

## 十万立方米外浮顶储罐设计

**摘要：**近一、二十年来，油罐的设计与施工技术较过去都有了更快的发展，明显的趋势是大型化，油罐大型化给人们带来许多经济利益，也带来了一些技术课题。浮顶油罐是目前国内外在大中型油罐中最常用的一种结构形式，它几乎全部消灭了气体空间，从而大大减少了油品的蒸发损耗和大气污染等。地区地质状况良好，适合建罐，设计基本风压为  $800\text{Mpa}$ ，对钢材的选择考虑了强度，可焊性和冲击韧性三项主要要求。罐壁厚度计算采用变点设计法，分别计算了充水和储油两种不同储存介质的情况，用它计算大容量罐时，可减少某些圈的壁厚和罐壁总用钢量。设计中不仅包括了罐顶，罐壁，罐底的整体轮廓计算，还包括抗风圈，加强圈和密封的计算，抗风圈和加强圈设计采用我国国内标准。油罐的抗震设计也参照国内外的设计规范，可承受 8 级以上的地震。校核部分包括浮顶四个准则，强度和稳定性校核，下节点校核以及开孔补强校核。

计算部分清楚简洁，图纸清晰规范，在保证安全的前提下，经济选材是本设计的特点。

**关键词：**浮顶油罐，浮顶，罐壁，抗风圈，加强圈

**Abstract:** Recent one or two decades, the design and construction of tank technology has been faster than in the past the development of a clear trend that large-scale and large-scale oil brings many economic benefits as well as a number of technical issues .Floating roof tank is the large and medium-sized oil tank at home and abroad in the most commonly used form of a structure, it eliminated almost all of the gas space, thus greatly reducing the evaporation loss of oils and atmospheric pollution. Geological in good condition and suitable for cans, for the design of the basic wind pressure 800Mpa, on the choice of the steel strength, weldability and impact toughness of the three main requirements. Calculation of tank wall thickness design method using change-point, were calculated and the reservoir water storage of two different media, the use it when calculating the large-capacity tanks can reduce certain circle tank wall thickness and the total amount of steel. Design includes not only the tank top, tank walls, tank at the end of the overall outline of the calculation, but also wind circle, strengthening and sealing ring, the wind and the strengthening of circle circle design standards in China. Seismic Design of oil tank at home and abroad is also reference to the design specifications can withstand earthquakes of more than 8. Check some of the four criteria, including floating roof, the strength and stability of calibration, the next check node and check opening reinforcement.Calculation of some clear and concise, clear drawings norms, in the premise of security, economic selection of the design characteristics.

**Key words:** floating roof tank, floating roof, tank skin, wind circle, Circle to enhance

## 目 录

1	绪论	5
2	油罐钢材、尺寸的选择	7
2.1	概述	7
2.2	求许用应力 $[\sigma]$	7
2.3	确定油罐经济直径和高度	8
3	罐壁强度设计	10
3.1	罐壁计算的说明	10
3.2	采用变点法设计各层壁板厚度	12
3.2.1	计算充水时各层板厚	12
3.2.2	计算储油时各层板厚	23
4	浮顶设计	35
4.1	基本数据	35
4.2	校核	36
4.2.1	第一准则校核	36
4.2.2	第三准则的计算和校核	37
4.2.3	第二准则校核	38
4.3	浮顶强度及稳定性校核	39
4.3.1	单盘的强度验算	39
4.3.2	浮船强度校核	40
4.3.3	浮船平面内稳定校核盘	41
4.3.4	浮船平面外稳定校核	42
4.3.5	关于 Ae 的验算	43
5	油罐密封及抗风设计	45
5.1	油罐的密封装置	45
5.2	抗风设计	45
5.2.1	抗风圈的设计和计算	45
5.2.2	加强圈的设计和计算	46
6	罐底及罐基础设计	48
6.1	罐底的设计	48
6.1.1	材料及厚度	49
6.1.2	排版方法	49
6.1.3	底板的连接	49
6.2	罐基础设计	49
7	下节点计算	51

8	油罐抗震设计 .....	54
8.1	倾覆力矩计算 .....	54
8.2	罐壁压应力的计算 .....	54
8.3	罐壁临界压应力及其校核 .....	55
9	油罐的附件设计及开孔补强 .....	56
9.1	附件设计 .....	56
9.1.1	罐顶附件 .....	56
9.1.2	罐壁附件 .....	56
9.1.3	罐壁附件简要介绍 .....	57
9.1.4	安全设施 .....	58
9.1.5	梯子、平台和栏杆 .....	58
9.2	开孔补强计算 .....	58
10	质量检验 .....	60
10.1	罐底质量检验 .....	60
10.1.1	罐底的平度检查 .....	60
10.1.2	焊缝质量检查 .....	60
10.2	罐底的质检 .....	60
11	油罐的消防系统选择 .....	61
11.1	罐区泡沫灭火部分 .....	61
11.2	罐区冷却水部分 .....	61
	<b>参考文献</b> .....	<b>62</b>
	<b>致谢</b> .....	<b>62</b>

# 1 绪论

## 国内外研究现状

伴随着世界石油工业的发展与进步，原油的储备和运输对储罐的容量提出了越来越大的要求。从世界范围来说，这一状况与国际能源危机有关，由于能源危机，近若干年来，大部分依靠原油进口的工业化国家都增加了原油的储备量，从而使这些国家建造了越来越大的油罐。在原油储备量相同的条件下，大容量储罐的经济性比小容量的储罐要好很多。

油罐大型化有很多优点，比如节省用钢，减少投资，减少占地面积，便于操作管理。在油罐大型化的趋势形成后，油库的组成结构与之前发生了很大改变，从油罐的“小而多”变为“大而小”。这一点成为一个国家在油罐设计、研究、建造等方面技术水平的一个衡量尺度。

油罐大型化使得对钢油罐的强度、抗震、抗风、抗断裂等方面的性能要求越发严格，使罐壁选材成为设计成功的基本要素，选材时要充分考虑钢板的强度、可焊性和冲击韧性等不同性能要求。

早期的油罐是固定顶式的，随着油罐直径的增大，固定式罐顶的投资费用大幅度增加。为了节省投资，采用一个漂浮在液面上的浮动顶盖（简称浮顶）取代了固定式罐顶。

外浮顶罐应运而生，简称为浮顶罐。浮顶油罐是目前国内外在大型油罐中最常见的一种罐顶形式，浮顶油罐是上部开口的立式圆柱形油罐，钢浮顶在油面上随着液面升降。从而浮顶与液面基本不存在油气空间，油品不能挥发，经济性指标较固定顶油罐有了很大的提高。

在浮顶与罐内壁之间的环形空间上有伴随浮顶浮动的密封装置，这种油罐的顶部与其他固定顶油罐相比，在设计时结构更易于处理，由于罐顶的自重受储液支撑其受力状况良好，故大型油罐大多采用浮顶油罐。作为目前国内外大中型油罐最常用的结构形式，浮顶罐分为两种，一种是双盘式的，一种是单盘式的，单盘式多用于 5000m<sup>3</sup> 以上的油罐。

储罐在国民经济发展中所起的作用是不可替代的，不仅石油、化工、国防、交通运输等领域，甚至我们的日常生活，均离不开大大小小的储罐。特别是石油石化企业，无论是大陆或海洋开采的原油，还是炼油厂加工炼制的成品油，都离不开各种容量和类型的储罐。而且，储罐工程投资在石油石化基本建设投资中占有相当大的比例。中国快速发展受石油资源的限制，我国近年来要进口 1.6 亿吨左右石油，以满足国民经济高速发展的需要，加快发展大型储罐的建设提高我国石油储备能力成为我国战略发展方向。因此，对原油储罐的研究与设计对国民经济有着十分重要的意义。

## 设计方法

本文是 100000m<sup>3</sup> 外浮顶原油罐的设计说明，本文主要阐述了外浮顶油罐的工艺设计、罐壁的设计、浮顶的设计、罐底的设计、地基的设计、地震、风载校核、防腐的设计等。罐壁厚度的计算采用变点法，地基的设计要考虑到地震的影响，防腐的设计要考虑到罐的内腐蚀和外腐蚀，防腐时采用的防腐漆是否合理和是否经济并考虑涂漆的技术和方法，罐壁和罐底要考虑焊接要求等。

## 2 油罐钢材、尺寸的选择

### 2.1 概述

本次设计对象为十万立方米原油外浮顶罐。设计一共分为：壁厚计算、浮顶计算、抗震计算、抗风计算及下节点计算和开孔补强计算等部分。浮顶油罐的罐顶是一个覆盖在油面上并随油面升降的结构。由于罐顶的自重受储液支承，其受力状况很好，较固定顶油罐经济性好，所以现在的大型油罐多采用浮顶油罐这种形式。浮顶油罐的显著特点是在浮顶与油面之间基本上不存在气体空间，因而可以有效地减少油品的蒸发损耗，同时还减少了油气对大气的污染，减少发生火灾的危险性，是一种经济，安全，环保的有效结构。

十万立方米的大容量储罐在设计前选材是设计成功的基本要素。大容量储罐对用作罐壁材料的钢板强度有很高的要求。所以罐壁底部采用许用应力较大的 07MnCrMoVR（球罐抗氢抗硫钢板）。上部采用 16MnR（普通低合金钢）作为罐壁的钢板材料。

### 2.2 求许用应力 $[\sigma]$

罐壁的受力主要来源于储液静压力的作用，储罐的圆筒型罐壁受储液的静压力作用如下图所示，此静压力按三角形分布，由上而下逐渐增大，所以罐壁厚度也由上而下逐渐增厚，实际储罐在设计时罐壁板不可能采用厚度呈连续变化的钢板，所以根据钢板的规格设计成逐级增厚的阶梯状变截面壁板组合焊接而成。

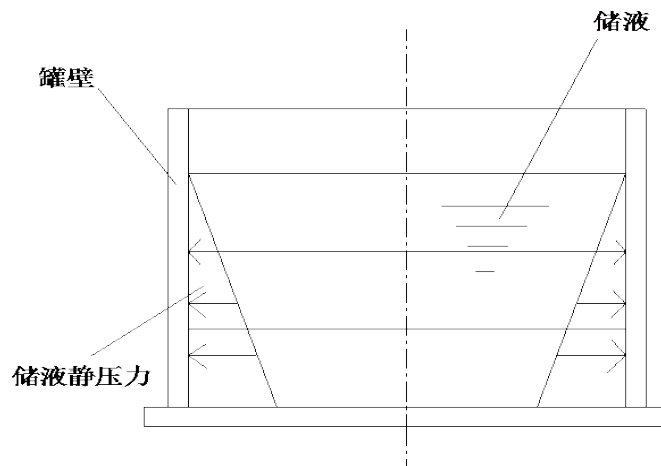


图 2-1 罐壁承受的储液静压力

储罐在接近常压的条件下储存液体时，罐壁沿高度所受内压力主要是液体静压和液面上较低的剩余压力。设液面处罐壁仅受液体的剩余压力 $P_0$ ，液体的密度 $\rho$ 离液面 $x$ 处的压力为： $P_x = P_0 + \rho gx$

罐壁在此处的环向应力： $\sigma_x = \frac{P_x}{\delta_x} R = (p_0 + \rho gx) R / \delta_x$

式中： $\delta_x$ —储罐此处的壁厚，单位 mm

(1) 对于材料 07MnCrMoVR (16~30mm)

$$\text{充水时: } \frac{3}{4}\sigma_s = \frac{3}{4} \times 490 = 367.5 \text{ Mpa}$$

$$\frac{3}{7}\sigma_b = \frac{3}{7} \times 630 = 270 \text{ Mpa}$$

$$\text{储油时: } \frac{2}{3}\sigma_s = \frac{2}{3} \times 490 = 326.67 \text{ Mpa}$$

$$\frac{2}{5}\sigma_b = \frac{2}{5} \times 630 = 252 \text{ Mpa}$$

$$\text{取 } \begin{cases} [\sigma]_{\text{水}} = 270 \text{ Mpa} \\ [\sigma]_{\text{油}} = 252 \text{ Mpa} \end{cases}$$

(2) 对于材料 16MnR (6~16mm)

$$\text{充水时: } \frac{3}{4}\sigma_s = \frac{3}{4} \times 343 = 257.25 \text{ Mpa}$$

$$\frac{3}{7}\sigma_b = \frac{3}{7} \times 509.8 = 218.49 \text{ Mpa}$$

$$\text{储油时: } \frac{2}{3}\sigma_s = \frac{2}{3} \times 343 = 228.67 \text{ Mpa}$$

$$\frac{2}{5}\sigma_b = \frac{2}{5} \times 509.8 = 203.92 \text{ Mpa}$$

$$\text{取 } \begin{cases} [\sigma]_{\text{水}} = 218.49 \text{ Mpa} \\ [\sigma]_{\text{油}} = 203.92 \text{ Mpa} \end{cases}$$

### 2.3 确定油罐经济直径和高度

查我国常用浮顶油罐尺寸表知，十万立方米浮顶油罐单盘板厚  $t=0.5\text{cm}$ ;查书中表知边缘板最小厚度取  $5\text{mm}$ ;即  $t_r=5\text{mm}$ ,  $t_b=10\text{mm}$ ,  $t_r+t_b=15\text{mm}$ ,取  $\lambda = 15\text{mm}$

$$93 \text{ 号汽油容量: } \gamma_{\text{油}} = 725 \times 9.8 = 7105 \text{ N/m}^3$$

$$\text{水 容 量: } \gamma_{\text{水}} = 9.8 \times 1000 = 9800 \text{ N/m}^3$$

$$\text{焊缝系数: } \eta = 0.9$$

$$\text{经济高度及半径定: } H_{\text{总}} = \sqrt{\frac{[\sigma]\eta\lambda}{\gamma}} = \sqrt{\frac{274.29 \times 10^6 \times 1.0 \times 0.015}{9800}} = 20.3\text{m}$$

$$R = \sqrt{V/H\pi} = \sqrt{10 \times 10^4 / 20.3 \times 3.14} = 39.6\text{m}$$

$$\text{取 } R = 40m \quad D = 80m$$

等壁厚高度 变等壁厚高度及每层圈板高度的确定:

$$\text{等壁厚高度: } H_0 = \frac{t_{s\min} \cdot \alpha}{R}, \text{ 其中 } \alpha = \frac{[\sigma] \eta}{\gamma}$$

查书中表知, 罐壁最小设计厚度为:  $t_{s\min} = 9mm$ , 则等壁厚高度为  $6.1m$

$$\text{变壁厚高度: } H_{\text{总}} - H_0 = 20.3 - 6.1 = 14.2m,$$

取变壁厚部分圈板数为 8,

$$\text{则每层圈板高度: } h = \frac{H_{\text{总}} - H_0}{8} = \frac{14.2}{8} = 1.78m$$

取最高液位为  $H' = 19.0m$

### 3 罐壁强度设计

#### 3.1 罐壁计算的说明

对于容积较小的储罐，采用定点法设计储罐壁厚度计算简便，结果也足够安全。但对于容积等于或超过 100000m<sup>3</sup> 的储罐，采用定点法计算储罐壁厚度时，该点的计算的罐壁应力与实际罐壁应力差别较大。因此对于容积较大的储罐宜采用变点法进行设计。储罐内径 80m，储罐总高 20.3m，计算液面高度 19m。

表 3-1 储罐最小壁厚

油罐内径 D, m	罐壁最小设计厚度, mm
D<12	4
12≤D<15	5
15≤D<36	6
36≤D≤60	8
D>60	9

常用的壁厚计算公式为:

$$t \geq t_0 + \frac{1}{2}c_0 + c \quad \text{式中 } t \text{ 为罐壁设计厚度, 单位 } mm;$$

$t_0$  为罐壁计算厚度, 单位  $mm$ ;

$c_0$  为钢板厚度允许负偏差, 单位  $mm$ ;

$c$  为腐蚀裕量, 单位  $mm$ ;

$$t_0 = \frac{\gamma(H-0.3)D}{2[\sigma]\eta} \quad \text{式中 } H \text{ 为计算的那圈罐壁板底边至罐壁顶端垂直高度, 单位 } m;$$

$D$  为油罐直径, 单位  $m$ ;

$[\sigma]$  为设计温度下钢板的许用应力, 单位  $N/m^2$ ;

$\gamma$  为储液容重, 单位  $N/m^3$ ;

$\eta$  为焊缝系数, 取  $\eta = 0.9$ ;

它们是根据各圈距底边 0.3m 处近似最大环向力来计算各圈壁厚的, 但各圈板在边缘力系影响下, 最大环向应力位置不一定是在距各圈底边 0.3m 处, 若油罐较大, 就应当做更精确的计算, 减少用钢量。在 API650 中, 介绍了罐壁的另一计算方法, 称为变点设计法, 它是考虑到罐壁相邻圈板之间的相互影响, 确定各圈环向应力最大处的位置。这种变点设计法更适合罐壁应力的实际情况, 故本设计中采用的罐壁设计法即为变点设计。

现将 API650 中有关变点设计法的计算公式介绍如下:

变点设计法计算底圈罐壁的计算厚度公式为:

$$t_{01} = \frac{\gamma(H - 0.305)D}{2[\sigma]\eta} \quad t_{01} = \left[ 1.06 - \frac{0.022D}{H} \sqrt{\frac{\gamma H}{[\sigma]\eta}} \right] \frac{\gamma HD}{2[\sigma]\eta}$$

式中  $t_{01}$  为底圈罐壁板计算厚度，单位  $mm$ ；

$H$  为罐底至顶部角钢顶面的高度，单位  $m$ ；

$D$  为罐底圈直径，单位  $m$ ；

$\gamma$  为储液容量，单位  $N/m^3$ ；

$\eta$  为纵向焊缝系数，取  $\eta = 0.9$ 。

选用两个计算式求得的较小值作为底圈的计算壁厚。

各圈壁厚的变点算法如下： 当  $\frac{h_{i-1}}{\sqrt{Rt_{0(i-1)}}} \leq 1.375$  时，  $t_{oi} = t_{o(i-1)}$

当  $\frac{h_{i-1}}{\sqrt{Rt_{0(i-1)}}} \geq 2.625$  时，  $t_{oi} = t_{ai}$

当  $1.375 < \frac{h_{i-1}}{\sqrt{Rt_{0(i-1)}}} < 2.625$  时

$$t_{oi} = t_{ai} + (t_{o(i-1)} - t_{ai}) \left( 2.1 - \frac{h_{i-1}}{1.25\sqrt{Rt_{0(i-1)}}} \right)$$

式中： $h_{i-1}$  为计算圈的下面一圈的圈板高，单位  $m$ ；

$R$  为油罐半径，单位  $m$ ；

$t_{oi}$  为所需计算的第  $i$  圈的罐壁计算厚度，单位  $mm$ ；

$t_{0(i-1)}$  为所需计算的第  $i$  圈下面一圈的圈板计算壁厚，单位  $mm$ ；

（但在计算比值  $\frac{h_{i-1}}{\sqrt{Rt_{0(i-1)}}}$  时， $t_{0(i-1)}$  单位取  $m$ ）

$t_{ai}$  为根据变点位置求得的第  $i$  圈的壁厚值，单位  $mm$ ；

先求得底圈计算壁厚  $t_{01}$  后，再顺序计算上面各圈的计算壁厚  $t_{oi}$ ， $i$  代表圈板顺序，自底圈向上分别为 1、2、3...。由  $t_{oi}$  的计算公式可以看出为了求得  $t_{oi}$ ，应先求出  $t_{ai}$ 。

下面三个式子中求出的最小  $x$  值，就是变点设计点到计算圈的圈板底边的距离，一次最小  $x$  值来计算  $t_{ai}$ 。

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{ai}} + 0.32cH_i$$

$$x_2 = cH_i$$

$$x_3 = 1.22\sqrt{Rt_{ai}} \quad \text{式中 } c = \frac{\sqrt{k}(k-1)}{1+k\sqrt{k}}; \quad k = \frac{t_{0(i-1)}}{t_{ai}};$$

$H_i$  为第  $i$  圈圈板底部至罐壁顶部角钢顶面的高度，单位  $m$ 。

用上面式子计算  $x$  值时， $R$  和  $t_{ai}$  均为  $m$  作为单位。 $k$  是个比值，计算  $k$  值时必须对  $t_{ai}$  和  $t_{0(i-1)}$  取相同的单位。求得的  $x$  值单位为  $m$ 。取  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  三个  $x$  值的最小值  $x_{\min}$  作为计算点，用它来求取第  $i$  圈的  $t_{ai}$  值。

$$t_{ai} = \frac{\gamma(H_i - x_{\min})D}{2[\sigma]\eta}$$

式中其余符号的意义均同前述。求得的  $t_{ai}$  的单位为  $mm$ 。

API650 规定，在利用上述方法计算各圈的计算壁厚时，要分别就设计条件和充水试验条件求出两种条件下各自的计算壁厚。按设计条件进行计算时， $\gamma$  采用储存油品的容重 ( $N/m^3$ )，

许用应力  $[\sigma]$  取  $\frac{2}{3}\sigma_s$  和  $\frac{2}{5}\sigma_b$  中的较小者 ( $[\sigma_s]$  为材料的屈服极限， $[\sigma_b]$  为材料的强度极限，单位均为  $MPa$ )。按充水试验条件进行计算时， $\gamma$  采用水的容重 ( $N/m^3$ )， $[\sigma]$  采用  $\frac{3}{4}\sigma_s$  和  $\frac{3}{7}\sigma_b$  中的较小者。

按设计条件求出的计算壁厚加上腐蚀裕量  $c$  后，与按充水试验求得的计算壁厚值比较，取两者中的较大值并向上圆整后作为计算圈的设计壁厚，并且，采用变点设计法时，上层圈板的厚度不得大于下层圈板的厚度，还不得小于 API650 规定的罐壁最小厚度。

## 3.2 采用变点法设计各层壁板厚度

### 3.2.1 计算充水时各层板厚

求底圈计算壁厚  $t_{01}$

$$t_{a1} = \frac{r(H - 0.305)D}{2[\sigma]\eta} = \frac{9800 \times (19 - 0.305) \times 80}{2 \times 270 \times 10^6 \times 1.0} = 27.14mm$$

$$t_{01} = \left[ 1.06 - \frac{0.022D}{H} \sqrt{\frac{\gamma H}{[\sigma]\eta}} \right] \frac{\gamma HD}{[\sigma]\eta} = 1.06 - \frac{0.022 \times 80}{19} \times \sqrt{\frac{9800 \times 19}{274.29 \times 10^6 \times 1.0}} = 28.11mm$$

取二者较小值，故底圈计算壁厚  $t_{01} = 27.14mm$

求第 2 圈计算壁厚  $t_{02} (i = 2)$

$$\frac{h_{i-1}}{\sqrt{Rt_{0(i-1)}}} = \frac{h_1}{\sqrt{Rt_{01}}} = \frac{1.78}{\sqrt{40 \times 0.02714}} = 1.71$$

由于  $1.325 < 1.72 < 2.625$  故用下式计算  $t_{02}$

$$t_{02} = t_{a2} + (t_{01} - t_{a2}) \left( 2.1 - \frac{1.96}{1.25 \sqrt{Rt_{01}}} \right)$$

用逐步法求  $t_{a2}$  取  $H_2 = 19 - 1.78 = 17.22 \text{ mm}$

第一次试算

$$t_{a2} = \frac{\gamma(H - 0.305)D}{2[\sigma]\eta} = \frac{9800 \times (17.22 - 0.305) \times 80}{2 \times 270 \times 10^6 \times 1.0} = 24.19 \text{ mm}$$

$$k = \frac{t_{01}}{t_{a2}} = \frac{27.14}{24.19} = 1.122$$

$$c = \frac{\sqrt{k}(k - i)}{1 + k\sqrt{k}} = \frac{\sqrt{1.122} \times (1.122 - 1)}{1 + 1.122 \times 1.122} = 0.047$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a2}} + 0.32cH_2 = 0.61 \times \sqrt{40 \times 0.02419} + 0.32 \times 0.047 \times 17.22 = 0.885$$

$$x_2 = cH_2 = 0.047 \times 17.22 = 0.809$$

$$x_3 = 1.22\sqrt{Rt_{a2}} = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.02419} = 1.200$$

$$x_{\min} = x_2 = 0.809 \text{ m}$$

$$t_{a2} = \frac{9800 \times (17.22 - 0.809) \times 80}{2 \times 270 \times 10^6 \times 1.0} = 23.83 \text{ m}$$

第二次试算

$$k = \frac{27.14}{23.83} = 1.139$$

$$c = \frac{\sqrt{1.139} \times (1.139 - 1)}{1 + 1.139 \times \sqrt{1.139}} = 0.072$$

$$x_1 = 0.61 \times \sqrt{40 \times 0.02383} + 0.32 \times 0.072 \times 17.22 = 0.977 \text{ m}$$

$$x_2 = 0.072 \times 17.22 = 1.240 \text{ m}$$

$$x_3 = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.02383} = 1.181 \text{ m}$$

$$x_{\min} = x_1 = 0.977m$$

$$t_{a2} = \frac{9800 \times (17.22 - 0.977) \times 80}{2 \times 270 \times 10^6 \times 1.0} = 23.58m$$

第三次试算

$$k = \frac{27.14}{23.58} = 1.151$$

$$c = \frac{\sqrt{1.151} \times (1.151 - 1)}{1 + 1.151 \times \sqrt{1.151}} = 0.072$$

$$x_1 = 0.61 \times \sqrt{40 \times 0.02358} + 0.32 \times 0.072 \times 17.22 = 0.905m$$

$$x_2 = cH_2 = 0.072 \times 17.22 = 1.240m$$

$$x_3 = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.02358} = 1.184m$$

$$x_{\min} = x_1 = 0.905m$$

$$t_{a2} = \frac{9800 \times (17.22 - 0.905) \times 80}{2 \times 270 \times 10^6 \times 1.0} = 23.68m$$

$$t_{02} = 24.19 + (27.14 - 24.19) \times \left( 2.1 - \frac{1.78}{1.25 \times \sqrt{40 \times 0.02714}} \right) = 26.35m$$

求第 3 圈计算厚度  $t_{03} (i = 3)$

$$\frac{h_{i-1}}{\sqrt{R(t_{0(i-1)})}} = \frac{h_2}{\sqrt{Rt_{02}}} = \frac{1.78}{\sqrt{40 \times 0.02635}} = 1.73$$

由于  $1.325 < 1.73 < 2.625$  故用下式计算  $t_{03}$

$$t_{03} = t_{a3} + (t_{02} - t_{a3}) \left( 2.1 - \frac{1.96}{1.25 \sqrt{Rt_{02}}} \right) \text{ 用逐步是算法求 } t_{a3}, \text{ 取 } H_3 = 19 - 2 \times 1.78 = 15.44m$$

第一次试算

$$t_{a3} = \frac{\gamma(H - 0.305)D}{2[\sigma]\eta} = \frac{9800 \times (15.44 - 0.305) \times 80}{2 \times 270 \times 10^6 \times 1.0} = 21.97mm$$

$$k = \frac{t_{02}}{t_{a3}} = \frac{26.35}{21.97} = 1.199$$

$$c = \frac{\sqrt{k}(k-1)}{1+k\sqrt{k}} = \frac{\sqrt{1.182} \times (1.182-1)}{1+1.182 \times \sqrt{1.182}} = 0.085$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a3}} + 0.32 \times 0.085 \times 15.44 = 0.997m$$

$$x_2 = cH_3 = 0.085 \times 15.44 = 1.312m$$

$$x_3 = 1.22\sqrt{Rt_{a3}} = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.02197} = 1.143m$$

$$x_{\min} = x_1 = 0.997m$$

$$t_{a3} = \frac{9800 \times (15.44 - 0.997) \times 80}{2 \times 270 \times 10^6 \times 1.0} = 20.96mm$$

第二次试算

$$k = \frac{26.35}{20.96} = 1.257$$

$$c = \frac{\sqrt{1.257} \times (1.257 - 1)}{1 + 1.257 \times \sqrt{1.257}} = 0.119$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a3}} + 0.32 \times 0.119 \times 15.44 = 1.205m$$

$$x_2 = 0.119 \times 15.44 = 2.933m$$

$$x_3 = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.02096} = 1.20m$$

$$x_{\min} = x_3 = 1.20m$$

$$t_{a3} = \frac{9800 \times (15.44 - 1.120) \times 80}{2 \times 270 \times 10^6 \times 1.0} = 20.79mm$$

第三次试算

$$k = \frac{26.35}{20.79} = 1.267$$

$$c = \frac{\sqrt{1.267} \times (1.267 - 1)}{1 + 1.267 \times \sqrt{1.267}} = 0.112$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a3}} + 0.32 \times 0.112 \times 15.44 = 1.118m$$

$$x_2 = 0.112 \times 15.44 = 1.729m$$

$$x_3 = 1.22\sqrt{40 \times 0.02079} = 1.113m$$

$$x_{\min} = x_3 = 1.113$$

$$t_{a3} = \frac{9800 \times (15.4 - 1.113) \times 80}{2 \times 270 \times 10^6} = 20.80 \text{ mm}$$

$$t_{03} = 20.80 + (26.35 - 20.80) \left( 2.1 - \frac{1.78}{1.25 \times \sqrt{40 \times 0.02635}} \right) = 24.76 \text{ mm}$$

求第 4 圈计算厚度  $t_{04}$  ( $i = 4$ )

$$\frac{h_{i-1}}{\sqrt{R(t_{0(i-1)})}} = \frac{h_3}{\sqrt{Rt_{03}}} = \frac{1.78}{\sqrt{40 \times 0.02476}} = 1.789$$

由于  $1.325 < 1.789 < 2.625$  故用下式计算  $t_{04}$

$$t_{04} = t_{a4} + (t_{03} - t_{a4}) \left( 2.1 - \frac{1.78}{1.25 \sqrt{Rt_{03}}} \right)$$

用逐步试算法求  $t_{a4}$ ;

$$H_4 = 19 - 3 \times 1.78 = 13.66 \text{ m}$$

第一次试算

$$t_{a4} = \frac{\gamma(H - 0.305)D}{2[\sigma]\eta} = \frac{9800 \times (13.66 - 0.305) \times 80}{2 \times 270 \times 10^6 \times 1.0} = 19.67 \text{ mm}$$

$$k = \frac{t_{03}}{t_{a4}} = \frac{24.76}{19.67} = 1.257$$

$$c = \frac{\sqrt{k}(k-1)}{1+k\sqrt{k}} = \frac{\sqrt{1.257} \times (1.257-1)}{1+1.257 \times \sqrt{1.257}} = 0.120$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a4}} + 0.32 \times 0.120 \times 13.66 = 1.058 \text{ m}$$

$$x_2 = cH_4 = 0.120 \times 13.66 = 1.639 \text{ m}$$

$$x_3 = 1.22\sqrt{Rt_{a4}} = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.01967} = 1.082 \text{ m}$$

$$x_{\min} = x_1 = 1.058 \text{ m}$$

$$t_{a4} = \frac{9800 \times (13.66 - 1.058) \times 80}{2 \times 270 \times 10^6 \times 1.0} = 18.30 \text{ mm}$$

第二次试算

$$k = \frac{24.76}{18.30} = 1.353$$

$$c = \frac{\sqrt{1.353} \times (1.353 - 1)}{1 + 1.353 \times \sqrt{1.353}} = 0.158$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a4}} + 0.32 \times 0.158 \times 13.66 = 1.121m$$

$$x_2 = 0.158 \times 13.66 = 2.158m$$

$$x_3 = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.01830} = 1.044m$$

$$x_{\min} = x_3 = 1.044m$$

$$t_{a4} = \frac{9800 \times (13.66 - 1.044) \times 80}{2 \times 270 \times 10^6 \times 1.0} = 18.32mm$$

$$t_{04} = 18.32 + (24.76 - 18.32) \times \left( 2.1 - \frac{1.78}{1.25 \times \sqrt{40 \times 0.02476}} \right) = 22.63m$$

求第 5 圈计算壁厚  $t_{05}$  ( $i = 5$ )

$$\frac{h_{i-1}}{\sqrt{R(t_{0(i-1)})}} = \frac{h_4}{\sqrt{Rt_{04}}} = \frac{1.78}{\sqrt{40 \times 0.02263}} = 1.871$$

由于  $1.325 < 1.871 < 2.625$  故用下式计算  $t_{05}$

$$t_{05} = t_{a5} + (t_{04} - t_{a5}) \left( 2.1 - \frac{1.78}{1.25 \sqrt{Rt_{04}}} \right)$$

用逐步试算法求  $t_{a5}$ ,  $H_5 = 19 - 4 \times 1.78 = 11.88m$

第一次试算

$$t_{a5} = \frac{\gamma(H - 0.305)D}{2[\sigma]\eta} = \frac{9800 \times (11.88 - 0.305) \times 80}{2 \times 270 \times 10^6 \times 1.0} = 16.81mm$$

$$k = \frac{t_{04}}{t_{a5}} = \frac{22.63}{16.81} = 1.346$$

$$c = \frac{\sqrt{k}(k-1)}{1+k\sqrt{k}} = \frac{\sqrt{1.346} \times (1.346-1)}{1+1.346 \times \sqrt{1.346}} = 0.152$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a5}} + 0.32 \times 0.152 \times 11.88 = 1.135m$$

$$x_2 = cH_5 = 0.152 \times 11.88 = 1.806m$$

$$x_3 = 1.22\sqrt{Rt_{a5}} = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.01681} = 1.000m$$

$$x_{\min} = x_3 = 1.000m$$

$$t_{a5} = \frac{9800 \times (11.88 - 1.000) \times 80}{2 \times 270 \times 10^6 \times 1.0} = 15.80mm$$

第二次试算

$$k = \frac{22.63}{15.80} = 1.432$$

$$c = \frac{\sqrt{1.432} \times (1.432 - 1)}{1 + 1.432 \times \sqrt{1.432}} = 0.190$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a5}} + 0.32 \times 0.190 \times 11.88 = 1.246m$$

$$x_2 = 0.190 \times 11.88 = 2.257m$$

$$x_3 = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.01580} = 0.954m$$

$$x_{\min} = x_3 = 0.954m$$

$$t_{a5} = \frac{9800 \times (11.88 - 0.954) \times 80}{2 \times 270 \times 10^6 \times 1.0} = 15.86mm$$

第三次试算

$$k = \frac{t_{04}}{t_{a5}} = \frac{22.63}{15.86} = 1.427$$

$$c = \frac{\sqrt{1.427} \times (1.427 - 1)}{1 + 1.427 \times \sqrt{1.427}} = 0.179$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a5}} + 0.32 \times 0.179 \times 11.88 = 1.182m$$

$$x_2 = 0.179 \times 11.88 = 2.127m$$

$$x_3 = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.01586} = 0.972m$$

$$x_{\min} = x_3 = 0.972m$$

$$t_{a5} = \frac{9800 \times (11.88 - 0.972) \times 80}{2 \times 270 \times 10^6 \times 1.0} = 15.83mm$$

$$t_{05} = 15.83 + (22.63 - 15.83) \times \left(2.1 - \frac{1.78}{1.25\sqrt{40 \times 0.02263}}\right) = 19.93mm$$

求第 6 圈计算壁厚  $t_{06}$  ( $i = 6$ )

$$\frac{h_{i-1}}{\sqrt{R(t_{0(i-1)})}} = \frac{h_5}{\sqrt{Rt_{05}}} = \frac{1.78}{\sqrt{40 \times 0.01924}} = 2.03$$

由于  $1.325 < 2.03 < 2.625$  故用下式计算  $t_{06}$

$$t_{06} = t_{a6} + (t_{05} - t_{a6}) \left( 2.1 - \frac{1.78}{1.25\sqrt{Rt_{05}}} \right)$$

用逐步试算法求  $t_{a6}$ ,  $H_6 = 19 - 5 \times 1.78 = 10.1m$

第一次试算

$$t_{a6} = \frac{\gamma(H - 0.305)D}{2[\sigma]\eta} = \frac{9800 \times (10.1 - 0.305) \times 80}{2 \times 274.29 \times 10^6 \times 1.0} = 14.00mm$$

$$k = \frac{t_{05}}{t_{a6}} = \frac{19.24}{14.00} = 1.374$$

$$c = \frac{\sqrt{k}(k-1)}{1+k\sqrt{k}} = \frac{\sqrt{1.374} \times (1.374-1)}{1+1.374 \times \sqrt{1.374}} = 0.238$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a6}} + 0.32 \times 0.238 \times 10.1 = 1.226m$$

$$x_2 = cH_6 = 0.238 \times 10.1 = 2.404m$$

$$x_3 = 1.22\sqrt{Rt_{a6}} = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.014} = 0.913m$$

$$x_{\min} = x_3 = 0.913m$$

$$t_{a6} = \frac{9800 \times (10.1 - 0.913) \times 80}{2 \times 274.29 \times 10^6 \times 1.0} = 13.13mm$$

第二次试算

$$k = \frac{19.24}{13.13} = 1.465$$

$$c = \frac{\sqrt{1.465} \times (1.465-1)}{1+1.465 \times \sqrt{1.465}} = 0.203$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a6}} + 0.32 \times 0.203 \times 10.1 = 1.098m$$

$$x_2 = 0.203 \times 10.1 = 2.050m$$

$$x_3 = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.01313} = 0.884m$$

$$x_{\min} = x_3 = 0.884m$$

$$t_{a6} = \frac{9800 \times (10.1 - 0.884) \times 80}{2 \times 274.29 \times 10^6 \times 1.0} = 13.17mm$$

$$t_{06} = 13.17 + (19.24 - 13.17) \times \left( 2.1 - \frac{1.78}{1.25 \times \sqrt{40 \times 0.01924}} \right) = 16.06m$$

求第 7 圈计算壁厚  $t_{07}$  ( $i = 7$ ) 换材料

$$\frac{h_{i-1}}{\sqrt{R(t_{0(i-1)})}} = \frac{h_6}{\sqrt{Rt_{06}}} = \frac{1.78}{\sqrt{40 \times 0.01606}} = 2.221$$

由于  $1.375 < 2.221 < 3.625$  故用下式计算  $t_{07}$

用逐步试算法求  $t_{a7}$ ,  $H_7 = 19 - 6 \times 1.78 = 8.32m$

第一次试算

$$t_{a7} = \frac{\gamma(H - 0.305)D}{2[\sigma]\eta} = \frac{9800 \times (8.32 - 0.305) \times 80}{2 \times 218.49 \times 10^6 \times 1.0} = 14.38mm$$

$$k = \frac{t_{06}}{t_{a7}} = \frac{16.06}{14.38} = 1.117$$

$$c = \frac{\sqrt{k}(k-1)}{1+k\sqrt{k}} = \frac{\sqrt{1.117}(1.117-1)}{1+1.117 \times \sqrt{1.117}} = 0.057$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a7}} + 0.32 \times 0.057 \times 8.32 = 0.614m$$

$$x_2 = cH_7 = 0.057 \times 8.32 = 0.474m$$

$$x_3 = 1.22\sqrt{Rt_{a7}} = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.01438} = 0.925m$$

$$x_{\min} = x_2 = 0.474m$$

$$t_{a7} = \frac{9800 \times (8.32 - 0.474) \times 80}{2 \times 218.49 \times 10^6 \times 1.0} = 14.08mm$$

第二次试算

$$k = \frac{16.06}{14.08} = 1.141$$

$$c = \frac{\sqrt{1.141} \times (1.141 - 1)}{1 + 1.141 \times \sqrt{1.141}} = 0.068$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a7}} + 0.32 \times 0.068 \times 8.32 = 0.639m$$

$$x_2 = 0.068 \times 8.32 = 0.566m$$

$$x_3 = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.01408} = 0.916m$$

$$x_{\min} = x_2 = 0.566m$$

$$t_{a7} = \frac{9800 \times (8.32 - 0.566) \times 80}{2 \times 218.49 \times 10^6 \times 1.0} = 13.91mm$$

第三次试算

$$k = \frac{16.06}{13.91} = 1.155$$

$$c = \frac{\sqrt{1.155} \times (1.155 - 1)}{1 + 1.155 \times \sqrt{1.155}} = 0.074$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a7}} + 0.32 \times 0.074 \times 8.32 = 0.652m$$

$$x_2 = 0.074 \times 8.32 = 0.617m$$

$$x_3 = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.01391} = 0.910m$$

$$x_{\min} = x_2 = 0.617m$$

$$t_{a7} = \frac{9800 \times (8.32 - 0.617) \times 80}{2 \times 218.49 \times 10^6 \times 1.0} = 13.82mm$$

$$t_{07} = 13.91 + (16.06 - 13.91) \times \left(2.1 - \frac{1.78}{1.25 \times \sqrt{40 \times 0.01606}}\right) = 14.61m$$

求第 8 圈计算壁厚  $t_{08} (i = 8)$

$$\frac{h_{i-1}}{\sqrt{Rt_{0(i-1)}}} = \frac{h_7}{\sqrt{Rt_{07}}} = \frac{1.78}{\sqrt{40 \times 0.01461}} = 2.328$$

$$1.375 < 2.328 < 2.625$$

用逐步试算法求 $t_{a8}$ , 取 $H_8 = 19.0 - 7 \times 1.78 = 6.54m$

第一次试算

$$t_{a8} = \frac{\gamma(H - 0.305)D}{2[\sigma]\eta} = \frac{9800 \times (6.54 - 0.305) \times 80}{2 \times 218.49 \times 10^6 \times 1.0} = 11.19mm$$

$$k = \frac{t_{07}}{t_{a8}} = \frac{14.61}{11.19} = 1.306$$

$$c = \frac{\sqrt{k}(k-1)}{1+k\sqrt{k}} = \frac{\sqrt{1.306}(1.306-1)}{1+1.306 \times \sqrt{1.306}} = 0.140$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a8}} + 0.32cH_8 = 0.61 \times \sqrt{40 \times 0.01119} + 0.32 \times 0.140 \times 6.54 = 0.701m$$

$$x_2 = cH_8 = 0.140 \times 6.54 = 0.916m$$

$$x_3 = 1.22\sqrt{Rt_{a8}} = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.01119} = 0.816m$$

$$x_{\min} = x_1 = 0.701m$$

$$t_{a8} = \frac{9800 \times (6.45 - 0.701) \times 80}{2 \times 218.49 \times 10^6 \times 1.0} = 10.48mm$$

第二次试算

$$k = \frac{t_{07}}{t_{a8}} = \frac{14.61}{10.48} = 1.394$$

$$c = \frac{\sqrt{k}(k-1)}{1+k\sqrt{k}} = \frac{\sqrt{1.394}(1.394-1)}{1+1.394 \times \sqrt{1.394}} = 0.176$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a8}} + 0.32cH_8 = 0.61 \times \sqrt{40 \times 0.01048} + 0.32 \times 0.176 \times 6.54 = 0.763$$

$$x_2 = cH_8 = 0.176 \times 6.54 = 1.151m$$

$$x_3 = 1.22\sqrt{Rt_{a8}} = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.01048} = 0.790m$$

$$x_{\min} = x_1 = 0.763m$$

$$t_{a8} = \frac{9800 \times (6.54 - 0.763) \times 80}{2 \times 218.49 \times 10^6 \times 1.0} = 10.36mm$$

第三次试算

$$k = \frac{t_{07}}{t_{a8}} = \frac{14.61}{10.36} = 1.410$$

$$c = \frac{\sqrt{k}(k-1)}{1+k\sqrt{k}} = \frac{\sqrt{1.410}(1.410-1)}{1+1.410 \times \sqrt{1.410}} = 0.182$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a8}} + 0.32cH_8 = 0.61 \times \sqrt{40 \times 0.01036} + 0.32 \times 0.182 \times 6.54 = 0.774$$

$$x_2 = cH_8 = 0.182 \times 6.54 = 1.190m$$

$$x_3 = 1.22\sqrt{Rt_{a8}} = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.01036} = 0.785m$$

$$x_{\min} = x_1 = 0.774m$$

$$t_{a8} = \frac{9800 \times (6.54 - 0.774) \times 80}{2 \times 218.49 \times 10^6 \times 1.0} = 10.34mm$$

$$t_{08} = 10.36 + (14.61 - 10.36) \times \left(2.1 - \frac{1.78}{1.25 \times \sqrt{40 \times 0.01461}}\right) = 11.37mm$$

$t_{09}$ 与 $t_{10}$ 的等壁厚的

$$\text{即 } t_{09} = t_{10} = 9mm$$

### 3.2.2 计算储油时各层板厚

求底圈计算壁厚 $t_{01}$

$$t_{01} = \frac{r(H - 0.305)D}{2[\sigma]\eta} = \frac{8428 \times (19 - 0.305) \times 80}{2 \times 256 \times 10^6 \times 1.0} = 24.62mm$$

$$t_{01} = \left[1.06 - \frac{0.022D}{H} \sqrt{\frac{\gamma H}{[\sigma]\eta}}\right] \frac{\gamma HD}{2[\sigma]\eta} = 1.06 - \frac{0.022 \times 80}{19} \times \sqrt{\frac{8428 \times 19}{256 \times 10^6 \times 1.0}}$$

$$\times \frac{8428 \times 19 \times 80}{2 \times 256 \times 10^6 \times 1.0} = 25.94mm$$

取二者较小值，故底圈计算壁厚 $t_{01} = 24.62mm$

求第2圈计算壁厚 $t_{02}$  ( $i = 2$ )

$$\frac{h_{i-1}}{\sqrt{Rt_{0(i-1)}}} = \frac{h_i}{\sqrt{Rt_{0i}}} = \frac{1.78}{\sqrt{40 \times 0.02462}} = 1.794$$

由于 $1.325 < 1.794 < 2.625$  故用下式计算 $t_{02}$

$$t_{02} = t_{a2} + (t_{01} - t_{a2}) \left(2.1 - \frac{1.78}{1.25\sqrt{Rt_{01}}}\right)$$

用逐步法求

$$t_{a2}$$

$$\text{取 } H_2 = 19 - 1.78 = 17.22mm$$

第一次试算

$$t_{a2} = \frac{\gamma(H - 0.305)D}{2[\sigma]\eta} = \frac{8428 \times (17.22 - 0.305) \times 80}{2 \times 256 \times 10^6 \times 1.0} = 22.27mm \quad k = \frac{t_{01}}{t_{a2}} = \frac{24.62}{22.27} = 1.106$$

$$c = \frac{\sqrt{k}(k - i)}{1 + k\sqrt{k}} = \frac{\sqrt{1.106} \times (1.106 - 1)}{1 + 1.106 \times \sqrt{1.106}} = 0.052$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a2}} + 0.32cH_2 = 0.61 \times \sqrt{40 \times 0.02227} + 0.32 \times 0.052 \times 17.22 = 0.862$$

$$x_2 = cH_2 = 0.052 \times 17.22 = 0.895$$

$$x_3 = 1.22\sqrt{Rt_{a2}} = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.02227} = 1.151$$

$$x_{\min} = x_1 = 0.862m$$

$$t_{a2} = \frac{8487 \times (17.22 - 0.862) \times 80}{2 \times 256 \times 16^6 \times 1.0} = 21.54m$$

第二次试算

$$k = \frac{24.62}{21.54} = 1.143$$

$$c = \frac{\sqrt{1.143} \times (1.143 - 1)}{1 + 1.143 \times \sqrt{1.143}} = 0.069$$

$$x_1 = 0.61 \times \sqrt{40 \times 0.02154} + 0.32 \times 0.069 \times 17.22 = 0.946m$$

$$x_2 = 0.069 \times 17.22 = 1.188m$$

$$x_3 = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.02154} = 1.132m$$

$$x_{\min} = x_1 = 0.946m$$

$$t_{a2} = \frac{8487 \times (17.22 - 0.946) \times 80}{2 \times 256 \times 10^6 \times 1.0} = 21.43m$$

第三次试算

$$k = \frac{24.62}{21.43} = 1.149$$

$$c = \frac{\sqrt{1.149} \times (1.149 - 1)}{1 + 1.149 \times \sqrt{1.149}} = 0.072$$

$$x_1 = 0.61 \times \sqrt{40 \times 0.02143} + 0.32 \times 0.072 \times 17.22 = 0.962m$$

$$x_2 = cH_2 = 0.072 \times 17.22 = 1.240m$$

$$x_3 = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.02143} = 1.130m$$

$$x_{\min} = x_1 = 0.962m$$

$$t_{a2} = \frac{8428 \times (17.22 - 0.962) \times 80}{2 \times 256 \times 10^6 \times 1.0} = 21.41m$$

$$t_{02} = 21.43 + (24.62 - 21.43) \times \left( 2.1 - \frac{1.78}{1.25 \times \sqrt{40 \times 0.02462}} \right) = 23.55m$$

求第 3 圈计算壁厚  $t_{03}$  ( $i = 3$ )

$$\frac{h_{i-1}}{\sqrt{R(t_{0(i-1)})}} = \frac{h_2}{\sqrt{Rt_{02}}} = \frac{1.78}{\sqrt{40 \times 0.02355}} = 1.834$$

由于  $1.325 < 1.834 < 2.625$  故用下式计算  $t_{03}$

$$t_{03} = t_{a3} + (t_{02} - t_{a3}) \left( 2.1 - \frac{1.78}{1.25 \sqrt{Rt_{02}}} \right)$$

用逐步试算法求  $t_{a3}$ ,  $H_3 = 19 - 2 \times 1.78 = 15.44m$

第一次试算

$$t_{a3} = \frac{\gamma(H - 0.305)D}{2[\sigma]\eta} = \frac{8428 \times (15.44 - 0.305) \times 80}{2 \times 256 \times 10^6 \times 1.0} = 19.93mm$$

$$k = \frac{t_{02}}{t_{a3}} = \frac{23.55}{19.93} = 1.182$$

$$c = \frac{\sqrt{k}(k-1)}{1+k\sqrt{k}} = \frac{\sqrt{1.182} \times (1.182-1)}{1+1.182 \times \sqrt{1.182}} = 0.087$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a3}} + 0.32 \times 0.087 \times 15.44 = 0.974m$$

$$x_2 = cH_3 = 0.087 \times 15.44 = 1.343m$$

$$x_3 = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.01993} = 1.089m$$

$$x_{\min} = x_1 = 0.974m$$

$$t_{a3} = \frac{8428 \times (15.44 - 0.974) \times 80}{2 \times 256 \times 10^6 \times 1.0} = 19.05mm$$

第二次试算

$$k = \frac{23.55}{19.05} = 1.236$$

$$c = \frac{\sqrt{1.236} \times (1.236-1)}{1+1.236 \times \sqrt{1.236}} = 0.111 \quad x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a3}} + 0.32 \times 0.111 \times 15.44 = 1.081m$$

$$x_2 = 0.111 \times 15.44 = 1.714m$$

$$x_3 = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.01905} = 1.065m$$

$$x_{\min} = x_3 = 1.065m$$

$$t_{a3} = \frac{8487 \times (15.44 - 1.065) \times 80}{2 \times 256 \times 10^6 \times 1.0} = 18.93mm$$

第三次试算

$$k = \frac{23.55}{18.93} = 1.244$$

$$c = \frac{\sqrt{1.244} \times (1.244 - 1)}{1 + 1.244 \times \sqrt{1.244}} = 0.114$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a3}} + 0.32 \times 0.114 \times 15.44 = 1.094m$$

$$x_2 = 0.114 \times 15.44 = 1.760m$$

$$x_3 = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.01893} = 1.062m$$

$$x_{\min} = x_3 = 1.062m$$

$$t_{a3} = \frac{8428 \times (15.44 - 1.062) \times 80}{2 \times 256 \times 10^6 \times 1.0} = 18.93mm$$

$$t_{03} = 18.93 + (23.55 - 18.93) \times \left( 2.1 - \frac{1.78}{1.25 \times \sqrt{40 \times 0.02355}} \right) = 21.85m$$

求第四圈计算壁厚  $t_{04} (i = 4)$

$$\frac{h_{i-1}}{\sqrt{R(t_{0(i-1)})}} = \frac{h_3}{\sqrt{Rt_{03}}} = \frac{1.78}{\sqrt{40 \times 0.02355}} = 1.904$$

由于  $1.325 < 1.904 < 2.625$  故用下式计算  $t_{04}$

$$t_{04} = t_{a4} + (t_{03} - t_{a4}) \left( 2.1 - \frac{1.78}{1.25\sqrt{Rt_{03}}} \right)$$

用逐步试算法求

$$t_{a4}, H_4 = 19 - 3 \times 1.78 = 13.66m$$

第一次试算

$$t_{a4} = \frac{\gamma(H - 0.305)D}{2[\sigma]\eta} = \frac{8428 \times (13.66 - 0.305) \times 80}{2 \times 256 \times 10^6 \times 1.0} = 17.59mm$$

$$k = \frac{t_{03}}{t_{a4}} = \frac{21.85}{17.59} = 1.242$$

$$c = \frac{\sqrt{k}(k-1)}{1+k\sqrt{k}} = \frac{\sqrt{1.242} \times (1.242-1)}{1+1.242 \times \sqrt{1.242}} = 0.113$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a4}} + 0.32 \times 0.113 \times 13.66 = 1.006m$$

$$x_2 = cH_4 = 0.113 \times 13.66 = 1.544m$$

$$x_3 = 1.22\sqrt{Rt_{a4}} = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.01759} = 1.023m$$

$$x_{\min} = x_1 = 1.006m$$

$$t_{a4} = \frac{8428 \times (13.66 - 1.066) \times 80}{2 \times 256 \times 10^6 \times 1.0} = 16.66mm$$

第二次试算

$$k = \frac{21.85}{16.66} = 1.312$$

$$c = \frac{\sqrt{1.312} \times (1.312-1)}{1+1.312 \times \sqrt{1.312}} = 0.143$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a4}} + 0.32 \times 0.143 \times 13.66 = 1.123m$$

$$x_2 = 0.143 \times 13.66 = 1.953m$$

$$x_3 = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.01666} = 0.996m$$

$$x_{\min} = x_3 = 0.996m$$

$$t_{a4} = \frac{8428 \times (13.66 - 0.996) \times 80}{2 \times 256 \times 10^6 \times 1.0} = 16.68mm$$

$$t_{04} = 16.68 + (21.85 - 16.68) \times \left( 2.1 - \frac{1.78}{1.25 \times \sqrt{40 \times 0.02185}} \right) = 19.66m$$

求第 5 圈计算壁厚  $t_{05}$  ( $i=5$ )

$$\frac{h_{i-1}}{\sqrt{R(t_{0(i-1)})}} = \frac{h_4}{\sqrt{Rt_{04}}} = \frac{1.78}{\sqrt{40 \times 0.01966}} = 2.007$$

由于  $1.325 < 2.007 < 2.625$  故用下式计算  $t_{05}$

$$t_{05} = t_{a5} + (t_{04} - t_{a5}) \left( 2.1 - \frac{1.78}{1.25\sqrt{Rt_{04}}} \right)$$

用逐步试算法求

$$t_{a5},$$

$$H_5 = 19 - 4 \times 1.78 = 11.88m$$

第一次试算

$$t_{a5} = \frac{\gamma(H - 0.305)D}{2[\sigma]\eta} = \frac{8428 \times (11.88 - 0.305) \times 80}{2 \times 256 \times 10^6 \times 1.0} = 15.24 \text{mm}$$

$$k = \frac{t_{04}}{t_{a5}} = \frac{19.66}{15.24} = 1.290$$

$$c = \frac{\sqrt{k}(k-1)}{1+k\sqrt{k}} = \frac{\sqrt{1.290} \times (1.290-1)}{1+1.290 \times \sqrt{1.290}} = 0.134$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a5}} + 0.32 \times 0.134 \times 11.88 = 0.986 \text{m}$$

$$x_2 = cH_5 = 0.134 \times 11.88 = 1.592 \text{m}$$

$$x_3 = 1.22\sqrt{Rt_{a5}} = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.01524} = 0.953 \text{m}$$

$$x_{\min} = x_3 = 0.953 \text{m}$$

$$t_{a5} = \frac{8428 \times (11.88 - 0.953) \times 80}{2 \times 256 \times 10^6 \times 1.0} = 14.39 \text{mm}$$

第二次试算

$$k = \frac{t_{04}}{t_{a5}} = \frac{19.66}{14.39} = 1.366$$

$$c = \frac{\sqrt{1.366} \times (1.366-1)}{1+1.366 \times \sqrt{1.366}} = 0.165$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a5}} + 0.32 \times 0.165 \times 11.88 = 1.090 \text{m}$$

$$x_2 = 0.165 \times 11.88 = 1.960 \text{m}$$

$$x_3 = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.0149639} = 0.926 \text{m}$$

$$x_{\min} = x_3 = 0.926 \text{m}$$

$$t_{a5} = \frac{8428 \times (11.88 - 0.926) \times 80}{2 \times 256 \times 10^6 \times 1.0} = 14.43 \text{mm}$$

第三次试算

$$k = \frac{19.66}{14.43} = 1.362$$

$$c = \frac{\sqrt{1.362} \times (1.362-1)}{1+1.362 \times \sqrt{1.362}} = 0.163$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a5}} + 0.32 \times 0.163 \times 11.88 = 1.083m$$

$$x_2 = 0.163 \times 11.88 = 1.936m$$

$$x_3 = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.01443} = 0.927m$$

$$x_{\min} = x_3 = 0.927m$$

$$t_{a5} = \frac{8428 \times (11.88 - 0.927) \times 80}{2 \times 256 \times 10^6 \times 1.0} = 14.42mm$$

$$t_{05} = 14.43 + (19.66 - 14.43) \times \left(2.1 - \frac{1.78}{1.25\sqrt{40 \times 0.01966}}\right) = 17.01mm$$

求第 6 圈计算表壁厚  $t_{06}$  ( $i=6$ ) 换材料

$$\frac{h_{i-1}}{\sqrt{R(t_{0(i-1)})}} = \frac{h_5}{\sqrt{Rt_{05}}} = \frac{1.78}{\sqrt{40 \times 0.01701}} = 2.158$$

由于  $1.375 < 2.158 < 2.625$  故用下式计算  $t_{06}$

用逐步试算法求

$t_{a6}$ ,

$$H_6 = 19 - 5 \times 1.78 = 10.1m$$

第一次试算

$$t_{a6} = \frac{\gamma(H - 0.305)D}{2[\sigma]\eta} = \frac{8428 \times (10.10 - 0.305) \times 80}{2 \times 203.92 \times 10^6 \times 1.0} = 16.19mm \quad k = \frac{t_{05}}{t_{a6}} = \frac{17.01}{16.19} = 1.051$$

$$c = \frac{\sqrt{k}(k-1)}{1+k\sqrt{k}} = \frac{\sqrt{1.051} \times (1.051-1)}{1+1.051 \times \sqrt{1.051}} = 0.026$$

$$x_1 = 0.61\sqrt{Rt_{a6}} + 0.32 \times 0.026 \times 10.1 = 0.575m$$

$$x_2 = cH_6 = 0.026 \times 10.1 = 0.263m$$

$$x_3 = 1.22\sqrt{Rt_{a6}} = 1.22 \times \sqrt{40 \times 0.01619} = 0.982m$$

$$x_{\min} = x_2 = 0.263m$$

$$t_{a6} = \frac{8428 \times (10.1 - 0.263) \times 80}{2 \times 203.92 \times 10^6 \times 1.0} = 16.26mm$$

第二次试算

$$k = \frac{17.01}{16.26} = 1.046$$

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/835131124333012010>