

有关大型油罐设计的若干设想

中国科学院北京力学研究所十二室 王震鸣

一、前言

在毛主席的无产阶级革命路线指引下,在党的正确领导下,我国石油工业有了很大的发展,具有重大的政治和经济意义。大型油罐的设计制造工作,在有关方面努力下,进展很快,已建成一大批一万、二万米³的油罐,五万米³的浮顶式油罐也已投产。为了适应石油工业更大的发展,需要研制 10 万、20 万米³或更大的油罐,这是发展的趋势。

在大型油罐的设计制造中,涉及到很多问题,如用钢的规格和数量、工艺情况、施工期限、经济指标、结构的可靠性等,也存在一些力学问题(如强度、稳定问题等),要研制大型油罐,就必须解决有关的力学问题。

本文探讨在我国现有条件下(以五万米³浮顶式油罐作为参照对象),设计十万米³以上大型油罐的若干设想和有关的力学问题,采用夹层结构或双层结构的形式,以达到建造大型油罐的目的,使焊接工艺的难度和每米³油罐的用钢量有所下降,供有关部门参考。

要探讨的大型油罐,和五万米³的油罐一样,仍采用浮顶的形式,因为浮顶式油罐,有其独特的优点,在设计制造方面,也积累了许多宝贵的经验。所用钢材仍为 16Mn,钢板厚度以不超过 38 毫米为限,有关的资料 [1] [2] 指出,当板厚超过 38 毫米,16Mn 在焊接后需要热处理,会增加施工的困难。油罐水位的高度,和五万米³一样,仍取 18 米。对于罐壁,在上层液压较小的部分,和往常一样,采用单层圆柱壳,在下部液压较大,要求 16Mn 的厚度超过 38 毫米的部分,采用夹层圆柱壳或双层圆柱壳的结构形式,使每一层钢板的厚度不超过 38 毫米。

文中提出的设计大型油罐的设想,可建造 10 万至数十万米³的大型油罐,一方面有减少用地面积,便于管理,节约管线和减少辅助设备 [1] 在建造时减小钢板的最大厚度,在卷板、焊接等方面带来好处,可使每米³油罐的用钢量和造价下降;另一方面,需要一定量的混凝土和土方工程,会增加运输和施工量,可能延长施工期限。新的结构形式,在施工安排方面也带来一些新的问题,需要解决。

二、基本方程

罐壁是油罐受力最大需要钢材最多的部分。以五万米³的浮顶式油罐为例，罐壁所用钢材，占全罐用钢量的 53.0%。

一个竖立的高度为 l 的圆柱壳容器，在装满液体后，其受力状况属于圆柱壳的轴对称问题。

根据《板壳理论》[3]，平衡方程为

$$\frac{d^2 M_x}{dx^2} + \frac{N_\theta}{R} = p \quad (1)$$

而

$$N_\theta = -\frac{Ewt}{R} \quad (2)$$

$$M_x = -D \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (3)$$

$$M_\theta = D M_x \quad (4)$$

式中， R 为半径， M_x 和 M_θ 分别为竖向和周向的弯矩， D 为抗弯刚度， t 为壳体周向承拉材料的厚度， p 为压力， w 为挠度（以向内为正）， D 为泊桑比， N_θ 为周向单位长度上的薄膜力。

将 (3) 代入 (1) 可得

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(D \frac{d^2 w}{dx^2} \right) + \frac{Etw}{R^2} = p \quad (5)$$

当 D 为常数，并引入记号 β ，使

$$\beta^4 = \frac{Et}{4R^2 D} \quad (6)$$

后可得

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 w = \frac{p}{D} \quad (7)$$

此方程的解为

$$w = e^{\beta x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) + f(x) \quad (8)$$

其中， $f(x)$ 为微分方程 (7) 的特解。每一段圆柱壳有四个边界条件，可求解四个待定常数 C_1, C_2, C_3, C_4 。当圆柱壳由若干段组成时，可由连续条件联合求解待定常数。《板壳理论》[3] 中，给出了半无限长圆柱壳的计算公式，但当 $\beta l \leq 3$ ，特别是当 $\beta l \leq 2$ 时，用半无限长壳的计算结果作为有限长壳的近似解，误差太大，不能应用。为此，本文给出了有限长圆柱壳，一端自由，另一端受弯矩 M_0 和剪力 Q_0 。

作用时的精确解, 给出挠度 w 、转角 $\frac{dw}{dx}$ 、弯矩 M_x 和剪力 Q_x 的值。引入记号

$$\frac{M_0}{2\beta^2 D} = A, \quad \frac{Q_0}{2\beta^3 D} = B \quad (9)$$

后, 可得表达式

$$\begin{cases} w = \alpha_1 A + K_1 B \\ \frac{dw}{dx} = \alpha_2 \beta A + K_2 \beta B \\ M_x = \alpha_3 M_0 + K_3 \frac{Q_0}{\beta} \\ Q_x = \alpha_4 \beta M_0 + K_4 Q_0 \end{cases} \quad (10)$$

(10) 中的 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 和 K_1, K_2, K_3, K_4 都是 βl 和 βx 的函数, 其数值由表 1 给出。

对于罐壁的设计, 讨论三种情况: 薄膜应力状态, 有矩状态和半地下式油罐。

三、按薄膜应力状态设计

当壳体相当薄, 抗弯刚度 D 相当小, 壳又比较长时, 那么除接近罐底一个小区域有边界效应 (存在弯矩和剪力) 外, 其余部分都处于薄膜应力状态。由 (5), 取 $D \approx 0$, 可得

$$\frac{Etw}{R^2} = p \quad (11)$$

由于 $\sigma_\theta = \frac{N_\theta}{t}$, 由 (2) 可得

$$\sigma_\theta = -\frac{Ew}{R} \quad (12)$$

由 (11), (12) 消去 w 可得

$$\sigma_\theta = \frac{pR}{t} \quad (13)$$

由于液压 p 是沿高度线性变化的, 要使整个壳体周向应力相同, 最好是做成变剖面的, 由于工艺上的原因, 国内外通常都是分成若干段, 每一段都是等剖面的, 但厚度不同。这样各段的连接处存在不连续应力, 根据资料 [1], [2], 厚度 t 可近似地由下式计算

$$t = \frac{0.1 (H-0.3) R}{K\sigma_0} \quad (14)$$

表 1

βl	βx	α_1	α_2	α_3	α_4	K_1	K_2	K_3	K_4
1.0	0.0	-3.104	6.740	-1.000	0	-2.019	3.104	0	-1.000
	0.2	-1.795	6.355	-0.894	0.977	-1.400	3.074	-0.128	-0.316
	0.4	-0.557	6.044	-0.643	1.446	-0.791	3.017	-0.143	0.121
	0.6	0.630	5.846	-0.347	1.430	-0.193	2.993	-0.095	0.318
	0.8	1.789	5.760	-0.102	0.946	0.393	2.943	-0.032	0.277
	1.0	2.939	5.745	0	0	0.986	2.939	0	0
1.1	0.0	-2.605	5.326	-1.000	0	-1.843	2.605	0	-1.000
	0.2	-1.580	4.933	-0.910	0.834	-1.324	2.574	-0.133	-0.367
	0.4	-0.628	4.609	-0.693	1.274	-0.816	2.513	-0.160	0.061
	0.6	0.270	4.386	-0.425	1.314	-0.319	2.455	-0.122	0.288
	0.8	1.134	4.267	-0.178	1.062	0.168	2.418	-0.059	0.318
	1.0	1.982	4.231	-0.023	0.439	0.650	2.406	-0.008	0.154
	1.1	2.405	4.229	0	0	0.890	2.405	0	0
1.2	0.0	-2.232	4.357	-1.000	0	-1.699	2.232	0	-1.000
	0.2	-1.401	3.967	-0.922	0.724	-1.255	2.201	-0.138	-0.409
	0.4	-0.642	3.634	-0.732	1.130	-0.821	2.135	-0.176	0.005
	0.6	0.059	3.389	-0.489	1.245	-0.401	2.069	-0.147	0.249
	0.8	0.720	3.242	-0.252	1.088	0.008	2.022	-0.087	0.328
	1.0	1.361	3.180	-0.071	0.672	0.410	2.000	-0.027	0.244
	1.2	1.996	3.170	0	0	0.809	1.996	0	0
1.3	0.0	-1.949	3.686	-1.000	0	-1.580	1.949	0	-1.000
	0.2	-1.252	3.296	-0.932	0.638	-1.192	1.917	-0.142	-0.446
	0.4	-0.628	2.954	-0.763	1.011	-0.815	1.848	-0.189	-0.045
	0.6	-0.065	2.692	-0.543	1.148	-0.453	1.775	-0.170	0.208
	0.8	0.455	2.521	-0.318	1.069	-0.104	1.717	-0.115	0.319
	1.0	0.949	2.433	-0.129	0.787	0.236	1.684	-0.051	0.293
	1.2	1.433	2.407	-0.016	0.311	0.571	1.674	-0.007	0.131
	1.3	1.673	2.406	0	0	0.739	1.673	0	0
1.4	0.0	-1.731	3.211	-1.000	0	-1.480	1.731	0	-1.000
	0.2	-1.129	2.820	-0.939	0.569	-1.136	1.699	-0.145	-0.477
	0.4	-0.601	2.472	-0.787	0.913	-0.803	1.627	-0.200	-0.090
	0.6	-0.135	2.196	-0.587	1.058	-0.485	1.548	-0.190	0.167
	0.8	0.284	2.004	-0.376	1.027	-0.183	1.480	-0.141	0.300
	1.0	0.672	1.893	-0.187	0.835	0.109	1.436	-0.078	0.315

表 1. 1

	1.2	1.045	1.847	-0.052	0.492	0.394	1.417	-0.023	0.214
	1.4	1.413	1.840	0	0	0.676	1.413	0	0
1.5	0.0	-1.562	2.871	-1.000	0	-1.395	1.562	0	-1.000
	0.2	-1.028	2.478	-0.945	0.515	-1.085	1.529	-0.148	-0.504
	0.4	-0.568	2.126	-0.807	0.832	-0.786	1.455	-0.210	-0.130
	0.6	-0.173	1.839	-0.623	0.979	-0.504	1.370	-0.208	0.127
	0.8	0.172	1.629	-0.425	0.877	-0.238	1.294	-0.166	0.275
	1.0	0.484	1.497	-0.241	0.845	0.015	1.240	-0.105	0.319
	1.2	0.775	1.431	-0.095	0.593	0.260	1.210	-0.045	0.264
	1.4	1.059	1.412	-0.012	0.226	0.501	1.201	-0.006	0.112
	1.5	1.200	1.411	0	0	0.261	1.200	0	0
1.6	0.0	-1.430	2.624	-1.000	0	-1.325	1.430	0	-1.000
	0.2	-0.945	2.231	-0.950	0.472	-1.041	1.397	-0.151	-0.527
	0.4	-0.535	1.875	-0.823	0.766	-0.769	1.321	-0.218	-0.166
	0.6	-0.191	1.579	-0.653	0.909	-0.514	1.231	-0.224	0.090
	0.8	0.101	1.354	-0.468	0.926	-0.276	1.147	-0.189	0.248
	1.0	0.356	1.203	-0.290	0.834	-0.054	1.082	-0.131	0.313
	1.2	0.587	1.119	-0.141	0.645	0.159	1.043	-0.069	0.292
	1.4	0.806	1.085	-0.038	0.366	0.365	1.025	-0.020	0.187
	1.6	1.023	1.080	0	0	0.570	1.023	0	0
1.7	0.0	-1.327	2.445	-1.000	0	-1.265	1.327	0	-1.000
	0.2	-0.878	2.052	-0.953	0.438	-1.002	1.293	-0.153	-0.547
	0.4	-0.504	1.692	-0.836	0.712	-0.751	1.215	-0.226	-0.197
	0.6	-0.197	1.388	-0.677	0.850	-0.517	1.121	-0.238	0.056
	0.8	0.056	1.152	-0.503	0.877	-0.302	1.030	-0.209	0.219
	1.0	0.269	0.986	-0.333	0.811	-0.104	0.957	-0.156	0.300
	1.2	0.454	0.883	-0.184	0.666	0.082	0.907	-0.094	0.304
	1.4	0.625	0.834	-0.071	0.449	0.261	0.880	-0.039	0.235
	1.6	0.790	0.820	-0.008	0.166	0.436	0.873	-0.005	0.096
		1.7	0.872	0.819	0	0	0.523	0.872	0
1.8	0.0	-1.246	2.315	-1.000	0	-1.215	1.246	0	-1.000
	0.2	-0.823	1.921	-0.956	0.411	-0.968	1.212	-0.155	-0.564
	0.4	-0.476	1.559	-0.846	0.668	-0.733	1.133	-0.232	-0.224
	0.6	-0.196	1.249	-0.697	0.801	-0.516	1.035	-0.250	0.025
	0.8	0.028	1.003	-0.532	0.832	-0.319	0.938	-0.227	0.192

表 1, 2

	1.0	0.210	0.823	-0.369	0.784	-0.140	0.856	-0.179	0.283
	1.2	0.362	0.706	-0.223	0.668	0.025	0.796	-0.119	0.305
	1.4	0.496	0.641	-0.106	0.496	0.180	0.761	-0.061	0.264
	1.6	0.621	0.616	-0.028	0.273	0.331	0.746	-0.017	0.162
	1.8	0.743	0.612	0	0	0.479	0.743	0	0
1.9	0.0	-1.183	2.220	-1.000	0	-1.173	1.183	0	-1.000
	0.2	-0.779	1.826	-0.958	0.390	-0.938	1.149	-0.156	-0.578
	0.4	-0.451	1.462	-0.854	0.633	-0.716	1.068	-0.237	-0.248
	0.6	-0.190	1.148	-0.713	0.759	-0.513	0.967	-0.261	-0.002
	0.8	0.012	0.894	-0.556	0.793	-0.330	0.865	-0.243	0.165
	1.0	0.171	0.703	-0.400	0.755	-0.166	0.776	-0.199	0.264
	1.2	0.298	0.572	-0.258	0.660	-0.018	0.707	-0.142	0.300
	1.4	0.403	0.493	-0.139	0.520	0.119	0.662	-0.083	0.280
	1.6	0.498	0.456	-0.053	0.339	0.248	0.639	-0.034	0.206
	1.8	0.588	0.445	-0.006	0.122	0.375	0.632	-0.004	0.081
	1.9	0.632	0.445	0	0	0.438	0.632	0	0
2.0	0.0	-1.134	2.152	-1.000	0	-1.138	1.134	0	-1.000
	0.2	-0.743	1.758	-0.960	0.373	-0.913	1.100	-0.158	-0.590
	0.4	-0.429	1.392	-0.860	0.605	-0.701	1.018	-0.242	-0.268
	0.6	-0.183	1.074	-0.726	0.725	-0.507	0.914	-0.270	-0.027
	0.8	0.005	0.814	-0.576	0.759	-0.335	0.807	-0.258	0.141
	1.0	0.146	0.614	-0.426	0.728	-0.184	0.711	-0.218	0.244
	1.2	0.254	0.471	-0.288	0.647	-0.050	0.635	-0.164	0.290
	1.4	0.338	0.380	-0.170	0.528	0.072	0.581	-0.105	0.286
	1.6	0.409	0.332	-0.079	0.378	0.184	0.550	-0.053	0.234
	1.8	0.473	0.313	-0.021	0.202	0.293	0.537	-0.015	0.139
	2.0	0.535	0.310	0	0	0.400	0.535	0	0

式中 H 为水位高度 (米), R 为壳体半径 (厘米), K 为焊缝系数, σ_{θ} 为钢材的许用应力, 在本文以后的计算中, 取 $K=1$, 对 16Mn, 取 $\sigma_{\theta}=2000$ 公斤/厘米², 若认为选用的许用应力偏高, 则可适当减小, 但对本文所要探讨的设想没有什么影响。

(14) 式中的 0.3 米, 是按 1 呎折合的。

根据 (14) 式, 可算出不同容积的油罐每一圈的厚度 t (取整数毫米值) 和相应的周向应力 σ_{θ} 。圈数是从下往上数的。每圈高度取为 1.6 米。所用材料一般为 16Mn,

只有应力小于 1300 公斤/厘米² 时才采用 A₃。油罐上部壳厚不小于 1 厘米。在第 12 圈, 只有 0.4 米接触液体, 所以应力较低。从表 2 中, 可看到五万米³ 油罐罐壁的应力比我们选用的低一些。

表 2

圈号	v = 5.09 万米 ³		v = 10.46 万米 ³		v = 20.36 万米 ³		v = 30.13 万米 ³		v = 51.04 万米 ³	
	R = 30 米		R = 43 米		R = 60 米		R = 73 米		R = 95 米	
	t 厘米	σ_{θ} 公斤/厘米 ²	t 厘米	σ_{θ} 公斤/厘米 ²	t 厘米	σ_{θ} 公斤/厘米 ²	t 厘米	σ_{θ} 公斤/厘米 ²	t 厘米	σ_{θ} 公斤/厘米 ²
1	3.2	1659	4.0	1903	5.4	1957	6.5	1988	8.5	1978
2	3.0	1610	3.5	1373	5.0	1932	6.0	1959	7.8	1961
3	2.6	1673	3.2	1948	4.4	1977	5.4	1960	7.0	1968
4	2.3	1633	2.8	1981	4.0	1935	4.8	1962	6.2	1977
5	2.0	1695	2.5	1944	3.4	1994	4.2	1964	5.4	1988
6	1.8	1617	2.2	1896	3.0	1940	3.6	1967	4.8	1920
7	1.4	1736	1.8	1935	2.5	1944	3.0	1971	4.0	1923
8	1.2	1625	1.4	1996	2.0	1950	2.4	1977	3.2	1930
9	1.0	1470	1.2	1755	1.5	1960	1.8	1987	2.4	1940
10	1.0	990	1.0	1419	1.0	1980	1.4	1720	1.6	1954
11	1.0	510	1.0	731	1.0	1020	1.0	1241	1.0	1615
12	1.0	30	1.0	43	1.0	60	1.0	73	1.0	95

表 3

容 积, 万米 ³	5	10	20	30	50
罐壁的用钢量, 公斤/米 ³	9.94	8.25	7.90	7.81	7.72

从表 2 可以看到, 如按薄膜应力状态设计, 采用 16Mn 的单层园柱壳, 在第一圈焊几个加强环后, 可实现 10 万米³ 的容量。因此, 仍可采用五万米³ 油罐所用的规范, 设计 10 万米³ 的油罐。一般说来, 要用单层园柱壳实现 10 万米³ 以上的容量, 就需要采用高强度合金钢 (日本用高强度合金钢建成 16 万米³ 的油罐)。从表 2 还可看到, 对于 20 万、30 万、50 万米³ 的油罐已分别有四、五、七圈壳厚超过 38 毫米。我们可采用双层园柱钢壳, 壳壁间充填沙土或低标号混凝土, 然后捣实, 使内外两层钢壳厚度的总和, 符合(14)式的要求。其中充填的沙土或混凝土, 仅用来传递压力, 使内外两层钢壳起协同作用。在内层钢壳的外壁上, 可焊一些环向加强筋, 以减小不连续应力, 使应力更为均匀。对于 50 万米³ 的油罐, 在焊了环向加强筋后, 可使其折合厚度达到 8.5 厘米。

采用这种方案, 解决了厚度超过 38 毫米后, 在剪板、卷板和焊接方面的困难, 但用钢量仍保持不变。多层容器的设想前人曾经有过 [1], 是否已用于大型油罐, 还不

清楚。如果充填的是沙土，则代价很小；如充填的是低标号混凝土，由于不要求它起承剪、抗弯的作用，只要求能保持两层壳壁有一定的间距，因此在浇注混凝土后，可继续施工，不必担心混凝土固化的强度问题，因此不会影响施工期限。两层钢壳中的充填材料，其厚度可以从几厘米到十几厘米，视施工方便、便于捣实和节约而定，小一点好。采用这种方案，设计和施工与五万米³的油罐大体相同。

对于薄膜应力状态的设计来说，边界效应带来的好处不大。液体的压力，每一圈都由钢板在周向承受，这时 σ_{θ} 是主要应力，接近 2000 公斤/厘米²，而竖向应力 σ_x 除边界附近外，一般都很小，只有数十公斤/厘米²。在设计油罐时，为慎重起见，对于边界效应和两圈间的不连续应力都必须认真计算（例如五万米³油罐所做过的那样）。

关于油罐高度问题，对于大型油罐，在同一水位高度的情况下（例如 18 米），若顶和罐底的平均厚度保持不变，当油罐的容积增大时，顶和底的用钢量（公斤/米³）大体上保持不变（略有下降）。罐壁的用钢量则保持不变。因为当 R 增大 α 倍，在高度不变时，容积增大 α^2 倍，由于半径 R 和壁厚 $t (= \frac{pR}{\sigma})$ 都分别增大 α 倍，因此总用钢量（公斤）亦增大 α^2 倍，单位体积的用钢量（公斤/米³）保持不变。当油罐的高度 H 增大 α_1 倍，由于 $p=0.1H$ ， $t = \frac{0.1HR}{\sigma}$ ，p 和 t 都增大 α_1 倍，罐壁总用钢量增大 α_1^2 倍，而容积只增大 α_1 倍，因此从罐壁的用钢量来看是不利的，不过由于高度增大了，顶和底的用钢量可以减少，得到补偿。总之，如按薄膜应力状态设计，当水位高度为 18 米时，则不论容积大到什么程度，罐壁的用钢量都不能小于 $0.1H \times \frac{7800}{2000} = 7.02$ 公斤/米³。

增加油罐高度，可减少占地面积，减少残留油量所占的比例，这是有利的方面。但是，增加油罐高度，要增加罐壁的最大厚度，引起卷板和焊接的困难，在抗风和抗震方面，在地基的沉降方面，会带来一些不利的影晌，对于薄膜应力状态的设计来说，以不增加高度为妥。

由于按薄膜应力状态的设计中，钢材处于单向受拉状态，这时 σ_{θ} 很大，而竖向应力 σ_x 不大还有潜力，这说明存在着节约钢材的可能性。但是，要从五万米³油罐的用钢量 17.82 公斤/米³ 大幅度下降，还是一个困难的任任务。提高许用应力，可使用钢量略有下降，是节约钢材的途径之一，但需要包括施工在内的多方面的配合才行。本文在下面要着重探讨节约用钢量（公斤/米³）的问题。由于新的结构形式需要一定量的混凝土和土方工程，因此造价下降的百分比要比用钢量下降的百分比小一些。

四、按有矩状态设计

当园柱壳的半径越来越大，壳的高度相对说来比较小，壳壁的抗弯刚度 D 又比较大时，那么接近罐底的一个相当大的高度内，壳体处于有矩状态，我们可利用罐底对罐壁的约束（用弯矩 M_0 和剪力 Q_0 来体现），传递一部分载荷给罐底和基础。

需要指出，五万米³的油罐，除罐底的环板（即弓形边板，厚度为 12 毫米，宽度

约为 1.6 米，拉伸应力不大，但弯曲应力相当大) 外，底板的中心部分厚度为 8 毫米，应力不大，只有数十公斤/厘米²。罐底地基的不均匀沉降引起的弯曲应力，虽不易确定但数值不大。因此底板在承受罐壁根部的 Q_0 方面，还有潜力。此外，在贮罐充满水时，罐底土壤有 1.8 公斤/厘米² 的压力。如果在罐底设计一个环形基础，则主动土压力 p_a 和被动土压力 p_p 分别为

$$\begin{cases} p_a = H \gamma \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \\ p_p = H \gamma \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \end{cases} \quad (15)$$

当 $H \gamma = 1.8$ 公斤/厘米²， $\phi = 30^\circ$ 时， p_a 和 p_p 分别为 0.6 和 5.4 公斤/厘米²。

此外，混凝土基础的底部和土壤之间有摩擦力 $F = Nf$ ， N 为正压力， f 为摩擦系数。对于粘土， $f = 0.25$ ；垆土， $f = 0.30$ ；砂， $f = 0.40$ ；岩石， $f = 0.60$ 。

上述底板承拉的潜力，土壤对基础的土压力，基础与土壤间的摩擦力等，都可设法利用来平衡由液压产生的剪力 Q_0 和弯矩 M_0 。

为了增大罐壁的抗弯刚度 D ，我们采用钢板混凝土夹层结构、混凝土和钢板联合作用的双层结构或其他结构形式。

一个长度为 l 的夹层圆柱壳，在上端作用有已知的 M_1 ， Q_1 ，在下端作用有已知的 M_0 和未知的 Q_0 ，根据 (9) 和 (10) 式，可由边界条件 (包括应力和位移的边界条件) 求解 Q_0 。

在精确计算中，要先假定夹层壳钢表板和混凝土夹心的厚度，求出 D ， β 和 βl ，然后根据 βl 由表 1 查出相应的 α_1 ， α_2 ， α_3 ， α_4 和 K_1 ， K_2 ， K_3 ， K_4 ，最后核算应力和位移。由于参数比较多，需要试算，计算工作比较繁琐。下面为了近似地探讨用钢量下降的问题，采用了一些简化假定，例如略去混凝土的承压作用，两块钢表板是等厚度的，可采用刚法线假定等。

对于有矩状态讨论三种比较简单的情况。

(1) 一个容量为 V (万米³) 的大型油罐，半径为 R (米)，罐壁的一部分为夹层壳，夹层壳高为 l (米)，其上为按薄膜应力状态设计的单层壳，夹层壳的混凝土夹心厚为 h_1 (厘米)，两块钢表板厚度之和为 t (厘米) (其中已包括钢板和混凝土夹心联接用的钢材)，钢的弹性模量 E 为 2.1×10^6 公斤/厘米²，泊桑比 ν 为 0.3，许用应力为 2000 公斤/厘米²，假定 $M_1 = Q_1 = M_0 = 0$ ，现在探讨表板厚度 t ，夹心厚度 h_1 和夹层壳高度 l 间的关系，并算出 Q_0 。

在静水压 p (公斤/厘米²) 的作用下，壳体的位移 δ (厘米) 由下式确定。

$$\delta = \frac{pR^2}{Et} \quad (16)$$

当壳体的端部和根部都能自由移动时，根部的向外位移为

$$\delta_0 = \frac{1.8R^2}{Et}$$

端部的向外位移为

$$\delta_1 = \frac{R^2}{Et} (1.8 - 0.1l)$$

于是, $\delta_0 - \delta_1 = \frac{0.1lR^2}{Et}$, l 以米计。

一个有限长的圆柱壳, 上边界自由, 下边界为 $M_0 = 0$, $Q_0 \neq 0$, 当 Q_0 向内作用时, 圆柱壳的下边界向内移动, 上边界向外移动, 可由表 1 给出, 选取适当的 Q_0 , 可使上下边界的位移相同。

当 $\beta l = 1.0, 1.5$ 和 2.0 时, 从表 1 可查得如下数值

表 4

βl	α_{10}	α_{11}	K_{10}	K_{11}	最大 K_s	K_5
1.0	-3.104	2.933	-2.019	0.986	0.143	0.026
1.5	-1.562	1.200	-1.395	0.621	0.210	0.085
2.0	-1.134	0.535	-1.138	0.400	0.270	0.188

表 4 中, α_{10} 和 K_{10} 为根部的 α_1 和 K_1 的值, α_{11} 和 K_{11} 为端部的 α_1 和 K_1 的值, $K_5 B$ 为壳体中和面的母线在 Q_0 的作用下变形后与两端间的联线的最大偏离, 可由表 1 中的 K_1 算出。

由上下边界位移相同的条件, 可得

$$\delta_0 + K_{10} B = \delta_1 + K_{11} B$$

于是

$$B = \frac{\delta_0 - \delta_1}{K_{11} - K_{10}} \quad (17)$$

上下边界的位移为

$$w_0 = w_1 = \delta_1 + \frac{K_{11}}{K_{11} - K_{10}} (\delta_0 - \delta_1) \quad (18)$$

壳体的最大位移为

$$w_{\max} = \delta_1 + \frac{K_{11} + K_5}{K_{11} - K_{10}} (\delta_0 - \delta_1) = \frac{R^2}{Et} (1.8 + 0.1l \frac{K_{10} + K_5}{K_{11} - K_{10}}) \quad (19)$$

下面先估算夹心的厚度 h_1 , 然后计算 t 和 Q_0 。

当两表板相等, 厚度之和为 t , 为简单起见, 若略去混凝土的承压作用, 可算得

显然是偏大的 h_1 。取 $D \approx \frac{Et (\frac{h_1}{2})^2}{1 - \nu^2}$, 则

$$\begin{cases}
 D \approx 0.275 E t h_1^2 \\
 \beta^4 = \frac{E t}{4 R^2 D} = \frac{0.91}{R_1^2 h_1^2} \\
 h_1 = \frac{0.954}{\beta^2 R} = \frac{0.954 l^2}{(\beta l)^2 R}
 \end{cases} \quad (20)$$

当 $\beta l = 1.0, 1.5, 2.0$ 时, 可算出相应的 h_1 , 供设计时参考。需要注意到, 在计算壳长时, l 以米计, 在 $\beta l = 1.0, 1.5, 2.0$ 时, l 以厘米计, 因为 β 的单位是 $1/\text{厘米}$ 。此外, 若考虑混凝土的承压作用, 则夹层壳的抗弯刚度 D 和夹心厚度 h_1 的算式, 将比 (20) 式复杂得多, 以后再探讨这个问题。现在根据 (20) 式中的第三式, 算出 h_1 的近似值, 单位为厘米, 见表 5。

表 5

V 万米 ³	10			20			30			50			
	43			60			73			95			
	R 米												
	βl	1.0	1.5	2.0	1.0	1.5	2.0	1.0	1.5	2.0	1.0	1.5	2.0
l 米	3.2	22.7	10.1	5.7									
	4.8	51.1	22.7	12.8									
	6.4	90.9	40.4	22.7	65.1	28.9	16.3						
	8.0	142	63.2	35.5	102	45.2	25.5	83.7	37.2	20.9			
	9.6	204	90.9	51.1	147	65.2	36.6	120	53.5	30.1			
	11.2	278	124	69.6	199	88.6	49.9	164	72.9	41.0	126	56.0	31.5
	12.8	363	161	90.8	261	116	65.2	214	95.2	53.5	165	73.2	41.0
	14.4	460	204	115	330	147	82.4	271	120	67.7	208	92.5	52.0
	16.0	568	252	142	407	181	102	335	149	83.7	257	114	64.3
	17.6	687	305	172	493	219	123	405	180	101	311	138	77.8
18.0	719	320	180	515	229	129	423	188	106	325	144	81.3	

由于 $M_\theta = \nu M_x$, $M_x = 2K_3 \beta^2 D B$, $\beta^2 D = \frac{E t}{4 R^2 \beta^2}$, $B = \frac{\delta_0 - \delta_1}{K_{11} - K_{10}}$,

$\delta_0 - \delta_1 = \frac{0.1 / R^2}{E t}$, $\sigma_x \approx \frac{M_x}{h_1 t}$, $\beta^2 h_1 = \frac{0.954}{R}$, 于是由 M_θ 引起的 σ_θ 为

$$\begin{aligned}
 \sigma_\theta = \nu \sigma_x &= \frac{0.3 \times 2 K_3}{t} \times \frac{E t}{4 R^2} \times \frac{0.1 / R^2}{E t} \times \frac{1}{K_{11} - K_{10}} \times \frac{R}{0.954} \\
 &= \frac{R}{t} \times \frac{0.01572 K_3 l}{K_{11} - K_{10}}
 \end{aligned}$$

最大周向应力 σ_θ 可允许达到 2000 公斤/厘米²

$$\frac{E w_{\max}}{R} + \frac{R}{t} \times \frac{0.01572 K_3 l}{K_{11} - K_{10}} = 2000 \quad (21)$$

将 (19) 代入 (21), 可得

$$t = \frac{R}{2000} \left(1.8 + 0.1 l \frac{K_{10} + K_5 + 0.1572K_3}{K_{11} - K_{10}} \right) \quad (22)$$

将表 4 中的数值代入 (22) 式, 可得到比较安全又比较简单的计算公式, 见表 6。然后考虑表 5 中 h_1 小于 1.5 米的情况, 算出 t 和 %, 见表 7。其中的 % 是指罐壁节约的钢材占表 2 中所用钢材的百分比。

表 6

βl	t 厘米
1.0	$\frac{R}{2000} (1.8 - 0.0656 l)$
1.5	$\frac{R}{2000} (1.8 - 0.0634 l)$
2.0	$\frac{R}{2000} (1.8 - 0.0591 l)$

表 7: 1

V 万米 ³	l 米	$\beta l = 1.0$		$\beta l = 1.5$		$\beta l = 2.0$	
		t 厘米	%	t 厘米	%	t 厘米	%
10	3.2	3.419	2.59	3.434	2.47	3.463	2.24
	4.8	3.193	4.38	3.216	4.11	3.260	3.59
	6.4	2.967	6.38	2.998	5.89	3.057	4.97
	8.0	2.742	8.95	2.780	8.20	2.853	6.78
	9.6			2.561	11.07	2.650	8.98
	11.2			2.343	14.06	2.447	11.21
	12.8					2.244	13.47
	14.4					2.040	16.56
	16.0					1.837	20.43
20	6.4	4.140	6.55	4.183	6.05	4.265	5.09
	8.0	3.826	8.98	3.878	8.22	3.982	6.70
	9.6	3.511	12.09	3.574	10.98	3.698	8.81
	11.2			3.270	14.06	3.414	11.12
	12.8			2.965	17.49	3.131	13.60
	14.4			2.661	21.20	2.847	16.31
	16.0					2.56	19.21
	17.6					2.280	23.74
	18.0					2.209	25.14

表 7: 2

30	8.0	4.654	8.83	4.719	8.04	4.844	6.52
	9.6	4.271	11.86	4.348	10.73	4.499	8.53
	11.2			3.978	13.76	4.154	10.76
	12.8			3.608	17.12	3.809	13.21
	14.4			3.238	20.82	3.464	15.87
	16.0			2.867	25.38	3.119	19.25
	17.6					2.773	23.35
	18.0					2.687	24.62
50	11.2	5.060	15.65	5.177	14.10	5.406	11.07
	12.8			4.695	17.66	4.957	13.69
	14.4			4.214	21.50	4.508	16.50
	16.0			3.731	25.69	4.059	19.49
	17.6			3.250	30.53	3.609	23.06
	18.0			3.129	32.03	3.497	24.21

这时油罐的最大挠度

$$w_{\max} = \frac{\sigma_{\theta} R}{E} = \frac{2000R}{E} \quad (23)$$

表 8

V 万米 ³	10	20	30	50
最大挠度 厘米	4.095	5.714	6.952	9.048

罐壁下端亦有比表 8 中所列略小的位移, 其数值可由 (18) 式算得。需要注意, 在罐底设计上必须有妥善的措施以确保这样的位移。

采用上述夹层圆柱壳, 罐底对罐壁的剪力 Q_0 可由下式计算,

$$Q_0 = 2\beta^3 D B = 2\beta^3 D \frac{\delta_0 - \delta_1}{K_{11} - K_{10}} = \frac{0.05 l}{(K_{11} - K_{10})\beta} \quad (24)$$

可算得表 9 中的值。

表 9

夹层壳高 l 米	3.2	4.8	6.4	8.0	9.6	11.2	12.8	14.4	16.0	17.6	18.0
$\beta l = 1.0$	17.0	38.3	68.1	106	153	209	273	345	426	515	539
$\beta l = 1.5$	16.9	38.1	67.7	106	152	207	271	343	423	512	536
$\beta l = 2.0$	16.6	37.4	66.6	104	150	204	266	337	416	503	527

从表 5 和表 7 对照起来看, 如混凝土夹心 h_1 的厚度小于 1.5 米, 当 $V = 10$,

20, 30, 50 万米³ 时, 可分别争取最多实现节约罐壁钢材的 15—20%, 20~25%, 20~25%, 25~30%。这是一个大致的数值, 有参考价值。在 l, R 相同的情况下, 当 h_1 较大因而 βl 较小时, 节约钢材的百分比要大一些, 不过混凝土的用量也多一些。混凝土的用量大了, 会增加施工量, 也影响造价的降低, 因此也不适宜。一般说来, 取 $\beta l \approx 1.5$, 或取 $\beta l \approx 1.3 \sim 1.8$ 比较合适。当然, 如果夹层壳的高度比较小, 混凝土夹心又比较薄, 那末节约钢材就少了。

这种受力状况 ($M_1 = Q_1 = M_0 = 0, Q_0 \neq 0, w_0 \neq 0$) 与薄膜应力状况相比, 不论 h_1 大到什么程度, βl 小到什么程度, 最多可争取实现节约罐壁钢材的 $1/3$, 不能再多了。要争取实现节约更多的钢材, 就要采用别的方案。

从表 7 还可看到, 当容量 V 增大时, 可争取实现节约钢材的百分比也大些, 以后还会遇到这种情况, 因此油罐造得大一点是有利的。

(2) 一个容量为 V 的大型油罐, 夹层壳高为 l (米), 其上为按薄膜应力状态设计的单层壳, 在夹层壳的上端部, 加焊一个环向钢圈, 钢圈的高度可以是 0.4 米, 0.8 米或 1.6 米, 可以是一个或二个钢圈, 也可以是原来的钢板加厚, 只要提供足够的截面积 A (厘米²) 就行, 现在近似地探讨节约钢材的可能性。

要求上下端部的位移相等, 可得

$$\delta_0 + K_{10} B_0 + K_{11} B_1 = \delta_1 + K_{11} B_0 + K_{10} B_1 \quad (25)$$

其中 $B_1 = \frac{Q_1}{2\beta^3 D}$, 而 $Q_1 = \frac{A\sigma}{R}$, A 为环向钢圈的截面积 (厘米²)。于是

$$B_0 = \frac{\delta_0 - \delta_1}{K_{11} - K_{10}} + B_1 \quad (26)$$

壳体的最大挠度近似地可表达为

$$w_{\max} = \delta_1 + (K_{11} + K_5) B_0 + (K_{10} + K_5) B_1 \quad (27)$$

由轴向弯曲引起的周向应力为

$$\sigma_\theta = \nu \sigma_x \approx \frac{2\nu K_3 \beta^2 D (B_0 + B_1)}{h_1 t} = \frac{0.1572 E}{R} K_3 (B_0 + B_1)$$

最大周向应力为 2000 公斤/厘米²

$$\frac{E w_{\max}}{R} + \nu \sigma_x = 2000$$

可得

$$\delta_1 + (K_{11} + K_5 + 0.1572 K_3) B_0 + (K_{10} + K_5 + 0.1572 K_3) B_1 = \frac{R}{1050}$$

经过化简可得

$$t = \frac{R}{2000} \left\{ \left(1.8 + 0.1 l \frac{K_{10} + K_5 + 0.1572 K_3}{K_{11} - K_{10}} \right) + (K_{11} + K_{10} + 2K_5 + 0.3144 K_3) 2\beta Q_1 \right\} \quad (28)$$

当 $\beta l = 1.0, 1.5, 2.0$ 时, 将有关的数值代入, 列于表 10。

表10

βl	t 厘米
1.0	$\frac{R}{2000} \left(1.8 - 0.0656 l - 32.68 \frac{A}{lR} \right)$
1.5	$\frac{R}{2000} \left(1.8 - 0.0634 l - 32.28 \frac{A}{lR} \right)$
2.0	$\frac{R}{2000} \left(1.8 - 0.0591 l - 22.16 \frac{A}{lR} \right)$

如果先给出 t ，则由表 10 的公式可算出 A ，见表 11。

表11

βl	环向钢圈的截面积 A 厘米 ²
1.0	$[(1.8 - 0.0656 l) R - 2000t] \times \frac{l}{38.68}$
1.5	$[(1.8 - 0.0634 l) R - 2000t] \times \frac{l}{32.28}$
2.0	$[(1.8 - 0.0591 l) R - 2000t] \times \frac{l}{22.16}$

在给定 h_1 ， l ， βl ， V ， R ， t 后，可算出 A 和罐壁节省钢材与表 2 所用钢材的百分比（%），见表 12。

表12

V 万米 ³	R 米	l 米	βl	h_1 厘米	t 厘米	A 厘米 ²	%	$\Delta\%$
10	43	6.4	1.0	90.9	2.6	122	9.14	2.76
		8.0	1.0	142	2.2	224	14.06	5.11
		9.6	1.5	90.9	2.2	215	14.28	3.21
		11.2	1.5	124	2.0	238	17.62	2.36
		12.8	2.0	90.8	2.0	281	14.23	0.76
		12.8	2.0	90.8	2.2	50.0	13.63	0.16
20	60	16.0	2.0	142	1.8	53.4	20.57	0.14
		8.0	1.0	102	3.2	259	13.40	4.42
		9.6	1.0	147	3.0	254	16.42	4.33
		12.8	1.5	116	2.6	290	20.73	3.24
		14.4	1.5	147	2.4	233	23.80	2.60
		16.0	2.0	102	2.4	236	19.06	0.46
30	73	18.0	2.0	129	2.2	14	25.18	0.04
		12.8	1.5	95.2	3.2	324	20.13	3.01
		16.0	1.5	149	2.4	463	29.70	4.32
50	95	18.0	2.0	106	2.4	466	25.39	0.77
		18.0	1.5	144	2.8	326	35.18	3.15
		18.0	2.0	81.3	3.2	482	24.83	0.62

表 12 中的 $\Delta\%$ ，为夹层壳上端部加一个环向钢圈后，与表 7 中相应的情况比较，在扣除环向钢圈所用的钢材后，多节约的百分比。采用上支承环的办法，对于不同情况，可以比没有上支承环的相应情况，多节约 0~5%。如果 A 大一些， βl 小一些，则多节约的百分比就大一些。如果环圈的截面积选择的适当，则可多节约 2~4%。采用上支承环，它可以使表 7 的 t （包括钢板和加筋）中的钢板厚度取整数毫米值，便于选用钢材，又可略有节约，因此是有意义的。

(3) 一个容量为 V 的大型油罐，夹层壳高为 l （米），其上为按薄膜应力状态设计的单层壳，对于夹层壳，假设上边界自由，下边界作用有 M_0 和 Q_0 ，使上下边界的周向应力分别为 2000 和 1950 公斤/厘米²，近似地探讨节约钢材的百分比。

上下边界的位移分别为

$$\begin{cases} \delta_1 + K_{11} B_0 - \alpha_{11} A_0 = 2000 \frac{R}{E} \\ \delta_0 + K_{10} B_0 - \alpha_{10} A_0 = \left(1950 - \frac{\nu}{h_1 t} M_0 \right) \frac{R}{E} \end{cases} \quad (29)$$

其中 A_0 和 B_0 分别为

$$\frac{M_0}{2\beta^2 D} = A_0, \quad \frac{Q_0}{2\beta^3 D} = B_0$$

在下边界，由于有 M_0 的作用，会产生 $M_0 = \nu M_0$ ， M_0 引起的环向应力为 $\frac{\nu M_0}{h_1 t}$ ，这就是 (29) 中第二式等号后括号中的第二项。两式相减可得

$$\begin{aligned} B_0 &= \frac{1}{K_{11} - K_{10}} \left(\delta_0 - \delta_1 + (\alpha_{11} - \alpha_{10}) A_0 + \frac{R}{E} \left(50 + \frac{\nu M_0}{h_1 t} \right) \right) \\ &= \frac{1}{K_{11} - K_{10}} \left(\frac{0.1 l R^2}{Et} + (\alpha_{11} - \alpha_{10}) \frac{M_0}{2\beta^2 D} + \frac{R}{E} \left(50 + \frac{\nu M_0}{h_1 t} \right) \right) \end{aligned} \quad (30)$$

M_0 由两部分组成，一部分由液压产生，另一部分由罐壁自重产生，在近似计算中取罐壁的平均比重为 2.2，这样，

$$\begin{aligned} M_0 &= h_1 \times 0.22 l \times \frac{h_1}{2} + 1.8a \left(h_1 + \frac{a}{2} \right) \\ &= 0.11 h_1^2 l + 1.8a \left(h_1 + \frac{a}{2} \right) \end{aligned} \quad (31)$$

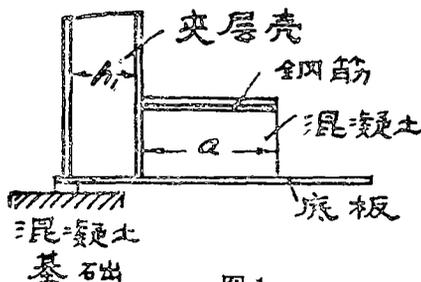


图 1

在图 1 中，取 a 大致为 300 厘米，钢筋用量约为 160 厘米²。

由 (29) 式消去 B_0 ，可得

$$(K_{10}\delta_1 - K_{11}\delta_0) - (K_{10}\alpha_{11} - K_{11}\alpha_{10})A_0 = 2000K_{10}\frac{R}{E} - \left(1950 - \frac{\nu M_0}{h_1 t}\right)\frac{R}{E}K_{11} \quad (32)$$

由于 $\beta^2 D = \frac{Et}{4R^2\beta^2}$ ， $A_0 = \frac{2M_0 R^2 \beta^2}{Et}$ ， $Rh_1 = \frac{0.954}{\beta^2}$ ，可得

$$\begin{aligned} K_{10}(1.8 - 0.1l)\frac{R^2}{Et} - K_{11} \times 1.8\frac{R^2}{Et} - (K_{10}\alpha_{11} - K_{11}\alpha_{10})\frac{2M_0 R^2 \beta^2}{Et} \\ = 2000K_{10}\frac{R}{E} - 1950K_{11}\frac{R}{E} + K_{11}\frac{\nu M_0}{h_1 t}\frac{R}{E} \end{aligned}$$

于是

$$t = \frac{R [1.8(K_{11} - K_{10}) + 0.1l/K_{10} + (K_{10}\alpha_{11} - K_{11}\alpha_{10} + 0.1572K_{11})2\beta^2 M_0]}{1950K_{11} - 2000K_{10}} \quad (33)$$

当 $\beta l = 1.0, 1.5, 2.0$ 时，可得 t 的算式，见表 13。

表 13

βl	t 厘米
1.0	$\frac{R}{5961} \left(5.409 - 0.2019l - 5.437 \times 10^{-4} \frac{M_0}{l^2} \right)$
1.5	$\frac{R}{4001} \left(3.629 - 0.1395l - 2.729 \times 10^{-4} \frac{M_0}{l^2} \right)$
2.0	$\frac{R}{3058} \left(2.768 - 0.1138l - 0.7394 \times 10^{-4} \frac{M_0}{l^2} \right)$

由于表 13 是在根部有较大的 M_0 时，最大应力或者位移是在上下端的条件下推导出来的；表 6 是在根部没有 M_0 时，最大应力或者位移是在夹层壳中间部分的条件下推导出来的。所采用的边界条件不同，因此，在表 13 中取 $M_0 = 0$ 时所得的算式和表 6 的算式不同。

经过推算化简后可得

$$\begin{aligned} Q_0 = 2\beta^2 D B_0 = \frac{100l}{2(100\beta l)(K_{11} - K_{10})} \left[0.1l + \frac{50t}{R} + \right. \\ \left. + \frac{2M_0(100\beta l)^2}{(100l)^2} (\alpha_{11} - \alpha_{10} + 0.1572) \right] \quad (34) \end{aligned}$$

将 $\beta l = 1.0, 1.5, 2.0$ 时的有系数代入后，可得 Q_0 的算式，见表 14。

表14

βl	Q_0 公斤/厘米
1.0	$16.64 l \left(0.1 l + \frac{50t}{R} + 1.240 \times 10^{-3} \frac{M_0}{l^2} \right)$
1.5	$16.53 l \left(0.1 l + \frac{50t}{R} + 1.314 \times 10^{-3} \frac{M_0}{l^2} \right)$
2.0	$16.25 l \left(0.1 l + \frac{50t}{R} + 1.461 \times 10^{-3} \frac{M_0}{l^2} \right)$

在给定 βl , l , h_1 , a , M_0 的情况下, 可以算出表板总厚度 t (厘米), 与表 2 相比, 在扣除底板环圈的钢筋用量 (约 160 厘米²) 后, 节约罐壁钢材的百分比 (%), 表板中竖向的应力 $\sigma_x \approx \frac{2M_0}{h_1 t}$ 和 M_0 的数值, 见表 15。其中 $\Delta\%$ 为表 14 与表 7 中相应的情况作比较后多节约罐壁钢材的百分比。

表15

V 万米 ³	R 米	l 米	βl	h_1 厘米	a 厘米	M_0 10 ⁴ 公斤	t 厘米	%	$\Delta\%$	σ_x 公斤/厘米 ²	Q_0 公斤/厘米
10	43	6.4	1.0	90.9	300	13.59	1.668	22.77	16.39	1793	508
		8.0	1.0	142	320	19.17	1.562	28.09	19.14	1729	603
		9.0	1.5	90.9	320	15.32	1.973	20.94	9.87	1708	503
		11.2	1.5	124	350	20.73	1.736	26.75	12.69	1926	635
		12.8	2.0	90.8	300	14.16	1.755	24.84	11.37	1778	533
		16.0	2.0	142	280	17.76	1.261	39.04	18.61	1984	683
20	60	8.0	1.0	102	350	18.37	2.248	29.18	20.20	1602	583
		9.6	1.0	147	350	22.57	2.153	32.98	20.89	1426	641
		12.8	1.5	116	350	20.23	2.259	31.08	13.59	1544	618
		14.4	1.5	147	350	23.71	1.962	36.68	15.48	1644	704
		16.0	2.0	102	320	16.92	1.763	39.66	20.45	1882	671
		18.0	2.0	129	280	16.85	1.337	50.89	25.75	1954	752
30	73	8.0	1.0	83.7	350	16.91	2.887	27.90	19.07	1400	545
		9.6	1.0	120	350	20.11	2.797	30.94	19.08	1198	619
		14.4	1.5	120	350	20.87	2.455	35.54	14.72	1417	662
		16.0	1.5	149	350	24.32	20.76	42.19	16.81	1572	757
		16.0	2.0	83.7	320	15.27	2.152	40.34	21.09	1696	646
		18.0	2.0	106	300	16.05	16.31	51.10	26.48	1857	741
50	95	11.2	1.0	126	350	20.92	3.571	33.46	17.81	930	598
		16.0	1.5	114	350	20.49	2.798	41.43	15.74	1285	705
		18.0	1.5	144	350	24.20	2.171	50.53	18.50	1548	694
		16.0	2.0	64.3	350	15.80	2.803	41.35	21.86	1753	736
		18.0	2.0	81.3	320	15.21	2.129	51.41	27.20	1757	730

从以上的近似计算可以看出，如在壳的下边界施加一个适当的 M_0 后，当夹心厚度在 1.5 米以下时，对于 $V = 10, 20, 30, 50$ 万米³ 时，可分别争取最多实现节约罐壁钢材的 25~35%，40~50%，40~50%，40~50%。这是一个大致的数值，有参考价值。在壳壁根部施加一个 M_0 要比没有 M_0 时多节约 10~25% 的罐壁钢材。由此可见，施加 M_0 是很有效的。但是，在施加 M_0 以后，作用于壳壁下方基础的力增大了， Q_0 也增大了，因此对于承载能力较大的地基是适合的，若地基的承载能力不大，则在设计罐壁下方的基础和罐底下的环形基础（用以承受 Q_0 的一部分）时，就需要较多的混凝土，这是应该注意的。

在有 M_0 的情况下，也可设计一个合适的上支承环，使用钢量再节约一些或便于选择板厚。

在有矩状态的 (1) (2) 两种情况，壳的外壁受拉，内壁受压，对于浮顶式油罐，由于浮顶和罐壁间有密封装置，因此希望内壁是钢的，这就要求做成夹层壳，不过从受力情况看，内层壳的厚度可薄一些，外层壳的厚度应厚一些，这样，夹层壳的抗弯刚度可大一些，有利一些。对于有矩状态的第 (3) 种情况，即在壳的下端作用有 M_0 ， Q_0 的情况，由于内壁受拉，外壁受压，因此可取消夹层壳的外层钢壳，改为双层壳，在混凝土中适当配置一些钢筋，这种钢板混凝土双层壳，施工是比较方便的。

对于有矩状态的三种情况，由于夹层壳部分是等剖面的，因此罐壁钢板厚度的种类，要比按薄膜应力状态设计的罐壁钢板的种类，（例如五万米³ 时，罐壁钢板有九种厚度）少一些，这有利于备料和卷板。

前面说过，为简单起见，引入了混凝土不能承压的简化假定。现在讨论混凝土能承压（不能承拉）两表板厚度不相等的情况。

用 n 表示钢和混凝土的弹性模量之比值， Z_0 表示中和轴的位置， D 为抗弯刚度， σ_1 为受压钢板中的应力， σ_2 为受拉钢板中的应力， σ_c 为混凝土中的最大压应力， $t_1 + t_2 = t$ ， $t_1 > t_2$ 。

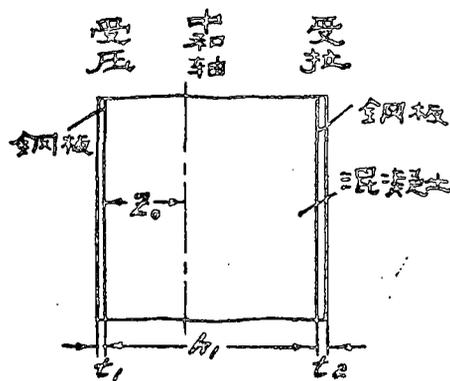


图 2

$$\left\{ \begin{aligned} Z_0 &= \frac{nt}{0.91} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{1.82t_2(h_1 + \frac{t_2}{2})}{nt^2}} \right) \\ D &= \frac{EZ_0^3}{3n} + \frac{E}{0.91} \left[t_1 \left(Z_0 + \frac{t_1}{2} \right)^2 + t_2 \left(h_1 - Z_0 + \frac{t_2}{2} \right)^2 \right] \\ \beta^4 &= \frac{Et}{4R^2J} \end{aligned} \right. \quad (34)$$

则

$$\begin{cases} \sigma_1 = n\sigma_c = \frac{M}{\frac{Z_0}{2n} \left(h_1 - \frac{Z_0}{3} + \frac{t_2}{2} \right) + t_1 (h_1 + t)} \\ \sigma_2 = \frac{M}{t_2 \left(h_1 - \frac{Z_0}{3} + \frac{t_2}{2} \right) + \frac{t_1 \left(Z_0 + \frac{t_1}{2} \right) \left(\frac{Z_0}{3} + \frac{t_1}{2} \right)}{h_1 - Z_0 + \frac{t_2}{2}} \end{cases} \quad (35)$$

当夹层壳的表板相等时，在 (84)，(35) 中取 $t_1 = t_2 = \frac{t}{2}$ ，可得

$$\begin{cases} Z_c = \frac{nt}{0.91} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{0.91 \left(h_1 + \frac{t}{4} \right)}{nt}} \right] \\ D = \frac{EZ_0^3}{3n} + \frac{E}{1.82} \left[\left(Z_0 + \frac{t}{4} \right)^2 + \left(h_1 - Z_0 + \frac{t}{4} \right)^2 \right] \\ \beta^4 = \frac{Et}{4R^2D} \end{cases} \quad (36)$$

和

$$\begin{cases} \sigma_1 = \lambda\sigma_c = \frac{2M}{t (h_1 + t) + Z_0 \left(h_1 - \frac{Z_0}{3} + \frac{t}{4} \right)} \\ \sigma_2 = \frac{2M}{t \left(h_1 - \frac{Z_0}{3} + \frac{t}{4} \right) + \frac{t \left(Z_0 + \frac{t}{4} \right) \left(\frac{Z_0}{3} + \frac{t}{4} \right)}{h_1 - Z_0 + \frac{t}{4}} \end{cases} \quad (37)$$

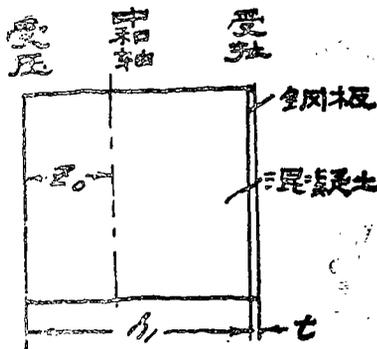


图 3

对于双层壳，在 (34)，(35) 中取 $t_1 = 0$ ， $t_2 = t$ 可得

$$\begin{cases} Z_c = \frac{nt}{0.91} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{1.82 \left(h_1 + \frac{t}{2} \right)}{nt}} \right] \\ D = \frac{EZ_0^3}{3n} + \frac{Et}{0.91} \left(h_1 - Z_0 + \frac{t}{2} \right)^2 \\ \beta^4 = \frac{Et}{4R^2D} \end{cases} \quad (38)$$

和

$$\begin{cases} \sigma_c = \frac{2M}{Z_0 \left(h_1 + \frac{t}{2} - \frac{Z_0}{3} \right)} \\ \sigma_s = \frac{M}{t \left(h_1 + \frac{t}{2} - \frac{Z_0}{3} \right)} \end{cases}$$

(39)

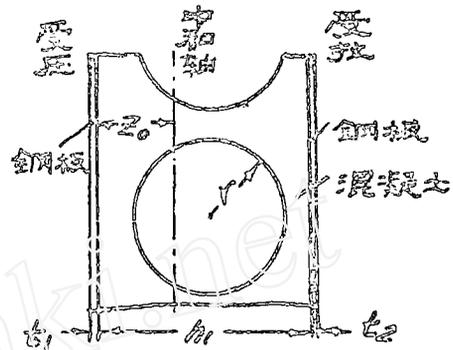


图 3

对于空心混凝土夹层壳，可利用 (34) 式和资料 [4] 中第 54 图，用试算法求出 Z_0 ，然后算得 D 和 β ，再由公式 (35) 式，作为计算应力的近似公式。

当采用钢表板空心混凝土夹心时，可以节省混凝土，如取 $t = 10$ 厘米，则混凝土的用量见表 16。

表 16

距离 h_1 厘米	75	100	125	150
混凝土折合厚度厘米	43.32	49.73	55.73	61.51

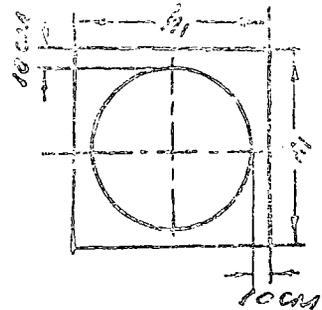


图 5

现在根据 (34)，(36) 和 (38) 计算夹层壳和双层壳的 β 和 βI 值，在计算 Z_0 和 D 时， t 中不计

环筋，在计算 β 时，在 t 中包括环筋。取 200 混凝土， $n = \frac{2.1 \times 10^6}{2.6 \times 10^5}$ ，将算得的 β 和 βI 列于表 17 中，也列出了 βI 的近似值，作为比较。

表 17

	V 万米 ³	R 米	l 米	h_1 厘米	t_1 厘米	t_2 厘米	环筋 厘米	t 厘米	Z_0 厘米	D E×10 ²	β 10 ⁻³ /厘米	βI 精确性	βI 近似值
夹层壳	10	46	16.0	142	0.6	1.0	0.2	1.8	38.07	152.3	1.092	1.747	2.0
	20	60	12.8	116	1.0	1.4	0.2	2.6	36.62	134.1	1.077	1.379	1.5
	30	73	18.0	106	1.0	1.2	0.2	2.4	31.97	98.52	1.034	1.861	2.0
	50	95	18.0	81.3	1.0	2.0	0.2	3.2	33.63	80.56	1.024	1.844	2.0
双层壳	10	43	16.0	142	0	1.0	0.261	1.261	42.97	141.6	1.048	1.676	2.0
	20	60	8.0	102	0	2.0	0.248	2.248	45.28	111.5	1.088	0.870	1.0
	30	73	16.0	149	0	1.8	0.276	2.076	55.06	246.8	0.793	1.268	1.5
	50	95	18.0	81.3	0	1.8	0.319	2.129	37.71	61.27	0.990	1.783	2.0

由表 17 可以看到，按 (34) 和 (38) 式算得的 βI ，要比前面的近似法用的 βI

值小一些。这说明前面的计算结果，还存在一些潜力。

以上对于夹层壳或双层壳的环向应力 σ_θ 和竖向应力 σ_x 都作了考虑和计算，对于壳中的剪应力应按公式 (10) 加以核算，如混凝土中承受的剪应力超过钢筋混凝土结构规范的规定，就应在剪应力大的部位配置一些斜向承剪钢筋，所用钢材的量是相当少的。

在设计时，还应该计算夹层壳由于混凝土夹心的剪切变形而引起的剪切挠度，这对于空心混凝土夹心尤其应当注意。

五、半地下式油罐

将油罐的一部分建在地下，液压的一部分为被动土压力所平衡。油罐在地面以上的部分，仍按薄膜应力状态设计。现在近似地探讨既能节约钢材和混凝土，又能使土方工程和总造价比较小的方案。

需要一定量的挖方，将挖出的土堆放在钢板混凝土双层壳的外边，逐步填高压实，使罐底和土方的顶部有高差 H (米)。

暂设土壤的内摩擦角 φ 为 30° ，土壤的比重 γ 为 1800 公斤/米³，在设计时 φ 和 γ 应按实际情况确定)，则主动土压力 $p_a = \frac{1}{3} \times 0.18 \times H = 0.06H$ 公斤/厘米²，被动土压力 $p_p = 3 \times 0.18 \times H = 0.54H$ 公斤/厘米²。

由于主动和被动土压力是土壤滑动时产生的最大主动土压力和被动土压力，压力和位移的关系无法用数学形式表达出来。为安全起见，在以下计算中，在计算主动和被动土压力时，引入安全系数 1.2。这样， $p_a = 0.072H$ 公斤/厘米²， $p_p = 0.45H$ 公斤/厘米²。

先选取 H 和混凝土最大壳厚 h_{1max} (厘米)，按 $\sigma = \frac{p_{amax}R}{h_{1max}}$ 算出混凝土在最大主动土压力 p_{amax} 作用时的最大压应力。然后算出最大被动土压力 p_{pmax} 和双层壳顶面处的液压 p ，见表 18。

表18

V	万米 ³	10	20	30	50
H	米	9.6	9.6	11.2	12.8
h_{1max}	厘米	40	55	75	100
p_{amax}	公斤/厘米 ²	0.6912	0.6912	0.8064	0.9216
p_{pmax}	公斤/厘米 ²	4.32	4.32	5.04	5.76
混凝土壳中的最大压应力 σ "		74.30	75.40	78.50	87.55
在双层壳顶部的液压 P "		0.84	0.84	0.68	0.52

当油罐充液时，在液压作用下，双层壳从受外压的状况转变为受内压的状况，必定

有若干厘米的向外位移，在离罐底 x 米的高度，液压为被动土压力所平衡。剩下的液压的合力为 Q_1 ，如将 Q_1 移到双层壳的顶部，则可得 $M_1 = Q_1 (H - x) \times \frac{1}{3}$ ，计算结果见表 19。

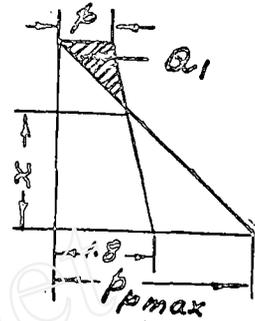


图 6

双层壳中，钢板厚 t_2 取为 8 毫米，环向加筋的折合厚度 t_1 取为 2 毫米（既可承受周向拉力，又能用于联接钢板和混凝土，使在抗弯时能起整体作用）。为了节约混凝土，在离罐底 3.2 米处，混凝土壳的厚度对于 10, 20, 30, 50 万米³ 的容量， h_1 分别取为 40, 40, 60, 75 厘米，即除 10 万米³ 的油罐厚度保持不变外，其余三个油罐，上边都适当减薄了。取 150 号混凝土， $n = \frac{2.1 \times 10^8}{2.3 \times 10^8} = 9.13$ 。

$$B_1 = \frac{Q_1}{2\beta^3 D}, \quad A_1 = \frac{M_1}{2\beta^2 D}, \quad B_0 = \frac{Q_0}{2\beta^3 D}$$

在壳的根部取 $w_0 = 0$, $M_0 = 0$ 的边界条件，（实际上在根部是有一定的约束弯距的，取 $M_0 = 0$ ，偏于安全），根据 $w_0 = 0$ ，可得

$$K_{10} B_0 + K_{11} B_1 - \alpha_{11} A_1 = 0$$

可得

$$Q_0 = -\frac{K_{11}}{K_{10}} Q_1 + \beta \frac{\alpha_{11}}{K_{10}} M_1 \quad (40)$$

在双层壳的顶端，

$$w_{\max} = K_{10} B_1 + K_{11} B_0 - \alpha_{10} A \quad (41)$$

顶端的周向拉应力

$$\sigma_\theta = \frac{E w_{\max}}{R} - \frac{0.6 M_1}{Z_0 \left(h_1 - \frac{Z_0}{3} \right)} \quad (42)$$

钢板在竖向的最大拉应力

$$\sigma_x = \frac{1}{t \left(h_1 - \frac{Z_0}{3} \right)} \left(K_3 \frac{Q_0 + Q_1}{\beta} - \alpha_3 M_1 \right) \quad (43)$$

混凝土在竖向的最大压应力

$$\sigma_c = \frac{2}{Z_0 \left(h_1 - \frac{Z_0}{3} \right)} \left(K_3 \frac{Q_0 + Q_1}{\beta} - \alpha_3 M_1 \right) \quad (44)$$

在已知 V , R , h_1 , H , t_2 等以后，可根据 (38) 式算得 Z_0 , D , β , 和 βH (即 βl)，由表 1 查得 α_{10} 和 α_{11} , K_{10} 和 K_{11} ，然后由 (40) ~ (44) 算

出 Q_0 , w_{max} , σ_x , σ_θ 和 σ_c , 结果见表 19。在 (42)~(44) 中, 如果略去 M_1 , 则计算比较简单而且安全。在表 19 中, 在计算 σ_θ , σ_x 和 σ_c 时, 已略去 M_1 。

表 19

V	万米 ³	10	20	30	50
R	米	43	60	73	95
H	米	9.6	9.6	11.2	12.8
h_{1max}	厘米	40	53	75	100
h_1	厘米	40	40	60	75
t_2	厘米	0.8	0.8	0.8	0.8
t_1	厘米	0.2	0.2	0.2	0.2
x	米	7.2	7.2	9.257	11.31
Z_0	厘米	18.67	18.67	24.13	27.68
D	公斤·厘米	653 E	653 E	1669 E	2776 E
β	1/厘米	2.193×10^{-3}	1.806×10^{-3}	1.295×10^{-3}	1.000×10^{-3}
βl		2.048	1.734	1.450	1.280
Q_1	公斤/厘米	100.8	100.8	66.06	38.74
M_1	公斤	24190	24190	12840	5772
Q_0	公斤/厘米	11.17	11.56	15.10	12.01
B_1		3.787	6.238	4.340	3.322
A_1		1.938	2.704	1.092	0.495
B_0		0.420	0.715	0.992	1.030
w_{max}	厘米	1.944	3.929	3.733	3.523
σ_θ	公斤/厘米 ²	949	1375	1074	779
σ_x	公斤/厘米 ²	524	548	317	182
σ_c	公斤/厘米 ²	45.0	47.0	32.8	16.4
%		47.66	56.14	64.48	73.54

在表 19 中的最后一行 % 是指半地下式油罐罐壁的用钢量与表 2 中的用钢量相比节约的百分比。节约的百分比对于 10, 20, 30, 50 万米³, 分别达到 47.66%, 56.14%, 64.48%, 73.54%, 这是一个相当大的数值。当然, 土方工程也比较大。如果还想增大节约钢材的百分比, 则可适当增加填土的高度 H, 例如, 取 H = 12.8 米, 取钢板厚为 0.6 厘米, 环筋等用 0.2 厘米, 则对于 10, 20, 30, 50 万米³ 的油罐, 可分别节约罐壁钢材的 58.59%, 68.13%, 71.78%, 76.56%, 当然土方工程和混凝土用量就更多一些, 也可将混凝土壳做得比土面高一些, 使没有土壤侧压支承的那部分双层壳所受的内压, 以 M 和 Q 的形式传到下面去。如果要增加半地下式油罐的可靠性, 则可在双层壳的顶部, 加一个有适当截面积的上支承环; 在油罐充水时, 不要在

第一次就充到最高水位 18 米，而是先充到 16 米，然后放水，将壳壁附近的土壤由于压实而出现的缝隙用砂土填满，这样可增大土壤的被动土压力。最后进行应力和位移的测量，在一切准备妥善后，可充水到 18 米。要经常维修填土部分，传达到或略超过设计标高，离罐壁若干距离（譬如 10 到 15 米）处，可以植树。要有防备暴雨和山洪的措施。对于地下水位较高的地区，要有降低地下水位的管道网和抽水设备。半地下式油罐用于黄土高原最为合适。

六、若干措施

(1) 上述钢板混凝土夹层结构和双层结构，是介于钢结构和钢筋混凝土结构之间的一种结构形式，有很大的抗弯刚度。为了保证在抗弯时的整体作用，在钢板和混凝土的交界面，需要承受一定的剪应力，光靠混凝土和钢板表面的粘合力来承受是不够的，必须采用充分的可靠的措施才行。将钢筋或小号型材在周向连续地焊在钢板上，每隔 25~50 厘米焊一圈，这种钢筋既能承受周向拉力，又可在竖向承受钢板和混凝土交界处的剪力，在用材方面是经济的，但焊接工作量比较大。此外，需要在剪应力较大的地方配置一些承剪钢筋。

(2) 除按薄膜应力状态和半地下式油罐外，如按有矩状态设计，当夹层壳的混凝土夹心比较厚，或双层壳的混凝土壳比较厚时，在罐壁根部采用简支条件 $w_0 = M_0 = 0$ ，将会引起很大的剪力 Q_0 ，采用固支条件 $w_0 = \frac{\partial W}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0$ ，将会引起很大的剪力 Q_0 和弯矩 M_0 ，很不好办，另一方面造成壳体上下应力分布不均匀，因而是经济的。如夹层壳的混凝土层较薄时，按简支条件设计是可行的，但不能节约钢材或节约的百分比不大。因此，按有矩状态设计，而且希望能显著节约钢材时，要求在壳体的根部有一定数量的位移，需要在罐底或罐壁和罐底的交界处加以安排。

当 Q_0 较小 ($Q_0 < 200$ 公斤/厘米)，可采取图 7 所示意的结构安排。弧形密封板，可以是薄钢板，也可以是耐油橡皮。具体的结构安排，还需深入研究。总之，要求既能密封，能承受一部分 Q_0 ，又允许有一定的位移 Δ 。环板也能承受一部分 Q_0 。

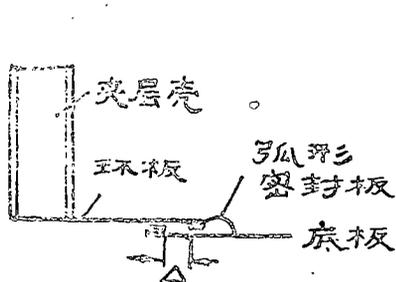


图 7

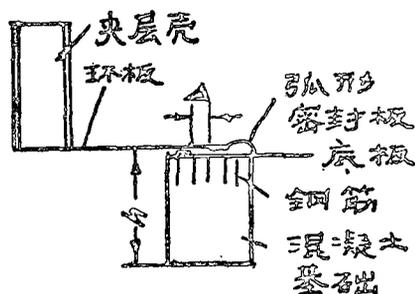


图 8

当 Q_0 较大时，需要有一个环形基础，当油罐充水后，水压传给土壤，环形基础能承受 $1.8h \sim 5.4h$ (公斤/厘米) 的力，可用来平衡 Q_0 ，采用 $1.8h$ 公斤/厘米是充分可靠的。环形基础和土壤间有摩擦力 (fN)，环板也能承受一部分 Q_0 ，底板和环

形基础连在一起,有钢筋相连,见示意图8。因此底板基本上可以不承受拉力,或者只承受很小的拉力。环板只需要1厘米厚,其宽度可在3~6米之间,视环形基础的受力状况而定, Δ 为允许位移的量,由壳壁的强度要求确定。

(3) 由于底板承受的拉应力很小,因此可和资料[2]一样,采用6毫米厚的钢板。对于浮顶,当油罐的容量增大时,由于直径和重量越来越大,应采取一些改进措施,如在中心集水坑的外边,加一个浮圈,为了增加浮顶的刚度,必须加辐射筋,也可加一、二圈环向筋,可和资料[2]一样,板厚采用5毫米,这样,浮顶和罐底可节约一部分用钢量(公斤/米³)。

(4) 当夹层壳的混凝土夹心或双层壳的混凝土层较厚时,为了节约水泥用量,可以在混凝土中安放30~50%的卵石。这样,可降低混凝土的造价,对于混凝土的抗压和承剪不用没有影响,而且可以减少混凝土的收缩量。

对于夹层壳,由于混凝土是在封闭空间内浇筑的,收缩量是很小的。对于双层壳,混凝土收缩引起预应力与工作状态的应力相反,因而更有利。

(5) 在夹层壳、双层壳上部的单层壳,在风压作用下,仍然存在着危险,需要慎重处理。如果采用的夹层壳或双层壳达到最高水位的高度,那么,就可取消抗风圈和加强圈,又可节约一部分钢材。

七、几点意见

(1) 采用本文所探讨的几种方案,可实现10万到数十万米³的大型油罐。

(2) 采用薄膜应力状态的设计方案,在原来壳厚超过38毫米的部分,采用两层钢壳在中间充填沙土或混凝土的办法,对于基础的承载能力没有什么严格要求,在罐壁根部可采用简支条件,不要求有一定的位移,施工安排基本上不变,但罐壁的用钢量也不节省。

(3) 采用有矩状态的设计方案,可降低罐壁的用钢量,也能降低造价,但需要相当数量的混凝土和少量的土方工程,有一定的施工量,在施工安排上会引起一些问题,需要解决。

(4) 半地下式油罐,罐壁钢材节约的百分比最大,但需要相当大的土方工程和一定量的混凝土,在施工安排上会引起一些问题,需要解决。对于暴雨、山洪、土坡的维护,需要经常注意。

(5) 大型油罐的地基,沉降是不均匀的,一般说来,中心部分沉降得更多一些。这对第三部分中(1),(2)两种情况和半地下油罐的情况,能带来一些好处,因为能提供有利的 M_0 ,但 M_0 的数值不大,大致为 $0.11h_1^2 l$ 。对于第三部分的(3),地基的沉降没有影响。由于有相当数量的液压以 M_0 和 Q_0 的形式传递给基础,因此要求地基土壤有较大的承载能力,如地基土壤的承载能力不够大,那么混凝土的用量就要多一些。而(1),(2)两种情况,对地基的承载能力要求就不那么高。半地下式油罐,对于地基的承载能力的要求也不高。

(6) 如果采用上述几种结构形式,由于罐壁的用钢量节省的比较多,因此可以适当增加油罐的水位高度,使浮顶和罐底用钢量下降,并使整个油罐的用钢量下降到一

个最小的数值。油罐的高度以采用 20~22 米为宜 [1] , [2] 。

(7) 采用有矩状态的设计方案, 整个油罐的用钢量可以争取实现下降15~25%, 造价下降 5~15%, 用钢量为 12~15 公斤/米³。如采用半地下式油罐的设计方案, 则用钢量可节约 30~45 %, 用钢量为 10~12 公斤/米³。油罐越大, 则节省钢材的百分比就越多, 因此做得大一点是有利的。

(8) 要研制 10 万米³ 以上的大型油罐, 特别是本文提到的结构形式, 在力学上是可行的, 在设计、施工和使用上会引起什么问题还没有把握, 由于能节省大量钢材, 因此值得研究。但是, 大型油罐的牵涉面很广, 需要在党的领导下, 实行工人、干部、技术人员的三结合和施工、设计、科研方面的三结合, 共同努力, 才能完成。

最后, 对于战备安全问题, 要特别重视。

八、参 考 文 献

[1] 《石油化工》, 技术情报, 1974 年第 2 期, 北京石油化工总厂设计院情报编辑组。

[2] Jr、J、M、Lamgeveld, 《钢制大型原油和液压天然气储罐的设计》, (本文是国际焊接协会 1974 年 7 月布达佩斯协会中的一份报告的中译本, 1975 年 1 月, 油印本)

[3] S. Timoshenko and S. Woinowsky—Krieger
《Theory of Plates and Shells》, 2nd edition, 1959, chap. 15.

[4] 苏联机器制造百科全书, 第一卷下, 机械工业出版社, 1956 年。