轧辊堆焊温度场的动态有限元模拟

杜晗婷,陈冰泉,牟军伟,韩 方,张正华

(武汉理工大学 材料科学与工程学院,湖北 武汉 430063)

摘要:利用有限元软件对轧辊堆焊温度场进行数值模拟。在模拟过程中,实现焊接移动热源的施加,较 好地模拟了焊接电弧移动加热过程以及整个温度场的瞬态变化,考虑了材料热物理性能参数与温度的 非线性关系,并以 70Cr3Mo的堆焊为例进行了实例计算,计算结果与实测结果相吻合。 关键词:焊接温度场;移动热源;非线性热物理性能参数;有限元法 中图分类号:TG455 文献标识码:A 文章编号:1001-2303(2007)11-0044-04

Dynamic FEM simulation of temperature distribution for rollers hardfacing process DU Han-ting, CHEN Bing-quan, MU Jun-wei, HAN Fang, ZHANG Zheng-hua (School of Material Science and Engineering WHUT, Wuhan 430070, China)

Abstract: Using ANSYS finite element software, the build-up welding temperature field of roller was numerically simulated. In the process of simulation, the application of moving welding heat source was realized; moving and heating process of welding arc and the instantaneous variation of the temperature field were properly simulated; the nonlinear relationship between thermo-physical property parameters and temperature was taken into consideration. Finally the build-up welding temperature field for 70Cr3Mo was analyzed as an example. The results were in agreement with reality.

Key words: welding temperature field; moving heat source; nonlinear thermo- physical property parameters; finite element method

随着有限元技术的发展与应用以及近年来计算机技术的突飞猛进,已经有很多人进行焊接温度场的数值模拟,其结果也初具成效¹¹⁻³。但关于堆焊数 值模拟的研究,大部分是应用于平板堆焊的,涉及 到环形焊缝的研究并不多。在此以 ANSYS 有限元计 算软件为基础,考虑了材料热物理性能的非线性变 化,采用移动热源的方式加载,以轧辊材料 70Cr3Mo 的堆焊为例对其温度场进行了动态模拟。

1 有限元模拟的过程

由于焊接过程的复杂性,在对轧辊堆焊温度场 进行数值模拟计算时,应考虑许多因素^[4-6],如材料物 理性能参数的确定、焊接热源模型的处理、熔化潜 热的影响等。为了提高模拟计算的可靠性,必须提出 恰当的数学物理模型。

- 1.1 焊接有限元模型的建立
- 1.1.1 定义材料属性

作者简介:杜晗婷(1983—),女,湖北武汉人,硕士,主要从事 焊接模拟的研究工作。

• 44 • Electric Welding M achine

材料的热物理性能参数数据不足是目前有限 元模拟技术遇到的困扰之一。许多材料的热物理性 能(比热容、导热系数、密度等)数据在高温特别在接 近熔化态时还是空白,某些材料仅有室温数据,这就 给非线性计算带来困难。

早期的处理方法是采用材料物理性能参数的 平均值进行计算,但焊接过程中,焊件温度变化十 分剧烈,如果不考虑材料的物理性能参数随温度的 变化,那么计算结果一定会有很大偏差。目前,一般 是通过实验和线性插值的方法获得高温时的一些 数据,而实验测试往往工作量大、对设备要求高,通 常只可能获得少数点的数据,在此基础上插值就会 导致结果不准确。目前最新的发展是应用金属材料 性能模拟计算软件,JMatPro就是其中之一。该软件 以稳定的热力学计算为核心,以经过广泛验证的物 理模型为基础,以强大的数据库为依托,使材料性 能预测的准确性大大提高。本研究运用JMatPro软件 对材料的性能参数进行预测计算,获得了较为完整 的轧辊热物理性能参数。

收稿日期: 2007-06-04

1.1.2 相变的处理方法

材料在发生相变时,会吸收或释放一定的热能,所以在计算焊接温度场时,须考虑相变潜热问题,否则,计算结果会有很大的偏差。

焊接过程中存在两类相变问题:一类是固态相 变,即材料金相组织的转变;另一类是固液相变,即 材料的熔化和凝固。相变问题需要考虑在相变过程 吸收或释放的热量。含有相变问题的热分析是一个 非线性的瞬态的问题。

ANSYS通过定义材料的焓(H)随温度变化来考虑相变如图 1 所示。



图1 焓随温度变化示意

焓的单位是 J/m³, 是密度 与比热容 c 的乘积 对温度 T 的积分

$$H = c(T)dT_{\circ}$$
(1)

1.1.3 建模和网格划分

建模时,依据焊件的形状、尺寸、载荷的形式等 综合考虑几何模型的形状。在焊接过程中,由于高度 集中的热源输入,必须将焊缝处的网格划分得极为 细密,以提高计算精度。远离焊缝的地方网格划分得 可以稀疏些,以减少整个模型的节点数,进而缩短 计算时间。在此采用的是一种过渡型网格划分,如图 2 所示。

1.2 加载计算

1.2.1 分析选项的确定

对于非线性分析,每个载荷步需要多个载荷子 步。时间步长的大小关系到计算的精度。步长越小, 计算精度越高,同时计算的时间越长。根据线性传导 热传递,可以按式(2)估计初始时间步长 ITS:

$$ITS = \frac{2}{4}$$
 , (2)

式中 为沿热流方向温度梯度最大处的单元的 长度; 为导温系数,它等于导热系数 k 除以密度 与比热容的乘积(=k/ c)。



图 2 轧辊堆焊模型和网格划分

如果载荷在这个载荷步是恒定的,需要设为阶 越选项;如果载荷值随时间线性变化,则要设定为 渐变选项。在此设为阶越。

1.2.2 焊接热源

焊接热源模型是实现焊接过程数值模拟的基本条件。焊接热源具有局部集中、瞬时和快速移动的 特点,易形成在时间和空间域内梯度都很大的不均 匀温度场,这种不均匀温度场会导致焊接过程中和 焊后出现较大的焊接应力和变形。因此,焊接过程数 值模拟中热源模型的选择非常重要,对焊接温度场 和应力变形的模拟计算精度,特别是在靠近热源的 地方,影响很大。在此选用高斯函数分布。

Eagar 和 Tsai 将焊接加热斑点上热流密度的 分布近似地用高斯数学模型^[7-8]来描述,如图3所 示。



图 3 高斯分布的热流密度

距加热中心任一点 A 的热流密度可表示为如 下高斯分布函数:

$$q(r)=q_m exp(-\frac{3r^2}{R^2}),$$
 (3)

$$q_{m} = \frac{3}{R^{2}} Q, \qquad (4)$$

$$Q = UI_{\circ}$$
 (5)

式中 qm为加热斑点中心最大热流密度(单位: J/(m²·

s)); R 为电弧有效加热半径(单位:mm); r 为热源某点 至电弧加热斑点中心的距离(单位:mm); Q 为热源 瞬时给焊件的热能(单位:W); 为焊接热效率; U 为 电弧电压(单位:V); I 为焊接电流(单位:A)。

雪焊機

基于焊接热源快速移动的特点,移动热源的实 现是尤其重要的,处理方法是将连续热源的作用时 间微分获得一系列个别的瞬时热源;再将移动热源 的作用距离分割即微分的瞬时热源在其移动方向 上连续顺序地排列;将导热体各点的微分瞬时热源 的效果总和起来,并考虑瞬时热源发生的时间和位 置,将其积分。这可以利用 ANSYS 自带的 APDL 语 言编写子程序,运用循环语句,移动电弧中心坐标 的方式来实现。

1.3 后处理

对模型进行有限元分析后,通常需要检查求解 结果,这种检查在 ANSYS 中称为后处理。

ANSYS后处理器功能强大,其结果显示可以用 彩色云图、等值线(面)、梯度、矢量、动画和图形的 BMP, BS, TIFF, JPEG等格式进行输出。其中, POST1 通用后处理器用于观察整个模型或模型的一部分 在某一时刻的模拟结果,在本研究中可显示埋弧焊 时的等温线和温度云图; POST26(时间-历程后处理 器)用于检查模型中指定点的分析结果与时间的函 数关系,可显示模型上各个节点的热循环曲线^啊。

2 焊接温度场的实例计算

2.1 实际模型

以 70Cr3Mo(成分见表 1)轧辊的堆焊为例,对 其焊接过程中的温度场变化进行非线性的动态模 拟。

表 1 /0Cr3Mo的化字成分							
(C)	(Si)	(Mn)	(Cr)	(Mo)	(P, S)	(Ni)	
0.650	0.400	0.500	2.400	0.400		0.400	
~	~	~	~	~	0.025	~	
0.750	0.700	0.800	2.700	0.600		0.600	

焊件的初始温度 20 ,所采用的电压 34 V,电 流 450 A, 热效率 0.82, 焊接速度 420 mm/min。采用 埋弧焊, 与基体接触的底层采用软层做过渡层(焊 丝 GS113- S, 4.0, 焊剂 107), 软层上再堆焊工作 层(焊丝 Diamond 320-L, 4.0, 焊剂 260), 直到其 直径恢复到原始尺寸。

轧辊材料 70Cr3Mo 的密度、比热容以及热焓与 温度的关系如图 4 所示。



d 热焓与温度关系

图 4 70Cr3Mo 的热物理性能参数与温度的关系

因为过渡层只焊了一层,相对于母材的尺寸和 工作层的尺寸而言很小,所以在建模时忽略过渡层 的存在。320-L熔敷金属的化学成分如表2所示。

表 2 Diamond 320-L 熔敷金属的化学成分。

						70
(C)	(Si)	(Mn)	(Cr)	(Mo)	(P, S)	(Ni)
0.25	0.50	1.00	11.50	0.50		0.80
~	~	~	~	~	0.03	~
0.35	1.20	1.20	13.50	0.80		1.50

注: 堆焊层焊态硬度为 HRC 50~54。

320-L 熔敷金属的比热容、导热系数、密度、热







2.2 计算结果

图 6 为焊接过程中 10 s, 30 s, 50 s, 80 s时的温 度分布。在加热过程中, 随热源的移动, 焊件上被加 热区的温度迅速升高, 经过一段时间后形成准稳态 温度场。在随后的冷却过程中, 随时间的变化焊件上 的温度逐渐趋于稳定, 降至室温。

图 7 是焊缝轴线上距热源 46 mm 处(节点 2090) 在焊接过程中的温度变化曲线。开始焊接后,在热源 作用下母材和焊缝金属熔化形成熔池,由于周围熔 化的金属的传热作用,该节点的温度逐渐升高,当热 源移动到该节点处,此时温度达到了最高值;随后 随焊接过程的继续进行,热源移开,该节点处开始 冷却,与加热速度相比冷却速度要缓慢得多。

在热影响区, 各点也经历了与焊缝类似的热循 环。距熔合线 1 mm 处(节点 2280)焊接热循环过程 的模拟结果和对该处实测的热循环曲线如图 8 所 示。由于热源不对这些位置直接接触加热, 而是通过 热传导使此处的温度升高, 所以其达到的峰值温度 要远低于焊接熔池的温度, 并且随着与焊缝轴线的 距离的加大, 热循环曲线的峰值温度越来越低。由于 各节点所受的热作用不同, 在冷却后就形成了热影 响区性能不同的各个区域。

由以上分析可看到,焊缝金属和基体金属在移 动热源作用下所经历的热循环随时间、空间的改变 而急剧变化。模拟过程中建立的物理模型的准确性 将直接影响到焊接接头各区域的温度场计算结果, 从而影响焊后接头各区域的组织、性能的分析计算。 本研究的模拟结果和实测趋势基本相符,验证了所 建模型的准确性。

3 结论

(1)通过 JMatPro 软件获得了更为完整的材料 热物理性能参数(特别是高温时), 弥补了物理性能 参数数据不足的缺陷, 提高了模拟精度。

(2)采用更接近实际的移动热源的加载方式,更精 确地模拟了焊接温度场在焊接全过程的动态变化。

参考文献:

- [1] 陈 楚.数值分析在焊接中的应用[M].上海:上海交通大 学出版社, 1985
- [2] Wang J.Improvement in Numerical Accuracy and Stability of 3- D FEM Analysis in Welding[J].Welding Journal, 1996, 75(4): 129- 134.



图 6 焊接过程中焊件上的温度变化



- [3] Wang Janhua. An FEM Model of Buckling Distortion During Welding of Thin Plate[J].J. of Shanghai Jiaotong University, 1999, E- 4(2): 69-72.
- [4] 潭陷峰,张 华.焊接温度场和应力场的热弹塑性有限 元分析[J].塑料工程学, 2004, 10(5): 71-74.
- [5] Rayes MEI, Walz C, Sepold G. The influence of various hybrid welding parameters on bead geometry[J]. Welding Journal, 2004, 83(9): 148- 153.
- [6] 陈丙森.计算机辅助焊接技术[M].北京:机械工业出版 社, 1999: 107- 168.
- [7] 梁晓燕,罗金华,杜汉斌,等.基于ANSYS平台焊接模拟 中不同焊接热源的比较[J].电焊机,2003,33(3):29-33.
- [8] 陈家权,肖顺湖,杨新彦,等.焊接过程数值模拟热源模型的研究进展[J].装备制造技术,2005(3):10-15.
- 48 Electric Welding M achine



图 8 热影响区中距熔合线 1 mm 处(节点 2280)的焊接 热循环曲线