

310S 奥氏体不锈钢 TIG 自熔焊热源模型 与温度场模拟

刘兆全¹, 张玉妥¹, 董文超²

(1. 沈阳理工大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110159; 2. 中国科学院金属研究所 沈阳材料科学国家(联合)实验室, 沈阳 110016)

摘 要: 采用 SYSWELD 有限元软件对 12mm 厚的 310S 奥氏体不锈钢平板 TIG 自熔焊焊接过程进行了模拟研究。通过建立材料物性数据库, 选用双椭球模型作为焊接模型, 以对流和辐射作为模拟工件与外部环境热交换的主要方式, 将模拟获得的焊缝截面形貌、焊接热循环曲线和实验获得的焊缝截面形貌、焊接热循环曲线对比, 建立了焊接热源模型, 获得了 TIG 焊温度场分布。研究表明: 建立的焊接热源模型拟合良好, 参数选取的较为合理; 双椭球热源模型能较好的模拟 310S 奥氏体不锈钢 TIG 焊接过程的温度变化。

关 键 词: SYSWELD; 数值模拟; 热源模型

中图分类号: TG444+.74 **文献标志码:** A

Simulation of Heat Source Model and Temperature Field of 310S Austenitic Stainless Steel by TIG Welding Method

LIU Zhaoquan¹, ZHANG Yutuo¹, DONG Wenchao²

(1. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 2. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The simulation of TIG welding process of 12mm thickness 310S austenitic stainless steel plate by finite element software SYSWELD was studied. The material thermophysical properties database of 310S stainless steel was established. Based on selection double ellipsoidal model as the model of welding, convection and radiation as the main method of the heat exchange, the weld cross-section morphology and the welding thermal cycle curve between simulation and experiment were compared. Finally, a double ellipsoid welding heat source model for TIG welding of 310S austenitic stainless steel was established and calibrated. Results showed that the double ellipsoid welding heat source model established was more reliable. It can accurately simulate the temperature changes of 310S stainless steel TIG welding process.

Key words: SYSWELD; numerical simulation; heat source model

310S 奥氏体不锈钢具有优良的高温力学性能及抗高温氧化性能,作为结构材料广泛用于石化工业^[1-3]。在这些石化工业设备的制造和维护过程中,焊接是不可或缺的一部分。310S 奥氏体不锈钢通常采用钨极惰性气体保护焊(Tungsten Inert Gas, TIG)方法进行焊接。为了解在焊接过程中试板内部的温度变化,需要建立合适的 310S 奥氏体不锈钢的 TIG 焊接热源模型。模拟的焊缝截面形貌与实验的焊缝截面形貌是否匹配、模拟的焊接温度场与实验测得的温度场是否吻合、焊接热源参数选取的是否合理,直接关系到建立的焊接热源模型是否准确可靠。

本文采用 SYSWELD 有限元软件,模拟分析了 310S 奥氏体不锈钢 TIG 焊接过程中的温度变化,通过与实测焊缝截面熔池形貌、焊接温度场热循环曲线对比,校核并建立了 310S 奥氏体不锈钢的 TIG 自熔焊接热源模型,获得了温度场分布。

1 焊接有限元模型

1.1 温度场

在焊接温度场计算过程中,由焊接电弧产生的热量在被焊工件内部的传导可用非线性传热方程描述^[4]:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_v \quad (1)$$

式中: T 为温度; t 为时间; k 是热导率; c_p 是比热容; ρ 是密度; Q_v 是热源项; x, y, z 为 3 个坐标轴。

1.2 材料热物性参数

材料热物性参数主要包括热导率、密度、比热等。经测试,310S 奥氏体不锈钢的固相线温度为 1383℃,另外,还测试了不同温度下 310S 不锈钢的比热、热导率等。基于 SYSWELD 软件格式,建立了 310S 奥氏体不锈钢数据库。不考虑温度变化对 310S 奥氏体不锈钢的密度的影响,其值为 7.97 g/cm³。表 1 为不同温度下的 310S 奥氏体不锈钢的比热和热导率。

1.3 双椭球热源模型

利用 SYSWELD 有限元软件对焊接热源模型进行拟合。建立合适的焊接热源模型必须考虑两点:(1)有效热能,即热源作用在焊件上的实际能

量;(2)作用于焊件上的热量的分布情况。相关研究表明^[5],对于 TIG 焊,双椭球热源更能准确地反应焊接过程中的热量分布。因此,本文选用双椭球体分布热源模型,如图 1 所示。

表 1 310S 奥氏体不锈钢的比热、热导率

温度/℃	比热/(J/(kg·K))	热导率/(W/(m·K))
20	450	13.30
100	490	14.19
200	522	-
300	545	-
500	566	-
1000	-	28.08
1200	-	30.93
1400	700	33.78

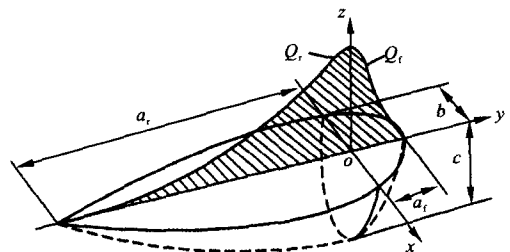


图 1 双椭球体热源模型示意图

作用于焊件上的体积热源分为前、后两部分。其前后部分椭球体热流密度公式分别为:

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_f Q)}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), x \geq 0 \quad (2)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_r Q)}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), x < 0 \quad (3)$$

式中: a_f, a_r 分别为双椭球体的前、后半轴参数; b, c 分别为焊接熔池半熔宽和半熔深; f_f, f_r 分别是前、后半球体内热输入的份额; Q 为电弧有效热功率, $Q = \eta UI$, η 是焊接热效率, U, I 分别为焊接电压和焊接电流。实际上,焊接热源模型的拟合,就是对模型中的参数 a_f, a_r, b, c 等拟合的过程,使得模拟和实测的熔池形貌及焊接热循环曲线相吻合。

1.4 边界条件

实际焊接工程中,被焊工件与外部环境(空气)进行热交换的方式主要有两种,对流和辐

射^[4,6]。

被焊工件与周围环境(空气)之间通过对流方式的热交换可用 Newton 冷却方程描述:

$$q_a = -h_a(T_s - T_a) \tag{4}$$

式中: q_a 是工件与周围空气之间的热交换; h_a 是对流交换系数,其值为 $25\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_a 是空气的温度(20°C); T_s 是工件表面温度。

通过热辐射损失的热量 q_r 可用以下公式计算:

$$q_r = -\sigma\varepsilon[(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \tag{5}$$

式中: ε 是热辐射系数,在计算中取值 0.8; σ 是 Stefan-Boltzman 常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} (\text{J} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$; 上述的 q_r 区别于后半椭圆热流密度的 q_r 。

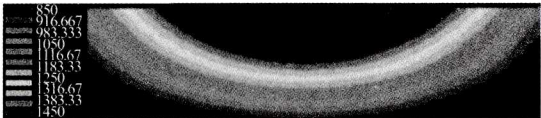
2 310S 钢 TIG 自熔焊热源模型

采用如表 2 所示的 TIG 焊接工艺参数进行焊接实验,然后对焊缝截面进行腐蚀,获得焊缝形貌。通过对比模拟和实验获得的焊缝截面形貌是否吻合来建立 310S 奥氏体不锈钢 TIG 自熔焊焊接热源模型。采用 SYSWELD 软件中的热源拟合工具(Heat Source Fitting, HSF)反复地模拟稳态焊接过程,初步获得焊接热源模型参数。

表 2 TIG 自熔焊焊接工艺参数

材料	电流 /A	电压 /V	速率 /(mm/min)	氩气流量 /(L/min)	电极间距 /mm
310S	200	12	90	10	2.0

图 2 为模拟和实验获得的焊接接头截面形貌对比,其中,图 2a 为模拟获得的焊缝截面形貌,熔池液相线温度为 1450°C ,图 2b 为实验获得的焊缝截面形貌。



(a) 模拟焊缝截面形貌



(b) 实验焊缝截面形貌

图 2 焊缝截面形貌

表 3 为图 2 中焊缝的熔深、熔宽的模拟和实验值。从图 2 和表 3 可以发现,模拟的焊缝截面形貌和实验的焊缝截面形貌一致。此时,焊接热源模型中各参数值如表 4 所示。

表 3 焊缝形貌比较 mm

	熔宽	熔深
实验	12.0	2.4
模拟	11.8	2.6

表 4 焊接热源模型的主要参数 mm

b	c	a_f	a_r	Q_f /(W/mm ³)	Q_r /(W/mm ³)	Q/W
8.3	2.4	4	4.7	1.2	0.8	1815

3 310S 钢 TIG 自熔焊焊接温度场模拟

为了验证建立的焊接热源模型的准确性,获得 310S 奥氏体不锈钢 TIG 焊温度场分布,开展了 310S 钢 TIG 自熔焊非稳态过程的数值模拟,通过模拟和实测的焊接温度场来校核所建立的焊接热源模型的准确性。焊前,将 310S 不锈钢试板表面清洗干净,然后在试板表面选取 3 个测温点(如图 3 所示),表 5 为 3 个测温点在焊接试板上的几何位置。采用点焊机将 NiCr-NiSi 热电偶点焊在测温点,采用 ADAM 测温模块测量 3 个点在焊接过程中的温度变化。将实测焊接试板上 3 个点的焊接热循环曲线和模拟获得的结果进行比较,验证所建立的焊接热源模型的准确性。

表 5 测温点几何坐标 mm

测温点	X	Y
A1	26.5	5.5
A2	41.5	13.5
A3	56.5	7.0

图 4 为 3 个测温点实验与模拟获得的焊接热循环曲线的对比。从图中可以发现,采用上述建立的焊接热源模型模拟获得的各个测温点热循环曲线与实测结果吻合较好,通过峰值温度对比发现,三个测温点的模拟结果与实验结果的偏差在 2.1% 以下。可见,焊接热源模型和模型参数选取

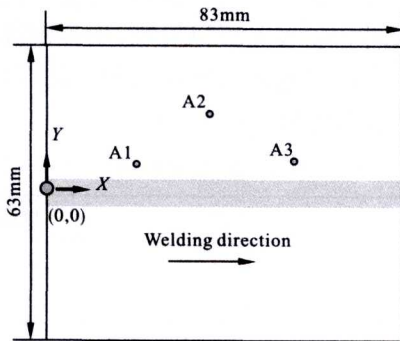


图3 热电偶测量位置

的较为合理,已建立的双椭球焊接热源模型是可靠的,可以较准确地模拟 310S 奥氏体不锈钢 TIG 焊接温度场分布。利用该模拟结果,可以抽取焊接接头不同位置的焊接热循环曲线,特别是焊接热影响区中的热循环曲线,为进一步研究 310S 奥氏体不锈钢焊接性、分析合金元素对焊接热影响区组织和性能的影响奠定基础。

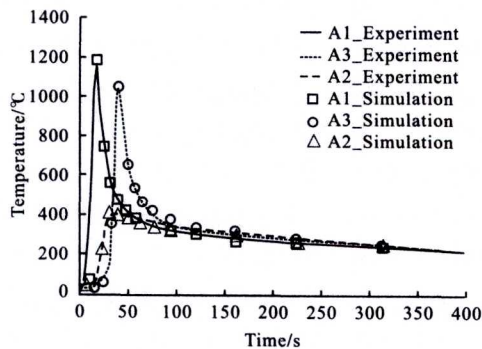


图4 实验与模拟获得的焊接热循环曲线对比

4 结论

(1)采用有限元方法模拟了稳态焊接过程,通过拟合模拟与焊接实验获得的焊缝截面形貌,建立了 310S 奥氏体不锈钢自熔焊双椭球热源模型。

(2)模拟获得了 310S 奥氏体不锈钢 TIG 自熔焊焊接过程温度场,模拟的焊接热循环曲线与实测的焊接循环曲线吻合较好。

参考文献:

- [1] 陈文革,何建祥,谢小彬,等. 高温时效处理对 310S 不锈钢焊接接口性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2013,34(4):95-99.
- [2] 李陵川,朱日彰. 310 不锈钢在 $H_2S/H_2/CO_2$ 混合气氛中的高温腐蚀[J]. 金属学报,1996,32(3):284-288.
- [3] XU Ming, LI Liu-he, LIU You-ming, et al. Mechanism of mechanical property enhancement in nitrogen and titanium implanted 321 stainless steel [J], Materials Science and Engineering A, 2006,425(1-2):1-6.
- [4] 朱瑞栋. 焊接残余应力对缓冲梁结构应力腐蚀性能的影响[D]. 沈阳:中国科学院金属研究所,2014.
- [5] 张书权,王仲珏. 基于 SYSWELD 的 T 型接头温度场的数值模拟[J]. 金属铸锻焊技术, 2011, 40(7): 133-135.
- [6] 谭兵,刘红伟. 基于 SYSWELD 的铝合金角接头激光-MIG 复合焊变形模拟[J]. 兵器材料科学与工程, 2011,34(4):48-52.

(责任编辑:王子君)