

超薄钛内衬复合材料高压气瓶力学特性分析

顾森东, 石晓强, 徐 涛

(兰州空间技术物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 以卫星用超薄钛内衬 T1000 碳纤维增强复合材料高压气瓶为研究对象, 基于各向同性材料弹塑性理论及复合材料层合板理论, 建立三维有限元分析模型。通过对比分析金属内衬和复合材料层在不同内压下的位移、应力和应变分布规律, 得到了这种气瓶在各承压工况下的力学特性, 最后通过压力试验结果验证了有限元模型的准确性。研究表明: 当内压超过气瓶的工作压力时, 复合材料气瓶主要发生轴向变形, 且内衬既有弹性变形又有塑性变形, 复合材料层始终处于弹性变形。此外, 气瓶爆破失效薄弱点在筒体与封头的过渡区域, 在不均匀应变的作用下易沿环向发生撕裂而爆破。本文的研究成果可为超薄内衬复合材料高压气瓶的设计、试验等提供参考依据。

关键词: 钛内衬; T1000 碳纤维; 复合材料压气瓶; 数值模拟

中图分类号: V 414.8

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.04.010

Analysis on Mechanical Properties of Ultra-thin Titanium-Lined Composite High-Pressure Vessels

GU Sendong, SHI Xiaoqiang, XU Tao

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 73000, Gansu, China)

Abstract: A T1000 carbon fiber-reinforced composite high-pressure vessel with an ultra-thin titanium liner for satellite applications is studied. A three-dimensional finite element (FE) model is established based on the elastic-plastic theory for isotropic materials and the laminated plate theory for composite materials. The displacement, the strain distribution, and the stress distribution of the metal liner and the laminated composite under different internal pressure conditions are compared and analyzed, and thus the mechanical properties of this kind of vessels under different internal pressure conditions are obtained. The validity of the FE model is verified by the pressure test results. It is shown that, when the internal pressure exceeds the operating pressure of the vessel, the composite vessel mainly deforms along the axial direction, the ultra-thin titanium liner has both elastic deformation and plastic deformation, while the laminated composite only has elastic deformation. In addition, the weak point for vessel burst failure is located in the transitional region between the cylinder and the head of the vessel. Under the action of non-uniform strain, the vessel is easy to tear and burst along the hoop direction. The research results of the present paper can provide references for the design and test of ultra-thin lined composite high-pressure vessels.

Key words: titanium liner; T1000 carbon fiber; composite pressure vessel; numerical simulation

0 引言

复合材料气瓶相对于全金属气瓶, 具有重量轻、承压能力强、可靠性高、抗疲劳性能好等优点, 在航天领域的应用越来越广。但随着航天新技术和新装备的发展, 对复合材料气瓶的质量和性能提

出了更加苛刻的要求。航天用复合材料气瓶具有内外双层结构, 内层为金属内衬结构, 一般为不锈钢、钛合金或铝合金等; 外层为纤维增强树脂基复合材料结构, 其承担了主要的压力载荷^[1-2]。采用超薄金属内衬和高强碳纤维增强复合材料是世界各

收稿日期: 2019-09-21; 修回日期: 2019-10-23

作者简介: 顾森东(1986—), 男, 博士, 主要研究方向为航天复合材料压力容器结构设计、仿真分析和试验。

国先进复合材料气瓶发展的重要方向^[3-5]。这种复合材料气瓶的整体力学特性十分复杂。在高压作用下,金属内衬层表现为材料非线性和几何非线性特征,复合材料则具有强烈的各向异性和非均质性的特点,纤维的缠绕角度、纤维厚度、铺层方式等参数对复合材料层力学性能的影响更加显著。

国内外研究人员对复合材料气瓶的力学特性进行了大量的研究,主要集中在理论分析和数值计算两个方面。在理论分析方面主要运用网格理论分析了筒体和封头的受力情况,并计算复合材料层的厚度和复合材料压力容器的爆破压力^[2,6-8]。在数值分析方面,主要运用数值模拟方法研究复合材料强度,分析复合材料气瓶的缠绕张力和应力应变规律等,从而优化设计方案^[9-13]。而对于超薄金属内衬 T1000 碳纤维增强复合材料高压气瓶,相关研究还不充分,缺少足够的数据库支持,对其力学特性的认知还远远不够。

因此,本文针对卫星用 0.8 mm 钛内衬 T1000 碳纤维增强复合材料高压气瓶,采用理论分析、数值模拟和试验研究相结合的方法,通过对比分析金属内衬和复合材料层在工作压力、验证压力和爆破压力下的位移、应力和应变分布规律,研究气瓶在各承压工况下的力学特性。这些研究对指导气瓶的结构设计和制定验证试验方案具有重要参考价值。

1 有限元模型建立

1.1 仿真结果

本文选用的复合材料气瓶结构如图 1 所示,其工作压力为 30 MPa,验证压力 45 MPa,爆破压力 60 MPa,容积为 90 L。

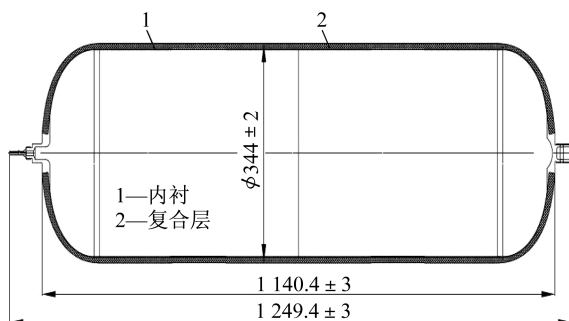


图 1 复合材料高压气瓶结构(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of the composite pressure vessel structure (unit: mm)

气瓶内衬结构为单极孔双接头等张力形封头圆柱形金属内衬,气瓶内衬结构由气口端接头、气口端封头、筒体、密封端封头和密封端接头 5 部分组成。气瓶的碳纤维增强复合材料层结构设计主要依据气瓶形状,纤维缠绕需保证气瓶各区域等强度,所以圆柱形筒体采取环向缠绕与螺旋缠绕的组合线型,纤维缠绕铺层次序如图 2 所示,封头采取螺旋缠绕线型。

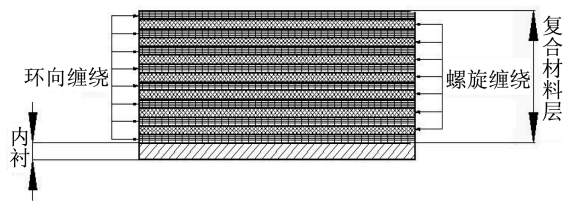


图 2 筒体处复合材料层结构图

Fig.2 Structure diagram of the laminated composite layer on the cylinder

环向缠绕角度为 90° ,螺旋缠绕角度 α 为

$$\alpha = \arcsin(d_0/D) \quad (1)$$

式中: d_0 为接头最大直径,mm; D 为内衬纬度圆直径,mm。当 D 等于内衬外径时,可得到筒体上的螺旋缠绕角度为 12° 。

螺旋缠绕在封头上为测地线轨迹,其螺旋缠绕角从极孔处到筒体处连续减小,封头上不同纬度圆处的缠绕角大小可利用式(1)来具体确定。

根据气瓶的性能要求,由网格理论设计的气瓶复合材料层结构参数见表 1。

表 1 复合材料层结构参数

Tab.1 Structure parameters of the laminated composite layer

位置	环向缠绕		螺旋缠绕	
	层数	厚度/mm	层数	厚度/mm
筒体	16	3.4	14	2.4
封头	0	0	14	根据式(2)

在封头曲面上的螺旋纤维缠绕层厚度 h_f 处于连续变化,其控制方程为

$$h_f = h_{fa} \sqrt{(D_0^2 - d_0^2)/(D^2 - d_0^2)} \quad (2)$$

式中: h_{fa} 为螺旋缠绕纤维厚度; D_0 为筒体直径。

1.2 网格划分与截面属性

本文基于 ANSYS 软件平台进行有限元建模和

分析,考虑到模型、载荷和约束条件的对称性,为了缩短运算时间,提供局部网格质量,减小计算误差,取整体气瓶的 1/4 建模。气瓶的内衬和复合材料层分别选用 8 节点三维实体单元 Solid95 和 4 节点三维壳单元 Shell181,有限元模型网格如图 3 所示。为了获得较规整的单元,避免局部区域出现较大计算误差或矩阵奇异而终止计算,气瓶内衬采用扫掠划分网格,并在应力集中区进行网格加密处理。在内衬外表面采用 Shell181 单元生成面网格,利用式(1)和式(2)计算得到的纤维缠绕厚度、角度等数据,通过面网格截面属性来设置纤维缠绕厚度、层数和角度。在筒体和封头的过渡区域,由于纤维在筒体是螺旋缠绕加环向缠绕,而封头只有螺旋缠绕,为了消除环向缠绕与螺旋缠绕的突变,在过渡区域的封头段设置了螺旋缠绕层渐变。按照式(2)计算,在封头根部附近发生了纤维堆积现象,在这里我们假设纤维的厚度保持在同一数值,但纤维缠绕角还是随纬度圆直径变化。

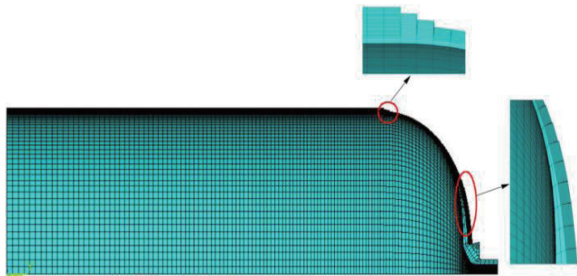


图 3 复合材料压气瓶有限元网格

Fig.3 Finite element meshes of the composite pressure vessel

1.3 材料模型及边界条件

本文中气瓶的复合材料层为碳纤维 T1000GB/环氧树脂 BA202,具体力学性能见表 2。钛内衬较

薄且受内压较大,要考虑到材料的非线性。气瓶的内衬材料为 TA1 工业纯钛,模型中采用双线性各向同性强化(BISO)模型来表示其室温下的应力-应变关系,如图 4 所示。

表 2 复合材料力学性能

Tab.2 Material properties of the composite

E_1/GPa	$(E_2=E_3)/\text{GPa}$	$(G_{12}=G_{13})/\text{GPa}$	G_{23}/GPa	$\mu_{12}=\mu_{13}$	μ_{23}
186	9.79	5.86	4.79	0.28	0.30

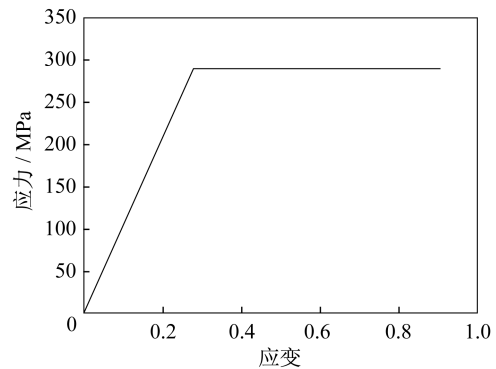


图 4 TA1 工业纯钛 BISO 应力-应变曲线

Fig.4 BISO stress-strain curve of TA1 pure titanium

由于在建模时只取整体气瓶的 1/4 划分有限元网格,因此,复合材料气瓶有限元模型施加的载荷条件主要有在 2 个轴向剖面和 1 个环向剖面上施加对称约束,内衬的内表面施加均布压力载荷。

2 结果分析与讨论

2.1 位移变化特性及试验验证

通过有限元数值模拟仿真,得到了气瓶在工作压力(30 MPa)和爆破压力(60 MPa)下位移(单位:mm)的分布情况,如图 5 所示。

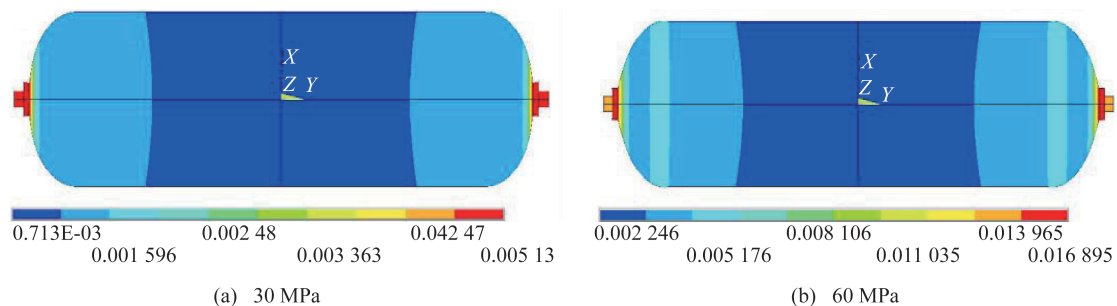


图 5 不同内压下位移分布情况

Fig.5 Distribution of the displacement under different internal pressure conditions

由图 5 可见,最大位移位置始终在气口端和密封端接头处,筒体处的位移最小。这是因为气口端和密封段接头处主要发生轴向变形,筒体处主要发生环向变形,轴向变形只取决于纤维螺旋缠绕强度,环向变形由纤维螺旋缠绕和环向缠绕强度共同决定,环形纤维强度发挥系数一般大于螺旋纤维。环向纤维对气瓶环向变形的约束较大,导致在内压载荷下,只有螺旋缠绕的气瓶封头附件产生较大的轴向变形。

气瓶筒体对称位置处环向位移和气口端接头处轴向位移在不同压力下的变化情况如图 6 所示。

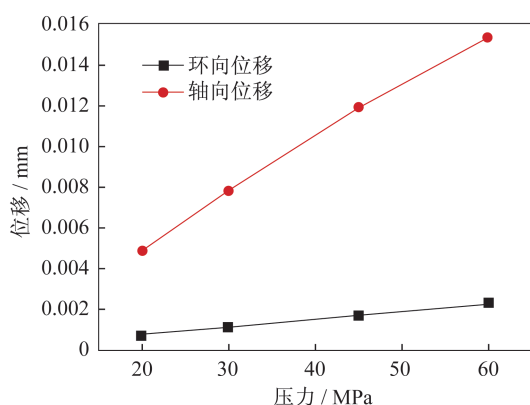


图 6 不同内压下环向位移和轴向位移变化趋势

Fig.6 Variation tendencies of the hoop and axial displacement under different internal pressure conditions

由图 6 可以看出,随着内压增加,气瓶的轴向和环向变形越来越大,其中轴向变形增加程度较大。

可见,轴向变形对气瓶整体变形有较大的影响,这对提供轴向力的螺旋缠绕纤维提出了更高的要求。

此外,不同压力下距筒体对称位置 170 mm 处位移模拟结果和试验结果见表 3。可以看出,两者吻合较好,验证了上述有限元模型的准确性。

表 3 位移模拟结果和试验结果对比

Tab.3 Comparison of the simulation and test displacement results

压力/MPa	位移/mm		误差/%
	试验结果	模拟结果	
30	1.60	1.52	5.0
45	2.73	2.50	8.4

2.2 等效应力变化特性

在工作压力和爆破压力下,内衬和复合材料层等效应力的分布情况如图 7 所示。可以看出,最大等效应力始终位于靠近接头的封头上,该处的等效应力超出了内衬材料的屈服强度(290 MPa),从封头到筒体,等效应力不断减小至低于屈服强度以下。在内压作用下,内衬既有弹性变形,又有塑性变形。此外,随着内压增加,内衬各处的等效应力基本保持不变,而复合材料层中的等效应力明显增大,其承压能力越来越明显。然而,即使在爆破压力下,复合材料层仍处于弹性变形,不存在塑性变形。可见,在超薄金属内衬高强碳纤维增强复合材料高压气瓶中,复合材料层承担了绝大部分的压力载荷,这也同时验证了这种气瓶设计思想的正

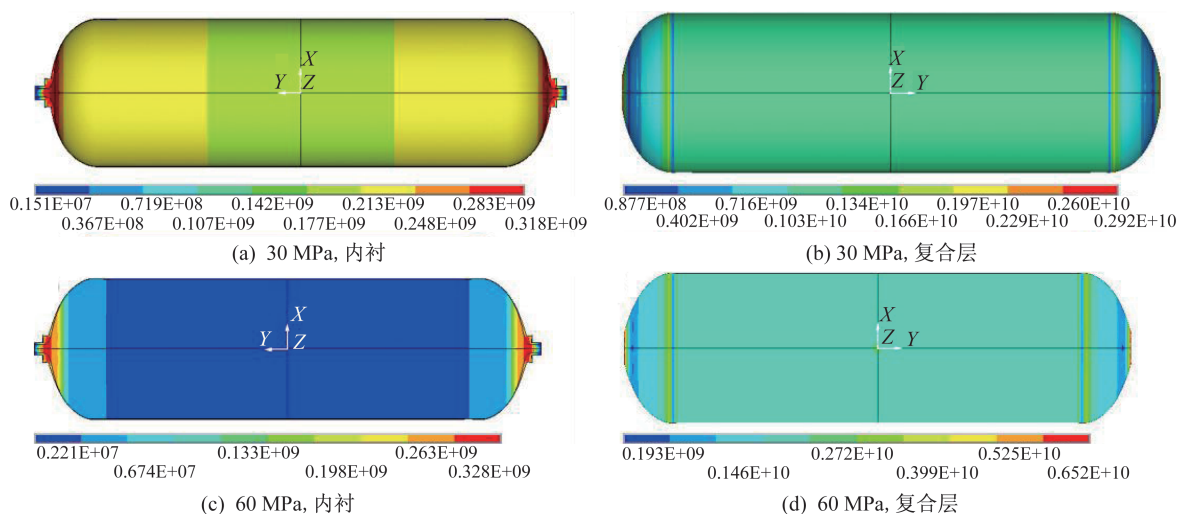


图 7 在不同压力下等效应力分布情况

Fig.7 Distribution of the equivalent stress under different internal pressure conditions

确性。

2.3 总应变变化特性

爆破压力下复合材料层中总应变的分布情况如图 8 所示。可以看出,筒体各处的总应变变化不大,这是由于筒体采用纤维螺旋和环形缠绕相结合,各个方向的变形情况一致,近似处于平面应变状态。在筒体和封头、封头和接头的过渡区域,总应变变化较为剧烈,导致气瓶变形不协调,容易引起该处发生爆破。由于内衬在封头和接头的过渡区进行了补强设计,该处的内衬强度可以完成承受爆破压力的作用。因此,气瓶爆破最薄弱点在筒体(靠封头)位置。

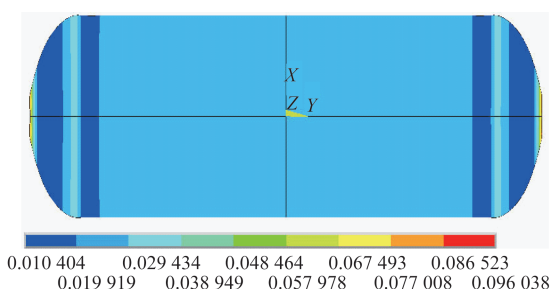


图 8 爆破压力下复合材料层总应变分布情况

Fig.8 Distribution of the total strain of the composite at the burst pressure

不同压力下从筒体对称位置到封头总应变分布情况如图 9 所示。总应变明显呈现,先轻微减小,然后剧烈增大,最后剧烈降低的趋势,且随着内压增加,这种趋势越来越明显,从而易导致当内压大于爆破压力,在筒体(靠封头)位置沿环向发生撕裂而爆破。

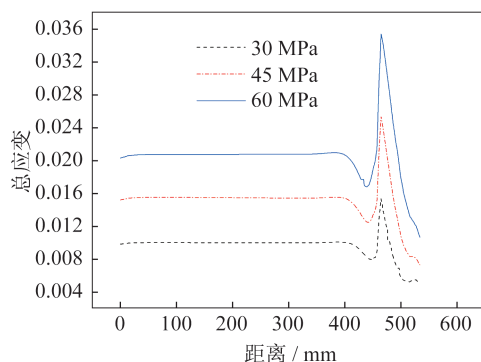


图 9 从筒体到封头总应变分布情况

Fig.9 Distribution of the total strain from the cylinder to the head

3 结束语

本文采用理论分析、数值模拟和试验研究相结合的方法,研究了卫星用 0.8 mm 钛内衬 T1000 碳纤维增强复合材料高压气瓶在不同内压载荷下的力学特性,得出了以下结论:

1) 气口端和密封端接头处主要发生轴向变形,筒体主要发生环向变形,随着内压增加,气瓶的轴向和环向变形越来越大,其中轴向变形增加程度较大,轴向变形对气瓶整体变形有较大的影响。

2) 在内压作用下,内衬既有弹性变形又有塑性变形,而复合材料层始终处于弹性变形。此外,随着内压增加,内衬各处的等效应力基本保持不变,而复合材料层中的等效应力明显增大。

3) 在筒体和封头的过渡区域,总应变明显呈现先轻微减小,然后剧烈增大,最后剧烈降低的趋势,且随着内压增加,这种趋势越来越明显,从而易导致当内压大于爆破压力时,在筒体(靠封头)位置沿环向发生撕裂而爆破。

虽然本文中模拟结果和试验结果吻合较好,但随着内压增大两者误差越来越大。此外,气瓶的爆破压力的试验结果和模拟结果存在一定差异,初步推断为内衬的焊缝影响所致。因此,在未来工作中,可参考相关文献,借助试验和仿真等手段,研究焊缝对超薄钛内衬复合材料高压气瓶力学特性的影响。

参考文献

- [1] 赫晓东,王荣国,矫维成,等.先进复合材料压力容器[M].北京:科学出版社,2016:1-3.
- [2] LEH D, SAFFRE D, FRANCESCATO P, et al. Progressive failure analysis of a 700 bar type IV hydrogen composite pressure vessel [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40 (38): 13206-13214.
- [3] ZU L, ZHU W, DONG H, et al. Application of variable slippage coefficients to the design of filament wound toroidal pressure vessels [J]. Composite Structures, 2017, 172: 339-344.
- [4] TAM W, BALLINGER I. Conceptual design of space efficient tank [R]. AIAA 2006-5058, 2006.
- [5] 李玉峰,李玲丽,潘宗友.一种卫星用钛内衬-碳纤维缠绕复合材料气瓶特性研究[J].宇航学报,2014,35 (11):1318-1325.

(下转第 95 页)