

金属膜片贮箱膜片的数值仿真与试验验证

张增亭

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 金属膜片贮箱中, 膜片工作过程的设计计算至关重要, 其翻转过程涉及到材料非线性、几何非线性等强非线性因素, 传统的解析方法难以完成这样的计算。采用大变形弹塑性有限元法, 用 MSC.MARC 软件对膜片的变形进行数值仿真, 实现了膜片的翻转计算。膜片的翻转试验表明, 数值仿真与试验结果吻合较好, 分析方法合理可行。

关键词: 金属膜片贮箱; 膜片翻转; 有限元; 试验

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2009) 03-0026-04

Numerical simulation and test verification of diaphragm for metal diaphragm tank

Zhang Zengting

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Calculation for metal diaphragm overturning process is the key factor for diaphragm tank design, in which strong nonlinearity factors of material, geometry, etc. should be considered. It's hard to complete such a complicated calculation with traditional methods. Diaphragm overturning process calculation was accomplished by employing MSC.MARC software with elastic-plastic finite element method. Test results fit the digital simulation very well which proved the validity of the analysis approach.

Key words: metal diaphragm tank; overturning process; finite element method; test

0 引言

航天器姿控推进系统贮箱的功能是实现推进

剂的贮存和推进剂管理, 向推力室提供不含气体的推进剂。推进剂的管理方式一般有囊式、非金属隔膜式、膜盒式、表面张力等多种类型, 这些贮箱各有优势, 也存在各自的局限性。为满足航

收稿日期: 2009-02-27; 修回日期: 2009-03-26。

作者简介: 张增亭 (1966 —), 男, 高级工程师, 研究领域为姿控发动机总装及压力容器设计。。

天任务的复杂性和多样性需求，开展了金属膜片贮箱研究。由于金属膜片贮箱内无非金属材料，可以实现推进剂特别是氧化剂的长期加注贮存，具有密封性好、加注贮存期长、质心稳定，不产生晃动、适应性广、能够采用热燃气增压等特点，因此在各种航天飞行器上有着广泛的应用前景。

作为贮箱的关键部件，金属膜片的设计决定着贮箱的成败。由于金属膜片不具备橡胶、塑料那样的柔韧性，只能靠有规律的变形翻转实现推进剂的管理，因此金属膜片的翻转特性分析是首先要解决的问题。本研究采用 MSC.MARC 有限元软件对膜片的翻转过程进行数值模拟与分析，并通过试验验证了分析结果。

1 膜片结构

金属膜片贮箱是在贮箱金属壳体内设计与壳体形面相匹配的金属膜片，膜片在压力作用下按特定的规律变形翻转，将推进剂逐渐排出，实现推进剂的管理和供应，见图 1。为了使金属膜片能够按预定要求有规律地翻转，实现推进剂的管理和供应，需要对膜片的结构进行精心地设计。其主要结构为半球面壳体，在赤道圆处设计有预翻边，预翻边与半球以小锥角过渡。在压力作用下膜片从预翻边开始沿轴线逐步向顶部翻转，膜片的厚度、型面、预翻边的尺寸都会对膜片的稳定性造成影响，为了控制翻转过程中的稳定性，膜片设计为变厚度结构，从顶部到赤道圆膜片厚度逐渐变薄。

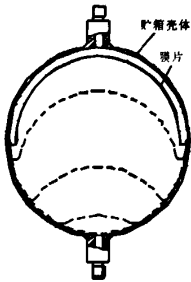


图 1 金属膜片贮箱工作原理
Fig.1 Operation principle of the metal diaphragm tank

2 有限元模型

膜片的翻转过程实际上是壳体在外压作用下按指定规律变形的过程，属于薄壳结构大变形问题，同时存在几何非线性和材料非线性，根据弹塑性理论建立的微分方程，难以解析求解。有限元法能够模拟出在载荷作用下材料弹塑性变形过程，应力应变分布，卸载后的残余应力分布等。

二维轴对称模型和三维壳模型都可以用来模拟膜片的翻转过程。二维轴对称模型结构简单，单元数量少，计算效率高，由于轴对称假设的限制，二维模型不能直观表现膜片在圆周方向可能出现的变形，无法对膜片翻转的稳定性进行有效分析，而三维壳模型除了能对膜片沿轴向翻转的状况进行仿真再现外，还能对膜片的周向失稳、翻转偏心等现象进行数值仿真。本文用非线性商业软件 MSC.MARC 的四节点四边形单元对三维结构进行离散，在顶点处进行了四边形单元处理，得到有限元模型如图 2 所示。单元尺寸大小的选取会对有限元求解结果的精度产生影响，较小的单元尺寸计算精度高，但计算效率低，较大的单元尺寸计算效率高，但精度差。考虑到金属膜片翻转是大变形、大位移过程，膜片共划分了 7188 个单元，7249 个节点。因膜片的厚度相对结构尺寸较小且变化均匀，采用分段赋值法近似膜片厚度变化。

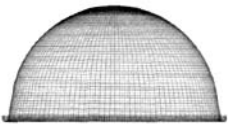


图 2 膜片有限元模型
Fig.2 Finite element model of the diaphragm

膜片预翻边与贮箱壳体之间采用焊接连接，在外表面增压气体与内表面液体推进剂共同作用下翻转变形，因此，将膜片的边界条件简化为边缘固支，外载简化为作用在膜片外表面的压差。膜片材料为纯钛 TA1-A，其机械性能为：屈服强度 $\sigma_s=250\text{MPa}$ ，抗拉强度 $\sigma_b=270\text{MPa}$ ，泊松比

$\lambda=0.32$, 弹性模量 $E=105\text{GPa}$ 。

计算时, 采用真实应力-对数应变曲线、Mises 屈服准则和线性硬化模型定义材料, Newton-Raphson 迭代法求解, 修正 Risk-Ramm 弧长法控制加载步长。

首先采用等厚度膜片计算, 根据计算演示的应力、压差和翻转过程等参数, 调整膜片不同部位的厚度, 直到得出满意的结果。本研究按翻转压差和膜片的翻转应力对膜片的厚度及其变化规律进行优化, 考虑到实际应用, 翻转压差取 $0.1\sim 0.25\text{MPa}$, 应力不大于纯钛 TA1-A 的抗拉强度, 翻转过程中不出现周向失稳和较大的偏心。

3 结果分析

膜片翻转的稳定性问题是膜片设计的关键。膜片的厚度、型面、预翻边的尺寸都会对膜片的稳定性造成影响。计算结果成功的模拟、再现了纯钛膜片的翻转过程, 如图 3 所示。

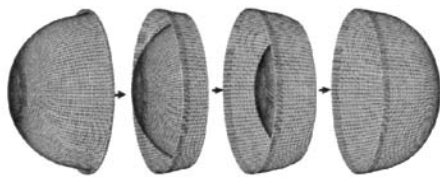


图 3 膜片翻转过程仿真

Fig.3 Overturning process simulation

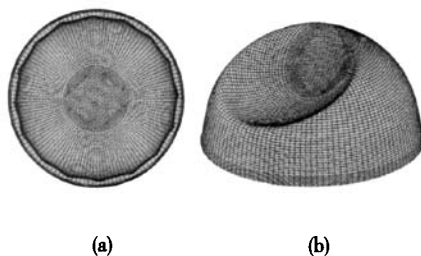
经过对不同结构参数的膜片进行仿真求解, 得到以下结果:

(1) 赤道圆处预翻边的设计是膜片按预定要求翻转的关键, 预翻边降低了膜片赤道圆处的刚度, 使膜片从该处开始滚动翻转。预圆翻边的半径应适当, 过小的预翻边将导致翻转应力过大, 过大则会降低贮箱的容积效率。

(2) 膜片的厚度不能太小, 否则将导致膜片周向失稳导致结构破坏。图 4(a)给出了厚度 0.4mm 的钛膜片的翻转仿真情况。在翻转的初期, 就出现了圆周方向多波失稳的情况, 在膜片翻转区与周向失稳皱褶叠加形成尖角, 随着翻转的不断进

行, 尖角处的应力迅速增大, 当膜片翻转 27.8mm 时, 应力超过了材料的抗拉强度, 膜片将产生破坏。

(3) 等厚度的膜片也可以实现翻转, 但会出现偏心现象, 即膜片翻转到一定程度时会产生一边翻转快、一边翻转慢的现象, 导致未翻转的部分偏向一侧。如图 4(b)所示。



(a) 厚度 0.4mm 的钛膜片的翻转仿真情况

(b) 翻转过程的偏心现象

图 4 膜片的多波失稳与偏心

Fig.4 Multiwave instability and eccentricity of the diaphragm

(4) 仿真结果表明, 可以通过改变膜片厚度和变化规律等结构参数来控制膜片的翻转压差曲线, 使翻转压差满足姿控推进系统的要求, 采用变厚度方案的膜片翻转压差曲线见图 5。变厚度可以有效控制翻转时膜片偏心问题, 采用适当的厚度变化规律可以大大减轻膜片翻转偏心现象, 从而保持在翻转过程中贮箱的质心在轴线附近移动, 提高了翻转的可靠性, 对姿控推进系统的质心控制也很有帮助。翻转偏心现象可以从顶点的横向位移来说明, 图 6 给出了等厚度膜片与变厚度膜片在翻转过程中顶点横向位移的情况, 可以看出变厚度对膜片的偏心有很好的控制作用。

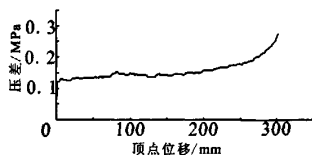


图 5 膜片翻转压差曲线的仿真结果

Fig.5 Diaphragm overturning simulation results of pressure difference

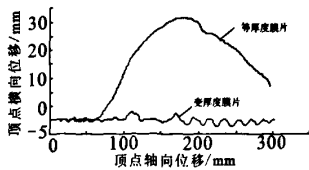


图 6 膜片翻转过程中的顶点横向位移

Fig.6 Diaphragm top displacement during overturning

4 试验验证

为验证仿真结果，进行了膜片的翻转试验。试验采用一个约 17L 的贮箱，为了便于观察膜片的翻转情况，贮箱的一半壳体设计为透明的，在试验时贮箱加满水，用气体挤压膜片，使其翻转，翻转时测量贮箱气液两腔的压差和流量。

生产了不同厚度和变化规律的膜片，进行了膜片的翻转试验。由于膜片顶点的位移难以测量，通过压差与流量的关系计算出压差与膜片顶点位移的曲线。试验结果表明，适当厚度的膜片，膜片能够正常翻转，翻转过程平稳，没有出现“急速通过”现象带来的压差突变，试验测得的膜片翻转压差曲线见图 7。

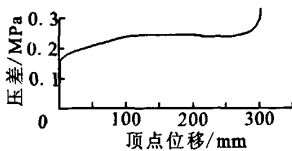
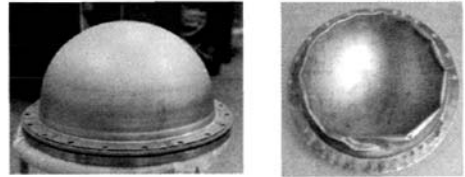


图 7 试验膜片的翻转压差曲线

Fig.7 Pressure difference curve during overturning test

与仿真结果相比，试验结果大了约 0.05~0.1MPa，考虑到由于加工精度的原因，膜片的实际厚度比设计值大了 10%，可以认为试验结果与仿真结果还是比较吻合的。膜片的翻转结果见图 8(a)，与图 3 所示的仿真结果基本一致，除了预翻边处外，与翻转前的型面十分接近，与贮箱壳体型面较好的配合时，可以获得较高的排空效率。

需要说明的是，由于加工的偏差，膜片的厚度变化没有达到要求的精度，在翻转过程中依然出现了一定程度的偏心现象。试验结果还表明，膜片厚度为 0.4mm，翻转时产生了周向多波失稳，见图 8(b)，膜片撕裂破坏，与图 4(a)对比，显示了与试验结果较好的一致性。



(a) 正常翻转的膜片 (b) 失稳破坏的膜片

图 8 试验膜片翻转情况

Fig.8 Overturning results of the diaphragm

5 结论

采用大变形有限元法对金属膜片的翻转过程进行数值仿真，可以实现对膜片的翻转压差、变形、稳定性等方面的计算，从而对膜片的结构参数（厚度及变化规律、型面、预翻边的尺寸等）进行优化。按照仿真分析生产的膜片，成功实现了翻转，试验结果表明，仿真结果与试验较为吻合，较好地解决了金属膜片的设计计算问题。

参考文献：

- [1] 布查南 G R. 有限元分析[M]. 董文军, 谢伟松, 译. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 陈火红. Marc 有限元实例分析教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] 朱智春, 赵和明, 罗斌. 金属膜片贮箱的膜片变形分析[J]. 推进技术, 1999, 20(5): 77-79.
- [4] 朱志华, 胡小平, 陈香林. 钛制金属贮箱膜片的有限元分析[J]. 火箭推进, 2007, 33(4): 36-39, 55.

(编辑：陈红霞)