

文章编号: 2095-2163(2020)02-0293-04

中图分类号: TG403

文献标志码: A

# 微束等离子弧焊气体流量配比的数值模拟

张兵, 何建萍, 张济楠

(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

**摘要:** 等离子弧焊电弧稳态性好, 电弧能量高, 穿透力强, 能实现单面焊双面成形, 特别适合超薄板的焊接。在焊接过程中, 电弧的形态和稳定性以及对工件的热输入对焊缝成形和焊接质量的影响都是显著的, 单从工艺试验和电弧宏观上的表现无法准确反映电弧与焊接质量的关系。得益于计算机技术的快速发展和有限元分析软件在焊接领域的应用, 利用 ANSYS 有限元分析软件, 建立了电弧的三维有限元模型, 比较不同离子气与保护气流量的配比的电弧温度场、流场、电磁力和电弧压力的分布特征, 通过数据分析, 选择合适的气体流量配比, 为工艺试验提供可靠的数据参考。

**关键词:** 微束等离子弧焊; 气体; 流量配比; 数值模拟

## Numerical simulation of ratio of gas flow in micro-plasma arc welding

ZHANG Bing, HE Jianping, ZHANG Jinan

(School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**[Abstract]** The steady state of plasma arc welding is good, meanwhile the plasma arc welding has high arc energy and strong penetration, which can realize single-side welding and double-side forming, especially suitable for the welding of ultra-thin plate. In the process of welding, the shape and stability of arc as well as the heat input to the work-piece have significant effects on weld formation and welding quality. But the macro performance of the process test and the arc alone cannot accurately reflect the relationship between the arc and the welding quality. Because of the rapid development of computer technology and the application of finite element analysis software in the field of welding, using ANSYS finite element analysis software, the paper sets up the three-dimensional finite element model of arc, compares arc temperature field, flow field, electromagnetic force and the arc pressure distribution characteristics between different ion gas and protection gas flow ratio. Through the data analysis, the paper selects the appropriate ratio of gas flow and provides reliable reference data for process test.

**[Key words]** micro-plasma arc weld; gas; ratio of flow; numerical simulation

## 0 引言

微束等离子弧焊(焊接电流小于 30 A), 是一种熔入型焊接<sup>[1-3]</sup>。微束等离子弧焊采用小孔径压缩喷嘴, 电弧形式为混合型等离子弧, 即转移弧和非转移弧同时存在<sup>[4]</sup>。等离子电弧受到 3 种压缩效应: 机械压缩、热压缩和磁压缩, 具有电弧弧柱温度高、热量集中、效率高、工件变形小的特点, 因此微束等离子弧焊经常应用在精密仪器、航空航天、医疗器械等高精度焊接领域<sup>[5-6]</sup>。

电弧是离子气在高电压和强电场下电离放电现象, 由焊接电源直接供给能量<sup>[7]</sup>。在焊接过程中, 电弧直接提供热源, 电弧的温度变化会影响工件熔池的形成, 而不同的离子气和保护气之间的配比关系, 将会影响气体的电离度和工件的保护效果, 进而影响焊缝成形质量。利用 ANSYS 先对小弧(非转移

弧)进行数值模拟, 其结果再以载荷的形式加载到主弧(转移弧)上进行耦合, 通过不同离子气和保护气流量的不同配比, 从电弧温度场、流场、电弧压力以及电磁力方面入手进行数值计算分析, 对研究直流微束等离子弧焊电弧与气流量的关系的多样性和复杂性提供了重要的参考价值。

## 1 等离子弧焊数学模型的建立

### 1.1 基本假设

- (1) 等离子弧是连续、稳定、轴对称的。
- (2) 电弧处于局部热动态平衡(LTE)。
- (3) 电弧处于光学薄且处于不可压缩的层流状态。
- (4) 忽略电弧因为光辐射而散失的热量。
- (5) 电弧区的气体为纯氩。

基于基本假设, 建立等离子弧的二维一半数学

**基金项目:** 国家自然科学基金(51775327); 上海市科委基础研究重点项目(14JC1402700)。

**作者简介:** 张兵(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 微束等离子弧焊的电流与气体流量配比机制; 何建萍(1964-), 女, 教授, 主要研究方向: 微束等离子弧焊接。

**通讯作者:** 何建萍 Email: janejphe@163.com

**收稿日期:** 2019-10-12

几何模型的,如图1所示。图1中,区域ABGF为钨棒,EJ为喷嘴的内壁面,CD为工件上表面,FE为离子气入口,JI为保护气入口,ID为保护气出口。由于微束等离子弧焊的维弧主要在钨棒和喷嘴内壁之间燃烧,在计算维弧电磁场时选取AEJH区域,流场计算区域为BGFEJIDC。

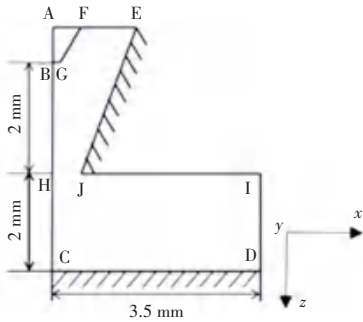


图1 电弧的数学几何模型

Fig. 1 Mathematical geometric model of arc

1.2 控制方程

电弧是在阳极和阴极之间高电压和强电场下的一种电离现象,在电弧的计算过程中,必须用到磁流体的动力学方程。

质量连续方程可表示为:

$$\vec{N} \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \tag{1}$$

质量守恒方程可表示为:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{N}p + (\mu \vec{N}\vec{v}) + \vec{J} \times \vec{B}, \tag{2}$$

能量守恒方程可表示为:

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = -\vec{N} \cdot (k \vec{N}T) + \frac{J^2}{\sigma} - S_r + \frac{5}{2} \frac{k_b}{e} \vec{J} \cdot \vec{N}T. \tag{3}$$

其中,ρ为等离子体密度;t为时间; $\vec{v}$ 为速度矢量;p为压力;μ为粘性系数;C<sub>p</sub>为比热容;K为热导率;T为温度;S<sub>r</sub>为辐射流密度;B为磁感应强度;σ为电导率;J为电流密度;J<sub>r</sub>,J<sub>z</sub>分别为径向、轴向电流密度;Φ为电势;μ<sub>0</sub>为真空磁导率。

电磁场边界条件:钨棒端面BG处的电流值I=0.5 A,喷嘴内壁EI处电势为0,电弧轴对称线设为BC磁感应强度为B的垂直边界。

温度场边界条件:钨棒端面BG和FG温度分布随时间递增见式(1),喷嘴内壁EI,离子气入口EF及出口CD。

流场边界条件:钨棒端面BG和GF、喷嘴内壁面EJ以及工件表面CD均设为光滑,保护气体出口ID处的相对压强为0,电弧轴对称面BC处的y方向

上的速度分量为0,离子气入口EF处的x和y方向的离子气流量均为0 L/min,z方向的离子气流量根据电流参数的不同进行设置。保护气入口JI处的x和y方向的保护气流量均为0 L/min,z方向的气流量根据离子气流量的大小做相应的调整。

2 有限元分析

根据图1的几何模型,先对维弧(小弧)物理过程进行数值模拟分析,在此计算基础上,得到维弧各个物理场分析的结果文件,其中包括维弧的温度场、电磁场、电弧压力以及流场的数据结果,然后再将这些结果文件作为新的环境载荷加载到主弧上,对微束等离子弧焊维弧-主弧进行耦合。其中,钨棒的直径为1 mm,钨棒内缩喷嘴2 mm,喷嘴离工件2 mm,钨棒锥度60°,喷嘴直径1 mm。电弧有限元模型如图2所示。

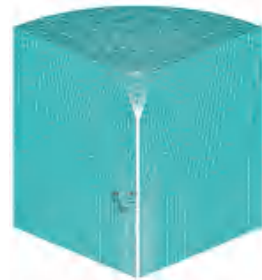


图2 电弧有限元模型

Fig. 2 Finite element model of arc

3 计算结果与分析

实验研究发现,当焊接电流不变时,随着离子气流量的增大,电弧的弧柱先由倒圆锥形电弧变为圆柱形电弧,再变为蘑菇底圆柱电弧。焊接电流为0.5 A时,气流量的配比分别为0.1/3.5 L/min和0.5/3.5 L/min以及焊接电流为4 A下气流量配比为0.5/3.5 L/min和1.0/3.5 L/min进行探讨。探讨分析详情如下。

3.1 不同气体配比维弧-主弧温度场分布特征

焊接电流0.5 A时的气体配比维弧-主弧温度场分布特征如图3所示。

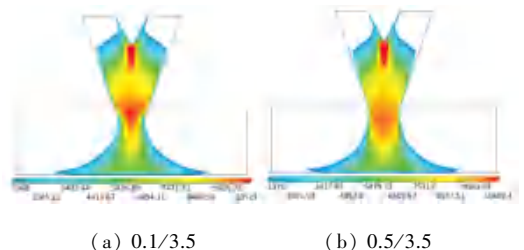


图3 焊接电流0.5 A时不同气体配比电弧温度场

Fig. 3 Temperature field of non-transferred arc coupled with transferred arc in different Ion gas flow/protection gas

### flow (0.5 A current)

由图3可以看出,气体配比在0.1/3.5时,喷嘴下方较高温度区域很窄,温度较低。当气体配比增加到0.5/3.5时,喷嘴对电弧的压缩作用增强,温度分布更加集中,最高温度由10 523 K升到10 609 K。靠近喷嘴出口处,随着气体配比由0.1/3.5到0.5/3.5的变化,电弧逐渐向两侧扩展,高温区域变大,而图3(a)中电弧很窄很瘦,电离度也不够,因此离子气流量还应该适当提高。

### 3.2 不同气体配比维弧-主弧流场分布特征

在微束等离子弧焊接过程中,有2种气体存在,即保护气和离子气。2种气体的流动形态分为湍流和层流,或者2种形态同时存在。当离子气与保护气之间是层流时,保护气对离子气起着保护作用,不受外界空气的干扰,同时保护工件避免在高温下被氧化影响工件对接接头的力学性能。由3.1节中温度场的分布特征可知,气体配比不同,最高温度和温度分布也不同,必然影响气体流速。

如图4所示,在焊接电流0.5 A,气体配比0.1/3.5和0.5/3.5对应的流场云图分别为图4(a)和4(b)的左下方大图,对应喷嘴出口流场分布的放大图为图4(a)和图4(b)的右上方小图。由图4可以得知,随着离子气流量的增加,电弧轴中心线上的流速增加,但是在0.1/3.5配比下,2种气体之间出现了湍流,电弧流场方向混乱无序,而气体配比为0.5/3.5时,湍流现象消失,气体流动状态为层流。

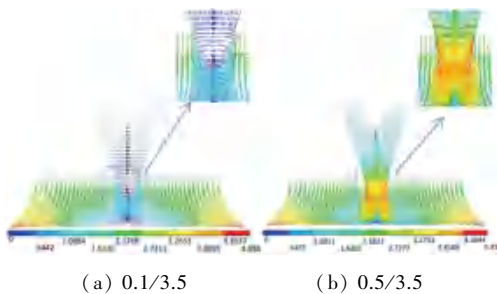


图4 不同气体配比维弧-主弧轴向流场分布特征

Fig. 4 Axial velocity distribution of non-transferred arc coupled with transferred arc in different Ion gas flow/protection gas flow

### 3.3 不同气体配比维弧-主弧电磁力分布特征

不同气体配比会影响电弧的温度,温度不变化会影响气体的电离度,电离度的不同必然影响电流密度的分布,进而影响电磁力。

焊接电流为0.5 A时,气体配比0.1/3.5和0.5/3.5时,电弧的电磁力分布如图5所示。可以看出,靠近钨棒端面的电磁力最大,当气流量由0.1/3.5

到0.5/3.5变化时,电磁力的最大值增加。这是因为离子气流量增大,电离的离子气增多,电离度增强,电离密度变大,使得电磁力增大。通过图5(a)和图5(b)看出,喷嘴内的轴向电磁力主要集中在钨棒端面附近以及电弧轴中线附近,而喷嘴外的轴向电磁力很小。

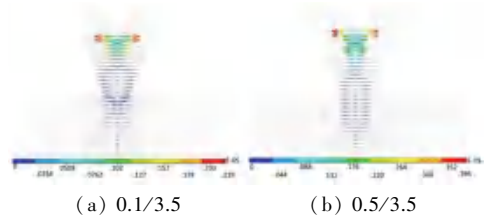


图5 不同气体配比维弧-主弧电磁力分布特征

Fig. 5 Magnetic force distribution of non-transferred arc coupled with transferred arc in different Ion gas flow/protection gas flow

### 3.4 不同气体配比维弧-主弧电弧压力分布

电弧压力主要是指等离子流对阳极表面的冲击作用,因此,气体流量对比对电弧压力的大小有很大的影响。

气体配比为0.1/3.5和0.5/3.5时的微束等离子弧焊电弧的维弧-主弧电弧压力分布如图6所示。可以看出,最大电弧压力均在点和中心位置,当气体配比由0.1/3.5变化到0.5/3.5时,最大电弧压力从31 Pa到36 Pa,且电弧压力的分布区域也有所增大。这是因为电磁力的增大,靠近工件表面斜向下指向电弧中心的电磁力推动等离子体向工件运动,电磁力的作用使得这种推力增大,加速等离子体的流速,对工件表面的冲击力也变大,进而增大电弧压力。

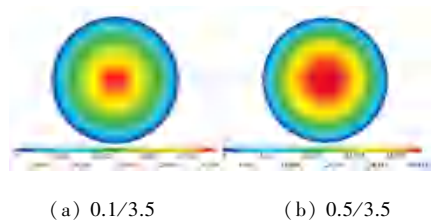


图6 不同气体配比维弧-主弧电弧压力分布

Fig. 6 Arc pressure distribution of non-transferred arc coupled with transferred arc in different Ion gas flow/protection gas flow

## 4 结束语

通过对电流为0.5 A,气体配比(离子气流量/保护气流量)分别为0.1/3.5和0.5/3.5时的微束等离子弧焊电弧的温度场、流场、电磁力以及电弧压力的分布分别进行了计算研究,探讨了比较合适的气体配比。得出以下结论:



(1) 气体配比 0.1/3.5 较气体配比 0.5/3.5 时靠近喷嘴出口处电弧要窄很多,较高的温度分布区域变小,电离度不够。

(2) 气体配比 0.1/3.5 时,喷嘴出口处出现了湍流,电弧流畅的方向混乱无序,保护气对离子气的流动产生干扰,2 种气体之间出现旋涡,当气体配比为 0.5/3.5 时湍流现象消失,2 种气体之间出现层流。通过对比,0.5/3.5 的气体配比效果要比 0.1/3.5 时的要好,更有利于电弧的稳定。

(3) 气体配比为 0.1/3.5 时,离子气流量太小,气体的电离度不够,喷嘴外几乎没有电磁力的分布,而气体配比为 0.5/3.5 时,喷嘴外电磁力虽小,但仍有电磁力的分布,且喷嘴外的电磁力也主要分布在电弧轴中心线附近。

(4) 气体配比由 0.1/3.5 变化到 0.5/3.5 时,电弧压力也随之增大,并且分布区域也变大,电弧压力的最大值出现在电弧的中心位置。

## 参考文献

[1] LIU Gu, WANG Liuying, WANG Wei. Numerical simulation and experimental investigation of multi-function micro-plasma jet and alumina particle behaviour [J]. MATEC Web of Conferences, 2016, 67:03051.

[2] XU Peiquan, YAO Shun, HE Jianping, et al. Numerical analysis for effect of process parameters of low-current micro-PAW on constricted arc [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 44(3-4):255.

[3] SOO Y S, JIN K S, LEE J K. Numerical simulation research in plasma technologies 5. kinetic simulation of micro plasmas [J]. Journal of Plasma & Fusion Research, 2004, 80(2):132.

[4] 张济楠,何建萍,王晓霞,等. 微束等离子弧焊电弧温度场的数值模拟[J]. 焊接技术, 2016(5):34.

[5] 王昂洋,何建萍,林杨胜蓝,等. 脉冲微束等离子弧焊电弧的辐射强度变化规律[J]. 热加工工艺, 2016(15):164.

[6] 王昂洋,何建萍,王晓霞,等. 微束等离子弧焊电弧温度场的分布特征及参数影响[J]. 焊接学报, 2017, 38(8):77.

[7] 王晓霞. 微束等离子弧焊电弧物理过程的研究[D]. 上海:上海工程技术大学,2015.

[8] 殷凤良,胡绳荪,郑振太,等. 等离子弧焊电弧的数值模拟[J]. 焊接学报, 2006, 27(8):51.

[9] 马立,胡绳荪,殷凤良,等. 等离子弧焊接过程数值模拟的现状和发展[J]. 焊接, 2005(8):8.

[10] 王怀刚,武传松. 小孔等离子弧焊接热场分析的热源模型 [C]// 第十一次全国焊接会议论文集(第2册). 上海:中国焊接协会,2005:2.

[11] 殷凤良. 等离子弧焊接过程的数值模拟[D]. 天津:天津大学,2007.

[12] 毛志伟,钟庆飞,周少玲,等. 喷嘴孔径对等离子弧焊影响的数值分析[J]. 热加工工艺,2016,45(7):200.

[13] 张济楠,何建萍,王晓霞,等. 微束等离子弧焊电弧多物理场耦合[J]. 焊接学报, 2018,39(6):13.

(上接第 292 页)

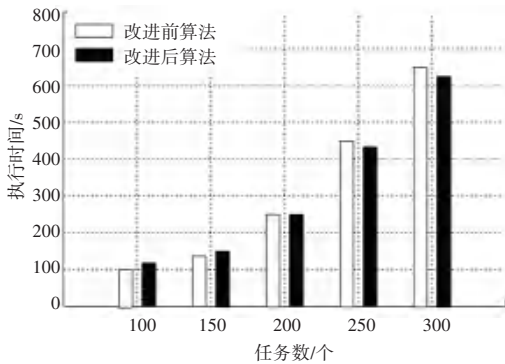


图 4 抢险应急调度的响应时间对比

Fig. 4 Comparison of response time of emergency dispatching

## 4 结束语

本文提出基于粒子群算法的抢险应急调度最短路径寻优规划算法。采用粒子群寻优方法进行抢险应急调度区域的环境信息采样,对采集的抢险应急调度区域数据进行自适应寻优控制,建立抢险应急调度区域的路径空间区域自适应规划模型,采用模糊状态寻优控制方法进行抢险应急调度最短路径寻优规划和自适应调度,提取抢险应急调度最短路径寻优规划的信息素特征量,采用最短路径规划法进行抢险应急调度特征分析,分析车辆的运动惯性势

能,采用粒子群算法进行抢险应急调度最短路径寻优规划过程中的自适应寻优,实现抢险应急调度最短路径寻优规划。分析得知,采用本文方法进行抢险应急调度最短路径规划的寻优能力较好,提高了抢险应急调度响应能力,执行时间开销较小。

## 参考文献

[1] 宋晓琳,周南,黄正瑜,等. 改进 RRT 在汽车避障局部路径规划中的应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2017,44(4):30.

[2] 张晓阳,徐韬,张宜华,等. 基于 QPSO-RBF 神经网络的混合交通流车速预测模型[J]. 公路,2019,64(1):147.

[3] 仇建华,尚凯,张亚岐,等. 基于相关向量机的城市轨道交通突发大客流预测[J]. 大连交通大学学报,2019,40(1):13.

[4] 钱伟,车凯,李冰锋. 基于组合模型的短时交通流量预测[J]. 控制工程,2019,26(1):125.

[5] 景辉鑫,钱伟,车凯. 基于灰色 ELM 神经网络的短时交通流量预测[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2019,38(2):97.

[6] RAMEZANI A, SAFARINEJADIAN B. A modified fractional-order unscented Kalman filter for nonlinear fractional-order systems[J]. Circuit System and Signal Processing, 2018, 37(9):3756.

[7] 梁凯,毛剑琳. 基于改进蚁群算法的室内移动机器人路径规划[J]. 电子测量技术,2019,42(11):65.

[8] 任秉银,魏坤,吴卓琦. 机械臂视觉伺服路径规划研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报,2018,50(1):1.