

# 激光-熔化极脉冲电弧复合焊接的双重导电机制

王 威 林尚扬 王旭友 徐 良 腾 彬 黄瑞生

(机械科学研究院哈尔滨焊接研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要** 对激光-电弧复合焊接的稳弧机理始终存在不同的观点。通过高速摄像机和光谱分析仪对比研究了激光与电弧复合前后电弧形态发生的变化。研究发现复合后电弧呈现一种全新的形态,具有两个独立的导电通道,这种现象被称为“双重导电机制”。这种机制对维持电弧稳定和保证焊缝成型良好具有非常重要的意义,正是激光-电弧复合焊接高速焊接过程中稳弧的关键所在。研究还发现“双重导电机制”的建立过程存在时间顺序,辅助导电通道首先是从激光小孔周围建立起来,然后逐渐扩展到整个电弧区域。各种焊接参数对“双重导电机制”也存在明显的影响。

**关键词** 激光技术;激光材料加工;激光-电弧复合焊接;等离子体;基础问题;熔化极气体保护焊

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0203001

## Double Electric Conduction Mechanism of Nd:YAG Laser-Pulse MAG Hybrid Welding

Wang Wei Lin Shangyang Wang Xuyou Xu Liang Teng Bin Huang Ruisheng

(Harbin Welding Institute, China Academy of Machinery Science & Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

**Abstract** Different ideas exist on arc stability mechanism of laser-arc hybrid welding process. With high-speed camera and spectrometer, contrast analysis and research are made between method active gas (MAG) arc welding and hybrid arc welding in this paper. The results show that hybrid arc takes on a new shape and has two electric conduction paths independently. This phenomenon is called "double electric conduction mechanism" of the laser-pulse MAG hybrid welding process. This mechanism plays a very important role in maintaining arc stability and getting good appearance of weld during high speed welding process. It is also shown that the establishment of double electric conduction channel exists time sequence. The additional electric conduction channel ignites originally from the laser keyhole and then extends gradually to the whole space of the arc. Welding parameters, including distance between laser and wire, arc voltage and welding speed, have obvious influence on the double electric conduction mechanism.

**Key words** laser technique; laser materials processing; laser-arc hybrid welding; plasma; foundational problems; gas metal arc welding

**OCIS codes** 140.3390; 350.5400; 350.3850

## 1 引 言

英国学者 Steen 于 20 世纪 70 年代末首先进行激光-电弧复合热源焊接方面的研究<sup>[1,2]</sup>,但受到当时激光器功率的限制,激光-电弧复合热源焊接技术展现的优势并不明显,没有得到广泛的重视。

近年来,随着激光器制造技术的不断发展,工业

可用的激光功率越来越大,CO<sub>2</sub> 气体激光器连续输出功率可达 50 kW,固体激光器的连续输出功率也可达 30 kW,激光-电弧复合热源焊接技术渐渐得到广泛的关注。英国、美国、德国、日本、韩国、俄罗斯和中国等都相继开展了大量的研究工作,并且成功地把激光-电弧复合热源焊接技术应用到造船、汽车

**收稿日期**: 2011-09-13; **收到修改稿日期**: 2011-10-31

**基金项目**: 科技部国际科技合作项目(2009DFB70280,2009DFR50170)资助课题。

**作者简介**: 王 威(1976—),男,博士研究生,高级工程师,主要从事激光-电弧复合热源焊接方面的研究。

E-mail: laserww@163.com

**导师简介**: 林尚扬(1932—),男,中国工程院院士,博士生导师,主要从事材料加工工程方面的研究。

E-mail: sylin2020@163.com

制造、高速铁路、管道焊接等领域中。

目前对激光-电弧复合热源焊接技术的研究多数集中在工艺研究和工程应用方面,对复合机理方面的研究相对较少,且对稳弧的机理看法存在着分歧<sup>[2~11]</sup>。本文主要研究在激光-脉冲熔化极气体保护焊(GMAW)电弧复合热源焊接过程中激光对电弧形态的影响。研究发现,复合焊接过程中电弧呈现一种全新的状态,具有两个导电通道,即“双重导电现象”,这对于稳定电弧非常有帮助。这种现象可用于解释激光对电弧的稳定机制,对深入研究激光-GMAW 电弧复合热源焊接机理有一定的帮助。

## 2 试验

### 2.1 试验条件

激光试验设备为额定功率为 2 kW 的连续氙灯抽运 Nd:YAG 固体激光器,输出波长为 1.06  $\mu\text{m}$  的连续激光,所用的激光输出聚焦透镜焦距为 200 mm,激光束焦斑直径为 0.6 mm。GMAW 焊接电源为 Fronius TPS5000 全数字化电源具有短路过渡模式和脉冲模式。焊接电弧形态由 Photron 公司生产的 FASTCAM-Ultima 512 32KC 高速摄像机拍摄获得,该摄像机的最高拍摄速度为 32000 frame/s,试验中的拍摄速度一般采用 4000 frame/s,此时最大分辨率为 512 pixel $\times$ 256 pixel。实验装置如图 1 所示。试验材料为低碳钢 Q235,试验板材的尺寸为 300 mm $\times$ 40 mm $\times$ 9 mm,焊丝材质 H08Mn2Si,焊丝直径为 1.2 mm,干伸长为 19 mm,保护气体比例为  $V_{\text{Ar}}/V_{\text{CO}_2}=95:5$ ,保护气体流量为 20 L/min。

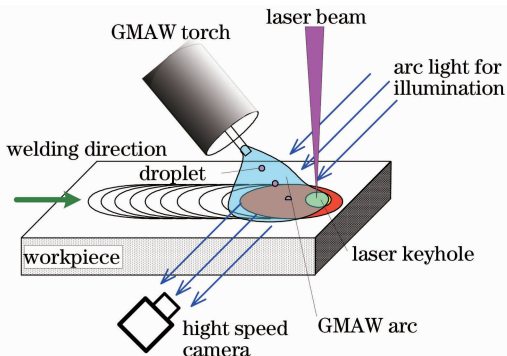


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic drawing of hybrid welding

### 2.2 激光-脉冲 MAG 复合电弧特征

#### 2.2.1 双重导电机制概念的引出

图 2 是单独脉冲活性气体保护电弧焊(MAG)和激光-脉冲 MAG 复合热源焊接两种焊接电弧在一个熔滴过渡周期内的瞬时形态对比图。平均焊接

电流为 160 A,平均电弧电压为 26.0 V,焊接速度为 1.0 m/min,光-丝间距为 2 mm,激光功率为 2000 W,激光垂直于工件表面,沿着焊接方向焊丝与激光轴线呈 15°夹角,激光在电弧前。

对比图 2(a),(b)可发现,在  $t=0.25\sim 1.75$  ms 之间两种电弧形态存在明显的不同。 $t=0.25$  ms 时单独脉冲 MAG 没有电弧(实际上存在微弱的脉冲基值电弧,但是由于背景光源掩盖了较弱的弧光,所以看不见脉冲基值电弧,同样也看不到脉冲峰值时电弧外围较弱部分,这样有助于观察电弧主体能量的分布情况,不会被电弧外围的虚弧误导),而激光-脉冲 MAG 却可以在激光小孔正上方观察到发光体。

随着时间的推移,发光体也不断变化,上端逐渐偏向焊丝端头,最终把焊丝端头和激光小孔连接起来,并能够在一段时间内保持连通状态。随后发光体又突然消失了,后续电弧燃烧过程两种电弧几乎一样,没有太大差异。

现在讨论发光体是什么。假设发光体是激光等离子体,那么只要加入激光就会一直看到激光等离子体,在实验过程中激光始终都以 2000 W 深熔焊方式与脉冲 MAG 电弧复合,所以激光等离子体始终能够被观察到。但在图 2(b)中  $t=0$  时的图像并没有发现激光等离子体产生的发光体,所以复合焊接过程出现的发光体不是激光等离子体发出的光。

假设发光体是电弧弧柱区散射的激光或者激光引起的各种粒子的光电离,那么该发光体只能够在激光的路径上产生,在没有激光辐射的区域就不会看到发光体,而观察图 2(b)中  $t=0.75\sim 1.75$  ms 之间的图像发现,发光体能够自由移动到激光辐射区域之外,所以这种假设也不成立。

现在只剩一种可能,即发光体与激光产生的铁金属蒸汽的电离和激发有关。

对比观察图 2(a),(b)发现,两图只是在激光小孔上方的发光体处有所不同,其余的 MAG 电弧形态基本相同,所以加入激光后的电弧形态和发光强度变化应该是由发光体的影响造成的。为了分析发光体的组成成分,对复合前后电弧的光谱进行了分析。

图 3 为分别在 Nd:YAG 激光焊、脉冲 MAG 焊和激光-脉冲 MAG 复合热源焊接三种焊接条件下,其发光等离子体辐射的光谱对比。图 3(a)是 Nd:YAG 激光的光谱分布,其辐射光的波长主要是介于 500~800 nm 间的连续辐射,除了在 1016 nm

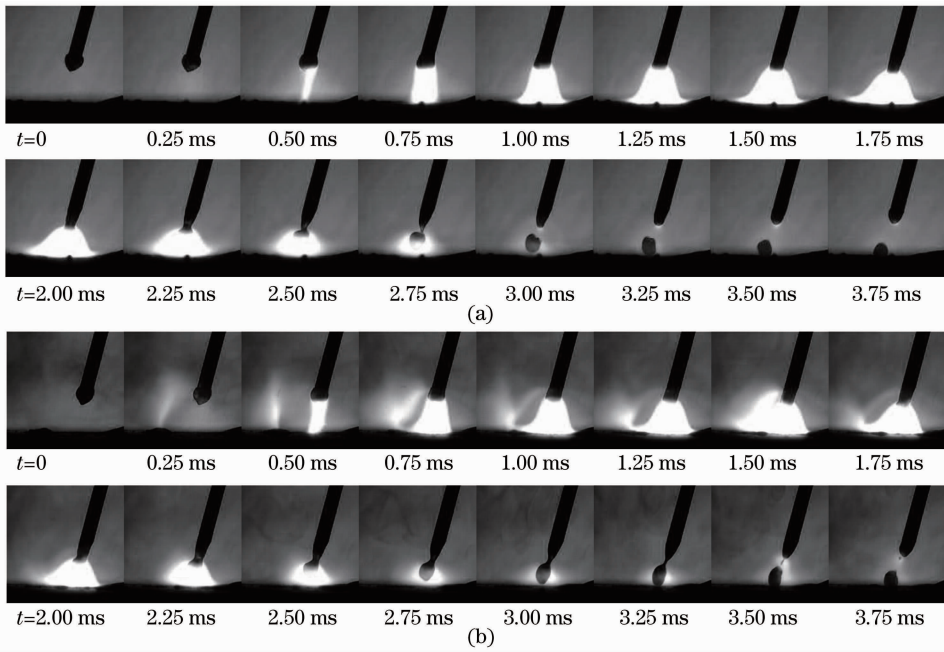


图 2 两种电弧形态对比。(a)脉冲 GMAW 电弧;(b)激光-脉冲 MAG 复合焊接电弧

Fig. 2 Arc shape comparison between GMAW and laser-MAG hybrid welding. (a) Arc shape of pulse GMAW; (b) arc shape of laser-pulse MAG hybrid welding

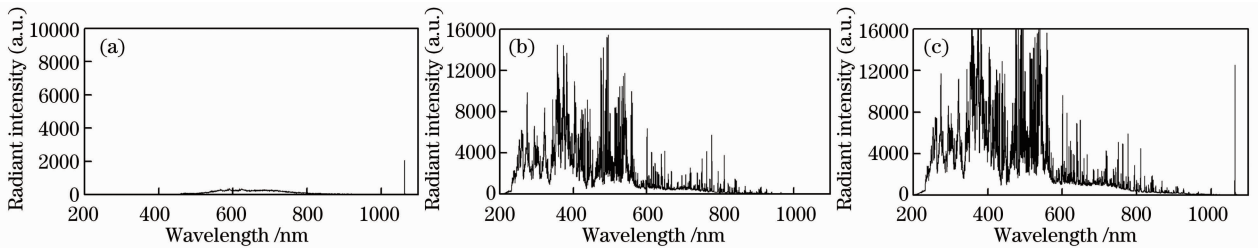


图 3 激光、MAG、复合焊三种等离子体光谱对比。(a)激光焊接等离子体光谱;(b) GMAW 电弧谱线; (c)激光-脉冲 MAG 复合焊接电弧谱线

Fig. 3 Spectrum comparison among laser welding, GMAW and hybrid welding. (a) Plasma spectrum of laser welding; (b) arc spectrum of GMAW; (c) arc spectrum of laser-pulse MAG welding

处由 Nd:YAG 激光散射造成的特征谱线外,没有发现明显的谱线辐射,体现为黑体辐射特征。从图中还可看出,单纯 Nd:YAG 激光产生的等离子体辐射强度非常弱,几乎检测不到,这也间接证明了图 2 中  $t=0.25$  ms 时一定强度背景光条件下看到的发光体不是激光等离子体。

图 3(b)为单独脉冲 MAG 电弧的等离子体辐射光谱,可看出电弧的辐射明显强于激光,在连续辐射的基础上存在大量谱线。谱线基本上由紫外区 (250~350 nm) 的 Fe I 和 Fe II 辐射、350~650 nm 间的 Fe I 辐射和 650~1100 nm 的 Ar I 辐射组成。由于脉冲 MAG 焊接过程中,电弧的正负极都为 Fe,且在高温电弧作用下强烈蒸发,造成电弧气氛中 Fe 浓度的很高,所以 350~650 nm 间的 Fe I 辐射明显高于 650~1100 nm 的 Ar I 辐射强度。

激光与脉冲 MAG 复合后的谱线分布如图 3(c)所示,谱线形状与单独 MAG 焊的辐射光谱相似,对比谱线分布,没有发现明显的新谱线产生。但其在紫外区(250~350 nm)的 Fe I、Fe II 辐射强度和可见光区 350~650 nm 间的 Fe I 辐射强度出现明显增强现象,这表明复合后的电弧具有更高的温度和 Fe 蒸汽浓度。

通过以上光谱和电弧图像的综合分析可知,图 2 中的发光体就是 Fe 金属蒸汽激发和电离后发出的光。而激光小孔里强烈蒸发、高速喷发出的 Fe 金属蒸汽中的 Fe 原子和 Fe 离子正是维持发光体的源泉。

图 4 是激光-脉冲 MAG 复合热源焊接电弧的动态图像与焊接电流电压对应图,焊接参数与图 2 相同。由图 4 可知,当脉冲 MAG 的电弧电压处于

脉冲峰值高电压阶段时(电弧电压曲线  $t=0.50\sim 2.25$  ms),就会在激光小孔上方与焊丝端头之间出现发光的铁蒸汽电离通道。而当电弧电压处于脉冲基值低电压时,发光的铁蒸汽电离通道就会消失。发光的铁蒸汽电离通道对电弧电压的响应速度非常快,与电弧电压的相关性很强。而脉冲 MAG 电弧等离子体与电弧电压之间没有明显的对应性,反而

与焊接电流之间具有较强的对应关系。如图所示,在  $t=0.75$  ms 时刻,焊接电流处于上升阶段,且没有达到最大值,与之对应的脉冲 MAG 电弧也没有达到最大体积。在  $t=1.00\sim 2.00$  ms 时间内,脉冲 MAG 焊接电流处于峰值电流阶段,相应的电弧形态也达到了最大体积。随后,随着焊接电流的逐渐降低,电弧也逐渐变弱。

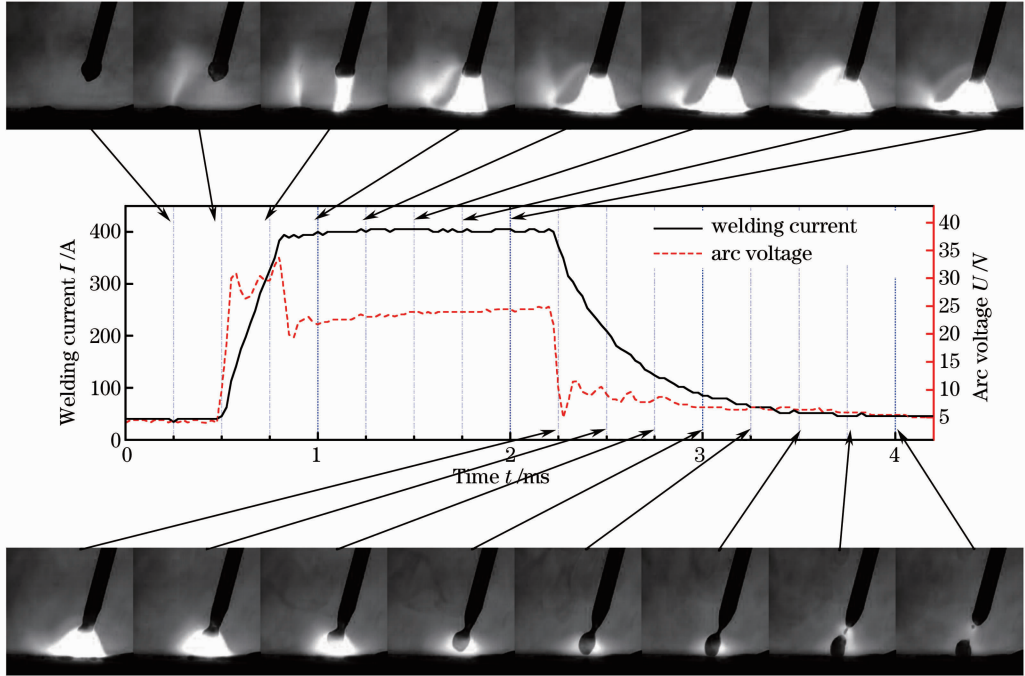


图 4 电弧图像与电参数对照图

Fig. 4 Arc shape corresponding to welding current and arc voltage

激光产生的铁蒸汽电离导电通道与电弧电压之间的快速响应关系应该与不同元素之间电离电位高低有关。表 1 是  $\text{CO}_2$  分子和 Ar、Fe 元素的电离电位值。使原子或分子失去一个电子所需的能量称为第一电离电位。从一价阳离子中再夺走一个电子所需要的能量称为第二电离电位。同理,从二价阳离子中夺走一个电子所需要的能量称为第三电离电位。

表 1 分子和元素电离电位

Table 1 Dissociation and ionization energies

Type	First ionization potential /eV	Second ionization potential /eV	Third ionization potential /eV
$\text{CO}_2$	14.0		
Ar	15.8	27.6	40.9
Fe	7.9	16.2	30.6

从表 1 中可知铁的第一电离电位最低,为 7.9 eV,比  $\text{CO}_2$  和 Ar 的第一电离电位低很多,而铁的第二电离电位基本与它们的第一电离电位相当。所以如果在电弧空间存在铁蒸汽,则电离电位低的

铁原子将比  $\text{CO}_2$  分子和 Ar 原子先被电离,首先形成导电通道。

激光-脉冲 MAG 复合热源焊接过程与单独脉冲 MAG 焊接过程相比存在很大的差异,激光-脉冲 MAG 复合热源焊接过程中加入了高能量的激光束,一般情况下激光采用深熔焊的模式复合,则激光小孔会强烈地喷发出大量的 Fe 离子、Fe 原子(统称为铁蒸汽)。在激光小孔上方周围区域、电弧区域和焊丝端头附近会弥漫着高浓度的铁蒸汽,由于向前的焊接速度影响,铁蒸汽笼罩区域会向后拖尾,更有助于向电弧区域和焊丝端头区域弥散。在脉冲 MAG 电弧电压从基值上升到峰值的最初阶段,激光产生铁蒸汽中的铁离子为最初期的导电通道提供了大部分导电粒子,然后随着脉冲 MAG 电弧电压从基值快速上升到峰值,铁蒸汽中的铁离子在电场的作用下被加速,并相互碰撞而加剧金属蒸汽的电离过程,形成了初期脉冲峰值燃弧的导电通道,增加了脉冲峰值初期“引弧”阶段电弧的稳定性。这种导

电机一直伴随到脉冲峰值电压的结束,也会增加燃弧阶段电弧的稳定性。

至此,定义在激光-脉冲 MAG 复合热源焊接过程中,激光小孔产生的铁蒸汽被电离后产生辅助导电通道现象为激光-脉冲 MAG 复合热源焊接的“双重导电机制”,如图 5 所示。

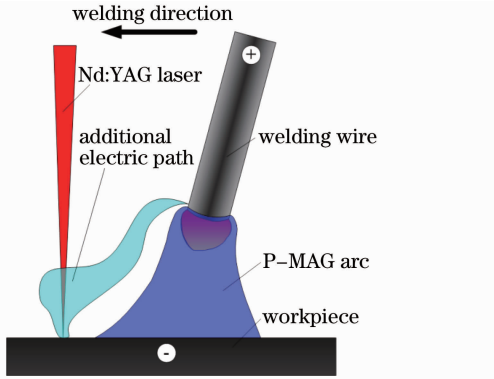


图 5 双重导电示意图

Fig. 5 Schematic of double electric conduction (DEC) mechanism

“双重导电机制”能够辅助引燃电弧,还能够稳定电弧,在合适的工艺条件下,能够获得更稳定的焊接过程,在高速焊接时,“双重导电机制”更能够体现它的稳弧优势。

### 2.2.2 双重导电形成过程

“双重导电现象”本质上就是铁蒸汽电离现象。下面讨论到底是激光小孔产生的铁蒸汽被电离,还是焊丝或熔滴产生的铁蒸汽被电离而形成的导电通道。

表 2 “双重导电现象”形成过程

Table 2 Establishing process of double electric conduction

Time sequence	Laser position	Time sequence	Laser position
1		11	
2		12	
3		13	
4		14	
5		15	
6		16	
7		17	
8		18	
9		19	
10		20	

为了观察“双重导电现象”的形成过程,采用高速摄像机的最高拍摄速度32000 frame/s进行拍摄,但是由于高速摄像机自身硬件条件的限制(拍摄速度越高,拍摄区域越小),无法对整个电弧区域进行动态拍摄,因此选取电弧的某一局部进行拍摄。拍摄部位选取从工件表面向上的一个窄带,如图 6 所示。

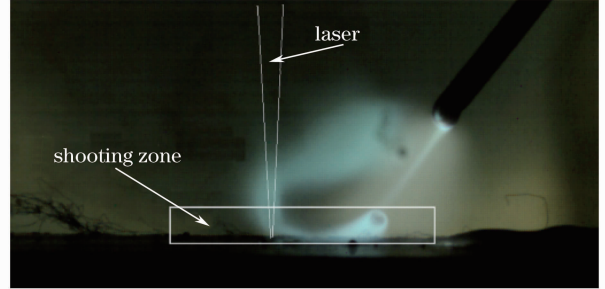


图 6 局部拍摄示意图

Fig. 6 Interpretation of shooting zone

表 2 是高速摄像机拍摄到的激光-脉冲 MAG 复合热源“双重导电现象”的形成过程。时间顺序编号相邻的两幅图片的时间间隔为 1/32000 s,焊接平均电流为 177 A,电弧平均电压为 24.7 V,光束间距为 3 mm,焊接速度为 1.0 m/min,激光功率为 2000 W。图片中的黑色圆球是前一次熔滴脱落过程中形成的小熔滴,这个小熔滴下落的速度较慢,在再一次脉冲 MAG 电弧峰值到来之前,依然在空中飞行,没有过渡到熔池中。图像中的虚线部位是激光小孔位置。

从表 2 中可看出在时刻 1~2 脉冲基值时激光小孔处的铁蒸汽没有被电离发光,小熔滴周围的铁蒸汽也没有被电离发光。在时刻 3~7 时段(4/32 ms)小熔滴周围的铁蒸汽被电离发光,但激光小孔周围的铁蒸汽没有被电离发光。在时刻 8~20 时段(12/32 ms),激光小孔周围和小熔滴周围的铁蒸汽都被电离发光。这些现象说明焊丝端头至激光小孔周围铁蒸汽的电离过程存在时间顺序,并不是电弧电压超过某一阈值后铁蒸汽区域立即电离。电离的顺序是从焊丝端头到弧柱区再到激光小孔周围。

另外从图像中还可看出,“双重导电现象”中铁蒸汽电离导电通道首先是从激光小孔周围建立起来,然后逐渐扩展到整个电弧区域,所以激光小孔或者说激光小孔产生的铁蒸汽是“双重导电现象”最关键的环节,它是“双重导电现象”中铁蒸汽的源泉,没有激光小孔就不存在“双重导电现象”。

表 3 焊接电流 100 A 时不同光丝间距条件下的电弧形态对比

Table 3 Effect of distance between laser and arc with 100 A welding current to DEC

Time	GMAW	Hybrid welding $D_{\text{laser-arc}}=2\text{ mm}$	Hybrid welding $D_{\text{laser-arc}}=4\text{ mm}$	Time	GMAW	Hybrid welding $D_{\text{laser-arc}}=2\text{ mm}$	Hybrid welding $D_{\text{laser-arc}}=4\text{ mm}$
$t=0$				$t=1.75\text{ ms}$			
$t=0.25\text{ ms}$				$t=2.00\text{ ms}$			
$t=0.50\text{ ms}$				$t=2.25\text{ ms}$			
$t=0.75\text{ ms}$				$t=2.50\text{ ms}$			
$t=1.00\text{ ms}$				$t=3.00\text{ ms}$			
$t=1.25\text{ ms}$				$t=3.50\text{ ms}$			
$t=1.50\text{ ms}$				$t=4.00\text{ ms}$			

表 4 是把焊接电流增大到 260 A,不同光丝间距下的电弧图像对比。焊接平均电流为 260 A,平

## 2.2.3 双重导电现象与焊接参数之间的关联

### 2.2.3.1 光丝间距对双重导电现象的影响

表 3 为不同光丝间距条件下的电弧形态对比。焊接平均电流为 100 A,电弧平均电压为 20.2 V,焊接速度为 1.0 m/min,激光功率为 2000 W,激光枪垂直于工件表面,激光在前引导焊接。从表 3 中可以看到光丝间距为 2 mm 时,“双重导电现象”最显著,尤其是在  $t=0.25\text{ ms}$  的脉冲峰值到来前期和峰值阶段。随着光丝间距增大到 4 mm,“双重导电现象”变得较弱,此时激光小孔周围的电离通道与焊丝之间的联系较弱,对辅助导电的帮助不大。这主要是由于电磁场产生的高速等离子流基本沿着焊丝轴线方向喷射,光丝间距增加后,等离子流对激光小孔附近铁蒸汽的碰撞电离作用降低,另外,光丝间距的增加也会使焊丝与激光小孔之间的电场强度随之降低,这将对铁蒸汽的电离起到负面作用。


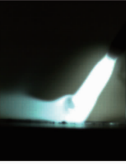
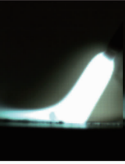
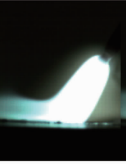
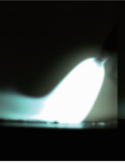






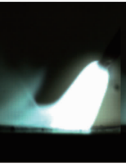
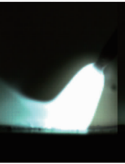



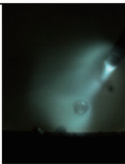
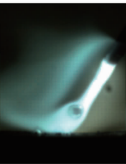

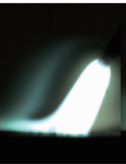
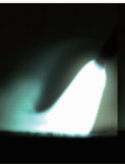


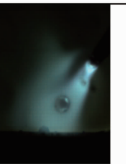
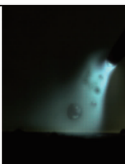

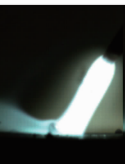

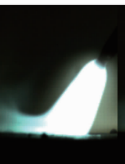






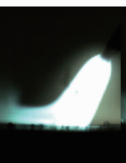
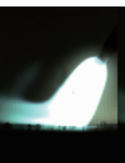











均电弧电压为 27.7 V,焊接速度为 1.0 m/min,激光功率 2000 W,激光枪垂直于工件表面,激光和焊

丝之间的夹角为  $30^\circ$ ，激光在前引导焊接。从表 4 中可看出光丝间距为 2 mm 时，“双重导电现象”最明显，光丝间距为 6 mm 时，电弧图像基本与单独脉冲 MAG 的电弧图像相同。另外，表 4 与表 3 对比，“双重导电现象”不如表 3 显著，这可能与焊接电流

增加有关系。当增加焊接电流时，等离子流速更快，这对碰撞电离起到积极作用，但是等离子流的吹力也更大，会吹散激光小孔周围的铁蒸汽，致使铁蒸汽浓度下降，能够用于建立导电通道的铁离子自然也减少了，最终造成“双重导电现象”不显著。

表 4 焊接电流 260 A 时不同光丝间距下的电弧图像

Table 4 Effect of distance between laser and arc with 260 A welding current to DEC

	$t=0$	0.50 ms	1.00 ms	1.50 ms	2.00 ms	2.50 ms	3.00 ms	4.00 ms
MAG								
Hybrid welding $D_{\text{laser-arc}}=1 \text{ mm}$								
Hybrid welding $D_{\text{laser-arc}}=2 \text{ mm}$								
Hybrid welding $D_{\text{laser-arc}}=3 \text{ mm}$								
Hybrid welding $D_{\text{laser-arc}}=4 \text{ mm}$								
Hybrid welding $D_{\text{laser-arc}}=6 \text{ mm}$								

### 2.2.3.2 电弧电压对双重导电现象的影响

既然“双重导电现象”是一种在电场中的碰撞电离现象，那么电场两端电压的变化必然会对“双重导电现象”产生影响。表 5、6 分别为不同电弧电压条件下脉冲 MAG 和激光-脉冲 MAG 复合热源焊接电弧的对比图组。焊接电流为 160 A，光丝间距为 3 mm，焊接速度为 1.0 m/min，激光功率为 2000 W，激光枪垂直于工件表面，激光在前引导焊接。试验过程中仅调节电弧电压参数，其余焊接参数保持不变，焊接电流由焊机自动匹配。当提高电弧电压时，弧

长会明显地增长，焊接电流也会相应地小幅度升高。表 5 中单独脉冲 MAG 焊接电弧随着电压的升高，弧长不断增加，这一现象与激光-脉冲 MAG 复合热源焊接电弧的变化规律一样。

对于激光-脉冲 MAG 复合热源，如表 6 所示，当电压较低时，“双重导电现象”非常明显。对于第 1 组电弧电压为 22.2 V 的图像，激光小孔附近的亮度最高，电离度也最大，当电弧电压上升到 27.4 V (第 6 组) 以上时，几乎看不到“双重导电现象”。假如把焊丝端头和工件之间的电场近似看作平行电

表 5 脉冲 MAG 复合热源焊接电弧电压对双重导电现象的影响

Table 5 Effect of arc voltage to DEC during pulse MAG hybrid welding process

Series number	Arc voltage /V, welding current /A	$t=0$	$t=0.50$ ms	$t=1.00$ ms	$t=1.75$ ms	$t=2.50$ ms
1	22.1, 156					
2	22.7, 167					
3	23.1, 171					
4	24.5, 182					
5	26.0, 192					
6	27.2, 203					
7	28.4, 218					

场,则有  $E = U/d$ ,其中  $E$  为电场强度, $U$  为电弧电压, $d$  为焊丝端头和工件之间的距离。当电弧电压从第 1 组的 22.2 V 上升到第 6 组的 27.4 V 时,电弧电压  $U$  增加了约 1/5,而焊丝端头和工件之间的距离  $d$  却增加了数倍,这会导致电场强度  $E$  大幅度下降,使得等离子流和其中的带电粒子在电场中获得的能量降低,对激光小孔附近铁蒸汽的电离起到负面作用。另外,随着电压的增加,电流也会相应地增加,会增加等离子流的吹力,降低了激光小孔周围的铁蒸汽浓度,同时也降低小孔周围铁离子的浓度。缺失了铁离子,“双重导电通道”建立困难。

### 2.2.3.3 高速焊接时的双重导电现象

表 7 为高速焊接时脉冲 MAG 和激光-脉冲 MAG 复合热源两种电弧形态对比。焊接电流为 160 A,光丝间距为 3 mm,激光功率为 2000 W,激光枪垂直于工件表面,激光在前引导焊接。从中可以看到,在焊接速度为 3 m/min 和 5 m/min 的高速焊

接过程中,“双重导电现象”依然能够稳定出现,在脉冲 MAG 电弧峰值建立初期阶段和峰值阶段能够确保电弧燃烧的稳定性。应该说“双重导电现象”正是激光-脉冲 MAG 复合热源高速焊接过程中稳定电弧的关键所在。另外从  $t = 2.50$  ms 之后的图像中还可看到单独脉冲 MAG 熔池前沿在高速焊接时会形成很高的隆起,这种现象会直接导致焊缝成型不好。激光-脉冲 MAG 复合热源焊接能够确保在高速焊接中获得成型良好的焊缝。

## 3 结 论

1) 发现并提出了激光-脉冲 MAG 复合热源焊接的“双重导电机制”,通过分析发现激光-脉冲 MAG 复合电弧稳定的真正原因就在于“双重导电机制”的存在。通过对激光-脉冲 MAG 复合电弧高速图像的观察分析发现,激光小孔周围到焊丝端头之间存在发光带,通过光谱分析确定了该发光带的



表 6 激光-脉冲 MAG 复合热源焊接电弧电压对双重导电现象的影响

Table 6 Effect of arc voltage to DEC during laser-pulse MAG hybrid welding process

Series number	Arc voltage /V, welding current /A	$t=0$	$t=0.50$ ms	$t=1.00$ ms	$t=1.75$ ms	$t=2.50$ ms
1	22.2, 152					
2	22.4, 160					
3	23.5, 164					
4	24.8, 174					
5	26.3, 178					
6	27.4, 189					
7	28.7, 203					

表 7 高速焊接时的电弧形态

Table 7 Arc shape of laser-pulse MAG hybrid welding during high speed welding process

Time	Velocity of 3 m/min		Velocity of 5 m/min		Time	Velocity of 3 m/min		Velocity of 5 m/min	
	GMAW	Hybrid	GMAW	Hybrid		GMAW	Hybrid	GMAW	Hybrid
$t=0$					$t=1.00$ ms				
$t=0.25$ ms					$t=1.25$ ms				
$t=0.50$ ms					$t=1.50$ ms				
$t=0.75$ ms					$t=1.75$ ms				

成分为被电离的 Fe 离子,由此提出了激光-脉冲 MAG 复合热源焊接过程中的“双重导电机制”。

2) 通过对激光-脉冲 MAG 复合热源焊接过程中电流、电压信号和激光小孔周围的极高速摄像图片的分析发现,“双重导电通道”的建立过程存在时间顺序,电离导电通道首先是从激光小孔周围建立起来,然后逐渐扩展到整个电弧区域。

3) 对于激光-脉冲 MAG 复合热源焊接“双重导电通道”的建立,光丝间距是一个非常重要的参数,光丝间距太小或太大都不利于“双重导电通道”的建立,对于本文试验条件,光丝间距为 3 mm 左右是最佳值;弧柱中电场强度对“双重导电机制”也有明显的影响,电场强度越高越有利于“双重导电通道”的建立。在高速焊接过程中,“双重导电机制”对维持电弧稳定和保证焊缝成型良好具有非常重要的意义,是高速焊接过程中稳弧的关键。

### 参 考 文 献

- 1 W. M. Steen, M. Eboo. Arc augmented laser welding[J]. *Metal Construction*, 1979, **11**(6): 332~333, 335
- 2 W. M. Steen. Arc augmented laser processing of materials[J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(11): 5636~5641
- 3 D. Lacroixa, G. Jeandel. Spectroscopic characterization of laser-induced plasma created during welding with a pulsed Nd:YAG laser[J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **81**(10): 6599~6606
- 4 B. W. Shinn, D. F. Farson, P. E. Denney. Laser stabilization of arc cathode spots in titanium welding[J]. *Sci. Technol. Weld. Joining*, 2005, **10**(4): 475~481

- 5 Chen Yanbin, Chen Jie, Li Liqun *et al.*. Properties of arc and weld in laser-TIG hybrid process[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2003, **24**(1): 55~57  
陈彦宾, 陈 杰, 李俐群等. 激光与电弧相互作用时的电弧形态及焊缝特征[J]. *焊接学报*, 2003, **24**(1): 55~57
- 6 Gao Ming. Study on Technology, Mechanism and Quality Controlling of CO<sub>2</sub> Laser-Arc Hybrid Welding [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. 57~58  
高 明. CO<sub>2</sub> 激光-电弧复合焊接工艺、机理及质量控制规律研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007. 57~58
- 7 Hu Shengsun, Zhang Shaobin, Zhao Jiarui. Arc augmented laser welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1993, **14**(3): 159~163  
胡绳荪, 张绍彬, 赵家瑞. 电弧强化激光焊[J]. *焊接学报*, 1993, **14**(3): 159~163
- 8 Chen Yanbin, Li Liqun, Wu Lin. Quantitative measurement of absorption and defocusing of laser beam by electric arc [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2003, **24**(3): 56~58  
陈彦宾, 李俐群, 吴 林. 电弧对激光吸收与散焦的定量测量[J]. *焊接学报*, 2003, **24**(3): 56~58
- 9 Zeng Xiaoyan, Gao Ming, Yan Jun. Effects of shielding gas in laser-arc hybrid welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0601005  
曾晓雁, 高 明, 严 军. 保护气体对激光-电弧复合焊接的影响[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0601005
- 10 Cui Li, He Dingyong, Li Xiaoyan *et al.*. Effects of welding direction on weld shape of fiber laser-MIG hybrid welded titanium alloys[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0103002  
崔 丽, 贺定勇, 李晓延等. 焊接方向对光纤激光-MIG 复合焊接钛合金焊缝成形的影响[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0103002
- 11 Qin Hao, Lei Zhenglong, Chen Yanbin *et al.*. Mechanical properties of laser-MAG hybrid welding on low alloy high strength steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1003005  
秦 浩, 雷正龙, 陈彦宾等. 低合金高强度钢激光-MAG 复合多层焊接接头力学性能[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1003005

栏目编辑:宋梅梅