

# 外加纵向磁场 GTAW 焊接机理\*

## II. 电弧模型

罗 键<sup>1,2)</sup> 贾昌申<sup>2)</sup> 王雅生<sup>2)</sup> 薛 锦<sup>2)</sup> 吴毅雄<sup>1)</sup>

1) 上海交通大学焊接研究所, 上海 200030

2) 西安交通大学焊接研究所, 西安 710049

**摘 要** 针对外加纵向磁场 GTAW(gas tungsten-arc welding) 焊接过程, 采用小孔气体微压传感器法和钨极探针法分别测定了外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧在水冷 Cu 阳极板上的等离子流力和电流密度的分布, 并对其规律进行了研究, 建立了外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧等离子流力和电流密度的径向分布数学物理模型

**关键词** 纵向磁场, 钨极氩弧焊, 电弧特性, 电流分布模型

中图分类号 TG456.2

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2001)02-0217-04

## MECHANISM OF THE GAS TUNGSTEN-ARC WELDING IN LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD CONTROLLING

### II. Model of the Arc

LUO Jian<sup>1,2)</sup>, JIA Changshen<sup>2)</sup>, WANG Yasheng<sup>2)</sup>, XUE Jin<sup>2)</sup>, WU Yirong<sup>1)</sup>

1) Welding Research Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030

2) Welding Research Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

Correspondent: LUO Jian, Tel: (021)62932585, E-mail: jluo@mail1.sjtu.edu.cn.

Manuscript received 2000-07-11, in revised form 2000-10-12

**ABSTRACT** In gas tungsten-arc welding (GTAW) with longitudinal magnetic field controlling, the distribution of arc plasmas force and electrical current density are measured by a barometer method and a probe method. The rules of distribution are analyzed. Under the conditions of weak magnetic field and small welding current, the distribution models of arc plasma force and electrical current density in GTA welding with longitudinal magnetic controlling are established.

**KEY WORDS** longitudinal magnetic field, GTAW, arc property, current distribution model

外加间歇交变纵向磁场电弧焊接技术可以有效地搅拌焊接熔池, 改变熔池金属的结晶状况, 细化焊缝金属的一次结晶组织, 减小化学不均匀性, 提高焊缝金属的塑性和韧性; 降低结晶裂纹和气孔的敏感性; 提高奥氏体不锈钢焊缝金属抗晶间腐蚀的能力, 全面提高焊接质量。

外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧电流密度和电弧等离子流力影响到电弧热场、电弧速度场以及电弧形状等, 与工件热量的输入、焊接熔池的搅拌和焊缝成形等都有直接关系, 电弧等离子流力和电流密度是焊接电弧的主要特

征参数。目前, 国内外关于外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧电流密度和电弧等离子流力等焊接电弧特性方面的研究比较薄弱, 基础理论研究并不十分全面与系统。然而, 焊接电弧电流密度和电弧等离子流力分布的研究对焊缝组织与性能的预测、焊接质量控制等都具有重要的意义。因此, 本文针对外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧, 集中讨论水冷 Cu 阳极表面电弧等离子流力和电流密度的径向分布情况及其数学描述, 所得结果有利于建立与外加纵向磁场 GTAW 焊接机制有关的基础理论, 对焊接实践也有指导意义。

### 1 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧等离子流力的测定

在普通 GTAW 焊接电弧中, 电弧等离子流力的径向

\* 国家自然科学基金资助项目 59775059

收到初稿日期: 2000-07-11, 收到修改稿日期: 2000-10-12

作者简介: 罗 键, 男, 1971 年生, 土家族, 博士

分布特征与电流密度、电弧温度、等离子气流的速度分布特征基本一致,大体上属于正态(Gauss)分布或双面指数分布<sup>[1]</sup>,但在外加纵向磁场作用下,GTAW焊接电弧等离子流力的分布会发生变化<sup>[2-6]</sup>

### 1.1 实验方法

本文采用静态测定法<sup>[1,7]</sup>测定焊接电弧气动压力,由于U形玻璃管压力计和双液态式压力计的反应速度慢,不能满足测量要求,为此在实验中采用了微压传感器作为压力计,采用标准浮球式压力计对传感器进行标定,外加纵向磁场GTAW焊接电弧等离子流力的测量装置如图1所示。

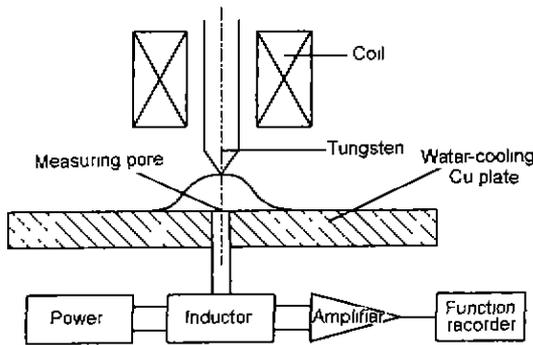


图1 外加纵向磁场GTAW电弧等离子流力测量装置示意图

Fig.1 Diagram of measuring arc plasmas force in GTAW with longitudinal magnetic field

图1阴极采用钨钨极,阳极是厚度为14mm的水冷紫铜板,直径为0.6mm的测量孔通过导管与微压传感器相连,微压传感器的输出信号经信号放大器放大后,由计算机记录,其测试平台为一微型机床,可精确调节其相对位置,阳极Cu板的厚度和冷却水的流量决定了所能测试的焊接工艺条件的最大范围

以外加纵向磁场GTAW焊接电弧为测试对象,钨极直径为3.2mm,尖锥夹角为60°,电弧长度为3mm,Ar气流量为6—12L/min,选用NZA-500-1型氩弧焊机施焊,水冷Cu板作阳极,外加纵向磁场由固定在焊炬喷嘴上的特制线圈产生,外加纵向磁场的磁感应强度可以在0—0.2T之间无级调节,测量时移动水冷阳极Cu板,焊接电弧的位置固定不动,保持焊接电弧轴对称稳定状态,为了保持钨极形状、便于对中和调节弧长,实验中采用高频引弧

### 1.2 外加纵向磁场GTAW焊接电弧等离子流力的径向分布特征

图2所示为焊接电流为100A,电弧长度为3mm,在不同磁感应强度情况下,根据多次实际测量数据绘制的外加恒定纵向磁场作用下GTAW焊接电弧等离子流力的径向分布曲线。

由图2可见,在普通GTAW焊接时( $B=0$ ),焊接电弧等离子流力在电弧中心处压力最大,为轴对称分布,而

在外加纵向磁场GTAW焊接时( $B \neq 0$ ),焊接电弧中心等离子流力降低,边缘某区域等离子流力较大,也为轴对称分布,在外加纵向磁场作用下,在焊接电弧边缘某一区域的等离子流力明显增大,并在离电弧中心一定距离处出现最大值,使焊接电弧等离子流力在整个电弧径向上的分布出现双峰值现象,从电弧外形的直观照片来看(见第I部分图4),焊接电弧外形轮廓的上部分在收缩,下部分在扩张,出现“边缘集中”现象。

本文认为焊接电弧等离子流体内外压力差与等离子流体旋转所产生的离心力相平衡,使外加纵向磁场GTAW焊接电弧保持相对稳定状态,研究表明<sup>[2-5]</sup>,外加纵向磁场的磁感应强度为0.1T左右时是转折值;在焊接电流较小( $I \leq 200$ A)、外加磁场较弱( $B \leq 0.1$ T)的情况下,随着外加纵向磁场强度的增大,外加纵向磁场GTAW焊接电弧回转半径增大,即焊接电弧压力的作用范围变大;当焊接电流较大、外加磁场较强时,焊接电弧特性的变化将十分复杂,需要进行深入的研究。

### 1.3 外加纵向磁场GTAW焊接电弧等离子流力分布模型

在小焊接电流( $I \leq 200$ A)和弱外磁场强度( $B \leq 0.1$ T)的条件下,利用焊接电弧等离子流力的多次实验测量值,采用多峰值Gauss分布公式进行数值回归分析,建立了外加纵向磁场GTAW焊接电弧等离子流力径向分布模型

$$\left. \begin{aligned} p(r)_{\text{arc}} &= p_0 \cdot \frac{\mu_0 I^2 K}{\pi} \exp[-K(r - r_\varphi)^2] \\ K &= \frac{a}{2\sigma_p^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $p(r)_{\text{arc}}$ 为焊接电弧压力径向分布, $p_0$ 为电弧压力常数, $\mu_0$ 为磁导率, $I$ 为焊接电流, $K$ 为压力集中系数, $r$ 为半径, $r_\varphi$ 为压力最大峰值处的半径, $a$ 为压力集中系数常数, $\sigma_p$ 为焊接电弧压力分布参数,定义为焊接电弧压力衰减至最大值的5%时的径向距离

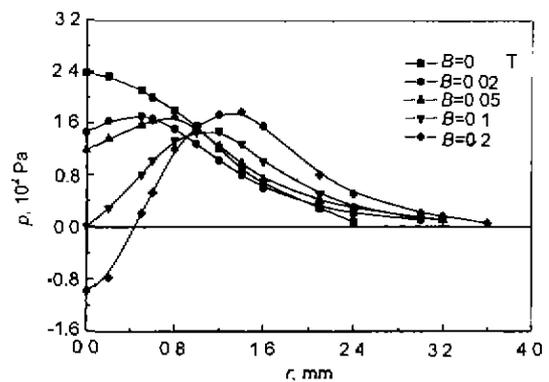


图2 外加纵向磁场GTAW实测电弧等离子流力沿径向的分布

Fig.2 Distribution of arc plasmas force measured in GTAW with longitudinal magnetic field

当焊接电流为 100 A、外加磁场强度为 0.02 T 时采用上述模型对焊接电弧等离子流力 ( $p$ ) 的径向分布进行拟合, 其拟合曲线如图 3 所示。

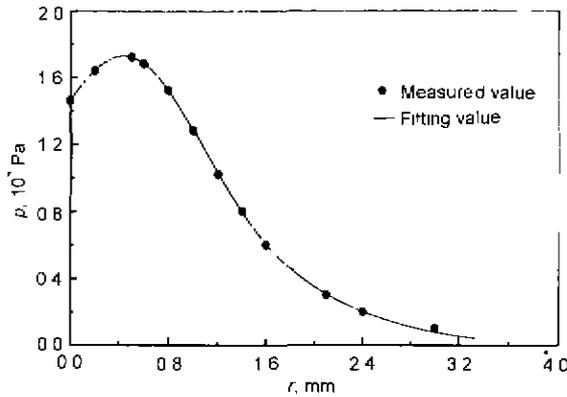


图 3 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧等离子流力的拟合曲线

Fig.3 Fitting curve of arc plasmas force in GTAW with longitudinal magnetic field

从图 3 可知, 外加纵向磁场 GTAW 电弧等离子流力径向分布的测量值与模型拟合曲线吻合较好。从表达式 (1) 可知, 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧等离子流力的径向分布模型中各参数均具有其特定的物理意义, 并不是简单的数学回归公式。因此, 该模型为外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧等离子流力径向分布的数学物理模型, 拟合结果表明所建立的模型比较准确。由此可见, 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧等离子流力的分布模型与普通 GTAW 焊接电弧等离子流力的 Gauss 正态分布模型有着明显不同。

## 2 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧电流密度的测定

### 2.1 实验方法

采用探针法测量直流正极性 GTAW 焊接电弧阳极表面电流密度的径向分布。实验装置示意图如图 4 所示。实验所用探针是直径为 0.6 mm 的钨钨极, 它与水冷 Cu 极板之间的绝缘层厚度为 0.05—0.15 mm, 水冷 Cu 阳极板上的小孔直径为 0.8 mm。记录仪上记录的电流为每一点上 (相当于探针表面积) 的电流数值, 再除以探针表面积即得该点的电流密度值。

### 2.2 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧电流密度的分布特征

图 5 为焊接电流为 100 A, 电弧长度为 3 mm, 在不同磁感应强度情况下, 根据测定结果所绘制的一组外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧电流密度的径向分布曲线。

从图 5 可知, 在外加纵向磁场作用下, 焊接电弧中心轴上的电流密度明显减小。当磁感应强度值较大时, 焊接电弧中心轴上的电流密度 ( $J$ ) 减小到接近于零值。与此同时, 在焊接电弧边缘某处的电流密度显著增大, 并在距

离焊接电弧中心轴一定距离处出现最大值, 使电流密度在整个电弧径向上的分布出现双峰现象 (对称的)。这种焊接电弧电流密度径向分布的变化, 也直接反映了焊接电弧形态和能量分布的变化

应该指出的是, 在纵向磁场作用下, 直流正极性 GTAW 焊接电弧电流密度与等离子流力的径向分布并不完全一致, 在外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧变为空心电弧后 (外加磁场强度较大时), 这种差别更为明显。图 6 给出了焊接电流为 100 A、外加纵向磁场的磁感应强度为 0.1 T 时, 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧电流密度和等离子流力的径向分布曲线。

### 2.3 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧电流密度分布模型

在小焊接电流 ( $I \leq 200$  A)、弱外加磁场强度 ( $B \leq 0.1$  T) 的条件下, 分析外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧电流密度的径向分布特征, 利用焊接电弧电流密度的多次测量值, 采用多峰值 Gauss 分布公式进行数值回归分析, 建立了外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧电流密度径向分布模型

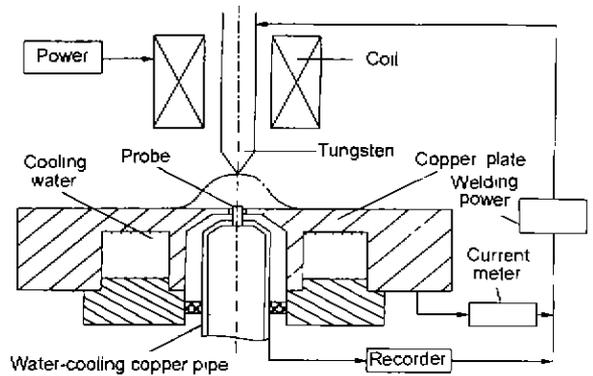


图 4 实验装置示意图

Fig.4 Diagram of measuring arc current density in GTAW with longitudinal magnetic field

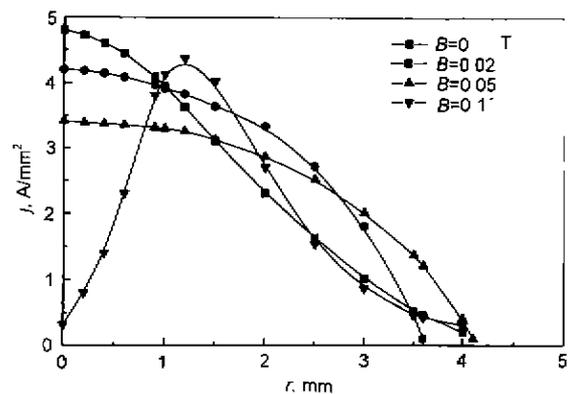


图 5 外加纵向磁场 GTAW 实测电弧电流密度的径向分布

Fig.5 Distribution of arc current density ( $J$ ) measured in GTAW with longitudinal magnetic field

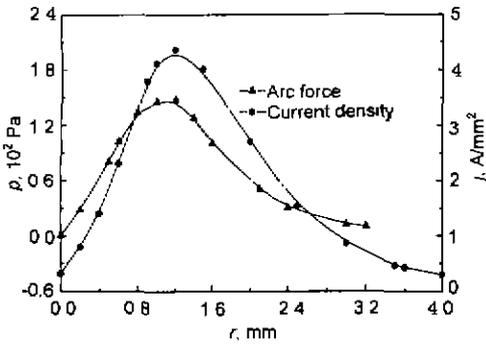


图6 外加纵向磁场 GTAW 电弧电流密度和等离子流力的径向分布  
Fig.6 Distribution curves of arc current density ( $j$ ) and plasmas force ( $p$ ) in GTAW with longitudinal magnetic field ( $B=0.1$  T)

$$\left. \begin{aligned} j(r)_{\text{arc}} &= j_0 \cdot \frac{K'I}{\pi} \exp[-K'(r-r_0)^2] \\ K' &= \frac{a}{2\sigma_j^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中  $j(r)_{\text{arc}}$  为电弧电流密度的径向分布,  $j_0$  为电流密度常数,  $K'$  为电流密度集中系数,  $I$  为焊接电流,  $r_0$  为最大峰值处的径向距离,  $a$  为集中系数常数,  $\sigma_j$  为焊接电弧电流密度分布参数, 定义为电流密度衰减至最大值的 5% 时的径向距离, 外加纵向磁场的磁感应强度将影响  $\sigma_j$  的大小。

当外加纵向磁场 GTAW 焊接电流为 100 A、外加纵向磁场的磁感应强度为 0.02 T 时, 采用上述模型对外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧电流密度的径向分布进行拟合, 其拟合曲线如图 7 所示。

从图 7 可知, 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧电流密度径向分布的测量值与模型拟合曲线吻合较好, 说明该

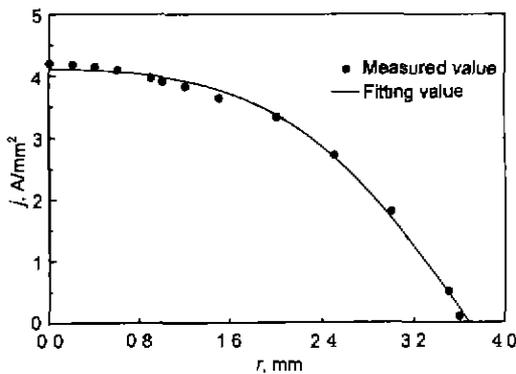


图7 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧电流密度的拟合曲线  
Fig.7 Fitting curve of arc current density in GTAW with longitudinal magnetic field

模型较准确。从表达式 (2) 可知, 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧电流密度径向分布模型中各参数也具有其特定的物理意义, 并不是简单的数学回归公式。因此, 该模型为外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧电流密度径向分布的数学物理模型。同时, 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧电流密度的分布模型与普通 GTAW 焊接电弧电流密度的 Gauss 正态分布模型也有着明显不同。

### 3 结论

(1) 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧等离子流力 (电弧压力) 的分布特征改变为中心压力低, 边缘区压力较高的双峰复杂分布, 具有轴对称性。在本实验条件下, 随着外加纵向磁场强度的增大, 电弧中心区压力不断降低并可出现负值, 边缘区压力不断增大。当外加磁场较弱时, 随着磁场强度的增大, 回转半径增大。首次建立了外加恒定纵向弱磁场 ( $B \leq 0.1$  T)、小电流 ( $I \leq 200$  A) GTAW 焊接电弧等离子流力 Gauss 双峰分布的数学物理模型

$$p(r)_{\text{arc}} = p_0 \cdot \frac{a\mu_0 I^2}{2\pi\sigma_p^2} \exp\left[-\frac{a(r-r_0)^2}{2\sigma_p^2}\right]$$

(2) 外加纵向磁场作用下, 随着磁场强度的增大, GTAW 焊接电弧电流密度重新进行了分布, 其电弧中心区电流密度不断减小, 直到接近于零, 而边缘出现电流密度最大峰值, 实际上形成了环形导电截面。首次建立了外加恒定纵向弱磁场 ( $B \leq 0.1$  T)、小电流 ( $I \leq 200$  A) GTAW 焊接电弧电流密度 Gauss 双峰分布数学物理模型

$$j(r)_{\text{arc}} = j_0 \cdot \frac{aI}{2\pi\sigma_j^2} \exp\left[-\frac{a(r-r_0)^2}{2\sigma_j^2}\right]$$

### 参考文献

- [1] Jia C S, Xiao K M, Yin X Q. *Trans China Weld Inst.*, 1994; 15: 101  
(贾昌申, 肖克民, 殷威青. 焊接学报, 1994; 15: 101)
- [2] Luo J, Jia T, Yin X Q. *Acta Metall Sin.*, 1999; 35: 330  
(罗 键, 贾 涛, 殷威青. 金属学报, 1999 35 330)
- [3] Kuznetsov V D. *Weld Prod.*, 1972; 19(4): 1
- [4] Willgoss R A. *Weld Met Fabr.*, 1981; 49: 189
- [5] Yin X Q, Luo J, Li H G. *J Xi'an Jiaotong Univ.*, 1999; 33(7): 71  
(殷威青, 罗 键, 李海刚. 西安交通大学学报, 1999; 33(7) 71)
- [6] Jia C S, Yin X Q, Jia T, Liu H X. *J Xi'an Jiaotong Univ.*, 1994; 28(4): 7  
(贾昌申, 殷威青, 贾 涛, 刘海侠. 西安交通大学学报, 1994; 28(4): 7)
- [7] Jin Y M, Fan Y S. *Physical Principle of Low Temperature Plasmas.* Beijing: Tsinghua University Press, 1983: 1  
(金佑民, 樊友三. 低温等离子体物理基础. 北京: 清华大学出版社, 1983: 1)