

# SAF2507 超级双相不锈钢 CMT+P 熔滴过渡特性

黄瀚川<sup>1</sup>, 徐连勇<sup>1,2</sup>, 荆洪阳<sup>1,2</sup>, 吕小青<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072; 2. 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300072)

**摘 要:** 采用焊接电信号采集系统与高速摄像系统对 SAF2507 超级双相不锈钢 CMT + P(冷金属过渡 + 脉冲) 熔滴过渡过程进行观测研究. 分析了 CMT 与 CMT + P 过程在不同送丝速度  $WFS$  下的熔滴过渡行为、波形变化机理与能量输入特征, 揭示了 CMT + P 熔滴过渡特性. 结果表明: CMT + P 实际波形图与理论上有多处不同; 熔滴形状与尺寸、过渡形式、熔池的波动状态、焊丝端部到工件的距离及飞溅等都能影响电压的波动, 电压波形图可以用来指导分析熔滴过渡行为; 脉冲阶段对热输入起主要影响作用, 调节脉冲峰值电流、脉冲基值电流、脉冲个数, 可实现热输入的控制.

**关键词:** 冷金属过渡; 脉冲; 超级双相不锈钢; 熔滴过渡; 热输入

**中图分类号:** TG 444 **文献标识码:** A **doi:** 10. 12073/j. hjxb. 2019400274

## 0 序 言

SAF2507 超级双相不锈钢为 90 年代初期发展的第三代双相不锈钢, 这类钢的特点是含碳量低, 含高钼和高氮, 钢中铁素体含量 40% ~ 45%, 并具有良好的耐点蚀性能, PREN 值 (耐点蚀当量数) 为 40 ~ 45. SAF2507 不仅耐应力腐蚀破裂, 同时可以适应海水、高 Cl<sup>-</sup> 溶液等较苛刻的环境, 在中海石油 (中国) 有限公司的油气田设备管线系统中有所应用.

焊条电弧焊 (SMAW)、钨极氩弧焊 (GTAW) 埋弧焊 (SAW)、熔化极气体保护焊 (GMAW) 是双相不锈钢常见的焊接方法<sup>[1]</sup>. 其中, 钨极氩弧焊 (GTAW) 用于打底层和薄壁材料的焊接, 可以获得高质量的焊缝金属. SAF2507 双相不锈钢焊接时应采用小电流, 快速焊, 输入热量应控制在 0.5 ~ 1.5 kJ/mm<sup>[2]</sup>, 以保证焊缝中铁素体相与奥氏体相的比例达到平衡.

CMT(冷金属过渡技术) 是一种先进的数字化焊接技术<sup>[3-6]</sup>. 之后 Fronius 公司又将 CMT 与脉冲 P 进行结合, 实现了 CMT 过渡与脉冲过渡的交替混合过渡 (即 CMT + P, 冷金属过渡 + 脉冲). CMT + P 焊接具有众多的优点: 与 GMAW 相比, 焊接过程稳定并且无飞溅; 与 GTAW 相比, 焊接效率很高.

CMT + P 能准确控制热输入大小, 可满足 SAF2507 焊接时对热输入的要求.

文中采用焊接电信号采集系统与高速摄像系统对 SAF2507 钢板 CMT + P 熔滴过渡过程进行观测研究. 分析了 CMT 与 CMT + P 过程在不同送丝速度  $WFS$  下的熔滴过渡行为、波形变化机理与能量输入特征, 揭示了 CMT + P 熔滴过渡特性, 为 CMT + P 焊接工艺优化奠定了基础.

## 1 试验方法

试验设备组成原理图如图 1 所示. 电信号采集系统中, 数据采集卡使用的采样频率为 8 000 Hz, 用来获得焊接电流与焊接电压波形图. 试验中使用 FASTCAM Mini UX100 高速摄影机, 采样频率为 4 000 fps, 用来拍摄熔滴过渡行为的高速摄影图像; FC-W-808-40W 激光器作为背光光源, 并使用 808 nm 滤光片来滤掉杂光. 焊接的工件为 8 mm 厚的 SAF2507 板材 (250 mm × 80 mm), 由恒速移动工作台控制其水平移动. 焊接电源为 CMT Advanced 4000, 由 FANUC M-10iA/12 焊接机器人进行施焊. 为了结合高速摄影的拍摄, 需要焊枪保持不动, 故由恒速移动工作台来控制工件移动, 其焊接速度为 5 mm/s. 试验使用的焊丝为 ER2594, 其直径为 1.0 mm. 用 97.5% Ar + 2.5% CO<sub>2</sub> 作为保护气, 气流速率为 15 L/min, 喷嘴到工件的距离 15 mm.

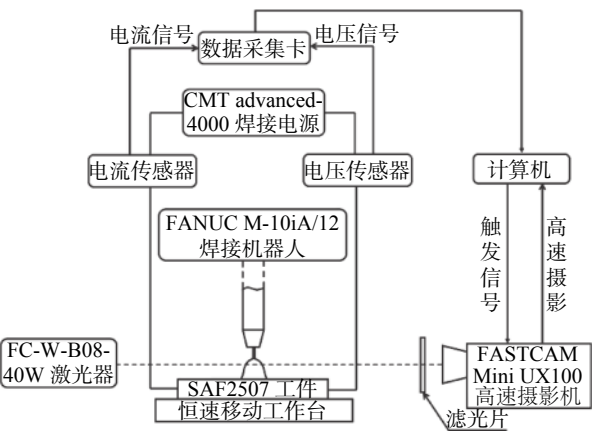


图 1 试验设备组成原理图  
Fig. 1 Schematic of the experimental set-up

试验中,焊接过程通过焊机的 RCU 5000i 控制面板进行控制,选择 CrNi199 的 CMT 与 CMT + P 专家程序来进行施焊(选择 CMT + P 模式,即可在 CMT 中加入脉冲电流,从而提高热输入).整个焊接过程为一元化焊接,试验过程中只需要改变送丝速度  $WFS$ (此送丝速度为程序中特征曲线的指导值),具体试验参数如表 1 所示;在之前做的准备试验中,得出焊接速度为 5 mm/s 较为合适. CMT 与 CMT + P 模式下,不同的送丝速度  $WFS$  分别代表着特征曲线中所有特征参数的不同组合,主要的特征参数 2.1 小节中标出. 试验之后,对焊缝进行线

切割切样,然后磨金相;采用配制的 60 mL  $H_2O$  + 30 mL  $HCl$  + 1 g  $K_2S_2O_5$  腐蚀剂,侵蚀时长为 30 s;最后用金相显微镜来观察焊缝的宏观形貌.

表 1 焊接参数			
Table 1 Welding parameters for each sample			
编号	焊接方法	送丝速度 $WFS/(m \cdot min^{-1})$	焊接速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$
1	CMT	3	5
2	CMT	4	5
3	CMT	5	5
4	CMT	6	5
5	CMT + P	3	5
6	CMT + P	4	5
7	CMT + P	5	5
8	CMT + P	6	5
9	CMT + P	7	5
10	CMT + P	8	5

## 2 试验结果与分析

### 2.1 CMT 与 CMT + P 焊接工艺的过程控制

图 2 为典型的 CMT + P 焊接过程原理图. 完整的 CMT + P 焊接循环包括一个脉冲阶段和一个

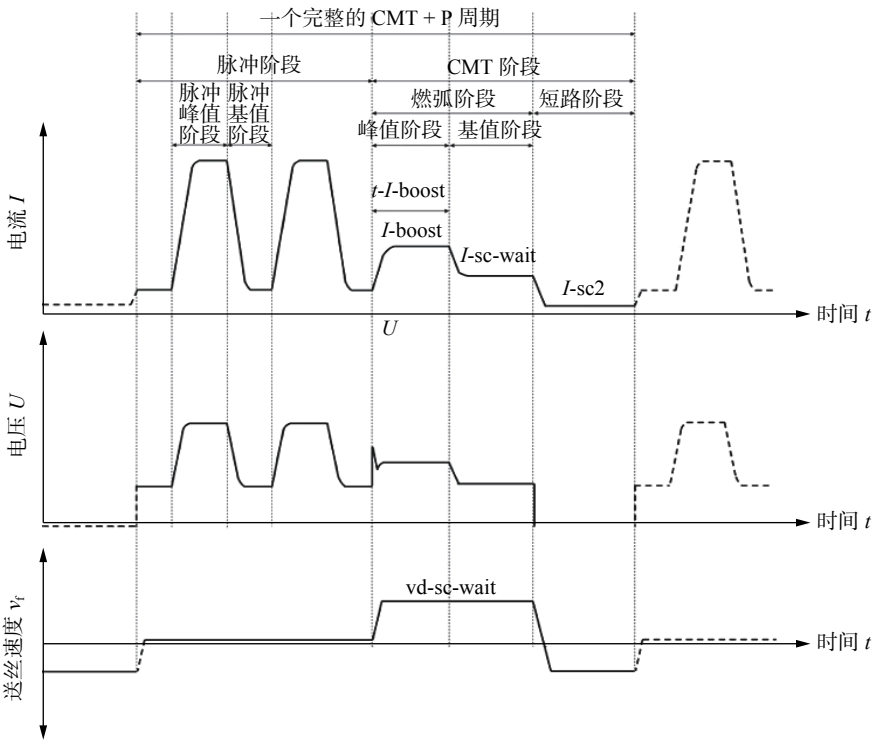


图 2 典型的 CMT + P 焊接过程原理图  
Fig. 2 Schematic of a typical CMT + P welding process

CMT 阶段. 在 CMT 阶段, 有五个特征参数:  $I_{\text{boost}}$  (A),  $t_{\text{-}I_{\text{boost}}}$  (ms),  $I_{\text{sc-wait}}$  (A),  $v_{\text{f-sc-wait}}$  (m/min),  $I_{\text{sc2}}$  (A). 其中  $I_{\text{boost}}$  为峰值电流;  $t_{\text{-}I_{\text{boost}}}$  为峰值持续时间;  $I_{\text{sc-wait}}$  为基值电流;  $v_{\text{f-sc-wait}}$  为送丝速度;  $I_{\text{sc2}}$  为短路电流. 整个 CMT 过程可以分为三个阶段: 峰值阶段、基值阶段和短路阶段, 峰值阶段与基值阶段统称为燃弧阶段; 这三个阶段分别对应了加热、冷却和快速冷却三个过程. 脉冲阶段包含脉冲峰值阶段和脉冲基值阶段; 脉冲个数可以被设置. 文献 [7-8] 对 CMT 与 CMT + P 焊接循环的过程控制进行了详细描述.

## 2.2 实际的 CMT 过程分析

### 2.2.1 短路前期阶段

CMT 焊接循环过程的电流电压波形图如图 3 所示, 所有的波形图都经过了中值滤波的优化. 不同  $WFS$  下的 CMT 熔滴过渡行为的高速摄影图像如图 4 所示.

当  $WFS = 3 \text{ m/min}$  时, 图像比较稳定, 呈现出典型的 CMT 过渡过程. 图 3a 中, 实际的 CMT 过程中,  $I_{\text{sc2}}$  其实是控制短路过渡过程中焊丝回抽的时候的电流值大小. 把焊丝端部熔滴刚接触到熔池

直到焊丝刚开始发生回抽这个阶段定义为短路前

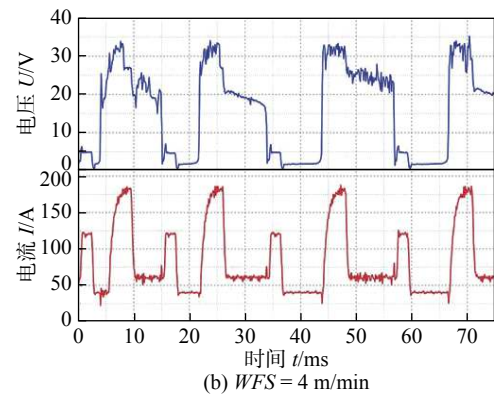
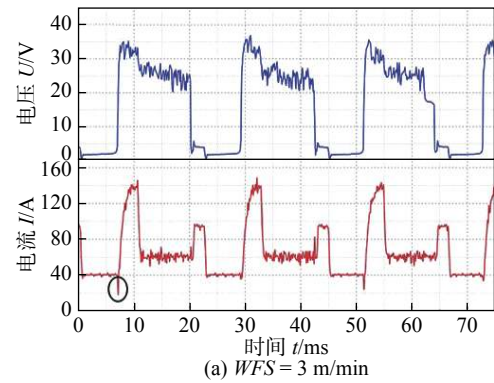
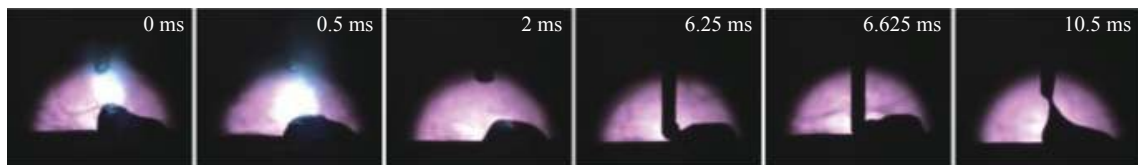
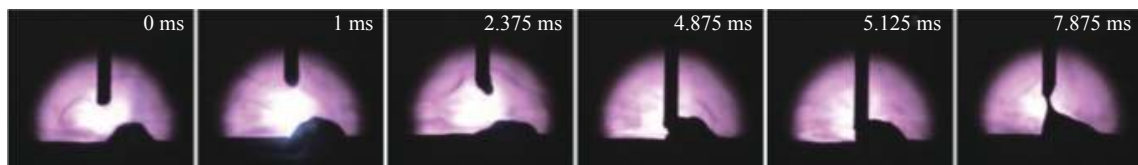


图 3 CMT 的实际波形图

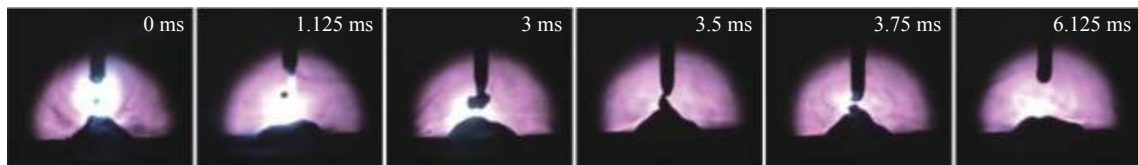
Fig. 3 Actual waveforms of CMT



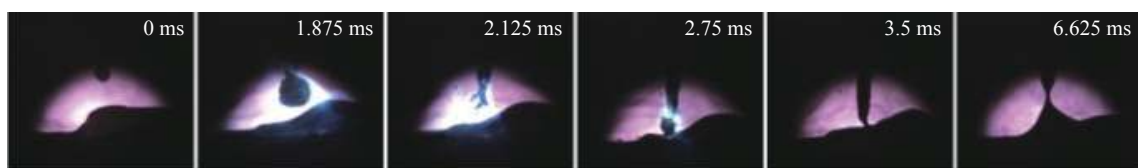
(a)  $WFS = 3 \text{ m/min}$



(b)  $WFS = 4 \text{ m/min}$



(c)  $WFS = 5 \text{ m/min}$



(d)  $WFS = 6 \text{ m/min}$

图 4 CMT 的熔滴过渡行为

Fig. 4 Metal transfer behaviors of CMT



期阶段,此时电流值大小并不可控制.短路前期阶段电流值会回升,这是因为焊丝端部接触到熔池时,形成一个闭合回路,短路后电阻大幅减小,使得电流突然变大.短路阶段结束时,液态金属桥刚破断,电流有一个轻微向下的波动(图 3a 画圈处).这是因为闭合回路突然断开,电阻猛然增大,导致电流迅速下降.而焊接电源接收到破断的信号后,马上开始增大电流,快速达到  $I$ -boost,这样下一个 CMT 循环开始进行.

### 2.2.2 电压扰动的分析

当  $WFS = 4 \text{ m/min}$  时,图 3b 中的第一个周期电压波形极不稳定,其熔滴过渡高速摄影图片如图 4b 所示.可以看出,在上一个 CMT 周期短路阶段结束前,液态金属桥即发生破断,导致电压突然上升,而此时电流仍为短路阶段电流  $I_{sc2}$ .电压的突然上升,加快了下一个 CMT 循环的到来.结合波形图与图像分析得出,电压波形与焊丝端部熔滴与熔池的距离有关,当焊丝端部熔滴形状不稳定,或液态熔池受电弧力作用而波动较大时,电压会有较大波动,即造成电压波形图的扰动.

### 2.2.3 基值阶段、短路阶段的时长与热输入

图 3b 中最长的 CMT 周期 (22 ms) 近乎是最短周期时长 (15 ms) 的 1.5 倍.其中,基值阶段的时长与短路阶段的时长均不一样,这两个时长不可设置,由实际焊接情况所决定.这两个时长的不稳定,会直接导致每个周期热输入的不稳定,从而导致整个焊接过程不稳定.结合波形图总结得出,影响 CMT 周期时长的主要因素为基值阶段时长和短路阶段时长;峰值阶段时长由电源设置而定;短路前期阶段时长基本稳定,影响不大.

从图 3 上来看,不稳定主要体现在电压的扰动与每个周期基值阶段、短路阶段的时长上;从图 4 上来看,不稳定主要表现为熔滴的形状不规则与尺寸变大、提前短路与提前分离熔池、爆破与飞溅等.综上,当送丝速度变大时,其焊接过程会变得极不稳定.所以通过提高 CMT 过程的送丝速度来提高热输入从而实现 SAF 2507 钢板的焊接是行不通的.

## 2.3 实际的 CMT + P 过程分析

### 2.3.1 电流波形图的特征

把电流脉冲引入到常规的 CMT 过程中,熔滴过渡行为将受到脉冲的控制.这样一来,不仅整个循环过程的热输入有所提升,CMT 焊接的优点也能保持在整个 CMT + P 过程中,尤其是焊接稳定和

无飞溅的优点.从图 5 可以看出 CMT + P 的周期为 90 ms 左右,一个 CMT 过程后接有 5 个脉冲,每个脉冲周期约为 10 ms;CMT 模式在同样的  $WFS$  下,周期为 20 ms 左右(图 3),可见整个 CMT + P 的周期有显著增加.

实际的 CMT + P 过程,与典型的 CMT + P 过程有所不同,如图 5 所示,具体表现如下.

(1) CMT 阶段中并没有明显的峰值阶段;而是脉冲阶段最后一个脉冲结束后,电流直接下降到一个较脉冲基值电流较高的值(圈 1).这是因为脉冲阶段过后电弧仍然在燃烧,以至于不需要高的电流再次点燃电弧,熔滴由热惯性即可形成.

(2) CMT 的短路阶段中,实际的短路阶段电流要比基值阶段的电流高,这与典型的 CMT 过程有所不同.这是因为使用的是 CrNi199 的程序,该材料熔融状态下粘度较大,为了保证焊接过程中焊缝成形良好,润湿性较好,应避免焊缝金属过快冷却,因此需要一个较高的短路电流,以保证金属的流动性.图 5 并没有出现上文所提到的短路前期阶段;这是因为此时短路前期阶段的电流刚好与预设的短路阶段电流一样,所以波形图上电流位于同一水平上(圈 2).

(3) 短路阶段结束后,在下一个周期的脉冲阶段开始前,出现了一个电流比脉冲基值阶段电流较高的阶段,定义此为脉冲阶段的预热阶段(圈 3).此较高电流的目的是对脉冲阶段开始前的焊丝进行预热,以至于电弧在脉冲阶段是稳定的.在短路阶段结束时,与实际的 CMT 过程一样,液态金属桥刚破断,电流会有一个轻微向下的波动;紧接着,在预热阶段开始前,电流会有一个较高的短暂脉冲(圈 4),这是因为焊接电源接受到液态金属桥破断的信号,使得电流迅速提升,然后再快速稳定到预热阶段的电流值,这存在一个反馈过程,需要短暂的时间,所以会出现一个短暂的电流脉冲.

### 2.3.2 电压波形图与熔滴过渡行为

当  $WFS = 3 \text{ m/min}$  时,从图 5 电压波形图来看,焊接过程是不稳定的.在图中第一个完整的 CMT + P 周期的电压波形图的脉冲阶段,第二个与第三个脉冲时,出现了波形的扰动(圈 4,圈 5).这是因为第二个脉冲时,形成了一个巨大的熔滴,比其他脉冲正常大小都大,在电流预设一定的情况下,电压会发生变化;第三个脉冲中的电压扰动,则是因为熔滴过渡时电弧间出现了小滴的飞溅.但脉冲阶段整体上呈现一脉冲一滴,所以脉冲过程还算稳定.短路阶段正常

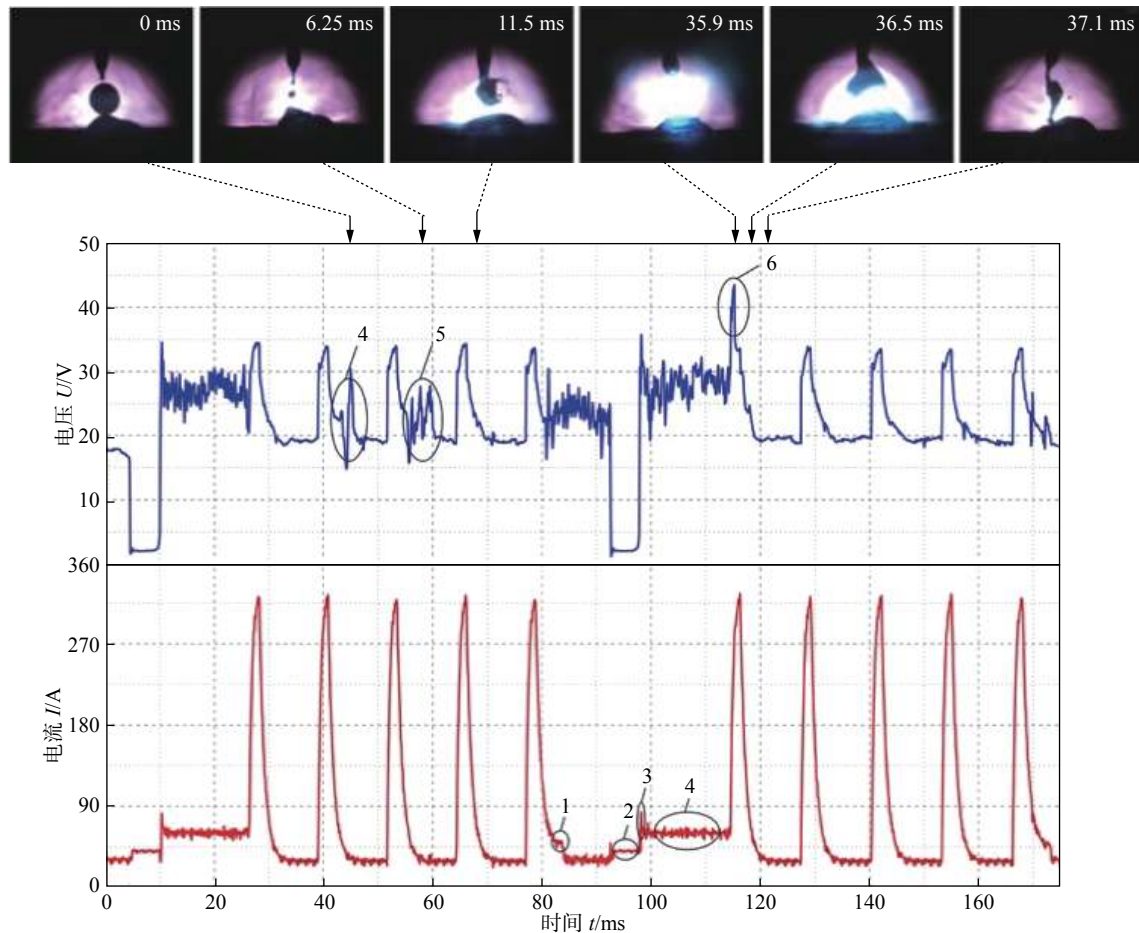


图 5 CMT + P 的波形图与熔滴过渡行为

Fig. 5 Waveforms and metal transfer behaviors

进行。预热阶段结束时,下一个脉冲阶段的第一个脉冲开始前,有一个较高的电压脉冲(圈 6),对应于图 5 的 35.9 ms,此时弧光比其他脉冲时都亮,这是因为预热阶段造成了电弧的提前点燃,使得电压突然增大;这直接造成了下一个周期脉冲阶段第一个脉冲时,熔滴形成过大,发生一次爆破后,熔滴以不规则形状进行过渡,并伴有小液滴的飞溅。

当  $WFS = 4 \text{ m/min}$  时,分析图 6 中的第一个周期,电压波形图基本稳定,只是在最后一个脉冲时出现了电压的短暂骤降(圈 1);这是因为此时熔滴在过渡时,尾部残留金属液体过长,导致熔滴在电弧中,把熔池与焊丝端部连接了起来,发生短路,导致电压的短暂骤降(图 6 的 8.875 ms)。从后一个周期可以看出,仍然出现了两次电压的骤降,这表明在脉冲阶段发生短路并不是偶然现象。所以当  $WFS = 4 \text{ m/min}$ ,会较高频率的发生短路过渡,并且熔滴形状并不是典型的滴装过渡形状,有点像射流过渡,此时的脉冲阶段是不稳定的。从图 6 的后两幅高速摄影图可以看出,这时为短路阶段结束后下一个

CMT + P 周期脉冲阶段开始前的预热阶段,电压从不稳定变到稳定,不稳定阶段为起弧及熔滴缓慢形成的过程,稳定阶段为熔滴大小基本稳定的状态。图 6 前三幅高速摄影图为正常电压波形下的第 4 个脉冲的高速摄影图像,可以看出,  $WFS = 4 \text{ m/min}$  时脉冲阶段的典型过渡为熔滴呈现细长的椭圆形,熔滴脱离焊丝端部后过渡向熔池时,尾部会拖出较长的液态金属丝,过渡继续进行,会伴有金属小液滴飞溅;当液态金属丝足够长时,即会发生上述的短路过程,电压发生短暂的骤降。

结合图 5 和图 6,总结得出:当脉冲阶段电压发生短暂骤降的扰动时,一般是因为熔滴尾部的液态金属拉丝过长或达到极限情况(发生短路);而当电压发生短暂向上的扰动时,一般是因为电弧中存在残留的小的金属液滴,即产生了飞溅。

由上文得知,电流波形图是电源预设决定的,只有基值阶段时长和短路阶段时长不可设置,受实际情况影响;而电压波形图的扰动,是由实际情况得到的,可以用来指导分析熔滴的过渡行为;熔滴

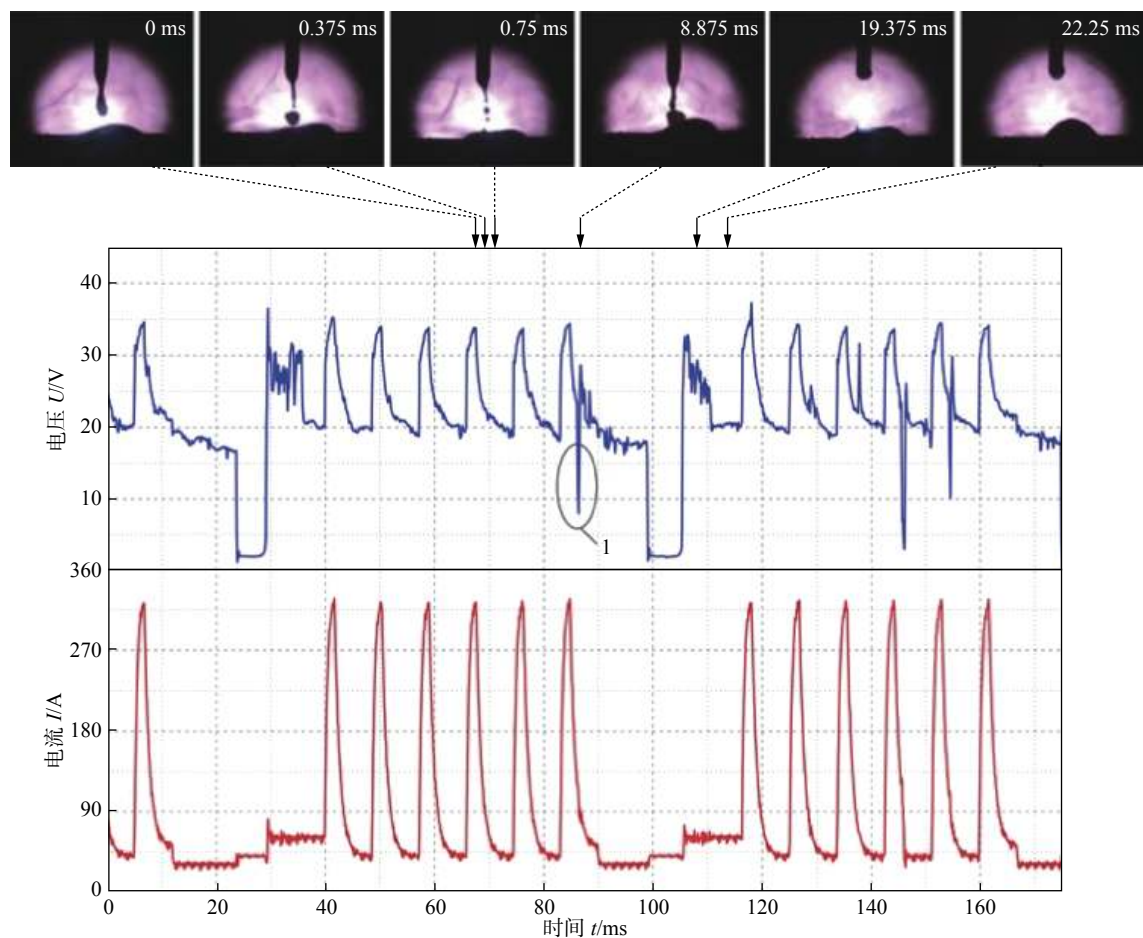


图 6 CMT + P 的波形图与熔滴过渡行为

Fig. 6 Waveforms and metal transfer behaviors

形状、尺寸、过渡形式、熔池的波动状态、丝端部到工件的距离及飞溅等都能影响电压的波动。

当  $WFS = 5 \text{ m/min}$  时, 脉冲阶段电压波形图依然出现了上述的扰动 (图 7), 并通过高速摄影图像验证了  $WFS = 3 \text{ m/min}$  与  $WFS = 4 \text{ m/min}$  时得出的结论。从图 7 可以看出, 此时的 CMT 阶段比较稳定, 预热阶段开始前, 电压都会出现一个向上的波动 (图 7 圆圈处), 这是因为短路阶段结束, 液态金

属桥破断, 导致电压的迅速增高, 然后逐渐稳定。预热阶段电压是否稳定, 与熔池的波动也有一定关系; 熔池波动越小, 电压波动越小。

当  $WFS = 6 \text{ m/min}$ ,  $WFS = 7 \text{ m/min}$ ,  $WFS = 8 \text{ m/min}$  时候, 波形图上不仅电压扰动巨大, 电压的峰值基值也不稳定, 整个波形图都不稳定, 故其特征参数没有参考价值。

图 8 为  $WFS = 5 \text{ m/min}$ ,  $WFS = 6 \text{ m/min}$ ,  $WFS = 7 \text{ m/min}$ ,  $WFS = 8 \text{ m/min}$  的脉冲阶段熔滴的典型过渡形式的图片, 可以看出, 都不是稳定的一脉一滴过渡; 随着送丝速度的增大, 经常会出现一脉多滴的现象, 并且容易发生短路过渡或者熔滴过大而爆破。

从高速摄影图像观察得出, CMT + P 焊接过程的不稳定主要出现在脉冲阶段, CMT 过程基本稳定。

### 2.3.3 波形图与热输入

CMT + P 过程每个阶段的平均功率可由式 (1) 计算; 其中  $U_i$  与  $I_i$  为每个阶段的电压、电流的瞬时值,  $n$  为每个阶段中所取样本点的个数。

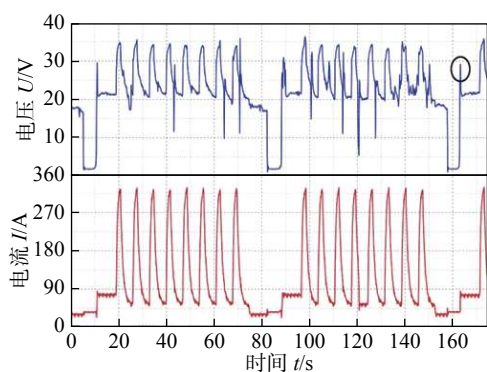


图 7 CMT + P 的实际波形图

Fig. 7 Actual waveforms of CMT + P ( $WFS = 5 \text{ m/min}$ )



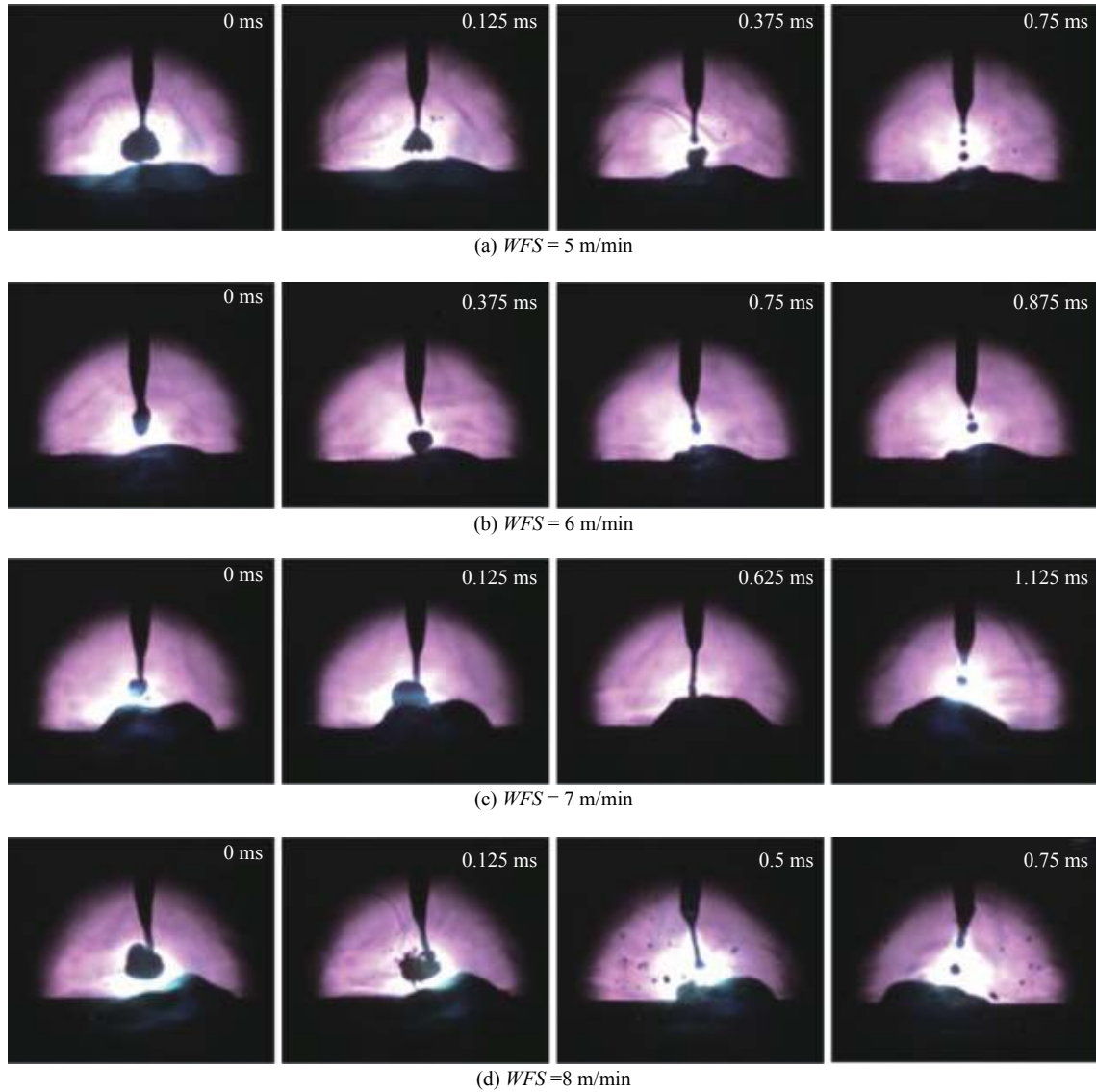


图 8 CMT + P 脉冲阶段的熔滴过渡行为  
Fig. 8 Metal transfer behaviors of CMT + P

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i I_i \quad (1)$$

整个 CMT + P 过程的平均功率  $P_{\text{总}}$  可以由式 (2) 计算; 其中  $P_1, T_1, P_2, T_2, P_3, T_3, P_4, T_4, P_5, T_5$  分别为脉冲峰值阶段, 脉冲基值阶段, CMT 的峰值阶段、基值阶段、短路阶段的平均功率与持续时长,  $T_{\text{总}}$  为整个 CMT + P 过程的总时长, 由式 (3) 计算; 其中  $n_1$  为脉冲阶段的脉冲个数。

$$P_{\text{总}} = (P_1 T_1 n_1 + P_2 T_2 n_1 + P_3 T_3 + P_4 T_4 + P_5 T_5) / T_{\text{总}} \quad (2)$$

$$T_{\text{总}} = (T_1 + T_2) \times n_1 + T_3 + T_4 + T_5 \quad (3)$$

一个 CMT + P 循环的热输入可以用式 (4) 计算。其中  $\eta$  为电弧热效率;  $v$  为焊接速度。Azar 建议<sup>[9]</sup> CMT 焊接中电弧热效率取 70% ~ 80%。

$$HI = \eta UI / v = \eta P_{\text{总}} / v \quad (4)$$

不同 WFS 下的热输入如表 2 所示。以 CMT + P 的 WFS = 5 m/min 为例, 结合高速摄影图像与波形图计算得出: 脉冲阶段的热输入为 538.66 J/mm, CMT 阶段的热输入为 37.70 J/mm。从具体数值看, 脉冲阶段的热输入比 CMT 阶段的热输入大的多, 所以起主要影响作用的是脉冲阶段。又因为 CMT 阶段基本稳定, 实际应用中只需要重点优化脉冲阶段的特征参数。从 2.3.2 节可以看出, 随着送丝速度变化, 脉冲峰值电流、脉冲基值电流、脉冲个数随之改变。所以脉冲阶段中, 改变这三个特征参数, 即可实现热输入的控制; 当脉冲峰值电流与脉冲基值电流一定时, 只需要改变脉冲个数, 就能准确控制热输入。因此, 优化特征曲线时, 首先需要找到合适的脉冲峰值电流与基值电流, 以保证熔滴过渡尽可

能稳定 (即电压扰动尽可能小), 然后调节脉冲个数, 使热输入控制在材料要求的范围内。

表 2 不同送丝速度  $WFS$  的热输入  
Table 2 Heat input with different  $WFS$

送丝速度 $WFS/(m \cdot min^{-1})$	焊接方法	脉冲个数 $n_1$	CMT个数 $n$	热输入 $Q/(J \cdot mm^{-1})$
3	CMT + P	5	1	327.36
4	CMT + P	6	1	454.24
5	CMT + P	8	1	576.37
6	CMT + P	9	1	716.83
7	CMT + P	15	1	889.96
8	CMT + P	36	1	1 130.76

#### 2.3.4 焊缝横截面

焊缝横截面的宏观形貌如图 9 ~ 图 11 所示, 焊缝几何参数具体数值见表 3, 图 12 为熔深、熔宽折线图。随着送丝速度增大, 熔深、熔宽、接触

角基本呈现增长趋势; 而且同样的送丝速度下, CMT + P 的这三个参数均比 CMT 大得多, 这是因为脉冲阶段的热输入很高, 大幅增加了整个焊接过程的热输入。

CMT + P 过程中, 随着  $WFS$  的增加, 脉冲个数随之增加, 分别为 5, 6, 8, 9, 15, 36 个; 脉冲个数在焊缝尺寸上有着显著的影响, 因为它控制熔池的受力与热量。在高的脉冲电流下, 相对大的电弧力作用于熔池表面造成了电弧下面的液态金属稀薄, 从而提高了熔池中液态金属的流动性。电弧力指向熔池, 随着脉冲个数的提高而提高, 因此可以获得更深的焊缝熔深; 当液态金属表面在电弧压力作用下, 表面张力会沿着液态金属的切线表面拉扯熔池边缘, 脉冲个数越大, 电弧力越大, 其反作用力表面张力也会越大, 这样熔池宽度也会越大。

焊缝与母材的接触角随着送丝速度的变化

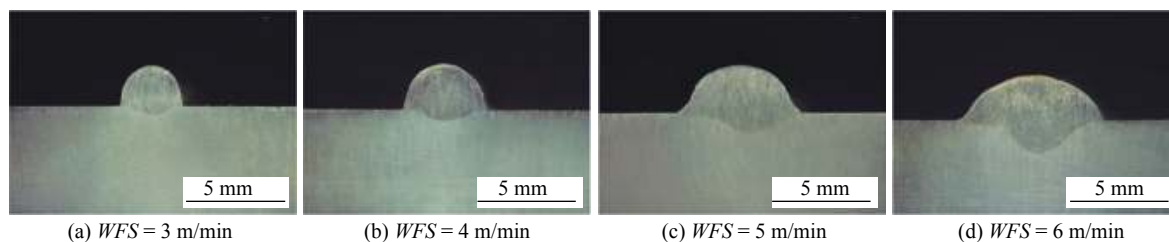


图 9 不同送丝速度下的 CMT 焊缝横截面

Fig. 9 CMT cross-sections of weld beads with different  $WFS$

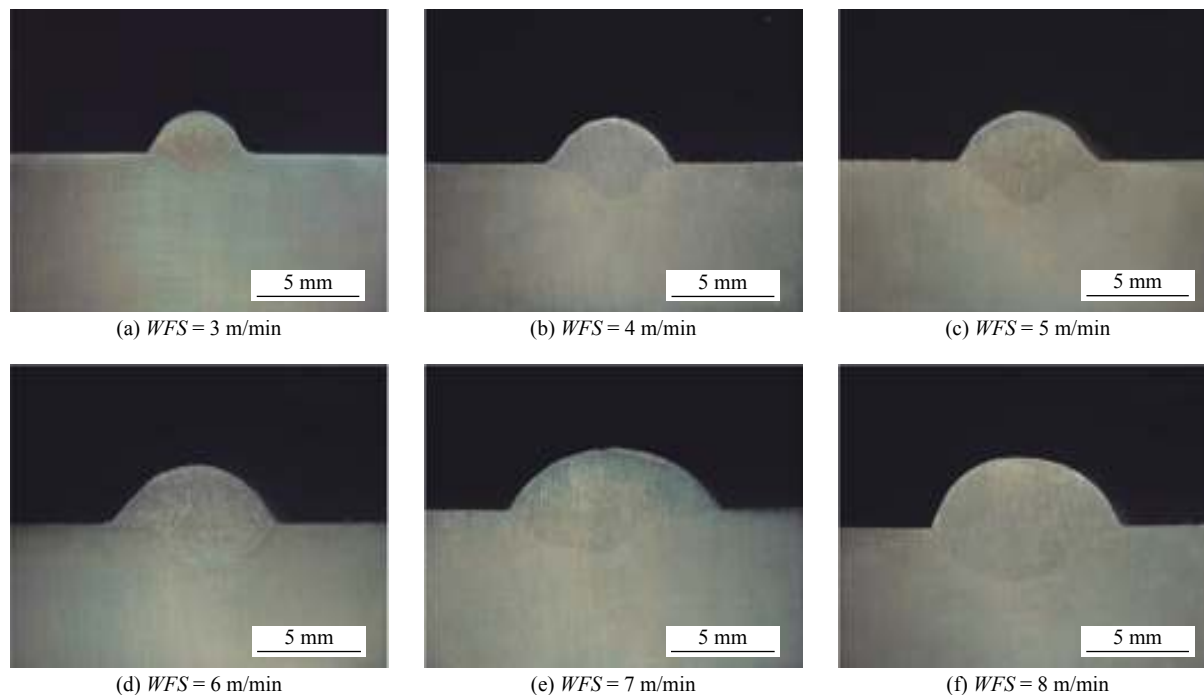


图 10 不同送丝速度下的 CMT+P 焊缝横截面

Fig. 10 CMT+P cross-sections of weld beads with different  $WFS$



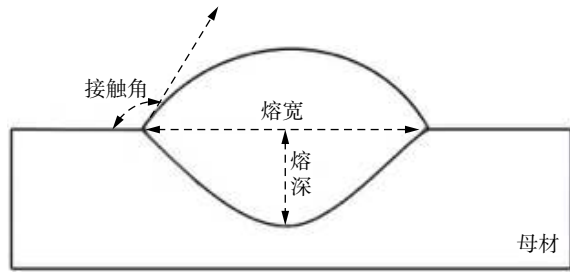


图 11 焊缝横截面示意图

Fig. 11 Schematic of weld bead

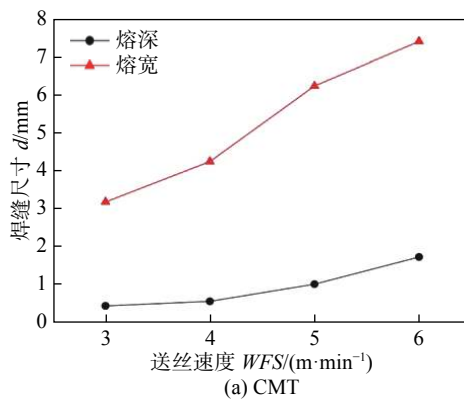
也发生显著的变化. CMT 过程中, 当送丝速度从 3 m/min 增加到 6 m/min 时, 接触角从 94°增加到 114°; CMT + P 过程中, 当送丝速度从 3 m/min 增加到 8 m/min 时, 接触角从 113°增加到 124°. 可见增加电流脉冲可以显著提升熔池的润湿性; 并且脉冲个数越多, 接触角越大, 润湿性越好. Pickin<sup>[10]</sup> 发现当接触角 < 90°时, 焊缝成形将不均匀, 熔池的润湿性也变得不好. Ola 等人<sup>[11]</sup>指出当接触角大于 115°时, 比较适合后续焊道的施焊, 能够保证较为

表 3 焊缝尺寸详细信息

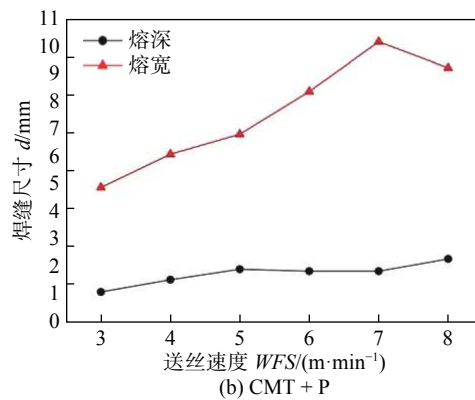
Table 3 Detailed dimensional information

编号	接触角 $\theta/(^\circ)$	熔深 $h/\text{mm}$	熔宽 $D/\text{mm}$
1	94	0.48	3.20
2	100	0.60	4.26
3	108	1.05	6.24
4	114	1.76	7.40
5	113	1.16	4.93
6	115	1.60	6.13
7	118	1.98	6.85
8	120	1.91	8.39
9	124	1.91	10.18
10	122	2.35	9.24

良好的道间熔合. 观察焊缝的宏观形貌, 可以看出 CMT + P 过程中 WFS = 5 m/min 时呈现出良好的焊缝形貌: 熔深为 1.98 mm, 熔宽为 6.85 mm, 满足根焊要求; 接触角为 118°, 润湿性较好, 适合后续焊道的施焊.



(a) CMT



(b) CMT + P

图 12 焊缝横截面尺寸

Fig. 12 Dimensions of the cross-sections of weld beads

### 3 结 论

(1) CMT 过程中, 有一个短路前期阶段; 送丝速度变大会使基值阶段时长和短路阶段时长不稳定, 从而导致热输入不稳定, 所以通过提高送丝速度来提高热输入是行不通的. CMT + P 过程中的 CMT 阶段没有一个明显的峰值阶段; 短路阶段结束后, 在下一个周期脉冲阶段开始前, 会有一个预热阶段. SAF2507 的实际短路阶段电流要比基值阶段电流高.

(2) 电流波形图主要由电源预设决定的; 电压

波形图的扰动由实际情况得到. 电压波形图可以用来指导分析熔滴过渡行为. 熔滴形状与尺寸、过渡形式、熔池的波动状态、焊丝端部到工件的距离及飞溅等都能影响电压的波动.

(3) 脉冲阶段的热输入比 CMT 阶段的热输入大的多, 起主要影响作用的是脉冲阶段. 只需要重点调节脉冲峰值电流、脉冲基值电流、脉冲个数这三个特征参数, 即可实现热输入的控制. 在 CMT 阶段, 低短路电流和焊丝回抽保证了熔滴过渡的稳定性; 在脉冲阶段, 高的脉冲电流提供了高热输入. CMT + P 结合了 CMT 焊和脉冲焊的优点, 在保证

接头质量的前提下,可以显著增加焊缝熔深.

#### 参考文献:

- [1] 金晓军. 双相不锈钢管道焊接质量控制和安全评定的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [2] 杜东方. SAF2507 双相不锈钢 GTAW 焊接接头组织与性能研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2013.
- [3] 张 栋, 陈茂爱, 武传松. 高速 CMT 焊送丝速度和焊接电流波形参数的优化 [J]. 焊接学报, 2018, 39(1): 119 – 122.  
Zhang Dong, Chen Maoai, Wu Chuansong. Optimization of waveform parameters for high speed CMT welding of steel[J]. Transactions of the China Welding Intitution, 2018, 39(1): 119 – 122.
- [4] 曹 睿, 朱海霞, 王 清, 等. 镁/钢异种金属 CMT 对接熔钎焊连接机理 [J]. 焊接学报, 2016, 37(5): 37 – 40.  
Cao Rui, Zhu Haixia, Wang Qing, *et al.* Joining mechanisms of Mg-steel butt welded joints by cold metal transfer method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(5): 37 – 40.
- [5] 葛佳棋, 王克鸿, 周 琦, 等. 7A52 铝合金-钢异种结构 CMT 熔钎焊接头组织及镀镍层的行为与影响 [J]. 焊接学报, 2016, 37(4): 24 – 28.  
Ge Jiaqi, Wang Kehong, Zhou Qi, *et al.* Study on CMT welding-brazing joint microstructure of 7A52 Al alloy-steel stud and influence of Ni coating[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(4): 24 – 28.
- [6] Ge Jiaqi, Wang Kehong, Zhang Deku, *et al.* Microstructure characteristics and mechanical properties of steel stud to Al alloy by CMT welding-brazing process[J]. China Welding, 2016, 25(01): 49 – 56.
- [7] Wang P. Characterization the contribution and limitation of the characteristic processing parameters in cold metal transfer deposition of an Al alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 245: 122 – 133.
- [8] Pang J. Arc characteristics and metal transfer behavior of CMT+P welding process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 238: 212 – 217.
- [9] Azar A S. A heat source model for cold metal transfer (CMT) welding[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2015, 122: 741 – 746.
- [10] Pickin C G. Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211: 496 – 502.
- [11] Ola O T, Doern F E. A study of cold metal transfer clads in nickel-base INCONEL 718 superalloy[J]. Materials and Design, 2014, 57: 51 – 59.

---

**第一作者简介:** 黄瀚川, 男, 1992 年出生, 硕士研究生. 主要从事焊接工艺及焊接设备控制相关研究工作. Email: [1873474176@qq.com](mailto:1873474176@qq.com)

**通信作者简介:** 徐连勇, 男, 教授. Email: [xulianyong@tju.edu.cn](mailto:xulianyong@tju.edu.cn)