

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.01.012

镁合金在冷金属过渡电弧增材制造成形过程中的数值模拟

王天琪, 靖雯, 何俊杰

(天津工业大学 机械工程学院, 天津 300387)

摘要: 针对镁合金在冷金属过渡(CMT)电弧增材制造成形过程中熔池精度难于控制、结构件成形质量差等问题,建立了三维瞬态数值模型,研究了增材过程中的熔池流动及传热过程。引入周期性系数加入双椭圆热源中,得到了更加符合实际CMT焊接过程的热源模型,并利用连续表面力思想将其转化为体热源加载在相界面;预测了焊缝和熔池的形状和尺寸,并与试验结果进行了比较;计算了同一焊接速度下不同焊接电流对焊缝成形的影响。结果表明:熔池内部主要受马兰戈尼力影响在熔池后方产生逆时针流动;将模拟结果与试验进行对比发现,焊接电流为129 A时熔宽误差约为1.13%,余高误差约为5.49%,熔深误差约为5.03%,验证了模型的准确性;相同焊接速度下,随着焊接电流的增大,焊缝宽高比以及熔深均增加。

关键词: 镁合金;冷金属过渡;熔池;焊缝成形;增材制造

中图分类号: TG457.19

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)01-0083-08

Numerical simulation of magnesium alloy in CMT arc additive manufacturing forming process

WANG Tianqi, JING Wen, HE Junjie

(School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: A three-dimensional transient numerical model was established to address the issues of difficult control of molten pool precision and poor forming quality of structural parts during the cold metal transition (CMT) arc additive manufacturing of magnesium alloy. The flow and heat transfer of the molten pool during the additive manufacturing process were studied. A periodic coefficient was introduced into the double elliptic heat source to obtain a heat source model more consistent with the actual CMT welding process, and the continuous surface force was used to convert it into a body heat source loaded at the phase interface. The shape and size of the weld seam and molten pool were predicted and compared with experimental results. Furthermore, the effects of different welding currents on the weld seam formation at the same welding speed were calculated. The results show that the interior of the melt pool is mainly influenced by Marangoni forces, which produce counterclockwise flow at the back of the pool. The simulation results were compared with the experimental results, and when the welding current was 129 A, the error of melting width was about 1.13%, the error of residual height was 5.49%, and the error of melting depth was 5.03%, which verified the accuracy of the model. At the same welding speed, the ratio of weld width to height and the depth of fusion increase with the increase of current.

Key words: magnesium alloy; cold metal transfer(CMT); molten pool; weld forming; additive manufacturing

镁合金具有比强度和比刚度高、密度低、电磁屏蔽性和加工性良好等特点,多用于汽车及航空航天等大型结构件的生产^[1-2]。增材制造技术堆积效率高、成

本低,且能够生产大型零部件。然而,由于镁合金的热膨胀系数大,熔点低,传统电弧增材方式热输入量大,在焊接过程中易引起飞溅、夹渣、裂纹等,影响成形件

收稿日期: 2022-11-17

基金项目: 天津市科技特派员项目(20YDTPJC00780);天津市“项目+团队”重点培养专项资助项目(XC202053);天津市教委科研项目(2019KJ011)

通信作者: 王天琪(1981—),男,博士,副教授,主要研究方向为金属电弧增材制造、焊接自动化控制技术。E-mail: wtq0622@163.com

质量^[3]。冷金属过渡(CMT)技术通过控制焊丝的抽送,实现焊接过程的冷-热交替,大幅降低热输入并减少飞溅,适合低熔点金属的电弧增材制造^[4-5]。因此,利用CMT技术能够实现大型复杂镁合金结构件的生产制造。然而在镁合金CMT增材过程中存在多个物理场的耦合,且熔池内部行为复杂,易导致不理想的焊缝形貌。因此,需通过数值模拟的方式分析CMT增材过程中的熔池流动及传热传质行为等,预测镁合金的成形尺寸并改善成形质量^[6]。

Cao等^[7]将建立的三维CMT电弧增材数值模型与实验对比,研究了不同倾斜表面熔池的演变机理,提出了抑制非对称熔池形态的成形策略。Cadiou等^[8]利用COMSOL建立了二维脉冲电弧送丝增材制造技术(WAAM)模型,研究了电弧及熔池的传热和流动,分析了熔滴过渡对熔池流动和形状的影响。随后又通过建立CMT技术增材制造三维瞬态模型,将熔滴形成、焊丝回抽及液态金属沉积过程完全耦合,分析了焊丝行为及其对熔池的影响^[9]。王岑等^[10]模拟了CMT焊接镁/钛异种金属的温度场,得出了AZ31B镁合金温度变化特点。夏胜全等^[11]根据建立的CO₂短路过渡焊接三维模型,分析了熔池温度场和流场的瞬态变化。Bai等^[12]建立了等离子弧焊接(PAW)三维瞬态模型,分析了单道多层沉积过程中的温度及流体流动演变。Huang等^[13]采用实时X射线直接观测法研究了熔池流动,对了解熔池行为的复杂物理过程有重要意义。周祥曼等^[14]建立了三维磁流体动力学模型,研究了相同熔积电流不同熔积方式下不同层焊缝形貌对电弧形态及物理量的影响。Hu等^[15]通过观察DC-CMT与脉冲CMT焊接试验中的焊丝实时动态行为和熔滴过渡,分析了AZ31镁合金CMT焊接过程的电弧特性。基于此,本文通过建立三维CMT增材过程的瞬态模型,分析AZ31B镁合金熔池的流动特点和传热过程,并对不同焊接电流下的焊缝成形进行预测。

1 CMT数值模型

CMT增材是多物理场耦合的复杂过程,通过监测电弧和焊丝运动实现熔滴短路过渡,其焊接过程呈周期性循环:焊丝向前进给,电弧产生,电流电压达到最大值,焊丝端部熔化,在各种力作用下形成熔滴;熔滴接触熔池时发生短路,电弧熄灭,电流电压均降至最低,焊丝回抽,熔滴脱落进入熔池。

对建立的模型进行以下假设:计算区域均视为流体;熔池中的流体流动为黏性不可压缩的牛顿层流;熔滴温度为恒定值;忽略熔池中的电磁力^[16];不考虑镁

合金蒸汽及氧化的影响。

1.1 控制方程

从上述假设可知,CMT增材制造镁合金过程满足质量、动量和能量三大守恒方程。控制方程组在整个流体域进行计算。

连续性方程:

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

式中: \mathbf{v} 为速度矢量。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{v}) + S \quad (2)$$

式中: S 为动量源项,即

$$S = \rho \mathbf{g} + F_t + F_s + F_m + F_{ap} + F_{as} + F_p + F_b \quad (3)$$

式中: p 为压力; μ 为流体黏度; F_p 为等离子流拉力; F_b 为浮力; F_s 为表面张力; F_t 为固液区阻力; F_m 为马兰戈尼力; F_{ap} 为电弧压力; F_{as} 为电弧剪切力。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_a + S_m \quad (4)$$

式中: h 为焓; k 为导热系数; S_a 为电弧热输入能量源项; S_m 为对流和辐射热损失能量源项。

流体体积法(VOF)是对熔池—气体表面进行追踪时常用的方法。通过引入函数 $\lambda(x, y, z)$ 来追踪三维模型中自由表面位置。满足以下守恒方程:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial t} + u \frac{\partial \lambda_i}{\partial x} + v \frac{\partial \lambda_i}{\partial y} + w \frac{\partial \lambda_i}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

式中: λ_i 为单元内第 i 相流体体积分。

1.2 动量源项

熔池自由表面的驱动力以源项的形式加载在动量方程中。熔池受到的表面张力由表面张力系数 γ 和自由表面曲率 κ 的乘积表示^[17]。

由于受移动热源的影响,熔池表面温度分布不均匀,产生表面张力梯度引起马兰戈尼(Marangoni)对流,计算公式为:

$$F_m = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{\tau}} \quad (6)$$

式中: $\boldsymbol{\tau}$ 为熔池表面切向矢量。

熔池表面受到的电弧压力一般近似为高斯分布。表达式为:

$$F_{ma} = p_{max} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_p^2}\right) \quad (7)$$

式中: p_{max} 为最大电弧压力,由表示 $p_{max} = \frac{1}{2} \rho_f v_f^2$; ρ_f 为等离子体密度; v_f 为等离子体流速; r 在此模型中为 xz 平面半径值。

电弧剪切力可用下式表示:

$$F_{as} = \begin{cases} s_{\max} \exp\left(-\frac{(r-0.001)^2}{2\sigma_p^2}\right), x \geq 0 \\ s_{\max} \exp\left(-\frac{(r+0.001)^2}{2\sigma_p^2}\right), x < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: σ_p 为电流密度分布参数; s_{\max} 为最大电弧剪切力。

根据电弧力的作用形式, 电弧两端轴向的受力不一致形成压力差, 使电弧对熔滴产生推力即等离子流拉力^[18]。

熔池内部浮力采用 Boussinesq 假设, 计算公式为:

$$F_b = \rho\beta(T - T_m)g \quad (9)$$

式中: ρ 为液体密度; β 为热膨胀系数; T_m 为金属熔点。

将镁合金基板固液两相均视为流体, 其熔化与凝固过程通过焓-孔隙度法模拟。此方法将动量衰减项加入动量方程中, 使糊状区和固体区受到阻力的影响^[19]。单元内孔隙率即液相体积分数 α 随糊状区温度线性变化, 满足:

$$\alpha = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_L - T_s} & T_s \leq T \leq T_L \\ 1 & T > T_L \end{cases} \quad (10)$$

式中: T 为环境温度; T_s 为工件的固相线温度; T_L 为液相线温度。

熔池受到的表面张力、马兰戈尼力、电弧压力和电弧剪切力等表面力通过连续表面力法(CSF)转化为熔池区域的体积力^[20], 可用下式表示:

$$F_{\text{body}} = F|\nabla\lambda| \frac{\lambda\rho_s + (1-\lambda)\rho_g}{2} \quad (11)$$

式中: F 表示各驱动力; λ 为体积分数; ρ_s 表示固相平均密度; ρ_g 表示气相平均密度。

1.3 能量源项

根据 CMT 焊接短路的特点, 在实际焊接时电弧热输入较小, 热源作用在基板表面, 因此可以选取面热源模型表示电弧的能量输入。电弧沿焊接方向移动时, 受焊接速度的影响, 电弧前后加热区域不一致, 热源分布前短后长, 因此热源呈双椭圆模型分布。

引入周期系数 φ 加入双椭圆热源模型中, 建立更符合 CMT 周期性过程的热源模型。前后部热流密度分布表达式分别为:

$$\begin{cases} q_1(x, y) = \frac{6\varphi Q_1}{\pi a_1 b} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_1^2} - \frac{3y^2}{b^2}\right) \\ q_2(x, y) = \frac{6\varphi Q_2}{\pi a_2 b} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_2^2} - \frac{3y^2}{b^2}\right) \end{cases} \quad (12)$$

式中: a_1 和 a_2 分别表示双椭圆前后半轴长度; b 为双椭圆的短半轴; Q_1 和 Q_2 分别表示双椭圆前后半轴的电弧功率。

利用高速摄像机采集熔滴电弧图像并观察其周期, 以电流 129 A 为例, 观察到的 CMT 焊接周期为 18 ms, 周期性函数表示为:

$$\varphi = \frac{1 + \sin[369(t + 0.006)]}{2} \quad (13)$$

采用的双椭圆面热源需利用连续表面力思想通过体热源的方式加载在相界面区域^[21], 表达式为:

$$S_{\text{body}} = q|\nabla\lambda| \frac{\lambda\rho_s + (1-\lambda)\rho_g}{2} \quad (14)$$

CMT 堆焊过程中, 镁合金内部存在不均匀的温度场, 热量在不同温度区域由高向低传导^[22], 在此过程中会产生大量的热损失, 其中以基板的对流和辐射损失为主^[23]。对流与辐射表达式分别如下:

$$q_c = -\delta(T - T_e) \quad (15)$$

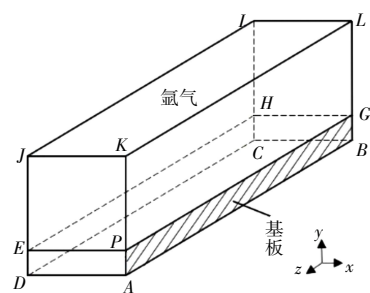
$$q_r = -\varepsilon C_0(T^4 - T_e^4) \quad (16)$$

式中: δ 为对流换热系数; ε 为辐射系数, 取值 0.85; C_0 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数; T 为表面温度; T_e 为环境温度。

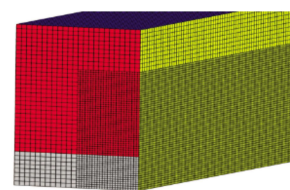
相界面处的热损失需要同热源一样通过类似连续表面力的思想加载其中。

1.4 网格划分及边界条件

针对 CMT 堆焊镁合金过程建立如图 1 所示的三维轴对称模型, 其中包括氩气和基板两部分。模型尺寸为 80 mm × 24 mm × 16 mm, 其中 ABCD-EFGH 为 3 mm 厚的基板区域, ABLK 为对称面。由于三维模型计算复杂, 耗时较长, 且为保证能够模拟出熔滴与熔池变化的细节, 对模型靠近焊缝中心位置进行网格加密, 并采用全结构化网格。



(a) 模型示意



(b) 模型网格划分

图 1 三维数值模型

Fig.1 Three-dimensional numerical model

使用的焊丝与基板均为 AZ31B 镁合金, 氩气作为

保护气体,表 1 为材料热物性参数。

表 1 AZ31B 镁合金及氩气热物性参数

Tab.1 Thermo-physical parameter of AZ31B magnesium alloy and argon

材料	AZ31B ^[24]	氩气
密度/(kg·m ⁻³)	1 774	0.05
固相线温度/K	839	/
液相线温度/K	903	/
比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	C _p (T)	520.64
热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	k(T)	0.015 8
黏度/(Pa·s)	μ(T)	2.125×10 ⁻⁵
表面张力系数/(N·m ⁻¹)	γ(T)	/
热膨胀系数/K ⁻¹	2.6×10 ⁻⁵	/
熔化潜热/(J·kg ⁻¹)	340 000	0

模拟所用边界条件如表 2 所示,通过对流和辐射边界条件来描述基板外部边界热损失。

表 2 边界条件

Tab.2 Boundary conditions

边界	类型	速度/(m·s ⁻¹)	温度/K
ABCD, ADEF CDEH, BCHG	壁面	0	$-k \frac{\partial T}{\partial n} = \delta(T - T_c) + \varepsilon C_0(T^n - T_c^n)$
IJKL, EFKJ, EHIJ, GHIL	压力出口	$\frac{\partial v}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$
ABLK	对称面	$\frac{\partial v}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$

2 结果与分析

2.1 模拟结果分析

利用 Fluent 对镁合金 CMT 增材时的成形过程进行模拟,采用基于压力的 Simple 算法,通过调整时间

步将库朗数控制在 1 以下,保证计算收敛。

采用直径为 1.2 mm 的镁合金焊丝,焊接速度为 0.014 m/s,送丝速率为 10 m/min,电流为 129 A,在保护气流量为 20 L/min 的条件下进行模拟,并以相同参数进行试验。

镁合金 CMT 增材过程中不同时刻焊缝形貌变化及温度场分布情况如图 2 所示。电弧附近温度最大,而基板的温度较为均匀,这是由于镁合金热导率较大,且基板厚度较薄,可以迅速传递热量。焊接过程结束后,焊缝尾部未被液态镁合金的回流填充而形成凹坑。

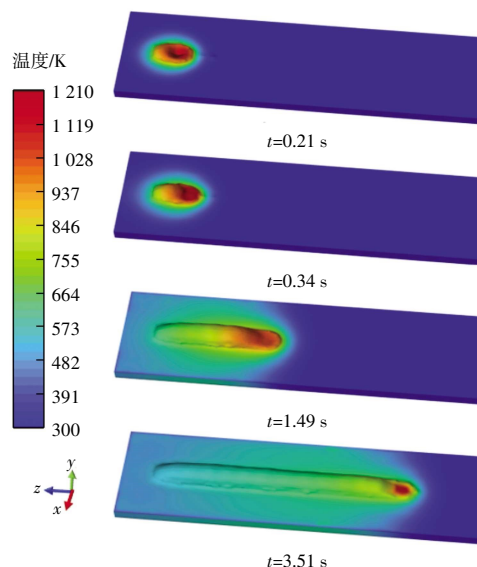


图 2 不同时刻堆焊过程熔池和焊缝成形三维视图

Fig.2 3D view of molten pool and weld forming in surfacing process at different times

图 3 所示为 2.474 s 开始的一个周期内熔滴转移模拟过程。

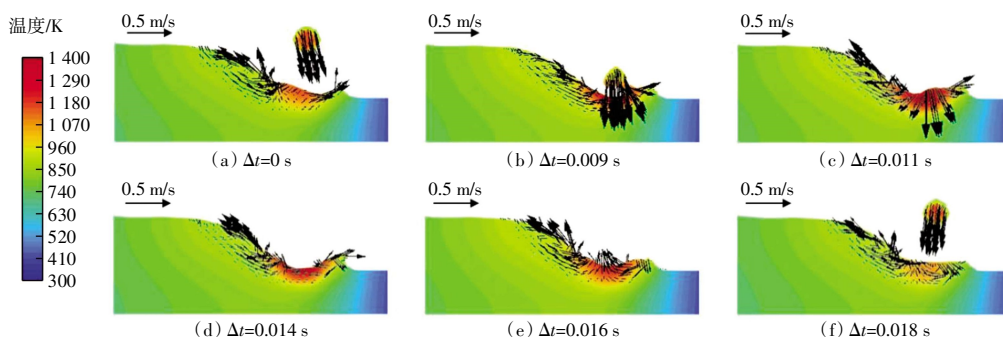


图 3 t=2.474 s 后循环周期内熔滴转移过程纵截面

Fig.3 Longitudinal section of droplet transfer process in cycle after t=2.474 s

由图 3 可见:图 3(a) Δt = 0 s 时熔滴生成,在电弧压力及等离子流拉力作用下向熔池转移,受上一循环周期影响,大量液态镁合金向熔池后方流动,少量流向熔池前方;图 3(b)熔滴开始接触熔池,此时熔滴速

度最大,为 0.652 m/s;图 3(c)熔滴完成向熔池的过渡,熔池受熔滴冲击向四周扩散;图 3(d)中熔滴完全进入熔池,熔池完全凹陷,液态镁合金主要向熔池后方斜坡流动,最大流速为 0.449 m/s;图 3(e)熔池中心位置

产生由内部向自由表面对流,有恢复初始状态的趋势;图 3(f)熔滴再次生成,新的熔滴周期开始。

在电弧压力、电弧剪切力、表面张力、马兰戈尼力、重力和浮力的综合作用下,液态镁合金主要向熔池后方流动,而液态镁合金的温度越高,表面张力越小,由此产生的马兰戈尼力主导熔池后方形成逆时针回流。根据熔池流动特点,取同一时刻不同位置 $x-y$ 横截面,如图 4 所示。

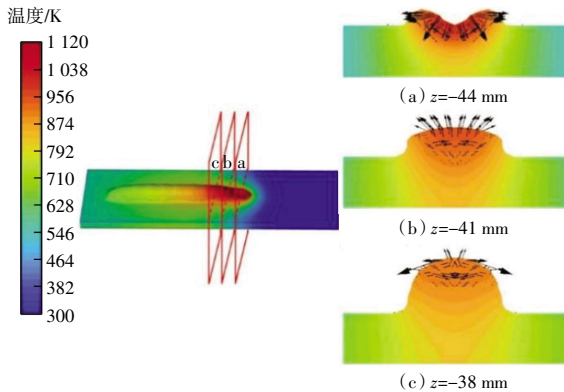


图 4 $t=2.44$ s 时不同位置横截面温度云图

Fig.4 Cross sectional of temperature profiles at different positions at $t=2.44$ s

距离熔池中心越远,熔池温度越低,焊缝余高逐渐增加。图 4(a)处电弧加热位置温度最高,熔池中心受电弧压力作用产生凹陷,同时液态镁合金受到挤压向熔池两侧流动。图 4(b)在表面张力的作用下,熔池自由表面向外流动,内部形成由两侧向中心的对流,阻碍了熔池向两侧流淌。图 4(c)位置时,熔池上方液态镁合金由内部向自由表面流动,且受到电弧剪切力及表面张力作用,熔池底部逐渐凝固,熔池表面积减小,余高增加。

2.2 试验验证

在相同工艺参数下对 AZ31B 镁合金进行单道单层成形试验,图 5 所示为高速摄像采集的熔池形态与模拟熔池液相体积分数对比。

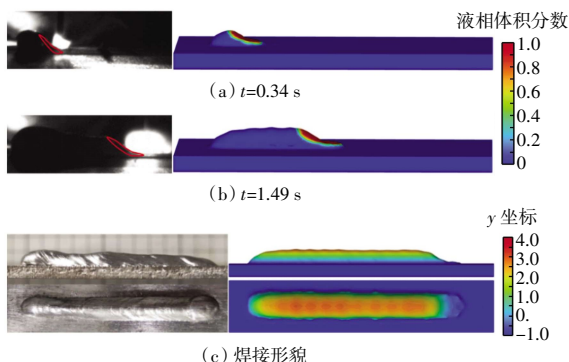
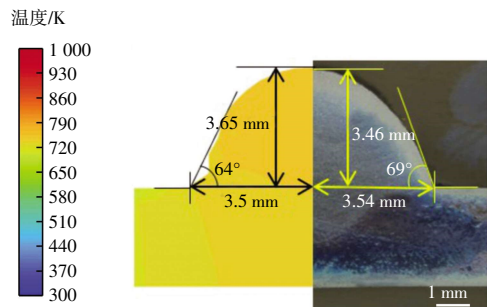


图 5 试验与模拟对比

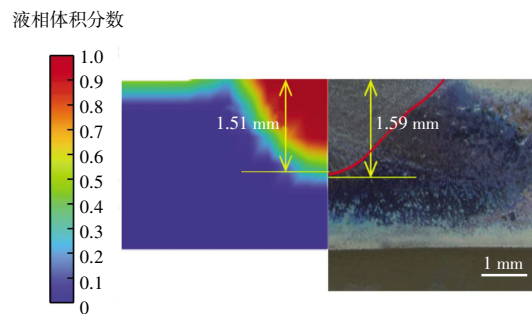
Fig.5 Comparison between experiment and simulation

通过高速摄像采集的图像观察试验过程中熔池的固液相界面,并与模拟所得固液相界面位置和尺寸进行对比,结果基本吻合;而试验与模拟的熔池形状略微存在差异,这是由于没有考虑镁合金蒸发造成的反力。试验时由于起弧端焊枪有短暂停顿,焊接过程不稳定,导致起弧端有凸起;而模拟时焊接过程相对稳定,焊缝高度均匀,如图 5(c)所示。

图 6 比较了电流为 129 A 时模拟与试验的焊缝横截面形貌。此时镁合金已经凝固,因此可以通过此截面预测焊缝成形。模拟与试验所得熔宽分别为 7 mm 和 7.08 mm,误差约 1.13%;模拟与试验余高分别为 3.65 mm 和 3.46 mm,误差约 5.49%;模拟所得熔深为 1.51 mm,试验熔深为 1.59 mm,误差为 5.03%。两者之间存在误差主要是由于建模时对模型进行了一定的简化,且本文给出的镁合金在高温下的材料参数与真实值仍存在差异。



(a) 焊缝熔宽及余高尺寸对比



(b) 熔深对比

图 6 模拟与试验焊缝横截面几何尺寸对比

Fig.6 Comparison of simulated and tested weld cross-sectional geometry

通过实验比较,验证了本文模型的准确性,可以满足对镁合金电弧增材制造过程的成形预测要求。

2.3 不同焊接电流的焊缝成形

相同焊接速度下,对焊接电流分别为 75、100、129 及 150 A 时的焊缝形貌进行模拟。图 7 所示为相同位置处不同电流计算所得模型的横截面形态变化。

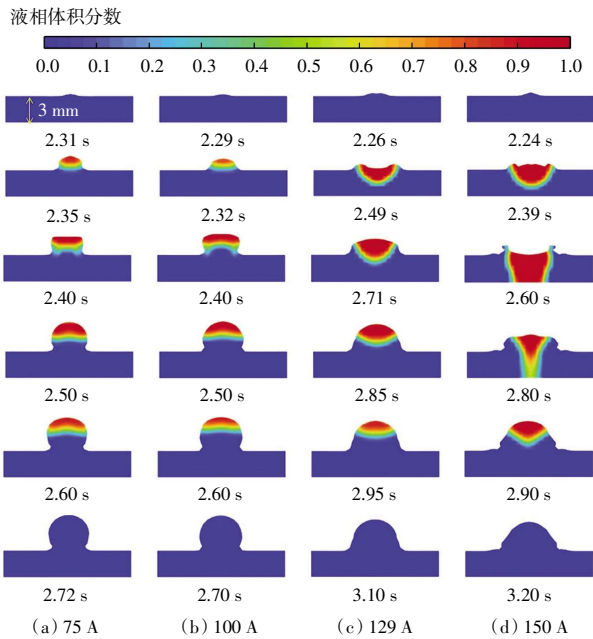
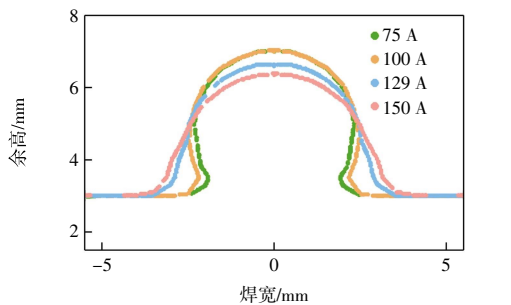


图 7 不同电流下相同位置熔化-凝固过程

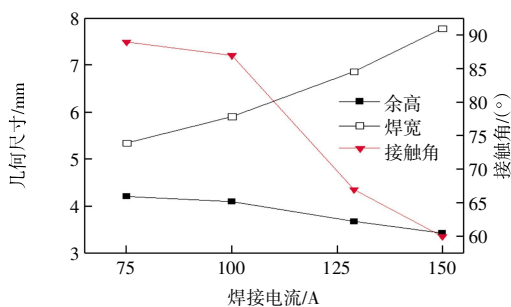
Fig.7 Melting-solidification process at the same position under different currents

由图 7 可以看出, 电流为 75 A 与 100 A 时, 熔池始终保持凸起, 129 A 时熔池产生凹陷, 随着时间的变化, 熔池自由表面逐渐凸起直至完全凝固。当电流为 150 A 时, 熔池热输入过大, 表面凹陷范围扩大, 凝固时间较长。

不同电流下得到的同一位置焊缝横截面形貌对比如图 8 所示。



(a) 焊缝轮廓对比



(b) 焊缝尺寸对比

图 8 不同电流焊缝形貌对比

Fig.8 Comparison of weld geometry at different currents

由图 8 可见: 电流越大, 熔宽越大; 电流为 75 A 与 100 A 时, 焊缝余高变化不明显; 随着电流继续增大, 余高明显减小, 接触角也相应减小。为了避免堆焊时两沉积层之间无法完全熔合, 接触角应小于 90°, 但过小的接触角不利于薄壁件成形。在焊接速度为 0.014 m/s 的情况下, 焊接电流在 100~129 A 范围内时可以得到合适的接触角, 有利于后续镁合金的沉积。

不同焊接电流下的焊缝熔深对比如图 9 所示。由图 9 可知电流的增大会导致焊缝的熔深增加。电流为 75 A 与 100 A 时, 焊缝的熔深过小; 电流为 150 A 时焊接电流过大, 镁合金薄板被焊透。

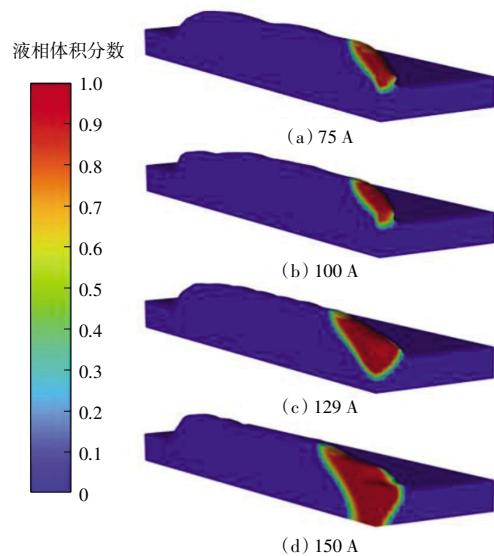


图 9 不同焊接电流下的熔深对比

Fig.9 Comparison of melting depth at different welding currents

3 结 论

本文引入周期性系数加入 CMT 热源中, 通过数值模拟得到了更为直观的镁合金 CMT 电弧增材成形过程。研究结果表明:

(1) 熔滴进入熔池后, 主要受马兰戈尼力的驱动流向熔池后方, 并在内部形成逆时针回流, 且与高速摄像中观察到的熔池动态行为一致。

(2) 相同工艺参数下, 模拟与试验所得焊缝熔宽、余高以及熔深的误差分别为 1.13%、5.49% 以及 5.03%, 误差均较小, 验证了模型的准确性。

(3) 模拟了不同焊接电流焊缝的成形, 在焊接速度为 0.014 m/s 的情况下, 焊接电流在 100~129 A 范围内时, 可以得到合适的接触角, 有利于后续镁合金的沉积。

参考文献:

- [1] 朱兆雨, 陈长军, 张敏. 激光增材制造镁合金的研究现状及展望[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 74-86.
ZHU Z Y, CHEN C J, ZHANG M. Research progress and prospect of laser additive manufacturing technique for magnesium alloy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(19): 74-86(in Chinese).
- [2] 王哲, 付彬国, 王玉凤, 等. 增材制造镁合金的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(11): 3093-3105.
WANG Z, FU B G, WANG Y F, et al. Research progress of additive manufacturing of magnesium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(11): 3093-3105(in Chinese).
- [3] 江宏亮, 杨红军, 刘维, 等. 镁合金冷金属过渡焊接技术研究进展[J]. 南方农机, 2021, 52(20): 27-31.
JIANG H L, YANG H J, LIU W, et al. Research progress of cold metal transition welding technology for magnesium alloy[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2021, 52(20): 27-31(in Chinese).
- [4] 张洪涛, 冯吉才, 胡乐亮. CMT能量输入特点与熔滴过渡行为[J]. 材料科学与工艺, 2012, 20(2): 128-132, 139.
ZHANG H T, FENG J C, HU L L. Energy input and metal transfer behavior of CMT welding process[J]. Materials Science and Technology, 2012, 20(2): 128-132, 139(in Chinese).
- [5] 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 and Design, 2015, 86: 894-901.
- [6] YI H, WANG Q, CAO H J. Wire-arc directed energy deposition of magnesium alloys: Microstructure, properties and quality optimization strategies[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 20: 627-649.
- [7] CAO H J, HUANG R F, YI H, et al. Asymmetric molten pool morphology in wire-arc directed energy deposition: Evolution mechanism and suppression strategy[J]. Additive Manufacturing, 2022, 59: 103113.
- [8] CADIOU S, COURTOIS M, CARIN M, et al. Heat transfer, fluid flow and electromagnetic model of droplets generation and melt pool behaviour for wire arc additive manufacturing[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 148: 119102.
- [9] CADIOU S, COURTOIS M, CARIN M, et al. 3D heat transfer, fluid flow and electromagnetic model for cold metal transfer wire arc additive manufacturing (CMT-WAAM)[J]. Additive Manufacturing, 2020, 36: 101541.
- [10] 王岑, 曹睿, 林巧力, 等. 镁/钛异种金属冷金属过渡焊接的温度场模拟[J]. 焊接学报, 2015, 36(4): 17-20, 114.
WANG C, CAO R, LIN Q L, et al. Numerical simulation on temperature distribution of cold metal transfer joining magnesium to titanium dissimilar metals[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(4): 17-20, 114(in Chinese).
- [11] 夏胜全, 孙晓明. CO₂短路过渡焊接熔池三维瞬态数值模拟[J]. 焊接学报, 2016, 37(1): 115-119, 134.
XIA S Q, SUN X M. Three-dimensional transient numerical simulation of melting pool in CO₂ shortcircuiting arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(1): 115-119, 134(in Chinese).
- [12] BAI X W, COLEGROVE P, DING J L, et al. Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 124: 504-516.
- [13] HUANG J K, LI Z X, YU S R, et al. Real-time observation and numerical simulation of the molten pool flow and mass transfer behavior during wire arc additive manufacturing[J]. Welding in the World, 2022, 66(3): 481-494.
- [14] 周祥曼, 张海鸥, 王桂兰, 等. 电弧增材成形中熔积层表面形貌对电弧形态影响的仿真[J]. 物理学报, 2016, 65(3): 331-342.
ZHOU X M, ZHANG H O, WANG G L, et al. Simulation of the influences of surface topography of deposited layer on arc shape and state in arc based additive forming[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(3): 331-342(in Chinese).
- [15] HU S S, ZHANG H, WANG Z J, et al. The arc characteristics of cold metal transfer welding with AZ31 magnesium alloy wire[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 24: 298-306.
- [16] 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(in Chinese).
- [17] SAHOO P, DEBROY T, MCNALLAN M J. Surface tension of binary metal-surface active solute systems under conditions relevant to welding metallurgy[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1988, 19(3): 483-491.
- [18] 李士凯, 陈茂爱, 武传松. 脉冲GMAW熔滴过渡动态过程的解析模型[J]. 焊接学报, 2004(2): 47-51, 131.
LI S K, CHEN M A, WU C S. Analytical model for dynamic process of metal transfer in pulsed GMAW[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004(2): 47-51, 131(in Chinese).
- [19] 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 W Y, CAO X Y, DU X W, 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).

- [20] 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.
- [21] 韩庆璘, 李大用, 李鑫磊, 等. GTAW 多相流数值模拟的相界面实时标记方法[J]. *焊接学报*, 2021, 42(6):58-63, 100. HAN Q L, LI D Y, LI X L, et al. Real-time phase interface marking method for GTAW multiphase flow numerical simulation[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2021, 42(6):58-63, 100(in Chinese).
- [22] HUANG J K, GUAN Z C, YU S R, et al. A 3D dynamic analysis of different depositing processes used in wire arc additive manufacturing[J]. *Materials Today Communications*, 2020, 24: 101255.
- [23] HUANG J K, YANG M H, CHEN J S, et al. The oscillation of stationary weld pool surface in the GTA welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 256:57-68.
- [24] 赵浩峰, 范晋平, 王玲. 镁合金及其加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017. ZHAO H F, FAN J P, WANG L. *Magnesium Alloy and Its Processing Technology* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017(in Chinese).

本文引文格式:

- 王天琪, 靖雯, 何俊杰. 镁合金在冷金属过渡电弧增材制造成形过程中的数值模拟[J]. *天津工业大学学报*, 2025, 44(1): 83-90.
- WANG T Q, JING W, HE J J. Numerical simulation of magnesium alloy in CMT arc additive manufacturing forming process[J]. *Journal of Tiangong University*, 2025, 44(1): 83-90(in Chinese).

(上接第 82 页)

- cess, 2020, 9:660-672.
- [17] 王议锋. CLTLC 多谐振变换器的磁集成方法[J]. *电工技术学报*, 2021, 37(2):380-388. WANG Y F. Magnetic integration method of cltlc multi resonant converter[J]. *Journal Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 37(2): 380-388(in Chinese).
- [18] 高圣伟, 贺琛, 刘赫, 等. 基于 GaN 全桥 LLC 谐振变换器交错并联系统的损耗分析[J]. *天津工业大学学报*, 2021, 40(2):52-63. GAO S W, HE C, LIU H, et al. Loss analysis based on staggered parallel system of GaN full bridge LLC resonant converter[J]. *Journal of Tiangong University*, 2021, 40(2): 52-63(in Chinese).
- [19] YANG F, RUAN X B, YANG Y, et al. Interleaved critical current mode boost PFC converter with coupled inductor[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(9):2404-2413.
- [20] 高圣伟, 祁树岭, 孙醒涛, 等. 基于 GaN HEMT 的双向 DC-DC 变换器系统损耗分析[J]. *天津工业大学学报*, 2020, 39(2):61-68. GAO S W, QI S L, SUN X T, et al. Loss analysis of double active bridge system based on GaN HEMT[J]. *Journal of Tiangong University*, 2020, 39(2): 61-68.(in Chinese).

本文引文格式:

- 高圣伟, 金从众, 于冠恒, 等. 面向双频 DC-DC 变换器的 EIE 型磁集成电感器设计[J]. *天津工业大学学报*, 2025, 44(2): 75-82, 90. GAO S W, JIN C Z, YU G H, et al. Design of EIE magnetic integrated inductor for Double-frequency DC-DC converters[J]. *Journal of Tiangong University*, 2025, 44(2): 75-82, 90(in Chinese).