

间隙对 GMAW 立焊熔滴过渡的影响及温度场特性

王子然, 张善保, 杨战利, 杨义成
(哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨 150028)

摘要: 采用高速摄像采集系统对间隙存在及变化时 GMAW 摆动电弧立向上焊焊接过程中的熔滴过渡行为实时图像进行采集, 分析了熔滴过渡行为对电弧质量和焊接过程的影响, 结合电弧质量分析仪采集的焊接电流、电弧电压概率曲线图对试验结果加以验证和补充解释, 最后通过有限元数值模拟技术对 GMAW 立向上焊接过程数值模型进行建立, 并对瞬态焊接温度场进行验证和分析。结果表明, 随着间隙的出现及尺寸的增加(0~4 mm 范围内), GMAW 立向上焊熔滴过渡形式由短路过渡向特殊的滴状过渡发展, 模拟结果说明 GMAW 立向上焊热影响区具有较大的温度梯度特性。

关键词: 间隙; GMAW 立焊; 熔滴过渡; 有限元; 温度梯度

中图分类号: TG 442 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.2019400133

0 序 言

实际生产中, 某些大型结构件由于体积大、重量高、结构复杂, 自动化焊接生产过程中存在难以翻转或翻转成本过高等问题, 在一定焊接质量要求下往往采用立向上焊。间隙是实际生产中结构件加工、组焊时不可避免的因素, 熔化极气体保护焊(gas metal arc welding, GMAW)立向上焊以其熔池的特殊受力状态对间隙的出现及尺寸的增加尤为敏感, 究其原因是焊接过程中熔滴过渡形式的变化对电弧质量以及焊接过程产生了影响。据此, 探究 GMAW 摆动电弧立向上焊接过程中熔滴过渡变化情况具有十分重要的意义^[1-3]。

目前 GMAW 立向上焊主要包括单丝、双丝、窄间隙等, 文献 [4-6] 对焊接过程熔滴过渡行为进行了阐释, 但鲜有对实际生产中间隙及间隙对熔滴过渡影响的问题进行报道。焊接机器人以其高柔性和可靠性近年来发展蓬勃, 在各领域应用广泛且逐年递增。据此, 采用焊接机器人作为执行机构, 搭配高速摄像采集系统和电弧质量分析系统对间隙变化量在 0~4 mm 时机器人 GMAW 摆动电弧立向上焊焊接过程熔滴过渡的变化情况及影响进行了图像采集、数据处理和试验分析。最后采用有限元

技术对机器人 GMAW 摆动电弧立向上实时焊接过程进行模拟及温度场验证, 得到其温度场特性。

1 试验方法

试验母材选用 Q235 钢, 焊丝为 $\phi 1.2$ mm 的 H08Mn2Si 焊丝, 母材化学成分如表 1 所示, 保护气成分为混合气 (Ar80% + 20%CO₂), 工艺规范如表 2 所示, 试件板材尺寸为 250 mm × 100 mm × 8 mm。

表 1 母材 Q235 钢的化学成分表 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of base metal Q235

C	Mn	Si	S	P	Cu	Fe
0.18	1.60	0.55	0.035	0.035	—	余量

表 2 试验工艺参数

Table 2 Test process parameters

焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 v/(cm·min ⁻¹)	摆动幅度 A/mm	摆动频率 f/Hz	两侧壁停留时间 t/s
170	17	27	3.5	1.0	0.3/0.3

将试件固定于铸铁平台上, 采用 GMAW 摆动焊, 试验平台体执行机构采用 KUKA KR-16 型机器人搭配 FRONIUS TPS5000型全数字式逆变焊接电源, 同时联合 Sony DSC-W290 型 CCD 结构相机和 FastCam Ultima 512 型高速影像采集系统及电弧质量分析仪对焊接过程的实时相关数据进行采集, 平台搭建如图 1 所示。



图 1 焊接试验平台
Fig. 1 Welding test platform

2 试验结果与分析

2.1 熔滴过渡形式的影响

当间隙尺寸为 0 mm 时, GMAW 立向上焊在两侧壁和根部具有短路过渡的典型特征. 当电弧运动到侧壁一端时, 电弧偏向侧壁, 熔滴的过渡方向并不是沿着电弧方向, 而是沿着电弧力和重力方向的合力方向向熔池过渡. 熔滴进入熔池后, 熔化金属在温度梯度和浓度梯度的作用下向对称端运动; 当电弧运动到根部时, 电弧拉长, 根据最小

电压原理及电弧自身的调节效应,焊丝伸出压缩电弧,电弧又回到稳定工作点,此时电弧建立在焊丝与根部熔池之间,熔滴也呈短路过渡方式过渡,所不同的是此时电弧吹力和重力方向基本一致,熔池在合力作用下直接过渡到熔池当中,而后电弧继续向另一侧壁运动,如图2所示.当电弧在机器人的带领下摆动到焊道根部,由于熔池金属向间隙填充,电弧拉长(电压增加),根据最小电压原理和电弧的自调节效应,电极伸长,电弧压缩重新回到稳定工作点,此时,电弧与离根部之间的距离较没有间隙时更近;熔滴过渡趋势仍为短路过渡,但由于间隙的存在导致两侧母材所携带的磁场已经不对称,随着间隙尺寸的增加(0~4 mm),这种趋势有所增加.当电弧移动到根部时,电弧熔化焊丝端部形成熔滴,此时熔滴受到两侧磁场所力的作用向合力方向旋转,与此同时,熔滴逐渐长大,随着熔滴长大,受合力作用越来越明显.当熔滴长大到一定尺寸与熔池相接触,在重力、电弧吹力、两侧端板磁场所力的作用下,熔滴向斜下方向发生颈缩,同时被磁场所力拉成月牙形,直至拉断,形成断弧,这是大间隙自动化快速GMAW焊电弧不稳定的原因,如图3所示.

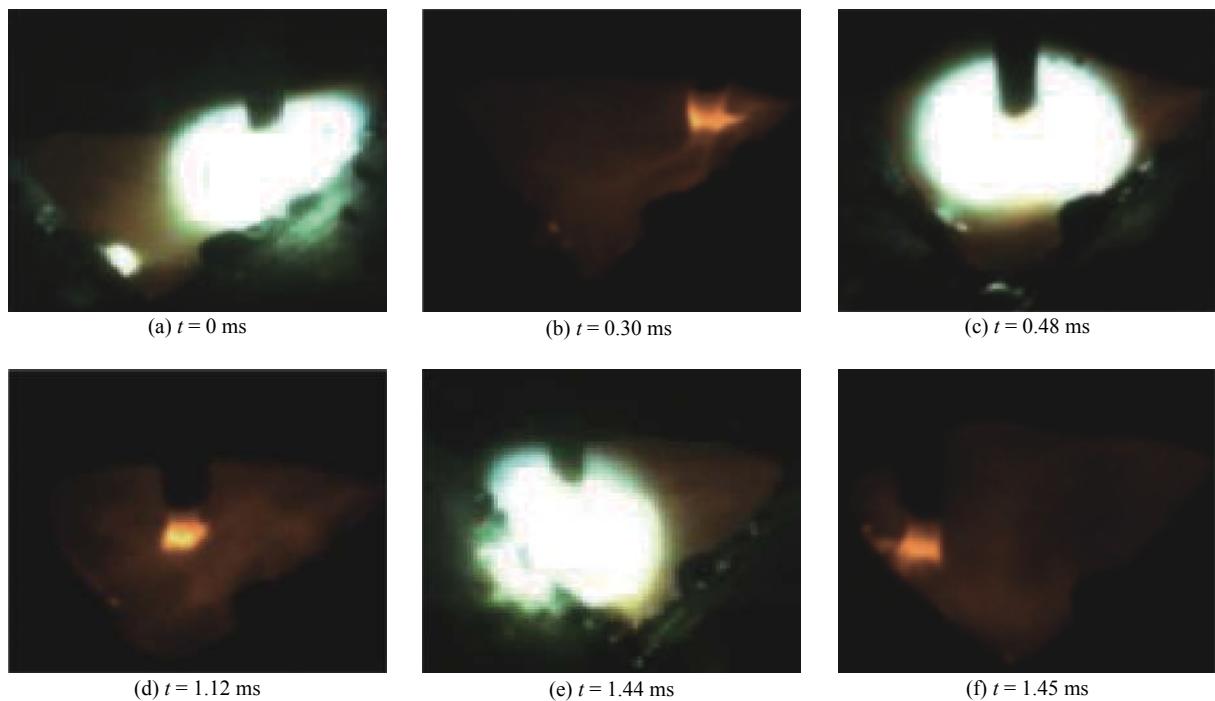


图 2 间隙尺寸为 0 mm 时熔滴过渡和电弧行为
Fig. 2 Droplet transition and arc behavior when gap is 0mm

采用弧焊质量分析系统对相同焊接规范及相

同运动参数下间隙尺寸在 0~4 mm 变化时直流非

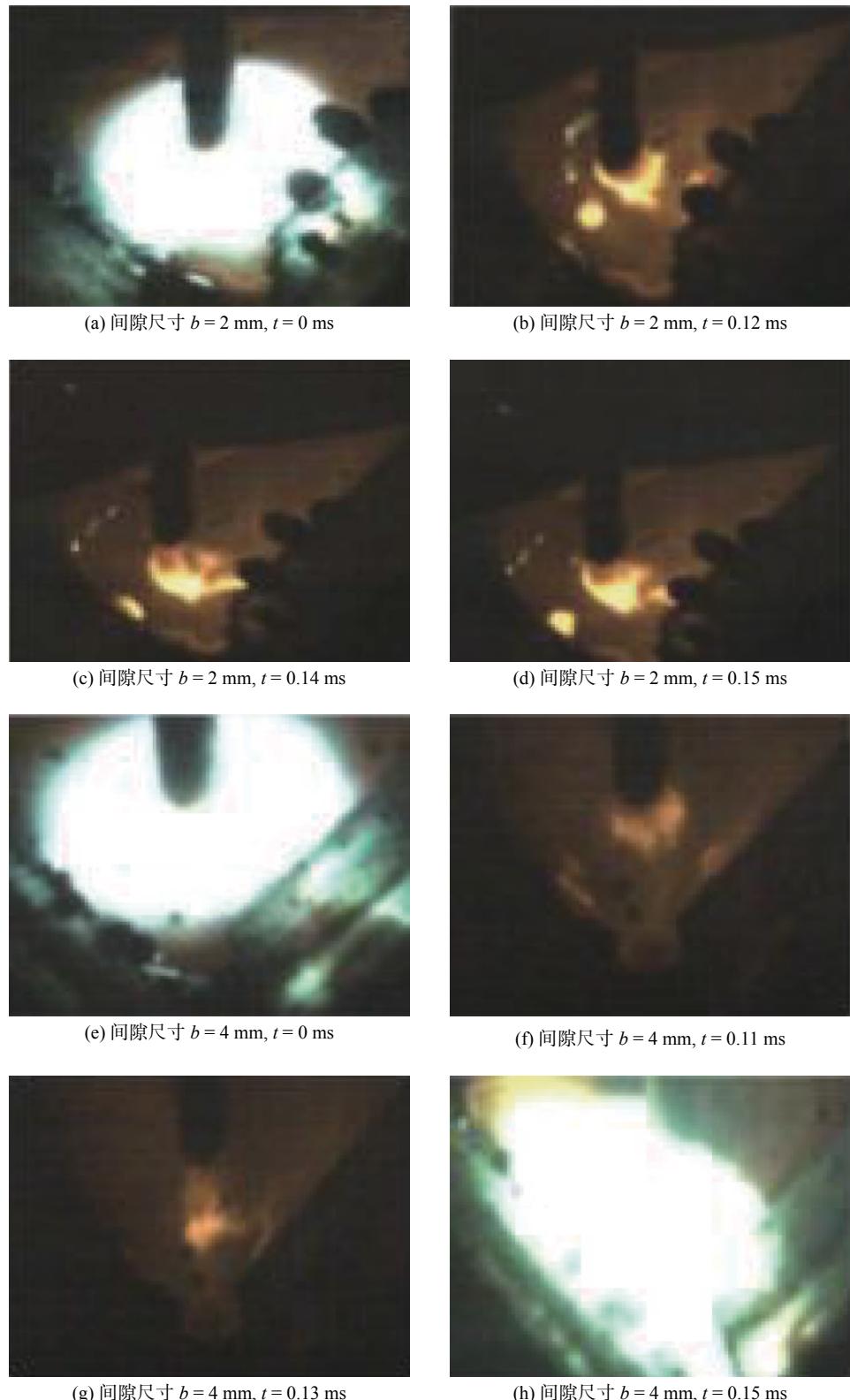


图 3 不同间隙尺寸下熔滴过渡和电弧行为
Fig. 3 Droplet transition and arc behavior at different gap sizes

脉冲 GMAW 焊的瞬时焊接电流、电压值采集后得到的密度分布叠加曲线^[7-9], 电信号采集时间为 5 s, 采集周期为 20 μs , 如图 4、图 5 所示.

焊接电流在接近零值附近的概率较高, 说明自

动化立向上 MAG 焊短路过渡的程度较大, 如图 4 所示. 电压分布曲线具有明显的“双驼峰”态势, 小驼峰和大驼峰中间有一个低谷, 这是某一时刻熔滴开始短路以及电弧复引时的瞬时电压. 电压散布曲

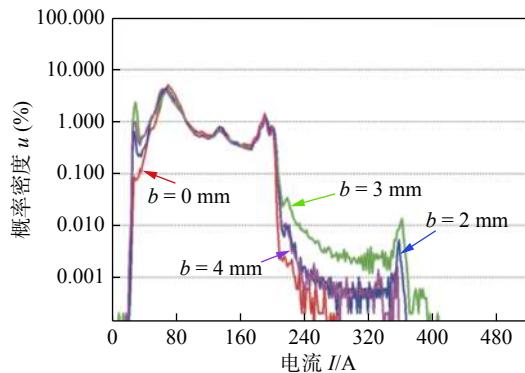
图 4 电流分布密度叠加图 (间隙尺寸 $b: 0 \sim 4 \text{ mm}$)

Fig. 4 Current distribution

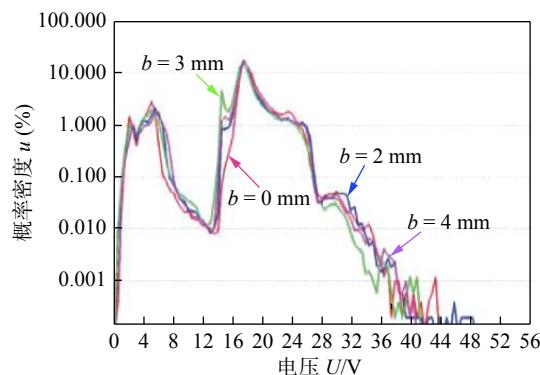
图 5 电压分布密度叠加图 (间隙尺寸 $b: 0 \sim 4 \text{ mm}$)

Fig. 5 Voltage distribution

线最右侧概率较低的高值电压分布因为过渡完成后电弧重引弧电压瞬时上升产生,这一点弧长最长,造成电压值较高,如图 5 所示。其它条件一定,间隙尺寸在 $0 \sim 4 \text{ mm}$ 变化时,机器人立向上快速 GMAW 焊熔滴过渡方式主要呈现短路过渡特征,与之前分析相符,熔滴过渡后产生的大电流曲线整体分布不高,都基本小于 0.1% ,曲线波峰出现在小电流区间。这说明,直流 GMAW 立向上焊短路过渡中,电弧加热焊丝端部逐渐形成熔滴,直至电弧熄灭,熔滴与在焊丝端部与熔池间形成短路这一过程在整个短路过渡过程中所占时间权重较大,熔滴较大。

结合以上结果,当间隙尺寸在 $0 \sim 4 \text{ mm}$ 变化时,焊接过程稳定性逐渐下降,究其原因是由于短路过渡熔滴过渡行为发生了变化,熔滴液桥在偏磁场的影响下拉断,熔滴划入熔池。因此为保证焊接过程的稳定性和焊缝良好成形,所用的焊接参数要能够保证熔滴尺寸的合理性,一则熔滴尺寸保证熔池体积合理,避免熔池过大下淌;二则保证过渡熔

滴与偏磁场相平衡,保证焊接过程的稳定飞溅小;相同焊接规范下焊后结果如图 6 所示。

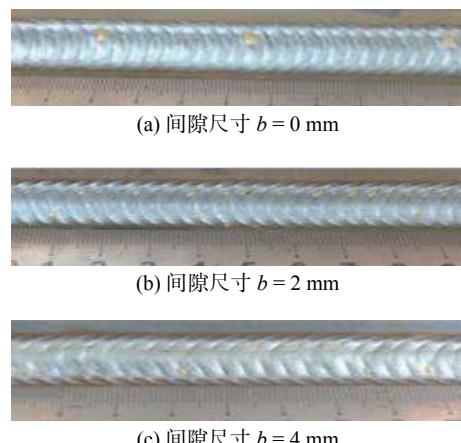
图 6 间隙尺寸 $0 \sim 4 \text{ mm}$ 时试件焊后结果

Fig. 6 Welding results

综上所述,直流非脉冲立焊主要以短路过渡为主,短路所占时间较长,短路过渡频率较低。相同规范不同间隙时,焊接过程主要的区别分别表现在熔滴长大到形成颈缩桥,以及再引弧。在相同工况下,电弧运动到焊道根部间隙处,由于电弧高度发生变化,根据弧长自身的调节作用以及最小电压原理,焊丝伸出达到电弧稳定燃烧点,同时随着间隙的增大,熔化金属越来越多地向间隙内填充,根部的熔池金属体积增大,曲线左侧低电流区域时间权重增加,焊丝与熔池之间气体间隙距离增加,再引弧击穿气体间隙所需电压间隙距离增加,出现曲线右侧尾部的高压区。 $0 \sim 3 \text{ mm}$ 间隙曲线右侧尾部的高压区电压越来越高。间隙尺寸达到 4 mm 时,高压区萎缩,这是因为间隙过大,电弧达到根部,熔池金属大部分填充间隙,熔滴没有成长到过渡尺寸就可能已经被非对称的磁场拉断,形成“断弧过渡”。

2.2 温度场验证

根据实际工况,模拟热源采用双椭球移动热源^[10]。焊接热源摆动行走,因此以起始点移动热源中心为原点建立移动坐标系, X, Y, Z 三轴满足右手定则,指定 Y 为焊接方向,热源中心移动速度在移动坐标系上的分量分别为 u, v, w ; 点 (x_0, y_0, z_0) 为移动坐标系下的焊接起始点; t 为焊接时间; 移动热源行走的任意点的坐标为

$$x = x_0 + ut \quad (1)$$

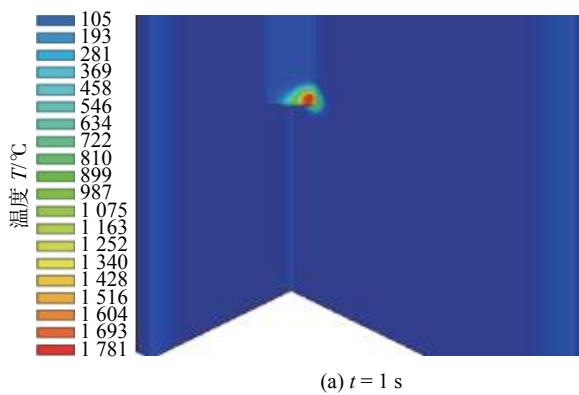
$$y = y_0 + vt \quad (2)$$

$$z = z_0 + wt \quad (3)$$

因此移动坐标系下该热源的数学模型为

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(Q_f)}{abc_f\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{3(x-x_0-ut)^2}{c_f^2} - \frac{3(y-y_0-vt)^2}{a^2} - \frac{3(z-z_0-wt)^2}{b^2}\right) \quad (4)$$

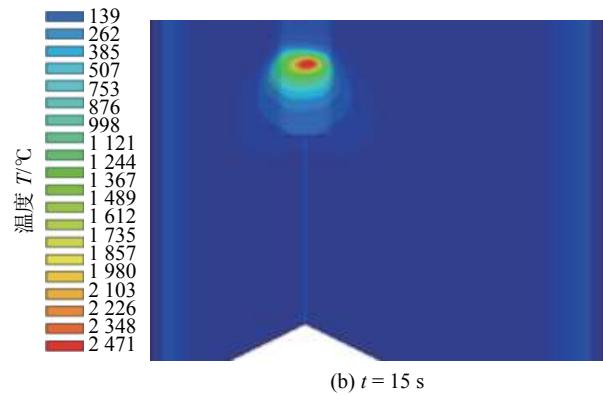
$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(Q_r)}{abc\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{3(x-x_0-ut)^2}{c_r^2} - \frac{3(y-y_0-vt)^2}{a^2} - \frac{3(z-z_0-wt)^2}{b^2}\right) \quad (5)$$



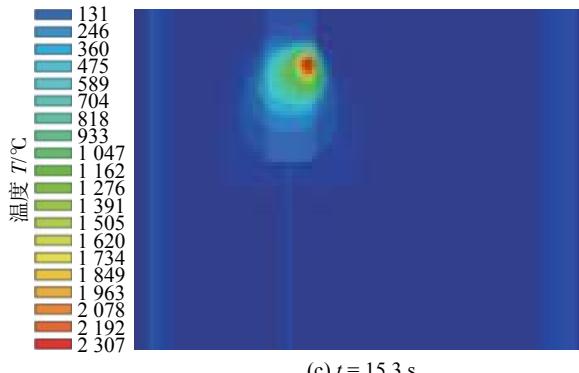
(a) $t = 1$ s

式中: q_f, q_r 为前后半球的热流密度; a, b, c 为椭球体半轴长; Q_f, Q_r 为前后半球热量分布.

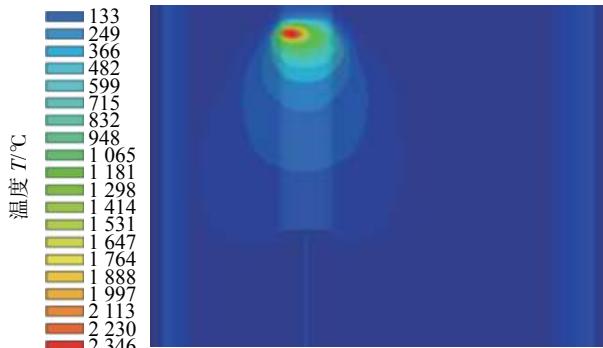
瞬态温度场模拟结果如图 7 所示, 图 7a ~ 7d 分别描述了摆动移动热源运动的 4 个时刻, 即起弧、正向摆动运动、一侧壁停留, 反向摆动. 随摆动移动, 熔池及周围温度逐渐增加, 达到某一时刻, 热源周围温度场趋于饱和. 最终形成稳定的立焊焊接过程温度场, 焊接熔池体积较小, 有效的控制了下淌敏感性. 边界线均匀; 温度梯度较大; 说明立向上焊达到一种快速冷却, 快速成形的过程, 与实际 GMAW 立焊成形机理相符.



(b) $t = 15$ s



(c) $t = 15.3$ s



(d) $t = 40$ s

图 7 模拟结果

Fig. 7 Simulation results

试件模型背部热影响区提取点 (N74794, 58314, 45954, 33694) 的模拟温度场曲线与实际测量温度曲线进行对比, 模拟结果如图 8 所示. 实际瞬态温度曲线提取结果如图 9 所示, 可以看出: ①实际的加热速率更快, 冷却速率更缓慢. ②峰值温度和 200 s 冷却速率基本接近. ③四个温度场的基本变化趋势与实际测量的温度场热循环曲线接近. 综上验证了数值模型的准确性, 辅助了以上结果的论证.

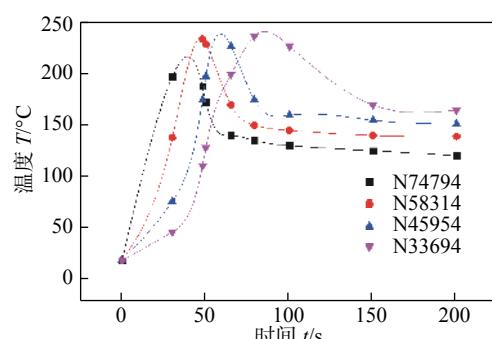


图 8 模拟温度场曲线

Fig. 8 Simulation results of temperature field curve

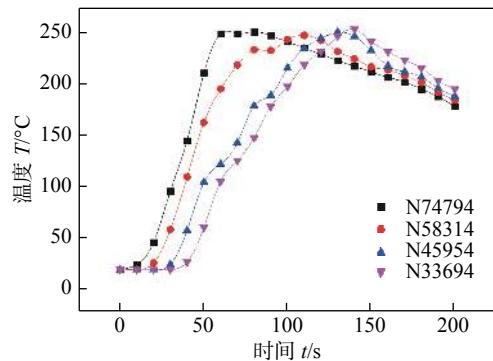


图 9 测量结果
Fig. 9 Measured results

3 结 论

(1) 当零件组装间隙范围在 $0 \sim 4$ mm 变化时, 机器人立向上 GMAW 焊焊接过程短路过渡熔滴行为发生变化, 熔滴液桥在偏磁场的影响下拉断, 熔滴进入熔池. 为保证焊接结果的可靠性和焊接过程的稳定性, 一则熔滴尺寸保证熔池体积合理, 避免熔池过大下淌; 二则保证过渡熔滴与偏磁场向平衡, 形成稳定的高频短路过渡.

(2) 从模拟验证的结果来看, GMAW 立焊焊接过程在焊接方向温度梯度较大, 说明立向上焊达到一种快速成形, 快速冷却的过程. 实际模型的准确性得到了验证.

参考文献:

- [1] 郭波, 石永华, 易耀勇. 基于电弧形态的熔滴过渡识别 [J]. 焊接学报, 2017, 38(2): 110–114.
Guo Bo, Shi Yonghua, Yi Yaoyong. Droplet transition recognition based on arc morphology[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2017, 38(2): 110–114.
- [2] 陈超, 范成磊, 林三宝, 等. GMAW 短路过渡过程的二次引弧现象 [J]. 焊接学报, 2018, 39(12): 10–12.
Chen Chao, Fan Chenglei, Lin Sanbao, et al. Secondary arcing phenomenon in GMAW short circuit transition[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2018, 39(12): 10–12.
- [3] 丁雪萍, 李桓. GMAW 熔滴过渡行为数值分析及试验验证 [J]. 焊接学报, 2017, 38(12): 71–76.

Ding Xueping, Li Huan. Numerical analysis and experimental verification of droplet transition behavior in GMAW[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2017, 38(12): 71–76.

- [4] 徐望辉, 林三宝, 杨春利, 等. 摆动电弧窄间隙立向上 GMAW 焊缝成形 [J]. 焊接学报, 2015, 36(4): 57–60.
Xu Wanghui, Lin Sanbao, Yang Chunli, et al. Narrow gap vertical GMAW weld forming with oscillating arc[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2015, 36(4): 57–60.
- [5] 兰虎, 张华军, 陈阿静, 等. 窄间隙 MAG 立焊动态过程模拟及热物理特性 [J]. 焊接学报, 2015, 36(7): 78–81.
Lan Hu, Zhang Huajun, Chen Ajing, et al. Dynamic process simulation and thermophysical properties of narrow gap MAG vertical welding[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2015, 36(7): 78–81.
- [6] 徐望辉, 林三宝, 杨春利, 等. 摆动电弧窄间隙 GMAW 熔滴过渡规律 [J]. 焊接学报, 2017, 38(2): 110–114.
Xu Wanghui, Lin Sanbao, Yang Chunli, et al. Dynamic arc narrow gap GMAW droplet transition rule[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2017, 38(2): 110–114.
- [7] 刘文吉, 段瑞彬, 岳建锋, 等. 窄间隙 P-MAG 焊电弧行为及信号传感特征分析 [J]. 焊接学报, 2018, 39(6): 26–28.
Liu Wenji, Duan Ruibin, Yue Jianfeng, et al. Analysis of arc behavior and signal sensing characteristics of P-MAG welding with narrow gap[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2018, 39(6): 26–28.
- [8] Dong Xiaoting, Yue Jianfeng, Liu Wenji, et al. Numerical simulation of asymmetric fillet weld pool based on temperature field and flow field coupling[J]. China Welding, 2018, 27(4): 27–31.
- [9] Jiang Yongyue, Zhao Zhijiang, Li Li. Numerical simulation for GMAW with a new model based on phase field model[J]. China Welding, 2018, 27(1): 46–51.
- [10] 张世亮, 胥国详, 曹庆南, 等. 基于 FLUENT 软件的 GMAW 熔池动态行为数值分析模型 [J]. 焊接学报, 2018, 39(2): 76–79.
Zhang Shiliang, Xu Guoxiang, Cao Qingnan, et al. Numerical analysis model of dynamic behavior of GMAW welding pool based on FLUENT software[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2018, 39(2): 76–79.

第一作者简介: 王子然, 男, 1990 年出生, 硕士. 主要从事焊接工艺, 机器人焊接专机及产线的研制工作. 发表论文 4 篇. Email: 285401897@qq.com

通信作者简介: 张善保, 男, 教授. Email: 13304506101@163.com