

# 碳纤维缠绕复合气瓶自紧力和疲劳的数值模拟

陈亮<sup>1</sup> 孙红卫<sup>2</sup> 陈国清<sup>1</sup> 任明法<sup>1</sup> 周文龙<sup>1</sup>

(1 大连理工大学,大连 116085)

(2 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 采用数值模拟方法研究了自紧工艺对碳纤维缠绕复合气瓶的应力分布和疲劳性能的影响。基于 ANSYS 商用有限元分析软件,考虑气瓶封头部分碳纤维缠绕层的角度和厚度沿封头子午线的连续变化,建立了有限元模型。分析验证了 54 MPa 自紧压力对复合气瓶零压和 35 MPa 工作压力下内衬和复合材料缠绕层应力的影响,并利用 Coffin-Manson 公式预测了复合气瓶的疲劳寿命。结果表明,自紧后复合气瓶内衬在工作压力下的最大应力减小了 29.1%。有限元计算的疲劳寿命结果与实验测定结果之间的误差 < 8%,验证了有限元模型和计算方法的正确性。

**关键词** 纤维缠绕气瓶,有限元,自紧力,疲劳寿命

## Numerical Simulation of Autofrettage and Fatigue of Filament Wound Pressure Vessel

Chen Liang<sup>1</sup> Sun Hongwei<sup>2</sup> Chen Guoqing<sup>1</sup> Ren Mingfa<sup>1</sup> Zhou Wenlong<sup>1</sup>

(1 Dalian University of Technology, Dalian 116085)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** The effect of autofrettage on stress distribution and fatigue life of composite overwrapped pressure vessels (COPV) was studied by using the numerical simulation. The finite element model of COPV was established based on the commercial software ANSYS. The variations of the thickness and winding angles of the composites along the meridian in the domes section are considered during the modeling. The influence of autofrettage pressure of 54 MPa on the stress of metallic liner and composite layers is analyzed. The fatigue life of the COPV is predicated by using Coffin-Manson formula. The results demonstrated that the diversity between the result of finite element analysis and the experiments is within 8%, which indicated the finite element model and the analysis is reasonable.

**Key words** Overwrapped pressure vessels, Finite element, Autofrettage pressure, Fatigue life

### 0 引言

以金属为内衬、复合纤维材料作为缠绕带的复合气瓶,已被广泛应用于航空航天、建筑、交通等领域<sup>[1]</sup>。复合气瓶综合了复合材料和金属内衬的优点,具备高承压、高疲劳寿命、质轻、耐腐蚀等优良性能<sup>[2]</sup>,但是复合气瓶的性能对生产工艺的依赖性很大。为了提高复合气瓶的疲劳寿命,通常采用自紧处理方法使复合气瓶在零压时内衬处于受压状态而碳

纤维复合材料层处于拉应力状态,从而降低工作时内衬的受力<sup>[3]</sup>,充分发挥碳纤维高强度的优点并提高复合气瓶的疲劳寿命。

国内外普遍采用有限元法对复合的自紧问题进行研究。如周敏华等<sup>[4]</sup>对厚壁圆筒的自紧过程进行了有限元分析,得出了厚壁圆筒的应力分布与自紧压力的关系并提出了最佳自紧压力。张传勇等<sup>[5]</sup>对呼吸气瓶的自紧过程进行了有限元计算,为解决气瓶的

收稿日期:2012-06-01

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(DUT10ZD02);新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0278)

作者简介:陈亮,1987年出生,硕士研究生,主要从事复合气瓶有限元模拟研究。E-mail:liangchen341@sina.com

自紧压力处于非优化状态这一问题提供了新途径。R. Thumser 和 J. W. Bergmann 等<sup>[6]</sup>则使用有限元方法对自紧后的残余应力场和疲劳寿命进行了分析,指出自紧工艺能有效提供材料的疲劳极限。但是以上分析计算的气瓶结构都比较简单,主要是厚壁金属气瓶和单一螺旋缠绕角度的复合气瓶,并且计算分析主要集中在圆筒段,对气瓶封头部进行了简化处理。

本文借助 ANSYS 有限元软件计算了 54 MPa 自紧压力对复合气瓶金属内衬和碳纤维缠绕层的应力和疲劳寿命的影响。

## 1 模型的建立

### 1.1 气瓶结构

复合气瓶是由铝内衬和碳纤维/树脂复合层构成。瓶体由圆柱段、封头段和气瓶接头三部分组成。气瓶容积为 130 L,总长 1 276 mm,圆柱段内衬壁厚 2 mm,外径 430 mm,封头为椭球形。复合材料缠绕层采用多角度螺旋缠绕(6 种角度)和环向缠绕相结合的方式,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结合。在气瓶的中间位置添加了加强层。

复合气瓶内衬为 6061-T6 铝合金,复合材料层由 T700 碳纤维和环氧树脂构成,它们的主要力学性能如表 1 和表 2 所示。

表 1 内衬力学性能

Tab.1 Mechanical properties of the liner

弹性模量/ GPa	泊松比	拉伸强度/ GPa	屈服强度/ GPa	密度/ g·cm <sup>-3</sup>
74.1	0.28	340	282	2.7

表 2 复合材料缠绕层力学性能

Tab.2 Mechanical properties of the composites

$E_x$ / GPa	$E_y$ / GPa	$E_z$ / GPa	$\nu_{xy}$	$\nu_{yz}$	$\nu_{xz}$	$G_{xy}$ / GPa	$G_{yz}$ / GPa	$G_{xz}$ / GPa
135	10	10	0.32	0.49	0.49	5	7	5

### 1.2 网格划分

采用 solid 186 块体单元划分金属内衬;shell 281 壳单元模拟复合材料缠绕层。由于螺旋缠绕层的缠绕角度和厚度在封头上沿母线不断的变化,为使模型结构与复合气瓶的真实结构相一致,封头上各角度螺旋缠绕层的厚度、角度和切根位置由测地线公式(1)~公式(3)计算得到,然后使用 APDL 操作命令编写宏文件把螺旋缠绕层的变化值赋给相应的壳单元。

$$d_0 = D_0 \times \sin\alpha_0 \quad (1)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{d_0}{D}\right) \quad (2)$$

$$h_f = h_{fa} \sqrt{\frac{D_0^2 - d_0^2}{D^2 - d_0^2}} \quad (3)$$

式中, $\alpha_0$  为圆柱段的螺旋缠绕层的角度, $d_0$  为缠绕角为  $\alpha_0$  的螺旋缠绕层切根处的曲面回旋直径, $D_0$  为气瓶圆柱段直径, $\alpha$  为封头上的缠绕角, $D$  为封头缠绕点的曲面回旋直径, $h_{fa}$  为螺旋缠绕层在圆柱段的厚度, $h_f$  为螺旋缠绕层在封头上的厚度。

由于复合气瓶的边界条件和几何结构都是轴对称的,因此计算采用 1/8 模型。单元划分后模型如图 1 所示。

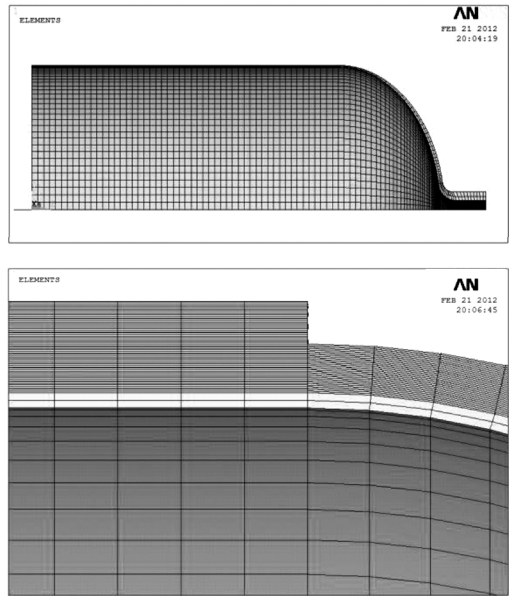


图 1 复合气瓶 1/8 有限元模型

Fig.1 1/8 Finite element model of composite vessel

### 1.3 边界条件和加载方式

复合气瓶的边界条件和加载方式是由气瓶的实际工作环境和承载方式决定的。本文中气瓶的边界条件为:气口端施加径向和切向位移约束,模型两侧和底部施加对称边界条件。内压载荷均匀地施加在气瓶的内表面上,加载过程如图 2 所示。

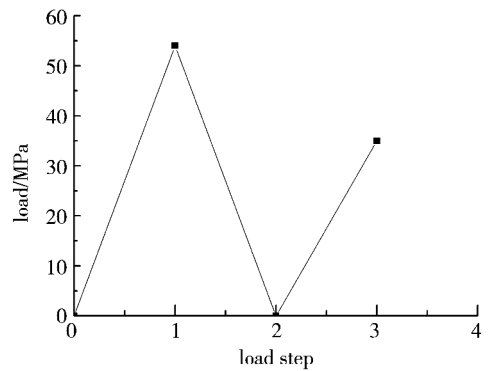


图 2 复合气瓶加载过程

Fig.2 Schematic of loading process

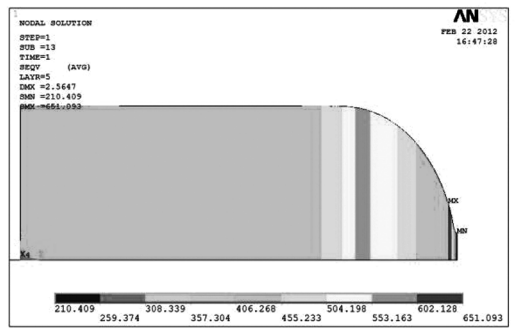
## 2 计算结果分析

### 2.1 自紧处理对应力大小和分布的影响

图3为没有自紧处理时工作压力下内衬的 Mises 等效应力分布云图和应力沿母线的分布曲线。由计算结果可知,在工作压力下应力分布均匀,这是多角度螺旋缠绕的优点。图3(b)表明最大应力位于圆柱段,在封头与气口的连接部分应力水平次之,封头部分的应力水平最低。但是整个内衬的应力都大于其屈服强度,即在工作状态下内衬处于拉伸屈服状态。

图4为没有自紧处理时复合气瓶碳纤维缠绕层在 35 MPa 工作压力下的应力分布云图。计算结果表明环向缠绕层的应力比螺旋缠绕层的大,在工作压力下环向缠绕层的应力低于其断裂强度的 50%,而螺旋缠绕层的应力低于其断裂强度的 35%。

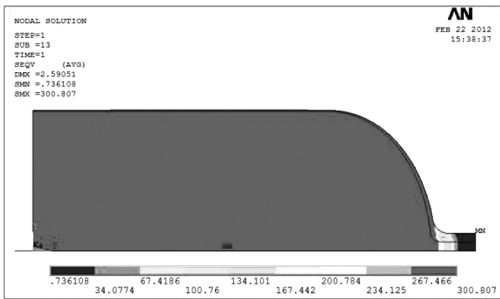
图5为经过 54 MPa 自紧压力处理后内衬在零压和工作压力下的应力分布。



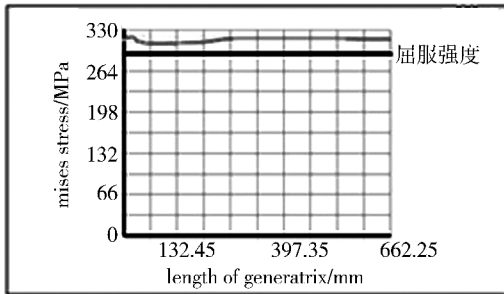
(b) 14°螺旋缠绕层等效应力分布云图

图4 复合材料缠绕层在工作应力下的 Mises 等效应力分布

Fig.4 Mises stress distribution of composites under working pressure



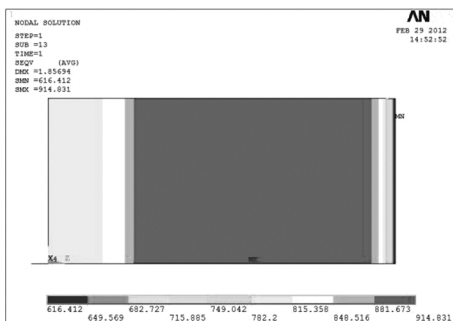
(a) 应力分布云图



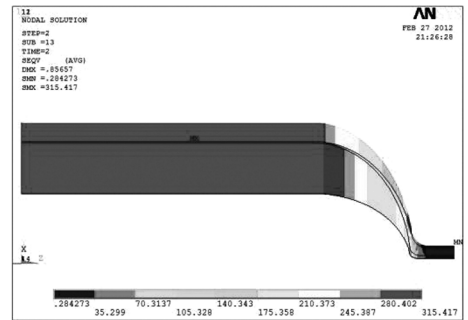
(b) 应力沿母线的分布曲线

图3 未经自紧处理时 35 MPa 压力下气瓶内衬的 Mises 等效应力

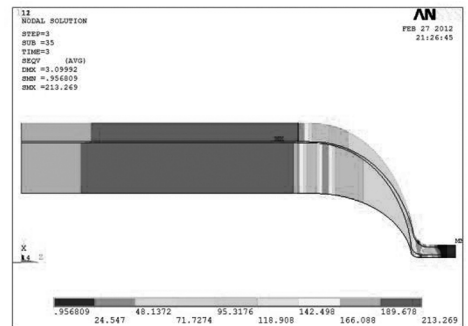
Fig.3 Mises stress of the liner under 35 MPa pressure without autofrettage process



(a) 90°环向缠绕层等效应力分布云图



(a) 零压下应力分布云图



(b) 工作压力下的分布云图

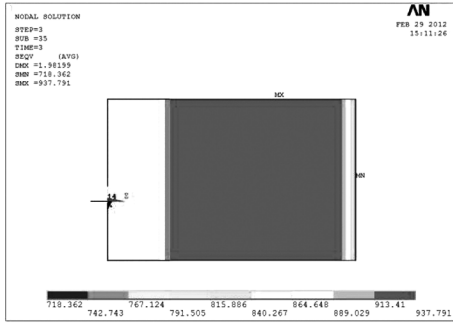
图5 自紧后复合气瓶内衬的应力分布

Fig.5 Stress distribution of liner after autofrettage process

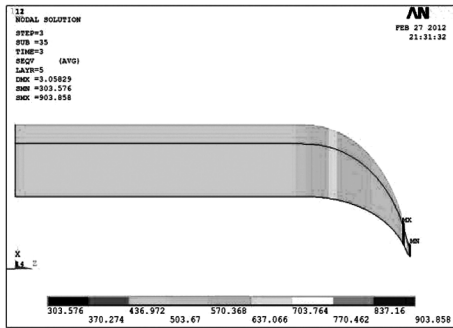
图5的分析结果表明,自紧后内衬在工作压力下的应力远远低于自紧前,最大应力减小了 29.1%,由 300.8 降为 213.3 MPa;自紧后内衬应力分布的差异性增大,封头部分的应力的降低比例比直筒段更大。表明自紧工艺能有效的降低铝合金内衬在工作压力下的应力并对内衬在工作压力的应力分布有一定的影响。零压下内衬处于压应力状态,并且压应力的数值很大,已经超过了屈服强度。这表明 54 MPa 的自紧压力对于该复合气瓶而言过高,应适当降低自紧压力。自紧对碳纤维复合材料缠绕层在工作内压下的应力大小无明显影响(图6)。这主要是因为复合气瓶中内衬的主要作用是密封,即防止高压气体泄

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012年 第4期

漏,而载荷的主要承受体是复合纤维层,它承担了气瓶 95% 以上的载荷<sup>[6]</sup>,所以即使在工作压力下内衬把一部分载荷转移到复合纤维层,对缠绕层应力大小的影响也不大。



(a) 90°纤维缠绕层的应力分布



(b) 14°纤维缠绕层的应力分布

图6 35 MPa 工作压力下碳纤维缠绕层的应力分布  
Fig.6 Stress distribution of composites under 35 MPa working pressure

## 2.2 疲劳寿命预测

高压气瓶普遍使用金属内衬外加纤维复合材料缠绕层的结构,其中纤维复合层承受了气瓶 95% 以上的载荷,而金属内衬主要起密封作用。由于在工作内压下,内衬的应力已经接近(甚至超过)屈服强度,而碳纤维复合层的应力水平远低于其强度,因此它的疲劳寿命比内衬高得多。从而高压气瓶在使用过程中往往是由于内衬的疲劳开裂而失效,气瓶疲劳设计的关键在于金属内衬。

由于在工作压力和零压下内衬都具有很大的应力,内衬的疲劳属于低周疲劳。对于低周疲劳,本文采用基于大量实验数据的 Coffin-Manson 公式,由零压和工作压力之间内衬的总应变预测复合气瓶的疲劳寿命。Coffin-Manson 公式为<sup>[5]</sup>

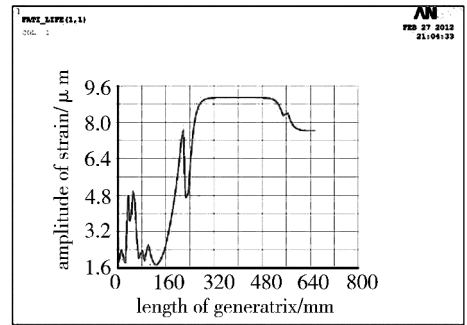
$$N = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_f} \right)^{\frac{1}{C}} \quad (4)$$

式中, $N$  为循环次数, $\Delta \varepsilon_p$  为循环中的塑性应变幅度, $\varepsilon_f$  为疲劳塑性系数, $C$  为疲劳塑性指数。

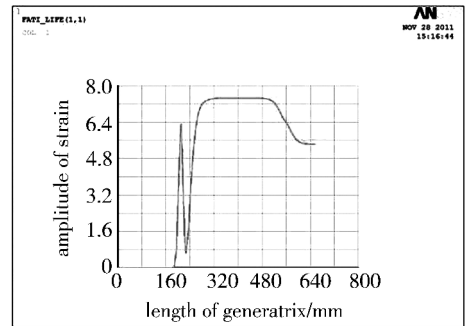
由于复合气瓶的疲劳性能是通过在 0 和 35 MPa 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012 年 第 4 期

水压反复加卸载而获得的,因此使用 ANSYS 计算内衬在 0 和 35 MPa 压力时的塑性应变,然后计算其疲劳塑性应变幅度,最后使用 Coffin-Manson 公式计算气瓶内衬的疲劳寿命。通过有限元计算得到未经自紧和自紧处理后气瓶内衬在零压和工作压力之间的疲劳塑性应变幅度沿气瓶母线的分布如图 7 所示。

由计算结果可知,经过自紧处理后气瓶内衬的塑性应变幅比未经自紧处理时小,尤其是在封头部位,应变幅的降低更加明显,并且无论有没有经过自紧处理,内衬疲劳应变幅度最大的位置都在圆柱段。在应变幅度沿母线的分布图中有两个地方需要特别注意:(1)是在封头和圆柱段的过渡区,由于气瓶几何结构和碳纤维缠绕层厚度的突然改变导致应力分布比较复杂,因此此处是气瓶爆破和发生疲劳失效的可能性较高的位置;(2)是在圆柱段中间,由于加强层的存在使得这个位置的应变幅度比圆柱段其他位置小。



(a) 未经自紧的塑性应变



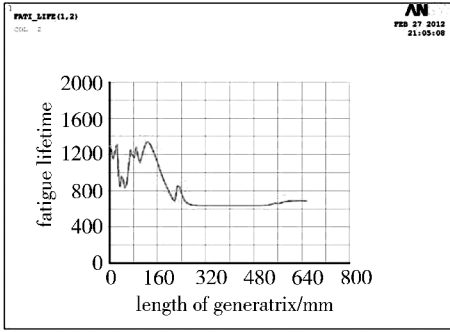
(b) 经过 54 MPa 自紧的塑性应变

图7 复合气瓶内衬在零压和工作压力之间的疲劳塑性应变幅度

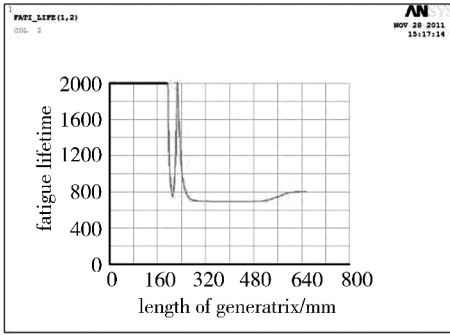
Fig.7 Fatigue plastic strain amplitude of liner between 0 and working pressure

使用(4)式计算得到气瓶疲劳寿命沿母线的分布,如图 8 所示。计算结果表明圆柱段的疲劳寿命最低,并且在过渡区应力集中带处疲劳寿命只略高于圆柱段,但是比封头上的其他位置的疲劳寿命要低很多。没有自紧处理的复合气瓶的疲劳寿命为 619 次,自紧后的疲劳寿命为 695 次,提高较小,通过对自紧

后零压下复合气瓶内衬的应力分析可知,54 MPa 的自紧压力对于 130 L 气瓶来说过高,适当降低自紧压力可以进一步改善气瓶的疲劳性能。通过与实验结果对比表明,计算结果与之偏差 8%,这主要是因为是在计算过程中采用的是理想几何模型和理想材料,即认为气瓶没有任何几何和材料缺陷。



(a) 没有自紧时



(b) 经过 54 MPa 自紧

图 8 复合气瓶内衬的疲劳寿命沿母线的分布

Fig. 8 Fatigue life curve of liner along axile line

### 3 结论

(1)复合气瓶自紧后,内衬在工作压力下的最大

应力减小了 29.1%,由 300.8 降为 213.3 MPa,达到了预期的效果;

(2)复合气瓶自紧后,零压下内衬的最大应力超过了内衬的屈服强度,表明工艺所选的自紧压力过高,应适当降低。

(3)通过有限元法计算出复合气瓶内衬在 0 和 35 MPa 的疲劳塑性应变幅,使用 Coffin-Manson 公式预测了复合气瓶的疲劳寿命,计算结果表明经过 54 MPa 自紧压力自紧后复合气瓶的疲劳寿命将会提高,尤其在封头上效果更好。

### 参考文献

- [1] 陈浩然,任明法,王荣国. 具有金属内衬缠绕压力容器成型全过程应力场分析[J]. 大连理工大学学报,2006,46(6):785-791
- [2] 王志辉,卢少春,郑强. 全缠绕复合气瓶的设计与研究[J]. 工艺. 装备,2009,47(543):70-72
- [3] 黄再满,蒋鞠慧,薛忠民,等. 复合材料天然气气瓶预紧压力的研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2001(9):29-32
- [4] 周敏华,李晓谦,刘荣光,等. 厚壁圆筒最佳自紧压力的有限元分析[J]. 现代制造工程,2008(8):111-114
- [5] 张传勇,万晓宁,张建伟. 采用有限元法计算 CNG2 型气瓶自紧压力[J]. 设计计算,2008(4):21-23
- [6] Thumser R, Bergmann J W, Vormwald M. Residual stress fields analysis and fatigue of autofrettaged parts[J]. Pressure vessels and piping,2002(79):113-117
- [7] 张晓军,常新龙. 复合材料气瓶有限元应力应变分析[J]. 纤维复合材料,2008(3):3-6

(编辑 吴坚)