

# 大型圆柱形壳体上圆形焊缝的焊接变形

田锡唐 顾福明 高进强

(哈尔滨工业大学)

**摘 要** 应用模型试验和数值分析研究了大型圆形壳体上圆形焊缝对法兰平面度的影响。研究表明:圆柱形壳体与法兰对接的圆形焊缝引起法兰平面的外侧倾斜,小圆柱壳体与大容器相贯的圆形焊缝对法兰平面的倾斜没有显著影响,在圆周方向上法兰局部下凹;并用有限元分析实际圆柱形壳体与法兰对接时,由于纵向收缩引起法兰外倾的斜率,其结果与模型试验分析的相吻合。

**关键词:** 圆形壳体 法兰 圆形焊缝 平面度 数值分析

## 0 序 言

在圆柱形壳体的建造过程中,常常会遇到封闭的圆形焊缝,由于封闭焊缝的拘束度大,收缩受到阻碍,因此将产生比较大的焊接变形和比较高的残余应力,甚至将造成壳体的失稳或降低壳体的强度<sup>[1]</sup>。这给壳体的设计、制造和使用带来了困难,因此预计大型圆柱壳体上圆形焊缝的焊接变形是人们在工程中所关注的问题,这将是人们在实际工程中采用适当的工艺措施控制焊接变形的依据。

圆柱形壳体的圆形焊缝有两种:(a)圆柱形壳体上的对接环缝<sup>[2~5]</sup>;(b)两个直径相差很大的圆柱壳体的相贯的焊缝,也可近似认为圆形焊缝。这两种焊缝对圆柱形壳体的母线不直度及圆柱壳体上的法兰平面度都有影响,而圆柱形壳体上的圆形焊缝引起焊接残余应力及焊接变形的主要影响因素有:(1)圆柱形壳体的刚度;(2)封闭圆形焊缝的大小;(3)焊接条件。

本文为了预计直径为 11m,厚度为 72mm 的真空容器在建造过程中,上述两类焊缝将引起的焊接变形,采用模型试验的方法分析了圆柱形壳体与法兰对接,小圆柱壳体与大型壳体相贯时对法兰平面度的影响,并用有限元模拟了实际圆柱形壳体与法兰对接的圆形焊缝引起平面度的变化,为大型容器的制造提供了有价值的结论。

## 1 试件尺寸及试验方法

### 1.1 试件的尺寸

模型尺寸是实物的 1/11,模型试件圆柱形壳体的直径为  $\Phi 1000\text{mm}$ ,厚度 2mm,相贯小筒的直径  $\Phi 110\text{mm}$ ,考虑到加工及测量的方便,在模型下端增设一个法兰,法兰截面尺寸如图 1,模型试验所用材料为低碳钢。

### 1.2 焊接方法及焊接顺序

在试验过程中,圆柱形壳体与法兰的对接环缝采用分段对称焊的方法进行施焊;小圆柱壳体与大圆柱体相贯时是一次焊成,且两个小圆柱壳体是对称的。两个小圆柱壳体焊接所用焊接速度及焊接电流相同。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 壳体与法兰对接的圆形焊缝对平面度的影响

图 2 是上法兰与圆形壳体对接外侧焊时引起法兰平面的变化,该图表明外侧环缝引起法兰平面的倾斜,倾斜斜率为  $0.021 \sim 0.033$ ,法兰截面内外侧的相对沉量为  $0.30\text{mm} \sim 0.59\text{mm}$

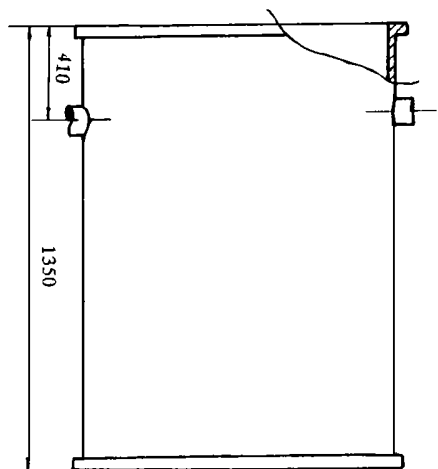


图 1 试件的尺寸

Fig. 1 Size of model workpiece

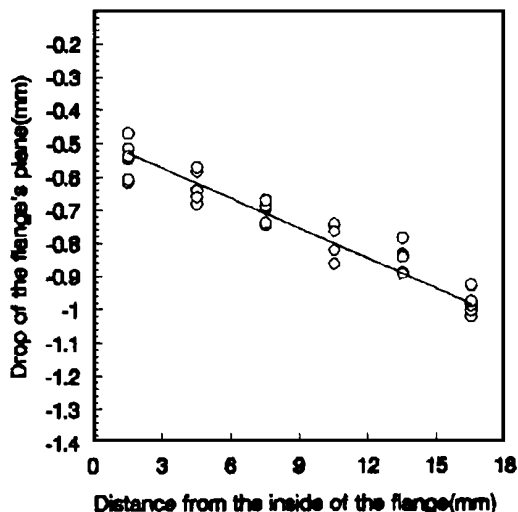


图 2 上法兰与圆形壳体对接外侧焊引起法兰平面度的变化

Fig. 2 Change of flange's planeness due to circular weld at joint between the cylindrical shell and flange

### 2.2 筒体相贯焊缝对法兰平面的影响

在模型试验中  $\phi 110\text{mm}$  的筒体模拟实际真空容器中  $\phi 1210\text{mm}$  的小筒体与主筒体相贯引起的焊接变形,由于相贯筒体的直径相差很大,相贯焊缝近似圆形焊缝

图 3 是  $\phi 110\text{mm}$  的筒体与主筒体相贯时引起法兰截面上平面度的变化,图 3 表明圆柱体相贯时,相贯焊缝对法兰平面倾斜没有明显影响

图 4 是  $\phi 110\text{mm}$  的筒体与主筒体相贯时引起法兰圆周方向上平面度的变化,图 4a 表明圆柱壳体相贯时,在圆周方向上法兰局部下凹,下凹值为  $0.2\text{mm} \sim 0.5\text{mm}$ ,图 4b 是圆柱形壳体相贯时,在圆周方向上法兰局部下凹的示意图。

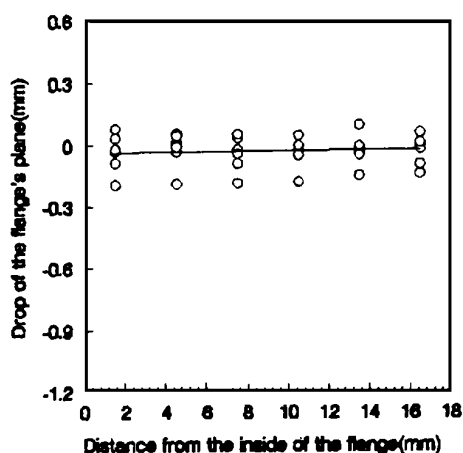
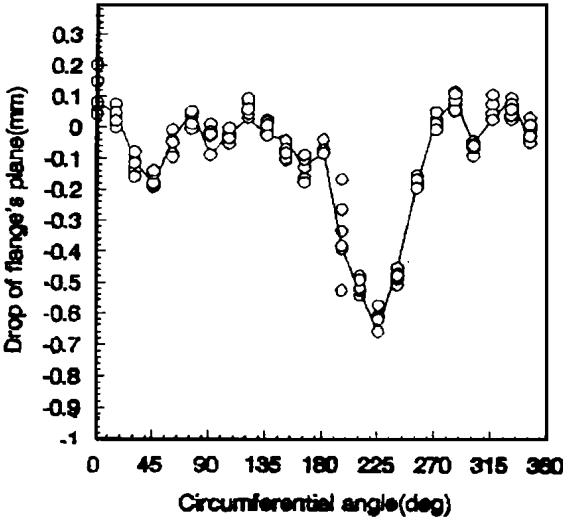
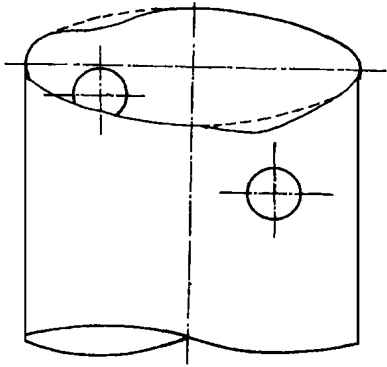


图 3 大筒体与小筒体相贯焊对法兰平面倾斜的影响

Fig. 3 Effect of intersect weld between small cylindrical shell and big cylindrical shell on inclination of flange's plane



(a)



(b)

图 4 大筒体与小筒体相贯焊引起法兰圆周方向上平面度的变化

Fig. 4 Changes of flange's plane in circumference due to intersect weld between small cylindrical shell and big cylindrical shell

### 3 实际工程中圆形焊缝引起的焊缝变形

#### 3.1 塑性变形式分析

实际工程中采用 X 型坡口,采用多道焊缝焊接而成,其塑性区宽度与厚度之比将比模型试验中塑性宽度与厚度之比小的多。根据文献 [1],单道焊的塑性变形区的宽度为

$$b_p = K_1 \cdot F_H / X \cdot W \tag{1}$$

多道焊的塑性变形区的宽度为

$$b'_p = K_2 \cdot (K_1 \cdot K_H / X \cdot W) \tag{2}$$

其中:  $\delta$ —板的厚度

$F_H$ ——焊缝截面积 (对多层焊是指一层焊缝金属的截面积)

$K_1$ ——系数,与焊接方法及材料有关,可查文献 [1]

$K_2$ ——系数,  $K_2 = 1 + 85 \cdot \epsilon_s \cdot n$ ,  $n$  为焊层数

由式 (1) 式 (2) 可得到

模型试验的纵向收缩体积

$$\begin{aligned} V &= b_p \cdot W \cdot X \\ &= K_1 \cdot F_H \end{aligned} \tag{3}$$

实际工程的纵向收缩体积

$$\begin{aligned} V' &= b'_p \cdot W \cdot X \\ &= K_2 \cdot K_1 \cdot F_H \end{aligned} \tag{4}$$

### 3.2 实际真空容器中圆形焊缝对法兰平面度的影响

对于实际工程中的法兰与筒体对接采用 X 型坡口,采用多道多层焊焊接,如图 5

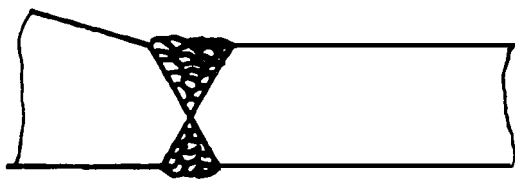


图 5 实际工程中法兰的坡口

Fig. 5 Groove of flange in actual engineering

模型试验的纵向收缩体积

$$\begin{aligned} V &= K_1 \cdot F_H \\ &= 0.05 \times 3 = 0.15 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

实际工程的纵向收缩体积

$$\begin{aligned} V &= K_2 \cdot K_1 \cdot D_H \\ &= 1.635 \times 0.076 \times 12.9 = 1.605 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

法兰与筒体对接环缝引起的焊接变形,当只考虑纵向收缩,且焊缝中的应力认为单向时,可以用筒体焊缝塑性区宽度上施加均布的径向载荷计算而得,根据文献 [6] 的相似理论,在单位长度上均布线性载荷作用下模型与实物间的变形相似比为:

$$r = (q/q)^* (E/E) \quad (7)$$

其中  $E$ ——弹性模量

$q$ ——长度上均布的载荷

$$\therefore q = (\epsilon/W/R)^* b^p$$

由式 (3)、(4) 可得到

$$q = \epsilon^* \cdot V / (R^* X) \quad (8)$$

$$\therefore r = (\epsilon/\epsilon')^* (X/X)^* (V/V')^* (R'/R) \quad (9)$$

所以 变形相似比  $r = (0.15/1.605)^* 11 = 1.03$

因此,实际工程中法兰与筒体对接时,将造成实际法兰内外侧的相对下沉量为  $0.31 \text{ mm} \sim$

$0.61 \text{ mm}$ , 法兰平面的倾斜斜率将比模型试验中所引起的法兰平面倾斜斜率小一个数量级即为  $0.0020 \sim 0.0030$

## 4 实际工程中法兰与筒体对接的数值分析

### 4.1 数值分析模型

在数值分析中,只考虑由于纵向收缩引起的焊接变形,环缝引起的焊接变形用筒体焊缝塑性区宽度上施加均布的径向载荷近似计算而得。实际真空容器的尺寸比较大,因此,采用轴对称有限元法,且分析第一个筒节与法兰间的环缝。实际真空容器焊接时塑性区的宽度为  $48.6 \text{ mm}$ , 均布的径向载荷为  $q = \epsilon^* W/R$  如图 6 是有限元分析模型和均布的径向载荷。

4.2 数值分析结果

如图 7实际工程中法兰与筒体对接的数值分析结果,图 7表明实际工程中法兰与筒体对接,将造成实际法兰内外侧的相对下沉量 0.47mm,法兰平面的倾斜斜率为 0.0022,这一点与模型试验分析的结果相吻合。

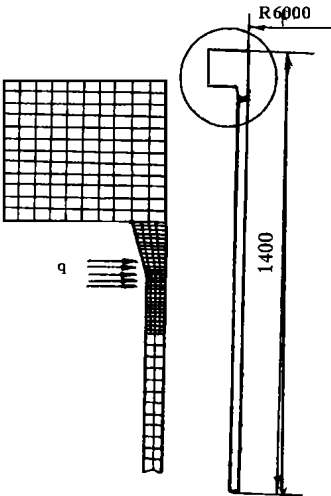


图 6 有限元分析模型

Fig. 6 FE mesh for numerical analysis

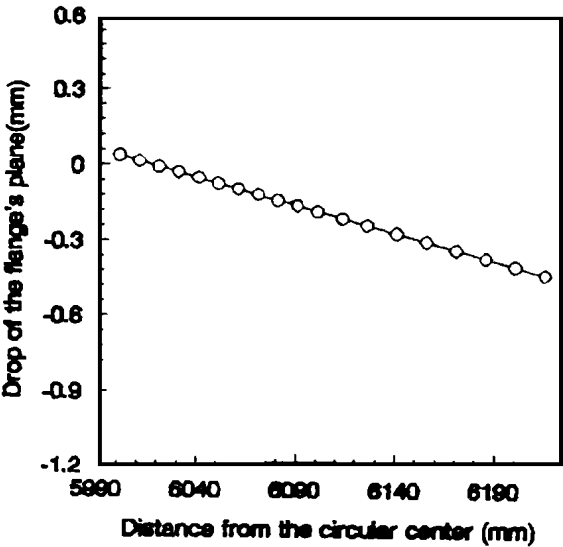


图 7 实际工程中法兰与筒体对接的数值分析结果

Fig. 7 Numerical analysis result of circular weld between flange and cylindrical shell in actual engineering

5 结 论

- (1)法兰与筒体对接的圆形焊缝,引起法兰平面的外倾,外倾的斜率是 0.018~ 0.033左右,法兰相对下沉量为 0.32mm~ 0.59mm左右
- (2)根据理论分析,可以推知,实际工程中法兰与筒体对接时法兰平面度将受到影响,实物的法兰平面的斜率将比模型试验法兰平面斜率小一个数量级,实际法兰平面的斜率为 0.0018~ 0.0030左右,实际法兰平面内外侧的相对下沉量为 0.43mm~ 0.64mm 这与数值分析的结果相吻合。
- (3) $\Phi 110\text{mm}$ 的筒体与主筒体相贯的圆形焊缝没有引起法兰截面上平面度变化,在圆周方向上法兰局部产生下凹,下凹值为 0.2mm~ 0.5mm

(1996- 03- 18收到初稿,1996- 11- 29日收到修改稿)

## 参 考 文 献

- 1 田锡唐.焊接结构.北京:机械工业出版社,1982,20~ 22
- 2 Kunihiro SATOH, et. Controlling parameters of residual stresses and deformation in welded thin cylindrical shells. Transaction of Japan welding society, 1986, 17( 1): 3~ 6
- 3 关桥等.薄壁圆筒单道环形对接焊缝所引起的残余应力及变形.焊接学会年会 A类论文, H- X- 005- 79
- 4 Yuzuru FUJITA, et al. Welding deformation and residual stresses due to circumferential welds at the joint between cylindrical drum and hemispherical head plat. I. I. W. DOC, X- 985- 81
- 5 R. I. Karless, et al. Three- dimensional finite element analysis of temperature and stresses in a single- pass butt- welded pipe. Trans of ASME. Journal of pressure vessel technology, 1990( 112): 76- 84
- 6 陆耀桢.实验应力分析.北京:机械工业出版社,1982,37~ 50

**Welding Deformations due to Circular Welds in Large Cylindrical Shells**

*Tian Xitang, Gu Fuming, Gao Jinqiang*  
( Harbin Institute of Technology )

**Abstract** Welding deformations due to circular welds in the large cylindrical shell is studied by the model test and numerical analysis. The result shows that the inclination of the flange's plane is induced by the circular weld at the joint between the cylindrical shell and the flange. The effect of the circular welds between the small cylindrical shells and the large cylindrical shell on the flange's plane is not obvious, but it induces the partial concave of the flange's plane in the circumference. The inclination slope of the flange's plane, which is induced by the circumferential weld at the joint between the actual vacuum vessel and the flange, is analysed by FEM. FEM result coincides well with the value which is analyzed by the model test.

**Key words** cylindrical shell, flange, circular weld planeness, numerical analysis