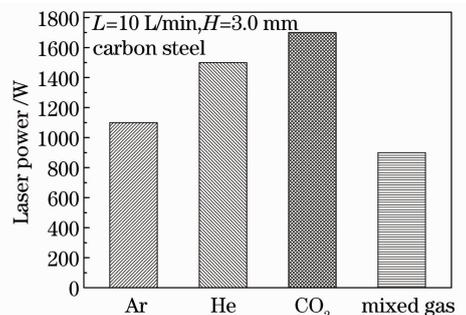


图 4 不同保护气体成分引弧所需的激光功率

Fig. 4 Minimum laser power that laser plasma ignited TIG arc in different shielding gases

体形态类似于单独两种气体时形态的叠加,激光等离子体在向入射方向偏离时,也向上扩展,有利于缩小激光等离子体与钨极之间的间距,增加了激光等离子体与钨极之间导通的几率,其不同保护气体时的等离子体形态如图 6 所示。

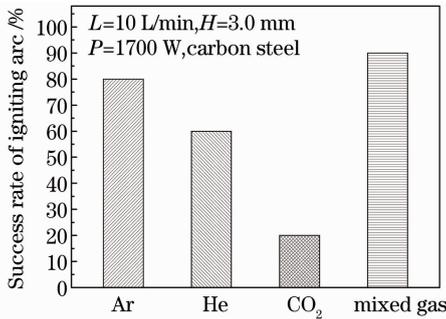


图 5 不同保护气体成分电弧引燃的成功率
Fig. 5 Success rate that laser plasma ignited TIG arc in different shielding gases

4.2 焊接材料的影响

图 7 和图 8 所示分别为不同工件材料时激光引

燃 TIG 电弧所需的最低激光功率及其相同激光功率下激光引弧的成功率。可以看出,选用钛合金作为工件时,引弧所需的激光功率最低,其引弧成功率也最高。当激光功率 P 为 1900 W 时,铝合金的引弧成功率在 20% 左右,等离子体的引弧性能最差;其余 3 种材料的引弧成功率都高于 70%,等离子体的引弧性能都比较好,其中选用钛合金作为工件材料时的引弧性能最好,此时激光等离子体引燃 TIG 电弧的成功率达到 100%。这主要是因为钛原子的电离能 (6.8 eV) 较低,金属蒸气只需要较少的能量输入就能发生电离;而且等离子体的形态非常好,钨极尖端与等离子体最高点之间的距离最近,所以此时激光等离子体的引弧性能最好,其激光焊接不同工件材料时的等离子体形态如图 9 所示。尽管 Al 元素的电离能 (6.0 eV) 最低,铝蒸气电离所需的能量也较少,但是由于铝板的反射率较高,导致激光能量的利用率偏低,因此同等条件下引燃 TIG 电弧所需的激光功率最高,等离子体的引弧性能最差。

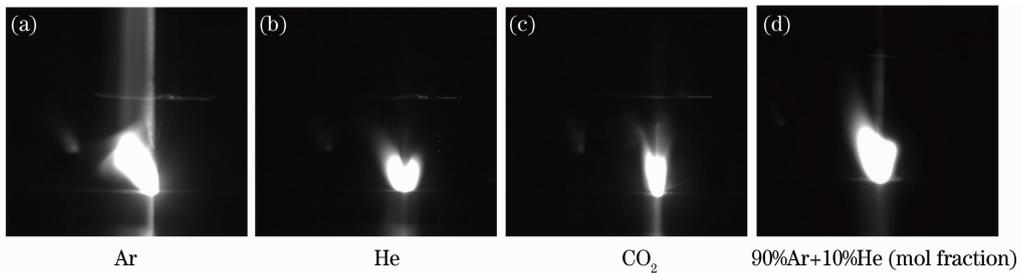


图 6 不同保护气体成分时的激光等离子体形态

Fig. 6 Plasma shape of laser welding in different shielding gases

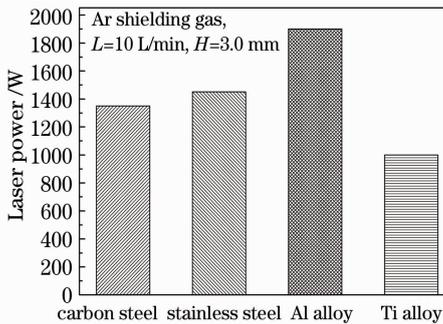


图 7 不同材料时引燃电弧所需的最小激光功率

Fig. 7 Minimum laser power that laser plasma ignited TIG arc in different workpiece materials

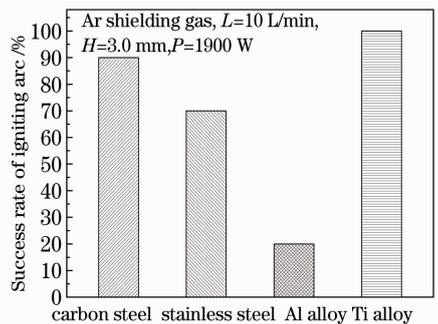


图 8 不同材料时电弧引燃的成功率

Fig. 8 Success rate that laser plasma ignited TIG arc in different workpiece materials

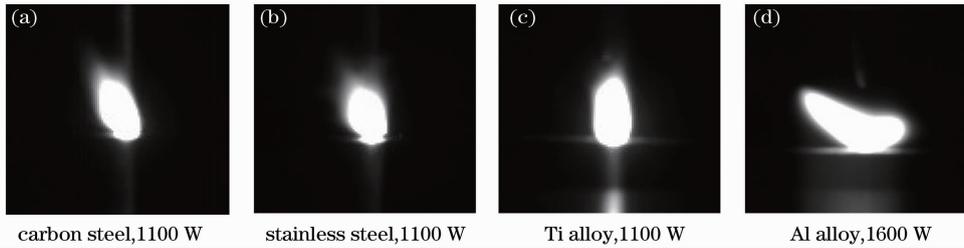


图 9 激光焊接不同工件材料时的等离子体形态

Fig. 9 Plasma shape of laser welding in different workpiece materials

4.3 激光离焦量的影响

图 10 和图 11 分别显示了离焦量对引燃电弧所需要的最低激光功率以及电弧引燃成功率的影响。可以看出,当激光束离焦量为 0 时,同样条件下引燃电弧所需要的激光功率最高;且在激光功率为 1400 W 时,TIG 电弧被引燃的成功率只有 30% 左右,此时等离子体的引弧性能最差。而采用一定离焦量的激光束进行焊接时,可以明显降低引弧所需要的激光功率,并极大提高引弧成功率。当激光束离焦量为 +2 mm 左右时,激光等离子体的引弧性

能达到最佳,其引弧所需最高激光功率只有 1100 W 左右,而此时引弧成功率可达到 90% 左右。这主要是因为采用适当的正离焦量进行焊接时,虽然激光束在工件表面是发散的,但是激光束焦点正好作用于工件上方的金属蒸气中,有利于金属蒸气电离产生大量的激光等离子体。同时,采用散焦的激光束照射工件时,等离子体倾斜角度变小,挺度有所增加,更加有利于 TIG 电弧的引燃,其不同离焦量时的激光等离子体形态如图 12 所示。

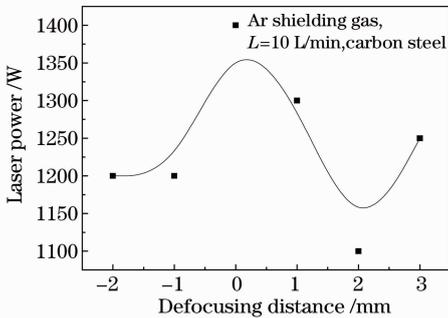


图 10 离焦量对引弧最低功率的影响

Fig. 10 Effect of defocusing distance on the minimum laser power that laser plasma ignited TIG arc

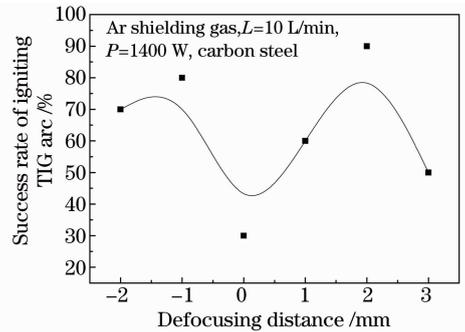


图 11 离焦量对引弧成功率的影响

Fig. 11 Effect of defocusing distance on the success rate that laser plasma ignited TIG arc

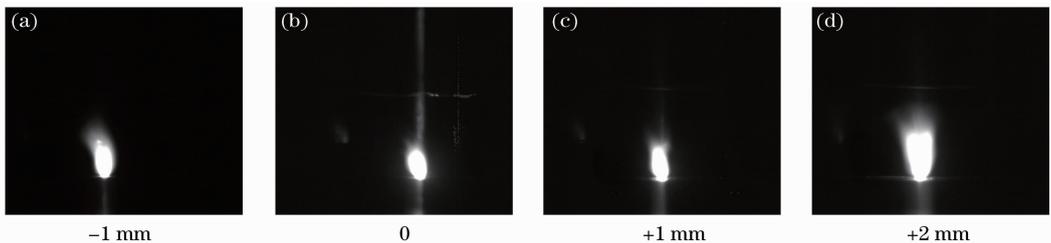


图 12 不同离焦量时的激光等离子体形态

Fig. 12 Plasma shape of laser welding in different defocusing distances

4.4 保护气体流量的影响

图 13 显示了保护气体流量对激光等离子体引燃 TIG 电弧所需的最低激光功率的影响。可以看出,随着保护气体流量的增加,引燃电弧所需的最小激光功率先降低后增加,当保护气体流量为 15 L/min 左右时引弧所需激光功率达到最小值,此时引弧成功率也

最高,达到 100% 左右,如图 14 所示。这表明在该保护气体流量范围内激光等离子体的引弧特性较好。当保护气体流量过大时,由于气体密度较大,此时等离子体的体积被压缩,直接影响了引弧性能,导致引燃电弧所需要的激光功率随着气流量的增加而急剧增加,其等离子体形态如图 15 所示。

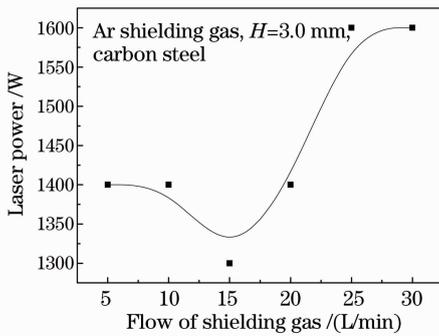


图 13 保护气体流量对引弧最低功率的影响

Fig. 13 Effect of flow of shielding gas on the minimum laser power that laser plasma ignited TIG arc

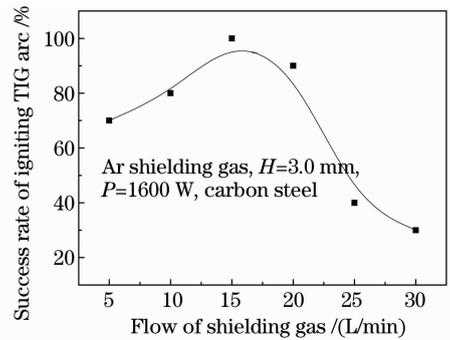


图 14 保护气体流量对引弧成功率的影响

Fig. 14 Effect of flow of shielding gas on the success rate that laser plasma ignited TIG arc

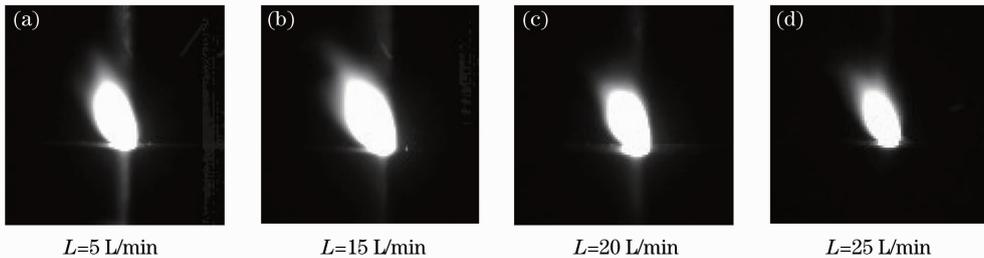


图 15 不同保护气体流量时的等离子体形态

Fig. 15 Plasma shape of laser welding in different flow of shielding gases

5 结 论

1) 激光等离子体成功引燃 TIG 电弧的必要条件是激光等离子体必须接触到钨极, 导致钨极与工件之间的间隙被导通产生电子发射并形成自持放电。

2) 激光等离子体的形态和大小是引弧成功与否的主要影响因素之一。当保护气体成分为氩氦混合气、工件材料为钛合金、激光束离焦量为 ± 2 mm 左右、保护气体流量为 15 L/min 左右时, 其产生的激光等离子体易与钨极导通, 引弧性能最佳。

参 考 文 献

- Li Dongqing, Zhang Zhongdian, Jiang Weiyan. TIG touch striking arc method with small current[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2001, **22**(5): 69~72
李冬青, 张忠典, 姜伟雁. 钨极氩弧焊的小电流接触引弧方法[J]. *焊接学报*, 2001, **22**(5): 69~72
- Li Liangyu, Liu Jingkui, Su Shujing. Development and current state of starting arc techniques for TIG welding[J]. *Electric Welding Machine*, 1995, (1): 23~25
李亮玉, 刘景奎, 苏淑靖. TIG 焊引弧技术的发展与现状[J]. *电焊机*, 1995, (1): 23~25
- A. Wolny, A. D. Stokes. Ignition of an electrical arc in a capillary: arc parameters in the initial period[J]. *IEE Proc. Part C*, 1994, **141**(5): 480~484
- N. Wakatsuki, Y. Akiba, Y. Yonezawa. Time-coordinated switching relay for arc discharge suppression [J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2005, **88**(8): 1635~1640

- Lin Dechao, Shi Yaowu. High frequency and touchable arc starting system TIG welding based on programmable logical controllers [J]. *Mechanical Science and Technology*, 1997, **16**(3): 515~518
林德超, 史耀武. PLC 控制的 TIG 焊高频接触引弧系统[J]. *机械科学与技术*, 1997, **16**(3): 515~518
- Guo Heping, Qian Yiyu, Fang Hongyuan. Mechanism of starting arc in hollow cathode vacuum arc welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2001, **22**(5): 79~82
郭和平, 钱乙余, 方洪渊. 空心阴极真空电弧焊接的引弧机理[J]. *焊接学报*, 2001, **22**(5): 79~82
- Tang Xiahui, Zhu Haihong, Zhu Guofu. Study of plasma control in high power CO₂ laser welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(2): 174~178
唐霞辉, 朱海红, 朱国富. 高功率 CO₂ 激光焊接等离子体控制实验研究[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(2): 174~178
- Chen Genyu, Zhao Zhi, Zhang Yi et al.. Data process method for measurement of plasma plume temperature field in deep penetration laser welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1778~1782
陈根余, 赵智, 张屹等. 激光焊接等离子体温度场测量及数据处理[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1778~1782
- Zhang Baohua, Liu Wenqing, Cui Zhifeng. Time and spatial evolution of the electron density in laser-induced Co plasmas[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1485~1490
张保华, 刘文清, 崔执凤. 激光诱导 Co 等离子体电子密度的时间空间演化特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1485~1490
- Liu Jinhe, Zhu Shigang. Image processing on high-speed photography of CO₂ laser welding plasma[J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(3): 342~344
刘金合, 朱石刚. CO₂ 激光焊接等离子体高速摄影照片图像处理[J]. *应用激光*, 2002, **22**(3): 342~344