

纤维缠绕壳体封头厚度计算*

陈林泉 王路仙

(陕西动力机械研究所, 西安, 710000)

摘 要: 纤维缠绕火箭发动机壳体封头厚度是不均匀的, 封头形状、纱带宽度及两端开口影响着外壳厚度。回顾了几种计算方法, 并在此基础上发展了一种计算封头厚度的公式, 最后用这几种公式对实际的壳体封头厚度进行了计算, 并与实测值进行了比较。

主题词: 火箭发动机壳体, 纤维, 缠绕工艺

分类号: V435.22

THICKNESS CALCULATION OF DOME CASE WOUND WITH FILAMENT

Chen Linqun Wang Luxian

(Shanxi Power Mechanical Inst. Xi'an, 710000)

Abstract: The thickness of rocket motor dome wound with filament is not uniform. The shape of dome, the width of filament band and the opennings at both ends all effect the thickness of the case. In this paper, various methods to predict dome thickness are reviewed, and a new calculation method of dome thickness is derived from the geometric relation of wound band. The dome thickness of an actual case is calculated with the methods mentioned above. The calculation results are compared with the thickness measured actually.

Subject terms: Rocket engine case, Fiber, Winding

1 引 言

在纤维缠绕复合材料发动机壳体设计和分析中, 确定封头的准确壁厚十分关键。通常计算封头厚度的公式为:

$$\frac{t_L}{t_p} = \frac{2r_c \cos \alpha_0}{r \cos \alpha}$$

* 本文1994年11月3日收到

此处 α 和 α_0 分别是所求点在环向圆周上的缠绕角和纤维在赤道圆周上的缠绕角。 t_L 为一个循环的厚度, t_P 为纱带厚或层厚, r_C 为圆筒段半径。

当 $\alpha \rightarrow 90^\circ$ 时 (即在封头极孔附近), $t_L \rightarrow \infty$ 。说明用上式算得的封头极孔附近的厚度为无穷厚。这显然与实际情况不符, 可是在工程实践中, 极孔附近的纤维缠绕堆积厚度数据非常重要。从纤维缠绕壳体的内压试验看, 此处往往容易出现破坏。因为在极孔附近, 纤维缠绕壳体与弹性剪切层、金属接头连接, 在内压作用下承受着弯矩和剪切力。因此要准确地分析此处的受力情况, 就要制造出精确的有限元模型, 从而要准确知道极孔附近缠绕壳厚度。本文回顾了 Knoell 等式和通用双公式算法, 并推导了一种封头厚度计算公式。用这三种公式计算了实际的封头厚度, 与实测值进行了比较。

2 两种计算封头厚度的双公式法

2.1 Knoell 等式

在估算封头区域, 特别是接头区的厚度工作中, Stang^[1]研究出一种计算任一给定位置层数的图解方法。用此法的困难是需要对封头作图。由于图的限制, 只能精确计算用宽带制作的小型封头。

Knoell^[2]在 Stang 提出的图解方法基础上, 发展了一套预算封头厚度的分析公式。这种方法可不用绘图, 便于在计算机上使用。第一个公式在接头附近一个带宽范围内有效, 第二个公式对于封头其余部分有效。两个公式如下:

$$\frac{t_L}{t_P} = 2 \left[1 - 0.1 \left(\frac{r - r_B}{w} \right) \right] \left(\frac{r_C}{w} \right) \cos^{-1} \left[\frac{r_B}{r} \right] \quad r_B \leq r \leq (r_B + w)$$

$$\frac{t_L}{t_P} = 2 \left[0.9 + 0.1 \left(\frac{r - r_B - w}{r_C - r_B - w} \right) \right] \left(\frac{r_C}{w} \right) \left(\cos^{-1} \left[\frac{r_B}{r} \right] - \cos^{-1} \left[\frac{r_B + w}{r} \right] \right) \\ (r_B + w) \leq r \leq r_C$$

式中 r_B 是封头开口半径, w 是带宽。

2.2 通用双公式法

为了弄清封头的精确厚度, Kurt^[3]用实际几何关系推导出两个厚度计算公式。与 Knoell 公式一样, 第一个公式适用于距封头开口一个带宽范围内, 第二个公式对于封头其余部分有效。两个公式如下:

$$\frac{t_L}{t_P} = \frac{\cos^{-1} \left[\frac{r_B}{r} \right]}{\sin^{-1} \left\{ \frac{[(r_C^2 - r_B^2)^{\frac{1}{2}} - (r_C^2 - (r_B + w)^2)^{\frac{1}{2}}]^2 + w^2}{2r_C} \right\}} \quad r_B \leq r \leq (r_B + w)$$

$$\frac{t_L}{t_P} = \frac{\cos^{-1} \left[\frac{r_B}{r} \right] - \cos^{-1} \left[\frac{r_B + w}{r} \right]}{\sin^{-1} \left\{ \frac{[(r_C^2 - r_B^2)^{\frac{1}{2}} - (r_C^2 - (r_B + w)^2)^{\frac{1}{2}}]^2 + w^2}{2r_C} \right\}} \quad (r_B + w) \leq r \leq r_C$$

3 补充双公式法

这是作者借助封头端视, 采用几何关系预测任意点的层数办法推导出来的。

图 1 示出了纤维缠绕外壳的封头开口处距极孔一个带宽范围内的任一点 A 近似叠带图。封头上带子的实际路线投影到水平面上时与图 1 所示略有不同, 这是因为带子从一边绕到另一边时, 绕过封头开口处时带子实际上是稍稍弯曲的, 而不是图 1 所示直线。该曲线的曲率是封头形状、初始缠绕角、开口半径、圆筒半径以及缠绕模型的函数, 由于对封头厚度, 特别是厚度最大的封头开口处影响很小, 可以不予考虑。为了使问题便于解决, 本文在整个封头区域都没有考虑这种弯曲影响。

3.1 计算距开口一个带宽范围内任一点的厚度

由图 1 可看出, 封头赤道 $\widehat{BC}$ 之间的带子在缠绕过程中都通过 A 点, A 点的厚度就是这几条带子的厚度。即

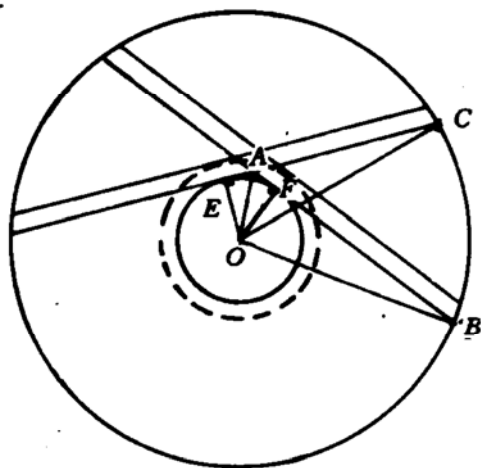


Fig. 1 Band geometry for a point within one band width of the dome opening

$$\frac{t_L}{t_p} = \frac{\beta}{2\pi} \cdot \frac{M}{2} = \frac{\beta}{4\pi} \cdot M$$

式中 t_L ——每个循环中 A 点的厚度

t_p ——纱带厚

M ——在一个循环中所需纤维束数

β —— $\angle BOC$

求解 β , 由图 1 可见:

$$\angle AOE = \cos^{-1}(r_B/r), \quad \angle AOF = \cos^{-1}(r_B/r)$$

$$\angle BOF = \cos^{-1}(r_B/r_C), \quad \angle COE = \cos^{-1}(r_B/r_C)$$

$$\beta = \angle BOC = \angle BOF + \angle COF = \angle BOF + (\angle AOE + \angle AOF - \angle COE)$$

$$= \cos^{-1}(r_B/r_C) + \cos^{-1}(r_B/r) + \cos^{-1}(r_B/r) - \cos^{-1}(r_B/r_C)$$

$$= 2\cos^{-1}(r_B/r)$$

3.2 计算距开口一个带宽以外点 A 的厚度

由图 2 可看出, 封头赤道上 $\widehat{BC}$ 以及 $\widehat{B'C'}$ 之间的带子在缠绕过程中都通过 A 点, A 点的厚度就是这几条带子的总厚度。即

$$\frac{t_L}{t_p} = \frac{2\beta}{2\pi} \cdot \frac{M}{2} = \frac{\beta}{2\pi} \cdot M$$

综合公式推导, 可得到封头厚度的计算公式:

$$\frac{t_L}{t_P} = \frac{M}{2\pi} \cos^{-1} \left[\frac{r_B}{r} \right]$$

$$r_B \leq r \leq (r_B + w)$$

$$\frac{t_L}{t_P} = \frac{M}{2\pi} \left\{ \cos^{-1} \left[\frac{r_B}{r} \right] - \cos^{-1} \left[\frac{r_B + w}{r} \right] \right\}$$

$$(r_B + w) \leq r \leq r_C$$

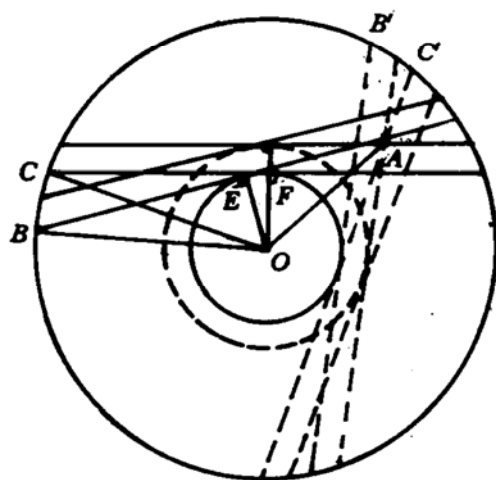


Fig. 2 Band geometry for a point beyond one band width of dome opening

4 算例及讨论

本文计算的封头型面为长短轴之比为 2 的半椭球, 采用平面缠绕工艺。在缠绕过程中, 为防止纱带在封头极孔附近堆积太厚和纱带架空的现象, 根据使用需要, 采用不断改变壳体平面缠绕极孔半径的办法。即缠绕一个循环, 封头缠绕极孔半径外移一定量以后, 再进行下一个循环的缠绕, 变化量见表 1。并且每完成一个循环缠绕, 在壳体圆筒段和封头赤道圆周处铺盖两层纤维纱带。

理论计算中所用的参数: $r_C = 696\text{mm}$, $L = 940\text{mm}$, $w = 4.75\text{mm}$, $t_P = 0.165\text{mm}$, $M = 1840$ 。

Table 1 Various wound polar radius and loop number of dome

Wound step	1	2	3	4	5	6	7	8
Wound polar radius of dome	r_{B1}	r_{B2}	r_{B3}	r_{B4}	r_{B5}	r_{B6}	r_{B7}	r_{B8}
	128	138	148	158	168	178	188	198
Loop numbers of various r_B	3	1	1	1	1	1	1	1

由于封头极孔半径 r_B 不断变化, 所以应首先计算每个循环的封头各点的厚度, 然后再作线性迭加, 求得封头型面上的总厚度值。

表 2 列出了用三种封头的厚度计算公式的结果, 解剖后的厚度实测值以及理论值与实测值的相对误差。

由表 2 可看出, 使用 Knoell 公式计算的厚度, 最大误差为 15.8%, 而用通用双公式法及本文提出的公式与实测值的最大误差都小于 10%, 这样小的误差, 在工程上是完全可被接受的。引起误差的原因是: (1) 实测封头解剖厚度时存在测量误差; (2) 计算中假定封头上的十个循环都分别缠绕在给定的标准椭球面上, 进行分层厚度叠加的; (3) 纱带在封头上交叉铺设时, 存在架空现象; (4) 在推导公式时, 作了一些近似简化。

Table 2 Actual values, prediction values and relative errors between them
(all values are in millimeter)

r	Actual values	Knoell formulas		General double formulas		Alternate double formulas	
		Prediction values	Relative errors %	Prediction values	Relative errors	Prediction values	Relative errors %
128.00	0.0	0.0		0.0		0.0	
128.50	11.87	12.66	-6.7	12.57	-5.9	12.79	-7.8
138.90	20.87	18.49	11.3	19.66	5.7	20.02	4.0
165.65	19.71	16.59	15.8	17.96	8.8	18.35	6.8
188.46	20.52	19.96	2.7	21.13	-3.0	21.71	-5.8
220.94	15.69	14.65	6.6	15.63	0.3	16.88	-2.5
248.83	11.78	11.29	4.1	11.99	-1.8	12.32	-4.6
295.83	8.80	8.60	2.2	9.05	-2.7	9.30	-5.6
369.21	6.75	6.50	3.7	6.73	0.2	6.92	-2.4
426.52	5.70	5.52	3.1	5.66	0.7	5.81	-2.0
473.62	5.23	4.94	5.5	5.02	4.1	5.15	1.4
513.34	4.93	4.55	7.6	4.58	7.0	4.71	4.5
547.28	4.54	4.27	5.9	4.26	5.9	4.39	3.4
576.47	4.34	4.06	6.5	4.04	6.9	4.14	4.5
601.59	4.05	3.89	3.9	3.85	4.8	3.96	2.2
623.15	3.79	3.76	0.7	3.71	2.1	3.81	-0.5
641.50	3.71	3.66	1.3	3.60	3.0	3.70	0.3
656.90	3.62	3.58	1.1	3.51	3.1	3.60	0.5
669.56	3.50	3.52	-0.5	3.44	1.8	3.53	-0.8
679.64	3.40	3.47	-1.9	3.38	0.4	3.48	-2.2
687.25	3.34	3.43	-2.7	3.34	0.1	3.43	-2.8
692.47	3.30	3.41	-3.2	3.32	0.5	3.41	-3.3
696.00	3.30	3.39	-2.8	3.30	0.0	3.38	-2.7

参 考 文 献

- [1] Stang D A. The Use of Planar Ribbon Winding for Control of Proc. the 14th SAMPE Conf, 1968
- [2] Knoell A C. Structural Design and Stress Analysis Program for Advanced Composite Filament-Wound Axisymmetric Pressure Vessels (CLMTRANK). JPL Technical Report 32-1521, 1971
- [3] Kurt C G. 纤维缠绕压力容器的圆顶厚度. 国外导弹与航天运载器, 1991 (3)