

超临界锅炉机组过热器用 Super304H 钢管道 TIG 焊接有限元分析

周兴美¹, 陈南², 蒋渝¹

(1. 四川大学材料科学与工程学院, 四川成都 610065; 2. 伊顿(中国)投资有限公司成都办事处, 四川成都 610016)

摘要: 基于 ANSYS 软件平台, 建立了 Super304H 钢管道 TIG 焊接的有限元数值分析模型。采用单元生死的热源模式进行加载, 获得了焊接温度场分布规律。利用温度-应力间接耦合的方法计算了焊接残余应力场。结果表明: 在焊缝及附近区域, 管道外表面的环向和轴向残余应力均为压应力, 管道内表面为较大的残余拉应力。在焊趾处, 管道内表面的环向残余应力最大值约 260 MPa, 轴向残余最大值约 230 MPa。

关键词: Super304H 钢管; 数值模拟; 温度场; 残余应力

中图分类号: TG404

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2010)09-0131-04

Finite Element Analysis of TIG Welding for Super304H Steel Pipe Based on ANSYS

ZHOU Xingmei¹, CHEN Nan², JIANG Yu¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. Eaton (China) Investment Co., Ltd., Chengdu 610016, China)

Abstract: Based on ANSYS software, FEM analysis model for TIG welding of Super304H steel pipe was established. The method of element birth and death was applied to simulate the model of loading welding heat source. The distribution regulation of temperature field was obtained. With the method of thermal-structure indirect coupling, the residual stress field was calculated. The results show that the residual stress of the outer wall is compression stress and the residual stress of the inner wall is tensile stress near the weld. The maximum hoop residual stress of the inner wall is 260 MPa and the axial residual stress is 230 MPa in the weld toe.

Key words: Super304H steel pipe; numerical simulation; temperature field; residual stress

Super304H 是新开发出的一种经济型的 18-8 型奥氏体不锈钢。该种钢有优越的高温蠕变强度, 良好的抗高温腐蚀性能及良好的焊接性能, 被广泛应用于超临界锅炉机组的过热器、再热器等高温部位^[1]。由于在焊接过程中局部快速加热, 致使焊后结构件常常会出现较大的残余应力。残余应力的存在, 在一定条件下会影响管道的强度、刚度及其使用寿命。甚至会导致管道的应力腐蚀开裂及早期疲劳失效等事故发生, 从而给生产及人生安全带来危害^[2]。本文结合 TIG 焊接的实际过程, 建立了计算模型, 基于 ANSYS 有限元分析软件平台, 对 Super304H 钢管焊

接过程的温度场和残余应力场进行了数值模拟。

1 钢管对接焊有限元模型的建立

本文研究对象是超临界锅炉机组过热器用 Super304H 钢管道对接焊, 规格为: $\phi 51 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 单面带钝边 V 型坡口, 坡口角度为 60° , 钝边为 1 mm。焊接方法为 TIG 焊接, 焊接电流 120 A, 电压 16 V, 焊丝直径 2.4 mm, 焊速 90~180 mm/min。

焊接温度场分析属于典型的非线性瞬态热传导问题。对于任何一种固体材料, 假定其求解域为 $V \in R^3$, 则 V 内任何一点的瞬态温度 $T(x, y, z, t)$ 应满足以下微分控制方程^[2-3]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \bar{Q} \quad (t \geq 0) \quad (1)$$

式中: $Q(x, y, z, t)$ 为求解域 V 中的内热源强度 (W); ρ 为材料密度 (kg/m^3); c 为材料比热 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$); λ 为

收稿日期: 2009-08-03

基金项目: 国家质量监督检验检疫总局 2008 科技计划项目 (2008IK072)

作者简介: 周兴美 (1984-), 女, 重庆荣昌人, 在读硕士, 主要从事焊接方面的研究; 电话: 13402837496; E-mail: zxm936@126.com

通讯作者: 蒋渝 (1972-), 男, 副教授, 主要从事纳米材料制备、失效分析等方面研究; E-mail: jycn@sina.com

材料热导率(m^2/s); T 为温度(K)。建立管道的有限元模型采用三维热实体单元 Solid70^[4]。在进行结构分析时,该单元可被 1 个等效的结构单元(solid45)代替。由于焊接热源附近温度梯度大,为了保证计算精度,在焊缝及附近采用细分的网格,而在远离焊缝处网格较粗。考虑管道结构的对称性采用 1/2 模型,其实体模型和有限元模型分别如图 1、图 2 所示。

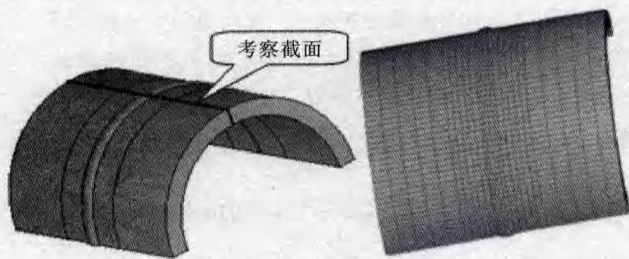


图 1 管道模型 Fig.1 The pipe model 图 2 有限元模型 Fig.2 Finite-element model

随温度变化的 Super304H 钢的热物理性能参数见表 1。

表 1 Super304H 物理性能
Tab.1 Super304H physical property^[4]

性能	室温	100℃	300℃	500℃	600℃	700℃	800℃
导热系数 / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	14.5	16.2	21.5	25.2	28.6	31.0	31.0
比热 / ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.454	0.511	0.618	0.658	0.716	0.733	0.707
密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94

材料性能依赖于温度的应力-应变本构方程^[5]:

$$d\{\sigma\} = [D]\{d\varepsilon\} - \{C\}dT \quad (2)$$

式中: $[D]$ 为弹性矩阵; $\{C\}$ 与温度有关。根据结构弹性力学有限元法,可获得单元节点位移代数方程组:

$$\{dR\}^e = [K]^e \{d\delta\}^e \quad (3)$$

式中: $\{dR\}^e = \int_{\Delta V} [B]^T \{C\} dT dV$; $[K]^e = \int_{\Delta V} [B]^T [D] [B] dV$;

$\{dR\}^e$ 为由温度引起的单元初应变等效节点力增量, $\{d\delta\}^e$ 为单元节点位移增量。求解过程为:将温度场分析得到的单元节点温度作为结构分析的载荷,逐步加载到 solid45 单元组成的焊接有限元结构中,由有限元方程(3)得到 solid45 单元各节点的位移增量 $\{d\delta\}^e$,代入式(1)、(2),则可求得各单元的应力增量 $d\sigma$,便可以求出单元的节点应力^[6]。

2 焊接温度场的计算及分析

定义热边界条件:将模型的对称面定义为绝热边界条件,即 $\partial T / \partial n = 0$ 。

焊接过程中,工件表面与周围环境存在大的温差,工件的散热形式主要为对流和辐射,故定义管道

表面换热边界条件:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T_a - T_s)^{[4]} \quad (4)$$

式中: n 是边界表面法线方向; α 是表面换热系数(包括辐射换热和对流换热); T_a 是周围介质温度; T_s 是物体表面温度。其中换热系数 α 随温度变化而改变,在 ANSYS 中,通过命令 *dim, conve, table,,, temp 来定义随温度变化的换热系数。命令 sfa, all, 1, conv, %conve%, T 来实现在模型表面加载。

热源加载:本研究对象为开坡口焊缝,焊缝处的单元在焊接开始时候尚不存在,而是随焊接材料的填充才不断产生的。焊接热源采用焊缝单元内部生热和单元生死方法。在开始计算前,将焊缝单元杀死相当于焊前的状态。温度场计算时,按顺序激活被“杀死”的单元,模拟焊缝金属的填充^[7-8]。同时给激活的单元施加生热率(HGEN),加载时间等于实际焊接时间。ANSYS 软件中,“杀死”有限元模型中的单元,只是将其热传导矩阵乘以一个很小的因子(如 10^{-6}),死单元的热载荷、质量和比热容设为零^[9-10]。利用 ANSYS 的 APDL 语言编程实现循环计算,得到各个时刻的焊接温度场分布,作为后面应力计算的载荷条件。生热率计算公式为:

$$HGEN = Q / (A_{\text{weld}} \times v \times d_t) \quad (5)$$

式中: $HGEN$ 为每个载荷步施加的生热率(W/m^3); Q 为热源热量, $Q = \eta UI$, 其中 η 为电弧热效率,本文取为 0.75; A_{weld} 为焊缝的横截面积(m^2); v 为焊接速度(m/s); d_t 为每个载荷步的时间步长(s)。

图 3 为焊接速度为 $2 \text{ mm}/\text{s}$ 时管道焊接及其冷却过程中不同时刻的温度场的分布。可看出,在 $t =$

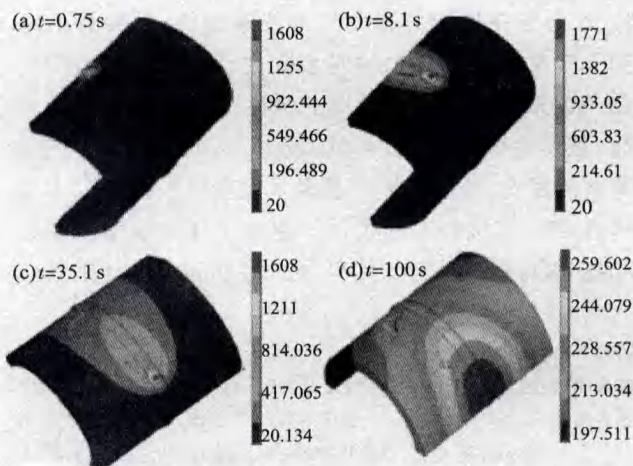


图 3 不同时刻的温度分布
Fig.3 Distribution of temperature field at different time

0.75 s 时的焊接初始阶段,温度不稳定,始焊部位迅速升温, $T_{\max}=1600^{\circ}\text{C}$,超过了 Super304H 的熔点;在 $t=8.1\text{ s}$ 时,焊接热源沿焊缝方向移动了一段距离,且 $T_{\max}=1771^{\circ}\text{C}$; $t=35.1\text{ s}$ 时, $T_{\max}=1800^{\circ}\text{C}$ 。随着焊接进行,最高温度部分随着焊接热源沿焊接方向前进,焊件上形成准稳态温度场,等温线分布形状基本一致。因此,通过控制焊缝单元的生死可以较好地模拟焊缝形成过程和热源施加过程。

图 4 为焊接速度为 2 mm/s 时的焊接过程中,考察截面上距离焊缝中心线不同距离处各点的热循环曲线。由图可知,焊接过程中,焊缝中心温度最高, $T_{\max}=1800^{\circ}\text{C}$,随着距焊缝中心距离增大,各点的温度逐渐降低,在距焊缝中心 9 mm 处温度降到约 450°C 。而且焊缝中心及近焊缝区域的节点,温度变化较快,而远离焊缝区域的节点温度变化较慢。各点温度变化趋势相同,都是先由室温迅速升高到最大值后缓慢冷却到焊件本体的温度。

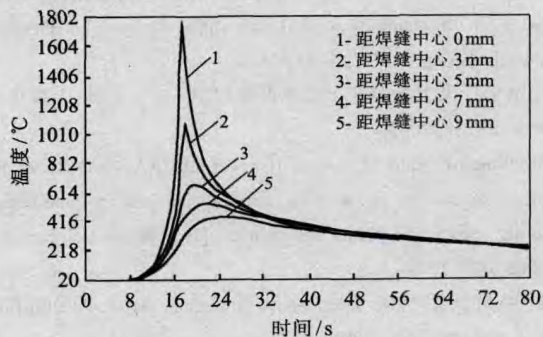


图 4 焊缝中心及附近各点的热循环
Fig.4 Heat cycle curves of different points away from weld center

图 5 为不同焊接速度下温度场进入准稳态时,考察截面上垂直于焊缝方向的同一路径的温度分布

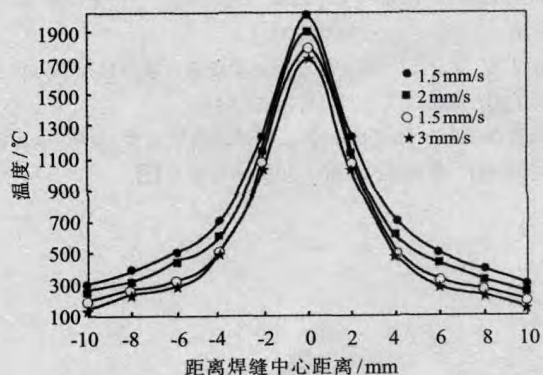


图 5 不同焊接速度下垂直于焊缝方向的温度
Fig.5 Distribution of temperature of direction perpendicular to the weld

布。可看出,其他条件一定的情况下,在四种焊接速度中,焊接速度为 1.6 mm/s 时,焊缝中心温度为 1950°C ,焊接热影响区宽度最大;焊接速度为 3 mm/s 时,焊缝中心温度为 1700°C ,焊接热影响区宽度最小;其余两种居中。鉴于奥氏体不锈钢 Super304H 的导热性差且熔点较高,采用 TIG 焊接时,在综合考虑热影响区宽度和焊透的情况下,尽量采用较小的焊接速度,本研究采用焊速为 2 mm/s。

3 焊接应力场的计算及分析

在应力场分析中,定义随温度变化的材料力学性能参数,将热分析单元转化为结构分析单元。为了防止刚性位移,对管道模型施加适当的结构约束,在纵向截面上施加约束,接头在轴向可以自由收缩。读入焊接速度为 2 mm/s 的温度场计算结果,进行温度-应力耦合分析。计算得到等效残余应力分布云图如图 6 所示;按路径读取考察截面管道一端内、外表面的环向和轴向残余应力数据并绘图,得到管道外、内表面环向和轴向残余应力沿轴向距焊缝中心距离的分布规律,如图 7、图 8 所示。

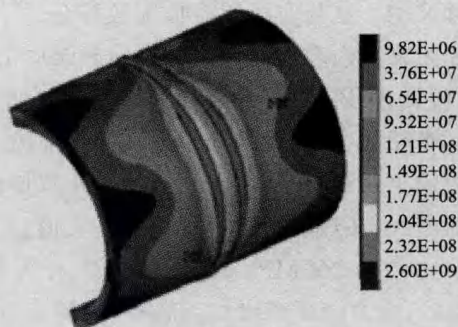


图 6 等效残余应力分布云图(MPa)
Fig.6 Distribution of equivalent residual stress (MPa)

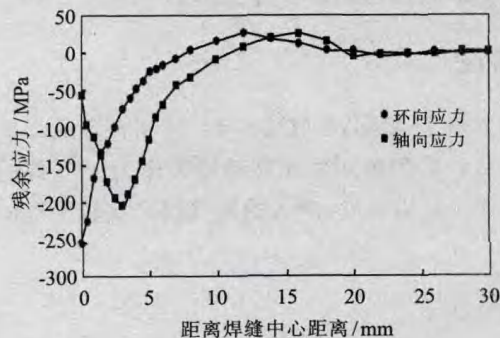


图 7 外表面焊接残余应力分布
Fig.7 Distribution of residual stress of pipe outer wall

图 7 为管道外表面的环向和轴向残余应力分布曲线图。可见,管道外表面的环向应力和轴向应力分

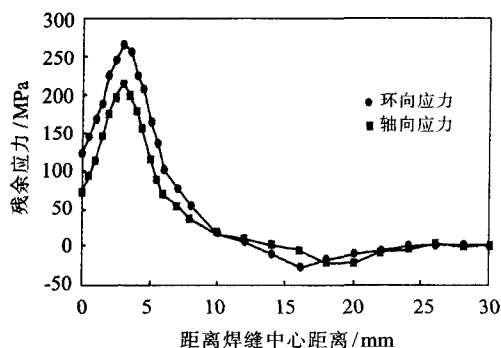


图8 内表面焊接残余应力分布

Fig.8 Distribution of residual stress of pipe inner wall

布趋势不同。虽然在焊缝及近缝区均为压应力,但是二者的分布趋势不同。环向残余应力在焊缝中心为最大的压应力,其值约为-250 MPa,随着距焊缝距离的增加,压应力逐渐变小,在距离焊缝12 mm处转化为较小的拉应力,最后趋于零值。轴向残余应力在焊缝中心为较小的压应力,随着距焊缝中心距离的增大,压应力越来越大,在焊趾附近达到最大值,约为210 MPa。距离进一步增大,压应力又逐渐变小,在距焊缝12 mm处转化为较小的拉应力,最后趋近于零附近波动。这与实际焊接情况较符合。

图8为管道内表面的环向和轴向残余应力分布曲线图。可见,管道内表面的环向应力和轴向应力分布趋势基本相同,在焊缝及其附近均为拉应力。在焊缝区域为较小的正值,随着距焊缝中心距离增加,拉应力逐渐增大,在焊趾附近区域达到最大值。其中最大环向应力约为260 MPa,最大轴向应力约为230 MPa。随后,应力随距离增加而减小,在距焊缝中心12 mm处变为较小的压应力,在更远处的母材区域,环向应力和轴向应力都在零值附近。

4 结论

(1) 基于ANSYS软件平台,建立合理的焊接有限元模型,采用单元生死移动热源作为TIG焊的热输入模式,利用温度-应力的间接耦合法较为准确地

模拟了Super304H管道焊接的温度场和应力场。

(2) 分析了焊接动态温度场和焊件上距焊缝中心不同距离处各点的热循环规律,并对不同焊接速度下垂直于焊缝方向的温度分布进行了比较分析。当焊速为2 mm/s时,焊缝中心最高温度达到1800℃,远高于材料熔点,而且焊接热影响区宽度适中。

(3) 焊接残余应力计算结果表明:管道外表面焊缝区及附近的环向应力和轴向应力均为压应力,最大压应力约为250 MPa。管道内表面焊缝区域的环向应力和轴向应力均为拉应力,在焊趾处达到最大值,最大环向拉应力约为260 MPa,最大轴向拉应力约为230 MPa。且随着离开焊缝距离的增加,由拉应力过渡为较小的压应力。

参考文献:

- [1] 缪筱玲,王鹏展. 超(超)临界锅炉用钢管SUPER304H与XA704性能特点评价[J]. 东方电气评论, 2006, 20(3):31-36.
- [2] Teng T, Chang P. Three-dimensional thermo-mechanical analysis of circumferentially welded thin-walled pipes [J]. Pressure Vessels Piping, 1998, 75:237-247.
- [3] 汪建华. 焊接数值模拟技术及其应用[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2003.
- [4] Siddique M, Abid M, Junejo H F, Mufti RA. 3-D finite element simulation of welding residual stresses in pipe-flange joints: effect of welding parameters [J]. Mater Sci Forum, 2005, 490:79-84.
- [5] ANSYS, Inc. ANSYS Elements Reference [M]. Twelfth Edition, SAS IP. Inc, 2001.
- [6] 刘兴龙,曲仕尧,邹增大,等. 基于ANSYS的焊接过程有限元模拟[J]. 电焊机, 2007, 37(3):41-44.
- [7] 陈家权,沈炜良,尹志新,等. 基于单元生死的焊接温度场模拟计算[J]. 热加工工艺, 2005, (7):64-65.
- [8] Andrea Capriccioli, Paolo Frosi. Multipurpose ANSYS FE procedure for welding processes simulation [J]. Fusion Engineering and Design, 2009, 39(1):1-8.
- [9] 陈星明,何东升. 基于单元生死的管道对接焊残余应力数值模拟[J]. 热加工工艺, 2009, 38(9):94-96.
- [10] 刘俊葵,陆皓,陈俊梅. 焊接残余应力的温度-组织-应力耦合分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(2):95-98. [H]