

# 药芯焊丝脉冲 TIG 电弧增材制造电弧特性研究

赵晓燕<sup>1</sup>, 杨立军<sup>2\*</sup>, 黄一鸣<sup>1,2\*</sup>, 黄仕程<sup>1</sup>, 李旺<sup>1</sup>

1. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350

2. 天津大学天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300350

**摘要** 对药芯焊丝脉冲 TIG 电弧增材制造电弧特性展开研究。利用高速摄像拍摄不同熔敷层脉冲电流条件下的电弧与熔滴过渡图片, 对高速摄像图片进行分析, 发现焊丝熔化过程存在“滞熔”现象, 导致熔滴过渡存在渣桥过渡与液桥过渡两种接触过渡方式, 在脉冲峰值电流较小的 50/100 A 电流参数下, 出现熔滴断续的渣桥过渡的频率最高。熔滴过渡影响电弧温度场与药粉成分在电弧中的分布, 利用光谱诊断分析熔敷过程中在不同脉冲峰值电流与脉冲基值电流条件下电弧温度场及药粉成分在电弧中的分布。利用点阵法测量得到各点光谱数据, 根据 Boltzmann 图法计算各点温度, 将各点温度拟合得到完整电弧温度场, 结果表明, 焊丝从钨极轴线前(左)侧送入, 吸收电弧热量并且对电弧有扰动作用, 电弧前侧温度低于电弧后(右)侧, 电弧前侧尺寸稍小于后侧; 随着熔敷层数增加, 降低峰值电流, 电弧收缩, 高温区面积相对减小, 低温区面积相对增大。电弧最高温度区域出现在钨极下方 1~2 mm 的范围, 大约为 13 000~15 000 K, 脉冲峰值电流越大则最高温度区域面积越大。在脉冲基值电流时期, 由于电流小, 电弧面积相比于峰值时期要小得多, 焊丝与电弧相互作用减弱, 电弧温度场基本关于钨极轴线对称分布。选择药芯焊丝中特有的 Na 元素的 Na I 589.6 nm 谱线对其分布点进行标记, 拟合绘出不同脉冲峰值电流与基值电流下药粉元素在电弧中的分布情况, 结果表明, 电流越小, 药粉运动高度越低, 在不同的脉冲峰值电流下药粉均没有沾染到钨极上, 在不同的脉冲峰值电流与脉冲基值电流下 Na 元素均偏电弧后侧分布, 说明焊丝自电弧前侧送入熔池后, 在电弧前侧的电弧中没有出现药粉强烈的喷发现象, 而是进入熔池进行冶金反应。接触过渡解决了碱性焊丝工艺性差的问题, 电弧较为稳定, 避免药粉喷发损伤钨极, 熔敷过程稳定进行。

**关键词** 药芯焊丝; 脉冲 TIG 增材制造; 光谱诊断; 高速摄像; 电弧特性

**中图分类号:** TG403 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)08-2397-07

## 引言

金属增材制造使用的热源主要有三类: 激光、电子束及电弧<sup>[1]</sup>, 以电弧为热源的增材制造因高成形效率, 低成本等优点而受到重视<sup>[2]</sup>。金属增材制造使用的填充材料一般有丝材和粉末两类, 丝材用于电弧增材制造, 即为丝材电弧增材制造方法 Wire Arc Additive Manufacturing(WAAM), 提高了材料沉积效率, 避免了外围粉末回收的过程<sup>[3]</sup>。WAAM 电弧热源主要有 TIG 电弧、GMA 电弧和等离子弧。GMA 电弧 WAAM 工艺效率相对较高, 但 TIG 电弧与等离子弧稳定性更好。本文面向 TIG 电弧的 WAAM 工艺展开研究, TIG 电弧稳定, 飞溅与发尘量小, 成形美观<sup>[4-5]</sup>。TIG 电弧

WAAM 工艺一般使用实心丝材填充, 但实心丝材成分调控灵活性受到丝材可加工性的制约, 冶金反应相对简单, 对工件表面氧化物、吸附物的工艺适应性不好, 尤其是去氢能力弱。

本文提出药芯焊丝 TIG 电弧 WAAM 工艺, 丝材成分调控灵活, 冶金反应丰富<sup>[6]</sup>, 可去除有害物质, 使熔敷金属具有更好的力学性能及工艺性能。药芯焊丝中一般有酸性与碱性两种焊丝, 酸性焊丝工艺性好, 在 GMA 焊接及增材制造中应用广泛; 而碱性焊丝含有氟化物, 发尘量大, 飞溅大, 工艺性差, 用于 GMA 焊接及增材制造中受到一定制约。课题组已利用酸性焊丝进行了药芯焊丝 TIG 焊电弧特性的研究, 发现适当的丝极间距可以使熔滴保持接触过渡, 焊接过程稳定; 后又进行了碱性药芯焊丝 TIG 焊工艺研究, 与酸性

收稿日期: 2020-08-14, 修订日期: 2021-01-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875403)资助

作者简介: 赵晓燕, 1995 年生, 天津大学材料科学与工程学院硕士研究生 e-mail: zhaoxytju@163.com

\* 通讯作者 e-mail: tdyjabc@163.com; ymhuang26@tju.edu.cn

焊丝的焊接效果进行对比,发现碱性药芯焊丝焊缝中扩散氢含量要明显低于酸性药芯焊丝焊缝中的扩散氢含量<sup>[7-8]</sup>,碱性焊丝中的氟化物可以有效降低熔敷金属的扩散氢含量<sup>[9]</sup>,同时接触过渡可以改善碱性焊丝工艺性差的情况。目前对于碱性焊丝 TIG 电弧特性的研究还比较欠缺。本文针对此情况,以 WAAM 工艺为背景展开研究,使用碱性药芯焊丝脉冲 TIG 电弧 WAAM 方法,将碱性焊丝与脉冲 TIG 电弧的工艺优点相结合,在脉冲峰值电流阶段熔化焊丝形成熔滴,脉冲基值电流阶段维持电弧稳定<sup>[10]</sup>,热输入控制灵活,参数可调程度高,便于精确控制成形<sup>[11-12]</sup>。

## 1 实验部分

采用高速摄像对脉冲电弧与熔滴过渡进行拍摄,再利用光谱诊断方法对电弧温度及特定元素分布进行研究。

### 1.1 工艺试验设计

TIG 电弧增材制造试验采用 JQ. YJ507-1 碱性药芯焊丝,基板为 Q235 钢板,图 1 为试验装置示意图,主要包括送丝系统与高速摄像装置和光谱采集装置。试验采用脉冲 TIG 电弧制作薄壁墙(板)式部件。在工艺试验过程中,熔敷高度逐层增加,脉冲峰值电流逐渐减小,送丝速度必须随着减小,才能获得外观良好的薄壁件,参数见表 1。脉冲电流频率约为 6 Hz,占空比约为 50%,弧长为 5 mm,保护气流量  $10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。WAAM 过程非常平稳,基本没有产生飞溅,获得了无夹渣与无气孔的薄壁件,如图 2 所示。选用 PHOTRON FASTCAM Mini UX100 型高速摄像机及其配套系统对电弧、熔滴与熔池变化情况进行拍摄,摄像频率为  $500 \text{ 帧} \cdot \text{s}^{-1}$ ,分辨率为  $1280 \times 616$ 。

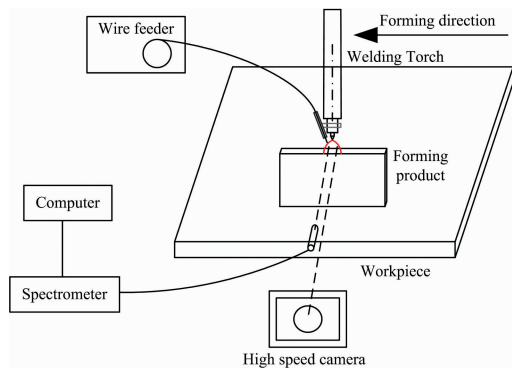


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

表 1 试验参数

Table 1 Experimental parameters

熔敷层数	脉冲峰值 电流/A	脉冲基值 电流/A	送丝速度 ( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ )
1	190	50	130
2	160	50	120
3	130	50	110
$\geq 4$	100	50	100

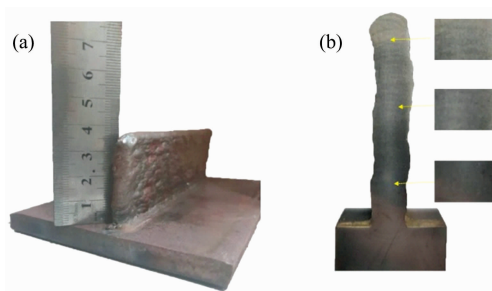


图 2 薄壁成形件

(a): 外观形貌; (b): 横截面形貌

Fig. 2 Thin-walled part

(a): Appearance shape; (b): Shape of transversal section

### 1.2 光谱诊断

光谱采集采用 AvaSpec-3648-USB2-RM 型光纤式数字光谱仪,测量范围为  $440 \sim 720 \text{ nm}$ 。光纤探头外接一个中空长直探针并将其固定在二维的移动滑台上面,以钨极轴线作为中心,分别沿其左右方向进行电弧空间定点采集,每层扫描 15 个点,点间距为  $1 \text{ mm}$ ;共采集五层,分别距离工件表面  $0.5, 1.5, 2.5, 3.5$  和  $4.5 \text{ mm}$ ,如图 3 所示。采集得到的光谱信息传送到计算机进行存储,然后处理分析。

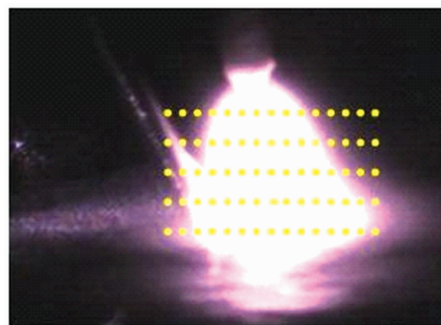


图 3 光谱分层扫描示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spectral scanning

#### 1.2.1 电弧温度场分析方法

对采集到的光谱数据,选择合适的谱线,利用 Boltzmann 作图法进行计算。对于满足局部热力学平衡状态(LTE)的等离子体,可以通过测量谱线强度而求得等离子体温度。LTE 状态的等离子体的谱线强度表达式如式(1)<sup>[13]</sup>

$$I_{ij} = \frac{h\nu}{4\pi} L d\Omega g_i A_{ij} \frac{N_0}{U(T)} \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \quad (1)$$

式(1)中, $h$ 为普朗克常数; $\nu$ 为频率, $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ;  $L$ 为等离子体的层厚; $d\Omega$ 为单位立体角; $A_{ij}$ 为跃迁几率; $g_i$ 为统计权重; $N_0$ 为基态原子数密度; $\frac{N_0}{U(T)}$ 为配分函数; $T$ 为激发温度(单位 K); $E_i$ 为激发能(单位 eV)。对式(1)取对数可得

$$\ln\left(\frac{I_{ij}\lambda}{A_{ij}g_i}\right) = -\frac{E_i}{kT} + D \quad (2)$$

以  $E_i$  为横坐标,  $\ln\left(\frac{I_{ij}\lambda}{A_{ij}g_i}\right)$  为纵坐标描出各点,对各点

进行最小二乘法拟合，拟合直线的斜率为  $-\frac{1}{kT}$ ，由此可以求出等离子体温度  $T$ 。利用该法将各点的温度计算出来，经拟合得到电弧温度分布图。

1.2.2 活性元素分布光谱诊断

药芯焊丝成分复杂，药粉中含有多种元素，药粉中某些成分易受热喷发沾染在钨极上，对钨极造成损伤，影响增材制造工艺性能与成形件质量。本研究试验中焊丝采用接触过渡方式，避免药粉喷发到钨极上损伤钨极，改善碱性焊丝工艺性能。为验证上述设想，选择焊丝药粉中特有的易挥发元素进行标定，研究药粉成分在电弧中的分布情况，进而分析药粉成分对钨极的影响。

2 结果与讨论

2.1 电弧与熔池高速摄像分析-熔滴过渡的渣桥现象

试验拍摄了 4 组脉冲电流的电弧与熔池图片，选取电弧特征差异大的 50/100 A 与 50/190 A 的图片进行分析，发现熔滴有断续和连续两种方式过渡，如图 4 是熔滴沿渣柱断续

过渡高速摄像的图片。

从图 4 可以看出，两种参数下电弧形态在脉冲电流时都呈钟罩形，只是尺寸上有较大差异，190 A 脉冲峰值电流时的电弧要比 100 A 脉冲峰值电流的电弧明显大一些。

在图 4(a)(b)中，脉冲峰值电流期间钢皮熔化，形成熔渣附着在焊丝上，沿着焊丝向上运动，药粉则形成渣柱与熔池接触，这种现象称为“滞熔”现象。对熔滴受力分析，因焊丝不是导电一极，熔滴主要受到表面张力和重力的作用，而熔滴向上运动极可能是由于熔滴侧下方靠近电弧，熔滴侧下方液态金属受高温作用蒸发产生反作用力，推动熔滴向上运动。同时推测持续送丝将渣柱与熔滴推入熔池，药粉成分在电弧前侧没有或很少熔化与蒸发，因此要关注药粉成分在电弧中的分布以及是否对钨极产生影响，可通过光谱诊断方法来探究。脉冲基值电流期间，电弧对熔滴的热作用减弱，熔滴绕渣柱运动，同时焊丝送进，熔滴与渣柱向熔池运动，形成渣桥过渡。

另外一种熔滴过渡方式如图 5，焊丝熔化与熔池连接形成金属液桥，熔滴以连续态稳定过渡，形成液桥过渡。熔滴过渡过程既有渣桥又有液桥，可称为“双桥”现象。

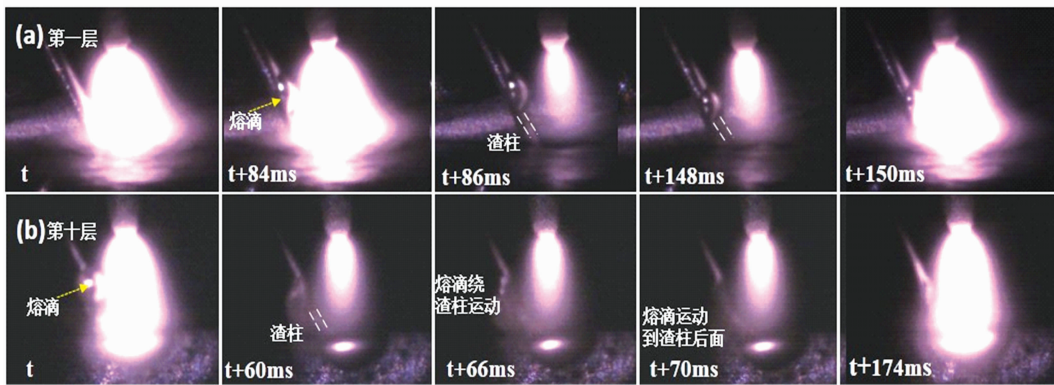


图 4 熔滴沿渣柱断续过渡的脉冲电弧与熔滴过渡

(a): 50/190 A; (b): 50A/100 A

Fig. 4 Transition pulsed arc and droplet transition along slag column

(a): 50/190 A; (b): 50/100 A

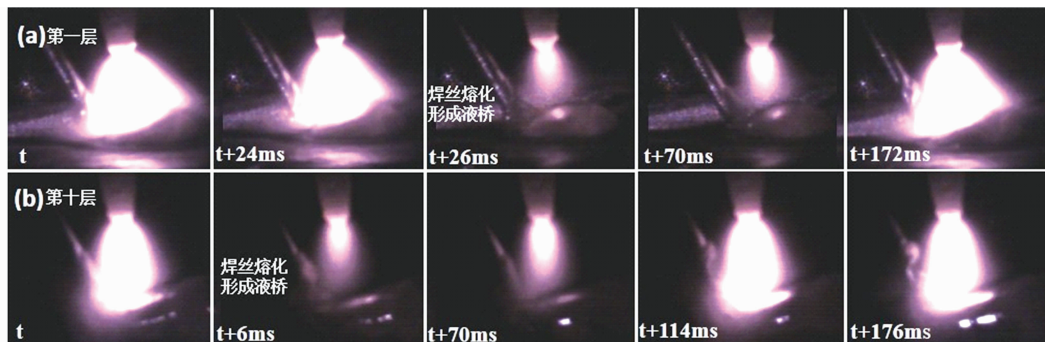


图 5 液桥过渡

(a): 50/190 A; (b): 50A/100 A

Fig. 5 Liquid bridge transition

(a): 50/190 A; (b): 50/100 A

拍摄的四组不同脉冲电流参数的高速摄像图片中都存在这两种过渡方式,其中在 50/100 A 电流参数下,出现渣桥过渡的频率最高,推测是因为其电弧面积小,电弧更容易作用到熔滴侧下方而不是笼罩整个熔滴,熔滴侧下方蒸发的金属蒸气产生的反作用力推动熔滴沿着焊丝向上运动,出现渣桥过渡。

## 2.2 电弧特性光谱分析

### 2.2.1 药芯焊丝 TIG 电弧增材制造电弧温度场分析

采用图 2 点阵法测量得到各点光谱数据,观察电弧谱线,440~520 nm 波段内的 Ar II 谱线分辨率较高且线形较好,满足 Boltzmann 作图法的谱线选择要求,谱线形状如图 6。选取 Ar II 的 454.50, 460.96, 472.69 和 484.78 nm 这四条谱线用于计算,计算采用的谱线的光谱学参数如表 2 所示。

在熔敷第一层时,脉冲峰值电流为 190 A,电弧底部平铺于基板之上;随着层数增加,脉冲峰值电流逐渐减小,由 160 A 减小为 130 A 和 100 A,到第四层后脉冲峰值电流固定为 100 A,电弧逐渐局限于薄壁墙的顶部,且随着电流逐渐变小,电弧尺寸随之缩小。计算得到薄壁件不同脉冲峰值电流时期各点温度,并拟合绘制电弧温度分布图,如图 7。

熔敷过程中焊丝从钨极轴线的前(左)侧送入,吸收电弧热量且对电弧有扰动作用,电弧前侧温度要低于后(右)侧,电弧前侧尺寸也要稍小于后侧。电弧最高温度区域出现在钨极下方 1~2 mm 的范围,大约为 13 000~15 000 K,不同脉冲峰值电流参数下的最高温度差别不大,只是最高温度分布

区域面积有所不同,脉冲峰值电流越大则最高温度区域面积越大。

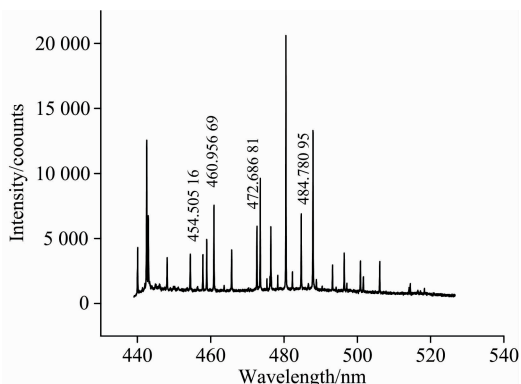


图 6 药芯焊丝 TIG 电弧增材制造特征光谱标定

Fig. 6 Spectrum about TIG arc additive manufacturing filled by fluxed-cored wire

表 2 Ar II 谱线的光谱学参数

Table 2 Spectroscopic constants of Argon ion transitions

波长 $\lambda/\text{nm}$	跃迁几率 $A/(10^7 \text{ s}^{-1})$	激发能 $E_u/\text{eV}$	统计权重 $g_u$
454.505 16	4.71	19.867 16	4
460.956 69	7.89	21.143 08	8
472.686 81	5.88	19.762 26	4
484.780 95	8.49	19.305 34	2

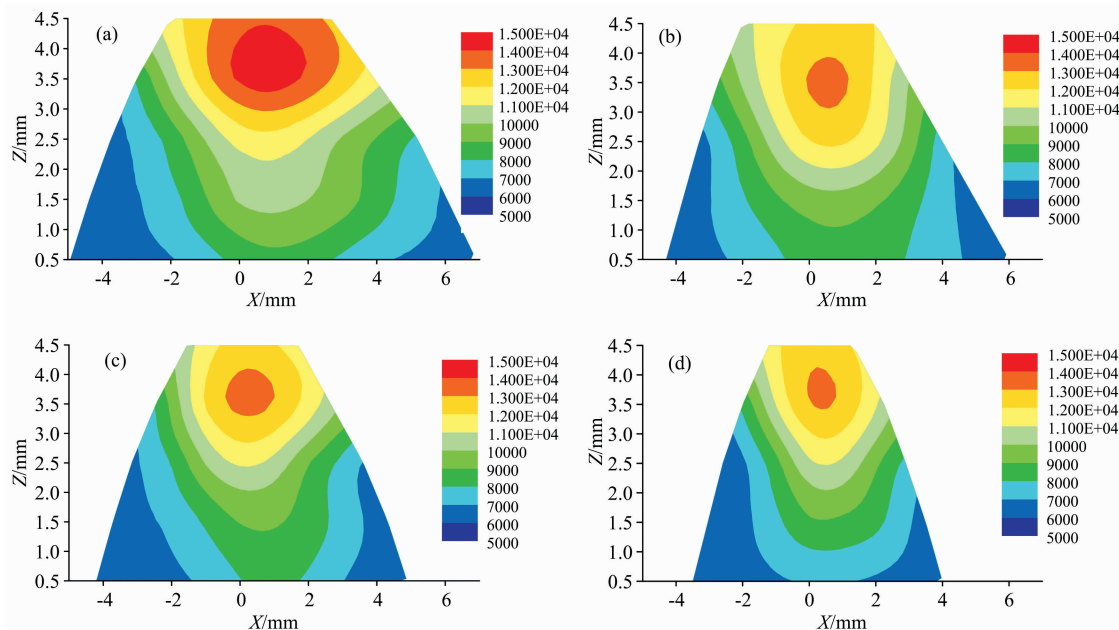


图 7 不同脉冲峰值电流电弧温度场分布

(a): 190 A; (b): 160 A; (c): 130 A; (d): 100 A

Fig. 7 Distribution of arc temperature field under different pulse peak current

(a): 190 A; (b): 160 A; (c): 130 A; (d): 100 A

在脉冲基值电流时期,由于电流小,电弧面积相比峰值时期要小得多,如图 8。在脉冲基值期间,由于电弧面积减

小,焊丝与电弧相互作用减弱,电弧温度场基本关于钨极轴线呈对称分布。总体而言,TIG 电弧保持电弧稳定性好的特

点, 焊丝熔滴也平稳地过渡到熔池, 保证熔敷过程的稳定性。

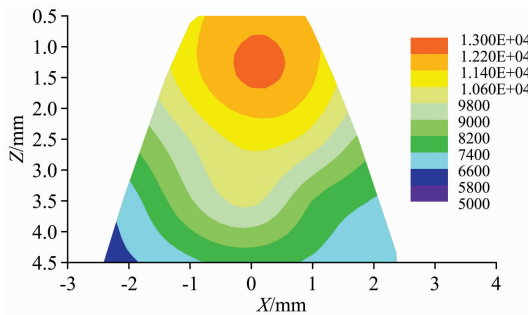


图 8 脉冲基值电流电弧温度场分布  
Fig. 8 Distribution of arc temperature field under pulse base current

2.2.2 药芯焊丝活性元素分布

药芯焊丝中含有大量药粉, 若在电弧中受热喷发易污染钨极, 影响成形件质量, 因此本研究采用接触过渡的方式避免药粉喷发对钨极的污染<sup>[8]</sup>。为了探究药粉成分在电弧中分布情况, 选用药粉中特有元素的谱线进行研究。对比不填丝与填丝两种情况采集到的电弧光谱, 选择 Na 元素作为标定对象, 研究药粉成分在电弧中的分布范围。光谱仪测得增材成形过程中 580~640 nm 波段谱线图形如图 9 所示, 存在两

条明显的线谱, 均为 Na I 谱线, 其中波长为 589.6 nm 的 Na I 谱线线形好, 选择该谱线进行标记。

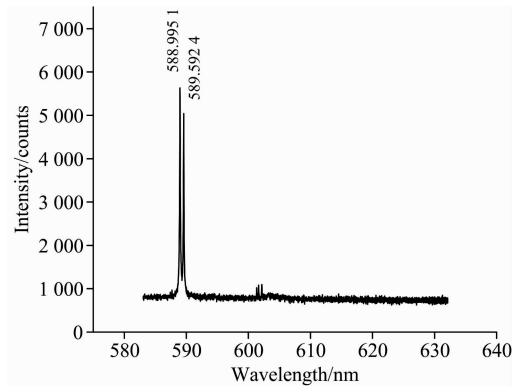


图 9 药芯焊丝特征元素  
Fig. 9 Characteristic elemental spectrum of flux-cored wire

利用图 3 的光谱分层扫描方法, 探测各个点是否有 589.6 nm 的 Na I 谱线存在, 利用对 Na 元素存在点的标记拟合绘出不同脉冲峰值电流下药粉元素在电弧中的分布情况, 如图 10。在纵向上, 电流为 190 A 时, Na 元素最高运动到了钨极下方 1 mm 处, 电流越小, 药粉运动高度越低, 在不同的脉冲峰值电流下药粉均未沾染到钨极上, 熔敷过程稳定进行。

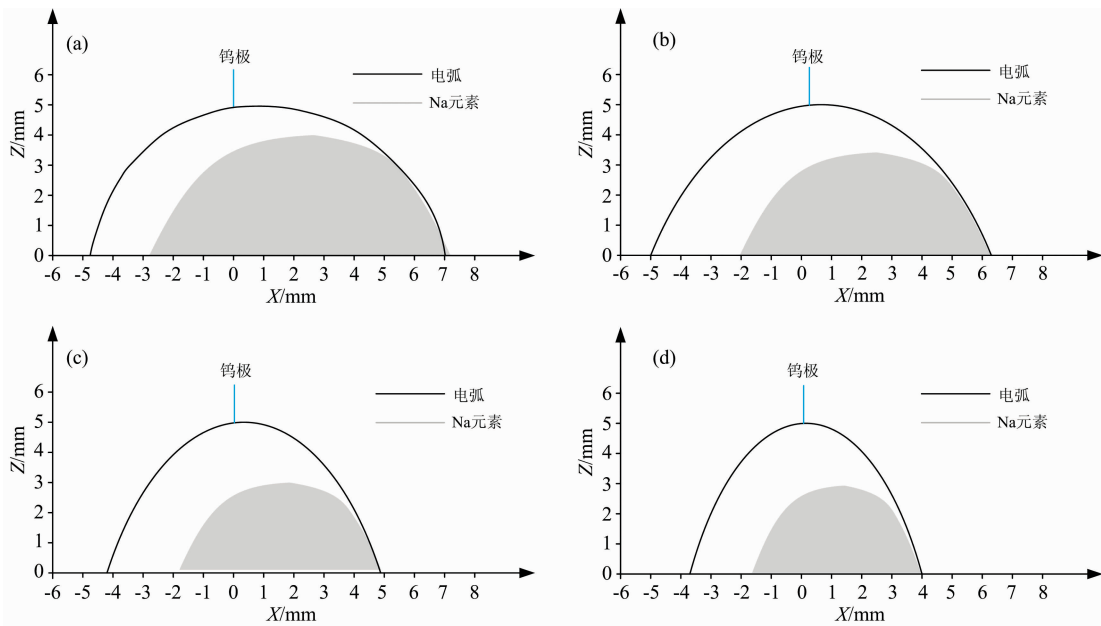


图 10 脉冲峰值电流下活性元素分布  
(a): 190 A; (b): 160 A; (c): 130 A; (d): 100 A  
Fig. 10 Distribution of active elements under different pulse peak current  
(a): 190 A; (b): 160 A; (c): 130 A; (d): 100 A

Na 元素偏电弧后侧分布, 说明焊丝自电弧前侧送入熔池后, 在电弧前侧的电弧中没有出现药粉强烈的喷发现象, 而是进入熔池进行冶金反应; 从图 2 的成形横截面也可以看出, 冶金反应很充分, 形成的气体和熔渣及时上浮, 没有在在

部产生气孔、夹渣等缺陷; 由于电弧持续向前运动, 相当于进入熔池的熔滴和药粉成分向后运动, 因此上浮的熔渣成分在电弧偏后侧的熔池表面与电弧接触, 易蒸发的元素受热蒸发进入电弧。这应当是药粉成分在熔池和电弧中的运动过程。

脉冲峰值电流越大,药粉在电弧空间分布的范围越广,由脉冲峰值电流降到脉冲基值电流时,电弧面积迅速变小,药粉成分不会迅速消失,在基值电弧空间大部分范围内都存

在药粉成分,且脉冲峰值电流越大其对应的基值电弧内药粉成分越多,测得不同脉冲峰值电流对应的脉冲基值电流时期药粉元素分布如图 11 所示。

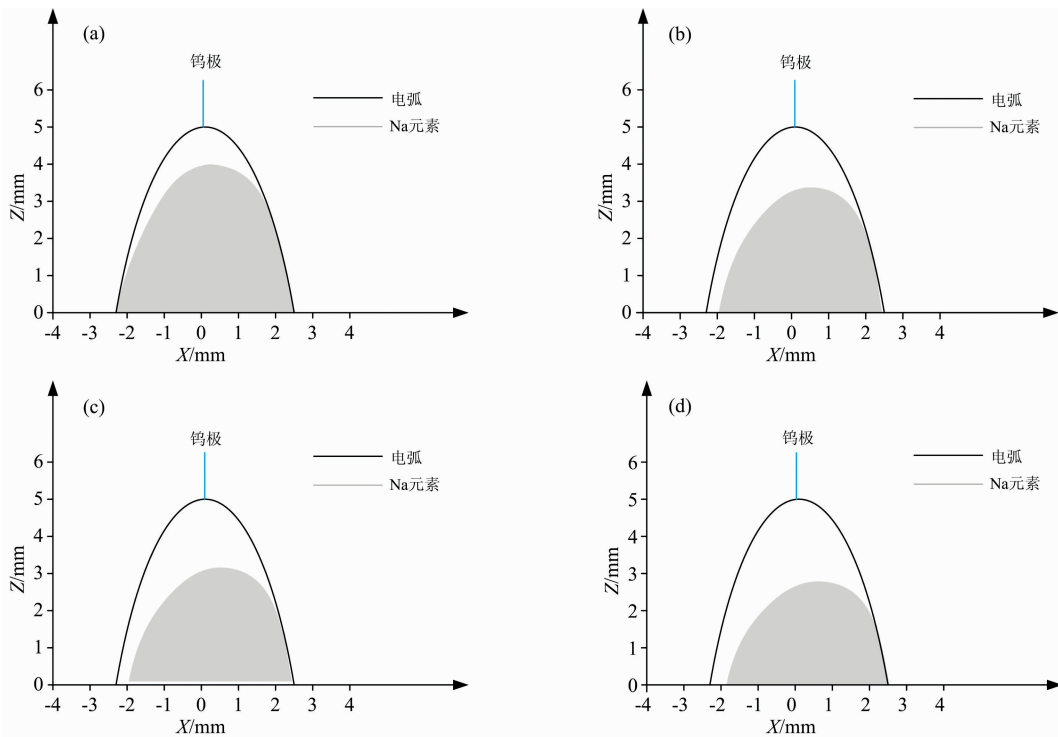


图 11 脉冲基值电流下活性元素分布

(a): 50 A(脉冲峰值电流 190 A); (b): 50 A(脉冲峰值电流 160 A);

(c): 50 A(脉冲峰值电流 130 A); (d): 50 A(脉冲峰值电流 100 A)

Fig. 11 Distribution of active element under pulse base current

(a): 50 A (Pulse peak current is 190 A); (b): 50 A (Pulse peak current is 160 A);

(c): 50 A (Pulse peak current is 130 A); (d): 50 A (Pulse peak current is 100 A)

从上述光谱诊断结果来看,电弧温度场未发生较大的畸变,意味着电弧比较稳定;药芯焊丝中的药粉成分也未对钨极造成污染,在熔池中进行了较为充分的冶金反应,这种采用接触过渡的药芯丝材脉冲 TIG 电弧 WAAM 工艺是成功的。

### 3 结 论

利用高速摄像与光谱诊断方法对脉冲 TIG 药芯焊丝 WAAM 电弧特性进行研究,得到如下结论:

(1) 在所研究的药芯丝材 TIG 电弧 WAAM 工艺的接触过渡过程中药芯丝材存在“滞熔”现象,导致焊丝存在渣桥过渡与液桥过渡两种接触过渡方式,脉冲峰值电流越小,越

容易出现渣桥过渡;两种过渡方式中渣桥的出现意味着药芯成分在进入熔池前未发生明显的蒸发。

(2) 对电弧的光谱诊断表明,电弧前侧的电弧温度低于电弧后侧,但整体的电弧温度场畸变较小,电弧比较稳定;药芯成分首先以渣桥方式进入熔池,发生冶金反应,在熔池后侧蒸发进入电弧。

(3) 采用接触过渡方式,焊丝不作为导电的一极,较好解决了碱性焊丝工艺性差的问题,药粉成分未对钨极造成不利影响,保证了药芯丝材 TIG 电弧 WAAM 工艺的顺利实施。

**致谢:**感谢天津理工大学李云涛副教授和 2018 级硕士研究生许剑的帮助。

### References

- [ 1 ] Ding D H, Pan Z X, Cuiuri D, et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(1): 173.
- [ 2 ] Ding D H, Pan Z X, Cuiuri D, et al. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2015, 34: 8.
- [ 3 ] Tang H P, Qian M, Liu N et al. JOM, 2015, 67: 555.
- [ 4 ] Williams S W, Martina F, Addison A C, et al. Materials Science and Technology, 2016, 32(7): 641.

- [ 5 ] Wang X L, Wang A M, Wang K X, et al. *Rapid Prototyping Journal*, 2019, 25(5): 809.
- [ 6 ] Quintana M A, Mclane J, Babu S S, et al. *Welding Journal*, 2001, 80(4): 98s.
- [ 7 ] LIU Ying, YANG Li-jun, HE Tian-xi, et al(刘莹, 杨立军, 何天玺, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2017, 37(7): 2171.
- [ 8 ] Zhai Y L, Yang L J, He T X, et al. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 250: 73.
- [ 9 ] Wang Y, Zhang Y Q, Wang B, et al. *Applied Mechanics and Materials II*, 2014, 477: 1369.
- [10] Cunningham C R, Flynn J M, Shokrani A, et al. *Additive Manufacturing*, 2018; 22, 672.
- [11] Harinadh V, Edison G, Akella S, et al. *Materials Today Proceedings*, 2017, 4(2A): 1452.
- [12] Madadi F, Ashrafizadeh F, Shamanian M. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, 510(1): 71.
- [13] Hegazy H, Alashkar E, Abou-Gabal H H, et al. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(6): 1674.

## Study on Arc Characteristic of Flux-Cored Wire Pulse TIG Arc Additive Manufacturing

ZHAO Xiao-yan<sup>1</sup>, YANG Li-jun<sup>2\*</sup>, HUANG Yi-ming<sup>1,2\*</sup>, HUANG Shi-cheng<sup>1</sup>, LI Wang<sup>1</sup>

1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China

2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China

**Abstract** The arc characteristic of flux-cored wire pulsed TIG arc additive manufacturing was studied. The images of arc and droplet transition under different pulsed current were taken using high speed camera. High-speed camera images were analyzed. The results showed that the lagging melt phenomena in the wire melting process resulted in two contacting transition modes: slag bridge transition and liquid bridge transition, in addition, under the current parameters of 50/100 A, the frequency of slag bridge transition with intermittent droplets is the highest. Droplet transfer modes affected the arc temperature field and the distribution of flux composition in the arc. The characteristics of flux-cored wire pulsed TIG arc additive manufacturing were studied by spectral diagnosis, and the distribution of the arc temperature field under the conditions of different pulsed peak current and pulsed base current during additive manufacturing was analyzed. The spectral data of each point was measured by the lattice method, the temperature of each point was calculated according to the Boltzmann diagram method, finally the temperature of each point was fitted to obtain a complete arc temperature field. The result showed that the arc was disturbed and arc heat was absorbed by wire when the wire was fed from the front (left) side of the tungsten electrode axis. The temperature on the front side of the arc is lower than the back (right) side of the arc, and the size of the front side of the arc is slightly smaller than the back side. As the number of additive layers increased, the peak current was reduced, the arc shrunk. Also the proportion of the high-temperature region was relatively reduced, the proportion of low-temperature region is relatively enlarged. The highest temperature region of the arc appeared in the range of 1~2 mm below the tungsten electrode, which is about 13 000~15 000 K. The larger the pulse peak current, the larger the proportion of the highest temperature region. Due to the small current, the arc size was much smaller than the peak period in the pulse base current period, the interaction between the wire and the arc weakened, and the arc temperature field was basically symmetrical about the tungsten axis. The Na I 589.5 nm spectrum line of the unique Na element in the basic flux-cored wire was selected to mark its distribution points, and the distribution of flux composition in the arc under different pulse peak currents and base currents was drawn by fitting. The results showed that the smaller the current, the lower the movement height of the powder. The flux composition was not contaminated on the tungsten electrode under different pulse peak currents, and the Na element was distributed in the back of the arc under different pulse peak currents and pulse base current. It showed that after the wire was fed into the molten pool from the front side of the arc, there was no strong spraying phenomenon of flux composition in the arc but it entered the molten pool for metallurgical reaction. The contact transition solves the problem of poor manufacturability of the flux-cored wire, the arc was relatively stable, and the tungsten electrode was prevented from being damaged by the spraying flux composition, the deposition process was stable.

**Keywords** Flux-cored wire; Pulsed TIG additive manufacturing; Spectral diagnosis; High speed imaging; Arc characteristic

\* Corresponding authors

(Received Aug. 14, 2020; accepted Jan. 2, 2021)