

# 0Cr18Ni9 不锈钢焊接温度场的数值仿真

张书权<sup>1,2</sup>, 王仲珏<sup>\*1</sup>, 代礼<sup>2</sup>, 文伟<sup>3</sup>, 胥锴<sup>2</sup>

(1. 安徽工程大学 机械与汽车工程学院, 安徽 芜湖 241000; 2. 安徽机电职业技术学院 机械工程系, 安徽 芜湖 241000;  
3. 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230000)

摘要: 基于有限元软件 SYSWELD 对不锈钢 0Cr18Ni9 平板 TIG 焊的温度场进行三维动态模拟, 得出了瞬态温度场分布图和特征点的热循环曲线, 同时也得出了焊缝上任一点的温度变化与相变的关系. 与文献资料比较表明, 所建立的数值模拟仿真模型可以较好的模拟焊接温度场, 为研究焊接过程中的应力应变和减少焊接应力与变形提供了参考依据.

关键词: SYSWELD; 0Cr18Ni9 钢焊接; 温度场; 焊接热循环

中图分类号: TG402 文献标识码: A

对焊接温度场的研究包括焊缝的熔化、结晶以及相变等复杂的过程, 它直接决定焊接应力应变场的变化, 同时也间接影响焊接热影响区的裂纹、熔合及组织性能等<sup>[1]</sup>, 因此深入研究焊接温度场是必要的. SYSWELD 是焊接专业类 CAE 软件的典型代表之一, 完全可以实现机械、金属冶金和热传导的耦合计算, 允许考虑晶相转变及同时产生的晶相转变潜热和晶相组织对温度的影响. 0Cr18Ni9 (相当于 304 不锈钢) 不锈钢属于奥氏体不锈钢系列, 是生产中应用最为广泛的, 性能相对其他不锈钢稍好, 但与低碳钢相比较差, 且奥氏体钢的热导率约为低碳钢的 1/3, 热膨胀系数约比低碳钢大 50%, 同时随着焊接过程中线能量的不断增加, 会导致焊接应力与变形比较严重, 奥氏体晶粒也容易变得粗大, 使焊接性能变差<sup>[2-3]</sup>. 针对上述问题, 采用有限元软件 SYSWELD 对 0Cr18Ni9 焊接温度场进行数值仿真, 拟对焊接过程的瞬态温度场和热循环曲线进行模拟研究, 同时分析温度场与热循环曲线特点以及温度与相变的关系, 为研究焊缝的应力应变场和减小焊接应力与变形提供依据, 并为最终改善奥氏体不锈钢的焊接性能提供参考.

## 1 焊接温度场模型的建立

### 1.1 数学模型的建立

焊接时加热温度高、高温停留时间短暂、冷却速度较快, 同时温度场随着热源的移动, 在时间和空间上不断发生急剧变化, 因此, 对焊接温度场的分析属于典型的非线性瞬态问题. 而且材料的热物理性能也随温度发生剧烈变化, 考虑到固体材料中的物质流速等于零, 在熔池周边固态金属内仅需进行热传导计算, 因此研究焊接温度场是以热传导为主, 其热传导问题的控制方程为<sup>[4]</sup>:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \bar{Q}$$

式中:  $\rho$ 、 $c$  和  $\lambda$  分别是材料的密度、比热容和热导率, 它们都是温度  $T$  的函数;  $\bar{Q}$  为内热源强度.

导热时通常有 3 类边界条件: ① 已知边界上的温度值, 即  $T_s = T_s(x, y, z, t)$ ; ② 已知边界上的热流密度分布, 即  $k_n \frac{\partial T}{\partial n} = q_s(x, y, z, t)$ ; ③ 已知边界上物体与周围介质间的热交换, 即  $k_n \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_a - T_s)$ , 特殊情况时, 边界与外界无热交换, 即绝热边界条,  $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ . 以上各式中,  $n$  为边界表面外法线方向;  $k_n$  为沿边界法线方向的热导率;  $q_s$  为单位面积上的外部输入热流;  $h$  为对流换热系数;  $T_a$  为周围介质温度;  $K$  为辐射系数;  $T_s$  为已知边界上的温度.

### 1.2 有限元模型

以平板对焊为研究对象, 焊缝位于平板正中间. 母材是 0Cr18Ni9 不锈钢, 焊接温度场数值模拟几何

收稿日期: 2010-11-12

作者简介: 张书权 (1975-), 男, 湖北武汉人, 讲师, 硕士研究生.

通讯作者: 王仲珏 (1952-), 男, 安徽安庆人, 教授.

模型尺寸为 60 mm×60 mm×6 mm. 计算之前进行网格划分和时间步长的设置将直接影响以后的模拟结果. 网格划分在焊缝及其附近要很细密,在远离焊缝的地方可较粗,以兼顾计算精度与计算速度之间的矛盾. 为获得一个满意的瞬态焊接温度场,焊缝处的单元网格最好控制<2 mm,焊接阶段要求时间步长最好控制在 0.1 s 左右<sup>[5]</sup>. 焊接模型及网格划分如图 1 所示,在焊缝处采用均匀的网格划分,单元网格确定为 1 mm,在其他地方采用过渡划分,共 8 418 个节点,11 980 个单元,102 个组.

## 2 有限元中的关键问题

### 2.1 焊接热源的选择

目前主要热源模式包括高斯函数分布热源、双椭圆分布热源、半椭球体分布热源及双椭球体分布热源<sup>[6]</sup>等. SYSWELD 软件提供了上述多种类型热源模型,其中包括双椭球体热源模型. 由于双椭球体热源模型的热流密度分布在椭球体内,可以准确地反映出沿深度方向焊接束流对焊件加热的影响,从而更为精确的仿真焊接温度场<sup>[7]</sup>. 因此,采用了适宜于 TIG 焊的双椭球体热源模型,结合焊缝剖面的实际尺寸与形状,利用 SYSWELD 软件所提供的热源校核工具,输入所拟定的焊接工艺参数对热源进行校核,得到图 2 所示的热源模型.

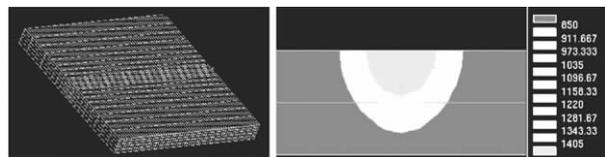


图 1 有限元网格模型 图 2 校核后的热源模型

### 2.2 材料的物理性能参数

材料的热物理性能参数是温度的函数,但许多材料的热物性(比热、导热系数等)资料在高温特别是在接近熔化状态时还是空白,文中某些温度下的参数采用插值法和外推法. 0Cr18Ni9 不锈钢的部分物理性能参数,如表 1 所示.

表 1 0Cr18Ni9 不锈钢的部分物理性能参数

钢号	密度 $\rho$ / $g \cdot cm^{-3}$	比热容 $C$ / $(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	弹性模量 $E$ / 20 °C (Mpa)	热胀系数 $\alpha/(10^{-6}/K)$			热导率 $\lambda/(W/m \cdot K)$		
				20~100 °C	20~300 °C	20~500 °C	20 °C	100 °C	300 °C
0Cr18Ni9	7.85	500	19 900	16	17	17	15	18	21

## 3 模拟结果及分析

### 3.1 焊接温度场分布特征

焊接方法为 TIG 焊,极性采用直流正极法,焊接电流为 170~210 A,焊接电弧电压为 15~18 V,焊接速度为 5 mm/s,焊接热效率为 0.68,利用 SYSWELD 软件提供生成动画的功能,可显示整个焊接过程中温度场的动态变化状况(见图 3),图 3 中 a、b、c、d、e 是焊接时的温度场云图,图 3f 是冷却时的云图. 可以看出,接头上各点的温度随时间而变化. 焊接开始时温度迅速升高,从图 3a 到图 3b,时间从 0.2 s 到 0.8 s,最高温度从 640 °C 迅速上升到 1 343 °C,到第 4.4 s 时形成了准稳态温度场,图 3c、图 3d 最高温度变化不大,分别为 1 690 °C 和 1 691 °C,热源周围各点以稳定的温度随热源一起移动. 到焊接结束 12 s 时,温度达到最高,为 1 919 °C(见图 3e),随后温度迅速下降,到开始冷却 4 s 时,最高温度只有 719 °C(见图 3f).

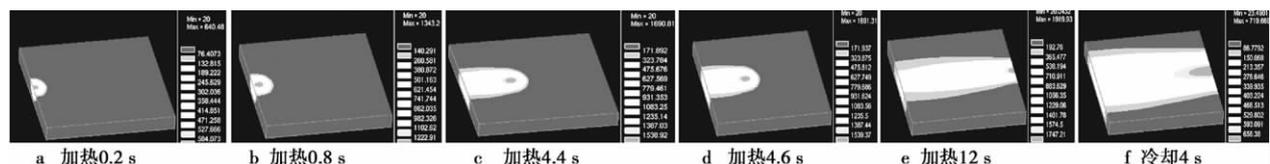


图 3 不同时刻焊接平板温度场分布

### 3.2 焊缝中心线各点的焊接热循环曲线

在 SWSWELD 中利用时间历程后处理器,可提取焊缝中心节点和垂直焊缝节点的温度热循环曲线. 在焊缝中心在线取等距 6 个点,依次为 3553、3673、3793、3913、4033 和 4153. 通过时域后处理,温度时间变化历程见图 4. 由图 4 可知,沿焊缝中心在线各节点的温度热循环曲线特征基本相似,先急剧升温然后冷却,最高温度均 $\geq 1 600$  °C,超过熔化温度(0Cr18Ni9 熔点范围 1 398~1 454 °C). 焊接过程中随着热源沿焊件移动,焊件上各点温度随时间由低而高,达到最大峰值后,又由高而低变化. 各点的升温速度明显比

冷却速度要大,其原因是随着热源远离节点,节点处的熔池开始冷却降温,但仍受到后面熔池的热作用,从而减缓了冷却速度.冷却时,各点温度逐渐趋于某一值,即到达焊件的最终平均温度为止.图 4 还可看出,所选择的 6 个节点温度热循环曲线形状基本相同,说明 6 个节点均达到了准稳态温度场.另外,节点温度在焊接时经历了迅速升温 and 降温的过程,这基本符合文献资料<sup>[8]</sup>.

### 3.3 垂直焊缝(宽度)方向各点的焊接热循环曲线

根据 SYSWELD 模拟焊接温度场结果,可以得到距离焊缝中心线 0、2 mm、3 mm、5 mm、7 mm、10 mm 和 13 mm 各点的热循环曲线,节点依此为 3673、12901、14663、7075、14480、14419 和 14358,描述如图 5 所示.在焊接过程中,工件上的温度随着瞬时热源或移动热源的作用而发生变化,温度随时间由低到高,达到最大值后,由高到低而变化,与焊缝中心线温度变化一样,升温速度明显比降温速度快.这几个点还反映了在焊缝两侧距离焊缝远近不同的点所经历的热循环是不一样的,离焊缝越近的各点,加热最高温度越高,越远的点,加热最高温度越低,这与文献资料也是基本相符的<sup>[8]</sup>.

### 3.4 焊缝中心点温度与相的演变过程

焊接中的电、磁、传热、金属熔化和凝固、相变等现象对焊接质量的影响很大.其中研究金属加热和冷却时的相变对焊接冶金和焊接接头组织性能的预测有重要意义.利用 SYSWELD 软件可以对焊接过程的相变进行模拟.选取焊缝中心线一节点(如 4033 节点)来研究,温度与相变的演变如图 6 所示.节点 4033 的热循环曲线与上面分析的一致,温度经历了迅速升温,到最高温度后,迅速降温,直到焊件最终平均温度为止.在整个热循环过程中,奥氏体曲线与贝氏体曲线始终保持为水平且重合,且左边贝氏体曲线的数值始终为零,右边奥氏体曲线的数值始终为 1,这说明在节点 4033 在温度变化过程中,该点的相组织始终为单相组织奥氏体,这与奥氏体不锈钢 0Cr18Ni9 组织特点有关,焊缝从加热到凝固冷却到室温整个过程中不发生相变,始终保持为单相奥氏体组织<sup>[9]</sup>.此外还可以从图 6 中看出在温度变化过程中,各个相比例的相互关系,图 6 中始终保持 100% 的奥氏体组织,贝氏体始终为 0.

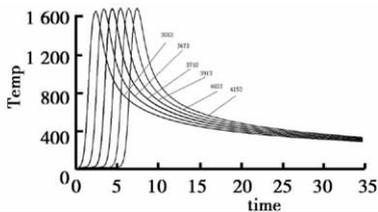


图 4 中心各点的焊接热循环曲线

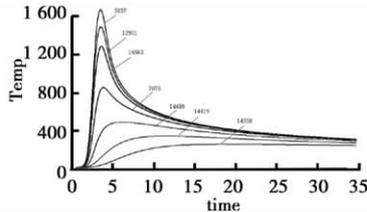


图 5 距焊缝中心不同位置的焊接热循环曲线

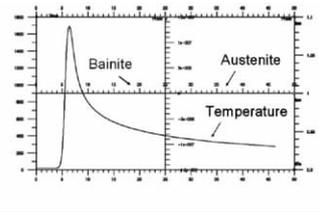


图 6 节点 4033 在 0~50 s 内的温度与相变的关系

## 4 结论

当在 4.4 s 温度场进入准稳态时,温度场的分布大小基本不变,随时间均匀的向前移动.焊接温度场随热源的移动,在时间和空间上急剧变化,焊缝、熔合区及热影响区的升温速度明显高于降温速度,离焊缝越近的点,加热速度越大,峰值温度越高,冷却速度也越大.反之,离焊缝越远的点,峰值温度越低,达到峰值温度的时间越长.焊接接头上任一点的温度变化与相变的演变是一一对应的,只要该点的温度达到了相变温度,即发生相变,且相变的相对成分也可以确定.

### 参考文献:

[1] 陈丙森. 计算机辅助焊接技术[M]. 北京:机械工业出版社,1999.  
 [2] 沈显璞. 双相钢的发展现状和展望[J]. 机械工程材料,1988(1):3-6.  
 [3] 李为卫,宫少涛,熊庆人,等. 2205 双相不锈钢的焊接性及焊接技术[J]. 热加工工艺,2006,35(3):36-38.  
 [4] 傅建,彭必友,曹建国. 材料成形过程数值模拟[M]. 北京:化学工业出版社,2009.  
 [5] 汪建华. 焊接数值模拟技术及其应用 [M]. 上海:上海交通大学出版社,2003.  
 [6] 程久欢. 焊接热源模型的研究进展[J]. 焊接技术,2004,33(1):13-17.  
 [7] 莫春立,钱百年. 焊接热源计算模式的研究进展[J]. 焊接学报,2001,6(22):93-96.  
 [8] 中国机械工程学会焊接学会. 材料的焊接:第 2 版[M]. 北京:机械工业出版社,2003.  
 [9] 英若采. 熔焊原理及金属材料的焊接:第 2 版[M]. 北京:机械工业出版社,2003.

(下转第 26 页)

**参考文献:**

- [1] 王翠茹,于祥兵,王成福. 基于 ZigBee 技术的温度采集传输系统[J]. 仪表技术与传感器,2008(7):103-105.
- [2] 孟臣,李敏. 多通道智能温湿度测试仪的研制[J]. 电子设计应用,2003(5):44-46.
- [3] 陈跃东. 蒸发器管路特性自动测试装置研制[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版,2003(1):35-38.
- [4] 陈跃东. DS18B20 集成温度传感器原理及其应用[J]. 安徽机电学院学报,2002(4):34-38.
- [5] 陈孟元,凌有铸,王冠凌,等. 基于 ZigBee 技术的广播电视授时无线网络系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置,2010(1):20-23.
- [6] 安徽工程大学. 一种伴热电缆的温度控制器:中国,201020100272.6 [P]. 2010-9-29.
- [7] 李银华,姬光锋. 基于 ZigBee 技术的烟叶仓库温湿度监测系统[J]. 仪表技术与传感器,2009(5):111-113.

## Tobacco alcoholize library distributed temperature and humidity detection system based on the ZigBee communication technology

CHEN Meng-yuan, LING You-zhu

(Anhui Key Laboratory of Electric Drive and Control,  
Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

**Abstract:** In view of temperature and humidity environment's immediate influence on tobacco alcoholizing, the paper proposed one kind of the wireless communication technology for ZigBee temperature and humidity detection system. Detection system employs the chip CC2420 as the core of wireless transceiver module, and digital temperature sensor DS18B20 and digital humidity sensor HIH3610 as components. Temperature and humidity measuring module, ZigBee receiver module and other key technologies were studied. The system achieves a sensor flexible layout, increases the real-time detection capability of the temperature and humidity environment parameters. The system provides a new way for the tobacco alcoholizing library environment detection.

**Key words:** ZigBee communication; temperature and humidity; tobacco alcoholize library; detection system

(上接第 22 页)

## Numerical simulation of temperature field for 0Cr18Ni9 stainless steel welding

ZHANG Shu-quan<sup>1,2</sup>, WANG Zhong-jue<sup>1</sup>, DAI Li<sup>2</sup>, WEN Wei<sup>3</sup>, XU Kai<sup>2</sup>

(1. Coll. of Mach. & Auto. Engn., Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China;

2. Dept. of Mech. Engn., Anhui Technical College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhu 241000, China;

3. Chinese Academy of Institute of Plasma Physics, Hefei 230000, China)

**Abstract:** Based on the finite element software SYSWELD of stainless steel 0Cr18Ni9 flat TIG welding temperature field for 3d dynamic simulation, the transient temperature field distribution as well as feature points thermal cycling curve is obtained, and through the finite element analysis, the relation of temperature located in any point of weld and phase transformation is derived. Comparing the simulation results with the literature data, it demonstrated that the establishes model of numerical simulation can preferably simulate the temperature field, which provides a reference for analyzing stress, strain and decreasing the welding stress and deformation in welding process.

**Key words:** SYSWELD; 0Cr18Ni9 stainless steel welding; temperature field; welding thermal cycle