

# 天然气汽车复合材料气瓶的优化设计

边文凤, 孙 芳

(哈尔滨工业大学 汽车工程学院, 山东 威海 264209)

**摘 要:**以网格理论为基础,讨论了纤维缠绕车用气瓶在内压作用下的优化设计,对于等强度复合材料气瓶,以层厚为设计变量,最小体积质量比为目标函数,对不同缠绕角的情况利用序列二次规划算法进行优化设计。

**关键词:**纤维缠绕;网格理论;螺旋缠绕;优化设计

中图分类号:TQ050.2 文献标识码:A 文章编号:1001-4837(2004)01-0024-04

## Optimum Design for Composite Pressure Vessel Used in CNG Vehicle

BIAN Wen-feng, SUN Fang

(Automobile Engineering Institute of Harbin Institute of Technology, Weihai 264209, China)

**Abstract:** Basing on the netting theory, the paper discussed the optimum design for filament-wound pressure vessel used in vehicle under internal pressure. The shell thickness is considered as design variable while the rate of volume and mass is as objection function. By using sequential quadratic programming, the optimum design is made with the change of winding angle.

**Key words:** filament-wound; netting theory; helix winding; optimum design

### 1 引言

天然气汽车气瓶(简称:CNG)是汽车燃料供给的重要环节,作为压力容器在汽车领域的一个应用,它既要符合安全性方面的要求,又要适应汽车轻型化的趋势。要同时兼顾这两方面的要求,采用纤维缠绕结构无疑是一个很好的选择,而且随着复合材料业的迅速发展,复合材料气瓶的造价也会逐渐下降,因此围绕纤维缠绕结构所进行的优化设计非常活跃。文献[4]利用网格理论和微分几何分析纵向平面缠绕规律,推导出纵向平面缠绕壳体的优化结构曲线,文献[6]利用经典层合理论,讨论了纤维缠绕玻璃钢在内压和法线方向一维非稳定温度场同时作用下的优化设计,文献[1]利用网格理论并结合图解

分析的方法对应变约束函数和强度约束函数下的层合压力容器进行优化设计,得到最小筒体质量时的纤维缠绕角。这些优化设计或者以纤维缠绕筒体为研究对象进行缠绕角和层厚的优化,或者对封头形状进行优化,而对带有封头的内压力容器整体的优化设计较少。本文将对纤维缠绕的车用气瓶进行整体优化设计,从轻型角度出发给出优化的目标函数,即最大容积质量比(此处的质量是指气瓶的质量),又从安全性角度出发给出优化的约束函数,即最大爆破压力。这样做的目的就是要求产品在安全使用的前提下,能保证CNG汽车有较高的动力性和较长的续驶里程,同时为节约原材料将天然气瓶设计成等强度结构。

## 2 符号说明

设封头纤维与经线的夹角(即缠绕角)为  $\alpha$ , 纤维极限应力为  $\sigma_0$ , 封头上任一平行圆处的纤维厚度为  $h$ , 壳体的经向应力和纬向应力分别为  $\sigma_l$  和  $\sigma_t$ , 经向薄膜内力和纬向薄膜应力分别为  $T_l$  和  $T_t$ , 筒体部分的缠绕角为  $\alpha_0$ , 筒体螺旋缠绕部分的厚度为  $h_0$ , 环向缠绕部分的厚度为  $h_1$ , 极孔半径为  $r$ , 封头上任意点所在圆的半径为  $R_i$ , 筒身为  $L_c$ , 筒身半径为  $R$ , 爆破压强为  $P_B$ 。

## 3 应力分析<sup>[2~4]</sup>

### 3.1 封头处应力分析

封头上纤维承受的经向单位内力和纬向单位内力如图 1 所示。

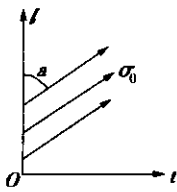


图 1 封头缠绕纤维应力

由网格理论可知壳体的薄膜内力全部由纤维承担, 于是有:

$$T_l = \sigma_l h = 2\sigma_0 h \cos^2 \alpha \quad (1)$$

$$T_t = \sigma_t h = 2\sigma_0 h \sin^2 \alpha \quad (2)$$

由式(1)和(2)可得:

$$\frac{\sigma_l}{\sigma_t} = \tan^2 \alpha \quad (3)$$

### 3.2 筒体应力分析

对于汽车用天然气气瓶的筒体部分, 依应力分布规律, 一般采用螺旋缠绕加环向缠绕, 以使环向得以加强, 此时螺旋缠绕纤维承担全部经向内力和部分纬向内力, 还有部分纬向内力由环向纤维承担, 如图 2 所示。

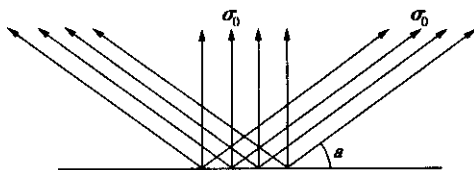


图 2 筒体缠绕纤维应力图

设环向缠绕纤维和螺旋缠绕纤维同时达到极限应力  $\sigma_0$ , 于是有:

$$T_l = \sigma_l h_0 = 2\sigma_0 h_0 \cos^2 \alpha_0 \quad (4)$$

$$T_t = \sigma_t h_0 = 2\sigma_0 h_0 \sin^2 \alpha_0 + \sigma_0 h_1 \quad (5)$$

万方数据

### 3.3 封头曲线的设计

壳体应力分析如图 3(b), 对壳体的一个横截面积进行平衡分析, 有:

$$\sigma_l = pR_i/2t \quad (6)$$

如图 3(c), 对壳体的一个微元进行平衡分析, 有:

$$\frac{\sigma_l}{R_l} + \frac{\sigma_t}{R_t} = \frac{p}{t} \quad (7)$$

将式(6)代入式(7)得:

$$\sigma_t = \frac{pR_i}{2t} \left( 2 - \frac{R_t}{R_l} \right) \quad (8)$$

将式(6)、(8)代入式(3), 可得封头部分缠绕角和主曲率的关系, 即:

$$\tan^2 \alpha = 2 - R_t/R_l \quad (9)$$

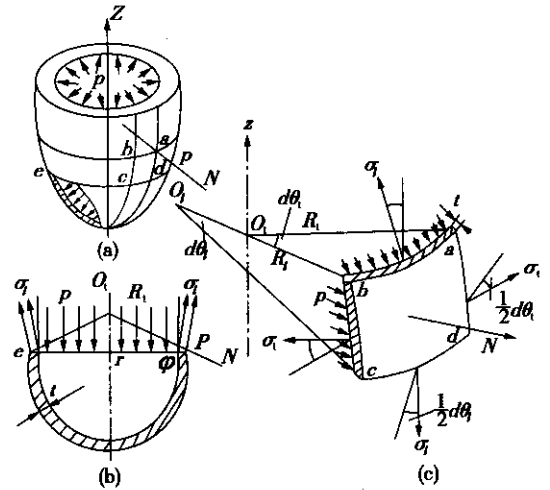


图 3 壳体应力分布

设封头曲线的方程为  $y = f(x)$ , 如图 4, 封头是由封头曲线围绕  $y$  轴旋转而成的, 因而由微分几何知识可得纬向主曲率半径和经向主曲率半径分别为:

$$R_l = \frac{x \sqrt{1 + (y')^2}}{y'} \quad (10)$$

$$R_t = \frac{[1 + (y')^2]^{3/2}}{y''} \quad (11)$$

封头纤维应沿测地线缠绕, 根据测地缠绕时的 Clairaut 方程<sup>[3]</sup>, 可知:

$$R_i \sin \alpha = C \quad (12)$$

式中  $C$  为确定的常数, 可由边界条件求得。

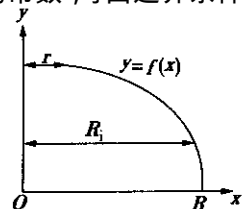


图 4 封头曲线示意图

根据缠绕工艺可知,纤维由筒身连续缠绕到封头上,故在封头与筒身连接处有:

$$R_i \sin \alpha = R \sin \alpha_0 \tag{13}$$

在极孔处有  $R_i = r, \alpha = \pi/2$ , 于是有:

$$C = r \tag{14}$$

如图4,令  $R_i = x, r = x_0$ ,由式(13)和(14)可得实现测地线缠绕时,封头上各点的缠绕角为  $\sin \alpha = x_0/x$ ,筒身缠绕角为  $\sin \alpha_0 = x_0/R$ .

将封头缠绕角表达式及式(10)(11)代入式(9)得:

$$\frac{y''}{y'[1+(y')^2]} = \frac{2x^2 - 3x_0^2}{x[x^2 - x_0^2]} \tag{15}$$

将式(15)利用边界条件积分两次,得到等张力封头曲线方程:

$$Y = \int_x^1 \frac{X^3}{\left[ \frac{X^2 - X_0^2}{1 - X_0^2} - X^6 \right]^{1/2}} dX \tag{16}$$

式中  $Y = \frac{y}{R}, X_0 = \frac{x_0}{R}, X = \frac{x}{R}$ .

由式(15)可知当  $x = \sqrt{3/2}x_0$  时,  $y'' = 0$ ,即封头曲线出现拐点,此后纤维将无法继续缠上去,而当  $x = \sqrt{2}x_0$  时,  $R_i = R_l = R_{lmax} = R/\sin 2\alpha_0$ . 工程实际中通常将  $x_0 \leq x \leq \sqrt{2}x_0$  这段区域用以  $R_{lmax}$  为半径的球面代替,即在  $x_0 \leq x \leq \sqrt{2}x_0$  时,封头曲线为圆弧,其方程为:

$$x^2 + (y + a)^2 = \left( \frac{R}{\sin 2\alpha_0} \right)^2 \tag{17}$$

其中  $a$  为未知量,能由边界条件:  $x = \sqrt{2}x_0$  时,  $y = R \int_{\sqrt{2}x_0}^1 \frac{X^3}{\left[ \frac{X^2 - X_0^2}{1 - X_0^2} - X^6 \right]^{1/2}} dX$  求出.

#### 4 优化设计<sup>[5,6]</sup>

本文综合考虑轻型化和安全性两方面的要求,以最大容积质量比为目标函数,从爆破压强的角度给出安全性约束函数.分两部分计算封头部分的体积有:

$$V_f = \int_{x_0}^{\sqrt{2}x_0} \frac{x^3}{\sqrt{\left( \frac{R}{\sin 2\alpha_0} \right)^2 - x^2}} dx + \int_{\sqrt{2}x_0}^R x^2 \frac{\left( \frac{x}{R} \right)^3}{\sqrt{\frac{x^2 - x_0^2}{R^2 - x_0^2} - \left( \frac{x}{R} \right)^2}} dx \tag{18}$$

由于缠绕工艺的连续性,筒身完成一个循环时,布满环向的纤维条数  $M$  在封头上也会有相同的纤维条数  $M$ . 令  $A$  为螺旋绕组纤维的总横截面积,则有:

$$A = 2\pi R h_0 \cos \alpha_0 = 2\pi r h \cos \alpha$$

从而得封头上任一平行圆处纤维厚度为:

$$h = \frac{R \cos \alpha_0 h_0}{r \cos \alpha} \tag{19}$$

由式(9)(10)和(11)可得封头缠绕角的微分方程如下:

$$\tan^2 \alpha = 2 - \frac{xy''}{y'[1+(y')^2]} \tag{20}$$

由上式可以看出对于封头的厚度,也应分两部分进行考虑.

当  $x_0 \leq x \leq \sqrt{2}x_0$  时,封头曲线为圆弧,由几何条件可知,此时环向曲率半径和子午向曲率半径相等,再根据缠绕角的微分方程可知这一段缠绕角均为  $\alpha = 45^\circ$ ,厚度  $h = \sqrt{2}R \cos \alpha_0 h_0 / x_0$ .

在  $\sqrt{2}x_0 \leq x \leq R$  时,封头纤维厚度为:

$$h = \frac{R \cos \alpha_0 h_0}{r \cos \alpha} = \frac{\sqrt{R^2 - x_0^2}}{\sqrt{x^2 - x_0^2}} h_0$$

故可得封头部分的质量为:

$$m_f = h_0 \int_{x_0}^{\sqrt{2}x_0} \frac{\sqrt{2}\pi R^2}{\left( \sin \alpha_0 \right) \sqrt{\left( \frac{R}{\sin 2\alpha_0} \right)^2 - x^2}} dx + h_0 \int_{\sqrt{2}x_0}^R \frac{2\pi x}{\sqrt{\frac{x^2 - x_0^2}{R^2 - x_0^2} - \left( \frac{x}{R} \right)^2}} dx \tag{21}$$

对于筒身部分,筒身部分为圆筒,其容积为:

$$V_l = \pi R^2 L_c \tag{22}$$

由于筒身部分的质量仅与圆筒直径和层厚有关,而按照均衡应变状态<sup>[7]</sup>,环向缠绕层厚与螺旋缠绕层厚有如下关系:

$$h_1/h_0 = 3\cos^2 \alpha_0 - 1 \tag{23}$$

因而筒身部分的质量为:

$$m_l = 2\pi R L_c (h_0 + h_1) \rho = 2\pi R L_c h_0 (3\cos^2 \alpha_0) \rho$$

故天然气瓶的总容积为:

$$V = V_f + V_l \tag{24}$$

气瓶的总质量为:

$$m = m_f + m_l \tag{25}$$

根据经济性原则给出目标函数为:

$$V/m \rightarrow \max \tag{26}$$

根据安全性原则给出如下的约束函数:

$$\left. \begin{aligned} h_0 > 0 \\ p_t \geq p_B \\ p_f \geq p_B \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

根据文献 [7] 可知,筒身部分爆破压强为:

$$p_t = 2\sigma_0(h_0 + h_1)/R \quad (28)$$

封头部分爆破压强为:

$$p_f = 2k_s\sigma_0h_0\cos^2\alpha_0/R \quad (29)$$

式中  $k_s$  为应力平衡系数,一般取 0.7 左右。

由于筒身的缠绕角要满足 Clairaut 方程,一旦极孔和筒身半径给定,筒身的缠绕角也就确定了,故对缠绕角的优化就变为在满足容积质量比要求下采用最佳极孔筒身半径比。采用缠绕角和层厚为设计变量,由于优化过程中以缠绕角和层厚为未知变量时,进行积分运算会难以解决,现针对一系列具体的缠绕角,以层厚作为设计变量,采用序列二次规划(SQP)算法进行优化,得到相应缠绕角下最优的层厚,以及最大的体积质量比,然后再将这些结果按照体积质量比的大小顺序排列起来,可得到缠绕角与体积质量比之间变化的关系。SQP 算法是模拟解决无约束优化问题的牛顿方法来解决约束优化问题,在每一次迭代时,收敛由拟牛顿方法得到的 Lagrange 函数构成的 Hessian 矩阵来保证。

### 5 算例

现采用石墨纤维,其极限应力  $\sigma_0 = 2.0 \text{ GPa}$ ,密度  $\rho = 1.3 \text{ g/cm}^3$ ,压力容器的半径  $R = 280 \text{ mm}$ ,筒身部分长  $L_c = 1070 \text{ mm}$ ,爆破压力  $p_b = 70 \text{ MPa}$ 。进行优化设计时,以层厚为设计变量,针对不同的缠绕角得到相应情况下的最佳层厚。

将所得结果数据表示在体积质量比 - 缠绕角关系图线中,如图 5,由图中可看出,最大体积质量比出现在  $a \sin(0.32)$  和  $a \sin(0.33)$  之间,为得到更精确的结果,在  $a \sin(0.32)$  和  $a \sin(0.33)$  之间进一步细化计算得到结果见表 1。即在  $\alpha_0 = 18.9656^\circ$  时  $V/m$  取最大值,因而得到最终的优化结果为  $64.9304 \text{ mL/kg}$ ,此时的螺旋层层厚为  $7.8267 \text{ mm}$ 。上述计算是在理论上给出了更高的精度,在工程中取  $\alpha_0 = 19.0^\circ$ ,  $h_0 = 7.83 \text{ mm}$ ,  $V/m = 64.9 \text{ mL/kg}$  即可。

### 6 结论

(1) 结合等张力封头曲线方程及均衡应变状态下爆破压强的计算,给出了等强度复合材料气瓶在

内压作用下优化设计的方法。

表 1

| $\sin\alpha_0$ | $h_0(\text{mm})$ | $V/m(\text{mL/kg})$ |
|----------------|------------------|---------------------|
| 0.321          | 7.8041           | 64.9295             |
| 0.322          | 7.8097           | 64.9299             |
| 0.323          | 7.8154           | 64.9302             |
| 0.324          | 7.8210           | 64.9303             |
| 0.325          | 7.8267           | 64.9304             |
| 0.326          | 7.8324           | 64.9303             |

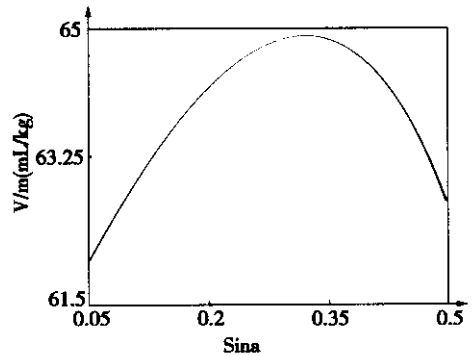


图 5 体积质量比变化曲线

(2) 通过算例可以看出,随着缠绕角的增大,满足约束条件的层厚是不断增加的,而个体最佳值时,可使气瓶达到容积大质量轻的最优状态。

(3) 本文所采取的 SQP 算法进行优化并结合试算判断的方法在解决优化过程中所遇到的数学难题不失为一个较好的方法。

参考文献:

- [1] Alexis A. Krikanov. Composite Pressure Vessels with Higher Stiffness[J]. Composite Structures, 2000, 48: 119 - 127.
- [2] 梅向明,黄敬之. 微分几何[M]. 北京:高等教育出版社,1996.5.
- [3] M. Hojjati et. al. Design of Domes for Polymeric Composite Pressure Vessels[J]. Composites Engineering, 1995, 5(1): 51 - 59.
- [4] 边文凤. 纵向平面缠绕壳体几何参数的优化设计[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1997, 6: 53 - 55.
- [5] 陈汝训. 纤维缠绕压力容器爆破压强计算[J]. 宇航材料工艺, 2000, 6.
- [6] 谢怀勤,等. 纤维缠绕 GPR 内压力容器在非稳定温度场工况下的优化设计[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1998, 4.

收稿日期 2003 - 10 - 17

作者简介 边文凤(1963 - )女,副教授,硕士生导师,主要从事汽车动力学、结构强度研究方面的理论分析与数值计算工作,通讯地址:山东省威海市哈尔滨工业大学汽车工程学院。

# 天然气汽车复合材料气瓶的优化设计

作者: [边文凤](#), [孙芳](#)  
作者单位: [哈尔滨工业大学, 汽车工程学院, 山东, 威海, 264209](#)  
刊名: [压力容器](#)   
英文刊名: [PRESSURE VESSEL TECHNOLOGY](#)  
年, 卷(期): 2004, 21 (1)  
被引用次数: 3次

## 参考文献(6条)

1. [Alexis A;Krikanov](#) [Composite Pressure Vessels with Higher Stiffness](#)[外文期刊] 2000
2. [梅向明;黄敬之](#) [微分几何](#) 1996
3. [M Hojjati](#) [Design of Domes for Polymeric Composite Pressure Vessels](#) 1995(01)
4. [边文凤](#) [纵向平面缠绕壳体几何参数的优化设计](#)[期刊论文]-[石油大学学报\(自然科学版\)](#) 1997(06)
5. [陈汝训](#) [纤维缠绕压力容器爆破压强计算](#)[期刊论文]-[宇航材料工艺](#) 2000(06)
6. [谢怀勤](#) [纤维缠绕GPR内压力容器在非稳定温度场工况下的优化设计](#) 1998

## 本文读者也读过(10条)

1. [许贤泽. 李志明](#) [天然气汽车气瓶计算机辅助优化设计](#)[期刊论文]-[湖北工学院学报](#)2002, 17(2)
2. [邢志敏. 高建岭. 王晓纯](#) [复合材料CNG气瓶的力学性能研究](#)[会议论文]-2004
3. [陈汝训](#) [复合材料天然气气瓶设计的几个问题](#)[期刊论文]-[宇航材料工艺](#)2001, 31(5)
4. [常新龙. 张晓军. 刘新国. 简斌. Chang Xinlong. Zhang Xiaojun. Liu Xinguo. Jian Bin](#) [复合材料气瓶有限元分析与爆破压力预测](#)[期刊论文]-[火箭推进](#)2008, 34(4)
5. [杨福全. 张天平. 刘志栋. 王小永. YANG Fu-quan. ZHANG Tian-ping. Liu Zhi-dong. WANG Xiao-yong](#) [复合材料气瓶的有限元建模与屈曲分析](#)[期刊论文]-[真空与低温](#)2005, 11(1)
6. [左惟炜. 肖来元. 廖道训. Zuo Weiwei. Xiao Laiyuan. Liao Daoxun](#) [三维编织复合材料高压储气瓶的屈曲分析与优化设计](#)[期刊论文]-[中国机械工程](#)2007, 18(3)
7. [夏立荣. XIA Li-rong](#) [车用CNG全复合材料气瓶的失效模式分析及预防](#)[期刊论文]-[压力容器](#)2009, 26(12)
8. [苏文献. 祝彦寿. 马宁. 李霖. SU Wen-xian. ZHU Yan-shou. MA Ning. LI Ji](#) [车用压缩天然气全缠绕复合材料气瓶强度试验及数值模拟](#)[期刊论文]-[上海理工大学学报](#)2010, 32(2)
9. [王明寅. 刘文博. 王士巍. 侯涤洋](#) [复合材料高压氮气气瓶的结构设计与试验分析](#)[期刊论文]-[纤维复合材料](#) 2003, 20(2)
10. [刘峰](#) [合理提高CNG汽车加气速度的几个关键环节](#)[期刊论文]-[城市公用事业](#)2003, 17(4)

## 引证文献(4条)

1. [张红星. 江华生](#) [用压缩天然气气瓶的研究概况](#)[期刊论文]-[石油和化工设备](#) 2011(10)
2. [岳忠. 李晓辉. 张树](#) [基于ANSYS对车用全复合材料CNG气瓶的安全研究](#)[期刊论文]-[中国安全科学学报](#) 2011(3)
3. [于斌. 刘志栋. 赵为伟. 申健. 靳庆臣. 栗刚. 程彬](#) [国内外复合材料气瓶发展概况与标准分析\(二\)](#)[期刊论文]-[压力容器](#) 2011(12)
4. [徐君臣. 银建中](#) [纤维缠绕复合材料气瓶研究进展](#)[期刊论文]-[应用科技](#) 2012(4)