

# 碳纤维缠绕铝内胆气瓶的有限元分析与自紧设计

嵇醒<sup>1\*</sup>, 戴瑛<sup>1</sup>, 顾星若<sup>2</sup>

(1. 同济大学固体力学教育部重点实验室, 同济大学, 上海 200092;

2. 上海复合材料学会, 气瓶技术部, 上海 200092)

**摘要:** 碳纤维缠绕铝内胆气瓶应用广泛, 由于贮气压力高, 安全性特别重要。铝内胆外表缠绕碳纤维的气瓶的重量比金属气瓶轻很多, 已从航天航空应用转向民用。这种气瓶的设计和制造, 在我国, 国家标准还没有公布, 在国际上较多采用 DOT CFFC 标准。本文对气瓶进行深入的有限元分析, 参考 DOT CFFC 标准来讨论气瓶的设计和自紧。如采用其他标准, 做法是一样的。本文有限元分析采用 ANSYS 程序。

**关键词:** 纤维缠绕; 气瓶; 自紧; 有限元分析

**中图分类号:** O39; O242.1

## Finite Element Analysis and Autofrettage Design of Filament Wound Pressure Vessel with Aluminum Liner

JI Xing<sup>1</sup>, DAI Ying<sup>1</sup>, GU Xing-ruo<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Solid Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Pressure Vessel, Shanghai Society of Composite Materials, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Carbon fiber wound pressure vessels have been extensively used in different areas, from aerospace and aeronautics to civil applications. The carbon fiber wound pressure vessels with aluminum liners are much more lighter than the metal counterparts. On account of the high pressure, safety is especially important. DOT CFFC Standard has been adopted in many countries. Here the design and autofrettage of carbon fiber wound pressure vessels with aluminum liners discussed were based on the finite element analysis.

**Key words:** filament wound; pressure vessel; autofrettage; FEA

呼吸气瓶的工作压力达到 30MPa, 故要求安全可靠, 此外还要求重量尽可能地轻, 以便于搬运。采用碳纤维缠绕铝内的气瓶能满足上述要求。这种气瓶的设计和制造, 在我国国家标准还没有公布, 在国际较多采用 DOT CFFC 标准<sup>[1]</sup>。本文对气瓶进行深入的有限元分析, 参考 DOT CFFC 标准来讨论气瓶的设计。如采用其他标准, 做法是一样的。本文有限元分析采用 ANSYS 程序<sup>[2,3]</sup>。

## 1 气瓶的强度和寿命

DOT CFFC 要求气瓶的爆破压力是工作压力的 3.4 倍, 使用寿命 15 年。为了使气瓶的设计和制造能满足强度和寿命的要求, 对气瓶的设计准则 DOT CFFC 做了如下的规定:

(1) 要求对气瓶进行有限元分析, 计算内胆和复合材料缠绕各层的周向和纵向应力, 考虑的载荷有零

收稿日期: 2003-01-13

作者简介: 嵇醒(1930-), 男, 浙江常熟, 教授, 博士生导师。

\* 通讯作者, 嵇醒, 同济大学工程力学与技术系, 上海, 200092

压力,工作压力,试验压力和爆破压力。

- (2) 工作压力下,缠绕层的纤维应力不能超过强度极限的 30%。
  - (3) 工作压力下,铝内胆的应力不能超过屈服极限的 60%。
  - (4) 零压力下,铝内胆的压应力不能超过屈服极限的 95%,但必须在屈服极限的 60%以上。
  - (5) 气瓶缠绕层封头处的最大应力必须总是小于筒体处的最大应力。
- 这些规定体现了现代纤维缠绕铝内胆气瓶设计的理论水平和技术要求。

## 2 自紧的必要性

仅仅依靠内胆的合理设计和缠绕层的合理设计,还不能达到上述 DOT CFRC 设计准则的要求。必须在气瓶固化完成后,在水压试验之前,让气瓶经受 1 次自紧压力循环。水压试验的压力为工作压力的 1.5 倍,自紧压力应该超过试验压力。自紧压力不能太大,也不能太小。自紧压力有个最优值,这个最优值是用有限元分析得出的。由此可见,精确可靠的有限元分析对气瓶设计是极其重要,且必不可少的。

自紧(Autofrettage)常常应用于金属厚壁高压容器<sup>[4]</sup>。在自紧压力下,让容器在靠近内壁的部分厚度范围内,达到屈服而产生塑性变形。当自紧压力卸掉后,内壁处产生残余压应力。其目的是:使得容器在工作压力下,容器内,外壁处的拉应力能够相近些,以较充分地利用材料。

碳纤维缠绕铝内胆气瓶的内胆和缠绕层的壁厚合在一起也不厚,不存在厚壁容器的自紧问题。气瓶的自紧需要来源于内胆和缠绕层的材料的不同,即两种材料的力学性能的巨大差异。设碳纤维胶带的弹性模量为 181000MPa,强度极限为 1850MPa。铝内胆的弹性模量为 69000MPa,屈服极限为 296.7MPa。二者的刚度比为 2.6,二者的强度比为 6.2。这说明在相同的应变下,即使铝内胆已经屈服,碳纤维还处于低应力状态,碳纤维的优良的高强度性能得不到充分发挥。不难看出:气瓶所面临的这个问题恰恰就是自紧所能解决的问题。而要解决气瓶的自紧问题,唯一的办法是对气瓶进行自紧的弹塑性力学分析。气瓶的自紧分析有两项内容:通过自紧分析,确定合适的自紧压力值;通过自紧分析,计算气瓶在自紧压力下,和零压力下,气瓶的内胆和缠绕层的应力分布。所有这些分析和计算,因其复杂性而不能依靠解析方法来完成,有限元方法是唯一的选择。

## 3 ANSYS 程序与建模

为了做好气瓶的有限元分析,首先要选择能符合要求的有限元程序。ANSYS 有限元分析软件<sup>[3]</sup>的功能可以满足气瓶分析的需要。在其单元库中,Solid 95 是弹塑性 20 节点块单元,可用于内胆;Shell99 是 8 节点层合复合材料壳单元,单元中各层可以有不同的缠绕角和厚度,并可以计算各层的纤维应力,可以用于计算碳纤维缠绕层。接触过气瓶有限元应力分析的人都知道,气瓶的有限元建模有许多特别的问题需要逐个加以解决,否则将得不到可靠有用的分析结果。气瓶有限元应力分析要由具有相当资质的专业人员来担任。他应掌握较多的固体力学理论,有限元法的理论,熟悉 ANSYS 软件及其应用操作技巧,同时要具备一定的气瓶设计和制造的经验。有研发能力的大型气瓶企业可以拥有自己的专业设计人员,没有研发能力的气瓶企业宜将气瓶的设计与有限元分析,委托给具有上述资质和有可靠信誉的气瓶技术服务机构。

使用 ANSYS 软件进行气瓶分析时,建模的方法和技巧都很重要,建模的正确性与结果的准确性,需要由使用人自己来检查和保证。

图 1 是 SCBA2 升气瓶的有限元模型的单元图。

## 4 有限元分析结果

气瓶的有限元建模完成之后,要进行有限元分析计算的内容有两项。其一是选择最优的自紧压力,然后在计算机上模拟自紧压力循环过程。其二是分别在零压力,工作压力,试验压力和爆破压力下,计算气

瓶的内胆和缠绕层各层的应力,以获取对气瓶设计有用的应力分析资料,或藉以评估气瓶设计的优劣,并找出必须在气瓶设计上作改进的地方。

现以2升气瓶为例,作自紧和经过自紧后的应力分析。利用ANSYS程序完成全部应力分析。能得到的应力分析的结果非常多,连缠绕层的层间剪应力也能查看到。本文不能给出全部有用的应力分析结果,只给出本文要用以说明的一些问题的相关结果。

图2是零压力下内胆的 Von Mises 应力分布图。图中的最大值为 268.278MPa,小于内胆材料的屈服极限 296.7MPa 的 95%,但大于 60%。

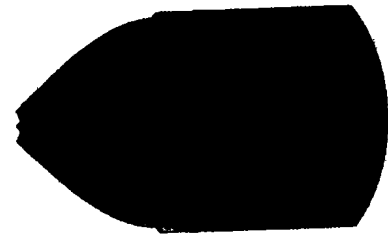


图1 SCBA2 升气瓶的有限元模型图  
Fig.1 Finite element model of SCBA pressure vessel(2 liters)

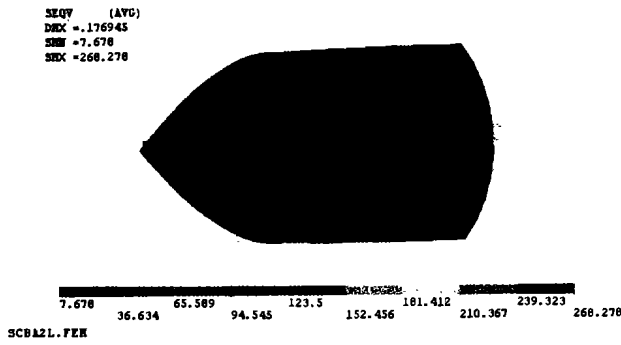


图2 零压力下内胆的 Von Mises 应力分布图  
Fig.2 Von Mises stress in aluminum liner without pressure

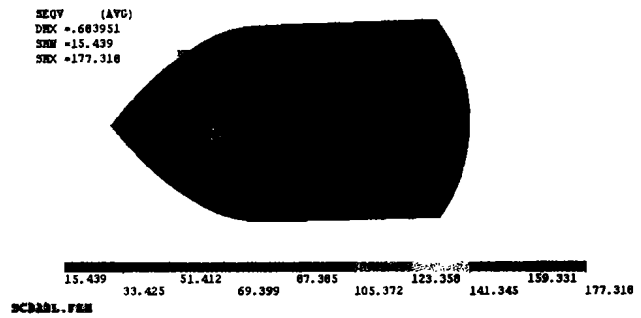


图3 工作压力下内胆的 Von Mises 应力分布图  
Fig.3 Von Mises stress in aluminum liner under working pressure

图3是工作压力下内胆的 Von Mises 应力分布图。图中的最大值为 177.318MPa,略小于屈服极限的 60%。

图4是工作压力下,某环向缠绕层的纤维向应力分布图。图中的最大值为 510.585MPa,取复合材料的强度极限为 1850MPa,前者小于后者的 30%。

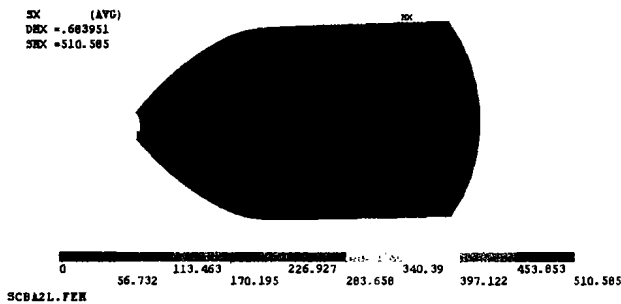


图4 工作压力下环向缠绕层的纤维方向应力分布图  
Fig.4 Tensile stress in hoop winding fiber under working pressure

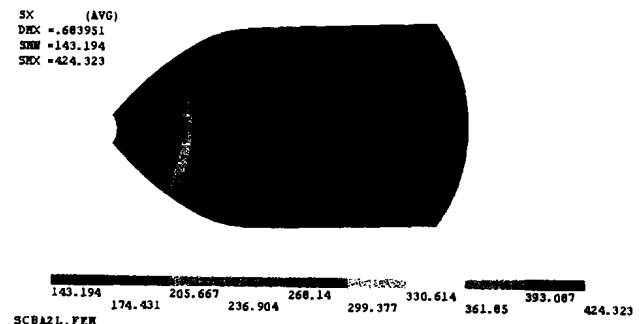


图5 工作压力下纵向缠绕层的纤维方向应力分布图  
Fig.5 Tensile stress in helical winding fiber under working pressure

图5是工作压力下,某纵向缠绕层的纤维向应力分布图。图中的最大值为 424.323MPa,发生在封头处,小于筒体处的最大环向应力。

图6是试验压力下,内胆的 Von Mises 应力分布图。图中的最大值为 263.887MPa,小于材料的屈服极限值。

图7是爆破压力下,环向缠绕层的纤维向应力分布图。图中的最大值为 1750MPa,稍小于强度极限。

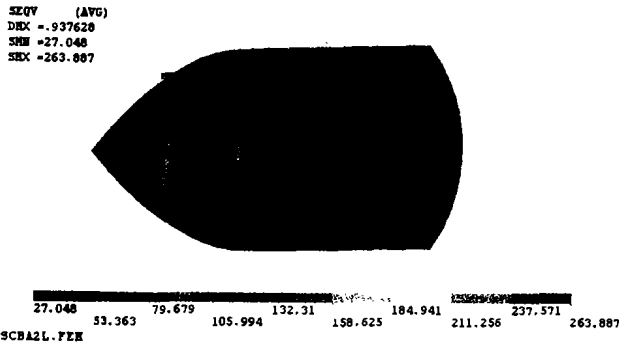


图 6 试验压力下内胆的 Von Mises 应力分布图

Fig. 6 Von Mises stress in aluminum liner under testing pressure

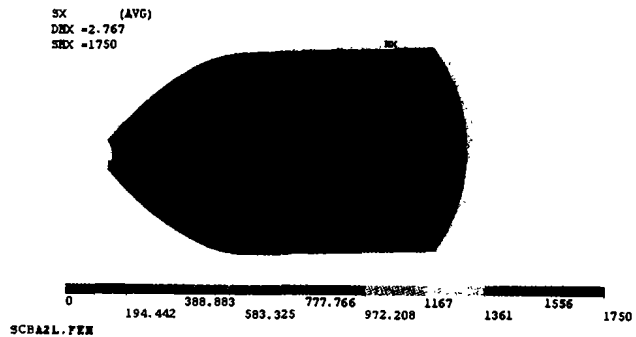


图 7 爆破压力下环向缠绕层的纤维方向应力分布图

Fig. 7 Tensile stress in hoop winding fiber under burst pressure

值得一提的是,从前常用的网格理论只提供由二个代数公式所能提供的非常有限的结果,而有限元法却能提供由一个大型有限元程序和高速计算机所能提供的详尽而又精确的大量的数值结果。以为在气瓶设计中真正有用的是网格理论,而有限元法只是锦上添花的议论,不仅是错误的,而且是有害的。网格理论最多只能用于缠绕层数的初步估算,估算之外,它就用不上了。而有限元分析就像给气瓶做了一次 CT 的全面检查,网格理论的计算结果是无法与有限元法相比的。

## 5 2 升气瓶自紧分析的结果

我们仍然用上节中 2 升气瓶例:让 2 升气瓶未经自紧压力循环,就受工作压力 30MPa 的作用。经过有限元分析,在工作压力下,内胆的 Von Mises 应力为 301.141MPa,已经达到材料的屈服极限,而这时环向缠绕层的应力为 384.419MPa,纵向层的应力为 280.495MPa,最大应力只是材料的强度极限的 20%。由于在工作压力下,铝内胆已经达到屈服,所以只要经过若干次的充气和放气后,铝内胆就会因疲劳而开裂,气瓶的 15 年的使用寿命是绝对保证不了的,而外层复合材料的作用还远远没有发挥出来。由 DOT CF8C 标准可知,内胆的应力状况是不合格的,而缠绕层的应力状况却是不经济的。

我们再回头来看本文的有限元分析结果,同样是这个 2 升气瓶,如果先经过自紧处理,再施加工作压力的话,这时内胆的 Von Mises 应力为 177.318MPa,而环向缠绕层的应力为 501.585MPa,纵向缠绕层的应力为 424.323MPa。从 DOT CF8C 标准看,这样的应力状况不仅是允许的,而且对材料的利用也更充分、经济、合理。

## 6 讨论

碳纤维缠绕铝内胆气瓶的设计离不开气瓶制造经验的积累,但是有限元分析能使气瓶设计达到相当精细和精确的程度,使气瓶设计人员可以利用到充分和足够的应力分析数据,将盲目性减小到最低限度,使气瓶设计和优化达到最佳程度。

对于气瓶制造工艺的制定,气瓶质量的控制,以及制造工艺研究等,有限元分析资料也是极其有用的参考。这是因为有限元分析中用到的不少参数与诸多的工艺因素有关。

气瓶设计是通过设计合格试验来评估的。国家质量技术监督部门是通过审核和型式试验的结果来对气瓶企业产品进行监控的。以有限元分析为根据的气瓶设计必将有助于顺利通过这些审核和试验。

对于纤维缠绕铝内胆或塑料内胆气瓶,除了无需经受自紧压力循环外,其余和纤维缠绕铝内胆气瓶的有限元分析没有多大差别。

在我国,纤维缠绕铝内胆或塑料内胆气瓶的生产起步虽然比较晚,但近年来的发展却很快。我们对这种气瓶进行深入的有限元应力分析研究,是气瓶工业发展所需要的。

**参考文献:**

- [1] DOT-CFFC Standard. Carbon-Fiber Aluminum Cylinders, 1996
- [2] 嵇醒,顾星若. 碳纤维缠绕铝内胆气瓶的有限元应力分析. 中国气瓶, 2002, 38(1): 21-32
- [3] ANSYS. Revision 5.6. Swanson Analysis Systems Inc., Houston, USA
- [4] Hill R. The Mathematical Theory of Plasticity. 1950