

# 基于 SYSWELD 的 T 型接头温度场的数值模拟

张书权<sup>1,2</sup>, 王仲珏<sup>1</sup>, 代礼<sup>2</sup>, 文伟<sup>3</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 T 型接头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演变的关系。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; T 型接头温度场; 焊接热循环; 相演变

中图分类号: TG404

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2011)07-0133-03

## Numerical Simulation on Temperature Field of T-joint Based on SYSWELD

ZHANG Shuquan<sup>1,2</sup>, WANG Zhongjue<sup>1</sup>, DAI Li<sup>2</sup>, WEN Wei<sup>3</sup>

(1. School of Machinery and Automobile Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China; 2. Department of Mechanical Engineering, 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 finite element software SYSWELD, the 3d-dynamic temperature field in T-junctions was simulated. The transient temperature field distribution as well as feature points thermal cycling curve was got. By the finite element analysis, the relation of temperature locating in any points of the weld and phase transformation was obtained. Comparing the simulation results with the literature data, it is demonstrated that the established model for numerical simulation can simulate the temperature field, which provides a reference for analyzing the stress, strain and decreasing the welding stress and deformation in welding process.

**Key words:** SYSWELD; T-junction temperature field; welding thermal cycle; phase evolution

T 型接头是最常见的焊接接头之一, 广泛应用于车辆、船舶、海洋工程、航空航天工程等重要焊接结构, 但与对接焊构件相比, 其温度场、应力应变场要复杂得多, 也没有对称性。目前对 T 型焊接接头的数值模拟研究相对较少, 但在很多情况下对 T 型接头的焊接质量要求非常高, 为提高 T 型接头的焊接质量和减少验证, 利用软件对其进行数值模拟显得十分必要。而对 T 型接头温度场的研究包括焊缝的熔化、结晶以及相变等复杂过程, 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也是十分必要的。

SYSWELD 是焊接专业类 CAE 软件的典型代表之一, 最初来源于核工业领域的焊接工艺模拟。它完全可以实现机械、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<sup>[2]</sup>。针对 T 型接头结构特点, 采用有限元软件 SYSWELD 对温度场进行数值模拟, 为进行焊接冶金分析及对焊接应力应变的数值模拟提供依据, 并为最终减少焊接应力与变形、改善接头的焊接性提供参考。

## 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, 而且冷却速度较快, 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热传导问题, 其控制方程为

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

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。

### 1.2 有限元模型

以 T 型接头焊件为研究对象, 焊缝为角焊缝, 母材为 2Cr13 不锈钢, 焊件尺寸为: 翼板为 60 mm ×

收稿日期: 2010-11-16

作者简介: 张书权(1975-), 男, 湖北人, 硕士研究生, 研究方向: 材料加工过程数值模拟仿真; 电话: 15055321636; E-mail: zhangshuquan2008@163.com

60 mm×3 mm, 腹板为 60 mm×40 mm×3 mm。计算之前的网格划分和时间步长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, 而远离焊缝的地方可以较粗, 以兼顾计算精度与速度之间的矛盾。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在 2 mm 以下, 而焊接阶段要求时间步长最好控制在 0.1 s 左右<sup>[3]</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, 在其它地方采用过渡划分, 共有 8845 个节点, 14284 个单元, 178 个组。

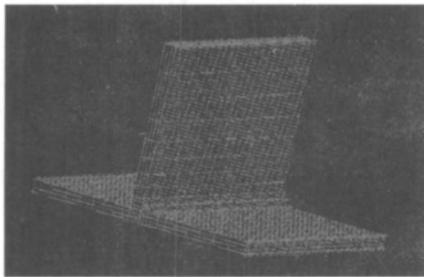


图 1 有限元网格模型  
Fig.1 Finite element mesh model

### 1.3 热源模型

目前主要热源模式有高斯热源、双椭圆热源、半椭球体热源、双椭球体热源<sup>[4]</sup>等。SYSWELD 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, 从而可更为精确的模拟焊接温度场<sup>[5]</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以及材料的热物理性能参数对热源进行校核, 得到图 2 所示的热源模型。

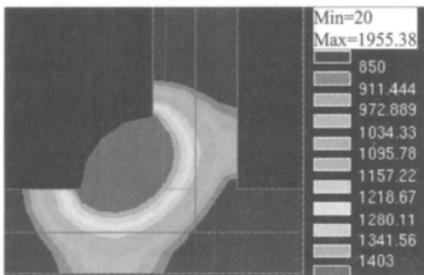


图 2 校核后的热源模型(°C)  
Fig.2 The heat source model after checking

## 2 模拟结果及分析

### 2.1 焊接温度场分布特征

焊接方法为 TIG 焊, 采用直流正极法, 焊接电

流 140~150 A, 电压 16~18 V, 焊接速度 5 mm/s, 焊接热效率为 0.68。由于为薄壁焊件, 焊前不预热。利用 SYSWELD 提供生成动画的功能, 可以显示整个焊接过程中温度场的动态变化状况如图 3 所示, 其中图 3(a)、(b) 分别是焊接时的温度场云图, 从图 3 可以看出, 接头上各点的温度随时间而变化。在焊接开始后温度迅速升高, 如从 0 s 到 4 s 时, 最高温度迅速上升到 1654 °C, 并且开始形成准稳态温度场, 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 1861.7 °C。随后温度迅速下降, 直到在空气中冷却到室温为止。

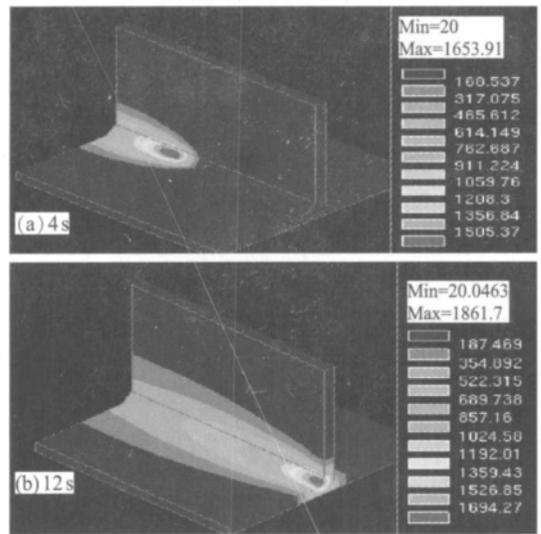


图 3 不同时刻焊接温度场分布云图(°C)  
Fig.3 Welding temperature distribution at different times

### 2.2 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, 可以得到距焊缝中心 0、0.5、1.5、3.5、5.75 和 11.5 mm 各点的热循环曲线, 节点依此为 20250、16467、16650、12180、12119 和 416, 描述如图 4 所示。可看出, 在焊接过程中, 工件上的温度随着瞬时热源或移动热

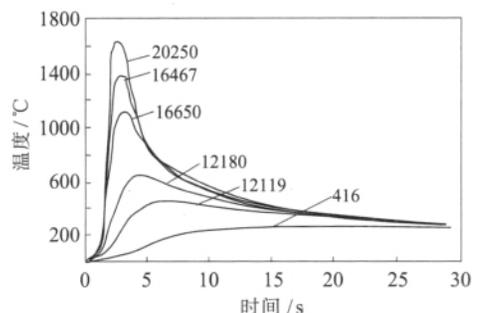


图 4 距焊缝中心不同位置的焊接热循环曲线  
Fig.4 Welding thermal cycling curves of different position from the weld center

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;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再热作用,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。这几个点还反映了在焊缝两侧距焊缝远近不同的点所经历的热循环是不同的,距焊缝越近的点,加热最高温度越高,越远的点,则越低,这与文献资料[6]基本相符。

### 2.3 焊缝中心点温度与相的演变过程

焊接是一个涉及到电弧物理、冶金、传热、材料学和力学等多学科的复杂过程。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可以对焊接过程的焊缝及热影响区相演变进行模拟。现选取焊缝中心线上一节点(如20250节点)来研究,温度与相变的演变如图5、6所示。

图5为节点20250温度上升阶段温度与相变的关系,而图6为节点温度下降阶段温度与相变的关系。从两图可以看出,节点20250热循环曲线与上

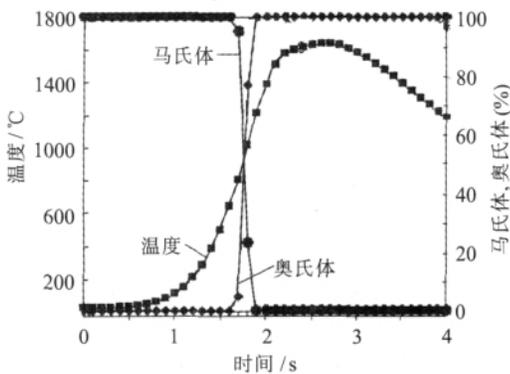


图5 节点20250升温时温度与相变的关系  
Fig.5 The relationship between temperature and phase transition when node 20250 warms up

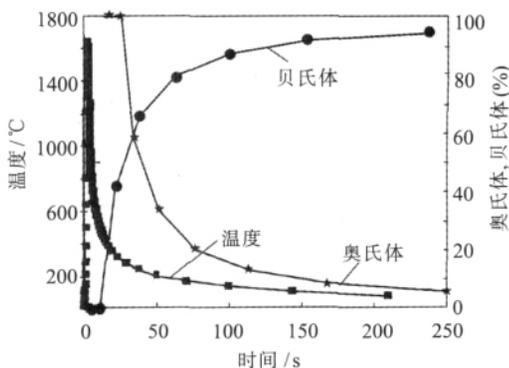


图6 节点20250降温时温度与相变的关系  
Fig.6 The relationship between temperature and phase transition when node 20250 cools

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,直至室温。2Cr13 不锈钢属于马氏体不锈钢,即原始组织为马氏体。图5为前4s温度变化与相变的关系,当焊接进行到1.6s左右时,温度上升到700°C左右,即达到临界温度,马氏体开始向奥氏体转变;焊到1.7s左右,马氏体开始迅速向奥氏体转变,但焊接进行到1.9s时,马氏体全部转变为奥氏体。从图6可以看出,在空气当中焊后冷却到18s左右(焊接时间为12s,见图中30s处),温度下降到大约300°C左右,奥氏体开始向贝氏体转变,随着温度的不断下降,奥氏体不断地向贝氏体转变,直到室温下,最后还有部分残留的奥氏体,因此在焊后空冷情况下得到的组织是贝氏体加少量的残余奥氏体,这与文献资料是基本相符的<sup>[6]</sup>。此外,从图中还可以看出,在温度变化过程中,各个相的比例关系总是确定的,在图5升温阶段,马氏体与奥氏体的比例关系总是确定的,在焊接1.7s时,马氏体大约占95%,奥氏体大约为5%,而在焊接1.8s时,马氏体仅占25%左右,而奥氏体占75%左右,到1.9s马氏体几乎完全转变为奥氏体,这也说明转变速度极快,几乎瞬间就完成了;同理在图6降温阶段,奥氏体与贝氏体的比例关系也是确定的。

### 3 结论

- (1) 在焊接4s温度场进入准稳态时,温度场的分布大小基本不变,随时间均匀向前移动。
- (2) 距离焊缝中心不同的点,焊接热循环曲线不同。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。
- (3) 焊缝及热影响区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] SYSWELD Engineering Simulation Solution for Heat Treatment and Welding Assembly. [http://www.convia.fi/files/ESI-Group\\_brochure.pdf](http://www.convia.fi/files/ESI-Group_brochure.pdf).
- [3] 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.
- [4] 程久欢. 焊接热源模型的研究进展[J]. 焊接技术, 2004, 33(1): 13-17.
- [5] 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, 22(6): 93-96.
- [6] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册: 第2卷 材料的焊接 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.