

低相变点焊条焊接接头残余应力场的数值模拟

冯兆龙,姚润钢,王明林

(洛阳船舶材料研究所,河南 洛阳 471039)

摘要:基于大型有限元软件 ANSYS,分别对低相变点焊条 LTTE(Low Transformation Temperature Electrode)和 E5015 焊条的横向立板角接接头的应力场进行三维数值动态模拟,并将计算控制在可接受的范围内。结果表明,LTTE 焊条的焊缝在焊趾部位产生的是压应力场,而 E5015 焊条的焊缝在焊趾部位产生的是拉应力场,两者形成了鲜明的对比,从理论上证实了 LTTE 焊条在改善焊接接头残余应力场方面的作用。

关键词:ANSYS;LTTE;应力场;焊接接头

中图分类号:TG422.1

文献标识码:A

文章编号:1001-2303(2007)09-0052-04

Numerical simulation of low transformation temperature electrodes' residual stress fields

FENG Zhao-long, YAO Run-gang, WANG Ming-lin

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China)

Abstract: This article analyzes the transverse fillet welded joints' residual stresses welded by LTTE electrodes and E5015 electrodes. The amount of calculation was controlled within the acceptable range. The calculated results show that, the stress fields of beams welded by LTTE electrodes are compressive stresses and beams welded by E5015 electrodes are tensile stresses. The effects of LTTE electrodes in improving welded joints' residual stresses were proved.

Key words: ANSYS; LTTE; stress fields; welded joints

0 前言

焊接是涉及众多学科的复杂物理、化学过程,要得到一个高质量的焊接结构涉及许多方面的知识。因此计算焊接接头的残余应力和热应力非常复杂,而且影响焊接残余应力的因素很多。单纯的实验难以全面了解残余应力分布复杂而多样的特点。测量残余应力的方法主要有盲孔法、X 射线衍射法、磁性测量法等,这些方法需要专门的实验设备,若要了解焊接接头区域的残余应力变化情况,则费时费力。随着计算机技术和有限元方法的快速发展,许多 CAE 软件都能实现对焊接接头的模拟。它们不仅可以节省实验时间,节约研究经费,而且可以了解试件上残余应力的连续分布规律,优化焊接工艺。其中,大型通用软件 ANSYS 具有强大的热、结构耦

合和瞬态、非线性分析能力,使其在焊接模拟技术中具有广阔的前景。利用 ANSYS 软件编制焊接残余应力数值模拟的命令流,可以实现对焊接残余应力的深层次研究。低相变点焊条熔修对焊接接头疲劳强度所具有的良好改善效果已被有关试验证实^[1-2],相关的理论分析还没有做过相应的研究与计算。本研究利用 ANSYS 软件,对 LTTE 焊条焊趾部位的残余应力场进行了模拟,并与 E5015 焊条的焊趾部位残余应力场进行对比,得到了与实验相得益彰的效果,从而为以后优化分析提供了一条可供借鉴的途径。

1 数学模型

在力学模型中,ANSYS 有限元分析基于 von Mises 屈服准则,对于热弹塑性材料模型,应力应变关系表达如下^[3]

$$d\sigma = [D^e][d\varepsilon] - [C^e]dT, \quad (1)$$

式中 $[D^e]$ 为热量刚度矩阵(包括弹性和塑性刚度);

收稿日期:2007-01-08

作者简介:冯兆龙(1981—),男,山东枣庄人,在读硕士,主要从事船体结构钢的设计研究工作。

$[C^h]$ 为比热矩阵; $d\sigma$ 为应力增量; $d\varepsilon$ 为应变增量; dT 为温度增量。

在热学模型中,由任意表面围成的体积在温度场中,温度变化规律可由热流平衡关系式表示

$$-\{(\partial R_x/\partial x)+(\partial R_y/\partial y)+(\partial R_z/\partial z)\}+Q(x,y,z,t)=\rho \gamma C_t \partial T(x,y,z,t)/\partial t, \quad (2)$$

式中 R_x, R_y, R_z 为每单位面积热流动的速度; $T(x, y, z, t)$ 为当前温度; $Q(x, y, z, t)$ 为内部热产生的速度; ρ 为密度; C 为比热; t 为时间。

2 建模

因 LTTE 焊条主要作用是为了改善焊接接头的疲劳性能,而横向立板角接头也是疲劳试验最常用的一种形式,故此次建模采取此种接头形式。

分析对象的尺寸和焊接顺序如图 1 所示,母材采用 Q235 钢。用 ANSYS 建立的 3D 模型如图 2 所示。接头采用 8 节点六面体单元划分网格,最小单元尺寸 1 mm。考虑到焊接热源附近温度梯度相对较大,焊缝及其附近采用细分网格,而在远离焊缝处采用较大的网格,以保证计算的精度和减少网格数量以提高计算速度。

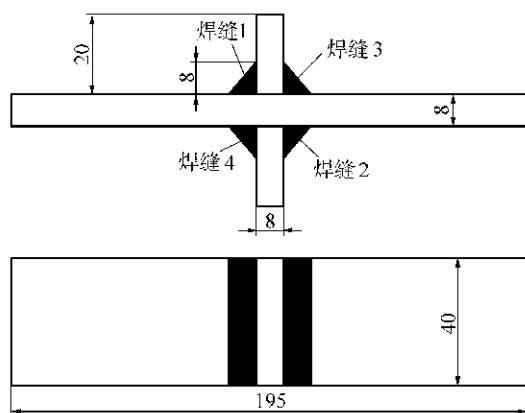


图 1 试样尺寸及接头焊接顺序

3 计算

焊接热源是通过假设焊缝所处单元的内部热生成模拟,内部热生成以热生成强度表示,将有效的焊接热输入量换算成每道焊缝单元在单位体积、单位时间的热生成强度。当所有焊接热能都加到焊缝上后,内部热停止生成。

四道焊缝分属于四个单元,通过 ANSYS 程序进行单元“死”和“活”的选择,即在焊接开始时,第二道、第三道、第四道焊缝单元处于“死”的状态,此时它们对温度场计算不起传热作用,对应力场计算

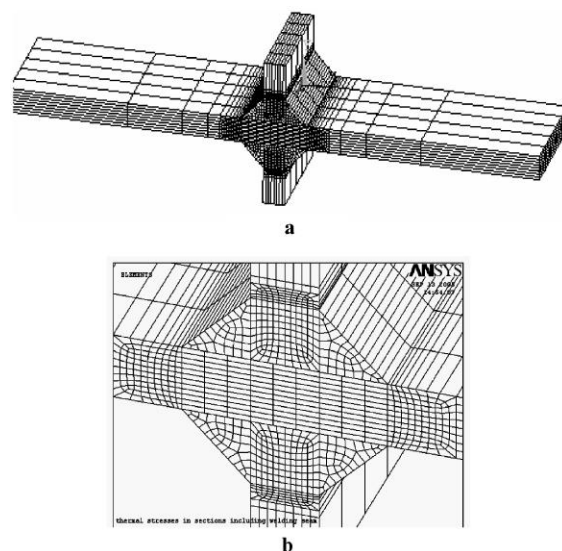


图 2 有限元模型

不承受应力;当第二道焊缝焊接开始时,该层焊缝单元处于“活”状态,对传热和热应力均起作用,而第三道、第四道焊缝单元处于“死”的状态,依此类推,直到第四道焊缝施焊时,全部单元都处于“活”状态。由此可以很好地模拟多道焊缝和热源的移动过程。

3.1 焊接温度场的计算

该计算主要考查 LTTE 焊条与 E5015 焊条残余应力场的对比,而两者的热物性参数又是相同的,因此在计算时将 LTTE 焊条、E5015 焊条产生的焊缝的各种材料参数与母材 Q235 钢的材料参数设置为相同。在温度场计算中,与温度有关的热物性参数(比热、传导率、对流系数)参见文献[4]。将辐射系数叠加到对流系数中来考虑辐射系数。

求解非线性热传导平衡方程时,采用一步欧拉向后时间积分法求解,在每一时间步上使用修正的 Newton-Raphson 迭代法进行热平衡迭代。时间步长主要取决于应力场计算的时间步长。

3.2 焊接应力应变场的计算

先由 ANSYS 将瞬态温度数据按单元结点号码预先存储在温度带上,在随后的热应力计算中从该温度带上读取所有温度数据。与温度有关的材料力学性能参数(屈服强度、屈服后的弹性模量、泊松比)根据文献[4]选择,E5015 焊条的线膨胀系数同样是参考文献[4],而 LTTE 焊条由于是一种新研制的焊条,缺少相应的线膨胀系数,依据文献[1]选择,然后进行计算得到如表 1 所示数据和图 3 所示的曲线。正是由于相变,焊条的线膨胀系数有如图 3 所示的

一个变化趋势,才形成了低相变点焊条改善焊接接头应力场的结果。

表 1 相变焊条的线膨胀系数 $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

温度 $t/^{\circ}\text{C}$	20	100	200	250	350	400	600	800	1200	1500
系数	10	13	1.50	-6.40	-7.71	-3.25	6.17	11.12	16.08	18.07

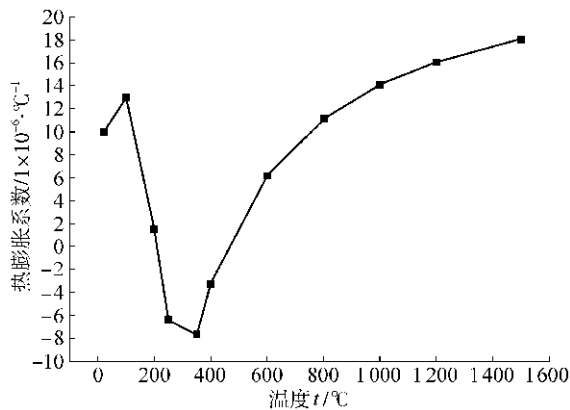


图 3 LTTE 的线膨胀系数

为了满足迭代收敛性与精度,在求解热平衡方程时采用步长的时间积分法,所选择的时间步长在焊接开始和冷却开始时时要小,一般为 0.001~0.050 s,在随后的冷却过程中逐步增大,每步加载平衡迭代步数限制在 300 次以内。

4 结果与讨论

焊趾及其附近沿给定路径等效残余应力的分布情况如图 4 所示。两种接头的等效残余应力分布如图 5~图 8 所示。

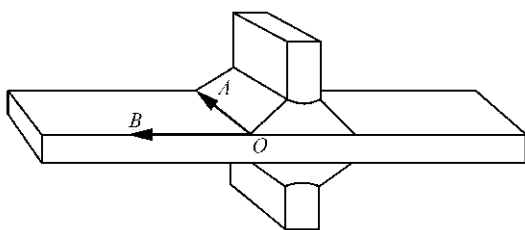


图 4 路径示意

横向应力的分布情况也可以采取同样的方法取得,在这里就不再一一列出。

由图 5~图 8 可知,E5015 焊条焊缝的纵向应力分布趋势与 LTTE 焊条焊缝的纵向应力分布趋势是完全相反的,这说明了 LTTE 焊条焊缝产生了压应力,与 LTTE 焊条的理论依据是完全相同的。3D 计算模型的应力峰值略高于材料的屈服强度,这可能是由于在考虑移动热源焊接时,相邻的焊缝单元是边加热和边冷却,其局部微区的加热膨胀受到周

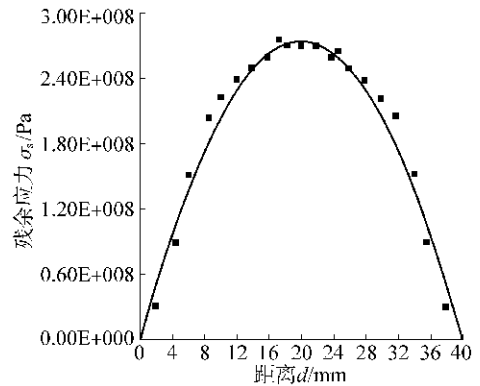


图 5 E5015 纵向应力沿 OA 方向分布

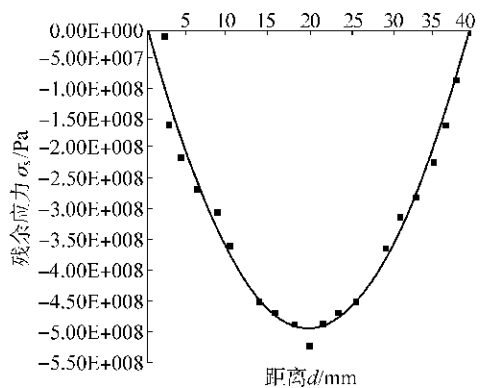


图 6 LTTE 纵向应力沿 OA 方向分布

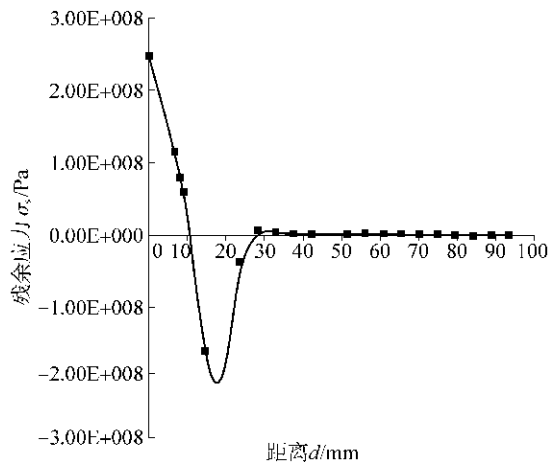


图 7 E5015 纵向应力沿 OB 方向分布

围广大弹性区(包括未熔化金属和已凝固恢复弹性的焊缝区金属)的强烈限制,发生了圈套的压缩塑性变形,在冷却后难以恢复,导致较高的残余应力峰值。但是,由于研究的主要目的是查看残余应力场的总体分布趋势,且 ANSYS 软件是一种近似的数值模拟工具,因此认为这种误差是可以接受的。

在计算焊接残余应力时,有限元网格的数量会影响到温度和应力的计算。一般来说,随着网格数量的增加,有限元计算的精度会提高, Page 61

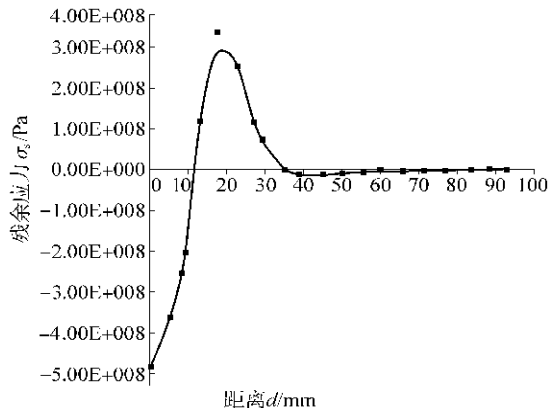


图8 LTTE纵向应力沿OB方向分布

同时计算规模也会增加,反之亦然。因此在计算中要综合考虑两者。计算应力时在应力较集中部位取相对多的网格,其他部位可以考虑适当减少;在热分析中,结构内部的温度梯度不大,不需要大量的内部单元,因此可以划分较少的网格。

计算应力时,当网格数量增加到一定程度,再增加网格数量对计算精度影响将会减小。进行热分析时为了保证计算效率,网格划分相对稀疏,单元尺寸影响相对要小。

5 结论

(1)通过计算方法证实,LTTE 焊条焊接接头的残余应力小于 E5015 焊条焊接的接头,且有残余

压应力存在,这与基本理论相一致,说明 LTTE 焊条对改善焊接接头处的残余应力分布有明显效果。

(2)利用三维移动热源根据实际焊接过程模拟焊接接头的残余应力。计算得到最大残余应力在焊缝焊趾处,即具有最大拘束的地方。E5015 焊条焊接的接头最大等效残余应力为 239 MPa,且为拉应力,LTTE 焊条焊接接头的最大等效残余应力为 301 MPa,且残余压应力也达到了 144 MPa。

(3)在焊接接头最危险点焊趾处,残余应力具有应力峰值,与焊根的应力值大体相当。通过取点拟合的方法得到的横向、纵向应力分布符合焊接接头应力分布的理论。

(4)有限元网格尺寸对应力和温度有一定影响,尤其对应力分布影响较大。但当最小单元尺寸小于 0.5 mm,单元尺寸的影响较小,且对计算速度有比较大的影响。

参考文献:

- [1] 王文先,霍立兴.相变应力及其改善焊接接头的疲劳强度[J].机械工程学报,2002,38(10):65-68.
- [2] 冯兆龙,霍立兴.利用低相变点焊条熔修方法改善焊接接头疲劳强度的试验[J].焊接学报,2006,27(2):11-14.
- [3] 商广泰,蒋凤昌.钢结构焊接残余应力的 ANSYS 分析[J].广东建材,2005(2):54-55.
- [4] 龚曙光,谢桂兰.ANSYS 操作命令与化编程[M].北京:机械工业出版社,2004:202-412.