

## 设计计算

## 拱顶油罐罐顶设计中应注意的问题

赵广森· 王宝霞

(中国石油天然气管道勘察设计院)

赵广森 王宝霞:拱顶油罐罐顶设计中应注意的问题,油气储运,1996(5)15,13~15,47。

**摘 要** 扇形板形式的拱顶是国内拱顶油罐普遍采用的拱顶结构,其展开图按惯例都设计成两侧为直线,两端为圆弧的形状。但在实际安装中常出现扇形板中部搭接宽度达不到设计要求的问题,造成拱顶的返修,施工周期延长,经济效益下降。从剖析现有文献中给出的扇形板几何计算公式入手,对这一问题进行了深入研究,找到了扇形板中部搭接宽度不足的原因,通过对拱顶对接结构(不搭接)的扇形板几何计算,得出了扇形板侧边不是直线而是曲线的结论,并给出了相应的计算公式。新的计算公式在计算大小端弦长时,相关参数少,计算简便,便于观察曲线形态。

**主题词** 拱顶罐 罐顶 扇形板 设计 计算 方程

## 一、对扇形板的基本要求

扇形板是拱顶油罐拱顶的主要结构形式,虽然有些文献也介绍过其他形式,但扇形板形式的拱顶在国内仍是普遍采用的结构,现行的油罐规范也推荐了这种结构。为了满足拱顶油罐安全储油的要求,在拱顶罐的使用寿命期间,扇形板应符合以下要求:

(1)扇形板的有效厚度应满足强度(由正压引起)和刚度(主要由负压、自重、活载荷引起)的要求;

(2)扇形板的有效厚度应满足遭雷击时的最小厚度要求;

(3)为保证计算的临界载荷均匀分布,应对扇形板的表面局部凹凸度加以限制。一般用长1 m的弧形样板测量时,任何位置上的间隙不得大于6 mm<sup>[1]</sup>;

(4)为保证有效搭接量,关于扇形板成形后的曲率半径,一般小型储罐(小于1 000 m<sup>3</sup>)误差控制在3 mm内;较大的储罐(一般到20 000 m<sup>3</sup>)误差控制在5 mm以内;

(5)应保证扇形板两侧边有均匀的搭接宽度,其

值不小于5倍板厚且不小于25 mm,一般取40 mm<sup>[1]</sup>;

(6)为避免肋间球壳的局部屈曲,带肋的扇形板的肋间距一般小于1.4 m,肋条厚度不小于8 mm<sup>[2]</sup>。

综合上述各项要求,根据国内外各公称容量的油罐情况,表1给出了扇形板的最小厚度(不包括厚度附加量)。

表1 扇形板的最小厚度

公称容量 (m <sup>3</sup> )	100	1 000	2 000	3 000	5 000	10 000
拱顶厚度 (mm)	4	5 (加肋或 不加肋)	5 (加肋)	5 (加肋)	6 (加肋)	6~7 (加肋)

## 二、扇形板在设计及施工中的问题

扇形板,顾名思义,象一把扇子,自然两侧边为直边。在大量的文献中,无论是刊载在杂志上的论文、设计参考手册、教科书,还是设计图纸,扇形板一般用图1表示(略去肋板)。

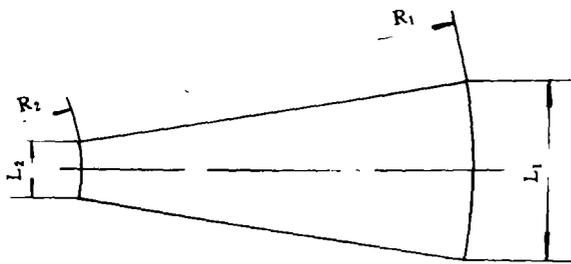


图1 扇形板结构示意图

图1中各参数的计算公式<sup>(3)</sup>分别为：

大端展开半径

$$R_1 = R_n \operatorname{tg} \alpha_3 \quad (1)$$

小端展开半径

$$R_2 = R_n \operatorname{tg} \alpha_4 \quad (2)$$

大端弦长

$$L_1 = 2R_1 \sin \left( \frac{\pi D_1 + 40n}{2nR_1} \times \frac{180}{\pi} \right) \quad (3)$$

小端弦长

$$L_2 = 2R_2 \sin \left( \frac{\pi D_2 + 40n}{2nR_2} \times \frac{180}{\pi} \right) \quad (4)$$

式中  $R_n$  —— 拱顶的曲率半径, mm;

$\alpha_3$  —— 拱顶半角(精确到秒);

$\alpha_4$  —— 扇形板小端在拱顶上与拱顶中心线的夹角;

$D_1$  —— 拱顶外缘直径, mm;

$D_2$  —— 扇形板小端在拱顶上的直径, mm;

$n$  —— 扇形板数量。

上述公式中的常数40为扇形板要求的搭接宽度(单位: mm)。根据上述公式计算设计的扇形板, 施工中如不加改变, 在采用等分定位法组焊拱顶时, 就会出现中部搭边宽度不足40 mm的情况; 若按顺序排板组焊(保证中部达到要求的搭接宽度), 就会出现最后组焊的两块扇形板有较大空隙。多年来, 这种矛盾一直存在, 其解决办法多是由施工单位依其经验, 在扇形板下料时中部多加某一尺寸。为什么各设计院的图纸却没有修正呢? 主要是没有文献及规范依据, 本文针对这一问题探讨解决的方法。

### 三、原因分析及解决方法

为了寻求问题的答案, 先分析一个实例。某油库拟建一座5 000 m<sup>3</sup> 拱顶罐, 罐顶及扇形板的主要尺寸见图2、图3。所有尺寸的单位为mm, 拱顶由28块搭接的扇形板及中心顶板组成。

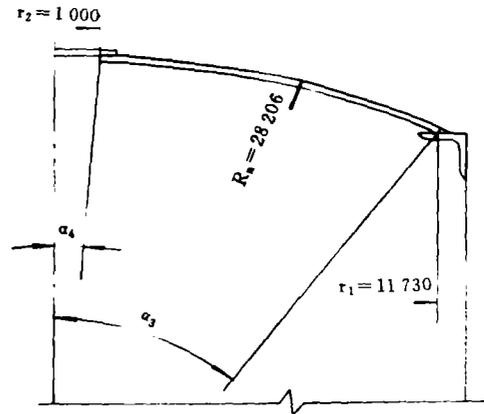


图2 拱顶结构简图

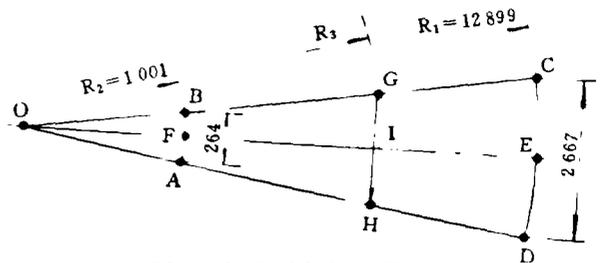


图3 扇形板图纸示意图

(注: 本图略去肋板)

按公式(1)~(4)核算扇形板几何尺寸。

大端展开半径计算:

$$R_1 = R_n \operatorname{tg} \alpha_3$$

其中  $R_n = 28\ 206$

$$\alpha_3 = \arcsin \frac{r_1}{R_n} = \arcsin \frac{11\ 730}{28\ 206} = 24.574^\circ$$

将各值代入式(1)得:

$$R_1 = 28\ 206 \times \operatorname{tg} 24.574^\circ = 12\ 898.3$$

图纸标注的大端半径  $R_1 = 12\ 899$ , 与计算值基本相同。

小端展开半径计算:

$$R_2 = R_n \operatorname{tg} \alpha_4$$

其中  $\alpha_4 = \arcsin \frac{r_2}{R_n} = \arcsin \frac{1\ 000}{28\ 206} = 2.0317^\circ$

将各值代入式(2)得:

$$R_2 = 28\ 206 \times \operatorname{tg} 2.0317^\circ = 1\ 000.6 (\approx 1\ 001)$$

图纸标注尺寸  $R_2 = 1\ 001$ , 与计算误差很小。

大端弦长计算:

$$L_1 = 2R_1 \sin \left( \frac{\pi D_1 + 40n}{2nR_1} \times \frac{180}{\pi} \right)$$

其中  $R_1 = 12\ 898.3$

$$D_1 = 2r_1 - 2 \times 11\ 730 = 23\ 460$$

$$n = 28$$

将各值代入式(3)得:

$$L_2 = 2 \times 12\,898.3 \times \sin\left(\frac{\pi \times 23\,460 + 28 \times 40}{2 \times 28 \times 12\,898.3} \times \frac{180}{\pi}\right) = 2\,667.4$$

图纸标注的大端弦长为 2 667, 与计算值相差很小。

小端弦长计算:

$$L_3 = 2R_2 \sin\left(\frac{\pi D_2 + 40n}{2nR_2} \times \frac{180}{\pi}\right)$$

其中  $R_2 = 1\,000.6 (\approx 1\,001)$

$$D_2 = 2r_2 = 2 \times 1\,000 = 2\,000$$

将各值代入式(4)得:

$$L_3 = 2 \times 1\,000.6 \times \sin\left(\frac{\pi \times 2\,000 + 28 \times 40}{2 \times 28 \times 1\,000.6} \times \frac{180}{\pi}\right) = 263.6 (\approx 264)$$

图纸标注的小端弦长为 264, 与计算值相差很小。

通过以上计算,说明图纸所标尺寸与公式计算各值基本一致,其误差都在允许范围内。

现在进一步分析一下图 3,若将两侧边延长,由其对称性,必交于一点 O。显然,三角形 OBA 和 OCD 是相似的等腰三角形。中心线 OE 是拱顶弧长的一半,扇形板上的 FE 长度就是扇形板成形后在拱顶上的弧长 FE。由上述可推知:若扇形板的两侧边是两条可相交的直线,则直线相交后形成等腰三角形,那么过三角形高的中点形成的三角形底边两端 GH 也必落在两直线上。是否如此呢?只有两个结论:要么 GH 落在两直线上,说明了扇形板的两侧边确实为直线;要么不落在两直线上,说明扇形板的两侧边不是直线。

由相似三角形的性质知道,  $OE : OI = CD : GH$ , 则

$$GH = \frac{OI \times CD}{OE} \quad (5)$$

因为 I 点为等腰三角形 OCD 高的中点,所以,  $OE = 2OI, CD = 2\,667 \text{ mm}$ , 代入上式后得:

$$GH = \frac{1 \times 2667}{2} = 1\,333.5 \text{ mm}$$

下面再利用中点 I 同是拱顶半弧中点的性质,计算一下过 I 点直线 GH 的值,见图 3、图 4。

根据公式(1):

$$R_3 = R_n \operatorname{tg} \frac{\alpha_3}{2}$$

$$\alpha_3 = 24.574^\circ (\text{前面已计算})$$

$$R_n = 28\,206 \text{ mm}$$

将各值代入上式得

$$R_3 = 28\,206 \times \operatorname{tg} \frac{24.574}{2} = 6\,143.2 \text{ mm}$$

弦长:

$$GH = 2R_3 \sin\left(\frac{\pi D_3 + 40n}{2nR_3} \times \frac{180}{\pi}\right)$$

其中  $D_3 = 2r_3$

$$r_3 = R_n \sin(\alpha_3/2)$$

$$= 28\,206 \times \sin(24.574/2)$$

$$= 6\,002.5 \text{ mm}$$

将各值代入上式得:

$$GH = 2 \times 6\,143.2$$

$$\times \sin\left(\frac{\pi \times 2 \times 6\,002.5 + 28 \times 40}{2 \times 28 \times 6\,143.2} \times \frac{180}{\pi}\right) = 1\,384 \text{ mm}$$

此值比按前面相似三角形的计算值 GH 大 50.5 mm (单侧大 25.25 mm)。说明 G、H 点实际上并没有与前面公式(5)计算的 G、H 点重合。

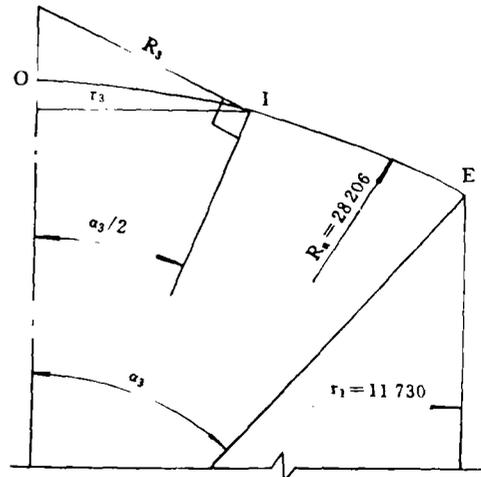


图 4 扇形板局部示意图

从以上计算得知,把扇形板的两侧设计成直线是错误的。如将拱顶的圆弧分割成若干等分,分别对各对应点的大端弦长加以计算,顺次连接各点,就会得出扇形板的两侧必是一条折线的结果。为了较精确的求出扇形板的侧边形状,进一步分析公式(3),假设不计式中的搭接宽度 40 mm (即将拱顶的扇形板变成对接时),扇形板两端弦长的计算式就变成:

$$L_2 = 2R_1 \sin\left(\frac{\pi D_1}{2R_1 n} \times \frac{180}{\pi}\right)$$

式中  $R_1 = R_n \operatorname{tg} \alpha_3$

$$D_1 = 2r_1$$

(下转第 47 页)

泵抽同时并用卸车。

(4)运行时安全系数较高。采用加热升压和泵抽同时并用的方法,只要求丙烯罐车的压力比储罐高出 0.1~0.2 MPa 即可,使系统压力比只用加热升压卸车至少降低 0.1 MPa。

(5)在卸车时只消耗少量蒸汽,经济效益显著。

### 三、丙烯罐车卸车方案的选择及实施

抚顺腈纶化工厂最初选定的卸丙烯罐车方案为第一和第二种结合的方法(见图 4),后因某些原因改为只用泵卸车方案(见图 1)。工程于 1994 年底完成,1995 年初系统投料卸车。在使用 5 个半月后,系统就出现了严重问题,同时卸两台以上的丙烯罐车,丙烯放空量大;在 20~32 °C 卸车时,有 0.8~2.5 t 的液态丙烯卸不下来;气温高于 32 °C 时,丙烯由于

气化严重无法卸车。为解决这些问题,决定对系统进行改造,恢复最初方案。

改造工程于 1995 年 6 月底完成,7 月投料卸车,应用效果良好。气温高于 32 °C 时,卸丙烯罐车很顺利;在 20~32 °C 时,每台丙烯罐车比原来至少多卸出 1.2 t 物料。卸丙烯罐车时,放空丙烯的现象大量减少,有时还可以不放空。据估算,改造后的卸丙烯罐车系统,7 月份共卸车 32 台,以每台比原来多卸出 1.2 t 物料计算,丙烯价格为 3 500 元/t,在该系统改造时本月应摊销的工程费为 1.8 万元,所以,仅 7 月份就创造 11.6 万元的效益。

对于物化性质类似于丙烯的物料,如氨、丁烷、顺反丁烯等化工原料,在选择其卸车方案时,最好同时采用泵抽和加热升压结合的工艺操作方案,这样既能确保卸车,又能保证安全(压力较低),物料损失较少。

(收稿日期:1995-09-14)

编辑:吕彦

(上接第 15 页)

$$r_1 = R_n \sin \alpha_3$$

将各值代入上式并简化得:

$$L_2 = 2R_n \operatorname{tg} \alpha_3 \times \sin \left( \frac{180}{n} \times \cos \alpha_3 \right)$$

当求任一确定的夹角  $\alpha_i$  处的弦长时,变成:

$$L_i = 2R_n \operatorname{tg} \alpha_i \times \sin \left( \frac{180}{n} \times \cos \alpha_i \right)$$

从上式可以看出扇形板的侧边是一个函数曲线。当在上式基础上再考虑搭边宽 40 mm 时,就变成

$$L_i = 2R_n \operatorname{tg} \alpha_i \times \sin \left( \frac{180}{n} \times \cos \alpha_i \right) + 40 \quad (6)$$

现在将同一参数  $\alpha_i = \alpha_3 = 24.574^\circ$ ,  $R_n = 28\ 206$  mm,  $n = 28$ ,  $\alpha_i = \alpha_4 = 2.0317^\circ$ , 代入公式(6),来核对新推导的公式与原来的大小端弦长计算式的误差:

大端弦长

$$\begin{aligned} L_2 &= 2 \times 28\ 206 \times \operatorname{tg} 24.574 \\ &\quad \times \sin(180/28 \times \cos 24.574) + 40 \\ &= 2\ 667.6 \text{ mm} \end{aligned}$$

与公式(3)的值(2 667.4 mm)基本相同。

小端弦长

$$L_3 = 2 \times 28\ 206 \times \operatorname{tg} 2.0317$$

$$\begin{aligned} &\times \sin(180/28 \times \cos 2.0317) + 40 \\ &= 263.9 (\approx 264) \text{ mm} \end{aligned}$$

也与公式(4)的值基本相同。

### 四、结 论

(1)拱顶油罐扇形板展开图的侧边不是直线而是一条曲线。

(2)用新推导的扇形板弦长计算式计算大小端弦长,其优点是相关参数少,计算简便,便于观察曲线形态。

(3)今后,对于拱顶油罐的扇形板展开图,不仅应标出两端的弦长,还应给出中间几点(最少三点)的弦长(如有肋板,应在各肋板处标出对应的弦长),并在扇形板的侧边画出相应的曲线或折线。

### 参 考 文 献

1. 潘家华:圆柱形金属油罐设计,石油工业出版社(北京),1984。
2. SYJ 1016-82 立式圆筒形钢制焊接油罐设计技术规定,1982。
3. 湛卢炳等:大型储罐设计,上海科学技术出版社(上海),1986。

(收稿日期:1995-11-21)

编辑:刘春阳