

氩弧焊数值模拟中高斯面热源加载方式探究

张卫之,程焰林

(中国工程物理研究院 电子工程研究所,四川 绵阳 621000)

摘要:高斯面热源模型被广泛应用于钨极氩弧焊数值模拟中。本文利用 Ansys 有限元仿真软件,分别采用表层单元热流密度、表层单元体热生成率、表层节点热生成率三种不同的高斯面热源加载方式对氩弧焊平板堆焊进行数值模拟,对比了三种加载方式的优缺点。模拟结果表明,采用表层单元热流密度加载时,由于单元面编号的不同会对结果产生很大影响,且会出现热流覆盖问题;表层单元体热生成率加载时,表层单元厚度会对模拟结果的峰值温度产生一定影响,模拟计算过程的收敛性较差;采用表层节点热生成率加载时,表层单元厚度会对模拟结果的峰值温度产生影响,计算的收敛性较好,计算得到的熔宽熔深值不随表层单元厚度变化而产生明显变化,可较好地模拟氩弧焊接过程。

关键词:高斯面热源;加载方式;数值模拟

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2015.13.072

中图分类号: TG402

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2015)13-0235-03

Research on Gauss Heat Source Applying Method in TIG Numerical Simulation

ZHANG Weizhi, CHENG Yanlin

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, China)

Abstract: Gauss Heat Source was widely used in TIG numerical simulation. Using Ansys as FEM software, three ways (surface element HFLUX, surface element HGEN, surface node HGEN) to apply Gauss Heat Source were studied to contrast their advantages and disadvantages. The results show that the surface element HFLUX can cause heat flux override problem due to different face number of the element. When using the surface element HGEN way, higher peak temperature is gained with thinner surface element model. Similar to surface element HGEN method, the peak temperature increases when the thickness of surface element decreases using surface node HGEN method, but the convergence of computational process is much better when using surface node HGEN method. Both the surface element HGEN and the surface node HGEN method can simulate the penetration and weld width correctly regardless of the surface element thickness variation.

Key words: Gauss Heat Source; applying method; numerical simulation

在氩弧焊接过程中,在电弧中心加热区域,金属材料熔化甚至汽化,而在母材处则为室温,这种温度大梯度特点导致焊接过程的温度场很难加以测量^[1],一般情况下仅能通过热电偶对热影响区或母材上的某点进行热循环测量。通过计算机数值模拟的方法,可以得到焊接过程的整体温度场分布,以便全面地了解温度分布情况^[2]。

基于氩弧焊电弧及加热方式特点,其焊接过程温度场数值模拟常采用高斯面热源模型^[3](图1),任意一点的表面热流密度由式(1)确定。

$$q(r) = \frac{3}{\pi R_h^2} \eta U I \exp\left(-\frac{3r^2}{R_h^2}\right) \quad (1)$$

式中: R_h 为电弧有效加热半径; r 为焊件上任意点至电

弧加热斑点中心的距离; η 为焊接热效率; U 为电弧电压; I 为焊接电流。

在 Ansys 数值模拟时,高斯面热源的加载方式有很多种,但对不同加载方式对模拟结果的影响的研究较少。本文研究了表层单元热流密度加载、表层单元热生成率加载及表层节点热生成率加载三种不同的加载方式,通过计算过程的收敛性、温度场计算的准确性,对比三种不同加载方式各自的优劣。计算中所采用的参数见表1。

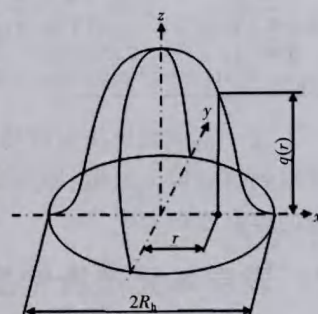


图1 高斯面热源模型
Fig.1 Gauss heat source model

表1 数值模拟参数

Tab.1 Parameters of weld procedure

有效加热半径 R_h/mm	电弧电压 U/V	焊接电流 I/A	焊接速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	热效率
1	12	50	0.005	0.75

收稿日期: 2014-09-10

基金项目: 中物院电子工程研究所科技创新基金资助项目(426010401)

作者简介: 张卫之(1989-),男,陕西宝鸡人,硕士,主要从事熔焊焊接工艺及计算机数值模拟方面的研究;电话: 13208266745;

E-mail: wzzhang@foxmail.com

1 建模与网格划分

为了减少计算量,本文所建立的模型尺寸为 20 mm×20 mm×2 mm,材料属性为不锈钢1Cr18Ni9Ti,焊接方式为表面堆焊。使用 solid70 单元^[4](单元几何结构如图 2)模拟焊接过程的动态温度场,为了提高计算精度及收敛性,并兼顾计算时间,采用焊缝及热影响区部分细化网格的方法,使用映射网格对模型进行网格划分^[5]。网格划分结果如图 3。

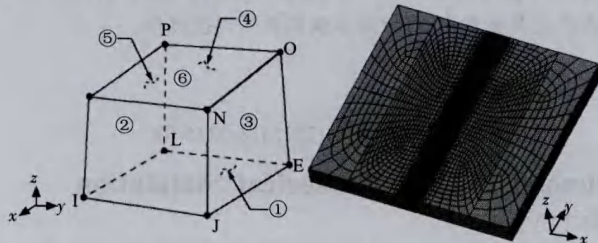


图 2 solid70 单元几何结构 Fig.2 Geometry of solid70
图 3 平板堆焊有限元模型 Fig.3 Finite Element model of the plane

材料的性能参数对焊接数值模拟的结果影响很大。通常条件下,室温和较低温度以下的材料属性可以通过实验获得,而高温下的材料属性只能通过外推法或者一些合理的假设来确定^[6]。本文使用的材料热物理性能参数(表 2)由文献[7]得到。

表 2 1Cr18Ni9Ti 物性参数
Tab.2 Material properties

温度 /℃	20	250	500	750	1000	1500	1700	2750
热导率 /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)	15.0	17.4	19.9	22.5	28.3	33.1	66.2	66.2
密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7800	7700	7610	7550	7490	7350	7300	7090
比热容 /($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)	460	480	530	675	690	694	697	698

在计算得到焊接温度场分布后,设置温度标尺,可得到熔点以上区域,即为焊后焊缝区域,可得到焊缝的熔宽及熔深^[8]。

2 表层单元热流密度加载方式

表层单元热流密度加载方式最贴近于高斯面热源模型,在使用该种加载模式时,需首先获得有效加热半径内的单元,并得到单元的位置坐标,根据高斯面热源公式计算得到热流密度,通过 SFE 命令加载在单元的某个面上。

在 Ansys 中, SFE 命令结构如下: SFE, ELEM, LKEY, Lab, KVAL, VAL1, VAL2, VAL3, VAL4。其中: ELEM 代表要加载热流的单元; LKEY 为单元的面编号; Lab 取 HFLUX 表示加载热流密度; VAL1 代表要加载的热流的大小,其余参数选取默认。

本文对单元的不同面进行热流加载,以得到不同的求解结果。为了对比求解结果,选取 1s 时刻的温度场分布作为对比对象。

图 4 为加载面不同时在 1s 时刻的温度场云图。在加热中心区域温度最高,超过了材料的熔点,形成焊缝,不同的加载面下焊缝的形貌差异很大。在 2、3、4、5 号面加载时,熔宽远远超过高斯热源的有效加热半径;在 1、6 号面加载时,熔池形貌的尺寸与实际较为相符。此外,在不同面加载时,1s 时刻温度场的峰值温度有较大差异(表 3)。

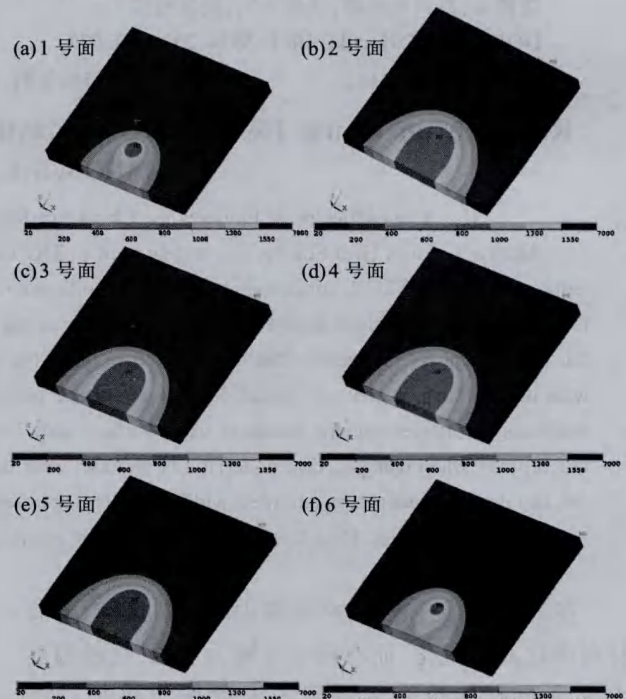


图 4 不同加载面 1s 时刻温度场分布及熔池形貌
Fig.4 Temperature field and weld pool appearance of 1s by different load face

表 3 不同加载面下的熔池峰值温度
Tab.3 Peak temperature under different load face

加载面号	1	2	3	4	5	6
峰值温度 /℃	3252	6306	6175	6327	6147	1836

加载面为 1、2、4 号面时会出现警告(Element face has convection applied. This element heat flux will override the convection),即面热流的加载会覆盖提前加载在表面上的对流散热,使对流散热无法进行,从而产生一定的误差。根据本例中建模及网格划分方向(图 2、3),单元的加热面应该为处于 z 轴正向的面,即 6 号面,但 6 号面的计算结果中焊接熔宽仅为 1.5 mm,与设定值(2 mm)不符。在 Ansys 计算求解时,单元的面编号会发生自动调整,与初始的面编号

不同,从而导致热源的加载出现较大偏差;此外,当焊缝结构较为复杂,呈空间曲线时,单元加热面的编号会很难确定,因此采用 SFE 命令在单元上施加面热流的方式不能很好地模拟高斯热源的加载方式,模拟结果有较大误差。为了避免 SFE 命令加载单元面热流的方式产生的误差和热流覆盖问题,可将表面热流换算为表层单元或表层节点的体热生成率来计算。

3 表层单元热生成率加载方式

同表层单元热流密度加载方式类似,表层单元热生成率加载时,需首先获得有效加热半径内的单元,并得到单元的位置坐标及表层单元厚度,根据高斯面热源公式计算得到热流密度,结合表层单元厚度换算得到表层单元的体热生成率,通过 BFE 命令将该值加载在体单元上。

在 Ansys 中, BFE 命令结构如下: BFE, ELEM, Lab, STLOC, VAL1, VAL2, VAL3, VAL4。其中: ELEM 代表要加载热生成率的单元; Lab 取 HGEN 表示加载热生成率; VAL1 代表要加载的热生成率的大小,其余参数选取默认值。

在使用表层单元的体热生成率模拟表面热流时,表层单元的厚度决定了模拟结果的准确性,当表层单元越薄,越能准确地模拟面热源加载方式。图 5 为不同厚度表层单元 1s 时的温度场分布图。由图可知,温度场的分布情况基本类似,在加热中心区域温度最高,超过了材料的熔点,形成焊缝,温度场有明显的拖尾现象,不同厚度下熔池的形貌尺寸基本相同。当表层单元厚度不同时,计算结果的峰值温度有一定的差异(如表 4),且随着表层单元厚度的减小,计算过程的收敛性有明显降低,在表层单元厚度为

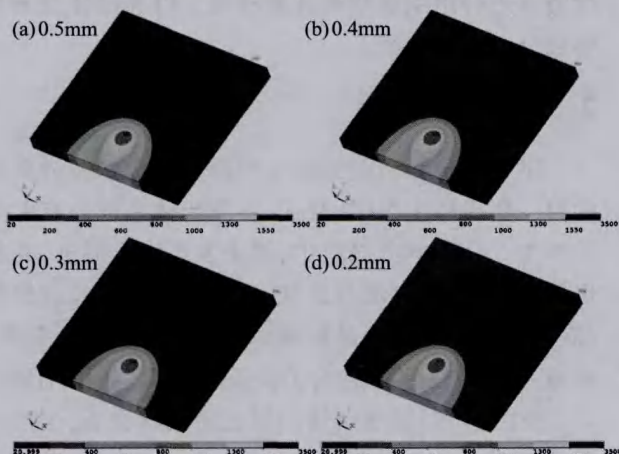


图 5 不同厚度表层单元 1s 温度场分布及熔池形貌
Fig.5 Temperature field and weld pool appearance of 1s by different surface element thickness

表 4 不同厚度表层单元的熔池峰值温度
Tab.4 Peak temperature of different surface element thickness

表层单元厚度 /mm	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
熔池峰值温度 /℃	2544	2636	2791	2927	不收敛

0.1mm 时就发生了不收敛现象。

4 表层节点热生成率加载方式

表层节点热生成率加载时,需首先获得有效加热半径内的节点,并得到节点的位置坐标,根据高斯面热源公式计算得到该节点坐标的热流密度值,结合该节点处单元的厚度,换算为节点的体热生成率,再通过 BF 命令将该值加载到节点上。

在 Ansys 中, BF 命令结构如下: BF, NODE, Lab, VAL1, VAL2, VAL3, VAL4。其中: NODE 代表要加载热生成率的节点; Lab 取 HGEN 表示加载热生成率; VAL1 代表要加载的热生成率的大小,其余参数选取默认值。

在使用表层节点的体热生成率模拟表面热流时, Ansys 软件会将节点热生成率转换为节点等效体积的单元热生成率进行计算,因此表层单元的厚度对计算结果会有一定的影响,当表层单元越薄,越能准确地模拟面热源加载方式。如图 6 为不同厚度

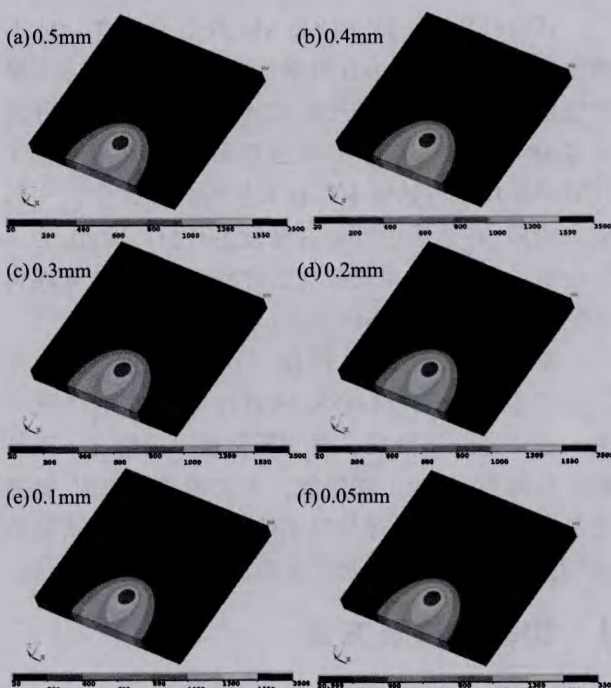


图 6 不同厚度表层单元 1s 温度场分布及熔池形貌
Fig.6 Temperature field and weld pool appearance of 1s by different surface element thickness (下转第 240 页)

小的情况下即发生开裂,因而也可以排除因道次变形量过大造成开裂。因此,综合以上检测结果和分析,可以认为,此次锻件开裂的主要原因在于坯料存在明显的冶金缺陷。

3 结论

综合以上分析认为,热锻件开裂的主要原因为:

- (1) 坯料中杂质元素 S 含量超标。
- (2) 坯料中有 Al_2O_3 和 $CaCO_3$ 夹杂。
- (3) 钢中合金元素,尤其是 Mn 严重偏析。

(上接第 237 页)表层单元 1s 时的温度场分布图。由图可知,温度场的分布情况基本类似,熔池形貌与实际相当。但当表层单元厚度不同时,计算结果的峰值温度有一定的差异(如表 5),且随着表层单元厚度降低,温度场的峰值温度增加。在焊接温度场数值模拟中,焊缝的形貌(熔化区域形状)是关注的对象,而熔池中心的峰值温度参数对于焊接过程不是很重要。

表 5 不同厚度表层单元的熔池峰值温度
Tab.5 Peak temperature of different surface element thickness

表层单元厚度/mm	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.05	0.03
熔池峰值温度/℃	2485	2590	2742	2873	3056	3165	3205

对比表层单元热生成率和表层节点热生成率两种加载方式(图 7),两者的峰值温度均随着表层单元厚度的减小而增大,在计算收敛的前提下,两者得到的峰值温度非常接近,而在 0.1 mm 及更薄的表层单元厚度下,表层节点热生成率加载方式仍收敛,而表层单元热生成率加载方式已不收敛,证明前者的加载方式具有更好的计算收敛性。

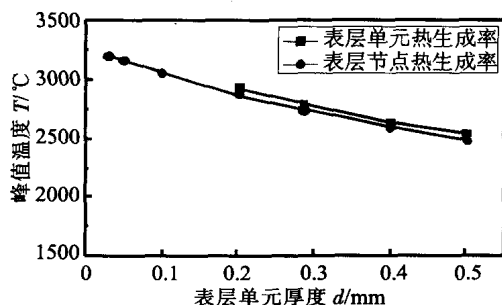


图 7 不同厚度表层单元熔池峰值温度
Fig.7 Peak temperature of weld pool by different surface element thickness

5 结论

- (1) 采用表层单元热流密度加载高斯面热源

因此,提高坯料的冶金质量是改善坯料热锻成型性能的关键。

参考文献:

- [1] 武建国,郭会光,刘建生. Mn18Cr18N 护环钢热变形特性的试验研究[J]. 大型铸锻件,2004(3):1-4.
- [2] 邵光帅,朱亮,周辉. 奥氏体不锈钢热变形过程中的裂纹敏感性评价方法[J]. 热加工工艺,2014,43(8):1-4.
- [3] 张进,李静媛,王一德,等. Mn18Cr18 高氮钢热加工工艺的研究[J]. 锻压技术,2009,34(1):10-13. [1]

时,由于单元受热面的选择较为困难,且会出现与对流冷却换热覆盖问题,该种方法的计算结果有较大的误差,当选择单元面不合适时,不能模拟焊接过程的熔池形态。

(2) 将高斯面热源通过换算得到表层单元热生成率,采用表层单元热生成率加载高斯面热源,可很好地模拟焊接过程的熔池形态,随着表层单元厚度的减小,熔池峰值温度增大,计算收敛性变差。

(3) 将高斯面热源通过换算得到表层节点热生成率,采用表层节点热生成率加载高斯面热源,可很好地模拟焊接过程的熔池形态,随着表层单元厚度的减小,熔池峰值温度增大,其收敛性要好于表层单元热生成率加载方式。

参考文献:

- [1] 张可荣,张建勋. 铝合金激光焊接大梯度残余应力特征分析[J]. 焊接学报,2010,31(3):38-40.
- [2] 吴言高,李午申,邹宏军,等. 焊接数值模拟技术发展现状[J]. 焊接学报,2002,23(3):89-92.
- [3] 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.
- [4] Ma J, Kong F, Kovacevic R. Finite-element thermal analysis of laser welding of galvanized high-strength steel in a zero-gap lap joint configuration and its experimental verification [J]. Materials & Design,2012,36:348-358.
- [5] Liu C, Zhang J. Numerical simulation of transient welding angular distortion with external restraints [J]. Science and Technology of Welding & Joining,2009,14:26-31.
- [6] 孙长青,张宏才,刘劲涛,等. 基于有限元法分析焊接参数对其温度场的影响[J]. 焊接技术,2014,43(3):16-18.
- [7] 宋小龙,安继儒. 新编中外金属材料手册[M]. 北京:化学工业出版社,2012.
- [8] 谢元峰. 基于 ANSYS 的焊接温度场和应力的数值模拟研究[D]. 武汉理工大学,2006. [1]