

# TC4 合金脉冲 PAW 工艺研究

雷小伟

(洛阳船舶材料研究所, 河南 洛阳 471039)

**摘要:** 进行了 TC4 直流 PAW、高频脉冲 PAW 和“一脉一孔”型 PAW 焊接工艺研究, 对比了 3 种 PAW 焊接工艺的焊缝外观形貌、力学性能和工艺性能, 后 2 种焊接工艺焊接接头性能略优于直流 PAW。高频 PAW 焊接工艺的高频脉冲对熔池的冲击作用有利于增加电弧挺度、提升焊接速度; 利用钛合金表面张力大的特性配合合理的工艺参数, 实现了稳定的 TC4“一脉一孔”型焊接工艺, 该工艺 PAW 比传统直流 PAW 焊缝外观成型更加美观, 焊缝背面具有手工 GTAW 单面焊双面成型形貌特征, 且更加均匀、美观, 焊缝正面几乎没有下塌; 力学性能试验和扫描电镜分析显示“一脉一孔”型 PAW 焊缝力学性能优于直流 PAW, 比传统“小孔型”PAW 更适合 TC4 合金的焊接。

**关键词:** TC4; 等离子焊; 高频脉冲; 一脉一孔

**中图分类号:** TG146.4<sup>+</sup>1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2017)S1-225-05

钛合金等离子弧焊接 (PAW: Plasma Arc Welding) 质量高、成型优、单道焊接厚度大, 在钛合金生产中被广泛应用。TC4 是最常用的高强度钛合金, 在工程应用当中越来越多。其是典型的双相钛合金, 研究其焊接性能有着较普遍的意义。

PAW 的“小孔效应”使其相比非压缩电弧的 GTAW 有诸多优点<sup>[1-5]</sup>: (1) 焊接效率高: PAW 的“机械压缩效应”和“电磁压缩效应”使得其电弧挺度极高, 焊接速度是 GTAW 的 2~3 倍, 同时, 可以减少坡口准备时间和降低焊材使用量。(2) 焊接质量高: PAW 焊缝热影响区窄, 工件变形及残余应力小, 焊接质量更高。(3) 工艺适应性好: 由于“小孔”持续存在, 有利于焊接过程中气体的逸出, 并且钨极位于喷嘴内部, 不会接触熔池或焊丝, 降低夹钨风险。(4) 成型效果佳: PAW 的“小孔效应”使得焊缝背面成型光滑平顺, 大大降低焊缝背面出现缺欠的风险。因此, PAW 被认为是钛及钛合金焊接最优焊接方法之一。

由于钛合金弹性模量低, 以及表面张力偏大等固有特性, 在焊接过程中易出现气孔及咬边等缺欠。近年来, 高频脉冲 PAW 有望解决该问题, 高频脉冲 PAW (HF-PAW) 是在焊接过程中对焊接电流施加高频脉冲 (1~10 kHz), 不但可以增加电弧挺度, 同时可以对熔池进行高频冲击达到促进气孔逸出, 提升焊接质量。

直流 PAW 和高频脉冲 PAW 均属于穿孔型等离子弧焊, 熔池穿孔的稳定性决定了焊接质量的好坏, 该

特点决定了其对焊接工艺条件的变化比较敏感, 要获得良好接头, 焊接参数范围窄, 可调裕度小。因此, 研究“一脉一孔”来提高 PAW 焊接过程的稳定性和适应性。所谓“一脉一孔”就是在脉冲峰值小孔成型, 在脉冲基值小孔闭合, 实现“穿孔-闭合”循环。

“一脉一孔”型等离子相比普通穿孔形等离子有以下特点<sup>[6-8]</sup>: (1) 焊接过程抗干扰能力强: “一脉一孔”型等离子峰值电流比传统直流 PAW 电流大, 此时, 电弧能力集中, 快速实现穿孔, 基值电流比传统直流 PAW 电流小, 保证小孔快速闭合, 整个过程处于可控的动态过程, 抗干扰性大大增加; (2) 线能量和直流 PAW 相当, 但焊缝处于高温阶段时间降低一半左右, 降低了工件变形, 更适用于焊接像钛合金一样对线能量敏感的材质<sup>[9-11]</sup>; (3) 脉冲功能可以充分搅拌熔池, 有利于氧化膜的破碎及焊缝气体的逸出; (4) 克服双弧, 使焊接过程更加安全; (5) 成型优良: 焊缝背面比直流 PAW 要窄很多, 并且背面几乎没有余高, 呈现类似手工 GTAW 双面成型的“马蹄形”形态, 不易出现背面咬边或余高过大。

因此, 对于 TC4 合金, 研究性能更加优良的“一脉一孔”型等离子焊接工艺是十分有必要, 并且值得大力推广。

## 1 实验

试验材料选用最常用的 TC4, 厚度为 5 mm 的板材, 材质符合 GB/T3621-2007 要求。试板规格为 300

收稿日期: 2016-12-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)(SS2013AA090102)

作者简介: 雷小伟, 男, 1983 年生, 硕士, 洛阳船舶材料研究所, 河南 洛阳 471039, 电话: 0379-67256051, E-mail: leisir126@126.com

mm ×150 mm×5 mm; 焊接时不填丝。TC4 化学成分和力学性能见表 1。

焊接电源采用 EWM 的 Tetrax450 DC plasma 型脉冲等离子焊接电源, 该焊接电源可实现电流 10~450 A 范围调节, 即脉冲焊接时基值可以低至 10 A 稳定输出; 脉冲控制精度为 0.1 s, 可以实现脉冲的精确输出。该设备支持直流 PAW、直流高频 PAW、以及可手动调节的脉冲 PAW。

TC4 试板采用“ I ”型坡口, 点焊时对接间隙 < 0.5 mm。焊接保护气体和离子气采用高纯度 (99.99% 以上) 氩气, 露点 < -40 °C, 符合 GB/T4842 要求。焊前彻底清理焊件坡口, 避免杂质污染。

为了对比 3 种 TC4 钛合金 PAW 焊接效果, 分别设计了普通“小孔型”PAW、高频脉冲 PAW 和“一脉一孔”型 PAW 焊接试验。普通“小孔型”PAW 在预熔阶段蓄积能量, 达到穿孔临界条件后, 顺利穿孔, 焊枪开始移动, 进行焊接, 焊接过程中小孔持续存在, 直到焊接过程结束。高频脉冲 PAW 是在普通 PAW 焊接过程对焊接电流施加高频脉冲, 焊接参数与普通 PAW 相同。

“一脉一孔”型 PAW 起始阶段与“小孔型”PAW 相同, 达到穿孔临界条件后, 穿孔成功, 当小孔稳定形成后, 将电流由峰值切换为基值  $I_b$ , 由于基值电弧能量降低, 不能满足小孔持续存在的能量条件, 小孔在液态金属表面张力作用下闭合; 但是, 基值电流  $I_b$  不能过低, 电流过低将导致下一次穿孔时间变长, 不利于焊接速度的提升; 基值电流  $I_b$  仍需维持电弧稳定燃烧的最小值同时兼顾焊接速度的匹配, 为下一次穿孔提供热量准备; 当小孔闭合后, 电流将切换为脉冲峰值电流  $I_p$ , 由于基值阶段电弧仍蓄积一定能量, 第 2 次穿孔要比预熔时第 1 次穿孔快, 一旦穿孔成功, 电流即重新进入基值, 往复循环, 形成稳定的“一脉一孔”焊接过程。

“一脉一孔”起始穿孔与直流 PAW 穿孔影响因素一样, 预熔电流  $I_r$  和预熔时间  $T_r$  决定预熔时电弧的输出能量, 预熔能量偏大容易使焊缝液态金属塌陷, 形成烧穿孔, 不能形成稳定的小孔; 预熔能量偏小使得先熔化的液态金属被等离子流反复吹出焊道, 形成焊缝凸起, 同时, 热影响区面积增大很大, 影响焊缝美

观和焊缝质量。因此, 合适的预熔能量是保证后续焊接过程顺利进行的关键, 同时也影响着焊接质量和焊接效率。经过试验验证, 对于“一脉一孔”型 PAW 焊接, 预熔电流  $I_r=120$  A, 预熔时间  $T_r=4$  s 比较合适, 满足顺利穿孔的同时, 穿孔点凸起也适当。

“一脉一孔”型 PAW 稳定焊接受诸多因素影响: 焊接电参数: 包括峰值电流  $I_p$ 、基值电流  $I_b$ 、峰值电流  $I_p$ 、基值时间  $T_b$ ; 峰值电流  $I_p$  和峰值时间  $T_p$  决定穿孔时电弧的输出能量, 穿孔电弧能量过大容易造成穿孔过大, 甚至焊漏, 穿孔电弧能量偏低容易造成穿孔时间过程, 不利于提升焊接效率。基值电流  $I_b$  和基值时间  $T_b$  决定闭孔时电弧的输出能量, 闭孔能量过高会导致闭孔时间延长, 闭孔能量偏低会造成下一次穿孔时间变长。可见, 穿孔能量和闭孔能量均需要一个合适的范围同时配合恰当的焊接速度才能满足稳定的“一脉一孔”焊接。

气体参数: 包含离子气和保护气成分、离子气和保护气流量; 为了对比“一脉一孔”型 PAW 和普通 PAW 区别及高频 PAW, 保护气体均采用 100% 纯 Ar 气作为保护气和离子气, 焊接过程中保护气流量采用 10~20 L/min; 离子气流量采用 3~6 L/min。3 种方法焊接时护气成分、离子气体流量基本保持一致。

其他因素, 包坡口类型、坡口清洁度、焊缝装配精度、焊接位置等; 同样, 2 种方法均采用“ I ”型破口, 机械清理加丙酮清理, 以及保证相同的装配精度, 均采用平焊。

综上所述, 影响“一脉一孔”焊接质量主要因素为第 1 类电参数, 后 2 类因素和普通 PAW 相同, 要想获得稳定的“一脉一孔”焊接过程, 必须严格控制焊接过程中电参数。

3 种焊接方法均采用 160 A (平均电流) 焊接电流, 直流 PAW 焊接速度为 250 mm/min, HF-PAW 和“一脉一孔”PAW 速度可达 300 mm/min。经过试验, 3 种焊接方法实现了顺利焊接, 且焊接外观均符合要求。

## 2 结果与分析

### 2.1 外观检验及无损检测

直流“穿孔型”PAW 焊缝正面和背面外观分别见图 1a 和图 1b; 高频脉冲 PAW 焊缝正面和背面外观分

表 1 TC4 合金化学成分和力学性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of TC4 alloy

Materials	Chemical composition, $\omega/\%$									Mechanical properties		
	Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O	Others	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	$A/\%$
TC4	Bal.	5.5~6.75	3.5~4.5	0.30	0.08	0.05	0.015	0.20	0.40	$\geq 830$	$\geq 895$	10

别见图 1c 和图 1d;“一脉一孔”型 PAW 焊缝正面和背面外观分别见图 1e 和图 1f。

经过测量 3 种方法焊缝正面熔宽均为 7~8 mm, 直流 PAW 焊缝背面熔宽为 5 mm, HF-PAW 和“一脉一孔”型 PAW 焊缝北面宽度 3~4 mm。从 3 种焊缝外观图中可以看出, 穿孔型 PAW 焊缝正面(图 1a)中, 焊道两侧比母材凹陷约 0.6~1 mm, 这是由于焊缝金属填充装配间隙及焊缝背面余高造成的, 焊缝装配间隙越大或者背面余高越大, 该现象越严重。而 HF-PAW 与直流穿孔型 PAW 基本一致, 无明显差异, 与直流 PAW 不同的是 HF-PAW 焊缝正面余高截面更为尖锐, 由半圆形向钝角三角形过渡, 这主要是由于高频脉冲使电弧推力增加, 熔池液态金属向后流动的动力更大造成的。此外, HF-PAW 试板咬边倾向明显比直流 PAW 要低, 这是因为电弧吹力增加导致的。而“一脉一孔”型 PAW 焊缝正面(图 1e), 为规则的脉冲波纹, 焊道正面塌陷只有 0.1~0.3 mm, 成型非常美观。穿孔型 PAW 背面成型图(图 1b)和 HF-PAW 背面成型图(图 1d), 焊缝截面积为凸起型圆弧(背面余高)。可以看出, 背面余高较高是焊缝正面塌陷的原因, 正常情况下, 正面塌陷需要重新盖面, 才能满足需要;而“一脉一孔”型 PAW 焊缝背面(图 1f), 是规则的“马蹄状”波纹相叠加, 类似手工 GTAW 双面成型效果, 但更加规则和致密。这正是 1 个脉冲形成 1 个波纹, 只有“一脉一孔”形 PAW 才能形成独有的连续型“马蹄状”焊缝。

可以看出,“一脉一孔”型 PAW 有着良好的焊缝正面成形效果和优越的背面成形效果, 尤其是焊缝背面“马蹄状”成形效果, 有着手工 TIG 单面焊双面成

形的特点, 又比手工 TIG 单面焊双面成型的效果要更均匀、更平滑, 是其他焊接方法无法实现的。

根据 NB/T47013.2-2005 承压设备无损检测标准和有关钛及钛合金 X 射线检测要求, 对 3 种 PAW 焊缝和近缝区母材进行 X 射线检测, 未出现不良焊接缺陷, 评定级别均为 I 级。

## 2.2 力学性能分析

分别对穿孔型 PAW 焊接试板、HF-PAW 焊接试板和“一脉一孔”型 PAW 焊接试板进行了拉伸和冷弯试验, 测试要求按照 JB/T4745-2002《钛制焊接容器》之附录 B《钛容器焊接工艺评定》要求进行, 其中, 拉伸试样采用宽 37 mm, 冷弯试样宽度 38 mm; 力学性能和工艺性能测试结果见表 2 和表 3。其中穿孔型 PAW 试样编号为 1#, HF-PAW 试样编号为 2#, “一脉一孔”型 PAW 试样编号为 3#。

由表 2 可以看出, 3 种焊接方法所取得试板的抗拉强度基本接近, 3#略高, 应该是“一脉一孔”焊缝正面凹陷较低引起有效抗拉截面积较大引起的, 3 种焊缝接头力学性能均符合要求。表 3 显示了 3 种方法所取得焊接接头的面弯和背弯也符合工艺评定要求的 20t/90° 性能。

## 2.3 SEM 断口分析

TC4 为双相合金, 塑性较差, 研究断口形貌可判断焊接接头的塑性是否降低, 对评定焊接接头优良有着指导意义, 为此对表 2 拉伸试验断裂后试样进行扫描电镜测试。图 2a、2c、2e 分别为直流 PAW、HF-PAW 和“一脉一孔”PAW 断口 500 倍 SEM 照片。图 2b、2d、2f 分别为直流 PAW、HF-PAW 和“一脉一孔”PAW 断口 1000 倍 SEM 照片。

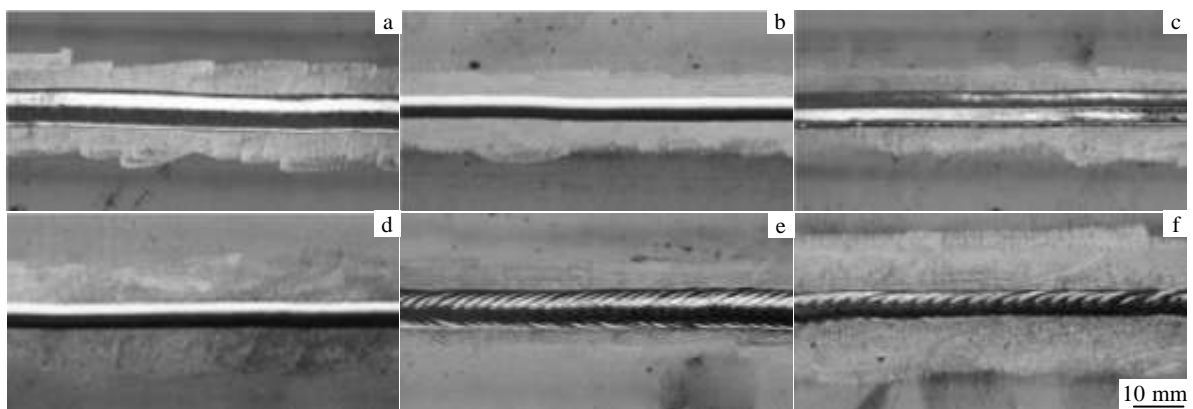


图 1 三型 TC4 合金 PAW 焊缝外观对比

Fig.1 Profile of “key-holing” PAW, HF-PAW and “one keyhole per pulse” PAW on TC4 welded joints: (a) surface of “key-holing” PAW joint; (b) reverse side of “key-holing” PAW joint; (c) surface of HF-PAW joint; (d) reverse side of HF-PAW joint; (e) surface of “one keyhole per pulse” PAW joint; (f) reverse side of “one keyhole per pulse” PAW joint

表 2 接头拉伸试验结果

Table 2 Mechanical properties of joints by the three methods

Welding methods	Sample dimension/mm	$R_m$ /MPa	Breakpoint
1#	5×37	930, 938	Base metal
2#	5×37	935, 938	Base metal
3#	5×37	945, 942	Base metal

表 3 接头冷弯试验结果

Table 2 Bending by properties of joints by the three methods

Welding methods	Sample dimension/mm	20 t/90 °	Bend method
1#	5×38	ok; ok	Face bend
2#	5×38	ok; ok	Face bend
3#	5×38	ok; ok	Face bend
1#	5×38	ok; ok	Root bend
2#	5×38	ok; ok	Root bend
3#	5×38	ok; ok	Root bend

从图中可以看出为均是典型的剪切韧窝特征，表示其断裂时不存在解理断裂，属于 TC4 焊接接头比较理想的断裂特性。由于 TC4 强度较高，其焊接接头可能存在力学性能及工艺性能均达到标准规定，但断口形貌会出现韧窝和解理断裂共存的现象。这是由于 TC4 属于高强合金，韧性较差，如果焊接接头出现硬化则很容易造成解理断裂。

### 3 结 论

1) 对于 5 mm 厚度 TC4 合金板材，选择合适的焊接参数，能够实现稳定的 HF-PAW 和“一脉一孔”PAW。

2) HF-PAW 焊缝尺寸和形貌和直流 PAW 基本一致，但咬边倾向降低，焊接速度比直流 PAW 高；“一脉一孔”PAW 焊缝正面为规则脉冲波纹，背面为规则的“马蹄形”波纹，成型美观；焊缝正面几乎没有下凹，背面余高很小，单面焊双面成型效果好。

3) 3 种焊接方法力学性能、工艺性能均满足标准要求。3 种焊接方法断口形貌均为韧性断裂，对于 TC4 合金较为理想，不存在接头硬化现象。

4) “一脉一孔”PAW 更适合 TC4 合金焊接。

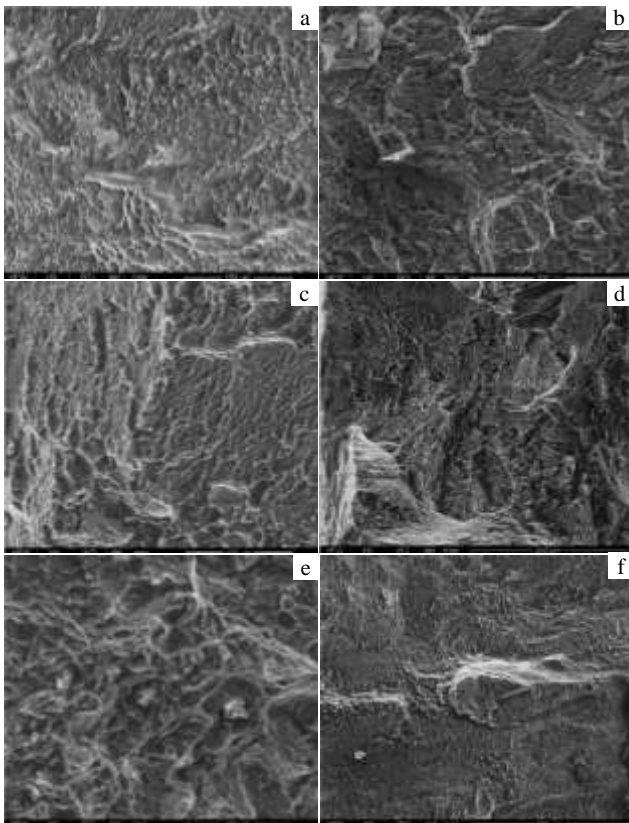


图 2 三型 PAW 焊缝断口 SEM 照片

Fig.2 SEM fracture morphologies of the “key-holing” PAW、HF-PAW and “one keyhole per pulse” PAW on TC4 joint crack surface: (a, b) “key-holing” PAW joint; (c, d) HF-PAW joint; (e, f) “one keyhole per pulse” PAW

### 参考文献 References

[1] Chen Yuchuan(陈裕川). *Modern Welding*(现代焊接)[J], 2008(8): 6

[2] Luo Fei(罗非), Jia Chuanbao(贾传宝). *Shandong Science*(山东科技)[J], 2011, 24(1): 16

[3] Zhu Chen(朱晨), Zhang Wei(张伟). *Welding Technology*(焊接技术)[J], 2011, 40(10): 3

[4] Metcalfe J C, Quigley M B C. *Welding Journal*[J], 1975, 54(3): 99

[5] Zhang Y M, Zhang S B. *Welding Journal*[J], 1999, 78(2): 53

[6] Chen Shujun(陈树君), Yang Xu(阳旭). *Welding*(焊接)[J], 2011 (10): 1

[7] Song Dongfeng(宋东风), Hu Shengsun(胡绳荪). *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2006, 27(6): 45

[8] Zhang Y M, Zhang S B, Liu Y C. *Measurement Science and Technology*[J], 2001(12): 1365

[9] Jia Chuanbao, Wu Chuansong, Zhang Yuming. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [J], 2009, 19(2): 341

[10] Ma Li(马立), Hu Shengsun(胡绳荪) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2006, 27 (2): 73

[11] Zhu Yifeng(朱轶峰), Zhang Hui(张慧). *Plasma Process Technology*(等离子加工技术)[J], 2006, 27(2): 73

## Pulse PAW Technology of TC4 Alloy

Lei Xiaowei

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** DC PAW, high-frequency pulse PAW (HF-PAW) and one keyhole per pulse PAW were conducted on TC4 alloy. Then the weld joint appearance, mechanical properties and processing properties of the three PAW joints were compared. Results show that the properties of the joints by HF-PAW and one keyhole per pulse PAW are slightly better than those of the joint by DC/PAW. The high-frequency pulse of HF-PAW reinforces the arc force to the melt pool, thus increasing the arc stiffness and the welding speed. One keyhole per pulse PAW is stabilized of TC4 alloy by its large surface tension, combined with proper processing parameters. The one keyhole per pulse PAW exhibits better appearance of the weld than the conventional DC PAW. The weld back possesses the characteristics of handmade GTAW; moreover, there is no subsiding area in the facade of the weld. It is concluded that one keyhole per pulse PAW is superior to DC PAW in mechanical properties, which is more suitable for TC4 PAW.

**Key words:** TC4; PAW; high-frequency pulse; one keyhole per pulse

---

Corresponding author: Lei Xiaowei, Master, Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471000, P. R. China, Tel: 0086-379-67256051, E-mail: leisir126@126.com