

最大的应力值 $\leq 3S_m^{[13]}$, 最大应力上限

$$S_{max} = 574.29 \text{ MPa}。$$

4.3 设计变量设置

本次优化选取夹套厚度 S_2 、短管壁厚 t 、短管直径 d 及短管间距 H 等参数作为设计变量, 具体如表 4 所示。

表 4 选取设计变量参数

Table 4 Design variable parameters

参数	短管壁厚	短管直径	短管间距	夹套厚度
	t/mm	d/mm	H/mm	S_2/mm
上限	4	130	500	6
下限	12	180	1 000	18

4.4 优化结果分析

如图 7 所示, 采用零阶优化设计方法来优化计算, 在迭代次数为第 12 次时, 目标函数达到最优。

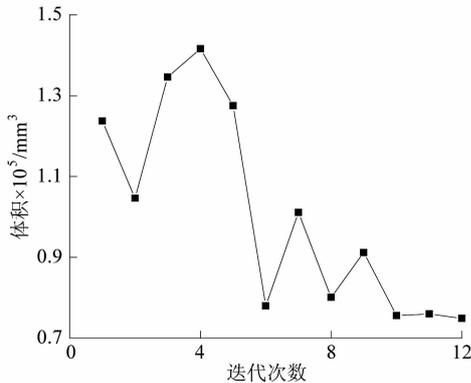


图 7 目标函数随迭代次数变化规律

Figure 7 Change rule of objective function with numbers of iterations

由迭代结果可知, 优化前的体积为 $1.237 \times 10^5 \text{ mm}^3$, 优化后的体积为 $0.749 \times 10^5 \text{ mm}^3$, 体积减少了

表 6 优化后的强度评定结果

Table 6 Results of strength evaluation after optimization

部位	路径	P_L		$P_L + P_b + Q$			
		应力值/MPa	评定结果 $1.5S_m/\text{MPa}$	应力值/MPa	评定结果 $3.0S_m/\text{MPa}$	评定结果	
筒体	Path1	41.97	274.50	合格	153.40	549.00	合格
夹套	Path2	88.24	286.95	合格	108.60	573.90	合格
短管	Path3	186.30	201.75	合格	301.80	403.50	合格

4.4.2 优化后模型的疲劳校核

优化后的疲劳计算云图如图 9 所示。

最危险点位于短管与夹套结构焊脚外壁处, 夹套材质为 Q345, 短管的材质为 S30408, 参考 JB/T 4732-1995 (2005 年确认) 附录 C-1 和表 C-1 为标准。

最大应力幅的修正值

$$S_a = 0.5 S_{rij} \frac{E}{E_t}$$

最大应力幅的修正值 $S_a = 277.78 \text{ MPa}$, 得循环次数为 $14\ 503 > 10\ 000$ 。

累积使用系数

$$U_2 = \frac{10\ 000}{14\ 503} = 0.68 < 1.0,$$

39.4%, 即质量减少了 39.4%。

优化后各参数值如表 5 所示。

表 5 优化后的各参数结果

Table 5 Parameters after optimization

短管壁厚	短管直径	短管间距	夹套厚度
t/mm	d/mm	H/mm	S_2/mm
4.51	147.49	952.68	8.37

综合考虑: 选取短管壁厚 5 mm、短管直径 148 mm、短管间距 960 mm、夹套厚度 11 mm 作为优化结果。

4.4.1 优化后的应力强度分析

为安全考虑, 退回到模型应力计算分析, 计算结果如图 8 所示。

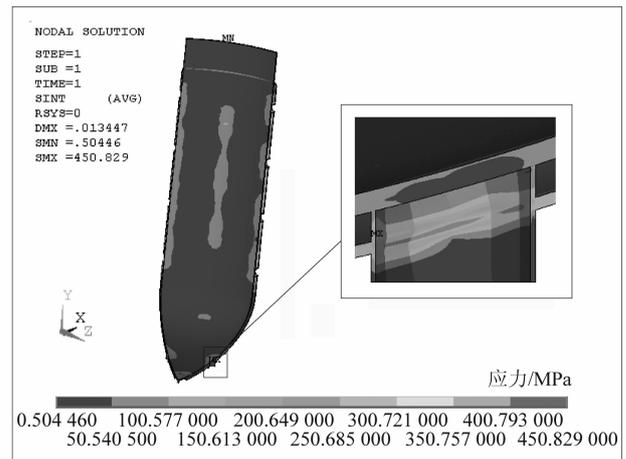


图 8 优化后夹套反应釜结构计算应力云图

Figure 8 Calculated stress cloud of optimized jacketed reactor structure

应力计算结果的校核如表 6 所示。

故疲劳校核合格。

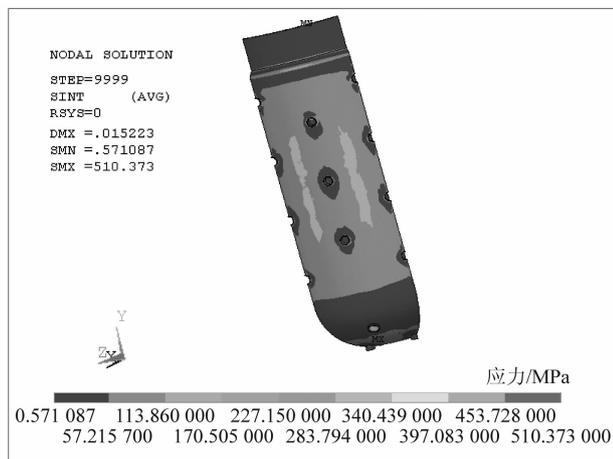


图9 疲劳计算应力云图

Figure 9 Cloud map of fatigue calculation stress

5 结论

采用有限元 ANSYS 优化短管和夹套的尺寸,对设计和生产制造有重要意义。通过课题组的分析研究,可以得出以下结论:

1) 优化前后应力强度最大点均位于短管与夹套结构焊脚外壁处。由于短管的存在,其变形量较小,大大的提高了夹套反应釜的整体刚度。

2) 在夹套反应釜的结构优化之后,反应釜质量减少了 39.4%,降低了生产制造成本。

3) 优化后的结构相比优化前的结构,改善了因传统设计尺寸不当造成的材料浪费。

(上接第 84 页)

速作为流场的衡量指标,从风速到动压方差经过了 2 次平方的放大,所以风速的变化为动压方差之商开四次方所得的结果,即为 1.2 倍。可以很直观地看到风量调节机构的引入带来的变化。

4 结语

针对现在普遍使用的烟熏炉存在的烟熏不均匀的现象,提出一种用于改进加热仓流场分布的进风口风量调节机构,得到符合工程应用的机构各项参数。从仿真和实验结果数据的比较来看,很明显地可以发现风量调节装置对加热仓带来的流场变化符合预期,可以有效改善生产中存在的问题。但是,由于实验条件有缺陷,笔者仅仅是对加热仓空仓状态下的风循环流场进行了研究,而对于加热仓满仓状态下流场则有待进一步研究。

4) 有限元法在此类夹套结构设计中具有指导意义,具有参考价值。

参考文献:

- [1] 陈彬,李庆生.大型薄膜蒸发器夹套结构传热性能数值模拟[J].石油化工设备,2013,42(6):22.
- [2] 庞冠.蜂窝夹套式薄膜蒸发器的设计研究[D].北京:北京化工大学,2013:51.
- [3] 宋晔明,马俊峰,孙中飞.基于 ANSYS 软件的钢制三通有限元应力分析[J].煤气与热力,2012,32(3):1.
- [4] 姚扬,董金善,范森.W形筒体外置蜂窝夹套应力分析与结构优化设计[J].化工机械,2016,43(6):744.
- [5] 吴迎春,王蓓蓓.化工生产中夹套容器内筒加强结构的设计[J].天津化工,2014,28(3):50.
- [6] 化工设备设计全书编辑委员会.搅拌设备设计[M].上海:上海科学技术出版社,1983.
- [7] 美国机械工程师学会.压力容器建造规则[G].VIII-1.北京:中国石化出版社,2000.
- [8] 冯军军,刘麟,顾伯勤.外弯矩和蠕变对螺栓法兰连接紧密性的影响[J].机械设计与制造,2011(5):188-190.
- [9] 高明,李庆生.长圆形开孔平盖结构优化设计[J].化学工程与装备,2017(7):182-185.
- [10] 卢艳玲,董金善,朱星榜,等.基于 ANSYS 的矩形容器强度分析及结构优化[J].轻工机械,2016,34(3):92-96.
- [11] 谭伟,卢艳玲,董金善.基于极限载荷分析法的矩形容器结构优化[J].轻工机械,2017,35(4):23-27.
- [12] 余伟炜,高炳军,陈洪军,等. ANSYS 在机械与化工装备中的应用[M].2版.北京:中国水利水电出版社,2007.
- [13] 王兴文,董金善,王学明,等.整体相连齿啮式快开结构强度分析及优化设计[J].机械强度,2016,38(3):640-644.

参考文献:

- [1] 于连江.肉制品加工烟熏炉的技术特点[J].养殖技术顾问,2013(7):249.
- [2] 汤定明.肉制品加工中的烟熏技术[J].肉类研究,2007(2):36-39.
- [3] 鞠红香.管壳式换热器流动与传热的研究[J].机电产品开发与创新,2015,28(3):103-104.
- [4] 杨红江.低温热管换热器的设计和应用[J].城市建筑,2015(11):378.
- [5] 顾荣利,陈海云.多管式热交换器换热过程数值模拟[J].化工装备技术,2010,31(5):20-21.
- [6] 焦凤,邓先和,孙大力,等.管束排列及管间距对换热器传热性能的影响[J].石油学报(石油加工),2013,29(5):836-843.
- [7] 于鹏,王二龙.浅议换热器强化传热技术[J].化工管理,2015(24):113.
- [8] 施明,刘红,李伟国,等.烟熏炉加热仓流动性能研究[J].轻工机械,2016,34(4):79-82.
- [9] 陈斐奇,祝高永,刘红,等.烟熏炉换热器进口主流道流动性改进[J].轻工机械,2014,32(6):101-103.

[环保·安全]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.03.018

锅炉烟道气吸附塔强度校核与寿命估算

黄世钊¹, 吴林杰¹, 向冰²

(1. 广西大学 化学化工学院, 广西壮族自治区 南宁 530004;
2. 广西工业技师学院 电气应用技术系, 广西壮族自治区 南宁 530031)

摘要:由于广西某糖厂锅炉烟道气变压吸附塔在设计时没有进行应力和安全性分析,为使糖厂锅炉烟道气浓缩变压吸附系统更好、更安全的运行,采用有限元分析软件 ANSYS 对变压吸附塔整体进行应力分析、强度校核及疲劳寿命估计。结果发现,吸附与解吸过程中的最大应力分别为 125.43 和 24.13 MPa,结合分析设计(校核)理论,得出糖厂锅炉烟道气浓缩吸附塔在强度、稳定性方面都符合安全要求。设计疲劳寿命大于 27 年,即在正常操作下,吸附塔还可以再运行 20 年以上。

关键词:吸附塔;应力分析;强度校核;疲劳分析;ANSYS 软件

中图分类号:TP274 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)03-0094-06

Intensity Check and Life Estimation of Boiler Flue Gas Adsorption Tower

HUANG Shizhao¹, WU Linjie¹, XIANG Bing²

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;
2. Department of Electrical Application Technology, Guangxi Petrochemical Advanced Technical School, Nanning 530031, China)

Abstract: Due to the design of pressure swing absorption tower in Guangxi sugar refinery boiler flue gas without stress and safety analysis, in order to make sugar mill boiler flue gas concentration PSA system better and safer operation, adopted ANSYS analysis software on the overall adsorption tower stress analysis, strength check and fatigue life estimation. It is found that the maximum stress in the process of adsorption and desorption is 125.43 and 24.13 MPa respectively. According to the theory of combined analysis and design, the results show that in this paper, the strength and stability of flue gas condensing adsorption tower of the sugar refinery meet security requirement; the design fatigue life is more than 27 years, that is, under the normal operation, the adsorption tower can also run for 20 years.

Keywords: adsorption tower; stress analysis; intensity check; fatigue analysis; ANSYS

吸附塔是实现混合物分离的一种设备,其工作原理是利用吸附剂在不同压力和温度下对不同介质(吸附质)具有不同的吸附容量,即不同操作条件(温度或压力)吸附剂能吸附不同容量的吸附质,从而达到混合物分离的目的^[1]。通常吸附塔这类设备在交变载荷下工作,所以需要进行疲劳分析。文中的烟道气浓缩工艺采用的是变压吸附,其工作步骤一般为升压、吸附、降压及解吸等^[2]。通常压力容器的疲劳分析是以应力分析为基础,确定应力幅值,再结合设计疲劳曲线确定许用循环次数^[3]。孙云路^[4]对中型立式吸附器进行了不同软件对比分析设计,得出了较好的效果;刘

冉冉^[5]采用 ANSYS 软件对制氢吸附器进行安全评定,得出吸附器的各危险截面都符合安全要求,并根据分析结果对吸附器结构进行了优化;张强^[6]对超期服役状态的吸附塔进行试验与 ANSYS 分析相结合的方法对吸附塔进行安全评定,得出吸附塔还处于安全状态,还能继续工作的结论。笔者采用 ANSYS Workbench 对吸附塔进行整体的应力分析,结合 JB/T 4732-1995《钢制压力容器-分析设计标准》^[7]¹⁰³进行危险截面的强度校核、解吸过程的稳定性校核及疲劳循环寿命估计。

1 吸附塔的结构和参数

笔者的研究对象是广西某糖厂锅炉烟道气浓缩的

收稿日期:2017-09-18;修回日期:2017-11-30

基金项目:广西科技成果推广与产业化示范项目(桂科产 1099051)。

第一作者简介:黄世钊(1963),男,壮族,广西桂平人,副教授,主要研究方向为化工过程设备技术。E-mail:huangsz@gxu.edu.cn

变压吸附塔,属于薄壁容器,采用标准椭圆形封头,支撑方式为裙座支撑。按《固定式压力容器安全技术监察规程》^[8]中,根据介质、设计压力及容积分类,吸附塔属于 I 类容器。主要流道为从下封头的进口管经过中间吸附剂,再到上封头的出口管。原料成分主要为 N₂ 和 CO₂。表 1 所示为吸附塔的主要结构尺寸和参数。图 1 所示为吸附塔的简图。

表 1 吸附塔的主要结构尺寸和操作参数表

Table 1 Main structure sizes and operation parameters table of adsorption tower

设计压力/MPa	周期/s	筒体直径/mm	筒体长度/mm
0.098~0.200	240	2 000	3 500
筒体厚度/mm	腐蚀裕量/mm	设计温度/℃	筒体/封头/接管材质
12	2	50	Q345R/Q345R/20 钢

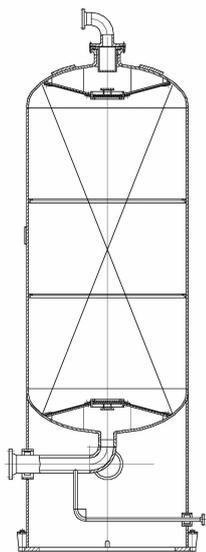


图 1 吸附塔简图

Figure 1 Diagram of adsorption tower

吸附塔复杂的细小结构对应力分析几乎没有影响,所以在 ANSYS 应力分析计算中对吸附塔结构进行简化。①吸附塔本身的结构(筒体、封头、裙座及接管等)以及其载荷、约束基本为轴对称,可将模型简化为 2D 轴对称模型,在满足实际工程要求的同时减少建模误差(在相同网格数量的气体前提下,增加了模拟的计算精度);②假设焊缝与筒体/封头材料物理性质一样;③忽略对吸附塔应力分析不影响的结构,把这些结构的质量按局部载荷进行等量化,如上、下气体分布器和分布器支撑结构以及吸附剂的质量;④假设吸附塔采用的材料符合连续性、均匀性及各向同性等理想条件;⑤吸附塔的变形为微小变形。表 2 所示为吸附塔

的主要材料的参数。

表 2 吸附塔的主要材料参数

Table 2 Main material parameters of adsorption tower

部位	材料	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	弹性模量/GPa	50℃设计应力强度/MPa
筒体	Q345R	7 860	0.30	206	196
(上、下)封头	Q345R	7 860	0.30	206	196
(上、下)接管	20 钢	7 850	0.25	204	151
裙座	Q345R	7 860	0.30	206	196
支撑环板	Q235-A	7 850	0.30	210	157

2 吸附塔的应力分析与强度校核

2.1 有限元模型建立

根据表 1 实体建模,得出吸附塔实体模型如图 2 所示。



图 2 用于应力分析的吸附塔实体模型

Figure 2 Physical model of adsorption tower for stress analysis

在应力分析过程中,实体模型的网格划分起着关键性的作用。网格采用 1~3 mm 的自由方式进行划分。由于压力容器的高应力区一般在结构或载荷的不连续区域,如封头接管处、筒体封头交接处及筒体封头鞍座连接处等。所以在进行网格划分时需要把这些高应力区域的网格进行加密处理。

根据糖厂锅炉烟道气浓缩吸附塔的实际操作情况可以对其边界条件进行以下设定:①变压吸附过程中的介质压力通过面力的形式作用于吸附塔表面;②由介质压力引起的上、下接管端面的轴向力以面力的形式作用于接管端面;③吸附塔自重以重力加速度的形式进行加载;④裙座底部采用固定约束;⑤吸附剂的质量进行简化处理,因为吸附剂作用在支撑环板上,即支撑环板可简化为梁结构处理,所以在进行内、外压载荷应力分析时,不对其考虑;⑥由于变压吸附过程可以看成等温操作过程,所以忽略热应力的影响;⑦忽略风、地震等自然载荷的影响;⑧忽略变压吸附操作系统

中其它设备和工艺管线对吸附塔的影响。

2.2 应力结果分析

根据设定条件,分别对吸附和解吸过程的应力进行模拟分析,得出:吸附塔在吸附和解吸过程中的最大应力分别为 125.43 和 24.13 MPa。图 3 所示为吸附过程上、下接管区应力分布云图。

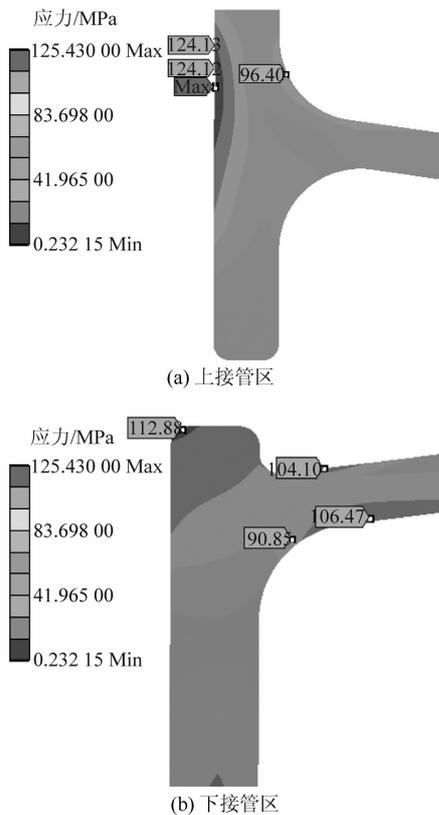


图 3 吸附过程上、下接管区应力分布云图
Figure 3 Stress distribution cloud in upper and lower area of adsorption process

由图 3 可以看出上、下接管附近都是应力比较大的区域,所以上、下接管和接管封头连接处都要进行线性化分析。图 4 所示为解吸过程上、下接管区的应力分布。

2.3 强度校核

2.3.1 应力评定路径的选取

因为压力容器的高应力区一般为结构和材料的不连续区或几何结构比较复杂的位置,笔者根据应力分析和吸附塔的实际情况选取 7 条路径进行评定。7 条路径分别为:下封头接管区 path1、path2;筒体裙座连接处 path3;下封头筒体连接处 path4;上封头筒体连接处 path5;上封头接管区 path6、path7。图 5 所示为应力评定路径位置。

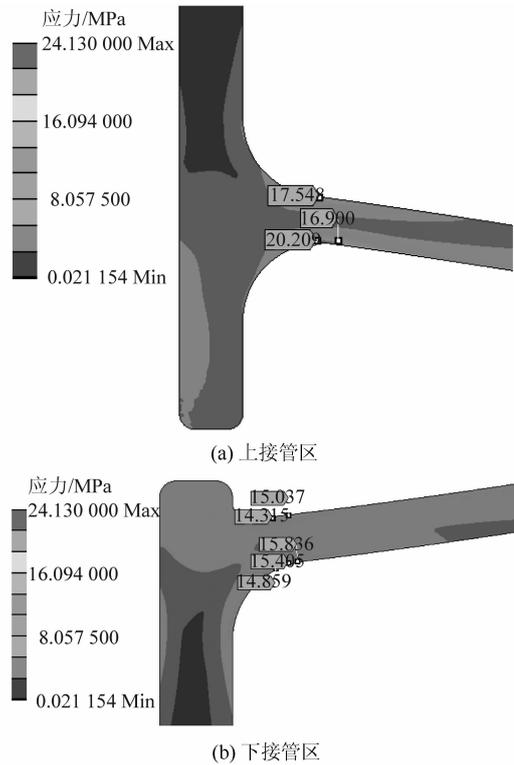


图 4 解吸过程上、下接管区的应力分布
Figure 4 Upper and lower stress distribution of desorption process

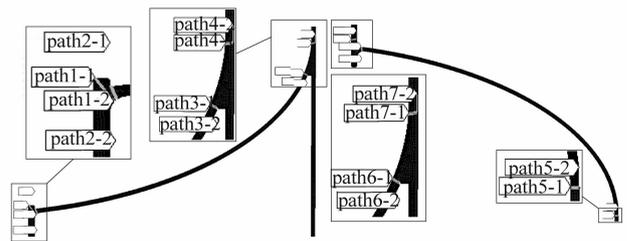


图 5 应力评定路径位置
Figure 5 Stress evaluation path location

2.3.2 强度评定结果

根据标准 JB/T 4732—1995 中表 4-1 一些典型情况的应力分类^{[7]14},得出:①在接管或其他开孔区域附近,承受外部载荷或内压,应考虑局部薄膜应力、弯曲应力及峰值应力;②封头筒体应考虑薄膜应力、弯曲应力。根据标准 JB/T 4732—1995 表 6-2 钢板的设计应力强度和表 6-4 钢管的设计应力强度,得出吸附塔中 16 MnR 钢板的设计应力强度为 196 MPa,20 钢管的设计应力强度为 151 MPa^{[7]24}。根据标准 JB/T 4732—1995 中表 3-3 载荷组合系数 K,得出本文中载荷组合系数 K 的取值为 1.0^{[7]6}。由以上条件和各路径的应力分析,可以得出吸附载荷下的评定结果如表 3 所示。

表3 吸附载荷下的评定结果

Table 3 Evaluation results under adsorption load

评定路径(位置)	S_{II}/MPa	S_{III}/MPa	S_V/MPa	许用应力 S_m/MPa	评定标准	评定结果
path1(接管)		121.800		151.000	$\leq 1.5KS_m$	合格
			113.450	151.000	$\leq 1.0KS_m$	合格
path2(接管/封头)		109.040		196.000	$\leq 1.5KS_m$	合格
			98.160	196.000	$\leq 1.0KS_m$	合格
path3(封头)	51.063			196.000	$\leq 1.5KS_m$	合格
		57.007	196.000	$\leq 1.5KS_m$	合格	
path4(筒体)	33.917			196.000	$\leq 1.5KS_m$	合格
		74.258	196.000	$\leq 1.5KS_m$	合格	
path5(封头)	32.207			196.000	$\leq 1.5KS_m$	合格
		37.988	196.000	$\leq 1.5KS_m$	合格	
path6(接管/封头)		74.079		196.000	$\leq 1.5KS_m$	合格
			91.733	196.000	$\leq 1.0KS_m$	合格
path7(接管)		125.410		151.000	$\leq 1.5KS_m$	合格
			124.670	151.000	$\leq 1.0KS_m$	合格

表3中, S_{II} 为一次薄膜应力强度,MPa; S_{III} 为一次薄膜加一次弯曲应力强度,MPa; S_V 为峰值应力强度,MPa; S_m 为许用应力强度,MPa。

由表3可知,在吸附载荷下吸附塔的各危险截面都满足强度要求。且吸附条件下的最大载荷 S_{III} 为125.41 MPa、 S_V 为124.67 MPa远小于其许用载荷226.5和151 MPa。而由上文可知,解吸载荷下的最大应力值远小于吸附载荷下的最大应力值,所以在解吸条件下强度也都是安全的。

3 稳定性分析

薄壁回转壳体的失稳时壳壁压缩应力通常低于材料的比例极限,考虑稳定性时,需要同时考虑轴向压缩载荷和周向压缩载荷。

3.1 筒体的稳定性分析

周向均布载荷稳定性分析,由过程设备设计^{[9]60}可知吸附塔筒体属于短圆筒,其临界压力

$$P_{cr} = \frac{2.59Et^2}{LD_0 \sqrt{D_0/t}},$$

$$[P] = \frac{P_{cr}}{m} = \frac{1.390}{3} = 0.433 \text{ MPa} > P = 0.1 \text{ MPa}。$$

式中: E 为材料的弹性模量,MPa; L 为等效长度,mm; D_0 为筒体外径,mm; t 为筒体厚度,mm; P 为设计压力,文中定为0.1 MPa; m 为稳定性安全系数。

即吸附塔的筒体在设计压力下不会发生失稳。

3.2 封头的稳定性分析

因为吸附塔的封头为标准椭圆形封头,过程设备设计^{[9]68}中认为标准椭圆封头可以用球壳封头的临界压力加以修正进行替代。球壳封头的临界压力为

$$P_{cr} = 1.21E \left(\frac{t}{R_0} \right)^2。$$

式中, R_0 为内半径。

根据过程设备设计^{[9]190},标准椭圆封头内半径 $R_0 = K_1 D_0$ 。其中 K_1 为等效系数,取值为0.90。则吸附塔封头的临界压力

$$P_{cr} = 7.512 \text{ MPa},$$

$$[P] = \frac{7.512}{14.52} = 0.517 \text{ MPa} > P = 0.1 \text{ MPa},$$

所以吸附塔封头也不会发生失稳。

综上所述,糖厂锅炉烟道气浓缩吸附塔稳定性合格。

4 疲劳分析和寿命估计

疲劳分析一般在应力分析之后,使用中应力强度范围的最大应力值(TOTAL值)进行疲劳计算。根据应力分析结果结合过程设备设计^{[9]194},可知在吸附和解吸的最大应力都在path7(属于接管区域)的位置,分别为125.43和24.13 MPa。所以交变应力幅为

$$S_{alt} = \frac{1}{2} \times [\sigma_{1max} - (-\sigma_{2max})] = 74.78 \text{ MPa}。$$

式中: S_{alt} 为计算应力幅,MPa; σ_{1max} 、 σ_{2max} 为吸附、解吸过程中最大应力,MPa。

接管的弹性模量 E_1 为204 GPa;筒体/封头的弹性模量 E_2 为206 GPa。而标准JB/T 4732—1995附录C中给出的温度不超过375℃的碳钢、低合金钢的设计疲劳曲线中 $\sigma_b \leq 552 \text{ MPa}$ 的曲线来确定允许循环次数^{[7]171}。该曲线指出材料的弹性模量

$$E_0 = 210 \text{ GPa}。$$

使用弹性模量修正系数对吸附和再生时的交变应力幅值进行修正。

则 S_{alt}' = S_{alt} \times \frac{E_0}{E} = 77.07 MPa。

而标准[7][17]中对应循环次数为 10^6 时,许用压力幅为 84.1 MPa。所以有 S_{alt}' = 77.07 MPa < 84.1 MPa,即糖厂烟道气浓缩吸附塔的疲劳循环次数大于 10^6。根据实际糖厂吸附塔的操作情况,该吸附塔年循环次数

N = (100 \times 24 \times 3600) / 240 = 36 000。

广西某糖厂锅炉烟道气吸附塔实际已经运行 7 年,按循环次数计算,说明在正常操作的情况下,该吸附塔还能运行 20 年。

5 “截面法”校核吸附塔的有限元应力分析

截面法是材料力学中求内力的一种方法。其基本分析步骤为:①沿需求内力的截面假想截开,取其中一部分进行分析;②对①中分析的部分建立平衡方程;③求解方程。

5.1 内力计算

吸附塔属于薄壁容器,且受力变形属于弹性小变形。根据材料力学中的三向应力分析知道,在内压 P 的作用下,容器壁上任意一点 A 都受到轴向力 \sigma_{\varphi}、周向力 \sigma_{\theta} 和径向力 \sigma_r 作用。由于径向力 \sigma_r 相对于轴向力 \sigma_{\varphi} 和周向力 \sigma_{\theta} 要小许多,所以在薄壁容器分析可以忽略。根据平衡方程有

\frac{\pi}{4} D_i^2 P = \pi D t \sigma_{\varphi}。

即 \sigma_{\theta} = \frac{P D_i}{2 t};

2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} P R_i \sin \alpha d\alpha = 2 t \sigma_{\theta}。

式中:D_i 为筒体内径,mm;MPa;D 为容器中径,mm;\alpha 为压力与竖直面夹角。

所以有

吸附过程: \sigma_{x\varphi} = 31.12 MPa;

\sigma_{x\theta} = 62.33 MPa。

解吸过程: \sigma_{j\varphi} = -4.64 MPa;

\sigma_{j\theta} = -8.43 MPa。

又 \sigma_{\theta} > \sigma_{\varphi},所以周向应力为主应力 \sigma_1、轴向应力为中间应力 \sigma_2。

5.2 有限元模型校核

因为截面法只能计算远离不连续截面处的应力,所以根据文中的模拟结果,取远离不连续处的筒体节点应力。图 6 所示为吸附过程中不连续处的 \sigma_1、\sigma_2 分

布情况,由图 6 得 \sigma_1 = 63.7 MPa、\sigma_2 = 32.25 MPa。图 7 所示为解吸过程中的 \sigma_1、\sigma_2 分布图,由图 7 得 \sigma_1 = -4.7 MPa、\sigma_2 = -8.5 \times 10^{-2} MPa。

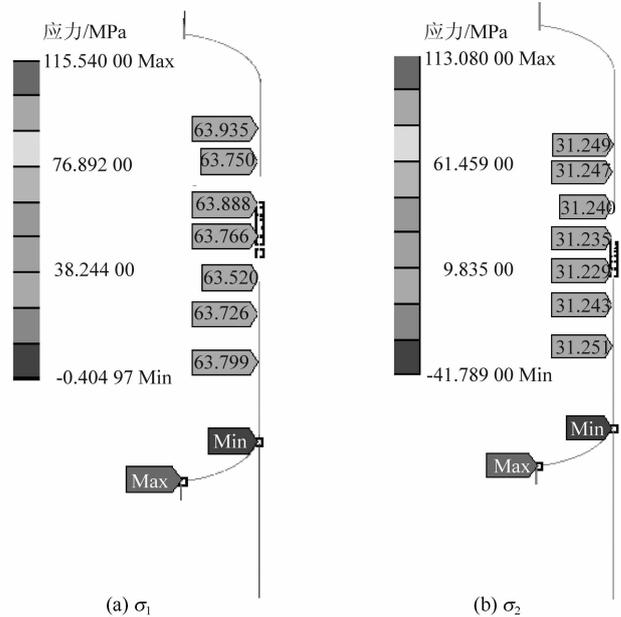


图 6 吸附过程中不连续处的 \sigma_1 和 \sigma_2 分布情况 Figure 6 Distribution of \sigma_1 and \sigma_2 discontinuity in process of adsorption

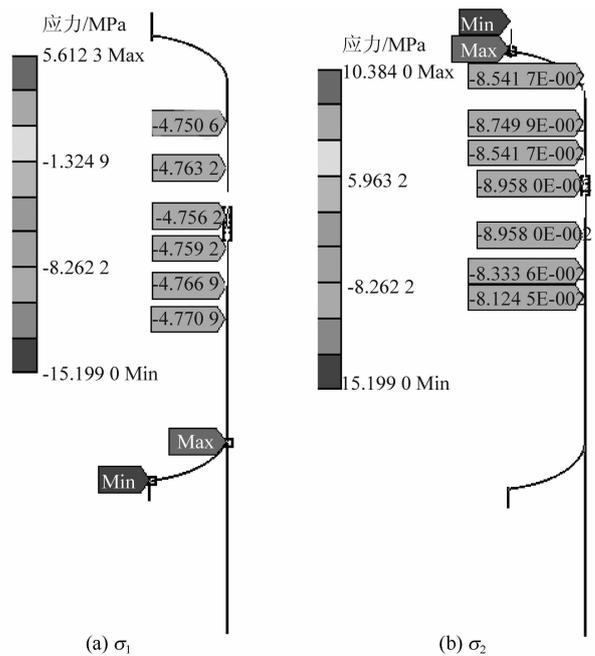


图 7 解吸过程中的 \sigma_1 和 \sigma_2 分布情况 Figure 7 Distribution of \sigma_1 and \sigma_2 in process of desorption