

钛制金属贮箱膜片的有限元分析

朱志华, 胡小平, 陈香林

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 为了优化钛制金属膜片设计, 基于有限变形理论, 采用大变形弹塑性有限元方法, 对金属膜片的翻转过程进行了数值模拟, 分析了膜片结构对其翻转行为的影响。仿真计算结果表明, 支撑结构及贮箱内壳体的限位设计是保证半膜实现多次反复平稳翻转的重要部件。通过试验验证了钛制金属膜片的翻转过程。

关键词: 钛制金属膜片; 数值模拟; 翻转试验

中图分类号: V432

文献标识码: A

文章编号: (2007) 04-0032-05

Finite element analysis of the overturning process of titanium diaphragm for propellant tank

Zhu Zhihua, Hu Xiaoping, Chen Xianglin

(Inst. of Aerospace & Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To optimize the design of metal diaphragm, based on finite deformation theory, the overturning process of the titanium diaphragm was simulated by using the Large Deformation Elastic-Plastic finite element method. The effects of metal diaphragm construction on overturning behavior were analyzed. Overturning tests were conducted. The simulation results indicate that the support structure and the limiting shell inside the tank are key components that ensure the smooth overturning of the diaphragm. The experiments demonstrated the overturning process of the titanium metal diaphragm.

Key words: titanium diaphragm, numerical simulation, overturning test

收稿日期: 2007-06-26; 修回日期: 2007-07-10。

作者简介: 朱志华 (1975—), 男, 工程师, 研究领域为火箭发动机总装。

1 引言

姿控发动机需要在失重环境下频繁地启动和关机,以前主要采用囊式贮箱,但橡胶囊与推进剂的相容性无法保证推进剂的长期贮存,故近期开展了金属膜片贮箱和表面张力贮箱的研制。它们各有优缺点及使用范围,而金属膜片贮箱作为一种新型贮箱,不仅耐腐蚀性能好,可长期贮存,而且刚性膜片在气体的挤压作用下紧贴液面,消除了推进剂的晃动^[1]。目前,国内研制的金属膜片主要采用铝制膜片,材料为L3M。在新型的热气增压方式中,由于铝制膜片在高温下的机械性能比较低,且当贮箱容积较小时,膜片的厚度相对较薄,铝材薄壁焊接很困难。钛制膜片在这两方面都有很好的优势,且钛膜片的耐氧化性及腐蚀性也非常好。金属膜片采用变厚度形式,其设计准则、膜片结构对翻转行为的影响还不很清楚,故针对钛制半球形膜片(以下简称半膜)开展了研究。

基于大变形弹塑性理论,采用有限元方法,对钛制金属半膜的翻转过程进行了数值模拟,再现了半膜变形过程,分析了金属半膜的结构对其翻转行为的影响,并通过翻转试验,验证了改进后半膜的翻转,为优化金属半膜设计,防止半膜在翻转过程中出现起皱、开裂等失效问题提供了理论参考和试验依据。

2 有限元模型分析

金属半膜翻转过程中的变形问题实际是球形对称薄壳的大变形问题。当半膜在一定载荷作用下产生塑性大变形时,变形体内的微元在发生塑性变形的同时可能产生较大的刚性旋转和刚性平移^[2-3]。对于大变形弹塑性问题,不仅要考虑特殊的应力-应变关系,而且还要考虑变形的影响。

在解决大位移、大转动的问题中需要用格林应变张量和基尔霍夫应力张量。本文采用修正的拉格朗日法即UL法建立有限变形弹塑性有限元方程^[4-5]。

$$\int_{V_t} S_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV + \int_{V_t} \tau_{ij} \delta \eta_{ij} dV = {}^{t+\Delta t} W - \int_{V_t} \tau_{ij} \delta e_{ij} dV \quad (1)$$

式中, S_{ij} 为基尔霍夫应力张量增量; τ_{ij} 为格林应变张量增量,都是参考时间 t 的位形增量, ${}^{t+\Delta t} W$ 是时间 $t+\Delta t$ 位形的外载荷虚功,且 $t e_{ij} = ({}_t u_{i,j} + {}_t u_{j,i})/2$, $\eta_{ij} = {}_t u_{k,i} {}_t u_{k,j}/2$, ${}_t u_{i,j}$ 是 t 时刻位移对 x 坐标的偏导。

在大位移、大应变且忽略体积变形增量的情况下,对于各项同性硬化材料,用等参单元对方程(1)在求解域内进行离散,整理后可得单元增量有限元刚度方程,即

$$({}_t K_L + {}_t K_{NL}) u = {}^{t+\Delta t} Q - {}_t F \quad (2)$$

式中, ${}_t K_L$ 与初始位移及位移增量有关,称为位移刚度矩阵; ${}_t K_{NL}$ 与已有的应力有关,称为应力刚度矩阵; ${}^{t+\Delta t} Q$ 是节点载荷; ${}_t F$ 是初应力内力节点力,所有这些矩阵或向量都是对应时间 t 的位形,并参考于同一位形确定的。

经组装后可得整体增量大变形弹塑性有限元刚度方程为

$$K \Delta U = Q - F \quad (3)$$

式中, K 为整体切线刚度矩阵; ΔU 为整体节点位移增量矩阵; Q 为整体外力节点载荷矩阵; F 为整体初应力内力节点力矩阵。

3 计算网格及边界条件

金属半膜采用变厚度形式,即从顶部到“赤道”处逐渐变薄,并且在“赤道”处翻边,以形成一个带有初始翻转半径的沟槽。在有限元建模过程中,基于几何结构用网格划分膜片。因半膜的厚度相对结构尺寸较小且均匀地变化,故在三维建模中用四节点四边形壳单元划分网格、用分段赋值法近似半膜厚度变化。半膜翻边与贮箱壳体交接处为焊接结构,对半膜边缘作固支处理。在外表面增压气体与内表面液体推进剂共同作用下,半膜发生翻转变形,因此,可将外载荷简化为作用在半膜外表面的压力差。分析时半膜的翻转历经从正向到反向的塑性大变形,同时存有几

何非线性、材料非线性和状态非线性等多重非线性性质,是一个十分复杂的变形过程。材料定义为满足 Von Mises 屈服准则和 Prandtl-Reuss 流动准则的各向同性硬化弹塑性材料。纯钛 TA1 材料参数分别为:抗拉强度 $\sigma_b=490\text{MPa}$ 、屈服强度 $\sigma_{0.2}=365\text{MPa}$ 、弹性模量 $E=108\text{GPa}$ 。

4 计算结果及比较分析

对所建立的有限元模型,用非线性结构分析软件进行计算和分析,采用变刚度法和牛顿-拉弗森 (Full Newton-Raphson) 迭代法,应用上述材料参数及真实材料的应力-应变关系,对膜片的正向翻转进行了模拟^[6],翻转过程如图 1 所示。

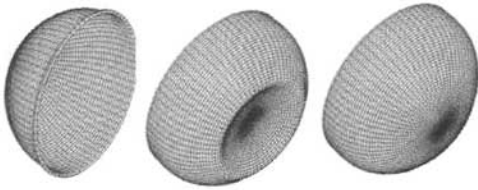


图 1 半膜翻转过程的有限元模拟

Fig.1 Simulation of overturning process of metal diaphragm

因金属膜片是轴对称结构,为减少三维整体模型的计算量及节省计算时间,采用简化的二维轴对称模型,在细化和优化网格质量,增加半膜与壳体之间的接触情况下对各种结构形式的有限元模型进行了大量的计算。在计算中认为贮箱壳体是刚性体,半膜与壳体之间的摩擦力采用修正的库仑定律,通过详细的比较分析,得到了以下几点分析结果:

(1) 金属半膜正向翻转 (图 2) 时,由于“赤道”翻边处厚度相对较薄且预设了一个初始滚动半径的沟槽,这样在外压作用下,半膜首先在“赤道”翻边处产生塑性变形,使得滚动曲率半径逐渐变大,从而带动整个半膜的平稳翻转,直到半膜顶部形成一小块反向预翻转的“凹坑”为止。仿真计算表明具有初始滚动曲率半径的沟槽是保证半膜产生规律性变形的前提条件。由图 2 可知,半膜正向翻转后,在其顶部会出现一小块

“凹坑”。这是由于半膜变形后的几何形状和材料取向引起了结构的几何非线性效应,半膜翻转时,结构刚度随着半膜变形的增加而不断变大,使得半膜逐渐变硬,从而出现“凹坑”;如果施加较大的载荷,“凹坑”会以突然跳跃方式翻转。这属于屈曲失稳的一种表现形式,即从一个平衡位置快速通过,跳跃到另一平衡位置,通常称为后屈曲。由于随着压应力的增加,半膜结构刚度在变形时产生了变化,致使结构抵抗横向变形力的能力下降,当载荷增大到某一水平,结构刚度变为零或负值,结构会丧失稳定性。但是,半膜在“突然翻转”后又快速跳跃到新的平衡位置,结构刚度又重新变成正值。

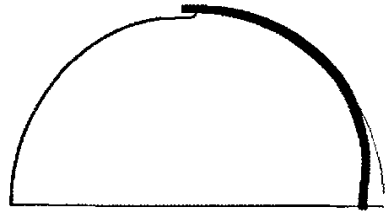


图 2 半膜正向翻转后的模拟

Fig.2 Simulation of positive overturned process of diaphragm

(2) 金属半膜反向翻转 (图 3) 首先从反向预翻转的“凹坑”处开始,与正向翻转过程恰好完全相反,就像镜头回放一样,翻转变形平稳均匀,在支撑结构的约束下,反向翻转后没有产生明显的褶皱现象,由图 3 可知,轮廓形状保持较好,与初始半膜形状基本相似。

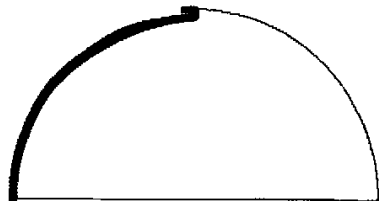


图 3 半膜反向翻转后的模拟

Fig.3 Simulation of counter overturned process of diaphragm

(3) 如果没有预设支撑结构对半膜反向翻转时进行限位变形以使沟槽形状复原,则容易在翻

边处产生褶皱、开裂等局部失稳现象, 影响下一次膜片正向翻转, 甚至致使半膜破坏失效 (图 4)。仿真计算结果表明, 支撑结构及贮箱内壳体的限位设计是保证半膜实现多次反复平稳翻转的重要部件。支撑结构不影响膜片的正向翻转, 但对膜片反向的复原起着重要的作用。

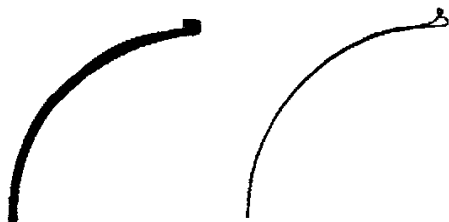


图 4 有、无支撑结构的金属半膜反向翻转后的变形比较
Fig.4 Deformation comparison of counter overturned diaphragm with and without supporting structure

(4) 金属半膜的初始屈服强度、壁厚变化规律及沟槽初始滚动曲率半径对半膜的翻转过程影响较大, 半膜壁厚及初始滚动曲率半径的选取影响半膜的翻转压差。

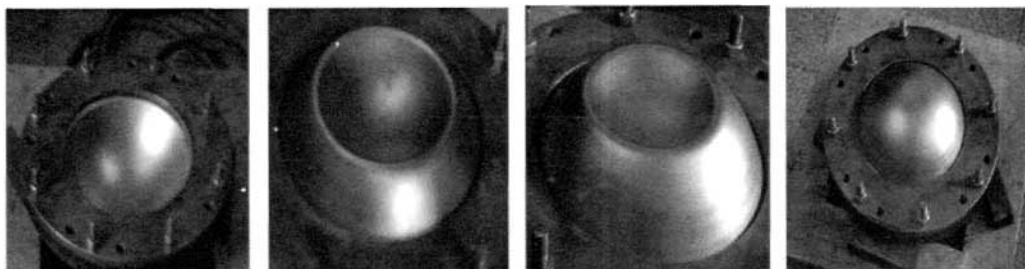


图 5 钛膜片空翻试验
Fig.5 Overturning test of diaphragm

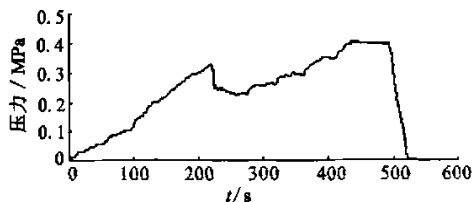


图 6 翻转试验压力曲线
Fig.6 Pressure curve of overturning test

5 翻转试验及结果

为了考察膜片设计的合理性及翻转特性, 翻转试验采取了膜片空翻的形式。即将膜片安装在专用的工装夹具中, 在一侧通入一定压力的空气, 以观察膜片的翻转情况。膜片空翻试验简单方便且容易观察到膜片的整个翻转变形过程, 对翻转过程中膜片的偏心、突变及失稳现象有很好的了解。在膜片设计的开始, 通过大量的膜片空翻试验, 对于膜片的关键参数及失稳主要的特性规律有了更深入的了解。图 5 为经过计算机模拟改进后设计的膜片翻转情况, 通过试验也验证了计算机模拟翻转的规律, 从图中也可看出改进后的膜片翻转时平稳、光滑, 没有突变、褶皱现象。试验过程中的压力曲线见图 6, 从曲线可以看出, 本结构钛膜片的初始翻转压力为 0.32MPa, 这与计算机模拟翻转过程的压差 0.36MPa 相近, 说明模型设计合理, 具有足够的精度。

6 结论

针对钛制半球形贮箱金属膜片进行了结构分析, 基于弹塑性有限变形理论及有限元法, 建立了有限元模型并分析了金属膜片变形情况。数值仿真结果表明, 采用有限元法可较准确地模拟膜片翻转过程, 获知变形过程中膜片压差、变形和应力等参数的变化。通过分析可了解贮箱及膜片的结构对翻转的影响。试验也成功地验证了钛制金属膜片的翻转过程。

(下转第 51 页)

表 1 火焰不同位置的黑度测量值
Tab.1 Blackness of hot gas at different positions

H/cm	黑度测量值
5 (中心)	0.07
6.5 (中心)	0.06
8.5 (中心)	0.07
10 (中心)	0.08
10 (偏右)	0.03
10 (偏左)	0.05

液体火箭发动机中, 能产生辐射换热的燃气的主要成分是 H_2O 、 CO_2 气体, 火焰黑度主要是其中的水蒸汽与二氧化碳气体的黑度之和, 即 $\varepsilon_g = \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{CO_2} - \varepsilon_{H_2O} \cdot \varepsilon_{CO_2}$, 式中最后一项是考虑 H_2O 和 CO_2 光谱重叠部分相互吸收的结果, 其中 $\varepsilon_{CO_2} = f(T_p, p_{CO_2}, L)$ 、 $\varepsilon_{H_2O} = f(T_p, p_{H_2O}, L)$ 可以根据相关文献算得, 通过计算得到 $\varepsilon_g = 0.065$ 。从试验测量值与计算值的比较可以看出, 两者差别不大。因此, 在测量燃气温度时, 可以近似用黑度计算值作为红外热像仪的原始输入参数, 以满足测试精度要求。

4 结论

- 综合试验结果分析, 可以得到以下结论:
- (1) 红外测温系统要得到准确的测温结果, 必须首先对黑度值进行修正, 在此基础上, 红外测温可以得到可信的结果。
 - (2) 红外测温能够得到发动机整个温度场的分布, 并且可以对启动瞬间及不同时刻的温度场进行分析。
 - (3) 红外测温系统测得的温度为发动机的热防护分析及可靠冷却提供依据。

参考文献:

[1] Wanhainen J P, Feiler C E, Morgen C J. Effect of chamber pressure, flow per element, and contraction ratio on acoustic mode instability in hydrogen-oxygen rockets[R]. NASA TN D-4733, 1968.

[2] Clautz W, Kozlov D N, Pykhov R L, et al. The analysis of the precision of single shot 2 -CARS temperature measurements in hydrogen[J]. Appl. Phys., B 65: 619-624.

[3] 丰松江, 聂万胜, 解庆纷, 等. 燃料室内燃烧模型对尾焰流场及其辐射的影响[J]. 火箭推进, 2006, 32(2): 6-10.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 35 页)

参考文献:

[1] 朱智春, 赵和明, 罗斌. 金属半膜贮箱的半膜变形分析[J]. 推进技术, 1999, 20(5): 77-79.

[2] Kammerer H, Hughes J, Gribben E. Analytical & material advances in contoured metal diaphragms for positive expulsion tanks, AIAA 95-2354.

[3] 董湘怀. 材料成形计算机模拟[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

[4] 王国栋, 赵德文. 现代材料成形力学 [M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2004.

[5] 王勘成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[6] 陈火红. Marc 有限元实例分析教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

[7] 陈志坚, 李治, 吴建军. 推进剂贮箱复合膜研究[J]. 火箭推进, 2005, 31(1): 21-23.

(编辑: 王建喜)