

金属内衬纤维增强复合材料筒体设计

赵立晨

(国防科技大学,长沙 410073)

文 摘 研究了金属内衬纤维增强复合材料筒体的设计方法,推导出了环向及螺旋加环向纤维缠绕的金属内衬筒体计算公式。以算例表明,该方法在保证壳体爆破强度前提下,达到了壳体减重和增加刚度的效果。本研究以固体火箭发动机壳体设计为背景,可以延伸用于一般压力容器。

关键词 压力容器,固体火箭发动机壳体,纤维增强复合材料,金属材料

Design of Fiber Reinforced Composite Cylinder Case With Metal Inner Liner

Zhao Lichen

(National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract The design method of fiber reinforced composite cylinder case with metal inner liner is investigated and the calculation formulae for the circumferential wound and helical-circumferential wound cylinder case with metal inner liner are derived. A calculation example shows that the method is effective for weight deduction and stiffness increment for the designed case on the premise of its burst pressure to be guaranteed. The case design of solid rocket motor is considered as study background and the method can also be extended to the application for other pressure vessels.

Key words Pressure vessel, Solid rocket motor case, Fiber reinforced composite, Metal

1 引言

当今的固体火箭发动机广泛采用了纤维缠绕复合材料壳体^[1-4],但是这些壳体往往存在刚度不足的问题,特别是用有机纤维缠绕的材料。火箭发动机设计专家一直努力寻求处理好复合材料壳体强度与模量之间关系^[5],但是纤维及树脂的特性决定了这种材料的强度及模量很难兼顾。

以金属(如高强度高模量的钢)为内衬,外部用缠绕纤维增强的复合材料压力容器,可在一定程度上解决上述问题,一定厚度的钢内衬可以弥补复合材料模量的欠缺。这种容器使用性能好,已在一些领域应用,如压缩天然气瓶,但在固体火箭发动机上的应用尚少。在一定条件下,将金属内衬纤维增强复合材料壳体用于固体火箭发动机可能会收到好的效果,即:减轻质量,保证刚度。文献[3]把这种壳体称为组合壳体。

对于环向增强的金属筒体压力容器结构分析,已有一些报道及公式^[6]。本研究将在环向增强的基础上,重点分析螺旋加环向增强的情况。固体火箭发动机壳体为“茧”式,它包含有筒体和前后封头,需要进行螺旋式缠绕。但是,为了便于说明问题,本文中公式系列仍从薄壳理论的基本公式起逐步推导,并主要

针对筒体部分进行讨论。

2 筒体受力分析

根据薄壳理论,两端封闭的筒体在工作压力 p 的作用下,有

$$\begin{cases} \sigma_{\varphi} = \frac{Rp}{2t} \\ \sigma_{\theta} = \frac{Rp}{t} \end{cases} \quad (1)$$

式中, R 为筒体中面半径, t 为筒体壁厚, p 为内压, σ 为筒体应力,下标 φ 和 θ 分别表示经向和环向。

由式(1)可见,筒体环向应力是经向应力的2倍,对于金属筒体,其破坏主要为环向破坏,经向强度未得到充分利用。为此,假设筒体破坏压力为 p_b ,当筒体经向应力 $\sigma_{m\varphi}$ 达到材料的破坏强度 σ_{mb} 时,而筒体的环向应力已是材料强度的2倍, m 指金属材料。

3 环向纤维增强金属筒体

3.1 应力分析

为了提高筒体的承载能力,在筒体外围环向缠绕增强纤维复合材料,让纤维承担部分环向应力。

由于固体火箭发动机壳体属于薄壁容器,为简化问题,可以近似地认为金属筒体和纤维增强筒体的中面半径相等,即为金属筒体与纤维增强筒体交界处的

收稿日期:2006-03-13

作者简介:赵立晨,1975年出生,硕士,主要从事飞行器的设计工作

宇航材料工艺 2007年 第2期

— 45 —

半径。可见,二筒体之间存在着接触压力 p' ; 对于金属筒体,它是外压;对于纤维增强筒体,它是内压。在工作压力 p 作用下,金属筒体的环向应变为

$$\varepsilon_{m\theta} = \frac{N_\theta - \nu N_\varphi}{E_m t_m} \quad (2)$$

式中, N 是由 p 引起的筒壁单位长度上的内力, E 为弹性模量, ε 为应变, ν 为材料的泊松比。而

$$\begin{cases} N_\varphi = \frac{R}{2} \\ N_\theta = R(p - p') \end{cases} \quad (3)$$

因此有

$$\varepsilon_{m\theta} = \frac{R}{2E_m t_m} \cdot [(2 - \nu)p - 2p'] \quad (4)$$

而纤维增强筒体由 p' 引起的环向应变为

$$\varepsilon_{f\theta} = \frac{Rp'}{E_f t_f} \quad (5)$$

式中,下标 f 表示纤维增强的。

因为纤维增强筒体内壁与金属筒体外壁始终粘接在一起,根据变形协调原理,有

$$\varepsilon_{m\theta} = \varepsilon_{f\theta} \quad (6)$$

将式(4)和式(5)代入式(6),经整理得金属筒体与纤维增强筒体之间的接触压力为

$$p' = \frac{(2 - \nu) E_f t_f}{2(E_m t_m + E_f t_f)} \cdot p \quad (7)$$

同时可以得到金属筒体环向应力为

$$\sigma_{m\theta} = \frac{(2E_m t_m + \nu E_f t_f) R}{2(E_m t_m + E_f t_f) t_m} \cdot p \quad (8)$$

以及纤维增强筒的环向应力为

$$\sigma_{f\theta} = \frac{(2 - \nu) E_f R}{2(E_m t_m + E_f t_f)} \cdot p \quad (9)$$

3.2 爆破压力

环向纤维增强的金属(组合)筒体在爆破压力 p_b 的作用下,内力平衡方程为

$$N_{m\theta} + N_{f\theta} = Rp_b \quad (10)$$

或:

$$Rp_{mb} + Rp_{fb} = Rp_b \quad (11)$$

$$P_{mb} + p_{fb} = p_b \quad (12)$$

为了充分发挥金属筒体的强度,可让环向纤维承担一半环向应力^[3],为此,假设: $p_{mb} = p_{fb} = p_b/2$,从而得到环向纤维缠绕厚度为

$$t_{fb} = \frac{Rp_b}{2\sigma_{f\theta b}} \quad (13)$$

金属筒体壁厚为:

$$t_{mb} = \frac{Rp_b}{2\sigma_{m\theta b}} \quad (14)$$

纤维的环向应变为

$$\varepsilon_{f\theta} = \frac{Rp_{fb}}{E_f t_{f\theta b}} = \frac{Rp_b}{2E_f t_{f\theta b}} \quad (15)$$

金属筒体的环向应变为

$$\varepsilon_{m\theta b} = \frac{\sigma_{m\theta b} - \nu\sigma_{m\varphi b}}{E_m} \quad (16)$$

又因为

$$\sigma_{m\theta b} = \sigma_{m\varphi b} = \sigma_{mb} \quad (17)$$

并根据变形协调原理,从而得到环向纤维厚度为

$$t_{f\theta b} = \frac{E_m}{E_f(1 - \nu) \cdot t_{mb}} \quad (18)$$

4 螺旋加环向缠绕纤维增强金属壳体

固体火箭发动机壳体由封头和筒体组成,增强纤维一般采取螺旋加环向缠绕的方式。现讨论螺旋加环向纤维与金属内衬的组合筒体部分。组合筒体的力平衡方程为

$$\begin{cases} N_{m\varphi} + N_{f\varphi} = \frac{Rp}{2} \\ N_{m\theta} + N_{f\theta} = Rp \end{cases} \quad (19)$$

由前面的假设,

$$N_{m\theta} = N_{m\varphi} = \sigma_m t_m \quad (20)$$

根据网格原理以及前面的假设,在爆破压力下,有

$$\begin{cases} N_{f\varphi b} = \frac{Rp_b}{2} - Rp_{mb} = \sigma_{f\varphi b} t_{f\varphi} \cos^2 \alpha \\ N_{f\theta b} = Rp_b - Rp_{mb} = \sigma_{f\theta b} t_{f\theta} + \sigma_{f\varphi b} t_{f\varphi} \sin^2 \alpha \end{cases} \quad (21)$$

且

$$p_{mb} \leq \frac{p_b}{2}$$

由式(13)得到螺旋缠绕纤维厚度和环向缠绕纤维厚度,以及其相应的断裂应力:

$$\begin{cases} t_{f\varphi} = \frac{R(p_b - 2p_{mb})}{2\sigma_{f\varphi b} \cos^2 \alpha} \\ t_{f\theta} = \frac{Rp_b}{\sigma_{f\theta b}} \cdot (1 - \frac{\tan^2 \alpha}{2}) - \frac{Rp_{mb}}{\sigma_{f\theta b}} \cdot (1 - \tan^2 \alpha) \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \sigma_{f\varphi b} = \frac{R(p_b - 2p_{mb})}{2t_{f\varphi} \cos^2 \alpha} \\ \sigma_{f\theta b} = \frac{Rp_b}{t_{f\theta}} \cdot (1 - \frac{\tan^2 \alpha}{2}) - \frac{Rp_{mb}}{t_{f\theta}} \cdot (1 - \tan^2 \alpha) \end{cases} \quad (23)$$

式(19)~(23)中已通过缠绕角 α 的三角函数式将螺旋缠绕转化为经向与环向的应力、应变。

为了满足纤维筒体与金属筒体之间的变形协调,则要求 $\varepsilon_{m\varphi} = \varepsilon_{f\varphi}$, $\varepsilon_{m\theta} = \varepsilon_{f\theta}$ 。根据前面的假设,有

$$\begin{cases} \varepsilon_{m\varphi} = \varepsilon_{f\varphi} = \frac{(1 - \nu) \sigma_{mb}}{E_m} \\ \varepsilon_{f\varphi} = \varepsilon_{f\theta} = \frac{\sigma_{f\theta}}{E_f} \end{cases} \quad (24)$$

这样,即可得到按变形协调设计的纤维缠绕层的应力

$$\sigma_{f\varphi} = \sigma_{f\theta} = \frac{E_f(1 - \nu)}{E_m} \cdot \sigma_{mb} \quad (25)$$

以及其缠绕厚度

$$\begin{cases} t_{f\varphi} = \frac{E_m R(p_b - 2p_{mb})}{2E_f(1 - \nu)\sigma_{mb} \cos^2 \alpha} \\ t_{f\theta} = \frac{E_m Rp_b}{E_f(1 - \nu)\sigma_{mb}} \cdot [(1 - \frac{p_{mb}}{p_b}) - (\frac{1}{2} - \frac{p_{mb}}{p_b}) \tan^2 \alpha] \end{cases} \quad (26)$$

由式(19)得壳体爆破时的平衡方程为

$$\begin{cases} \sigma_{mb} t_m + \sigma_{f\phi} t_{f\phi} \cdot \cos^2 \alpha = \frac{Rp_b}{2} \\ \sigma_{mb} t_m + \sigma_{f\theta} t_{f\theta} + \sigma_{f\phi} t_{f\phi} \cdot \sin^2 \alpha = Rp_b \end{cases} \quad (27)$$

5 算例及讨论

5.1 算例

设计一固体火箭发动机壳体,直径 1 m ($R = 500$ mm),筒体长 2.5 m,最大压力 $p_b = 11$ MPa。采用 30CrMnSiA 钢, $\sigma_{mb} = 1.08$ GPa, $E_m = 210$ GPa, $\rho_m = 7.81$ g/cm³;有机纤维, $\sigma_b = 4.2$ GPa, $E_f = 135$ GPa, $\rho_f = 1.4$ g/cm³。

(1) 如果完全采用钢设计,不考虑安全系数,则全钢筒体壁厚为

$$t_m = \frac{Rp_b}{\sigma_b} = 5.09 \text{ mm}$$

全钢筒体质量为: $m_m = 2\pi R t_m \rho_m = 312.219$ kg

(2) 内衬采用钢壳,外缠有机纤维,采用螺旋加环向缠绕。根据前面的分析,为了充分发挥钢的使用强度,取 $p_{mb} = 5$ MPa,钢筒体壁厚为

$$t_m = 2.31 \text{ mm}$$

剩余的 6 MPa 压力由纤维承担。则取 $\alpha = 20^\circ$, $\nu = 0.3$ (钢),由式(26)求得纤维的缠绕厚度为

$$\begin{cases} t_{f\phi} = 3.495 \text{ mm} \\ t_{f\theta} = 6.105 \text{ mm} \end{cases}$$

总纤维厚度: $t_f = t_{f\phi} + t_{f\theta} = 9.600$ mm

金属筒体及纤维缠绕部分质量分别为

$$m_m = 141.694 \text{ kg}$$

$$m_f = 105.544 \text{ kg}$$

若以树脂占总体积的 30% 且其密度按 1.24 g/cm³ 计算,则树脂含量为

$$m_g = V_g \rho_g = 0.3 V_g \rho_g = \frac{0.3 m_f \rho_g}{0.7 \rho_f} = 40.067 \text{ kg}$$

总质量: $m = m_m + m_f = 287.315$ kg < 312.219 kg

显然, F-12 有机纤维缠绕的钢筒体质量小于纯钢筒体的质量,而其刚度则比纯纤维缠绕筒体高。需要说明的是,计算厚度时未考虑基体树脂含量,加入 m_g 之后厚度 t_f 应略大一些。

5.2 讨论

从分析及算例可见,利用纤维增强复合材料补充壳体的部分强度既保证了壳体的刚度又减轻了质量。文献[3]中主张金属(内衬)壳体与增强复合材料层各分担一半预定应力时计算出的两者厚度值为最佳,同时提出,复合材料增强层设计中,当一层纵向带上缠绕两层环向带时,其厚度的计算公式结果比较适用。这些与本文钢筒和纤维缠绕筒承力分配及纤维缠绕层径向与环向受力比例分析相似。

从公式[26]等及算例可以看出,本工作主要是

在纤维弹性模量基础上计算的,主要考虑以下两点:

(1) 公式推导中依据了内外层在中面处粘接牢固,应变协调。

(2) 认为复合材料中主要承载靠增强纤维,树脂基体虽然起到了承力传递及缓冲作用,但在承受接近爆破压力的载荷条件下,基体的承力作用已退为其次。基体树脂的力学性能值通常比增强纤维低一个数量级^[6]。以上分析与复合材料压力容器在较高内压下试验时观察到的现象一致。

本文研究的计算方法主要针对固体火箭发动机壳体,这种壳体具有一次性使用、要求质量尽可能轻等特点。要把这种方法推广到一般压力容器的设计,如压缩天然气瓶等,还需考虑更多的设计因素及较高的安全系数。

(1) 一般压力容器多次重复使用,应考虑其疲劳问题。还应考虑耐冲击、耐酸碱等多种外界因素。

(2) 在选用材料时应该注意,内衬最好选用模量低、强度高的金属;纤维增强复合材料选用模量高、强度大的纤维。设计时可以不计内衬的承力作用,假定所有压力均由增强纤维承担来进行计算。对于如气瓶之类的压力容器,内衬应尽量取得薄一些,并增强内衬与纤维增强层的粘接强度,防止内衬在卸压时失稳。

(3) 考虑成本因素。

6 结论

本研究得出金属内衬纤维增强复合材料筒体的设计方法及推导的计算公式具有计算过程简洁等特点,可用于固体火箭发动机壳体的初步设计计算。但要用于包括前后封头及连接部位的整个壳体设计,仍需补充公式,例如封头的补强措施,连接部位结构的专门设计方法。

本方法为延伸用于一般压力容器的初步设计奠定了基础,但尚需依据其使用环境及特殊要求,在材料选择、结构厚度分配等方面考虑多种因素。

参考文献

- 1 Evans P R. Composite motor case design. AD-9005006; in AD-A184476 (Design methods in SRM), 1987
- 2 王铮,胡永强. 固体火箭发动机. 第五章. 北京: 宇航出版社, 1993
- 3 Шишков А А et al. Рабочие процессы в РДТТ. Москва: Машиностроение, 1989
- 4 赵克熙. 原苏联芳纶复合材料研究进展及其在固体发动机壳体上的应用. 宇航材料工艺, 1995; 25(5): 8~19
- 5 黄代尧. 固体发动机纤维缠绕壳体设计准则判别式. 固体火箭技术, 1997; 20(1): 9~14
- 6 陈汝训. 纤维缠绕圆筒压力容器结构分析. 固体火箭技术, 2004; 27(2): 105~107

(编辑 吴坚)