

试验研究

TIG 电弧活性化焊接现象和机理研究(3) ——活性化 TIG 焊接中的熔池表面张力测定

哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室(150001)

日本大阪大学接合科学研究所

杨春利

牛尾诚夫, 田中学

摘要 利用熔池振荡及熔池谐振信号的检测,以熔池自身固有振荡频率与熔池尺寸的内在关系测定熔池金属表面张力,研究了薄板 SUS304 不锈钢 TIG 焊不同熔池尺寸的表面张力变化以及活性剂对熔池表面张力的影响。实验研究方法为焊接熔池表面张力测定中的最初应用。

关键词: A-TIG 焊 表面张力 活性剂

焊接熔池

TG444.74

PHENOMENON AND MECHANISM OF ACTIVATED ARC IN TIG(3) ——SURFACE TENSION DETECTION IN A-TIG

TG401

Harbin Institute of technology

Yang Chunli

Joint and Welding Research Institute, Osaka University

Ushio Masao, Tanaka Manabu

Abstract By detecting the signals of weld pool oscillation and weld pool resonance, the weld pool surface tension is measured in this paper based on the intrinsic relationship between weld pool oscillation frequency and weld pool size. The surface tension variation of weld pool with different size and the effect of active flux on surface tension of weld pool are studied during TIG welding of thin stainless steel SUS304. The experimental method is the preliminary application for surface tension detection of weld pool.

Key words: A-TIG welding, Surface tension, Active flux

0 前言

活性化 TIG 焊(A-TIG)在增加焊接熔深、提高焊接效率方面有明显效果。对熔深增加机理的初期考察和分析认为,A-TIG 焊电弧收缩是焊接熔深增加的一项重要原因,许多研究已对上述结果和现象进行了论述^[1,2,3],但电弧收缩并不是 A-TIG 焊熔深增加的唯一原因。此后所建立的著名的表面张力影响学说认为^[4],象铁、镍、钴这样的材料,其液态金属的表面张力系数随温度的提高而降低,焊接熔池中心温度高而周边温度低,液态金属形成从熔池中心向熔池周边的表面张力流,电弧向熔池底部的传热效率低,所形成的焊缝宽而浅;当液态金属处于氧化性气氛中或液态金属中含有氧元素、硫元素或其它某种微量元素时^[5,6],液态金属表面张力数值降低,同时表面张力系数随温度

的提高而增大,在焊接熔池情况下,由于熔池中心区温度最高,液态金属形成从熔池周边向熔池中心的表面张力流,熔池中心区的电弧热量通过液态金属直接传向熔池底部,对熔池底部的加热效率提高,从而形成更大的熔深。

多年来人们对焊接熔池表面张力的研究多侧重于数值计算,缺乏实验测量,这是由于焊接熔池表面张力测量具有很大的难度,这在整个电弧焊领域都是共同的。此外,对于活性化 TIG 焊方法,就活性剂涂敷量对熔池表面张力的影响效果亦未见研究报道,这两点对焊接研究具有一定意义和研究价值,本文介绍作者在上述两方面所做的研究工作。

1 实验方法

熔化焊接中,表面张力对熔滴过渡、熔池形成及熔

池流动起着重要作用。高温下,工业用金属表面张力的测定通常采用悬浮液滴法。而焊接熔池金属表面张力的测定是很困难的,以往对活性化 TIG 焊熔池表面张力采用了—个经验公式进行评定如式(1),该实验式以焊接电流(I)、电弧电压(E)、焊接速度(V)下的焊接最大熔深(t_{max})来评定熔池表面张力^[7],而实际情况下影响焊接熔深的因素还有许多,结果表明实验数据的分散性很大。

$$\sigma = \frac{4.3 \times I \times E}{t_{max} \times \sqrt{V}} \quad (1)$$

以悬浮液滴法测定液态金属的表面张力实际上采用了液体自由振动的测试方法。通过液滴自由振动频率测定表面张力,具有充分理论依据,但应用于焊接熔池尚缺乏研究,比如在确定熔池尺寸与熔池自身固有振荡频率数值关系方面缺乏有效手段。为此本文利用熔池振荡及熔池谐振原理和实验方法对此做出探讨。实验原理和实验方法如下:从物理学知识知道,任何体积的确定液体,当其质量、边界尺寸及拘束条件一定时,都具有一个确定的自身固有振荡频率。薄钢板 TIG 焊全熔透情况下的研究表明^[8],熔池自身固有振荡频率与熔池几何尺寸及熔池金属密度、熔池表面张力之间存在式(2)的对应关系,为流体动力学推导和实验数据证明的正确结果。从式(2)得出式(3)关系式,反映熔池表面张力与熔池自身固有振荡频率、熔池几何尺寸及熔池金属密度之间的关系。如果能够得到熔池自身固有振荡频率与熔池几何尺寸的对应数值,则可以计算出熔池表面张力数值。

$$f_0 = 1.08 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho H D^2}} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{\rho H D^2 f_0^2}{1.1664} \quad (3)$$

式中 f_0 ——熔池自身固有振荡频率(Hz)

H ——熔池深度(m)

D ——等价熔池宽度(m)

ρ ——熔池金属密度(kg/m^3)

σ ——熔池表面张力(N/m)

H 、 D 在薄板全熔透焊接状态下即为试板厚度和熔池宽度(正反面熔池宽度相等)。

以实验方法检测熔池振荡可以通过对电弧电压或电弧弧光的检测予以实现。薄板全熔透焊接采用图 1 的焊接电流波形,该焊接电流在基值电流(I_b)之上叠加一定频率(f)的正弦波电流,正弦波电流幅值(I_p)一定,通称变动焊接电流,焊接中产生变动的电弧压力,诱发

熔池金属振荡。

采用图 1 的单一变动量成分焊接电流,电弧电压的变化见图 2。图中 $U_1(t)$ 是由电弧—静特性决定的电弧电压变动量幅值,只与电弧导电性能有关,某一数值的焊接电流 $I(t)$ 下

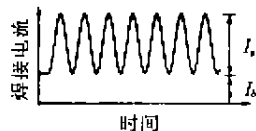


图 1 变动焊接电流波形

存在某一数值的电弧电压 $U_1(t)$ 。 $U_2(t)$ 是变动焊接电流作用下由于电弧长度的变化而产生的电弧电压变动量幅值,首先是变动的焊接电流 $I(t)$ 产生变动着的电弧压力 $P(t)$,变动的电弧压力 $P(t)$ 造成熔池金属的振荡即熔池表面的上下波动,电弧长度 $L(t)$ 相应变化,从而产生电弧电压变动分量 $U_2(t)$ 。

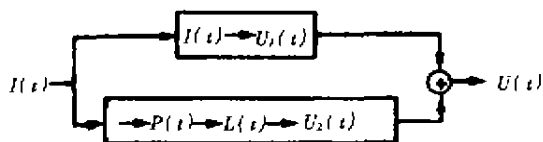


图 2 焊接电流对电弧电压的影响关系

TIG 焊定点电弧条件下,采用确定参数的焊接电流进行焊接(I_b, I_p, f 数值确定),当电弧达到热的准稳定状态后(燃弧后经过一段较短时间), $U_1(t)$ 达到稳定值, $U_1(t)$ 相对 $I(t)$ 的相位角 $\phi_1(t)$ 亦处于稳定值。 $U_2(t)$ 的变化与熔池振荡情况有关,当熔池尺寸较小时,熔池振荡程度弱,对电弧电压的影响小;随熔池尺寸的逐步长大,熔池自身固有振荡频率随之逐步降低,熔池振荡程度逐步增强, $U_2(t)$ 值逐步增大,当熔池增长到某一确定尺寸时,熔池自身固有振荡频率(f_0)变化到与变动电流中的正弦波频率(f)相等,熔池在此时刻产生谐振。熔池谐振在电弧电压变动分量中的表现是其变动量幅值 $U_2(t)$ 达到最大,而变动量相对焊接电流的相位角 $\phi_2(t)$ 为 -90° ;此后随着熔池尺寸的继续长大,熔池逐渐离开谐振点,熔池振荡又逐渐减弱。上述特征性规律见图 3,图中 $U_1(t)$ 、 ϕ_1 在电弧参数值(I_b, I_p, f, L)不变的情况下具为确定值,图 3(a)中变量频率比 $n = f/f_0$ 。

熔池振荡在电弧电压上的整体表现见图 3 中曲线 $U(t)$ 。其变化特征是:在熔池谐振点附近电弧电压变动量幅值达到一最大值后产生一明显而迅速的衰减,在衰减到最低谷值后又逐渐恢复到熔池谐振前的水平,这是 $U_1(t)$ 和 $U_2(t)$ 两部分变化量按相位叠合的结果,其中,熔池谐振点是出现在电弧电压变动量幅值

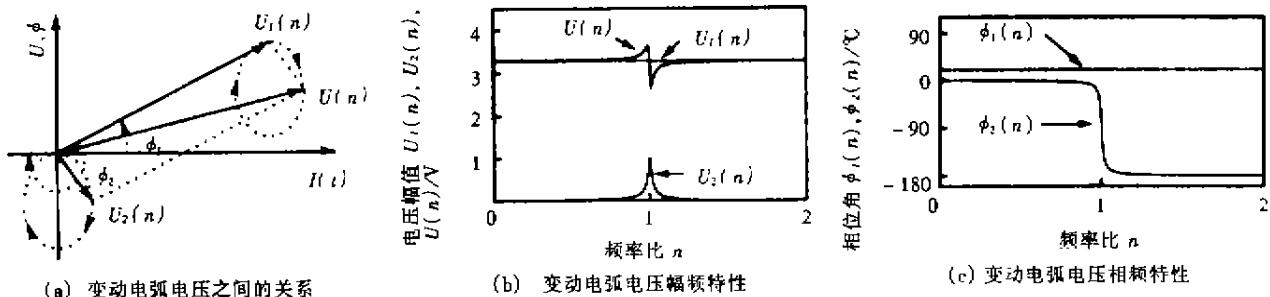


图3 电弧电压变动量幅值变化特性

$U(t)$ 的衰减期。

熔池谐振点既熔池谐振信号的检测对于检测熔池尺寸具有特殊意义。以上所述已经得到实验和理论推导的证实^[9,10]。以电弧电压变动量幅值在熔池谐振点附近的特征表现作为熔池谐振信号,具有变化特征明显、可检测性强、对应性好等项优点,并且可以把熔池自身固有频率与谐振熔池尺寸对应起来,即可以实现对熔池表面张力的测定。对于 TIG 焊和活性化 TIG 焊能够考察表面张力的变化,以及考察活性剂涂敷量对表面张力变化的影响。

研究结果表明^[11],在对熔池振荡即熔池谐振信号的检测中,电弧弧光光强与电弧电压有着相同的表现,而弧光信号的抗干扰能力强、信号重复性好,因此本研究以对电弧弧光信号的采集来检测焊接熔池振荡及熔池的谐振。

由计算机、A/D 数据采集卡、D/A 数据输出卡、弧光强传感器(光敏管和放大电路)、逆光变式焊接电源及焊枪、焊接小车组成焊接实验系统。Turbo C 语言与汇编语言联合编程,以软件方式通过 D/A 数据输出卡发出图 1 的电流波形给定信号到焊接电源,控制焊接电流的输出,电流参数由软件设定。弧光光强信号经 A/D 数据采集卡到计算机,定时数据采集,采样频率 4 000 Hz。计算机程序对采样信号进行比较和判断,检测熔池谐振的产生。实验硬件系统见图 4。

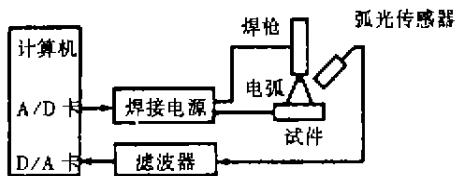


图4 实验系统组成

活性剂涂敷及涂敷量的测定采取如下方法:实验采用薄板小试件(不锈钢 SUS 304,板厚 1 mm,试件尺寸 30 mm×40 mm),首先用电子秤(精度 0.1 mg)测量试件

重量,用丙酮调和活性剂粉末成溶液,用扁平毛刷把活性剂溶液均匀涂敷在试件表面,等待丙酮完全挥发后再次测量试件重量,计算单位面积上的活性剂涂敷量。试件共涂敷数十枚,选出涂敷量存在差别的试件进行焊接实验。

2 实验结果与讨论

2.1 熔池谐振信号检测

实验采用的焊接电流参数见下表。以设定数值的焊接电流进行定点电弧实验,对应于某一确定的变动焊接电流频率,检测得到电弧弧光光强信号的变化,图 5 示出弧光信号产生快速幅值变化一段时刻的波形。

实验焊接参数			
基值电流 I_b/A	峰值电流 I_p/A	电弧长度 L/mm	保护气体流量 $q_m/L \cdot min^{-1}$
15~20	100~140	1.5~2	Ar, 15

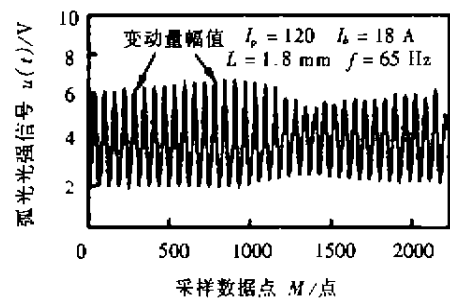


图5 熔池谐振点附近弧光光强变化

以 60 Hz 变动焊接电流频率进行实验,检测得到弧光光强变动量幅值变化信号见图 6。

弧光幅值数据快速衰减的时刻即对应于熔池谐振的产生,该时刻的熔池尺寸即为谐振熔池尺寸,而其振荡频率即为熔池自身固有振荡频率,数值等于变动焊接电流中叠加的正弦波频率。通过这一信号能够检测得到熔池自身固有振荡频率,并能够与该时刻的熔池

尺寸即谐振熔池尺寸相对应。熔池谐振时刻弧光光强幅值衰减是由于熔池振荡对电弧电压(弧光光强亦同)的影响在熔池谐振时与焊接电流出现 -90° 的反相位。

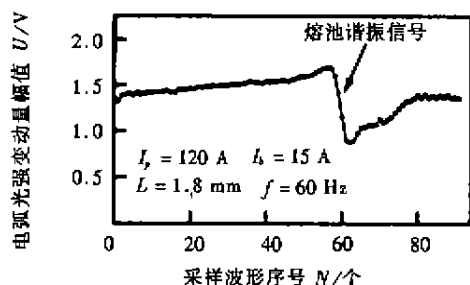


图6 熔池振荡过程中的弧光光强幅值变化

2.2 熔池金属表面张力检测

为得到熔池自身固有振荡频率与熔池尺寸的对对应关系,实验采取如下原则:①定点焊接过程中,计算机采集到熔池谐振信号后,立即停止焊接电流波形信号的输出(D/A卡输出0),这时电弧自动熄灭,熔池凝固后测量其正面尺寸即为谐振熔池尺寸;②改变焊接电流波形中叠加的正弦波频率,熔池将在相应的尺寸下谐振,见图7说明,重复上述实验,得到熔池自身固有频率与熔池尺寸之间的对应关系。

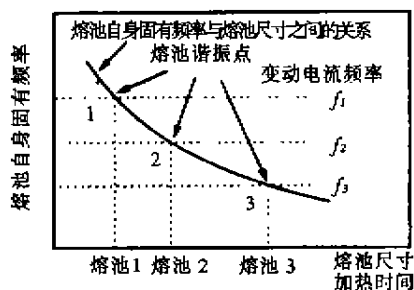


图7 不同焊接电流频率下的熔池谐振检测

实验采集得到熔池谐振信号及控制输出见图8。分别对1mm厚度普通状态下的SUS 304不锈钢试板、涂敷 TiO_2 活性剂、涂敷 SiO_2 活性剂的同材料、同厚度试

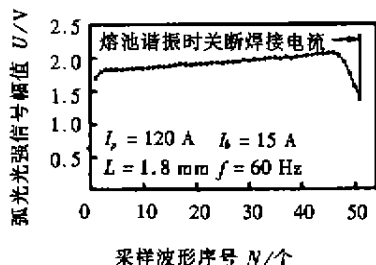


图8 熔池谐振信号检测结果

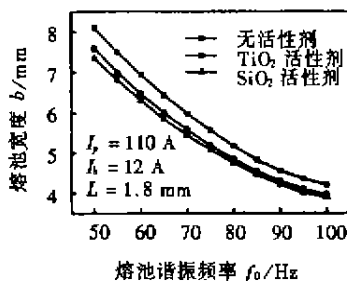


图9 熔池自身固有频率与熔池尺寸之间的对应关系

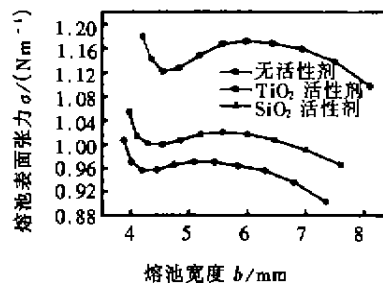


图10 各熔池对应的表面张力测定结果

板进行试验,改变变动电流频率,得到熔池自身固有频率与熔池尺寸之间对应关系曲线见图9。其中,各试板活性剂涂敷量相近,测量结果为 $2 \text{ mg/cm}^2 \sim 3 \text{ mg/cm}^2$ 。

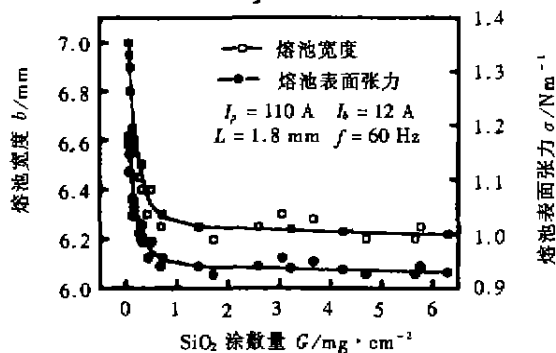
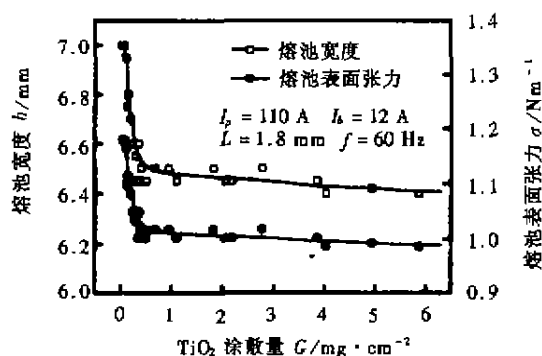
利用公式(3),得到各熔池对应的熔池表面张力变化曲线见图10($H = 1 \text{ mm}$, $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)。

实验结果表明,活性剂(TiO_2 、 SiO_2)具有降低熔池表面张力的作用,其中以 SiO_2 的影响更大于 TiO_2 的影响。活性剂在电弧高温下产生分解,分解出的氧元素与熔池金属中的某种元素反应,提高了熔池温度,从而造成熔池表面张力的降低,更为准确的影响机理有待进一步深入研究。同种试件下,当熔池尺寸较大时,实际电弧加热时间已较长,熔池平均温度较高,熔池表面张力亦有所下降。在熔池尺寸比较小时,实验测得熔池表面张力出现一个特殊的波谷,这是由于熔池处于某一较小尺寸范围时,作为电弧主要导电通道的阳极区范围小,电弧加热相对集中,亦是熔池金属温度增加的结果。

2.3 活性剂涂敷量对熔池表面张力的影响

对不同活性剂涂敷量的试件,在相同的焊接电流参数下按照上述方法进行定点焊接、熔池检测及表面张力测定,考察活性剂涂敷量对熔池表面张力的影响。此项工作对于研究A-TIG焊接熔深的变化规律是有意义的。

实验结果见图11、图12曲线。对于两种活性剂,当涂敷量少于 0.7 mg/cm^2 时,熔池表面张力随涂敷量的改变产生很大变化;当活性剂涂敷量大于 0.7 mg/cm^2 后,熔池表面张力的变化很小,大致成一定数值。这是由于活性剂在电弧高温下分解出的氧元素在电弧阳极区即熔池表面存在饱和的结果。该结果与厚板焊接时对熔深的影响结果是符合的^[2,3](活性剂涂敷量处于 0.7 mg/cm^2 以下时,随着涂敷量的增加,焊接熔深急剧增加;涂敷量大于 0.7 mg/cm^2 后,焊接熔深变化出现饱和)。

图 11 活性剂 SiO_2 涂敷对熔池表面张力的影响图 12 活性剂 TiO_2 涂敷量对熔池表面张力的影响

3 结 论

以熔池谐振方法测得焊接熔池表面张力及其变化,活性剂 TiO_2 、 SiO_2 涂敷在焊件表面较大幅度降低了焊接熔池表面张力,活性剂涂量对熔池表面张力存在影响,涂敷量大于 0.7 mg/cm^2 后熔池表面张力的变化出现饱和,实验方法对于进行焊接现象的深入研究和进行 A-TIG 焊技术的研究具有创造意义。

参 考 文 献

- 1 Paskell T, Lundin C. GTAW flux increases weld joint penetration. Welding Journal, 1997(4):57~62
- 2 杨春利. TIG 电弧活性化焊接现象和机理研究(1). 焊接, 2000(4):16~18
- 3 杨春利. TIG 电弧活性化焊接现象和机理研究(2). 焊接, 2000(5):
- 4 Heiple C R, Roper J R. Mechanism for minor element effect on TIG fusion zone geometry. Welding Journal, 1982, 61(4):97-s~102-s
- 5 Takeuchi Y, Takagi R, Shinoda T. Effect of Bismuth on weld joint penetration in austenitic stainless steel. Welding Journal, 1992, 71(8):283-s~289-s (收稿日期 2000 01 24)

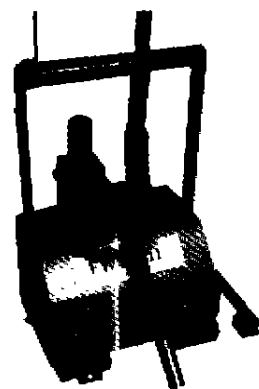
作者简介: 杨春利, 1962 年生, 博士, 副教授。

FWT - I, FWT - II 型角焊缝跟踪器

FWT - I 型角焊缝跟踪器可用于平面角焊缝、搭接焊缝、对接焊缝等的自动焊接。跟踪器可以在平面或斜面上行走,能够上下 30° 的坡。它结构轻巧,携带和操作方便。可实现一人多机操作。适用于焊接桥梁、车辆、造船等行业的钢结构产品。



FWT - I



FWT - II

FWT - II 型角焊缝跟踪器除具有 FWT - I 型的特点外,还增加了焊枪旋转机构和控制器,可实现角到角焊接,能消除焊枪与焊接件间的盲区。控制器还可控制外围设备同时工作,完成并满足不同焊接工艺要求。

哈尔滨焊接研究所自动化工程部

联系人: 孙松涛、王铁军 电话: 6340554 传真: 6325871 地址: 哈尔滨市和兴路 111 号 邮编: 150080