

磁场作用下的TIG电弧行为分析

张晓鸿¹ 司中祺² 范翼飞¹ 文远华¹ 张万春¹

(1 四川航天长征装备制造有限公司, 成都 610100)

(2 成都航空职业技术学院, 汽车工程学院, 成都 610100)

文 摘 在磁流体动力学理论的基础上, 针对外加纵向磁场作用下的钨极氩弧焊(TIG)电弧在旋转圆柱坐标系中建立了不同电流密度的数学模型。通过Fluent用户自定义函数进行编程开发, 对其流场和电磁场进行耦合求解, 得到了外加纵向磁场作用下的TIG电弧热场和流场的分布规律。结果表明, 纵向磁场作用下的TIG电弧温度场呈现空心钟罩形态, 并表现为双峰分布, 在近阳极表面位置出现“低温腔”, 且电流密度越大, “低温腔”越大; 其次, 纵向磁场的作用造成阳极表面的压力变化也呈现双峰分布, 其峰值压力较无磁场作用时下降了约70%, 且电流密度越大下降的越多。

关键词 TIG电弧, 纵向磁场, 温度场, 磁流体

中图分类号: TG444

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.03.007

Analysis of TIG Arc Behavior Under the Effect of Magnetic Field

ZHANG Xiaohong¹ SI Zhongqi² FAN Yifei¹ WEN Yuanhua¹ ZHANG Wanchun¹

(1 Sichuan Aerospace Changzheng Equipment Manufacturing Co. Ltd., Chengdu 610100)

(2 Department of Automotive Engineering, Chengdu Aeronautic Polytechnic, Chengdu 610100)

Abstract Based on the theory of magnetohydrodynamics, the mathematical models of different current densities for TIG (tungsten inert gas) arc with external longitudinal magnetic field were established in the rotating cylindrical coordinate system. The flow field and electromagnetic field were coupled by fluent user-defined function, and the results show that the temperature field of TIG arc under longitudinal magnetic field presents the shape of hollow bell, and the distribution is bimodal, but a zone of low temperature occurs near the anode. With the increasing of current density, zone of "low temperature cavity" becomes larger near the anode surface. In addition, effect of longitudinal magnetic field on the pressure of anode surface is also distributed in double peak, and the peak pressure decreases by about 70% compared with that without magnetic field. And the dropping become sharper with the increasing of current density.

Key words TIG arc, Longitudinal magnetic field, Temperature field, Magnetic fluid

0 引言

TIG电弧在稳定燃烧时会电离激发具有良好导电性的离子和电子, 形成电弧等离子体, 使电弧成为具有良好导电性的气态导体, 进而使得电弧具有良好的磁场可控性。TIG焊作为一种非接触的焊接方法, 可通过调控电弧等离子体的运动规律达到改善熔池流动特性的目的。因此, 可通过外加磁场的方法对等离子体施加洛伦兹力来控制电弧等离子体的运动状态和分布模式, 进而对焊接熔池的形状与受力状态进行调控, 达到改善焊缝成形和质量的目的^[1]。

为此, 刘政军等^[2]使用外加间歇交变纵向磁场辅助TIG焊对AZ61镁合金进行了焊接试验, 发现强烈的电磁搅拌作用可以有效细化晶粒并抑制接头中的

气孔, 使焊接接头力学性能得到显著提高。江淑园^[3]采用GTAW焊接方法对奥氏体不锈钢进行了焊接, 发现施加纵向磁场后, 其焊缝晶粒明显细化, 焊缝组织形貌得到了显著改善。还有学者对外加磁场控制焊接电弧和熔池流动进行了相关研究, 罗键等^[4]学者采用外加纵向磁场的方式模拟了GTAW焊接温度场, 发现外加纵向磁场的作用使得焊接电弧呈现“矮胖”形态, 但磁场并不影响电弧的总热量。殷咸青等人^[5-6]基于磁流体动力学理论建立了外加纵向磁场作用下的TIG焊电弧熔池双向耦合模型, 计算分析认为外加磁场可以使弧柱区的等离子体发生旋转运动, 造成阳极表面附近出现电弧在周向上发散的现象。代巍等^[7]人通过数值模拟的手段研究了外加磁

收稿日期: 2020-10-19

基金项目: 四川省科技计划重点研发项目(2020YFG0197); 成都航空职业技术学院自然科研项目(062029)

第一作者简介: 张晓鸿, 1991年出生, 工程师, 主要从事宇航先进制造工艺研究工作。E-mail: inovme@163.com

场对TIG焊热源的影响,指出在外加磁场的作用下,TIG焊的电弧会在周向上扩张,造成电弧有效加热半径增大。常云龙等^[6]人利用MHD模型建立了外加磁场电弧模型,研究了外加磁场在等离子体中的分布形态,发现等离子体在纵向磁场中运动时呈现不均匀密度分布的规律,并且在外加交变磁场作用下电弧会出现明显的收缩现象。

目前,大部分研究集中在磁场作用下的焊接过程熔滴过渡和熔池流动现象上,对于电流密度和磁场强度对TIG电弧行为的影响机理研究还很少。本文结合已有的理论和试验分析,在旋转圆柱坐标系下对纵向磁场下的TIG电弧建立数学模型,使用CFD软件Fluent编程进行二次开发,通过数值模拟揭示外加纵向磁场中的电弧等离子体发生螺旋运动的原因和机理;进一步分析外加纵向磁场作用时不同的电流密度和不同的磁场强度对TIG电弧行为的影响规律,拟为磁控TIG焊接的参数优化和过程控制提供理论依据。

1 数学模型

1.1 基本假设

外加纵向磁场作用下的TIG焊接电弧内部存在强烈的电磁热耦合流动。为简化数学模型,计算时TIG电弧等离子体满足以下假设^[5,8]:

- (1) 电弧的阴极区、弧柱区、阳极区均为导电的纯氩气环境;
- (2) 电弧等离子体关于中心轴对称且不可压缩;
- (3) 电弧等离子体处于层流状态,且处于局部热平衡(LTE)状态;
- (4) 电弧是光学薄的,即电弧对热量辐射的重新吸收相对于电弧的热量损失可以忽略不计。

1.2 物理模型

基于上述假设,外加纵向磁场作用的三维TIG电弧求解可以简化为二维电弧的旋转问题。选择二维对称轴旋转模型求解磁控电弧周向的速度场。AGFE为直径3.2 mm,凸台半径0.5 mm,锥角60°的钨极,弧长5 mm。使用ICEM-CFD软件建模并划分网格见图1。

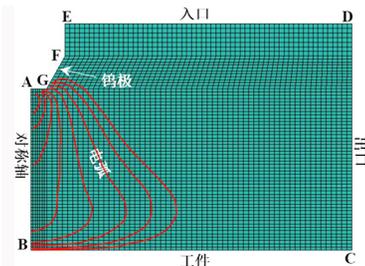


图1 TIG电弧数学模型和网格示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mathematical and mesh model of TIG arc

1.3 控制方程

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rpv)}{\partial r} + \frac{\partial(ru)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (r\rho uu) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\rho vu) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r\mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left[r\mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) \right) \right] + F_z \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\rho vv) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (r\rho vu) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left[r\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r\mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) \right) \right] + \rho \frac{u^2}{r} + F_r \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (r\rho uu) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\rho vv) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(r\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^3 \mu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{w}{r} \right) \right] - \rho \frac{vw}{r} + F_w \quad (4)$$

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial z} + v \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\sigma r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = 0 \quad (6)$$

$$J_z = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z} J_r = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial r} \quad (7)$$

$$B_\theta = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r J_z r dr \quad (8)$$

式(1)为连续性方程;式(2)~(4)分别为轴向、径向和周向动量方程;式(5)为能量守恒方程;式(6)为电流连续方程;式(7)为欧姆定律;式(8)为安培环流定律。其中, u 、 v 、 w 表示轴向、径向、周向速度; σ 为氩气电导率; φ 为电势; ρ 为氩气的密度; T 为等离子体温度; J_r 、 J_z 分别为径向和轴向的电流密度; B_θ 为自感应磁场; μ_0 为真空磁导率。氩气的热物性参数均参考文献[9]和[10]选取。

1.4 方程源项

动量方程中的源项主要来自电弧中的带电粒子所受到的电磁力和重力,如下式:

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times (\mathbf{B} + \mathbf{B}_1) + \rho \mathbf{g} \quad (9)$$

能量源项由下式给出:

$$Q = \frac{J_r^2 + J_z^2}{\sigma} + \frac{5}{2} \frac{k_B}{e} \left(J_r \frac{\partial T}{\partial r} + J_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - S_R \quad (10)$$

式中, \mathbf{J} 为电流密度, \mathbf{B} 为感生电磁场强度, \mathbf{B}_1 为外加磁场强度; σ 是电导率, k_B 是玻尔兹曼常数, e 是电子电量, S_R 是辐射损失。

1.5 边界条件

结合前文假设和实际情况,磁场下TIG电弧数学模型边界条件如表1所示。

钨极表面电流密度参考文献[6],由下式给出,其中 L 取0.4 mm:

$$\int_0^{R_c} 2\pi r j_{\max} dr + \int_0^L 2\pi r j(l) dr = I \quad (11)$$

$$j(l) = j_{\max} \left(1 - \frac{l}{L} \right) \quad (12)$$

表 1 TIG 电弧边界条件

Tab. 1 Boundary conditions of TIG arc

边界名称	$u/m \cdot s^{-1}$	$v/m \cdot s^{-1}$	T/K	φ
AB	0	$\partial v / \partial r = 0$	$\partial T / \partial r = 0$	$\partial \varphi / \partial r = 0$
BC	$\partial u / \partial r = 0$	$\partial v / \partial r = 0$	6000	0
CD	$\partial u / \partial r = 0$	$\partial v / \partial r = 0$	1000	$\partial \varphi / \partial r = 0$
DE	u_{Ar}	0	1000	$\partial \varphi / \partial r = 0$
EF	0	0	1000	$\partial \varphi / \partial r = 0$
FG	0	0	1000	$\partial \varphi / \partial r = 0$
GA	0	0	3000	$-\sigma(\partial \varphi / \partial z) = \frac{1}{\pi r^2}$

2 模拟结果与分析

采用 SIMPLE 算法,二阶迎风格式离散计算稳态电弧。焊接参数为直流正接,电流分别为 150 和 200 A,外加纵向磁场强度 0.02 T,氩气流量为 10 L/min。

2.1 磁场对电弧温度场的影响

图 2 为数值模拟得到的电弧温度场。对比图 2(a)和(c)可知,因为阴极温度低电导率低,所以焊接电流为 150 和 200 A 时的 TIG 电弧最高温度不是出现在阴极,而是在钨极尖端正下方 0.5 mm 左右的位置,峰值温度分别为 19 985.3 和 21 678.9 K,且电弧形貌均为典型钟罩形态。但是相比 150 A 电流密度,200 A 时 TIG 电弧电流密度更大,高温区域分布更加集中,有效加热半径更大^[11]。在施加 0.02 T 的外加纵向磁场时,TIG 电弧温度场如图 2(b)和(d)所示,电弧形状由无外加磁场时候的典型钟罩形变为空心钟罩形。近阴极附近区域的电弧等离子体被压缩,而

在近阳极(工件表面)发生扩散,出现了空心“低温腔”,造成阳极表面热流密度分布模式变为双峰分布;且电弧的横截面距离阳极越近,高温区域越远偏离轴线,这与文献[6]和[10]的研究结论是一致的。

相比 150 A,200 A 的电流密度在外加 0.02 T 的纵向磁场之后,近阴极的电弧压缩和近阳极的电弧扩散都更加明显;且电流密度越大电弧的横截面距离阳极越近,高温区域就越远偏离轴线,造成阳极表面电流密度呈现更加明显的双峰分布。这主要因为外加纵向磁场的存在,使得电弧中的带电粒子在径向上切割磁力线产生洛伦兹力,带电粒子在洛伦兹力和周向速度的共同作用下围绕着电弧的中心轴线作如图 3 所示的螺旋状旋转运动,最终到达阳极工件表面。因此,电弧等离子体具有在周向上朝着电弧边缘汇聚的倾向,故电弧中心轴线位置的带电粒子减小,造成阳极表面电弧中心位置的温度降低,进而出现了“低温腔”和空心钟罩形态分布^[11]。

图 4 是 TIG 电弧在阳极表面的温度分布。由图可以看出无外加磁场的时候,电弧温度在阳极表面服从高斯分布,中心轴线处温度最高,距离中心轴线越远温度越低。在施加了纵向磁场之后,电弧温度在阳极表面出现了双峰分布,且电流密度越大,峰值越大;同时,高温区域在阳极表面(径向)分布半径更大,有效加热面积也越大。对比图中 0.02 T 纵向磁场作用下的温度分布可以看出,电流密度越大,阳极表面高温区域越远离电弧中心轴线。由洛伦兹力公式 $F = J \times B$ 可知,电流密度越大,电弧等离子体在洛伦兹力的驱动下围绕

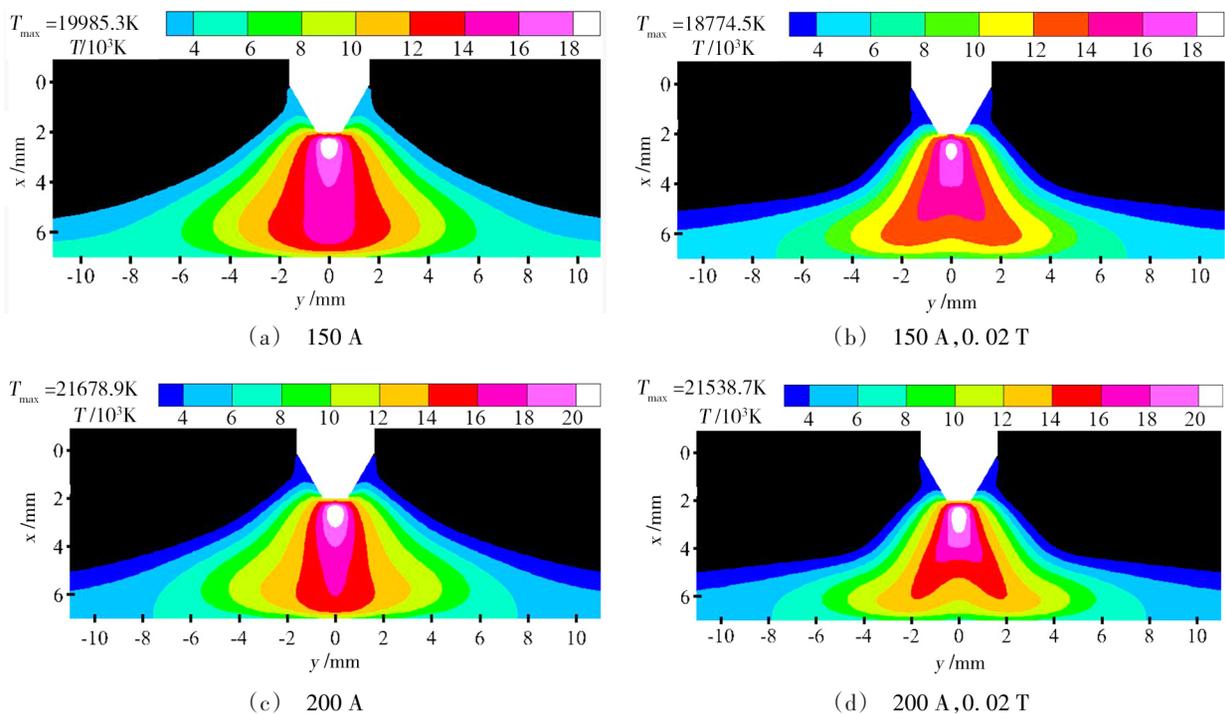


图 2 不同电流和磁场强度下的 TIG 电弧温度场

Fig. 2 Temperature field of TIG arc under different current and magnetic intensities

中心轴线的螺旋运动越剧烈,造成电弧等离子体运动到阳极表面时越远离中心轴线,表现为阳极表面高温区域越远离中心轴线。

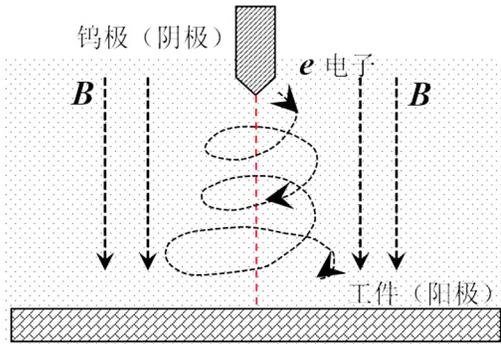


图3 等离子体在外加纵向磁场下的运动

Fig. 3 The motion of plasma under the applied longitudinal magnetic field

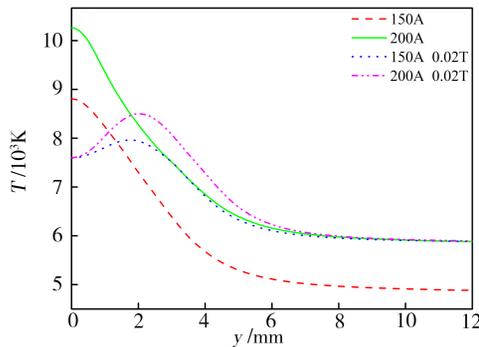


图4 阳极(工件)表面温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of anode surface (workpiece)

2.2 磁场对电弧压力场的影响

图5是TIG电弧等离子体对阳极表面轰击形成的压力分布。

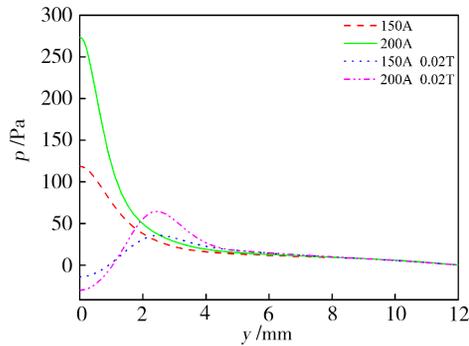


图5 阳极(工件)表面压力分布

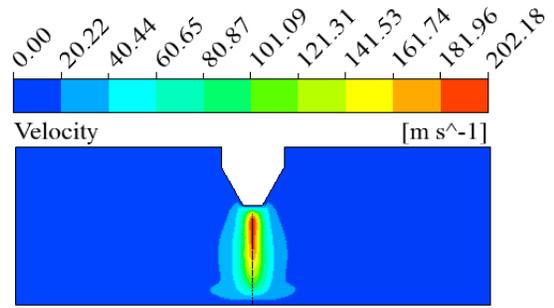
Fig. 5 Pressure distribution of anode surface (workpiece)

可以看出在没有外加纵向磁场作用时,电弧压力关于中心轴线服从高斯分布。150和200 A的电流密度下阳极表面最大电弧压力分别为118.4、272.3 Pa。在施加纵向磁场之后,最大电弧压力偏移中心轴线,且电流密度越大,偏移量越大。当施加0.02 T纵向磁场的作用时,与150和200 A的电流密度对应的电弧最大压力均出现了明显下降,只有35.8、64.6 Pa,分别下降了69.8%、76.3%。这是由于电弧等离子体在上述的螺旋运动状态下从阴极运动到阳极表面发生扩散,并且运

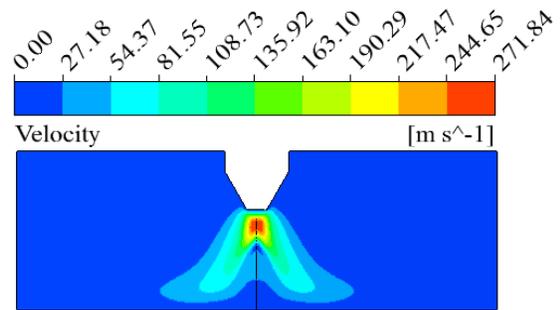
动速度也在一定程度上减小,导致电弧等离子体对工件阳极表面的“轰击”作用减弱,表现为阳极表面的电弧压力峰值在径向上外延且减小。

2.3 磁场对电弧速度场的影响

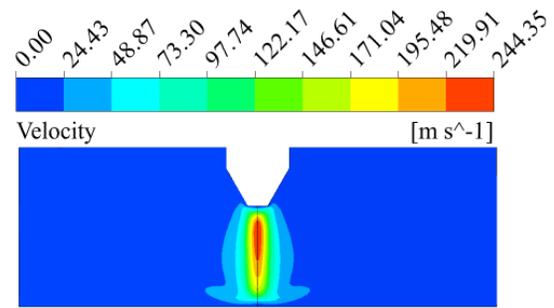
图6是TIG电弧等离子体在不同电流和磁场强度下速度场分布。



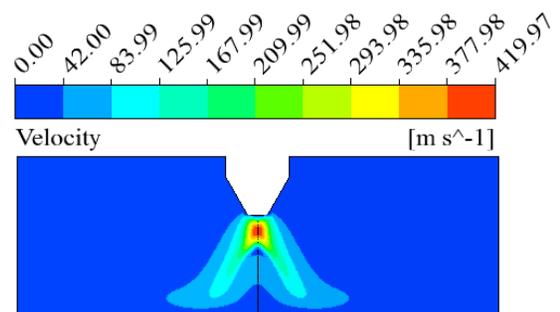
(a) 150 A



(b) 150 A, 0.02 T



(c) 200 A



(d) 200 A, 0.02 T

图6 不同电流和磁场强度下的TIG电弧速度场

Fig. 6 Velocity field of TIG arc under different current and magnetic intensities

对比四种焊接工况,可以看出在没有外加纵向磁场作用时,电弧等离子体的速度峰值随着电流密度的增大而增大,电流密度增大25%速度峰值增大17%,150和200 A的电流密度下电弧等离子体的速度峰值分别为202.18、244.35 m/s。在施加纵向磁场之后,速度场的分布模式发生显著变化。相同的电流密度下,施加纵向磁场对电弧等离子体的峰值速度增加明显。且施加纵向磁场之后,电弧等离子体因为在周向上获得了洛伦兹力的加速作用,其速度表现为电弧中心轴线上速度小,轴线两端速度大的分布模式。相同的磁场强度下,电流密度增加对于速度峰值的增加更为明显,电流密度增加25%,电弧等离子体速度峰值增加35.5%,这与黄勇等^[12]人采用三维模型计算得到的结论是一致的。

3 结论

(1)纵向磁场作用下的TIG电弧呈现空心钟罩形态,在近阳极表面位置出现“低温腔”,且电流密度越大,“低温腔”越大;其次,电弧温度场不再关于中心轴线呈现高斯分布;而是呈现双峰分布,且电流密度越大,双峰距离电弧中心轴线越远。

(2)纵向磁场作用下的TIG电弧在阳极表面的压力分布不再关于中心轴线呈现高斯分布,而出现了双峰分布;其峰值压力较无磁场作用时出现了明显下降,且电流密度越大,下降的越多。

(3)外加纵向磁场对于TIG电弧等离子体的加速效果明显,且外加磁场改变了电弧等离子体的运动模式,使其呈现中心轴线速度小,两端速度大的特点。

参考文献

[1] 刘明旭. 磁场作用下短路电弧熔滴过渡的数值模拟[D]. 沈阳工业大学,2015.

LIU Mingxu. The numerical simulation of the influence of magnetic field on short circuiting arc and droplet transfer [D]. Shenyang University of Technology, 2015.

[2] 刘政军,温晓波,苏允海. 外加磁场电流对镁合金焊接接头力学性能的影响[J]. 沈阳工业大学学报,2012(3):258-262.

LIU Zhengjun, WEN Xiaobo, SU Yunhai. Effect of imposed magnetic field current on mechanical properties of magnesium alloy welded joint[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2012(3):258-262.

[3] 江淑园,张学武,陈焕明. 外加纵向磁场对GTAW焊接不锈钢接头宏观形貌及组织的影响[J]. 上海交通大学学报,2010(S1):89-91.

JIANG Shuyuan, ZHANG Xuewu, CHEN Huanming. Effect of external longitudinal magnetic field on weld formation and microstructure in GTAW welding [J]. Journal of Shanghai

Jiaotong University, 2010(S1):89-91.

[4] 罗键. 外加纵向磁场GTAW焊接熔池流体流动与传热行为的研究[D]. 西安交通大学,1999.

LUO Jian. Research on fluid flow and heat transfer behavior of GTAW welding pool with longitudinal magnetic field [D]. Xi'an Jiaotong University, 1999.

[5] 殷咸青,孙江涛,张建勋. 纵向磁场作用下的钨极氩弧焊电弧温度场[J]. 西安交通大学学报,2013,47(3):85-89.

YIN Xianqing, SUN Jiangtao, ZHANG Jianxun. Arc temperature distribution of gas tungsten arc welding in external longitudinal magnetic field [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013,47(3):85-89.

[6] YIN X, GOU J, ZHANG J, et al. Numerical study of arc plasmas and weld pools for GTAW with applied axial magnetic fields [J]. Journal of Physics D-applied Physics, 2012, 45(45):285203-285215.

[7] 代巍,江淑园,张学武. 外加纵向磁场作用TIG焊温度场的数值模拟[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版),2008,22(4):23-27.

DAI Wei, JIANG Shuyuan, ZHANG Xuewu. Numerical simulation of temperature field in TIG welding under external longitudinal magnetic field [J]. Journal of Nanchang Hangkong University(Natural Sciences), 2008,22(4):23-27.

[8] 常云龙,杨旭,李大用,等. 外加纵向磁场作用下的TIG焊接电弧[J]. 焊接学报,2010,31(4):49-52.

CHANG Yunlong, YANG Xu, LI Dayong, et al. Arc shapes of TIG welding in a longitudinal magnetic field [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2010,31(4):49-52.

[9] SANSONNENS L, HAIDAR J, LOWKE J J. Prediction of properties of free burning arcs including effects of ambipolar diffusion [J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2000, 33(2):148-157.

[10] 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.

XIAO Lei, FAN Ding, HUANG Jiankang, et al. Numerical simulation of TIG welding arc with extra highfrequency longitudinal magnetic field [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2017,38(2):66-70.

[11] 张晓鸿. 高温镍基合金焊缝晶粒细化工艺研究及数值模拟[D]. 西南交通大学,2018.

ZHANG Xiaohong. Study on grain refinement process of high temperature Ni-based alloy welds and numerical simulation [D]. Southwest Jiaotong University, 2018.

[12] 黄勇,刘林,陆肃中,等. 外加纵向磁场对TIG电弧特性影响的数值分析[J]. 兰州理工大学学报,2016,42(3):31-34.

HUANG Yong, LIU Lin, LU Suzhong, et al. Numerical analysis of influence of external longitudinal magneto-field on TIG arc characteristics [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016,42(3):31-34.