

[环保·安全]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.05.017

# 水平管蒸发器薄管板设计计算及结构验证

于亚菲, 陈 晔, 安超凡, 程 松

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816)

**摘 要:**管板拥有比较复杂的受力情况,为确保水平管蒸发器能更好地承担压力,并且最大限度降低制造成本,管板的设计和改进行显得更为迫切。将各种设计标准比较,选出较为适合水平管蒸发器薄管板设计计算的管板计算式,对新型薄管板的厚度进行预计算,根据经验得出预设管板厚度。利用 ANSYS 对改进后的水平管蒸发器进行强度分析,验证薄管板的厚度是否符合要求。经过分析得到的结果充分表明新型薄管板满足了设计要求,并且管子的扭曲变形度能够使水平管蒸发器在使用时满足布液要求,从而在保证蒸发效率的前提下,实现了水平管蒸发器的轻量化设计。

**关 键 词:**水平管蒸发器;预计算;薄管板;ANSYS 软件;扭曲变形度

中图分类号:TK172 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2017)05-0076-05

## Design Calculation and Structural Verification of Thin Tube Sheet for Horizontal Tube Evaporator

YU Yafei, CHEN Ye, AN Chaofan, CHENG Song

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** Tube-sheet has more complicated force situation, to ensure the horizontal tube evaporator can better bear the pressure and minimize manufacturing costs, the design and improvement of tube-sheet is even more urgent. Comparing various design standards, selected more suitable formul for the design and calculation of the thin tube sheet of horizontal tube evaporator, precomputed for the thickness of the thin tube-sheet, according to the experience the thickness of preset tube-sheet was obtained. Intensity stress analysis of the improvement horizontal tube evaporator was carried out by ANSYS to verify whether the thickness of the thin tube-sheet meet the requirements. The results through the analysis are fully indicated, the new thin tube sheet meets the design requirements, and the buckling deformation of the tube enables the horizontal tube evaporator meet the requirements of liquid distribution, under the premise of ensuring the evaporation efficiency, achieve the lightweight design of horizontal tube evaporator.

**Keywords:** horizontal tube evaporator; precomputation; thin tube sheet; ANSYS; buckling deformation degree

工业废水的排放量逐年增长,严重的水污染情况加剧了水资源的短缺。寻找高效率、低耗能的技术实现废水排放的同时回收淡水资源的方法迫在眉睫。水平管降膜蒸发被广泛用于石化和海水淡化的技术上,属于短程蒸馏方法<sup>[1]</sup>。水平管降膜蒸发的结构优化至关重要,不同管束结构、管间距以及液体的初始流速对管外液体流动影响强烈<sup>[2]</sup>。对于水平管蒸发器来说,由于管板的受力情况比较复杂,其在水平管蒸发器中担任着重要承压原件的角色,并且厚管板加工困难、耗材量大、浪费资源,这就导致了薄管板技术的发展。

非标设备很难选择相关标准进行设计计算,参考各种标准,计算出预设管板厚度。应用 ANSYS 有限元软件建立结构模型,对预设管板厚度进行结构验证,分析结构稳定性,达到管板更薄,设备质量更小,并且保证设备安全运转的目的。

### 1 薄管板常用的计算方法

薄管板换热器的管板一般有椭圆形、挠性以及平板3种,本次研究主要讨论的是固定管板式圆平板形薄管板的强度计算和设计方法。所谓薄管板是相对于较厚的管板而言,一般厚管板厚度为40 mm,而薄管板

收稿日期:2017-03-20;修回日期:2017-05-02

第一作者简介:于亚菲(1990),女,河北唐山人,硕士,主要研究方向为过程设备先进制造技术。E-mail:yyf71795@163.com

一般厚度为 14~18 mm。自从从德国将薄管板换热器引进到国内后,其在生产实践中的诸多优点引起大家的广泛关注<sup>[3]</sup>。目前,相关的标准、规定以及规范在国内还未颁布出来。常用的薄管板设计方法有美国 TEMA 标准以及国标 GB 151 热交换器和德国 AD 规范等。由于薄管板应充分考虑管束对管板的加强作用从而来建立数学模型,接下来将通过分析比较或简化公式,推出比较适合薄管板的计算公式以及设计方法。

### 1.1 美国 TEMA 标准<sup>[4]</sup>

按照美国 TEMA 标准,在圆平板理论中,有周边受约束和均布载荷作用的理论。或者是当量实心板理论,此理论在弹性基础上以等效弹性常数概念作为基础,因此会有管板的计算厚度公式:

$$\delta = \frac{FG}{3} \sqrt{\frac{p}{\mu[\sigma]_r}} \quad (1)$$

式中: $F$ 为无因次量,管板固定支撑系数,若是圆板周边简支, $F=1.25$ ,若是圆板周边固支, $F=1.00$ ;  $G$ 为压力作用的直径,mm; $p$ 为等效压力载荷,MPa; $\mu$ 为管板强度削弱系数; $[\sigma]_r$ 为在设计温度下管板材料的许用应力,MPa。

### 1.2 国标 GB 151 热交换器<sup>[5]</sup>

在国标 GB 151 中,将管板当成梁上的圆平板,从而推导出的管板计算公式,一般不会应用于薄管板的计算当中,但充分考虑管子对管板起到加强作用,根据此方法得出的管板厚度计算公式为:

$$\delta = Kd_j \sqrt{p_0/[\sigma]_r \eta_g} \quad (2)$$

式中: $K$ 为支撑特征系数; $d_j$ 为假想圆直径,mm; $p_0$ 为计算压力,取管程和壳程中设计压力的较大值,MPa; $\eta_g$ 为管板许用应力修正系数,取 0.85; $[\sigma]_r$ 为在设计温度下管板材料的许用应力,MPa。

### 1.3 德国 AD 规范<sup>[6]</sup>

对于薄管板来说,薄管板的布管区的应力水平相较于非布管区的应力水平要低,即用于支撑薄管板的换热管一般会对管板具有加强作用,因此在设计时只要考虑非布管区的强度,以及布管区和非布管区的交界处的强度就足够了。根据经验,在局部强度法中,管板是作为在管子支撑下的圆平板结构。根据此方法顺利得出在无支撑的情况下的区域的圆平板强度,由此得到管板厚度公式为:

$$\delta = 0.4d \sqrt{P_a/[\sigma]_r} \quad (3)$$

式中: $\delta$ 为管板的厚度,mm; $d$ 为非布管区中能画得的最大外接圆直径,mm; $P_a$ 为管板计算载荷,MPa;

$[\sigma]_r$ 为在设计温度下管板材料的许用应力,MPa。

### 1.4 水平管蒸发器薄管板预计算的公式选择

传统的水平管蒸发器主要用于海水淡化,而课题组所自主研发设计的这台水平管蒸发器主要用于工业废水的处理。由于液体具有腐蚀性,所以从设备的稳定性和长久性角度考虑,管板和管子在连接时,考虑采用焊接的方式进行连接,并且保证了管子所受的全部轴向力能够被焊缝承受<sup>[7]</sup>。管子作为对管板起到固定支撑作用的必须因素,保证管子与管板的刚性支撑条件,并且保证管板的强度要求,确定管板不产生失效的情况。此外,温差应力能够使管子受到压应力,从而产生失稳情况,薄管板产生失效,但此设备的设计温度显示管板两侧温差几乎不存在,从而可以忽略由于温差应力而引起的失效情况。根据上述情况,从 3 种国内外计算规范的分析中可知,比较满足以上设计要求的有中国的标准 GB/T 151—2014《热交换器》和德国的标准 AD 规范,一般情况下,GB/T 151—2014《热交换器》适用于全部布满管子的管板。

由图 1 可知,该水平管蒸发器的管板非布管区的区域面积比较大,因而在设计时仅考虑非布管区与布管区交界处的强度以及非布管区的强度情况。而且,对某文献中关于某台换热器的管板的设计计算方法比较后得出,管板厚度  $T_{AD} < T_{GB151} < T_{TEMA}$ <sup>[8]</sup>。课题组尝试选择德国 AD 规范对水平管蒸发器的薄管板厚度进行预计算,从而得出较为合适且相对较薄的管板厚度。

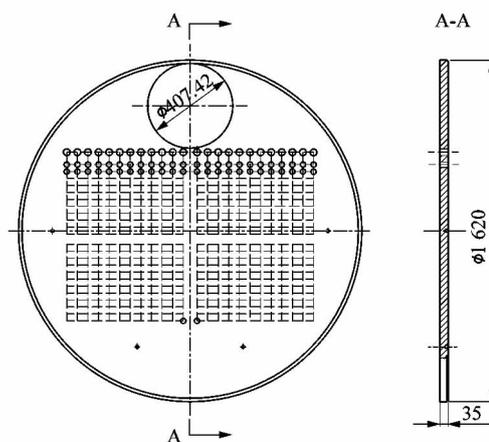


图 1 管板布管模型

Figure 1 Tube distribution model of tube sheet

## 2 水平管蒸发器薄管板设计计算

现有一台非标水平管蒸发器,视其为固定管板式换热器的一种,此水平管蒸发器为自主研发设备,管板

直径为  $D = 1\ 620\ \text{mm}$ , 厚度  $T = 35\ \text{mm}$ , 壳体内径  $D_i = 1\ 600\ \text{mm}$ , 壳体壁厚  $T_1 = 10\ \text{mm}$ 。管子分为 2 种, 一种为喷淋管, 尺寸为  $\varnothing 16\ \text{mm} \times 3.5\ \text{mm}$ , 根数 24 根, 喷淋管中心距为  $L_1 = 50\ \text{mm}$ ; 另外一种为蒸发管, 尺寸为  $\varnothing 12.5\ \text{mm} \times 2.5\ \text{mm}$ , 根数 552 根, 蒸发管排列方式为矩形排列, 横向中心距为  $L_2 = 50\ \text{mm}$ , 纵向中心距为  $L_3 = 33\ \text{mm}$ 。

如果管子并未布满管板, 在不布管区画得最大外接圆直径为  $d_2 = 407.42\ \text{mm}$ , 当不布管区变大时应力系数会变大<sup>[9]</sup>, 因此按照 AD 规定来设计薄管板的厚度时, 最关键的一点是要严格控制不布管区的大小。德国 AD 规范中, 规定设计压力将会选取管程压力和壳程压力中的压力较大者; 如果管子与管板的连接方式采用焊接, 那么焊缝一定要能够承受管子的拉脱力, 并且具有足够大的剪切强度。由此理论为设计依据, 充分考虑管子的加强作用, 从而只将不布管区最大内接圆的直径面积的弯曲强度纳入考虑范围, 得到了管板的厚度

$$\delta = 0.4d_2 \sqrt{P_a / [\sigma]_r} = 0.4 \times 407.42 \times \sqrt{0.05 / 113.8} = 3.21\ \text{mm} \quad (4)$$

式中:  $d_2 = 407.42\ \text{mm}$ , 设计时的管板计算载荷  $P_a = 0.05\ \text{MPa}$ , 在设计温度  $118\ \text{℃}$  下管板材料 TA2 的许用应力  $[\sigma]_r = 113.8\ \text{MPa}$ 。

设  $\varphi = d_2 / D_i = 407.42 / 1\ 600 = 0.255$ , 所以,  $\varphi$  较小, 需要满足

$$\sigma_r = 0.16\varphi^2 P_a \left( \frac{D_i}{\delta} \right)^2 \leq [\sigma]_r \quad (5)$$

将参数值代入公式(5), 得

$$\sigma_r = 0.16 \times 0.255^2 \times 0.05 \times \left( \frac{1\ 600}{14} \right)^2 = 6.79\ \text{MPa} \leq$$

$[\sigma]_r = 113.8\ \text{MPa}$ 。

即结构满足要求。式中:  $\varphi$  为非布管区所画外接圆直径  $d_2$  与管板直径  $D_i$  的比值;  $\sigma_r$  为非布管区的局部强度。

一般薄管板的设计厚度为  $14 \sim 18\ \text{mm}$ , 从而根据设计和工程实际需要, 将计算后的薄管板厚度圆整, 圆整后得到的薄管板厚度  $\delta = 14\ \text{mm}$ , 选在适宜的厚度范围之内。

### 3 水平管蒸发器有限元分析

#### 3.1 设计参数

工艺参数如表 1 所示。

表 1 工艺参数

Table 1 Process parameter

项目	设计压力/MPa	设计温度/℃	材料	泊松比	弹性模量/GPa	水压试验压力/MPa
管程	0.12	118	TA2	0.4	102	0.15
壳程	0.12	118	TA2	0.4	102	0.15

#### 3.2 结构分析

##### 3.2.1 建立有限元模型

根据水平管蒸发器的结构特点以及载荷特点, 采用 1/4 三维力学模型进行有限元建模。由于水平管蒸发器的管板和与之连接的结构是应力分析的主要部分, 所以忽略筒体上的接管, 从而建立实体模型如图 2 所示。

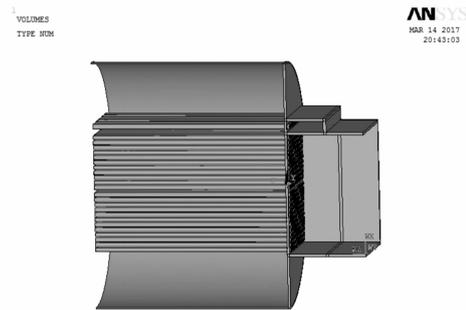


图 2 水平管蒸发器管箱结构实体模型

Figure 2 Solid model of tube box of horizontal tube evaporator

##### 3.2.2 单元网格划分

水平管蒸发器的管板、喷淋管、蒸发管及壳体等部位进行网格划分, 采用六面体八节点结构分析单元 solid45, 从而得到单元数 263 950 个, 节点数 444 110 个, 有限元模型如图 3 所示。

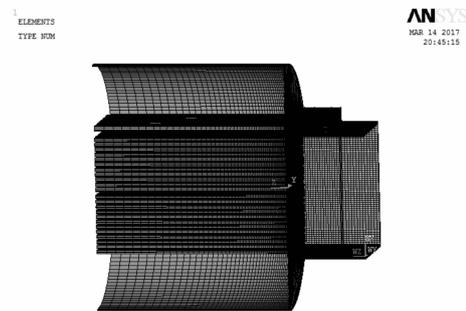


图 3 水平管蒸发器网格模型

Figure 3 Grid model of horizontal tube evaporator

#### 3.3 有限元校核分析

##### 3.3.1 施加载荷情况

根据需要, 此水平管蒸发器的载荷施加情况如下:

在壳程壁面上作用的壳程压力,即壳程壳体内壁面和喷淋管及蒸发管外壁面受到的压力;作用在管程壁面管程压力,即管程中蒸发管箱内壁面受到的压力。

模型的温度场边界条件:由于壳程与管程的设计温度都是 118 ℃,所以可以不考虑温度场的影响。

模型力学边界条件:管、壳程各施加设计压力 0.12 MPa,对筒体的端面施加全约束,有限元模型为 1/4 结构,因此对换热管端面施加对称约束,同样对水平管蒸发器的对称面施加对称载荷,对蒸汽管箱端面施加轴向平衡载荷 1.81 MPa,对水平管蒸发器进行加载。

### 3.3.2 有限元分析结果

#### 1) 应力分析结果

对水平管蒸发器整体模型进行有限元的应力分析,做相关应力的评定,得出管板上的最大应力,并在此应力处做一路径,对该路径进行应力评定。计算所得到的应力云图如图 4 所示。

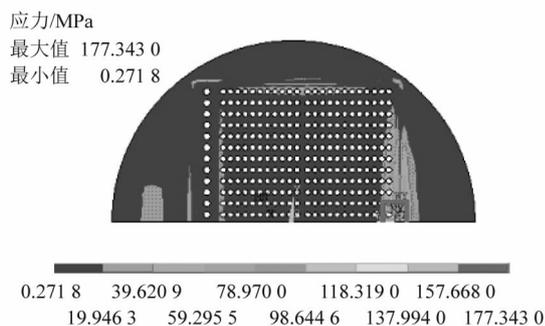


图 4 机械场应力云图

Figure 4 Stress nephogram of mechanical field

根据行业内标准 JB 4732—1995 (2005 确认版)<sup>[10]</sup>,压力容器的分析设计标准中的应力的分类方法,在机械场中,找出最大应力点,沿应力衰减最快方向选定路径,即沿管板的厚度方向,评定后结果如表 2 所示。

表 2 机械场强度评定

Table 2 Intensity evaluations of mechanical field

局部薄膜应力/MPa	许用应力/MPa	评定	一次+二次应力/MPa	许用应力/MPa	评定
118.5	1.5 × 113.8	合格	177.3	3 × 113.8	合格

在评定时,一般会在最大应力点处,沿管板厚度方向做线性化分析。

1) 工况 1:只有壳程压力  $P_s$ ,管程设计压力  $P_t = 0$ ,不考虑热膨胀变形差。

2) 工况 2:只有管程设计压力  $P_t$ ,壳程设计压力

$P_s = 0$ ,不考虑热膨胀变形差。

3) 工况 3:只有管程设计压力  $P_t$ ,壳程设计压力  $P_s = 0$ ,考虑热膨胀变形差。

4) 工况 4:只有壳程压力  $P_s$ ,管程设计压力  $P_t = 0$ ,考虑热膨胀变形差。

由于水平管蒸发器在设计时,管程设计温度与壳程的设计温度相同,所以不考虑温度场的影响,不计入热膨胀变形差的因素,所以只需考虑工况 1 与工况 2 两种情况即可。水平管蒸发器设计压力较小,所以工况分析进行水压试验分析,水压试验要求压力为 0.15 MPa,对水平管蒸发器进行评定,其评定情况如表 3 所示。

表 3 各工况下强度评定

Table 3 Intensity evaluations under each working condition

工况	局部薄膜应力/MPa	许用应力/MPa	评定	一次+二次应力/MPa	许用应力/MPa	评定
工况 1	26.17	170.7	合格	75.01	341.4	合格
工况 2	161.40	170.7	合格	242.40	341.4	合格

#### 2) 变形位移分析结果

经研究发现,水平管蒸发器采用降膜式蒸发方式时,分布均匀的液体对传热会有很大的影响。当成液滴状流动时,液体的传递几乎全部由管壁完成,平稳的液膜流动对传热速率的提高至关重要<sup>[11]</sup>。蒸发管的扭曲变形程度是影响布液效率、蒸发水平的重要因素之一,所以要关注水平管蒸发器的蒸发管的位移变形情况,在建模时将 Z 轴方向设定为蒸发管轴向方向, X (蒸发器水平方向)、Y (蒸发器垂直方向) 方向均为径向方向,布液情况来源于扭曲度,即 X、Y 方向的变形情况。在设计压力整体加载后得到蒸发管位移变形情况如图 5 所示。

图 5 中 X 轴方向变形从 -0.882 5 mm 变化到 0.552 4 mm, Y 轴方向变形从 -0.164 2 mm 变化到 0.496 0 mm,此处正负仅代表变形方向的不同,因此 X 轴方向变形最大值为 0.882 5 mm; Y 轴方向变形最大值为 0.496 0 mm。

在换热时,溶液需沿传热面均匀分配,并且溶液在传热面上布膜均匀,使成膜情况较好。根据工作和使用经验可知,水平管蒸发器的蒸发管只有保证综合最大位移变量在  $h \leq 2.000 0$  mm 范围之内,才能保证喷淋管喷淋出的液体能很好地在蒸发管外壁上成膜,从而保证成膜面积,且保证水平管蒸发器的蒸发效率。径向变形中 X 轴变形量最大 0.882 5 mm,达到 X 轴方

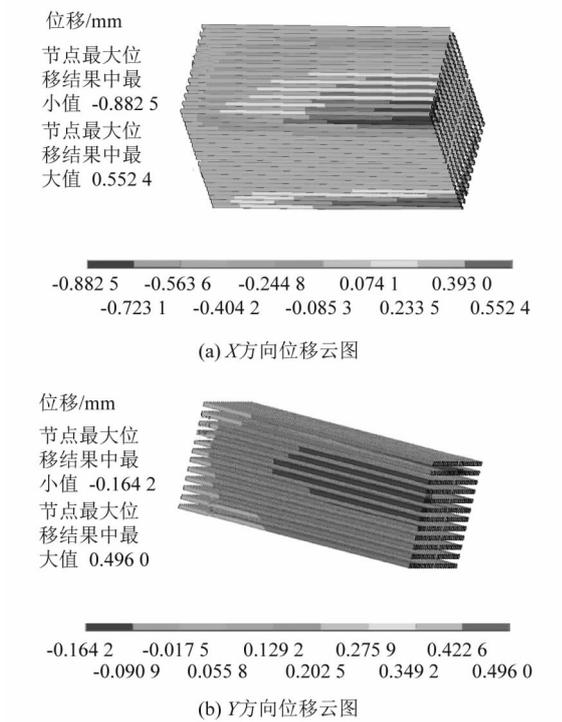


图5 蒸发管径向变形云图

Figure 5 Cloud map of radial deformation of evaporation tube

向可能的最大变形量为:

$$2d_x = 2 \times 0.8825 = 1.7650 \text{ mm} < 2.0000 \text{ mm}。$$

同理可知径向变形中的Y轴可能的最大变形量为:

$$2d_y = 2 \times 0.4960 = 0.9920 \text{ mm} < 2.0000 \text{ mm}。$$

由计算结果可知,结构符合工程实际要求。

通过对水平管蒸发器的薄管板在设计和计算时对计算标准的比较以及选取,并根据所选取的较为适合的标准进行薄管板的预计算,将得到的新型薄管板厚度运用到水平管蒸发器的有限元模拟当中去,得到了管板的应力情况以及蒸发管的位移变形情况,均符合工程实际要求。从而可知,管板厚度由原来的35 mm减薄到现在的14 mm,能够满足应力水平以及位移变形水平,能够保证喷淋出的液体在蒸发管壁上均匀的生成一层薄膜,达到降膜蒸发的标准,从而在对水平管蒸发器轻量化设计的基础之上保证了设备的蒸发效率。

## 4 结语

1) 分别对美国TEMA,我国GB 151—2014《热交换器》,以及德国AD中薄管板计算公式进行比较,并根据水平管蒸发器管板非布管区面积的情况,以及管子在其中起到对管板的支撑与加强作用的条件下,选择德国AD规范作为此台非标设备的设计参考,选择其中公式对管板厚度进行预计算,得出管板合适的预设厚度。

2) 建立水平管蒸发器的1/4模型,并对模型进行网格划分以及机械场的施加,应力分析结果显示,对不同工况下的路径进行分析,预设的管板厚度满足了水平管蒸发器的应力要求,新型的薄管板在强度方面安全可靠。

3) 验证水平管蒸发器中的蒸发管的位移变形情况,根据位移变形,判断蒸发管上喷淋液体在落下时的着膜情况,从而验证薄管板结构的可行性,通过减薄管板的厚度从而达到设备的节省材料、造价低、加工简便、并有较高的换热效率的目的。

## 参考文献:

- [1] 杨丽,王文,白云飞,等.水平管降膜蒸发器传热优化研究[J].工程热物理学报,2009,30(11):1913-1916.
- [2] 杨丽,王文,周加强.水平管降膜蒸发器管束结构优化数值模拟[J].山东建筑大学学报,2012,27(2):193-197.
- [3] 丁雪晶.薄管板换热器的设计及薄管板计算的探讨[J].化工设计通讯,2003,29(3):32-34.
- [4] 化学工业部设备设计技术中心站.美国管式换热器制造商协会标准(TEMA)[G].上海:化工部设备设计技术中心站,1982:33.
- [5] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会.热交换器:GB 151—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [6] 化工部设备设计技术中心站.西德AD压力容器规范[G].薛大年,译.上海:化工部设备设计技术中心站,1982:65.
- [7] 杨云雨,董金善,娄秀勇,等.薄管板技术在加氢反应器中的应用与研究[J].机械设计与制造,2013(6):141-147.
- [8] 江小志,董金善,吕冬祥.基于ANSYS的挠性薄管板设计方法与结构尺寸研究[J].机械强度,2015,37(1):109-113.
- [9] 张石铭.薄管板强度计算及设计方法[J].化工机械,1994,21(6):338-343.
- [10] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会.钢制压力容器:分析设计标准:JB 4732—1995[S].北京:中国标准出版社,2005:12-19.
- [11] 钱强,朱跃钊,廖传华,等.海水淡化中水平管降膜蒸发的研究[J].水处理信息报导,2009(3):16-18.