

DOI:10.13393/j.cnki.issn.1672-948X.2021.05.017

引用格式:周祥曼,刘练,陈永清,等.外加变位磁场作用 GTAW 焊接电弧的数值模拟[J].三峡大学学报(自然科学版),2021,43(5):101-106,112.

外加变位磁场作用 GTAW 焊接电弧的数值模拟

周祥曼^{1,2} 刘 练¹ 陈永清^{1,2} 袁有录^{1,2} 田启华^{1,2} 杜义贤^{1,2} 何青松² 付君健^{1,2}

(1. 三峡大学 机械与动力学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

摘要:为了揭示外加变位磁场对 GTAW 焊接电弧的形态以及传热传质影响规律,建立了 GTAW 焊接电弧的数学模型;对比分析了无外加磁场,30°变位磁场,60°变位磁场作用下 XZ 截面(即 $Y=0$ 截面)的电弧温度场、压强以及 $Z=7.5\text{ mm}$ 截面电磁力矢量的变化规律;并在电弧空间取一条路径 Path1(X 方向),详细对比分析了此路径上的电流密度、电弧温度、 X 方向电磁力分量、 Y 方向电磁力分量、压强、 X 方向速度分量、 Y 方向速度分量的分布规律.结果显示:外加变位磁场作用下的 XZ 截面的电弧温度场、压强以及 $Z=7.5\text{ mm}$ 截面电磁力矢量均不再呈现对称分布.在 Path1 上随着变位角度的增加,电弧 X 方向电磁力分量“波峰”上移、“波谷”下移;电弧 Y 方向电磁力分量由零变为“双峰分布”,再变为“单峰分布”,且“波峰”上移;电弧 X 方向速度分量由类似余弦函数分布逐渐变为“单峰”分布,且“波谷”下移;电弧 Y 方向速度分量由零逐渐变为类似正弦函数分布,且“波峰”下移,“波谷”上移.

关键词:外加变位磁场; 钨极惰性气体保护焊; 焊接电弧; 数值模拟

中图分类号: TG47

文献标志码: A

文章编号: 1672-948X(2021)05-0101-06

Numerical Simulation of GTAW Welding Arc under the External Static Magnetic Field of Changing Position

ZHOU Xiangman^{1,2} LIU Lian¹ CHEN Yongqing^{1,2} YUAN Youlu^{1,2}

TIAN Qihua^{1,2} DU Yixian^{1,2} HE Qingsong² FU Junjian^{1,2}

(1. College of Mechanical & Power Engineering, China Three Gorges Univ., Yichang 443002, China;
2. Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design & Maintenance, China Three Gorges Univ., Yichang 443002, China)

Abstract In order to reveal the effect of external magnetic field of changing position on the shape, heat and mass transfer of GTAW welding arc, a mathematical model of GTAW welding arc was established, and changeable rule of arc temperature field, pressure of cross section XZ (i. e. $y=0$ section) and electromagnetic force vector of $Z=7.5\text{ mm}$ section under the action of no external magnetic field, 30 degree displacement magnetic field and 60 degree displacement magnetic field are compared and analyzed. Path1 (X direction) are selected in the arc model, and the distribution laws of current density, arc temperature, electromagnetic force, pressure, velocity and potential on this path are compared and analyzed in detail. The results show that the arc temperature field, pressure in XZ section (i. e. $y=0$ section) and electromagnetic

收稿日期:2021-01-26

基金项目:国家自然科学基金(51705287, 51475265, 51775308);水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室(三峡大学)开放基金项目(2017KJX11);三峡大学研究生学位论文培优基金(2020SSPY033)

通信作者:周祥曼(1983—),男,副教授,博士,主要从事电弧增材制造技术研究. E-mail: zhouxman@ctgu.edu.cn

force in $Z=7.5$ mm section no longer show symmetrical distribution under the action of external magnetic field. With the increase of the displacement angle on Path1, the "peak" of the electromagnetic force component in the X direction of the arc moves up and the "valley" moves down; the electromagnetic force component in the Y direction of the arc changes from 0 to "bimodal distribution", and then to "unimodal distribution" with "peak" moving upward; the velocity component of the arc X direction gradually changes from a "similar cosine function" distribution to a "single peak" distribution, and the "valley" moves downward; the arc Y direction velocity component gradually changes from 0 to a similar sine function distribution with "peak" moving down, the "valley" moving up.

Keywords external magnetic field of changing position; gas tungsten arc welding(GTAW); welding arc; numerical simulation

钨极惰性气体保护焊(gas tungsten arc welding, GTAW)是指在惰性气体保护下,利用阴极(钨极)和阳极(工件)之间产生的电弧熔化填充焊丝和母材的一种焊接方法. GTAW 的电弧稳定、焊缝美观且质量高,因此在航空航天、国防军工、轨道交通等领域有非常广阔的应用^[1-2].

外加磁场作用作为焊接过程中一种非常重要的辅助手段,可以改变焊接电弧与熔池的传热传质过程,进而改善焊缝的质量. 为此,国内外学者们对外加磁场调控焊接电弧行为开展了大量的研究工作. Ando 等^[3]探索了外加横向磁场改善 TIG 焊缝成形的机理,研究表明,外加横向磁场能够使焊接电弧向前倾斜,加强了熔池内液态金属向前流动的趋势,从而达到改善焊缝质量的目的. 周祥曼等^[4]建立了基于 GMAW 电弧增材成形过程中电弧和熔池的弱耦合模型,并揭示了外加横向磁场对电弧增材成形过程中电弧和熔池传热传质以及成形件微观组织影响的内在机理. 刘海华等^[5]建立了微束等离子电弧三维模型,并分析了外加横向稳态磁场作用下电弧特性与电弧对工件热、力输入的变化规律. 卢振洋等^[6]揭示了外加交变横向磁场作用下 TIG 焊接电弧的运动机制,结果表明,外加横向交变磁场能使 TIG 焊接电弧做有规律的交替进行的旋转运动和偏移运动. Melnikova T S 和 Prokalov V V^[7]采用参数法和测量法研究了外加纵向磁场作用持续增压的非对称非稳态电弧等离子体温度场的局部参数,研究表明,电弧温度等值线的形状取决于电弧燃烧区域中心轴线的位移值. 刘政军等^[8]建立了基于磁流体动力学的二维轴对称的数学模型,分析了外加纵向磁场作用下的焊接电弧传热与流动特性. 肖磊等^[9]建立了外加高频纵向磁场作用下 GTAW 焊接电弧的三维稳态数值模型,并解释了外加高频纵向磁场作用下的电弧收缩现象. 常云龙等^[10]通过研究外加纵向磁场对 CO_2 焊接过程产生的影响,对比分析了不同磁场参数

作用下的焊接电弧形态.

虽然国内外学者对外加磁场作用焊接电弧的研究较多,但大多局限于外加横向磁场和纵向磁场对焊接电弧的影响. 基于此,本文提出一种兼具纵向和横向分量的外加变位磁场作用于焊接电弧,并利用 FLUENT 软件建立纯氩保护的 GTAW 电弧熔积过程的电弧模型,系统分析外加变位磁场作用下 GTAW 焊接电弧的形态以及传热传质规律,为今后磁控焊接及磁控电弧增材技术的应用提供理论基础.

1 数学模型

1.1 基本假设

- 1) 焊接电弧满足局域热平衡假设和光学薄的假设^[11];
- 2) 忽略金属蒸汽对电弧的影响^[12], 电弧的流动状态为层流^[13];
- 3) 在一个标准大气压下,保护气体(纯氩气)的密度、比热、热导率、黏度、电导率仅为温度的函数^[9].

1.2 控制方程

本文描述电弧等离子体的控制方程为磁流体动力学数学模型,该模型已经在作者前期的研究工作^[11,14]中做了详细的解释说明,故不再详细叙述.

1.3 物理模型和边界条件

本文建立的物理模型如图 1 所示.

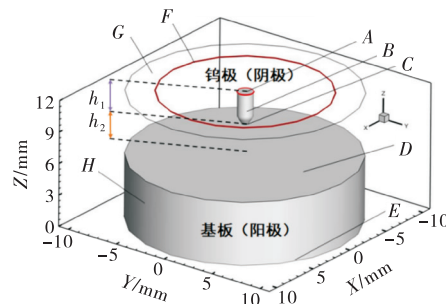


图 1 电弧的物理模型

图中:阳极(基板)厚度为 6 mm;阴极(钨极)直径为 1.4 mm;下底面 C 直径为 0.6 mm,尖角为 60°;钨极的整体高度 h_1 为 3 mm,钨极固定不移动;电弧计算区域高度 h_2 为 3 mm;保护气入口 F 直径为 15 mm;焊接电流为 170 A;保护气为纯氩气,其流量

为 15 L/min,纯氩气的物性参数参考文献[14];阴极的材料为钨,阳极的材料为 SUS304 不锈钢,钨和 SUS304 不锈钢的物性参数参考文献[15].

表 1 为本文电弧模型的边界条件.

表 1 电弧模型边界条件

边界条件	速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	压强/Pa	温度/K	电势/V	磁矢势/($\text{Wb} \cdot \text{s}^{-1}$)
A	—	—	1 000	$-\sigma \frac{\partial \Phi}{\partial z} = -\frac{I_w}{\pi R_w^2}$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
B、C、D	—	—	耦合	耦合	耦合
E	—	—	式(2)	0	$\partial A / \partial n = 0$
F	式(1)	101 325	300	$\partial \Phi / \partial n = 0$	$\partial A / \partial n = 0$
G	—	101 325	$\partial T / \partial n = 0$	$\partial \Phi / \partial n = 0$	$A = 0$
H	—	—	$\partial T / \partial n = 0$	$\partial \Phi / \partial n = 0$	$A = 0$
I	—	—	$\partial T / \partial n = 0$	$\partial \Phi / \partial n = 0$	$\partial A / \partial n = 0$

其中,在钨极的上顶面 A 处设置焊接电流密度边界条件,基板底部 E 处设置为零电势边界条件,F 处为氩气入口边界.焊接电流击穿 G 区域氩气,在阴阳两极之间气相区域放电产生电弧.保护气入口 F 的速度与气流量以及保护气喷嘴内径有关^[11],相关公式见式(1):

$$\begin{cases} v_z(r) = \frac{2Q}{\pi} \frac{\{R_n^2 - r^2 + (R_n^2 - R_w^2) \frac{\ln(r/R_n)}{\ln(R_n/R_w)}\}}{\{R_n^4 - R_w^4 + \frac{(R_n^2 - R_w^2)^2}{\ln(R_n/R_w)}\}} \\ r = \sqrt{x^2 + y^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中:Q 为保护气流量; R_w 为钨极上顶面半径; R_n 为喷嘴内径.金属与空气接触的部分为对流与辐射综合的边界条件^[14],即

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{\text{conv}}(T - T_{\text{amb}}) + \alpha \epsilon (T^4 - T_{\text{amb}}^4) \quad (2)$$

式中: h_{conv} 为金属与空气的对流换热系数; T_{amb} 为环境温度; α 为斯蒂芬波尔兹曼常数; ϵ 为辐射发射率^[14].

2 外加变位磁场的施加方式

外加变位磁场是一种偏离竖直方向一定角度的磁场,即具有横向和纵向磁场分量的一种磁场.本文施加变位磁场的强度为 0.005 T,外加变位磁场的施加方式以及对电弧整体作用力分析示意图如图 2 所示.其中 $\boldsymbol{B}$ 表示本文所施加变位磁场的磁通密度的大小和方向; $\boldsymbol{B}_z$ 表示磁通密度 $\boldsymbol{B}$ 的 Z 向分量; $\boldsymbol{B}_y$ 表示磁通密度 $\boldsymbol{B}$ 的 Y 向分量; β 表示变位角度; $\boldsymbol{J}$ 表示电弧区域中电弧的电流密度; $\boldsymbol{J}_1$ 为电流密度矢量 $\boldsymbol{J}$ 的 Z 向分量; $\boldsymbol{J}_2$ 为电流密度矢量 $\boldsymbol{J}$ 的径向分量; $\boldsymbol{F}_{m1}$

表示磁通密度 $\boldsymbol{B}$ 的横向分量 $\boldsymbol{B}_y$ 所产生的电磁力,即 $\boldsymbol{F}_{m1} = \boldsymbol{J}_1 \times \boldsymbol{B}_y$,该电磁力会使电弧整体偏向一侧; $\boldsymbol{F}_{m2}$ 表示磁通密度 $\boldsymbol{B}$ 的纵向分量 $\boldsymbol{B}_z$ 所产生的电磁力,即 $\boldsymbol{F}_{m2} = \boldsymbol{J}_2 \times \boldsymbol{B}_z$,该电磁力会使电弧整体受到沿顺时针方向的周向电磁力作用.

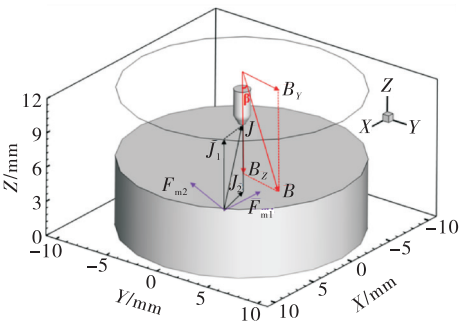


图 2 外加变位磁场的施加及电弧受力分析示意图

3 模拟结果及分析

3.1 无外加磁场作用下的电弧云图

图 3 为无外加磁场作用下的 $Z = 7.5 \text{ mm}$ 截面的电弧电磁力矢量分布图,可以看到电磁力矢量分布呈现对称并且有向电弧中心聚集的趋势.

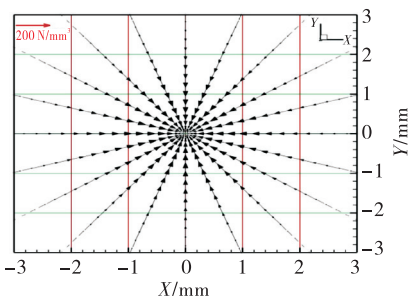


图 3 无外加磁场作用下 $Z = 7.5 \text{ mm}$ 截面电弧电磁力矢量分布

图 4 为无外加磁场作用下电弧温度为 10 000 K 的等值曲面图. 可以发现电弧呈现周向完全对称, 这是由于在平面基板情况下, 电弧空间、边界条件均对称, 电流密度和电磁力分布对称.

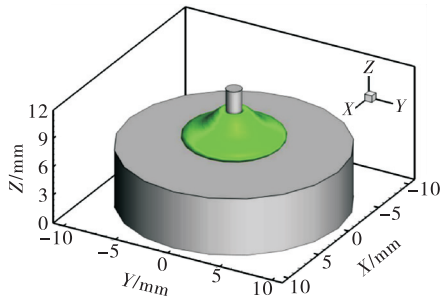


图 4 无外加磁场作用时电弧温度 10 000 K 等值曲面图

图 5 和图 6 分别为无外加磁场作用下 XZ ($Y=0$) 截面的电弧压强分布和电弧温度场分布. 可以看到电弧压强云图呈现对称且形似“秤砣”状分布, 电弧温度云图呈现对称且形似“锅盖”状分布, 电弧温度和压强最大值均出现在钨极下方, 这是由于电弧的电流在此处聚集, 电流密度最大, 电磁力最大且向中心挤压形成的.

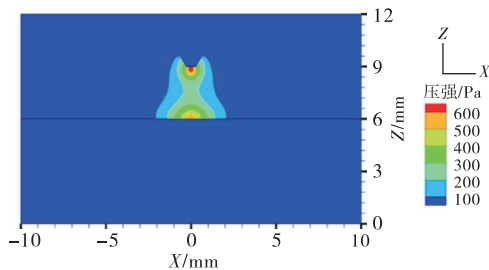


图 5 无外加磁场作用时电弧压强分布云图

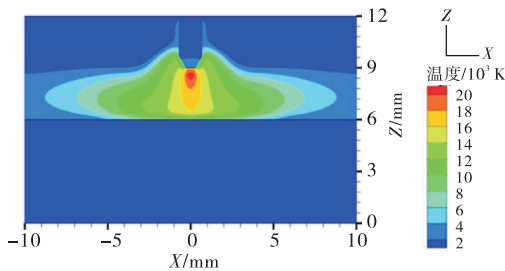


图 6 无外加磁场作用时电弧温度场云图

图 7 所示为在相同弧长与电流的条件下, 电弧模拟所得的等温线分布与参考文献[16]的实验测量所得的等温线结果对比, 可以发现模拟结果与实验总体契合, 从而验证了本文模型的有效性.

3.2 外加变位磁场作用下的电弧模拟结果对比分析

图 8 为外加变位磁场作用下的 $Z=7.5$ mm 截面的电弧电磁力矢量分布图. 可以看到, 在外加变位磁场作用下, 电弧电磁力矢量不再呈现对称分布, 四周的电磁力不再指向中心. 此外随着变位角度的增加, 电磁力指向的位置偏离中心越来越远, 电磁力偏转的

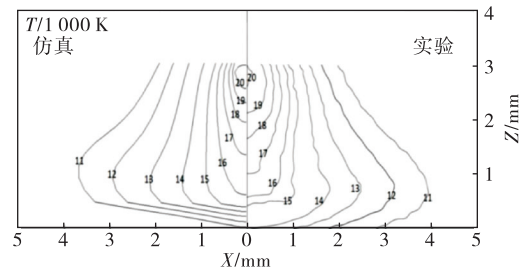


图 7 电弧的等温线与实验结果^[16]对比(单位: 1 000 K)

角度越来越大. 这是由于随着变位角度的增加, 外加变位磁场的横向分量 B_Y 逐渐增大, 纵向分量 B_Z 逐渐减小, 横向分量 B_Y 产生的指向 $-X$ 方向的电磁力分量逐渐增大, 纵向分量 B_Z 产生的沿顺时针方向的周向电磁力分量逐渐减小, 电弧同时受到指向 $-X$ 方向的电磁“推力”作用和沿顺时针方向的“周向搅拌”电磁力作用, 形成了如图 8 所示的指向 $-X$ 方向和周向电磁力合力的分布效果, 且随着变位角度的增加, 电弧中心逐渐偏离轴中心, 且往“第二象限”内偏转.

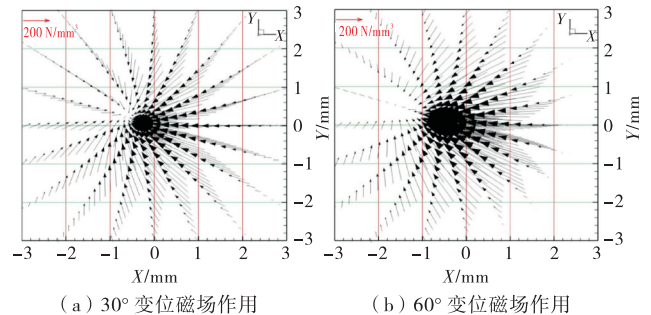


图 8 外加变位磁场作用下 $Z=7.5$ mm 截面的电弧电磁力矢量分布图

如图 9 所示, 外加变位磁场作用下的电弧温度为 10 000 K 等值面不再呈现对称分布, 随着变位角度的增加, 电弧偏向 $-X$ 方向越明显, 并且电弧温度等值面在 Y 方向上收缩的趋势变得愈加明显. 这是由于外加变位磁场的横向分量产生的指向 $-X$ 方向电磁推力导致温度等值面向 $-X$ 方向偏转, 外加变位磁场的纵向分量产生的外加“搅拌”电磁力以及横向磁场产生的指向 $-X$ 方向外加电磁“推力”使电弧所受的电磁力合力方向发生了偏转并且电磁力合力在 Y 方向上的分量也逐渐增大, 这与图 8 所示 XY 截面 ($Z=7.5$ mm 截面) 的电磁力分布相印证.

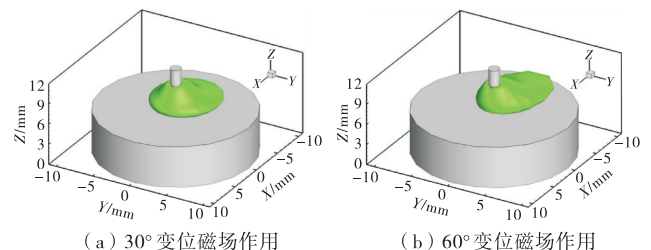
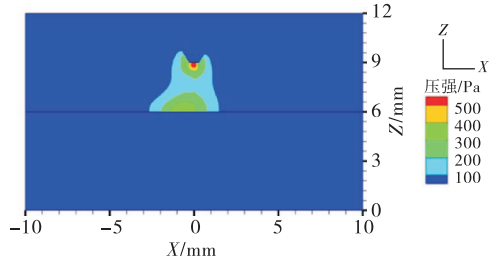
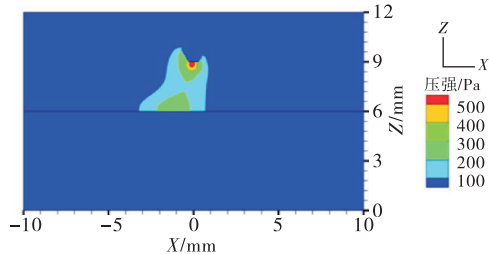


图 9 外加变位磁场作用下的电弧温度为 10 000 K 等值面图

图 10 和图 11 分别为外加变位磁场作用下的电弧压强分布云图和电弧温度分布云图. 可以看到在外加变位磁场的作用下, 电弧压强云图和电弧温度云图不再呈现对称分布, 都偏向 $-X$ 一侧, 并且随着变位角度的增加, 电弧压强分布和电弧温度分布偏向 $-X$ 方向越明显. 这是由于随着变位角度的增加, 电磁力的分布呈现如图 8 分布的态势, 即指向 $-X$ 方向的电磁力逐渐增大, 而周向电磁力逐渐减小, 电磁力的综合作用使电弧等离子体逐渐向 $-X$ 方向偏转.

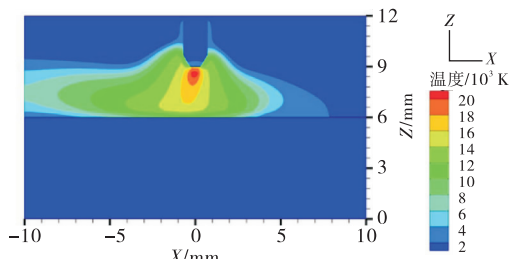


(a) 30° 变位磁场作用

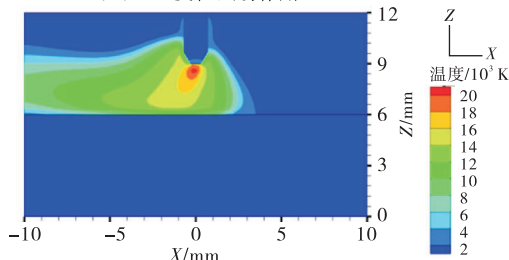


(b) 60° 变位磁场作用

图 10 外加变位磁场作用下电弧压强分布云图



(a) 30° 变位磁场作用



(b) 60° 变位磁场作用

图 11 外加变位磁场作用下电弧温度场云图

4 路径分析

为了定量对比分析电弧各个参量的分布, 本文在模拟空间取如图 12 所示的路径 Path1 (X 方向, 高度方向位于阴阳两极之间的正中间, $P_1(-10 \text{ mm}, 0$

$\text{mm}, 7.5 \text{ mm})$, $P_2(10 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, 7.5 \text{ mm})$). Path1 上的电弧参量分布如图 13 所示.

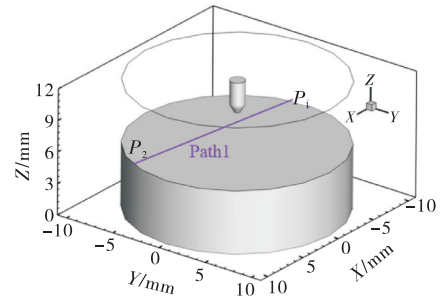


图 12 路径选取示意图

如图 13(a)、(b) 所示, 外加变位磁场作用下的电流密度和电弧温度均向 $-X$ 方向偏移, 电流密度和电弧温度峰值均小于无外加磁场作用时的情况且变化规律一致. 这是由于电弧热由焦耳热主导, 随着变位角度的增加, 磁通密度在 Y 方向上的分量逐渐增大, Z 方向上的分量逐渐减小, 指向 $-X$ 方向上的“电磁推力”逐渐增大, 沿顺时针方向的“搅拌电磁力”逐渐减小, 电弧逐渐向 $-X$ 方向偏转. 随着变位角度的增加, 电弧弧柱向 $-X$ 方向偏转程度越来越大, 在 Path1 上电弧温度和电流的密度峰值也会逐渐降低.

如图 13(c) 所示, 外加变位磁场作用下 X 方向电磁力分量的“波峰”逐渐上移, 右边的“波谷”逐渐下移, 且“拐点”位置逐渐向 $-X$ 方向移动. 这是由于随着变位角度的增加, “电磁推力”逐渐增大, 指向 $-X$ 方向的电磁力逐渐增大, 指向 $+X$ 方向的电磁力逐渐减小. 如图 13(d) 所示, 外加变位磁场作用下, Path1 上的 Y 方向电磁力分量随着变位角度的增加逐渐从 0 变为双峰分布, 再变为单峰分布, 且左边的“波峰”峰值呈现逐渐增大的趋势, 这是由于沿顺时针方向的“电磁搅拌力”作用, 指向 $+X$ 方向的电磁力向 $+Y$ 方向偏转, 指向 $-X$ 方向的电磁力向 $-Y$ 方向偏转, 随着变位角度的增加, “电磁搅拌力”减弱、指向 $-X$ 方向“电磁推力”增强使得指向 $+X$ 方向电磁力向 $+Y$ 方向偏转的角度增大, 指向 $-X$ 方向电磁力向 $-Y$ 方向偏转的角度减小, 即在 Path1 上指向 $+X$ 方向的电磁力的 Y 向分量逐渐增大, 指向 $-X$ 方向的电磁力的 Y 向分量逐渐减小到 0.

如图 13(e) 所示, 在外加变位磁场作用下电弧压强逐渐向 $-X$ 方向偏移, 且峰值小于无外加磁场作用下的情况. 这是由于无外加磁场作用下, 电磁力呈现对称且具有向轴中心聚集的趋势, 电弧等离子体在轴中心处所受挤压力最大, 压强峰值最大, 而在外加变位磁场作用时, 在 Path1 上指向 $-X$ 方向的电磁力大于指向 $+X$ 方向电磁力, 且电磁力向 Y 方向偏转,

故电弧等离子体之间的碰撞减弱,压强峰值降低。

如图 13(f)所示,外加变位磁场作用下,Path1 上的 X 方向速度分量逐渐从类似余弦函数分布变为“单峰”分布,且“波谷”位置逐渐下移。这是由于随着变位角度的增加,Path1 上指向 -X 方向的电磁力逐渐增大,指向 +X 方向的电磁力逐渐减小,从而导致指向 +X 方向的电弧速度 X 方向分量逐渐减小到 0,指向 -X 方向的电弧速度 X 方向分量逐渐增大。如图 13(g)所示,在外加变位磁场作用下,Path1 上的电弧 Y 方向速度分量逐渐从 0 变为类似正弦函数分布,

且“波峰”逐渐下移,“波谷”逐渐上移。这是由于无外加磁场作用时,电弧速度在 Path1 上呈现左右对称且具有从电弧中心向外发散的趋势,Y 方向的速度分量为 0。而随着变位角度的增加,沿顺时针方向的“电磁搅拌力”减弱,指向 -X 方向的“电磁推力”逐渐增强,导致在 Path1 指向 -X 方向的电弧速度向 +Y 方向,指向 +X 方向的电弧速度向 -Y 方向偏转的角度均减小,即指向 -X 方向的电弧速度在 +Y 方向速度分量、指向 +X 方向的电弧速度在 -Y 方向的速度分量均降低。

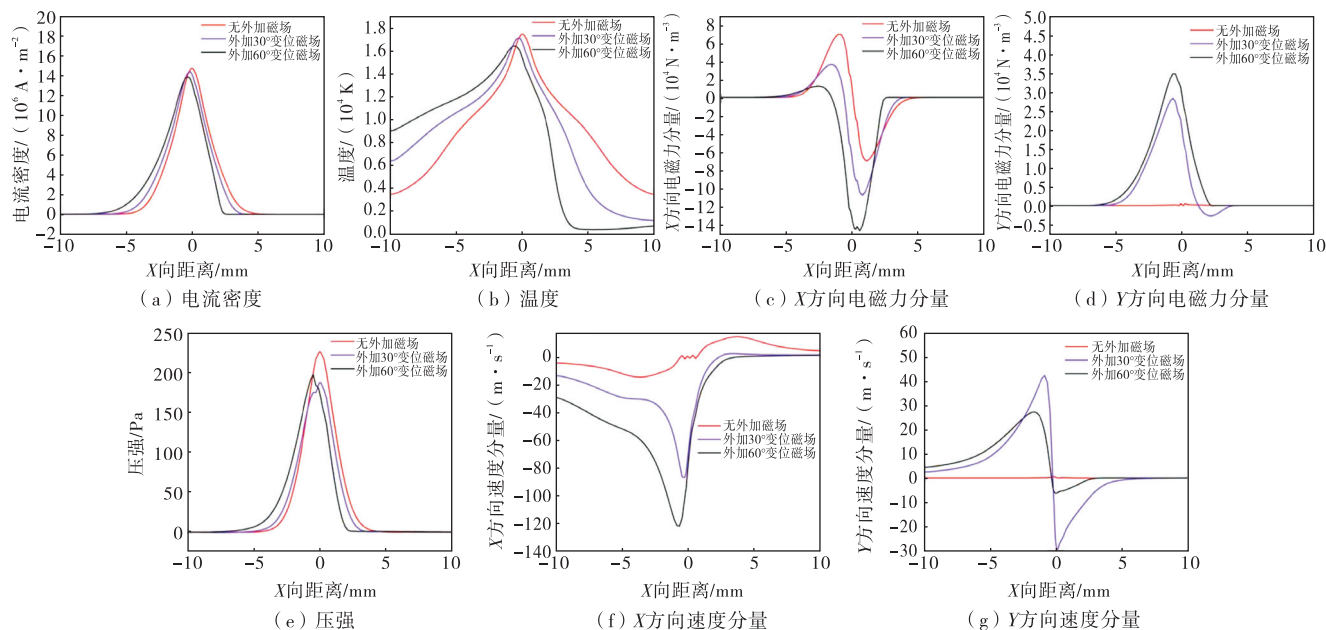


图 13 Path1 上的电弧各个参量对比

5 结论

1) 外加变位磁场产生的沿顺时针方向的“搅拌电磁力”作用和指向 -X 方向的“电磁推力”使得电弧形态不再呈现对称分布。

2) 外加变位磁场作用焊接电弧使得 Path1 上的 X 方向电磁力分量“波峰”上移、“波谷”下移;电弧 Y 方向电磁力分量由 0 变为“双峰分布”,再变为“单峰分布”,且“波峰”上移;电弧 X 方向速度分量由类似余弦函数分布逐渐变为“单峰”分布,且“波谷”下移;电弧 Y 方向速度分量由 0 逐渐变为类似正弦函数分布,且“波峰”下移,“波谷”上移。

参考文献:

[1] 张赛钰, 马国红, 向月, 等. GTAW 焊电弧的磁流体动力学数值分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(4): 22-27.

[2] 赵瑞, 方涛, 程方杰. D-GTAW 焊枪枪头的设计及工艺研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(3): 58-61.

[3] ANDO K, NISHIKAWA J, YAMANOUCHI N. Effects of the magnetic field on bead formation in TIG arc welding[J]. Journal of the Japan Welding Society, 1968, 37(3): 249-254.

[4] 周祥曼, 田启华, 杜义贤, 等. 外加横向磁场作用电弧增材成形过程中的传热传质仿真[J]. 机械工程学报, 2018, 54(12): 193-206.

[5] 刘海华, 赵淘, 张志臣, 等. 横向稳态磁场作用下微束等离子电弧数值分析[J]. 材料科学与工艺, 2021, 29(1): 59-65.

[6] 卢振洋, 白韶军, 汤金蕾, 等. 横向旋转磁场作用下 TIG 焊电弧的运动机制[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(9): 902-907.

[7] MELNIKOVA T S, PICKALOV V V. Temperature Field Measurements of the Electric Arc Plasma in a Longitudinal Magnetic Field[J]. Contributions to Plasma Physics, 2010, 22(2): 171-180.

(下转第 112 页)

- vant microorganisms[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2000, 89(1): 1-11.
- [12] MCGREGOR C E, LAMBERT C A, GREYLING M M, et al. A comparative assessment of DNA fingerprinting techniques (RAPD, ISSR, AFLP and SSR) in tetraploid potato (*Solanum tuberosum* L.) germplasm [J]. Euphytica, 2000, 113(2): 135-144.
- [13] 田韦韦, 王彩霞, 田敏, 等. 文心兰体细胞无性系变异的倍性检测和 CE-AFLP 分析[J]. 核农学报, 2017, 31(2): 241-247.
- [14] 张建成, 王传堂, 江玉萍, 等. AFLP 技术在花生品种鉴定上的应用研究[J]. 种子, 2006, 25(2): 1-3.
- [15] 李本逊, 蔡健, 谭学林, 等. AFLP 在水稻类群划分研究中的应用[J]. 种子, 2001, 20(4): 26-27.
- [16] 陈强, 张小平, 李登煜, 等. 从豆科植物的根瘤中直接提取根瘤菌 DNA 的方法[J]. 微生物学通报, 2002, 29(6): 63-67.
- [17] SILVER W S, GRESSHOFF P M, ROTH L E, et al. Nitrogen fixation: achievements and objectives[J]. Transactions of the American Microscopical Society, 1992, 111(2): 166.
- [18] 龚振平, 金喜军, 马春梅, 等. 春大豆对不同来源氮素吸收利用的研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(5): 1138-1141.
- [19] 陈慧, 邸伟, 姚玉波, 等. 不同大豆品种根瘤固氮酶活性与固氮量差异研究[J]. 核农学报, 2013, 27(3): 379-383.
- [20] 黄建辉, 白永飞, 韩兴国. 物种多样性与生态系统功能: 影响机制及有关假说[J]. 生物多样性, 2001, 9(1): 1-7.
- [21] 沈浩, 刘登义. 遗传多样性概述[J]. 生物学杂志, 2001, 18(3): 5-7.
- [22] 杨永华, 钦佩, 胡永金. 分子遗传技术与生物遗传多样性研究[J]. 农村生态环境, 1996(4): 28-31.
- [23] 白建荣, 郭秀荣, 侯变英. 分子标记的类型、特点及在育种中的应用[J]. 山西农业科学, 1999, 27(4): 33-38.
- [24] 康红卫, 史卫东, 罗海玲, 等. 菜心抗虫性的 cDNA-AFLP 分析[J]. 西南农业学报, 2018, 31(6): 1135-1142.
- [25] ZEID M, SCHON C C, LINK W. Genetic diversity in recent elite Faba bean lines using AFLP markers[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2003, 107(7): 1304-1314.
- [26] 贾腾飞, 张小娟. 蚕豆根瘤菌生物地理学及 AFLP 多样性分析[J]. 分子植物育种, 2019, 17(20): 6860-6866.
- [27] HOU B C, WANG E T, LI Y, et al. Rhizobial resource associated with epidemic legumes in Tibet[J]. Microbial Ecology, 2009, 57(1): 69-81.
- [28] WANG L, CAO Y, WANG E T, et al. Biodiversity and biogeography of rhizobia associated with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Shaanxi Province[J]. Systematic and Applied Microbiology, 2016, 39(3): 211-219.
- [29] 陈文新, 汪恩涛. 中国根瘤菌[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [30] TIAN C F, ZHOU Y J, ZHANG Y M, et al. Comparative genomics of rhizobia nodulating soybean suggests extensive recruitment of lineage-specific genes in adaptations[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(22): 8629-8634.

[责任编辑 周文凯]

(上接第 106 页)

- [8] 刘政军, 李宇航, 苏允海. 纵向磁场下 GTAW 电弧传热与流动数值模拟[J]. 焊接学报, 2019, 40(5): 120-125, 166.
- [9] 肖磊, 樊丁, 黄健康, 等. 外加高频纵向磁场作用下的 TIG 焊电弧数值模拟[J]. 焊接学报, 2017, 38(2): 66-70, 4.
- [10] 常云龙, 白金, 刘丹, 等. 纵向磁场对 CO₂ 焊接电弧及焊缝成形的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2016, 38(6): 612-617.
- [11] 周祥曼, 田启华, 杜义贤, 等. 外加稳态磁场作用下的焊接电弧数值仿真[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(7): 1068-1075.
- [12] 肖磊, 樊丁, 黄自成, 等. 考虑金属蒸汽的定点活性钨极惰性气体保护焊电弧与熔池交互作用三维数值分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(16): 93-99.
- [13] JIAN Xiaoxia, WU Chuan Song. Numerical analysis of the coupled arc-weld pool-keyhole behaviors in stationary plasma arc welding[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2015, 58: 839-847.
- [14] 周祥曼, 张海鸥, 王桂兰, 等. 电弧增材成形中熔积层表面形貌对电弧形态影响的仿真[J]. 物理学报, 2016, 65(3): 331-342.
- [15] TANAKA M, TERASAKI H, USHIO M, et al. Numerical Study of a Free-Burning Argon Arc with Anode Melting[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23(3): 585-606.
- [16] YIN X, GOU J, ZHANG J, et al. Numerical study of arcplasmas and weld pools for GTAW with applied axial magnetic fields[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2012, 45(28): 285203-285215.

[责任编辑 张莉]