

文章编号:1671-6833(2015)02-0018-04

Q345B 厚板 T 型头 CO₂ 气体保护焊温度场的 数值模拟与分析

王 栋, 肖 波, 宋志东, 何宗海

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 基于商用有限元软件 ANSYS 的 APDL 语言, 选用适用于 CO₂ 气体保护焊的双椭球热源模型, 建立 Q345B 厚板 T 型接头多层多道焊的有限元模型, 采用单元生死技术, 通过编制子程序逐层逐段地激活焊缝单元来模拟焊缝材料的填充过程, 得到不同焊接速度下模型温度场的分布情况以及模型典型位置的热循环曲线, 并通过实验验证了仿真结果, 证明了焊接模拟的可靠性, 为实际焊接过程分析提供一定的理论帮助。

关键词: CO₂ 气体保护焊; T 型接头; 单元生死技术; 温度场

中图分类号: TG402

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2015.02.005

0 引言

近些年, 为满足国内外在建筑、矿山机械、铁路车辆、桥梁隧道等领域的飞速发展, 厚板钢焊接结构的需求越来越多^[1]。T 型焊接接头因其具有较高强度的优良特性, 被广泛应用于箱梁等空间焊接结构中。

对于厚板 T 型接头的焊接, 单道焊缝无法填满坡口, 多采用多道焊的方式进行焊接。焊接过程是一个快速且不均匀的热循环过程, 焊接热源集中在焊件接头部分, 使焊件存在温度梯度, 产生不均匀的温度场^[2], 焊接温度场与焊接质量和生产效率密切相关。一些研究者在焊接温度场的模拟方面做了大量工作^[3-6]。笔者基于有限元分析软件 ANSYS, 利用生死单元技术, 编制了焊缝材料逐步填充以及热源移动的子程序^[7], 对不同焊接速度下 Q345B 厚板 T 型接头 CO₂ 气体保护焊的焊接过程进行模拟, 并对温度场的模拟结果进行了分析研究与实验验证。

1 建立有限元模型

1.1 焊件几何模型

本模拟的厚板模型由两块平板及焊缝组成,

其几何尺寸与模型如图 1 所示。坡口形式为单面 V 型坡口, 坡口角度为 35°, 钝边尺寸为 2 mm, 采用 CO₂ 气体保护焊, 通过五层六道焊缝焊完。

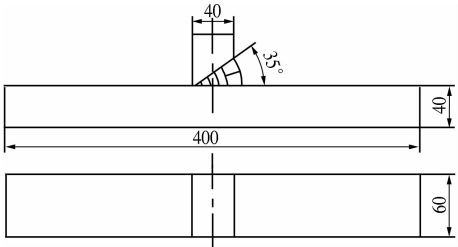


图 1 焊缝及工件的几何模型图 (mm)

Fig. 1 Geometric model of weld bead and workpiece

1.2 数学模型的建立

焊接是一个局部快速受热并随后快速冷却的过程, 随着热源的移动, 形成时间和空间内梯度都很大的不均匀温度场, 材料的热物理性能也随温度剧烈变化, 因此焊接温度场的分析是典型的非线性瞬态热传导问题。

非线性瞬态热传导问题的控制方程为^[8]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_{\text{内}}, \quad (1)$$

式中: ρ 为材料密度; c 为材料比热容; λ 为材料热导率; T 为材料瞬态温度; $Q_{\text{内}}$ 为物体内部产生的

收稿日期: 2014-10-30; 修订日期: 2015-01-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目 (863 计划) (2012AA041801); 河南省教育厅科学技术研究重点项目 (14A460001)

作者简介: 王栋 (1970-), 男, 河南郑州人, 郑州大学副教授, 博士, 主要研究方向为抗疲劳制造技术, E-mail: wangdong@zzu.edu.cn.

热量,初始参数如表 1 所示. 其表达的就是物体升温所需热量与传入物体的热量及物体内部产生的热量和相等.

1.3 热源模型的选择^[9]

焊接热源模型是对作用在焊件上的热输入在时间和空间上的一种数学描述,其选取合适与否将直接影响焊接温度场的计算精度. 模拟初始参数如表 1 所示.

表 1 数值模拟初始参数

Tab.1 The initial parameters of numerical simulation

$T/^{\circ}\text{C}$	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$
20	7 850	480	60

目前常用的焊接热源模型主要有高斯热源模型、均匀热源模型、椭球形热源模型、双椭球热源模型等^[10]. 由于双椭球热源考虑了厚度方向的热流密度分布,模拟结果具有较大熔深的特点,因此适用于厚板焊接过程的数值模拟^[11],结合 CO₂ 保护焊焊接的特点,本模拟选用双椭球热源模型,其热流密度分布如图 2 所示.

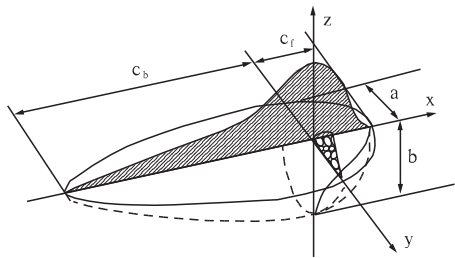


图 2 双椭球热源模型热流密度分布图
Fig.2 Heat flux of double-ellipsoid heat source

双椭球热源前半部分的热流密度分布表达式为

$$q_f(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}f_i q_0}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{c_f^2} - \frac{3y^2}{a^2} - \frac{3z^2}{b^2}\right), \quad (2)$$

双椭球热源后半部分的热流密度分布表达式为

$$q_b(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}f_b q_0}{abc_b \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{c_b^2} - \frac{3y^2}{a^2} - \frac{3z^2}{b^2}\right), \quad (3)$$

式(2)、(3)中: a 、 b 、 c_f 、 c_b 为热源的双椭球形状参数,mm; q_0 为热输入功率, $q_0 = \eta UI$,W; f_i 、 f_b 为热源前后椭球的热流密度分布系数, $f_i + f_b = 2$,是无量纲单位.

1.4 仿真分析条件

焊接是一个涉及物理、化学、冶金和力学的多元过程,因此在对焊接过程进行数值模拟的过程中,对一些次要因素进行了简化,提出以下假设及

处理:(1)初始室温设为 20 ℃;(2)忽略焊件与试验台之间的热传导;(3)忽略溶池内部化学反应;(4)焊丝与母材材料采用相同的热物理性能参数;(5)忽略保护气体对温度场的影响;(6)假设焊接速度为匀速;(7)焊接电流、焊接电压、焊接热效率等在焊接过程中是定值.

本焊接工艺参数为:电压 25 V,电流 220 A,焊接热效率为 0.75,焊丝直径 1.2 mm,气体流量为 15 L/min,采用短路过渡,同向异时焊接,即上一道焊缝焊完后,冷却 10 s 后再同向焊下一道焊缝,并最终空冷至室温. 焊接顺序如图 3 所示.

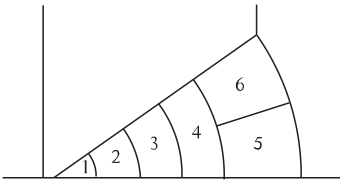


图 3 焊接顺序示意图
Fig.3 The diagram of the welding sequence

1.5 有限元模型

按照几何模型在 ANSYS 中建立有限元模型. 因为焊接过程是一个加热不均匀的过程,在焊缝及近焊缝处温度梯度较大,其它区域温度梯度较小,因此在对有限元模型划分网格时,焊缝及近焊缝处采用较为细密的网格,而其它区域采用较为稀疏的网格,这样既保证了焊接模拟结果的可靠性,同时减少了网格数量,节省了计算时间.

结合本分析的有限元模型,对焊缝及近焊缝处的单元大小定为 1 mm,其它区域的单元大小定为 4 mm,划分网格后模型如图 4 所示,总节点数为 53 472,总单元数为 45 630.

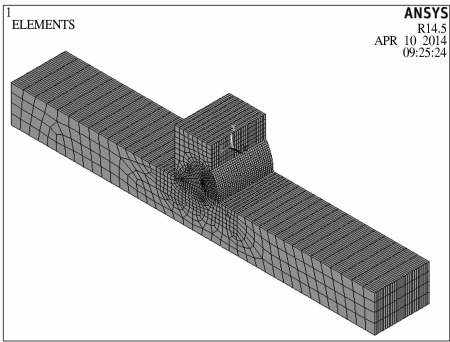


图 4 有限元网格模型
Fig.4 Finite element mesh model

2 仿真结果及分析

2.1 焊缝填充过程的实现

在计算过程中,利用 ANSYS 软件本身的生死

单元技术,在不增加或减少单元数量的前提下,通过抑制和逐段的激活焊缝处的单元,可以较为真实地模拟焊缝金属的填充这一过程.

2.2 温度场分析结果及分析

在焊丝直径、焊接电流和电压、气体流量等工艺参数一定的情况下,焊接速度是影响焊接稳定性和质量以及温度场分布的重要因素,因此,本次模拟分别对 6 mm/s、8 mm/s 及 10 mm/s 3 种焊接速度进行模拟,得出温度场分析结果并进行分析.

以第一道、第二道焊缝为例,3 种焊接速度下焊接第一、二道焊缝时的温度场分布如图 5 所示,可以看出 3 种焊接速度下,焊缝上的温度云图呈

椭球状分布.随着焊接速度由 6 mm/s 增加到 10 mm/s,温度场等温层的宽度逐渐减小,6 mm/s、8 mm/s 和 10 mm/s 速度下第一道焊缝焊接过程中热源中心经过位置的最高温度分别为 1 747.08 ℃、1 508.93 ℃和 1 378.34 ℃,第二道焊缝焊接过程中热源中心经过位置的最高温度分别为 2 113.81 ℃、1 687.48 ℃和 1 544.3 ℃,呈逐渐降低的趋势,模型最低温度为常温 20 ℃.这是因为随着焊接速度的增加,热源对焊缝的作用时间逐渐减小,因此热影响区宽度逐渐减小,模型的最高温度逐渐降低.

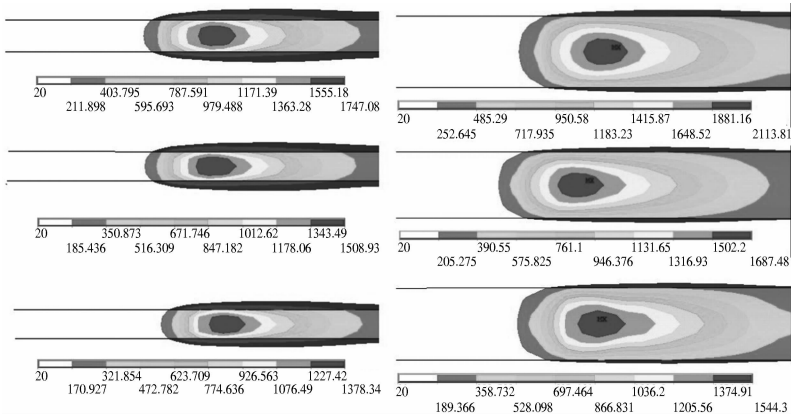


图 5 3 种焊接速度下焊接第一(左)、二(右)道焊缝时温度场分布云图
Fig.5 Temperature cloud chart of the first(left) and the second(right) weld under the three welding speeds

在此取热源中心经过各道焊缝的点作为研究对象进行分析,6 个点分别为 A、B、C、D、E、F,节点号分别为 2 653、7 535、6 029、3 139、3 748 和 9 423,均位于各焊道的中间位置,位置分布如图 6 所示.在 3 种焊接速度下,通过 ANSYS 的计算,得到在焊接过程中六点的温度循环曲线图.

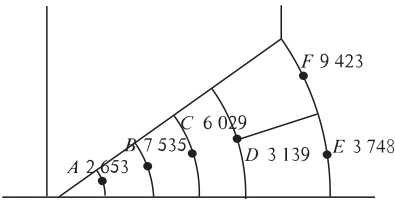


图 6 六点位置分布图
Fig.6 Distribution diagram of the six points

以焊接速度 8 mm/s 时为例,焊缝上 A ~ F 点的温度循环曲线如图 7 所示:焊接热源在第一道缝上加载 2.5 s 左右时,A 点开始受到热源加热作用,温度迅速升高,4.5 s 时 A 点达到最高温度 1 508.93 ℃.随着热源的离开,A 点的温度迅速下

降,直至 500 ℃左右时温度的下降逐渐减缓,并降至一个较低值.随着后几道焊缝的焊接,A 点又经历了几次温度升降循环过程,第二次温度循环的最高温度为 300 ℃左右,远低于第一次温度循环的最高温度.这是由于焊缝材料在高温情况下呈液态,导热系数较大,因此当热源离开 A 点之后温度迅速下降;当温度降低以后,焊缝材料呈固态以及相变状态,导热系数远低于液态,因此 A 点的温度下降速度放缓.20.5 s 时 A 点受到第二道焊缝焊接的加热作用,经历第二次温度升降循环,但由于热源不直接作用在 A 点上,因此其最高温度较低.随着焊接厚度的增加,热源对 A 点的作用逐渐减弱,A 点的温度曲线呈现为一种缓慢降低的过程. B ~ F 点的温度循环曲线与 A 点相似,在此不作赘述.

当焊接速度为 6 mm/s 和 10 mm/s 时,A ~ F 点的温度循环曲线变化趋势与焊接速度为 8 mm/s 时基本相同,不同点在于随着焊接速度的提高,温度循环曲线的最高温度逐渐降低,这是由于焊接热

源的作用时间随着焊接速度的提高而逐渐减小,因此输入的热量减少,所以最高温度逐渐降低。

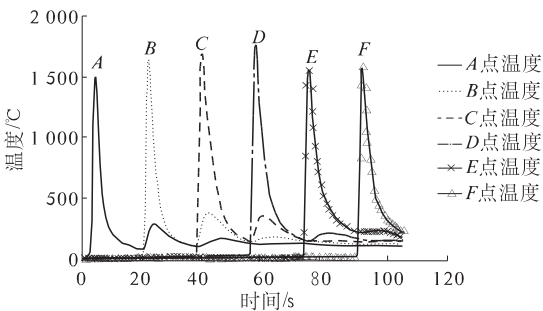


图 7 8 mm/s 焊接速度下 6 点热循环曲线

Fig.7 The thermal cycling curves of the six points under the welding speed of 8 mm/s

2.3 实验验证

实验设备选用 NBC-350 熔化极气体保护弧焊机一台,焊接热循环曲线测量系统一套.实验材料为 Q345B 钢板两块,焊丝选用 H08Mn2SiA,焊接速度选用 8 mm/s,实验材料尺寸及焊接工艺参数与数值模拟时所选参数相同.实验样件及实验所选样点分布如图 8 所示,a~f 点与上文中的 A~F 点依次对应.通过实际焊接,利用热循环曲线测试系统测得在焊速为 8 mm/s 时,a~f 点的热循环曲线如图 9 所示。



图 8 实验样件及实验样点位置

Fig.8 The experimental sample and sample locations

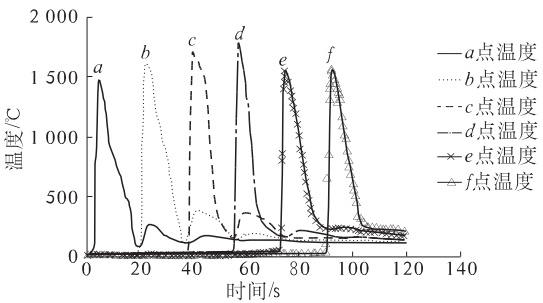


图 9 焊速 8 mm/s 下 a~f 点实测热循环曲线

Fig.9 The actual thermal cycling curves of a~f points under the welding speed of 8 mm/s

可以看出,通过实验测得的 a~f 6 点的热循环曲线与模拟所得曲线变化趋势相似.具体温度值略有误差.在温度下降阶段,模拟的曲线温度下降速率大于实测曲线。

总体来说,对于热循环曲线的变化趋势和最高温度范围,模拟结果与实验结果较为吻合,可以认为模拟数据较为可信。

3 结论

(1) 对比了 6 mm/s、8 mm/s 和 10 mm/s 3 种焊接速度下焊接第一道焊缝和第二道焊缝过程中温度场的分布情况,得出随着焊接速度的提高,温度场垂直焊接方向的等温层宽度有所减小,热源中心的最高温度也有所降低。

(2) 选取位于各道焊缝中间位置的 6 点(A 点~F 点)作为研究对象,利用 ANSYS 中的时间历程后处理功能,得到了 3 种焊接速度下 6 点的热循环曲线,结果表明:随着热源的靠近,焊缝处温度瞬间升高到最高温度,接着热源离开,焊缝处温度快速下降,直至 500 ℃ 时,温度下降速度减缓;另外随着焊接速度的提高,取样点的最高温度有所下降。

(3) 通过实验验证,模拟得到的热循环曲线与实测曲线较为吻合,模拟结果较为可信,为实际焊接过程的分析提供一定的理论帮助。

参考文献:

[1] 刘志刚,苏白兰,韦弦. Q345 钢板焊接性能研究[J]. 河南冶金,2003,11(1):14-15.

[2] 丁林,周永涛,李明喜. T 型接头激光焊接的温度场和应力场的数值模拟[J]. 安徽工业大学学报,2007,24(4):384-388.

[3] KARLSSON R I,JOSEFSON B L. Three-dimensional finite element analysis of temperatures and stresses in a single-pass butt-welded pipe[J]. AMSE Journal of Pressure Vessel Technology,1990,112(2):76-84.

[4] KONG Fan-rong,MA Jun-jie,RADOVAR K. Numerical and experimental study of thermally induced residual stress in the hybrid laser-GMA welding process[J]. Journal of Materials Processing Technology,2011,211(6):1101-1111.

[5] 张银霞,乔向南,王栋,等. CO₂ 气体保护焊温度场的三维数值模拟与分析[J]. 郑州大学学报:工学版,2012,33(4):41-45.