考虑金属逐步填充的多道焊温度场数值模拟

孟庆国, 方洪渊, 徐文立, 姬书得 (哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要:采用"单元死活"有限元技术自行编制了控制焊接过程金属填充的子程序,利 用 Marc 有限元软件以低碳钢为例进行了三维多道焊温度场的数值模拟。实现了模拟 过程中焊接材料的逐步填充,温度场计算结果与试验测量值十分吻合。将计算结果与 未考虑材料逐步填充的多道焊计算结果进行了比较。结果表明,是否考虑金属逐步填 充对多道焊计算结果影响很大,在多道焊次数较多时不可忽略。为更准确的多道焊应 力分析打下了基础。

关键词:数值模拟;多层多道焊;温度场

中图分类号: TG44 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2004)05-53-04



孟庆国

0序言

近年来随着计算机性能和有限元技术的发展, 对三维焊接过程数值模拟的研究受到了越来越多焊 接研究人员的注意。如 Carmignani^[1] 作了激光焊接 厚板的数值模拟工作, 斯坦福大学的 Hill Michael R^[2]用数值模拟的方法研究了不同板厚的残余应力 等。在厚板焊接中,考虑到焊接方法熔宽及熔深大 小的局限性, 一般采用多层多道焊的方法, 而多层多 道焊的模拟涉及到金属的逐步填充问题,这在数学 建模上比较难以实现,这种情况下一般采用将模型 简化为二维或者不考虑逐步填充,材料一开始就全 部填入焊道的方法^[3]。这些方法从不同程度上降低 了模拟的精度,都不是太理想。现在有限元计算中 的单元" 死活" 技术提供了解决这种问题的一种方 法,作者利用此方法,在 Marc 软件的基础上开发了 控制金属逐步填充的子程序,在低碳钢上进行了开 Y 形坡口的多层多道焊的温度场模拟。

1 有限元模型的建立

1.1 电弧热输入

目前描述焊接热源的模型大致有四种,其中 Goldak 提出的双椭球形热源⁴¹对于厚板焊接比较适 用,此模型中热流密度沿长轴呈高斯分布,前后两 部分为不同的椭球形热源,这种形式最大程度的模

收稿日期: 2003-11-13

基金项目: 国家 863 计划项目(2002AA305402)

拟了熔池的形状,其形式如图1所示。



图 1 双椭球型热源模型 Fig. 1 Double ellipsoid heat source model

前半部分椭球热源表达式为

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}Qf_{\rm f}}{abc \,\pi \,\sqrt{\pi}} e^{-3(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(z - y \times t)^2}{c_1^2})} \quad , \quad (1)$$

后半部分椭球热源表达式为

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}Qf_{\rm r}}{abc_{2}\pi} e^{-3(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(z - y \times t)^2}{c_2^2})} , \quad (2)$$

式中: $f_{\rm f}$ 和 $f_{\rm r}$ 是热流密度分布系数, $f_{\rm f}+f_{\rm r}=2$; Q为 热源总功率, $Q=\eta W$; η 为焊接热效率。

文中计算时参数取值为 $f_f=0.6, f_r=1.4, \eta=$ 0.7, $c_1=2$ mm, $c_2=6$ mm, a=4 mm, b=3 mm。

1.2 焊丝熔敷速度

多道焊建模时要将填充金属考虑进去,所以要 知道每一层焊道的大小以及体积。这靠焊丝的熔敷 速度来确定。Janez D Sc 通过分析焊丝直径,干伸长 度,电流强度等因素的影响,采用多重回归分别获得 了单丝焊和双丝焊时焊丝熔化速度同焊接参数之间 的数学关系式^[3],其中单丝焊的关系式为

 $M = 0.013 \ 84I = 0.407 + 1.926 \times 10^{-6} \frac{I^2 L}{d^2}, \qquad (3)$ r=0.987 6, S_e=0.406 (直流反接),

 $M = 0.009 \ 38I = 0.234 + 2.019 \times 10^{-6} \frac{I^2 L}{d^2}, \qquad (4)$ r=0.988 9, S_e=0.327 (**直流正接**),

式中: M 是熔化速度 (kg/m); I 是焊接电流; d 是焊 丝直径; L 是焊丝干伸长; R 是多重回归系数; S_e 是 估计误差。

1.3 热物理性能参数的处理

对热物理性能参数建立了分段线性化的"温度 一性能"表供计算程序使用。采用增大热传导系数 的方法来模拟熔池内流体流动的影响。

1.4 多道焊的网格划分

图2为多道焊的物理模型,其中1、2、3为试验 测量温度场时的采集点。表1为温度采集点距离焊 道中心线垂直距离。



图 2 多道焊的物理模型及温度场试验采集点的位置 Fig. 2 Real model of multi-pass welding and position of measuring points in temperature field experiment

表1 温度采集点距离焊道中心线垂直距离

Table 1 Vertical distance from temperature measuring point to bead center line

采集点编号	1	2	3
距离 <i>l/mm</i>	11	16	26

由于该模型是对称的,所以取其一半进行温度 场的计算。在网格划分上采取不均匀的划分方式, 焊道及其附近区域较密,远离焊道处单元按一定比 例增大,如图3所示。





2 金属逐步填充的实现

在模拟中由于要考虑到刚度矩阵的稳定性,所 以填充材料在初始建模时就要出现在焊接构件中, 图 4 为第一焊道填充材料网格划分。



图 4 第一层焊道材料填充 Fig. 4 Material filling of first welding pass

控制金属逐步填充的子程序步骤如下: 首先在 前处理时将这些单元"杀死", Marc 中将单元杀死并 不是真正将这部分单元移走, 而是将它们的热传导 系数变为很小的值, 在保证刚度矩阵稳定的前提下, 将这部分单元的作用减至最小, 这样在实际计算中 就相当于这部分单元不存在。然后在焊接过程中再 根据焊接速度逐步将这部分单元激活。即将它们的 热传导系数恢复原值, 相当于这部分材料被逐步填 充入构件。激活的判断标准是热源的位置, 在 t 时 刻热源的位置为 $v \times t$, 如果单元在焊道方向的坐标 小于 $v \times t$ (即图4 中的M点), 则说明此单元应该已 经被填充入焊道, 所以将它激活。其它单元保持不变。

3 数值模拟与试验结果对比分析

文中采用的焊接方法为 MIG 焊, 焊接规范为: 第一层焊道为打底焊, 电压 20 V, 电流为 65 A, 焊丝 直径为 2.5 mm, 焊接速度为 2.5 mm/s; 第二层电压 为 22 V, 电流为 135 A, 焊丝直径为 4 mm, 焊接速度 为 1.6 mm/s。第一层与第二层间时间间隔为 120 s。 试验采集点分布如图 2 所示, 利用镍铬一镍硅热电 偶来进行温度的测量。图 5 为数值模拟得到的第一 层焊道焊接时板的温度场分布。从图中可以看出, 在热源前端焊道里的材料温度为零, 这是因为这部 分没有填充的材料, 也就没有温度。而热源走过的 部分温度则为正常值, 表示这部分填充了焊道。这 与实际的焊接填充非常吻合。



Fig. 5 Temperature field's distribution of the first welding pass

为了考察材料逐步填充这种更真实的情况对温 度场计算结果的影响,文中作了未考虑材料逐步填 充的比较计算,采用完全一致的物理模型和网格划 分方式。不同之处在与焊道上的单元在计算之前并 没有杀死。图 6 为试验测量的热循环曲线与分别采 用上述两种计算方法得到的结果的对比。在图中 1 增量步=0.5 s。

通过比较可看出,三个采集点由于距焊道距离 的不同到达热循环峰值温度的时间也有差异,在进 行第一道焊接时,第一点在32.5 s时达到峰值,第二 点在43.5 s时达到峰值,第三点在55 s时达到峰 值。与预期的结果一致,在三个采集点处的热循环 曲线,都是考虑焊接材料逐步填充的温度场计算结 果与试验结果的吻合效果比未考虑逐步填充的温度 场吻合效果要好得多,说明了采用这种处理方法的 正确性与必要性。另外未考虑材料逐步填充的计算 温度比考虑后得到的温度普遍偏高,但是在温度较 高的第二道焊时差距却减小了。以上现象的产生作 者分析认为是由于未考虑材料逐步填充时,一次将 材料全部填入焊道,这些材料过早参与热传导,增大 了导热面积,导致热量的传递更容易,所以温度偏 高,但是低碳钢在温度升高到一定程度后热传导系 数减小,所以在温度较高的第二道焊时差距反倒减 小了。由此可推出,当模拟热传导系数随温度升高 而逐渐增大的材料时,焊道越多,构件温度就越高, 温差就会越来越大。所以在进行次数较多的多层多 道焊模拟时,不考虑材料的逐步填充会对结果的准 确性产生很大的影响。



55

5 结 论

(1) 供试的 X65 管线钢试件对接接头焊态的疲劳强度 $\triangle \sigma$ (2×10⁶)为 219 MPa; 母材的疲劳强度 $\triangle \sigma$ (2×10⁶)为 338 MPa; 超声冲击处理后焊接接头的疲劳强度 $\triangle \sigma$ (2×10⁶)为 302 MPa.

(2) 经过超声冲击处理的 X65 钢对接焊接管接 头,其疲劳寿命是原始焊态接头 1.85~11 倍,其疲 劳强度相对原始焊态接头提高 37.9%。

(3)超声冲击处理能使X65钢管对接焊接接头的疲劳性能显著改善,实际操作也进一步说明超声 冲击是一种行之有效且便于操作的理想的焊后改善 焊接接头疲劳性能的措施。

参考文献:

- [1] 霍立兴. 焊接结构的断裂行为及评定[M]. 北京: 机械 工业出版 社, 2000. 154—176.
- [2] 王东坡、张玉凤、霍立兴. 超声冲击处理焊接接头焊趾区材料的 疲劳性能[J].天津大学学报,2001,34(1):13-17.

- [3] Wang Donpo, Huo Lixing, Zhang Yufeng *et al.* Ultrasonic peening method to inprove fatigue strength of welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1999, 20(3); 158-163.
 王东坡,霍立兴,张玉凤,等.提高焊接接头疲劳强度的超声冲击法[J]焊接学报, 1999, 20(3); 158-163.
- [4] Statnikov E S, Muktepavel V O, Troufiakov V J, et al. Comparison of ultrasonic impact treatment and other fatigue life improvement methods
 [J]. Welding in the World, 2002, 46(3/4); 20-32.
- [5] Wang Dongpo Huo Lixing, Zhang Yufeng. Investigation of improving fatigue strength of welded joints on low carbon steel by ultrasonic peening method[J]. Journal of Mechanical Strength, 1999, 21(4): 289-291.
- [6] Huo Lixing Wang Dongpo Zhang Yufeng et al. Investigation on improving fatigue properties of welded joints by ultrasonic peening method[J]. Welding in the World, 2001, 45(3/4): 12-16.
- [7] Janosch J J, Koneczny H, Debiez S, et al. Improvement of fatigue strength in welded joints(in HSS and in aluminum alloys) by ultrasonic hammer peening J]. Welding in the World, 1996, 37(2):72-81.

作者简介: 柳锦铭, 男 1980 年9 月出生, 硕士研究生。主要研究 方向为焊接结构强度及其断裂。发表论文 2 篇。

Email: howysand @eyou.com

[上接第 55 页]

4 结 论

(1)利用自行编制的子程序,成功实现了三维 状态下考虑焊接材料逐步填充的多道焊温度场的数 值模拟。计算结果与试验结果吻合较好。

(2)对于热传导系数随温度升高而升高的材料,不考虑材料逐步填充的计算结果将比考虑逐步填充的计算结果偏高。因此进行焊道层数较多的数值模拟时,必须考虑材料的逐步填充。

参考文献:

 Carmignani C, Mares R, Toselli G. Transient finite element analysis of deep penetration laser welding process in a single pass buttwelded thick steel plate[$J\!]$. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 1999, 179(3) ; $197\!-\!214.$

- [2] Hill Michael R, Nelson Drew V. Determining residual stress through the thickness of a welded plate[A]. American society of mechanical engineers[C]. Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP, 1996. 29–36.
- [3] 李国成,王靖涛,曾 静.大型箱型梁对接焊的三维数值模拟 [J].工业建筑,2002.32(11):61-62.
- [4] John Goldak. A new finite model for welding heat source[J]. Metallurgual Transactions, 1984, 15B(2): 299–305.
- [5] Janez D Sc. Mathematical modeling of melting rate in twin wire welding
 [J] Journal of Materials Processing Technology, 2000 100; 250-256.

作者简介: 孟庆国, 男, 1978 年出生, 博士研究生。主要研究方向 为焊接过程数值模拟, 发表论文 4 篇。

Email: mqg66@0451.com