

移动热载荷在焊接温度场数值模拟中的应用

刘 波,姚河清

(河海大学机电工程学院,江苏 常州 213022)

摘要:为分析焊接过程中焊件温度场随焊接热源移动变化情况,采用 ANSYS 命令流编制参数化程序,动态填充热流密度表,实现移动热载荷的加载;针对薄板堆焊,选用高斯热源模型,进行了焊接温度场数值模拟。数值模拟结果表明,所采用命令流动态加载热载荷的方法,能够较好地模拟实际焊接过程中的热源移动情况;针对其他的焊缝形状和焊接方法,可通过更改命令流程序参数的设置,获得适合的移动热源移动轨迹和热源模型的数学描述,实现焊接温度场的数值模拟。

关键词:移动热载荷;焊接温度场;ANSYS

中图分类号: TG402

文献标识码: A

文章编号: 1000-198X(2008)03-0405-05

焊接是一个涉及电弧物理、传热、冶金和力学的复杂过程^[1]。焊接温度场的准确计算是焊接质量控制、焊接冶金和力学分析的前提^[2]。传统的焊接温度场计算依赖于试验和统计基础上的经验曲线或经验公式,无前瞻性,不能全面预测和分析焊接对整个结构的力学特性影响,客观评价焊接质量。随着差分法、有限元法的不断完善和计算机技术的发展,开发了许多有限元分析建模的工程软件,为焊接温度场的计算机数值模拟技术提供了工具,ANSYS 是其中应用较广的一种工程软件。

焊接的热输入过程是一个时变的热过程,焊接电弧作为焊接热过程中的主要载荷,其中心随焊枪移动而移动,即其热载荷是一移动热载荷。在 ANSYS 热分析中,实现移动热载荷的准确施加往往是焊接温度场数值模拟的一个关键。针对移动热载荷的施加,本文采用 ANSYS 命令流编制参数化程序,动态填充热流密度表,实现了移动热载荷的加载。以薄板堆焊为例,进行了焊接温度场数值模拟。

1 热源模型的选择

对于大部分焊接来说,焊接热源是实现焊接过程的基本条件。由于焊接热源的局部集中热输入,致使焊件存在十分不均匀、不稳定的温度场,进而导致焊接过程中和焊后出现较大的焊接应力和变形。因此,焊接热源模型选取是否恰当,对焊接温度场和应力变形的模拟计算精度,特别是靠近热源的地方,会有很大的影响。在焊接过程的数值模拟研究中,人们提出了一系列热源计算模型,常用的有 Rosenthal 解析模型、高斯热源模型、半球状热源模型、椭球型热源模型和双椭球型热源模型等^[3-5]。所有热源模型的共同点是忽略在焊接熔池中的复杂过程,特别是熔化和结晶过程中的熔合区移动和借助对流和热辐射的传热^[6]。焊接熔池中复杂的热过程用导热连续体中的焊接热源加以近似。

针对薄板堆焊,选用高斯热源模型。焊接时,电弧热源把热能传给焊件是通过一定的作用面积进行的,这个面积成为加热斑点。加热斑点上的热量分布是不均匀的,中心多而边缘少。加热斑点上的热流密度分布可以近似地用高斯函数来描述^[7],如图 1 所示。

距斑点中心任意一点的热流密度^[8]为

$$q(r) = q_m \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) \quad (1)$$

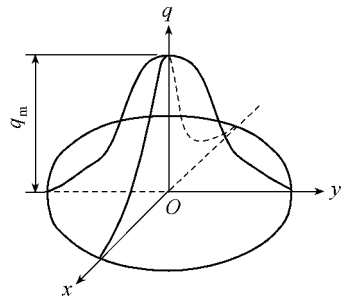


图 1 高斯热源模型

Fig.1 Gaussian heat source model

其中

$$q_m = \frac{3}{\pi R^2} Q \tag{2}$$

式中： q_m ——加热斑点中心最大热流密度； R ——电弧有效加热半径； r ——离电弧加热斑点中心的距离； Q ——电弧热功率。

2 ANSYS 建模

2.1 几何尺寸与材料属性

分析试板为一长 350 mm、宽 100 mm、厚 4 mm 的薄板。为减少计算工作量，提高运算速度，将几何模型简化为二维平面模型，通过选择壳单元，添加单元厚度参数，来实现对实际情况的模拟。几何模型简化为 35 cm × 10 cm 的二维平面。对于较大尺寸的板，根据焊接情况，对于对称焊，可以采用模型减半的方法，以减少单元个数，提高运算速度。单元定义时应相应地设定单元的轴对称参数选项。

试验中使用的试板材料为 Q235，其热物性参数^[9]：热导率为 61.13 W/(m·K)，比热容为 745.25 J/(kg·K)，密度为 7860 kg/m³。

2.2 单元选择

为提高温度场数值计算的精度，除考虑移动热载荷（即电弧热输入）外，还要考虑试板与空气的对流换热。移动热载荷为热流密度载荷，对流换热为对流载荷，二者同属于面载荷，不能施加在同一单元上，因此定义单元时选用 SHELL157 和 SURF152 2 种单元。壳单元 SHELL157 是一种具有平面传导能力的三维单元，每个节点只有温度 1 个自由度，可用于稳态和瞬态热分析中，用于接收热流密度载荷；表面效应单元 SURF152 主要应用于三维热分析，可在 SHELL157 上生成 SURF152，用于承受对流载荷。

2.3 网格划分

焊接过程是一个加热非常不均匀的过程，在焊接熔合区及附近温度梯度变化很大，划分网格时一般不采取均匀的网格，而是在焊缝及其附近的部分用加密的网格，在远离焊缝的区域，能量传递缓慢，温度分布梯度变化相对较小，这时可以采用相对稀疏的单元网格。总之，在保持精度的同时减少网格的数量，以减少计算量。

首先采用映射网格划分的方法，设定网格尺寸为 10 mm × 10 mm，对整个面进行网格划分，划分后的网格情况如图 2(a)所示。

为了保证热源热影响区的计算精度，对热源中心轴线附近的网格进行局部细分，借助 ANSYS 提供的细分工具采用最高级细分，细分后的网格小于 1 mm，细分后的网格情况如图 2(b)所示。

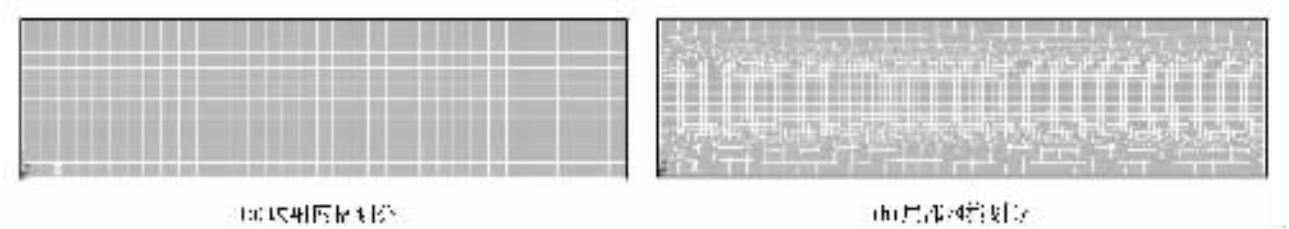


图 2 网格划分和细分
Fig.2 Grid cell division and refinement

3 移动载荷的施加方法

焊接电弧的热输入在 ANSYS 中是作为热流密度载荷施加的，在 ANSYS 中可以通过定义热流密度表来对指定单元施加热流密度载荷。定义热流密度表，应用 ANSYS 命令流程序动态填充热流密度表，实现移动载荷的施加。

在焊接过程中，随着焊枪的移动，焊接电弧加热斑点中心随之移动。设焊枪沿薄板中线移动，以薄板中线作为 x 轴，宽度方向起始侧作为 y 轴建立平面坐标系如图 3 所示。

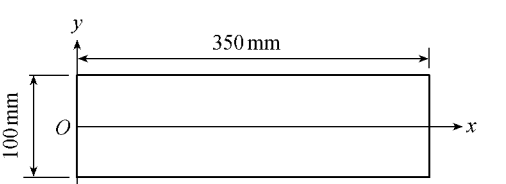


图 3 自定义坐标系
Fig.3 User-defined coordinate system

Fig.4 Flow chart of command line program

4 温度场求解

焊接过程是一个瞬态传热过程,在此过程中,系统中的温度、热流率、热边界条件以及系统内能随时间都有明显变化.根据能量守恒原理,瞬态热平衡^[10]可以表达为

$$C\dot{T} + KT = Q$$

(3)

式中: K ——传导矩阵,包含热导率、对流系数及辐射率 and 形状系数; C ——比热容矩阵,考虑系统内能的增加; T ——节点温度向量; $\dot{T}$ ——温度对时间的导数; Q ——节点热流率向量,包含热生成.在选择求解方式时,应选择瞬态求解,载荷变化复杂时,采用循环求解.以下为瞬态求解命令流代码:

```
! 瞬态求解
Antype ,trans
.....
SFA ,ALL ,1 ,HFLUX ,% FLUX3% ! 将定义好的热流密度表作为载荷表施加给选定单元
.....
Timint ,on ! 打开时间积分
* Do ,Tm ,1e - 6 ,105 ,1 ! 定义循环求解
TIME ,Tm ! 设定载荷步终止时间
Autots ,0
Deltim ,,,,1
Kbc ,1 ! 设定载荷为阶跃载荷
```

计算所得温度场如图 5 所示,其中图 5(a)为移动热源刚刚进入焊缝起始端时的温度场分布,图 5(b), (c)为移动热源中心点移动到不同位置时的温度场分布,从图中可以看到热源的移动及其引起的温度场的变化.

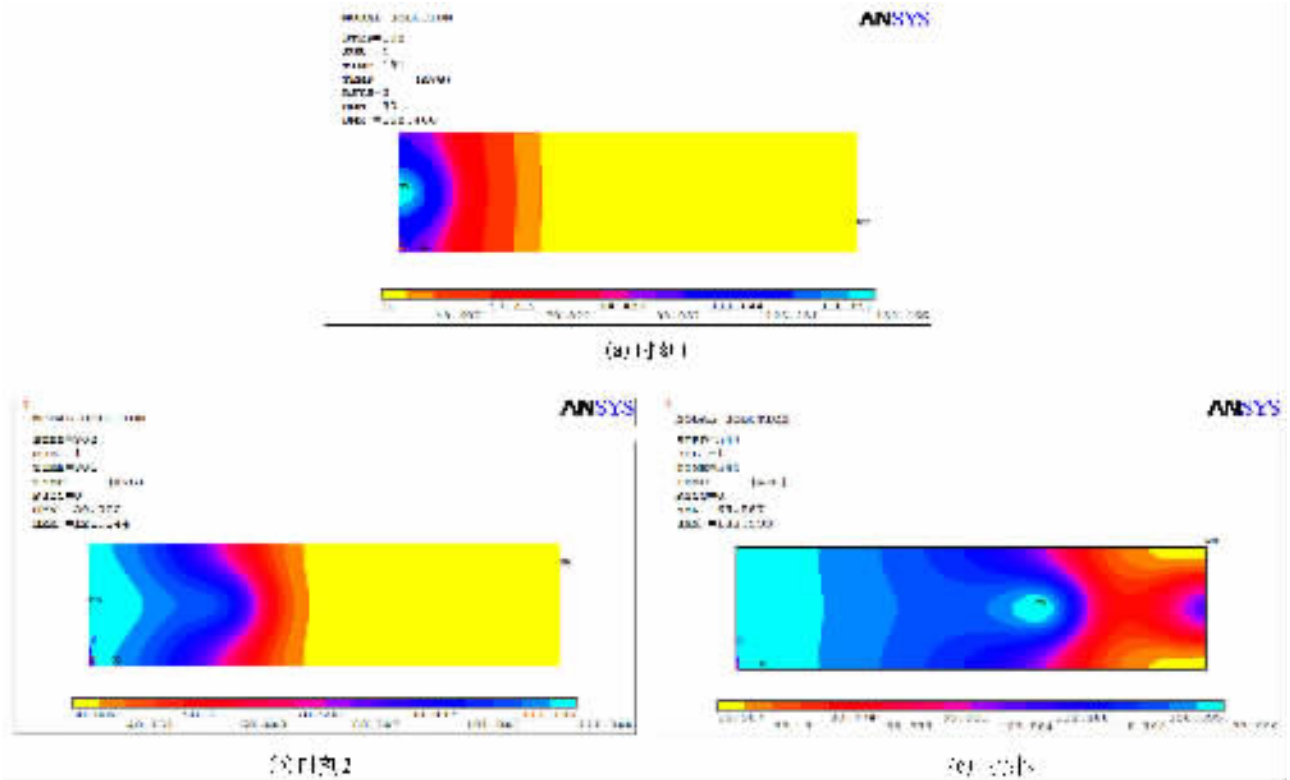


图 5 ANSYS 输出的不同时刻温度场分布云图

Fig.5 Temperature field at different time output by ANSYS

5 结 语

采用 ANSYS 命令流编制参数化命令程序 , 通过参数计算 , 动态填充定义的热流密度表 , 实现了移动热源的加载和对焊件温度场随移动热源移动的变化情况进行数值模拟 . 针对其他的焊缝形状和焊接方法 , 可通过更改命令流参数的设置 , 改变移动热源移动轨迹和热源模型的数学描述 , 实现焊接温度场的数值模拟 .

参考文献 :

[1] 周远远 , 于治水 . 焊接熔池数值模拟的研究现状 [J]. 华东船舶工业学院学报 : 自然科学版 , 2003 , 17 (2) : 65-69 .
[2] 黄晖 , 贾剑平 , 黎和昌 . 基于 ANSYS 平台的旋转电弧传感器焊接热过程模拟 [J]. 南昌大学学报 : 工学版 , 2007 , 29 (1) : 22-24 .
[3] 孟庆国 , 方洪渊 , 徐文立 , 等 . 双丝焊热源模型 [J]. 机械工程学报 , 2005 , 41 (4) : 110-113 .
[4] 程久欢 , 陈俐 , 于有生 . 焊接热源模型的研究进展 [J]. 焊接技术 , 2004 , 33 (1) : 13-15 .
[5] 莫春立 , 钱百年 , 国旭明 , 等 . 焊接热源计算模式的研究进展 [J]. 焊接学报 , 2001 , 22 (3) : 93-96 .
[6] 李臻 . 钎换热器管板焊接接头温度场数值模拟 [J]. 压力容器 , 2007 , 24 (4) : 19-23 .
[7] 武传松 . 焊接热过程数值分析 [M]. 哈尔滨 : 哈尔滨工业大学出版社 , 1990 : 32-35 .
[8] 陈家权 , 肖顺湖 , 吴刚 , 等 . 焊接过程数值模拟热源模式的比较 [J]. 焊接技术 , 2006 , 35 (1) : 9-11 .
[9] 樊东黎 , 徐跃明 , 佟晓辉 . 热处理工程师手册 [K]. 北京 : 机械工业出版社 , 2005 : 112 .
[10] 唐兴伦 , 范群波 . ANSYS 工程应用教程 : 热与电磁学篇 [M]. 北京 : 中国铁道出版社 , 2003 : 83-89 .

Application of moving thermal loads in numerical simulation
of welding temperature field

LIU Bo , YAO He-qing

(College of Mechanical and Electrical Engineering , Hohai University , Changzhou 213022 , China)

Abstract : In order to analyze the variation of temperature in weldment with the movement of the heat source in the process of welding , moving thermal loads were loaded properly using ANSYS command lines to design a parametric program to dynamically complete the heat flux table . The welding temperature field during thin board pile-up welding was numerically simulated using the Gaussian heat source model , and the simulation results show that the moving of heat source in the actual welding process can be well simulated by dynamically loading heat loads through command lines . As for other weld seal and weld process , numerical simulation of their welding temperature fields can also be realized by changing parameters in command line program , from which the moving path of the heat source can be obtained and mathematically described in the heat source model .

Key words : moving thermal loads ; welding temperature field ; ANSYS