

大型储罐罐壁的强度计算

黄勇力

中国石化集团北京设计院 100011

摘 要 在大型储罐罐壁强度计算中, 我国规范 SH 3406- 92、日本规范 JIS B 8501 和英国规范 BS 2654 等均采用“定点法”或修正了的“定点法”; 美国规范 API 650 给出了“变点法”计算方法。文章介绍了上述 4 种规范的计算方法和计算式, 并结合实际工程设计对其计算结果进行了分析对比。

关键词 大型储罐 罐壁 强度计算 定点法 变点法

1 前言

随着储罐的大型化, 储罐的直径和钢材总重量也随之增大。大型储罐的设计应尽可能地减少钢材的消耗量, 以达到比较好的经济合理性。罐壁钢材的重量在大型储罐罐体的总重量中约占 35% 到 50%。因此, 确定罐壁厚度的罐壁强度计算, 对于减少罐壁的重量从而降低整个储罐的钢材消耗量、对于大型储罐的经济合理性具有决定性的作用。国内外储罐设计规范提供的罐壁强度计算方法不尽相同, 计算所得的罐壁板的厚度也有差别, 因此有必要对各种规范提供的计算方法进行比较。

外浮顶储罐罐壁承受的储液静液压如图 1 所示。工程设计中罐壁厚度按静液压在罐壁中产生的最大环向应力确定。由于实际的罐壁设计时罐壁板不可能采用厚度连续变化的钢板, 所以制造时均采用不同厚度的钢板组焊成罐壁。因此除储罐直径较小, 罐壁厚度按刚性确定并设计成等壁厚外, 通常情况下各层罐壁板的厚度也是沿罐壁由上到下逐层增厚的。

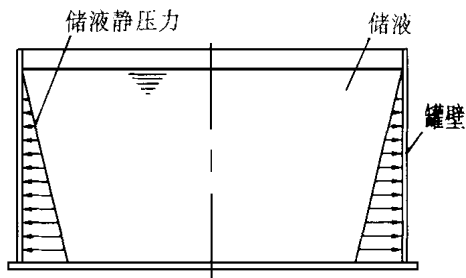


图 1 罐壁承受的储液静压力

每一层罐壁钢板的厚度可根据罐壁板承受的最大应力计算得出。各层罐壁板承受的应力呈梯形分

布, 因此从理论上讲其最大应力点应在每一层罐壁板的下端。但由于罐壁板采用的是有一定宽度的钢板, 在其宽度范围内厚度是不变的, 因此各层罐壁板宽度范围内的应力分布是不均匀的, 其上段的应力较小。各层罐壁板下端因受到下层罐壁板的影响, 使罐壁板中最大应力点的位置上移。因此, 罐壁板厚度不是按每层罐壁板下端的应力决定, 而是按罐壁板下端向上一定距离的最大应力点处的静液压计算得出的。至于最大应力点上移的位置, 各国储罐规范中均采用罐壁板下端向上约 304.8mm (1ft) 处。此种罐壁厚度的计算方法称为“定点法”。当储罐直径较小时, 各层罐壁板的应力分布比较均匀, 用定点法计算罐壁厚度的精度能够满足实际需要。但随着储罐直径的增大, 由计算得到的结果和应力实测数据表明, 用“定点法”计算出的罐壁厚度, 往往造成罐壁板的下部应力较大, 甚至超过了许用应力, 这显然是不安全的; 而罐壁板的上部应力较小, 又显得比较保守。图 2 列出了三种不同直径的储罐罐壁环向应力分布曲线图。由图 2 可以看出, 储罐直径为 $\phi 6576\text{mm}$ (120ft) 时, 各层罐壁板的应力分布比较均匀, 罐壁中的环向最大应力点均落在各层罐壁高度范围内; 但储罐直径为 $\phi 7056\text{mm}$ (220ft) 以上时, 罐壁中最大的环向应力点逐渐上移, 底层罐壁中的最大应力点甚至已经落到了第二层壁板上, 而上部各层罐壁的应力偏低。对此, 有

收稿日期: 1998-08-06

作者简介: 黄勇力, 1987 年毕业于华东石油学院机械系矿机专业, 现在中国石化集团北京设计院从事炼油设备设计工作, 工程师。

些国家的规范对定点算法做了修正, 如计算底圈罐壁板时采用不同的焊缝系数等措施, 这满足了一些中型储罐的需要。但对于大直径储罐, 由于其底层罐壁的最大应力点有可能落到第二层壁板上, 即使有这些修正措施仍然会有较大的误差。因此如果能计算出罐壁板中最大应力点的位置, 再按此位置确定罐壁板的厚度将会得出比较精确合理的结果, “变点法”就是基于这种概念进行计算的。美国 API 650《钢制焊接储罐》中给出了“变点法”进行罐壁厚度计算的方法, 我国 SH 3046- 92、日本 JIS B 8501 和英国 BS 2654 等规范均采用“定点法”或修正了的“定点法”。

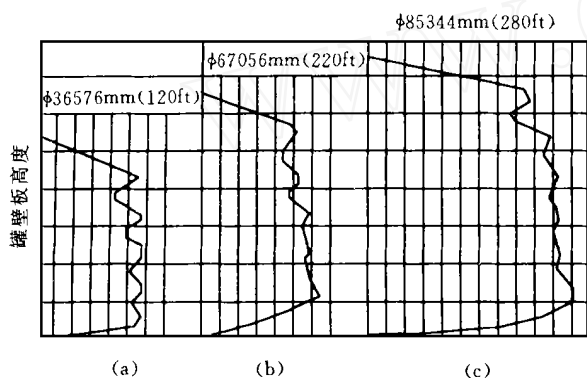


图 2 不同直径储罐罐壁环向应力分布

结合福建炼油化工有限公司 10 万立方米浮顶油罐的罐壁强度计算, 对上述 4 种规范进行了比较与分析。

2 10 万立方米大型浮顶油罐罐壁强度计算

设计条件:

公称容积: 100000m³;

储罐直径: 81m;

罐壁高度: 21.1m;

储存液密度: 0.85t/m³;

腐蚀裕量: 1mm;

设计储液高度: 19.5m;

罐壁层数: 9;

底层罐壁高度: 2.4m;

罐壁材质: SPV 490Q ($\sigma_s = 490\text{MPa}$, $\sigma_b = 610\text{MPa}$);

SPV 355 ($\sigma_s = 355\text{MPa}$, $\sigma_b =$

520MPa);

SM 41 ($\sigma_s = 216\text{MPa}$, $\sigma_b = 402\text{MPa}$).

2.1 按美国规范 API 650《钢制焊接油罐》变点法计算 (因按原标准计算, 故仍保留原有单位制)

2.1.1 底层罐壁板厚度的计算

分操作和试水两种情况, 分别按定点法计算公式计算一个初步厚度:

$$\text{操作 } t_{pd} = \frac{2.6D(H-1)G}{S_d} + C_2 \quad (1)$$

$$\text{试水 } t_{pt} = \frac{2.6D(H-1)}{S_t} \quad (2)$$

式中: D ——储罐公称直径, ft;

H ——设计液面高度 (所计算的罐壁板底部到设计液位的高度), ft;

G ——储液设计密度, kg/m³;

C_2 ——腐蚀裕量, in;

S_d ——设计条件下管壁板材的许用应力, psi;

S_t ——充水试验条件下罐壁板材的许用应力, psi

用下列公式分别计算设计条件和充水试验条件下的底层罐壁所需厚度 t_{1d} 和 t_{1t}

$$t_{1d} = \left[1.06 - \frac{0.463D}{H} \sqrt{\frac{HG}{S_d}} \times \frac{2.6HDG}{S_d} \right] + C_2 \quad (3)$$

$$t_{1t} = \left[1.06 - \frac{0.463D}{H} \sqrt{\frac{HG}{S_t}} \times \frac{2.6HDG}{S_t} \right] + C_2 \quad (4)$$

注: t_{1d} 不必大于 t_{pd} , t_{1t} 不必大于 t_{pt}

2.1.2 第二层罐壁厚度的计算

先计算第一圈罐壁的比值 K_b :

$$K_b = \frac{h_1}{(rt_1)^{0.5}} \quad (5)$$

式中: h_1 ——底层罐壁的高度, in;

r ——储罐的公称半径, in;

t_1 ——底层罐壁的实际厚度减去腐蚀裕量, 用以计算设计条件下的 t_2 , in。

如果 $K_b \leq 1.375$ 则 $t_2 = t_1$;

如果 $K_b \geq 2.625$ 则 $t_2 = t_{2a}$;

如果 $1.375 < K_b < 2.625$ 则

$$t_2 = t_{2a} + (t_1 - t_{2a}) \frac{h_1}{25(rt_1)^{0.5}} \quad (6)$$

式中: t_2 ——第二层罐壁的最小设计厚度 (不含腐蚀

裕量), in;

t_{2a} ——按第二层以上的罐壁计算方法求得的第二层罐壁板厚度, in。

2.1.3 第三层以上各层罐壁厚度的计算

分操作和试水两种情况, 分别按定点法计算式计算一个初步厚度, 再计算可变设计点距该层罐壁底部的距离 x , x 是下列三个表达式中的最小值:

$$x_1 = 0.61 (rt_u)^{0.5} + 3.84CH \quad (7)$$

$$x_2 = 12CH \quad (8)$$

$$x_3 = 1.22 (rt_u)^{0.5} \quad (9)$$

式中: t_u ——环焊缝上侧的罐壁厚度, in;

C ——系数, $C = [K^{0.5} (K - 1)] / (1 + K^{1.5})$, $K = t_u / t_x$;

t_u ——环焊缝下侧的罐壁厚度, in;

H ——设计液面高度, ft。

对于设计条件和充水试验条件, 分别使用以上计算中得到的 x 的最小值计算上一层罐壁的最小厚度 t_x :

$$\text{设计 } t_{dx} = \frac{2.6D (H - x/12) G}{S_d} + C_2 \quad (10)$$

$$\text{充水 } t_{tx} = \frac{2.6D (H - x/12) G}{S_t} \quad (11)$$

用第一次的计算值 t_x 去重复计算 x 的最小值和 t_{dx} 及 t_{tx} 的值, 直到两次连续计算的 t_x 值之间只有微小的差别为止, 此时的 x 值为本层罐壁板的较为精确的设计点的位置, 从而计算出本层罐壁的厚度。

API 650 变点法罐壁厚度计算结果见表 1。

表 1 API 变点法罐壁厚度计算结果

层号	材料	设计许用应力/ M Pa	充水许用应力/ M Pa	腐蚀裕量 C_2 / mm	操作计算厚度/ mm	试验计算厚度/ mm	名义厚度/ mm	罐壁宽度/ mm	重量/ kg
1	SPV 490Q	243.4	260.9	1	26.633	29.140	29.5	2400	141428.8
2	SPV 490Q	243.4	260.9	1	23.323	25.949	26.0	2400	124649.1
3	SPV 490Q	243.4	260.9	1	18.952	20.703	21.0	2400	100678.1
4	SPV 490Q	243.4	260.9	1	15.891	17.426	17.5	2400	83898.4
5	SPV 490Q	243.4	260.9	1	12.601	13.802	14.0	2400	67118.7
6	SPV 490Q	243.4	260.9	1	9.366	10.258	12.0	2400	57530.3
7	SPV 355	208.1	222.9	1	7.413	8.111	12.0	2400	57530.3
8	SM 41	160.9	172.5	1	4.661	5.088	12.0	2100	50339.0
9	SM 41	160.9	172.5	1	0.803	0.864	12.0	2100	50339.0

2.2 按我国规范定点法计算

我国现行规范为 SH 3046- 92 《石油化工立式圆筒形钢制焊接储罐设计规范》。

罐壁设计厚度按下式计算, 取其中较大值。

$$t_1 = 4.9 \times 10^{-3} \times \frac{\rho (H - 0.3) D}{[\sigma]_t \varphi} + C_1 + C_2 \quad (12)$$

$$t_2 = 4.9 \times \frac{(H - 0.3) D}{[\sigma] \varphi} + C_1 \quad (13)$$

式中: t_1 ——储存预定介质时的设计厚度, mm;

t_2 ——储存水时的设计厚度, mm;

ρ ——储液密度, kg/m^3 ;

H ——计算的罐壁板底边至罐壁顶端 (当设有溢流口时, 应为至溢流口下端) 的距离, m;

D ——储罐内直径, m;

$[\sigma]_t$ ——设计温度下罐壁钢板的许用应力, M Pa;

$[\sigma]$ ——常温下罐壁钢板的许用应力, M Pa;

φ ——焊接接头系数, 一般取 0.9;

C_1 ——钢板厚度负偏差, mm;

C_2 ——腐蚀裕量, mm。

计算结果见表 2。

2.3 按日本规范 JIS B8501 定点法计算

罐壁厚度按下式计算:

$$t = \frac{D (H - 0.3) \rho}{2f \eta} + C \quad (14)$$

式中: t ——罐壁最小厚度, mm;

D ——储罐内直径, m;

H ——由该段壁板下端到设计液位高度, m;

ρ ——介质密度 (当小于 1 时取 1);

f ——母材的许用应力, MPa;

C ——腐蚀裕量, mm。

η ——焊接接头系数, 一般取 100%, 其中第一层取 85%;

计算结果见表 3。

2.4 按英国规范 BS2654 计算

表 2 按 SH3046-92 定点法罐壁厚度计算结果

层号	材料	设计许用应力/ MPa	腐蚀裕量 C_2 / mm	操作计算厚度/ mm	试验计算厚度/ mm	名义厚度/mm	罐壁宽度/mm	重量/kg
1	SPV 490Q	259.9	1	27.57	32.43	32.5	2400	155811.4
2	SPV 490Q	259.9	1	24.12	28.38	28.5	2400	136634.6
3	SPV 490Q	259.9	1	20.68	24.33	24.5	2400	117457.8
4	SPV 490Q	259.9	1	17.23	20.27	20.5	2400	98281.0
5	SPV 490Q	259.9	1	13.78	16.22	16.5	2400	79104.2
6	SPV 490Q	259.9	1	10.34	12.16	12.5	2400	59927.4
7	SPV 355	235.4	1	7.61	8.95	12.0	2400	57530.3
8	SM 41	163.5	1	5.48	6.45	12.0	2100	50339.1
9	SM 41	163.5	1	0.69	0.81	12.0	2100	50339.1

表 3 按 JB 8501 定点法罐壁厚度计算结果

层号	材料	设计许用应力/MPa	腐蚀裕量 C_2 /mm	计算厚度/mm	名义厚度/mm	罐壁宽度/mm	重量/kg
1	SPV 490Q	294.2	1	30.49	30.5	2400	146223.0
2	SPV 490Q	294.2	1	22.68	23.0	2400	110266.5
3	SPV 490Q	294.2	1	19.44	19.5	2400	93486.8
4	SPV 490Q	294.2	1	16.20	16.5	2400	79104.2
5	SPV 490Q	294.2	1	12.96	13.0	2400	62324.5
6	SPV 490Q	294.2	1	9.72	12.0	2400	57530.4
7	SPV 355	211.8	1	9.00	12.0	2400	57530.4
8	SM 41	147.1	1	6.48	12.0	2100	50339.1
9	SM 41	147.1	1	0.81	12.0	2100	50339.1

罐壁最小厚度按下式计算:

$$t = \frac{D}{20S} [98w (H - 0.3) + p] + C_2 \quad (15)$$

式中: t ——罐壁最小厚度, mm;

D ——储罐内直径, m;

H ——由该段壁板下端到设计液位高度, m;

w ——介质密度, g/mL (取值不得小于 1);

S ——设计许用应力, N/mm²;

p ——设计压力, mbar (对无压罐可忽略不计);

C ——腐蚀裕量, mm。

计算结果见表 4。

3 结语

将以上 4 种规范计算出的罐壁厚度列于表 5。

对 4 种规范计算所得罐壁厚度分析如下:

由于底层罐壁板中的最大应力点上移, API 650 底层罐壁板的厚度由式 (3) 和式 (4) 确定, 其值不得大于按定点法式 (1) 和式 (2) 计算所得的厚度, 其计算结果不会大于定点法计算值, 因此按 API 650 计算所得的底层罐壁厚度最小。第二层罐壁板计算时, 由式 (5) 计算得出第一圈罐壁的 K_b 为:

$$1.375 < K_b < 2.625$$

表 4 按 BS 2654 定点法罐壁厚度计算结果

层号	材料	设计许用应力 $M\text{Pa}$	腐蚀裕量 C_2/mm	计算厚度/mm	名义厚度/mm	罐壁宽度/mm	重量/kg
1	SPV 490Q	260.00	1	29.31	29.5	2400	141428.8
2	SPV 490Q	260.00	1	25.65	26.0	2400	124649.1
3	SPV 490Q	260.00	1	21.98	22.0	2400	105472.3
4	SPV 490Q	260.00	1	18.32	18.5	2400	88692.6
5	SPV 490Q	260.00	1	14.65	15.0	2400	71912.9
6	SPV 490Q	260.00	1	10.99	12.0	2400	57530.4
7	SPV 355	235.44	1	8.09	12.0	2400	57530.4
8	SM 41	156.96	1	6.07	12.0	2100	50339.1
9	SM 41	156.96	1	0.76	12.0	2100	50339.1

表 5 各规范罐壁厚度计算结果对照 mm

层号	API 650	SH 3046- 92	JIS B 8501	BS 2654
1	29.140	32.43	30.49	29.31
2	25.949	28.38	22.68	25.65
3	20.703	24.33	19.44	21.98
4	17.426	20.27	16.20	18.32
5	13.802	16.22	12.96	14.65
6	10.258	12.16	9.72	10.99
7	8.111	8.95	9.00	8.09
8	5.088	6.45	6.48	6.07
9	0.864	0.81	0.81	0.76

此 K_b 值表示罐底约束对第二层壁板有一定影响, 但最大应力仍在底层壁板上, 只不过位置比较靠上。因此第二层壁板的厚度也应该比按定点法计算所得的厚度要小。第三圈及以上各层壁板由于变点法计算比较精确地确定了最大应力点的位置, 因此变点法计算得出的壁板厚度较按定点法计算的小。从以上图表中还可以看出, 按 JIS B 8501 计算的第三层罐壁厚度与第一层厚度相差很大, 其原因是第一层罐壁的焊接接头系数为 85%, 而其余各层均为 100%。此外, 按 JIS B 8501 计算的各层罐壁厚度是最小的, 且小于按“变点法”计算得到的罐壁厚度, 其原因是许用应力取值较高造成的。

按 4 种规范计算的全部罐壁板的总重量列于表 6 中。除了按 JIS B 8501 计算所得的罐壁厚度由于其许用应力取值较高导致其罐壁总重量最小以外, 按

API 650 变点法计算的全部钢板的总重量是最小的。大型储罐采用变点法计算罐壁厚度可以使每一层罐壁板中产生合理均匀的应力, 并接近于计算壁厚时采用的设计许用应力值, 可以充分地利用罐壁金属厚度, 达到节省材料的目的。尤其是当储罐直径较大时, 罐壁钢板厚度的较小变化导致的钢材消耗量的下降是比较可观的。从此可以看出, 大型储罐采用变点法进行罐壁强度计算可以在满足实际需要的前提下得到比较精确的结果, 从而达到减少钢材消耗量降低投资的目的。

表 6 各规范计算的罐壁总重量 kg

SH 3046- 92	API 650	JIS B 8501	BS 2654
805425	733512	707144	747895

参 考 文 献

- 1 美国石油学会标准 API 650《钢制焊接油罐》(Welded Steel Tanks for Oil Storage)
- 2 英国规范 BS 2654, British Standard Specification for Manufacture of Vertical Steel welded storage tanks with butt-welded shells for the petroleum industry
- 3 中华人民共和国行业标准 SH 3046- 92《石油化工立式圆筒形钢制焊接储罐设计规范》
- 4 日本工业标准 JIS B 8501《钢制焊接油罐结构》
- 5 潘家华编著 圆柱形金属油罐设计. 北京: 石油工业出版社, 1989

STRENGTH CALCULATION OF TANK SHELL OF LARGE SCALE STORAGE TANK

Huang Yongli SINOPEC BDI, P. C 100011

Abstract In the strength calculation of large scale storage tank shell, the "variable point method" or modified "variable point method" are adopted in domestic standard SH3406-92, Japanese standard JIS8501 and British standard BS2654 etc. The calculation method of "variable point method" is given in American standard API650. In this article, the calculation method and calculation formulas of above mentioned four standard are recommended. In combination of practical engineering design, their results of calculation are analyzed and contrasted.

Keywords Large scale storage tank, Tank shell, Strength calculation, Constant point method, Variable point method

DEVELOPMENT OF CONDENSER WITH LONGITUDINAL FLOW MIXED BUNDLE

Wu Jiasheng, etc. Wuhan Institute of Chemical Industry, P. C 430074

Abstract On the basis of theoretical analysis and experimental investigation, the condenser, with longitudinal flow wire wound tube and variable cross section tube bundle, are designed and fabricated. The practical operation in worksite indicated that this condenser has the characteristics of low pressure drop, high heat transfer efficiency, compact structure, high efficiency and wide application range by comparison with traditional tube and shell condenser.

Keywords Longitudinal flow, Wire wound tube, Variable cross section tube, Mixed bundle, Condenser

FAILURE AND SAFE OPERATION OF PRESSURE PIPELINE IN SERVICE

Qiao Zhenlin. SINOPEC Yangzi Petrochemical Limited Company, Nanjing, P. C 210048

Abstract The defects of pressure pipeline may be

occurred in the stages of fabrication, erection and operation. Some hidden trouble in production of aromatic combin unit are left over by the existential defects. By means of nondestruction testing of general overhaul over the years, all the defects are exposed step by step. The repair and replacement are carried out continuously. So that the safe reliability of pressure pipeline are increased. The failure type, reason and safe operation principle of pressure pipeline are mentioned in this article.

Keywords Pressure pipeline, Defect type, Failure reason, Operation principle

DESIGN ANALYSIS ON STIFFENING RING OF HORIZONTAL JACKETED REACTOR FOR CHEMICAL FIBRE INDUSTRY

Pan Ruimin, etc. China Textile Industry Design Institute, P. C 100037

Keywords Horizontal jacket reactor, Stiffening ring, Design

CHECK CALCULATION OF REGENERATOR IN CATALYTIC CRACK UNIT BY TOWER COMPUTER PROGRAM

Zhao Likui Qingdao University of Radio and Television, Jiaozhou Branch School, P. C 266300

Abstract By means of reasonable simulate and transformation of external form, internal parts and heat-proof abrasion resistance lining of regenerator (reactor) in catalytic crack unit, a model of similar tower is established. So that the check calculation may be carried on by using tower computer program. By way of example, it is proved that this method is workable.

Keywords Regenerator, Simulate, Transformation, Tower, Program, Check calculation

SEVERAL PROBLEMS IN THE DEVELOPMENT OF 15000~20000kW LARGE SCALE FLUE GAS