

DOI:10.11784/tdxbz202403024

基于动网格技术的 CMT-WAAM 熔池温度场与流场数值模拟

申俊琦^{1,2}, 张帆^{1,2}, 胡绳荪^{1,2}, 耿辉^{1,2}

(1. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350;

2. 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300350)

摘要: 针对基于冷金属过渡(CMT)技术的镁合金摆动电弧增材制造(WAAM)过程, 采用流体体积(VOF)法和动网格(DM)技术建立了分别考虑熔滴和熔池受力情况的三维瞬态数值模型, 研究了熔滴过渡和熔池流动过程中的温度场和速度场变化。结果表明, 相应试验结果验证了所建立数值模型的有效性, 熔池和熔滴尺寸参数模拟的误差均在 10% 之内。在 CMT-WAAM 开始阶段, 基板表面和焊丝在电弧热作用下熔化分别形成熔池和熔滴。在焊丝向熔池送进过程中, 熔滴不断长大, 并在表面张力作用下长成球形。熔滴金属的热量主要通过热传导的形式向熔池传递, 熔池最高温度随着熔滴金属的过渡而升高, 熔池最高温度可达 2 100.0 K; 随着焊丝的回抽, 熔池最高温度降低至 1 763.6 K。随着焊丝向熔池送进, 熔滴的最大速度从 1.87 m/s 逐渐减小到 1.07 m/s, 而熔池的最大速度仅为 0.87 m/s。当熔滴金属前端与熔池发生接触后, 液态金属的最大速度可达到 4.21 m/s; 随着焊丝的机械回抽, 液态金属的最大速度在 1.69~4.90 m/s 范围内波动。当熔滴与熔池接触发生短路时, 熔滴金属从熔池表面流向熔池底部和熔池两侧, 增强了对熔池底部和熔池两侧的搅拌作用, 使得熔池体积增加; 当熔滴从焊丝端部脱离后, 熔池中液态金属从熔池底部流向熔池表面和熔池两侧, 熔池温度和流体速度随之降低, 从而减缓了熔池体积的增加。此外, 熔池自由表面在摆动电弧作用下呈现波浪式变形。

关键词: 动网格; 电弧增材制造; 熔滴过渡; 熔池流动; 数值模拟

中图分类号: TG402

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)02-0147-10

Numerical Simulation of Temperature and Flow Field of Molten Pool During CMT-WAAM Process Based on Dynamic Mesh Technique

Shen Junqi^{1,2}, Zhang Fan^{1,2}, Hu Shengsun^{1,2}, Geng Hui^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In the weaving wire arc additive manufacturing (WAAM) of magnesium alloy, enhanced by the cold metal transfer (CMT) technique, a three-dimensional transient numerical model is employed to investigate the temperature and velocity fields during the process. Utilizing the volume of fluid (VOF) method and dynamic mesh (DM) technique, this model accounts for the forces exerted on the droplet and molten pool. The model's accuracy is demonstrated through experimental validation, with the simulation parameters related to the molten pool and droplet size showing a margin of error under 10%. In the beginning of CMT-WAAM, the molten pool forms on the substrate and the droplet forms at the wire tip owing to arc heat. As the wire feeds into the molten pool, the droplet expands into a spherical shape driven by surface tension. Heat transfer occurs mainly through thermal conduction, causing the peak temperature of the molten pool to rise to 2 100.0 K with the droplet transfer, then drop to 1 763.6 K as the wire re-

收稿日期: 2024-03-18; 修回日期: 2024-04-09.

作者简介: 申俊琦 (1983—), 男, 博士, 副教授.

通信作者: 申俊琦, shenjunqi@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52075377).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52075377).

tracts. The maximum velocity of the droplet decreases from 1.87 m/s to 1.07 m/s during its incorporation into the molten pool, while the molten pool maintains a maximum velocity of 0.87 m/s. When the droplet meets the molten pool, the maximum velocity of the liquid metal reaches 4.21 m/s. As the wire is withdrawn, this velocity fluctuates between 1.69 m/s and 4.90 m/s. During a short circuit, the metal from the droplet flows from the surface of the molten pool to its bottom and sides, enhancing the stirring effect and increasing the volume of the molten pool. Once the droplet detaches from the wire, the liquid metal moves from the bottom back to the surface and sides of the molten pool, leading to a decrease in temperature and fluid velocity, which moderates the volume of the molten pool. In addition, the free surface of the molten pool exhibits wavy deformation influenced by the weaving arc.

Keywords: dynamic mesh; wire arc additive manufacturing (WAAM); droplet transfer; molten pool flow; numerical simulation

电弧增材制造(wire arc additive manufacturing, WAAM)技术具有成形尺寸大、制造成本低、材料沉积率高等特点^[1],可用于整体结构件的制造^[2].冷金属过渡(cold metal transfer, CMT)技术具有低热输入和无飞溅等优点^[3-4],将该技术应用于 WAAM 过程中,可以解决由于高热输入而产生的晶粒粗大、残余应力和变形等问题^[5-6].因此,CMT 技术在 WAAM 领域得到了广泛的应用.目前,关于 CMT-WAAM 的研究主要集中在成形控制^[7-9]、微观组织和力学性能调控^[10-11]等方面,而关于 CMT-WAAM 过程中熔滴形成、生长和过渡,以及熔滴与熔池之间相互作用的相关研究则相对较少.此外,相关研究结果表明,将摆动电弧引入 WAAM 过程中,可以促进液态金属的铺展,改善沉积金属的成形质量^[12-13].

CMT-WAAM 过程是一个温度场、速度场和力场等多物理场耦合的非线性过程^[14],而使用传统的实验方法难以全面反映上述多个物理场的变化.数值模拟技术通过数值求解方法求解多个物理量,是目前研究 CMT-WAAM 过程中熔滴过渡和熔池流动的重要方法.一些学者^[15-17]通过简化熔滴过渡过程中的熔滴形成和长大以及 CMT 焊丝机械回抽过程,将熔滴视为具有初始轮廓,且具有一定速度和温度的液态金属,并以此建立了三维数值模型;另一些学者^[18]利用基于动网格技术所建立的二维数值模型实现了对 CMT-WAAM 中焊丝回抽过程的模拟,但忽略了熔滴过渡过程中的受力情况.

本文针对镁合金摆动电弧 CMT-WAAM 工艺,建立了相应的三维瞬态数值模型.在分别考虑 CMT-WAAM 过程中熔滴与熔池受力情况的基础上,采用两相流流体体积(volume of fluid, VOF)方法和动网格(dynamic mesh, DM)技术开展了熔滴形成、长大和过渡,以及其与熔池流动过程中的温度场和速度场变化的数值模拟研究.

1 数值模型建立

1.1 控制方程和基本假设

计算流体力学主要通过计算机和数值方法求解质量、动量和能量守恒方程的偏微分方程组,从而得到流场的离散定量描述,相应的数学表达式如式(1)~(3)所示^[19].

质量守恒方程为

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

动量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{v}) - \nabla p + \mathbf{F}_{\text{Darcy}} + \mathbf{F}_1 \quad (2)$$

能量守恒方程为

$$\frac{\partial (\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + q_{\text{loss}} + q_{\text{arc}} \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度; \mathbf{v} 为速度矢量; μ 为金属材料的黏度系数; p 为压力; $\mathbf{F}_{\text{Darcy}}$ 为凝固金属区域的动量源项; \mathbf{F}_1 为液态金属区域各种表面力和体积力产生的动量源项; H 为焓; k 为金属材料的热导率; T 为温度; q_{loss} 为热损失; q_{arc} 为电弧热.

此外,为了简化模型,采用了如下假设和条件进行模型建立:

- (1) 假设熔融液态金属为不可压缩的牛顿流体,且液态金属的流动为层流;
- (2) 材料之间的表面张力系数设为 1.2 N/m,热导率和比热容随温度变化而变化,其他材料参数设为恒定值;
- (3) 采用 Boussinesq 假设计算液态金属的浮力;
- (4) 采用焓-孔隙率法处理熔池边界区域中液态金属凝固过程中的动量损失 $\mathbf{F}_{\text{Darcy}}$;
- (5) 采用双椭球热源模拟电弧热源;忽略金属蒸

发产生的热损失,只考虑对流和辐射引起的热损失;

(6) 假设熔滴的入口温度不变,设为 2 100 K,初始环境温度设为 300 K;

(7) 模型中设置氩气保护气为第 1 相,设置金属为第 2 相.

1.2 计算域与网格划分

使用 Design Model 软件建立如图 1 所示的三维计算域几何模型,其中焊丝高度为 4.4 mm、焊丝半径为 0.6 mm;保护气区域高度为 4.4 mm,区域半径为 7 mm(与喷嘴半径相同);基板尺寸为 38 mm × 30 mm × 5 mm(长 × 宽 × 高).

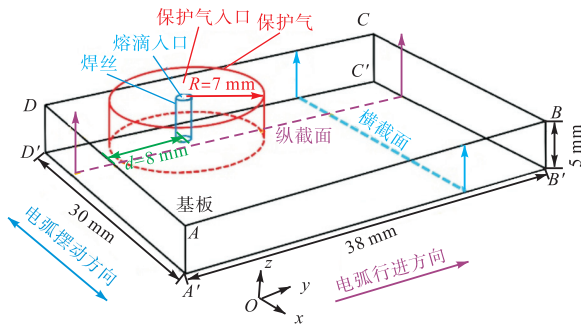


图 1 计算域几何模型

Fig.1 Geometric model of the computational domain

使用 ICEM 软件进行网格划分,网格类型为六面体网格,划分后模型的网格数为 1 884 660,节点数为 1 948 777. 其中,焊丝网格尺寸为 0.02 mm × 0.02 mm × 0.04 mm(长 × 宽 × 高);保护气区域网格尺寸 0.04 mm × 0.04 mm × 0.04 mm;基板区域网格尺寸 0.2 mm × 0.2 mm × 0.4 mm. 几何模型在 Oxz 截面处的网格划分情况如图 2 所示.

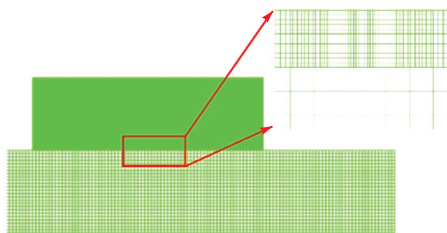


图 2 网格模型

Fig.2 Meshing model

1.3 动网格模型

动网格模型可以用来模拟由于流体边界运动所引起的流域形状随时间变化的流动情况,动网格更新方法包括弹簧光滑法、动态分层法和局部重划法,其中动态分层法可以增加或去除与运动边界相邻的单元网格^[20]. 摆动电弧 CMT-WAAM 过程中包含焊丝回抽和焊枪摆动两个机械运动,因此在模型中采用

Fluent 软件自带的 DEFINE_CG_MOTION 宏对焊丝回抽速度和电弧摆动速度两个参数进行设置,所建立的动网格模型如图 3 所示.

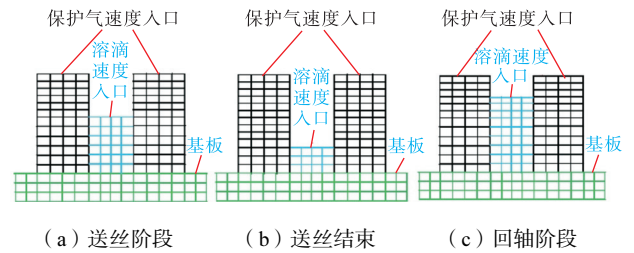


图 3 动网格模型

Fig.3 Dynamic meshing model

1.4 能量源项

一个典型 CMT-WAAM 熔滴过渡周期中的电流和电压的波形如图 4 所示,可以看出,存在电弧燃烧和熔滴短路过渡两个阶段. 在电弧燃烧阶段,熔池主要由电弧加热,相应的热输入可以根据电流和电压的平均值计算得到;而在短路过渡阶段,电弧熄灭,此时熔池主要由过渡熔滴携带的热量加热.

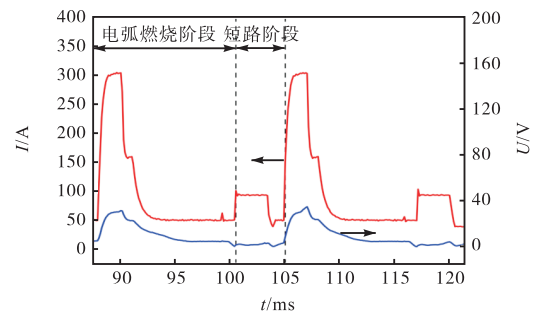


图 4 电参数波形

Fig.4 Electrical parameter waveform

在 CMT-WAAM 过程中,电弧沿摆动路径运动时,电弧热流密度分布呈后宽前窄的双椭球体,电弧能量分布不均匀. 因此,本文中采用 Goldak 双椭球热源模型^[21]模拟 CMT-WAAM 过程中的电弧热源,在模型中以能量源项的形式参与计算,其数学表达式为

$$\begin{cases} q_1 = \frac{6\sqrt{3}f_1Q}{a_1bc\pi\sqrt{\pi}}S_1 & x \geq x_0 + v_x t \\ q_2 = \frac{6\sqrt{3}f_2Q}{a_2bc\pi\sqrt{\pi}}S_2 & x < x_0 + v_x t \end{cases} \quad (4)$$

$$S_1 = \exp\left(-\frac{3(x-x_0-v_x t)^2}{a_1^2} - \frac{3(y-y_0)^2}{b^2} - \frac{3(z-z_0)^2}{c^2}\right) \quad (5)$$

$$S_2 = \exp\left(-\frac{3(x-x_0-v_x t)^2}{a_2^2} - \frac{3(y-y_0)^2}{b^2} - \frac{3(z-z_0)^2}{c^2}\right) \quad (6)$$

式中: S_1 为前半椭球热源形状; S_2 为后半椭球热源形状; $Q = \eta UI$, η 为加热熔池的电弧效率, U 为焊接电压, I 为焊接电流; $(x_0 + v_x t, y_0, z_0)$ 为电弧中心当前坐标; f_1 和 f_2 分别为前后半椭球体的热量分布系数, 且 $f_1 + f_2 = 2$; a_1 、 a_2 、 b 、 c 为热源几何尺寸.

1.5 动量源项

1.5.1 熔滴动量源项

在 CMT-WAAM 熔滴形成、长大和过渡过程中, 作用在熔滴上的力 F_{droplet} 包括重力 F_g 、浮力 F_{buo} 、表面张力 F_{st} 、马兰戈尼力 F_{Ma} 、电磁力 F_m 和电弧等离子拉力 F_{pd} .

$$F_{\text{droplet}} = F_g + F_{\text{buo}} + F_{\text{st}} + F_{\text{Ma}} + F_m + F_{\text{pd}} \quad (7)$$

重力和浮力的计算式分别为

$$F_g = \rho_{\text{metal}} g \quad (8)$$

$$F_{\text{buo}} = -\rho_{\text{metal}} g \beta (T - T_1) \quad (9)$$

式中: ρ_{metal} 为金属密度; g 为重力加速度; β 为热膨胀系数; T 为当前温度; T_1 为液相温度.

表面张力和马兰戈尼力的计算公式分别为

$$\tau_{\text{st}} = \gamma \kappa \quad (10)$$

$$\tau_{\text{Ma}} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial s} \quad (11)$$

式中: γ 为表面张力系数; κ 为界面曲率; s 是指向自由表面的向量.

由于表面张力和马兰戈尼力都是表面力, 不能直接在能量方程中进行计算, 需要采用连续表面力 (continuum surface force, CSF) 模型^[22]将其转化为三维坐标系下的体积力. 使用 CSF 模型转化后的表面张力和马兰戈尼力的体积形式为

$$F_{\text{st}} = \tau_{\text{st}} \nabla F \frac{2\rho}{\rho_{\text{metal}} + \rho_{\text{gas}}} \quad (12)$$

$$F_{\text{Ma}} = \tau_{\text{Ma}} \nabla F \frac{2\rho}{\rho_{\text{metal}} + \rho_{\text{gas}}} \quad (13)$$

式中: ∇F 为第 2 相体积分数梯度; ρ 为两相平均密度; ρ_{gas} 为氩气密度.

根据陈茂爱等^[23]提出的假设, 熔滴所受电磁力 F_m 沿 x 、 y 、 z 轴的分量可表示为

$$F_{\text{mx}} = B_d \left(\frac{rI}{4\pi R_w^2 H_0} - \frac{k_d I r \exp(-k_d r^2)}{4\pi H_0} \right) \frac{x - x_0 - v_x t}{r} \quad (14)$$

$$F_{\text{my}} = B_d \left(\frac{rI}{4\pi R_w^2 H_0} - \frac{k_d I r \exp(-k_d r^2)}{4\pi H_0} \right) \frac{y - y_0 - v_y t}{r} \quad (15)$$

$$F_{\text{mz}} = B_d \left(\left(1 - \frac{z - z_0}{H_0} \right) \frac{I}{2\pi R_w^2} + \frac{k_d I z \exp(-k_d r^2)}{2\pi H_0} \right) \quad (16)$$

$$B_d = \frac{\mu_0 I k_d r}{4\pi} \left(1 - \frac{z}{H_0} \right) + \frac{\mu_0 I z (1 - \exp(-k_d r^2))}{2\pi H_0 r} \quad (17)$$

式中: B_d 为感应磁场强度; R_w 为焊丝半径; H_0 为熔滴长度; k_d 为电流集中系数, 由 $1/\sigma_j^2$ 决定, σ_j 为电流分布半径; μ_0 为磁导率; r 为计算单元距焊丝末端的径向距离; z 为计算单元距焊丝端部的轴向距离; (x_0, y_0, z_0) 为起点坐标; v_x 和 v_y 分别为 x 轴和 y 轴方向的运动速度.

熔滴金属受到的电弧等离子拉力^[19]为

$$F_{\text{pd}} = \frac{C_d A_p \rho_f v_f^2}{2\rho V_d} \quad (18)$$

式中: C_d 为等离子体流动系数; A_p 为等离子体作用面积, 由 $\pi(R_d^2 - R_w^2)$ 确定, R_d 为液滴等效半径; ρ_f 为等离子体密度; v_f 为等离子体速度; V_d 为熔滴体积.

1.5.2 熔池动量源项

在 CMT-WAAM 过程中, 作用在熔池中的力 $F_{\text{moltenpool}}$ 主要包括重力 F_g 、浮力 F_{buo} 、表面张力 F_{st} 、马兰戈尼力 F_{Ma} 、电磁力 F_m 和电弧压力 F_{arc} .

$$F_{\text{moltenpool}} = F_g + F_{\text{buo}} + F_{\text{st}} + F_{\text{Ma}} + F_m + F_{\text{arc}} \quad (19)$$

根据文献^[24], 熔池中的电磁力 F_m 沿 x 、 y 、 z 轴的分量可表示为

$$F_{\text{mx}} = -\frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 \sigma_i^2 r_c} \exp\left(-\frac{r_c^2}{2\sigma_i^2}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{r_c^2}{2\sigma_i^2}\right) \right) \cdot \left(1 - \frac{z_c}{H_1} \right)^2 \frac{x - x_0 - v_x t}{r_c} \quad (20)$$

$$F_{\text{my}} = -\frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 \sigma_i^2 r_c} \exp\left(-\frac{r_c^2}{2\sigma_i^2}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{r_c^2}{2\sigma_i^2}\right) \right) \cdot \left(1 - \frac{z_c}{H_1} \right)^2 \frac{y - y_0 - v_y t}{r_c} \quad (21)$$

$$F_{\text{mz}} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 r_c^2 H_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{r_c^2}{2\sigma_i^2}\right) \right)^2 \left(1 - \frac{z_c - z_0}{H_1} \right) \quad (22)$$

式中: r_c 为计算单元距熔池中心的径向距离; z_c 为计算单元距熔池中心的轴向距离; H_1 为基板厚度; σ_i 为电弧有效半径.

由于在熔滴短路过渡阶段电弧熄灭, 熔池受到的电弧压力为 0, 因此, 熔池表面受到的电弧压力只存在于电弧燃烧阶段. 根据文献^[19], 假设熔池受到的电弧压力呈高斯分布, 受到电流密度的影响, 其大小为

$$P_{arc} = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi\sigma_p^2} \exp\left(-\frac{r_c^2}{2\sigma_p^2}\right) \quad (23)$$

式中 σ_p 为电弧压力分布半径. 利用 CSF 模型将电弧压力转换为对应的体积力为

$$F_{arc} = P_{arc} \nabla F \frac{2\rho}{\rho_{metal} + \rho_{gas}} \quad (24)$$

1.6 边界条件和初始条件

如图 1 所示, 焊丝的上表面为熔滴速度入口, 速度大小为 10 m/min, 方向与焊丝送进时一致, 与焊丝回抽时相反, 熔滴入口温度设为 2100.0 K, 压力为 1 个标准大气压, 第 2 相体积分率设为 1.

保护气区域的上表面(不包含焊丝上表面)为保护气速度入口, 其入口速度 $v(r)$ 按照式(25)^[19]换算, 保护气入口温度设为 300 K, 第 2 相体积分率设为 0; 保护气区域的侧圆面为压力出口, 设为 1 个标准大气压.

$$v(r) = \frac{2Q_g \left[R_n^2 - r^2 + (R_n^2 - R_w^2) \frac{\ln(r/R_n)}{\ln(R_n/R_w)} \right]}{\pi \left[R_n^4 - R_w^4 + \frac{(R_n^2 - R_w^2)^2}{\ln(R_n/R_w)} \right]} \quad (25)$$

式中: Q_g 为保护气流量; R_n 为喷嘴内径.

图 1 所示的 $ABB'A'$ 、 $BCC'B'$ 、 $CDD'C'$ 和 $ADD'A'$ 面为基板壁面, 散热系数设为 30 W/(m²·K), 辐射系数设为 0.85.

1.7 材料属性

使用表 1 设置 AZ91 镁合金的热导率和比热容^[25], 其他材料参数设为恒定值^[26]. 其中, 密度 ρ 为

表 1 AZ91 镁合金参数^[25]

Tab.1 AZ91 magnesium alloy parameters^[25]

温度 T/K	热导率 $k/(W/(m \cdot K))$	比定压热容 $c_p/(J/(kg \cdot K))$
300	156	605.68
350	155	—
400	153	631.44
500	151	655.99
600	149	680.54
700	—	704.84
800	146	729.39
900	—	754.18
923	—	833.66
1 000	—	802.06
1 100	—	766.57
1 300	—	707.24
1 600	—	686.13
2 000	—	685.401
2 300	—	685.401

1 810 kg/m³, 熔化潜热 L_m 为 3.7×10^5 J/kg, 固相温度 T_s 和液相温度 T_l 分别为 740 K 和 870 K, 黏度系数 μ 为 1.72×10^{-5} kg/(m·s), 热膨胀系数 β 为 1.1×10^{-5} K⁻¹, 重力加速度 g 为 9.81 m/s².

2 结果与讨论

2.1 模型验证

采用表 2 中的工艺参数进行镁合金摆动电弧 CMT-WAAM 单道熔敷试验. 摆动路径如图 5 所示, 其中摆动幅度为 5 mm, 摆动频率为 2 Hz, 摆动过程中电弧在 M 、 R 和 L 各点处均停留 0.1 s.

表 2 试验工艺参数

Tab.2 Experimental process parameters

送丝速度/ (m/min)	焊接速度/ (cm/min)	保护气流量/ (L/min)	焊丝半径/ mm
10	40	15	0.6

采用高速摄像采集熔滴过渡过程, 并以此验证模拟结果. 在上述工艺参数下测得 1 个熔滴过渡周期约为 14 ms. 此外, 模型中焊丝回抽时间和速度分别设为 7 ms 和 0.5 m/s, 与动网格模型中参数保持一致.

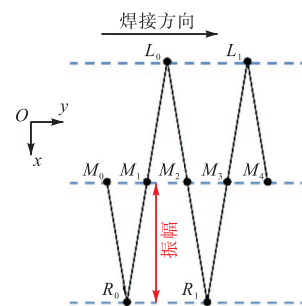


图 5 摆动路径示意

Fig.5 Schematic diagram of the weaving path

图 6 为开始阶段熔池形成时的实际形状与模拟结果对比. 熔池最大宽度的实际值与模拟值分别为 4.28 mm 和 3.90 mm, 误差为 8.88%; 熔池深度的实际

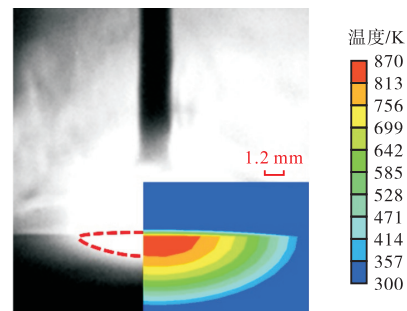


图 6 试验与模拟熔池形状对比

Fig.6 Comparison between experimental and simulated molten pool shapes

值与模拟值分别为 0.70 mm 和 0.68 mm, 误差为 2.86%。两者的模拟误差均保持在 10% 以内。

图 7 为熔滴与熔池刚刚接触时熔滴实际形状与模拟结果对比。熔滴最大直径的实际值与模拟值分别为 1.85 mm 和 1.88 mm, 误差为 1.62%; 熔滴长度的实际值与模拟值分别为 1.60 mm 和 1.56 mm, 误差为 2.50%。两者的模拟误差均保持在 5% 以内。

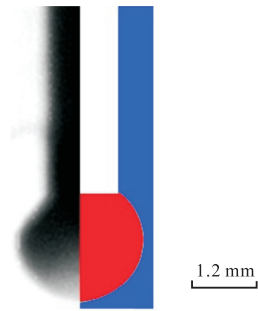


图 7 试验与模拟熔滴形状对比

Fig.7 Comparison between experimental and simulated droplet shapes

2.2 温度场

图 8 为摆动电弧 CMT-WAAM 过程中第 1 个熔滴过渡周期内的温度场变化模拟结果。由图 8(a)可

以看出, 0.7 ms 时基板部分区域在摆动电弧热的作用下发生熔化并形成熔池, 熔池最高温度为 892.3 K, 熔池周围的基板上温度呈椭圆状分布; 焊丝端部在电弧热作用下熔化形成熔滴, 熔滴最高温度为 2 100.0 K。随着焊丝向熔池送进, 熔池受到电弧热作用产生热积累, 熔池最高温度达到 906.5 K, 熔池周围基板的受热区域扩大, 熔滴在表面张力作用下长大成球形, 如图 8(b)所示。6.2 ms 时, 熔滴最大直径达到 1.86 mm, 熔滴前端与熔池发生接触; 随着熔滴向熔池中过渡, 熔滴携带的热量传至熔池中导致熔池温度升高, 7.0 ms 时熔池最高温度达到 2 100.0 K, 如图 8(d)所示。之后, 由于焊丝的机械回抽作用, 熔滴金属被拉长形成液桥并产生缩颈现象; 同时, 熔池温度也开始降低, 8.2 ms 时熔池最高温度降为 2 095.9 K。当熔滴金属完全进入熔池后, 液态金属在基板上铺展流动, 熔池最高温度进一步减小, 14.0 ms 时熔池最高温度降为 1 763.6 K, 这是因为一方面熔池周围的温度较低的基板金属以热传导形式消耗了部分熔池热量, 另一方面焊丝回抽过程中电弧对熔池的热作用减小。

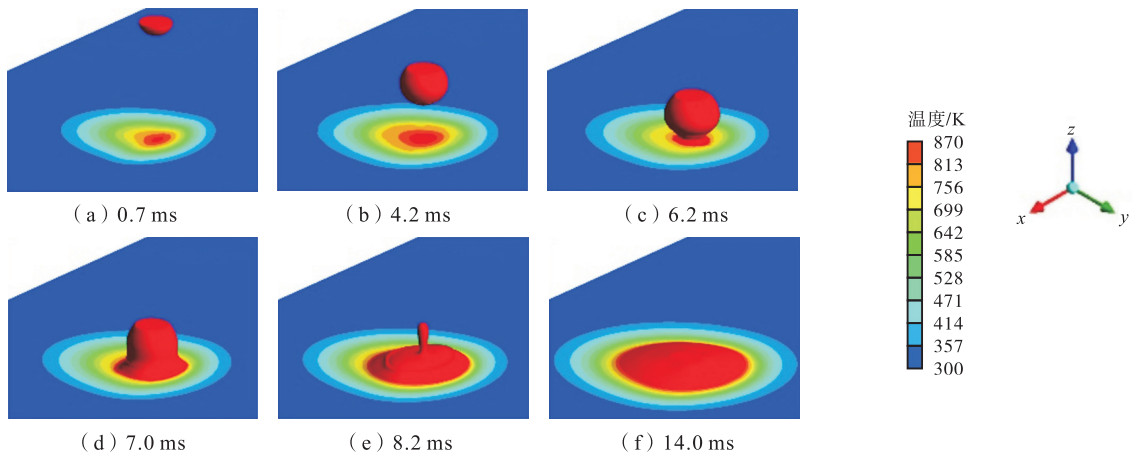


图 8 第 1 个熔滴过渡周期内温度分布

Fig.8 Temperature distribution during the first droplet transfer process

图 9 和图 10 显示了摆动电弧 CMT-WAAM 过程中第 1 个熔滴过渡周期内熔池体积和基板温度分布结果。由图可以看出, 在熔滴前端与熔池发生接触之前, 少量基板金属在电弧热作用下熔化形成熔池, 此时熔池体积变化较小; 在 0.7 ms 时, 熔池体积仅为 $2.40 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ 。在 6.2 ~ 9.1 ms 时, 熔滴金属携带大量的热量进入熔池, 增加了熔池中液态金属体积; 同时, 基板在电弧热和熔滴热的共同作用下进一步发生熔化, 使得熔池体积增大, 熔池体积从 $9.42 \times 10^{-1} \text{ mm}^3$ 增加至 8.89 mm^3 。随后, 熔池体积继续增大, 但

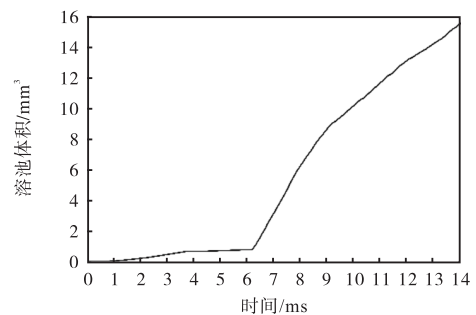


图 9 不同时刻熔池体积变化

Fig.9 Changes of volume of molten pool at different times

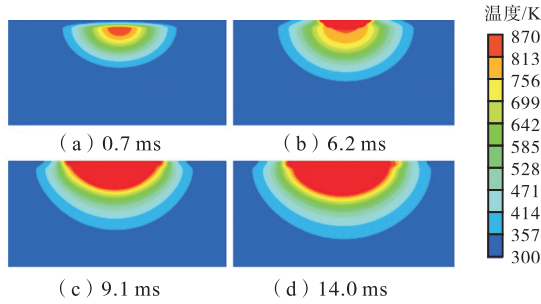


图 10 不同时刻基板横截面温度分布

Fig.10 Temperature distribution on substrate cross section at different times

其增长率有所降低,这是由于液态金属在熔池中铺展流动时温度逐渐降低,对周围基板的热作用逐渐减小,从而造成基板熔化速率减小;在 14.0 ms 时,熔池体积为 15.53 mm^3 .

2.3 速度场

图 11 和图 12 为摆动电弧 CMT-WAAM 过程中第 1 个熔滴过渡周期内液态金属最大速度的模拟结果.如图 12(a)、(b)所示,在熔滴前端与熔池发生接触之前,由于熔滴在表面张力作用长大并保持为球形,熔滴金属的流速逐渐减小,其最大流速从 1.87 m/s 逐渐减小至 1.07 m/s ;而此时熔池金属的最大流速仅为 0.87 m/s .当熔滴与熔池接触后,由于熔

滴金属的过渡使得熔池体积增加,同时熔池中液态金属受到的驱动力也有所增大,因此液态金属(熔滴+熔池)速度增加,其最大速度从 1.41 m/s 增加到 4.21 m/s ,如图 12(c)、(d)所示.在 7.0 ms 以后,焊丝的机械回抽作用在一定程度上降低了熔滴金属进入熔池的速度;但熔滴脱离焊丝端部后在重力加速度下加速进入熔池,对熔池表面又会产生冲击作用,从而增大流体速度,因此液态金属的最大速度在 $1.69 \sim 4.90 \text{ m/s}$ 范围内发生波动,如图 12(e)、(f)所示.在 9.0 ms 后,熔滴金属全部进入熔池,熔池金属的流速受到熔池温度降低的影响,其最大速度从 2.64 m/s 逐渐减小到 0.21 m/s ,如图 12(g)、(h)所示.

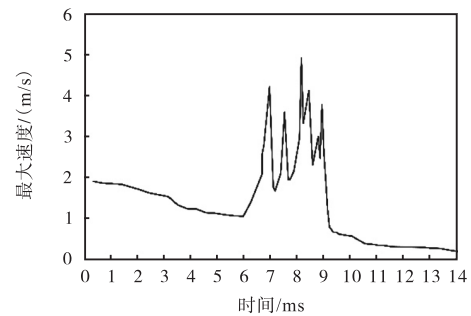


图 11 不同时刻液态金属最大速度曲线

Fig.11 Maximum velocity curve of liquid metal at different times

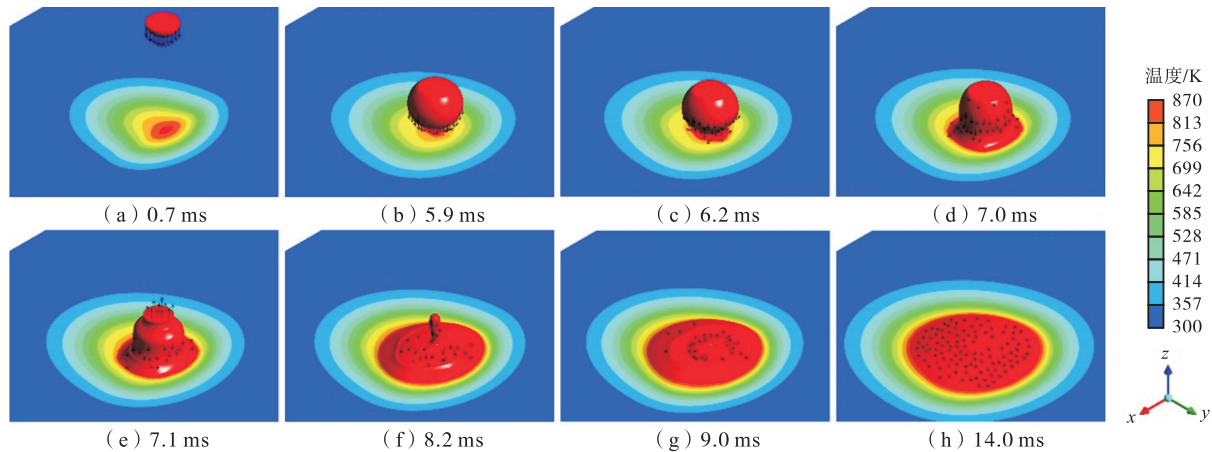


图 12 不同时刻液态金属速度分布

Fig.12 Velocity distribution of liquid metal at different times

流线是流场中不同流体质点在同一时刻所组成的曲线,曲线上任一点的切线为该点流体在这一时刻的速度方向,流线越密集表示流速越大.图 13 为第 1 个熔滴过渡周期内熔池金属的流线分布结果,图中熔池横截面(图 1 中 Oxz 截面)为垂直于焊接方向的截面,纵截面(图 1 中 Oyz 截面)为平行于焊接方向的截面.在 4.2 ms 时,基板在电弧热作用下发生熔化形成熔池,液态金属主要从熔池表面流向熔池两侧以及

熔池后方,此时流体流动对熔池底部的搅动作用较小,熔深和熔池体积较小.在 8.1 ms 时,熔滴金属进入熔池中,液态金属沿熔池表面-熔池底部-熔池侧面流动,液态金属对熔池底部的搅动作用加强,从而使熔深增加;同时,大量液态金属受到电弧前进的影响流向熔池后方,少量金属流向熔池前方,使得周围基板发生熔化.在 11.5 ms 时,熔池金属从熔池底部流向熔池表面后,再流向熔池两侧,在熔池横截面上

可以观察到两个不对称的马兰戈尼环流,这主要是由于摆动电弧的影响所致.在熔池纵截面上,熔池后方的金属在电磁力和马兰戈尼力等作用下沿熔池底部-熔池表面-熔池后方流动,形成一个封闭的环流,此时金属的流动会将熔池底部的热量带走,从而减缓熔深和熔池体积的增加;由于从熔池底部流出的金属被熔池后方的环流带走,因此熔池前方的金属沿熔池前端-熔池底部-熔池表面流动,形成了一个半封闭的环流.

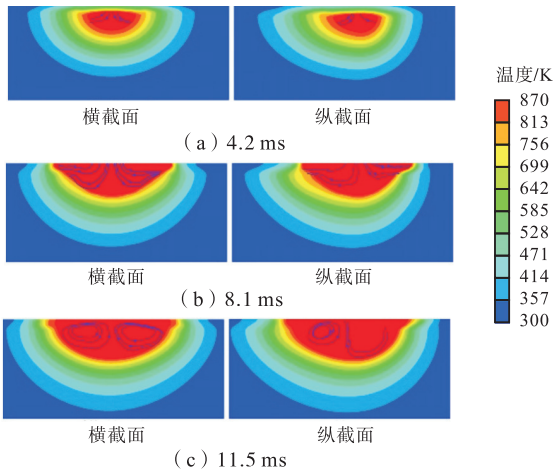


图 13 熔池流线分布

Fig.13 Streamline distribution of molten pool

由图 14 可以看出,在第 2 个熔滴过渡周期的电弧燃烧阶段,随着电弧向熔池逐渐靠近,熔池自由表面在电弧压力作用下发生了下塌变形,熔池表面中心位置的液态金属被推向熔池两侧,使得熔池两侧凸起.在电弧摆动前进过程中,熔池表面中心处受到的电弧压力逐渐减小,而电弧摆动一侧的金属受到的电弧压力增大,使得熔池外围的金属被推向熔池中心,之前形成的下塌变形被填充.熔池表面在摆动电弧作用下,发生了波浪式变形.

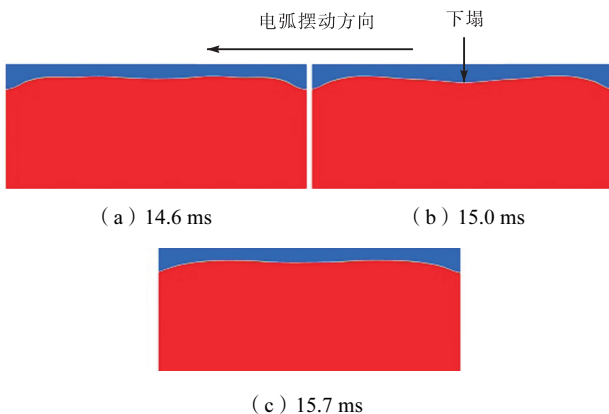


图 14 熔池表面变形

Fig.14 Deformation of the molten pool surface

3 结论

(1) 基于动网格技术建立了考虑了熔滴和熔池受力情况的镁合金摆动电弧 CMT-WAAM 三维数值模型,相应试验验证了模型的有效性,熔池形状参数和熔滴形状参数模拟误差均能够控制在 10% 以内.

(2) 在 CMT-WAAM 熔滴过渡过程中,基板部分区域在电弧热作用下熔化形成熔池,熔池周围形成椭球形温度分布,同时熔滴在焊丝端部形成并长大成球形;熔池最高温度随着焊丝的送进逐渐升高,当焊丝运动至最低端时,熔池最高温度达到 2 100.0 K,之后随着焊丝的回抽,熔池最高温度逐渐降低至 1 763.6 K.

(3) 在焊丝向熔池送进过程中,熔滴金属的流速逐渐减小;当熔滴接触到熔池金属后,受到熔池驱动力影响,液态金属的最大速度增大到 4.21 m/s;在随后的焊丝回抽过程中,流体速度在一定范围内发生波动;熔滴过渡完成后,熔池温度开始降低,熔池中液态金属的最大速度逐渐减小至 0.21 m/s.

(4) 熔滴金属向熔池的过渡加强了液态金属对熔池底部和两侧的搅动作用,使得熔池体积增加;在焊丝回抽后期,熔池中形成马兰戈尼环流,造成熔池温度和流体速度有所减小,从而使得熔池体积的增加有所减缓.

(5) 熔池自由表面在摆动电弧作用下发生了波浪式变形.

参考文献:

[1] 程方杰, 李璐菲, 武少杰. 基于逐层建模的电弧增材制造过程有限元仿真方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2022, 55(4): 337-342.
Cheng Fangjie, Li Lufei, Wu Shaojie. Finite element simulation method of wire arc additive manufacturing process based on layer-by-layer modeling[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2022, 55(4): 337-342 (in Chinese).

[2] Wang J, Zhao Z Y, Bai P K, et al. Microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy prepared using wire arc additive manufacturing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 939: 168665.

[3] 徐连勇, 邵春盛, 荆洪阳, 等. 焊接方法对镍基合金耐晶间腐蚀性能的影响[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2023, 56(1): 11-17.
Xu Lianyong, Shao Chunsheng, Jing Hongyang, et al.

- Effects of different welding methods on the intergranular corrosion resistance performance of nickel-based alloy[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2023, 56(1): 11-17(in Chinese).
- [4] 吕小青, 王壮壮. 正负极性 CMT 铝焊丝熔滴体积增长量分析[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2023, 56(4): 430-435.
Lü Xiaoqing, Wang Zhuangzhuang. Analysis of droplet volume increasing amount of positive and negative electrode on cold metal transfer welding of aluminum wire[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2023, 56(4): 430-435(in Chinese).
- [5] Ola O T, Valdez R L, Oluwasegun K M, et al. Process variable optimization in the cold metal transfer weld repair of aerospace ZE41A-T5 alloy using central composite design[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105: 4827-4835.
- [6] Zhang H, Hu S S, Wang Z J, et al. The effect of welding speed on microstructures of cold metal transfer deposited AZ31 magnesium alloy clad[J]. *Materials & Design*, 2015, 86: 894-901.
- [7] Qi K, Li R F, Hu Z X, et al. Forming appearance analysis of 2205 duplex stainless steel fabricated by cold metal transfer(CMT) based wire and arc additive manufacture(WAAM) process[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 31(6): 4631-4641.
- [8] 张金田, 王杏华, 王涛, 等. 单道多层电弧增材制造成形控制理论分析[J]. *焊接学报*, 2019, 40(12): 63-67.
Zhang Jintian, Wang Xinghua, Wang Tao, et al. Research on forming control for single-pass multi-layer of WAAM[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(12): 63-67(in Chinese).
- [9] Ding D H, Yuan L, Huang R, et al. Corner path optimization strategy for wire arc additive manufacturing of gap-free shapes[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 85: 683-694.
- [10] 叶凡凡. 基于 CMT 电弧增材制造 308L 不锈钢组织及力学性能研究[D]. 镇江: 江苏科技大学材料科学与工程学院, 2022.
Ye Fanfan. Research on the Microstructure and Mechanical Property of 308L Stainless Steel Produced by CMT Wire Arc Additive Manufacturings[D]. Zhenjiang: School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, 2022(in Chinese).
- [11] 方学伟, 白浩, 姚云飞, 等. 冷金属过渡电弧增材制造多道搭接工艺研究[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(1): 141-147.
Fang Xuewei, Bai Hao, Yao Yunfei, et al. Research on multi-bead overlapping process of wire and arc additive manufacturing based on cold metal transfer[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(1): 141-147(in Chinese).
- [12] Xu X F, Ding J L, Ganguly S, et al. Preliminary investigation of building strategies of maraging steel bulk material using wire + arc additive manufacture[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28: 594-600.
- [13] 李玉飞. 电弧增材制造 5B06 铝合金工艺及性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学光学与电子信息学院, 2017.
Li Yufei. Process and Property Study on Wire Arc Additive Manufacturing of 5B06 Aluminum Alloy[D]. Wuhan: School of Optics and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, 2017(in Chinese).
- [14] 欧文敏. MIG 电弧增材制造过程数值模拟及成形均匀性调控研究[D]. 南京: 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 2020.
Ou Wenmin. Numerical Simulation of Deposit Morphology and Uniformity Regulation Research During MIG Wire Arc Additive Manufacturing[D]. Nanjing: College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020(in Chinese).
- [15] 黄如峰, 伊浩, 曹华军, 等. 倾斜基面电弧增材制造熔池形貌演变机制研究[J]. *铸造技术*, 2023, 44(9): 821-830.
Huang Rufeng, Yi Hao, Cao Huajun, et al. Research on the morphology evolution mechanism of molten pool on inclined surface in wire arc additive manufacturing[J]. *Foundry Technology*, 2023, 44(9): 821-830(in Chinese).
- [16] Wang N, Shen J Q, Hu S S, et al. Numerical analysis of the TIG arc preheating effect in CMT based cladding of Inconel 625[J]. *Engineering Research Express*, 2020, 2(1): 015030.
- [17] 姚鹤. 铝/钢异种金属 CMT 焊熔池温度场及流场的研究[D]. 镇江: 江苏科技大学材料科学与工程学院, 2016.
Yao He. The Research of Molten Pool Temperature Field and Fluid Field of CMT Welding Between Aluminum Al-

- loy and Steel[D]. Zhenjiang: School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, 2016 (in Chinese).
- [18] 赵文勇, 曹熙勇, 杜心伟, 等. CMT 电弧增材制造过程传热传质数值模拟[J]. 机械工程学报, 2022, 58(1): 267-276.
- Zhao Wenyong, Cao Xiyong, Du Xinwei, et al. Numerical simulation of heat and mass transfer in CMT-based additive manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(1): 267-276 (in Chinese).
- [19] Zhao W Y, Wei Y H, Long J W, et al. Modeling and simulation of heat transfer, fluid flow and geometry morphology in GMAW-based wire arc additive manufacturing[J]. Welding in the World, 2021, 65(8): 1571-1590.
- [20] ANSYS Inc. Ansys fluent theory guide[EB/OL]. <https://www.ansys.com>, 2022-07-01.
- [21] Fang X W, Zhang L J, Yang J N, et al. Effect of characteristic substrate parameters on the deposition geometry of CMT additive manufactured Al-6.3%Cu alloy[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 162: 114302.
- [22] Brackbill J U, Kothe D B, Zemach C. A continuum method for modeling surface tension[J]. Journal of Computational Physics, 1992, 100(2): 335-354.
- [23] 陈茂爱, 武传松, 廉 荣. GMAW 焊接熔滴过渡动态过程的数值分析[J]. 金属学报, 2004, 40(11): 1227-1232.
- Chen Mao'ai, Wu Chuansong, Lian Rong. Numerical analysis of dynamic processes of metal transfer in GMAW[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2004, 40(11): 1227-1232 (in Chinese).
- [24] Kumar A, Debroy T. Calculation of three-dimensional electromagnetic force field during arc welding[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 94(2): 1267-1277.
- [25] Bannour S, Abderrazak K, Mhiri H, et al. Effects of temperature-dependent material properties and shielding gas on molten pool formation during continuous laser welding of AZ91 magnesium alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(8): 2459-2468.
- [26] Abderrazak K, Bannour S, Mhiri H, et al. Numerical and experimental study of molten pool formation during continuous laser welding of AZ91 magnesium alloy[J]. Computational Materials Science, 2009, 44(3): 858-866.

(责任编辑: 田 军)