# 变位磁场强度对电弧熔积中电弧和熔池 传热与流动的影响

# 李梅<sup>a</sup>,杨胜波<sup>b</sup>,李立军<sup>a,b</sup>,周祥曼<sup>b\*</sup>

(三峡大学 a.创新创业学院 b.机械与动力学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:目的研究变位磁场强度对变位磁场作用下电弧熔积中电弧和熔池传热与流动的影响规律与机理。 方法基于流动动力学方程(麦克斯韦方程组、动量守恒方程、连续方程、能量守恒方程),建立了变位磁 场作用下TIG电弧-熔池耦合的数值模型,对比分析了外加不同强度的变位磁场对电弧与熔池传热传质的影 响规律与机理。结果外加变位磁场使电弧发生偏移,电弧等离子体具有偏向一侧与旋转的流动趋势,熔池 的整体形貌向x正方向与y负方向发生偏移,熔池除了具有中心向外流动趋势以外,还具有偏向一侧与围绕 中心旋转的趋势。随着变位磁场强度的增大,电弧与熔池整体形貌偏移量增大且偏向一侧与围绕中心旋转的 趋势增强。结论外加变位磁场可使电弧发生偏移,且变位磁场强度增大,电弧与熔池整体形貌偏移量增大。 关键词:电弧熔积;数值模拟;变位磁场;传热流动;电弧增材制造 DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2024.11.021 中图分类号:TG44 文献标志码:A 文章编号: 1674-6457(2024)11-0178-11

## Effect of Deflection Magnetic Field Intensity on Heat Transfer and Flow of Arc and Molten Pool in Arc Deposition

LI Mei<sup>a</sup>, YANG Shengbo<sup>b</sup>, LI Lijun<sup>a,b</sup>, ZHOU Xiangman<sup>b\*</sup>

(a. College of Innovation and Entrepreneurship, b. College of Mechanical and Power Engineering, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effect law and mechanism of deflection magnetic field intensity on the heat transfer and flow of the arc and the molten pool in the arc deposition under the action of the deflection magnetic field. Based on the flow dynamics equations (Maxwell's equations, momentum conservation equations, continuity equations and energy conservation equations), a numerical model of TIG arc-molten pool coupling under the action of a deflection magnetic field was established. The effects of different intensities of the deflection magnetic field on the heat and mass transfer of the arc and the molten pool were compared and analyzed. The external deflection magnetic field caused the arc to shift. The arc plasma had a tendency to shift to one side and rotate. The overall morphology of the molten pool shifted to the positive direction of *x* and the negative direction of *y*. In addition to the outward flow of the center, the molten pool also had a tendency to shift to one side and rotate

收稿日期: 2024-03-08

Received: 2024-03-08

\*通信作者 (Corresponding author)

基金项目:湖北省教育厅科研计划(D20211203)

Fund: Hubei Provincial Department of Education Research Program Project (D20211203)

**引文格式:**李梅,杨胜波,李立军,等.变位磁场强度对电弧熔积中电弧和熔池传热与流动的影响[J]. 精密成形工程,2024, 16(11): 178-188.

LI Mei, YANG Shengbo, LI Lijun, et al. Effect of Deflection Magnetic Field Intensity on Heat Transfer and Flow of Arc and Molten Pool in Arc Deposition[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(11): 178-188.

around the center. With the increase of the deflection magnetic field, the overall morphology offset of the arc and the molten pool increased and the tendency to shift to one side and rotate around the center increased. The external deflection magnetic field can make the arc shift, and the intensity of the deflection magnetic field increases, and the offset between the arc and the overall morphology of the molten pool increases.

**KEY WORDS:** arc deposition; numerical simulation; deflection magnetic field; heat transfer and flow; wire arc additive manufacturing

电弧熔积工艺是以电弧为热源的焊接工艺,作为一种高效且低成本的金属连接、制造与加工手段,广 泛应用于多个工业领域<sup>[1-3]</sup>。其中以电弧熔积技术为 基础的电弧增材制造技术因具有成本低、成形快等优 点,成为了金属增材制造技术的重要研究方向之一<sup>[4-6]</sup>。 但电弧熔积技术有着自身的问题:因热输入过大而引 起较大残余应力与变形、熔积过程中易产生气孔与缺 陷而引起的力学性能不佳、熔积表面质量较差等<sup>[7-9]</sup>。 在电弧熔积工艺中外加能量场可以改变电弧熔池传 热传质过程,进而改善电弧熔积自身缺陷。相对于其 他能量场来说,外加磁场具有低成本、易调控等优点, 所以广泛应用于电弧熔积技术中<sup>[10]</sup>。

目前外加磁场辅助的电弧熔积工艺可按磁场方向分为3种类型,第一类为外加垂直于焊枪的纵向磁场,在纵向磁场作用下,电弧被压缩,电弧与熔池发生旋转运动,在纵向磁场的电磁搅拌作用下焊件晶粒减小、气孔析出减少,焊件的力学性能得以增强<sup>[11-12]</sup>。 第二类为垂直于焊枪方向的横向磁场,在横向磁场作用下,电弧与熔池向一侧偏移,能在细化晶粒的同时,抑制驼峰、咬边等缺陷<sup>[13-14]</sup>。第三类为具有各个方向分量的复合磁场,如变位磁场<sup>[15]</sup>,变位磁场兼顾了纵向磁场与横向磁场的优点,不仅可以起到电磁搅拌的作用,还可以使电弧增材过程中的搭接质量得到明显提升<sup>[16-17]</sup>。

目前针对变位磁场作用下电弧熔积技术的研究 主要集中在变位角度对其影响方面<sup>[17]</sup>,而变位磁场强 度作为变位磁场的重要参数,其大小直接影响变位磁 场作用下的电弧与熔池传热传质过程。因此本文将针 对不同变位磁场强度对电弧熔积过程中电弧与熔池 传热和流动的影响进行研究,采用流体动力学分析软 件 Fluent 建立变位磁场作用下的电弧熔池耦合模型, 分析对比不同强度作用下的变位磁场对电弧与熔池 传热传质的影响规律与机理,最后通过实验进行验 证,以期为磁场在电弧熔积工艺和以电弧熔积为基础 的电弧增材制造工艺中的应用提供理论依据和参考。

## 1 数学模型

## 1.1 基本假设

电弧熔积过程十分复杂,电弧等离子与熔池具有

如下特性:等离子辐射再吸收能量远远小于等离子辐射散热能量;电弧与熔池流速相对较小且流动距离较小;在模型中进行定点电弧与熔池分析时,熔池表面自由变形较小;金属蒸气对电弧与熔池传热影响相对较小。对此,可作出如下合理假设以简化计算并提高计算效率:1)电弧为连续介质且满足区域热平衡<sup>[18]</sup>,并满足光学薄性质<sup>[19]</sup>;2)假设电弧与熔池的流动为层流<sup>[20]</sup>;3)通过加密电极和电弧之间区域的网格来简化鞘层区<sup>[21]</sup>;4)将熔池自由表面简化为平面<sup>[22]</sup>; 5)忽略金属蒸气对传热的影响<sup>[23]</sup>。

#### 1.2 控制方程

本文建立的电弧与熔池耦合的数值模型的控制 方程如下。

质量守恒方程(连续性方程):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \tag{1}$$

式中: *ρ* 为密度; *t* 为时间; *V* 为速度矢量。因未送丝,计算域内的质量源项均为 0。

动量守恒方程(N-S方程):

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V V) = -\nabla P + \nabla \cdot \left[ \boldsymbol{\tau} \cdot \left( \nabla V + \nabla V^{\mathrm{T}} \right) \right] + S_{\mathrm{M}} (2)$$

式中: P 为压强; r 为黏度张量; S<sub>M</sub>为动量源项。 电弧与熔池动量源项 S<sub>M</sub>包括电磁力、重力,其 表达式如式(3)所示。

$$S_{\rm M} = J \times B + \rho g \tag{3}$$

式中: *J* 为电流密度; *B* 为磁感应强度; *ρ* 为密 度; *g* 为重力加速度。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V H) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{c_{\rm p}} \nabla H\right) + S_{\rm E}$$
(4)

式中: *H* 为焓; *c*<sub>p</sub> 为比热容; *k* 为热传导系数; *S*<sub>E</sub> 为能量源项。

电弧区的能量源项包括焦耳热、电子焓与辐射 热,其计算方法如式(5)所示,对于钨极及阳极基 板区域,其能量源项仅有焦耳热。

$$S_{\rm E} = \frac{J \cdot J}{\sigma} + \frac{5K_{\rm b}}{2e} \left( \frac{J}{c_{\rm p}} \cdot \nabla H \right) - S_{\rm R}$$
(5)

式中: $\sigma$ 为导电率; $K_b$ 为 Steven-Boltzmann 常数; e为电子电量; $S_R$ 为辐射热。

$$J = -\sigma \cdot (\nabla \Phi)$$
(7)  
磁矢势力:

$$\vec{\mathbf{W}} = -\mu_0 \mathbf{J} \tag{8}$$

$$\vec{\mathbf{W}} = \mathbf{E} \mathbf{E} \mathbf{E}$$

$$B = V \times A + B_0 \tag{9}$$

式中: $\phi$ 为电势; $\mu_0$ 为真空磁导率;A为磁矢势;  $B_0$ 为外加稳态磁场的磁通密度。

此外,本文采用焓-孔隙率模型处理固液相之间 的糊状区,此区域被当作多孔区域来处理,并考虑其 对动量的影响。

$$F_{\text{mush}} = \frac{\left(1 - \beta_{1}\right)^{2}}{\left(\beta_{1}^{2} + \omega\right)} A_{\text{mush}} \left(V - V_{\text{p}}\right)$$
(10)

熔化凝固模型如式(11)所示。

$$\beta_{\rm l} = \begin{cases} 0 & (T \le T_{\rm S}) \\ \frac{T - T_{\rm S}}{T_{\rm L} - T_{\rm S}} & (T_{\rm S} < T < T_{\rm L}) \\ 1 & (T_{\rm L} \le T) \end{cases}$$
(11)

式中: $\beta_1$ 为液相金属体积分数; $\omega$ 为一个防止分 母为0的很小的数;T为金属液体温度; $A_{mush}$ 为糊状 区系数; $V_p$ 为固体区域速度; $T_s$ 为材料固相线温度;  $T_L$ 为液相线温度。

### 1.3 物理模型与边界条件

求解域如图 1 所示,其中钨极直径为 3.2 mm, 其尖端角度为 60°,整体高度为 5 mm,氩气的气体 入口直径为 15 mm,弧长为 3 mm,阳极不锈钢板厚 度为 10 mm,氩气流量为 18 L/min。

为进一步表达计算域及其边界,通过如图2所示



图 1 求解域示意图 Fig.1 Schematic diagram of the solution domain



的 zx 中心截面作进一步说明。

计算域边界条件如表1所示。

保护气体入口的气体速度与流量及其喷嘴尺寸 的关系<sup>[24]</sup>可表示为:

$$V_{Z} = \frac{2Q_{\rm Ar}}{\pi} \frac{R_{\rm n}^{2} - r^{2} + \left(R_{\rm n}^{2} - R_{\rm w}^{2}\right) \frac{\ln\left(r / R_{\rm n}\right)}{\ln\left(R_{\rm n} / R_{\rm w}\right)}}{R_{\rm n}^{4} - R_{\rm w}^{4} + \frac{\left(R_{\rm n}^{2} - R_{\rm w}^{2}\right)^{2}}{\ln\left(R_{\rm n} / R_{\rm w}\right)}}$$
(12)

式中: $Q_{Ar}$ 为保护气体流量; $R_n$ 为喷嘴内半径;  $R_w$ 为钨极半径;r为到喷嘴中心距离。

基板表面热输入主要由传导热 q<sub>e</sub>、电子流动引起的热量 q<sub>e</sub>、辐射热损失 q<sub>r</sub>构成<sup>[25]</sup>,可表示为:

$$q_{\rm a} = q_{\rm c} + q_{\rm e} + q_{\rm r} = -k \frac{\partial T}{\partial z} + \left| j_{\rm z} \right| \Phi_{\rm a} - \varepsilon \sigma T^4$$
(13)

式中: $j_z$ 为轴向电流密度; $\Phi_a$ 为阳极功函数; $\varepsilon$ 为辐射系数;T为温度。

阳极基板外表面换热可表示为:

$$q_{\rm loss} = -h_{\rm conv}(T - T_{\rm ref}) - \varepsilon K_{\rm b}(T^4 - T_{\rm ref}^4)$$
(14)

式中: *h*conv 为热对流系数; *T*ref 为环境温度; *K*b 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数。

阴极表面热输入<sup>[26]</sup>可表示为:

$$q_{\rm c} = -k \frac{\partial T}{\partial z} + \left| j_{\rm i} \right| V_{\rm i} - \left| j_{\rm e} \right| \Phi_{\rm c} - \varepsilon \sigma T^4 \tag{15}$$

式中:  $j_i$  为离子电流密度;  $V_i$  为氩气电离能;  $j_e$  为电子电流密度;  $\boldsymbol{\Phi}_c$  为阴极材料逸出功。等式右边 包括热传导项、离子热效应项、电子冷却效应项、辐 射散热项。根据 Richardson-Dushman 定律,  $j_i$ 、 $j_e$ 的 计算如式(16)和(17)所示。

$$\left|j_{\rm R}\right| = A_{\rm R} T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{\rm c}}{K_{\rm b}T}\right) \tag{16}$$

$$j_{e} = \begin{cases} j_{R}, j_{i} = |j| - j_{R}; (j_{R} < |j|) \\ |j|, j_{i} = 0; (j_{R} < |j|) \end{cases}$$
(17)

式中: $A_R$ 为 Richardson 常数; $j_R$ 为阴极热电子热 发射产生的电流;  $j_1$ 为电流密度。

因阳极基板表面被假设为平面,所以不考虑表 面张力的作用,但熔池表面还存在电弧剪切力及 表1 计算域边界条件

Tab.1 Computational domain boundary conditions					
Boundary name	Velocity	Pressure	Temperate	Electric potential	Magnetic vector potential
BC, DE	Formula (12)	—	$\partial T / \partial n = 0$	$\partial \Phi / \partial n = 0$	$\partial A/\partial n=0$
AB, EF, AI, FJ	_	101 325 Pa	$\partial T / \partial n = 0$	$\partial \Phi / \partial n = 0$	$\partial A/\partial n=0$ A=0(AJ, FK)
CG, GH, HD	—	—	Formula (15)	Coupling	Coupling
CD	—		1 000	$-\sigma \cdot \partial \Phi / \partial z = -I_w / (\pi \cdot R_w^2)$	$\partial A/\partial n=0$
IJ	Formula (15), (16)		Formula (13)	Coupling	Coupling
IK, JL	—		Formula (14)	$\partial \Phi / \partial n = 0$	A=0
KL	—	—	Formula (14)	0	$\partial A/\partial n=0$

Marangoni 力, 电弧剪切力及 Marangoni 力在 x 和 y 方向上可表示为:

$$\tau_x = -\mu_p \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}$$
(18)

$$\tau_{y} = -\mu_{p} \frac{\partial v_{y}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial I}{\partial y}$$
(19)

式中: μ<sub>p</sub>为等离子体黏度; y 为表面张力; V<sub>x</sub>和 V<sub>x</sub>分别是 x 方向和 y 方向的速度。

SU304 不锈钢、氩气、钨的热物性参数参考 文献[27-29]。

## 1.4 外加变位磁场施加方式

变位磁场施加方式和变位磁场发生装置及其连 接示意图如图 3 与图 4 所示,焊枪固定,在 zy 平面 上以一定的磁场强度和变位角 θ 为 45°进行施加。



图 3 变位磁场施加示意图 Fig.3 Schematic diagram of applied deflection magnetic field



图 4 变位磁场发生装置及其连接示意图 Fig.4 Deflection magnetic field generating device and its connection diagram

# 2 结果与讨论

# 2.1 外加变位磁场的磁场强度对电弧及熔 池形貌的影响

在磁场强度为 25、50、75 和 100 GS, θ 角为 45° 的变位磁场作用下,电弧形态(温度为 10 000 K 的 等温面)与熔池整体形貌及电弧速度分布场如图 5 所 示。无外加磁场时电弧与熔池呈对称分布<sup>[22-23]</sup>,而外 加变位磁场使电弧发生偏转,也使熔池发生偏移,且 随着变位磁场强度的增加,电弧偏转与熔池偏移增 加。在电弧流动方面,无外加磁场时,电弧等离子体 运动方向沿电极方向喷射,外加变位磁场时,电弧等 离子体运动具有了向一侧偏移和旋转的趋势,25、50、 75 和 100 GS 磁场强度作用的等离子体最高速度分别 为 199.3、202.8、216.7、227.8 m/s,可见,随着变位 磁场强度增加,电弧等离子体最大运动速度增加且电 弧等离子体向一侧偏移和旋转的趋势增强。

在上述 4 种磁场强度的变位磁场作用下电弧所 受的电磁力如图 6 所示。无磁场时,电弧所受的电磁 力均指向熔池中心<sup>[17]</sup>,而外加变位磁场时,电磁力不 再指向熔池中心,其指向中心向焊枪中心的右侧偏 移,且随着变位磁场的强度增加,电磁力增大,其指 向右侧偏移量增加。电磁力之所以发生上述的变化, 是因为电弧作为一种带电粒子,在磁场中会受到力的 作用,因为变位磁场具有纵向磁场与横向磁场分量, 由左手定则可知,纵向磁场产生了使电弧旋转的电磁 力分量,而横向磁场产生了偏向一侧的电磁力分量, 在 2 个电磁力分量的共同作用下,电弧运动发生如图 5 所示的偏移与旋转,变位磁场的增加也使 2 个电磁 力分量增加,从而随着变位磁场强度的增加,电弧等 离子最大速度增加,如图 5 所示。

在上述 4 种磁场强度的变位磁场作用下,电弧及 熔池的 xz 截面与 yz 截面温度云图如图 7 与图 8 所示, 图 9 为 xz 截面与 yz 截面熔池轮廓。可以看出,电弧 在 xz 截面与 yz 截面发生了明显倾斜(xz 截面向右倾 斜, yz 截面向左倾斜),且随着变位磁场强度的增加, 电弧的倾斜程度增加。在熔池形貌方面,在变位磁场



c 75 GS

图 5 电弧形态及熔池整体形貌 Fig.5 Arc shape and overall morphology of molten pool



a 25 GS

b 50 GS



c 75 GS

d 100 GS

图 6 电磁力矢量分布 Fig.6 Electromagnetic force vector distribution









c 75 GS





图 7 xz 截面电弧和熔池温度分布云图 Fig.7 Temperature distribution cloud diagram of arc and molten pool at xz section



a 25 GS







c 75 GS

d 100 GS

图 8 yz 截面电弧和熔池温度分布云图 Fig.8 Temperature distribution cloud diagram of arc and molten pool at yz section



图 10 阳极表面热流密度

Fig.10 Heat flux density of the anode surface: a) heat flux density of anode surface on x axis; b) heat flux density of anode surface on y axis

作用下,熔池最大熔深分别出现在 xz 截面与 yz 截面 熔池中心左侧与右侧,熔池在 xz 截面与 yz 截面向着 不同方向偏移,在 xz 截面上 50、75、100 GS 磁场强 度作用下的熔池相对于 20 GS 时向右偏移了 0.87、 2.08、2.58 mm,在 yz 截面上向左偏移了 0.72、2.01、 2.69 mm。可见随着变位磁场强度的增大,电弧的倾 斜程度增加,熔池偏移量增加。

熔池形貌的变化主要是由电弧的热输入引起的, 熔池的热输入即为热流密度,图 10 为 x 轴上与 y 轴 上阳极表面的热流密度,无磁场时热流密度沿焊枪中 心呈对称分布,而外加变位磁场时,在 x 轴上,热流 波形向右侧偏移,随着变位磁场增大,热流波形向右 侧偏移量增大且热流作用波形宽度减小,这个也是图 7 中随着变位磁场强度增大,熔池向右侧偏移量增加 且熔池宽度逐渐减小的原因。在 y 轴上,热流波形向 左侧发生偏移,随着变位磁场强度的增加,向左侧发 生偏移且热流作用波形宽度减小,这也解释了图 8 中 熔池形貌的变化规律。

在 4 种磁场强度的变位磁场作用下阳极基板平 面温度及速度矢量分布云图如图 11 所示。在外加不 同强度磁场作用下,熔池轮廓变为不规整的椭圆形, 熔池整体向 x 正方向和 y 负方向偏移,且偏移量随磁

场强度的增加而增大,这与图9结果相印证。在熔池 流动方面,金属液体除具有从中心向外流动趋势外, 还具有偏向一侧与围绕中心旋转的趋势,且随着磁场强 度的增加,偏向一侧与围绕中心旋转趋势越发明显。 SU304 不锈钢的表面张力系数为-0.000 2 N/(m·K), 且 熔池中心温度大于熔池外围温度,所以 Marangoni 力 方向为熔池中心指向熔池外围,从图5与图11可知, 熔池流动速度远远小于电弧等离子速度,因此熔池表 面受到电弧剪切力的作用,图 12 为熔池表面所受到 的电弧剪切力,可以看出,熔池电弧剪切力总体由熔 池中心指向外侧, 所以在电弧剪切力与 Marangoni 力 共同作用下, 熔池具有了中心向外流动的趋势。在变 位磁场作用下,熔池受到如图6所示的电磁力,同时 从图 5 可知,电弧等离子体具有旋转和偏向一侧的运 动趋势,所以使图 12 中电弧剪切力发生偏转, 且随 着变位磁场强度的增加,偏转角度增大。所以在 Marangoni 力、电磁力、电弧等离子剪切力共同作用 下, 熔池除了具有中心向外流动趋势以外, 还具有偏 向一侧与围绕中心旋转的趋势。

#### 2.2 实验验证

图 13 为 2.1 节中数值模型计算所得 xz 平面熔池





c 75 GS







图 12 熔池受到电弧剪切力示意图 Fig.12 Schematic diagram of arc shear force on the molten pool





















轮廓与实验的比较结果,实验条件与数值模型相同, 模拟所得 25、50、75、100 G 熔池宽度分别为 11.4、 12.5、9.8、8.9 mm,实验所得分别为 10.8、10.1、9.3、 8.9 mm,可以看出,实验结果与模拟结果基本吻合。

实验中 50、75、100 GS 磁场强度作用下的熔池相对于 20 GS 时的分别向右侧偏移了 0.6、1.5、1.8 mm,可见在外加不同强度磁场后,实验所得的熔池轮廓整体向右侧偏移,偏移量随磁场强度的增大而增大,左

侧的熔深略大于右侧的熔深,且随着磁场强度的增大,左侧熔深大于右侧熔深的趋势越发明显,这与数 值模型有着相同的规律。

从实验和模拟结果可以看出,模拟存在着一定的 误差,这是因为首先本数值模型忽略了金属蒸气对传 热的影响,也忽略了基板的自由变形对阳极传热与流 动造成的影响;其次网格大小也会影响到模拟结果, 模型中外部的网格尺寸比较大造成仿真精度有所欠 缺,阳极表面第一层网格无法过于细化造成剪切应力 大于实际情况;另外现实中难以产生均匀磁场,这对 实验也造成了一定的误差。

## 3 结论

通过建立 TIG 电弧与熔池耦合的三维瞬态数值 模型,分析了外加磁场强度对电弧及熔池流动的影响 规律及其内部机理,最后在相同的工艺条件下进行了实 验,对数值模拟结果进行了验证,得出以下主要结论:

1)外加变位磁场使电弧发生偏移,电弧等离子体具有偏向一侧与旋转的运动趋势,随着变位磁场强度的增加,电弧偏移量增加,电弧等离子体偏向一侧与旋转趋势增加。

2)外加变位磁场使电弧发生变化,使熔池的热 输入发生变化,进而使熔池的整体形貌向 x 正方向与 y 负方向发生偏移,在 x 方向上 50、75、100 GS 磁场 强度作用下的熔池相对于 20 GS 时分别向正方向偏 移了 0.87、2.08、2.58 mm,在 y 方向上向负方向偏 移了 0.72、2.01、2.69 mm。熔池在 Marangoni 力、 电磁力、电弧等离子剪切力、电弧等离子体环向剪切 力共同作用下,熔池除了具有中心向外流动趋势以 外,还具有偏向一侧与围绕中心旋转的趋势,且随着 变位磁场强度的增大,熔池向 x 正方向与 y 负方向偏移 量增大,熔池偏向一侧与围绕中心旋转的趋势增强。

3)研究可为磁场在电弧熔积工艺和以电弧熔积 为基础的电弧增材制造工艺中的应用提供理论依据 和参考。

#### 参考文献:

- 陈健,苏金花,张毅梅.《中国制造 2025》与先进焊接工艺及装备发展[J].焊接,2016(3):1-5.
   CHEN J, SU J H, ZHANG Y M. Made in China 2025 and the Development of Advanced Welding Technology and Equipment[J]. Welding & Joining, 2016(3): 1-5.
- [2] 滕彬,范成磊,徐锴,等. 厚板窄间隙焊接技术研究 现状与应用进展[J]. 焊接学报, 2024, 45(1): 116-128. TENG B, FAN C L, XU K, et al. Research Status and Application Progress of Narrow Gap Welding Technology for Thick Plates[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(1): 116-128.

- [3] 李宁. 我国船用钢高效焊接技术发展现状[J]. 热加工工艺, 2015, 44(23): 10-12.
  LI N. Development Status of High Efficient Welding Technology for Hull Steel in China[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(23): 10-12.
- [4] KUMAR SINHA A, PRAMANIK S, YAGATI K P. Research Progress in Arc Based Additive Manufacturing of Aluminium Alloys-a Review[J]. Measurement, 2022, 200: 111672.
- [5] LANGELANDSVIK G, AKSELSEN O M, FURU T, et al. Review of Aluminum Alloy Development for Wire Arc Additive Manufacturing[J]. Materials, 2021, 14(18): 5370.
- [6] 石玗,朱珍文,张刚,等.金属电弧增材成形控制关 键技术及研究现状[J].材料导报,2022,36(12):135-142.
  SHI Y, ZHU Z W, ZHANG G, et al. Key Technology and Status of Metal Arc Additive Morphology Control[J]. Materials Reports, 2022, 36(12):135-142.
- [7] WANG X, ZHU C, XIE H Q, et al. A High-Efficiency Forming Method of Large- Scale Aluminum Alloy Components Using Fused Deposition Additive Manufacturing Based on Multi-Energy Fields[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62: 704-710.
- [8] JAFARI D, VANEKER T H J, GIBSON I. Wire and Arc Additive Manufacturing: Opportunities and Challenges to Control the Quality and Accuracy of Manufactured Parts[J]. Materials & Design, 2021, 202: 109471.
- [9] 张岩, 闫婉迪, 国旭明, 等. 基于熔化极电弧增材制造的控"形"与控"性"技术研究现状与展望[J]. 有色金属工程, 2021, 11(6): 17-23.
  ZHANG Y, YAN W D, GUO X M, et al. Research Status and Prospect of Control Technology of Shape and Property Based on Gas Metal Arc Welding Additive Manufacturing[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(6): 17-23.
- [10] 刘晓光,关子奇,张洪旭,等. 磁控 TIG 焊接技术的 研究现状及展望[J]. 热加工工艺, 2019, 48(15): 1-5. LIU X G, GUAN Z Q, ZHANG H X, et al. Research Status and Future Prospects of Magnetic Control TIG Welding Technology[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(15): 1-5.
- [11] ZHAO X S, WANG Y X, SONG H, et al. Effect of Auxiliary Longitudinal Magnetic Field on Overlapping Deposition of Wire Arc Additive Manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(3): 1383-1401.
- [12] 周祥曼,田启华,杜义贤,等.纵向稳态磁场对电弧 增材成形零件表面质量和性能影响的研究[J].机械工 程学报,2018,54(2):84-92.
  ZHOU X M, TIAN Q H, DU Y X, et al. Study of the Influence of Longitudinal Static Magnetic Field on Surface Quality and Performances of Arc Welding Based Additive Forming Parts[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(2): 84-92.

- [13] ZHAO M, CHEN J X, YU M B, et al. Effect of Transverse Magnetic Field on Weld Formation and Microstructure & Properties of High-Speed Hot-Wire Tungsten Inert Gas Welding Joints[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2020, 25(5): 407-414.
- [14] 周祥曼,田启华,杜义贤,等. 外加横向磁场作用电弧增材成形过程中的传热传质仿真[J]. 机械工程学报,2018,54(12):193-206.
  ZHOU X M, TIAN Q H, DU Y X, et al. Simulation of Heat and Mass Transfer in Arc Welding Based Additive Forming Process with External Transverse Magnetic Field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(12):193-206.
- [15] 周祥曼,刘练,陈永清,等.外加变位磁场作用 GTAW 焊接电弧的数值模拟[J]. 三峡大学学报(自然 科学版), 2021, 43(5): 101-106.
  ZHOU X M, LIU L, CHEN Y Q, et al. Numerical Simulation of GTAW Welding Arc under the External Static Magnetic Field of Changing Position[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences),
- [16] ZHOU X M, FU Z C, ZHOU X, et al. Numerical Simulation of Heat and Mass Transient Behavior during WAAM Overlapping Deposition with External Deflection Magnetic Field[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 218: 124780.

2021, 43(5): 101-106.

- [17] 周祥曼,杨胜波,王礴允,等.变位磁场作用电弧增材中电弧和熔池传热与流动数值模拟[J]. 兵器材料科学与工程, 2024, 47(1): 17-24.
  ZHOU X M, YANG S B, WANG B Y, et al. Numerical Simulation of Heat Transfer and Flow of Arc and Molten Pool in Arc Additive under Variable Magnetic Field[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2024, 47(1): 17-24.
- [18] XU G, HU J, TSAI H L. Three-Dimensional Modeling of the Plasma Arc in Arc Welding[J]. 2008, 104(10): 103301.
- [19] LI L M, LI B K, LIU L C, et al. Numerical Modeling of Fluid Flow, Heat Transfer and Arc-Melt Interaction in Tungsten Inert Gas Welding[J]. High Temperature Materials and Processes, 2017, 36(4): 427-439.

- [20] YIN X Q, GOU J J, ZHANG J X, 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(28): 285203.
- [21] JIAN X X, WU C S. Numerical Analysis of the Coupled Arc–Weld Pool–Keyhole Behaviors in Stationary Plasma Arc Welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 84: 839-847.
- [22] XIAO L, FAN D, HUANG J K. Tungsten Cathode-Arc Plasma-Weld Pool Interaction in the Magnetically Rotated or Deflected Gas Tungsten Arc Welding Configuration[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32: 127-137.
- [23] 王新鑫, 樊丁, 黄健康, 等. TIG 焊电弧-熔池传热与流动数值模拟[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 69-78.
  WANG X X, FAN D, HUANG J K, et al. Numerical Simulation of Heat Transfer and Fluid Flow for Arc-Weld Pool in TIG Welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 69-78.
- [24] RAO Z H, HU J, LIAO S M, et al. Modeling of the Transport Phenomena in GMAW Using Argon-Helium Mixtures. Part II-the Metal[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(25/26): 5722-5732.
- [25] HAN Y, CHEN J, LI L Q, et al. Numerical Investigation of Arc-Pool-Metal Vapor Behavior in GTAW with an External Magnetic Field[J]. Metals, 2020, 10(9): 1199.
- [26] WANG X X, LUO Y, FAN D. Investigation of Heat Transfer and Fluid Flow in High Current GTA Welding by a Unified Model[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 142: 20-29.
- [27] HU J, TSAI H L. Heat and Mass Transfer in Gas Metal Arc Welding. Part I: The Arc[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(5/6): 833-846.
- [28] WANG X X, FAN D, HUANG J K, et al. A Unified Model of Coupled Arc Plasma and Weld Pool for Double Electrodes TIG Welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(27): 275202.
- [29] TANAKA M, TERASAKI H, USHIO M, et al. Numerical Study of a Free-Burning Argon Arc with Anode Melting[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23(3): 585-606.