

复合材料气瓶有限元分析与爆破压力预测

常新龙, 张晓军, 刘新国, 简 斌
(第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)

摘 要: 利用 ANSYS 大型有限元程序建立了复合材料气瓶的有限元模型, 建模中将纤维缠绕层作为复合材料层合板处理, 考虑了封头处缠绕层厚度及缠绕角沿子午线不断变化的情况。针对建立的模型进行了气瓶在几个工况点下的变形分析, 利用最大应变准则预测了气瓶的爆破压力。通过分析结果与相应试验结果对比, 验证了建模与分析方法的正确性。

关键词: 复合材料气瓶; 有限元建模; 应力应变分析

中图分类号: V414.8

文献标识码: A

文章编号: (2008) 04-0027-05

Finite element analyses and bursting pressure prediction for COPV

Chang Xinlong, Zhang Xiaojun, Liu Xinguo, Jian Bin
(Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: A finite element model of composite overwrapped pressure vessels (COPV) is established by ANSYS finite element software. In the modeling process, the number of filament winding layers is treated as composite laminates with thickness and wrap angle variations of every unidirectional layer in the domes section considered. Using this model, static deformation analyses are conducted at several operating modes. Based on the maximum strain criteria, burst pressure of the vessel is predicted. The analyses results are compared with the test ones. The method of COPV modeling and analyzing are validated.

Key words: composite overwrapped pressure vessels (COPV); finite element modeling; stress and strain analyses

收稿日期: 2008-04-22; 修回日期: 2008-07-10。

作者简介: 常新龙 (1965—), 男, 教授, 博导, 主要研究领域为失效物理与可靠性。

1 引言

复合材料的显著优点是比强度高、比模量大、抗疲劳性能好。复合材料具有的这些优点正好满足航天系统对减轻结构重量的特殊要求,这使它成为当代航天系统上应用越来越多的重要材料。但是复合材料具有强烈的各向异性和非均质性的特点,因此它的力学性能比较复杂。此外结构在形成过程中有组分材料的物理和化学变化发生,构件的性能对复合工艺的依赖性很大。这些因素决定了复合材料气瓶结构的复杂性,因此仅靠网格理论对其进行静力学设计和分析不能满足空间系统对压力容器的高可靠、高性能要求,而有限元分析方法能进行非常准确和详细的静力学分析,为设计提供充分和足够的应力应变分析数据,从而将盲目性减小到最低程度,使气瓶设计达到最佳程度。在我国,纤维缠绕金属内衬复合材料气瓶的设计和分析技术还不是很成熟,对这种气瓶的有限元应力应变分析进行深入研究是非常必要的。

2 建模

2.1 复合材料气瓶结构

所要分析的复合材料气瓶是由纤维缠绕复合层和金属内衬组成。内衬由圆柱段、等张力封头以及安装与气口接头组成。纤维缠绕复合层采用的线型为螺旋线缠绕和环向缠绕相结合,其中封头部分全部为螺旋缠绕,圆柱段为螺旋缠绕与环向缠绕的组合。

圆柱段的螺旋缠绕角 α_0 由下式决定

$$\alpha_0 = \arcsin(d_0/D_0) \quad (1)$$

式中, d_0 为内衬极轴直径; D_0 为圆柱直径。经计算得到 $\alpha_0 = 11.3^\circ$; 圆柱段上环向缠绕角为 90° 。

螺旋缠绕为测地线轨迹,缠绕角 α 从极轴处的 90° 连续减小到圆柱段的 α_0 , 具体关系式为

$$\alpha = \arcsin(d/D) \quad (2)$$

式中, D 为封头缠绕点的曲面回转直径。

根据气瓶的技术指标,由网格理论设计的最终铺层数为螺旋层和环向层各为 6 层。柱段最外层为环向缠绕,其余层为螺旋与环向交替缠绕。封头上螺旋缠绕的复合层厚度 h_f 的方程为

$$h_f = h_{f_{\alpha_0}} \sqrt{[(D_0^2 - d_0^2)/(D^2 - d_0^2)]} \quad (3)$$

式中, $h_{f_{\alpha_0}}$ 为柱段上螺旋缠绕的复合层厚度。

2.2 复合材料气瓶有限元模型

(1) 单元类型的选用

选取多层结构体单元 Shell91 和 3D 实体单元 Solid95 来建立气瓶的有限元模型。Shell91 单元可以用来模拟多层结构壳模型, Solid95 单元适用于有曲线边界的实体结构的建模。这两种单元都支持塑性、大变形等非线性行为。

(2) 网格划分

在 ANSYS 前处理中建立了气瓶几何实体模型。在实体模型的壳体部分用 Shell91 单元划分网格,金属内衬作为整个层单元中的一层,层单元的节点位于金属层顶面与所有复合层底面。在这里假设复合层与内衬粘结牢固,层间不产生滑移,各单层按平面应力状态分析。

由式(2)和(3)可知,封头部分纤维缠绕层的缠绕角(材料主方向角)与复合层的厚度沿子午线方向是连续变化的,是该点几何位置的函数,这样就使得建模变得复杂。通过编写命令流定义单元不同节点处的厚度来模拟实际气瓶结构,保证单元内部和单元之间的厚度能够光滑过渡。离散化之后,无法通过定义单元属性来保证纤维缠绕角的连续变化。假定同一个单元内部材料方向角是相同的,这样它的材料方向角可以通过单元的中心坐标公式(2)求得。这样处理的结果就是单元与单元之间的角度变化是不连续的。因此必须保证网格划分足够细,从而使有限元模型所反映的纤维缠绕角尽可能与实际情况接近,以提高分析精度。划分的每个单元都有自己的坐标系,用来规定正交材料特性的方向,通过设置单元的材料主方向与单元坐标系的夹角来定义单元的材料方向角。单元的中心坐标和材料方向角的计算也通过编写命令流来实现。

在气瓶缠绕工艺中,为了避免极孔处的纤维

堆积, 采用了扩孔技术。这样就使极孔附近一定区域的纤维层厚度的变化规律很难用数学公式描述。在这部分的建模中, 根据经验采用等厚度单元划分该区域网格。

在整个壳体部分, 为了保证单元形状的规则, 不使局部区域出现较大的计算误差或矩阵奇异而终止计算, 均使用映射网格。

对于气瓶的安装固定端和气口端, 由于其形状较复杂且有一部分为曲线, 选用 Solid95 单元划分网格。

最后得到整个气瓶的有限元模型如图 1 所示。该模型共有单元 10752 个, 其中壳单元 7296 个, 实体单元 3456 个, 节点 30251 个。

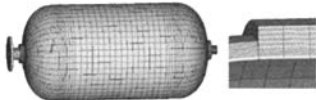


图 1 气瓶有限元模型
Fig.1 FEM model of COPV

2.3 边界条件

有限元模型的边界条件是由气瓶的实际约束条件与加载条件决定的。为了与实际情况相符, 在模型的法兰安装面实施固支约束, 气口端 $\phi 30$ 安装面径向约束, 即固定 x 向、 y 向的位移。气瓶外壁面按分析需要加均布载荷 (压力)。

3 分析结果与试验验证

3.1 有限元分析结果与试验结果的对比分析

有限元分析结果的正确与否可以通过相关试验结果来验证。该气瓶在水压试验过程中, 测量了不同压力下的轴向位移量和应变。下面对这两方面的分析结果与试验结果进行对比分析。

(1) 位移

30MPa 和 45MPa 压力下的位移分析结果和试验结果对比见表 1。

(2) 应变

在水压试验过程中对从零到 45MPa 之间的—

系列压力下的气瓶外表面不同点处于午向和环向应变进行了测量。为了方便, 这里仅对如图 2 所示的柱段上 1,2,3 三个点处应变的试验结果和分析结果进行对比, 见图 3~8。

表 1 分析结果与试验结果对比

Tab.1 Comparision of analyses and test results

压力/MPa	位移/mm		误差/%
	分析值	试验值	
30	6.25	5.86	9.3
45	8.4	7.69	9.0

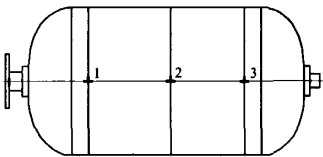


图 2 应变测点和对应分析点分布示意图
Fig.2 Strain measurement points

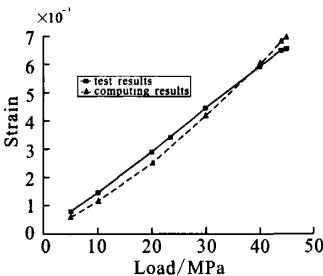


图 3 点 1 处于午向应变与压力关系曲线
Fig.3 Stress-strain relation of point 1 in meridian direction

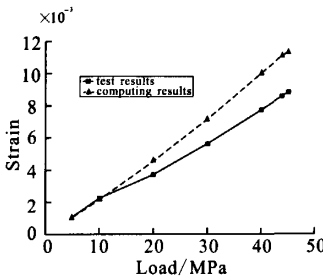


图 4 点 1 处环向应变与压力关系曲线
Fig.4 Stress-strain relation of point 1 in circle direction

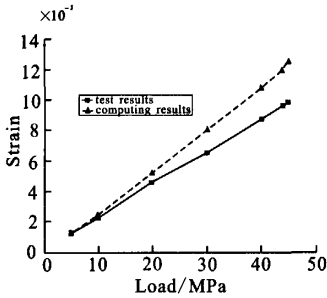


图5 点2处子午向应变与压力关系曲线

Fig.5 Stress-strain relation of point 2 in meridian direction

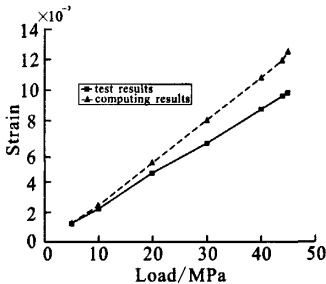


图6 点2处环向应变与压力关系曲线

Fig.6 Stress-strain relation of point 2 in circle direction

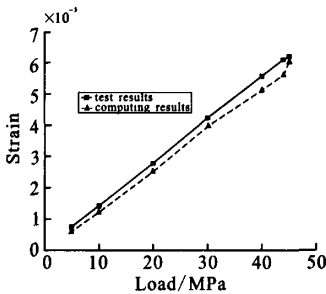


图7 点3处子午向应变与压力关系曲线

Fig.7 Stress-strain relation of point 3 in meridian direction

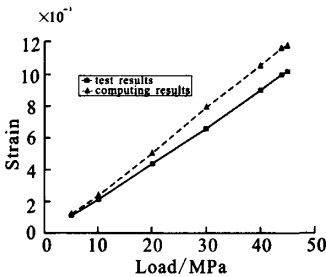


图8 点3处环向应变与压力关系曲线

Fig.8 Stress-strain relation of point 3 in circle direction

由图3~图8可知,三点的轴向应变试验值和分析值的平均偏差分别为11.67%、13.3%、9.5%;三点的环向应变试验值和分析值的平均偏差分别为16.5%、16.1%、13.6%。

3.2 爆破压力预测

复合材料气瓶的强度主要由纤维缠绕复合层的强度决定。由于气瓶对于强度和变形要求比较严格,以最先一层失效作为整个纤维缠绕复合层的强度准则。

研究表明用应力准则预测复合材料气瓶的爆破压力误差较大。国外同类复合材料气瓶的多次爆破试验表明:环向复合层的断裂应变约为纯纤维的85%,螺旋缠绕复合层的断裂应变约为纯纤维的75%。国外预测复合材料气瓶爆破压力通常所用的准则为最大应变准则,其判据式为

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i^h \quad (4)$$

其中 ε_i 为分析得到的环向缠绕复合层的纤维方向最大应变; ε_i^h 为极限应变,本文取值为0.0187。

通过有限元建模分析,环向缠绕复合层上纤维方向最大应变点的应变与载荷曲线如图9所示。由式(4)得到气瓶的爆破压力约为66MPa。实际的两次爆破试验中,测得的爆破压力分别为65MPa和68MPa。

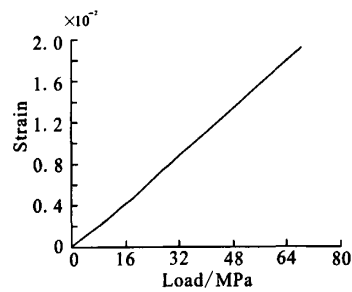


图9 环向缠绕复合层最大应变与载荷关系曲线

Fig.9 Maximum stress-load relation of circle wound composite layer

图10是66MPa下的应变分布云图,可以看出最大应变位置与爆破试验中的初始破坏位置一致。由此可见,用复合层应变预测复合材料气瓶的爆破压力是相当准确的。

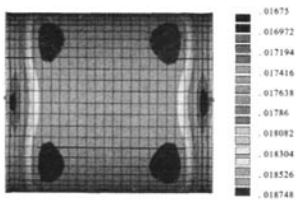


图 10 66MPa 下的环向层纤维向应变分布云图
Fig.10 Strain distribution contour of circle direction fiber layer under 66MPa loading pressure

4 结论

通过对复合材料气瓶进行有限元建模分析和试验检验, 表明, 采用有限元静力分析可以从整体上把握气瓶的受力和变形情况, 寻找设计中较弱的部位和不合理的部位。本文的有限元建模与分析方法能够用来进行此类复合材料气瓶的力学特性分析。尽管还有一些不完善的地方, 但是通过与试验的不断结合和对比, 对模型进行不断修

正, 最终可为设计提供准确的分析结果, 从而达到对产品的优化设计。

参考文献:

[1] 王耀先. 复合材料结构设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
[2] 沈观林. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
[3] Shu J C, Chiu S T, Chang J B. An enhanced analysis vessels[R]. AIAA 95-1204-CP.
[4] Kirk Sneddon, Scott Saunders, Roger Dever, Mike Teare. The Eurostar 2000+ helium COPV[R]. AIAA 97-3033.
[5] 张天平, 刘志栋, 杨福全, 等. 一种卫星推进系统复合材料氮气瓶设计及验证[J]. 上海航天, 2006, (3): 41-47.
[6] 闫峰. 基于有限元软件 ANSYS 的扩压器强度分析[J]. 火箭推进, 2007, 33(6): 38-42.
[7] 张天平, 杨福全, 王小永, 等. 钛内衬碳纤维缠绕氮气瓶的疲劳寿命和可靠度验证[J]. 中国空间科学技术, 2007, (1): 41-46.

(编辑: 陈红霞)



《火箭推进》召开 2008 年工作会

6 月 19 日下午, 《火箭推进》召开了 2008 年工作会, 院、所的主要领导出席了会议。会上, 主编旷武岳汇报了《火箭推进》2007 年的工作, 提出了 2008 年的工作思路: 2007 年, 《火箭推进》期刊的质量进一步提高, 影响力持续扩大, 相继被国际著名索引期刊美国的《乌利希国际期刊指南》和波兰的《哥白尼索引》收录, 并被陕西省新闻出版局评为年度优秀期刊。2008 年, 《火箭推进》将继续实施“精审、精编、精校、精印”的精品战略, 采取有效措施, 树品牌, 上台阶。参会领导对期刊的发展提出了宝贵意见。谭永华院长作了重要讲话, 对《火箭推进》的工作给予充分肯定, 同时对期刊的发展提出了更高要求。谭院长指出, 《火箭推进》作为展示新六院的窗口, 应有与之相适应的地位和影响力, 要按照期刊评价体系的要求, 对标分析, 持续提高质量, 加入国内一流期刊的行列。