

文章编号:1007-6735(2012)05-0471-04

残余应力对排液蒸发器强度影响的有限元分析

苏文献, 范斌, 许斌, 眭宏梁

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 某排液蒸发器管箱隔板与筒体焊接处产生了焊接变形, 其凹陷处最大值为 5 mm, 影响结构的安全运行. 焊接应力与变形是焊接过程的必然产物, 计算和分析比较困难. 采用固有应变分析法, 计算出隔板和筒体的固有应变体积, 然后获得筒体的焊接残余应力. 在此基础上只考虑焊接残余应力、设计应力以及焊接残余应力与工作应力叠加 3 种工况计算出变形区域的等效应变, 并转化为等效残余应力. 利用有限元方法对蒸发器的强度进行分析, 计算结果可用于指导其实际运行.

关键词: 蒸发器; 焊接变形; 焊接应力; 固有应变法; 有限元分析

中图分类号: TO 051

文献标志码: A

Finite Element Analysis on the Effect of Residual Stress in Disposal Vaporizer

SU Wen-xian, FAN Bin, XU Bin, SUI Hong-liang

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The weld joints between the channel clapboard and shell of a disposal vaporizer generate welding deformation. The maximum concave may reach 5 mm, so it may have a bad influence on the safe operation of the structure. The inherent strain method was applied to calculate the strain volume of the channel clapboard and shell, and then get the welding residual stress of the shell. On this basis, three cases of stresses, which is the welding residual stress, design stress and welding residual stress plus design stress, calculate the equivalent strain of the deformation zone, transform it into equivalent residual stress, and then perform strength analysis by using finite element method. The result can be used to guide the actual operation of the vaporizer.

Key words: vaporizer; welding deformation; welding stress; inherent strain method; finite element analysis

某压力容器制造厂生产排液蒸发器, 在制造过程中, 管箱隔板与筒体焊接处产生了焊接变形, 其凹陷处最大为 5 mm. 由于时间紧迫和质量控制问题等原因, 无法对其进行退火等消除残余应力的处理. 为了

校核变形后的管箱能否满足设计条件下的强度要求, 本文采用了固有应变有限元法, 计算出变形区域的等效残余应变, 转化为等效残余应力, 作为初始条件施加在有限元模型中^[1], 利用大型有限元软件包 ANSYS

收稿日期: 2011-06-28

作者简介: 苏文献(1967-), 男, 副教授. 研究方向: 过程设备设计与有限元分析. E-mail: digestsu@163.com

进行强度校核.

1 载荷与结构分析

1.1 载荷分析

排液蒸发器为管壳式结构,其管箱带有横向与纵向隔板,直径为1 000 mm,如图1所示.管程主要工艺参数:介质为液氧和液氮、进口温度为-185℃、出口温度为-100℃.壳程主要工艺参数:壳程介质为冷却水、进口温度为-19℃、出口温度65℃.在焊接过程中结构经历了局部高温循环,在焊缝处产生了热膨胀.由于邻近区域材料的温度较低,热膨胀在这些区域受到了明显的抑制,所以在焊缝及邻近区域内就产生了压缩塑性应变,焊后冷却至室温下,这一应变也无法自动消除,结构内产生的应力为残余应力^[2].固有应力是指在不受外力作用下物体内部所存在的应力.因此,焊接残余应力就是一种典型的固有应力,是热应变、塑性应变以及相应变综合影响的结果.在焊接过程中,固有应变为热应变、塑性应变以及相应变3者之和.固有应变有限元法是一种既能解决大型复杂结构,又比较经济的预测焊接变形的方 法,目前在国内外都取得了不少进展,具有较广阔的应用前景^[3].



图1 管箱变形外观图
Fig.1 External view of the channel deformation

隔板与筒体焊接截面如图2所示.根据制造厂提供的焊接数据(见表1),计算过程中,电流*I*为100 A,电压*U*为14 V,焊接速度*v*为0.33 cm/s,电弧热效率*η*为0.8,将上述数据带入式

$$Q = \eta IU/v \tag{1}$$

求得焊接线能量*Q*为3 360 J/cm,将*Q*根据隔板和筒体导热情况分为*Q*₁和*Q*₂,分别加于隔板和筒体上,固有应变分布的区域也分为隔板和筒体两部分进行计算.隔板纵向单位固有应变体积和横向单位固有应变体积分的计算式^[4]为

$$W_{x1} = KQ_1 \tag{2}$$

$$W_{y1} = \xi Q_1 \tag{3}$$

筒体纵向单位固有应变体积和横向单位固有应变体积分计算式为

$$W_{x2} = KQ_2 \tag{4}$$

$$W_{y2} = \xi Q_2 \tag{5}$$

式中,*K*为纵向焊接系数, $K = 8.6 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{J}$; ξ 为横向焊接系数, $\xi = 0.9 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{J}$ ^[5].根据对该蒸发器现场数据测量,焊接变形区域中,筒体水平方向变形宽度约为50 mm,故筒体固有应变区*F*₂ = 2*a* × *h*' = 50 mm × 6 mm,对于隔板取固有应变区*F*₁ = *a* × *h* = 25 mm × 12 mm,对于.隔板平均固有应变和分别为

$$\epsilon_{x1}^* = W_{x1}/F_1 \tag{6}$$

$$\epsilon_{y1}^* = W_{y1}/F_1 \tag{7}$$

筒体平均固有应变和分别定义为

$$\epsilon_{x2}^* = W_{x2}/F_2 \tag{8}$$

$$\epsilon_{y2}^* = W_{y2}/F_2 \tag{9}$$

由上式求得,隔板平均残余固有应变 $\epsilon_{x1}^* = 0.000\ 481\ 6$, $\epsilon_{y1}^* = 0.000\ 504$,筒体平均残余固有应变 $\epsilon_{x2}^* = 0.000\ 481\ 6$, $\epsilon_{y2}^* = 0.000\ 504$.从而得出隔板残余应力 $\delta_{x1} = E \epsilon_{x1}^* = 92.89 \text{ MPa}$, $\delta_{y1} = E \epsilon_{y1}^* = 97.27 \text{ MPa}$;筒体残余应力 $\delta_{x2} = E \epsilon_{x2}^* = 92.89 \text{ MPa}$, $\delta_{y2} = E \epsilon_{y2}^* = 97.27 \text{ MPa}$ (*E*为设计温度下材料的弹性模量,取 $E = 1.93 \times 10^5 \text{ MPa}$).将上述固有应力作为焊缝初始载荷,就可对焊缝进行弹性有限元分析^[6-8],得出管箱焊接变形结果.

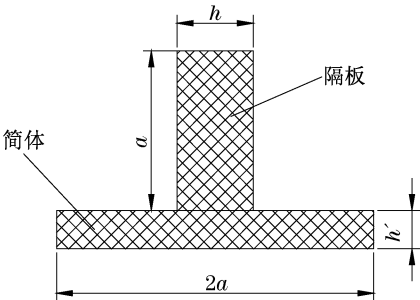


图2 隔板和筒体固有应变区域
Fig.2 Inherent strain area of the clashboard and shell

表1 焊接工艺参数
Tab.1 Welding parameters

焊层	焊接材料	焊接方法	规格 Φ/mm	电流 I/A	电压 U/V	焊速 v/(cm·min ⁻¹)
1	H0Cr21Ni10	GTAW	2.0	80~120	12~16	15~25
2	H0Cr21Ni10	GTAW	2.0	80~120	12~16	15~25
3~8	H0Cr21Ni10	GTAW	2.0	80~120	12~16	15~25

根据相关图纸和技术数据,基本设计数据见表 2.

表 2 设计参数
Tab.2 Design parameters

参数名称	数值
设计压力 P /MPa	0.4
工作压力 P_w /MPa	0.136
设计温度 t /℃	-196/65
工作温度(进/出) t_w /℃	-185/~100
材料	0Cr18Ni9
腐蚀裕量 C /mm	0

本文所考虑的载荷为管程压力、焊接残余应力和 3 个接管的等效端面力.考虑工况分别为只有焊接残余应力作用无管程设计压力作用、焊接残余应力和管程设计压力同时作用.

1.2 模型的结构尺寸与主要设计参数

计算模型包括封头、管箱筒体、接管以及管箱隔板.几何模型及相关尺寸见表 3 及图 3.封头、筒体和隔板所用材料为 0Cr18Ni9,在设计温度下的弹性模量为 1.93×10^5 MPa,泊松比为 0.3,许用应力 S_m 为 117.5 MPa.

表 3 几何模型参数
Tab.3 Geometric parameters of model

参数名称	数值
管箱筒体内径 D_i /mm	1 000
管箱筒体长度 L /mm	1 000
管箱筒体厚度 H_1 /mm	6
封头厚度 H_2 /mm	6
隔板厚度 H_3 /mm	12
	33.7×3.9
接管尺寸 $\Phi \times H$ /mm	168.5×6.2
	457×5.25

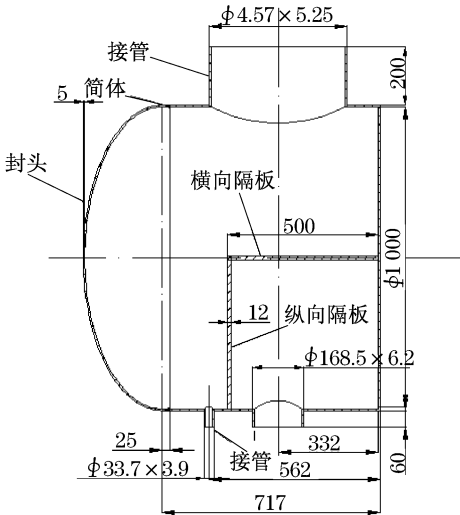


图 3 几何模型
Fig.3 Geometry of model

1.3 有限元计算模型

由于六面体网格具有计算精度高、占用节点少等优点,所以采用六面体网格划分,沿壁厚方向划分 2 层.单元类型为 Solid 95,共划分了 26 938 个六面体单元,149 018 个节点.有限元网格如图 4 所示.沿筒体端面轴向及环向方向进行约束.

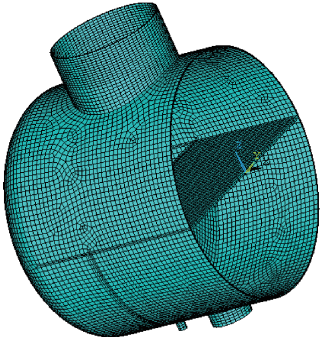


图 4 模型的有限元网格图
Fig.4 Finite element mesh of model

2 有限元计算结果及分析

2.1 工况 1——仅受焊接残余应力作用

在此工况下的应力强度分布见图 5.由图 5 可知,隔板与筒体间焊缝(图中矩形框内部分)的应力强度在 20~45.713 MPa 之间,远小于设计温度下该材料的许用应力 117.5 MPa.

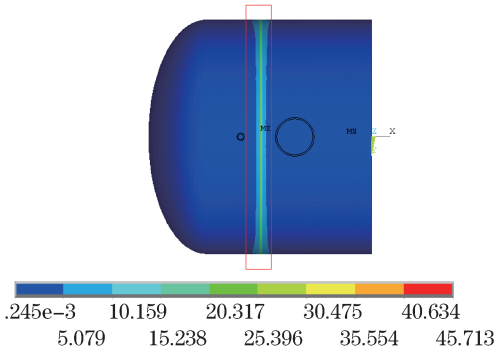


图 5 仅受残余应力作用下应力分布
Fig.5 Stress intensity results(only residual stress)

2.2 工况 2——仅受管程设计压力作用

封头、管箱筒体和 3 个接管的内表面以及隔板受管程压力 0.4 MPa 作用.有限元分析得到模型的应力分布(见下页图 6).最大应力强度点在接管 $\Phi 457 \times 5.2$ 与筒体连接处.选取两条应力评定路径,一条是接管 $\Phi 457 \times 5.2$ 与筒体连接处沿接管壁厚方向;另一条选取筒体径向隔板与筒体连接处沿

隔板壁厚方向,应力评定结果见表4.

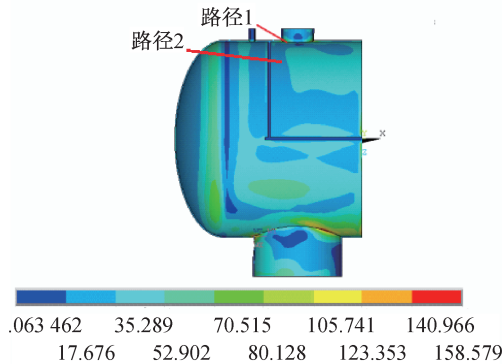


图6 仅受管程设计压力作用下应力分布图
Fig.6 Stress intensity results (only tube design pressure)

表4 应力强度评定(工况2及工况3)
Tab.4 Assessment of intensity (case 2 and case 3)

路径	工况2		工况3		差值/%	
	S _{II}	S _{IV}	S _{II}	S _{IV}	S _{II}	S _{IV}
1	108.60	117.90	94.37	118.80	13.1	0.80
2	29.29	34.01	26.56	34.24	9.30	0.70

2.3 工况3——焊接残余应力和管程设计压力同时作用

这一工况下的应力强度分布见图7.最大应力强度点仍在接管 $\Phi 457\times 5.2$ 与筒体连接处.应力评定路径的数量和位置与工况2相同.应力评定结果见表4.

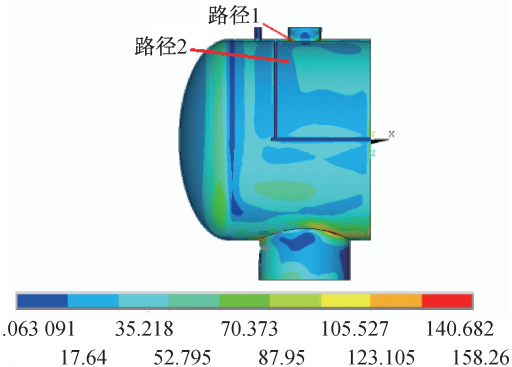


图7 残余应力和管程设计压力同时作用下应力分布图
Fig.7 Stress intensity results(both residual stress and tube design pressure)

2.4 应力评定

将计算得到的应力结果按照JB 4732—1995《钢制压力容器—分析设计标准》规定进行评定,结果为:一次局部薄膜应力的值不得超过许用应力的1.5倍,为176.3 MPa,一次局部薄膜应力加二次应力的值不得超过许用应力的3倍,为352.5 MPa.

由表4可以看出,在3种载荷作用的工况下,设备的结构强度均能满足要求,且在残余应力和管程

设计压力共同作用下的应力强度与仅在管程设计压力作用下的应力强度差别不大.

3 结束语

采用固有应变分析法,先计算出隔板和筒体的固有应变体积,然后获得筒体的焊接残余应力.针对仅考虑焊接残余应力、设计应力以及焊接残余应力与工作应力叠加3种工况,计算出变形区域的等效应变,转化为等效残余应力,并利用有限元软件对容器的强度进行分析.本例中工况2和工况3的最大应力都发生在接管与筒体连接处,且相差不大,焊接变形区域的应力水平较低,利用固有应变法算出的等效焊接残余应力对设备强度的影响可忽略不计.

需要指出的是,由于金属材料在残余应力和某些腐蚀介质的共同作用下会导致应力腐蚀裂纹的萌生,可能影响到容器的正常使用,尽管这个问题不在本文的研究范围,但在实际运行中应引起注意,通过定期检验来确保设备的安全运行.

参考文献:

[1] 魏良武.固有应变法预测焊接变形的研究及其工程应用[D].上海:上海交通大学,2004.

[2] Chen J M, Lu H. Prediction of welding deformation of underframe [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 9(1): 10-14.

[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] 黄辉,赵耀,袁华.平板焊接变形预测固有应变方法的研究[C]//第五届中国CAE工程分析技术年会论文集,兰州:中国机械工程学会机械工业自动化分会,2009.

[5] Ueda Y, Yuan M G. Prediction of residual stresses in butt welded plates using inherent strains[J]. Journal Engineering Materials and Technology, 1993, 115(10): 417-423.

[6] Murakawa H, Deng D, Ma N S, et al. Applications of inherent strain and interface element to simulation of welding deformation in thin plate structures [J]. Computational Materials Science, 2012, 51(1): 43-52.

[7] Deng D, Murakawa H, Liang W. Prediction of welding distortion in a curved plate structure by means of elastic finite element method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 203(1/2/3): 252-266.

[8] Wang R, Zhang J X, Serizawab H, et al. Study of welding inherent deformations in thin plates based on finite element analysis using interactive substructure method[J], 2009, 30(9): 3474-3481.