

氦-氩混合保护气体角接头旋转激光+电弧复合焊 电弧特性数值分析

苏霄阳¹, 刘文¹, 胥国祥¹, 孙亚杰², 朱杰¹, 胡庆贤¹
(1.江苏科技大学 江苏省先进焊接技术重点实验室, 江苏 镇江 212100;
2.二重(镇江)重型装备有限公司, 江苏 镇江 212114)

摘要: 目的 研究激光+电弧复合焊中氦-氩混合保护气体成分对电弧等离子体物理特性的影响, 从而改善焊接性能。方法 综合考虑角接头几何特性和氦-氩混合保护气体的物理特性, 建立氦-氩混合保护气体角接头旋转激光+电弧复合焊电弧行为的数值分析模型。使用 FLUENT 软件对不同体积比氦-氩保护气体下电弧等离子体的温度场、流场、压力场和电势场进行模拟计算, 对比分析保护气体成分改变对电弧等离子体的影响规律, 考虑其对焊接性能的影响, 并将计算结果与高速摄影试验进行对比, 验证数值分析模型的准确性与合理性。结果 保护气体分别为纯 Ar、95%Ar+5%He、90%Ar+10%He 时, 电弧向激光侧偏移收缩, 电弧整体形貌被压缩, 位置 A 纵截面处电弧等离子体的峰值温度分别为 25 603、25 080、23 904 K, 最大流速分别为 336.34、334.34、317.58 m/s, 压力最大值分别为 899.08、943.40、957.67 Pa, 电势梯度分别为 11.56、12.17、13.18 V。结论 在氦-氩混合保护气体激光+电弧复合焊中, 当保护气体中氦气体积分数增加到 5%和 10%时, 随着氦气所占比例的增大, 电弧处于动态变化过程, 电弧被压缩, 等离子体的峰值温度逐渐降低, 最大流速下降, 电弧压力和电势梯度增大, 有利于焊缝熔深的增大。

关键词: 旋转激光; 保护气体成分; 激光+电弧复合焊; 电弧动态行为; 数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.04.018

中图分类号: TG403 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2023)04-0164-12

Numerical Analysis of the Arc Characteristics of Rotating Laser + Arc Hybrid Welding with Helium-argon Mixed Shielding Gas for Fillet Joint

SU Xiao-yang¹, LIU Wen¹, XU Guo-xiang¹, SUN Ya-jie², ZHU Jie¹, HU Qing-xian¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Jiangsu Zhenjiang 212100, China; 2. Erzhong (Zhenjiang) Heavy Equipment Co., Ltd., Jiangsu Zhenjiang 212114, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of helium-argon mixed shielding gas composition on the physical characteris-

收稿日期: 2023-02-27

Received: 2023-02-27

基金项目: 国家自然科学基金 (51975263, 51905232)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51975263, 51905232)

作者简介: 苏霄阳 (1998—), 男, 主要研究方向为激光+电弧复合焊数值分析。

Biography: SU Xiao-yang (1998-), Male, Research focus: numerical analysis of laser+arc hybrid welding.

通讯作者: 刘文 (1982—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向材料加工。

Corresponding author: LIU Wen (1982-), Female, Doctor, Lecturer, Research focus: material processing.

引文格式: 苏霄阳, 刘文, 胥国祥, 等. 氦-氩混合保护气体角接头旋转激光+电弧复合焊电弧特性数值分析[J]. 精密成形工程, 2023, 15(4): 164-175.

SU Xiao-yang, LIU Wen, XU Guo-xiang, et al. Numerical Analysis of the Arc Characteristics of Rotating Laser + Arc Hybrid Welding with Helium-argon Mixed Shielding Gas for Fillet Joint[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(4): 164-175.

tics of arc plasma in laser + arc hybrid welding to improve the welding performance. In overall consideration of the geometric characteristics of the fillet joint and the physical characteristics of the helium-argon mixed shielding gas, the numerical analysis model of the arc behavior of the helium-argon mixed shielding gas rotating laser + arc hybrid welding of the fillet joint was established. The temperature, flow, pressure and electric potential field of the arc plasma under different proportion of helium-argon shielding gas were simulated and calculated with FLUENT software. The effect of the change of shielding gas composition on the arc plasma was compared and analyzed, and its effect on the welding performance was considered. The calculation results were compared with the high-speed photography experiment, which verified the accuracy and rationality of the numerical analysis model. When the shielding gas was pure Ar, 95%Ar+5%He and 90%Ar+10%He respectively, the arc shifted and contracted toward the laser side, the overall shape of the arc was compressed, the peak temperature of the arc plasma at the longitudinal section of position *A* was 25 603, 25 080 and 23 904 K, the maximum flow velocity was 336.34, 334.34 and 317.58 m/s, the maximum pressure was 899.08, 943.40 and 957.67 Pa, and the potential gradient was 11.56, 12.17 and 13.18 V. In the helium-argon mixed shielding gas laser + arc hybrid welding, when the helium in the shielding gas increases to 5% and 10%, the arc is in a dynamic change process with the increase of the helium ratio, the arc is compressed, the peak temperature of the plasma gradually decreases, the maximum flow rate decreases, and the arc pressure and potential gradient increase, which is conducive to the increase of the weld penetration.

KEY WORDS: rotating laser; composition of shielding gas; laser + arc hybrid welding; arc dynamic behavior; numerical simulation

铝合金因其密度较低、抗拉强度高、耐蚀性能优异、便于二次加工及废弃处理时易于再生等多方面的优点被越来越多地应用于造船、航空航天、管道及零部件制造等场景^[1]。段晨风^[2]对 6061 铝合金在激光复合焊中的接头性能进行了研究,发现其具有良好的塑性,但随着应力的增大会出现裂纹,影响接头疲劳寿命。刘晓红等^[3]研究发现,6061 铝合金在激光电弧复合焊过程中可通过采用功率较低的脉冲复合热源得到成形较好的焊接接头。激光+GMAW(Gas Metal Arc Welding, 熔化极气体保护电弧焊)复合热源焊结合了激光焊和 GMAW 的优点,具有焊接速度快、熔深大、成形好、变形小、搭桥能力强等优点^[4-7],但复合焊对工艺参数的匹配要求较高,参数搭配不合理时仍会出现焊接缺陷;而旋转激光+电弧复合焊可进一步改善熔池流动模式及热流作用特征,抑制了咬边、气孔、裂纹等焊接缺陷,提高了焊接质量的稳定性^[8-10],但激光的摆动会使复合焊熔深减小,同时,光致等离子体在能量传输过程中对激光的屏蔽作用会影响焊缝成形,减小尺寸。保护气体成分对电弧物理特性具有重要影响,焊接过程中母材汽化、蒸发过程中产生的光致金属蒸气与保护气体混合也会对热物理性能产生重要影响。相较于纯氩气保护,氦气保护条件下电弧分布与热流密度相对集中,熔深较大;且对于激光焊有利于抑制光致羽辉的影响,减少小孔等焊接缺陷,同时增大熔深,但氦气电弧稳定性较差,成本较高。故氦-氩混合保护气体可综合两者优点,既能提高复合焊熔深,减少焊接缺陷,又保证了电弧稳定性^[11],且成本相对较低。激光的旋转、接头几何特征及氦-氩混合气体保护使复合焊电弧形态及物理特性发生变化,导致电弧与光致羽辉之间的相互作用

也更为复杂。因此,深入理解混合气体条件下角接头旋转激光+电弧复合热源焊电弧的物理特性对于优化复杂接头复合焊工艺参数、提升其质量稳定性和可靠性具有重要意义。

目前,研究者大多侧重于研究保护气体对复合焊接工艺性的影响,缺乏对物理现象及动态行为的研究。Kuk 等^[12]对不同混合气体保护下 5083 铝合金焊后接头的疲劳寿命进行了研究,结果表明,混合气体能够有效提高铝合金焊接接头的疲劳强度,而单组元气体保护下接头的疲劳强度不高。Ismail 等^[13]研究了混合保护气体对奥氏体不锈钢接头力学性能的影响,发现在 Ar 中加入 H₂ 会使抗拉强度下降。Zhang 等^[14]研究发现, MIG 焊(Metal-Inert Gas Welding, 惰性气体保护焊)中加入氮气可以提高接头耐蚀性。Wang 等^[15]通过对铝合金激光焊的研究发现,随着保护气体流量的增大,孔隙比先减小后增大。Li 等^[16]研究发现,在激光过程中,向氩气保护气体中添加氧气会对铝合金的金相组织比例产生重要影响。

雷正龙等^[17]对不同保护气体下铝合金激光焊的研究表明,与氩气相比,氦气的加入可以更好地减少焊接气孔缺陷,由于等离子体数量减少,小孔稳定性提高,焊缝稳定性增强,气孔率也减小至 1% 以内。Dipali 等^[18]在 TIG 焊保护气体中加入了氦气,提高了焊缝深宽比并减小了角畸变。Chae 等^[19]采用高功率 CO₂ 激光-GMAW 复合形式焊接了船用钢板,研究了不同比例的氦-氩混合保护气体对等离子体和焊缝形状的影响,试验证明,氦气对 CO₂ 激光等离子体具有较好的抑制作用。Zhu 等^[20]研究了激光电弧复合焊中不同比例的氦-氩混合保护气体对焊缝成形的影响,结果表明,随着 He 比例的增大,焊接熔深增大,焊

缝成形先变好后变差。Cai等^[21]通过高速摄像等分析手段研究了不同体积比的氦-氩混合保护气对铝合金激光+MIG焊接质量的影响,证明了氦气的加入具有增大熔深、抑制气孔缺陷等效果。Leandro等^[22]研究了氩基气体中氧气含量对电弧的影响,发现在高氧环境下电弧收缩更大,同时压力增大。

Yang等^[23]利用数值分析模型与高速摄像试验研究了保护气体对MIG焊的影响,发现高保护气体流量可以增强熔滴过渡的稳定性,抑制焊缝氧化。Rao等^[24]通过建立数值分析模型,分析了氦-氩气体成分对电弧物理特性的影响,但相关模型和研究仅限于电弧焊。

文中综合考虑接头几何特征及混合气体物理特性,建立氦-氩混合保护气体角接头旋转激光+电弧复合焊电弧数值分析模型,对不同氦气-氩气比例下复合焊电弧形态进行模拟计算,分析电弧物理特性及动态特征,探讨不同组分比例对其的影响,对优化焊接工艺参数和提高焊接过程稳定性具有重要意义。

1 试验

图1为T形接头焊接示意图。母材为6061铝合金,搭建激光+电弧复合焊接试验系统,系统包括IPG YLS-6000型光纤激光器、ABB机器人、Fronius TPS4000自动化焊机、水冷机、空压机、控制系统、机器人控制器和焊接行走小车等。焊接过程中激光与焊丝的角度设为 30° ,光丝间距为2 mm,电弧初始高度为5 mm,焊丝伸出长度设为15 mm。焊接电流为150 A,电压为20 V,焊接速度为0.6 m/min。为对比研究各比例混合保护气体下的电弧行为,保护气体分别为纯Ar、95%Ar+5%He、90%Ar+10%He。

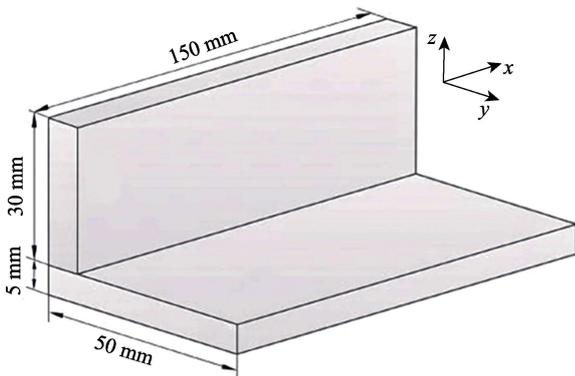


图1 T形接头示意图

Fig.1 Schematic diagram of T-joint

2 数值分析模型

2.1 控制方程

焊接过程中,电弧涉及热、力、电、磁等多物理

现象耦合,过程极其复杂;且光致羽辉(光致等离子体及金属蒸气)具有复杂的物理行为。为简化计算过程,突出研究重点,需对数值分析模型进行一定的简化处理,为此,在建立数值分析模型前作如下基本假设^[25-26]:电弧为层流且不可压缩的理想牛顿流体;电弧处于局部热力学平衡状态(LTE);忽略熔池中产生的金属蒸气、熔池表面变形及熔滴的形成与脱落;电弧满足光学薄性质,忽略重力及黏性耗散;将光致羽辉简化为由小孔口高速喷出的金属蒸气,忽略光致等离子体及其产生过程。等离子体数值分析中所包含的控制方程见式(1)~(4)。

质量连续方程:

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

式中: ∇ 为哈密顿算子; ρ 为密度; \mathbf{v} 为速度矢量; t 为时间。

动量守恒方程:

x 轴方向动量方程:

$$\frac{\partial \rho v_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v v_x) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(2\mu \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \right] + j_y B_z - j_z B_y \quad (2)$$

y 轴方向动量方程:

$$\frac{\partial \rho v_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v v_y) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(2\mu \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \right] + j_z B_x - j_x B_z \quad (3)$$

z 轴方向动量方程:

$$\frac{\partial \rho v_z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v v_z) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \right] + j_x B_y - j_y B_x \quad (4)$$

式中: v_x 、 v_y 和 v_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的速度矢量; P 为压强; μ 为黏度系数; j_x 、 j_y 、 j_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的电流密度分量; B_x 、 B_y 、 B_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的感应磁场强度分量。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho h_e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v h_e) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{c_p} h_e \right) + \frac{j_x^2 + j_y^2 + j_z^2}{\sigma_e} - 4\pi \zeta + \frac{5k_B}{2e} j \cdot \nabla T + Q_{\text{laser}} \quad (5)$$

式中: c_p 为比热容; σ_e 为电导率; k_B 为玻尔兹曼常数; ζ 为净辐射系数; e 为电荷。方程右侧第2项

为焦耳热;第 3 项为向外界辐射损失的热量,即辐射热损失;第 4 项为电子迁移热; Q_{laser} 为激光被电弧吸收的能量。

电磁场方程

电流连续方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\sigma_e \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\sigma_e \frac{\partial \phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma_e \frac{\partial \phi}{\partial z}\right) = 0 \quad (6)$$

电流密度分量:

$$j_x = -\sigma_e \frac{\partial \phi}{\partial x}, j_y = -\sigma_e \frac{\partial \phi}{\partial y}, j_z = -\sigma_e \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (7)$$

式中: ϕ 为电势。

磁场分量:

$$\frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} = -\mu_0 j_x \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 A_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial z^2} = -\mu_0 j_y \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} = -\mu_0 j_z \quad (10)$$

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z}, B_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x}, B_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \quad (11)$$

式中: A_x 、 A_y 、 A_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的磁分量; μ_0 为真空磁导率。

组分输运方程:

激光束作用到工件上,使得工件加热融化、升华,产生金属蒸气。在计算中,采用 FLUENT 软件自有的组分输运方程描述金属蒸气的产生,组分输运方程的表达式如式(12)所示。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho f_v) + \nabla \cdot (\rho v f_v) = \nabla \cdot (\rho D \nabla f_v) \quad (12)$$

式中: f_v 为金属蒸气的质量分数; D 为扩散系数,其值由黏度近似方程决定,见式(13)。

$$D = \frac{2\sqrt{2}\left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}\right)^{0.5}}{\left\{\left(\frac{\rho_1^2}{\beta_1^2 \eta_1^2 m_1}\right)^{0.25} + \left(\frac{\rho_2^2}{\beta_2^2 \eta_2^2 m_2}\right)^{0.25}\right\}^2} \quad (13)$$

式中: m_1 、 m_2 分别为铝和混合保护气体的摩尔质量; ρ_1 、 ρ_2 、 η_1 、 η_2 分别为铝金属蒸气和保护气体的密度和黏度; β_1 和 β_2 为无量纲常数。

2.2 旋转路径

本文在激光+电弧复合热源焊接过程中考虑激光移动路径,即激光旋转。在实际焊接过程中,激光的旋转会影响电弧温度的大小、质量和能量的传递,为使计算合理,需对激光旋转路径做出合理而准确的描述,路径公式如式(14)所示。

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + a \cos(2\pi ft) \\ y(t) = a + \sin(\pi ft) \end{cases} \quad (14)$$

式中: a 为激光旋转的半径; f 为频率; x_0 为激光旋转中心在 x 轴的位置。

2.3 激光致金属蒸气模型

为了得到等离子体小孔孔径、金属蒸气的喷发速度及温度,采用高速摄像的方法测得小孔直径,如图 2 所示。

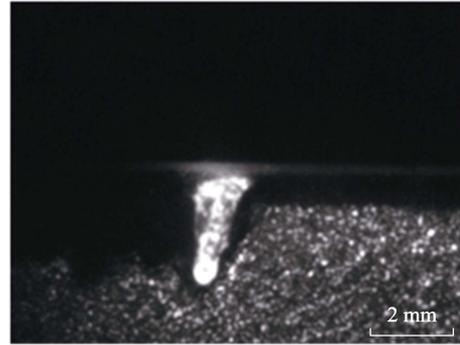


图 2 激光功率 3 kW 时小孔形貌

Fig.2 Keyhole morphology at laser power of 3 kW

Dilthey 等^[27]建立的小孔内激光致等离子体模型描述了小孔半径和等离子体温度、激光能量密度的关系,可以根据该模型计算出小孔处的等离子体温度。将激光致等离子体温度和激光能量密度的关系进行拟合,其拟合关系式如式(15)所示。

$$\begin{cases} T = 0.00425I + 3240.38462, 0.20 \text{ mm} < R \leq 0.30 \text{ mm} \\ T = 0.00431I + 3252.13675, 0.30 \text{ mm} < R \leq 0.40 \text{ mm} \\ T = 0.00438I + 3263.88889, 0.40 \text{ mm} < R \leq 0.50 \text{ mm} \end{cases} \quad (15)$$

式中: T 为等离子体温度, K; I 为激光能量密度, W/cm^2 ; R 为小孔半径, mm。

根据 Amara 等^[28]建立的激光小孔表面金属蒸气流动模型可以算出小孔处的金属蒸气速度,如式(16)所示。

$$V_g = \sqrt{\kappa \frac{L T_k}{m_a}} \quad (16)$$

式中: V_g 小孔处的金属蒸气速度; κ 为比热率; L 为理想气体常数; T_k 为近工件表面处小孔的温度; m_a 为原子质量。

2.4 网格划分及边界条件

图 3 为计算区域示意图,为了简化模型,电极端部电流密度采用平均分布模型,如式(17)所示。

$$J_z = \frac{I^2}{\pi r_w} \quad (17)$$

式中: I 为焊接电流; r_w 为电极半径,具体边界条件见表 1。

表 1 T形接头旋转激光+电弧复合焊电弧计算模型边界条件
Tab.1 Boundary conditions of arc calculation model for rotating laser + arc hybrid welding of T-joint

Boundary	F	$V/(m \cdot s^{-1})$	T/K	φ/V	$A/(Wb \cdot m^{-1})$
Inlet	0	V_a	1 000	$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
Outlet	0	$\frac{\partial V}{\partial n} = 0$	1 000	$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$	0
Electrode tip	0	0	3 000	J_z	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
Electrode	0	0	1 000	$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
Workpiece	$1, r \leq R$ $0, r > R$	$V_g, r \leq R$ $0, r > R$	$T_g, r \leq R$ $1\ 000, r > R$	0	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$

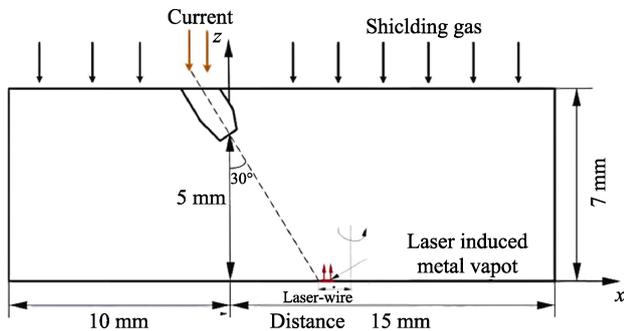


图 3 T形接头旋转激光+电弧复合焊电弧模型计算区域示意图

Fig.3 Schematic diagram of arc model calculation area for rotating laser + arc hybrid welding of T-joint

计算过程中,为了简化过程以提高效率,对T形接头旋转激光+电弧复合焊模型进行非均匀网格划分,如图4—5所示。最小网格尺寸为0.1 mm,计算时采用非均匀时间步长,最小时间步长为 10^{-6} s。

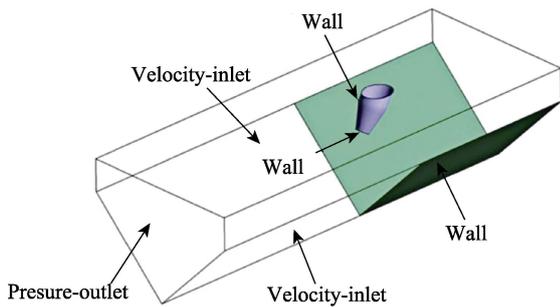


图 4 T形接头旋转激光+电弧复合焊电弧模型边界条件示意图

Fig.4 Schematic diagram of boundary conditions of arc model for rotating laser + arc hybrid welding of T-joint

3 结果与分析

为了对T形接头不同截面上的电弧温度、速度等分布结果进行对比分析,需在模型上选取对应截面,其中纵截面分为 S_1 、 S_2 和 S_3 , S_1 为电弧中心处纵截面,

S_2 和 S_3 为激光旋转至立板和底板时所对应的纵截面; S_4 为激光所在位置对应横截面,具体截取方式如图6所示。

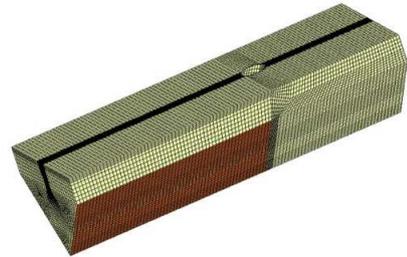


图 5 T形接头旋转激光+电弧复合焊电弧模型网格划分示意图

Fig.5 Schematic diagram of grid division of arc model for rotating laser + arc hybrid welding of T-joint

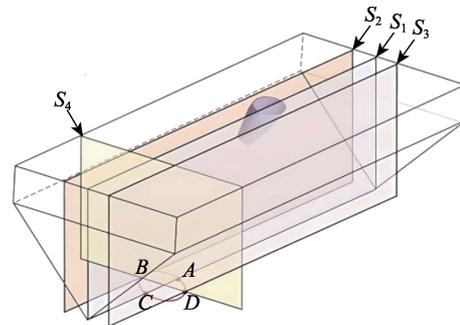


图 6 截面截取示意图

Fig.6 Schematic diagram of cross-section interception

图 7 为不同保护气体组分条件下激光旋转至位置A、B时复合焊电弧纵截面温度场分布云图。可以看出,由于激光的旋转,受光致羽辉影响,复合焊电弧形态呈非对称分布,且处于周期性动态变化过程。激光作用区域中,光致羽辉由小孔口高速喷出,导致电弧温度分布出现波动,且小孔口对电极轴线前部电弧具有压缩弧根的作用,表明了模型的合理性;由于光致金属蒸气热导率较大,其分布区域温度有所降低。相较于A点位置,电弧中心位置处纵截面光致金属蒸气对电弧温度场影响更大。同时,由图7可知,

随着保护气体中氦气比例的增大, 电弧整体逐渐收缩, 向激光侧偏移, 电弧后侧向电弧中心收缩, 且电弧等离子体峰值温度有所下降, 与 Zhu 等^[20]试验检测结果一致, 表明了模型的合理性。保护气体为纯 Ar、95%Ar+5%He、90%Ar+10%He 时, 位置 A 电弧峰值温度分别为 25 603、25 080、23 904 K, 位置 B 则分别为 25 605、25 081、23 910 K。可见, 当氦气所占比例达到 10%时, 电弧峰值温度明显降低。上述现象与氦气、氩气的电离能有关, 因为氦气的一次电离能远高于氩气, 大大增加了电弧引燃的难度; 同时, 与氩气相比, 氦气作为保护气体时分子质量较小, 热导率高, 使等离子体与周围空气间的

热流速率快, 等离子体冷却速度快, 易通过热传导、辐射、对流等方式与环境进行换热, 对电弧产生冷却作用, 通过收缩电弧的形式来减少损失、维持能量平衡。

图 8 为不同保护气体组分条件下激光处于位置 A、B 时电弧横截面温度场分布云图。可以看出, 激光致金属蒸气对电弧具有冷却作用, 激光束在不同位置时电弧冷却的区域和效果存在差异。相较于位置 B, 位置 A 离电弧中心更近, 激光致金属蒸气电弧冷却的影响更大。同时, 图 8 表明, 当激光旋转至不同位置时, 激光致金属蒸气对位置 B 处的电弧冷却效果更好。

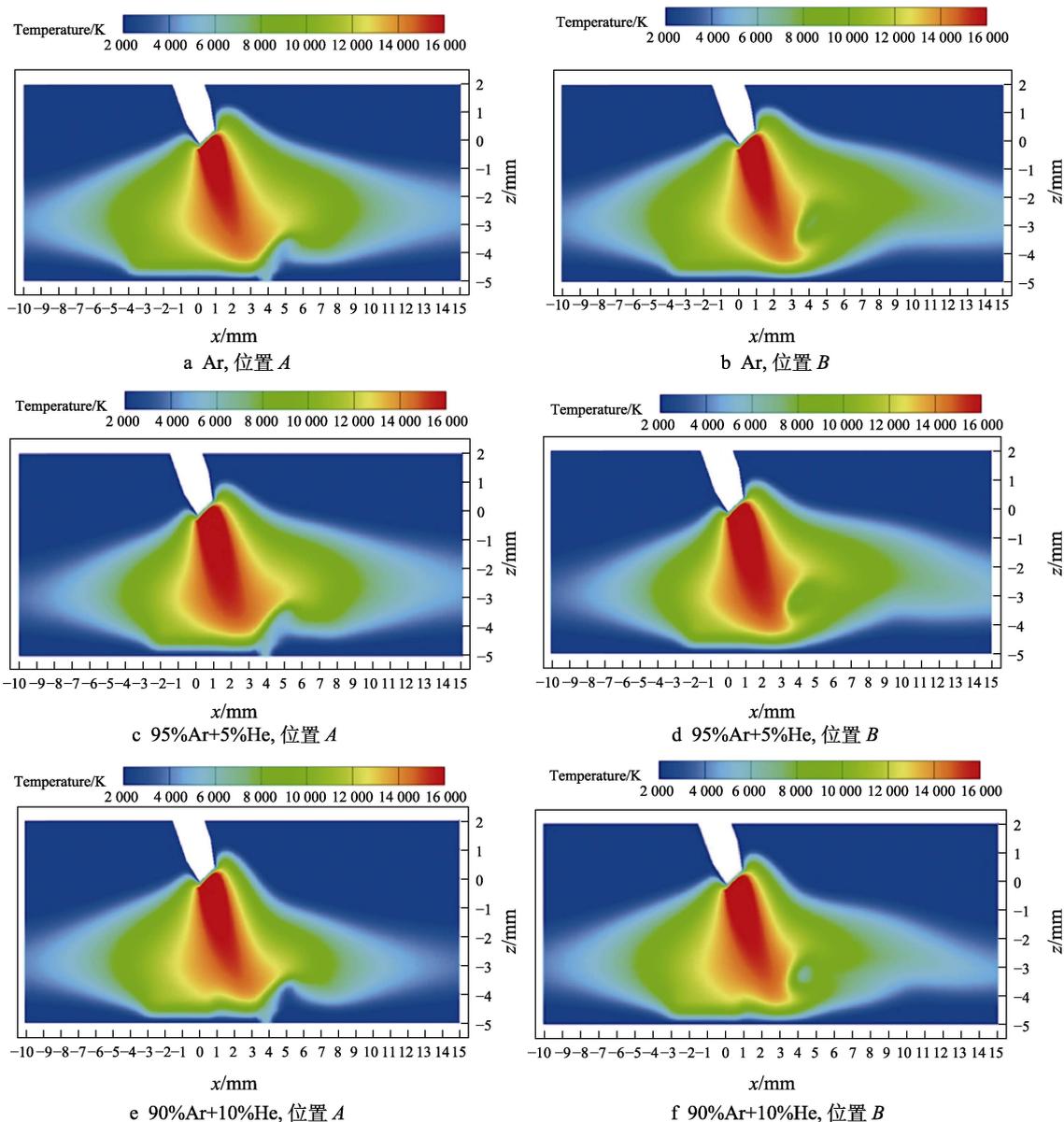


图 7 不同成分保护气体下电弧纵截面温度场分布 (位置 A、B)

Fig.7 Temperature field distribution of arc longitudinal section under different compositions of shielding gas (positions A and B): a) Ar, position A; b) Ar, position B; c) 95%Ar+5%He, position A; d) 95%Ar+5%He, position B; e) 90%Ar+10%He, position A; f) 90%Ar+10%He, position B

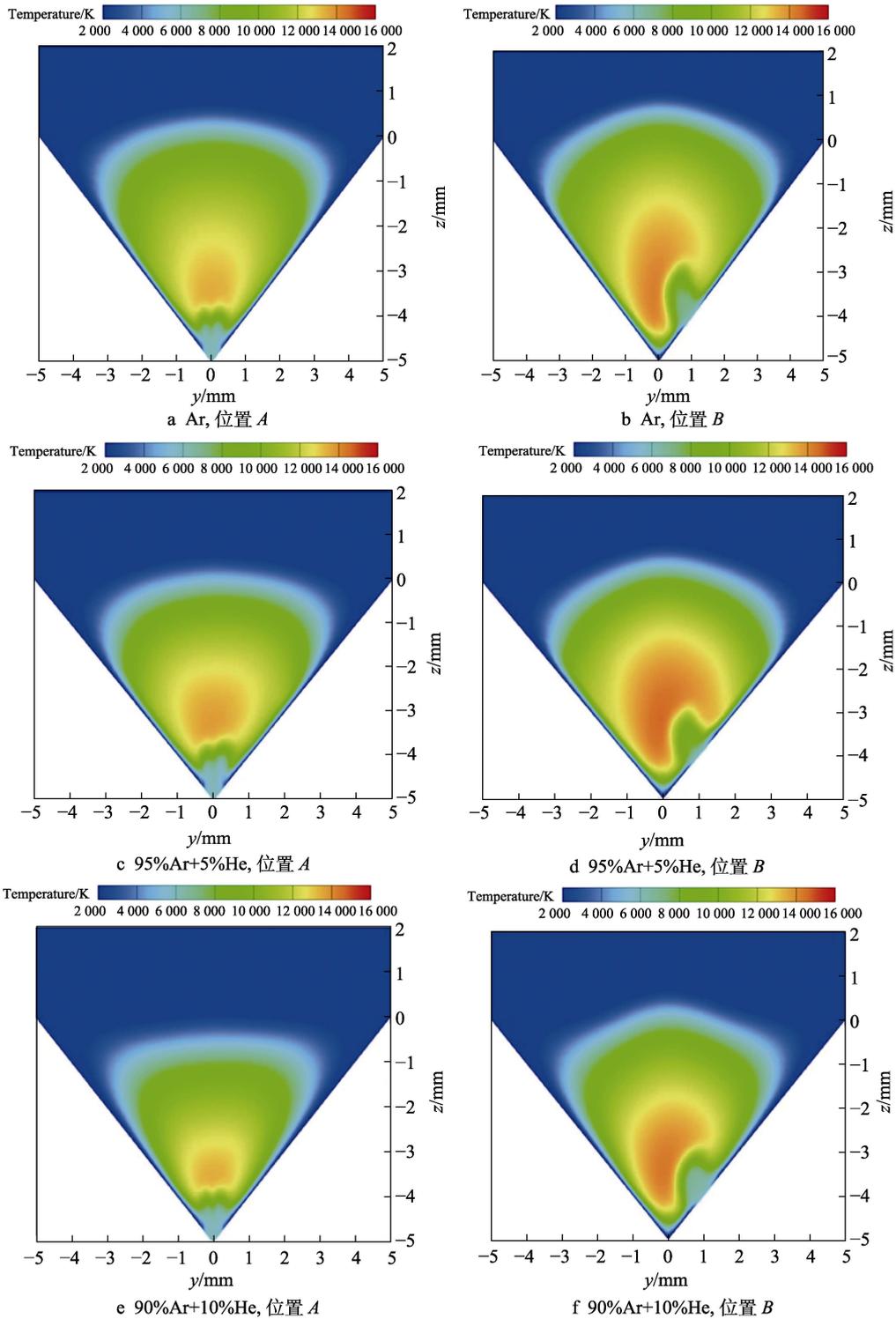


图 8 不同成分保护气体下电弧横截面温度场分布 (位置 A、B)

Fig.8 Temperature field distribution of arc cross section under different compositions of shielding gas (positions A and B): a) Ar, position A; b) Ar, position B; c) 95%Ar+5%He, position A; d) 95%Ar+5%He, position B; e) 90%Ar+10%He, position A; f) 90%Ar+10%He, position B

图 9 为不同保护气体组分条件下激光处于位置 A、B 时复合焊电弧速度场中心纵截面分布云图。可见,在复合焊过程中,电弧等离子体沿电极轴向高速流向熔池表面,小孔附近区域高速向上流动的光致金属蒸气与电弧等离子体相遇,随即转向流向熔池前

方;光致金属蒸气使得复合焊电弧等离子体流场分布更为复杂;同时,当激光旋转至不同位置时,复合等离子体流场分布特征同样产生变化。相较于位置 B,当激光旋转位于位置 A 时,光致金属蒸气对该位置的界面流场影响更为明显。

此外, 由图 9 可知, 在不同氦气-氩气比例条件下, 电弧等离子体基本流态相似, 且最大流速出现于电极端部附近区域。当保护气体为纯 Ar、95%Ar+5%He、90%Ar+10%He 时, 激光旋转至位置 A, 电弧等离子体峰值流速减小, 分别为 336.34、334.34、317.58 m/s; 当激光旋转至 B 处时, 峰值流速分别为 336.18、334.29、317.68 m/s, 差异较小。这主要是因为随着电弧温度的降低, 温度场的影响使得电磁力减小, 进而使电弧等离子体流速降低。这与电弧等离子体的温度场变化具有一致性, 因为两者都受到电流密度这一物理量的影响; 同时, 由于光致金属蒸气喷射的位置与焊丝端部还有一定距离, 对焊丝端部附近区域流场峰值流速影响较小, 故激光旋转至

不同位置对电弧等离子体峰值流速改变有限, 主要对小孔附近的流场产生影响。

图 10 为不同保护气体组分下复合焊电弧压力场的分布情况。分析可知, 在复合焊接过程中, 电弧内部压力受到电流密度与等离子体流动速度的影响, 同时也受光致金属蒸气影响, 故其压力分布与等离子体流场的特征相近, 压力峰值位于焊丝端部位置; 随着远离电弧中心, 压力逐渐减小。如上文所述, 光致金属蒸气从小孔口高速流向上方, 故小孔附近同样存在高压区域。当激光处于位置 A 时, 小孔口金属蒸气分布区域周围压强高于位置 B, 这是由于点 A 位于焊缝中心上, 金属蒸气的动能和势能较大, 点 B 位于侧面, 金属蒸气的动能和势能较小, 金属蒸气对电弧的

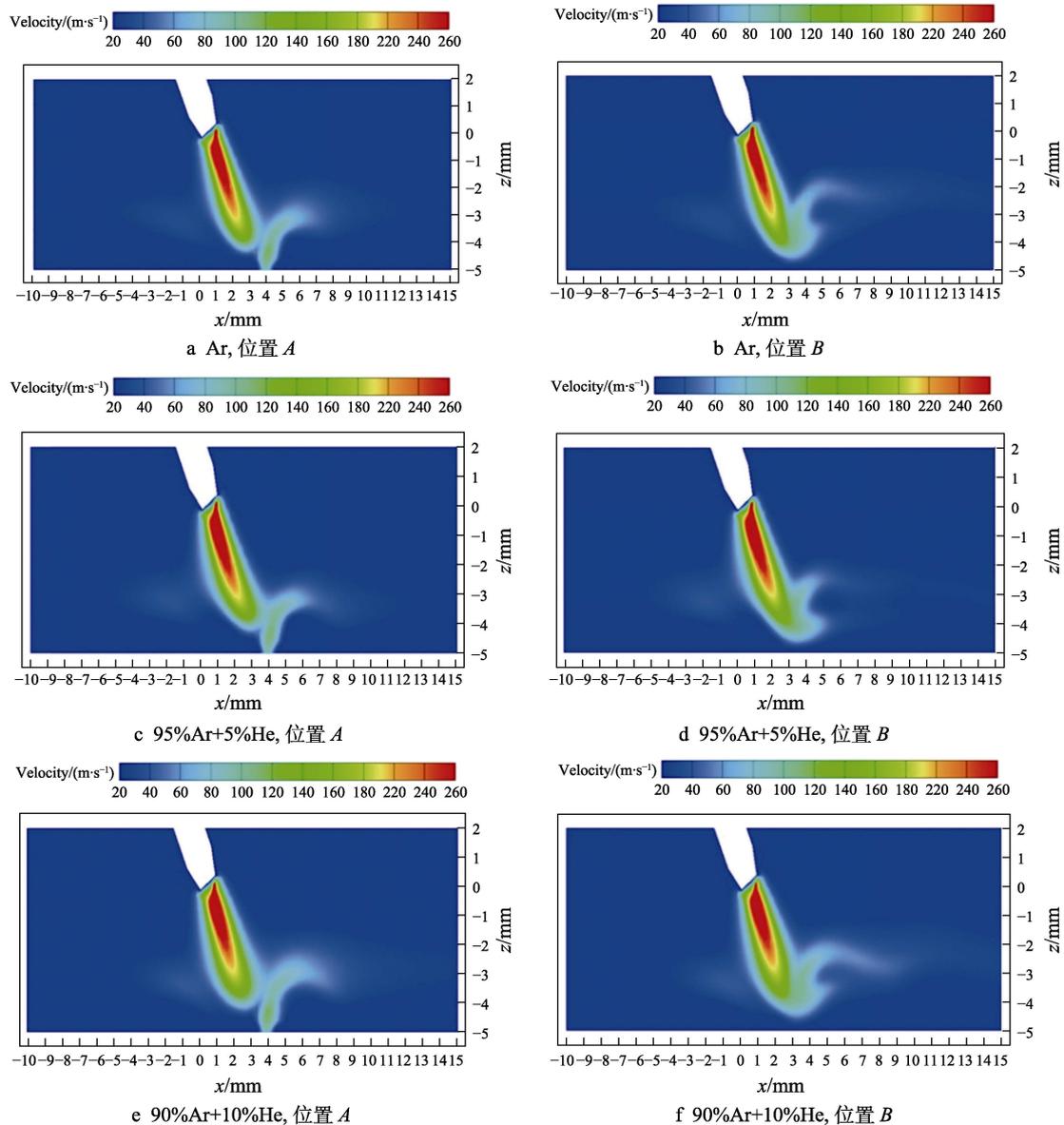


图 9 不同成分保护气体下电弧纵截面速度场分布 (位置 A、B)

Fig.9 Velocity field distribution of arc longitudinal section under different compositions of shielding gas (positions A and B): a) Ar, position A; b) Ar, position B; c) 95%Ar+5%He, position A; d) 95%Ar+5%He, position B; e) 90%Ar+10%He, position A; f) 90%Ar+10%He, position B

影响也较小。当保护气体为纯 Ar、95%Ar+5%He 和 90%Ar+10%He、激光处于位置 A 时，复合电弧压力峰值分别为 899.08、943.40、957.67 Pa，而在位置 B 时为 775.78、791.96、852.31 Pa。随着氦气所占比例的上升，电弧压力峰值及工件附近高压分布区域增大，这与高氦气含量混合气体的电弧收缩有关，较大的电弧压力同样有助于复合焊熔深的增大。此外，需要指出，由于金属蒸气密度相对较大，故其压力相对较高，因此，激光处于位置 A 时，其压力较位置 B 大，但复合焊时电弧等离子体流速与电流密切相关。

图 11 为不同保护气体组分条件下复合电弧电势纵截面分布云图。当旋转激光复合焊保护气体分别为纯 Ar、95%Ar+5%He、90%Ar+10%He 时，激光处于位置 A，电势分别为 11.56、12.17、13.18 V；激光处于位置 B 时则分别为 10.75、11.09、13.03 V。由于焊丝端部附

近区域电流密度较大，故其电势梯度也随之较大；在工件表面附近电弧导电区域较大，电流密度较低，故其电势变化幅度小；而激光旋转至位置 B 时电势略低于位置 A，这与金属蒸气的分布特征有关。同时，由于氦气电离势能大，故在相同的电流及弧长条件下，电弧电势随着保护气体中氦气成分的增加而上升。由于文中氦气比例变化有限，故其电势变化幅度较小。此外，当氦气所占比例增大至 10%时，激光摆动位置及光致金属蒸气对电弧电势的影响迅速减弱，如图 11e、f 所示。

图 12 为不同保护气体成分下高速摄像测得的电弧形态。可以看出，随着保护气体中氦气的增加，电弧形态逐渐收缩，与数值模拟结果基本吻合，证明了激光电弧复合焊模型的准确性，其可以应用于氦-氩混合保护气下旋转激光+电弧复合焊电弧动态特性的研究与分析中。

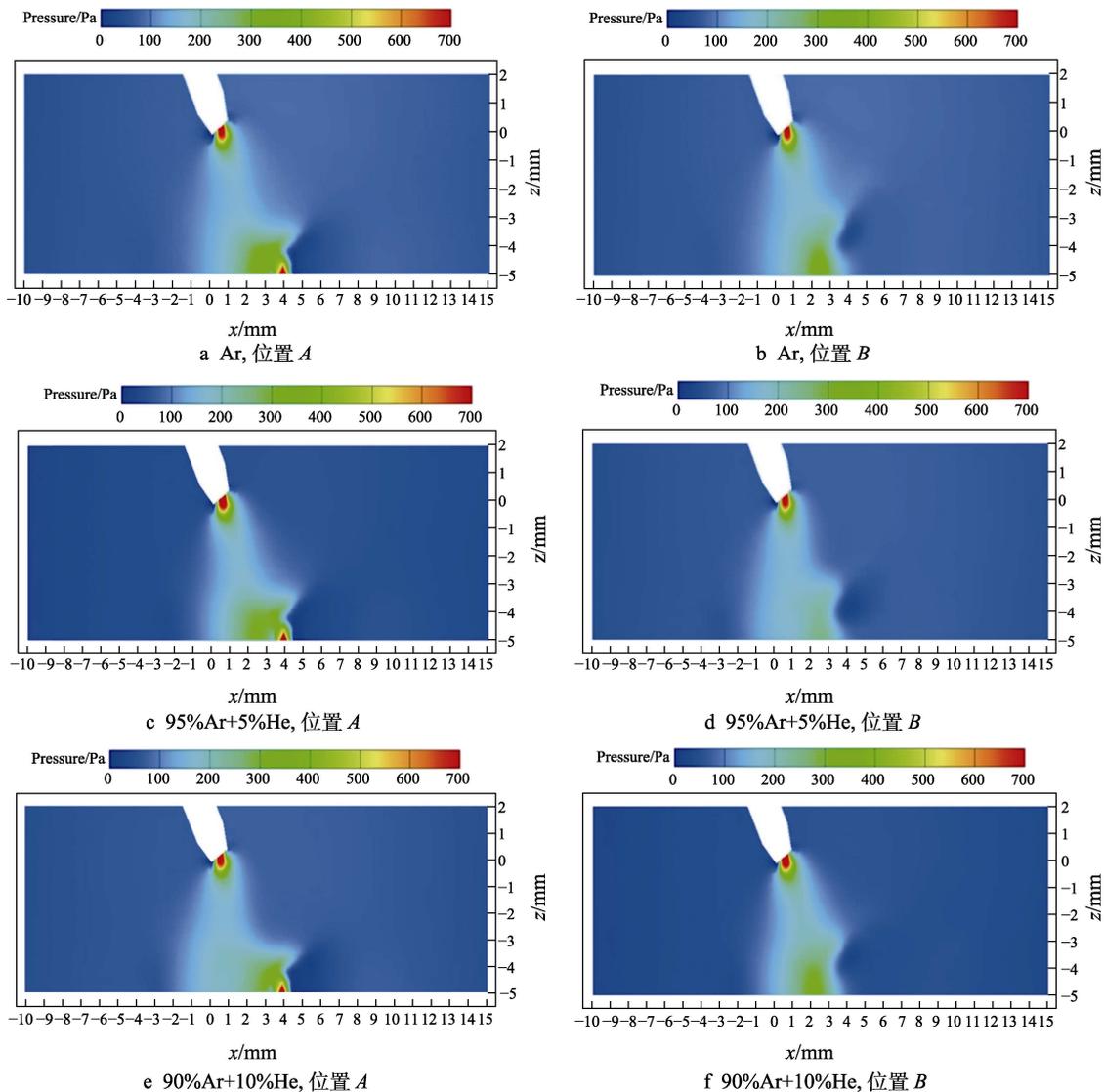


图 10 不同成分保护气体下电弧纵截面压力分布 (位置 A、B)

Fig.10 Pressure distribution of arc longitudinal section under different compositions of shielding gas (positions A and B): a) Ar, position A; b) Ar, position B; c) 95%Ar+5%He, position A; d) 95%Ar+5%He, position B; e) 90%Ar+10%He, position A; f) 90%Ar+10%He, position B

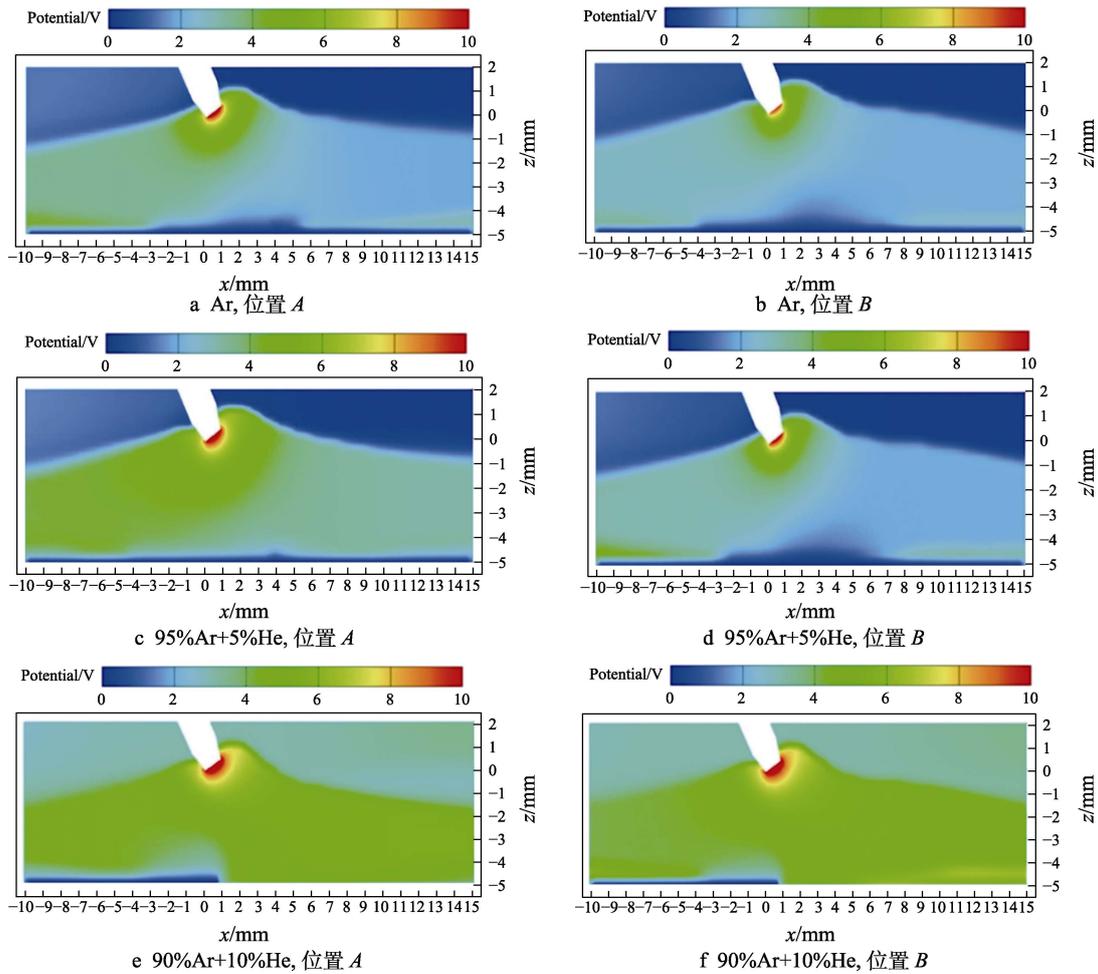


图 11 不同成分保护气体下电弧纵截面电势分布 (位置 A、B)

Fig.11 Electric potential distribution of arc longitudinal section under different compositions of shielding gas (positions A and B): a) Ar, position A; b) Ar, position B; c) 95%Ar+5%He, position A; d) 95%Ar+5%He, position B; e) 90%Ar+10%He, position A; f) 90%Ar+10%He, position B



图 12 不同成分保护气体下电弧高速摄像图

Fig.12 High speed image of arc under different compositions of shielding gas

4 结论

1) 综合考虑接头几何特征、不同比例的氦-氩混合保护气体成分及旋转激光热源移动路径变化,建立了角接头旋转激光+电弧复合焊电弧数值分析模型;模拟计算了不同比例氦-氩混合保护气体成分下电弧等离子体的温度场、速度场、压力场及电势梯度分布;分析了不同成分保护气体对等离子体各特性的影响,并通过高速摄像试验验证了其合理性。

2) 在激光旋转条件下,复合焊电弧物理行为处

于动态变化过程;当激光旋转至不同位置时,电弧物理特性分布随之改变;当保护气体中氦气体积分数由 0 增至 10%时,电弧逐渐收缩,电弧峰值温度逐渐降低,等离子体最大流速降低,电弧压力和电势随之上升。

参考文献:

[1] KIM H J, KEOLEIAN G A, SKERLOS S J. Economic Assessment of Greenhouse Gas Emissions Reduction by

- Vehicle Lightweighting Using Aluminum and High-Strength Steel[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2011, 15(1): 64-80.
- [2] 段晨风. 6061 铝合金激光复合焊接接头的显微组织和疲劳性能研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2020.
DUAN Chen-feng. Study on Microstructure and Fatigue Property of Laser Composite Welded Joint of 6061 Aluminum Alloy[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2020.
- [3] 刘晓红, 王红阳, 刘黎明. 焊后热处理对 6061-T6 铝合金激光-电弧复合焊接性能的影响[J]. *焊接技术*, 2016, 45(5): 26-29.
LIU Xiao-hong, WANG Hong-yang, LIU Li-ming. Effect of Post-Weld Heat Treatment on Laser-Arc Hybrid Welding Performance of 6061-T6 Aluminum Alloy[J]. *Welding Technology*, 2016, 45(5): 26-29.
- [4] 雷振, 徐良, 徐富家, 等. 激光-电弧复合焊接技术国内研究现状及典型应用[J]. *焊接*, 2018(12): 1-6.
LEI Zhen, XU Liang, XU Fu-jia, et al. Typical Applications and Research Status of Laser-Arc Hybrid Welding Technology[J]. *Welding & Joining*, 2018(12): 1-6.
- [5] 王旭友, 王威, 秦国梁, 等. 激光及激光+电弧复合热源焊接技术的研究与应用[J]. *机械工人(热加工)*, 2007(6): 33-36.
WANG Xu-you, WANG Wei, QIN Guo-liang, et al. Research and Application of Laser and Laser+Arc Compound Heat Source Welding Technology[J]. *MW Metal Forming*, 2007(6): 33-36.
- [6] JOOST W J. Reducing Vehicle Weight and Improving U.S. Energy Efficiency Using Integrated Computational Materials Engineering[J]. *JOM*, 2012, 64(9): 1032-1038.
- [7] BOBBIE F, LENNART S, RENO F, et al. On Increasing Fuel Efficiency by Operator Assistant Systems in a Wheel Loader[C]//2012 International Conference on Advanced Vehicle Technology and Integration, 2013: 155-161.
- [8] 祁小勇, 周京, 刘硕夫, 等. 5083 铝合金摆动激光电弧复合焊工艺研究[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(6): 71-78.
QI Xiao-yong, ZHOU Jing, LIU Shuo-fu, et al. Research on Wobbling Laser-Arc Hybrid Welding of 5083 Aluminum Alloy[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(6): 71-78.
- [9] WANG Lei, GAO Ming, ZHANG Chen, et al. Effect of Beam Oscillating Pattern on Weld Characterization of Laser Welding of AA6061-T6 Aluminum Alloy[J]. *Materials & Design*, 2016, 108: 707-717.
- [10] 邹吉鹏. 5A06 铝合金厚板窄间隙激光扫描焊接工艺特性研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2018.
ZOU Ji-peng. Study on Process Characteristics of Narrow Gap Laser Scanning Welding for 5A06 Aluminum Alloy Thick Plate[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology, 2018.
- [11] 王冲, 王立颖. 保护气体在铝合金焊接中的影响[J]. *河南科技*, 2012(17): 79.
WANG Chong, WANG Li-ying. Influence of Shielding Gas on Aluminum Alloy Welding[J]. *Henan Science and Technology*, 2012(17): 79.
- [12] KUK J M, JANG K C, LEE D G, et al. Effects of Temperature and Shielding Gas Mixture on Fatigue Life of 5083 Aluminum Alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155/156: 1408-1414.
- [13] ISMAIL A, BEHCET G. Effect of Shielding Gas Combination on Microstructure and Mechanical Properties of MIG Welded Stainless Steel 316[J]. *Materialpruefung: Werkstoffe und Bauteile, Forschung Pruefung Anwendung*, 2021, 63(1): 97-101.
- [14] ZHANG Xin-yu, ZHA Xiao-qin, GAO Ling-qing, et al. Influence of Shielding Gas on Microstructure and Properties of GMAW DSS2205 Welded Joints[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2021, 14(10): 2671.
- [15] WANG Lei, XU Xue-zong, WANG Ke-hong, et al. Effect of Shielding Gas and Defocusing on Porosity during Laser Beam Welding of 7A52 Alloy[J]. *China Welding*, 2020, 29(3): 20-25.
- [16] LI S, ZHOU Z, XIAO G, et al. Influence of Carbon Dioxide Shielding Gas on Microstructure and Corrosion Property of Welds[J]. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 2019, 50(7): 819-828.
- [17] 雷正龙, 李颖, 陈彦宾, 等. 双光束激光填丝焊工艺对铝合金焊接气孔率的影响[J]. *焊接学报*, 2013, 34(2): 40-44.
LEI Zheng-long, LI Ying, CHEN Yan-bin, et al. Effect of Process Parameters on Porosity Formation Ratio in Dual-Beam Laser Welding of Aluminum Alloys with Filler Wire[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(2): 40-44.
- [18] PANDYA D, BADGUJAR A, GHETIYA N. Effect of Hydrogen Additions to Shielding Gas on Activated TIG Austenitic Stainless Steel Weld[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 47: 1025-1029.
- [19] CHAE H B, KIM C H, KIM J H, et al. The Effect of Shielding Gas Composition in CO₂ Laser-Gas Metal Arc Hybrid Welding[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2008, 222(11): 1315-1324.
- [20] ZHU Yong-an, CAI Yan, WANG Min. Effects of He Content in Shielding Gases on High-Efficient Hybrid Laser Arc Welding with C-276 Filler Metal[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 299: 117367.
- [21] CAI Chuang, HE Shuang, CHEN Hui, et al. Influence of Ar-He Mixture on Welding Characteristics of Fiber Laser-MIG Hybrid Welding of Aluminum Alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 113: 37-45.
- [22] SILVA L J D, SCOTTI F M, FERNANDES D B, et al. Effect of O₂ Content in Argon-Based Shielding Gas on Arc Wandering in WAAM of Aluminum Thin Walls[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2021, 32: 338-345.
- [23] YANG Xiao-yi, CHEN Hui, ZHU Zong-tao, et al. Effect

- of Shielding Gas Flow on Welding Process of Laser-Arc Hybrid Welding and MIG Welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 38: 530-542.
- [24] RAO Z H, HU J, LIAO S M, et al. Modeling of the Transport Phenomena in GMAW Using Argon-Helium Mixtures. Part I - the Arc[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(25/26): 5707-5721.
- [25] MURPHY A B, TANAKA M, YAMAMOTO K, et al. Modelling of Arc Welding: The Importance of Including the Arc Plasma in the Computational Domain[J]. *Vacuum*, 2010, 85(5): 579-584.
- [26] WU C S, USHIO M, TANAKA M. Analysis of the TIG Welding Arc Behavior[J]. *Computational Materials Science*, 1997, 7(3): 308-314.
- [27] DILTHEY U, GOUMENIOUK A, LOPOTA V, et al. Kinetic Description of Keyhole Plasma in Laser Welding[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2000, 33(21): 2747-2753.
- [28] AMARA E H, FABBRO R, BENDIB A. Modeling of the Compressible Vapor Flow Induced in a Keyhole during Laser Welding[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(7): 4289-4296.