

旋转电弧窄间隙焊温度场和侧壁熔深的数值模拟

黎文航¹, 胡 婷¹, 刘 川¹, 王加友¹, 王 森²

(1. 江苏科技大学 材料科学与工程学院, 镇江 212003; 2. 南京鹏力科技有限公司, 南京 211106)

摘 要: 针对旋转电弧窄间隙 MAG 焊缝成形研究需要, 采用 Ansys 软件对旋转电弧窄间隙 MAG 焊接温度场进行数值模拟, 研究焊缝成形的影响因素。考虑旋转电弧窄间隙 MAG 焊特点, 实现热源模型旋转加载和旋转电弧窄间隙焊接三维温度场数值计算, 模拟温度场结果与试验焊缝形貌吻合良好。为进一步提高计算效率, 根据热源等效和旋转电弧热源分布特点, 提出了一种类似马鞍形圆环的等效热源, 侧壁熔深模拟结果与实际较符合, 且计算效率大为提高。研究结果为进一步的熔深控制和焊接变形研究奠定基础。

关键词: 旋转电弧窄间隙焊; 焊缝成形; 数值模拟; 等效热源; Ansys

中图分类号: TG 402 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)08-0005-04

0 序 言

旋转电弧窄间隙 MAG 焊是一种高效优质的焊接方法, 如何保证坡口侧壁的均匀熔透性是它的一大工艺难点。由于侧壁熔深不能直接观察且难以通过其它焊缝成形参数表征, 以往主要依靠焊接工艺试验研究各参数对焊缝成形的影响^[1,2], 难以做到实时预测与控制, 且难以全面深入研究焊接过程。数值模拟方法具有高效经济、可全面考虑各方面因素等特点, 是研究焊接过程相关机理的有效工具。目前已有南昌大学贾剑平等^[3]和哈尔滨工业大学 Guo 等人^[4]对旋转电弧进行了温度场模拟和焊缝成形研究, 取得较好效果, 但其研究或者未针对窄间隙坡口、或者对热源分析及侧壁熔深研究不够深入。文中针对上述不足, 利用 ANSYS 软件对旋转电弧窄间隙 MAG 焊温度场、焊缝成形进行数值模拟, 进而为提高运算效率, 研究了热源的等效化^[5]。

1 焊接试验

文中旋转电弧焊炬采用偏心导电嘴对焊丝折弯实现电弧旋转, 具体原理可参考文献^[6]。工件材料为 Q235, 形状尺寸如图 1 所示, 由于采用多层单道焊, 第一层焊后, 坡口底部中间凹两边略高, 故将坡

口加工成 U 形。焊接试验所用焊丝为 1.2 mm 的 H08Mn2Si, 保护气体为 80% Ar + 20% CO₂, 流量为 30 L/min。其余工艺参数见表 1。试验时, 分别设置 ± 1 mm, ± 0.5 mm, 0 mm 的焊缝偏差(即电弧旋转中心与坡口中心的差值, 以焊接方向焊炬左偏为正), 焊后对工件进行横向切割, 打磨和腐蚀, 获取其焊缝形貌。

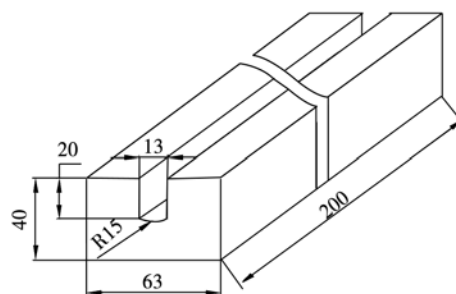


图 1 试验工件 U 形坡口尺寸 (mm)

Fig. 1 Test piece of U type groove

表 1 焊接工艺参数

Table 1 Welding parameters

焊炬高度	焊接电流设定值	电弧电压	焊接速度	旋转频率
H/mm	I/A	U/V	$v_w/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	f/Hz
20	300	31	230	50

2 有限元模型

根据试验工件尺寸建立有限元模型如图 2 所示。工件左下角为坐标原点, 焊接方向为 y 轴, 工件厚度方向为 z 轴。采用 8 节点六面体单元 (solid70

收稿日期: 2014-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51005107, 51475218); “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项资助项目 (2012ZX04008031); 江苏省青蓝工程科技创新团队、优秀青年骨干教师资助项目

单元)划分网格. y 方向按 3 mm 等距划分. 垂直 y 轴的截面上, 焊缝中心区域采用较为细密的网格(约 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$), 远离焊缝处采用较稀疏网格(约 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$).

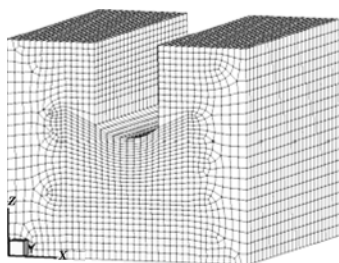


图 2 模型网格划分

Fig. 2 Model mesh

随温度变化的材料性能如表 2 所示^[7]. 其它参数有: 环境温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 熔化温度 $1\ 450\text{ }^{\circ}\text{C}$.

表 2 低碳钢热物理性能

Table 2 Low carbon steel thermal physical properties

温度 $T/^{\circ}\text{C}$	比热容 $c/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	热导率 $\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$
20	420	52.0
100	487	51.0
300	513	44.0
500	547	37.0
700	619	32.5
900	694	26.2
1 470	694	31.4
1 500	694	120.0
2 000	698	120.0
5 000	698	120.0

3 旋转电弧焊接热源模型的建立

3.1 旋转电弧的运动轨迹模型

在旋转电弧焊接过程中, 焊接电弧不但沿焊接长度方向(y 轴)作匀速直线运动, 而且绕焊炬中心作水平旋转. 假设焊丝伸出长度不变化, 则 z 轴方向位置不变, 电弧位置的 x 坐标和 y 坐标公式如下.

$$\begin{cases} x_n = x_{\text{fst}} + R_{\text{wire}} \times \sin\theta \times \cos(n \times t_{\text{inc}} \times \omega) \\ y_n = y_{\text{fst}} + n \times t_{\text{inc}} \times v_w - R_{\text{wire}} \times \sin\theta \times \sin(n \times t_{\text{inc}} \times \omega) \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_{fst} 为起始“电弧旋转中心位置”的 x 坐标; y_{fst} 为起始“电弧旋转中心位置”的 y 坐标; R_{wire} 为焊丝折弯处到熔池表面的距离; θ 为焊丝折弯与垂直轴的夹角(25°); ω 为电弧旋转角速度; t_{inc} 为载荷步时间; n 为载荷步的步数; v_w 为焊接速度.

由于电弧旋转, 焊接时熔滴受离心力作用会呈现非轴向熔滴过渡, 如图 3 所示. 且熔滴落到熔池后会继续向熔池边缘铺展, 相比轴线熔滴过渡, 会将更多热量带到坡口侧壁. 因此在加载热源时, 设定电弧倾角 θ' 比实际焊丝折弯角度更大, 以反映上述热量分配的变化.

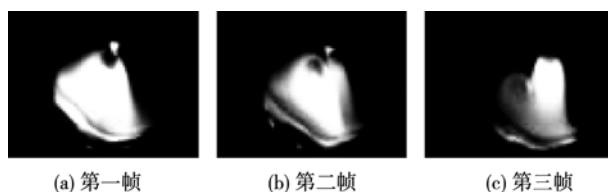


图 3 非轴向过渡高速摄像(每帧 0.001 s 间隔)

Fig. 3 Nonaxial transition photos of high speed camera

电弧的旋转通过在载荷步内不断改变热源位置来实现. 显然熔池前后左右四个位置是必须的, 而为了提高模拟精度, 可以在上述四个位置中间插入热源点, 但这也会使得计算时间和空间大大增加. 作者比较一个旋转周期内热源数分别为 4, 8, 16 的情况, 发现对侧壁熔深的影响不大, 故选择一个电弧周期 4 个热源, 即每个载荷步 5 ms, 载荷子步数为 1.

3.2 旋转电弧的热源模型

根据已有经验, 旋转电弧焊作为一种熔化极焊接方法, 一般考虑选取两类热源: 体热源, 体热源和表面热流的复合热源^[8]. 该焊接方法的特点是电弧旋转加热形成一个大熔池(熔池形貌类似双椭球), 但电弧下方并未形成双椭球, 故文中并不采用双椭球热源, 而是选择半椭球热源倾斜加载在 U 形坡口内, 如图 4a 所示, 每个半椭球热源模型如图 4b 所示, 其中 a, b, c 为半椭球的形状系数, 计算时形状系数 $a = b \neq c$. 由于是窄间隙焊接, 焊接效率相对较高, 为 0.9.

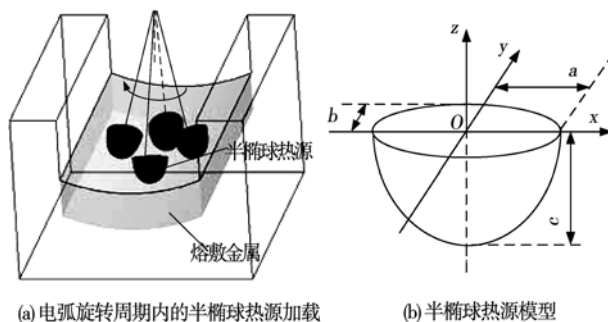


图 4 半椭球热源旋转加载示意图

Fig. 4 Semi ellipsoidal heat source rotation schematic diagram

不同的热源有效半径对焊接温度场的影响不同,半径越小,热量相对集中,焊接区域的温度越高,则焊接熔池的熔深在不断变大,熔宽在不断变小.为了保证工件有足够的侧壁熔深,最优的热源有效半径为 4 mm.

文中结合了 ANSYS 中的“生死单元”技术和 APDL 语言编程来实现在焊接过程中焊接热源的移动加载.

3.3 边界条件及初始条件的确定

焊接过程中,所有有限元模型暴露在空气的表面节点都施加对流边界条件. 设定的随温度变化的对流系数可参考文献[9].

4 热源模型及验证

图 5 为焊接 4 s 后过坡口中心的 yOz 面焊缝温度场云图,熔池截面形状类似为半椭圆,熔池中心温度最高,熔池前方等温线密集,温度梯度大,而熔池后方等温线比较稀疏,温度梯度比较小. 由于在模拟中没有考虑对流、电磁力、表面张力、熔滴冲击力等驱动力,所以模拟得到的熔深比较浅. 图 6 所示为焊接 4 s 时刻实际焊缝形貌和计算的温度轮廓比较,从图 6 中可以看出采用基于焊缝形貌的移动热源模型能够准确计算焊接温度场,模拟温度场结果和焊缝形貌吻合良好.

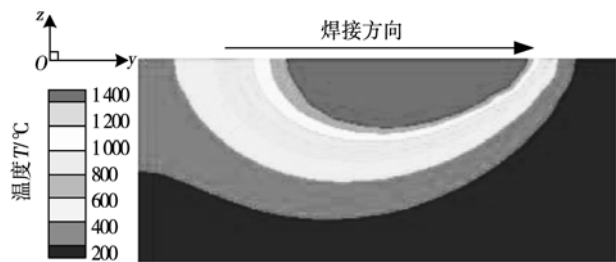


图 5 yOz 面温度场云图

Fig. 5 Cloud in yOz surface temperature field

侧壁熔深模拟计算值 P_{sim} 与实际测量值 P_{test} 的比较结果如表 3 所示,焊炬居中焊接时模拟计算值 P_{sim} 与实际测量值 P_{test} 吻合良好;而当焊缝偏差为 ± 1 mm 时,远离焊炬那侧熔深模拟结果 P_{sim} 偏小,误差 E_p 相对较大,这是因为在数值计算中简化了热源模型,没有考虑熔池流动、熔滴铺张对该侧热量分配的影响.

在模型的网格划分中,由于焊缝周围熔池边界的变化导致少量网格畸变,而模型计算中的网格是预先划分完成的,也会导致一些计算误差.

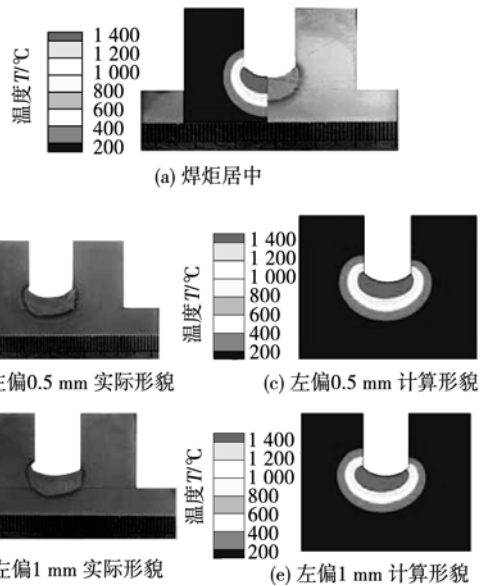


图 6 模拟结果与实际结果比较

Fig. 6 Comparison between simulation results and experiment results

表 3 侧壁熔深模拟结果与试验测量值比较

Table 3 Comparison between side wall penetration's simulated results and experiment results

种类	模拟计算值		试验计算值(平均值)		误差	
	P_{sim}/mm		P_{test}/mm		E_p/mm	
	左	右	左	右	左	右
焊炬居中	1.22	1.22	1.15	1.08	0.07	0.14
左偏 0.5	1.64	0.68	1.56	0.60	0.08	0.08
右偏 0.5	0.67	1.49	0.66	1.61	0.01	0.12
左偏 1	2.28	0.27	2.08	0.46	0.20	0.19
右偏 1	0.27	2.30	0.60	2.00	0.33	0.30

5 等效热源模型

如前所述,模拟 50 Hz 电弧旋转的最大载荷步为 5 ms,使得计算效率低、空间需求大. 为满足大型结构多层焊温度场模拟、应力应变模拟的需求,有必要根据旋转电弧热源分布特点,进行热源等效化研究.

随着电弧旋转频率的增高,每个旋转周期内电弧的轨迹越接近于圆形;而在任意瞬间,电弧中心处热量高,两边热量低,两者结合使得一个电弧周期内热源类似于圆环. 若考虑熔敷金属 U 形成形,则热源更类似于一个马鞍形圆环,如图 7 所示. 考虑到若热源横截面选取高斯热源分布,则进行等效热源推导时会出现不可积分的情况,同时考虑 Ansys 热源加载的可行性,以熔敷金属所在的圆环柱和热源所在的圆环柱取交集,得到图 7 所示的等效热源形

状,其选择参数包括内径、外径和厚度等. 通过多次模拟计算,设定内径 5 mm,外径 8 mm.

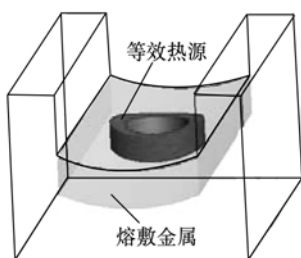


图 7 等效热源模型

Fig. 7 Equivalent heat source model

使用等效热源模拟时设置时间步长 t_{inc} 为 0.05 s,计算速度大大提高,图 8 所示为焊接 7.5 s 后实际焊缝形貌和计算的温度轮廓比较,结果显示侧壁熔深达到要求,由于热源模型的简化,工件侧壁与坡口底部过渡不平滑.

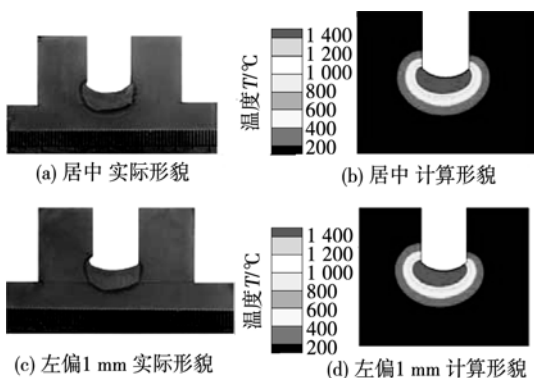


图 8 等效热源下模拟结果与试验结果的比较

Fig. 8 Comparison between simulation results using equivalent heat source and experiment result

表 4 为等效热源的侧壁熔深模拟计算值 P_{sim} 与实际测量值 P_{test} 的比较结果,研究结果显示电弧居中和偏差 1 mm 时,模拟结果与试验结果比较吻合,当电弧偏离侧壁的距离较小时,偏离焊炬那一侧的模拟侧壁熔深 P_{sim} 和试验的误差 E_p 较大.

比较表 3 和表 4 可以看出:半椭球模型在焊缝偏差小时更优,而马鞍形模型在焊缝偏差大时更优.这主要是因为半椭球模型是用 4 个位置代表旋转电弧热源,其热源作用处能量集中度更大,使其对焊缝偏差影响更敏感,小偏差下能更好反映熔深变化,但偏差大时会出现误差 E_p 增大.而马鞍形模型是用一个圆环来代表旋转电弧热源,其热量集中度相对较低,从而对小的焊缝偏差不敏感,误差 E_p 增大,而大的焊缝偏差时与实际结果较稳合.

表 4 等效热源下侧壁熔深模拟结果与试验结果

Table 4 Simulation results using equivalent heat source and experiment result for side wall penetration

种类	模拟计算值		试验计算值(平均值)		误差	
	P_{sim}/mm		P_{test}/mm		E_p/mm	
	左	右	左	右	左	右
居中	1.23	1.21	1.15	1.08	0.08	0.13
左偏 0.5	1.34	0.27	1.56	0.60	0.22	0.33
右偏 0.5	0.28	1.36	0.66	1.61	0.38	0.25
左偏 1	2.08	0.48	2.08	0.46	0	0.02
右偏 1	0.52	2.04	0.60	2.00	0.08	0.04

6 结 论

(1) 以旋转电弧窄间隙焊接为研究对象,建立了有限元模型,实现了三维焊接温度场数值模型,并研究了焊接工艺参数对焊缝成形的影响,从而为实际焊接提供了依据.

(2) 采用半椭球体积热源模型以及热源的倾斜加载,计算的选择电弧窄间隙焊接侧壁熔深的结果与实际测量值吻合良好.

(3) 根据旋转电弧热源分布特点,遵循能量守恒定律,提出的模拟电弧旋转的马鞍形环的等效热源模型能够比较准确模拟焊接时电弧旋转的温度场分布.

参考文献:

- [1] 赵 博, 范成磊, 杨春利. 高速旋转电弧窄间隙 MAG 焊焊缝成形的分析[J]. 焊接学报, 2008, 29(9): 109-112.
Zhao Bo, Fan Chenglei, Yang Chunli, *et al.* Influence of welding parameters on bead formation in high-spin-arc narrow gap MAG [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(9): 109-112.
- [2] Guo N, Lin S B, Gao C, *et al.* Study on elimination of interlayer defects in horizontal joints made by rotating arc narrow gap welding [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(6): 584-588.
- [3] 贾剑平, 施辉飞, 彭 桃, 等. 基于 ANSYS 的旋转电弧焊接温度场的数值模拟[J]. 焊接技术, 2011, 40(6): 14-17.
Jia Jianping, Shi Huifei, Peng Tao, *et al.* Numerical simulation of rotating arc welding temperature field based on ANSYS[J]. Welding Technology, 2011, 40(6): 14-17.
- [4] Guo N, Han Y F. A novel finite model of heat source for rotating arc welding[J]. China Welding, 2011, 20(3): 58-63.
- [5] 胡军峰, 杨建国, 方洪渊, 等. 模拟焊接过程电弧摆动的热源模型[J]. 焊接学报, 2005, 26(6): 57-60.
Hu Junfeng, Yang Jianguo, Fang Hongyuan, *et al.* Pilot study of a heat source model for weaving welding arc[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(6): 57-60.

-
- [2] 李海涛, 陈芙蓉, 胡艳华, 等. 热输入对 10CrMo910 钢焊缝金属根焊层热循环的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(1): 49–52.
Li Haitao, Chen Furong, Hu Yanhua, *et al.* Effect of heat input of root layer on thermal circle of 10CrMo910 steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(1): 49–52.
- [3] 杨武林, 杨晓华, 李晓延, 等. TC4 钛合金薄板激光焊接接头的疲劳寿命及断口分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(3): 105–108.
Yang Wulin, Yang Xiaohua, Li Xiaoyan, *et al.* Analysis on fatigue property and fracture mechanism of TC4 titanium alloy joint during laser welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(3): 105–108.
- [4] 宁兴荣. 焊接钛合金在俄罗斯航空工业中的应用[J]. 钛工业进展, 1998(1): 22–26.
Ning Xingrong. Application of welding titanium in Russian aviation industry[J]. Titanium Industry Progress, 1998(1): 22–26.
- [5] Jinkeun O, Nack J K, Sunghak L. Correlation of fatigue properties and microstructure in investment cast Ti-6Al-4V welds[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 340(1): 232–242.
- [6] 赵永庆, 洪 权, 葛 鹏. 钛及钛合金相图谱[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2011.
- [7] Suslick K S, Neis U. The chemical effects of ultrasound[J]. Scientific American, 1989, 43(2): 80–86.
- [8] 大野笃美. 金属的凝固理论、实践及应用[M]. 邢建东, 译. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [9] Komarov S, Hirasawa M. Enhancement of gas phase heat transfer by acoustic field application[J]. Ultrasonics, 2003, 41: 289–293.
-
- 作者简介:** 刘浩东,男,1986 年出生,博士研究生. 主要从事激光加工技术在航空飞行器维修领域应用的研究. 发表论文 10 余篇.
Email: mdlhd@sina.com
-

[上接第 8 页]

- [6] 王加友, 国宏斌, 杨 峰. 新型高速旋转电弧窄间隙 MAG 焊接[J]. 焊接学报, 2005, 26(10): 65–67.
Wang Jiayou, Guo Hongbin, Yang Feng. A new rotating arc process for narrow gap MAG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(10): 65–67.
- [7] Michaleris P, Debiccari A. Prediction of welding distortion[J]. Welding Journal, 1997, 76(4): 172s–181s.
- [8] 武传松. 焊接热过程与熔池形态[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [9] Brown S, Song H. Finite element simulation of welding of large structures[J]. Journal of Engineering for Industry, 1992, 114(44): 441–451.
-
- 作者简介:** 黎文航,男,1978 年出生,博士,副教授,硕士研究生导师. 主要从事焊接智能控制、焊接设备和自动化. 发表论文 20 余篇.
Email: Lwh_abc@qq.cn