

塔设备连接法兰的校核方法研究及应用

刘万朋,施哲雄,何荣娥,周 阳

(华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237)

摘 要:为了解决石化行业中塔设备连接法兰腐蚀后的连接可靠性问题,降低生产过程中的事故发生概率,对法兰校核方法进行了研究,并结合工程实例,提出了用有限元软件 AxiPRO 对法兰连接系统在内外载荷共同作用下的强度和刚度校核方法,克服了法兰设计校核标准中不考虑外部载荷的影响和只进行强度计算的弊端,首先对法兰连接系统进行强度校核,通过等效应力原则确定连接系统中的危险区域,考核其是否满足强度要求;然后对法兰密封性进行了计算,根据垫片应力分布情况推断法兰的泄漏情况及泄漏趋势,最后给出了法兰泄漏预判断的有限元分析方法流程。

关键词:法兰;螺栓;泄漏;有限元

中图分类号:TQ05

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2012.11.016

0 引 言

塔设备是石油化工装置中常见的设备,在生产中占有十分重要的地位。一些中低压工作状态下的塔设备为了拆装方便,往往采用法兰连接,然而法兰连接处又是塔设备发生泄漏的潜伏点,且工作介质一般情况下具易燃易爆有毒的特点,一旦发生泄漏或者其他的失效形式,后果将会十分严重,所以科学合理的法兰校核方法对保证塔设备的安全运行显得尤为重要。

法兰连接是一个连接系统,它是由法兰对、螺栓、螺母和垫片组成的^[1]。塔节通过法兰用螺栓连接在一起,靠螺栓连接来增加法兰和垫片之间的压紧力,使垫片表面产生塑性变形或弹性变形,阻隔了塔内流体或气体介质可能外溢的通道,从而保证连接处的密封性。因此,塔设备连接法兰的校核要兼顾应力和应变两个方面,既要保证法兰连接系统的强度要求,同时还要保证法兰连接可靠的密封性。

1 失效机理

研究的对象为某公司塔设备腐蚀最严重且风弯矩相对较大的一个法兰,其腐蚀机理主要是保温层下腐蚀(CUI)。通过现场调查,可以发现腐蚀严重的部位保温不合理,造成保温层内含有大量的积水无法排出,且塔的工作温度在 35℃左右,

在易发生保温层下腐蚀的温度范围内(-12℃~117℃)^[2]。现场实景如图 1 所示。

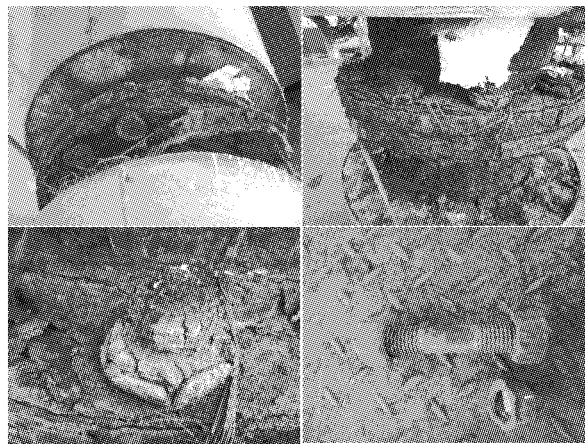


图 1 现场照片

Fig. 1 Scene photos

从现场照片上可以看出法兰、螺栓腐蚀严重,并且塔内的工作介质为二氯乙烷,属于易燃易爆有毒性气体,一旦发生失效,后果影响范围将会很大。因此,对该塔连接法兰进行科学合理的校核迫在眉睫。

2 有限元分析

传统的法兰设计和校核,国内参考的标准主要是 GB150^[3]和 JB4710^[4],在该准则中,假设法兰和垫片是刚性的,用刚性方程来描述它们的力学特征,并且准则中所计算主要是强度计算,并不考

收稿日期:2012-09-21

作者简介:刘万朋(1986-),男,山东济宁人,硕士研究生。研究方向:压力容器系统基于风险的检验实施策略应用。

指导老师:施哲雄,男,副教授,博士。研究方向:特种设备安全保障,工业风险评估,地理管道检测技术等。

虑外部载荷的影响和法兰的泄漏问题,而在实际情况下,由外部载荷造成的法兰泄漏也是常见的失效形式^[5]. 接下来将通过有限元分析软件(AxiPRO)来对塔设备连接法兰在外部载荷作用下的强度和刚度要求进行计算.

2.1 法兰参数

法兰是一个连接系统^[6],在有限元计算过程中,需要对法兰、螺栓、螺母及垫片进行深入的研究,有关设计参数如表 1 所示,法兰零件图如图 2 所示.

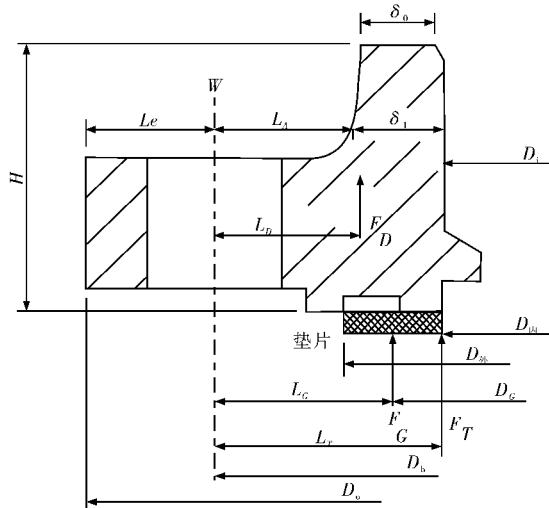


图 2 法兰剖视图

Fig. 2 Cutaway view of flange

根据法兰的计算压力、设计温度和材料种类,结合 HG20625(美洲体系)^[7]可以确定法兰的等级为 PN2.5 MPa(class 150)的带颈平焊法兰;螺栓为高强度螺栓,公称抗拉强度为 800 MPa,屈服强度为 640 MPa;根据 HG20606^[8]可确定垫片为凸凹面垫片.

具体设计参数如表 2 所示.

表 1 设计参数

Table 1 Design parameters

参数	数值及规格
计算压力	1.1 MPa
设计温度	35 ℃
法兰材料	16Mn II
螺栓材料	8.8 级
螺栓公称直径	M24
螺栓个数	12
法兰规格	SO50-2.5
垫片规格	MFM200-2.5

表 2 法兰和垫片参数一览表

Table 2 Flange & gasket parameters

结构尺寸/mm							
D_i	221.0	D_o	360.0	L_D	29	L_G	30.5
D_b	310.0	$D_{\text{外}}$	260.0	$D_{\text{内}}$	238.0	δ_0	17.0
L_e	25.0	L_A	13.5	h	22.0	δ_1	32.0
材料类型	软垫片	N	11.0	m	2.00	y	11.0
压紧面形状		凸凹面		b	5.50	D_6	249.0

由表 1 和 2 可以看出,连接螺栓和法兰的选用均满足 HG20593^[9]标准.

2.2 分析模型

法兰结构具有良好的对称性,且螺栓及垫片在内外载荷的作用下的力学性能沿着荷载方向的中轴面对称,故此次分析中选取 $\frac{1}{2}$ 的模型(见图 3)来研究 12 个螺栓和垫片的力学性能,分析中连接螺栓和法兰均选用腐蚀后的最小测量数据,即连

接螺栓 $d=20.45$ mm,法兰最大厚度 $\delta=24.1$ mm.

2.3 网格划分

法兰连接系统中涉及到法兰对、螺栓和垫片的网格划分,有限元软件中默认的网格划分是 3×3 的网格节点,为了得到更贴近实际的力学结果和更详细的垫片应力分布情况,采用 4×4 的网格节点,网格质量 0.72,共划分 8 949 个单元,10 293 个节点.

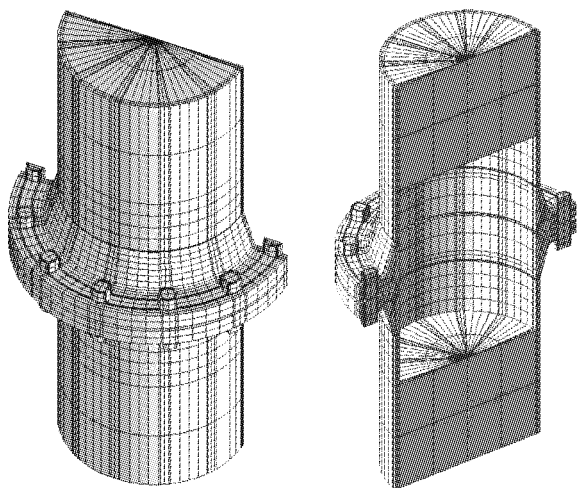


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

2.4 载荷施加

在分析中,主要考虑轴向应力、地震载荷和由风载、雪载等产生的外部弯矩载荷影响.在各种法兰设计和校核标准中,都没有明确规定外部载荷和许用应力的关系,ASME SEC VIII Div1 中规定“所设计法兰应该足够强度以承受外部载荷”^[10],GB150 中也没有做明确的规定,只是在 API 605《大口径碳钢法兰》中明确规定温度—压力等级表中的法兰应该能够承受与其相连管道许用应力一半所对应的外部弯矩^[11].实际失效案例中,外部弯矩是造成法兰泄漏的一个主要原因.在分析中,取内压 $P=1.1$ MPa,外弯矩 $M=13\ 648\ 152$ N·mm,轴向载荷 $F=47\ 326.5$ N(外弯矩和轴向载荷为 SW6 软件计算结果)计算参数如表 3 所示.

表 3 塔设备 SW6 计算参数表

Table 3 SW6 calculation parameters for tower

参数	数值	参数	数值
塔直径/mm	219	设计基本风压/ $N \cdot m^{-2}$	550
塔高度/mm	21 750	设计雪压/ $N \cdot m^{-2}$	200
塔节厚度/mm	6	地震烈度/度	7
裙座厚度/mm	16	地面粗糙度类别	C 类
设计压力/MPa	1.1	场地土类型	IV 类
最高工作压力/ MPa	1.0	物料特性	二氯乙烷 (中毒危害)
设计温度/℃	35	塔板形式	浮阀
最高工作温度/℃	35	主要受压 元件材料	10、Q235-A、 16Mn、16MnII

3 法兰计算结果分析

塔设备连接法兰要保证法兰连接系统的强度要求和法兰连接可靠的密封性,所以法兰的校核要从应力和应变两个方面进行分析.

3.1 强度校核

法兰连接系统的强度校核主要是通过等效应力确定危险区域,然后对危险区域进行应力计算,最后将计算结果与许用应力比较,进而确定法兰连接系统组件是否满足强度要求,通过有限元软件计算得到法兰螺栓的应力结果如图 4 所示.

从图 4 中可以看出,两种工作状态下,对于法兰来说,较大应力都集中在法兰和塔节的连接处及法兰的锥颈处;对于螺栓和螺母来说,螺柱与螺孔的接触面和螺柱与螺母的接触面应力较大,且外部弯矩对螺栓的应力改变不是很大.

对法兰危险区域进行数据读取,可得到最大应力.

即:① 预紧状态下 $\sigma_{\max 1}=166.062$ MPa

② 操作状态下 $\sigma_{\max 2}=182.060$ MPa

则

$$\sigma_{\max} = \max(\sigma_{\max 1}, \sigma_{\max 2}) = 182.060 \text{ MPa} < 1.5 [\sigma] = 244.3 \text{ MPa (GB150-1998)}$$

校核合格对螺栓危险区域进行数据读取,可得到最大应力,如表 4 所示.

螺栓等级为 8.8 级,由此可知其抗拉强度为 800 MPa,所以螺栓的许用应力为

$$[\sigma] = 267 \text{ MPa}$$

螺栓计算应力均小于许用应力,即螺栓满足强度要求.

表 4 螺栓计算应力

Table 4 Calculation stress of bolts

螺栓编号	预紧状态/MPa	操作状态/MPa
1	174.886	184.978
2	172.693	181.049
3	172.798	176.929
4	172.803	171.142
5	172.799	165.348
6	172.691	161.020
7	174.856	161.438

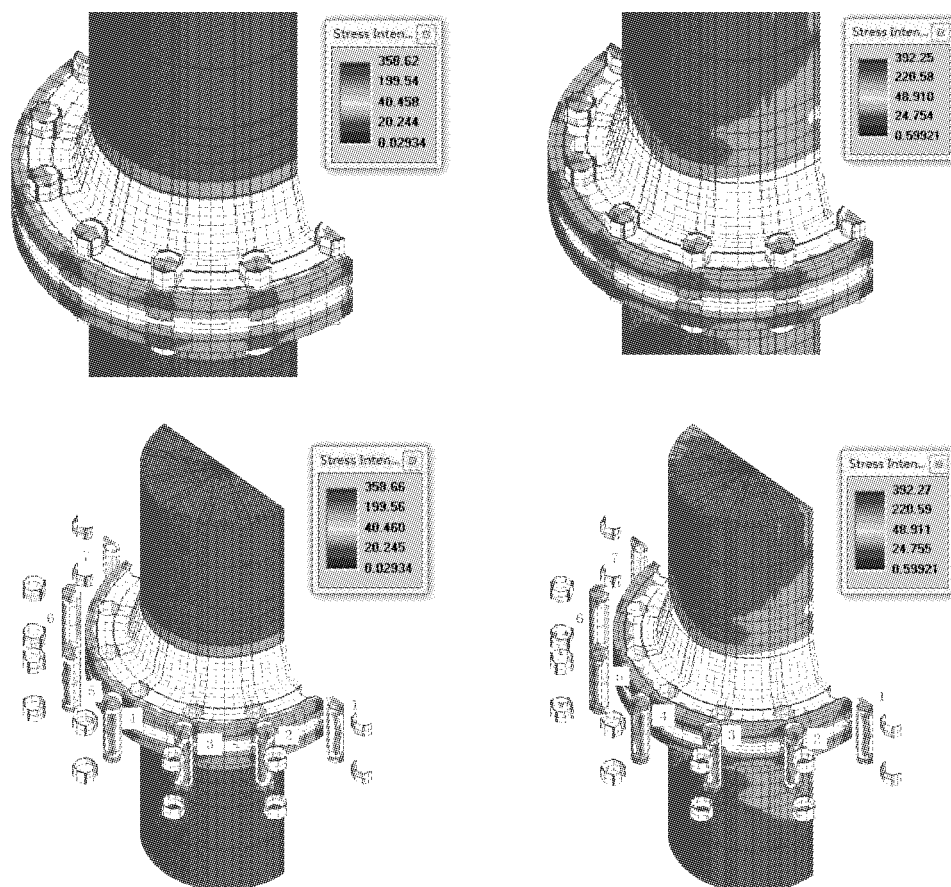


图 4 应力强度云图

Fig. 4 Stress intensity nephogram

3.2 密封性校核

3.2.1 校核结果 法兰因刚度造成的失效主要是介质泄漏^[12],这也是法兰在实际应用中最主要的失效形式. ASME VIII Div1 和 GB 150 的法兰校核只是关于强度的校核,并不考虑法兰的刚度校核,即法兰的泄漏问题. 这样误导人们认为只要满足了强度要求,理论上就不会泄漏,且在面对法

兰的泄漏问题时,缺少计算依据和定量的计算,只能凭经验处理法兰泄漏问题.

考虑到法兰、垫片和工作介质,法兰的泄漏校核主要从法兰的刚度因子、垫片外边缘应力和介质泄漏流量及外边缘泄漏介质最小可检测量三个方面进行考查,校核结果如表 5 所示.

表 5 刚度校核结果

Table 5 Results of rigidity check

考查对象	考查参数	计算值	允许值	校核结果
法兰	刚度因子	预紧状态	<1	合格
		操作状态		
垫片	外边缘最大应力/MPa	预紧状态	<151.580	合格
		操作状态		
	外边缘最小应力/MPa	预紧状态	>6.201	合格
		操作状态		
工作介质	泄漏量(kg/y)	0.033	38.26	合格
	边缘可查泄漏率/%	167.371×10^6	1968.49×10^6	合格

注: 1. 分析所选用的代表性流体为氯甲烷; 2. 允许值由 ASME 标准计算, 工作介质泄漏允许值来源于 EPA/API.

3.2.2 泄漏预判断方法及应用 法兰泄漏是一个非常复杂的问题,涉及到法兰形式、法兰等级、垫片属性、螺栓以及相对刚度、预紧力、法兰温

度梯度和外部载荷等因素^[13-14],并且垫片应力在外部载荷作用下的变化是个高度非线性的复杂问题,所以对法兰在操作工况且有外部弯矩作用下

的泄漏进行预判断,是非常困难的.然而,无论是在法兰设计中,还是法兰校核中,对法兰泄漏情况进行定量预判断都有着非常现实的意义.像 ANSYS、Abaqus 等有限元软件解决这类问题计算过程比较复杂,下面主要是结合专门用于法兰连接分析的有限元软件(AxiPRO)对法兰泄漏预判断方法的探讨及应用,该软件采用的是 ASME BFJ(Bolted Flange Joint)法则和垫片非线性属性模型.

由文献可知:依据垫片的应力分布可以推断法兰的泄漏情况及泄漏趋势^[12].所以选择垫片的应力分布作为法兰泄漏预判断的依据,具体判断步骤如下:

(1)确定垫片的最大应力要求和最小应力要求

垫片的最小应力要求是保证法兰连接不泄漏的最低标准,最大应力要求是保证垫片有效性能的最大值.

实例中,通过软件计算可得垫片的最小应力要求为 6.201 MPa(保证密封性),最大应力要求为 151.580 MPa(保证垫片正常的力学性能).

(2)分析垫片的应力分布情况

实例中垫片的应力分布情况如图 5 所示.

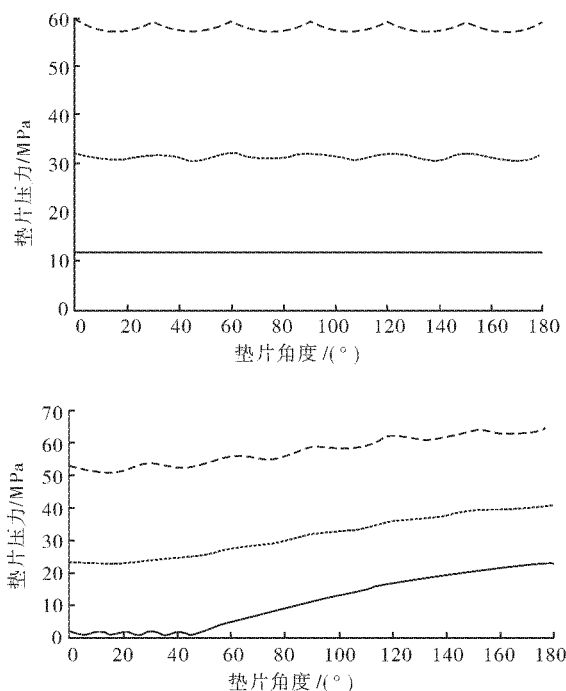


图 5 垫片应力分布

Fig. 5 Gasket stress distributions

注:垫片中心距(mm)——108.9; ·····121.9; ---134.9

由图 5 可知:①在预紧状态下,垫片的应力分布沿径向由内向外逐渐增大,外边缘最大应力约 59 MPa,位于螺栓的连接部位,此处由于螺栓预紧

力的作用使得垫片应力最大.②在操作状态下,受压侧垫片外边缘的最大应力上升到 65 MPa,受拉侧降到 51 MPa.

(3)预判断垫片的泄漏情况

由步骤(2)的分析结果可知:极端情况下的垫片应力分布都在许用应力范围内,理论上不会泄漏,即使要泄漏的话,泄漏最易发生在以 1#螺栓(迎风侧)为中心顺时针偏转 18°和逆时针偏转 18°的地方.

除此之外,还可以通过分析有限元软件的计算结果,寻查法兰的泄漏原因.众所周知,塔设备连接法兰的泄漏主要与法兰刚度、垫片类型、安装质量、螺栓预紧力和外部载荷等因素有关,可以控制单一因素,用有限元分析软件进行计算分析,寻查具体情况下的法兰泄露原因,若是垫片选择问题,可以考虑更换垫片;若是安装问题,可以考虑提高安装质量;若是螺栓预紧力不够,可以紧固螺栓;若是外部载荷过载,可以考虑降低外部载荷.

4 结 语

a. 在组合载荷的作用下,较大应力集中在法兰和塔节的连接处、法兰锥颈处、螺柱与螺孔的接触面和螺柱与螺母的接触面上;

b. 外部弯矩的变化对螺栓应力的影响不是很大,主要是引起垫片应力的再分布;

c. 垫片在外部弯矩的作用下,应力分布沿径向由内到外应力逐渐增大,最大应力集中在垫片的外边缘;

d. 外部弯矩下的法兰泄漏预判断问题可以参考有限元的计算结果进行分析,该判断方法简单易操作;

e. 运用有限元软件进行计算分析,可以寻查法兰泄漏原因,为解决法兰泄漏问题提供理论依据及更佳解决方案.

参考文献:

- [1] 苏改. 冲压松套钢制管法兰的力学性能研究[D]. 无锡:江南大学,机械工程学院力学性能研究所,2009.
- [2] American Petroleum Institute. API Recommended Practice 581, Risk Based Inspection Technology[S]. America:2008 American Petroleum Institute, 2008.
- [3] GB150-1998 钢制压力容器[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会,1998.
- [4] JB4710-2005 钢制塔式容器[S]. 北京:国家发展和改革委员会,2005.
- [5] 张志. 法兰泄漏的校核及评定[J]. 城市建设理论研究,2011(31):10-16.

- [6] 蔡洪涛. 压力容器法兰的参数化绘制方法 [J]. 武汉工程大学学报, 2010, 32 (9): 86-89.
- [7] HG20625-1997 钢制管法兰压力—温度等级(美洲体系) [S]. 北京: 中华人民共和国化学工业部, 1998.
- [8] HG20606-1997 钢制管法兰用非金属平垫片(欧洲体系) [S]. 北京: 化工部设备设计技术中心站, 1997.
- [9] HG20593-1997 板式平焊钢制管法兰(欧洲体系) [S]. 北京: 化工部设备设计技术中心站, 1997.
- [10] ASME SEC VIII Div1 Appendix 2 锅炉及压力容器规范[S]. 北京: ASME 锅炉及压力容器委员会, 2007.
- [11] API 605-1988 大口径碳钢法兰[S]. 美国: 美国石油协会, 1988.
- [12] 周德红, 王六九. 氯气泄漏扩散风险分析[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33 (6): 76-78.
- [13] 张旭. 压力管道设计中法兰校核方法探讨[J]. 石油与化工设备, 2010(5): 5-9.
- [14] 张红卫, 陈刚, 刘岑, 等. 标准椭圆对三薄壁内压圆筒承载能力的影响[J]. 武汉工程大学学报, 2010, 32 (3): 103-106.

Study and application on checking method of tower equipment connecting flanges

LIU Wan-peng, SHI Zhe-xiong, HE Rong-e, ZHOU Yang

(School of Science and Technology, East China University, Shanghai 200237, China)

Abstract: To solve the reliability problem of flange connection which is caused by the corrosion of tower equipment in the petrochemical industry and to decrease the accident rate in producing process, the finite element checking method of flange was discussed. Combined with the analysis of engineering project example, a finite element method was put forward to test the intensity and rigidity of the flanges under the combined action of internal and external loads. This method overcame the disadvantages that the check and design standards of flanges only considered the calculation of intensity regardless of the impact of external loads; Firstly, the intensity of the flange connection system was checked to ensure the intensity requirement. Secondly, the sealing characteristic of the flange was calculated, and the leakage situation and trends were predicted according to the stress distribution of the gasket. Finally, a finite element analysis process for pre-judgment of the flange leakage was presented.

Key words: flange; bolt; leakage; finite element

本文编辑: 陈小平