

# 隔热层参数对金属隔膜翻转性能的影响

曹 潇<sup>1</sup>, 王亲猛<sup>1</sup>, 欧阳海宁<sup>1</sup>, 周 旋<sup>1</sup>, 穆小强<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学, 北京 100124; 2. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 当金属隔膜贮箱的增压气体为高温燃气时, 一般在金属隔膜靠近气腔一侧表面喷涂隔热层, 对内部的液体推进剂起到隔热作用。涂层的存在相应地增加了隔膜的厚度和刚度, 对隔膜翻转会造成一定的影响, 以往的研究都忽略了该因素。使用 MSC. Marc 软件采用大变形有限元法对带隔热层金属隔膜的翻转过程进行仿真分析, 研究了隔热层的厚度、弹性模量等参数对贮箱隔膜翻转过程的影响, 得到了隔热层参数与翻转的临界载荷的关系。

**关键词:** 金属隔膜翻转; 隔热层; 临界载荷; 有限元法

**中图分类号:** V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 05-0028-05

## Effect of heat shield parameters on inversion property of metal diaphragm

CAO Xiao<sup>1</sup>, WANG Qinmeng<sup>1</sup>, OUYANG Haining<sup>1</sup>, ZHOU Xuan<sup>1</sup>, MU Xiaoqiang<sup>2</sup>

(1. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** A thermal insulation layer is usually sprayed at the outer surface of the metal diaphragm in the side near the air cavity if the pressurized gas in the metal diaphragm tank is high-temperature gas. It can play a thermal insulation role to protect the internal liquid propellant in the metal diaphragm propellant tank to be impacted by the high-temperature pressurization gas. Meanwhile, the total thickness and stiffness of the diaphragm are increased because of the existing of the coating, which may cause an influence on the inversion property of the diaphragm. However, this problem was neglected in the past. In this paper, the deforming process of metal diaphragm with heat shield is simulated with FEA and MSC. Marc software. The influence of thickness and elastic modulus of heat shield on inversion process of the metal diaphragm was studied, and the relation between main parameters of heat shield and critical load of inversion was obtained.

**Keywords:** metal diaphragm inversion; heat shield; critical load; FEM

收稿日期: 2016-04-20; 修回日期: 2016-05-20

作者简介: 曹潇 (1990—), 男, 硕士研究生, 研究领域为机械结构变形模拟及优化设计

0 引言

推进剂贮箱是空间推进系统对推进剂实行贮存和控制的装置。隔膜贮箱主要由贮箱壳体和隔膜构成, 其结构如图 1 所示。一定压力的增压气体使隔膜发生翻转, 从而达到排出推进剂的目的。

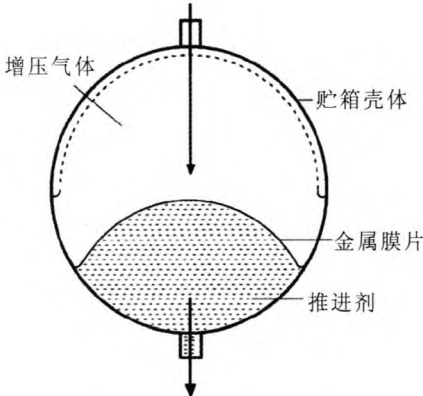


图 1 推进剂贮箱结构图  
Fig. 1 Structure of propellant tank

贮箱隔膜应用的材质有不锈钢、纯铝和纯钛等<sup>[1-4]</sup>, 近年来金属与非金属组成的复合材料也得到了应用研究<sup>[5]</sup>。尽管目的和任务不同, 金属隔膜大多采用旋转变厚度薄壳结构, 在形式上呈现多种化, 有三段式隔膜<sup>[1-3]</sup>、锥柱形隔膜<sup>[6]</sup>和顶部凹陷隔膜, 以及更为复杂的带加强筋隔膜和带波纹结构隔膜<sup>[7-8]</sup>。

金属隔膜的结构复杂性导致理论上难以得到翻转临界载荷表达式, 实践中多采用试验测试<sup>[1]</sup>和数值仿真的方法进行研究。制造工艺的高难度和发射的高可靠性致使试验测试的成本居高不下。随着计算机和有限元分析软件的发展, 数值仿真的可靠性和运算速度不断提高, 因此数值仿真逐步成为研究推进剂贮箱金属隔膜翻转性能的重要手段, 相对于考虑推进剂与隔膜相互作用的流固耦合分析<sup>[5]</sup>, 更多的是对翻转过程进行的结构分析研究<sup>[6-8]</sup>。

在采用燃气增压的空间推进系统中, 贮箱金属隔膜外侧是温度高达 1 000 K 的高温增压气体, 内部是温度较低的液体推进剂。为了减少增

压气体的热量对液体推进剂和隔膜本身的影响, 在金属隔膜的外表面喷涂上隔热涂层, 隔绝增压气体与金属隔膜的直接接触, 达到隔热效果<sup>[9]</sup>。

然而, 由于隔热层的存在, 增加了隔膜的厚度和刚度, 对隔膜的翻转会造成一定的影响, 目前尚缺乏明确的方法对其进行定量分析。本文以图 2(a)所示的金属隔膜为例, 考虑其外表的隔热层, 见图 2(b), 对带隔热层的航天推进剂贮箱金属隔膜的翻转过程进行数值仿真, 对隔热层参数与金属隔膜翻转性能之间的关系进行研究。

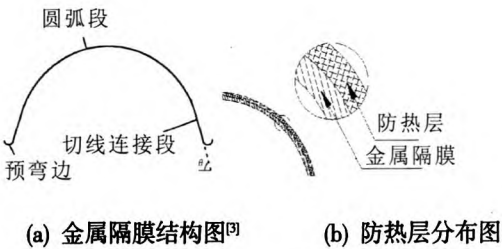


图 2 金属隔膜结构及隔热层分布图  
Fig. 2 Structure of metal diaphragm and its heat shield

1 模型及参数

1.1 贮箱金属隔膜参数

选择文献 [3] 中的金属隔膜的结构和尺寸。该金属隔膜主要由圆弧段、切线连接段和预弯边段组成, 结构图如图 2(a) 所示。隔膜圆弧段和预弯边之间以切线连接, 切线段与水平线夹角为  $\theta$ 。为了控制翻转过程中的稳定性, 隔膜设计为变厚度结构, 从顶部到赤道圆边界隔膜的厚度逐渐变薄。

金属隔膜主要尺寸参数和材料参数见表 1, 隔膜材料为铝, 厚度从顶部到预弯边由 2 mm 至 1 mm 均匀变化。为了使有限元模型更接近真实情况, 对每层单元的厚度都采用变厚度设置, 使厚度变化更加均匀。

隔热层为涂层材料, 影响隔膜翻转的主要参数有弹性模量和厚度。本文选取不同的隔热层弹性模量和厚度进行数值仿真分析, 其中弹性模量变化范围为 0~200 MPa (0 表示无隔热层结构), 厚度变化范围为 0~2 mm (0 表示无隔热层结构)。

表 1 模型结构及材料参数

Tab. 1 Model structure and material parameters

隔膜		涂层	
厚度 $t/\text{mm}$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	弹性模量 $E_h/\text{MPa}$	厚度 $t_h/\text{mm}$
2~1	69	0~200	0~2

1.2 模型计算条件

模型运用四节点壳单元在 MSC.Marc 软件中建模,采用复合层方法对隔热层进行建模,通过双线性构建材料弹塑性曲线。

金属隔膜在工作过程中受到气体压力和液体压力的综合作用,将其简化为外表面的压力差,其大小为 250 kPa;由于隔膜与贮箱壳体连接处进行焊接处理,因此在隔膜边缘处(贮箱与隔膜焊接处)作固支处理。

数值分析采用变刚度法和牛顿-拉斐逊法进行求解,通过修正 Riks-Ramm 弧长法控制载荷步长,跟踪失稳路径。

1.3 模型翻转性能指标

贮箱金属隔膜的翻转过程可以大致分为以下 3 个阶段。

- 1) 在隔膜翻转压力达到临界载荷之前,隔膜顶点高度位移变化缓慢,翻转压力迅速增加;
- 2) 隔膜翻转压力缓慢变化,顶点高度位移迅速增加,在这一阶段翻转压力曲线出现波动现象;
- 3) 由于隔膜的几何变形,受力情况由外压变为内压,由弯曲变形为主变为拉伸变形为主,因此顶点高度位移变化缓慢,翻转压力迅速增加。

为了便于评价贮箱隔膜翻转性能,选择 3 个阶段分割点处的翻转压力作为评价指标。其中,1) 和 2) 阶段分割点为临界载荷点,其翻转压力为  $p_{\alpha}$ ; 2) 和 3) 阶段分割点设定为隔膜翻转过程中顶点高度位移达到其最大位移的 90%处,此处翻转压力为  $p_{0.9}$ 。

2 计算结果与分析

在隔热层参数中,选择隔热层的 2 个主要参

数厚度  $t_h$  和弹性模量  $E_h$  按照单一变量原则进行研究,分析  $t_h$  和  $E_h$  对隔膜翻转过程的影响。

2.1 隔热层厚度分析结果

将隔热层弹性模量  $E_h$  取为固定值 128 MPa,在 0~2 mm 之间等距选择 11 个隔热层厚度  $t_h$  数据,构建有限元模型进行仿真分析,得到模型翻转性能指标  $p_{\alpha}$  和  $p_{0.9}$ ,结果如表 2 所示。

表 2 隔热层厚度分析数据结果

Tab. 2 Analysis results on thickness of heat shield

隔热层厚度 $t_h/\text{mm}$	$p_{\alpha}/\text{kPa}$	增量/%	$p_{0.9}/\text{kPa}$	增量/%
0	6.95	0	23.2	0
0.2	7.12	2.45	23.4	0.862
0.4	7.22	3.88	23.5	1.29
0.6	7.37	6.04	23.3	0.431
0.8	7.52	8.20	22.6	-2.59
1.0	7.89	13.5	22.5	-3.02
1.2	8.21	18.1	24.2	4.31
1.4	8.78	26.3	23.8	2.59
1.6	8.9	28.1	22.8	-1.72
1.8	9.31	34.0	22.9	-1.29
2.0	9.71	39.7	22.8	-1.72

由表 2 可知,隔膜翻转过程中临界载荷  $p_{\alpha}$  随着隔热层厚度的增加而增大,相比之下, $p_{0.9}$  随着隔热层厚度的增加而不断反复波动变化。因此,相对于  $p_{0.9}$ , $p_{\alpha}$  对金属隔膜隔热层厚度更为敏感一些。

通过分析计算,当  $t_h$  为 0.874 mm 时, $p_{\alpha}$  相对于初始模型的增加幅度达到 10%,此时隔热层的存在已经影响到了隔膜的翻转性能。

为了更直观地查看隔热层厚度的影响情况,从表 2 中选择 6 种隔热层厚度 (0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0) 对应的贮箱隔膜翻转压力曲线绘制成图 3。其中,横轴为翻转过程中贮箱隔膜顶点高度变化位移,纵轴为不同顶点高度位移下对应的隔膜翻转压力。

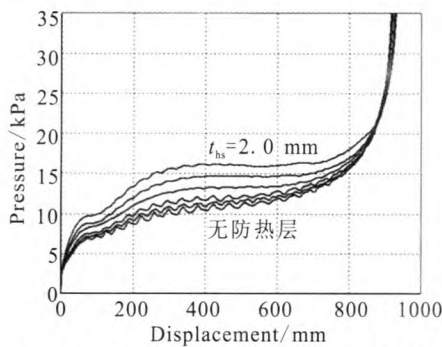


图 3 不同隔热层厚度下的翻转压力曲线对比

Fig. 3 Comparison of overturn pressure curves at different thickness of heat shield

由图 3 可知, 不同隔热层厚度对应的隔膜翻转压力曲线的变化趋势基本保持一致。随着膜隔热层的增厚, 隔膜在同一顶点高度位移下的翻转压力也随之增大, 隔热层的影响随着隔热层的增厚也越来越无法忽略。在 90% 位移处, 各个曲线基本上汇合到一起, 导致  $p_{09}$  随着隔热层的厚度变化在一定范围内波动。

2.2 隔热层弹性模量分析结果

与隔热层厚度分析方法类似, 将隔热层厚度  $t_{hs}$  取为固定值 1.0 mm (与隔膜本体最小厚度值相等), 在 0~200 MPa 之间等距选择 11 个隔热层弹性模量  $E_{hs}$ , 经过仿真分析得到对应的隔膜翻转性能指标  $p_{\sigma}$  和  $p_{09}$ , 结果如表 3 所示。

表 3 隔热层弹性模量分析数据结果

Tab. 3 Analysis results on elastic modulus of heat shield				
隔热层厚度 $t_{hs}/\text{mm}$	$p_{\sigma}/\text{kPa}$	增量/%	$p_{09}/\text{kPa}$	增量/%
0	6.95	0	23.2	0
20	7.19	3.45	22.9	-1.29
40	7.28	4.7	22.6	-2.59
60	7.46	7.34	23.3	0.431
80	7.52	8.20	22.3	-3.88
100	7.71	10.9	22.2	-4.31
120	7.85	12.9	22.5	-3.02
140	8.00	15.1	22.6	-2.59
160	8.05	15.8	22.4	-3.45
180	8.21	18.1	22.9	-1.29
200	8.33	19.9	22.7	-2.16

由表 3 可知, 隔膜的  $p_{\sigma}$  随着隔热层弹性模量的增大而增大,  $p_{09}$  随着隔热层弹性模量的变化而上下波动, 变化幅度较低。隔热层弹性模量的大小对  $p_{\sigma}$  要比  $p_{09}$  更加敏感。

当隔热层弹性模量由 0 增加到 200 MPa 时,  $p_{\sigma}$  仅增加了 20%, 相对于隔热层厚度, 隔热层弹性模量对隔膜翻转性能的影响并不显著。

为了更好地比较隔热层弹性模量对隔膜翻转压力曲线的影响大小, 从表 3 中选择 6 种隔热层弹性模量 (0, 40, 80, 120, 160, 200) 对应的隔膜翻转压力曲线并绘制成图 4。

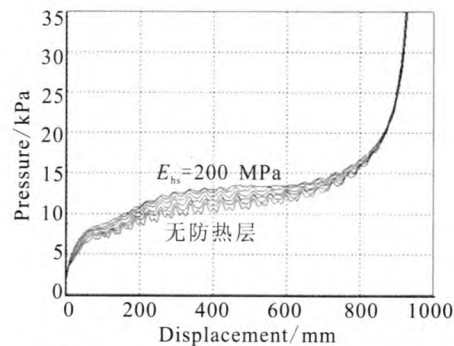


图 4 不同隔热层弹性模量下的翻转压力曲线对比

Fig. 4 Comparison of inversion pressure curves of heat shield with different elastic modulus

由图 4 可看到隔膜翻转压力曲线的第 1 阶段和第 3 阶段压力曲线迅速上升, 第 2 阶段压力曲线在缓慢上升过程中产生一定波动。

弹性模量的改变主要影响第 2 个阶段, 此时隔膜处于发生弯曲变形的阶段, 不断由外压状态变为内压状态, 弹性模量影响很大。在第 3 阶段不同的曲线已经汇聚到了一起, 因此得到的  $p_{09}$  随着弹性模量的变化而不断在一个稳定的范围内波动, 隔膜主要承受拉伸变形, 隔热层弹性模量对其几乎没有影响。

比较图 3 和图 4, 相对于隔热层厚度, 隔热层弹性模量对隔膜的翻转过程影响很小。

3 隔热层参数对模型翻转的影响

从前面的计算结果与分析可知, 翻转性能指标  $p_{09}$  对翻转压力曲线的表征能力要弱于临界载荷  $p_{\sigma}$ 。因此, 主要讨论隔热层参数对临界载荷



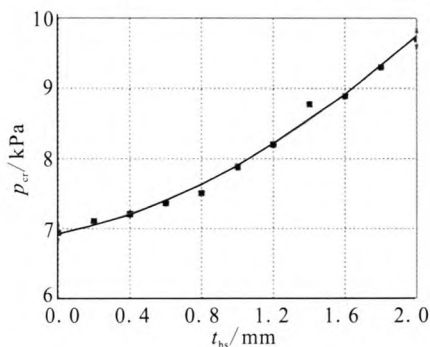
$p_{cr}$  的影响, 进一步探讨隔热层厚度  $t_{hs}$ 、弹性模量  $E_{hs}$  与临界载荷  $p_{cr}$  的关系。

根据表 2 和表 3 中的数据绘制隔热层厚度和弹性模量对隔膜翻转过程临界载荷的关系变化图, 如图 5 所示。

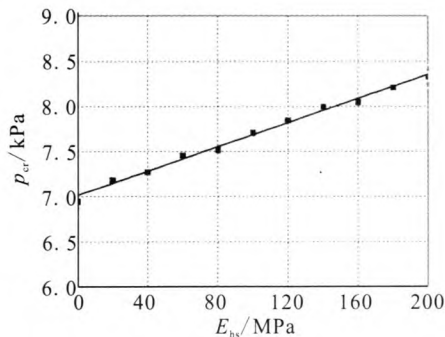
显然, 临界载荷  $p_{cr}$  与隔热层厚度、弹性模

量均呈正相关; 由图 5 (a) 可知, 临界载荷  $p_{cr}$  与隔热层厚度  $t_{hs}$  大致为二阶关系; 由图 5 (b) 可知, 与隔热层弹性模量  $E_{hs}$  大致为一阶线性关系。

因此, 隔热层厚度的增加对金属隔膜的翻转过程影响更为明显。



(a) 厚度变化, 弹性模量不变 ( $E_{hs}=128\text{ MPa}$ )



(b) 弹性模量变化, 厚度不变 ( $t_{hs}=1.0\text{ mm}$ )

图 5 隔热层参数对模型临界载荷的影响

Fig. 5 Influence of heat shield parameters on critical load of model

## 4 结论

通过对不同的贮箱隔膜隔热层参数 (厚度  $t_{hs}$  和弹性模量  $E_{hs}$ ) 进行有限元分析, 得到它们对隔膜翻转性能指标  $p_{cr}$  和  $p_g$  的影响。

由于隔热层的存在, 隔膜翻转的临界载荷  $p_{cr}$  和  $p_{09}$  均发生变化, 且与隔热层厚度和弹性模量均呈正相关关系。临界载荷  $p_{cr}$  与隔热层厚度  $t_{hs}$  大致为二阶关系, 与隔热层弹性模量  $E_{hs}$  为一阶线性关系, 隔热层厚度对翻转性能的影响比弹性模量更大一些。

从隔热效果出发, 隔热层的厚度越厚越好, 然而隔热层增加了隔膜的厚度和刚度, 当隔热层达到一定厚度时, 会显著影响隔膜的翻转效果, 在选择隔膜的隔热材料时, 需要引起重视。

### 参考文献:

- [1] 张增亭. 金属隔膜贮箱隔膜的数值仿真与试验验证[J]. 火箭推进. 2009, 35(3): 26-29.  
ZHANG Z T. Numerical simulation and test verification of diaphragm tank[J]. Journal of rocket propulsion. 2009, 35 (3): 26-29.
- [2] 张绪虎, 唐斌, 李金山, 等. 材料参数对 20L 近半球形金属隔膜翻转性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2011, 18(5): 116-120, 125.
- [3] 吴安达, 王亲猛. 推进剂贮箱金属隔膜的变形模拟及参数分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2012 (3): 59-62.
- [4] WINDISCH M, BECK R. Numerical simulation and optimization of a hemispherical metallic membrane designed for positive expulsion of a propellant tank[C]// Proceedings of European Conference on Space Craft Structure, Materials and Mechanical Testing. Braunschweig, Germany: [s.n.], 1999: 45-52.
- [5] 强洪夫, 周算, 王广, 等. 径厚比对锥柱形金属膜片屈曲和后屈曲状态的影响[J]. 航空动力学报, 2012, 27(11): 2521-2528.
- [6] 周算, 强洪夫, 王学仁, 等. 波纹位置对顶部凹陷隔膜翻转行为的影响研究[J]. 工程力学, 2014, 31(02): 242-248.
- [7] SZELINSKI B, LANGE H, R?TTGER C, et al. Development of an innovative sandwich common bulkhead for cryogenic upper stage propellant tank[J]. Acta astronautica, 2012, 81(1): 200-213.

(编辑: 陈红霞)