

59-66

高频脉冲TIG焊电弧的阳极行为

赵家瑞 孙 栋 胡绳荪*

(天津大学)

张选明[✓]

(天津海洋技术研究所)

TG434.5

摘 要 本文首次测定了高频脉冲TIG焊电弧阳极的平均电流密度分布及其中心电流密度动态过程,研究其变化规律并建立了数学模型,从而探明了高频脉冲TIG焊电弧的高频压缩机理。本文还利用自制的微压测试装置,研究了高频脉冲TIG焊电弧阳极轴向压力的分布,建立了数学模型。试验研究表明,高频脉冲TIG焊电弧阳极能量密度高,阳极轴向压力适中,适宜焊接精密超薄结构,推荐脉冲频率为20 kHz左右。

关键词 高频脉冲; TIG焊电弧; 阳极行为; 高频压缩机理

0 序 言

高频脉冲TIG焊电弧具有能量集中,稳定性好,挺度高等特点,近年来高频弧焊工艺在生产中,特别是焊接薄板方面的应用越来越广泛。

众所周知,电弧的阳极是直接作用于焊接熔池的部分,其产生热量的规律,能量密度大小、分布及产生的机械作用力,对于焊接过程及其质量具有很大影响。因此进行高频脉冲TIG焊电弧阳极行为的研究,对充分发挥高频脉冲TIG焊的工艺特点,提高焊接生产率及焊接质量是十分必要的。

1 试验方法及条件

对高频脉冲TIG焊电弧阳极行为,人们最感兴趣的是阳极电流密度。因为阳极电流密度与阳极能量密度密切相关,同时它对电弧轴向压力及电弧稳定性都有很大影响。因此,本文首先利用分辨阳极法对高频脉冲TIG焊电弧阳极平均电流密度的分布进行了测定,对不同脉冲频率(f)、电流(I)、弧长(L)影响高频脉冲TIG焊电弧阳极电流密度分布的规律进行了研究。试验条件列于表1。

* 参加本文研究工作的还有路登平讲师

表 1 试验条件
Table 1 Test condition

Electrode	Tip angle of electrode	Argon flow rate	Diameter of the nozzle
Cerium-tungsten Dia. $\phi 3\text{mm}$	60°	12L/min	10mm

为了研究高频TIG焊电弧高频效应机理,采用探针法对电弧阳极电流密度的动态过程进行了测试,图1为测试装置简图。图中探针是用来测量电弧阳极中心电流密度的,它周围用0.1mm厚云母片与水冷铜阳极绝缘。通过两个分流器分别获得探针电流信号和焊接电流信号,用高频双线示波器同时显示两电流信号波形变化,并用录相机记录其瞬态波形进行研究。表2为该项研究的试验条件。

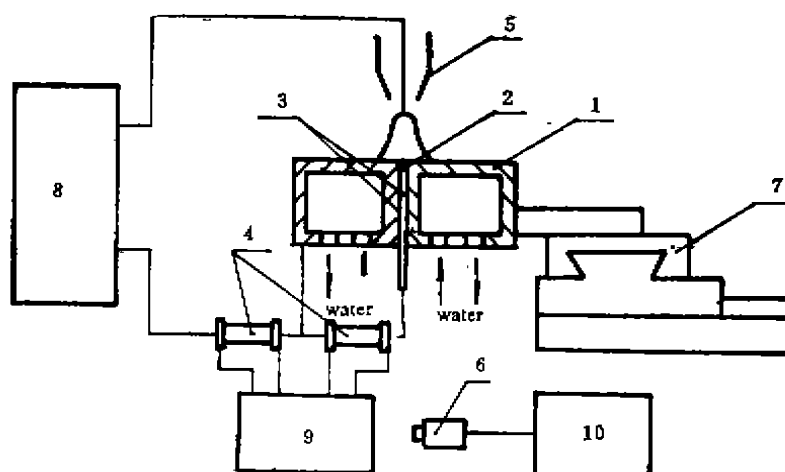


图 1 电弧阳极电流密度动态过程测试装置

Fig.1 Set of measuring dynamic process of TIG welding arc anode current density

1. water cooling copper anode 2. probe 3. mica 4. current divider 5. TIG welding torch
6. camera 7. precise slide 8. welding power source 9. double oscillograph 10. video recorder

表 2 试验条件
Table 2 Test condition

Average welding current	Arc length	Dia. of probe	Material of probe	The others
50A	4mm	0.9mm	cerium-tungsten	see table 1

采用了图2所示的测试电弧阳极轴向压力装置,分别测试了不同脉冲频率、电流及弧长时高频脉冲TIG焊电弧阳极轴向压力的径向分布。

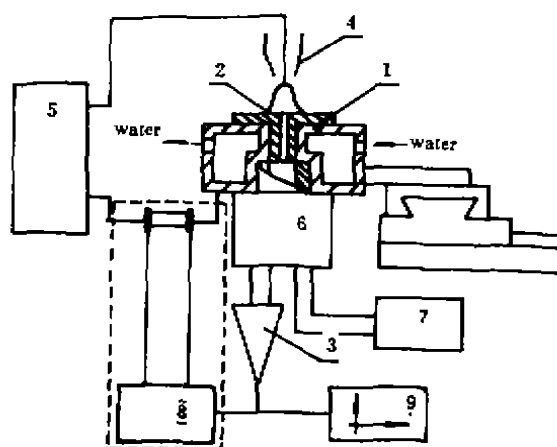


图2 电弧阳极轴向压力测试装置

Fig.2 Set of measuring welding arc anode axial pressure

1, water cooling copper anode 2, guided pressure hole 3, small signal amplifier 4, TIG welding torch 5, welding power source 6, micro-pressure sensor 7, constant current power source 8, double oscillograph 9, function recorder

2 试验结果及分析

2.1 电弧阳极平均电流密度径向分布规律

图3是不同频率(f)、电流(I)、弧长(L)时高频TIG焊电弧阳极电流密度的测试结果。其中图3a是不同频率下,电弧阳极电流密度径向分布曲线。由图可知,随着脉冲频率的提高,电弧中心部分的阳极电流密度增大,电弧直径减小。当脉冲频率由1 kHz提高到20 kHz时,电流密度由4.49 A/mm²增加到10.49 A/mm²,电弧半径由4.5 mm减小到2.25 mm。其原因可见后面电流密度动态过程分析部分。

图3b是不同焊接电流时,电流密度分布曲线。由图可知,焊接电流增加,电弧阳极中心的电流密度增大,电弧直径也增大,这是符合弧压最小原理的。

图3c是不同弧长时的电流密度分布曲线。可见,弧长增加,电弧阳极中心电流密度减小,电弧半径增大。因为钨阴极是前端磨尖的细棒,而阳极为一个大平面,使电弧近似成一圆锥状,弧长增加,距阴极越远,电弧半径增大,导电截面增大,使电流密度减小。

由图3曲线可以证明,阳极径向电流密度分布 $J(r)$ 服从正态分布,可用下式表示:

$$J(r) = J_0 e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}$$

式中 J_0 ——电弧中心的电流密度

σ ——电弧电流密度分散系数

r ——电弧径向座标

$J(r)$ ——对应于 r 的电流密度

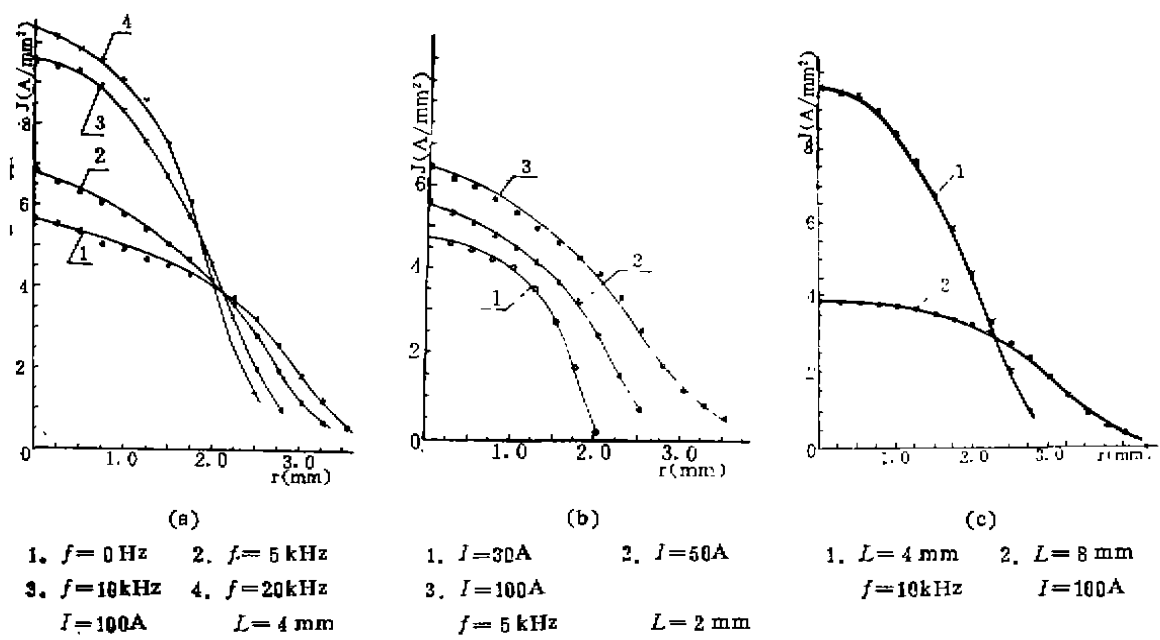


图3 不同频率(f)、电流(I)、弧长(L)时高频电弧阳极电流密度分布

Fig.3 Density distribution of high-frequency arc anode current in different frequency (f)、current (I) and arc length (L)

2.2 电弧阳极中心电流密度的动态变化过程

图4为不同频率下焊接电流与电弧阳极轴线电流密度的动态波形。由图可知,当脉冲频率低于5 kHz时,电流密度动态变化波形都有一个共同点,即焊接电流由维弧电流跃变为脉

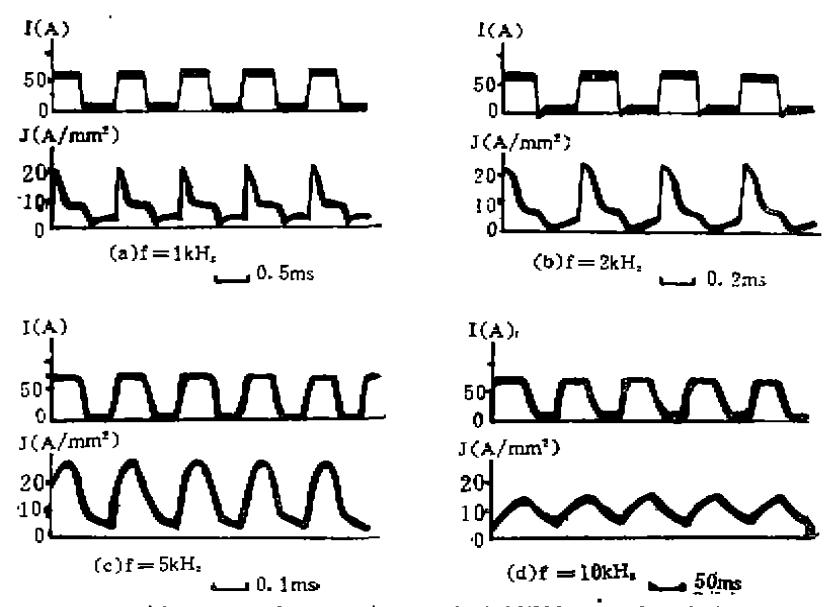


图4 不同频率(f)下焊接电流(I)与电弧阳极轴线电流密度(J)的动态波形

Fig.4 Wave shape of welding current (I) and anode axis current density (J) in different pulse frequency (f)

冲电流的瞬间, 阳极电流密度迅速增加, 大大超过稳定值, 形成一个尖峰, 它不随频率变化, 尖峰前沿上升时间约为40μs左右, 尖峰后沿下降时间约为60μs左右。随着脉冲频率的提高, 电弧阳极电流密度为稳定状态的时间变短, 则尖峰电流密度所占的时间比例相对增加。当频率大于5 kHz以后, 电流密度来不及达到稳定状态, 故脉冲频率提高, 电流密度的脉动变化减小。

由于热惯性的原因, 当电流跃变时, 电弧直径不能立刻达到与脉冲电流所对应的电弧直径。而电弧电流上升速度很快, 故在电流跃变时, 电流密度产生一个尖峰。

电弧电流由维弧电流跃变为脉冲电流时, 电弧直径(D_u)是按指数规律变化的^[1], 即:

$$D_u = D_1' - (D_1' - D_2')e^{-\frac{t_u}{T_u}} \quad (1)$$

高频方波TIG焊电弧直径达不到稳定状态, 在维弧电流跃变到脉冲电流时, 电弧直径所达到的最大值(d_1)和最小值(d_2)分别为:

$$d_1 = D_2 + (D_1 - D_2) \left[\frac{(1 - e^{\frac{\varphi}{T_u \cdot f}}) e^{\frac{1-\varphi}{T_D \cdot f}}}{1 - e^{(\frac{1}{T_u} + \frac{1-\varphi}{T_D \cdot f}) \cdot \frac{\varphi}{f}}} \right] \quad (2)$$

$$d_2 = D_2 + (D_1 - D_2) \left[\frac{1 - e^{\frac{\varphi}{T_D \cdot f}}}{1 - e^{(\frac{1}{T_u} + \frac{1-\varphi}{T_D \cdot f}) \cdot \frac{\varphi}{f}}} \right] \quad (3)$$

(1)、(2)、(3)式中:

T_u, T_D ——电流上升、下降时, 电弧直径变化的时间常数

t_u, t_D ——电流上升、下降跃变后所经过的时间

φ ——脉宽比

f ——脉冲频率

D_1, D_2 ——分别为脉冲电流 I_p 和维弧电流 I_b 对应的稳定电弧直径

D_1', D_2' ——分别为 I_p, I_b 所对应的最大电弧直径, 低频可达其稳定值时, $D_1' = D_1$,

$D_2' = D_2$; 高频达不到其稳定值时, $D_1' = d_1, D_2' = d_2$

由前面分析已知, 高频脉冲TIG焊电弧阳极电流密度分布为正态分布, 即:

$$J(r) = J_0 e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}$$

则焊接电流 I 为:

$$I = \int_0^\infty J(r) \cdot 2\pi r dr = 2\pi J_0 \sigma^2$$

故:

$$J_0 = \frac{I}{2\pi\sigma^2} \quad (4)$$

由正态分布的性质可知, 当 $R = 3\sigma$ 时, 正态分布曲线内所包含的电流为焊接电流的

$$99.7\%, \text{ 因此 } J_0 = \frac{9I}{2\pi R^2} \quad (5)$$

当焊接电流由维弧电流跃变为脉冲电流时, 由式(1)和式(5)可知, 电弧阳极轴线

电流密度 J_{0a} 为:

$$J_{0a} = \frac{9I_p}{2\pi\left(\frac{1}{2}D_0\right)^2} = \frac{18I_p}{\pi\left[D_1' - (D_1' - D_2')e^{-\frac{t_a}{T_a}}\right]^2} \quad (6)$$

当 $t_a = 0$ 时, 电流密度获得最大值为:

$$J_{0a} = \frac{18I_p}{\pi D_2'^2} \quad (7)$$

当 t_a 增加, J_{0a} 逐渐减小。由于 T_a 是与脉冲频率无关的热惯性时间常数, 所以 J_{0a} 下降的时间不随频率改变, 而脉冲频率提高时, 脉冲时间减小, 故在脉冲时间中 J_{0a} 由最大值过渡到稳态值的过渡时间所占的比例增大, 这一现象可从图4中看得很清楚。当脉冲频率进一步提高, 电弧直径达不到稳定状态, 电弧在脉冲和维弧时所对应的最大值和最小值就由 D_1' 、 D_2' 变为 d_1 、 d_2 。由式(2)、(3)可知, d_1 、 d_2 是脉冲频率 f 的函数, f 提高, 则 d_1 减小, 而 d_2 增大, d_1 与 d_2 的差值减小。由式(7)可知, 电流密度变化的最大值 $J_{0a} = \frac{18I_p}{\pi D_2'^2}$ 也减小, 这样, f 提高, 电弧阳极电流密度的脉动变化减小。

2.3 电弧阳极轴向压力分布的规律

图5中a、b、c分别显示了不同脉冲频率(f)、不同电流(I)、不同弧长(L)时, TIG电弧阳极轴向压力分布。由图可知, 当焊接参数(f 、 I 、 L)改变时, 压力分布曲线形状的变化都是很相似的。经验证, 靠近电弧中心部分的压力分布属正态分布, 靠近电弧边

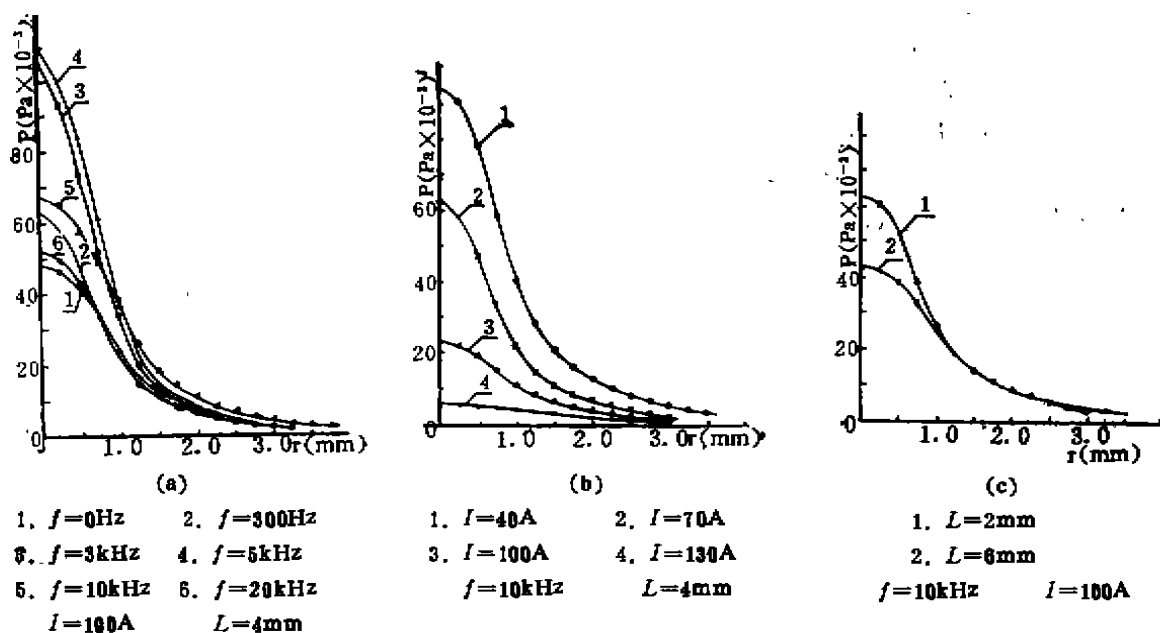


图5 不同频率(f)、电流(I)及弧长(L)的电弧阳极轴向压力分布

Fig.5 Distribution of TIG welding arc axial pressure in different pulse frequency (f), current (I) and arc length (L)

缘部分压力分布属指数分布,即

$$\begin{cases} P(r) = P_{01} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} & r \leq \frac{1}{3} R \quad (P_{01} \text{ 为电弧中心压力}) \\ P(r) = P_{02} e^{-ar} & r > \frac{1}{3} R \quad (P_{02} \text{ 为电弧等效中心压力}) \end{cases}$$

众所周知,电弧阳极轴向压力主要是由电磁附加压力和电弧等离子流力形成的。电磁附加压力是电弧电流洛伦兹力形成的轴向附加压力。它与电弧电流密度密切相关。由前面分析可知,脉冲频率提高,电流密度尖峰所占份额相对增加,从而使电流密度增加,使电弧的电磁附加压力也增大,电弧形态由圆锥状向圆柱状变化,电磁附加压力沿电弧轴向梯度减小,因此,由它形成的等离子流产生的动压力减小。这两个因素综合作用的结果,使电弧阳极中心轴向压力随脉冲频率的提高,首先是增加,当频率为 5 kHz 左右时,压力达到最大值。脉冲频率继续增加,电弧压力反而逐渐减小。当频率为 20 kHz 时,电弧压力与直流 TIG 焊电弧阳极中心轴向压力很接近。

由图 5 b、c 可清楚看到,当焊接电流增加及电弧长度减小时,电弧压力均增大,这由于增加电流和减小弧长会使电弧的电磁附加压力及等离子流力增大的结果。

通过对高频脉冲 TIG 焊电弧阳极行为的研究发现,脉冲频率的提高,对电弧阳极行为有很大影响。高频电弧的特点主要来自电弧由维弧到脉冲电流跃变时,产生电流尖峰脉冲。在测定电弧阳极电流密度动态过程时,可明显见到,正是这个尖峰随脉冲频率提高而增加了阳极电流密度,使电弧自磁压缩作用增加,从而使高频电弧能量密度、挺度和稳定性增加。这就是脉冲 TIG 焊“高频效应”的实质。

采用高频 TIG 焊电弧对不锈钢、青铜等合金薄板进行了焊接工艺试验。通过试验发现,脉冲频率为 20 kHz 左右时,噪音小,能量密度、电弧轴向压力较适中,焊缝狭窄,成型美观。

3 结 论

(1) 通过对高频 TIG 焊电弧阳极电流密度进行测定,发现电弧阳极平均电流密度径向分布可用正态分布函数来描述。

电弧阳极电流密度随脉冲频率提高而增大,电流分布半径随频率增加而减小,脉冲频率进一步提高,其变化速度减慢,最后趋于稳定。

(2) 通过对高频 TIG 焊电弧阳极轴向压力分布进行测定,发现其轴向压力分布可用分段函数描述,靠近电弧中心部分符合正态分布,而靠近电弧边缘部分符合指数分布。

电弧中心轴向压力,开始随频率增加而增加,在本试验条件下,当频率为 5 kHz 时达到最大值,然后,随脉冲频率提高而减小。

电弧阳极轴向压力随焊接电流增大显著增大,随弧长增加而减小。

(3) 通过高频 TIG 焊电弧阳极电流密度动态过程的测定,首次发现脉冲前沿存在一个电流密度尖峰,它是高频压缩效应产生的主要原因,从而明确了高频 TIG 焊电弧高频效应的实质。

(4) 试验证明,焊接精密薄件,采用脉冲频率为 20 kHz 左右的小电流焊接工艺,其电

弧能量密度、轴向压力均适中,且电弧稳定,噪音小,焊缝成型好,值得推荐。

(1991年11月7日收到修改稿)

参 考 文 献

- 1 赵家瑞等. 脉冲TIG焊电弧数学模型及可控性研究. 第五届全国焊接学术会议论文选集, 1986, 4(4~6)

Anode behaviour of high frequency pulse TIG welding arc

Zhao Jiarui, Sun Dong and Hu Shengsun

(Tianjin University)

Zhang Xuanming

(Tianjin Ocean Engineering Institute)

Abstract The distribution of high frequency pulse TIG welding arc anode average current density and the dynamic process of the said arc anode are determined in this paper. Their mathematical models are established, and the compression mechanism of high frequency pulse TIG welding is explored. The distribution of high frequency pulse TIG welding arc anode axial pressure has been studied by a self-made micro-pressure measuring device. And the related mathematical model is established as well. Experiments have shown that high frequency pulse TIG welding is a useful technique for welding precise super-thin plates. An adaptive pulse frequency of about 20kHz is recommended.

Key words high frequency pulse; TIG welding arc; anode behaviour; compression mechanism of high frequency