

70MPa 铝内胆碳纤维全缠绕复合气瓶结构设计

王旻昱

(天津核工业理化工程研究院 天津 300180)

摘 要:储氢瓶作为高压气态储氢的容器,用于氢燃料电池产业上下游的主要环节,复合材料气瓶由于其质量轻、强度大、结构设计灵活 等优点成为车载储氢设备的首选。对70MPa铝内胆碳纤维全缠绕复合气瓶设计的关键问题开展研究,采用GB/T35544—2017《车用压缩 氢气铝内胆碳纤维全缠绕气瓶》标准确定设计要求,通过理论计算得到气瓶主要结构参数,使用有限元方法进行仿真计算分析,验证结构 设计合理性,为气瓶的设计提供理论依据。

关键词:复合材料;储氢瓶;有限元;结构设计

0 引言

碳达峰、碳中和是我国经过深思熟虑做出的重要战略决策,发 展绿色能源、促进低碳转型是现阶段的主要目标,氢能作为一种零 碳能源,是目前最具潜力的二次能源,在"双碳"政策的大背景下, 氢能将获得长足发展。

当前氢能产业发展主要通过交通领域带动,氢能利用的完整链 条包括生产、储存、运输、应用等几个方面,决定氢能能否广泛应 用的关键是安全可靠的储氢技术。高压气态储氢因具有设备结构简 单、压缩氢气制备能耗低、充装和排放速度快等优点,在目前氢能 储输方式中占据主导地位。储氢瓶是高压气态储氢的容器,用于氢 燃料电池产业上下游的主要环节,复合材料气瓶由于其质量轻、强 度大、结构设计灵活等优点成为车载储氢设备的首选。

根据制造的材质和工艺,储氢瓶一般分为四型,目前国内外市 场应用较多的是铝内胆碳纤维全缠绕复合气瓶(III型气瓶),根据工作 压力分为 35MPa 和 70MPa 两个等级。本文对 70MPa 铝内胆碳纤维 全缠绕复合气瓶设计的关键问题开展研究,采用 GB / T 35544— 2017《车用压缩氢气铝内胆碳纤维全缠绕气瓶》标准确定设计要求, 通过理论计算得到气瓶主要结构参数,使用有限元方法进行仿真计 算分析,验证结构设计合理性。

1 设计要求

本研究设计的铝内胆碳纤维全缠绕气瓶的主要技术指标见表 1: 表1 气瓶设计指标

主要参数	数值
容积(L)	28
工作压力(MPa)	70
许用压力(MPa)	87.5
最小爆破压力(MPa)	164.5

本研究参考 GB / T 35544—2017《车用压缩氢气铝内胆碳纤维 全缠绕气瓶》标准进行结构设计,设计基本要求如下:

- (1)内胆应采用 6061 铝合金;
- (2) 铝内胆端部采用渐变厚度设计, 筒体与端部圆滑过渡;
- (3)纤维应力比不低于 2.25;
- (4) 气瓶最小爆破压力应不低于 2.25 倍公称工作压力;
- (5)设计循环次数为7500次。

2 铝内胆复合材料气瓶结构设计

2.1 内衬结构设计

椭球形封头因其受力较为均匀、工艺性能好、存储空间利用率 高,是目前绝大多数复合材料气瓶采用的结构。综合考虑强度和加 工工艺可行性,封头椭球比选取√2。

对于复合材料气瓶,内衬不是主要受力承载体,所要求的尽可能的减小壁厚,结合加工工艺可行性,内衬筒身段厚度取 5.5mm, 气瓶内衬的主要几何参数如下图所示:



图 1 铝合金内胆几何尺寸

依据 GB / T 35544—2017 对材料选用的规定, 铝合金内衬选用 铝合金 6061-T6, 材料参数见表 2。

表 2 铝合金 6061-T6 材料性能参数

密度(kg/m³)	弹性模量	泊松比	屈服强度		
	(GPa)		(MPa)		
2800	69	0.3	280		

2.2 复合材料层结构设计

气瓶受内压情况下,纤维层主要受到径向和环向的拉伸力,采
 用螺旋缠绕加环向缠绕筒身的方式进行结构设计。螺旋层缠绕角为
 ± α ,根据网格理论计算公式可得:

$$\alpha_0 = \sin^{-1}(\frac{r_0}{R}) \tag{1}$$

式中r₀为极孔处半径, R为筒体半径。将螺旋纤维层和环向纤维 层的应力叠加,得静力平衡方程:

$$N_{z} = \sigma_{f\alpha} t_{f\alpha} \cos^{2} \alpha$$

$$N_{\theta} = \sigma_{f\alpha} t_{f\alpha} \sin^{2} \alpha + \sigma_{f\theta} t_{f\theta}$$
(2)

式中符号 N_z 、 N_θ 表示简体轴向、环向薄膜内力, $\sigma_{f\alpha}$ 、 $\sigma_{f\theta}$ 表 示螺旋缠绕层和环向缠绕层纤维方向的应力, $t_{f\alpha}$ 、 $t_{f\theta}$ 表示螺旋纤 维层和环向纤维层的厚度。根据薄膜理论可得简体轴向、环向薄膜 内力分别为:

$$N_z = \frac{1}{2} R p \tag{3}$$

$$N_\theta = R p$$

式中p为气瓶内压。当薄膜内力最大时,纤维应变达到极限,应

力达到纤维发挥强度,如果纤维为相同材料,纤维应力相等,则有:

$$\varepsilon_{max}E_f = \sigma_f \tag{4}$$

其中 σ_{f} 为纤维发挥强度,当内压达到最大时,将式(2)、(3) 代入式(1),求解方程得到纤维厚度:

$$t_{f\alpha} = \frac{Rp_{max}}{2\sigma_f \cos^2 \alpha}$$

$$t_{f\theta} = \frac{Rp_{max}(2 - \tan^2 \alpha)}{2\sigma_f}$$
(5)

代入σ。即可得到环向层与螺旋层的厚度。

材料选取 T700 级碳纤维, 拉伸强度取 3000MPa, 引入纤维强度 发挥系数 k, 取值 0.75, 将上一节确定的内胆结构尺寸代入式(1) 和(5),得到环向纤维层厚度为 8.7mm, 螺旋纤维层厚度为 4.8mm, 缠绕角为 15°。

3 气瓶应力分析

采用 ANSYS 有限元软件建立三维模型,通过 ACP 模块设置复合材料参数、铺层顺序、铺层厚度及角度,形成复合材料气瓶模型 见图 2。



图 2 复合材料气瓶有限元模型

在气瓶底部端面施加轴向位移为零的位移边界条件;载荷边界 条件为气瓶口部端面受拉应力σ,具体为:

$$\sigma = \frac{{d_0}^2}{{d^2} - {d_0}^2} \pi p \tag{6}$$

按顺序施加4个载荷步,分别为:自紧压力95MPa、零压力0MPa、 工作压力70MPa、最小爆破压力164.5MPa,计算得到气瓶内衬、纤 维层的应力云图。下面以工作压力70MPa为例给出铝内胆、碳纤维 环向层、碳纤维螺旋层的应力计算结果。其余工况下的计算结果列 于表3。



图 3 铝合金内胆等效应力



Universe Scientific Publishing

(a)环向层纤维方向应力 图 4 复合材料层纤维方向应力

表 3 气瓶不同工况下应力计算结果

结构及应力 类型	零压力	工作 压力	许用 压力	最小爆 破压力
铝内胆 Mises 应力/MPa	276	204	246	298
环向层纤维方向应力/MPa	201	844	1024	1965
螺旋层纤维方向应力/MPa	241	698	823	1925

查阅文献得到 6061-T6 合金 S-N 曲线,应力幅值与循环次数的 函数关系式可表达为式(7),根据设计要求循环次数 N=7500,则应 力幅值 S=263MPa。

$$S = \frac{14479}{\sqrt{N}} + 96.5 \tag{7}$$

根据计算结果,许用压力 87.5MPa 下,铝内胆筒身 Mises 应力 最大值为 246MPa,零压力下筒身 Mises 应力最大值为 276MPa,则 等效应力幅值为 261MPa<SN=7500,满足设计要求。

4 结论

本文对 70MPa 铝内胆碳纤维全缠绕气瓶结构设计,通过理论计 算得到气瓶主要结构参数,使用有限元方法进行仿真计算分析,结 论如下:

(1)采用 GB/T 35544—2017《车用压缩氢气铅内胆碳纤维全 缠绕气瓶》标准,通过网格理论确定了气瓶内胆筒身结构、封头结 构、复合材料层结构。

(2)根据有限元计算结果,所设计的气瓶纤维应力比为 2.32, 理论循环次数大于 7500 次,满足设计要求,建议开展缠绕工艺试验。

参考文献

1 杨文刚,李文斌,林松,贾晓龙.碳纤维缠绕复合材料储氢气瓶的 研制与应用进展[J].玻璃钢/复合材料,2015,12:99-104.

2 欧训民. 氢能制取和储存技术研究发展综述[J]. 能源研究与 信息, 2009,01:14+16.

3 李冬燕. 储氢技术研究进展[J]. 河北化工, 2007,02:11-13+15.

4 秦玉琪,袁奕雯,杨振国.纤维缠绕储氢气瓶及燃料汽车应用现 状综述[J]. 中国特种设备安全, 2018,01(35):70-75

5 周威威.复合材料气瓶内衬稳定性分析及爆破压力研究[D].杭州:浙江大学,2013.

6 YAHR G T. Fatigue design curves for 6061 — T6 aluminum[J]. Journal of Pressure Vessel Technology. 1997, 119(2); 211 — 215. DOI: 10. 1115 / 1. 2842286

作者简介:

王旻昱(1994.11-),男,汉族,山东龙口人,助理研究员,硕 士研究生,核工业理化工程研究院,研究方向:复合材料结构设计。