

堆焊温度场的三维动态模拟

李冬林 于有生 温家伶 陈明清

(武汉理工大学材料科学与工程学院 武汉 430063)

摘要:对堆焊温度场进行了三维瞬态数值模拟. 利用 ANSYS 软件的 APDL 语言编写程序, 实现在移动热源载荷下的有限元计算. 采用过渡网格划分技术, 减少了有限元模型的节点数、缩短了计算时间.

关键词:温度场; 移动热源; 数值模拟

中图分类号: TG4

焊接温度场的准确计算是焊接冶金分析、焊接应力和变形分析以及焊接质量控制的前提. 由于焊接过程中, 随着热源的移动, 整个焊件的温度均随时间和空间变化; 材料的热物理性能参数随温度变化, 以及焊接过程中存在熔化潜热和相变. 因此, 焊接温度场的问题是典型的非线性瞬态热传导问题. 长期以来, 焊接温度场的模拟研究一直停留在二维水平, 虽然近年来, 随着计算机和有限元技术的发展, 对焊接温度场的三维模拟有过很多研究, 但多数停留在基础性研究阶段. 这主要有以下几方面的原因: (1) 热源的精确定义很困难; (2) 缺乏高温时的热物理性能参数; (3) 三维模型自由度数目庞大, 导致计算时间过长.

文中借助于大型通用的有限元软件 ANSYS, 对平板堆焊时移动热源所形成的温度场进行三维动态模拟, 并采用过渡网格划分技术, 大大减少了节点数、缩短了计算时间.

1 计算模型

1.1 数学模型

焊接温度场满足非线性瞬态热传导微分方程

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q$$

式中: k_x, k_y, k_z 分别为材料沿 x, y, z 方向的热传

导系数; ρ 为材料密度; c 为材料比热容; Q 为内热源; T 为当前温度值; t 为时间. 这些参数中 k_x, k_y, k_z, ρ, c 都随温度变化.

焊接温度场的计算通常用到以下两类边界条件.

1) 已知边界上的热流密度分布

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = q$$

2) 已知边界上物体与周围介质间的热交换

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = h(T_a - T)$$

式中: q 为单位面积上的外部输入热源; h 为表面换热系数; T_a 为周围介质温度; n_x, n_y, n_z 为边界外法线的方向余弦.

1.2 物理模型

模拟计算中采用的试件尺寸为 $320 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 材料为 20 号钢, 电弧中心在 y 轴上移动. 实际模型简图如图 1 所示.

1.2.1 模型假设

- (1) 忽略熔覆金属的填充作用;
- (2) 材料为各向同性.

1.2.2 定义材料属性 定义材料属性时, 给定 20 号钢在 $20 \sim 2500 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内各热物理性能参数随温度的变化值, 并对未知温度范围内的热物理性能参数进行插值. 给定材料的热焓来考虑熔化潜热, 计算相变问题.

收稿日期: 2002-06-20

李冬林, 女, 29 岁, 硕士生, 主要研究领域为材料加工过程的计算机模拟

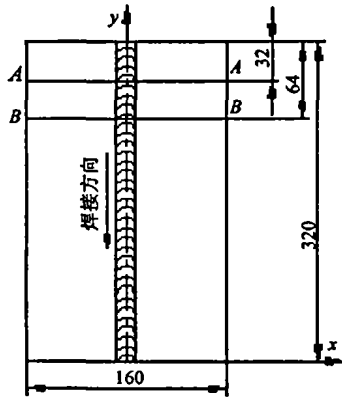


图1 实际模型简图

1.2.3 建立有限元模型 由于试件沿 y 轴左右对称,故取其右半边进行分析.在建立有限元模型时,先建二维几何模型,采用过渡网格划分技术进行划分,使得距焊缝处大约 10 mm 宽的网格比较细密,而远离焊缝处网格稀疏一些,然后用几何变换法由二维模型拉伸成三维模型.有限元网格划分如图 2.

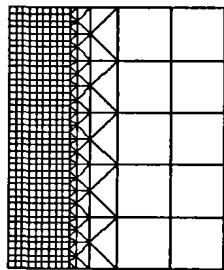


图2 有限元网格

1.2.4 焊接热源的处理与施加 焊接热源按表面移动热源处理,其热流密度的分布近似于高斯函数分布.电弧中心沿 y 轴移动,试件上某点 P 的热流密度 $q(r)$ 为

$$q(r) = \frac{3}{\pi R^2} \eta UI \exp\left(-\frac{3r^2}{\pi R^2}\right)$$

式中: R 为电弧有效加热半径; η 为焊接热效率; U 为电弧电压; I 为焊接电流; r 为 P 点距电弧中心的距离.

当电弧中心位于 y 轴上某点 P 时,选取以 O 点为圆心,电弧有效加热半径 R 为半径的圆面上所有节点,根据给定的焊接参数按高斯函数计算出各节点上的热流密度,并将其施加于所选节点上.当电弧中心移动时,重复上述工作,实现移动热源的施加.文中采用 ANSYS 软件自带的 APDL 语言编写子程序来实现.

1.2.5 边界条件的处理 取对称面为绝热边界条件,其他表面为对流换热表面,初始温度设定为 $20\text{ }^\circ\text{C}$.

2 模拟计算

利用 ANSYS 软件强大的热分析功能,按上述的有限元模型进行了焊接温度场的三维动态数值模拟.在模拟计算时,采用以下焊接参数:焊接热效率 $\eta=0.75$;电弧电压 $U=20\text{ V}$;焊接电流 $I=120\text{ A}$;电弧有效加热半径 $R=7.1\text{ mm}$;焊接速度 $v=5\text{ mm/s}$.整个焊接过程共用 64 s 完成,每 0.32 s 为一个时间步长,并以此时间步长来计算电弧中心移动的步距.由于是非线性问题,设置自动时间步长,以保证求解的稳定性和精确性.并采用 Full Newton-Raphson 方法进行线性搜索,每进行一次平衡迭代,就修正一次刚度矩阵.

3 计算结果及分析

利用 ANSYS 软件生成动画的功能,显示整个焊接过程中温度场的变化状况,能很清楚地发现:随着热源的移动,焊件上各点的温度随时间而变化;开始一段时间内,温度很不稳定,而且焊件升温迅速;经过一段时间后,焊件上会形成准稳定温度场,即焊件上各点的温度虽然随时间变化,但各点以固定的温度跟随热源一起移动.图 3 和图 4 是焊接到中间(即 32 s 时),焊件温度处于准稳定状态时,近缝区温度场的二维分布和三维分布图.由图可知,整个熔池形状类似于不标准的半椭球,熔池中部(即热源中心)温度很高,前部等温线很密集,而后部等温线比较稀疏.

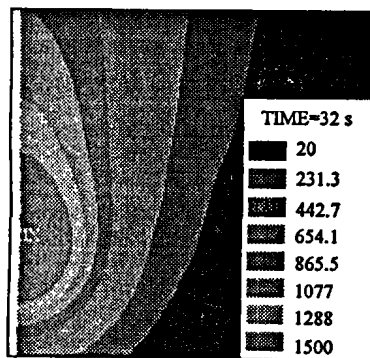


图3 $x-y$ 平面内的温度分布($^\circ\text{C}$)

焊接过程中,各点的温度变化十分不均匀,近焊缝区,温度变化比较快,而远离焊缝区各点温度变化比较慢.图 5 为 $A-A$ 线上,焊缝及近缝区各点在不同时间的温度变化.

$B-B$ 线上,距焊缝不同距离各点的热循环如图 6 所示.该图显示,焊接过程中热源沿焊件移动

时,焊件上某点温度由低而高,达到最高值后,又由高而低,随时间而变化;各点的升温速度均明显地比冷却速度要大;冷却时,各点温度逐渐趋于某一值,即降到焊件的平均温度为止。

4 结束语

- 1) 建立了适当的有限元计算模型,利用过渡网格划分技术得到近焊缝区细密的网格,减少模型的节点数量,大大缩短了计算时间。
- 2) 利用 ANSYS 软件的 APDL 语言编写程序,实现了呈高斯函数分布且移动的焊接热源的施加,这是实现三维动态模拟的关键。
- 3) 模拟温度场所得结果可以作为温度载荷,进一步进行焊接应力和变形的有限元计算,同时也可以在此基础上继续进行焊接热影响区组织转变的研究。

参考文献

- 1 陈楚. 数值分析在焊接中的应用. 上海:上海交通大学出版社,1985. 96~246
- 2 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践. 西安:西北工业大学出版社,1999. 166~178
- 3 张文钺. 焊接传热学. 北京:机械工业出版社,1989. 118~143
- 4 鹿安理,史清宇,赵海燕等. 厚板焊接过程温度场、应力场的三维有限元数值模拟. 中国机械工程, 2001, 12(2):183~186

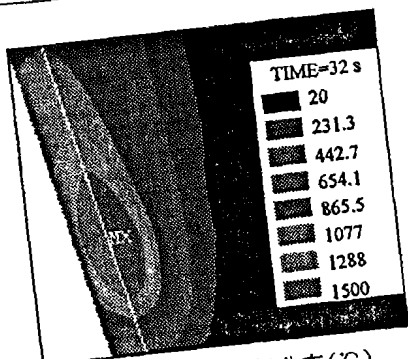


图4 三维温度场分布(°C)

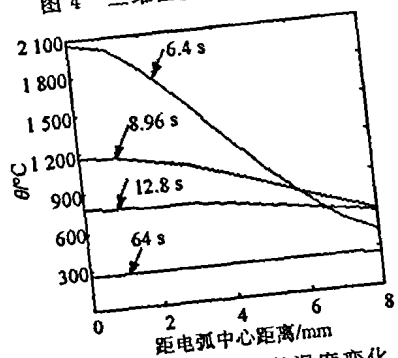


图5 A-A线上各点的温度变化

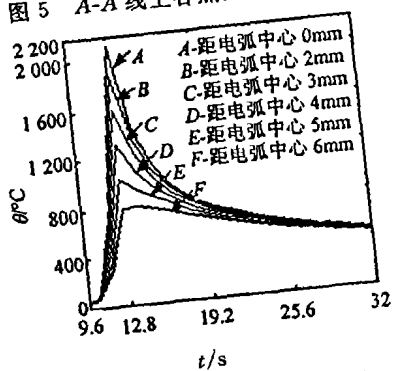


图6 B-B线上各点的热循环

3D Dynamic Simulation on Temperature Field of Surfacing

Li Donglin Yu Yousheng Wen Jialing Chen Mingqing
 (School of Material Science & Engineering, WUT, Wuhan 430063)

Abstract

3D transient temperature field of surfacing is simulated by the method of numerical analysis. Compiling procedure with APDL of ANSYS is to deal with the moving heat source. In order to reduce the amount of model's nodes and shorten the time of computation, the method of transitional mesh division is used.

Key words: temperature field; moving heat source; numerical simulation