例题 2　3 000m³液化石油气球罐

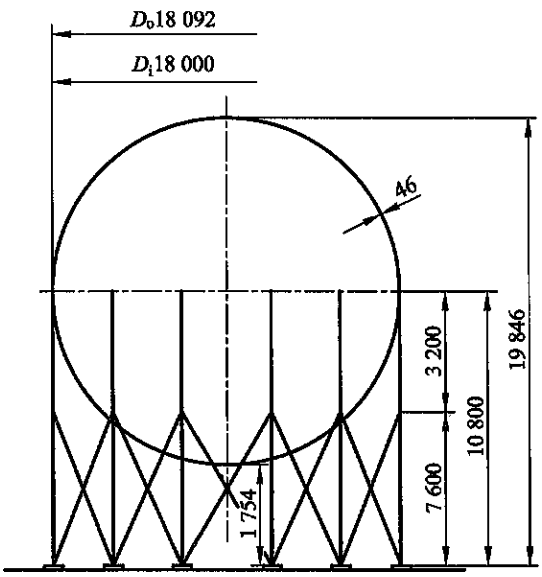

图 2-1

1　设计条件

设计压力：$p = 1.77$ MPa

设计温度：50℃/−19 ℃

水压试验压力：$p_T = 1.25p\dfrac{[\sigma]}{[\sigma]^t} = 2.22$ MPa

球壳内直径：$D_i = 18\,000$ mm $(3\,054\ \mathrm{m}^3)$

储存介质：液化石油气

装量系数：$k = 0.90$

地震设防烈度/加速度/地震分组：7 度/0.10g/ 第二组

基本风压值：$q_0 = 600\ \mathrm{N/m^2}$

基本雪压值：$q = 600\ \mathrm{N/m^2}$

支柱数目：　n=10

支柱选用：ϕ630×12　Q345R　钢板卷制

拉杆选用：ϕ60 圆钢

球罐建造场地：场地类别Ⅱ、地面粗糙类别 B

钢材厚度负偏差：$C_1 = 0.3\,mm$，按 GB 12337 第 3.8.3.1，取 $C_1 = 0$ mm

腐蚀裕量：C_2=1.0mm

2 球壳计算

2.1 计算压力

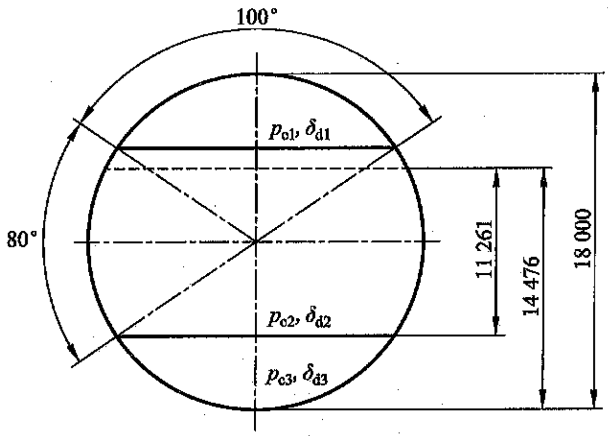

图 2-2

设计压力：$p=1.77\mathrm{MPa}$

球壳各带的介质液柱高度：

$h_1=0\ \mathrm{mm}$；

$h_2=11\ 261\ \mathrm{mm}$；

$h_3=14\ 476\ \mathrm{mm}$。

介质密度：$\rho_2=480\ \mathrm{kg/m^3}$

重力加速度：$g=9.81\ \mathrm{m/s^2}$

球壳各带的计算压力：

$p_{ci}=p+h_i\rho_2 g\times10^{-9}\ \mathrm{MPa}$

$p_{c1}=1.77+0=1.770\ \mathrm{MPa}$

$p_{c2}=1.77+11\ 261\times480\times9.81\times10^{-9}=1.823\ \mathrm{MPa}$

$p_{c3}=1.77+14\ 476\times480\times9.81\times10^{-9}=1.838\ \mathrm{MPa}$

2.2 球壳各带的厚度

球壳内直径：$D_i=18\ 000\ \mathrm{mm}$

设计温度下球壳材料 Q370R 的许用应力：$[\sigma]^t=193\ \mathrm{MPa}$

焊接接头系数：$\phi=1.0$

厚度附加量：$C=C_1+C_2=0+1.0=1.0\ \mathrm{mm}$

球壳各带的设计厚度

$$\delta_{d1}=\frac{p_{c1}D_i}{4[\sigma]^t\phi-p_{c1}}+C_2=\frac{1.77\times18\ 000}{4\times193\times1.0-1.77}+1.0=42.36\mathrm{mm}$$

$$\delta_{d2}=\frac{p_{c2}D_i}{4[\sigma]^t\phi-p_{c2}}+C_2=\frac{1.823\times18\ 000}{4\times193\times1.0-1.823}+1.0=43.61\mathrm{mm}$$

$$\delta_{d3}=\frac{p_{c3}D_i}{4[\sigma]^t\phi-p_{c3}}+C_2=\frac{1.838\times18\ 000}{4\times193\times1.0-1.838}+1.0=43.96\text{mm}$$

球壳各带名义厚度：

取 $\delta_{n1}=46\text{ mm}$；

取 $\delta_{n2}=46\text{ mm}$；

取 $\delta_{n3}=46\text{ mm}$。

2.3 外压校核

球壳的有效厚度：$\delta_e=\delta_n-C=46-1.0=45\text{ mm}$

球壳的外半径：$R_o=9\ 046\text{ mm}$

系数 A：$A=\frac{0.125}{R_o/\delta_e}=\frac{0.125}{9\ 046/45}=0.000\ 621\ 8$

系数 B：查 GB 150.3 的图 4-6 得 B=82

许用外压力[p]：

$$[p]=\frac{B}{R_o/\delta_e}=\frac{82}{9\ 046/45}=0.407\ 9\text{MPa}$$

$$[p]=0.407\ 9\text{MPa}>0.1\text{MPa}$$

外压校核通过。

3 球罐质量计算

球壳平均直径：$D_{cp}=18\ 046\text{ mm}$

球壳材料密度：$\rho_1=7\ 850\text{ kg/m}^3$

装量系数：$k=0.90$

水的密度：$\rho_3=1\ 000\text{ kg/m}^3$

球壳外直径：$D_o=18\ 092\text{ mm}$

基本雪压值：$q=600\text{ N/m}^2$

球面的积雪系数：$C_s=0.4$

球壳质量：

$$m_1=\pi D_{cp}^2\delta_n\rho_1\times10^{-9}=\pi\times18\ 046^2\times46\times7\ 850\times10^{-9}=369\ 436\text{ kg}$$

介质质量：

$$m_2=\frac{\pi}{6}D_i^3\rho_2k\times10^{-9}=\frac{\pi}{6}\times18\ 000^3\times480\times0.90\times10^{-9}=1\ 319\ 167\text{ kg}$$

耐压试验时液体的质量：

$$m_3=\frac{\pi}{6}D_i^3\rho_3\times10^{-9}=\frac{\pi}{6}\times18\ 000^3\times1\ 000\times10^{-9}=3\ 053\ 628\text{ kg}$$

积雪质量：

$$m_4=\frac{\pi}{4g}D_o^2qC_S\times10^{-6}=\frac{\pi}{4\times9.81}\times18\ 092^2\times600\times0.4\times10^{-6}=6\ 289\text{ kg}$$

保温层质量：

$m_5=0$（无保温）

支柱和拉杆的质量：

$m_6=24\,509$ kg

附件质量：

$m_7=33\,962$ kg

操作状态下的球罐质量：

$$\begin{aligned}m_o&=m_1+m_2+m_4+m_5+m_6+m_7\\&=369\,436+1\,319\,167+6\,289+0+24\,509+33\,962\\&=1\,753\,363\text{ kg}\end{aligned}$$

耐压试验状态下的球罐质量：

$$\begin{aligned}m_T&=m_1+m_3+m_6+m_7\\&=369\,436+3\,053\,628+24\,509+33\,962\\&=3\,481\,535\text{ kg}\end{aligned}$$

球罐最小质量：

$$\begin{aligned}m_{min}&=m_1+m_6+m_7\\&=369\,436+24\,509+33\,962\\&=427\,907\text{ kg}\end{aligned}$$

4 地震载荷计算

4.1 自振周期

支柱底板底面至球壳中心的距离：$H_o=10\,800$ mm

支柱数目：$n=10$

支柱材料 Q345R 的室温弹性模量：$E_S=201\times10^3$ MPa

支柱外直径：$d_o=630$ mm

支柱内直径：$d_i=606$ mm

支柱横截面的惯性矩：

$$\begin{aligned}I&=\frac{\pi}{64}\left(d_o^4-d_i^4\right)\\&=\frac{\pi}{64}\times\left(630^4-606^4\right)=1.112\times10^9\text{ mm}^4\end{aligned}$$

支柱底板底面至上支耳销子中心的距离：$l=7\,600$ mm

拉杆影响系数：$\xi=1-\left(\dfrac{l}{H_o}\right)^2\left(3-\dfrac{2l}{H_o}\right)=1-\left(\dfrac{7\,600}{10\,800}\right)^2\times\left(3-\dfrac{2\times7\,600}{10\,800}\right)=0.2113$

球罐的基本自振周期：

$$\begin{aligned}T&=\pi\sqrt{\frac{m_oH_o^3\xi\times10^{-3}}{3nE_SI}}\\&=\pi\sqrt{\frac{1\,753\,363\times10\,800^3\times0.211\,3\times10^{-3}}{3\times10\times201\times10^3\times1.112\times10^9}}=0.828\,8\text{ s}\end{aligned}$$

4.2 地震载荷

地震影响系数的最大值：$a_{max}=0.08$（查 GB 12337 表18）

特征周期：$T_g=0.40\ \mathrm{s}$ （查 GB 12337 表19）

曲线下降段的衰减指数γ：

ζ——阻尼比，取$\zeta=0.035$

$$\gamma=0.9+\frac{0.05-\zeta}{0.3+6\zeta}=0.9+\frac{0.05-0.035}{0.3+6\times0.035}=0.929\ 4$$

阻尼调整系数η_2：

$$\eta_2=1+\frac{0.05-\zeta}{0.08+1.6\zeta}=1+\frac{0.05-0.035}{0.08+1.6\times0.035}=1.110$$

对应于自振周期T的地震影响系数：

$$a=\left(\frac{T_g}{T}\right)^{\gamma}\eta_2 a_{max}=\left(\frac{0.40}{0.828\ 8}\right)^{0.929\ 4}\times1.110\times0.08=0.045\ 12$$

球罐的水平地震载荷：

$$F_e=am_o g=0.045\ 12\times1\ 753\ 363\times9.81=7.761\times10^5\ \mathrm{N}$$

5 风载荷计算

风载荷体型系数：$k_1=0.4$

系数ξ_1：$\xi_1=1.597$ （查 GB 12337 表 20）

风振系数：$k_2=1+0.35\xi_1=1+0.35\times1.597=1.559$

基本风压值：$q_0=600\ \mathrm{N/m^2}$

支柱底板底面至球壳赤道平面的距离：$H_o=10.8\ \mathrm{m}$

风压高度变化系数：$f_1=1.021$ （查 GB 12337 表21）

球罐附件增大系数：$f_2=1.1$

球罐的水平风力：$F_W=\frac{\pi}{4}D_o^2k_1k_2q_o f_1f_2\times10^{-6}$

$$=\frac{\pi}{4}\times18\ 092^2\times0.4\times1.559\times600\times1.021\times1.1\times10^{-6}$$

$$=1.080\times10^5\mathrm{N}$$

6 弯矩计算

（$F_e+0.25F_W$）与F_W的较大值，F_{max}：

$$F_e+0.25F_W=7.761\times10^5+0.25\times1.080\times10^5=8.031\times10^5\ \mathrm{N}$$

$$F_W=1.080\times10^5\ \mathrm{N}$$

$$F_{max}=8.031\times10^5\mathrm{N}$$

力臂：$L=H_o-l=10\ 800-7\ 600=3\ 200\ \mathrm{mm}$

由水平地震载荷和水平风力引起的最大弯矩：

$$M_{max}=F_{max}L=8.031\times10^5\times3\ 200=2.570\times10^9\ \mathrm{N\cdot mm}$$

7 支柱计算

7.1 单个支柱的垂直载荷

7.1.1 重力载荷

操作状态下的重力载荷：

$$G_o=\frac{m_o g}{n}=\frac{1\,753\,363\times9.81}{10}=1.720\times10^6\ \mathrm{N}$$

耐压试验状态下的重力载荷：

$$G_T=\frac{m_T g}{n}=\frac{3\,481\,535\times9.81}{10}=3.415\times10^6\ \mathrm{N}$$

7.1.2 支柱的最大垂直载荷

支柱中心圆半径：$R=R_i=9\,000\ \mathrm{mm}$

最大弯矩对支柱产生的垂直载荷的最大值（查 GB 12337 表 22）

$$(F_i)_{max}=0.2\,000\frac{M_{max}}{R}=0.2\,000\times\frac{2.570\times10^9}{9\,000}=5.711\times10^4\ \mathrm{N}$$

拉杆作用在支柱上的垂直载荷的最大值（查 GB 12337 表 22）

$$\left(P_{i-j}\right)_{max}=0.323\,6\frac{lF_{max}}{R}=0.323\,6\times\frac{7\,600\times8.031\times10^5}{9\,000}=2.195\times10^5\ \mathrm{N}$$

以上两力之和的最大值（查 GB 12337 表 22）

$$\begin{aligned}\left(F_i+P_{i-j}\right)_{max}&=0.117\,6\times\frac{M_{max}}{R}+0.3\,078\frac{lF_{max}}{R}\\&=0.117\,6\times\frac{2.570\times10^9}{9\,000}+0.307\,8\times\frac{7\,600\times8.031\times10^5}{9\,000}\\&=2.423\times10^5\ \mathrm{N}\end{aligned}$$

7.2 组合载荷

操作状态下支柱的最大垂直载荷：

$$W_o=G_o+\left(F_i+P_{i-j}\right)_{max}=1.720\times10^6+2.423\times10^5=1.962\times10^6\ \mathrm{N}$$

耐压试验状态下支柱的最大垂直载荷：

$$\begin{aligned}W_T&=G_T+0.3\left(F_i+P_{i-j}\right)_{max}\frac{F_W}{F_{max}}\\&=3.415\times10^6+0.3\times2.423\times10^5\times\frac{1.080\times10^5}{8.031\times10^5}=3.425\times10^6\ \mathrm{N}\end{aligned}$$

7.3 单个支柱弯矩

7.3.1 偏心弯矩

操作状态下赤道线的液柱高度：$h_{oe}=5\,476\ \mathrm{mm}$

耐压试验状态下赤道线的液柱高度：$h_{Te}=9\,000\ \mathrm{mm}$

操作状态下介质在赤道线的液柱静压力：

$$p_{oe}=h_{oe}\rho_2 g\times10^{-9}=5\,476\times480\times9.81\times10^{-9}=0.025\,79\ \mathrm{MPa}$$

耐压试验状态下液体在赤道线的液柱静压力：

$$p_{\mathrm{Te}}=h_{\mathrm{Te}}\rho_3 g\times10^{-9}=9\,000\times1\,000\times9.81\times10^{-9}=0.088\,29\ \mathrm{MPa}$$

球壳有效厚度：$\delta_{\mathrm{e}}=\delta_{\mathrm{n}}-C=46-1.0=45\ \mathrm{mm}$

操作状态下球壳赤道线的薄膜应力：

$$\sigma_{\mathrm{oe}}=\frac{(p+p_{\mathrm{oe}})(D_i+\delta_{\mathrm{e}})}{4\delta_{\mathrm{e}}}$$

$$=\frac{(1.77+0.025\,79)\times(18\,000+45)}{4\times45}=180.03\ \mathrm{MPa}$$

耐压试验状态下球壳赤道线的薄膜应力：

$$\sigma_{\mathrm{Te}}=\frac{(p_{\mathrm{T}}+p_{\mathrm{Te}})(D_i+\delta_{\mathrm{e}})}{4\delta_{\mathrm{e}}}$$

$$=\frac{(2.22+0.088\,29)\times(18\,000+45)}{4\times45}=231.40\ \mathrm{MPa}$$

球壳内半径：$R_{\mathrm{i}}=9\,000\ \mathrm{mm}$

球壳材料的泊松比：$\mu=0.3$

球壳材料 Q370R 的室温弹性模量：$E=201\times10^3\ \mathrm{MPa}$

操作状态下支柱的偏心弯矩：

$$M_{\mathrm{o1}}=\frac{\sigma_{\mathrm{oe}}R_{\mathrm{i}}W_{\mathrm{o}}}{E}(1-\mu)$$

$$=\frac{180.03\times9\,000\times1.962\times10^6}{201\times10^3}\times(1-0.3)$$

$$=1.107\times10^7\ \mathrm{N\cdot mm}$$

耐压试验状态下支柱的偏心弯矩：

$$M_{\mathrm{T1}}=\frac{\sigma_{\mathrm{Te}}R_{\mathrm{i}}W_{\mathrm{T}}}{E}(1-\mu)$$

$$=\frac{231.40\times9\,000\times3.425\times10^6}{201\times10^3}\times(1-0.3)$$

$$=2.484\times10^7\ \mathrm{N\cdot mm}$$

7.3.2 附加弯矩

操作状态下支柱的附加弯矩：

$$M_{\mathrm{o2}}=\frac{6E_{\mathrm{s}}I\sigma_{\mathrm{oe}}R_{\mathrm{i}}}{H_{\mathrm{o}}^2E}(1-\mu)$$

$$=\frac{6\times201\times10^3\times1.112\times10^9\times180.03\times9\,000}{10\,800^2\times201\times10^3}\times(1-0.3)$$

$$=6.488\times10^7\ \mathrm{N\cdot mm}$$

耐压试验状态下支柱的附加弯矩：

$$M_{T2}=\frac{6E_sI\sigma_{Te}R_i}{H_o^2E}(1-\mu)$$
$$=\frac{6\times201\times10^3\times1.112\times10^9\times231.40\times9\,000}{10\,800^2\times201\times10^3}\times(1-0.3)$$
$$=8.339\times10^7\,\text{N}\cdot\text{mm}$$

7.3.3 总弯矩

操作状态下支柱的总弯矩：

$$M_o=M_{o1}+M_{o2}=1.107\times10^7+6.488\times10^7=7.595\times10^7\ \text{N}\cdot\text{mm}$$

耐压试验状态下支柱的总弯矩：

$$M_T=M_{T1}+M_{T2}=2.484\times10^7+8.339\times10^7=1.082\times10^8\ \text{N}\cdot\text{mm}$$

7.4 支柱稳定性校核

计算长度系数，取 $k_3=1$；

单个支柱的横截面积：

$$A=\frac{\pi}{4}\left(d_o^2-d_i^2\right)=\frac{\pi}{4}\times\left(630^2-606^2\right)=23\,298\text{mm}^2$$

支柱的惯性半径：

$$r_i=\sqrt{\frac{I}{A}}=\sqrt{\frac{1.112\times10^9}{23\,298}}=218.5\ \text{mm}$$

支柱长细比：

$$\lambda=\frac{k_3H_o}{r_i}=\frac{1\times10\,800}{218.5}=49.43$$

支柱材料 Q345R 的室温屈服强度：$R_{eL}=345\ \text{MPa}$

支柱换算长细比：

$$\bar{\lambda}=\frac{\lambda}{\pi}\sqrt{\frac{R_{eL}}{E_s}}=\frac{49.43}{\pi}\times\sqrt{\frac{345}{201\times10^3}}=0.\ 6519$$

$$\bar{\lambda}>0.215$$

系数：$\alpha_2=0.965$　　$\alpha_3=0.300$

弯矩作用平面内的轴心受压支柱稳定系数：

$$\phi_p=\frac{1}{2\bar{\lambda}^2}\left[\left(\alpha_2+\alpha_3\bar{\lambda}+\bar{\lambda}^2\right)-\sqrt{\left(\alpha_2+\alpha_3\bar{\lambda}+\bar{\lambda}^2\right)^2-4\bar{\lambda}^2}\right]$$
$$=\frac{1}{2\times0.651\,9^2}\times\left[\left(0.965+0.3\times0.651\,9+0.651\,9^2\right)-\sqrt{\left(0.965+0.3\times0.651\,9+0.651\,9^2\right)^2-4\times0.651\,9^2}\right]$$
$$=0.803\,9$$

等效弯矩系数：$\beta_m=1$

截面塑性发展系数：$\gamma=1.15$

单个支柱的截面系数：$Z=\dfrac{\pi\left(d_o^4-d_i^4\right)}{32d_o}=\dfrac{\pi\left(630^4-606^4\right)}{32\times630}=3.53\times10^6\text{mm}^3$

欧拉临界力：$W_{EX}=\pi^2E_sA/\lambda^2$

$$=\frac{\pi^2\times201\times10^3\times23\,298}{49.43^2}=1.892\times10^7\,\mathrm{N}$$

支柱材料的许用应力：$[\sigma]_c=R_{eL}/1.5=\frac{345}{1.5}=230\,\mathrm{MPa}$

操作状态下支柱的稳定性校核：

$$\frac{W_o}{\phi_p A}+\frac{\beta_m M_o}{\gamma Z\left(1-0.8\frac{W_o}{W_{EX}}\right)}=\frac{1.962\times10^6}{0.8039\times23\,298}+\frac{1\times7.595\times10^7}{1.15\times3.532\times10^6\times\left(1-0.8\times\frac{1.962\times10^6}{1.892\times10^7}\right)}$$

$$=125.15\mathrm{MPa}<[\sigma]_c$$ ，校核合格

耐压试验状态下支柱的稳定性校核：

$$\frac{W_T}{\phi_p A}+\frac{\beta_m M_T}{\gamma Z\left(1-0.8\frac{W_T}{W_{EX}}\right)}=\frac{3.425\times10^6}{0.8039\times23\,298}+\frac{1\times1.082\times10^8}{1.15\times3.532\times10^6\times\left(1-0.8\times\frac{3.425\times10^6}{1.892\times10^7}\right)}$$

$$=214.02\,\mathrm{MPa}<[\sigma]_c$$ ，校核合格

结论：稳定性校核通过。

8 地脚螺栓计算

8.1 拉杆作用在支柱上的水平力

拉杆和支柱间的夹角（见图 7）：

$$\beta=\arctan\frac{2R\cdot\sin\frac{180^\circ}{n}}{l}=\arctan\frac{2\times9\,000\times\sin\frac{180^\circ}{10}}{7\,600}=36.2^\circ$$

拉杆作用在支柱上的水平力：

$$F_c=(P_{i-j})_{max}\tan\beta=2.195\times10^5\times\tan36.2^\circ=1.607\times10^5\,\mathrm{N}$$

8.2 支柱底板与基础的摩擦力

支柱底板与基础的摩擦系数：$f_s=0.3$（钢–钢）

支柱底板与基础的摩擦力：

$$F_s=f_s\frac{m_{min}g}{n}=0.3\times\frac{427\,907\times9.81}{10}=1.259\times10^5\,\mathrm{N}$$

8.3 地脚螺栓

因为 $F_s<F_c$，球罐必须设置地脚螺栓。

每个支柱上的地脚螺栓个数：$n_d=2$

地脚螺栓材料 Q235B 室温屈服强度：$R_{eL}=215\,\mathrm{MPa}$

地脚螺栓材料的许用剪应力：$[\tau]_B=0.4R_{eL}=0.4\times215=86\mathrm{MPa}$

地脚螺栓的腐蚀裕量：$C_B=3.0\mathrm{mm}$

地脚螺栓的螺纹小径：

$$d_B = 1.13\sqrt{\frac{F_c - F_s}{n_d[\tau]_B}} + C_B$$

$$= 1.13\times\sqrt{\frac{1.607\times10^5 - 1.259\times10^5}{2\times86}} + 3.0 = 19.07\ \text{mm}$$

取M42的地脚螺栓。

9 支柱底板

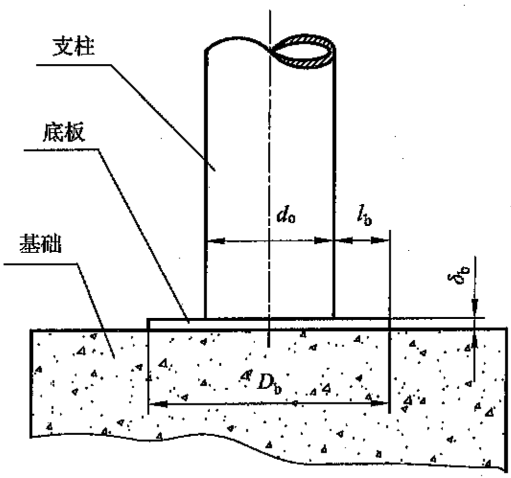

图 2-3

9.1 支柱底板直径

基础采用钢筋混凝土，其许用压应力：$[\sigma]_{bc} = 3.0\ \text{MPa}$；

地脚螺栓直径：$d = 42\ \text{mm}$；

支柱底板直径（取D_{b1},D_{b2}中较大值）：

$$D_{b1} = 1.13\sqrt{\frac{W_{max}}{[\sigma]_{bc}}} = 1.13\times\sqrt{\frac{3.425\times10^6}{3.0}} = 1\ 207.39\ \text{mm}$$

$$D_{b2} = (8\sim10)d + d_o = (8\sim10)\times42 + 630 = 966\text{mm}\sim1\ 050\ \text{mm}$$

选取底板直径$D_b = 1\ 250\ \text{mm}$

9.2 底板厚度

底板的压应力：$\sigma_{bc} = \dfrac{4W_{max}}{\pi D_b^2} = \dfrac{4\times3.425\times10^6}{\pi\times1250^2} = 2.790\ \text{MPa}$

底板外边缘至支柱外表面的距离（见图 2-3）：　$l_b = \dfrac{1\ 250 - 630}{2} = 310\ \text{mm}$

底板材料 Q345R 室温屈服强度：$R_{eL} = 305\ \text{MPa}$

底板材料的许用弯曲应力：$[\sigma]_b = R_{eL}/1.5 = \dfrac{305}{1.5} = 203.3\ \text{MPa}$

底板的腐蚀裕量：$C_b = 3.0\ \text{mm}$

底板厚度：　$\delta_b=\sqrt{\dfrac{3\sigma_{bc}l_b^2}{[\sigma]_b}}+C_b=\sqrt{\dfrac{3\times2.790\times310^2}{203.3}}+3.0=65.90\ \text{mm}$

选取底板厚度 $\delta_b=68\ \text{mm}$

10 拉杆计算

10.1 拉杆螺纹小径的计算

拉杆的最大拉力：

$$F_T=\frac{\left(P_{i-j}\right)_{max}}{\cos\beta}=\frac{2.195\times10^5}{\cos36.2^\circ}=2.720\times10^5\ \text{N}$$

拉杆材料 Q235B 室温屈服强度：$R_{eL}=215\ \text{MPa}$

拉杆材料的许用应力：$[\sigma]_T=R_{eL}/1.5=\dfrac{215}{1.5}=143.3\ \text{MPa}$

拉杆的腐蚀裕量：$C_T=2.0\ \text{mm}$

拉杆螺纹小径：

$$d_T=1.13\sqrt{\frac{F_T}{[\sigma]_T}}+C_T=1.13\times\sqrt{\frac{2.720\times10^5}{143.3}}+2.0=51.23\ \text{mm}$$

选取拉杆的螺纹公称直径为 M60。

10.2 拉杆连接部位的计算

10.2.1 销子直径

销子材料 35 室温屈服强度：$R_{eL}=315\ \text{MPa}$

销子材料的许用剪切力：$[\tau]_p=0.4R_{eL}=0.4\times315=126\ \text{MPa}$

销子直径：$d_p=0.8\sqrt{\dfrac{F_T}{[\tau]_p}}=0.8\times\sqrt{\dfrac{2.720\times10^5}{126}}=37.17\ \text{mm}$

选取销子直径为 $d_p=42\ \text{mm}$。

10.2.2 耳板厚度

耳板材料 Q235B 室温屈服强度：$R_{eL}=225\ \text{MPa}$

耳板材料的许用压应力：$[\sigma]_c=R_{eL}/1.1=\dfrac{225}{1.1}=204.5\ \text{MPa}$

耳板厚度：$\delta_c=\dfrac{F_T}{d_p[\sigma]_c}=\dfrac{2.720\times10^5}{42\times204.5}=31.67\ \text{mm}$

选取耳板厚度为 36mm。

10.2.3 翼板厚度

翼板材料 Q235B 室温屈服强度：$R'_{eL}=225\ \text{MPa}$

翼板厚度：$\delta_a=\dfrac{\delta_c}{2}\cdot\dfrac{R_{eL}}{R'_{eL}}=\dfrac{31.67}{2}\times\dfrac{225}{225}=15.84\ \text{mm}$

选取翼板厚度为 18 mm。

10.2.4 连接焊缝强度验算

A 焊缝单边长度：$L_1 = 400\ \mathrm{mm}$

A 焊缝焊脚尺寸：$S_1 = 12\ \mathrm{mm}$

支柱或耳板材料屈服强度的较小值：$R_{eL} = 225\ \mathrm{MPa}$

角焊缝系数：$\phi_a = 0.60$；

焊缝的许用剪切应力：$[\tau]_W = 0.4R_{eL}\phi_a = 0.4\times225\times0.60 = 54\ \mathrm{MPa}$

耳板与支柱链接焊缝 A 的剪切应力校核：

$$\frac{F_T}{1.41L_1S_1} = \frac{2.720\times10^5}{1.41\times400\times12} = 40.19\ \mathrm{MPa} < [\tau]_W，校核合格$$

B 焊缝单边长度：$L_2 = 300\ \mathrm{mm}$

B 焊缝焊脚尺寸：$S_2 = 20\ \mathrm{mm}$

拉杆或翼板材料的屈服强度的较小值：$R_{eL} = 215\ \mathrm{MPa}$

焊缝的许用剪切应力：$[\tau]_W = 0.4R_{eL}\phi_a = 0.4\times215\times0.60 = 51.6\ \mathrm{MPa}$

拉杆与翼板的焊缝 B 的剪切应力校核：

$$\frac{F_T}{2.82L_2S_2} = \frac{2.720\times10^5}{2.82\times300\times20} = 16.08\ \mathrm{MPa} < [\tau]_W，校核合格$$

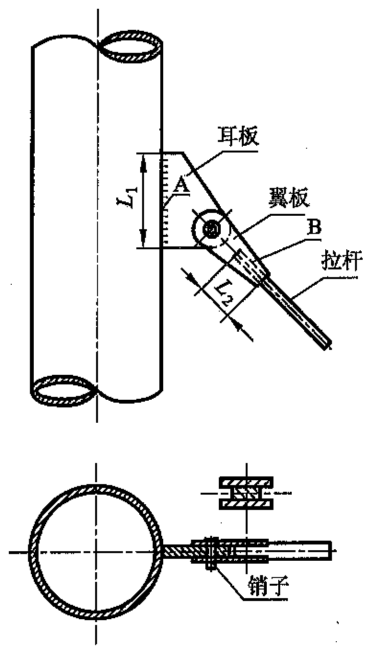

图 2-4

11 支柱与球壳连接最低点 a 的应力校核

11.1 a 点的剪切应力

支柱与球壳连接焊缝单边的弧长：$L_W = 3\,055\ \mathrm{mm}$

球壳 a 点处的有效厚度：$\delta_{ea} = 45.0\ \mathrm{mm}$

操作状态下 a 点的剪切应力：

$$\tau_o=\frac{G_o+(F_i)_{max}}{2L_W\delta_{ea}}=\frac{1.720\times10^6+5.711\times10^4}{2\times3\,055\times45.0}=6.463\ \mathrm{MPa}$$

耐压试验状态下 a 点的剪切应力：

$$\tau_T=\frac{G_T+0.3(F_i)_{max}\dfrac{F_W}{F_{max}}}{2L_W\delta_{ea}}=\frac{3.415\times10^6+0.3\times5.711\times10^4\times\dfrac{1.080\times10^5}{8.031\times10^5}}{2\times3\,055\times45.0}=12.43\ \mathrm{MPa}$$

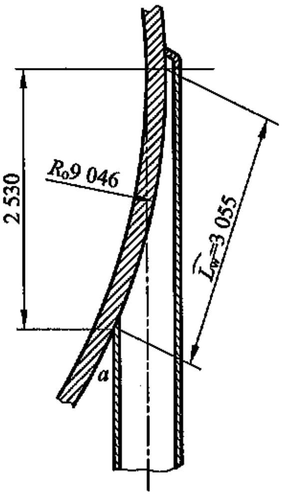

图 2-5

11.2 a 点的纬向应力

操作状态下 a 点的液柱高度：$h_{oa}=8\,006\ \mathrm{mm}$

耐压试验状态下 a 点的液柱高度：$h_{Ta}=11\,530\ \mathrm{mm}$

操作状态下介质在 a 点的液柱静压力：

$$p_{oa}=h_{oa}\rho_2 g\times10^{-9}=8\,006\times480\times9.81\times10^{-9}=0.0377\ \mathrm{MPa}$$

耐压试验状态下液体在 a 点的液柱静压力：

$$p_{Ta}=h_{Ta}\rho_3 g\times10^{-9}=11\,530\times1\,000\times9.81\times10^{-9}=0.1131\ \mathrm{MPa}$$

操作状态下 a 点的纬向应力：

$$\sigma_{o1}=\frac{(p+p_{oa})(D_i+\delta_{ea})}{4\delta_{ea}}=\frac{(1.77+0.0377)\times(18\,000+45.0)}{4\times45.0}=181.2\ \mathrm{MPa}$$

耐压试验状态下 a 点的纬向应力：

$$\sigma_{T1}=\frac{(p_T+p_{Ta})(D_i+\delta_{ea})}{4\delta_{ea}}=\frac{(2.22+0.1131)\times(18\,000+45.0)}{4\times45.0}=233.9\ \mathrm{MPa}$$

11.3 a 点的应力校核

操作状态下 a 点的组合应力：

$\sigma_{oa}=\sigma_{o1}+\tau_o=181.2+6.463=187.7\text{MPa}$

耐压试验状态下 a 点的组合应力：

$\sigma_{Ta}=\sigma_{T1}+\tau_T=233.9+12.43=246.3\ \text{MPa}$

应力校核：

$\sigma_{oa}=188.7\ \text{MPa}<[\sigma]^t\phi=193\times1.0=193\ \text{MPa}$，校核合格

$\sigma_{Ta}=246.3\ \text{MPa}<0.9R_{eL}\phi=0.9\times340\times1.0=306\ \text{MPa}$，校核合格

结论：校核通过。

12 支柱与球壳连接焊缝的强度校核

W取$G_o+(F_i)_{max}$和$G_T+0.3(F_i)_{max}\dfrac{F_W}{F_{max}}$两者中的较大值：

$$G_o+(F_i)_{max}=1.720\times10^6+5.711\times10^4=1.777\times10^6\ \text{N}$$

$$G_T+0.3(F_i)_{max}\frac{F_W}{F_{max}}=3.415\times10^6+0.3\times5.711\times10^4\times\frac{1.080\times10^5}{8.031\times10^5}=3.417\times10^6\ \text{N}$$

$$W=G_T+0.3(F_i)_{max}\frac{F_W}{F_{max}}=3.417\times10^6\ \text{N}$$

支柱与球壳连接焊缝焊脚尺寸：$S=12\ \text{mm}$

支柱与球壳连接焊缝所承受的剪切应力：

$$\tau_w=\frac{W}{1.41L_WS}=\frac{3.417\times10^6}{1.41\times3055\times12}=66.11\ \text{MPa}$$

支柱或球壳材料屈服强度的较小值 $R_{eL}=340\ \text{MPa}$

焊缝许用剪切应力：$[\tau]_W=0.4R_{eL}\phi_a=0.4\times340\times0.6=81.6\ \text{MPa}$

应力校核：$\tau_W=66.11\ \text{MPa}<[\tau]_W$ 则通过。