

电弧弧长对 TIG 焊电弧特性影响规律研究^{*}

郭朝博^{1,2}, 崔露露³, 李兴霞^{1,2}, 马天凤^{1,2}, 周慧琳^{1,2}, 吴金杰^{1,2}

(1. 河南工学院 材料科学与工程学院, 河南 新乡 453003; 2. 河南省金属材料改性技术工程技术研究中心, 河南 新乡 453003; 3. 河南工学院 图书馆, 河南 新乡 453003)

摘要:建立了不同弧长的 TIG 焊电弧二维轴对称数学模型,通过耦合求解控制方程组,对不同弧长作用下的电弧温度场、速度场、电弧压力等的变化规律进行数值分析。结果显示:随着弧长的增长,电弧形态由倒置的杯型转变为钟罩型;在弧长较短时,最高电弧温度的位置逐渐向钨极移动,在弧长较长时,最高电弧温度的增大是先快后慢的;最高等离子速度随弧长的增长基本呈线性增加;电弧压力在数值和作用区域上随着弧长的增长而增大。

关键词:TIG 焊;电弧弧长;数值模拟

中图分类号: TG402

文献标识码: A

文章编号: 2096-7772(2023)04-0007-04

0 序言

作为高质量的连接方法,钨极氩弧(TIG)焊在加工制造业中已得到广泛的应用。TIG 焊电弧具有的复杂传热传质特性可直接影响熔池的形成,并决定焊接质量。

TIG 焊电弧由于不存在焊丝熔化、熔滴过渡等复杂的过程,对于焊接电弧机理的研究具有一定的优势。随着计算机技术、数值分析方法的发展,研究人员通过建立大量的二维、三维数学模型对焊接电弧^[1]、熔池^[2]、加工过程^[3]等进行数值分析,在 TIG 焊电弧方面,对焊接电流^[4]、保护气^[5]、钨极形状^[6]、外加磁场^[7]对电弧温度场、速度场、电弧压力、电流密度的影响进行了研究。

在焊接过程中,工件尺寸的变化时常导致电弧弧长发生变化,进而影响电弧形态。本文针对 TIG 焊电弧建立二维轴对称数学模型,对不同焊接弧长作用下的电弧温度场、速度场等进行分析,探讨弧长对电弧温度、等离子速度、电弧压力等的影响规律,为焊接参数的选择、工艺的优化提供一定的理论依据。

1 数学模型

1.1 基本假设

基于 TIG 焊稳定燃烧时的电弧特性,建立二维轴对称数学模型,其示意图如图 1 所示。

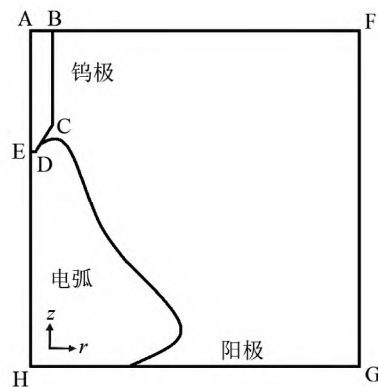


图 1 TIG 焊电弧数学模型示意图

为了简化 TIG 焊电弧数学模型,对其做出以下假设:

- (1) 电弧为连续的等离子流体,且处于层流状态;
- (2) 电弧处于局部热平衡状态;
- (3) 电弧是光学薄的;
- (4) 由于粘性效应导致的热损失忽略不计。

^{*} 收稿日期: 2023-03-20

基金项目: 高等学校重点科研项目基础研究专项计划(20B430003); 河南工学院高层次引进人才科研启动基金(KQ1821)

第一作者简介: 郭朝博(1985—),男,河北石家庄人,讲师,博士,主要从事焊接物理研究。

1.2 控制方程

基于所建立的数学模型及基本假设,采用如下控制方程:

1.2.1 磁流体动力学方程

质量守恒方程为:

$$\nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为:

$$\nabla \cdot (\rho v v) = F - \nabla P + \nabla \cdot \tau \quad (2)$$

能量守恒方程为:

$$\nabla \cdot (\rho c_p v T) = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + Q \quad (3)$$

式中 v 是速度, ρ 是密度, c_p 是定压比热容, κ 是导热率, P 是压力, T 是温度, F 是电磁力, τ 是粘度应力张量,其表达式为:

$$\tau_{ij} = \mu \left(2 \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \nabla \cdot v \right) \quad i = j \quad (4)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad i \neq j$$

式中 μ 是动力粘度, v_i 是 x_i 方向上的速度分

量。

1.2.2 麦克斯韦方程组

电流连续性方程为:

$$\nabla \cdot (\sigma_e \nabla \Phi) = 0 \quad (5)$$

欧姆定律为:

$$-\sigma_e \nabla \Phi = \sigma_e E = J \quad (6)$$

泊松方程为:

$$\nabla^2 A = -\mu_0 J \quad (7)$$

$$B = \nabla \times A \quad (8)$$

式(5)~(8)中 Φ 是电势, E 是电场强度, σ_e 是电导率, J 是电流密度, A 是磁矢势, μ_0 是真空磁导率, B 是磁通密度。

1.3 边界条件和源项

1.3.1 边界条件

在如图 1 所示的数学模型中,区域 ABCDE 为钨极,其中钨极直径为 2.4 mm,锥角为 60°且其尖端带有平顶。该模型的边界条件如表 1 所示。

表 1 边界条件

区域	速度/ v	温度/ T	电势/ Φ	磁矢势/ A
AEH	对称	对称	对称	对称
AB	0	1000K	$-\sigma_e \partial \Phi / \partial z = I / (\pi r^2)$	$\partial A / \partial n = 0$
BCDE	0	耦合	耦合	耦合
BF	$v = v_{giv}$	1000K	$\partial \Phi / \partial n = 0$	$\partial A / \partial n = 0$
FG	—	1000K	$\partial \Phi / \partial n = 0$	0
HG	0	6000K	0	$\partial A / \partial n = 0$

注: I 是电流, r 是钨极半径, v_{giv} 是氩气输入速度。

1.3.2 控制方程源项

能量守恒方程源项为:

$$Q = \frac{J^2}{\sigma_e} + \frac{5}{2} \frac{K_B}{e} J \cdot \nabla T - S_R \quad (9)$$

式中 K_B 为波尔兹曼常数, e 为电子电量, S_R 是辐射损失。

动量守恒方程源项为:

$$F = J \times B \quad (10)$$

2 模拟结果及分析

针对基本假设,选择合适的边界条件,求解控制方程组,分别对弧长为 3 mm、4 mm、5 mm、6 mm、7 mm、8 mm、9 mm 和 10 mm 的 TIG 焊电弧进行数值分析,在模型中所采用的焊接电流为 150 A,保护气体为氩气,其热物性参数选自文献[8],气体流量为 10 L/min。电弧温度场和等离子体速度场的数值模拟结果如图 2 和图 3 所示。

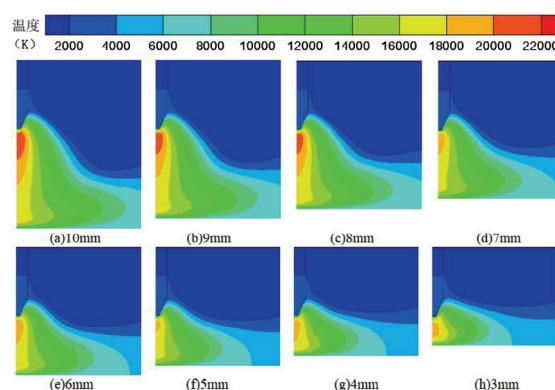


图 2 电弧温度场分布云图

2.1 电弧弧长对温度场的影响分析

如图 2 所示,在 TIG 焊电弧弧长较长时(如弧长为 10 mm 时),电弧明显呈现出钟罩型,随着弧长变短,电弧形状逐渐转变为扁平状的钟罩型(如弧长为 6 mm 时),随着弧长进一步变短,电弧形状呈现为倒置的杯型(如弧长为 3 mm 时)。在阴极区和阳极区附近的温度梯度较大、弧柱区的温度梯度较小,

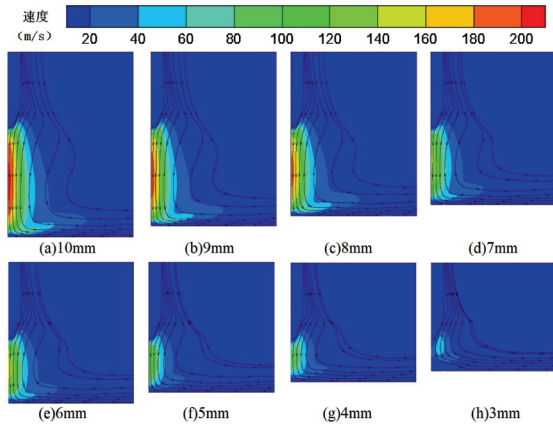


图3 等离子体速度场分布云图

电弧的最高温度均出现在钨极下方约 1 mm 的地方,这与文献[9]的结果一致。

不同弧长的电弧温度在轴线上的分布如图 4 所示。电弧弧长在 6 mm 和 10 mm 之间时,温度的分布趋势基本一致。随着弧长的增长,最高温度由 18,951 K 增高到 21,990 K,且其增高趋势是先快后慢的。电弧弧长在 3 mm 到 6 mm 变化时,由于弧长较短,电弧不能得到充分的伸展,电弧形态变化较大。随着电弧长度的增长,最高电弧温度变化不大,但其位置逐渐向钨极移动。

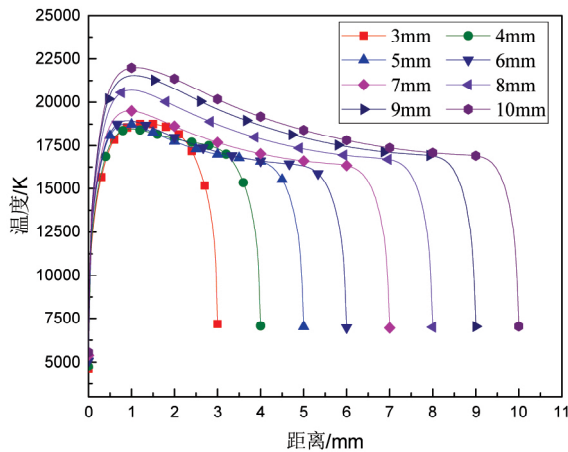


图4 电弧轴线温度分布曲线

2.2 电弧弧长对速度场的影响分析

如图 3 所示,在焊接电弧中,径向电磁力指向电弧中心,轴向电磁力指向阳极。在电磁力作用下,弧柱区的等离子体呈逆时针方向运动。由于在钨极尖端区域的电流密度较大,致使在此区域的电磁力较大。较大的电磁力推动等离子体向阳极运动,并在此区域形成较大的压力梯度,使等离子体速度增大。当等离子体到达阳极区域时,由于此区域的电流密度较小,致使电磁力对等离子体的作用降低,等离子

体速度开始减小,并开始向四周运动。图 3 显示最大等离子体速度出现在钨极下方区域,且随着距离中心位置的增大,速度逐渐减小。

弧长在 4 mm 到 10 mm 范围之内,等离子体的最高速度出现在钨极下方的中心轴上,随着电弧长度的增长,等离子体的最高速度逐渐增大。图 5 为不同弧长作用下等离子体的最高速度变化曲线,从图中可以看出,随着弧长的增长,等离子体速度由 98.7 m/s(弧长为 4 mm 时)增大到 206.1 m/s(弧长为 10 mm 时),其增大的趋势接近于线性。这是由于随着弧长的增长,弧柱区的长度不断增长,电磁场作用区域增大,较大的电磁力可以使等离子体增大速度,这也进一步阐述了随着弧长的增长,最大等离子速度距离钨极尖端的距离逐渐增大的原因。在电弧弧长为 3 mm 时,由于弧长过短,阳极的阻碍作用增强,导致等离子体在钨极区域的电磁力作用下无法提供有效的空间进行加速,使得等离子体的最高速度出现在钨极下方中心轴的附近。

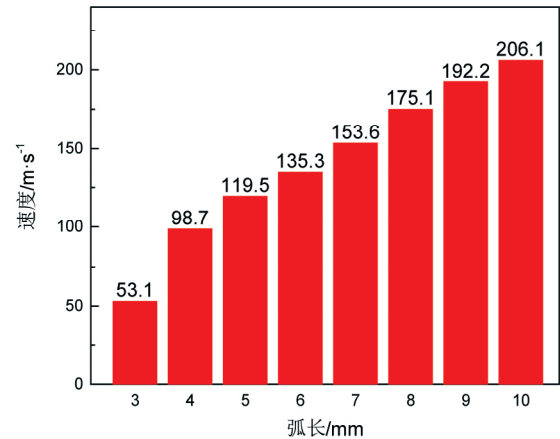


图5 等离子体最高速度随弧长变化曲线

2.3 电弧弧长对电弧压力的影响分析

受电磁力作用,等离子体对工件表面具有一定的冲击性,阳极区域形成的较大压降区使工件表面产生电弧压力。图 6 为不同弧长作用下阳极表面的电弧压力分布曲线。从图中可以看出,不同弧长的电弧压力的分布规律是基本一致的,电弧中心处的电弧压力最大,远离电弧中心处的电弧压力逐渐降低,这与文献[10]中的描述一致。

随着电弧弧长的增长,最大电弧压力由 149 Pa(弧长为 3 mm 时)上升为 373 Pa(弧长为 10 mm 时),呈先快后慢的增大趋势。电弧弧长的增长使电弧形态充分伸展,增加了电弧对工件的作用面积。

由于电弧弧长的长短直接影响电弧压力的分

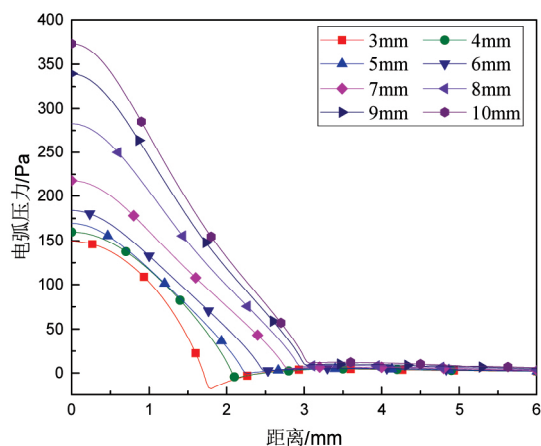


图6 电弧压力分布曲线

布,也相继影响焊接熔池的形成,因此选择合适的电弧弧长有利于焊接质量的保障,通过对不同弧长的温度场、速度场、电弧压力等进行分析,有利于 TIG 焊接工艺参数的优化。

3 结论

(1)针对不同电弧弧长建立了二维轴对称 TIG 焊电弧数学模型并进行数值分析,得出不同弧长下电弧温度场、速度场、电弧压力的分布规律。

(2)随着弧长的增长,电弧形态由倒置的杯型转变为钟罩型。弧长较短时,随着弧长的增长,最高电弧温度变化不大,但其位置逐渐向钨极移动;弧长较长时,随着弧长的增长,最高电弧温度呈先快后慢的增高趋势。

(3)弧长较长时,最大等离子速度出现在钨极下方,并随着弧长的增长基本呈线性增大。

(4)随着弧长的增长,电弧压力在数值和作用面积上均增大了。

(责任编辑 吕春红)

参考文献:

- [1] 贾剑平,詹志平,王鑫,等. 基于旋转电弧的 GTAW 填丝焊熔滴过渡数值模拟[J]. 热加工工艺, 2019, 48(7): 192-194, 198.
- [2] 郭瑞,岳建峰,常玉烁,等. GTAW 耦合模型数值模拟研究进展[J]. 热加工工艺, 2021, 50(9): 1-4.
- [3] 陈丽,陆祖辉,赵伟,等. 焊接工艺参数对焊接接头温度场的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(15): 150-153, 157.
- [4] 杨文飞,刘爱国. 不锈钢熔丝 TIG 焊数值模拟[J]. 沈阳理工大学学报, 2021, 40(6): 71-76, 91.
- [5] 袁张,单彦广,刘维球. 氩弧保护下 GMAW 电弧特性的数值分析[J]. 热加工工艺, 2017, 46(7): 227-231.
- [6] 雷正,朱宗涛,李远星,等. 空心钨极 TIG 焊电弧特性数值模拟[J]. 焊接学报, 2021, 42(9): 9-14, 27, 97.
- [7] 母中彦,胡仁志,庞盛永. 磁场辅助电弧焊接旋转等离子体行为的数值模拟[J]. 精密成形工程, 2021, 13(6): 123-129.
- [8] 陈熙. 热等离子体传热与传质[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [9] SAVA A, CEYHUN V. Finite element analysis of GTAW arc under different shielding gases[J]. Computational Materials Science, 2012, 51(1): 53-71.
- [10] FAN H G, SHI Y W. Numerical simulation of the arc pressure in gas tungsten arc welding[J]. Journal of Material Processing Technology, 1996, 61(3): 302-308.

Numerical Analyze of Arc Length on TIG Welding Arc Characteristics

GUO Chaobo^{1,2}, CUI Lulu³, LI Xingxia^{1,2}, MA Tianfeng^{1,2}, ZHOU Huilin^{1,2}, WU Jinjie^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China;

2. Henan Engineering Research Center for Modification Technology of Metal Materials,

Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China; 3. Library of Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: Two-dimensional axial symmetry models of TIG welding arc with different arc length are developed. The distributions of temperature field, velocity field and arc pressure with different arc length are analyzed by solving the control equations. The results show that with the increasing of the arc length, the arc shape is changed from inverted cup shape to bell shape, the maximum temperature is moving to the tungsten electrode when the arc length is shorter and increasing faster followed by slower when the arc length is longer; the maximum of the plasma velocity increases approximately linearly with increasing of the arc length; the value and scope of the arc pressure increases with arc length increasing.

Key words: TIG welding; arc length; numerical simulation