

# 基于有限元的多次补焊焊接残余应力的数值模拟

朱援祥, 张小飞, 杨 兵, 李晓梅

(武汉大学 动力与机械学院, 武汉 430072)

**摘 要:** 应用有限元方法建立了补焊温度场的数学模型, 并对温度场进行一定的简化。焊接应力分为热应力和组织应力两部分, 分别给出了热应力和组织应力的计算模型。利用 ANSYS 有限元软件以 BHW35 钢补焊为例进行数值模拟, 给出了有限元的实现过程。并分别给出了一次、三次、五次补焊的模拟结果。并将计算模拟值与实际测量数值比较。计算结果和实际测量数值基本吻合。并根据应力分布情况, 得到一些结论, 焊缝中心的残余应力变化不大; 热影响区存在较高的残余拉应力, 且同一位置, 随修复次数的增加, 应力值逐步提高; 残余拉应力区宽度变大。文中还给出了焊后热处理后的应力大小情况, 以证明焊后热处理能改善应力分布。

**关键词:** 焊接残余应力; 温度场; 数值模拟; 有限元

**中图分类号:** TG404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2002)01-65-04



朱援祥

## 0 序 言

由于焊接结构本身的特点, 一些焊件结构在制造和安装过程中不可避免地产生了许多焊接缺陷。并且, 这些部件往往在恶劣环境下运行, 在原有缺陷发展的同时, 又可能产生不少新的缺陷, 缺陷越多, 返修率也越高。对于十分严重的缺陷立即进行现场挖补修复。局部补焊时, 焊接残余应力的问题将是较为突出的, 而焊接残余应力的存在又往往是接头产生裂纹的重要原因, 它将严重降低结构的强度、疲劳寿命, 并加速裂纹的扩展破坏。因此, 为了进一步提高补焊修复的成功率, 更好地控制补焊接头的性能, 切实保证补焊部件的安全使用, 对补焊时接头残余应力的数值模拟是非常必要的。对于焊接应力的数值模拟, 在国内起步于 80 年代, 如文献[1]中给出了白口铸铁焊补应力场的数值模拟的情况; 文献[2]中给出了锤击消除焊接接头残余应力的数值模拟。本文采用有限元法模拟补焊过程, 分析补焊接头的温度场变化, 数值模拟补焊的焊接残余应力分布, 为制订正确的补焊工艺、改善接头的性能提供理论依据。

## 1 有限元法模型的建立

有限元方法是对连续物体进行离散化成有限个单元而进行的数值计算。焊接时所用的热源大多是

移动热源。在热源移动时, 整个焊件的温度、应力应变随时间和空间急剧变化, 并且同时存在着加热和冷却等现象。在不同的时刻和位置, 温度和应力应变的分布极不均匀, 如采用均匀网格, 势必引起计算时间的增长或存储空间浪费。本文的处理方法是, 在焊缝及其附近的部位用加密的网格。对所建立的模型进行有限元计算可分为三个方面, 确定材料的热物理参数、落实边界条件及区域离散化。本文假定所采用的材料是各向同性且均匀的, 其热物理参数随温度而变化(如表 1 所示)。

## 2 焊接应力的计算

焊接应力包含热应力和组织应力(相变应力), 它们的计算都与温度场有关。

### 2.1 温度场的计算

焊接热过程贯穿整个焊接过程的始终, 可以说, 焊接物理化学过程都是在热过程中发生和发展的。准确地了解焊接热过程是进行焊接冶金分析、焊接应力分析和对焊接过程进行控制的前提。

对于三维的瞬态温度场, 其场变量  $\Phi(x, y, z, t)$  在直角坐标中应满足的微分方程是

$$\rho c \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) - Q = 0,$$

边界条件是

$$\Phi = \bar{\Phi}, \quad (\text{在 } \Gamma_1 \text{ 边界上});$$

$$k_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial \Phi}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} n_z = q, \quad (\text{在 } \Gamma_2 \text{ 边界上});$$

$$k_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial \Phi}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} n_z = h(\Phi_a - \Phi), \quad (\text{在 } \Gamma_3 \text{ 边界上});$$

式中:  $\rho$  为材料密度;  $c$  为材料比热;  $t$  为时间;  $k_x, k_y, k_z$  分别为材料沿  $x, y, z$  方向的热传导系数;  $Q = Q(x, y, z)$  为物体内部的热源密度;  $n_x, n_y, n_z$  为边界外法线的方向余弦;  $\overline{\Phi} = \overline{\Phi}(\Gamma, t)$  为  $\Gamma_1$  边界上的给定的温度;  $q = q(\Gamma, t)$  为  $\Gamma_2$  边界上的给定的热流量;  $h$  为放热系数。

$\Phi_a = \Phi_a(\Gamma, t)$  在自然对流条件下,  $\Phi_a$  是外界环境温度, 在强迫对流条件下,  $\Phi_a$  是边界层的绝热壁温度。

边界应满足  $\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 = \Gamma$ ,

式中:  $\Gamma_1$  为边界上给定温度  $\overline{\Phi}(\Gamma, t)$ , 称为第一类边界条件, 它是强制边界条件;  $\Gamma_2$  为边界给定热流量  $q(\Gamma, t)$ , 称为第二类边界条件, 当  $q=0$  时是绝热边界条件;  $\Gamma_3$  为边界给定对流换热的条件, 称为第三类边界条件。

焊接瞬态应力和残余应力属于三维热弹塑性问题。本文中为进行多道焊对接焊缝, 综合而言在厚度方向温度变化不大。所以假设在厚度方向温度变化为 0, 即温度场为

$$\rho c \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) - Q = 0.$$

这样把三维问题转化为二维问题。式中考虑到高温塑性、相变, 材料热物理性能、力学性能随温度变化等因素的影响。

一般都将电弧看成辐射状对称并呈高斯分布的二维热流作用于工件表面。设电弧随  $x$  轴运动, 则热输入的高斯分布为

$$q(x, y) = q_0 e^{-\frac{3r^2}{r_b^2}} = 3 \frac{\eta UI}{\pi r_b^2} \exp \left\{ -\frac{3[(x-vt-x_0)^2 + y^2]}{r_b^2} \right\},$$

式中:  $U, I, v$  分别为电弧电压、电流和电弧移动速度;  $r, \eta$  分别为点  $(x, y)$  到电弧中心的距离和电弧热效率系数;  $r_b$  为电弧的有效加热半径 (95% 的热流分布在此范围内)。

2.2 热应力的计算

微小变形对可按照有限元单元体和位移  $\{S\}$ , 用位移函数  $[A]$  和节点位移  $\{S_n\}$  的形式来表达, 即  $\{S\} = [A] \{S_n\}$ 。

因此单元体内应变  $\{\epsilon\}$ , 根据上式微分得到

$$\{\epsilon\} = [b] \{S_n\},$$

式中:  $[b]$  为几何矩阵。

当物体温度变化时, 考虑力学性能与温度有关, 应力和应变增量关系一般可表示为

$$\{d\sigma\} = [D] \{d\epsilon\} + \{C\} dT,$$

式中: 弹性区  $[D] = [D^e], \{C\} = \{C^e\}$ ; 塑性区  $[D] = [D^p], \{C\} = \{C^p\}$ ;  $[D^e]$  为弹性矩阵;  $[D^p]$  为塑性矩阵;  $\{C\}$  为与材料性能有关的向量;  $dT$  为温度增量;  $d\sigma$  为应力增量;  $\epsilon$  为应变。

计算  $t$  时刻的有限元温度和应力, 从而求出这种状态下的刚度矩阵、时间增量  $dt$ , 使之温度变化  $T + dT$ , 就可计算出材料力学性能  $[D]$  和  $[C]$  的变化<sup>[3]</sup>。

2.3 组织应力的计算

组织应力又称相变应力。由于相变而导致的變化有潜热、线膨胀系数、弹性模量、屈服应力和应变硬化系数的变化等。弹性模量的变化、屈服应力的变化和应变硬化系数等力学性能的变化虽然对温度曲线有一定的影响, 但与相变的体积膨胀相比对残余应力的影响较小<sup>[4]</sup>。线膨胀系数是表征相变温度内相变量。通过线膨胀系数的变化可以计算出体积的膨胀。

线膨胀系数的变化为

$$\xi_i = \xi_{0i} \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{fi}}{T_{si} - T_{fi}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (T_{fi} < T < T_{si});$$

式中:  $\xi_i$  为相  $i$  的体积百分比;  $\xi_{0i}$  为转变结束时, 相  $i$  的体积百分比;  $i$  为转变相的名称;  $T$  为温度;  $T_{si}$  为相  $i$  开始转变的温度;  $T_{fi}$  为相  $i$  转变结束温度。

相变问题需要考虑潜热, 即在相变过程吸收或释放的能量。通过定义材料的焓  $H$  随温度变化来考虑潜热, 即

$$H = \int \rho c(T) dT,$$

式中:  $\rho$  为密度;  $c(T)$  为比热函数。

3 实 现

本文利用 ANSYS 有限元软件 (ANSYS 软件强大的功能之一就是分析相变问题) 来实现。本文采取间接法, 首先进行热分析, 然后将求出的节点温度作为体载施加在结构应力中。具体实现过程为, 首先进行热分析, 可以使用热分析的所有功能进行热分析, 但要注意划分单元要充分考虑结构的要求, 如在可能应力集中的地方要求网格密一点、热分析求解、显示温度分布。重新进入前处理中, 将热单元转换为相应的结构单元; 设置结构分析中材料属性如弹性模量、泊松比、热膨胀系数以及前处理细节如约束方程等; 读入热分析的节点温度; 设置参考温度; 结构分析求解; 显示等效应力。

4 计算实例

本文采用电站汽包常用钢 BHW35, 模拟现场局部补焊的情况, 在周边固定的拘束条件下对其进行多次挖补。此后采用盲孔法对各补焊试板进行了焊

接应力的测试。试验材料的热物理性能如表 1 所示, 材料力学性能如表 2 所示。用 18 块 BHW35 钢分成 3 组, 分别进行一次、三次和五次补焊的模拟。每一组模拟后, 冷却到常温再测量每组的残余应力。

表 1 试验材料的热物理性能

Table 1 Thermal physical properties of experimental material

Temperature $T/^\circ\text{C}$	20	100	200	300	400	500
Density $d/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	7.85	7.82	7.79	7.76	7.72	7.69
Specific heat at constant pressure $c_p/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.47	0.48	0.50	0.52	0.53	0.55
Thermal conductivity $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	37	39	39	38	37	35
Linear expansion factor $\alpha/(10^{-6}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	12.0	12.2	12.8	13.4	13.9	14.3
Elastic modulus $E/(10^5\text{ MPa})$	2.11	2.07	2.00	1.92	1.83	1.73
Resistivity $\rho/(\Omega\cdot\text{mm}^2\cdot\text{m}^{-1})$	0.28	0.33	0.40	0.47	0.59	0.71

表 2 试验材料的力学性能

Table 2 Mechanical properties of experimental material

Temperature $T/^\circ\text{C}$	Yield strength $\sigma_s/\text{MPa}$	Tensile strength $\sigma_b/\text{MPa}$	Elongation $\delta(\%)$	Impact energy $A_{\text{K6}}/\text{J}$
25	450	556	25%	1 774.19
350	420	565	30%	219

补焊坡口。本文采用机械的方法, 严格控制加工精度, 将原始焊缝金属挖去, 得到如图 1 所示的补焊坡口。

补焊工艺。焊前预热  $150\sim 200^\circ\text{C}$ , 打底焊使用结 607 焊条( $\phi 3.2\text{ mm}$ ), 焊接电流  $I=100\text{ A}$ , 焊接电压  $U=24\text{ V}$ , 焊接速度  $v=73\text{ mm/min}$ ; 中间层及盖面使用结 607 焊条( $\phi 4.0\text{ mm}$ ), 焊接电流  $I=170\text{ A}$ , 焊接电压  $U=28\text{ V}$ , 焊接速度  $v=138\text{ mm/min}$ 。

焊后热处理工艺。石棉保温消氢处理后, 进行

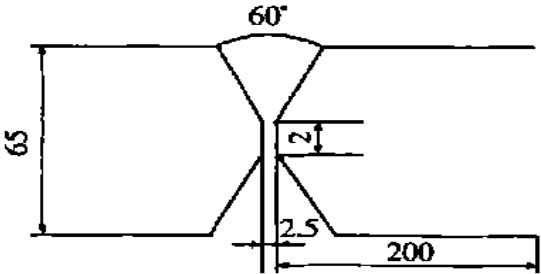


图 1 坡口图  
Fig. 1 Groove face

高温退火。试验结果: 本文应用电阻应变仪, 严格遵照盲孔法的操作要求, 对焊后各试板直接进行了残余应力的测量, 测量结果如表 3、4 所示。

根据 ANSYS 有限元软件的计算值在图 2、3 中显示, 并将测量值和计算值进行对比。计算数值基本上与测量数值吻合。焊后进行 PWTH (高温回火) 焊接应力状况将大大改善。PWTH 后应力状态如表 5 所示。

表 3 多次补焊时纵向残余应力  $\sigma_x$  的分布情况

Table 3 Longitudinal residual stress after multi-repaired weld

Distance from weld center $l/\text{mm}$	0	22	30	45	60	70	90	120
$\sigma_x$ after 1st repaired—weld	588.07	162.99	101.44	58.83	-117.5	-26.3	-10.4	-25.4
$\sigma_x$ after 3rd repaired—weld	573.82	308.87	169.68	98.45	-25.41	-46.3	-116.2	-34.5
$\sigma_x$ after 5th repaired—weld	524.27	465.41	396.58	215.36	56.26	-210.2	-85.46	-25.3

表 4 多次补焊时横向残余应力  $\sigma_y$  的分布情况

Table 4 Cross residual stress after multi-repaired weld

Distance from weld center $l/\text{mm}$	0	22	30	45	60	70	90	120
$\sigma_y$ after 1st repaired—weld	465.9	251.0	-545.74	-255.7	-228.13	-66.69	-21.04	-6.32
$\sigma_y$ after 3rd repaired—weld	452.65	290.3	-380.46	-440.2	-416.28	-297.61	-118.2	-23.67
$\sigma_y$ after 5th repaired—weld	441.24	322.12	550.14	-645.9	-427.92	-86.61	-27.47	-10.34

5 分析和讨论

根据上面的试验结果, 补焊接头残余应力变化情况主要表现在以下几个方面。

表 5 补焊五次后的试板经高温回火后残余应力的分布情况  
Table 5 Weld residual stress by PWT after the fifth repaired weld

Distance from weld center $l$ /mm	0	22	30	45	60	70	90	120
Longitudinal residual stress $\sigma_x$ /MPa	-6.9	-36.4	56.89	-11.93	12.73	-22.8	44.44	12.46
Cross residual stress $\sigma_y$ /MPa	7.03	-94.9	63.54	-19.36	-57.24	-122.4	-22.19	6.64

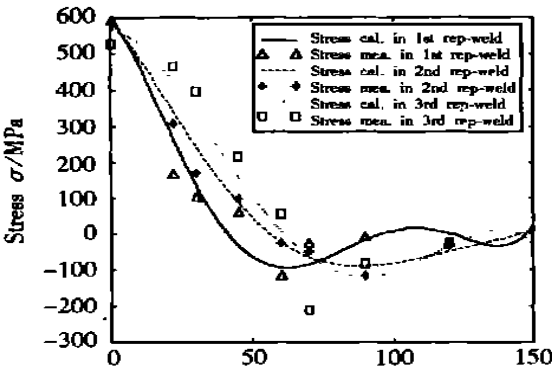


图 2 纵向残余应力计算值和测量数值对比  
Fig. 2 Analysis of longitudinal stress calculated and measured

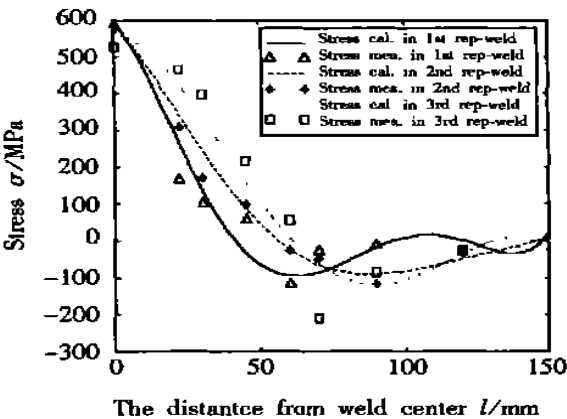


图 3 横向残余应力计算值和测量数值对比  
Fig. 3 Analysis of cross stress calculated and measured

应力分布特点的变化。由图 2、3 中应力的分布特点可以看出补焊一次、三次、五次后试板接头中残余应力的分布特点并没有发生明显改变, 均与拘束条件下平板对接接头中残余应力的分布特点一致。即焊缝及附近区域存在着拉应力; 距焊缝中心距离的增大, 逐渐变为压应力; 至板边则应力为零。

焊缝中心残余应力的变化。因为, 焊缝金属每一次补焊都是新填充的, 且试板的拘束条件在多次补焊过程中并未发生变化; 因此, 按照一般焊接理论, 焊缝中心的残余应力变化不大。

热影响区残余应力的变化。由图 2、3 还可以看出, 焊缝附近的热影响区存在较高的残余拉应力, 且同一位置, 随修复次数的增加, 应力值逐步提高, 尤其是纵向应力的增加趋势更加显著。由此可看出,

随补焊次数的增加, 接头热影响区的残余应力应是逐步提高。

残余拉应力区宽度的变化。图 2、3 还显示出, 随修复次数的增加, 无论是纵向残余应力  $\sigma_x$  还是横向残余应力  $\sigma_y$ , 其拉应力区都是逐步加宽的。这可能是由于接头热影响区随修复次数增加而变宽以及压缩塑性变形在焊接区域逐步积累造成。

由表 5 可以看出, 焊后热处理可以很好改善应力分布状况。

6 结 论

(1)文中应用有限元方法建立了补焊温度场的数学模型, 并对温度场进行一定的简化。焊接应力分为热应力和组织应力两部分, 分别给出了热应力和组织应力的计算模型。

(2)利用 ANSYS 有限元软件以 BHW35 钢补焊为例进行数值模拟, 给出了有限元的实现过程。分别给出了一次、三次、五次补焊的模拟结果。并将计算模拟值与实际测量数值比较。计算结果和实际测量数值基本吻合。并根据应力分布情况, 得到一些结论, 焊缝中心的残余应力变化不大; 热影响区存在较高的残余拉应力, 且同一位置, 随修复次数的增加, 应力值逐步提高; 残余拉应力区宽度变大。文中还给出了焊后热处理后的应力大小情况, 以证明焊后热处理能改善应力分布。

参考文献:

[ 1 ] 王新洪, 曲仕尧, 邹增大. 白口铸铁焊补应力场的数值模拟[ J ]. 山东工业大学学报 1998, 28(4): 301 ~ 306.  
[ 2 ] 邹增大, 王新洪, 曲仕尧. 锤击消除焊接接头残余应力的数值模拟[ J ]. 中国机械工程, 1999, 10(4): 466 ~ 468.  
[ 3 ] 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. 140 ~ 150  
[ 4 ] 陈 楚, 张月娥. 焊接热模拟技术[ M ]. 北京: 机械工业出版社, 1985.

作者简介: 朱援祥, 男, 1963 年出生, 副教授。主要研究方向为计算机在材料加工工程中的应用, 发表论文 20 篇。

Email: zhuayanxiang@ctgpc.com.cn (编辑: 董卫国)