

# 纤维缠绕复合材料压力容器多型封头对比分析

蔡 强,赵晓宁,李新田,淡林鹏,蒲晓航,黄慧慧  
(中国运载火箭技术研究院,北京 100076)

**摘 要:**纤维缠绕复合材料容器在航天领域得到广泛应用,为满足复材容器快速方案设计需求,对比分析了缠绕线型和封头子午线类型对复材容器性能的影响,通过建立简化的复材容器几何参数模型,基于成熟可靠的网格理论和测地线理论,详细推导了螺旋缠绕封头、螺旋缠绕椭球封头、平面缠绕封头和平面缠绕椭球封头等 4 种封头的控制方程。对应每种封头,均进行实例计算以验证设计方法的正确性,结果表明:相同纤维缠绕线型的子午线、缠绕角、壁厚、纤维应力以及综合性能参数等设计结果相似,推荐采用螺旋缠绕椭球封头或平面缠绕椭球封头以避免子午线曲率拐点,同时有利于加工制造。

**关键词:**复合材料;压力容器;封头;网格理论;测地线理论

**中图分类号:**V421.4   **文献标识码:**A   **文章编号:**1672-9374(2020)06-0090-07

## Comparative analysis on multi-type domes of filament-wound composite pressure vessels

CAI Qiang, ZHAO Xiaoning, LI Xintian, DAN Linpeng, PU Xiaohang, HUANG Huihui  
(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Filament-wound Composite Pressure Vessels (FCPV) has been widely used in the aerospace field. The main purpose of this paper is to meet the requirements of rapid concept design of FCPV and compare the effects of winding pattern and meridian type of domes on the properties of FCPV. A simplified geometric parameter model of FCPV was established. Based on the mature and reliable grid theory and geodesic theory, four types of domes (helical winding, helical winding ellipsoid, polar winding, polar winding ellipsoid) were studied. The control equations of each type of dome were derived. According to each type of dome, case calculation was carried out to verify the correctness of the design method. The result analysis shows that the design results of meridian, winding angle, wall thickness, fiber stress and  $pV/W$  of the same winding pattern are similar. Ellipsoid dome is recommended to avoid the curvature inflection point of meridian, which is also conducive to processing and manufacturing. The research results can provide reference for the design and selection of FCPV.

**Keywords:** composite material; pressure vessel; dome; grid theory; geodesic theory

收稿日期:2020-03-08;修回日期:2020-05-01

基金项目:国家自然科学基金(11972377)

作者简介:蔡强(1984—),男,博士,高级工程师,研究领域为火箭发动机总体设计及仿真

## 0 引言

纤维缠绕复合材料压力容器(以下简称复材容器)由于具有轻质高强的优点,在航天技术领域得到了广泛的应用<sup>[1-7]</sup>。复材容器一般由前后封头和筒段组成,三者一体缠绕成型,在前后封头缠绕过程中,缠绕角、纤维厚度和纤维应力等参数是不断变化的,不同的缠绕线型和子午线形状直接影响复材容器的承压能力,因此封头设计及分析工作是复材容器设计的核心内容。

复材容器封头的设计分析多采用网格理论计算,内压完全由纤维承担,树脂基体仅起到黏合作用,纤维缠绕通常采用测地线缠绕理论,不用考虑摩擦力的因素,纤维能够在芯模上稳定铺敷不打滑<sup>[8-10]</sup>。近年来,有关学者引入经典层板理论和非测地线纤维缠绕轨迹,考虑了树脂基体的承力并扩大了纤维缠绕轨迹设计空间<sup>[11-19]</sup>。

在方案论证阶段,通常需要快速开展封头方案的迭代设计、优化分析,因此亟需建立不同封头的快速方案评估模型,并通过对比分析优选出满足设计要求的方案。为此,本文系统整理出螺旋缠绕封头、螺旋缠绕椭球封头、平面缠绕封头和平面缠绕椭球封头4种封头的控制方程,设计上采用成熟可靠的网格理论和测地线理论,通过实例计算对比分析缠绕线型和封头子午线类型对复材容器性能的影响。

## 1 复材容器参数模型

### 1.1 几何参数模型

本文主要研究对象是复材容器封头,但是筒段的长度、外径和壁厚直接影响封头的参数,因此采用图1所示的封头和筒段一体化的几何参数模型。封头的主要参数有子午线形状、缠绕角、封头壁厚和纤维应力。

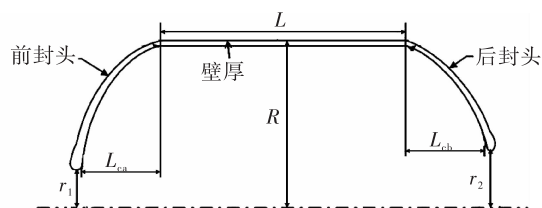


图1 复材容器参数模型

Fig.1 Simplified parametric model of filament-wound composite pressure vessels

复材容器成型工艺是在芯模上按照一定的轨迹连续缠绕浸胶的复材纤维带,常用的纤维缠绕线型轨迹有螺旋缠绕和平面缠绕2种方式。

螺旋缠绕线型如图2所示,其中 $r_1$ 为给定的筒段径向位置; $\alpha_1$ 为筒段纤维缠绕角; $r_2$ 为给定的封头径向位置; $\alpha_2$ 为封头纤维缠绕角。纤维轨迹严格满足稳定的测地线,即 $r_1 \sin \alpha_1 = r_2 \sin \alpha_2$ ,不存在滑纱的风险,同时封头各点纤维应力相等,但是要求前后极孔直径相等。

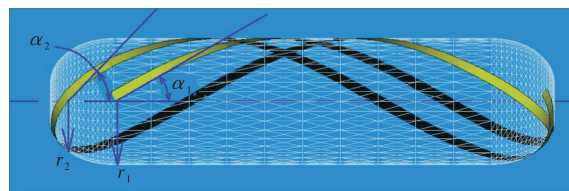


图2 螺旋缠绕线型

Fig.2 Helical filament winding

平面缠绕线型如图3所示,其中 $\phi_{\text{Front pole}}$ 为前极孔直径, $\phi_{\text{Back pole}}$ 为后极孔直径,前后极孔直径可以不等, $\alpha$ 为纤维缠绕角。平面缠绕线型轨迹是从一个极孔直接缠绕至另一个极孔,这种线型只能用于长度较小的壳体,要求壳体长径比 $L/D \leq 2$ 。

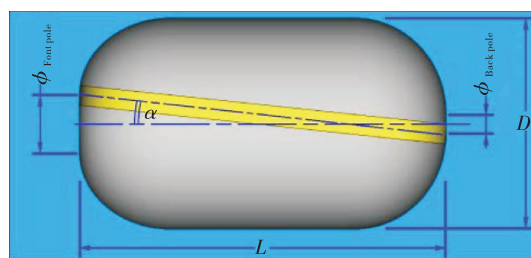


图3 平面缠绕线型

Fig.3 Polar filament winding

以上2种线型,封头和筒段一体缠绕,纤维应力连续变化,承压能力较好,但是封头子午线形状受限于缠绕线型无法自主设计,工程上为了设计和工艺方便,并提高体积装填率,经常采用椭球封头,即封头子午线方程满足椭圆弧曲线方程

$$r^2/R^2 + z^2/B^2 = 1 \quad (1)$$

令椭球比

$$m = R/B$$

将不同缠绕线型和封头子午线形状组合,常用

的封头形式可以分为螺旋缠绕封头、螺旋缠绕椭球封头、平面缠绕封头和平面缠绕椭球封头 4 类。

### 1.2 网格理论假设

封头设计及分析时采用如下的网格理论,有如下假设条件:

1) 复材容器的载荷全部由纤维的拉伸强度承担,树脂基体仅对纤维起黏结、定位的作用,使纤维强度充分发挥;

2) 在整个复材容器上纤维连续缠绕,分布均匀且对称;

3) 复材容器为薄壁结构件,应力沿壁厚均匀分布,无弯曲应力,内部压力处处相等,均匀一致;

4) 复材容器前后封头和筒段螺旋向一体成型,然后筒段补充环向缠绕,即前后封头为“螺旋向”或“平面”缠绕线型,筒段为“螺旋向 + 环向”或“平面 + 环向”缠绕线型。

### 1.3 筒段壁厚计算方法

筒段长度  $L$  和外径  $R$  一般根据约束条件给定,筒段壁厚  $h_{ic}$  与封头形式无关,本文采用参考文献[20]中方法计算,为了方便下文引用,列出筒段壁厚

$$\begin{cases} h_{i\alpha} = \frac{Rp_b}{2\sigma_{fb} \cos^2 \alpha_0} \\ h_{i\theta} = \frac{Rp_b}{2\sigma_{fb}} (2 - \tan^2 \alpha_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $p_b$  为容器最大内压;  $h_{i\alpha}$  为纤维螺旋向或平面缠绕壁厚;  $h_{i\theta}$  为环向壁厚;  $\sigma_{fb}$  为纤维的实际发挥强度。

## 2 复合容器封头设计模型

### 2.1 设计规则及控制方程

一般封头的几何构型如图 4 所示,封头上采用螺旋缠绕或平面缠绕线型,纤维分布满足以下 3 个规则:

规则 1: 纤维排列关于子午线对称;

规则 2: 纤维与子午线的夹角即缠绕角  $\alpha$  是关于平行圆半径  $r$  的函数,  $\alpha = \alpha(r)$ , 赤道圆上的缠绕角等于圆筒上的纵向缠绕角  $\alpha_0$ , 在极孔上,  $\alpha = \pi/2$ ;

规则 3: 根据物质守恒定律,通过平行圆法截面上的纤维总量等于通过赤道圆法截面上的纤维总

量,且等于通过圆筒横截面上的纤维总量。因平行圆半径是变化的,因而封头厚度  $h_f$  也是  $r$  的函数,即  $h_f = h_f(r)$ , 在赤道圆处,封头壁厚等于筒段壁厚  $h_{i\alpha}$ , 即  $h_f = h_{i\alpha}$ 。

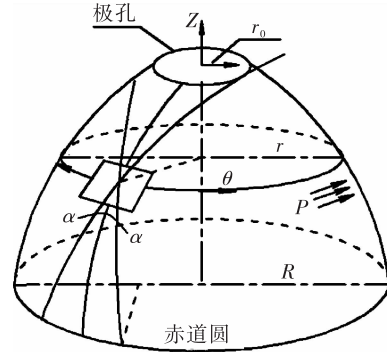


图 4 一般封头几何构型

Fig. 4 Geometry of general dome

极坐标条件下,一般回转体封头的曲面方程

$$S(\theta, z) = \{r \cos \theta, r \sin \theta, z\} \quad (3)$$

式中:  $r = r(z)$  为封头的母线方程,  $r$  是平行圆半径坐标;  $z$  为回转体轴线坐标;  $r$  和  $z$  均大于 0,  $\theta$  为沿纬度圆的包角。

引入无量纲参数

$$\begin{cases} \rho = r/R \\ \varepsilon = z/R \\ \bar{h} = \frac{h_f}{h_{i\alpha} \cos \alpha_0} \\ \bar{\sigma} = \frac{\sigma_f}{RP_b / (2h_{i\alpha} \cos \alpha_0)} \end{cases} \quad (4)$$

根据规则 1 ~ 规则 3, 可以推导出一般封头的无量纲化控制方程<sup>[20]</sup>

$$\begin{cases} \tan^2 \alpha = 2 + \frac{\rho \ddot{\rho}}{1 + \dot{\rho}^2} \\ \bar{\sigma} = \frac{\rho (1 + \dot{\rho}^2)^{1/2}}{\bar{h} \cos^2 \alpha} \\ \bar{h} = \frac{1}{\rho \cos \alpha} \end{cases} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,有 4 个未知数: 平行圆半径  $\rho$ 、缠绕角  $\alpha$ 、纤维应力  $\bar{\sigma}$  和封头厚度  $\bar{h}$ , 但是只有 3 个方程, 因此需要根据特定封头类型补充一个额外的条件, 确保方程可解。

## 2.2 螺旋缠绕封头

从1.1节的介绍可知,螺旋缠绕封头满足等应力条件 $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_0$ 和测地线 Clairaut 公式 $\sin \alpha = \rho_0/\rho$ , 可以将式(5)改写为

$$\begin{cases} \bar{\sigma} = \bar{\sigma}_0 \\ \sin \alpha = \rho_0/\rho \\ \bar{\sigma} = \frac{\rho(1+\dot{\rho}^2)^{1/2}}{\bar{h} \cos^2 \alpha} \\ \bar{h} = \frac{1}{\rho \cos \alpha} \end{cases} \quad (6)$$

利用龙格库塔法求解方程组可以得出螺旋缠绕封头各点子午线坐标、缠绕角和壁厚。如图5所示,在计算螺旋缠绕封头子午线方程时, $r = \sqrt{1.5}r_0$  ( $r_0$ 为极孔半径)处子午线曲率出现拐点,且由 $+\infty$ 变化到 $-\infty$ ,即封头曲面由外凸变为内凹,无法保持连续。采用参考文献[20]中的方法, $r = \sqrt{2}r_0$ 时封头曲面主曲率半径 $R_\phi = R_\theta$ ,称为等曲率点,并且此处 $R_\theta$ 最大,  $(R_\theta)_{\max} = R/\sin 2\alpha_0$ ,因此在等曲率点以后,用半径为 $(R_\theta)_{\max} = R/\sin 2\alpha_0$ 的圆弧替代,确保拐点附近的子午线最大限度保持连续。

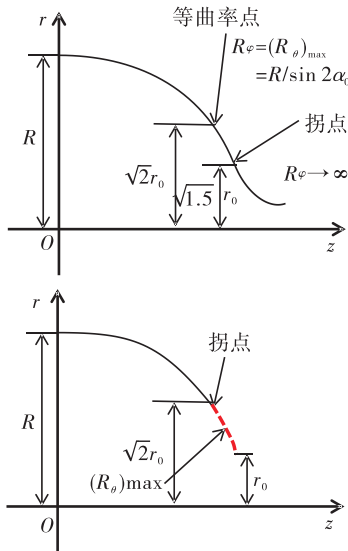


图5 螺旋缠绕封头子午线拐点及处理方法

Fig. 5 Inflection point and modified meridian of helical winding dome

## 2.3 螺旋缠绕椭球封头

椭球封头的子午线方程是给定的椭圆弧,将

式(4)代入式(1)得出无量纲化的子午线方程

$$\rho^2 + m^2 \varepsilon^2 = 1 \quad (7)$$

对 $\rho$ 求一阶和二阶导数,可得

$$\begin{cases} \rho(\varepsilon) = \sqrt{1 - m^2 \varepsilon^2} \\ \dot{\rho}(\varepsilon) = -\frac{m^2 \varepsilon^2}{\sqrt{1 - m^2 \varepsilon^2}} \\ \ddot{\rho}(\varepsilon) = -\frac{m^2}{(1 - m^2 \varepsilon^2) \sqrt{1 - m^2 \varepsilon^2}} \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)中 $\dot{\rho}$ 和 $\ddot{\rho}$ 代入式(5),得到螺旋缠绕球封头的控制方程式

$$\begin{cases} \bar{\sigma} = \frac{\rho^3(1+\dot{\rho}^2)^{1/2}}{(\rho^2 - \rho_0^2)^{1/2}} \\ \sin \alpha = \rho_0/\rho \\ \bar{\sigma} = \frac{\rho(1+\dot{\rho}^2)^{1/2}}{\bar{h} \cos^2 \alpha} \\ \bar{h} = \frac{1}{\rho \cos \alpha} \end{cases} \quad (9)$$

值得注意的是该封头不再满足等应力条件。

## 2.4 平面缠绕封头

从图3中可知,平面缠绕筒段纤维缠绕角 $\alpha_0$ 满足

$$\tan \alpha_0 = \frac{\phi_{\text{Front pole}} + \phi_{\text{Back pole}}}{2L} \quad (10)$$

根据图6中的平面缠绕封头的几何关系,得出

$$\rho \sin \theta = \rho_e + \varepsilon \tan \alpha_0 \quad (11)$$

$$\tan \alpha = \dot{\rho} \theta / \sqrt{1 + \dot{\rho}^2} \quad (12)$$

式中 $\rho_e$ 为赤道处纤维轨迹起点坐标在子午线平面的投影。

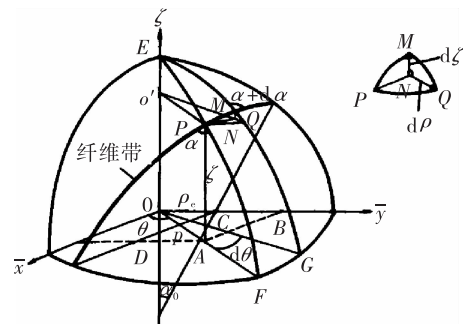


图6 平面缠绕封头几何关系

Fig. 6 Geometry of polar winding dome

联合式(5)、式(11)和式(12),得出平面缠绕封头的控制方程

$$\left\{ \begin{aligned} \tan^2 \alpha &= \frac{[\rho \tan \alpha_0 - \dot{\rho}(\rho_e + \varepsilon \tan \alpha_0)]^2}{(1 + \dot{\rho}^2)[\rho^2 - (\rho_e + \varepsilon \tan \alpha_0)^2]} \\ \ddot{\rho} &= \left\{ \frac{[\rho \tan \alpha_0 - \dot{\rho}(\rho_e + \varepsilon \tan \alpha_0)]^2}{(1 + \dot{\rho}^2)[\rho^2 - (\rho_e + \varepsilon \tan \alpha_0)^2]} - 2 \right\} \frac{1 + \dot{\rho}^2}{\rho} \\ \ddot{h} &= \frac{1}{\rho} \left\{ 1 + \frac{[\rho \tan \alpha_0 - \dot{\rho}(\rho_e + \varepsilon \tan \alpha_0)]^2}{(1 + \dot{\rho}^2)[\rho^2 - (\rho_e + \varepsilon \tan \alpha_0)^2]} \right\}^{1/2} \\ \ddot{\sigma} &= \rho^2 \left\{ 1 + \rho^2 + \frac{[\rho \tan \alpha_0 - \dot{\rho}(\rho_e + \varepsilon \tan \alpha_0)]^2}{\rho^2 - (\rho_e + \varepsilon \tan \alpha_0)^2} \right\}^{1/2} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

与椭球封头相似,平面封头曲率在缠绕角  $\alpha = 54.7^\circ$  时也会出现拐点,采用相同的处理方法,在等曲率点  $\alpha = 45^\circ$  以后用圆弧替代原子午线。

### 2.5 平面缠绕椭球封头

将式(8)中椭圆弧二阶导数代入式(13),得出平面缠绕椭球封头的控制方程

$$\left\{ \begin{aligned} \tan^2 \alpha &= \frac{[\rho \tan \alpha_0 - \dot{\rho}(\rho_e + \xi \tan \alpha_0)]^2}{(1 + \dot{\rho}^2)[\rho^2 - (\rho_e + \xi \tan \alpha_0)^2]} \\ \ddot{\rho} &= - \frac{m^2}{(1 - m^2 \xi^2) \sqrt{1 - m^2 \xi^2}} \\ \ddot{h} &= \frac{1}{\rho} \left\{ 1 + \frac{[\rho \tan \alpha_0 - \dot{\rho}(\rho_e + \xi \tan \alpha_0)]^2}{(1 + \dot{\rho}^2)[\rho^2 - (\rho_e + \xi \tan \alpha_0)^2]} \right\}^{1/2} \\ \ddot{\sigma} &= \rho^2 \left\{ 1 + \rho^2 + \frac{[\rho \tan \alpha_0 - \dot{\rho}(\rho_e + \xi \tan \alpha_0)]^2}{\rho^2 - (\rho_e + \xi \tan \alpha_0)^2} \right\}^{1/2} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

## 3 实例及结果分析

### 3.1 模型验证

为了验证本文计算模型的正确性,选取极孔半径  $\rho_0 = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$  共4种工况,分别对比螺旋缠绕封头曲线与参考文献[21]中的等应力封头曲线,计算结果如图7所示,可见吻合性非常好。

### 3.2 实例对比分析

以下针对4种不同类型复材容器封头的实例进行讨论,采用T700/树脂基体复合材料,纤维体积含量为60%,复合密度为  $1.56 \text{ g/cm}^3$ ,最大设计压强为10 MPa,筒段外径均为  $\phi 1\,000 \text{ mm}$ 。4个实例三维模型如图8所示,其他几何参数如表1所示。

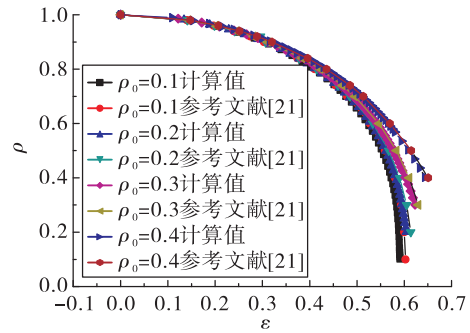


图7 封头设计模型验证

Fig. 7 Verification of dome design model

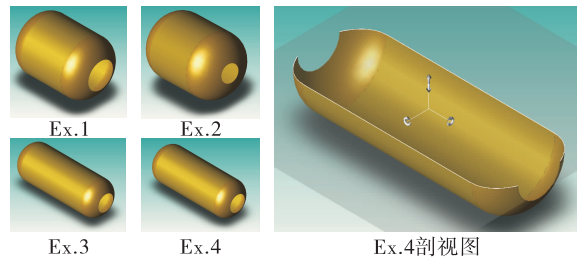


图8 设计实例三维模型

Fig. 8 3D solid geometric models of cases

表1 实例几何尺寸

Tab. 1 Case dimensions

实例	封头类型	筒段 外径/mm	筒段 长度 /mm	前极孔 半径 /mm	后极孔 半径 /mm	封头 椭球比
Ex. 1	平面缠绕 封头	1 000	800	150	250	-
Ex. 2	平面缠绕 椭球封头	1 000	800	150	250	1.40
Ex. 3	螺旋缠绕 封头	1 000	2 000	250	250	-
Ex. 4	螺旋缠绕 椭球封头	1 000	2 000	250	250	1.40

由表1可以看出,4个后封头尺寸相同,以下对比4个后封头的设计结果。封头的子午线、缠绕角和壁厚的设计结果对比如图9所示。

1) 子午线设计结果:除螺旋缠绕封头高度较大外,其余3种封头子午线轮廓设计结果相近,螺旋缠绕封头高度(332 mm)比其余封头高度大了约8.9%。另外,平面缠绕封头和螺旋缠绕封头在等曲率点前后变化趋势连续无奇异点,证明2.2节处理



方法的正确性。

2) 缠绕角设计结果: 相同缠绕线型的缠绕角度变化趋势相似, 且变化连续,  $z = 250\text{ mm}$  之前螺旋缠绕线型缠绕角 (初始缠绕角约  $15^\circ$ ) 大于平面缠绕线型 (初始缠绕角约  $30^\circ$ ), 之后变化趋势一致, 由于螺旋缠绕封头高度较大, 因此在极孔附近缠绕角变化较缓。

3) 封头厚度设计结果: 封头厚度的变化趋势同缠绕角, 相同线型相似, 且螺旋缠绕线型平均封头厚度大于平面缠绕线型。

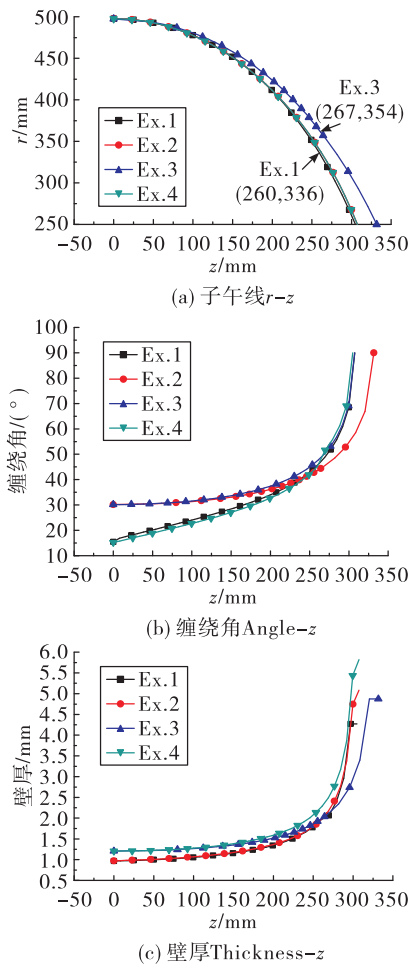


图 9 后封头设计结果对比  
Fig. 9 Comparison of dome design results

4 种封头的纤维应力对比如图 10 所示, 可见:

1) 在靠近筒段附近, 平面缠绕线型的纤维应力大于螺旋缠绕线型; 在靠近极孔附近, 纤维应力迅速增大。根据式 (5), 纤维应力与缠绕角  $\alpha$  和子午线一阶导数的平方  $\dot{\rho}^2$  成正比, 在极孔附近, 缠绕角的迅速增大导致了纤维应力的增大。

2) 另外, 平面缠绕和螺旋缠绕封头的纤维应力

在等曲率点以后发生了突变, 这是由于在等曲率点后用球面拼接, 子午线一阶导数的平方  $\dot{\rho}^2$  发生了突变。

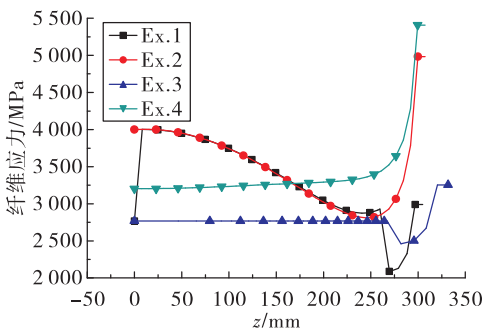


图 10 后封头纤维应力设计结果对比  
Fig. 10 Comparison of fiber stress design results for rear dome

工程上为了解决极孔附近应力较大问题, 通常在此处进行局部补强, 另外在极孔处通过缠绕固定铝合金或钛合金接头的设计来弥补应力突变带来的结构强度不足。

为比较 4 种后封头的综合性能, 引入参考文献 [8] 中的综合性能系数  $pV/W$  ( $p$  为容器内压;  $V$  为封头体积;  $W$  为封头质量)。详细对比如表 2 所示。

1) 由于封头高度的原因, 螺旋缠绕封头自由容积最大, 其余三者相近。

2) 由于螺旋缠绕封头平均厚度大于平面缠绕, 相同缠绕线型的封头质量相近, 螺旋缠绕线型封头的质量大于平面缠绕线型。

3) 相同缠绕线型的综合性能系数  $pV/W$  相近, 平面缠绕线型的封头的  $pV/W$  值优于螺旋缠绕线型。

表 2 后封头性能参数对比				
Tab. 2 Comparison of performance parameters for rear dome				
实例	封头类型	$V/\text{m}^3$	$W/\text{kg}$	$pV/W$
Ex. 1	平面缠绕封头	0. 178 4	1. 72	1. 037 2
Ex. 2	平面缠绕椭球封头	0. 179 6	1. 79	1. 003 0
Ex. 3	螺旋缠绕封头	0. 193 0	2. 27	0. 850 2
Ex. 4	螺旋缠绕椭球封头	0. 179 6	2. 11	0. 852 5

综上, 相同缠绕线型的缠绕角、壁厚和性能参数接近, 平面缠绕线型封头质量轻、 $pV/W$  值高, 螺

旋缠绕线型纤维受力较好。为了避免封头曲面曲率的不连续性,同时考虑设计和加工的便捷性,推荐采用螺旋缠绕椭球封头或平面缠绕椭球封头。

## 4 结 论

本文基于复材容器的参数模型,系统研究了壳体筒段和封头的设计方法,完成了螺旋缠绕封头、螺旋缠绕椭球封头、平面缠绕封头和平面缠绕椭球封头等 4 类封头控制方程的建模,通过对 4 种后封头实例的子午线、缠绕角、壁厚、纤维应力以及综合性能参数对比,发现相同缠绕线型的封头设计结果相似,建议根据实际应用情况采用螺旋缠绕椭球封头或平面缠绕椭球封头,以避免子午线曲率的拐点,同时有利于加工制造。

### 参考文献:

- [1] 王婉君,张鹏,贺政豪,等. 碳纤维复合材料压力容器的研究进展[J]. 现代化工,2020,40(1): 68-71.
- [2] 冯雪,沈俊,田桂,等. 复合材料压力容器在航天领域的应用研究[J]. 火箭推进,2014,40(4): 35-42.  
FENG X, SHEN J, TIAN G, et al. Research of composite over-wrapped pressure vessels for space application [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2014, 40(4): 35-42.
- [3] 陈军军,田桂,沈俊,等. “柱形”铝内衬纤维缠绕复合材料气瓶自紧分析[J]. 火箭推进,2014,40(3): 57-62.  
CHEN J J, TIAN G, SHEN J, et al. Analysis on autofrettage of filament-wound composite cylinder[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2014, 40(3): 57-62.
- [4] 晏飞. 纤维缠绕/金属内衬复合材料气瓶应力分析[J]. 火箭推进,2011,37(1): 46-50.  
YAN F. Stress analysis of filament-wound composite gas cylinders with metal liner[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2011, 37(1): 46-50.
- [5] ROSATO D V, GROVE C S. Filament winding: its development, manufacture, applications, and design [M]. [S. l.]: Interscience Publishers, 1964.
- [6] SHIBLEY A M. Filament winding [M]//Handbook of composites. Boston, MA: Springer US, 1982: 449-478.
- [7] PETERS S T, HUMPHREY W D, FORAL R F. Filament winding composite structure fabrication [M]. [S. l.]: SAMPE International Business Office, 1991.
- [8] ZU L, KOUSSIOS S, BEUKERS A. Design of filament-wound domes based on continuum theory and non-geodesic roving trajectories[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(9): 1312-1320.
- [9] FUKUNAGA H, UEMURA M. Optimum design of helically wound composite pressure vessels [J]. Composite Structures, 1983, 1(1): 31-49.
- [10] HOJJATI M, SAFAVI ARDEBILI V, HOA S V. Design of domes for polymeric composite pressure vessels[J]. Composites Engineering, 1995, 5(1): 51-59.
- [11] 李长鹏,谢淮北,刘力红. 纤维缠绕超高压容器承载特性研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(2): 25-30.
- [12] 何朋飞. 碳纤维缠绕压力容器结构设计及其有限元分析[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2018.
- [13] 周吉. 纤维缠绕压力容器的强度分析和优化设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [14] 矫维成,王荣国,刘文博,等. 纤维缠绕复合材料压力容器封头厚度预测[J]. 复合材料学报, 2010, 27(5): 116-121.
- [15] 祖磊,穆建桥,王继辉,等. 基于非测地线纤维缠绕压力容器线型设计与优化[J]. 复合材料学报, 2016, 33(5): 1125-1131.
- [16] DE CARVALHO J, LOSSIE M, VANDEPITTE D, et al. Optimization of filament-wound parts based on non-geodesic winding[J]. Composites Manufacturing, 1995, 6(2): 79-84.
- [17] KIM C U, KANG J H, HONG C S, et al. Optimal design of filament wound structures under internal pressure based on the semi-geodesic path algorithm [J]. Composite Structures, 2005, 67(4): 443-452.
- [18] LIANG C C, CHEN H W, WANG C H. Optimum design of dome contour for filament-wound composite pressure vessels based on a shape factor [J]. Composite Structures, 2002, 58(4): 469-482.
- [19] TEW B W. Preliminary design of tubular composite structures using netting theory and composite degradation factors[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1995, 117(4): 390-394.
- [20] 陈汝训. 固体火箭发动机设计与研究[M]. 北京: 宇航出版社, 1992.
- [21] 周敏,王志辉. 纤维缠绕压力容器封头段的网络分析[J]. 机械制造, 2010, 48(8): 39-41.