

浅谈钢制单盘式内浮顶储罐浮盘设计

商家骏 (中国石化工程建设有限公司, 北京 100000)

摘要: 近年来,油品储存过程中蒸发损失问题倍受人们关注。因此,人们通过采取各种措施,降低油品蒸发带来的损失。其中,内浮顶储罐的使用最为广泛。内浮顶罐是在液面上设置内浮盘,内浮盘连续覆盖在储液表面,从而降低蒸发损失约达90%;并且浮盘也隔绝了空气与介质接触,在减少大气污染的同时也降低了火灾危害的发生概率。本次以10000m³碳钢制单盘式内浮顶为例,对内浮盘进行设计计算。通过对浮盘浮力、强度和稳定性、抗沉性、以及支柱等方面计算,对浮盘各个参数的选择进行验证,从而确保了浮盘本身的可靠性。

关键词: 内浮顶储罐; 碳钢浮盘; 单盘式; 焊接

中图分类号: TE972 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 007-0148-03

A Brief Discussion on the Design of Steel Single-Disk Internal Floating Roof Tanks

Shang Jiajun (Sinopec Engineering Incorporation, Beijing 100000, China)

Abstract: In recent years, the problem of evaporation loss during oil storage has attracted much attention. Therefore, people take various measures to reduce the loss caused by oil evaporation. Among them, the inner floating top storage tank is the most widely used. The inner floating top tank sets the inner floating plate on the liquid surface, which continuously covers the reservoir surface, reducing the evaporation loss by about 90%, and the air and the probability of fire hazard. In this paper, 10000m³ carbon steel single disk internal floating top is taken as an example to design and calculate the internal floating plate. Through the calculation of buoyancy, strength and stability, sink resistance, and pillar of the floating plate, the selection of each parameter of the floating plate is verified to ensure the reliability of the floating plate itself.

key words: Internal floating roof storage tank; Carbon steel floating disc; Single disc type; welding

1 概述

根据《石油化工企业设计防火标准》(GB50160-2008, 2018年版)中要求:储存甲_B、乙_A类的液体应选用金属材质的浮舱式的内浮顶罐。浮顶应根据储存介质的物性和材质强度进行选用,当单罐容积大于5000m³的内浮顶储罐应选用钢制单盘式或双盘式浮顶;并且根据《石油化工储运系统罐区设计规范》(SH3007-2014)中对内浮顶储罐的浮盘选用要求:储存I、II级毒性介质的内浮顶储罐和直径不小于40m的甲_B、乙_A类的内浮顶储罐,内浮顶不得采用易熔材料。根据以上标准要求,基于安全性考虑,钢制焊接浮盘成为大容积或I、II级毒性介质用储罐内浮顶的第一选择。

2 浮顶结构

钢制单盘式内浮顶主要由一个单层中心板和周围环形独立密封浮舱构成的。其中单盘采用薄钢板加强度加强筋构成。周围浮舱由浮舱底板、浮舱顶板、外边缘板、内边缘板、浮舱隔板及加强筋等组成,浮舱被径向隔板分隔成多个独立的密封隔舱。

3 浮顶设计原则

浮顶的浮力计算应符合:①当储存液体的密度大于或等于700kg/m³时,应按700kg/m³计算;②当储存液体的密度小于700kg/m³时,应按实际密度计算;③当设计单盘板安装高度时,按储液实际密度计算。

浮顶的设计应满足以下条件:①浮顶支撑在罐底板上时,能够承受浮顶自重和1.2kPa的附加活载荷;②浮顶漂浮在储液上,在浮顶上没有活载荷的情况下,单盘板和任意两个隔舱同时泄漏时,浮顶应能漂浮在液面上不沉没,且不发生强度和稳定性破坏;③浮顶在运行时,浮顶罐中的任何零部件,如浮顶、储罐罐壁、导向管、浮顶支柱等均不能受到损坏;任何相对运动的元件,均不得影响浮顶的升降,也不得因摩擦而产生火花;④浮顶的计算浮力不得小于其自重(包括密封装置)加上密封装置与罐壁之间摩擦力的两倍;⑤单盘式浮顶的每个浮舱均应满足气密性要求;⑥浮顶运行过程中,内浮盘应连续覆盖在储液表面,与储液全面接触。

4 钢制内浮顶设计举例

本次以某项目10000m³煤油储罐为例,储存介质为煤油,采用钢制焊接单盘式内浮顶。

4.1 设计基本参数

储罐储存介质密度 $\rho = 766.4 \text{ kg/m}^3$; 储罐内径 $D = 27.5 \text{ m}$, 浮舱外径 $D_1 = 27.1 \text{ m}$, 浮舱内径 $D_2 = 22.1 \text{ m}$, 浮舱数 $m = 16$, 浮舱宽度 $b = 2.5 \text{ m}$; 浮舱外边缘板宽度 $b_3 = 80 \text{ mm}$, 厚度 $t_3 = 6 \text{ mm}$; 浮舱内边缘板宽度 $b_1 = 70 \text{ mm}$, 厚度 $t_1 = 8 \text{ mm}$; 浮舱顶板厚度 $t_2 = 5 \text{ mm}$, 浮舱底板厚度 $t_4 = 6 \text{ mm}$, 单盘板厚度 $t = 5 \text{ mm}$, 浮舱底板倾斜角 $\alpha = 0.02 \text{ rad}$; 浮顶材质为 Q235B, 浮舱重量

$Q=25t$, 单盘重量 $Q_1=17t$ 。

以上为初选及常用尺寸, 最终尺寸需经稳定性、抗沉性计算校核, 并考虑结构、安装因素才能最后确定。

4.2 单盘板的安装高度 C 值确定

为保证浮顶整体安全性及单盘板与储液全面接触, 单盘板的设置高度 C 应满足 $C_{\min} < C < C_{\max}$ 。当安装高度小于 C_{\min} 时, 单盘漂浮于储液上时, 介质会对单盘板产生向上的力, 这样会导致单盘板受力过大容易造成单盘板破裂。当安装高度大于 C_{\max} 时, 会使单盘局部或全部离开液面, 首先离开液面的部位是在单盘与环形浮舱连接处, 那里的单盘挠度最小, 易造成气体空间。此外, 当单盘漏损后, 要求由于单盘自重产生的作用于环形浮舱上的弯矩要尽可能小。

4.2.1 单盘板最低安装高度 C_{\min}

当单盘在最低安装高度时, 单盘板的重量完全由储液浮力提供, 这种情况下, 单盘安装前后浮顶的整体浸没深度没有变化, 单盘板自身受到的浮力与单盘板自重相平衡, 即

$$(T_0 - C_{\min}) \frac{\pi D_2^2}{4} \rho_1 g = P = \frac{\pi D_2^2}{4}$$

$$\text{单盘最低安装高度 } C_0: C_0 = T_0 - \frac{P}{\rho_1} = 0.135\text{m}$$

4.2.2 单盘板最高安装高度 C_{\max}

单盘安装高度越高, 储液对单盘的浮力越小, 浮舱需要承担更多的单盘重量, 此时浮舱的沉没深度变大 (ΔT_1)。当达到最高安装高度 C_{\max} 时, 安装单盘后环形浮舱所增加的下沉增加的浮力加单盘的浮力等于单盘总重, 即 $C_{\max} = T_0 + \Delta T_{1\max}$

$$\text{单盘最高安装高度 } C_m: C_m = T_0 + \frac{0.479\tau^2}{1-\tau^2} \cdot \frac{P}{\rho_1} = 0.248\text{m}$$

由以上可得出, 单盘板的安装高度应介于 135mm 和 248mm 之间。单盘板的安装高度可以进行初步确定, 浮舱结构校核过程中, 可能会出现应力等不合格的情况, 此时单盘板的安装高度需要进行修改后再进行浮顶核算。因此, 单盘板的安装高度初步定为 200mm。

4.3 内浮顶设计浮力计算

内浮顶浮力应满足条件

$$F_{\text{浮舱}} + F_{\text{单盘}} \geq 2(Q + Q_1) + F_{\text{摩擦}}$$

经过计算:

$$F_{\text{浮舱}} + F_{\text{单盘}} = 265387\text{N}$$

$$2(Q + Q_1) + F_{\text{摩擦}} = 97270\text{N}$$

内浮顶设计浮力满足要求。

4.4 浮顶的强度和稳定性

4.4.1 单盘的挠度和应力

单盘的直径很大, 厚度很薄。它支撑与浮舱的内周边上, 边缘力矩很小, 可以把单盘近似看作是支撑于弹性边环 (环形浮舱) 上的圆薄膜。中国科学院力学研究所和北京炼油设计院在对支撑于弹性边环上圆薄膜在均布荷载作用下的挠度及应力分析中引用了无量纲参数 ρ 及 $S_t(X)$

$$\rho = \frac{qR_2^1}{Etf_m^2}$$

$$S_t(X) = \frac{R_2^2 N_r}{Etf_m^2}$$

$$\text{单盘中点的挠度 } f_m: f_m = K_1 \sqrt[3]{\frac{qR_2^4}{Et}} = 0.21\text{m}$$

单盘边缘的径向应力 σ_r :

$$\sigma_r = K_2 \sqrt[3]{\frac{Eq^2 R_2^2}{t^2}} = 8.5\text{MPa}$$

单盘中点的径向应力 σ_m :

$$\sigma_m = K_3 \sqrt[3]{\frac{Eq^2 R_2^2}{t^2}} = 18.3\text{MPa}$$

4.4.2 环形浮舱的整体稳定性

环形浮舱的整体稳定性, 系指环形浮舱在受到来自单盘均匀径向拉力作用下的稳定性, 包括在环形浮舱平面内的稳定和侧向稳定。

① 环形浮舱平面稳定性。根据弹性稳定理论及中国科学院力学研究所的推荐公式, 环形浮舱在圆环平面内的临界失稳荷载 P_{cr1}

$$P_{cr1} = 3EI_z/R_c^3 = 7.05 \times 10^6 \text{N/m}$$

$$\text{满足环形浮舱平面稳定的条件为: } P_{cr1} \geq n_1 N_r \frac{2\tau}{1+\tau} = 5.34 \times 10^4 \text{N/m}$$

因此环形浮舱平面稳定性合格。

② 环形浮舱侧向稳定性。环形浮舱在圆环侧向的临界失稳荷载 P_{cr2} 为

$$P_{cr2} = \frac{EI_x}{R_c^3} \cdot \frac{9}{4 + \frac{EI_x}{GI_y}} + \frac{\rho_1 g b R_c}{4} = 4.53 \times 10^5 \text{N/m}$$

$$\text{满足侧向稳定的条件为: } P_{cr2} \geq n_2 N_r \frac{2\tau}{1+\tau} = 5.34 \times 10^4$$

N/m, 因此环形浮舱侧向稳定性合格。

4.4.3 环形浮舱截面的承载能力

通过对不同尺寸油罐的计算, 发现环形浮舱的整体稳定比较容易满足, 而环形浮舱截面的承载能力需要通过计算, 采取结构措施才能满足。

① 环形浮舱顶、底板。环形浮舱、底板又薄又宽, 因此其临界应力很低, 在浮顶处于不利工况下, 它们往往处于单向受压失稳后还承担较大的竖向均布荷载的状态, 此时需要验算失稳板在垂直均布荷载作用下

的径向拉力 σ_{r2} 、 σ_{r4} 不应大于许用应力 $[\sigma]$ ，即：

$$\sigma_{r2} = \sqrt[3]{\frac{Eq_2^2}{24} \cdot \left(\frac{b}{t_2}\right)^2} \leq [\sigma]$$

$$\sigma_{r4} = \sqrt[3]{\frac{Eq_4^2}{24} \cdot \left(\frac{b}{t_4}\right)^2} \leq [\sigma]$$

计算浮舱顶、底板径向拉力： $\sigma_{r2}=14.4 \text{ MPa} < [\sigma]$

$\sigma_{r4}=29.0 \text{ MPa} < [\sigma]$

浮舱顶板、底板径向拉力合格。

②环形浮舱内、外边缘板。环形浮舱内、外边缘板应承担起作用在环形浮舱截面上的总环向压力。为此必须满足以下三个条件。

膜应力：由径向拉力引起的边缘板应力应小于 $[\sigma]$

$$\sigma_N = \frac{nN_r R_2}{b t_1 + b_3 t_3 + F_L} = 52.4 \text{ MPa} < [\sigma]$$

得出：膜应力满足要求。

弯曲应力：由径向拉力及泄漏后自重引起的弯矩 M 而产生的应力之和应小于屈服限，即

σ_M —由单盘泄漏后盘自重产生的弯矩 M 而引起的边缘板应力

$$\sigma_M = \frac{M \times \frac{D_1}{4} (1 + \pi)}{I_x} (b_3 - O_z) = 13.9 \text{ MPa}$$

$\sigma_N + \sigma_M = 66.2 \text{ MPa} < \sigma_s$

得出：弯曲应力满足要求。

稳定性：由径向拉力引起的边缘板应力应小于临界应力，即

内边缘板的临界应力：

$$\sigma_{cr1} = 7.6 \times 10^6 \times (t_1/b_1)^2 = 9.92 \times 10^{-4} \text{ MPa}$$

外边缘板的临界应力：

$$\sigma_{cr3} = 7.6 \times 10^6 \times (t_3/b_3)^2 = 4.275 \times 10^{-4} \text{ MPa}$$

因为 $\sigma_{r1} < \sigma_N$ ，所以内边缘板稳定性不合格，需增加加强筋；因为 $\sigma_{r3} < \sigma_N$ ，所以外边缘板稳定性不合格，需增加加强筋；由于 $\sigma_N > \sigma_{cr1,3}$ ，要采取加强措施。加强筋的刚度为

$$EI \geq \frac{a^2}{\pi^2} [\sigma] (F_{1,3}' + dt_{1,3})$$

外边缘板加筋选择 L50x5，内边缘板加筋选择 L100x63x8，并且都设置在板中心位置。加筋后，内外边缘板的临界应力 $\sigma_{cr1,3}$ 应满足：

$$\sigma_{cr1,3} = 7.6 \times 10^{11} \times \left(\frac{t_{1,3}}{d_{1,3}}\right)^2 \geq [\sigma]$$

此时， $\sigma_{cr1}=296.5 \text{ MPa} > [\sigma]$

$\sigma_{cr3}=151.5 \text{ MPa} > [\sigma]$

得出：内、外边缘板临界应力合格。

4.5 浮顶的抗沉性计算

对浮顶抗沉性的一个要求是，当单盘板与任意两

个浮舱同时泄漏时，浮顶的下沉深度不得大于浮舱外边缘板的高度 b_3 ，且至少应考虑 50 ~ 100mm 裕量。当允许下沉深度不满足时，介质会从外边缘板外侧流入浮顶上方，导致浮顶沉没。即 $b_3 \geq T + T_{0\alpha} + (0.05 \sim 0.10) = 0.598 \text{ m} < b_3 = 0.8 \text{ m}$ ，所以单盘板与任意两个浮舱泄漏时的抗沉性合格。

4.6 支柱计算

浮顶支柱应能承受浮顶自重和 1.2kPa 的均匀附加荷载。支柱的稳定性计算可以按两端铰支的压杆考虑，支柱承载不均匀系数 $K_1=1.5$ ，可满足各种支柱不完全均布的情况。

4.6.1 浮舱支柱计算

支柱的临界应力为： $\sigma_{cr1} = a - b \lambda_1 = 195.4 \text{ MPa}$ (a, b 与材料有关)

支柱的实际受力： $\sigma_1 = F * g / A_1 = 28.3 \text{ MPa}$

工程上一般用稳定安全系数法判断压杆稳定性 $n_{st} = 1.8 \sim 8$

因为 $1.8 < \sigma_{cr1} / \sigma_1 = 6.9 < 8$ ，所以浮舱支柱稳定性合格。

4.6.2 单盘支柱计算

支柱的临界应力为： $\sigma_{cr2} = \pi^2 * E / (\lambda_2)^2 = 126.7 \text{ MPa}$

支柱的实际受力： $\sigma_2 = F * g / A_2 = 24.0 \text{ MPa}$

因为 $1.8 < \sigma_{cr2} / \sigma_2 = 5.3 < 8$ ，所以单盘支柱稳定性合格。

5 结论

本文根据标准中设计准则并结合参考文献计算方法，通过对 10000m³ 单盘式内浮顶浮力、强度和稳定性、抗沉性、以及支柱等方面计算，对浮顶各个参数的选择进行验证，从而确保了浮顶本身的可靠性。

参考文献：

- [1] 刘明福. 拱顶储罐内浮顶的发展 [J]. 石油化工设备, 2003-07-26.
- [2] GB 50160-2018. 石油化工企业设计防火标准 [S]. 北京: 中国住房和城乡建设部, 2009.
- [3] GB 50737-2011. 石油储备库设计规范 [S]. 北京: 中国石化工程建设公司, 2011.
- [4] SH 3007-2014. 石油化工储运系统罐区设计规范 [S]. 北京: 中国工业和信息化部, 2011.
- [5] 徐英, 杨一凡, 等. 球罐和大型储罐 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

作者简介：

商家骏，男，2013年毕业于盐城工学院，过程装备与控制工程专业，学士学位，主要从事中国石化工程建设有限公司设备室容器设计工作。