DOI: 10.3901/JME.2018.02.070

旁路耦合微束等离子弧堆垛与熔池动态行为 数值模拟*

黄健康¹ 杨茂鸿¹ 余淑荣² 石 玓¹ 樊 丁¹

(1. 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室 兰州 730050;

2. 兰州理工大学机电工程学院 兰州 730050)

摘要: 针对旁路耦合微束等离子弧增材制造堆垛过程中熔滴与熔池的动态行为, 在考虑自由表面的情况下, 建立一个熔滴与熔池耦合作用的传热与传质模型, 分析表面张力和熔滴冲击动量共同作用下的熔池瞬态形状和复杂的流体流动行为, 并通过试验验证了模型的正确性。研究发现: 当熔滴携带热量冲击熔池时, 熔池温度升高, 熔池中的最大速度可增大到 2.06 m/s; 随着进入熔池的熔滴数目增加, 熔池余高增加, 熔宽增加, 而熔深基本不变; 同时, 当旁路电流增大时, 母材温度较低, 造成更浅的熔深, 更高的余高和更小的熔宽, 熔池液态金属的流动也不稳定; 增加熔滴间隔时间后, 每一层的顶部半径随着层数增加而减小。

关键词: 旁路耦合微束等离子弧焊; 定点堆垛; 熔滴冲击; 熔池动态; 数值模拟

中图分类号: TG452

Study on the Dynamic Behavior of Molten Pool during the Stationary Pileup of the Double-electrode Micro Plasma Arc Welding

HUANG Jiankang¹ YANG Maohong¹ YU Shurong² SHI Yu¹ FAN Ding¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract: Aiming at the dynamic behavior of the droplet on the molten pool during the stationary pileup process of the double-electrode micro plasma arc welding, a mathematical model of the coupling effect between the droplet and the molten pool is established, the flow shape of the molten pool and the complex fluid flow are mainly calculated by the combination of surface tension and droplet impact momentum. It is found that, when the droplet carries heat to hit the molten pool, the bath temperature rises. When the droplets impact the pool of the moment, the maximum speed in the pool can be increased to 2.06 m/s. With the increase in the number of droplets entering the molten pool, the bath height increases, the melting width increases, the penetration depth is almost constant. As the bypass current increases, the base metal temperature is low. Resulting in a lighter depth, a higher height and a smaller weld width. Molten pool liquid metal flow is not stable. After increasing the cooling time, the radius of each layer decreases as the number of layers increases.

Key words: double-electrode micro plasma arc welding; stationary pileup; droplet impingement; weld pool dynamics; numerical simulation

0 前言

弧焊快速成形是增材制造的一大类, 因其具有成本低、效率高等优点, 具有很大的发展潜力。但是也存在一些问题, 如成形精度不高、微观组织粗

大等^[1], 这都可以归结为对母材的热输入控制不当。通过分析文献[2-3], 发现较快的冷却速率使得晶粒尺寸更小, 较低的热输入能够使成形件的组织致密、性能更好。而旁路耦合电弧可以在不减小焊接速度的前提下控制对母材的热输入^[4]。因此, 将二者结合起来并研究其熔池行为对提高弧焊快速成形中的表面平整度具有重要的理论意义和工程实用价值。

目前, 对于电弧增材制造方法主要有钨极惰性

* 国家自然科学基金资助项目(51665034)。20170911 收到初稿, 20171110 收到修改稿

气体保护焊^[5](Gas tungsten arc welding, GTAW)、熔化极气体保护焊^[6](Gas metal arc welding, GMAW)、等离子弧焊^[7](Plasma-arc welding, PAW)、冷金属过渡焊接^[8](Cold metal transfer, CMT)等,并随着机器人技术的成熟,有了一些工业应用^[9]。但对于一些影响成形精度的物理量,如熔池温度、流动速度、形貌以及熔滴冲击力等,在增材制造过程中很难传感与检测,因此,一定程度上使得电弧增材制造的应用前景受到限制。但是,随着数值分析技术的发展,一些学者已经利用数值分析方法来进一步提高电弧增材制造中成形机制、流动规律。文献[10]以实现 GMAW 多重堆积路径优化为目标,预先设定堆垛层的形貌,采用有限元模拟和试验方法对多重加热模式下的复杂应力、变形、路径影响规律进行了系统研究,实现了多指标路径优化。文献[11]研究了液态熔滴在基板上堆垛的瞬态传输过程,冲击速度和熔滴相对距离对成形形貌的影响。但其没有考虑电弧对堆垛层形貌的影响。文献[12]建立了不考虑自由表面的三维热传和流动模型,研究了功率、扫描速度、Marangoni 数、傅里叶数和量纲一温度对热应变的影响规律并给出了减小变形的办法。文献[13]分析了不同的层间间隔时间对成形零件表面质量的影响,发现适当控制层间时间可以改善成型的稳定性。在当前的研究中,很少有学者研究在增材制造过程中熔滴与熔池的耦合行为,以及所涉及的传热传质机制,同时,基于流体的自由表面理论对增材制造成形因素的研究还不够全面,相关领域还需进一步的深入探讨,以此来提高电弧增材制造的成形精度和拓宽其应用范围。

本文旨在研究旁路耦合微束等离子弧焊(Double-electrode micro plasma arc welding, DE-MPAW)熔滴对熔池的冲击作用和旁路电流对熔池温度场、流场和形貌的影响。采用流体体积技术(Volume of fluid, VOF),建立了定点三维瞬态 DE-MPAW 数学模型,计算了熔池温度场、流动模式、熔池形状及熔滴对熔池的冲击速度。分析了定点焊接过程中熔池温度,熔池形貌,熔滴对熔池冲击的详细过程及旁路电流对熔池形貌的影响。最后通过试验验证了模型的正确性。

1 数学模型

图 1 是定点 DE-MPAW 焊的示意图,采用微束等离子弧焊作为主路,焊丝作为旁路。随着更多的熔滴沉积到基板上,熔池的尺寸逐渐增大。

在该模型中假定具有均匀初始温度,初始速

度,并且在一定高度的球形熔滴落在最初处于室温的母材上。由重力,电磁力和等离子流力驱动的熔滴携带质量,动量和热量以一个固定的频率冲击基板,基板将被等离子电弧热流和熔滴携带的热能逐渐融化。

图 1 DE-MPAW 焊示意图

1.1 控制方程

为了方便,下面给出的公式对于熔池和熔滴都适用。然而,只有熔滴受到等离子流力。一旦熔滴接触自由表面,熔滴就被认为是母材的一部分。模拟中用到的质量、动量、能量守恒方程如下所示。

质量守恒方程

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

动量守恒方程

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{F} + \mathbf{v} \left(\frac{m_s}{\rho} - K \right) + \mathbf{F}_{drag} \quad (2)$$

能量守恒方程

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla T \right) = \lambda \nabla^2 T + U_s \quad (3)$$

式中, \$\rho\$ 为密度; \$t\$ 为时间; \$\mathbf{v}\$ 为速度; \$m_s\$ 为质量源项; \$P\$ 为压力; \$\mu\$ 为黏度; \$\mathbf{F}\$ 为体积力; \$K\$ 为拖曳系数; \$T\$ 为温度; \$\lambda\$ 为热传导系数; \$c\$ 为流体的比热容; \$U_s\$ 为能量源项。

1.2 能量分配

合理的能量分配是精确计算温度场的重要前提。由于加入了旁路, DE-MPAW 焊接方法的能量分配比较复杂。由微束等离子电源输入的能量 \$Q_p\$ 被熔滴吸收一部分 \$Q_d\$, 从焊丝分走一部分 \$Q_s\$, 剩下的进入熔池 \$Q_w\$。同时还有一部分能量通过对流、辐射和蒸发从熔滴和熔池中损失 \$Q_{dr}\$, \$Q_{wr}\$。如图 1 所示, 能量平衡可由式(4)表示

$$Q_p = Q_d + Q_w + Q_s + Q_{dr} + Q_{wr} \quad (4)$$

熔滴吸收的能量 \$Q_d\$ 由式(5)计算^[14]

$$Q_d = \eta_d \cdot \frac{Q_p}{\pi r_q^2} \cdot 2\pi r_d^2 \tau \quad (5)$$

式中, η_d 为熔滴的吸收率, r_d 为熔滴半径(通过拍摄的熔滴过渡图片获得), r_q 为电弧有效半径, τ 为熔滴与等离子弧接触时间。

熔滴初始温度由式(6)计算^[14]

$$T - T_\sigma = \frac{3Q_d}{4\pi r_d^3 c_p \rho_p} \quad (6)$$

式中, T 为熔滴初始温度, T_σ 为室温, c_p 为熔滴比热容, ρ_p 为熔滴密度, ϕ 为熔滴过渡频率。施加到母材表面的能量为 $U_s = Q_w + Q_{dr}$ 。与熔滴相关的参数如表 1 所示。

表 1 熔滴热参数

参数	数值
熔滴初始速度/(m/s)	0.01
初始高度/m	0.002
接触时间/s	0.017
熔滴半径/m	0.001
熔滴能量吸收系数	0.6
熔滴温度/K	1 800

1.3 体积力

动量守恒方程, 即式(2), 中的 $\mathbf{F}$ 是体积力, 电弧焊熔池中的体积力包括电磁力和因温度变化而引起的浮力, 其在 x, y, z 方向上的分量分别为^[15]

$$F_x = -\frac{\mu_m I^2}{4p^2 s_j^2 r} \exp\left(-\frac{r^2}{2s_j^2}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2s_j^2}\right)\right] \left(\frac{z}{H_b}\right)^2 \frac{x}{r} \quad (7)$$

$$F_y = -\frac{\mu_m I^2}{4\pi^2 \sigma_j^2 r} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\right] \left(\frac{z}{H_b}\right)^2 \frac{y}{r} \quad (8)$$

$$F_z = -\frac{\mu_m I^2}{4\pi^2 \sigma_j^2 r} \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\right]^2 + \rho g \beta \Delta T \quad (9)$$

式中, μ_m 是真空磁导率, H_b 是母材厚度, ρ 是液态金属的密度, g 是重力加速度, β 是液态金属的热膨胀系数, r 是距电流密度中心的距离, σ_j 是电流密度分布参数。

1.4 等离子流

在式(2)中, 液态熔滴受到电极尖端和母材之间的等离子流。由文献[16]所给出的公式计算等离子流

$$F_{drag} = 0.5\pi C_{ds} \rho_g v_g^2 r_d^2 \quad (10)$$

式中, C_{ds} 是球形拖拽系数, ρ_g 和 D_d 分别是等离子气体的密度和熔滴直径, v_g 是等离子气体速度。

1.5 表面张力

熔池的表面张力是温度和表面活性元素浓度的函数。对于伪二元 Fe-S 系统, 表面张力是温度(T)与硫含量(f^s)的函数由式(11)给出^[17]

$$\gamma = 1.934 - 4.3 \times 10^{-4} (T - 1723) - RT \times 1.3 \times 10^{-8} \times \ln\left(1 + 0.003 18 f^s \exp\left(1.688 \times 10^8 / RT\right)\right) \quad (11)$$

式中, R 是气体常数。在计算过程中, 假定焊丝和母材都含有 0.02% 的硫含量。

1.6 自由表面追踪

在数值分析中, 采用 VOF 算法追踪自由表面。流体分数由 VOF 函数 $F(x, y, z, t)$ 定义。这个函数代表单位体积上的 VOF 值且满足以下守恒方程^[16]

$$\frac{dF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) F = \dot{F} \quad (12)$$

式中, $\dot{F}$ 为 F 的变化率。

1.7 边界条件

对于计算模型的边界, 可分为自由表面、底面和侧面。

自由表面: 对于自由表面单元, 满足下面的压力边界条件^[18]

$$p = p_{arc} + \gamma \kappa \quad (13)$$

式中, p 是自由表面法线上的压力, p_{arc} 表示电弧压力, 可表示为^[19]

$$P_{arc} = P_{max} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_p^2}\right) \quad (14)$$

式中, σ_p 为 Gaussian 压力作用半径(mm), $\sigma_p = 1.487 5 + 0.001 23 I$; P_{max} 是电弧压力的峰值; r 是 Gaussian 压力分布半径。

自由表面被电弧热通量加热并且通过对流、辐射和金属蒸发将热量散发到周围环境, 热边界条件如下

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q_w}{2\pi \sigma_q^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_q^2}\right) - q_{conv} - q_{radi} - q_{evap} \quad (15)$$

式中, σ_q 是电弧热源分布参数, $\sigma_q = 0.533 I^{0.294 1}$, q_{conv} 、 q_{radi} 、 q_{evap} 分别表示对流、辐射、蒸发热损失。

底面和侧面

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = q_{conv} \quad (16)$$

$$u = 0, v = 0, w = 0 \quad (17)$$

1.8 材料属性

分析中用到的材料热物理性能见表 2^[20], 其他物性参数, 如热导率、比热容、液体动态黏度, 与温度的关系如图 2 所示^[20]。

图2 SUS304 不锈钢热物理参数

表2 数值模拟中用到的部分 SUS304L 热物理属性

参数	数值
重力加速度 $g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	9.8
换热系数 $h_c/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	80
固液相变潜热 $\Delta H/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	2.47×10^5
偏析焓 $\Delta H_0/(\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{mol})^{-1})$	-1.66×10^{-8}
偏析焓因子 k_1	3.18×10^{-3}
液气相变潜热 $L_b/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	$6.259\ 5\times 10^6$
液相线温度 T_L/K	1 727
固相线温度 T_s/K	1 633
环境温度 T_a/K	300
大气压强 p_0/Pa	1.01×10^5
气体常数 $R_g/(\text{J}(\text{kg}\cdot\text{mol}\cdot\text{K})^{-1})$	8 314.3
硫的活度 $a_s(\%)$	0.022
热膨胀系数 β/K^{-1}	10^{-4}
纯金属液体的表面张力 $\gamma_m/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1.8
Stefan-Boltzmann 常数 $\sigma/(\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)^{-1})$	5.67×10^{-8}
表面辐射系数 ε	0.4
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 930
磁导率 $\mu_0/(\text{H}\cdot\text{m}^{-1})$	1.256×10^{-6}
表面过饱和度 $\Gamma_s/(\text{kg}\cdot\text{mol}\cdot\text{m}^{-2})$	1.3×10^{-8}

该模型的计算域为 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 7\text{ mm}$ ，总共网格数目为 40 万。计算是用的焊接参数为总电流 40 A，旁路电流 5 A，送丝速度为 0.04 m/s。

2 结果与讨论

2.1 熔滴堆垛过程中的流场特点

在计算模型的基础上，分析了定点熔滴堆垛过程。图 3 为 DE-MPAW 温度场模拟结果，显示了 4 滴熔滴进入熔池及对流稳定后的熔池温度场。在 $t=0$ s 时，等离子弧加热母材与焊丝，并通过焊丝分走部分电流。在 $t=0.1$ s 时形成熔池及第一滴熔滴，熔滴在重力、电磁力和等离子流力的作用下加速向下运动。在经历了 0.033 s 的时间，熔滴携带一定的热量进入熔池，使熔池温度升高，熔池体积增大。由于熔滴包含过热的热量且母材被电弧热通量加热，熔滴没有立即固化。之后，随着堆积时间的延长，熔池温度稳定在 $1\ 800\sim 2\ 100\text{ K}$ 。但是在熔池对流

的作用下，熔池中每一点的温度并不是恒定的。从图 3 中还可以看出，随着焊接时间的增加，通过热传导输入到熔池以外母材的能量持续增多，使得母材温度逐渐升高。

图3 DE-MPAW 温度场模拟结果

图 4 为对应的前 3 滴熔滴的形貌演化，与第 1 滴相比，第 2 滴熔滴进入熔池后熔宽和余高都增加，而熔深略微减小；与第 2 滴熔滴相比，第 3 滴熔滴的加入只使得熔池余高增加，熔深减小，而熔宽都没有发生变化。从图中可以看出，熔滴的加入对于熔深的影响不大，但对于余高的影响较大。余高的增加主要是熔滴带入到熔池的能量，而熔宽在第 2 滴之后不再增加是因为熔池达到了准稳态，而熔深略微减小是由于电弧作用在熔池表面，余高的增加使得热量作用到熔池底部的距离变长。

图4 前3滴熔滴轮廓

第 2 滴熔滴的速度场如图 5 所示。从中主要选取了熔滴生成时刻、熔滴和熔池接触时刻、熔滴对熔池冲击时刻和熔池达到稳定时刻的速度场。从图中可以看出熔滴从生成到熔池达到稳定共用了 0.025 s。在熔滴生成时刻，熔滴半径为 1 mm，初始位置为高于母材 2 mm，熔滴初始速度 0.01 m/s，熔滴过渡的频率为 7.7 Hz。此时，熔滴在各种力的作用下运动，熔滴上部速度大下部速度小，说明存在某种作用力阻碍熔滴过渡。在该熔池与熔滴组成的系统中，表面张力梯度对系统对流的影响最大，最大流速为 0.185 m/s，出现在熔池中。图 5b 中，熔滴与熔池接触，毛细现象出现，将熔滴吸入熔池。此时，最大流速增大到 0.6 m/s，出现在熔池与熔滴接触的部分。这与文献[21]中 0.47 m/s 的速度相似，当时只考虑了重力的影响。图 5c 中，熔滴携带质量、

能量和动量进入熔池。此时, 熔滴冲击力对熔池对流的作用最大, 整个系统的速度增大到 1.35 m/s,

造成熔池较大的变形。在图 5d 中, 熔池在各种力的作用下达到稳定, 速度下降到 0.253 m/s。

(a) 0.233s(最大速度为 0.85m/s) (b) 0.24s(最大速度为 0.6m/s) (c) 0.242s(最大速度为 1.35m/s) (d) 0.258s(最大速度为 0.252m/s)

图5 第2滴熔池形貌和速度场

2.2 旁路电流对熔池流场及其形貌的影响

采用旁路电流为 5 A 和 25 A 两种情况进行对比研究。图 6 为不同旁路电流下母材热输入及温度分布。其中热循环曲线的测量点是熔池中心(0, 0, 0.002 9), 两张云图分别是在 5 A 和 25 A 旁路电流下 1 s 时提取的。从图中可以看出, 旁路电流 5 A 时熔池中心的平均温度为 1 878 K; 而当旁路电流增大到 25 A 时, 熔池中心的平均温度降至 1 404 K。由于对母材的热输入较小, 形成的熔池较小, 熔池中的对流作用不强。熔滴在母材表面没有铺展开, 大量的热能集中在熔滴中, 没有传导到母材。在云图中也可以看出旁路电流为 25 A 时, 没有熔化的母材的温度比旁路电流为 5 A 时低。

图6 不同旁路电流下母材热输入及温度分布

为研究旁路电流对熔池流场和形貌的影响采用第1滴与第7滴熔滴进入熔池达到稳定后的熔池流场和形貌对比, 如图7所示。从图中可以看出, 当旁路电流为 25 A 时, 由于对母材的热输入较小, 在母材上基本没有形成熔池, 熔滴与母材交界面上的流动速度较小, 余高较大, 熔池流动不稳定, 但最大流速变化不大。

图7 不同旁路电流下熔池流场

2.3 旁路电流对堆垛形貌的影响

在图 8a 中叠加了 4 滴熔滴进入熔池之后的堆积层横截面轮廓, 以说明成形轮廓的演变。该图清楚地表示出每一层的顶部具有圆形轮廓, 其半径随着层数增加而减小。结果表明先前堆积层的表面形状对下一堆积层的表面轮廓具有显著影响。同时该图还显示了各堆积层之间的熔池熔融边界的叠加。从图中可以看出, 由后续层的堆积引起的重熔厚度随着堆积高度的增加而增加。这主要是由于随着熔覆高度的增加, 熔覆层上表面沿堆积方向的温度梯度变小。减小了在上层熔覆时的热传导系数。另外, 在定点多层堆积过程中, 随着堆积层的增多, 热传模式从三维 X、Y、Z 方向变为更接近于 Z 方向。

图 8b 展示了在图 8a 所示位置处计算的随时间变化的温度场。焊接开始后, 等离子束将热量传至母材, 使母材温度迅速升高, 同时熔滴携带大量能量进入熔池, 在热循环曲线上出现了第一个峰值。随后等离子弧熄灭, 温度迅速下降。当第二滴堆积时, 第一层被再次加热, 温度升高。因此, 在第一层热循环曲线上出现了第二个峰值。在后续层的堆

图 8 堆垛形貌与热循环曲线(旁路电流 5 A)

积期间重复该过程, 因此在第一层热循环曲线上有 4 个峰值。通常, 从堆积层的顶表面向下到母材表面的热传导随着堆积层的数量增加而减少。由于较窄的堆积宽度减小了用于导热的面积, 因此降低了用于导热的温度梯度, 使得成形件测量点冷却到相同温度的时间增长。

图 9 为旁路电流为 12 A 时的堆积形貌及热循环曲线。与图 8 对比可以发现, 增加旁路电流使得堆积层宽度减小, 高度增加。测量点峰值温度下降, 冷却时间间隔减小。

(a) 堆垛形貌变化

(b) 测量点热循环曲线

图 9 堆垛形貌与热循环曲线(旁路电流 12 A)

为了验证计算模型的正确性, 采用第 3.1 节焊接工艺参数进行了 DE-MPAW 定点焊接试验。图 10 为第 1 滴熔滴进入熔池达到稳定时熔池横截面对比。从图中可以看出, 模拟结果与试验结果吻合良好。说明所建立的模型能够很好地模拟熔滴堆垛过程。

图 10 试验与模拟横截面结果对比

3 结论

通过所建立的含自由表面熔滴与熔池的耦合作用模型, 分析了旁路耦合微束等离子弧定点堆垛过程中熔滴与熔池的动态行为, 获得了如下结论。

(1) 发现在堆垛过程中, 熔池中的温度保持在 1 800~2 100 K。当熔滴携带热量冲击熔池时, 熔池温度升高。熔滴冲击对熔池速度场的影响较大。当熔滴冲击熔池的瞬间, 熔池中的最大速度可增大到 2.06 m/s(熔池达到稳定时的最大速度为 0.31 m/s)。

(2) 由于旁路电流的增大, 对母材的热输入较少, 所以母材温度较低, 熔滴在母材上的铺展不好。造成更浅的熔深, 更高的余高和更小的熔宽, 增材制造成形效率提高, 但是其表面成形粗糙度和精度明显变差。

(3) 增加冷却时间后, 每一层的顶部半径随着层数增加而减小。由后续层的堆积引起的重熔厚度

随着堆积高度的增加而增加。在冷却到相同温度时, 增加旁路电流使得堆积层宽度减小, 高度增加。测量点峰值温度下降, 冷却时间间隔减小。

参 考 文 献

- [1] 徐富家. Inconel625 合金等离子弧快速成形组织控制及工艺优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
XU Fujia. Microstructure control and process optimization of Inconel 625 alloy fabricated by plasma arc rapid prototyping[J]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [2] THIVILLON L, BERTRAND P, LAGET B, et al. Potential of direct metal deposition technology for manufacturing thick functionally graded coatings and parts for reactors components[J]. Journal of Nuclear Materials, 2009, 385(2): 236-241.
- [3] THERIAULT A, XUE L, DRYDEN J R. Fatigue behavior of laser consolidated IN-625 at room and elevated temperatures[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 515(1-2): 217-225.
- [4] LI Kehai, CHEN Jinsong, ZHANG Yuming. Double-electrode GMAW process and control[J]. Welding Journal, 2007, 86(8): 231-237.
- [5] KATON M, OH J, MIYAMOTO Y, et al. Freeform fabrication of titanium metal and intermetallic alloys by three-dimensional micro welding[J]. Materials & Design, 2007, 28(7): 2093-2098.
- [6] CHUA C K, LEONG K F, LIM C C S. Rapid prototyping: principles and applications[M]. Hackensack: World Scientific Publishing Company, 2010.
- [7] BENDER E M, DRELLISHAK S, FOKKENS A, et al. Grammar prototyping and testing with the LinGO grammar matrix customization system[C]//Proceedings of the ACL 2010 System Demonstrations, 2010: 1-6.
- [8] EBRABIMNIA M, GOODARZI M, NOURI M, et al. Study of the effect of shielding gas composition on the mechanical weld properties of steel ST 37-2 in gas metal arc welding[J]. Materials & Design, 2009, 30(9): 3891-3895.
- [9] 赵慧慧. GMAW 再制造多重堆积路径对质量影响及优化方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
ZHAO Huihui. Path influence on quality and path optimization method in multiple deposition of GMAW remanufacturing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [10] ZHAO H H, ZHANG G J, YIN Z Q, et al. Three-dimensional finite element analysis of thermal stress in single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(1): 276-285.
- [11] DU J, WEI Z, CHEN Z, et al. Numerical investigation of pileup process in metal microdroplet deposition manufacture[J]. Micromachines, 2014, 5(4): 1429-1444.
- [12] MUKHERJEE T, MANVATKAR V, DE A, et al. Mitigation of thermal distortion during additive manufacturing[J]. Scripta Materialia, 2017, 127: 79-83.
- [13] 申俊琦, 胡绳荪, 刘望兰, 等. 铝合金焊接快速成形层间间隔时间分析[J]. 焊接学报, 2009, 29(5): 109-112.
SHEN Junqi, HU Shengsun, LIU Wanglan, et al. Effects of time interval in rapid prototyping of Al-alloy based on welding[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2009, 29(5): 109-112.
- [14] MANVATKAR V, DE A, DEBROY T. Heat transfer and material flow during laser assisted multi-layer additive manufacturing[J]. Journal of Applied physics, 2014, 116, 124905.
- [15] 武传松. 焊接热过程数值模拟[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990.
WU Chuansong. Numerical simulation of welding heat process[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1990.
- [16] SCHLICHTING H, GERSTEN K, KRAUSE E, et al. Boundary-layer theory[M]. New York: McGraw-Hill, 1960.
- [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 transactions B, 1988, 19(3): 483-491.
- [18] KOTHE D B, MJOLNESS R C, TORREY M D. RIPPLE: A computer program for incompressible flows with free surfaces, Los Alamos National Lab[R]. LA-10612-MS, Los Alamos, NM, 1991.
- [19] USHIO M, WU Chuansong. Mathematical modeling of three-dimensional heat and fluid flow in a moving gas metal arc weld pool[J]. Metal Mater. Trans. B, 1997, 28(3): 509-516.
- [20] WU C S. Welding thermal processes and weld pool behaviors[M]. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [21] WASZINK J H, PIENA M J. Experimental investigation of drop detachment and drop velocity in GMAW[J]. Welding Journal, 1986, 65(11): 289-298.

作者简介: 黄健康, 男, 1981 年出生, 博士, 硕士研究生导师。主要从事焊接过程检测与控制、焊接物理等相关方面的研究。

E-mail: sr2810@163.com

杨茂鸿, 男, 1991 年出生, 博士研究生。主要从事焊接物理、焊接数值模拟方面的研究。

E-mail: y970094835@163.com

樊丁(通信作者), 男, 1961 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要从事焊接物理、焊接方法与智能控制及激光加工等方面的研究。

E-mail: fand@lut.cn