

GMAW 熔滴过渡行为数值分析及试验验证

丁雪萍^{1,2}, 李 桓³

(1. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院,重庆 401122; 2. 智能增材制造技术与系统重庆市重点实验室,重庆 400714;
3. 天津大学 天津市现代连接技术重点实验室,天津 300072)

摘 要: 基于 FLUENT 软件,考虑热分析,选用 VOF 模型,针对纯氩气保护直流熔化极气体保护焊(GMAW)熔滴过渡行为进行数值模拟,分析熔滴过渡不同时刻对应电弧温度、电势、热通量等物理量的变化规律. 结果表明,电弧最高温度呈现周期性变化趋势;电势分布随着熔滴行为变化而变化,而在熔滴脱落后,电流不再流经脱落熔滴. 热通量最大值出现在中心部位,沿径向距离减小. 为验证模拟结果准确性,开展焊接试验,利用 LabVIEW 信号采集系统采集焊接电流和电弧电压波形,借助高速摄像设备拍摄实时电弧形态和熔滴过渡过程,从而有效、定量验证模拟结果准确性. 比较结果表明模拟结果同试验结果二者吻合良好,文中熔滴过渡数学模型是合理的.

关键词: 熔化极气体保护焊; 熔滴过渡; 数值分析; 高速摄像

中图分类号: TG 444.7 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20160329002

0 序 言

熔化极气体保护焊(GMAW)操作方便、生产效率高,广泛应用于工业生产. 焊接过程中,熔滴过渡对焊接稳定性和焊接质量有重要影响,因此研究熔滴过渡行为具有重要意义. 近年来,随着计算机发展,利用数值分析方法同时辅以少量焊接试验,可以深入认识熔滴过渡物理本质,优化焊接过程.

目前有关熔滴过渡模拟理论模型有静力学平衡模型^[1]、收缩不稳定模型^[2]、质量弹簧模型^[3-4]、流体力学理论^[5-6],但上述模型均利用语言编程方式计算. 对于新学者来说,需要较好编程基础,花费大量时间实现算法,难度极大. 而且一旦有错误出现,需要长时间调试. 因此寻求利用通用软件代替大量语言编程进而研究熔滴过渡行为极有意义.

文中利用 FLUENT 软件开展 GMAW 熔滴过渡过程数值研究,分析不同时刻温度、电势、热通量等物理量分布变化情况. 同时进行相应焊接试验,利用 LabVIEW 信号采集系统采集焊接电流和电弧电压波形,借助高速摄像系统同步拍摄电弧形态和熔滴过渡过程,实时监测焊接过程,从而有效、定量验证模拟结果准确性.

1 数学模型

为简化计算,做出以下假设:(1)模型为二维轴对称;(2)焊丝直接假设为液态金属,忽略熔化过程,液态金属和气体流动为层流;(3)电弧等离子体为光学薄,处于局部热平衡状态;(4)忽略金属蒸汽影响. 上述假设如忽略焊丝熔化、金属蒸汽等因素会对电弧行为计算产生影响,而电弧行为又会反过来影响焊丝熔化,因此对此问题需要在以后研究工作中完善. 而文中基于以上假设和简化,重点关注熔滴长大不同阶段其表面形状变化的动力学,进行 GMAW 熔滴过渡模拟. 计算模型见图 1,计算域中,存在液体(阴影区—液态金属)和气体(空白区—保

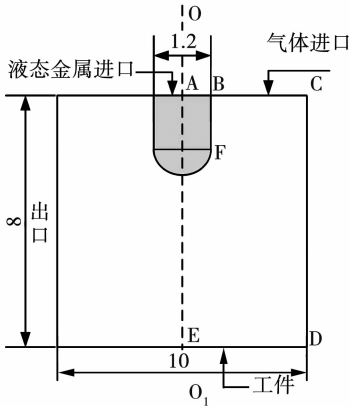


图 1 熔滴过渡数值计算模型示意图(mm)

Fig. 1 Computational domain for droplet transfer

收稿日期: 2016-03-29
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175374); 重庆市基础科学与前沿技术研究一般项目(cstc2016jcyjA0059); 先进焊接与连接国家重点实验室面上项目(AWJ-M16-03)

护气体)两相. 模型为轴对称,仅选取一半模型进行计算. 焊丝为 H08Mn2SiA,直径 1.2 mm,保护气体为纯氩气,气体流量为 15 L/min. 焊丝和氩气物性参数参考文献[6].

1.1 控制方程

控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程,如式(1)~式(3)所示.

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{JB} + \mathbf{F}_s \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} H = \nabla \cdot \left(\frac{k}{c_p} \nabla H \right) + \frac{\mathbf{J}^2}{\sigma} + \frac{5}{2} \frac{k_B}{e} \mathbf{JH} - S_R \tag{3}$$

式中: ρ 为密度; $\mathbf{v}$ 为速度矢量; t 为时间; P 为压强; $\boldsymbol{\tau}$ 为粘性应力张量; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; $\mathbf{J}$ 为电流密度矢量; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度矢量; $\mathbf{F}_s$ 为表面张力,即

$$\mathbf{F}_s = \gamma \nabla \alpha_i \tag{4}$$

式中: γ 为表面张力系数; κ 为自由表面曲率; α 为流体体积分数. 采用连续表面张力模型(CSF)将表面张力转化为体积力加入到动量方程源项中; H 为焓; k 为热导率; c_p 为定压比热; σ 为电导率; k_B 为波尔兹曼常数; e 为电子电量; S_R 为辐射损失. 动量方程包含重力、电磁力、表面张力,能量方程源项包含电阻热、辐射热和电子焓输运.

电磁方程包括电流连续性方程、欧姆定律和安培定律,如式(5)~式(7)所示.

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \tag{5}$$

$$\mathbf{J} = -\sigma \nabla \Phi \tag{6}$$

$$\mathbf{B}_\theta = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r j_z r dr \tag{7}$$

式中: Φ 为电势标量; μ_0 为真空磁导率; r 为径向坐标; j_z 为轴向电流密度分量; $\mathbf{B}_\theta$ 为自感应磁感应强度.

利用两相流中 VOF 模型追踪熔滴自由表面变化. 该模型中涉及单元格流体体积函数 F ,满足式(8). $F=1$,单元格中充满流体; $F=0$,单元格中没有流体; $0 < F < 1$,单元格中部分充满流体.

$$\frac{dF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) F = 0 \tag{8}$$

上述方程利用 FLUENT 软件求解,同时引入 UDF 和 UDS 分别求解源项和电流连续性方程.

1.2 边界条件

边界条件见表 1, v_f 为送丝速度, v_g 为保护气体流速. AB 为焊丝进口,考虑到文中直接将焊丝假设为液态金属,因此 AB 处温度为钢液熔化温度,将其设

为 1 800 K. 为了保证在工件表面得到稳定电弧,DE 边界施加高斯温度分布,见式(9)^[7].

$$T(r) = 2\,700 \cdot e^{-\left(\frac{r}{1.4R_w}\right)^2} + 300 \tag{9}$$

式中: R_w 为焊丝半径. 为保证计算收敛性,初始温度设为 300 K,电势设为 0 V.

表 1 边界条件
Table 1 Boundary conditions

位置	径向速度 u	轴向速度 v	电势 Φ	温度 T	体积分数 F
AB	0	v_f	$\frac{I}{\pi R_{\text{wire}}^2}$	1 800 K	1
BC	0	v_g	$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0$	300 K	0
CD	$\frac{\partial u}{\partial r} = 0$	0	$\frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0$	300 K	0
DE	0	0	0	T_r	0
EA	0	$\frac{\partial v}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	0

2 试验结果与讨论

基于以上数学模型,针对送丝速度为 5.6 m/min,焊接电流为 220 A 时对应 GMAW 熔滴过渡过程进行数值模拟,具体结果见图 2. 观察发现,典型熔滴过渡过程包括熔滴形成、长大、脱落过程,电弧温度分布呈现钟罩形. 在熔滴长大阶段,因熔滴表面处是电流密度较大地方,电弧主要集中在熔滴中下部;当熔滴脱离焊丝,焊丝端部成为新的电流密度集中处,因此电弧跳变到焊丝端部,脱落熔滴在电弧中向熔池过渡. 除了电弧温度分布形状有变化外,电弧最高温度 T_{max} 也有变化. 随着熔滴长大,如图 2a~2d,电弧被压缩,温度升高, T_{max} 增大;熔滴脱离焊丝阶段,如图 2e, T_{max} 最大,因为此时焊丝端部为尖锥状,电流密度最大;随后进入下一个熔滴形成阶段,焊丝端部缓慢变为圆形, T_{max} 呈现减小趋势. 总的来说,电弧最高温度分布随着熔滴过渡过程呈现周期性波浪状趋势. 因为在熔滴形成长大阶段,熔滴表面积越来越大,导致电流密度发散程度增大,电流密度减小. 而电弧能量大都由电流流经等离子体产生的电阻热提供,电流密度减小,随之电弧温度降低. 当熔滴脱离焊丝,焊丝端部横截面积减小,电流密度增大,电弧温度较高,见图 2e, $T_{\text{max}} = 21\,417$ K. 随后焊丝端部在表面张力作用下回缩,电流密度减小,随之电弧温度减小,见图 2f, $T_{\text{max}} = 19\,241$ K,至此进入新一轮熔滴过渡周期.

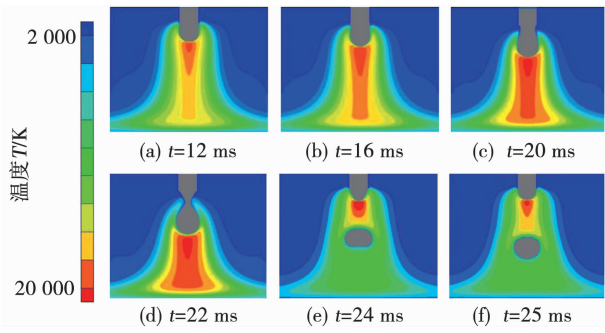


图 2 熔滴过渡温度分布

Fig. 2 Distribution of temperature in metal transfer process

图 3 显示了熔滴过渡过程中电势分布变化情况。观察发现在焊丝和熔滴上压降很小,电势变化主要集中在电弧上。因为钢液电导率为 $770\ 000\ \Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$,电弧为氩气等离子体,根据文献[4],电导率 σ 是温度 T 的函数,在 $10\ 000\sim 21\ 000\ \text{K}$ 之间,拟合关系式为 $\sigma = 0.89\ T - 5\ 735$ 。大于 $21\ 000\ \text{K}$ 时,电导率为 $12\ 000\ \Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 。由此可见,钢液电导率为电弧电导率 60 多倍,所以压降基本集中在电弧上。

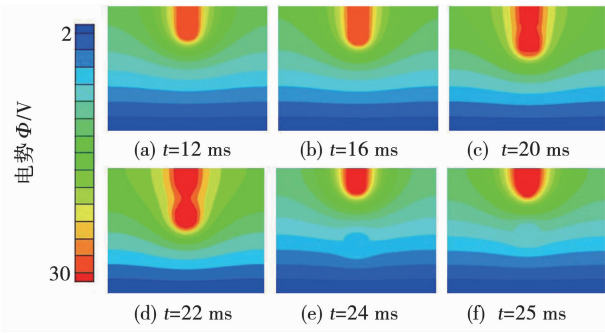


图 3 熔滴过渡电势分布

Fig. 3 Distribution of electric potential in metal transfer process

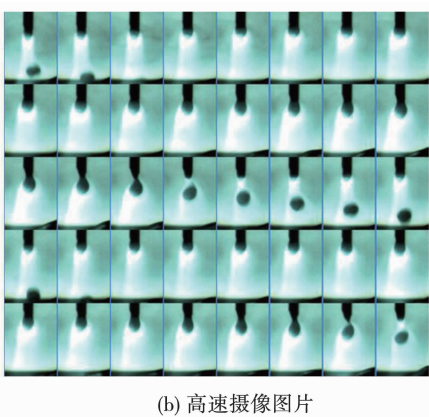
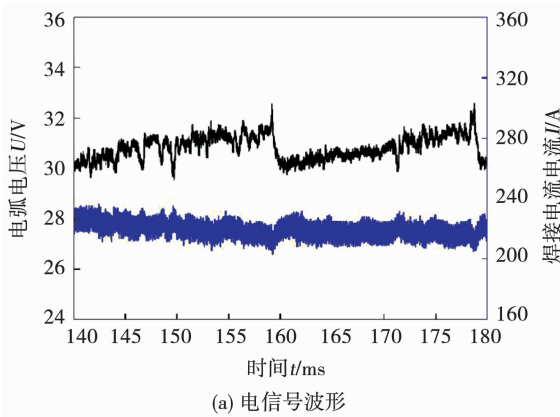


图 5 熔滴过渡对应电信号和高速摄像

Fig. 5 Electric signal waveform and high-speed photography for metal transfer

图 4 显示了熔滴过渡过程中不同时刻工件表面热通量分布情况,发现热通量最大值出现在中心部位,沿径向距离减小。热通量反映工件表面单位面积流过的热量,其分布趋势同时反映了熔池熔深分布,同熔池形状吻合。观察图 2、图 4 发现,在熔滴长大阶段(在 $12\sim 22\ \text{ms}$ 阶段),电弧最高温度减小,而热通量增大。因为随着熔滴长大,电弧弧长减小,电弧受到压缩,使得电弧能量更有效加热工件,因而工件表面处热通量增大。当熔滴脱离焊丝后,随着时间推移,热通量随之减小。因为此阶段电弧弧长大于熔滴长大阶段,因而其向周围介质散失热量增加,用于加热工件热效率小于熔滴长大阶段。

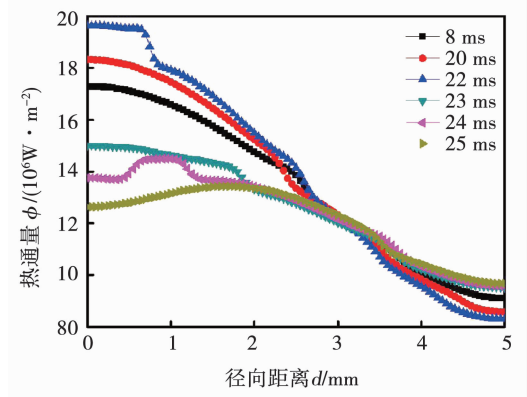


图 4 工件表面热通量分布

Fig. 4 Distribution of heat flux on the workpiece

为了验证数值模拟结果准确性,进行焊接试验,焊接工艺参数同数值模拟参数,利用 LabVIEW 信号采集系统采集焊接电流和电弧电压波形,借助高速摄像设备实时拍摄电弧形态和熔滴过渡过程,结果如图 5 所示。图中电压是导电嘴端部焊丝与工件间电压,该图显示了熔滴过渡两个周期情况,时间为 $141\sim$

180 ms,时间间隔为 1 ms. 比较试验结果同模拟结果,选取脱落熔滴直径、长度和周期作为评定指标,比较结果如表 2 所示. 分析发现,模拟结果同试验结果基本吻合良好.

表 2 熔滴过渡试验值与模拟值比较

Table 2 Comparisons between experimental and simulated results

类别	熔滴过渡 周期 t/ms	脱落熔滴 直径 D/mm	脱落熔滴轴 向长度 l/mm
试验值	21	1.617	1.98
模拟值	23	1.623	1.82
相对误差(%)	9.52	0.37	8.08

结合试验中电信号波形和高速摄像相比发现,在熔滴长大过程中,电压呈增大趋势,在熔滴脱离焊丝时刻,此时电压达到最大值,熔滴脱离焊丝后,电压立即降到最小值,随后进入下一个熔滴过渡周期. 与模拟结果中电势分布变化规律一致.

观察图 3e,3f 发现电势分布在脱落熔滴处发生变化. 按照常规来说,熔滴电导率是电弧电导率几十倍以上,电流线优先选择流过电导率较大介质,即

电流流过熔滴. 但是如果电流流过熔滴,势必经历一个流入和流出熔滴的过程. 那么在熔滴上就会形成阳极(电子流入熔滴的地方)和阴极(电子流出熔滴的地方). 阴极斑点的产生对热阴极来说需要8~10 V 阴极区电压降,对非热阴极来说需要大约 15 V 阴极区电压降^[8]. 而在 GMAW 过程中总电压大约 30 V 左右. 其中熔池中阴极斑点阴极压降约为 15 V,阳极压降约为 2~4 V,弧柱压降同样约为几伏. 因此总电压不足以支持在熔滴上形成新阴极斑点,所以说电流未流过脱落熔滴. 同时结合图 5 熔滴高速摄像图片 161~164 ms,脱落熔滴穿越电弧时,熔滴表面发暗无光亮. 而如果电流流经熔滴,熔滴上一定会有阴极斑点,那么熔滴是有光亮的. 综上,可得出结论,电流是不流经脱落熔滴的. 因此图 3 在脱落熔滴上表现出电势等势线的变化,在脱落熔滴上压降只有 2 V.

将不同焊接电流情况下,数值模拟和试验测量得到的熔滴尺寸和过渡周期相对比,比较结果分别如图 6 所示,发现二者基本吻合. 但存在一定误差,分析因为高温物性参数不准确影响模拟结果,以及试验结果测量时带来的误差等.

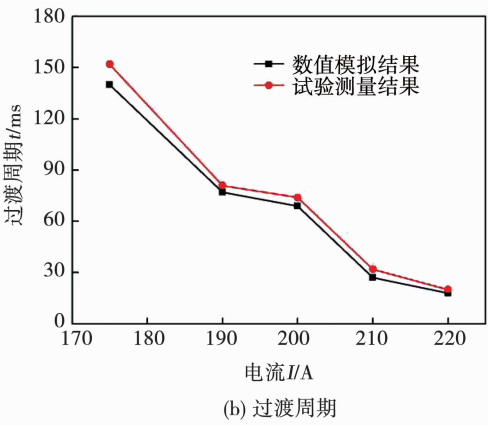
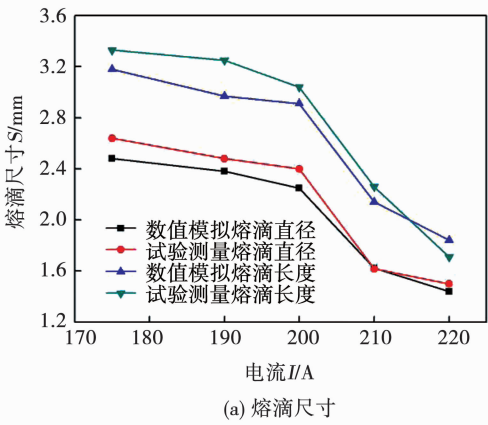


图 6 模拟结果同试验结果对比

Fig. 6 Comparisons between simulated results and experimental measurements

3 结 论

(1) 基于 FLUENT 软件,考虑热分析,建立了 GMAW 焊接熔滴过渡二维轴对称数学模型,实现了熔滴过渡过程数值模拟.

(2) 熔滴过渡过程中熔滴的行为变化引起电势分布变化,熔滴脱离焊丝后,电流不流经脱落熔滴.

(3) 工件中心部位热通量最大,且热通量沿径

向距离减小,其分布趋势同焊缝熔深分布相吻合.
(4) 数值模拟结果同试验结果基本吻合良好.

参考文献:

[1] Choi J H, Lee J, Yoo C D. Dynamic force balance model for metal transfer analysis in arc welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 34: 2658-2664.

(2) 接头经过热处理后,DD6/FGH96 接头抗拉强度由焊态 962.5 MPa 提高到热处理后 1 085 MPa.

(3) 接头断口分析结果表明,其表现为脆断特征,且断口表面存在台阶形貌.

参考文献:

[1] 《中国航空材料手册》编辑委员会.《中国航空材料手册(第 2 卷)变形高温合金、铸造高温合金》[M]. 北京:中国标准出版社,2002.

[2] 《中国航空材料手册》编辑委员会.《中国航空材料手册(第 5 卷)粉末冶金材料 精密合金与功能材料》[M]. 北京:中国标准出版社,2002.

[3] 张田仓,李 晶,季亚娟,等. TC4 钛合金线性摩擦焊接头组织和力学性能[J]. 焊接学报,2010, 31(2): 53 – 56.

Zhang Tiancang, Li Jing, Ji Yajuan, *et al.* Structure and mechanical properties of linear friction welding joint[J]. Transactions of

the China Welding Institution, 2010, 31(2): 53 – 56.

[4] 季亚娟,刘燕冰,张田仓,等. 振幅对线性摩擦焊接头组织和元素分布的影响[J]. 焊接学报,2012, 33(9): 101 – 104.

Ji Yajuan, Liu Yanbing, Zhang Tiancang, *et al.* Effect of amplitude on microstructures and representative element distribution in linear friction welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(9): 101 – 104.

[5] 季亚娟,刘燕冰,张田仓,等. TC4/TC17 线性摩擦焊接头组织及力学性能[J]. 焊接学报,2012, 33(10): 109 – 112.

Ji Yajuan, Liu Yanbing, Zhang Tiancang, *et al.* Structure and mechanical properties of TC4/TC17 linear friction welding joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33 (10): 109 – 112.

作者简介:季亚娟,女,1979 年出生,工学硕士,高级工程师. 从事搅拌摩擦焊、线性摩擦焊工艺研究. 发表论文 10 余篇. Email: jyj_moon@sohu. com

[上接第 76 页]

[2] Park A Y, Kim S R, Hammad M A, *et al.* Modification of pinch instability theory for analysis of spray mode in GMAW[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42: 1 – 6

[3] 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, 25(2): 47 – 51.

Li Shikai, Chen Maoai, Wu Chuansong. Analytical model for dynamic process of metal transfer in pulsed GMAW[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(2): 47 – 51.

[4] Ersoy U, Kannatey-Asibu E, Hu S J. Analytical modeling of metal transfer for GMAW in the globular mode[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 2008, 130: 1 – 8.

[5] Xu G, Hu J, Tsai H L. Three-dimensional modeling of arc plasma and metal transfer in gas metal arc welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52: 1709 – 1724.

[6] Rao Z H, Liao S M, Tsai H L. Effects of shielding gas compositions on arc plasma and metal transfer in gas metal arc welding [J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107: 1 – 11.

[7] Boselli M, Colombo V, Ghedini E, *et al.* Dynamic analysis of droplet transfer in gas-metal arc welding: modelling and experiments [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2012, 21: 1 – 6.

[8] Nemchinsky V. A droplet in the inter-electrode gap during gas metal arc welding [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44: 1 – 7.

作者简介:丁雪萍,女,1988 年出生,博士,助理研究员. 主要从事焊接过程数值分析和监控工作. 发表论文 9 余篇. Email: dingxueping@cigit. ac. cn

通讯作者:李 桓,男,教授. Email: lihuan@tju. edu. cn