

某固定管板式换热器的温度场与热应力分析

冷纪桐 吕 洪 章姚辉 赵 军

(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘 要: 文中介绍了某固定管板式换热器高温高压下的工作条件, 建立了热分析与结构分析的有限元模型, 计算得出管板的温度场以及温度场与结构耦合产生的应力场, 给出了管板最高应力值及某些路径的应力变化曲线。

关键词: 换热器; 管板; 温度场; 热应力

中图分类号: TQ052.4

引 言

固定管板式换热器在工程实际中被广泛应用, 大量文献报道, 管板在工程中是易发生事故的装置之一。其发生原因有多种, 但是在高温高压下服役的固定管板式换热器, 有可能是温度引起的热应力使其破坏。

JB4732^[1]对换热器管板看做是各向同性的轴对称结构, 在材料的弹性范围内, 且弹性模量和热膨胀系数保持不变的情况下计算热应力, 但是没有给出管板壁温的计算方法。美国 ASME 规范根据 Gandner^[2]的分析, 认为板中只在靠近板表面的一层金属中存在较大的温度梯度(称为“表皮效应”), 因而只在板表面处存在显著的热应力, 而其余部分热应力可以忽略。但是实际上管板的温度场复杂得多。Sign 与 Holtz^[3], Oholz^[4], Kasahara 与 Iwata^[5]考虑到三维有限元分析的复杂性, 对管板进行了各种简化分析。薛明德、吴强胜^[6]试图从管板(包括与其相连的换热管与壳体)的温度场、热应力分析出发去探讨改善管板设计的途径, 提出了一种分析换热器管板温度场的简化方法。其分析得出的结论是在布管区与非布管区过渡处、管板与壳体连接处有较大的温度梯度, 而管子与管板胀接处的接触热阻使管板中的“表面热效应”减小, 并使管板厚度方向的温度梯度均匀化。

本文所涉及的某固定管板式换热器是国家重点攻关项目国产化的关键设备, 是一台高参数换热器,

其设计温度为 465℃, 设计压力为 12.6 MPa, 直径超过 1 m, 目前在国内尚未进行温度载荷下, 因此对这样的大型重点设备进行分析具有重要的意义。本文以此设备为对象, 进行换热器温度场和应力场分析。

1 建立有限元模型

1.1 模型的建立

换热器的工艺参数如表 1 所示。由于现有的计算条件的限制, 不可能全部采用实体单元进行模拟。因此在既考虑精确度, 又保证准确的同时, 对换热器整体采用了实体单元、壳单元和梁单元相结合的建模方式。由于进行的是热和结构的间接耦合分析, 故分别采用了热分析模型和结构模型。结构模型中管程进口端的筒体, 管板和与管板胀接部分的换热管, 部分壳体以及进口端壳程侧伸出的部分管子选用了实体的体单元, 其余部分的换热管采用梁单元, 出口端管板壳体采用壳单元。为了保证耦合分析中的节点一致, 删除不参与热分析的梁单元的梁单元, 在热分析中, 将结构分析中的实体单元和壳单元转化为与热分析相对应的单元类型, 即对应实体的热单元, 对应壳的热单元, 这就得到了热分析模型。

表 1 换热器工艺参数表

Table 1 Technological parameters of heat exchanger

	介质	设计温度	工作温度	设计压力
		(进 - 出)/	(进 - 出)/	/ MPa
壳程	BW + 蒸汽	343	225 - 248.22	4.2
管程	来自蒸汽过滤器的合成气	465 - 343	416.3 - 282	12.6

收稿日期: 2003-09-01

第一作者: 男, 1944 年生, 副教授

E-mail: lengjt@mail.buct.edu.cn

1.2 热分析加载和边界条件

耦合分析的方法是采用间接耦合,即先进行热分析,再进行结构分析。

热分析时仅考虑稳态热传导的情况。边界条件为设计方提供:进口端管程侧附着在管板上的堆焊层表面施加的温度为 405 ,包括胀接在管板上的管子管程部分的横截面;进口端管程上附着在筒体部分的堆焊层表面施加的温度为 405 ;胀接在管板中的管子大部分单元上的边界节点施加 405 温度边界。其余单元的边界为绝热。壳程侧管板面施加温度边界为 249 ,壳程筒体内表面施加温度为 249 ;实体部分的管子伸出部分按照工艺给定温度为 310.4 ;出口端管板施加温度为 249 ,出口端筒体施加温度为 265 。

1.3 结构模型约束与加载

结构分析时,选取换热器的不在一条直线上的三个结点约束了换热器的六个刚体自由度,另外考虑到折流板对换热管的支撑作用,在换热管五个位置的节点上约束 X 、 Y 两个自由度。结构分析时的载荷是结点温度作为热载荷加载到对应结点。

2 分析

2.1 温度场分析

通过计算得到了管板温度场分布云图如图 1,2 所示。由图 1,2 可以对管板温度场作如下描述:可以看出在靠近壳程低温侧的布管区沿轴向的温度梯度变化最急剧;在壳程侧换热管和管板胀接的地方温度梯度变化也很明显;在非布管区管板沿轴向温度数值比较大,但是变化区域的厚度较大,所以梯度相对比较舒缓;远离布管区的管板边缘沿轴向的温度梯度变化相对较小;进口端两堆焊层相连接的地方温度梯度变化不明显;管板在高温管程侧布管区沿厚度方向温度梯度变化舒缓;在管板周边的径向

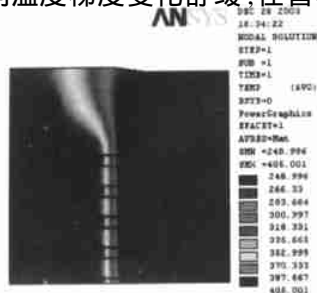


图 1 进口端管板的温度场分布云图

Fig. 1 Temperature field distribution of tube sheet inlet

厚度方向的温度梯度也变化不大,管桥处温度变化甚微。



图 2 进口端管板和部分管子温度场云图

Fig. 2 Temperature field distribution of tube sheet inlet and a part of tubes

2.2 结构应力分析

如前所述,由于本文涉及的耦合分析为间接耦合,作结构分析时只需将温度场分析所得的节点温度作为体载荷加载到每个节点,给出所有的力学边界条件即可计算。得到整个换热器的热应力分布,但是为了显示需要和重点考虑起见,本文只将重点考察的管板的 1/2 选取出来,如图 3,4 所示为管板的应力强度云图。

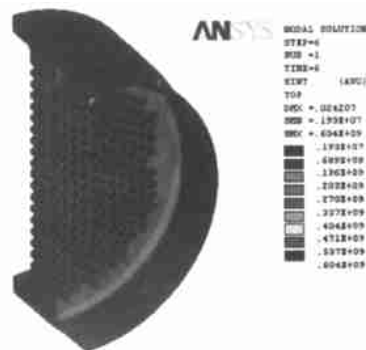


图 3 管板壳程侧的应力强度云图

Fig. 3 Shell side stress intensity distribution of tube sheet

从图 3,4 中可以看出:温度载荷对管板产生了很大的热应力;应力强度最大值发生在两种不同材料的堆焊层处,最大值到达 604 MPa,但是除去堆焊层之后,该处的应力值为 317 MPa;另一个热应力较大的地方是在进口端低温侧管板与换热管胀接的区域,应力值达到 355 MPa;非布管区的管板轴向和径向的应力强度都没有明显的增大。

为了对管板安全性能作一定的评定,需要找出管板应力较大的危险截面。下面就是选择的几条典型的路径进行必要的分析。图 5 所示为管板的路径



图 4 管板管侧的应力强度云图

Fig. 4 Tube side stress intensity distribution of tube sheet 分布图。



图 5 管板应力强度和路径图

Fig. 5 Stress intensity distribution and path of tube sheet

路径 1 是沿管板轴向上截取的,方向是由管程到壳程。该路径还包括 10 mm 的堆焊层,包括由于温度梯度急剧变化而引起的区域。图 6 是路径 1 的应力与应力强度图,即含应力强度(S)、第一主应力(S_1)、第二主应力(S_2)、第三主应力(S_3) (下同)。由图 6 可以看出应力强度值出现了较大的波动。在靠近壳程侧的管板上应力强度值达到了最大。这个

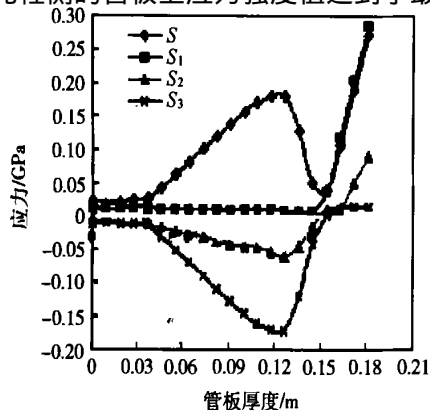


图 6 路径 1 上的应力与应力强度变化图

Fig. 6 Stress and stress intensity distribution along path1

最大值主要由第一主应力在这个区域的急剧增大引起的。厚度方向上的第一主应力,在温度变化不大的区域波动小,受到的拉力也很小;在温度急剧变化的薄层区域,受到的拉应力也急剧增大,成为应力强度值的主要决定因素。

路径 2 是进口端在堆焊层处沿筒体厚度方向上截取的路径,方向是由内到外,包括 3 mm 的堆焊层。应力强度在此出现了较大的变化,在堆焊层上应力强度值达到了最大,为 604 MPa;过了堆焊层区域后,应力强度值急剧减小。以上的变化趋势是由于堆焊层部分与筒体温度相差很大,导致产生较大的应力强度变化。温度的变化和材料属性的变化成为这个趋势的主要因素。图 7 是路径 2 上应力与应力强度变化图。

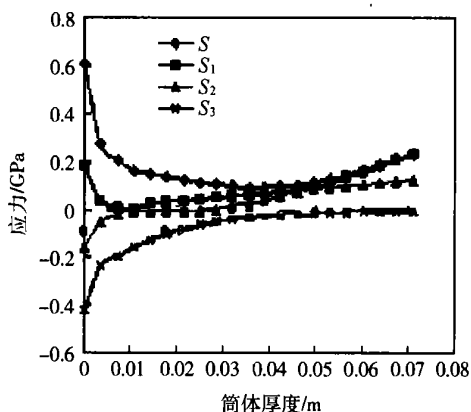


图 7 路径 2 上的应力与应力强度变化图

Fig. 7 Stress and stress intensity distribution along path2

路径 3 是沿换热器轴向上通过两种堆焊层材料截取,包括 3 mm 厚的堆焊层。图 8 是路径 3 的应力与应力强度变化图。取此路径目的在于考察两种不同材料可能给应力强度值的影响。由图 8 可知,应力强度值出现了不连续的突变。应力强度值从一

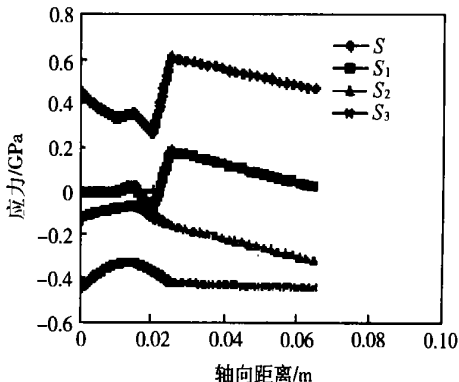


图 8 路径 3 上的应力与应力强度变化图

Fig. 8 Stress and stress intensity distribution along path3

种堆焊层材料到另一种堆焊层材料时,突然增大。这是由于处于同样的温度下,两种堆焊层材料的热物性相差很大,造成了不连续膨胀,产生很大的应力强度值。两种堆焊层材料在远离它们相连接的区域的地方,应力值下降较快,达到了正常的水平。因此,两种材料物理性质的变化,成为此处应力突然增加的主要原因。

路径4是在壳程侧靠近管板的壳程筒壁上沿着厚度方向截取的,方向由内到外,但是不完全按照径向截取。选取此路径时为了考察热应力在壳程筒壁上的影响程度。图9是路径4的应力与应力强度变化图。由图9可以看出,应力强度值出现缓慢下降,热应力在壳程厚度方向上应力强度波动不大。

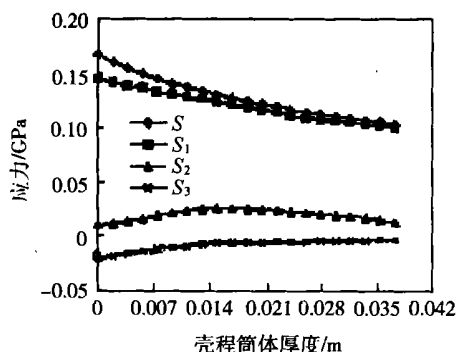


图9 路径4上的应力与应力强度变化图

Fig.9 Stress and stress intensity distribution along path4

3 结论

布管区的管板低温侧的温度急剧下降,非布管区的温度变化缓慢,而布管区的中心区呈现出明显的“表皮效应”,这与文献[2]分析结果一致。通过对换热器温度场的计算,得出温度急剧变化的区域是在管板的壳程侧薄层以及管板与换热管胀接的部

分区域。

经过应力计算与分析,发现在管板壳程侧以及壳程侧管板与换热管胀接处应力变化剧烈。最大应力在两种材料堆焊层的连接处,应力值为604 MPa;进口端靠近管程侧管板与换热管胀接的地方应力值达到了355 MPa。

计算结果表明高参数下,温度载荷对该换热器的管板造成了很大的热应力,设计时需要引起重视,更应该对管板的温度场进一步作比较精确的分析。

参考文献

- [1] 全国压力容器标准化技术委员会. JB4732-95 钢制压力容器[M]. 北京:全国压力容器标准化技术委员会, 1995
- [2] Gardener K A. Heat exchanger tube sheet temperatures [J]. The Refiner & Natural Gasoline Manufacturer, 1942 (4): 72-74
- [3] Sign K P, Holt M. An approximate method for evaluating the temperature field in tube sheet ligament of tubular heat exchangers under steady state conditions[J]. ASME Journal of Engineering for Power, 1982, 104: 895-900
- [4] Ohol R D, Rane M T, Noras R A. A finite element procedure for temperature distribution in tube sheets [C]. Proceedings of the 7th International Conference on Pressure Vessel Technology, Dusseldorf: Springer Press, 1992, 2: 355-370
- [5] Kasahara N, Iwata K. Simplified 2-dimensional thermal analysis method considering 3-dimensional heat transfer [J]. Computational Mechanics 86, Springer Verlag, 1986 (2): 127-137
- [6] 吴德胜,薛明德. 固定管板式换热器管板温度场的分析方法[J]. 核动力工程, 1998(10): 402-407

Analysis of temperature field and thermal stress in a fixed tube-sheet heat exchanger

Leng Ji-tong L üHong Zhang Yao-hui Zhao Jun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Finite element models for a fixed tube-sheet heat exchanger were established with considering the coupling action of high temperature and high pressure. Temperature and thermal stress distribution fields are obtained and analyzed for some important regions or along some critical stress-check lines in the exchanger.

Key words: heat exchanger; tube-sheet; temperature field; thermal stress

(责任编辑 刘同帅)