

# 极性对细直径自保护药芯焊丝 CMT 下熔滴过渡及焊缝成形的影响

张恒铭, 石珂, 李春凯, 顾玉芬, 朱明

(兰州理工大学, 兰州, 730050)

**摘要:** 自保护药芯焊丝广泛应用在野外焊接及修复领域中, 其中在野外薄壁管道的焊接中, 减少母材热输入, 保证焊接质量具有重要意义。因此探索了适用于野外薄壁管道焊接的细直径自保护药芯焊丝 CMT 技术, 利用电信号采集系统和高速摄影系统, 对比分析了不同极性下的熔滴过渡过程。结果表明, 在不同极性下, 熔滴过渡表现为混合过渡模式。在直流反接条件下, 峰值阶段下的熔滴过渡模式主要表现为大滴排斥过渡。在直流正接条件下时, 峰值阶段下的熔滴过渡模式主要表现为射滴过渡, 相比于直流反接条件, 焊缝的熔深较浅, 余高较高, 熔宽较宽。焊接参数的增大, 并未改变熔滴过渡的模式。爆炸型焊接飞溅主要出现在直流正接条件下的短路阶段中。排斥型飞溅主要出现在直流反接条件下的峰值阶段中。

**创新点:** (1) 探索了不同电极极性条件下的熔滴过渡过程, 针对不同电极极性下的熔滴过渡模式变化, 主要分析解释了电极极性对熔滴过渡模式的影响机理。

(2) 对比不同极性下发生的飞溅过程, 分别分析了电极极性对飞溅过程的影响以及飞溅产生的机理。

**关键词:** 自保护药芯焊丝; CMT; 熔滴过渡; 焊接飞溅

**中图分类号:** TG 442    **文献标识码:** A    **doi:** 10.12073/j.hjxb.20210419001

## 0 序言

由于自保护药芯焊丝野外焊接的优异性能<sup>[1]</sup>, 广泛用于管道焊接、大型装备堆焊修复等领域<sup>[2]</sup>。其中, 在野外薄壁管道的全位置焊接过程中, 减少母材热输入, 保证焊接质量具有重要意义。目前, 由于 CMT<sup>[3]</sup> 电弧焊具有低热输入和高质量焊接接头而被广泛应用于薄板及增材堆焊过程。

Lei 等人<sup>[4]</sup> 通过激光和 CMT 热源的复合, 发现激光的加入, 显著提高了焊丝的熔敷率, 促进力熔滴过渡的频率, 使电弧的稳定性进一步提升, 改善

了焊缝成形的质量。Liang 等人<sup>[5]</sup> 通过对比分析了 TIG-CMT 与传统 TIG-MAG 复合焊接过程, 在 TIG-CMT 复合焊中, TIG 电弧的加入, 细化微观组织晶粒, 提高微观硬度, 获得较高的焊缝质量。Pickin 等人<sup>[6]</sup> 探索 CMT 焊接技术在三元合金 (Al-Cu-Mg)Al 板堆焊的应用, 发现 CMT 技术降低焊缝稀释率, 减少焊缝缺陷。Derekar 等人<sup>[7]</sup> 利用 CMT 技术, 实现了 Al 丝的堆焊增材过程。通过与脉冲 MIG 焊对比分析, 发现 CMT 热源下, 试样在固溶体中的溶解氢含量更高。

以上方法主要针对的是实芯焊丝。由于自保护药芯焊丝的特殊结构、较大差异的药芯成分、特殊的应用工况, 导致 CMT 热源下自保护药芯焊丝电弧焊过程具有较大独特性。

近年来, 针对自保护药芯焊丝的研究, 主要集焊缝性能和熔渣设计、熔滴过渡等方面。学者 Liu 等人<sup>[8]</sup> 通过不同渣系的设计, 创新性的设计出了无渣自保护药芯焊丝, 并且探索分析了熔滴过渡的渣溅机理。并且, 通过不同药芯成分的添加, 实现了焊缝更高的耐磨性能。学者 Zhang 等人<sup>[9]</sup> 探索了

收稿日期: 2021-04-19

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51905245); 国防科工局科研基础研究计划项目 (JCKY2018427C001); 甘肃省引导科技创新发展专项资金项目 (2019ZX-08); 甘肃省重点研发计划项目 (20YF3WA017); 有色金属先进加工与再利用国家重点实验室资助项目 (SKLAB02019009); 北京石油化工学院开放基金; 浙江省自然科学基金 (LQ21E050023); 甘肃省自然科学基金 (20JR10RA164); 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室开放课题 (SKLAB02019009)。

自保护药芯焊丝中夹杂物对熔覆金属微观组织和韧性的影响,发现对夹杂物进行必要调控,可以提高熔覆金属的冲击韧性.学者 Liu 等人<sup>[2]</sup>利用高速摄影图像,观察发现,熔滴过渡模式主要表现为液桥过渡和大滴排斥过渡.学者 Xu 等人<sup>[10-11]</sup>对水下药芯焊丝的熔滴过渡机理及熔滴内部气泡特征进行分析,发现水下药芯焊丝中熔滴内部气泡的产生使熔滴重力减少,导致熔滴过渡困难,恶化焊接过程稳定性.

针对极性对细直径自保护药芯焊丝 CMT 下熔滴过渡及焊缝成形的研究极少.因此通过高速摄影图像和电信号采集系统,比较分析不同极性下自保护药芯焊丝 CMT 热源下的熔滴过渡模式,通过不同极性下熔滴过渡模型,分析了熔滴过渡以及飞溅

机理,对保证野外薄壁管道焊接质量具有重要的指导意义.

## 1 试验方法

在焊接过程中选取了细直径的自保护药芯焊丝,设计了自保护药芯焊丝的焊接规范,观察研究了熔滴过渡模式,并且重点分析了自保护药芯焊丝的熔滴过渡过程.

### 1.1 试验材料

试验采用 1.0 mm (牌号: AWSE71T) 细直径自保护药芯焊丝,熔覆金属的成分见表 1.母材为 Q235 钢板规格为 240 mm × 50 mm × 8 mm,母材成分见表 2.

表 1 细直径自保护药芯焊丝熔覆金属成分 (质量分数, %)

Table 1 Composition of cladding metal for fine diameter self-shielded flux cored wire

项目	C	Mn	Si	P	S	Al
标准值	—	1.75	0.60	0.03	0.03	1.8
测量值	0.13	0.50	0.21	0.009	0.006	0.92

表 2 Q235 母材成分 (质量分数, %)

Table 2 Composition of Q235 base metal

C	Mn	Si	S	P
0.14 ~ 0.22	0.30 ~ 0.65	≤ 0.30	≤ 0.05	≤ 0.045

### 1.2 焊接系统

焊接系统如图 1 所示, CMT 焊机的型号为 Transpulse Synergic 320, 该焊机为一元化焊机,其中电流、电压随送丝速度变化而发生改变. 高速摄影系统主要由奥林巴斯高速摄影系统和滤光系统组成,拍摄频率为 3000 帧/s.

### 1.3 试验参数设计

为了保证焊接过程的稳定性,通过前期大量试

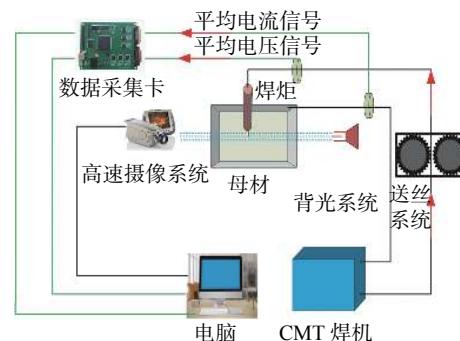


图 1 焊接试验系统

Fig. 1 Welding test system

验,选取了合理的焊接工艺范围,分别采用了如表 3 所示的试验参数.

表 3 试验参数

Table 3 Experimental parameters

焊接极性	送丝速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	平均电流 $I/A$	平均电压 $U/V$	焊接速度 $v_f/(cm \cdot min^{-1})$	导电嘴到工件的距离 $d/mm$
直流正接/直流反接	4 ~ 6	90 ~ 110	19 ~ 25	70	8

## 2 试验结果

为了分析极性对熔滴过渡过程的影响,因此结

合电流、电压信号和熔滴过渡的高速摄像图片,对不同送丝速度下的熔滴过渡过程进行观察.

### 2.1 直流正接条件下熔滴过渡分析

如图 2 所示,当送丝速度为 4 m/min 时, CMT

下的电信号主要分为峰值阶段、基值阶段和短路阶段。其中,熔滴过渡主要在峰值阶段和短路阶段。观察峰值阶段对应的熔滴过渡图片以及统计发现,熔滴过渡模式主要为射滴过渡,熔滴过渡频率为113 Hz,熔滴尺寸接近焊丝直径。其中,焊丝端部总会出现滞融渣柱,电弧极易上爬包裹熔滴,促进熔滴过渡。而在短路阶段,主要表现出短路过渡。

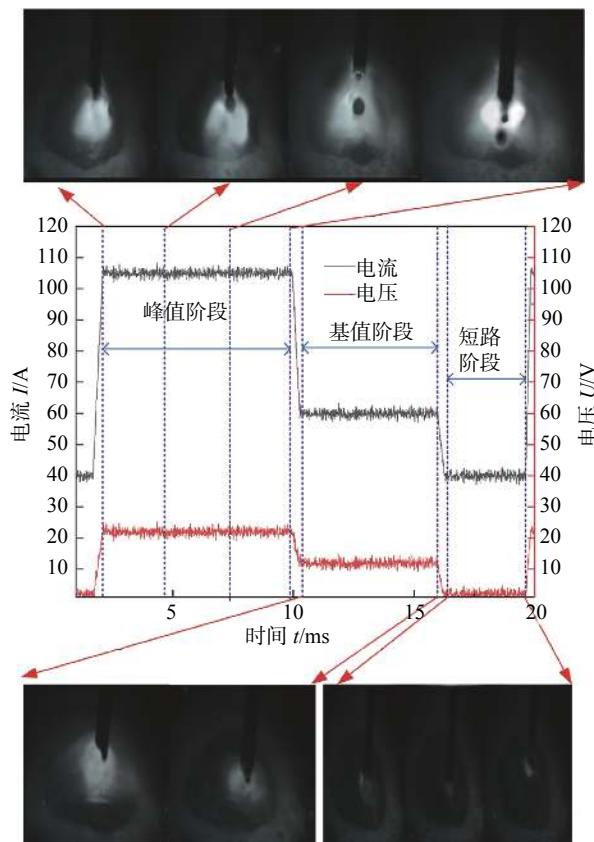


图2 送丝速度为4 m/min时电信号波形图及熔滴过渡过程  
Fig. 2 Electric signal waveform and droplet transfer process at 4 m/min wire feeding speed

如图3所示,送丝速度为5 m/min时,渣柱滞融现象明显存在。其中,熔滴过渡的过程主要发生在峰值阶段和短路阶段。峰值阶段表现为射滴过渡,电弧极易包裹熔滴,熔滴在电弧内脱落。通过前期统计发现,峰值时的过渡频率达到205 Hz,熔滴尺寸为0.8 mm左右。短路过渡主要发生在短路阶段。

如图4所示,当送丝速度为6 m/min时,射滴过渡过程发生在峰值阶段,过渡频率为322 Hz,熔滴尺寸大约为0.5 mm。短路过渡过程出现爆炸飞溅现象,短路阶段时间明显增加,接近5 ms。

## 2.2 直流反接条件下熔滴过渡分析

如图5所示,送丝速度为4 m/min时,从电信号波形图可以发现,电信号主要分为峰值阶段、基值阶段和短路阶段。其中,通过观察图片和统计分析

发现,在峰值阶段,电弧始终位于熔滴底部,熔滴过渡过程表现为大滴排斥过渡,过渡频率约99 Hz,熔

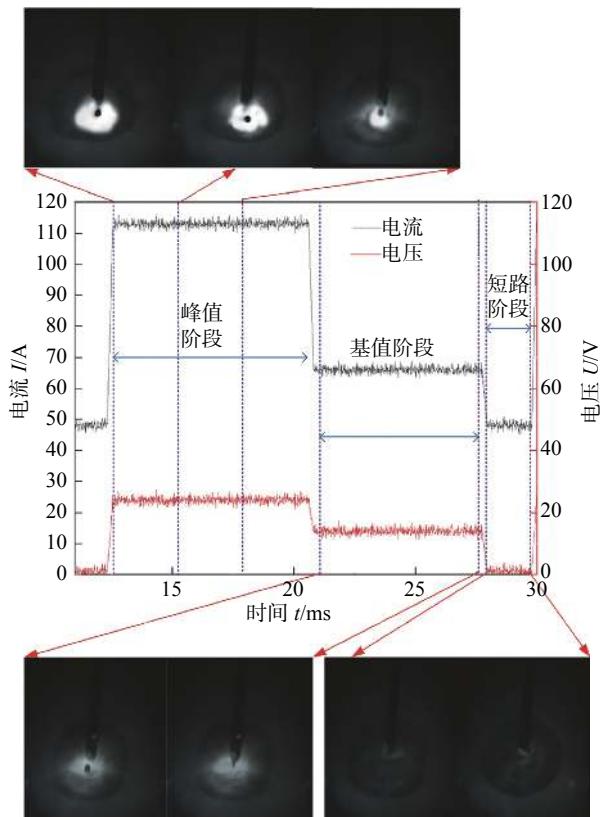


图3 送丝速度为5 m/min时电信号波形图及熔滴过渡过程  
Fig. 3 Electric signal waveform and droplet transfer process at 5 m/min wire feeding speed

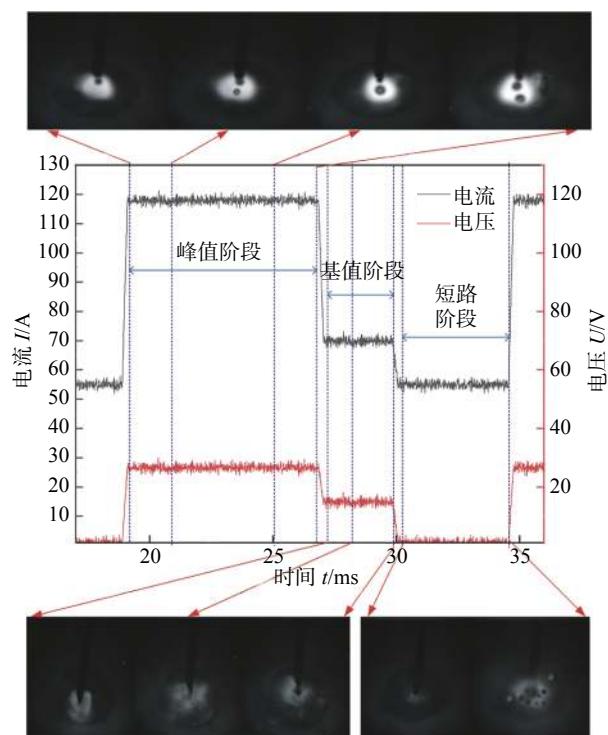


图4 送丝速度为6 m/min时电信号波形图及熔滴过渡过程  
Fig. 4 Electric signal waveform and droplet transfer process at 6 m/min wire feeding speed

滴尺寸大约为 1.2 mm. 其中, 滞融渣柱现象不太明显. 并且, 短路过渡并无明显飞溅.

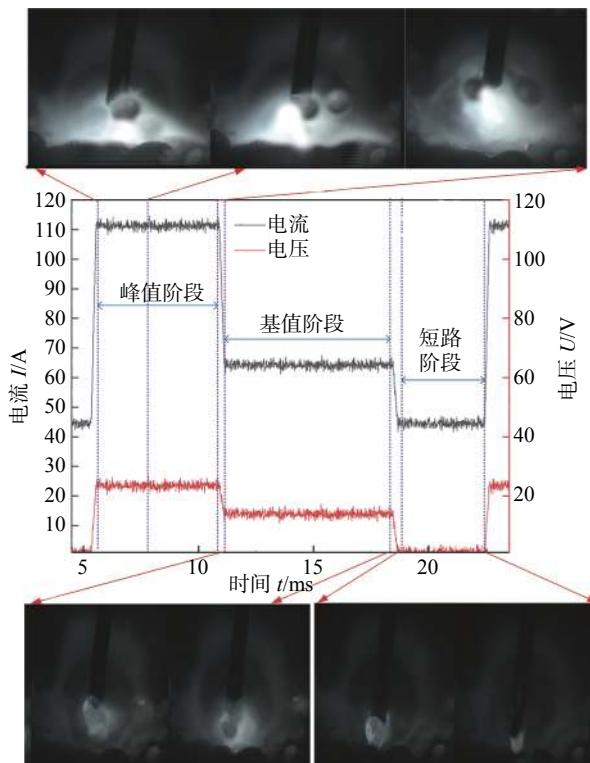


图 5 送丝速度为 4 m/min 时电信号波形图及熔滴过渡过程  
Fig. 5 Electric signal waveform and droplet transfer process at 4 m/min wire feeding speed

如图 6 所示, 在送丝速度为 5 m/min 时, 峰值阶段内, 熔滴过渡模式表现为大滴排斥过渡模式, 电弧始终在熔滴底部, 其中熔滴尺寸为 1.5 mm, 过渡频率约为 105 Hz. 在短路阶段, 熔滴主要以短路过渡的模式过渡到熔池内, 并无明显飞溅现象.

如图 7 所示, 在送丝速度为 6 m/min 时, 峰值阶段内, 熔滴过渡模式没有改变, 表现为大滴排斥过渡, 过渡频率为 121 Hz 左右, 熔滴尺寸约为 1.8 mm. 在短路阶段内, 熔滴过渡过程中表现出明显飞溅.

### 2.3 极性对焊缝成形的影响

图 8 是直流正接时不同送丝速度下焊缝及焊缝横截面的图像. 从图中观察发现, 当送丝速度为 5 m/min 时, 焊缝两侧并无明显飞溅颗粒. 其中, 当送丝速度为 6 m/min 时, 焊缝两侧出现少量飞溅颗粒.

图 9 分别是直流反接下的焊缝及横截面形貌, 从图中可以明显看到, 焊缝两侧都存在大量的焊接飞溅颗粒.

为了对比极性对熔深、余高、熔宽的影响, 分别测量了焊缝的余高、熔深、熔宽, 得到图 10~图 12.

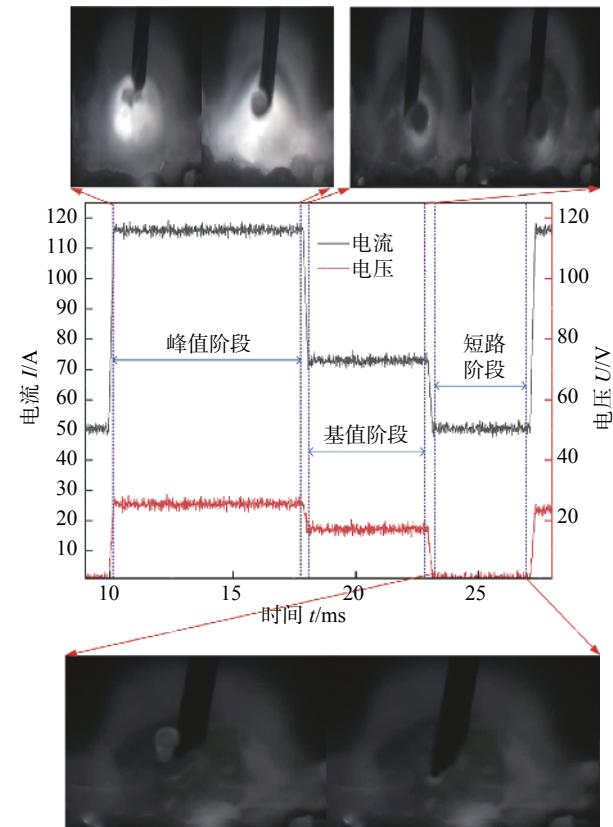


图 6 送丝速度为 5 m/min 时电信号波形图及熔滴过渡过程  
Fig. 6 Electric signal waveform and droplet transfer process at 5 m/min wire feeding speed

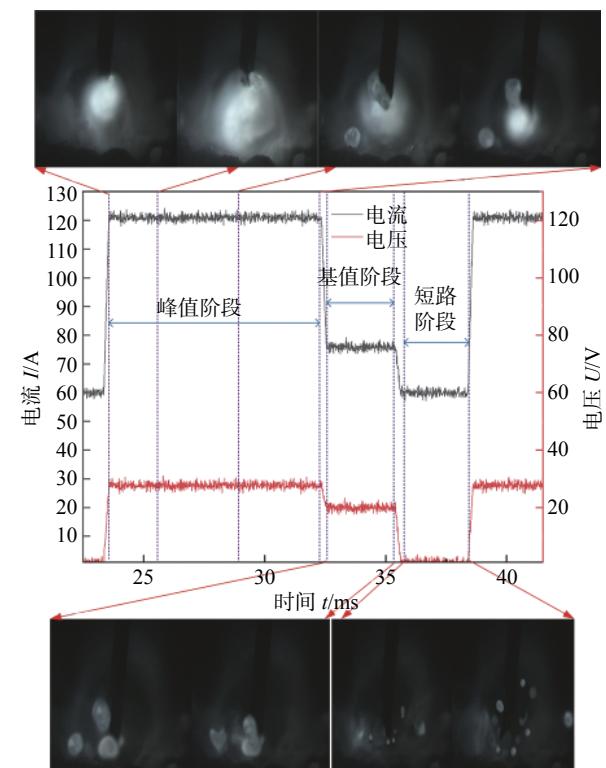


图 7 送丝速度为 6 m/min 时电信号波形图及熔滴过渡过程  
Fig. 7 Electric signal waveform and droplet transfer process at 6 m/min wire feeding speed

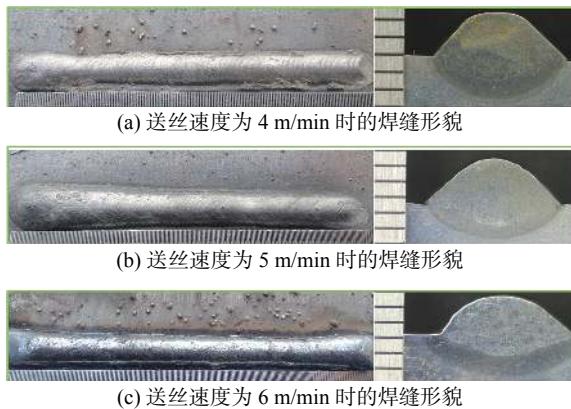


图 8 不同送丝速度下直流正接下焊缝形貌及横截面

Fig. 8 Weld beam and cross section under DCEN at different wire feeding speed. (a)  $v_f = 4 \text{ m/min}$ ; (b)  $v_f = 5 \text{ m/min}$ ; (c)  $v_f = 6 \text{ m/min}$

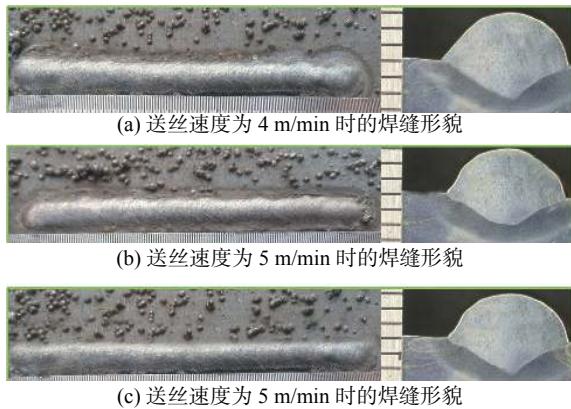


图 9 直流反接下焊缝形貌及横截面

Fig. 9 Weld beam and cross section under DCEP at different wire feeding speed. (a)  $v_f = 4 \text{ m/min}$ ; (b)  $v_f = 5 \text{ m/min}$ . (c)  $v_f = 6 \text{ m/min}$

从图 10 可以看到,随着送丝速度的增加,熔深都在显著增加.主要是因为母材的热输入整体增加导致的.并且可以发现,直流正接时,焊缝的熔深始终小于直流反接情况下的焊缝熔深.从图 11 中可以看

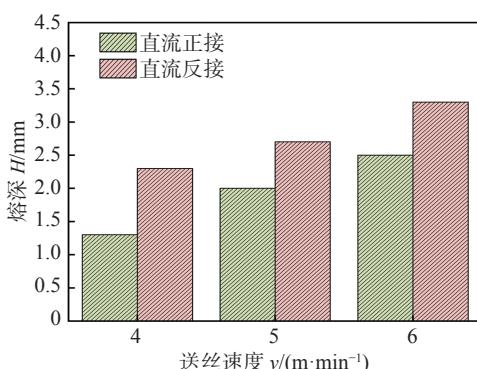


图 10 极性在不同送丝速度下对熔深的影响

Fig. 10 Effect of polarity on penetration at different wire feeding rate

到,送丝速度的增加导致焊缝的余高都在增加,其中,直流正接时焊缝余高比直流反接时的焊缝余高要高.

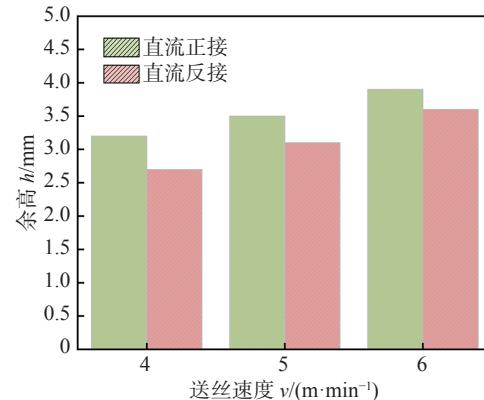


图 11 极性对不同送丝速度下余高的影响

Fig. 11 Effect of polarity on reinforcement at different wire feeding rate

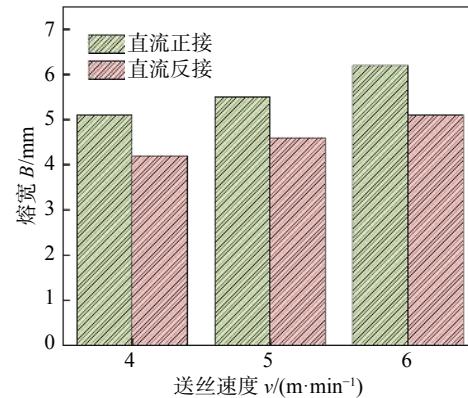


图 12 极性对不同送丝速度下熔宽的影响

Fig. 12 Effect of polarity on width at different wire feeding rate

从图 12 可以看出,熔宽随送丝速度的增加而增大.并且,相同送丝速度下,直流正接时熔宽比直流反接时的熔宽始终要大.

从以上结果观察发现,相比于直流反接条件,直流正接时,可以得到浅熔深,低余高,高熔宽的焊缝形貌特征.并且,直流正接时,焊接过程中的焊接飞溅明显要少.

### 3 极性对熔滴过渡的影响机理

熔滴过渡模式是决定焊接质量的重要因素.从以上结果发现,在 CMT 下,熔滴过渡都表现为混合过渡模式<sup>[12]</sup>.其中,不同的极性决定了峰值阶段熔滴过渡的模式.因此,极性对熔滴过渡模式的影响主要受药芯成分、斑点行为、电弧行为.

### 3.1 直流正接条件下峰值阶段熔滴过渡机理

在直流正接条件下, 峰值阶段时, 熔滴过渡的模式主要表现为射滴过渡. 其中, 电弧总会在滞融渣柱或者钢皮一侧燃烧, 由于药芯和钢皮不同的融化速度, 导致焊丝端部表现为不对称结构.

电弧在钢皮或者滞融渣柱燃烧时, 一旦形成较为明显的熔滴, 熔融的熔渣会分布在熔滴与固体焊丝连接的位置处. 其中, 熔渣中含有许多氧化物, 导致阴极斑点极易从熔滴底部上跳至于熔滴与固体焊丝的连接处, 形成导电通道, 熔滴与固体焊丝的连接处受到电磁收缩力的作用, 连接位置出现明显的缩颈现象, 同时, 熔滴受到重力和气体吹力、等离子流力的作用, 促进熔滴脱离焊丝, 形成射滴过渡的模式, 如图 13 所示. 而电磁力成为促进熔滴过渡的主要作用力.

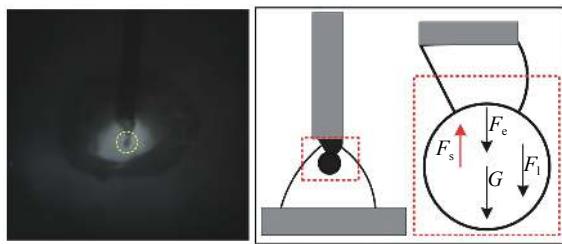


图 13 峰值阶段下熔滴过渡时的受力模型

Fig. 13 Force model of droplet transfer at the peak stage

在短路阶段, 短路过渡是主要的过渡方式, 如图 14 所示, 焊丝尖端的熔滴在表面张力的作用下过渡到熔池, 其中熔滴与熔池的表面张力大于熔滴与固体焊丝的表面张力, 短路阶段表面张力成为促进熔滴过渡的主要促进力. 但是在焊丝尖端接触熔池时, 也极易发生爆炸飞溅, 而具体的机理解释将在下一章进行解释.

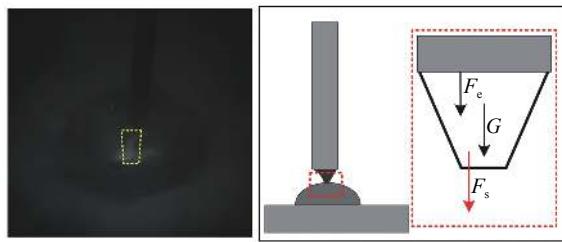


图 14 短路阶段下熔滴过渡时的受力模型

Fig. 14 Force model of droplet transfer in short circuit stage

### 3.2 直流反接条件下的熔滴过渡机理分析

在直流反接条件下, 峰值阶段时, 熔滴过渡的模式并未随送丝速度的增加而改变, 表现为大滴排斥过渡模式. 图 15 为大滴排斥过渡下熔滴的受力

分析, 其中, 导致熔滴过渡受到的主要阻力为电磁力  $F_e$ 、表面张力  $F_s$ 、斑点压力  $F_a$ , 而重力  $G$  和等离子流力  $F_l$  成为主要促进熔滴过渡的力. 同时, 在焊丝向上“拉”的过程中, 熔滴受到的惯性力方向与重力方向相同, 成为促进熔滴的作用力. 在焊丝向下“推”的过程中, 熔滴受到惯性力  $F_m$  方向与重力方向相反, 成为阻碍熔滴过渡的作用力. 同时发现, 电弧弧根位置始终可以稳定在熔滴底部燃烧, 主要是由于熔滴底部燃烧, 导致熔滴底部存在大量纯金属蒸汽, 形成高温区, 使熔滴底部接受电子并且更容易成为主要的导电截面, 出现典型的阳极斑点. 而熔渣主要分布在焊丝与熔滴的连接处, 其中熔渣的主要成分是氧化物, 所以随着电流的增大, 电弧弧根位置不易上爬至焊丝与熔滴的连接处, 导致阳极斑点总会在熔滴底部出现. 这也是导致熔滴尺寸持续长大, 熔滴过渡模式表现为排斥过渡的主要原因.

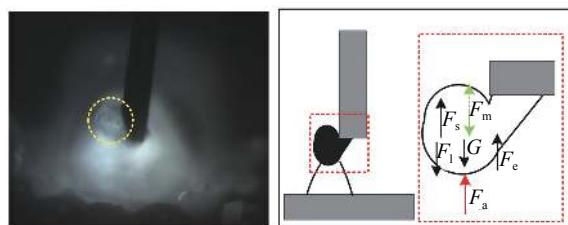


图 15 燃弧条件下熔滴过渡的受力模型

Fig. 15 Force model of droplet transfer under burning arc

如图 16 所示, 短路阶段时, 熔滴过渡的主要模式是短路过渡. 过渡过程平稳, 主要依靠表面张力促使熔滴过渡, 同时焊丝回抽, 迅速拉断液桥, 避免了短路过程中电流激增导致的短路液桥爆断. 该短路过程在焊接过程中也较为稳定.

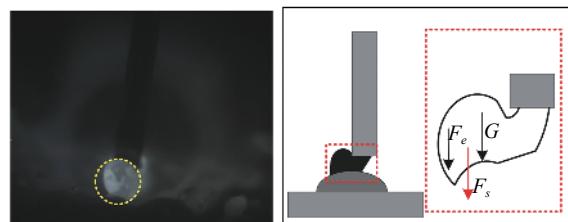


图 16 熄弧条件下熔滴过渡的受力模型

Fig. 16 Force model of droplet transfer under extinguished arc

## 4 飞溅机理分析

### 4.1 爆炸型飞溅机理分析

观察图 8 分析发现, 直流正接时, 焊缝两侧基本没有飞溅颗粒, 但是, 当送丝速度为 6 m/min 时, 焊缝两侧明显出现飞溅颗粒. 这主要是由于短路阶

段的爆炸型飞溅导致。爆炸型焊接飞溅现象主要出现在直流正接条件下的短路阶段。当药芯焊丝接触熔池时,焊丝前端有残余的金属液柱,其中,液柱先接触熔池,形成短路阶段,由于液柱的直径较细,并且焊丝处于向下运动的状态,液柱很难被拉断重新燃弧,并且根据电信号波形图发现,短路阶段的时间明显达到其他短路阶段时间的两倍,导致热积累增多,通过液柱的电流激增,产生液柱的爆断现象,形成飞溅。同时,也会有少量滞融的渣柱掉落到熔池,其中,渣柱的主要成分是造渣剂和造气剂,渣柱短时间内会在熔池内部发生激烈的冶金反应,产生大量气体,使熔池爆炸,形成飞溅。

#### 4.2 排斥型飞溅机理分析

从图9分析发现,直流反接时,焊缝两侧存在大量飞溅颗粒,导致这种飞溅的主要原因是排斥型飞溅。其中,排斥型飞溅主要出现在直流反接条件下的峰值阶段。主要是由于熔滴脱离焊丝时,熔滴受到的合力方向明显偏离于焊丝的轴向,导致部分熔滴未能完全进入熔池,从而在焊缝两侧形成明显的飞溅大颗粒,严重影响焊接质量。

### 5 结论

(1) 在直流正接条件下,熔滴过渡的模式主要是射滴过渡和短路过渡的混合过渡模式。在直流反接条件下,熔滴过渡的模式主要是大滴排斥过渡和短路过渡的混合过渡模式。随着焊接参数的增加,不同极性下熔滴过渡的模式并未发生改变。

(2) 在直流正接条件下,峰值阶段中,由于熔融的熔渣中存在大量氧化物,并且主要分布在焊丝与熔滴的连接处,导致电弧极易上爬至连接处,包裹熔滴,使熔滴过渡受到较大促进力,形成射滴过渡。

(3) 在直流反接条件下,峰值阶段中,由于熔滴底部燃烧存在大量的纯金属蒸气,导致电弧弧根始终位于熔滴底部,使熔滴尺寸持续长大,受到较大阻力,熔滴过渡困难,表现为大滴排斥过渡,也是导致飞溅的主要原因。

(4) 在直流正接条件下,由于在短路过渡阶段中,短路时间的增加以及滞融渣柱在熔池内的冶金反应,成为爆炸飞溅的主要原因。

### 参考文献

- [1] Zhu Z, Fan K, Liu H, et al. Characteristics of short-circuit behaviour and its influencing factors in self-shielded flux-cored arc welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2016, 21(2): 91–98.
- [2] Liu H Y, Li Z X, Li H, et al. Study on metal transfer modes and welding spatter characteristics of self-shielded flux cored wire[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 13(8): 777–780.
- [3] Feng J, Zhang H, He P. The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding[J]. Mater Design, 2009, 30(5): 1850–1852.
- [4] Lei Z, Li B, Bi J, et al. Influence of the laser thermal effect on the droplet transfer behavior in laser-CMT welding[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 120: 1–10.
- [5] Liang Y, Hu S, Shen J, et al. Geometrical and microstructural characteristics of the TIG-CMT hybrid welding in 6061 aluminium alloy cladding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 239: 18–30.
- [6] Pickin C G, Williams S W, Lunt M. Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(3): 496–502.
- [7] Derekar K S, Addison A, Joshi S S, et al. Effect of pulsed metal inert gas (pulsed-MIG) and cold metal transfer (CMT) techniques on hydrogen dissolution in wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminium[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(1): 311–331.
- [8] Liu D, Liu R, Wei Y. Effects of titanium additive on microstructure and wear performance of iron-based slag-free self-shielded flux-cored wire[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 207: 579–586.
- [9] Zhang T, Li Z, Kou S, et al. Effect of inclusions on microstructure and toughness of deposited metals of self-shielded flux cored wires[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 628: 332–339.
- [10] Xu C, Guo N, Zhang X, et al. Internal characteristic of droplet and its influence on the underwater wet welding process stability, (2020) 116593.
- [11] Chen H, Guo N, Shi X H, et al. Effect of water flow on the arc stability and metal transfer in underwater flux-cored wet welding[J]. J Manuf Process, 2018, 31: 103–115.
- [12] Pang J, Hu S, Shen J, et al. Arc characteristics and metal transfer behavior of CMT+P welding process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 238: 212–217.

第一作者:张恒铭,博士研究生;主要从事焊接过程控制研究;Email: Zhm564145007@163.com。

通信作者:石玕,教授,博士研究生导师;Email: shiyu@lut.cn。

(编辑: 张基隆)