

金属内衬复合材料高压气瓶研制技术

王祥龙 程 彬 刘志栋

(兰州空间技术物理研究所, 兰州 730000)



摘要: 介绍了纤维缠绕金属内衬压力容器的工艺特点、性能优势和爆破前先泄漏(LBB)的安全失效模式, 以及一般设计原则、材料和工艺要求。以某型号航天器携带的高压气瓶为例, 详细阐述了复合材料高压气瓶的研制情况。

关键词: 复合材料高压气瓶; 金属内衬; 结构设计

The Techniques to Develop the Composite High- pressure Vessel with Metalliner

Wang Xianglong Cheng Bin Liu Zhidong

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000)

Abstract: The technique characteristics , performances and safety failure mode of leakage before burst for filament wound pressure vessel with metal liners were introduced in this paper. The general principle, material and technology requirement in design for the vessel were also presented. This paper take the composite pressure Vessel as example which is carried by spacecraft, describe the structure design and research of the Composite Pressure Vessel appliances in detail.

Key words: composite pressure vessel; metalliner; structure design

1 引言

高压气瓶作为高压气体介质的贮存设备, 在各类航天器系统中都有着相当广泛的应用。与金属气瓶中质量效率最高的钛合金气瓶相比, 采用高性能碳纤维缠绕的复合材料气瓶可节省重量约 20%~50%左右, 而且气瓶工作压力越高, 减重效果越明显。并且气瓶的可靠性高, “爆破前先泄漏”(LBB)的失效模式安全。国外航天技术先进国家在 20 世纪 60 年代末期就已经开始了复合材料压力容器在空间系统中的应用, 主要是玻璃纤维和凯夫拉纤维缠绕的复合材料气瓶, 到了 80 年代中期以后, 随着高性能碳纤维制造工艺的日趋成熟和稳定, 复合材料压力容器在国外空间系统中的应用已非常广泛, 许多著名的卫星平台, 如 HS-601、HS-702、Eurostars-2000⁺以及国际空间站

各舱段中的高压气瓶都采用纤维缠绕复合材料高压气瓶^[1]。近年来, 高性能的复合材料高压气瓶在我国航天器上也得到了广泛使用。本文以某型号用复合材料高压气瓶为研究背景, 详细阐述了复合材料高压气瓶研制技术。

2 设计指标

气瓶容积: $\geq 30\text{L}$;

工作介质: 氦气;

额定工作压力: 60MPa (20℃下);

气瓶重量: $\leq 18.5\text{kg}$ (不含工作介质);

强度试验压力: 90MPa;

爆破压力: $\geq 150\text{MPa}$;

外漏率: 工作压力下, 不大于 $1.0 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$;

作者简介: 王祥龙 (1976-), 硕士, 机械设计及其自动化专业; 研究方向: 航天压力容器设计与试验。

收稿日期: 2012-10-24

疲劳次数：额定工况下，用水压反复加排次数不小于 100 次。

3 气瓶设计

复合材料气瓶由气瓶内衬和复合层两部分组成。内衬的功能主要是包容贮存介质，防止介质泄漏；作为缠绕芯模，并提供对外接口和界面；在纤维增强型复合材料气瓶中承担部分内压载荷。复合层的功能主要是承担气瓶的内压载荷。

3.1 气瓶内衬设计

通常可作为复合材料压力容器内衬材料的金属有铝合金、不锈钢、钛及钛合金、Monel 合金（Ni-Cu

合金）及 Inconel 合金（Ni-Cr 合金）等。可根据以下特点进行选择^[2]：

- a. 密度低，比屈服强度和比极限强度高；
- b. 与工作介质相容性好；
- c. 低周疲劳特性和高周疲劳特性好；
- d. 抗裂纹增长性能好,以保证寿命；
- e. 焊接性能好；
- f. 加工、成型性能好；
- g. 抗腐蚀性好。

综合以上因素，本次复合材料气瓶设计中，内衬材料选用工业纯钛，其中柱段和封头采用塑性较好的 TA1，接头采用具有一定塑性，并且强度较高的 TA3。复合材料高压气瓶内衬材料参数见表 1。

表 1 复合材料高压气瓶内衬材料参数

材料名称	拉伸强度/MPa	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa	密度/kg m ⁻³	延伸率 δ ₅ /%
TA1	370	290	105	4510	≥30
TA3	540	460	107	4550	≥20

3.2 内衬结构设计

内衬由接头、气口端封头、筒段、密封端封头四部分组成，各部分通过焊接方式进行连接，具体结构如图 1 所示。为了提高气瓶的性能因子（pv/m），充分发挥纤维的作用，内衬通常设计为薄壁结构，壁厚取决于机械加工能力、气瓶疲劳寿命、复合层缠绕工艺等。

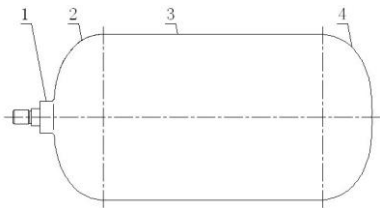


图 1 复合气瓶内衬结构图

1—气瓶接头 2—气口端封头 3—筒身段 4—密封端封头

3.2.1 气瓶接头结构设计

在气瓶的气口端封头上设计有气瓶接头，气瓶接头在气瓶结构中的作用是与外部结构连接和为缠绕提供挂丝台。

挂丝台直径主要由纤维缠绕工艺确定，挂丝台直径越大，缠绕角越大，纤维缠绕稳定性越好，缠绕工艺越容易。但挂丝台直径增大后，接头重量将增加，所以在确定挂丝台直径时要综合考虑。

气瓶接头应保证有足够的强度余量，在实际工况下应处于弹性形变范围。接头壁厚和肩部厚度应满足公式（1）和（2）的要求：

$$t \geq \frac{r_0 p}{\sigma_b + p} \tag{1}$$

$$\delta \geq \frac{r_0 p}{2\tau_s} \tag{2}$$

式中：t——接头壁厚，mm；r₀——封头极孔半径，mm；p——气瓶工作压力，MPa；σ_b——材料抗拉强度，MPa；δ——接头肩部壁厚，mm；τ_s——材料剪切强度，MPa。

3.2.2 封头结构设计

封头结构有椭球面缠绕封头、等张力封头、平面缠绕封头等。等张力封头在均匀内压下封头各点纤维应力都相等，且等于筒身螺旋缠绕纤维应力，纤维强度可以得到最充分的利用，所以在设计中内衬两端封头均采用 等张力封头结构。封头曲面对应的旋转母线由等张力曲线方程（3）给出。

$$z(r) = R \times \int_r^1 \frac{x^3}{\sqrt{x^2 - (\Phi_1 / \Phi)^2} \sqrt{1 - (\Phi_1 / \Phi)^2} - x^6} dx \tag{3}$$

(0.3≤r≤1)

式中，r 为径向坐标，R 为内衬外半径，Φ₁ 为挂

丝台直径， Φ 为内衬外径。等张力封头外曲面加工时严格按旋转母线坐标编程。由于纤维无法缠绕到接头根部，该部位的结构强度应全部由金属材料提供，因此，挂丝台处的内衬厚度必须要确保该处的强度要求，并留有一定的安全余量。

3.2.3 内衬表面处理

内衬焊接后，需对其进行清洗，表面不得有污渍、划伤等缺陷。在缠绕前，用环氧树脂对表面进行处理，使纤维和内衬能够很好粘接。

3.3 气瓶复合层设计

3.3.1 复合层材料选择

纤维是复合材料的主要承载部分，承担绝大部分

(75%~95%) 的压力载荷^[3]。为了降低气瓶的质量，提高气瓶的性能，应尽量选择高强度和高模量、低密度纤维材料；强度越高表明纤维承受载荷能力越强，就越能发挥纤维的增强作用；而高模量可以保证产品结构的稳定性；密度越低，可以有效降低产品重量。通常采用的纤维材料有玻璃纤维、凯夫拉纤维和碳纤维等。玻璃纤维和凯夫拉纤维相对于碳纤维密度较大、比强度较低，目前在航天产品上已基本被碳纤维取代。碳纤维在 20 世纪 80 年代开始得到大量使用，目前航天产品上主要的规格有 T700 和 T1000，本次气瓶研制纤维选用碳纤维 T700，具体参数见表 2。

表 2 复合材料高压气瓶碳纤维材料参数

材料名称	拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa	断裂延伸率/%	密度/kg m ⁻³	线密度/g m ⁻¹
T700	4900	230	2.1	1800	0.80

3.3.2 复合层设计

气瓶复合层设计包括复合层强度设计、缠绕线型和铺层顺序的确定。纤维的缠绕线型包括环向缠绕、螺旋缠绕和平面缠绕。其中圆柱段有环向缠绕、螺旋缠绕和纵向缠绕 3 种方式，由此可构成 4 种主要的组合线型：单螺旋缠绕、螺旋缠绕加环向缠绕、螺旋缠绕加纵向铺放、环向缠绕加纵向铺放。封头缠绕既可采取螺旋缠绕，也可采用平面缠绕，具体采取何种线型取决于内衬的结构形式，如封头形状、极孔尺寸、内衬长径比等。根据该气瓶内衬的等张力封头结构特点，在圆柱段采用单一缠绕线型无法满足各方向的强度要求，必须采用组合线型的缠绕方式；等张力封头不适宜于采用平面缠绕线型，只能进行螺旋缠绕。因此，气瓶圆柱段采取螺旋缠绕加环向缠绕的组合线型，纵向强度由螺旋向纤维提供，环向强度则由螺旋向纤维和环向纤维共同提供；封头部位只进行螺旋纤维缠绕，封头上纵向和环向强度均由螺旋线型提供。

3.3.2.1 缠绕角设计

缠绕角的大小取决于内衬极孔直径与纬度圆直径的比值，即缠绕角 $\alpha=\arcsin(d_0/D)$ ，其中 d_0 为内衬极孔直径， D 为纬度圆直径。

螺旋缠绕在封头上为测地线轨迹，其缠绕角从极孔处的 90°连续减小到柱段处的 α_0 ，封头上不同纬度圆处的缠绕角大小可利用公式 $\alpha=\arcsin(d_0/D)$ 来具体确定。圆柱段上的环向缠绕角保持 90°不变。

3.3.2.2 筒身段复合层强度设计

根据网络理论中关于纤维厚度与气瓶压力之间的关系方程：

$$h_{fa} = D_m P_b / 4K_\alpha \sigma_b \cos 2\alpha_0 \tag{4}$$

$$h_{f\theta} = D_m P_b (2 - \tg 2\alpha_0) / 4K_\theta \sigma_b \tag{5}$$

式中： h_{fa} 为螺旋缠绕纤维厚度； $h_{f\theta}$ 为环向缠绕纤维厚度； D_m 为气瓶圆柱段平均直径； P_b 为气瓶设计爆破压力； α_0 为圆柱段缠绕角； σ_b 为纤维拉伸强度（计算时取 4500MPa）； K_α 为螺旋缠绕纤维强度发挥系数； K_θ 为环向缠绕纤维强度发挥系数。

在纤维缠绕层厚度已知的情况下，缠绕层铺层数目可按如下方程进行计算：

$$N_\alpha = h_{fa} / A_0 m_{0\alpha} \tag{6}$$

$$N_\theta = h_{f\theta} / A_0 m_{0\theta} \tag{7}$$

式中： N_α 为螺旋向纤维缠绕层数； N_θ 为环向纤维缠绕层数； A_0 为每束纤维的横截面积； $m_{0\alpha}$ 为螺旋缠绕纤维束密度，即单位长度上螺旋缠绕纤维束的数目，其值等于螺旋缠绕纤维带距的倒数； $m_{0\theta}$ 为环向缠绕纤维束密度，即单位长度上环向缠绕纤维束的数目，其值等于环向缠绕纤维带距的倒数。

4 试验验证

(下转第 30 页)

