

# 焊接电弧的等离子流力

贾昌申 肖克民 般咸青

(西安交通大学)

**摘要** 以试验为基础,分析了直流TIG电弧阳极热斑表面等离子流力的径向分布、数学表达式、电弧长度及电流的影响,阐述了该力在整个电弧机械作用力中的地位。

**关键词** 焊接; 电弧; 等离子体; 力; 分布

## 0 序言

焊接电弧的等离子流力是焊接电弧中高速运动的等离子流所产生的冲击力,通常又称为电弧的气体动力(气动力)或等离子流的速度压力。焊接过程中,这个力作用于熔池表面使之产生液面差,直接影响熔池中液体金属的运动、焊缝的截面尺寸和成形状况,是电弧的主要机械作用力。

随着现代科技的发展,在焊接领域已开始通过计算机模拟对焊接过程乃至对热应力应变、焊接接头的组织和力学性能进行预测,实践证明,仅按照传统的传热学理论尚不能解决全部问题,由于熔池液面差的形成,熔池的几何尺寸变化范围较大,例如用同一焊接电流数值而用不同焊接方法(埋弧焊与CO<sub>2</sub>焊)所焊焊缝熔深可能差一倍多,为了正确反映客观实际,建立包括力的因素在内的电弧综合数模是重要的,为此必须研究焊接电弧机械作用力及其数学表达式。

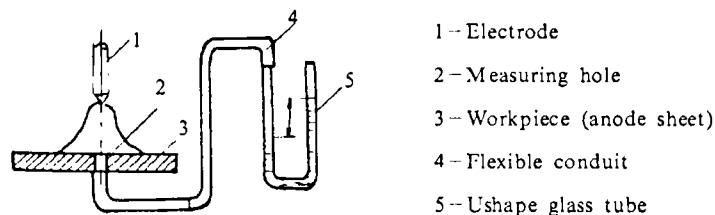


图1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experiment equipment

研究电弧机械作用力的方法早期都用理论分析和计算,70年代始,较多研究人员开始采用实际测量和定量分析的方法。实践证明,实际测量能较精确的反映客观实际,并能澄清某些模糊认识,实际测量的方法很多,但归纳起来大体上可为两类:(1)天秤法,用于测量电弧的总作用力;(2)气压计法,用于测量气体动力。本研究工作采用了此种测量方法,其试验装置如图1所示。图中电极1为Φ4.0mm 钨极,尖锥角60°,顶端平头直径为0.2mm,阳极板3为δ=14mm水冷铜板,测量孔2(Φ0.8mm)通过导管4与“U”形玻璃管5连接,玻璃管内水柱的液面差ΔH可以从标尺上读出,由此换算出单位面积上的气动力。测量过程中电弧固定不动,以维持电弧的轴对称形态,阳极板可以纵向或横向移动。直流正极性电源。试验结果表明,该测量方法简单实用,数据的再现性强,精确度较高。

## 1 等离子流力的径向分布和数学表达式

图2所示各条曲线是根据部分实测结果绘制的,习惯上称它们为实验分布曲线,它们能清楚的表示出等离子流力的径向力分布特征和工艺参数对分布状况的影响,现在的问题是必须找到一个简单的数学表达式,确切反映这一分布规律,使其概念化规范化。

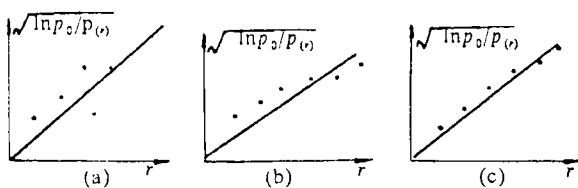


图2 实测的  $\sqrt{\ln p_0/p(r)}$  与  $r$  的关系(弧长3mm)

Fig.2 Relationship between measured  $\sqrt{\ln p_0/p(r)}$  and  $r$  (arc length 3mm)

对此主要有两种见解,大部分研究人员认为,等离子流力的径向分布与阳极斑点上的电流密度分布和等离子流的速度分布特征是一致的,均属于正态分布,即高斯分布;另外一些研究人员则认为,这种力的径向分布应属于双面指数分布<sup>[1~3]</sup>。为了弄清上述两种见解中究竟哪一种更符合实际情况,下面将根据实际测量结果进行分析比较。

首先讨论正态分布。如果焊接电弧中的等离子流力的径向分布是高斯分布,假设温度相对恒定,那么在极坐标体系中,它的分布特征可以用下式来表达:

$$p(r) = p_{\max} \exp(-\alpha r^2) \quad (1)$$

式中  $p_{\max}$  —— 试验分布的压力峰值,在轴对称电弧中等于电弧轴线上的压力  $p_0$ ,即

$p_{\max} = p_0$ , 单位 Pa

$\alpha$  —— 常数,被称为分布曲线的集中系数  $\text{mm}^{-2}$

$r$  —— 径向坐标值 mm

将式(1)变化:

$$\ln p_{(r)} = \ln p_0 - \alpha r^2$$

$$\alpha r^2 = \ln p_0 / p_{(r)} \quad (2)$$

对于特定的高斯曲线而言,  $\alpha$  是常数,  $\sqrt{\ln p_0 / p_{(r)}}$  与  $r$  成直线关系。因此, 如果根据实际测量数据计算得到的  $\sqrt{\ln p_0 / p_{(r)}}$  与  $r$  关系是直线, 那么试验分布曲线就是高斯曲线, 图 2 所示各点就是根据实测结果计算得到的, 显而易见, 它们的连线与直线的差别均较大, 所以说该条件下试验分布不是高斯曲线, 为了直观比较, 根据文献[1] 提供的数据选取适当的  $\alpha$  值, 与实际测定的  $p_0$  值一起代入式(1), 计算出相应于试验分布曲线各个点的  $p_{(r)}$  值, 再绘出相应的高斯分布曲线, 它们与试验分布曲线的差异也是显而易见的。

如果等离子流力的径向分布是双面指数分布, 那么它的表达式为:

$$p_{(r)} = p_{\text{peak}} \exp(-\alpha|r|) \quad (3)$$

式中  $p_{\text{peak}}$  ——电弧轴线上的压力峰值, 可以根据下式求得:

$$p_{\text{peak}} = p_{\max} \frac{\alpha^2 r^2}{2[1 - e^{-\alpha r}(\alpha r + 1)]} \quad (4)$$

$p_{\max}$  ——实测电弧轴线上的气动压力,  $p_{\max} = p_0$ , Pa

$r$  ——测量孔道的半径, mm

系数  $\alpha$  值由下式求得:

$$\alpha = \frac{1}{r'' - r'} \ln \frac{p'}{p''} \quad (5)$$

式中  $r'$ ,  $r''$  ——相应于压力  $p'$ ,  $p''$  的径向坐标值。

将同一条件下实测的  $p', p'' \dots$  和相应的  $r', r'' \dots$  分别代入式(5), 所求得的  $\alpha$  数值都是比较接近的, 因此, 可以取它们的平均值作为该分布的  $\alpha$  值, 将其分别代入式(4), (3) 进行计算, 再将计算结果绘成曲线, 该曲线即为双面指数分布曲线, 比较各曲线表明, 除在电弧轴线上的压力峰值差别较大之外, 双面指数曲线比高斯曲线更接近于试验分布。至于电弧轴线上压力峰值的差别, 可以这样来理解: 实际测量时所用测量孔道直径为  $\phi 0.8$  mm, 所以试验分布曲线上的压力峰值是直径为  $\phi 0.8$  mm 的小圆面积上的平均压力, 而双面指数曲线上的压力峰值是电弧中心一点上的压力, 从这个意义上讲, 指数函数更符合实际情况, 即等离子流力的径向分布更接近于双面指数分布。反复试验表明, 上述结论对于大多数情况下的直流 TIG 电弧是适用的; 在少数情况下, 例如当电弧的弧长较短 ( $L=1$  mm) 时, 分布规律将发生变化, 此时更接近于高斯分布, 图 3b 中的曲线(1)就是较典型的高斯分布曲线。

## 2 焊接规范参数对等离子流力径向分布的影响

影响电弧中等离子流力径向分布的因素很多, 例如弧长、电弧电流、电极尖端的几何形状和尺寸, 保护气体成分等对电弧的等离子流力及其分布均有较大影响, 这里仅研究主要规范参数——电弧电流和弧长的影响。

图 3a 较直观的描绘了电弧电流对等离子流力及其分布的影响, 从中可以看到, 当维

持弧长不变时,随着电流的增大,等离子流力的分布半径和压力峰值均增大,曲线形状也随之变化,当电流增大到一定值时,分布曲线由原来的指数分布曲线变为高斯分布曲线,产生上述变化的原因,主要是随着电流的增大,电弧功率增大,弧柱截面和阳极热斑的尺寸均增大,分布半径加大;与此同时,当电流增大时,因弧柱截面尺寸增大较慢,使电弧的电流密度和等离子流速度加大,所以压力峰值增大。

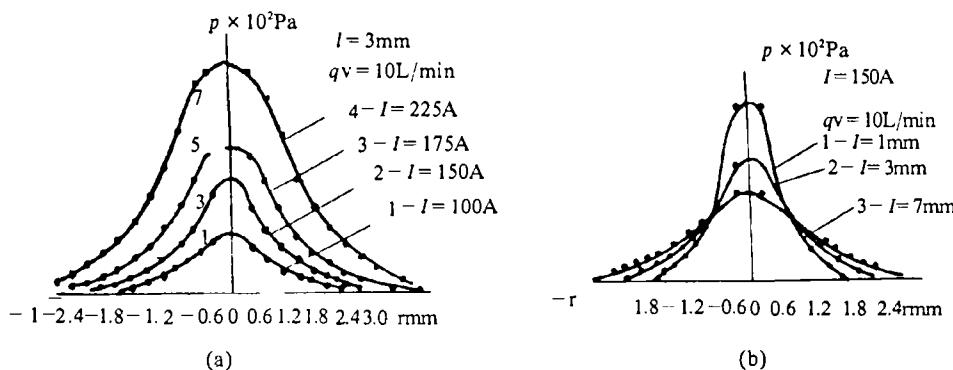


图3 焊接电流和弧长对等离子流力分布的影响

Fig.3 Effect of welding current and arc length on distribution of plasma flow force

图3b所示是弧长对等离子流力及其分布的影响,产生这种影响的原因,是随弧长增大,电弧在阳极板上的活动范围增大,即阳极斑增大,电弧中心的等离子流速度降低,因此使分布半径 $R$ 增大,压力峰值 $p_0$ 减小。弧长在2mm以上时,分布函数为双面指数。

### 3 等离子流力在电弧总机械作用力中的地位

通常讲电弧的机械作用力包括电磁力、等离子流力和气体蒸发反力,关于其中各个分力的作用和大小,以往研究工作中得出的结论是不同的,但随着研究工作的深入和测试技术的进步,认识逐渐趋于一致,即等离子流力是主要力。现根据我们的试验结果分析比较。

关于电弧的总机械作用力,一般认为它与焊接电流的平方成正比,即

$$P = \frac{\mu_0 \mu}{8\pi} I^2 = K I^2 \quad (6)$$

式中 $\mu_0, \mu$ 分别为空气和电弧气氛的导磁系数,在计算中一般令 $\mu = \mu_0$ ,实际上由于电弧温度高和金属蒸气的存在,很难有人测量 $\mu$ 值的大小,为此,某些研究人员用天秤法实际测量 $P$ 值的大小<sup>[4]</sup>。再据式(6)求出不同电流情况下的系数 $K$ ,通过统计分析确定一定条件下(例如某一保护气体成分)的 $K$ 值,以此做为计算依据。A·叶罗欣用上述方法求得的 $K$ 值多在 $(1.20 \sim 1.40) \times 10^{-6} \text{N/A}^2$ 之间<sup>[4]</sup>。

电弧总的等离子流力可以用式(1)或(3)积分的方法求出,所以习惯上称该力为积分力,

即

$$F = \int_0^{2\pi} \int_0^R p(r) r d\varphi dr \quad (7)$$

由于电弧热斑以外的等离子流力为 0, 可以取积分半径  $R = \infty$ , 由式(1), (3)积分得:

$$F_G = \frac{\pi}{\alpha} p_{\max} \text{ (高斯分布)} \quad (8)$$

$$F_E = \frac{2\pi}{\alpha^2} p_{\max} \text{ (双面指数分布)} \quad (9)$$

由于  $p_{\max} = p_0$  与  $I^2$  成正比<sup>[9]</sup>, 所以积分力  $F$  亦与  $I^2$  成正比, 即

$$F = K_1 I^2, \quad K_1 = F/I^2 \quad (10)$$

比较式(6)和式(10)中  $K$  与  $K_1$  实际数值的大小, 就可以确定等离子流力在电弧总机械作用力中的比重(地位), 这里关键问题是选择正确的分布函数  $p(r)$ , 若依照本文阐述的分布规律, 即一般情况下用双面指数分布; 而弧长较短( $L = 1\text{mm}$ )用高斯分布, 由此求得的  $K_1$  值是相当接近的, 例如, 当弧长  $L = 3 \sim 5\text{mm}$ , 电流  $I = 100 \sim 225\text{A}$  范围内, 按指数分布求得的  $K_1 = (1.24 \sim 1.33) \times 10^{-6}\text{N/A}^2$ ; 而弧长  $L = 1\text{mm}, I = 100 \sim 200\text{A}$  范围内, 按高斯分布求得的  $K_1 = (1.06 \sim 1.35) \times 10^{-6}\text{N/A}^2$ , 比较由式(10)得到的  $K_1$  与文献[4]列出的  $K$  值大小, 能充分说明, 在电弧诸力中, 等离子流力是主要的, 起决定作用的, 它几乎占电弧总机械作用力的 80% 以上, 该结论与文献[5]中的提法是一致的。

#### 4 结 论

(1) 焊接电弧中等离子流力的径向分布, 一般情况下属双面指数分布, 个别情况下, 例如弧长短、电流较大时近于高斯分布。

(2) 随着电弧电流增大, 等离子流力的分布半径增大, 压力峰值增大; 随着弧长增大, 分布半径增大, 压力峰值降低。

(3) 等离子流力是电弧的主要机械作用力, 它可占电弧总机械作用力的 80% 以上。

(1993 年 10 月 29 日收到修改稿)

## 参考文献

- 1 Ерохин А.А. Силовое воздействие дуги на расплавляемый металл. Автоматическая Сварка, 1979.
- 2 Котов Г.Н. Распределение газокинетической составляющей давления дуги по ее радиусу. Автоматическая Сварка, 1974.
- 3 Кубланов В.Я. Силовое воздействие дуги на ванну расплавленного металла. Сварочное Производство, 1974.
- 4 Селянников В.Н. Силовые и тепловые характеристики ионизированной компоненты потока плазмы дуги, горящей в аргоне. Автоматическая Сварка, 1982.
- 5 Селянников В.Н. Некоторые зависимости тепловых и силовых характеристик дуги от электрического режима и геометрических параметров электрода. Сварочное Производство 1981.

## Plasma flow force of welding arc

Jia Changshen, Xiao Kemin and Yin Xianqing

(Xi'an Jiaotong University)

**Abstract** Based on experiment, the radial distribution, mathematical expression, arc length and current effect of the plasma force of direct current TIG arc welding anode spot surface were analysed, and the contribution of this force to the whole arc mechanical reaction force was also described.

**Key words** welding; electrical arc; plasma; force; distribution