

文章编号 :1006-279X(2000)04-0057-04

碳纤维复合材料高压球形容器研制^①

曾金芳,严秀侠,王庭武

(中国航天科技集团公司四院四十三所,西安 710025)

摘要 采用变带距方法对球形容器进行优化设计,并研制了一批产品。试验结果表明,在纤维设计应力相同条件下,采用变带距缠绕的球形容器,其复合材料重量比等带距缠绕的轻 24.6%,而其容器特性系数高出 10.4%,能同时满足设计提出的强度和重量两方面要求。

关键词 球形容器,缠绕工艺,高压容器,碳纤维增强复合材料

中图分类号 TB332 **文献标识码** A

1 引言

轻质复合材料压力容器在民用、航天等领域应用日趋广泛。其结构形式一般为圆筒形,这是因为圆筒形复合材料压力容器的设计和制造工艺简单,容易制作等强度结构且容器特性系数比较高。而复合材料球形容器设计计算复杂、成型工艺比较难,而且很难设计成等强度结构,容器特性系数较低。因此,大容积的复合材料球形容器未曾多见。但许多航天或导弹系统都需要轻质高强的复合材料球形容器^[1,2],如阿里安 5 火箭的姿控系统。作者在系统分析和实验基础上,采用变带距设计与工艺方法,研制出了容器特性系数较高的球形容器,满足了设计对强度和重量两方面要求。

2 理论分析

2.1 受力分析

根据文献[3]介绍,两端开口的球形容器在内压作用下,器壁上所承受的经向内力及纬向内力分别为

$$N_1 = \frac{PR}{2} \left(1 - \frac{x_0^2}{x^2} \right)$$

$$N_2 = \frac{PR}{2} \left(1 + \frac{x_0^2}{x^2} \right)$$

式中 N_1 为经向内力; N_2 为纬向内力; P 为容器承受的内压(这里用设计爆破压强计算,MPa); R

为容器半径(mm); x_0 为容器开口半径(mm); x 为过球面上任意一点的纬度圈半径(mm)。

球形容器在内压作用下器壁受力状态如图 1 所示。

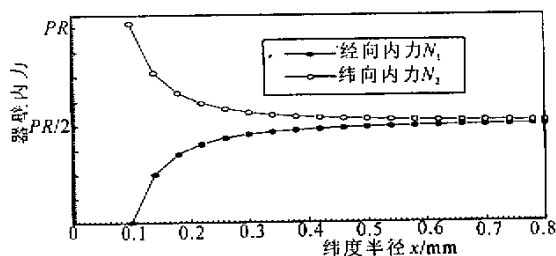


图 1 两端开口球壳内压作用下器壁薄膜力

Fig.1 Vessel wall membrane stress of spherical vessel with double ended opening under internal pressure

2.2 结构层次设计

2.2.1 球形容器缠绕成型过程简介

要在球面上实现稳定缠绕,纤维轨迹必须是球面上的测地线,即球面上直径最大的圆。因此,球形容器缠绕成型过程如下:先在开口处缠绕一定循环的纤维来满足开口处附近的强度要求。由于纬度越低,纬度圈的半径越大,过该纬度圈的纤维密度越小,所以必须在较开口低的纬度处缠绕一定循环的纤维。这样又形成了一个比开口大的包络圈,

① 收稿日期 2000-02-25,修回日期 2000-05-19。

作者简介:曾金芳(1968-),男,博士,主要从事高性能聚合物结构复合材料研究。

满足了该纬度附近的强度要求。然后再在纬度更低的地方缠绕,直到赤道附近,从而满足了球形容器各纬度处的强度要求,见图2。

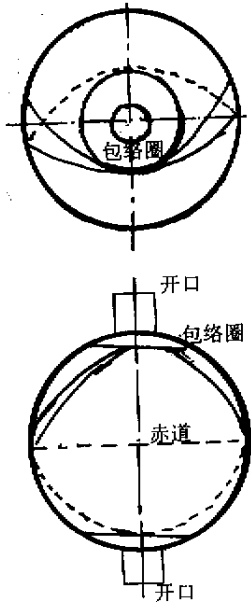


图2 球形容器缠绕过程示意图

Fig.2 Winding process diagram of spherical vessel

2.2.2 计算方法

首先用开口(即极孔)处的纬向内力来确定该处包裹圈所需的纤维用量,即该处的缠绕循环数。计算这些缠绕循环的纱带在各纬度处提供的强度,并分别与容器在受内压时同纬度处的内力相比较。从极孔处开始,若纱带提供的强力大于内力,则比较下一点,若小于内力,则以该纬度圈做开口开始另一个缠绕循环。然后将该处纱带提供的强力与前些循环提供的叠加,再与内力比较,这样依次计算下去,直到赤道附近。

各缠绕循环纱带提供的强力为

$$T_1 = nf \cos^2 \alpha$$

$$T_2 = nf \sin^2 \alpha$$

式中 T_1 为纱带提供的经向强力; T_2 为纱带提供的纬向强力; f 为股纱强力(N/股); n 为过各纬度圈的纤维密度(根/cm); α 为各纬度处的缠绕角。

且有

$$n = n_e \frac{R \cos \alpha_e}{x \cos \alpha}$$

式中 n_e 为赤道处纤维密度; α_e 为赤道处的缠绕角。

各处缠绕角由下式计算:

$$\alpha = \arcsin \frac{x_0}{x}$$

式中 x_0 为包裹圈半径(mm); x 为各点纬度圈半径(mm)。

3 试验

3.1 原材料

使用 PAN 基碳纤维,基体为环氧/胺体系配方,原材料性能如表1所示。

表1 原材料性能

Tab.1 Properties of raw materials

材料	拉伸强度 MPa	拉伸模量 GPa	延伸率 (%)	密度 g/cm ³
HTA-P30	3 830	230	1.87	1.78
AE4	90	3.7	3~6	1.22

注:HTA-P30 为纤维的牌号;AE4 为基体代号。

3.2 设备

LC-800 立式缠绕机;
微机控制缠绕机;
水压试验检测系统。

3.3 试验件制作

3.3.1 技术指标

球内径 $\Phi 160\text{mm}$, 开口直径 $\Phi 20\text{mm}$;
爆破压强 $\geq 20\text{MPa}$;
复合材料重量 $\leq 220\text{g}$ 。

3.3.2 缠绕层次确定

球形容器结构层次设计时需要计算各纬度处纤维提供的强力。为了保证计算精度,计算时各纬度圈必须取得较密。从容器开口到赤道共取了15个点,为了便于计算,编制了球形容器结构层次自动计算程序。设计初期,采用等带距设计,该方法在强力上能保证,但由于球形容器受力特点,在某些纬度处纤维提供的强力过高,从而消极质量过大,使得复合材料重量超过设计要求;在试验基础上,设计了一个可根据不同纬度处强力的要求,在

计算过程中实时调节带距,从而在保证强力要求的条件下,最大限度减少复合材料重量,即实现优化设计。具体计算结果如表2及图3所示。

表2 缠绕结构层次参数

Tab.2 Layer parameters of wound structure

层次序号		1	2	3	4	5	6
等带距设计	缠绕角/(°)	8.62	14.4	23.21	35.87	57.28	75.44
	带距/mm	3	3	3	3	3	3
变带距设计	缠绕角/(°)	8.62	14.4	23.21	32.62	47.24	76.09
	带距/mm	4	4	3.5	3.3	3.2	3

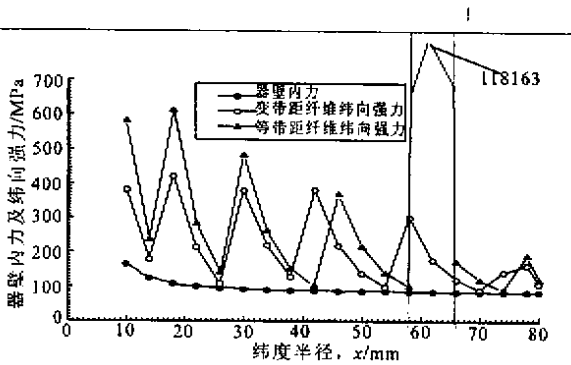


图3 不同设计方法对纤维提供纬向强力的影响

Fig.3 Influence of variable design methods on fiber supported weft strength

由图3可以看出,变带距设计的球形容器,其纤维提供的纬向强力高于受内压时器壁内力而小于等带距设计球形容器纤维提供的纬向强力,即变带距设计可减轻复合材料的重量。

3.3.3 试验件制备

以预先包覆耐强氧化介质腐蚀薄膜的铝内衬为芯模(正式产品需将铝内衬去掉,只留薄膜内衬),采用HTA-P30碳纤维预浸带干法缠绕成型。为了确保各包络圈的位置,先在LC-800缠绕机上缠绕1~2纵向循环,其它纵向层次在微机控制缠绕机上缠绕。容器缠绕完后,先在室温下放置一定时间,然后放到烘箱中,并以1°C/min的升温速度按“RT→90°C/3h→130°C/4h→150°C/5h→自然降温”制度固化。

3.3.4 水压爆破试验

球形容器固化完后,进行水压爆破试验。

4 试验结果

4.1 球形容器外观

球形容器的外观如图4所示。

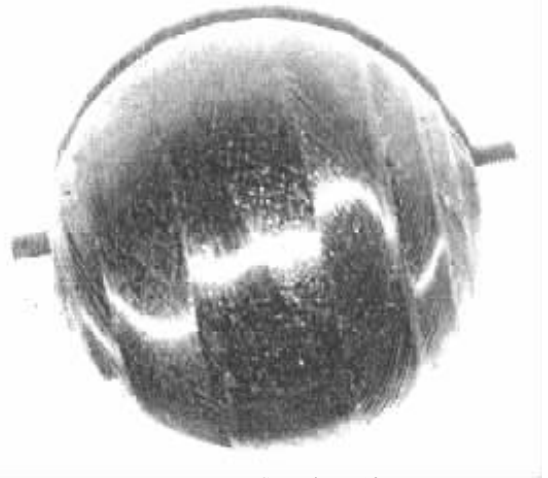


图4 球形容器外观

Fig.4 Appearances of spherical vessels

4.2 水压爆破试验结果及分析

水压试验结果如表3所示。

表3 球形容器水压试验结果

Tab.3 Hydroburst test results of spherical vessel

编号	设计方法	用纱量/g	爆破压强/MPa	PV/Wc
1	等带距	260	30	25.0
2	变带距	196	25	27.6

由表3可以看出,变带距缠绕的球形容器其复合材料重量比等带距缠绕的轻24.6%,而容器特性系数高10.4%。

球形容器的宏观破坏形貌如图5所示。



(a) 等带距

(b) 变带距

图5 球形容器破坏形貌

Fig.5 Appearances of bursted spherical vessels

由图5可知,等带距缠绕的球形容器水压爆破时主要从赤道处破坏,铝内衬挤出时将复合材料拉坏,容器只出现一个豁口,说明该容器各处的纤维提供的强力不太一致,容器在薄弱的赤道处首先破坏,各处纤维未能同时发挥作用;而变带距缠绕的球形容器水压破坏时,从一开口处开始破坏一直延续到另一开口,容器断裂成两半,说明该容器从开口到赤道处纤维提供的强力比较相近,在内压作用下纤维受力较均匀,消极质量小,容器特性系数高,结构合理。

5 结论

本文采用变带距设计球形容器,不仅满足了容器的强度要求,还减轻了容器的消极质量,为球形容器的优化设计提供了方法。

参考文献

- [1] Ronald B V, *et al.* Design and development of an aluminum lined composite overwrapped spherical pressure vessel [R]. AIAA-89-2642.
- [2] Toland R H, *et al.* Stress-rupture life of Kevlar/epoxy spherical pressure vessels [R]. UCID-17755.
- [3] 上海玻璃钢研究所. 玻璃钢结构设计 [M]. 中国建筑工业出版社, 1980.

Development of High Pressure Spherical Vessel of Carbon Fiber Composites

ZENG Jin-fang, YAN Xiu-xia, WANG Ting-wu

(The 43rd Institute of the Fourth Academy of CASC, Xi'an 710025, China)

Abstract In this paper, optimum design of spherical vessel using variable-bandwidth method and a batch of products are presented. The experimental results show that, with the same designed stress of fiber the weight of spherical vessels fabricated with variable-bandwidth is 24.6% lower than those with constant-bandwidth, while their performance factor of vessel is 10.4% higher than those with constant-bandwidth. It dicates that the design can meet with the designer's requirements both in strength and weight.

Key words spherical vessel; winding process; high pressure vessel; carbon fiber reinforced composite