

锥柱形加筋金属膜片变形的数值仿真分析

何星星, 周仕明, 袁杰红
(国防科技大学, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 概述了金属膜片贮箱膜片结构的研究现状, 提出了锥柱形加筋膜片整体结构变形问题。根据试验情况建立了该膜片的有限元模型, 并基于非线性有限元软件 MSC.Marc 进行了数值模拟, 分析了膜片结构的变形过程 and 变化规律, 通过对加筋结构的分析解释了膜片变形的机理, 得到了一些控制膜片失效的方法。

关键词: 金属膜片; 加筋; 变形; 仿真分析

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2007) 06-0034-04

Deformation numerical simulation analysis of stiffened metal diaphragm for positive expulsion tank

He Xingxing, Zhou Shiming, Yuan Jiehong
(National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The current researches on the metal diaphragm structure are summarized. The problem of the stiffened metal diaphragm deformation is pointed out. Based on the experiment conditions, the FEM model of the metal diaphragm is established with the MSC.Marc software for numerical simulation. And it's also used to analyze the deformation process of the diaphragm and the rule of it. After the analysis of the ring-stiffened diaphragm, the mechanism of its deformation is explained. Some methods for the failure control of the diaphragm are concluded, which provide the bases for the design improvement of the diaphragm structure.

Key words: metal diaphragm; stiffened; deformation; simulation analysis

1 引言

金属膜片贮箱是当前航天领域重点研究的一

种空间推进剂管理装置, 它借助增压气体对金属膜片的挤压而引起的膜片变形实现对推进剂的有效管理和正常供应。膜片的变形经历从上半球翻转到下半球的弹塑性大变形, 此过程的稳定性成

收稿日期: 2007-07-06; 修回日期: 2007-11-06。

作者简介: 何星星 (1982—), 男, 硕士研究生, 研究领域为结构失效分析与预防。Email:twinklehe@sohu.com.

为衡量贮箱管理能力的关键指标。

文献 [1,2] 基于经验计算程序对金属贮箱及其膜片的相关参数进行了评估分析。文献[3]采用旋转对称壳体的变矩理论分析了贮箱正向排放过程膜片的变形。文献[4]主要分析了膜片的边界条件及几何形状对圆顶球形部分结构变形的影响。但是这些研究都没有涉及到对膜片整体结构的变形分析。在文献 [5] 中, 运用数值模拟分析方法对某锥柱形未加筋金属膜片的变形过程进行了数值仿真和失效分析, 并将分析结果与试验进行了对比 (图 1), 验证了数值模拟方法在此分析中的准确性。在此研究的基础上, 对锥柱形加筋金属膜片结构变形的研究可以深入分析其中的变形机理和变形规律。

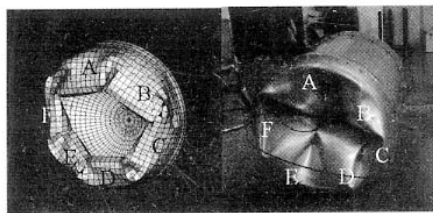


图 1 某锥柱形未加筋金属膜片变形仿真结果与试验结果对比图

Fig.1 Comparison between the results of numerical simulation and experiment of the metal diaphragm

2 有限元模型及边界条件的建立

膜片由下端的弯边、柱段、旋转弧段和球冠段组成。在几何模型的基础上采用 MSC.Patran 软件对膜片进行网格划分 (如图 2 所示)。为保证球壳刚度足够大, 不在柱段翻转前失稳, 膜片采用了变曲率变厚度的设计方案, 球壳段与柱段都采用均匀厚度 (两者厚度差值用表示), 且其内侧环向配置有矩形截面筋, 由两种不同的尺寸构成。

膜片的厚度相对于其结构尺寸较小且变化均匀, 故用四节点四边形壳单元对模型进行网格划分, 环向筋直接采用体单元划分。由于膜片卷边

外边缘与贮箱箱体交界处是焊接结构, 故此处作为固支边界处理。此外膜片是在外表面增压气体 (定义气体压力为 $p_{气}$) 与内表面液体推进剂 (定义液体内压为 $p_{液}$) 共同作用下发生的翻转变形 ($p_{气} > p_{液}$), 因此将外载荷简化为作用在外表面的压力差 ($\Delta p = p_{气} - p_{液}$)。根据文献 [5] 的试验情况, 工况设置中取压力差 $\Delta p = 0.25 \text{ MPa}$ 。

膜片的材料为铝, 其机械性能为: 抗拉强度 $\sigma_b = 70 \pm 5 \text{ MPa}$, 屈服强度 $\sigma_{0.2} = 30 \text{ MPa}$, 弹性模量 $E = 69 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.3$ 。该膜片的变形属于典型的组合非线性问题, 求解时依据文献 [5] 中非线性有限元方法进行数值模拟。

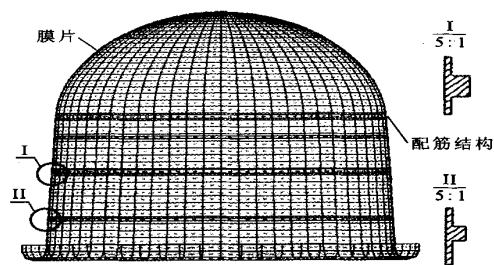


图 2 膜片有限元模型

Fig.2 Finite element model of metal diaphragm

3 膜片排放过程的数值仿真及分析

3.1 膜片排放过程的数值模拟

通过 MSC.Marc 非线性有限元软件对上述建立的有限元模型进行数值模拟和仿真。膜片在 0.25 MPa 的压力作用下实现了完全翻转 (图 3), 但是膜片在下翻过程中球壳部分并不是呈轴对称有序翻转, 而是从单侧进行翻转的, 而且柱段翻转完毕之前, 膜片的横向摆动幅度最大达 10.6 cm , 如图 4 所示。理论上来说横摆过大容易造成膜片侧倾失稳, 很难保证在太空复杂环境下的工作稳定性。在柱段翻转完毕时, 膜片的最大压力达到了 0.215 MPa 。翻转过程中, 当压力为 0.1033 MPa 时, 膜片的最大等效应力为 88.52 MPa , 高出了铝的最大极限应力, 故而即使能翻转膜片也将破裂。

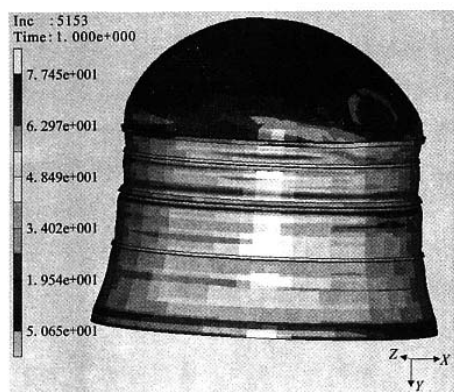


图 3 膜片完全翻转变形图
Fig.3 Overtum deformation of the diaphragm

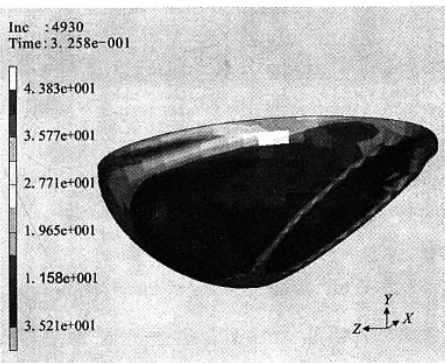


图 4 球壳部分翻转变形图
Fig.4 Overtum deformation of the sphere shell

3.2 膜片翻转过程的规律分析

为了更充分地研究膜片翻转变形的规律，在上述模型（定义为Ⅰ型模型）的基础上通过一系列变化得出了三种模型（Ⅱ型、Ⅲ型、Ⅳ型）：Ⅱ型是针对Ⅰ型模型在柱段翻转前横摆较大，通过改变膜片旋转弧段的厚度，使膜片厚度由球壳顶部到柱段的变化更均匀，其厚度差值降为 $\Delta d/2$ ，以期能获得较小的横向摆动；Ⅲ型是在Ⅰ型的基础上将球壳部分加了三条环向筋而成，主要目的是增大球壳部分的刚度，使其顺利有序翻转；Ⅳ型是在Ⅰ型的基础上去掉第一条筋和第三条筋（由下至上的顺序）而成，主要目的是减小结构刚度，降低翻转的最大压力和等效应力。

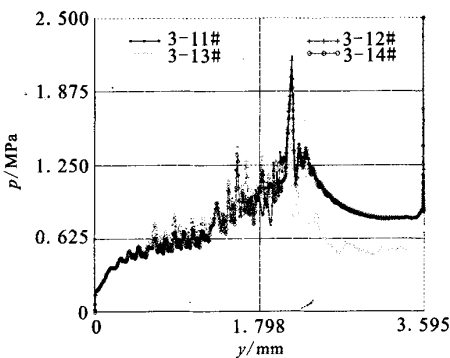


图 5 Ⅰ~Ⅳ型膜片压力与轴向位移关系
Fig.5 The relationship between the pressure and displacement y of model Ⅰ~Ⅳ diaphragms

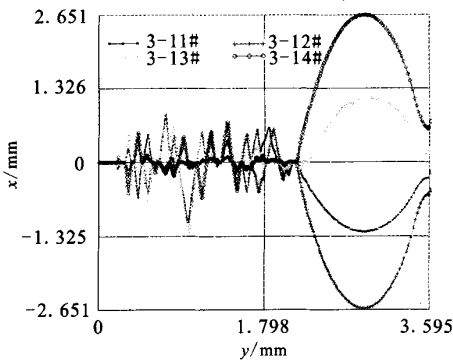


图 6 Ⅰ~Ⅳ型膜片横向位移与轴向位移关系
Fig.6 The relationship between the displacement x and the displacement y of model Ⅰ~Ⅳ diaphragms

通过对Ⅱ~Ⅳ型模型进行数值模拟，三种膜片都实现了翻转，并且膜片的最终变形效果基本相同，主要差别为变形过程中膜片压力变化及等效应力的差异。通过图 5 可以看出在膜片下降约 180mm 时，Ⅱ型的压力下降幅度要小于Ⅰ型；图 6 则表明在柱段翻转完毕前其横向摆幅比Ⅰ型减少了近 4mm。这说明了膜片厚度采用较均匀变化的设计起到了较好的效果，所以在Ⅲ、Ⅳ型模型仿真过程中继续采用了这一设计方案。Ⅲ型膜片变形的特点是膜片的最大压力较Ⅰ型有了明显的下降（图 5），且膜片球壳部分在短距离上实现了对称翻转，说明球壳部分的加筋起到了预期的效果，但是在翻转过程中膜片的最大应力没有减

小,当压力为 0.115 MPa 时达到了 88.74 MPa。IV型虽然仅加了两根筋,实现了翻转,但与 I 型相比在变形过程中其压力及等效应力仅有很小的变化。

另外还可以总结出:只要膜片压力能达到柱段翻转完毕之前出现的最大压力,就能够保证膜片球壳部分的顺利翻转,也就是说试验工作要求的最小压力就是柱段翻转完毕的最大压力。

3.3 膜片变形失效机理分析

以上仿真分析表明:在该柱段锥角下的加筋膜片均能实现翻转,而且环向加筋的数量对结构的性能和变形的过程影响并不大,膜片的最大等效应力并没有得到很好的控制以致失效。观察图 5 可以看出 I~IV 型膜片在轴向最大位移约为 215mm 时,压差增加较快,这必然导致了膜片等效应力的增加。从中分析原因我们发现,在加筋实现翻转后,翻转部位的环向刚度变大,同时结构的径向内力也增大,使得已翻转膜片具有往径向紧缩的趋势,迫使已翻转部分与翻转部分的夹角 θ 变小。若要使膜片继续翻转,相应的压差必须增大;而且若弯边半径过小,减小的速度会更加迅速,这必然会导致膜片应力的不断增加,直至超过材料的极限强度,使材料破裂。故而比较关键的问题在于保证不能过小,据此分析及相关工程经验,通过减小加筋刚度,增大弯边半径,适当地增加柱段锥角都可以有效地改善结构性能。

4 结论

通过对上述 I~IV 型膜片排放过程中结构变形和压差变化的仿真分析,可以得出以下结论:

(1) 采用非线性有限元分析方法可以比较准

确地模拟锥柱形加筋金属膜片的变形过程及压差、应力等参数的变化规律。

(2) 该型号的金属膜片都能实现顺利翻转,但都出现失效现象,加筋部分翻转时导致等效应力过大是其失效的主要原因。

(3) 在保证推进剂容量的同时,适当减小加筋刚度,增大弯边半径,增加柱段锥角都能减小等效应力,优化膜片的结构设计,提高膜片开发的效率。

参考文献:

- [1] Marvin M, Kammerer H, Gidley J T. Parametric Evaluation of Contoured Aluminum Diaphragm Positive Expulsion Tanks [C]. AIAA/SAE/ASME/ASEE 28th Joint Propulsion Conference and Exhibit July 6-8,1992/Nashville,TN.
- [2] Kammerer H, Hughes J, Gribben E. Analytical & Material Advances in Contoured Metal Diaphragms for Positive Expulsion Tanks [C]. 31th AIAA/SAE/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit July 10-12,1995/San Diego,CA.
- [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] Stanley S, Smeltzer, Lynn M Bowman. Buckling design studies of inverted-oblate bulkheads for a propellant tank [C]. 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures Structural Dynamics and Material Con 22-25 April 2002 Denver Colorado.
- [5] 周仕明,袁杰红.金属膜片贮箱的数值模拟和失效分析[J].上海航天,2005,(4):13-16.
- [6] 王勖成.有限单元法[M].北京:清华大学出版社,2005,5.
- [7] 陈火红,于军泉,席源山. MSC.Marc/Mentat 2003 基础与应用实例[M].北京:科学出版社,2004.

(编辑:侯早)