

# 纤维缠绕压力容器爆破压强计算

陈汝训

( 陕西动力机械研究所 西安 710025 )

**文 摘** 用于固体火箭发动机壳体和工业贮罐的纤维缠绕压力容器,爆破压强是重要的设计参数。本文基于网络理论,给出了纤维缠绕圆筒压力容器圆筒和封头爆破压强的计算方法,给出了用模拟实验压力容器确定纤维发挥强度的方法。算例表明,计算值与实测结果符合良好。这些方法可供纤维缠绕压力容器设计者参考或直接应用。

**关键词** 纤维缠绕,压力容器,爆破压强,发挥强度

## Burst Pressure Calculation of the Filament-Wound Pressure Vessels

Chen Ruxun

( Shaanxi Institute of Power Machineries Xi'an 710025 )

**Abstract** The burst pressure of filament-wound pressure vessels which is applied to solid rocket motor case and gas tank in industry is an important design parameter. On the basis of netting analysis, the calculating methods of the burst pressure of cylinder pressure vessels are presented. The method determining developed fiber strength is given by simulation test of a subscaled filament-wound pressure vessel. Calculating example shows that the calculating results coincide with experiment. These methods may be available for reference or used directly by designers of the filament-wound pressure vessels.

**Key words** Filament-wound, Pressure vessel, Burst pressure, Developed fiber strength

### 1 引言

玻璃纤维、有机纤维和碳纤维等复合材料具有较高的比强度和使用安全性。纤维缠绕压力容器作为固体火箭发动机壳体、汽车用天然气瓶及工业用贮罐等得到广泛的应用。爆破压强是压力容器的重要设计参数,准确预报压力容器的爆破压强一直为人们所关注。

纤维缠绕压力容器属于纤维增强复合材料层压薄壳结构,分析其在内压作用下的力学行为,需要用到各向异性层压结构理论。目前用这种理论进行结构分析只能得到较准确的弹性解,或者严格说来只适用于基体树脂开裂之前。纤维缠绕压力容器在爆

破之前将发生大量的树脂开裂、纤维脱胶、局部纤维断裂和分层等,这些物理非线性问题在本构关系中没有适当的方式对其进行描述。因此,用各向异性层压结构理论尚不能准确预报纤维缠绕压力容器的爆破压强。

由于基体树脂的抗拉强度及抗拉模量只是纤维的2%~5%,而且在压力容器爆破时,破源处的树脂几乎全部开裂,已不起加强作用,所以在计算压力容器的爆破压强时,忽略树脂的作用,将压力容器看做是完全由纤维缠绕而成。用这种模型对纤维缠绕结构进行分析计算的一套理论和方法称为网络理论。国内外的实践表明,在初步设计阶段,用网格理

收稿日期:1999-12-10;修回日期:2000-03-13

陈汝训,1936年出生,研究员,主要从事复合材料结构分析与优化设计的研究工作

论计算纤维缠绕压力容器的爆破压强是相当准确的。下面是纤维缠绕圆筒压力容器爆破压强计算的几个问题。

## 2 纤维缠绕圆筒压力容器筒体爆破压强计算

纤维缠绕圆筒压力容器的圆筒段一般为单一螺旋缠绕或螺旋缠绕加环向缠绕两种。而封头只能是单一螺旋缠绕,且与圆筒的螺旋缠绕同时成型。

### 2.1 单一螺旋缠绕圆筒

单一螺旋缠绕圆筒压力容器在内压作用下,圆筒段纤维在网格意义下的平衡方程为<sup>[1]</sup>

$$\sigma_f h_f \cos^2 \alpha = \frac{1}{2} RP \quad (1)$$

$$\sigma_f h_f \sin^2 \alpha = RP \quad (2)$$

式中  $\sigma_f$  ——纤维应力;  
 $h_f$  ——纤维厚度;  
 $R$  ——圆筒中面半径;  
 $P$  ——内压强;

$\alpha$  ——圆筒段螺旋缠绕角(纤维与圆筒母线的夹角)。

由式(1)和式(2)可见,欲同时满足这两个方程,不能任意给定,应当有

$$\tan^2 \alpha = 2 \quad (3)$$

即必须有  $\alpha = 54.7^\circ$ 。这就是单一螺旋缠绕圆筒的均衡型条件。当螺旋缠绕角偏离此值时,在内压作用下纤维要发生偏转,只有当缠绕角达到此值时方能达到平衡。将式(3)代入式(1)或式(2),得

$$P = \frac{2 \sigma_f h_f}{3 R} \quad (4)$$

如果认为纤维应力达到其抗拉强度极限时圆筒即爆破,则由式(4)得单一螺旋缠绕圆筒压力容器圆筒段的爆破压强为

$$P_b = \frac{2 \sigma_{fb} h_f}{3 R} \quad (5)$$

式中  $P_b$  ——爆破压强;  
 $\sigma_{fb}$  ——纤维抗拉强度极限。

### 2.2 螺旋缠绕加环向缠绕圆筒

固体火箭发动机壳体和汽车用天然气气瓶,一般为螺旋缠绕加环向缠绕,其圆筒段纤维在网格意义下的平衡方程为

$$\sigma_f h_f \cos^2 \alpha = \frac{1}{2} RP \quad (6)$$

$$\sigma_f h_f \sin^2 \alpha + \sigma_r h_r = RP \quad (7)$$

式中  $\sigma_f$  ——螺旋缠绕纤维应力;  
 $\sigma_r$  ——环向缠绕纤维应力;  
 $h_f$  ——螺旋缠绕纤维厚度;  
 $h_r$  ——环向缠绕纤维厚度。

欲为均衡型应变状态,螺旋向纤维的应变( $\epsilon_f$ )和环向纤维的应变( $\epsilon_r$ )应相等,为

$$\epsilon_f = \epsilon_r =$$

但因  $\epsilon_f = E_f^{-1} \sigma_f$ ,  $\epsilon_r = E_r^{-1} \sigma_r$  ( $E_f$  为纤维的拉伸模量)。故有

$$\sigma_f = \sigma_r = \sigma \quad (8)$$

将式(8)代入式(6)和式(7),两式相除并整理之,得

$$\frac{h_r}{h_f} = 3 \cos^2 \alpha - 1 \quad (9)$$

式中  $\frac{h_r}{h_f}$  为环向纤维和螺旋向纤维厚度比。

式(9)为螺旋缠绕加环向缠绕圆筒的均衡型条件,亦为实现均衡型缠绕的充分必要条件。如果缠绕角预先给定,由式(9)得满足均衡型缠绕的环向与螺旋向纤维厚度比。反之,如果环向和螺旋向纤维厚度给定,由式(9)可得实现均衡型缠绕的缠绕角。

实际使用的纤维缠绕圆筒压力容器,一般是预先给定容器直径和长度、封头形状、开口尺寸等,而且一般为平面缠绕,此时  $\alpha$  就确定了。设计时,由式(9)确定厚度比。

如果认为螺旋向纤维和环向纤维的抗拉强度极限相同,为  $\sigma_{fb}$ ,则由式(6)和式(9),得圆筒螺旋向纤维和环向纤维厚度分别为

$$h_f = \frac{RP_b}{2 \sigma_{fb} \cos^2 \alpha} \quad (10)$$

$$h_f = \frac{RP_b}{2 f_b} (2 - \text{tg}^2 \alpha) \quad (11)$$

将式(10)和式(11)相加,得

$$h_f = h_f + h_f = \frac{3RP_b}{2 f_b} \quad (12)$$

式中  $h_f$  ——螺旋向和环向纤维厚度之和。

由式(12),得螺旋加环向缠绕圆筒压力容器圆筒段的爆破压强为

$$P_b = \frac{2 f_b h_f}{3R} \quad (13)$$

比较式(13)和式(5)不难发现,在应变均衡型缠绕条件下,螺旋加环向缠绕圆筒的爆破压强与单一螺旋缠绕圆筒的爆破压强有相同的表达式。

实际设计的螺旋加环向缠绕圆筒压力容器,为了使封头有足够的强度,或者为了使圆筒段有足够的强度,往往有意增加螺旋向或环向纤维厚度,致使整个压力容器偏离了应变均衡型,因而就不能再用式(13)确定其爆破压强。此时应当从式(6)和式(7)出发,分别解得

$$P = \frac{2 f_b h_f \cos^2 \alpha_0}{R} \quad (14)$$

$$P = \frac{f_b (h_f \sin^2 \alpha_0 + h_f)}{R} \quad (15)$$

其中,  $P$  为螺旋缠绕爆破压强,  $P$  为环向缠绕爆破压强,且圆筒段的爆破压强为  $P$  与  $P$  中的较小者,即

$$P_b = \min\{ P, P \} \quad (16)$$

至此,要计算螺旋加环向缠绕圆筒压力容器圆筒段的爆破压强时,首先检查式(9),如果满足,则由式(13)计算爆破压强。否则,用式(16)计算爆破压强。

### 3 纤维缠绕圆筒压力容器封头爆破压强计算

在网格理论意义下,纤维缠绕圆筒压力容器的封头以等张力封头最为合理。这不仅因为等张力封头是按测地线缠绕,纤维不易“打滑”,在工艺上最合理,而且在整个封头上纤维所受应力相等,且等于圆筒段螺旋缠绕纤维的应力,即

$$f = \frac{RP}{2 h_f \cos^2 \alpha_0} \quad (17)$$

式中  $f$  ——等张力封头纤维应力;

$\alpha_0$  ——圆筒与封头连接处的螺旋缠绕角。

由式(17)不难得到等张力缠绕封头的爆破压强为

$$P_b = \frac{2 f_b h_f \cos^2 \alpha_0}{R} \quad (18)$$

由式(18)和式(14)可见,均衡型缠绕圆筒压力容器,当封头为等张力缠绕时,整个压力容器为等强度的。因此,采用等张力封头是最合理的。

实现等张力缠绕,需要满足一定的几何条件和缠绕设备条件,在工艺上可能会遇到一些困难。实际的圆筒压力容器往往采用均衡型平面缠绕封头或椭球封头。这些封头都不能实现等张力,纤维应力需要解复杂的微分方程才能得到,因而其爆破压强也不能用一个简单的显式来表达。对这类封头,当圆筒压力容器的长径比不是很大时,实践中仍以式(18)为基础,采用经验系数的方法来确定非等张力封头的爆破压强:

$$P_b = \frac{2 k_s f_b h_f \cos^2 \alpha_0}{R} \quad (19)$$

式中  $k_s > 1$ ,称为应力平衡系数。纤维缠绕椭球封头,由于它既不是等张力的,也不是应变均衡型的,其  $k_s$  较小。对椭球比为2的封头,一般取  $k_s$  为0.7左右。

### 4 纤维强度指标的确定

在以网格理论为基础的爆破压强公式推导中,  $f_b$  在理论上是作为纤维强度出现的。但在实际设计计算时,既不能将其取为纤维的单丝强度,也不能将其取为纤维纱带强度。原因是网格理论本身是非

常理想化的,它既不考虑基体树脂的影响,也不考虑缠绕层次、缠绕张力和纤维受力不均匀的影响,更不可能考虑内部缺陷及纤维与基体界面作用的影响。在进行纤维缠绕圆筒压力容器设计时,为了能将 $f_b$ 取得准确,使计算出的爆破压强与实际结果相符合,通常是先做小型模拟试验压力容器,进行内压爆破试验,由试验得到的实测爆破压强 $P_b$ ,通过式(13)或式(16)反算出 $f_b$ ,称为纤维发挥强度,以此作为实际压力容器设计的强度指标。用这种方法设计的纤维缠绕压力容器,实际爆破压强与计算值一般比较吻合。

实践中发现,即使材料和工艺都相同,不同尺寸的模拟试验压力容器,所反算出的 $f_b$ 也有一定的差别,尤其是压力容器的厚度,是影响 $f_b$ 的主要因素。如果定义

$$k = f_b / \sigma_b \quad (20)$$

为纤维缠绕压力容器的纤维强度转换率(亦称纤维强度发挥系数),式中 $f_b$ 为由模拟试验压力容器得到的纤维发挥强度, $\sigma_b$ 为单丝强度。那么,对玻璃纤维一般有 $k = 0.75 \sim 0.85$ ;对有机纤维,有 $k = 0.6 \sim 0.7$ 。压力容器的壁越厚, $k$ 越小。

## 5 算例

玻璃纤维缠绕圆筒压力容器的圆筒半径为 $R = 1 \text{ m}$ ,螺旋缠绕和环向缠绕的纤维厚度分别为 $h_f = 3.52 \text{ mm}$ 和 $h_r = 4.74 \text{ mm}$ ,螺旋缠绕角为 $\alpha = 12.5^\circ$ ,玻璃纤维单丝强度为 $\sigma_b = 3.2 \text{ GPa}$ 。求圆筒的爆破压强。

首先将已知数据代入式(9),若不满足,则应由

式(16)求解。

取玻璃纤维的强度转换率为 $k = 0.8$ ,则纤维的发挥强度为 $f_b = 2.56 \text{ GPa}$ 。

将已知数据代入式(14)和(15),分别得 $P = 17.2 \text{ MPa}$ , $P = 12.6 \text{ MPa}$ 。故爆破压强为 $P_b = 12.6 \text{ MPa}$ 。

该压力容器的实测爆破压强为 $12.9 \text{ MPa}$ 。可见计算值与实际结果相当符合。

该压力容器未采用等张力封头,其应力平衡系数为 $0.76$ ,致使圆筒的螺旋缠绕纤维增厚而偏离了应变均衡型。

## 6 结论

在薄壳结构范围内,基于网格理论,推导出了纤维缠绕压力容器爆破压强计算公式。应用时,公式中的强度指标,既不能简单地取为单丝强度,也不能取为复丝强度或纤维纱带强度。而是根据实际情况,通过模拟试验压力容器的实测爆破压强代入计算公式中,反算出纤维发挥强度。这样一来,分析模型的简化、几何非线性和物理非线性等未知因素,都由这一“发挥强度”体现出来了。用该发挥强度进行纤维缠绕压力容器爆破压强计算,所得结果与实测结果符合良好。因此,文中给出的纤维缠绕压力容器爆破压强计算公式,实质上是从网格理论出发,以实验为依据的半径经验公式。由于它是以实践为基础的,所以可信度较高,可直接用于纤维缠绕压力容器的初步设计。

## 参考文献

- 1 陈汝训. 固体火箭发动机设计与研究(下). 北京:宇航出版社,1992:100~110

## 更正

本刊2000年第5期发表的《陶瓷/复合材料装甲板防弹机理分析》一文中,由于本人疏忽大意,将文章的重要参考文献遗漏,现补充如下:“6 白长河. 陶瓷—复合材料弹道吸能与动力学仿真模型的研究. 北京航空航天大学材料系硕士论文. 1995: 28~36”。文章的2.3及3中的参考数据部分引用了此文献,在此对白长河同志表示最诚恳的歉意。