

换热器管板堆焊数值模拟及残余应力分析*

王渝皓,何庆中,王佳,郭斌,王永斌,蒲虎
(四川理工学院机械工程学院,自贡 643000)

摘要:针对换热器管板堆焊实际情况,确定了堆焊试验模型及工艺参数,并进行了堆焊试验。同时,在相同模型及工艺条件下,利用 Ansys 软件进行了堆焊数值模拟,使用 APDL 语言进行参数化编程,得到了模拟结果温度场和应力场的分布规律。通过试验结果与数值模拟结果的对比分析,证明了分析方法的合理性,对于今后产品局部结构优化设计、焊接残余应力分析及焊接工艺优化等均有直接帮助。

关键词:换热器管板;堆焊试验;Ansys 软件;堆焊数值模拟

中图分类号:TG404 **文献标志码:**A **文章编号:**1671—3133(2016)07—0090—05

DOI:10.16731/j.cnki.1671-3133.2016.07.019

Numerical simulation of the heat exchanger tube sheet welding and analysis of residual stress

Wang Yuhao, He Qingzhong, Wang Jia, Guo Bin, Wang Yongbin, Pu Hu
(Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, Sichuan, China)

Abstract: In view of the actual situation of heat exchanger tube sheet welding, determines the welding test model and its process parameters, and a welding test was carried out. Meanwhile, under the condition of the same model and process, welding numerical simulation are carried out using Ansys software, parameterized using APDL language programming, and obtained the distribution of temperature field and stress field. Through comparing and analyzing the test results and the numerical simulation results, the analysis method was proved to be reasonable. This approach have a direct help for the optimal design of the local structure of products, the analysis of the welding residual stress, the optimization of the welding process and so on.

Key words: tube sheet welding; welding test; Ansys software; welding numerical simulation

0 引言

换热器是一型通用设备,广泛应用于化工、电力、炼油、节能减排和原子能等工业部门。由于换热器高压、高温的特点,工作时其管板要承受很大的压力,因此管板材料多采用高强度钢。换热器工作介质常为弱碱性或弱酸性,介质中还混有少量的氢气,换热器管板与换热管焊接时存在一定的焊接应力,由于氢气的氢脆作用和弱酸、弱碱的腐蚀作用,使得焊缝处的应力腐蚀加剧,影响其使用寿命,甚至存在安全隐患。为了提高管板与换热管焊接应力、耐腐蚀能力,延长其使用寿命,目前主要的方法是在管板高强度钢上堆焊一层低强度结构钢或不锈钢。

本文根据堆焊试验的工艺特点和工艺参数,进行了堆焊试验,同时在相同工艺条件下采用 Ansys 软件利用间接法对堆焊过程进行了动态模拟,得到了焊后温度场和应力场分布规律,通过试验结果和模拟结果对比分析,得到了残余应力的分布情况,为今后的结构优化设计以及焊接工艺优化奠定了基础。

1 换热器管板试验模型及工艺参数的确定

1.1 管板试验模型的确定

根据有限元分析思想,当研究对象比较复杂时,可以将对象分解成若干个具有相同或相近特性的单元,对子单元进行研究与分析,即可推导出总体的特性,节约时间和材料。圆具有轴对称性,其对称轴为

* 材料腐蚀与防护四川省重点实验室开放基金重点应用研究项目(2013CL05);四川省自贡市 2013 年度重点科技计划项目(2013C16);四川理工学院研究生创新基金项目(y2014037)

直径,故可将圆形看作由直径旋转一周所经过的路径,而取其一条直径研究即可表征圆形的特征,故取管板中一条宽度为300mm的直径作为研究对象。对换热管板进行几何分解,并建立了试验模型,如图1所示。

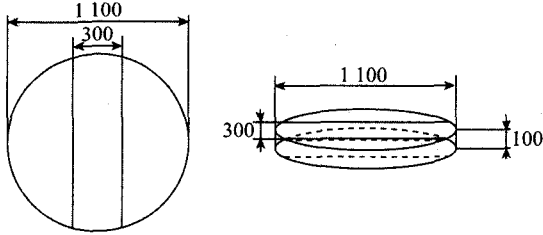


图1 管板几何尺寸

将圆形管板简化为尺寸 $a = 500\text{mm}$ 、 $b = 300\text{mm}$ 、厚度 $t = 100\text{mm}$ 的20MnMo钢锻件条形管板,作为试验研究对象,如图2所示。为模拟管板堆焊过程中的管板实际受力状态,在试件堆焊过程中将管板点焊在固定板上,在宽度方向限制其自由伸缩,如图3所示。

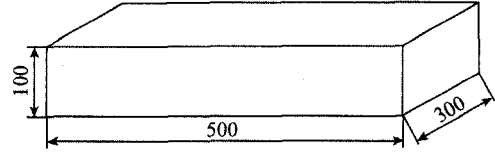


图2 试件几何尺寸

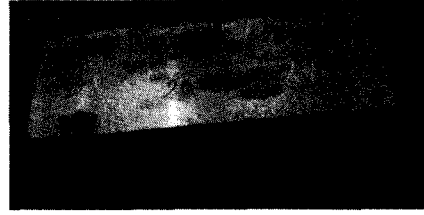


图3 试验试件

1.2 堆焊工艺参数

把试件固定在试验平台上,焊接区域纵向均分为22道焊缝,对其进行100℃预热后进行堆焊。先横向焊完一道焊缝,再依次纵向堆焊,每道焊缝焊完后冷却200s,全部焊完后空冷5000s。堆焊工艺参数如表1所示。

表1 堆焊工艺参数

管板材质	焊接方法	焊材牌号	规格/mm	焊接电流/A	极性	焊接电压/V	焊接速度/(cm·min ⁻¹)	线能量/(kJ·cm ⁻¹)
20MnMo 或 SA302B + H08A	SAW	H08A/HJ431	φ5.0	600~650	直流反接	30~36	50~60	28

2 管板堆焊数值模拟理论基础

2.1 温度、应力场的控制方程

在堆焊的过程中,由于材料的热物理性能随温度的变化而不断变化,同时边界条件也随时间的变化而变化,另外还有堆焊过程中的热辐射,因此堆焊模拟属于典型的非线性瞬态热传导问题。其控制方程为:

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

式中: x, y, z 分别为相应坐标系内的3个矢量方向; ρ 为材料的密度; c 为材料的比热容; T 为温度; t 为时间; k 为材料的导热系数; ρ, k 和 c 为温度的函数; Q 为内热源强度。

为了求解方程(1),需要给出边界条件和初始条件。通常温度边界条件有以下3种。

1)边界温度函数 T_s 已知:

$$T_s = k \frac{\partial T}{\partial x} l + k \frac{\partial T}{\partial y} m + k \frac{\partial T}{\partial z} n \quad (2)$$

式中: l, m, n 分别为边界法线的方向余弦; T_s 为位置的函数。

2)边界热流密度函数 Q_s 已知:

$$Q_s = k \frac{\partial T}{\partial x} l + k \frac{\partial T}{\partial y} m + k \frac{\partial T}{\partial z} n \quad (3)$$

式中: Q_s 为时间的函数。

3)边界换热系数 h 已知:

$$(T_\alpha - T_s) h = k \frac{\partial T}{\partial x} l + k \frac{\partial T}{\partial y} m + k \frac{\partial T}{\partial z} n \quad (4)$$

式中: T_α 为计算区域周围环境的温度值。

求解开始时整个区域的温度值为初始条件:

$$T|_{t=0} = T_0 \quad (5)$$

应力控制平衡方程:

$$\sigma_{ij} = 0 \quad (6)$$

热应变方程:

$$\epsilon_{ij}^T = \alpha_{ij} (T - T_\beta) \delta_{ij} \quad (7)$$

式中: T_0 为初始温度; σ_{ij} 为应力分量; ϵ_{ij}^T 为热应变张量; α_{ij} 为热膨胀系数; T_β 为参考温度; δ_{ij} 为算子。

2.2 高斯移动热源

由于堆焊热源的集中性和移动性,容易形成很大的温度梯度,这将导致焊后较大的残余应力与变形,因此选择合适的热源模型非常关键。焊接热源分为点热源、线热源、面热源和体热源,其中面热源的特点是焊接过程中的热量只从焊接的表面输入,通过热传

导的方式把热量传递到焊接件的各个部分。面热源适用于熔池深度较小的焊接模拟,由于堆焊层的厚度很小,仅为3mm,采用面热源可以得到比较满意的结果。本次分析选用移动高斯面热源,如图4所示,其热流密度函数为:

$$q(r) = \frac{3q_m}{\pi R^2} e^{-\frac{3r^2}{R^2}} \quad (8)$$

式中: q_m 为最大热流密度, $J/(m^2 \cdot s)$; $q = \eta UI$, η 为焊接热效率, U 为电弧电压, I 为焊接电流; R 为电弧有效加热半径, $R = \frac{d_H}{2}$, mm, d_H 为电弧有效加热直径; r 为点 A 到电弧加热中心的距离, mm。

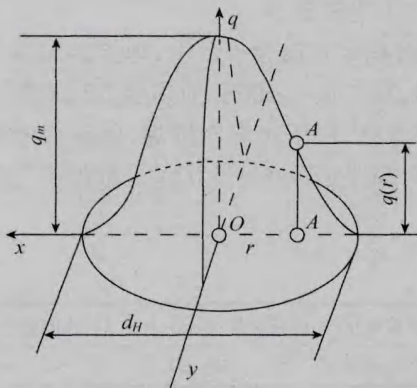


图4 高斯热流密度分布

式(8)的热流密度面载荷施加的位置为每个单元的每个面,但最终的热流密度值是施加在每个单元的各个节点上的,如果相邻单元有公共节点,则计算的热流密度值要平分到相邻的单元上。

3 有限元分析计算

3.1 有限元模型的建立

根据管板简化后的试验模型确定了理论分析模型参数,通过 Ansys 的 APDL 命令流建立了几何模型,模型分为堆焊层、管板和未焊接区域3部分,其中未焊接部分为应力测试区域。几何模型如图5

所示。

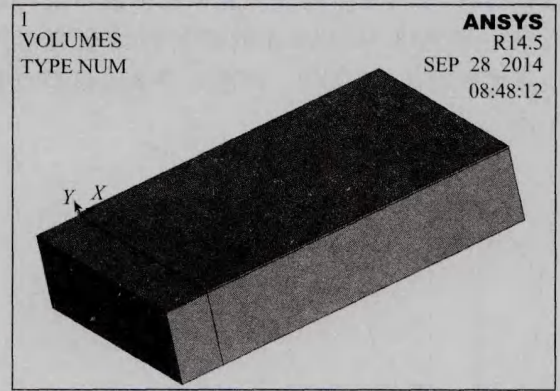


图5 几何模型

温度场分析时,单元类型采用三维8节点热分析单元 Solid90;结构场分析时,单元类型采用弹簧单元 Combin14。划分网格时,在堆焊层及其附近采用较小的单元尺寸,随着焊缝层距离的增大,网格尺寸逐渐增大,划分单元节点数 50 999 个,网格数 11 563 个。有限元模型如图6所示。

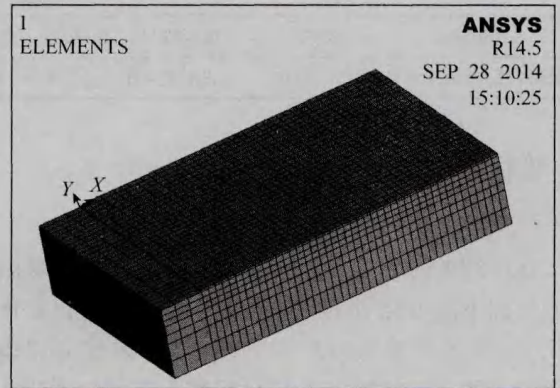


图6 有限元模型

3.2 材料特性参数

本次模拟的材料为 20MnMo,先通过 APDL 命令流定义温度表,再对应定义各温度条件下的材料热物理性能。20MnMo 热物理性能如表2所示。

表2 20MnMo 热物理性能

温度/ ℃	密度/ ($t \cdot m^{-3}$)	熔点/ ℃	比热容/ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	弹性模量 $\times 10^5$ /MPa	泊松比	热导率/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	线膨胀系数 $\times 10^{-6}$ /℃ ⁻¹
20	7.85	1 470	460	2.16	0.28	36.8	11.1
100	7.82	1 470	486	2.11	0.283	38.9	12.2
200	7.79	1 470	498	2.04	0.29	38.9	12.8
300	7.76	1 470	519	1.96	0.295	38.1	13.4
400	7.72	1 470	532	1.87	0.3	36.8	13.9
500	7.69	1 470	548	1.76	0.31	35.2	14.3

3.3 顺序耦合方法与边界条件设置

热力耦合方法分为直接耦合法和顺序耦合法,其中顺序耦合又分为单向顺序耦合和双向顺序耦合,由于焊接过程的热力耦合主要是温度场对结构场的影响,而结构场对温度场的影响很小,为了减少计算时间,本次分析采用单向顺序耦合法,即直接法。

进行温度场分析时,先进行稳态分析,施加初始温度 100°C ,堆焊过程中管板各表面均施加对流边界条件,空气的对流换热系数为 $28/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$ 。进行结构分析时,为了防止堆焊过程中的刚性移动,对远离堆焊区域的管板底部施加全约束。

3.4 单元生死法及移动热源的加载

进行堆焊时,为了真实模拟堆焊材料的依次填充过程,一般采用单元生死技术。在堆焊过程中,堆焊材料逐渐依次填充管板上,要真实的模拟这一过程必须用到 Ansys 中的单元生死技术。单元死亡并不是将死亡的单元从模型中删除,而是将其单元刚度矩阵乘以一个很小的因子,从而使死亡单元的载荷、质量、阻尼和其他类似效果都变为零。单元出生并不是将单元添加到模型中,而是将以前死亡的单元重新激活,当一个单元被激活后,其刚度、质量和阻尼等将被恢复其原始数值。在进行堆焊模拟过程中,先建立包括堆焊层和管板在内的整体模型,开始计算时先将焊缝单元杀死,随着堆焊的进行,再逐步将这些单元重新激活,Ansys 软件中杀死和激活单元的命令为 EKILL 和 EALIVE。

在进行温度场分析时,采用高斯热源模型,使用 DO,ENDDO 循环语句和 IF,ENDIF 有条件分支语句依次对每道焊缝的每个单元进行热源加载;结构场分析时,通过读取热分析结果文件的温度值依次进行温度载荷的加载。

4 计算结果

本次计算了 22 道焊缝堆焊模拟的全过程,其应力、温度分布规律如图 7 和图 8 所示。

5 堆焊试验及结果分析

5.1 堆焊试验

本次试验地点在某企业的容器分厂执行,由公司焊工(均取得自动焊资质)执行焊接过程,采用焊研威达 ZD5(D)-1250 焊接电源匹配埋弧自动焊机

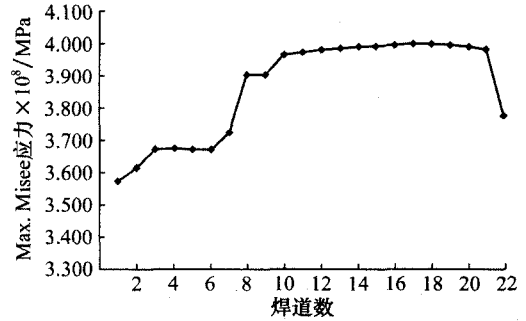


图7 堆焊后残余应力分布

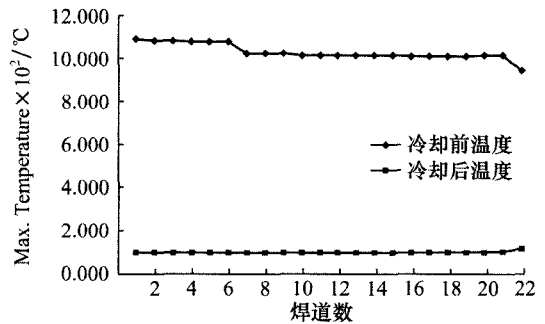


图8 堆焊完后温度分布

进行堆焊操作,并在焊接过程中由专人执行过程参数控制,堆焊试验现场及堆焊图分别如图 9 和图 10 所示。



图9 堆焊试验现场

使用西格玛 ASM3.0 型残余应力分析测试仪对管板堆焊层残余应力进行分析测试,测试方法使用盲孔法,选择具有一定平整度的待测点,将其待测表面的锈迹和氧化层打磨干净,粘贴上应变花,进行钻孔测量。

5.2 测试结果与模拟结果分析对比
管板堆焊试验结果如表 3 所示。

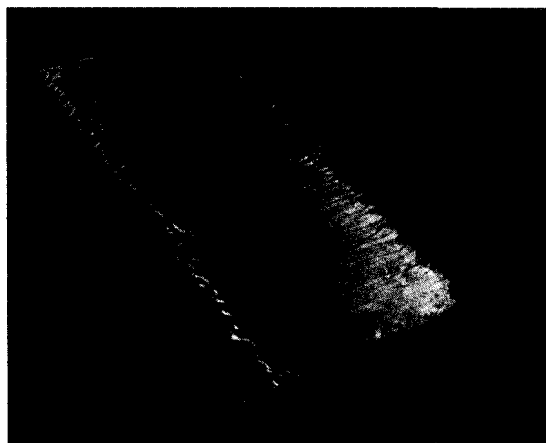


图10 堆焊图

表3 管板堆焊试验结果

序号	位置	堆焊模拟残余 应力值/MPa	试验分析测试 数据/MPa	误差 (MPa/%)
1	板端	376.0	353.0	23/6.5
2	管板长度方向 2/5处	324.8	296.8	30/10.1
3	板心	327.0	305.7	21.3/6.96
4	管板长度方向 4/5处	346.9	315.7	31.2/9.88
5	板端	360.0	324.0	36/11.1
6	厚度方向焊缝	157.0	143.3	13.7/9.56
7	厚度方向熔合线	140.0	129.9	10.1/7.77

由试验与计算结果可知,每道焊缝起始位置的残余应力值最大,最后一道焊缝焊完处的温度最高。模拟结果显示,堆焊完成后,残余应力最大值为376MPa,最高温度为120℃。从表3中可以看出,试验与数值模拟的最大误差为11.1%,最小误差为6.5%,计算结果误差在工程允许的范围之内,说明了本文分析方法是合理的。

6 结语

本文根据换热器管板堆焊的实际情况确定了试验模型和工艺参数,进行了堆焊试验,并测试了堆焊完成后的残余应力值。在相同的模型和工艺条件下,建立了数值模拟的分析模型,设置了相应的材料属性和边界条件,运用了单元生死技术、移动热源加载技术和顺序耦合法,得到了堆焊完成后残余应力和温度的分布规律。

通过软件模拟结果和试验验证结果的对比分析,其误差范围为6.5%~11.1%,计算结果误差在工程允许的范围之内,验证了本文分析方法是合理的。本次分析方法为今后堆焊数值模拟的研究提供参考,同时为企业产品局部结构优化设计、焊接残余应力分析以

及焊接工艺优化提供了依据。

参考文献:

- [1] 高耀东,何雪.基于Ansys的生死单元的焊接模拟[J].热处理技术与装备,2010(2):51-54.
- [2] 宋丽平.有关焊接有限元数值模拟计算前处理技术的探讨[J].热加工工艺,2012,41(9):179.
- [3] 高耀东,张福宽,高俊萍.利用不同焊接热源模型对结构件进行焊接模拟[J].内蒙古科技大学学报,2013,32(1):59-63.
- [4] 肖冯,米彩盈.T型角接头焊接热源模型研究[J].电焊机,2010,40(6):41-45.
- [5] 郭淑娟,张莹莹,杨坪.换热器管与管板接头焊接残余应力的有限元分析[J].金属铸锻焊技术,2010,39(3):155-157.
- [6] 李毅磊,白庆华,马跃进.基于Ansys的堆焊过程应力场动态模拟[J].试验与验证,2010,39(8):13-15.
- [7] 林尚扬,于丹,于静伟.压力容器焊接新技术及其应用[J].压力容器,2009(11):1-6.
- [8] 郑腊梅,戴峰泽,张永康,等.中厚板多道焊接温度场和残余应力场的三维数值分析[J].热加工工艺,2013,42(3):138.
- [9] 田全荣,刘金合,王世清.基于生死单元的组合热源在GMAW焊接中的应用[J].热加工工艺,2012,41(7):164.
- [10] 殷苏民,江文林,王匀,等.船用厚板焊接温度场演变规律[J].电焊机,2013,43(6):6-8.
- [11] 高耀东,李强,张玉宝.ANSYS机械工程应用精华60例[M].北京:电子工业出版社,2012(8):548-550.

作者简介:王渝皓,硕士研究生,主要研究方向为焊接特性与工艺技术优化。

E-mail:15196007990@163.com

收稿日期:2014-11-08