

铝合金直流 TIG 激光诱导引弧机理的探讨

北京工业大学机电学院(100124) 夏 源 宋永伦 冉国伟 杨晓红

摘要 分析了目前传统 TIG 氩弧焊引弧技术的机理及其不足,提出了一种基于激光辐射的新型非接触引弧方法,并采用先进的等离子体发射光谱诊断技术对铝合金直流 TIG 激光引弧过程的物理现象进行诊断,对激光引弧过程的机理进行了探讨。研究结果表明,激光引弧将成为一种全新的引弧方式,在高质量焊接产品制造中有其独特的应用前景。

关键词: 激光引弧 机理 光谱诊断

中图分类号: TG456.7

0 前 言

TIG 氩弧焊在制造业中是一种重要的焊接工艺,它具有焊接过程稳定、焊缝质量高、电弧热量集中、功率密度大、热影响区小和焊件变形小等优点^[1]。引弧过程是 TIG 电弧焊的关键环节之一,尤其在自动化焊接中引弧性能的好坏直接影响到焊接过程能否顺利进行^[2]。因此,对引弧过程的机理、方法和新技术的探讨研究,加深对 TIG 氩弧焊引弧物理过程及其基本性质的了解是十分必要的。

针对传统的引弧问题,国内外学者提出了许多方法来提高引弧性能,如采用低电流接触引弧和激光辅助引弧等。与传统的 TIG 引弧方法相比,近年来研究较多的激光辅助引弧,例如在交流电压情况下由激光感生电弧的方法;利用 Nd:YAG 脉冲激光激发等离子体引燃 TIG 电弧的方法等,可以避免高频或高压脉冲所引发的危害,也可以避免接触引弧所带来的焊接缺陷^[3,4]。国内,哈尔滨工业大学对高功率脉冲 CO₂ 激光器产生激光离子体引燃 TIG 电弧的特性进行了研究^[5]。在以上方法中都是利用大功率激光与工件相互作用产生金属等离子体来接近钨极,从而使钨极满足自持放电条件来引燃电弧。

文中对直流 120 V 电源电压作用下利用小功率连续激光器来引燃 TIG 电弧的机理进行了探讨。与前面提到的其他激光辅助引燃电弧的方法相比,其特点是

具有激光功率小、激光能量利用充分及装置性价比好等优点,有利于推广应用。

为了认识激光辐照引弧方法的机理以及物理过程,利用光谱分析方法,即借助光谱仪将电弧辐射信号转换为光谱信号,再根据光谱强度与电弧等离子体物理参数的关系等规律来反映引弧过程的物理状态及其过程^[6]。从而能够更深入地理解利用激光辐照方法引燃 TIG 焊电弧的机理。

1 引弧机理

目前,研究出的引弧机理主要可归为三种方法:第一,电气击穿。即把电极上的端电压增加到足以引起辉光放电转移到电弧放电的阈值。此方法需要有高的引燃电压以及在低电压下为维持电弧稳态所需要的高电流;第二,接触拉弧。即简单地分离起始时处于接触中的电极,使局部的接触点上产生热电子发射条件,从而提供了能够维持电弧需要的电子;第三,由外部能量产生外部电离为基础的引弧^[7]。如文中提出的一种基于激光辐照效应的引弧方法,即采用一定功率的激光辐射电极和工件,形成电子发射条件,同时在外加强电场作用下,形成导电通道,完成引弧过程。

TIG 焊引弧的特点主要有^[8-10]:电极与工件几何形状的不对称,引弧时电场的不均匀;电极与工件间隙小;一般情况下在大气压或稍高于大气压条件下实现击穿;焊接间隙击穿后,由回路中的焊接电源提供后续电流以维持能量平衡,而后再进一步转换为电弧放电的过程。从引弧机理来看,电弧一般都是通过强电场

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能量来引燃。

TIG 焊引弧方式分为接触引弧和非接触引弧两大类,对比情况见表 1。

表 1 传统 TIG 焊引弧方式对比

特点	接触引弧	非接触引弧	
		高频引弧	高压脉冲引弧
优点	简单、方便	结构简单、引弧稳定、成本低廉	成功率高,引弧稳定
缺点	易烧损钨极、夹钨粘钨	存在电磁干扰,对人体与环境有害	有击穿电源的危险,存在电磁环境干扰

1.1 接触引弧机理

当钨极与工件接触形成短路时,焊接电源恒值输出短路电流,在接触处产生较大的电阻热,工件开始局部熔化。随后,电极与工件开始脱离,这个过程中,接触电阻开始逐渐增大,到脱离工件的瞬间增大到最大值,这时接触处温度迅速上升,进一步提高了钨极的温度,并使工件局部气化产生金属蒸气。故在钨电极和工件脱离时,加强了钨极的电子发射和空间气体的电离,脱离后钨极与工件之间快速建立强电场,同时钨极发射电子,在空间产生电子雪崩,引燃电弧。

1.2 非接触引弧机理

非接触引弧时,主要采用高频或高压脉冲等方法来产生火花放电,随即利用焊接电源提供后续电流,使电弧空间用火花放电很快过渡到电弧放电,从而完成引弧过程。引弧时,钨电极通常都作为热阴极,但在刚起弧时,阴极斑点温度尚未升高,不具备回路所要求的热电子发射能力,阴极斑点从表面存在氧化膜的位置产生。在高频高压作用下,高频的每一个脉冲电压会使阴极产生电子发射,在阴极附近形成电子层,下一个脉冲电压又会继续形成电子层,直至完全击穿电极间隙。使电弧空间用火花放电很快过渡到电弧放电,从而完成引弧过程。非接触引弧困难主要有两方面原因:一是钨极的逸出功高,并且引弧时钨极一般处于冷态;二是保护气体(氩气或氦气)的电离能比较高。

2 激光引弧系统

激光引弧试验系统的示意图如图 1 所示,在系统中,通过蓄电池组对 TIG 焊电弧提供电源。阴极为钨钨极,直径为 1 mm;工件采用 3 mm 厚铝合金板,电极到工件距离为 1 mm。蓄电池组的空载电压为 120 V,负载采用调节变阻器,电弧稳定燃烧时的工作电流为 5

A。保护气体采用普莱克斯公司生产的工业氩气,其流量为 7 L/min。激光功率为 200 W,波长为 800 nm,通过聚焦装置,半径为 0.2 mm 的激光聚焦到钨极尖端及工件处。光谱分析系统的主要装置由 ACTON 公司生产的 SpectrPro750i 型光谱仪和 Princeton 仪器公司生产的 PI-MAX 增强型 CCD 接收器件组成。

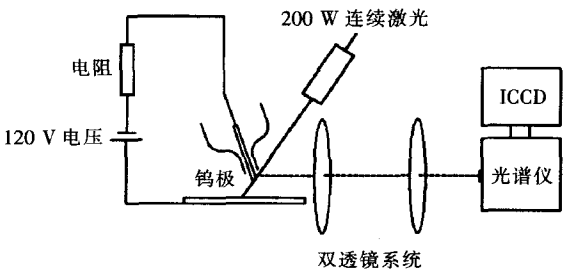


图 1 激光引弧系统示意图

3 试验结果

采用光谱诊断技术分析引弧瞬间和电弧稳定过程的光谱图,如图 2 和图 3 所示。

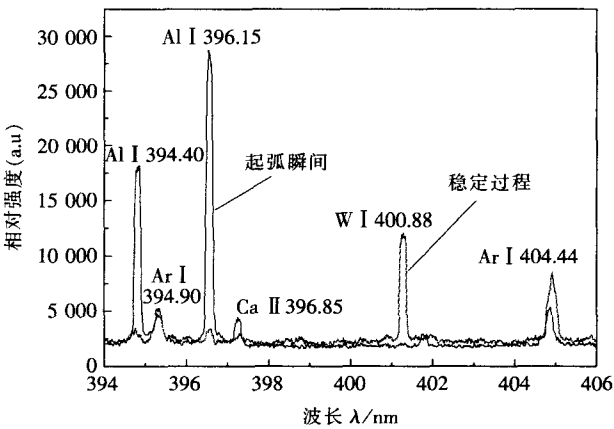


图 2 引弧瞬间与稳定电弧光谱图

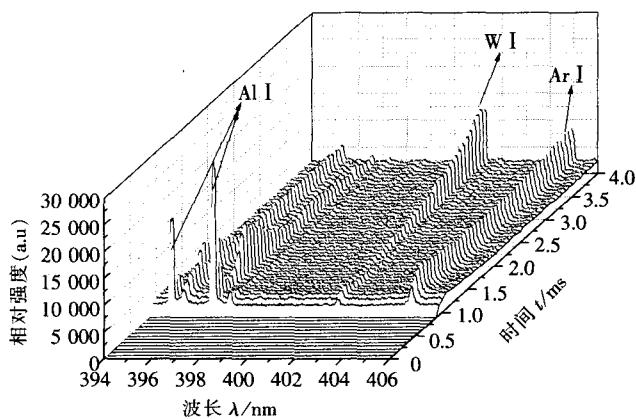


图3 引弧瞬间电弧时序光谱图

由图2可见,在激光起弧瞬间,有很强的AlI谱线,而当电弧稳定后,铝谱线消失,光谱图上出现强烈的WI谱线。这个过程中,钨极被激光加热,虽然具备热电子发射能力,但这时钨极与工件间隙内,并没有出现相应的W谱线,说明此时并不是由钨极发射电子。但与此同时能观测到强烈的Al谱线,由此可知由金属工件的阳极斑点产生电离,发射电子进入两极空间。在引弧的瞬间,电极与工件之间,是由金属等离子体和气体等离子体共存的二元等离子体结构。而在电弧稳定过程中,电弧工作电流仅为5 A,并不能形成熔池。此时,电弧空间不再有铝谱线存在,这时的导电机理主要是由钨极和保护气体氩原子参与电离维持电弧放电。

由图3可见,在起弧过程中,AlI线的强度逐渐降低,而WI线的强度却逐渐增加,可知铝板提供电子的能力越来越弱,而钨极提供电子的能力却逐渐增强;这个过程中,ArI线没有明显的变化。这也说明激光引弧过程与稳定过程是两种不同的导电机理。

4 激光引弧机理讨论

利用激光辐照氩保护气体下的钨阴极及铝合金板,使其两者间隙被击穿,由火花放电到电弧放电过渡。主要从三个方面初步探讨了激光引弧的机理。

4.1 光电子发射

当一种入射光辐射金属表面,每一光子能量 ε 为:

$$\varepsilon = h\nu \quad (1)$$

式中, h 为普朗克常量; ν 为频率。金属表面每一电子的逸出功 W_w 为:

$$W_w = eV_w \quad (2)$$

式中, e 为电子电荷电量; V_w 为逸出电压。只有当 $h\nu > eV_w$ 金属表面的自由电子可以得到差值动能逃逸出来。当电子逸出之际,伴随着它在金属内部发生碰撞要损失一些能量,故逸出电子的速度多半都低于 $h\nu$ 与 W_w 的差值。当增加入射光子能量时,仅仅逸出电子数成正比地增加,电子速度并不变化。故要增加逸出电子的速度,只能提高 $h\nu$,即通过提高入射光的频率 ν 来实现^[1]。因此,要使激光引弧能顺利进行,可以通过提高入射激光的频率,即用短波长的激光来实现引弧更为理想。

4.2 热电子发射

在强电场作用下,激光辐射到钨极尖端和铝合金工件,并与两电极表面发生相互作用,从而导致能量在阴极微体积中汇集,使其温度升高并具有热电子发射能力,使钨极尖端部位形成电子雪崩,再加上周边氩保护气体的击穿电离作用,从而在两极空间区域产生电弧等离子体。

由于铝合金的熔点、沸点比钨极低,因此在激光照射下,易形成金属蒸气,参与空间电离,并形成热电子发射。由此可见,在激光辐照引弧过程中,热电子发射起着重要的作用。

4.3 场致电子发射

产生场致电子发射所需的电场强度如式(3)^[11]:

$$E = \frac{\sqrt{2m\Phi^3}}{\hbar e} \quad (3)$$

式中, $\hbar$ 为约化普朗克常量; E 为外加电场强度; m 为电子质量; Φ 为逸出功; e 为电子电荷电量。由式(3)可以得到不同材料场致电子发射所对应的电场强度,如表2所示。

表2 材料的逸出功、电离势^[12]及场致发射电子的电场强度数据

材料或气体	逸出功或电离能 Φ/eV	场致发射电子的电场 强度阈值 $E'/(10^7 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1})$
钨	4.55	5
铈钨	2.70	2.3
氧化铝	3.90	4.03
氩气	15.8	32.90

在该试验中,正、负两极之间加载直流电压,且电压击穿也是由阴极微尖峰的加热和爆炸产生的,则局

部击穿电场强度 E 为:

$$E = \beta_E U/d \quad (4)$$

式中, β_E 为微尖峰电场的放大倍数; U 为正、负两极之间加载直流电压; d 为两极间隙距离。其电场分布示意图如图 4 所示^[1]。

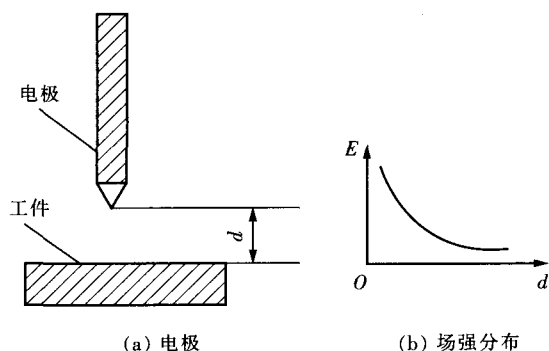


图 4 焊接电极及场强分布

由图 4 可知,尖端电极上的场强可以达到很高的值。因此,在直流电压作用下,当阴极表面上微尖峰产生的电场达到场致电子发射的电场强度阈值,即: $E = E'$ 才有可能产生场致电子发射。通过试验分析可知,当减小正、负两极间隙距离 d 时,阴极表面上微尖峰产生的电场会增大,因此更加有利于电子的发射。可见,场致电子的发射在激光辐照引弧过程中起着举足轻重的作用。

激光引弧过程电信号如图 5 所示。其中电压震荡的时刻应与阳极斑点发射的铝金属蒸气涨落有关;而电流波形的尖峰应认为是钨极具备热电子发射条件的开始时刻。进一步认识还需要做更多的观测试验。

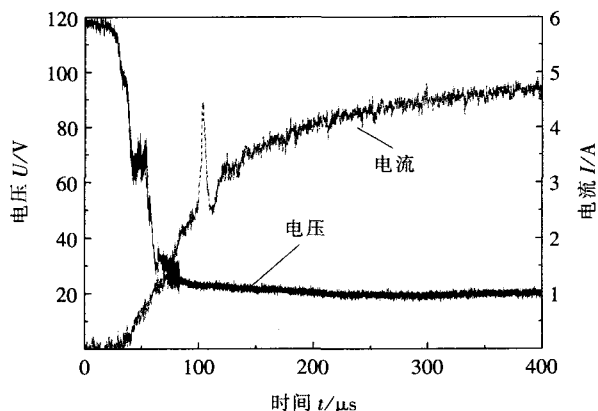


图 5 激光引弧过程的电信号图

5 结 论

(1) 采用光谱诊断技术可以揭示铝合金直流 TIG 激光引弧过程的机理。引弧瞬间,主要由铝板提供电子,然后钨极通过热电子发射补充整个电弧空间所需要的电子数密度。

(2) 铝合金直流 TIG 激光引弧过程的主要机理是两极吸收了光子辐射能量提升自身温度,并在电场作用下,形成场致电子发射和热电子发射能力,并引燃电弧。

(3) 激光引弧可以避免传统引弧方式的缺陷,将成为一种全新的引弧方式,在高质量焊接产品制造中有其独特的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 安藤弘平,长谷川光雄. 焊接电弧现象(增补版)[M]. 北京:机械工业出版社,1985. 35-50, 216-230.
- [2] 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. 85-86.
- [3] 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]. CN 1296433A, 2001.
- [4] Tsukamoto M, Murai K. Pulsed laser focusing for triggering arc discharge in an arc welding system[J]. Welding International, 2006, 20(2): 106-110.
- [5] 王 木. 激光等离子体引燃 TIG 电弧特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007. 1-10.
- [6] 胡坤平. 交流 TIG 电弧的过零现象及其特征[D]. 北京:北京工业大学,2008. 109-113.
- [7] 罗思 J R. 工业等离子体工程[M]. 北京:科学出版社,1998. 240-267.
- [8] 李亮玉,张广军,李莉群,等. 焊接电弧引弧机理的探讨[J]. 焊接学报. 1997, 18(4): 238-241.
- [9] 郭和平,钱乙余,方洪渊,等. 空心阴极真空电弧焊接的引弧机理[J]. 焊接学报, 2001, 22(10): 79-82.
- [10] 周玉生,张文明. 电弧焊[M]. 北京:机械工业出版社,1994. 132-155.
- [11] 米夏兹 Г А. 真空放电物理和高功率脉冲技术[M]. 北京:国防工业出版社,2007. 5-12.
- [12] 傅积和,孙玉林. 焊接数据资料手册[M]. 北京:机械工业出版社,1997. 129-13.

作者简介: 夏 源, 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。已发表论文 4 篇。