环形气瓶金属内衬的 CAE 仿真分析

姚金莉　杨芙蓉　杨　恒　万里园
（树脂基结构与功能材料技术湖北省工程实验室，孝感 432100）

摘要：运用 CAE 技术对环形气瓶金属内衬进行仿真分析，研究金属内衬在受到不同压力工况下的应力及变形情况，得到环形气瓶的薄弱部位和耐压情况，为气瓶增强层加固方案和工艺制定提供了依据，并为气瓶的强度验证试验提供了内压载荷数据。

关键词：环形气瓶；金属内衬；CAE

CAE Simulation Analysis of Metal Liner of Torus Vessel

Yao Jinli　Yang Furong　Yang Heng　Wan Liyuan
(Hubei Provincial Engineering Laboratory of Resin Based Structure and Functional Materials Technology, Xiaogan 432100)

Abstract：CAE technology is used for the simulation analysis of metal liner of torus vessel to research the stress and deformation under different pressure conditions. The weak parts and pressure situation of torus vessel are obtained, which provides the basis for the strengthening scheme, process setting, and strength test data for the gas cylinder.

Key words：torus vessel；metal liner；CAE

1　引言

金属内衬复合环形气瓶由环形金属内衬和其外表面的复合纤维补强层组成。内衬的主要功能是存储介质并防止介质泄漏，承担内压载荷；复合纤维补强承担气瓶的部分内压载荷，主要用于增加气瓶的安全系数[1]。作为高压气体介质的贮存设备，金属内衬复合环形气瓶的安全性备受关注。运用 CAE 技术对环形气瓶金属内衬进行有限元分析，研究环形气瓶金属内衬的耐压情况，为提高金属内衬复合环形气瓶的安全系数提供依据。

2　建立计算模型

2.1　建立 CAE 模型

环形气瓶金属内衬选用实体单元 solid45，该单元为八节点单元，每个节点三个平动自由度。根据环形对称性，中间建立柱面坐标系（r, θ, z）；为减小计算量，仅取环形气瓶的 1/2 进行有限元分析，得到 CAE 模型，六面体单元总数 72000 个，节点总数 97200 个，如图 1 所示。

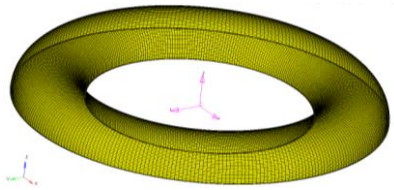


图 1　环形气瓶金属内衬 CAE 模型

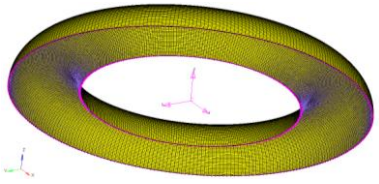
2.2　材料物理参数

主要分析环形气瓶金属内衬在工作压力、强度试验压力和爆破压力下的受力情况，因此材料不仅有弹性变形也有塑性变形和爆炸，材料模型不能仅考虑弹性变形阶段。材料的物理参数：弹性模量 110000MPa；密度 4.51g/cm^3；泊松比 0.34；屈服极限 830MPa；切线模量 2150MPa。

2.3　边界条件处理

作者简介：姚金莉（1985-），硕士，机械电子工程专业；研究方向：机械 CAD/CAE。
收稿日期：2015-07-06

分析环形气瓶金属内衬在高度和径向方向上的变形，因此建立柱面坐标系（r、θ、z），在对称面上，对单元节点进行轴向和角度方向的约束，即仅仅释放径向方向。载荷的添加方式为受力面加压强。环形气瓶金属内衬的边界条件如图 2 所示。



a　整体示意图

b　局部放大示意图

图 2　环形气瓶金属内衬的边界条件

3　CAE 仿真分析结果

3.1　不同内压工况下的受力情况

a. 环形气瓶金属内衬在最高工作压力 30MPa 的作用下，计算结果如图 3、图 4 和图 5 所示。如图 3 所示，环形气瓶金属内衬所受最大应力为 777MPa，还未达到材料的屈服极限 830MPa，材料发生弹性变形；从图中可以看出中间靠内侧部分为薄弱部位，因此在内衬外缠绕复合纤维增强层时可以重点在此部位补强。如图 4 所示，X 向（径向方向）变形对称，最大 0.3799mm；如图 5 所示，Z 向（高度方向）变形最大 0.618mm；在高度和径向方向的最大变形均满足设计技术要求。

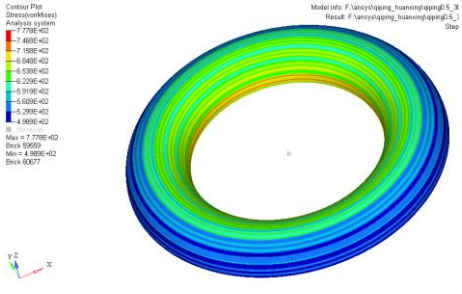


图 3　内压 30MPa 环形气瓶金属内衬 Von Mises 应力云图

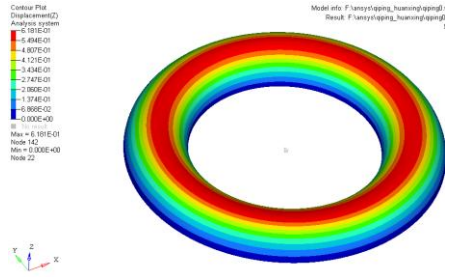


图 4　内压 30MPa 环形气瓶金属内衬 Z 向变形

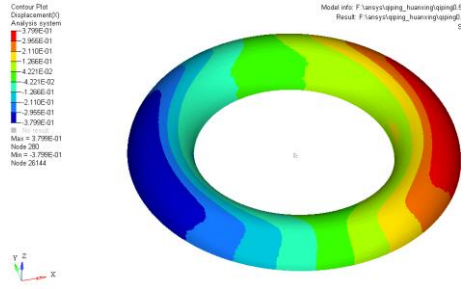


图 5　内压 30MPa 环形气瓶金属内衬 X 向变形

b. 计算环形气瓶金属内衬在 30～45MPa 内压作用下的受载情况，计算结果如表 1 所示。环形气瓶金属内衬内压载荷在 34MPa 时，金属内衬已达到屈服极限 830MPa，在此内压范围内，金属内衬发生弹性变形；内压载荷大于 34MPa 时，随着内压的增大，高度和径向的变形都在明显增加。最高工作压力为 30MPa，金属内衬还在弹性变形范围内，因此外部复合纤维增强层仅起到补强作用，即增加气瓶的整体安全系数和可靠性。因此为了提高气瓶的整体安全系数，必须在金属内衬的薄弱部位着重补强。

表 1　环形气瓶金属内衬不同内压下的受力情况

内压工况/MPa	Von Mises 应力/MPa	高度方向最大变形/mm	径向方向最大变形/mm
30	777	0.618	0.3799
32	820.9	0.659	0.405
34	834	0.7046	0.429
36	879.1	0.964	0.455
38	937.2	1.884	0.563
40	991.2	3.385	0.991
42	1044	5.038	1.405
45	1122	7.913	2.001

3.2　外压 1MPa 受力情况

金属内衬外需要缠绕复合纤维进行补强来增加气瓶的整体安全系数，因此需要计算金属内衬在受到 1MPa 外压缠绕力作用时的受力情况，计算结果如图 6、图 7 和图 8 所示。Von Mises 最大应力 25.8MPa；

变形朝内，Z 向（高度方向）最大变形为 0.02086mm；X 向（径向方向）变形对称，最大变形 0.0135mm，远未达到材料的屈服极限，安全可靠。

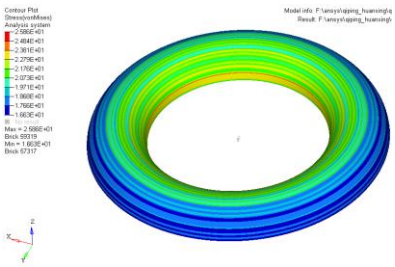


图 6　外压 1MPa 环形气瓶金属内衬 Von Mises 应力云图

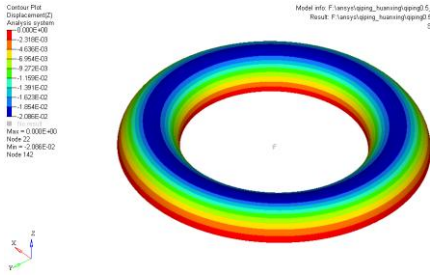


图 7　外压 1MPa 环形气瓶金属内衬 Z 向变形

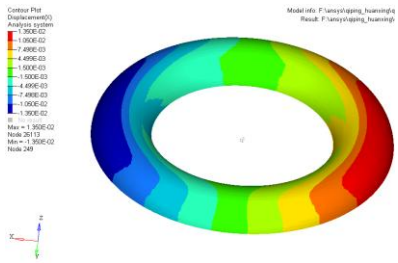


图 8　外压 1MPa 环形气瓶金属内衬 X 向变形

4　结束语

环形气瓶金属内衬的 CAE 仿真分析计算得出：

a. 在内压载荷为工作压力 30MPa 时，环形气瓶金属内衬发生弹性变形；内压载荷大于 34MPa 时，随着内压的增大，高度和径向的变形都在明显增加。简而言之，最高工作压力为 30MPa，金属内衬还在弹性变形范围内，因此外部复合纤维增强层仅起到补强作用。

b. 金属内衬在受内压载荷时，中间靠内侧部分为薄弱部位，因此在内衬外缠绕复合纤维增强层时可以重点在此部位补强。

c. 计算结果可以为气瓶的强度验证试验提供内压载荷数据，降低试验的盲目性。

d. 在受到 1MPa 外压的缠绕力作用时，金属内衬远未达到材料的屈服极限，安全可靠。

参考文献

1　王小永. 航天系统用纤维缠绕金属内衬压力容器的寿命分析技术[J]. 玻璃钢/复合材料，2007(5)：47～52

※※※