

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.03.10

等离子-缆式MIG复合焊电弧特性模拟

司中祺¹, 张晓鸿², 赵娟妮¹

1. 成都航空职业技术学院 汽车工程学院, 四川 成都 610100
2. 四川航天长征装备制造有限公司, 四川 成都 610100

摘要: 基于磁流体动力学理论, 建立了三维等离子(PAW)+缆式MIG复合焊接电弧数学物理模型, 借助Fluent用户自定义函数编程, 耦合求解了复合电弧的热场、流场和压力场, 得到了PAW+缆式MIG复合焊接电弧热场和流场的特性规律。结果表明, PAW电弧和缆式MIG电弧相互倾斜吸引, 耦合效果较好; 复合电弧最高温度18 500 K, 两电弧复合区域间温度保持在10 000 K以上, 电弧高温区分布广, 对工件有效加热半径大, 尤其在中厚板打底层和中间填充层可有效减少焊接过程中因焊道填充热量不足带来的未焊透和咬边等焊接缺陷, 验证了PAW+缆式MIG复合电弧焊接加热范围广, 熔化效率高的优点。同时, 两电弧间形成了电弧压力约80 Pa的复合区域; 且PAW+缆式MIG复合电弧的速度云图出现缆式MIG电弧被PAW电弧“吹偏压缩”的不连贯现象。

关键词: 等离子-缆式MIG; 电弧等离子体; 温度场; 磁流体

中图分类号: TG444 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)03-0077-05

Simulation of Arc Characteristics in Plasma Cable-Wire MIG Composite Welding

SI Zhongqi¹, ZHANG Xiaohong², ZHAO Juanni¹

1. School of Automotive Engineering, Chengdu Aeronautic Polytechnic, Chengdu 610100, China
2. Sichuan Aerospace Changzheng Equipment Manufacturing Co., Ltd., Chengdu 610100, China

Abstract: Based on the theory of magnetohydrodynamics, a mathematical and physical model of the three-dimensional plasma-cable type welding wire MIG hybrid welding arc was established. With the help of Fluent user-defined function programming, the thermal field, flow field, and electromagnetic field of the composite arc were coupled and solved, and the characteristic laws of the thermal field and flow field of the plasma cable MIG composite welding arc were obtained. The results indicate that PAW arc and cable MIG arc are inclined and attracted to each other, and the coupling effect is good. The maximum temperature of the composite arc is 18500K, and the temperature in the two arc composite area is above 10000K. The high temperature zone is more widely distributed, and the effective heating radius of the workpiece is larger. This verifies the advantages of PAW+cable MIG composite arc welding, such as a wide heating range and high melting efficiency. At the same time, a composite area with an arc pressure of about 80Pa was formed between the two arcs; And the velocity cloud map of the PAW+cable MIG composite arc shows a discontinuous phenomenon where the cable MIG arc is blown and compressed by the PAW arc.

Keywords: Pplasma-cable wire MIG hybrid welding; arc plasma; temperature field; magnetic fluid

引用格式: 司中祺, 张晓鸿, 赵娟妮. 等离子-缆式MIG复合焊电弧特性模拟[J]. 电焊机, 2025, 55(3): 77-81.

Citation: SI Zhongqi, ZHANG Xiaohong, ZHAO Juanni. Simulation of Arc Characteristics in Plasma Cable-Wire MIG Composite Welding[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(3): 77-81.

收稿日期: 2024-10-29 修回日期: 2024-12-02

基金项目: 成都航空职业技术学院自然科学基金项目(06211039)

作者简介: 司中祺(1990—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事先进制造技术研究。E-mail: 190742005@qq.com。

0 引言

等离子弧焊(Plasma Arc Welding, PAW)因其能量密度高、电弧穿透性强、焊接速度快等优点,广泛应用于熔点高、热导率大、易氧化的金属材料焊接,且焊件应力和变形较小。缆式焊丝气体保护焊(Cable-Wire Melt Inert-Gas Welding, CMIG)因其多根焊丝耦合电弧的自旋转特性,使其熔池在电弧力的旋转作用下扩张较好,熔池的熔敷和填充效果较好,焊件质量可靠,焊接效率高,广泛应用于结构件气保焊接。PAW+CMIG 是在等离子-普通单丝 MIG 复合焊的基础上发展起来的一种复合焊接方法。该方法复合了等离子弧和缆式 MIG 电弧的多种物理特性,针对中厚板焊接可以做到单面焊双面成型,且焊接过程节能高效,接头优质可靠。但目前国内外对 PAW+MIG 复合焊的研究主要集中在单根焊丝上,对 PAW+CMIG 复合焊的研究尚处于起步阶段,对此新型焊接方法的电弧耦合行为机理仍不明确。

为此,国内外学者开展了相关研究。针对 PAW+MIG 复合焊,Asai^[1]、YANG^[2]等人使用 PAW+MIG 复合焊接方法对铜/钢异种金属开展了焊接试验,研究了其界面属性,表明了 PAW+MIG 复合焊接技术在异种金属焊接领域的优势。孙彦文和郭阳阳^[3-4]针对中厚碳钢板开展焊接试验,揭示了不同焊接参数对 PAW+MIG 复合焊的焊件接头成型组织和力学性能规律,获得了较好的复合焊接工艺参数。孙家帅等^[5]针对 5083 铝合金进行等离子-MIG 复合焊接试验,重点研究了送丝速度对焊缝成形与接头力学性能的影响。

针对 PAW+CMIG 复合焊接,李翠红^[6]对双缆十四丝 MIG 焊接方法建立了三维电弧数值模型,计算研究焊接电流、保护气体流量、双丝间距对电弧热场和流场的影响规律,结果表明,双缆式 MIG 焊接电弧热场和流场分布明显不同于双根单丝电弧,且焊接电流增大,电弧热场和流场分布增大。吴浩^[7]针对 Q235 钢薄板的 PAW+CMIG 焊接,模拟了复合焊接过程中熔池的温度场和流场,结果表明在 PAW+CMIG 复合焊接方法在相同电流下比 PAW+MIG 复合焊热流集中,且熔深更大,更利于减小热

影响区体积,得到焊接变形小的接头。朱蔡琛^[8]使用 E501T-1 的药芯细焊丝绞合而成缆式焊丝,对 Q235 钢厚板进行缆式焊丝 GMAW 电弧数值模拟研究,结果表明,电弧温度、压力等物理量随电流增加而增加,熔滴过渡的尺寸减小,速度加快。

综上,针对 PAW+MIG 复合焊接的研究主要集中在研究 PAW+单焊丝 MIG 复合焊上面,且大部分研究使用实验方法对其熔池和电弧做了定性分析,一定程度上未能充分揭示复合焊接电弧内部物理耦合行为本质规律。且针对 PAW+七丝 CMIG 复合焊接方法的试验和仿真研究较少,耦合电弧的物理规律还不明确。因此,本文在磁流体动力学理论的基础上,使用 Fluent 软件建立了三维 PAW+CMIG 复合焊电弧物理模型,通过数值计算求解,定量分析了 PAW+CMIG 复合焊电弧的耦合热场和流场行为,为 PAW+CMIG 复合焊接参数优化和推广使用提供理论依据。

1 数学模型

1.1 基本假设

本文中缆式焊丝由 7 根单焊丝绞合而成,起弧后由 7 个小弧组成,电弧间电流密度分布较为复杂,为简化计算,作如下假设^[9-11]:

- (1)缆式焊丝气体保护焊电弧模型为三维非轴对称模型。
- (2)7 个阳极构成了缆式焊丝电弧模型端部。
- (3)电弧是局部热力学平衡状态(LTE)。
- (4)电弧计算区域的保护气体为纯 Ar。
- (5)电弧等离子体是不可压缩的稳态层流态。
- (6)忽略熔滴、熔池变形以及弧长对电弧的影响。
- (7)忽略气体粘性效应导致的热损失。

1.2 物理模型

基于上述假设,使用 SCDM 建立了 PAW+CMIG 复合焊电弧三维模型,并使用 Meshing 进行网格离散划分,如图 1 所示。模型的几何参数如下:等离子喷枪半径 4 mm,缩口内径 3 mm,钨极直径 3.2 mm,回缩 2.8 mm;由 7 根焊丝绞合而成的缆式 MIG 焊丝直径 1.8 mm,焊丝倾角 30°,弧长 5 mm。PAW 喷枪

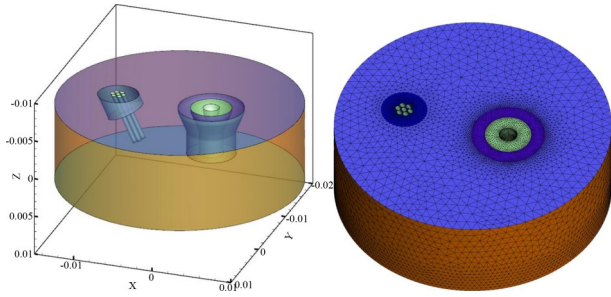


图1 几何模型和网格划分

Fig. 1 Geometric model and mesh generation.

距离缆丝 MIG 焊丝水平距离 8.5 mm。

1.3 控制方程

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

(2) 能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \nabla \cdot (\rho c_p \mathbf{v} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (3)$$

$$S = \frac{j^2}{\sigma} + \frac{5}{2} \frac{k_B}{e} \mathbf{j} \cdot \nabla T - S_R \quad (4)$$

式中 σ 为电导率; k_B 为玻尔兹曼常数; e 为电子电量; S_R 为辐射损失。

(3) 电流连续性方程

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla \Phi) = 0 \quad (5)$$

式中 Φ 为电势。

(4) 欧姆定律

$$-\sigma \nabla \Phi = \sigma \mathbf{E} = \mathbf{j} \quad (6)$$

式中 $\mathbf{E}$ 为电场强度。

(5) 磁失势泊松方程

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{j} \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (8)$$

式中 $\mathbf{A}$ 为磁失势; μ_0 为真空磁导率。

1.4 边界条件

结合前文假设和实际情况,在 PAW+缆式 MIG 复合焊电弧计算过程中设定了以下边界条件:壁面均设置为无滑移壁面边界,即在壁面上没有能量和物质的损失;电弧计算域的侧壁与大气相接,设置为压力出口;等离子体喷枪和缆式 MIG 焊枪喷嘴设置为速度入口,速度为保护气流量与喷嘴截面积的比值;PAW 焊接电流 100 A,氩气流量 12 L/min;缆

式 MIG 焊接电流 150 A,氩气流量 15 L/min。为保证稳定起弧,边界条件中工件表面温度设为 3 000 K,电极、保护气体速度入口、压力出口以及焊丝壁面等均设置为 1 000 K。

2 模拟结果与分析

采用用户自定义标量 UDS 将欧姆定律和磁失势泊松方程进行表达,分别计算 x 、 y 、 z 三个方向上的电势和磁失势,然后通过 UDF 耦合嵌套到 FLUENT 本体的质量方程、动量方程、能量方程中,最终迭代求解得到 PAW+CMIG 复合焊接电弧各物理场数据。计算过程中选择 Pressure-Based 求解器,采用 SIMPLE 算法,压力、能量、动量和电势均采用二阶迎风离散格式进行复合电弧求解。

2.1 复合电弧温度

图 2 为数值模拟得到的 PAW+CMIG 复合焊接电弧温度场。由图可知,PAW 电弧和 CMIG 电弧复合后耦合效果较好,两电弧在电磁力的吸引下相互倾斜靠近,复合区域温度超过 10 000 K,复合电弧高温区分布更广,对工件有效加热半径更大,故 PAW+CMIG 复合电弧焊接加热范围广、熔化效率高,在打底层和中间填充层可有效减少焊接过程中因焊道填丝热量不足带来的未焊透和咬边等焊接缺陷。

PAW+CMIG 复合电弧温度场最高温度为 18 500 K,出现在等离子焊枪钨极正下方约 0.5 mm 位置,且高温区分布细而长;而缆式 MIG 电弧的最高温度较 PAW 低约 2 000 K,高温区域出现在缆式焊丝端部约 1 mm 位置,且电弧高温区分布范围较大。这是因为 PAW 电弧在喷嘴处电离形成等离子体后,受到强烈的阴极壁压缩作用,使得等离子体从喷嘴中高速喷射而出,形成了细长的 PAW 电弧温度分布模式,表现为 PAW 电弧刚直性更好。

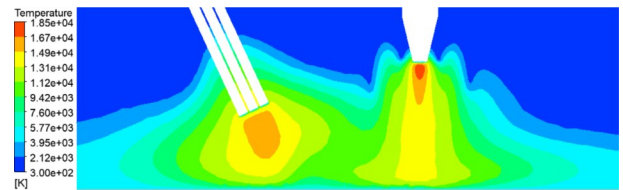


图2 复合电弧温度场云图

Fig. 2 Cloud diagram of composite arc temperature field.

2.2 复合电弧压力

图3为数值模拟得到的PAW+CMIG复合电弧压力云图。由图3可知,PAW电弧和缆式MIG电弧复合之后,PAW电弧因为喷嘴的机械压缩作用,对缆式MIG电弧产生了冲击和压缩作用;加之PAW电弧的热收缩和磁收缩效应,使得CMIG电弧被吸引,在PAW电弧和CMIG电弧间形成了电弧压力复合区域,复合区域压力约为80 Pa。PAW+CMIG复合电弧的最高电弧压力为200 Pa,出现在PAW电弧与工件接触的位置。这是因为PAW电弧通过喷嘴的物理约束,对缆式MIG电弧产生机械压缩,这种压缩效应使得电弧等离子体在横截面积上流速增大,等离子体轰击工件表面动能更大,表现为电弧压力较大。

其次,PAW焊炬位置的压力较高,主要原因是焊炬通过喷嘴的物理约束,保护气和等离子气在电离后流经喷嘴时候被压缩,出现了高速高压的流动区域;但这种高压区域并不能直接作用于工件表面。缆式MIG电弧最高电弧压力约为100 Pa,出现在焊丝端部,仅为PAW电弧最高压力的50%左右。

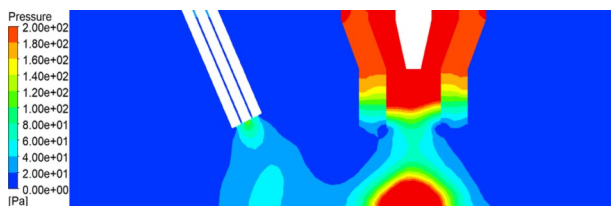


图3 复合电弧压力云图

Fig. 3 Cloud diagram of composite arc pressure.

2.3 复合电弧速度

图4为数值模拟得到的PAW+CMIG复合电弧的速度云图。由图4可知,复合电弧等离子体的最大运动速度约200 m/s,出现在PAW电极正下方,而缆式MIG电弧等离子体的最大运动速度为60 m/s。复合电弧的等离子体速度云图显示出不连贯,缆式MIG电弧被PAW电弧“吹偏压缩”的现象。这是因为PAW电弧的强烈压缩(机械压缩、热收缩、磁收缩),使其等离子体运动速度较快,产生较大等离子体流^[12]。且等离子体的高速运动区间较宽,在接近工件表面时对缆式MIG电弧产生冲击和扰动,缆式MIG电弧等离子体流动速度较小,在工件表面被冲击压缩,表现为速度云图中缆式MIG电弧被PAW

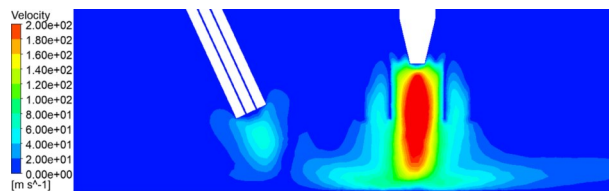


图4 复合电弧速度云图

Fig. 4 Cloud diagram of composite arc velocity

电弧“吹偏压缩”。

2.4 计算电弧形貌与试验结果对比

图5为计算的PAW+CMIG复合电弧形貌与试验对比。对比高速摄像机拍摄得到的复合电弧形貌可以看出,PAW电弧的温度较缆式MIG电弧更高,电弧刚直性更好。且二者的有效高温加热区耦合较好,可以观察到两电弧之间相互倾斜吸引的现象,模拟得到的复合电弧形貌与试验相吻合。其次,本研究仿真得到PAW+CMIG复合电弧最高温度为18 500 K,相同参数条件下焊接试验过程测得最高温度约为19 000 K,偏差500 K,在误差范围内也一定程度上验证了PAW+CMIG复合电弧数值模拟的准确性。

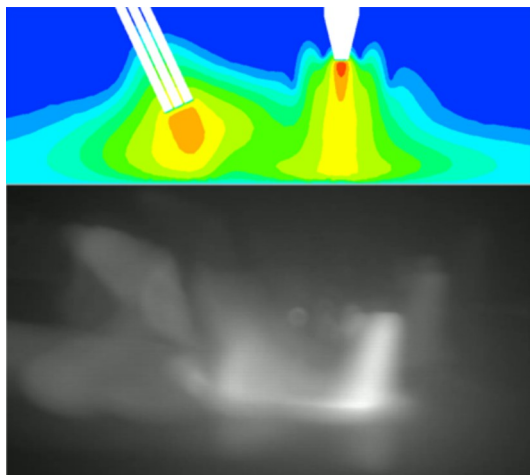


图5 计算复合电弧形貌与试验对比

Fig. 5 Calculation of composite arc morphology and experimental comparison

3 结论

本研究在磁流体动力学方程的基础上,针对PAW+CMIG复合焊接电弧建立了三维数学物理模型,数值模拟得到复合电弧的物理特性,直观揭示了等离子弧和缆式MIG电弧的复合过程及其相互

作用,使得PAW+CMIG焊接过程更容易理解。后续针对复合电弧的各焊接参数展开定量研究,分析其背后的物理规律,从而找到最佳的焊接工艺和最优化的焊接参数。结论如下:

(1)PAW+CMIG电弧复合后耦合效果较好,PAW电弧和CMIG电弧相互倾斜吸引,两电弧复合区域温度在10 000 K以上,高温区分布更广,对工件有效加热半径更大,验证了PAW+CMIG复合电弧焊接加热范围广,熔化效率高的优点。

(2)PAW+CMIG复合电弧的最高电弧压力约200 Pa,出现在PAW电弧与工件接触的位置;且在两电弧间形成了电弧压力约80 Pa的复合区域。

(3)PAW+CMIG复合电弧等离子体最大运动速度约为200 m/s,出现在PAW电极正下方;且复合电弧的等离子体速度云图出现CMIG电弧被PAW电弧“吹偏压缩”的不连贯现象。

参考文献:

- [1] Asai M S, Ogawa M T, Ishizaki M Y, et al. Application of Plasma MIG Hybrid Welding to Dissimilar Joints Between Copper and Steel[J]. *Welding in the World, Le Soudage Dans Le Monde*, 2013, 56(1-2): 37-42.
- [2] Yang T, Gao H, Zhang S, et al. Interface behavior of copper and steel by plasma-MIG hybrid arc welding[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2013, 26: 328-332.
- [3] 孙彦文. Q345B钢等离子-MAG复合焊工艺研究[D]. 四川:西南交通大学, 2015.
SUN Y W. Research on hybrid plasma-mag welding progress of Q345B steel[D]. Sichuan: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [4] 郭阳阳, 孙彦文, 霍海龙, 等. Q345B钢等离子-MAG复合焊接头组织与力学性能[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(11): 215-217.
GUO Y Y, SUN Y W, HUO H L, et al. Microstructure and mechanical properties of plasma-mag hybrid welded joints for Q345B steel[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(11): 215-217.
- [5] 孙家帅, 张焱, 零的应, 等. 送丝速度对5083铝合金等离子-MIG复合焊接头性能的影响[J]. *电焊机*, 2021, 51(10): 143-147.
- [6] 李翠红. 双缆式十四丝GMAW焊接电弧的数值模拟研究[D]. 江苏:江苏科技大学, 2017.
LI C H. The study of arc simulation on twin-cable 14-wire GMAW[D]. Jiangsu: Jiangsu University of Science and Technology, 2017.
- [7] 吴浩. 等离子-缆式七丝MIG复合焊接熔池流体行为研究[D]. 江苏:江苏科技大学, 2019.
WU H. The study of molten pool fluid behavior on PAW-cable seven wire MIG composite welding[D]. Jiangsu: Jiangsu University of Science and Technology, 2019.
- [8] 朱蔡琛. 缆式焊丝气保焊电弧行为及熔滴过渡机理研究[D]. 江苏:江苏科技大学, 2017.
ZHU C Ch. Study on arc behavior and droplet transfer mechanism of cable-type welding wire gas shielded welding[D]. Jiangsu: Jiangsu University of Science and Technology, 2017.
- [9] Janez Tušek. Mathematical modeling of melting rate in twin-wire welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 100(1-3): 250-256.
- [10] Kiran D V, Cheon J, Arif N, et al. Three-dimensional finite element modeling of pulsed AC gas metal arc welding process[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(5-8): 1-22.
- [11] Schnick M, Wilhelm G, Lohse M, et al. Three dimensional modelling of arc behaviour and gas shield quality in tandem gas-metal arc welding using anti-phase pulse synchronization[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2011, 44(18): 185205-185215.
- [12] 杨涛. Plasma-MIG电弧耦合机制及2219铝合金焊接工艺研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学, 2013.
YANG T. Research on arc coupling mechanism and welding technology of plasma-mig hybrid arc welding process for 2219 aluminum alloy[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2013.