

外加高频纵向磁场作用下的 TIG 焊电弧数值模拟

肖 磊¹, 樊 丁¹, 黄健康¹, 王新鑫^{1,2}

(1. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050;

2. 重庆理工大学 材料科学与工程学院, 重庆 400054)

摘 要: 基于局部热平衡状态假设, 建立外加高频纵向磁场作用下的钨极惰性气体保护焊的电弧稳态三维数值模型。通过对麦克斯韦方程组、连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程的耦合求解, 得到了电弧的温度场、流场和压力场等计算结果。结合法拉第电磁感应定律, 考虑时变磁场的电磁感应效应, 引入感应电场, 解释了高频纵向磁场作用下的电弧收缩现象。结果表明, 外加高频纵向磁场感应产生环向电场, 形成环向电流, 环向电流与外加纵向磁场作用产生径向洛伦兹力, 导致电弧收缩。

关键词: 钨极惰性气体保护焊; 高频纵向磁场; 数值模拟

中图分类号: TG 444 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2017)02-0066-05

0 序 言

由于电弧等离子体良好的导电性, 提供了外部磁场对它的可作用性。通过外部磁场可以改变电弧的形状和位置, 控制电弧的运动行为, 为采用外部磁场对焊接工艺进行控制提供了可能性。中国科学技术大学的白冰等人^[1,2]建立了耦合阴极磁分散电弧数值模型, 分析了耦合阴极对磁分散电弧位形的影响。西安交通大学的殷成青等人^[3]建立了外加直流纵向磁场作用下的电弧熔池耦合数值模型, 分析认为由于外加纵向磁场的作用, 电弧等离子体作旋转运动, 形成内外压力差, 阳极表面上方出现等离子体回流区, 使得电弧在阳极表面处发散。沈阳工业大学的常云龙等人^[4,5]系统地研究了外加直流和高频纵向磁场作用下的 TIG 焊电弧特性。试验表明, 外加直流纵向磁场作用下的 TIG 焊电弧在阳极表面发散, 阳极表面的电流密度及电弧压力分布呈现双峰分布, 而外加高频纵向磁场时电弧收缩成柱状。该课题组还从磁场的不均匀分布及电子在不均匀磁场中的运动行为两方面出发, 解释了直流纵向磁场时的电弧发散现象和高频纵向磁场时的电弧收缩行为。国内外关于高频纵向磁场作用下 TIG 焊电弧模拟和试验方面的研究较少, 特别是关于高频收缩现象的理论解释部分。文中结合前面学者已有的分析, 通过数值模拟的方法成功解释了这种电弧收缩

现象, 为今后将高频纵向磁场应用于高速 TIG 焊提供有力支撑。

1 数学模型

1.1 基本假设

由于焊接电弧内部存在复杂的物理过程, 为了简化计算, 得到较为合理的电弧数学模型, 作以下基本假设。

(1) 电弧等离子体为连续、层流的 Newton 流体, 电弧等离子体处于稳态且满足局部热平衡 (local thermodynamic equilibrium, LTE) 状态。

(2) 在一个标准大气压下, 保护气体 (氩气) 的密度、比热、热导率、粘度、电导率仅为温度的函数。

(3) 电弧是不可压缩的。

(4) 考虑交变磁场感应产生的交变电场而不考虑该交变电场感应产生的磁场。

(5) 外加高频方波纵向磁场, 感应电场波形为带尖峰的三角形波。为了简化计算, 认为感应电场波形为具有特定幅值 (取感应电场的最大值) 的方波。由于正负半周附加动量源项在数值和方向上没有改变, 数值计算上采用稳态计算。

1.2 控制方程

基于以上的假设, 建立了三维坐标下的控制方程组。

$$\text{质量守恒方程} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程

收稿日期: 2015-06-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51205179); 国家自然科学基金
基金资助项目 (51074084)

$$\frac{\partial(\rho \boldsymbol{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v} \boldsymbol{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + j\boldsymbol{B} + \rho \boldsymbol{g} + S_u$$

(2)

式中: ρ 为密度; $\boldsymbol{v}$ 为速度矢量; $\boldsymbol{\tau}$ 为粘性应力张量; j 为电流密度; $\boldsymbol{B}$ 为磁感应强度; $\boldsymbol{g}$ 为重力加速度; S_u 为动量守恒方程的源项。
能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v} c_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S$$

(3)

式中: c_p 为比热容; k 为流体的热传导系数; T 为温度; S 为能量守恒方程的源项。
能量守恒方程的源项 S 的表达式为

$$S = \frac{j^2}{\sigma} + \frac{5k_B}{2e} j \cdot \nabla T - 4\pi \epsilon_n$$

(4)

式中: σ 为电导率; k_B 为玻尔兹曼常数; e 为电子电量; ϵ_n 为辐射系数。等式右侧的三项分别代表了焦耳热、电子输运焓和电弧等离子体的辐射散热项。

麦克斯韦方程组包括电流连续性方程、欧姆定律、泊松方程和磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 的亥姆霍兹分解方程。各自的表达式为

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = 0$$

(5)

$$\boldsymbol{j} = -\sigma(\nabla \phi) = \sigma \boldsymbol{E}$$

(6)

$$\nabla^2 A = -\mu_0 j$$

(7)

$$\nabla \cdot \boldsymbol{A} = B$$

(8)

式中: ϕ 为电势; A 为磁矢量势; $\boldsymbol{E}$ 为电场强度; μ_0 为真空磁导率。根据法拉第电磁感应定律

$$\oint_L \boldsymbol{E}_i \cdot d\boldsymbol{l} = - \iint_S \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \cdot d\boldsymbol{S}$$

(9)

得到环向电场的电场强度,即

$$E_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} = -\frac{r}{2} \frac{dB}{dt}$$

(10)

式中: $\frac{dB}{dt}$ 为常数。

将 E_θ 进行坐标变换得到

$$E_x = -E_\theta y/r$$

(11)

$$E_y = E_\theta x/r$$

(12)

式中: r 是坐标点离电弧轴线的距离。
设定磁场正方向为钨极指向母材的方向,根据左手定则,在交变磁场由负变正,感应电流方向为逆时针方向(从上往下观察),与处于正半周的磁场相互作用产生的洛伦兹力指向电弧轴线;同理交变磁场由正变负,感应电流方向为顺时针,但此时磁场方向改变,洛伦兹力仍然指向轴线,电弧一直保持收缩状态。

1.3 边界条件

求解域如图 1 所示,选择钨极直径 3.2 mm,尖角 60°,且带有直径 1 mm 的凸台。求解域为圆柱体,底面半径 12 mm,电弧计算区域高度 5 mm。

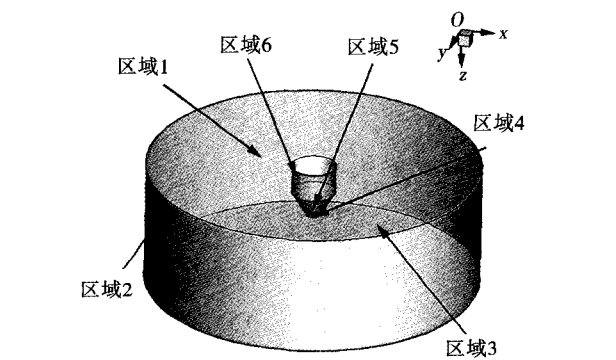


图 1 几何模型示意图
Fig. 1 Schematic diagram of simulation model

求解域中区域 1 是氩气入口,气体流量为 10 L/min,根据入口尺寸计算得到入口速度 v_{giv} 。区域 2 是氩气出口。区域 3 是阳极表面,模型中没有考虑阳极鞘层区,阳极的能量守恒方程边界条件选取温度定值。同理区域 4、区域 5、区域 6 作为阴极壁面,温度边界条件同样选取温度定值。区域 4(凸台)及区域 5(锥面)处的电流连续性方程边界条件选用给定电流密度的方式给出^[3]。边界条件如表 1 所示。

表 1 边界条件
Table 1 Boundary conditions

边界	速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	压力 p/Pa	温度 T/K	电势 ϕ/V	磁势 $A/(\text{Wb} \cdot \text{m}^{-1})$
区域 1	$v_z = v_{\text{giv}}$	—	1 000	$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial A_i}{\partial n} = 0$
区域 2	$\frac{\partial(\rho v)}{\partial n} = 0$	101 325	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial A_i}{\partial n} = 0$
区域 3	0	—	3 000	0	$\frac{\partial A_i}{\partial n} = 0$
区域 4	0	—	3 000	j_{max}	$\frac{\partial A_i}{\partial n} = 0$
区域 5	0	—	3 000	$j(l)$	$\frac{\partial A_i}{\partial n} = 0$
区域 6	0	—	3 000	$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial A_i}{\partial n} = 0$

焊接电流 $I = 200$ A, 弧长 $l_0 = 5$ mm. 钨极形状如图2所示, 凸台半径 $r_0 = 0.5$ mm. 凸台处电流密度的最大值 $j_{\max} = 1.2 \times 10^8$ A/m², 凸台分得电流 $I_1 = 94.2$ A, 余下电流按一次函数 $j(l) = 1.2 \times 10^8 (1 - l/L)$ (A/m²) 分布在锥面上. 其中 l 的取值从0到 L . L 可通过式(13)计算得到, 即

$$\int_0^L = 2\pi(r_0 + l \sin 30^\circ)j(l)dl = I - I_1 \quad (13)$$

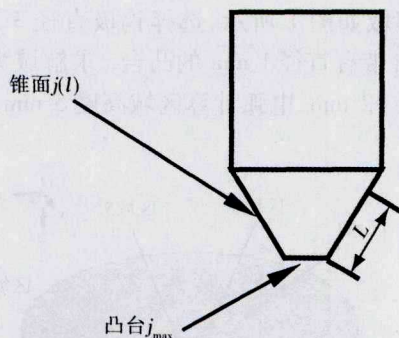


图2 阴极凸台

Fig. 2 Cathode tip

2 计算结果与比较

外加高频纵向磁场的波形为方波交流. 磁场磁感应强度最大值为 0.03 T, 磁场频率为 1 500 Hz. 文献[4]指出, 获得相同磁感应强度的磁场, 可以通过匹配磁控电流与线圈匝数获得. 不同之处在于, 大电流配少匝数可以使磁场波形更接近方波, 而小电流配多匝数虽然可以获得同样数量级的磁感应强度, 但是其电感量大, 磁场波形以类似三角波形式存在. 假设磁场发生器的脉冲上升时间和脉冲下降时间 Δt 相同. 由式(10)可计算得到感应产生的环向电场, 且 Δt 越小, 感应产生的环向电场的电场强度越大, 感应电流随之也越大, 则径向洛伦兹力越大, 电弧收缩越明显. 考虑到实际波形的限制, Δt 分别取 5×10^{-6} , 1×10^{-6} 和 5×10^{-7} s 等多组数值进行计算. 计算结果表明, 当 Δt 的取值小于 5×10^{-7} s 时, 由于径向洛伦兹力太大会导致计算结果不收敛, 且超出电源的调节能力, 不符合实际情况. 当 Δt 的取值大于 5×10^{-6} s 时, 电弧收缩现象不明显. 下面以 1×10^{-6} s 作为 Δt 的取值, 得到如下计算结果.

假设外加方波交变纵向磁场感应产生的环向电场的电场强度的大小在半个周期内保持不变, 半个周期后改变一次方向, 数值计算上采用稳态计算. 图3和图4分别是无外加磁场和外加高频纵向磁场时电弧的温度场. 图5和图6是无外加磁场和外加

高频纵向磁场时电弧的压力场和流场. 外加高频纵向磁场时的温度场和流场分布情况与外加直流纵向磁场时的情况相似, 温度场在阳极上方出现“低温腔”, 阳极表面的电流密度和压力呈双峰分布. 在数值以及温度场轮廓线收缩程度上存在差异, 下面将主要分析这些差异.

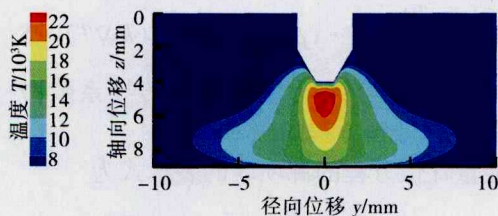


图3 TIG 焊电弧温度场

Fig. 3 Temperature field of TIG welding

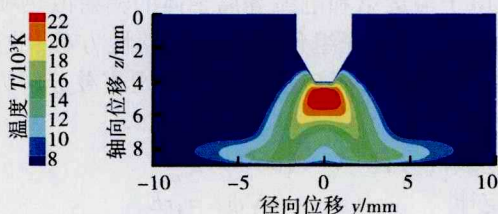


图4 外加高频纵向磁场时电弧的温度场

Fig. 4 Temperature field of TIG welding with axial high-frequency magnetic field

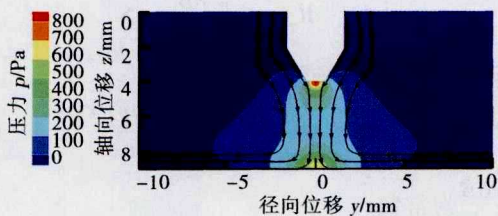


图5 TIG 焊电弧压力场和流场

Fig. 5 Pressure and flow fields of TIG welding

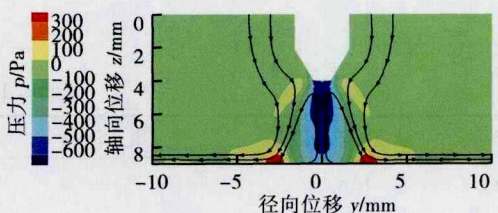


图6 外加高频纵向磁场时电弧的压力场和流场

Fig. 6 Pressure and flow fields of TIG welding with axial high-frequency magnetic field

外加高频纵向磁场与外加直流纵向磁场对电弧温度场的影响结果如图7所示. 外加高频纵向磁场

时电弧明显收缩,温度最大值由外加直流纵向磁场时的 24 594.51 K 上升为 25 082.38 K. 温度上升的原因是环向电流与外加磁场相作用产生径向洛伦兹力促使电弧收缩,导致温度上升. 由式(10)可知通电螺线管中心的电场分布呈一次函数分布,离轴线越远电场强度越大. 由欧姆定律(式(6))可知电流密度除了与电场强度有关之外还与电导率相关. 根据计算结果,外加直流纵向磁场作用下的 TIG 焊电弧温度场在阳极上方出现“低温腔”,阳极表面的电流密度和温度呈双峰分布,电弧横截面越靠近阳极,高温区偏离轴线越远,该高温区电场强度越大. 因此在偏离轴线具有较大电导率和较大的电场强度的区域里产生的感应电流较大,使得电弧收缩现象明显. 但是与试验结果比较发现,收缩程度没有文献[4]所描述的“在外加高频磁场作用下,电弧形态由钟罩形变为柱形”. 主要原因在于研究内容没有考虑感应加热和外加磁场作用时的霍尔效应. 初步分析发现,感应加热将会有助于提高电弧温度. 更值得注意的是根据右手定则,由霍尔效应产生的环向霍尔电流与此前分析的感应电流在正负半周方向是一致的^[6],均对电弧的收缩起到一定的促进作用.

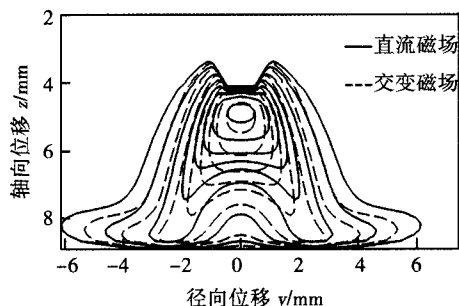


图7 外加高频纵向磁场对电弧温度场的影响

Fig. 7 Influence of axial high-frequency magnetic field on the isotherms of plasma

图8是三种不同条件(无外加磁场、外加直流磁场和外加高频磁场)下电弧轴线上温度分布曲线. 与自由电弧相比较,外加磁场作用下电弧靠近阳极表面的温度较低,靠近阴极处较高. 这是因为外加磁场与径向电流相作用产生的环向洛伦兹力使得电弧旋转,旋转时的离心作用导致形成“低温腔”. 外加高频纵向磁场时的轴向温度曲线整体较直流磁场时偏高,特别是在电弧轴线的中部. 这是因为外加高频纵向磁场时产生的附加径向洛伦兹力阻碍了电弧旋转时的离心运动,缩小了“低温腔”,轴线处温度较高.

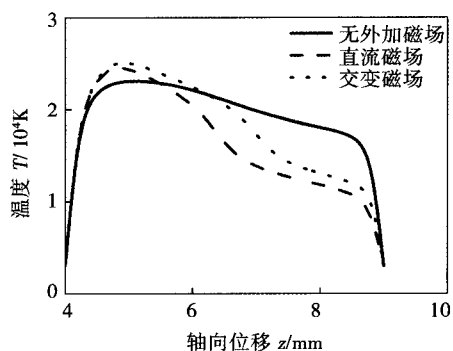


图8 轴向温度

Fig. 8 Axial temperature

图9和图10分别是三种不同条件下阳极表面电流密度和压力分布曲线. 由于外加直流纵向磁场后“低温腔”的存在,阳极表面的电流密度峰值和压力峰值均偏离轴线,而外加高频纵向磁场后电弧收缩,峰值点向阳极表面中心靠拢.

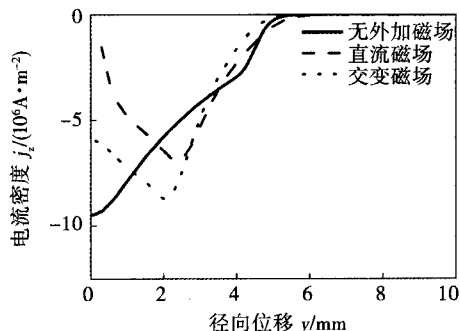


图9 阳极表面电流密度

Fig. 9 Current density on the anode surface

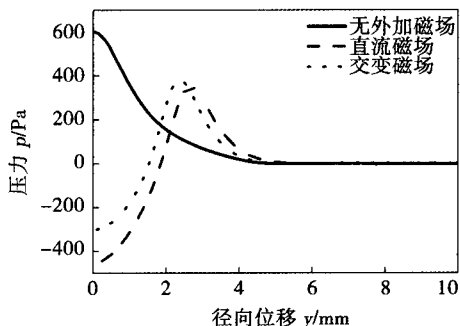


图10 阳极表面压力

Fig. 10 Pressure on the anode surface

3 结 论

(1) 外加高频纵向磁场感应产生环向电场,形成环向电流,环向电流与外加纵向磁场作用产生径

向洛伦兹力,导致电弧收缩。

(2) 外加磁场周期变化时,感应电场方向随之改变,产生的洛伦兹力的方向始终指向轴线,导致电弧处于稳定收缩状态。

(3) 上述模型没有考虑高频磁场作用时的感应加热作用和霍尔效应的影响。为了完善数值模型,后续研究将重点考虑这两方面的影响。

参考文献:

- [1] Chen Tang, Zhang Xiaoning, Bai Bing, *et al.* Numerical study of DC argon arc with axial magnetic fields[J]. Plasma Chem Plasma Process, 2015, 35(1): 61-74.
- [2] 白 冰. 耦合电极的磁分散电弧等离子体的数值模拟研究[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2012.
- [3] Yin Xianqing, Gou Jianjun, Zhang Jianxun, *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,

285203.

- [4] 寇 婵. 纵向磁场频率对 TIG 焊电弧特性的影响[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- [5] 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.
- [6] Wang Lijun, Jia Shenli, Shi Zongqian, *et al.* Simulation research of magnetic constriction effect and controlling by axial magnetic field of vacuum arc[J]. Plasma Science & Technology, 2005, 7(1): 2687-2692.

作者简介: 肖 磊,男,1991 年出生,博士研究生. 主要研究方向为高效焊接方法及数值模拟. 发表论文 1 篇. Email: xxxiaolei@aliyun.com

通讯作者: 樊 丁,男,教授,博士研究生导师. Email: fand@lut.cn

书 讯

◇卓越焊接工程师

◇案头必备工具书

《焊接制造工程基础》



书号: 978-7-111-53831-8
作者: 史耀武 主编
定价: 139.00元

本书是机械工业出版社组织编写的卓越工程师教育系列丛书之一。本书以焊接制造工程为导向,以卓越焊接工程师的职业需求为目标。书中收集了大量典型工程案例,全面反映了企业从焊接工程招投标到焊接结构制造工程全过程所需的材料、工艺、装备、信息化及技术管理的资料和方法,推动基于问题和基于项目的学习方法,提高学生的焊接工程概念和意识,培养分析和解决焊接制造工程实际问题的能力,为指导学生迅速适应企业的生产技术管理、技术创新和开发工作提供路径。本书是未来焊接工程师在校学习理论和进入企业工作的桥梁,本书也是企业培养卓越焊接工程师的指导教师及企业焊接工程技术人员的必备参考工具书。

编辑热线:010-88379644 购书热线:010-88379425 传真:010-68351729 焊接微信公众号:进入微信搜索“好焊悦读”
传真购书请注明:姓名、详细地址、邮编、联系电话、传真、E-mail、所购图书书名、书号、数量、是否需要发票及发票抬头