

复合材料气瓶的有限元建模与屈曲分析

杨福全, 张天平, 刘志栋, 王小永
(兰州物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 复合材料气瓶在空间系统中逐渐取代全金属气瓶而得到越来越广泛的应用。利用 ANSYS 大型有限元程序建立复合材料气瓶及其内衬的有限元模型, 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。建立了气瓶整体结构的特征值屈曲分析与非线性屈曲分析有限元方程, 并分别进行了气瓶整体结构和内衬的外压失稳(屈曲)分析计算, 得出了气瓶整体结构及内衬的屈曲模态形状和临界外压。

关键词: 复合材料气瓶; 有限元建模; 屈曲分析

中图分类号: V257; O241.82

文献标识码: A **文章编号:** 1006-7086(2005)01-0040-06

FINITE ELEMENT MODELING AND BUCKLING ANALYSIS OF COPV

YANG Fu - quan, ZHANG Tian - ping, LIU Zhi - dong, WANG Xiao - yong
(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Composite overwrapped pressure vessels (COPV) are widely applied to space system. Finite element model of COPV and its liner are established by ANSYS finite element program. In the modeling, the total of filament winding layers are handled as composite laminate, with considering variational thickness and wrap angle of every unidirectional layer of the domes. Eigen buckling and nonlinear buckling finite element equations of the integral vessel are established. Buckling calculation of COPV and its liner are respectively made, and buckling modal shapes and the critical outer pressure are obtained.

Key words: composite overwrapped pressure vessels (COPV); finite element modeling; buckling analysis

1 引言

在保守载荷系统作用下的弹性结构存在 2 种可能的屈曲形式, 即分支点屈曲和极值点屈曲。分支点屈曲可以用传统的经典线性理论来研究, 它除了在数学上作线性化处理外, 还假定结构是完善的, 即没有初始几何缺陷, 也不存在载荷的偏心, 其求解失稳载荷问题是一个求解特征值的问题。在工程上许多结构都含有初始缺陷, 或存在载荷的偏心, 它在变形途中存在一个最大载荷, 达到最大载荷后, 变形会迅速增大而载荷反而下降, 这样的屈曲属于极值点屈曲。对于这类屈曲问题利用非线性分析是比较合理的^[1]。

空间系统使用的高压气瓶对于可靠性和安全性要求很高。本文所研究的对象是空间系统用复合材料高压气瓶, 该气瓶采用了新型材料结构, 在国内没有成熟的设计技术和经验可以传承。而气瓶在加工、试验及加注时有受外压的情况; 气瓶在缠绕加工时, 内衬受纤维缠绕张力的外压作用, 缠绕完成后在未充气状态时, 由于纤维的缠绕张力作用, 因而也是处于压应力状态。外压达到一定值时气瓶结构可能发生屈曲失稳, 所以对整个气瓶和内衬分别进行外压下的结构稳定性分析是十分必要的, 分析结果可以为气瓶设计、加工

收稿日期: 2004-11-30.

作者简介: 杨福全(1969-), 男, 甘肃省宕昌县人, 硕士生, 从事空间压力容器设计与分析研究。

和使用过程提供参考数据。

用有限元对大型复杂结构进行结构力学分析计算是工程上普遍使用的最有效的方法之一,而利用有限元理论建立与实际结构相一致的有限元模型是进行结构分析的基本前提和关键。只有建立了正确的有限元模型,随后的分析计算才得以顺利进行。

作者根据 Ansys 程序的功能特点和分析的需要,讨论了复合材料高压气瓶的建模方法及过程,并进行了特征值(线性)屈曲和非线性屈曲分析。

2 建模

2.1 复合材料气瓶结构简介

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由下式决定^[2]

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

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^[2]

$$\alpha = \arcsin (d_0/D) \quad (2)$$

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_i 的方程为^[2]

$$h_i = h_{i_0} \sqrt{[(D_0^2 - d_0^2)/(D^2 - d_0^2)]} \quad (3)$$

式中 h_{i_0} 为柱段上螺旋缠绕的复合层厚度。

由式(3)可知,封头上的螺旋缠绕层的厚度沿子午线不断变化,在靠近极轴处将造成纤维堆积。在缠绕工艺上采用扩孔技术来解决这个问题。

2.2 建立有限元模型

有限元建模是应用有限元法解决工程问题的关键,而要建立与考察对象的力学特性尽可能一致的有限元模型,是一项复杂而细致的工作。复合材料气瓶是纤维在金属内衬上以特定的缠绕工艺缠绕而形成的由金属和复合层共同构成的结构,其纤维缠绕方式既有螺旋缠绕又有环向缠绕。气瓶的这种结构决定了有限元建模的复杂性,而分析计算结果的正确与否,主要与建立的有限元模型有关。

2.2.1 单元类型的选用

要建立正确的有限元模型,选择合适的单元类型是最基本的前提。对于 T1000/Epoxy 金属内衬复合材料气瓶,它的复合层可以用正交各向异性层合板理论模型。作者根据所要分析的碳纤维缠绕复合材料气瓶的结构特点以及 Ansys 程序的特点,经过反复对比研究,最终选取 shell91 单元和 solid95 单元来建立气瓶的有限元模型。shell91 层单元可以用来模拟多层结构壳模型,单元形式如图 1 所示;solid95 单元适用于有曲线边界的实体结构的建模,单元形式如图 2 所示。这 2 种单元都支持塑性、大变形等非线性行为。

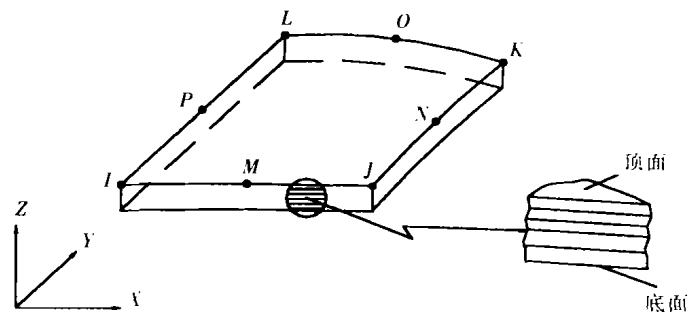


图 1 shell91 单元示意图

2.2.2 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。

气瓶柱段部分, 由于环向缠绕与螺旋缠绕的角度在整个柱段上保持不变, 因此这部分处理类似于平板层合板。层单元的层数和铺层形式与实际缠绕情况相同, 如图 3 所示。

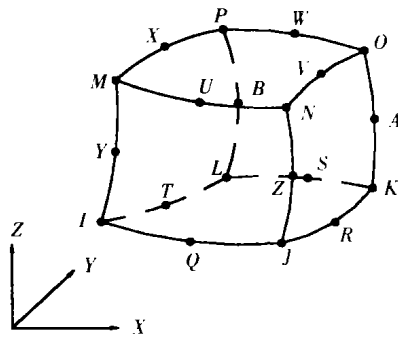


图 2 solid95 单元示意图

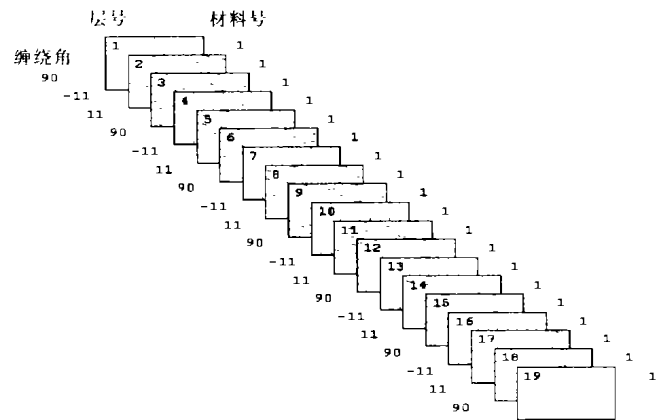


图 3 柱段层单元排列图

封头部分, 纤维缠绕层的缠绕角(材料主方向)与复合层的厚度沿子午线方向不断变化, 也就是说, 封头上每一点的缠绕角和复合层厚度是该点几何位置的函数。利用程序中前处理器的功能, 通过改变单元坐标系的方向和单元不同节点处壳单元厚度来模拟实际气瓶结构, 使有限元模型准确反映实物结构。

在气瓶缠绕工艺中, 为了避免极孔处的纤维堆积, 所以采用了扩孔技术。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, 故选用 solid95 单元划分网格。这部分的网格划分如图 4 所示。

最后得到整个气瓶的有限元模型如图 5 所示。该模型共有单元 10 752 个, 其中壳单元 7 296 个, 实体单元 3 456 个, 节点 30 251 个。

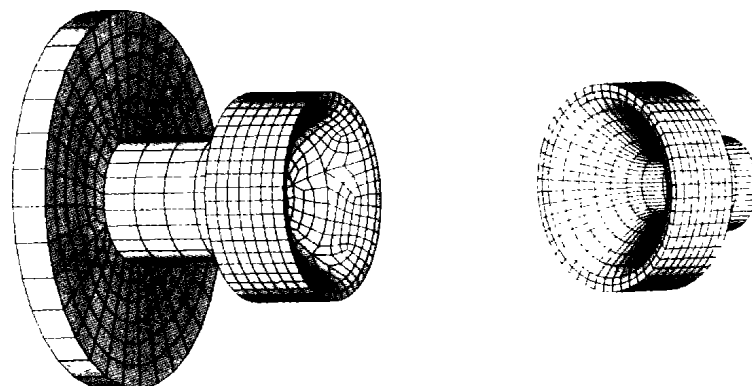


图 4 气瓶固定端和气口端网格

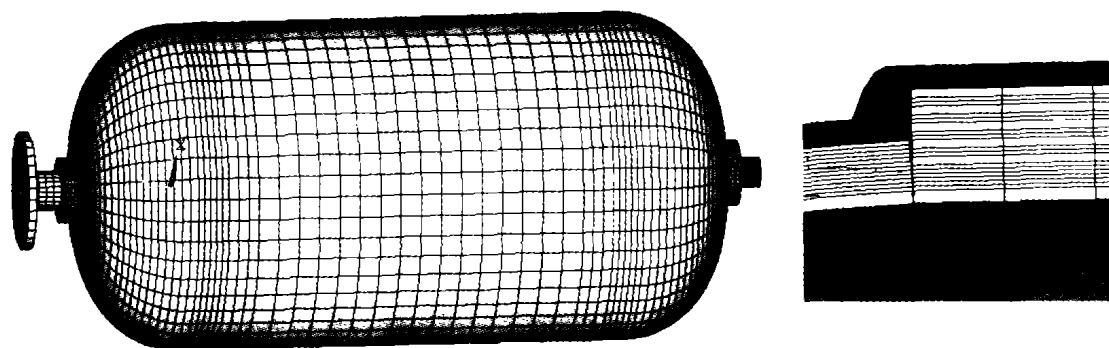


图5 气瓶有限元模型

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)。

2.4 材料参数的选择

在对结构进行有限元分析时,结构材料的工程常数是一组非常重要的特性参数,只有确保程序输入的材料工程常数的准确性,才能保证有限元分析结果的正确性和有效性。对于作者所研究的复合材料气瓶,在国内没有现成的用于分析的材料特性参数。在国外同类产品的结构有限元分析中,普遍采用将每一缠绕层当作复合材料单向板,整个缠绕层处理为层合板的方法。国外文献报道的用于 T1000GB 碳纤维缠绕气瓶有限元分析的单向板的材料性能参数见表 1 所列^[3]。由于文献中的缠绕工艺和所用材料与作者研究的气瓶一致,所以认为在本文中引用表 1 参数是可行的,符合该气瓶的有限元分析要求。金属内衬材料性能参数可以从通用材料手册中查得。

表 1 复合材料单向板材料参数表

E_1 (GPa)	$E_2 = E_3$ (GPa)	$G_{12} = G_{13}$ (GPa)	G_{23} (GPa)	$\nu_{12} = \nu_{13}$	ν_{23}
186	9.79	5.86	4.79	0.28	0.30

3 求解

分别对复合材料气瓶整体结构和内衬进行了线性特征值屈曲与非线性屈曲分析。特征值分析的增量平衡方程为^[4]

$$[[K_e] + \lambda[K_\sigma(\sigma_0)]]\{\Delta u\} = 0 \tag{4}$$

式中 K_e 为弹性刚度矩阵; K_σ 为应力状态 $\{\sigma_0\}$ 下计算的初始应力矩阵; $\{\Delta u\}$ 为位移增量。

式(4)的特征方程为^[4]

$$|[[K_e] + \lambda[K_\sigma(\sigma_0)]]| = 0 \tag{5}$$

在 n 个自由度的有限元模型中,式(5)产生 λ 的 n 阶多项式。在实际计算中根据需要只计算前几阶特征值 λ ,由计算出的最小 λ 值给定弹性临界载荷。作者进行的线性特征值屈曲分析计算了前几阶屈曲模态。

由于工程结构一般都含有初始缺陷,或存在载荷的偏心,所以由非线性屈曲分析得出的开始屈曲时的所谓极限载荷更接近实际情况。在本文中模拟实际情况,非线性屈曲分析基于特征值屈曲分析得出的第一阶屈曲模态,在模型上施加了一个小缺陷。非线性分析中,载荷是以一个恒定的增量逐步的施加,直到解开始变得发散为止。非线性屈曲分析的控制方程为^[4]

$$K_T(u)\Delta u = \Delta P(u) \tag{6}$$

式中 $K_T(u)$ 为某一增量步上的切线刚度矩阵, ΔP 为结构的外载荷增量, Δu 为位移增量。施加载荷时, 载荷增量 ΔP 必须足够小, 以使载荷达到预期的临界屈曲载荷。若载荷增量太大, 则屈曲分析所得到的屈曲载荷就有可能不精确, 这在确定载荷步数时要注意。

4 结果分析

4.1 气瓶的屈曲结果分析

分析得到的特征值屈曲分析的第 1 阶屈曲临界载荷为 11.286 MPa。

气瓶前 10 阶的屈曲形状如图 6 所示。由于同一载荷因子的屈曲模态在 x 轴、 y 轴的屈曲形状相同, 只是方向不同, 故只用同一个图表示。

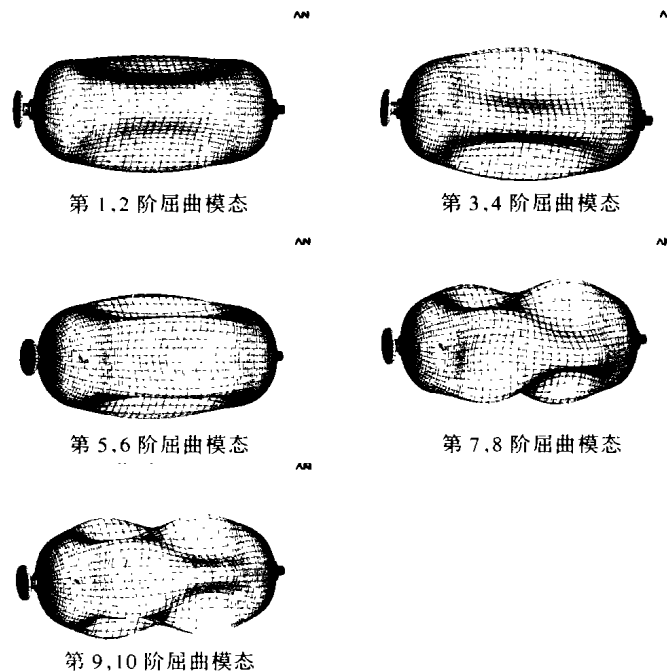


图 6 气瓶前 10 阶屈曲形状

基于特征值屈曲一阶模态形状, 故在模型上施加一小缺陷, 进行非线性屈曲分析。分析结果显示, 在外压为 9.135 MPa 时, 解开始变得发散。

根据图 6 的第 1 阶屈曲形状, 取气瓶柱段中部变形较大的某一节点, 显示该节点的 X 向位移 - 载荷曲线如图 7 所示。

由非线性屈曲分析结果和图 7 可知, 气瓶开始屈曲时的极限载荷在 9.100 MPa 附近, 低于特征值屈曲分析的临界载荷值。

4.2 内衬的屈曲结果分析

分析得到的内衬特征值屈曲第 1 阶临界载荷为 0.057 34 MPa。

内衬前 6 阶的屈曲形状如图 8 所示。由于同一载荷因子的屈曲模态在 x 轴、 y 轴方向的屈曲形状相同, 只是方向不同, 故只用同一个图表示。

基于特征值屈曲一阶模态形状, 故在内衬模型上施加一小缺陷, 进行非线性屈曲分析。分析结果显示, 在载荷系数为 0.13 时, 解开始变得发散。

根据图 8 的第 1 阶屈曲形状, 取内衬柱段中部

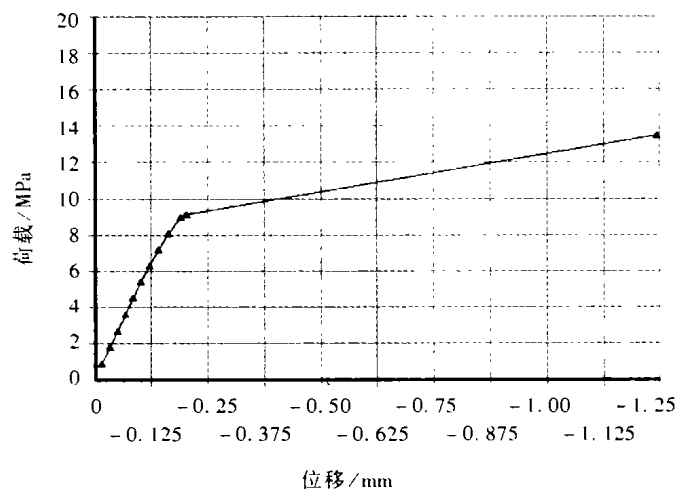


图 7 1849 号节点的位移 - 载荷曲线

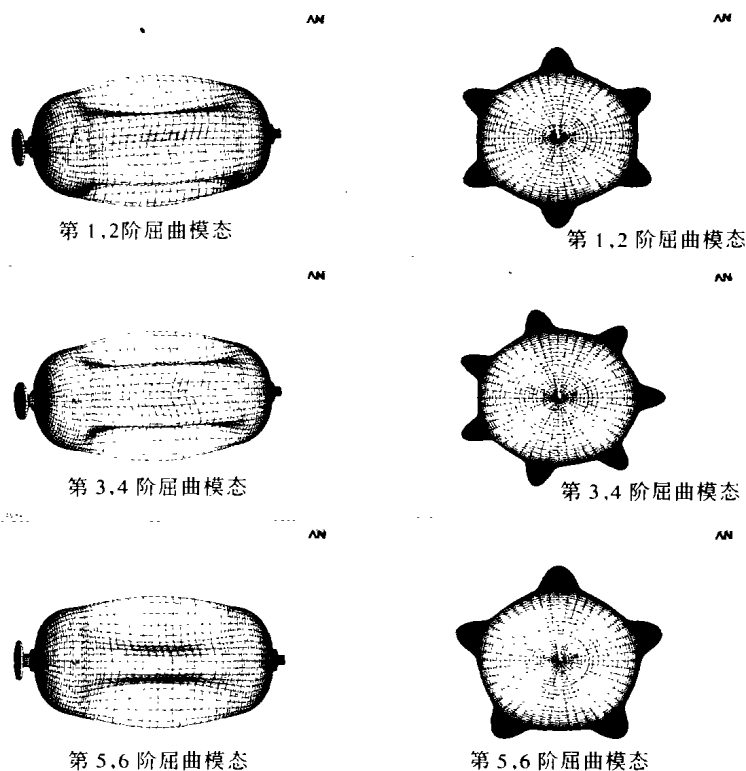


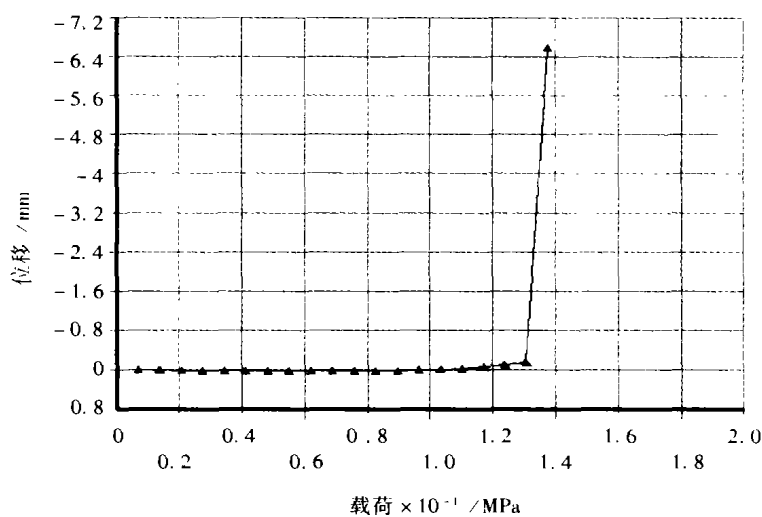
图 8 内衬前 6 阶屈曲形状

变形较大的某一节点,显示该节点的 X 向载荷 - 位移曲线如图 9 所示。

由非线性屈曲分析结果和图 9 可知,内衬在载荷系数为 0.13 时开始变得不稳定,由于内衬屈曲分析时所加的载荷为 0.5 MPa,由此可知极限载荷在 $0.13 \times 0.5 = 0.065$ MPa 附近。

5 结 论

分别对气瓶整体和内衬进行了外压稳定性分析。分析得到的屈曲形状和临界载荷虽然无法通过试验来验证其准确性,但由于分析使用的有限元模型经过模态和静力分析结果与试验结果的验证,认为比较符合实际,所以有理由认为本分析结果可以为同类气瓶在设计、加工和使用中的外压稳定性要求提供依据。同时通过与气瓶试验的结合和对比,经过不断的修正后,该建模和分析方法将更加成熟,进而为设计、加工和使用提供更好、更准确的分析结果。



参考文献:

- [1] 王瑁成,邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京:清华大学出版社,1997.
- [2] 王耀先. 复合材料结构设计[M]. 北京:化学工业出版社,2001.
- [3] SHU J C, CHIU S T, CHANG J B. An enhanced analysis method for composite overwrapped pressure vessels[R]. AIAA-95-1204-CP.
- [4] 郭乙木,陶伟明. 线性与非线性有限元及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2003.