

氩气和氦气保护 TIG 焊电弧数值模拟研究

郭朝博^{1,2}, 崔露露³, 马天凤^{1,2}, 李兴霞^{1,2}, 刘相邑¹

(1. 河南工学院 材料科学与工程学院, 河南 新乡 453003; 2. 河南工学院 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: 针对氩气和氦气保护下的 TIG 焊电弧, 建立二维轴对称数学模型。通过求解控制方程组, 对氩弧焊和氦弧焊电弧的温度场、等离子体流场、电弧形态、电弧压力等进行分析。结果表明, 氩弧焊的电弧形态呈钟罩型, 氦弧焊的电弧形态呈圆球形。与氩弧焊相比, 氦弧焊电弧的最高电弧温度略低, 在阳极区电弧收缩较大; 氦弧焊电弧的电磁力较大, 最高等离子体速度较大, 但在阳极区附近的等离子体速度较小; 氦气因原子质量小、热导率高、电离能大的特点使氦弧焊产生的电弧压力较小, 有利于高能量密度的精细加工。

关键词: 氩弧; 氦弧; 电弧特性; 数值模拟

中图分类号: TG403

文献标志码: A

文章编号: 2096-7772-(2026)01-0026-04

0 引言

钨极惰性气体保护焊 (TIG 焊) 作为一种高焊接质量、易精确控制的方法在机械制造业领域得到了广泛的应用。氩弧焊电弧以电离能低、电弧收缩性好、能量密度高的特点在 TIG 焊中具有明显的优势, 但其在铝合金焊接中易出现的熔池浅、效率低的问题限制了其发展, 尤其在厚板焊接过程中, 氩弧焊不能有效满足产品的需求。而氦弧焊可以有效提高热源温度, 形成深而窄的焊缝, 同时提高焊缝的拉伸强度和延伸率^[1]。随着制造业的发展, 氦弧焊技术已得到了推广应用^[2]。

氩弧焊和氦弧焊焊缝的差异性是由电弧决定的, 通过数值模拟的方法对电弧进行数值分析可以有效揭示不同保护气下电弧的差异性。针对氩弧焊电弧, 研究人员建立了大量的二维、三维数学模型对单电弧^[3-4]、耦合电弧^[5-6]等的电弧形态、温度场、流场、电磁场、电弧压力等进行了分析, 但对于氦弧的研究相对较少。

本文通过建立氩弧焊和氦弧焊的电弧二维轴对称数学模型对不同保护气下的电弧进行分析, 探讨电弧温度、等离子体速度、电磁场、电弧压力等的差异性,

以揭示氦弧焊电弧的特性, 为氦弧焊的优化应用提供理论依据。

1 数学模型

1.1 基本假设

TIG 焊电弧涉及电、热、光、磁等复杂的物理现象, 为了简化计算过程, 对数学模型做出以下假设:

- (1) 电弧等离子体处于局部热平衡状态 (LTE)。
- (2) 电弧等离子体处于层流状态, 并且是稳定、连续的。
- (3) 电弧等离子体是光学薄的。
- (4) 由于粘性效应导致的热损失忽略不计。

1.2 控制方程

质量守恒方程:

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

动量守恒方程:

$$\nabla \cdot (\rho v) = J \times B - \nabla P + \nabla \cdot \tau \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\nabla \cdot (\rho c_p v T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \frac{J^2}{\sigma_e} + \frac{5}{2} \frac{K_B}{e} J \cdot \nabla T - S_R \quad (3)$$

电流连续性方程:

$$\nabla \cdot (\sigma_e \nabla \Phi) = 0 \quad (4)$$

收稿日期: 2025-04-03

基金项目: 河南工学院创新教育课程项目 (CX-2020-005、CX-2021-004); 河南工学院教育教学改革研究与实践项目 (CLXY-2021001)

第一作者简介: 郭朝博 (1985—), 男, 河北深泽人, 讲师, 博士, 主要从事材料加工数值模拟研究。

欧姆定律：

$$-\sigma_e \nabla \Phi = \sigma_e E = J \quad (5)$$

泊松方程：

$$\nabla^2 A = -\mu_0 J \quad (6)$$

$$B = \nabla \times A \quad (7)$$

式中： ρ 为密度， v 为速度， J 为电流密度， B 为磁通密度， $J \times B$ 为电磁力， P 为压力， c_p 为定压比热， T 为温度， k 为导热率， σ_e 为电导率， K_B 为波尔兹曼常数， e 为电子电量， S_R 是辐射损失 Φ 为电势， E 为电场强度， A 为磁矢势， μ_0 为真空磁导率。 τ 为粘度应力张量，其表达式为：

$$\tau_{ij} = \mu \left(2 \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \nabla \cdot v \right) \quad i = j \quad (8)$$

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

式中： μ 为动力粘度， v_i 为 x_i 方向上的速度分量。

1.3 边界条件和计算区域

基于电弧特性建立二维轴对称数学模型，如图 1 所示，其中 ABEGF 为钨极区域，BCDIHFGE 为电弧区域，电弧区域半径为 20 mm。该模型所采用的钨极直径为 5 mm，锥角为 45°，且尖端带有平顶。焊接电流为 160 A，保护气为氩气和氦气，气体流量为 15 L/min，电弧弧长为 4 mm。具体边界条件如表 1 所示。

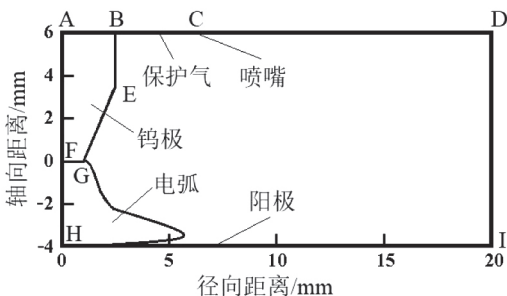


图 1 TIG 焊电弧模型示意图

表 1 边界条件

区域	速度 / v	温度 / T	电势 / Φ	磁矢势 / A
AFH	对称	对称	对称	对称
AB	0	1000K	$ j = \frac{I}{\pi r^2}$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
BEGF	0	耦合	耦合	耦合
BC	15 L/min	1000K	$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
CDI	—	1000K	$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$	0
HI	0	6000K	0	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$

注： I 是电流， r 是钨极半径。

2 模拟结果及分析

针对已建立的数学模型，通过选择合适的边界条

件，对控制方程组进行耦合求解，分别对氩气和氦气保护的 TIG 焊电弧进行数值分析。本模型所采用的氩气和氦气的热物理参数选自文献 [7]。氩弧和氦弧的电弧温度场和流场如图 2 和图 3 所示。

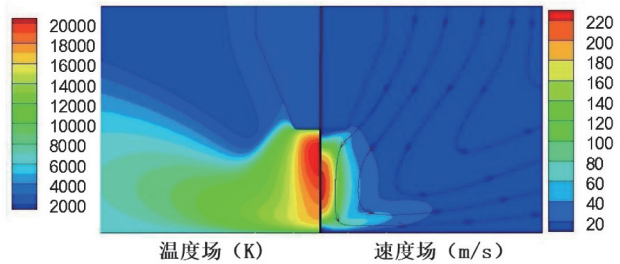


图 2 氩弧焊电弧温度场和速度场云图

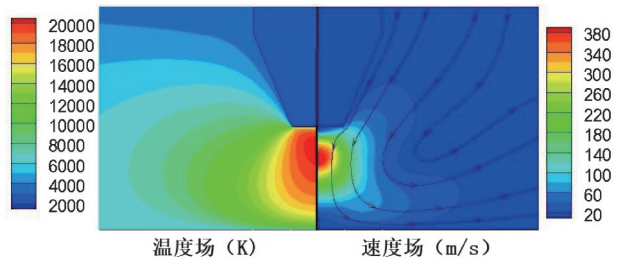


图 3 氦弧焊电弧温度场和速度场云图

2.1 氩弧焊电弧物理场分析

图 2 为氩气保护 TIG 焊电弧的温度场和速度场的分布图。电弧温度在钨极下方约 0.9 mm 处达到最高值，约 21,046 K。随着距电弧中心区域的距离逐渐增大，电弧温度快速下降，其中在阴极区（钨极尖端平台端部）和阳极区均出现较大的温度梯度。由于电弧阴极区的电流密度比阳极区大，在阴极区会产生更多的热量，因此在阴极区的温度梯度比阳极区要大。

为了清晰描述电弧形态，对电弧 10,000 K 时的电弧形态进行提取，如图 4 所示。在阴极区，由于电流密度较高，可见到显著的电磁收缩效应，该区域的电弧半径最小；在弧柱区，随着远离钨极，电离气体逐渐向四周扩散，致使电弧逐渐向外膨胀，电弧半径增大；在接近阳极区处，电弧半径扩展到最大值；在阳极区，电弧发生收缩。电弧整体呈现上窄下宽的形状，呈现出明显的钟罩形。

等离子体在图 2 中呈逆时针流动。等离子体从喷嘴进入电弧后，在电磁力的作用下，加速向电弧中心处流动，且在钨极下方约 2 mm 处达到最大流速（约 227 m/s），随后在阳极的阻拦下向四周流动。

电磁力的分布直接影响等离子体流速的分布。图 5 为电弧电磁力分布图。电弧内部电磁力的方向是向内、向下的，且在钨极附近区域达到最大值（约 3.79×10^6 N），其可使流入电弧的等离子体快速流向钨极下方。在轴向

电磁力的作用下,等离子体加速向下运动。随着远离钨极,电弧在横截面上的电流密度逐渐降低,直接导致电磁力下降,且由于阳极的阻碍在阳极区域出现高压区,使等离子体速度快速下降,并流向电弧四周。

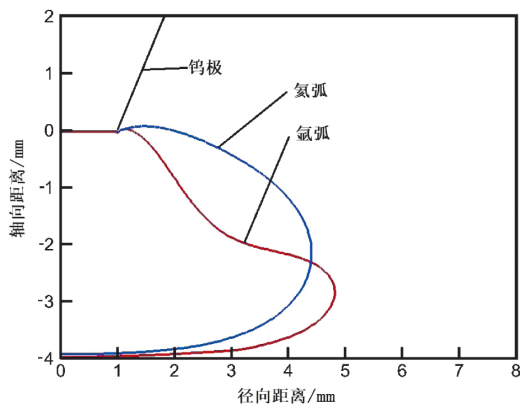


图4 氩弧焊和氦弧焊电弧形态分布图

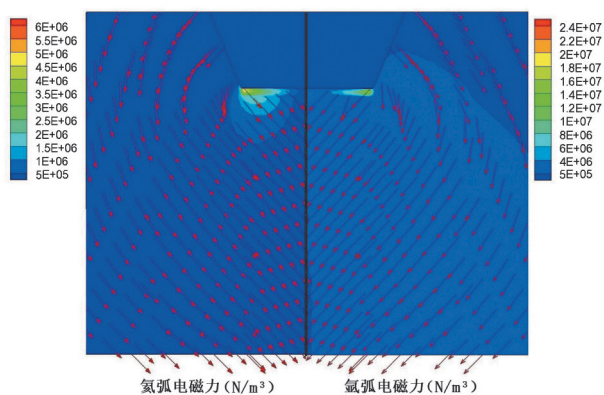


图5 氩弧焊和氦弧焊电弧电磁力分布云图

2.2 氦弧焊电弧物理场分析

图3为氦气保护TIG焊电弧的温度场和速度场的分布图。其温度分布趋势与氩弧焊电弧相似,电弧最高温度出现在钨极下方约0.75 mm处(约为20,598 K),略低于氩弧焊电弧。阴极区和阳极区也出现较大的温度梯度,与氩弧焊电弧相比,阴极区的温度梯度较大,阳极区的温度梯度较小。

图4中指出氦弧焊的电弧形态趋向于圆球形。与氩弧焊相比,氦弧焊电弧在阴极区快速膨胀。随着远离钨极,电弧膨胀的速度下降。在阳极区,电弧快速收缩,且其收缩的速度比氩弧焊电弧快。

在阴极区,由于氦气具有较高的热导率,电弧中心的热量更容易向四周传递,致使电弧形态半径比氩弧焊电弧大。在阳极区,由于氦气具有较高的热导率,电弧与外界的热交换增强,致使电弧半径减小。电弧在阳极区域明显的收缩现象表明在阳极区域会产生更加集中的电流密度,这有利于热量传递到熔池。

氦弧焊电弧等离子体的流动趋势与氩弧焊相似,

如图3所示,其在电磁力的作用下呈逆时针流动,且在钨极下方约1.25 mm处达到最大值(约400 m/s),远大于氩弧焊电弧的速度。氩弧焊和氦弧焊电弧在电弧轴线上的速度分布如图6所示。

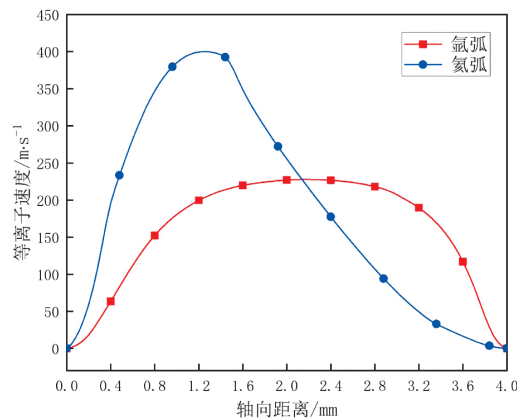


图6 电弧轴线上的等离子速度分布曲线

在TIG焊电弧中,由于电子通过热发射脱离钨极表面,在钨极下方产生高电流密度区域,此区域较大的电场强度导致较大电磁力的产生。如图5所示,氦弧焊电弧产生的最大电磁力约为 1.15×10^7 N,远大于氩弧焊电弧的电磁力,且氦气的密度较小,这些因素直接导致氦弧焊电弧可以产生更大的等离子体速度。因此在钨极下方附近区域,氦弧焊电弧的等离子体速度快速增大。随着远离钨极,等离子体速度快速下降。虽然在该阶段电弧的电磁力比氩弧焊电弧大,但氦气黏度大的特点使等离子体运动的阻力变大,最终导致等离子体速度的下降速率比氩弧焊电弧大。

2.3 电弧压力分析

电弧等离子流作用到阳极表面产生电弧压力,而电弧压力的分布直接影响工件的热量传递及熔池的形状。图7为氩弧焊和氦弧焊在阳极表面的电弧压力分布曲线。电弧压力在电弧中心处最大,随着远离电弧中心,电弧压力快速下降,在距离电弧中心约5 mm处,电弧压力趋于平缓。根据最小电压原理,电弧中心处的电流密度是最高的,随着远离中心,电流密度逐渐降低。氩弧焊和氦弧焊的电弧压力分布规律与文献[8]是一致的。与氩弧焊相比,氦弧焊有较小的电弧压力,最高仅为282 Pa,而氩弧焊为680 Pa,且其作用范围较氩弧焊大。

根据理想气体定律:

$$PV = NK_B T \quad (9)$$

式中: P 为压力, V 为体积, N 为粒子数, T 为温度。

由于氦气的密度较小,且高速的等离子体更容易发生扩散,导致单位体积内碰撞产生的压力较小。氦气具有高的热导率,这直接导致氦弧的热量散失更快,电弧温度相对较低,热膨胀效应减弱,从而直接降低

了电弧区域的压力。

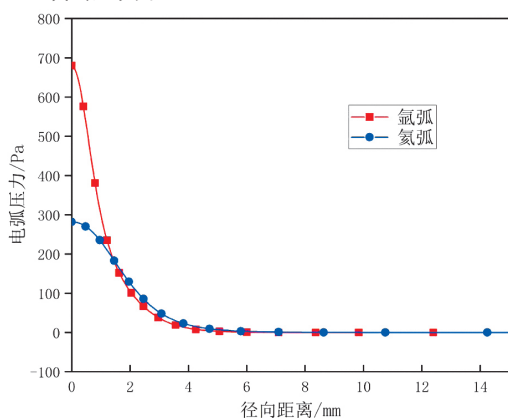


图 7 电弧压力分布图

较高的电弧压力虽然可以增强电弧的稳定性, 提高其抗干扰能力, 但也会造成飞溅过大、热影响区过大等缺陷, 如采用提高焊接速度的方式降低电弧压力的影响, 则会直接降低对工件的热输入, 导致熔池较浅。而氦弧焊可以在保障热输入的情况下只有较小的电弧压力, 这可以减小焊接飞溅, 提高焊缝质量, 使氦弧焊更适合高能量密度的精细加工, 在高导热材料、厚板、精密件焊接等方面具有广阔的应用前景。

3 结语

(1) 针对氩弧焊和氦弧焊电弧建立了二维轴对称电弧模型, 并对其电弧温度、等离子体速度、电弧形态、电磁力、电弧压力等进行了数值分析。

(2) 氩弧焊的电弧形态成钟罩型, 氦弧焊电弧的最高温度略低于氩弧焊, 电弧形态呈圆球形, 且在阳

极区电弧收缩较大。

(3) 与氩弧焊电弧相比, 氦弧焊电弧产生的电磁力较大, 最大等离子体流速较大, 但在阳极区附近的等离子体流速较小。

(4) 与氩弧焊电弧相比, 氦弧焊在保障热输入的情况下产生的电弧压力较小。

参考文献:

- [1] KOJUNDŽIĆ D, KRNIĆ N, KOŽUH Z. Influence of argon and helium purging flow rates on the fusion zone in autogenous stationary TIG arc welding of 316L stainless steel [J]. Transactions of Farneta, 2024, 48: 63–86.
- [2] 肖华, 彭必荣, 欧阳忠华. 不同保护气体对连续激光线焊熔池的影响研究 [J]. 电焊机, 2023, 53(10): 103–108.
- [3] ZHAN J, YE X, LIU Z, et al. Numerical investigation of dynamic arc behavior in K-TIG welding enhanced by an external sinusoidal alternating longitudinal magnetic field [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2025, 212.
- [4] LIU Y, DING H, LUO J, et al. Numerical and experimental study of TIG welding arc in high frequency longitudinal magnetic field [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 5253–5262.
- [5] 王新鑫, 樊丁, 黄健康, 等. 双钨极 TIG 电弧 – 熔池传热与流动数值模拟 [J]. 金属学报, 2015, 51(2): 178–190.
- [6] 申孟伟, 陈毅腾, 梁志敏, 等. 双丝脉冲 MIG 电弧与熔池传热传质数值模拟 [J]. 电焊机, 2024, 54(12): 49–55.
- [7] XIANG J, TANAKA K, CHEN F, et al. Modelling and measurements of gas tungsten arc welding in argon-helium mixtures with metal vapour [J]. Weld World, 2021, 65, 767–783.
- [8] 赵红星, 王国庆, 宋建岭, 等. 氦弧与氩弧电弧特性对比研究 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(8): 137–143.

Numerical Simulation Study on Argon and Helium Shielded TIG Welding Arc

GUO Chaobo^{1,2}, CUI Lulu³, MA Tianfeng^{1,2}, LI Xingxia^{1,2}, LIU Xiangyi¹

(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: A two-dimensional axisymmetric numerical model is developed for TIG welding arcs under argon and helium shielding gases. By solving the governing equations, the temperature fields, plasma flow fields, arc morphology, and arc pressure of argon and helium arcs are simulated. The results showed that The arc shape of argon arc is bell-shaped, and the arc shape of helium arc is spherical. Compared with the argon arc, the helium arc demonstrated slightly lower maximum arc temperature with greater arc constriction in the anode region. The helium arc exhibited larger electromagnetic forces and higher maximum plasma velocity, but lower plasma velocity near the anode region. Due to helium's characteristics of smaller atomic mass, higher thermal conductivity, and higher ionization energy, the helium arc generated lower arc pressure, which is conducive to fine processing of high energy density.

Key words: helium arc; argon arc; arc characteristics; numerical simulation

(责任编辑 吕春红)