

全缠绕复合气瓶有限元优化设计

王志辉, 郑强

(武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:介绍了一种基于有限元数值模拟的复合气瓶优化设计方法,利用 ANSYS 的 APDL 语言建立了与全缠绕复合气瓶力学特性尽可能一致的有限元模型,实现了气瓶封头段螺旋缠绕层的变厚和变角度,并按照美国 DOT - CFRC 设计要求对复合气瓶进行了优化设计,提高了气瓶的容重比和可靠性。

关键词:复合气瓶;有限元;优化设计

中图分类号:TQ050.2

DOI:10.3963/j.issn.1007-144X.2009.05.013

复合材料的铺层角度、铺层厚度和自紧压力等因素对复合气瓶的性能有很大影响。复合气瓶的设计制造也要满足相关的标准,如 ISO 11439《车用压缩天然气高压气瓶》标准、美国 DOT - CFRC《铝内衬全缠绕碳纤维增强复合气瓶的基本要求》,同时还要受到纤维缠绕工艺的制约。这些设计要求与参数之间存在着复杂的关系,这使得复合气瓶的设计分析比较复杂^[1-2]。适当的优化设计技术可提高设计效率、缩短研制周期和节约研制费用。随着复合气瓶的广泛应用,目前,复合气瓶的有限元分析技术及高效、可靠和实用的结构设计优化技术已成为重要的研究课题,它对提高设计水平,改善压力容器的性能,都具有十分重要的意义^[3-4]。笔者按照 DOT - CFRC 设计要求对复合气瓶进行优化设计,确定了最佳的铺层方案。

1 有限元模型的建立

有限元建模是进行有限元分析的重要前提,其准确性将直接影响研究结果的正确性。目前有很多研究中用平面单元建立复合气瓶模型^[5-7],把复合材料层作为一个整体研究。由于平面单元无法描述复合材料层的铺层特性,笔者从建模着手,在 ANSYS 中力求建立与考察对象的力学特性尽可能一致的有限元模型。

通过比较单元特性,选择 SOLID95 单元建立铝内衬模型,选择 SHELL99 建立复合材料层模型。铝合金内衬和复合材料的性能参数如表 1 和

表 2 所示。复合气瓶的铝内衬在自紧压力下已处于塑性状态,屈服后的行为是应变强化塑性行为。根据材料性质、加载条件和分析需要,内衬采用双线性等向强化力学模型。

表 1 铝合金 6061 - T6 性能参数

| 参数名称 | 数值 |
|------------|--------|
| 弹性模量/GPa | 69.00 |
| 塑性模量/GPa | 0.69 |
| 泊松比 | 0.32 |
| 屈服强度/MPa | 296.00 |
| 拉伸极限强度/MPa | 330.00 |

表 2 复合材料各向性能参数

| 参数名称 | 数值 |
|------------|--------|
| 纵向拉伸模量/GPa | 145.00 |
| 横向拉伸模量/GPa | 10.50 |
| 面内剪切模量/GPa | 6.32 |
| 主泊松比 | 0.32 |

对于复合材料层,定义层单元材料属性时只需要定义正轴方向的材料属性,偏轴方向的材料属性通过定义层的定向角来实现。单元材料属性方向由材料坐标系决定,材料坐标系参考单元坐标系,因此,单元坐标系确定纤维缠绕的方向。在网格划分时,为了保证纤维缠绕方向的一致,必须控制所有单元坐标系的指向一致,对于每一层材料,由单元实常数表定义材料性质、层的定向角和层的厚度。筒身段复合材料铺层形式如图 1 所示。

复合材料层的缠绕角与厚度在封头部分沿子午线方向是不断连续变化的,缠绕角的变化规律

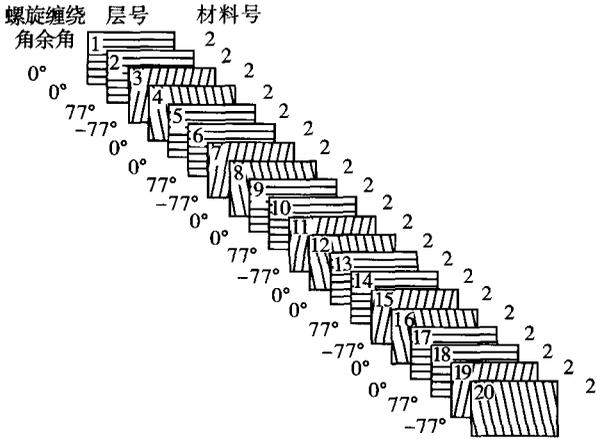


图1 筒身段复合材料铺层形式

如式(1)所示,封头上任意一点的复合材料层的厚度 t_f 可通过式(2)估算^[8]:

$$\sin \alpha = r_0/r \quad (1)$$

$$t_f = R \cos \alpha_0 / (r \cos \alpha) t_\alpha \quad (2)$$

式中, α 为测地线与封头曲面上子午线夹角; r_0 为极孔圆半径; r 为测地线与子午线交点处平行圆半径; R 为内衬筒身段外径; α_0 为筒身段纤维缠绕角; t_α 为筒身段螺旋向纤维缠绕层厚度。

为了尽可能准确地反映实际结构的厚度,利用 SHELL99 单元能够对复杂的厚度分布进行造型,通过编写命令流来实现封头纤维缠绕层厚度的连续变化。SHELL99 单元变厚是通过指定单元 4 个节点处厚度实现的。在划分好网格之后,对于任意一个单元的 I, J, K, L 4 个节点,可以获得这 4 个节点的位置坐标,继而得到节点处的平行圆半径,再根据式(2)的厚度分布规律,可以求出 I, J, K, L 4 个节点的厚度值。用循环语句可以遍历封头所有的单元,对所有的单元求出 4 个节点的厚度值并赋值。缠绕角度变化的实现方法与连续厚度变化的实现方法类似,只是定义的对象是 SHELL99 单元内部方向角。复合气瓶 1/2 有限元模型如图 2 所示。封头纤维缠绕层的变厚段有限元模型如图 3 所示。

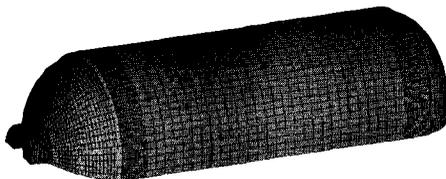


图2 复合气瓶 1/2 有限元模型

2 优化分析

2.1 优化设计数学模型

优化数学模型根据 DOT - CFFC 对气瓶应力分布的要求来建立,其要求有如下规定^[9]:

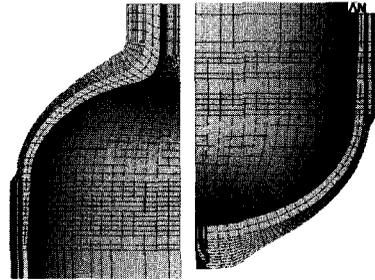


图3 封头纤维缠绕层的变厚段有限元模型

(1)在工作压力下,内衬任意点上的最大计算拉伸应力不得超过材料屈服强度的 60%。零压下内衬侧壁压应力应大于屈服强度的 60%,但不得超过材料屈服强度的 95%;

(2)用于防内衬电腐蚀和外保护的玻璃纤维层总承受载荷的能力不得超过气瓶最小爆破压力下总压力载荷的 15%;

(3)在工作压力下,碳纤维或玻璃纤维的最大轴向应力不得超过最小爆破压力下的纤维轴向应力的 30%;

(4)爆破破口应在气瓶侧壁上。同时应注意气瓶端部最大应力应小于气瓶筒体最大应力,以便能通过爆破试验。

复合气瓶优化设计数学模型为:

$$\begin{cases} \min F(X) \\ X = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [press1, theta2, tlay1, tlay2]^T \\ \text{s. t.} \\ press1_{\min} \leq x_1 \leq press1_{\max} \\ theta2_{\min} \leq x_2 \leq theta2_{\max} \\ tlay1_{\min} \leq x_3 \leq tlay1_{\max} \\ tlay2_{\min} \leq x_4 \leq tlay2_{\max} \\ \sigma_s \leq s \max1_al \leq \sigma_b \\ 0.6\sigma_s \leq s \max2_al \leq 0.95\sigma_b \\ s \max3_al \leq 0.95\sigma_b \\ cfvs \geq 10/3 \\ s \max4_al \leq \sigma_s \\ s \max5_al \leq \sigma_b \\ s \max5_cf \leq \sigma_b \end{cases} \quad (3)$$

其中, $F(X)$ 为目标函数;自紧压力 $press1$ 、螺旋缠绕角余角 $theta2$ 、螺旋单层厚度 $tlay2$ 和环向单层厚度 $tlay1$ 为设计变量;自紧压力下内衬应力 $s \max1_al$ 、零压下内衬应力 $s \max2_al$ 、工作压力下内衬应力 $s \max3_al$ 、水压试验下内衬应力 $s \max4_al$ 、爆破压力下内衬应力 $s \max5_al$ 、纤维应力比 $cfvs$ 和爆破压力下纤维向应力 $s \max5_cf$ 为状态变量并满足 DOT - CFFC 设计要求。

2.2 优化方法

ANSYS 提供的优化设计方法有零阶方法和一阶方法,它们都是通过对目标函数添加罚函数将问题转化为非约束的优化问题,前者用曲线拟合建立目标函数与设计变量之间的关系来实现逼近,后者使用因变量对设计变量的偏导数进行梯度设计来确定搜索方向,再用线搜索法对非约束问题最小化。零阶方法不易陷入局部极值点,一阶方法优化精度更高。笔者采用零阶方法和一阶方法的多次优化,以气瓶的容重比为目标函数进行整体优化。内衬几何尺寸不变,内衬容积和重量为一定值,在进行整体优化时,为了减少运算时间,只计算复合材料层体积。

2.3 优化过程

在 ANSYS 中建立复合气瓶参数化优化设计流程,如图 4 所示。

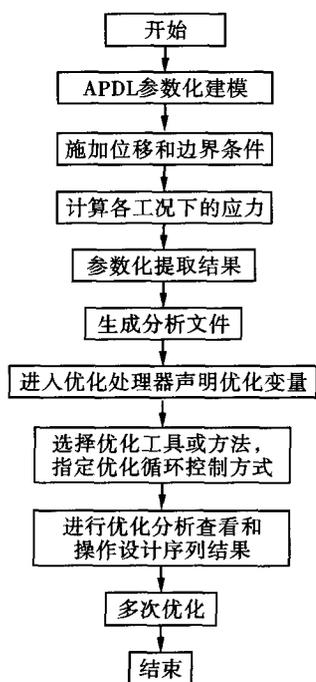


图 4 复合气瓶参数化优化设计流程

2.4 优化结果

目标函数(*vot - cf*)优化前后的结果对比如表 3 所示,目标函数迭代曲线如图 5 所示,第 17 次迭代结果为最优解。

由表 3 数据可知,自紧压力由 55.000 MPa 降低到 54.284 MPa,缠绕角由 13°(缠绕角余角为 77°)减小到 9.735°(缠绕角余角为 80.265°),缠绕角基本没有背离测地线公式,环向缠绕层厚度由 0.250 mm 减小到 0.209 mm,螺旋缠绕层厚度由 0.270 mm 减小到 0.187 mm。随着设计变量的变化,优化对于工作压力条件和最小爆破压力条

表 3 目标函数(*vot_cf*)优化结果表

| 优化变量 | 优化前 | 优化后 |
|---|-----------|-----------|
| <i>press1</i> /MPa | 55.000 | 54.284 |
| <i>theta2</i> / (°) | 77.000 | 80.265 |
| <i>tlay1</i> /mm | 0.250 | 0.209 |
| <i>tlay2</i> /mm | 0.270 | 0.187 |
| <i>s max1_al</i> /MPa | 299.550 | 301.170 |
| <i>s max2_al</i> /MPa | 181.870 | 239.080 |
| <i>s max3_al</i> /MPa | 173.720 | 179.160 |
| <i>cfvs</i> | 3.378 | 3.448 |
| <i>s max4_al</i> /MPa | 274.450 | 276.890 |
| <i>s max5_al</i> /MPa | 316.610 | 324.570 |
| <i>s max5_cf</i> /MPa | 2 064.300 | 2 624.200 |
| <i>vot_cf</i> × 10 ⁶ mm ³ | 0.306 | 0.232 |

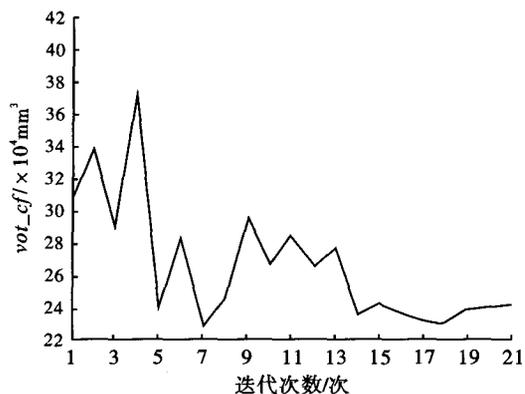


图 5 目标函数(*vot_cf*)迭代曲线

件下内衬应力影响不大,而复合材料层的应力显著提高,最小爆破压力下环向层最大应力由 2 064.300 MPa 提高到 2 624.200 MPa,接近纤维复丝强度。通过优化,纤维强度转换率得到提高,复合材料层体积由 306 cm³减小到 232 cm³,气瓶的容重比由 7.24 提高到 8.22,优化效果明显。

3 结论

将有限元数值分析和优化技术应用于全缠绕复合气瓶的设计中,在产品阶段提高结构设计的可靠性,可有效地缩短产品设计周期和费用。

参考文献:

- [1] 周海成,阮海东. 纤维缠绕复合材料气瓶的发展及其标准情况[J]. 压力容器,2004,21(9):32-36.
- [2] 雷绍辉,郑传祥. 复合材料高压储氢容器筒壁应力优化控制分析[J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版,2006,28(11):380-385.
- [3] PROCHAZKA P P. Deterministic and stochastic optimization of composite cylindrical laminates[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003 (40): 7109-7127.

- base to improve freshness[C]//Proc of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. [S. l.]:[s. n.],2000;586-603.
- [2] MICHELE B, CARMEN T. Incremental data warehouse updates[J]. DM Review,1998(5):236-350.
- [3] 许力,马瑞新. 基于快照比对的增量数据捕获研究与实现[C]//第3届全国信息检索与内容安全学术会议论文集. [S. l.]:[s. n.],2007;473-480.
- [4] 郑祥云,张娟,葛文庚. 数据库同步中差异数据捕获方案设计与实现[J]. 电脑知识与技术,2008(7):68-70.
- [5] 尤玉林,张宪民. 一种可靠的数据仓库中 ETL 策略与架构设计[J]. 计算机工程与应用,2005(10):588-590.
- [6] 陆剑锋,张洁. 数据仓库数据更新的研究及基于 Oracle 数据库的开发与应用[J]. 计算机工程与应用,2004(6):384-386.
- [7] PAULRAI P. Data warehousing fundamentals: a comprehensive guide for IT professionals [M]. [S. l.]: McGraw-Hill Companies Inc,2001;236-252.
- [8] 章水鑫,徐宏炳,于立. 增量式 ETL 工具的研究与实现[J]. 现代计算机,2005(3):64-66.
- [9] 郭一忠. 异构数据源下变动数据捕获技术的研究[D]. 厦门:厦门大学图书馆,2008.

Research on Change - Data - Capture Technology

XU Fuliang, ZHOU Zude

Abstract: Traditional database technology is limited in continuous refreshing data, real time business intelligence and ODS(Operational Data Stores). Change - Data - Capture (CDC) technology provides an integrated solution. It has a far - reaching influence on IT operational challenges and business models. The value of the CDC and the technology architecture for CDC in data disaster recovery were discussed.

Key words: change data capture (CDC); data acquisition; data disaster

XU Fuliang: Postgraduate; School of Information Engineering, WUT, Wuhan 430070, China.

[编辑:王志全]

(上接第 735 页)

- [4] KRIKANOV A A. Composite pressure vessels with higher stiffness[J]. Composite Structures,2000(48):119-127.
- [5] 刑志敏,高建岭,王小纯. 复合材料 CNG 气瓶的力学性能研究[C]//第13届全国结构工程学术会议论文集. [S. l.]:[s. n.],2004;412-416.
- [6] 岳中第,刘彬,高光波. 先进数字化制造中的工程分析及其应用[J]. 航空制造技术,2005(6):65-70.
- [7] 李鹏,盛周红,吴耀楚. 全缠绕复合气瓶 ANSYS 参数化结构分析[J]. 机械研究与应用,2007(2):114-116.
- [8] 郑传祥. 复合材料压力容器[M]. 北京:化学工业出版社,2006:32-38.
- [9] DOT - CFFC - 2000 Standard. Basic requirements for fully wrapped carbon - fiber reinforced aluminum lined cylinders[S].

Finite Element Optimization Design of the Full - wrapped Composite Vessel

WANG Zhihui, ZHENG Qiang

Abstract: The composite vessel is widely used to replace the steel cylinder for its excellent performances such as high specific strength, designable, good corrosion resistance. An optimization design method was presented based on FEM. The finite element model was established with APDL language, which has maximum consistency with the mechanical characteristic of full - wrapped composite vessel, The optimization design was made according to the design criteria of DOT - CFFC. It improves the rate of volume and mass and the reliability of the vessel.

Key words: composite vessel; FEM; optimization design

WANG Zhihui: Assoc. Prof.; School of Mechanical and Electronic Engineering, WUT, Wuhan 430070, China.

[编辑:王志全]