

气路膜片设计研究

刘中华, 苏 晨, 汪军安, 马庆明
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 基于 ANSYS 软件平台, 对气路膜片进行了数值仿真, 研究了气路膜片等效应力与位移之间的关系, 得出了气路膜片材料、几何结构以及结构尺寸设计准则, 采用该设计准则设计的气路膜片通过了火工品专用试验台考核。试验结果还表明, 气路膜片破裂压力范围为 9 ± 0.5 MPa, 试验系统氮气加载速率 ≥ 100 MPa/s, 气路膜片满足设计要求。气路膜片已应用于火工品试验台气体快速加载装置, 以模拟药柱燃烧时产生的高温、高压气体快速充填试验系统。

关键词: 液体火箭发动机; 气路膜片; 气体快速加载; 建模

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 05-0095-06

Design and study of pneumatic diaphragm in gas circuit

LIU Zhonghua, SU Chen, WANG Jun'an, MA Qingming
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Numerical simulation of the pneumatic diaphragm was carried on with ANSYS to study the relationship between equivalent stress and displacement of the pneumatic diaphragm, and then the design criteria of the material, geometric structure and size of pneumatic diaphragm were obtained. The pneumatic diaphragm adopting the design criteria passed the assessment of the special testbed for initiating explosive devices. The test results show that the rupture pressure range of pneumatic diaphragm is 9 ± 0.5 MPa, the nitrogen loading rate of the test system is not less than 100 MPa/s, and the pneumatic diaphragm meets the design requirements. The pneumatic diaphragm has been applied to a rapid gas loading device to simulate the rapid filling test system of high temperature and high pressure gas produced while the grain is burning.

Keywords: liquid propellant rocket engine; pneumatic diaphragm; rapid gas loading; modeling

收稿日期: 2015-03-26; 修回日期: 2015-05-16

作者简介: 刘中华 (1982—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机流体试验技术

0 引言

气路膜片是一种压力敏感元件，它能够在容器或者管路内的气体介质超压时迅速动作，当气路膜片的承压侧与泄放侧压力差达到设定启爆压力时，膜片会发生脱落或破裂，将容器或管路内的介质压力释放出去。气路膜片作为压力容器或管道的安全泄压装置具有结构简单、类型多样、密封性能好、泄放面积大、动作迅速、工作可靠、价格低廉、适用范围广等特点，在石油、化工、医药、食品、消防、电力、航空航天等领域得到了广泛应用。本文设计的气路膜片用于火工品试验台气体快速加载装置，以模拟药柱燃烧时产生的高温、高压气体快速充填试验过程。

1 气路膜片类型

目前使用的气路膜片均为拱形和平板形金属膜片。拱形膜片分为正拱形和反拱形：正拱形气路膜片压力敏感元件呈正拱形，安装后拱的凹面处于压力系统的高压侧，动作时该元件发生拉伸破裂，根据膜片破裂机理，正拱形膜片分为正拱普通型、开缝型和带槽型；反拱形气路膜片压力敏感元件呈反拱形，安装后拱的凸面处于压力系统的高压侧，动作时该元件发生压缩失稳，致使膜片破裂或脱落。根据膜片破裂机理，反拱形膜片分为反拱鄂齿型、十字槽型、环槽型等类型。平板型气路膜片压力敏感元件呈平板形，根据膜片破裂机理，平板形

表 1 气路膜片类型与特征

Tab. 1 Types and characteristics of pneumatic diaphragm		
膜片类型	刻痕类型	特性
正拱形	普通型	适用于气液两种介质；适用于高温高压环境；最大工作压力可达最小允许爆破压力的 70%；爆破后有碎片；带托架可承受背压；膜片破裂压力范围与膜片材料抗拉强度有关
	开缝型	适用于气液两种介质；最大工作压力达最小允许爆破压力的 80%；爆破后有碎片；带托架可承受真空背压；使用温度-196~540 ℃；膜片破裂压力范围与膜片材料抗拉强度有关
	带槽型	适用于气液两种介质；最大工作压力可达最小允许爆破压力的 70%~80%；爆破无碎片；膜片破裂压力范围与膜片材料抗拉强度有关
反拱形	鄂齿型	适用于气体介质；最大工作压力可达最小允许爆破压力的 90%；爆破后无碎片；抗疲劳，可用于脉动压力场合；不需真空托架，可承受完全真空状态；膜片破裂压力范围与膜片材料抗拉强度有关
	十字槽型	适用于气体介质；适用于高温高压环境；最大工作压力可达最小允许爆破压力的 90%；爆破后无碎片；抗疲劳，可用于脉动压力场合；不需要真空托架，可承受完全真空状态；膜片破裂压力范围与膜片材料抗拉强度有关
	环槽型	适用于气液两种介质；最大工作压力可达最小允许爆破压力的 90%；爆破后无碎片；抗疲劳，可用于脉动压力场合；不需要真空托架，可承受完全真空状态；膜片破裂压力范围与膜片材料抗拉强度有关
平板形	开缝型	适用于气液两种介质；适用于常压系统；使用温度-40~260 ℃；膜片破裂压力范围与膜片材料抗拉强度有关
	带槽型	适用于气液两种介质；适用于常压系统；膜片破裂压力范围与膜片材料抗拉强度有关。

膜片分为平板开缝型和带槽型。气路膜片类型与特征见表 1。

本文设计的气路膜片用于火工品用试验台气体快速加载装置, 加载压力为 9 MPa, 介质为氮气, 试验系统严禁出现和产生多余物, 为此, 选择反拱十字槽型气路膜片。反拱十字槽型气路膜片结构示意图见图 1。

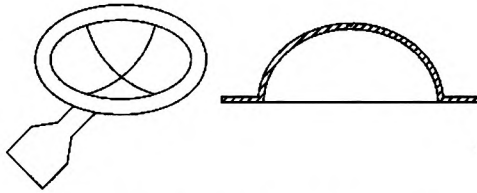


图 1 反拱十字槽型气路膜片结构图
Fig. 1 Structure of inverted arch pneumatic diaphragm with cross groove

2 气路膜片数值仿真

2.1 膜片破裂压力计算半经验公式

普通拱形膜片破裂压力计算公式为:

$$p_b = K \sigma_b \frac{S}{D} \tag{1}$$

式中: K 为材料系数, $K=3\sim3.8$; σ_b 为材料抗拉强度, MPa; S 为膜片初始厚度, mm; D 为泄放口直径, mm。

公式 (1) 是基于“薄膜 (无力矩) 理论”推导出来的, 在分析球壳承压时忽略了沿厚度方向的径向应力, 另外公式 (1) 计算膜片破裂压力的准确度还取决于材料系数 K , 而 K 值是根据经验和相关实验结果选取的。因此, 公式 (1) 计算的膜片破裂压力理论值与膜片实际破裂压力值之间有误差。

2.2 膜片破裂力计算模型

在图 2 中, 假设从单层厚壁球形壳上取一截面, 沿分界面 R_c 将壳体壁厚分成弹性层与塑性层两部分。设定弹性层与塑性层分界面上的压力为 p_c , 并用 p_c 代表弹性层与塑性层之间的径向应力, 那么弹性层上承受的外压力为 0, 内压力则为 p_c ; 塑性层上承受的外压力为 p_c , 内压力则为 0。

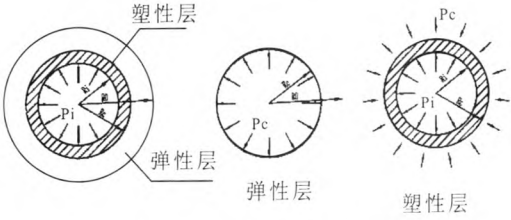


图 2 单层厚壁球壳分解图
Fig. 2 Exploded view of monolayers thick spherical shell

对于塑性层, 根据微元体平衡方程 (2)、Mises 屈服条件 (3) 以及相关边界条件, 积分迭代, 可得公式 (4):

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \frac{r}{2} \frac{d\sigma_r}{dr} \tag{2}$$

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \tag{3}$$

$$p_c = -\frac{4}{\sqrt{3}} \sigma_s \ln \frac{R_c}{R_i} + p_i \tag{4}$$

对于弹性层, 将弹性层视为承受内压 p_c 的弹性球体, 设 $K_c = \frac{R_o}{R_c}$, 则弹性层内壁 $r=R_c$ 处的应力表达式为:

$$(\sigma_r)_{r=R_c} = -p_c \tag{5}$$

$$(\sigma_\theta)_{r=R_c} = -\frac{p_c}{K_c^3 - 1} \left(1 + \frac{1}{2} K_c^3 \right) \tag{6}$$

根据 Mises 屈服条件 (公式 3) 可得:

$$p_c = \frac{4}{3\sqrt{3}} \sigma_s \left(\frac{K_c^3 - 1}{K_c^3} \right) \tag{7}$$

令公式 (4) 与公式 (7) 相等, $R_o=R_c$, 则可推导出沿壁厚整体屈服时的内压力 p_z 的表达式

$$p_z = \frac{4}{\sqrt{3}} \sigma_s \ln K \tag{8}$$

式中 $K = \frac{R_o}{R_i} = \frac{R_o}{R_o - t} = \frac{4H^2 + d^2}{4H^2 + d^2 - 8Ht}$, H 为拱高, t 为厚度。

则膜片破裂压力上限值为公式 (9), 爆破压力下限值为公式 (10), 膜片破裂压力 p_b 为公式 (11)。

$$p_{bmax} = \frac{4}{\sqrt{3}} \sigma_b \ln K \tag{9}$$

$$p_{bmin}=\frac{4}{\sqrt{3}}\sigma_b\ln K$$
 (10)

$$p_b=p_{bmin}+\frac{\sigma_s}{\sigma_b}(p_{bmax}-p_{bmin})=-\frac{4}{\sqrt{3}}\sigma_s\left(2-\frac{\sigma_s}{\sigma_b}\right)\ln K$$

$$=-\frac{4}{\sqrt{3}}\sigma_s\left(2-\frac{\sigma_s}{\sigma_b}\right)\ln\frac{4H^2+d^2}{4H^2+d^2-8Ht}$$
 (11)

式中： H 为拱高； d 为泄放口直径； t 为膜片厚度； σ_s 为膜片材料屈服强度； σ_b 为膜片材料抗拉强度。

公式 (11) 即为本文建立的气路膜片破裂力计算模型

2.3 膜片破裂力数值仿真

反拱十字槽型膜片是在拱形膜片凸面加工十字切槽而成型的。在正常工作状态下，气路膜片在介质压力作用下，膜片发生变形，应力主要集中在十字切槽上。当系统工作压力超压并达到膜片设计破裂压力时，十字切槽处因膜片材料强度不足而发生断裂，随即膜片整个拱形面沿着十字切槽被揭起破裂开花，破裂花瓣沿膜片根部整体贴壁 (膜片破裂后无碎片即无多余物产生)，从而释放了压力容器系统内介质的压力。

反拱十字槽形膜片设计要求见表 2。

表 2 反拱十字槽形膜片设计要求

Tab. 2 Design requirements of the inverted arch pneumatic diaphragm with cross groove

反拱十字槽形气路膜片	设计要求
膜片材料	304 不锈钢
膜片工作温度	20 ℃
膜片破裂压力设计值	9±0.5 MPa
膜片外径	50.5 mm
泄放口直径	25.5 mm
膜片拱高	4.95 mm
膜片厚度	3.82 mm
膜片槽深	3.6 mm
膜片响应时间	≤0.1 s
试验系统氮气加载速率	≥100 MPa/s

反拱十字槽形膜片结构对称，起爆点始于十字槽中心点，采用 ANSYS 软件平台数值仿真时，坐标原点即为膜片十字槽中心点，取四分之一膜片作为研究对象进行建模并数值仿真。位移边界条件：在膜片加持面两侧施加固定位移约束，限制其各个方向上的位移及转动；在两侧剖分截面上分别施加法向位移约束，限制其沿截面法方向上的位移。载荷边界条件：膜片的设计破裂压力为 9 MPa，凹面侧为承压面，故在整个凹面侧施压 9 MPa 的静压力，方向垂直于承压面。网格划分：选用 solid186 单元，利用自适应网格划分法对整个结构进行网格划分，网格尺寸为 0.1 mm。通过建模、数值仿真， X 和 Y 轴的等效应力与位移之间的关系见图 3。

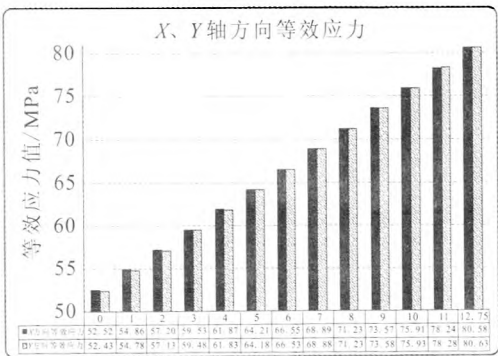


图 3 X 和 Y 轴的等效应力分布图

Fig. 3 Equivalent stress distribution of X and Y axes

由图 3 可知，膜片上的等效应力随坐标距离原点的距离增大而增大，在拱顶处达到最大值，且在每点处， X 轴方向等效应力（周向应力）与 Y 轴方向等效应力（周向应力）大小相当。

拱顶处 X 轴方向等效应力（拱顶处周向应力） $\sigma_x = 80.583$ MPa

拱顶处 Y 轴方向等效应力（拱顶处径向应力） $\sigma_y = 80.628$ MPa

在膜片破裂压力 $p=9$ MPa，泄放口直径 $d=25.5$ mm 时，由球壳薄膜应力公式计算，可得： $\sigma=82.76$ MPa

理论计算结果与仿真分析最大误差为：

$$\Delta=\frac{\sigma-\sigma_x}{\sigma}2.63\%$$

可见, 气路膜片破裂力理论模型与仿真分析模型之间的误差是很小的, 两模型计算结果的误差基本在工程设计允许范围之内。

3 气路膜片设计准则

气路膜片性能与膜片材料、结构、尺寸等均

有关系, 这些因素直接影响膜片的破裂压力。

3.1 膜片材料

膜片常用金属材料见表 3。

3.2 膜片几何结构与尺寸设计

气路膜片的几何结构根据使用要求、膜片固有性能以及表 1 气路膜片类型与特征等确定。

表 3 膜片常用金属材料

Tab. 3 Common metallic materials of pneumatic diaphragm		
膜片材料	最高使用温度/℃	耐腐蚀性能
304 不锈钢	400	可耐有机酸、碱、有机化合物、中性溶液以及多种气体腐蚀。会被盐酸和硫酸等严重腐蚀。在遇到混有卤素离子的盐溶液时会有小孔腐蚀。在含有对应力腐蚀较为敏感离子的溶液中, 会产生应力腐蚀
316 不锈钢	480	与 304 不锈钢性能相近, 耐热的有机酸、非氧化性酸、氯化物溶液腐蚀能力比铬镍不锈钢强
铜	200	对大多数盐溶液如海水以及有机物具有良好的耐腐蚀性。不耐氨水、氧化性酸、熔融金属, 硫及硫的化合物腐蚀
蒙乃尔合金	425	耐氧化性酸、热浓碱液、中性溶液、高温卤素、各类食品、水、海水、大气、多种有机化合物等腐蚀。对纯镍、氧化性酸及其溶液、浓硫酸和高温含硫气体的耐腐蚀性能较差

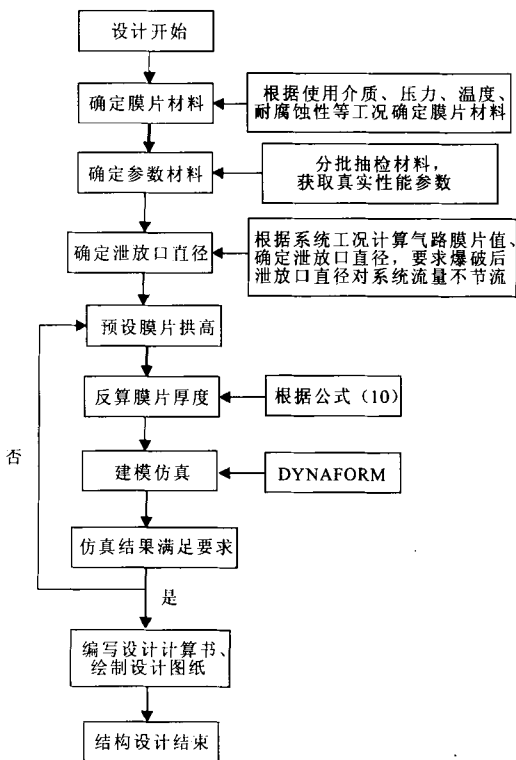


图 4 气路膜片结构与尺寸设计计算流程
Fig. 4 Design and calculation process of the pneumatic diaphragm structure and size

气路膜片结构尺寸根据公式 (10) 设计计算, 并按图 4 气路膜片结构与尺寸设计计算流程采用计算机 Dynaform 仿真平台进行优化。

4 气路膜片试验验证

气路膜片破裂试验是在火工品气体加载试验台上完成的, 试验系统原理框图见图 5。

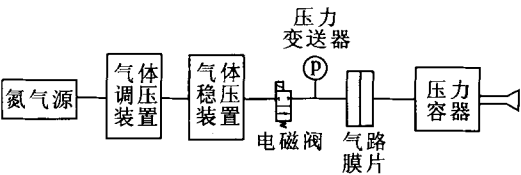


图 5 气路膜片破裂试验系统原理框图
Fig. 5 Block diagram of the pneumatic diaphragm rupture test system

气路膜片破裂试验程序: 将氮气压力经过调压装置调节到 14 MPa, 瞬时打开电磁阀, 使氮气介质快速填充气路膜片前端, 当气体压力达到膜片爆破压力时, 膜片破裂, 氮气进入压力容

器，采集膜片破裂时的破裂压力值和气体填充压力容器的速率以验证膜片数值仿真与设计计算的合理性与正确性。膜片破裂试验升压曲线见图 6。

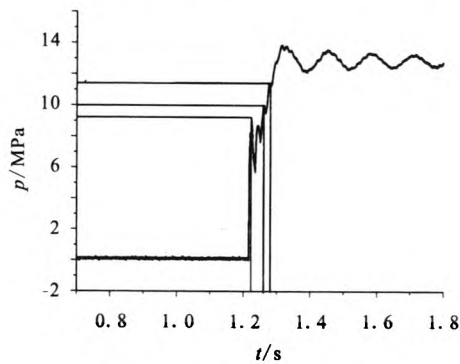


图 6 膜片破裂试验升压曲线图

Fig. 6 Curve of boost in rupture test of pneumatic diaphragm

表 4 试验结果与设计值比较

Tab. 4 Comparison between test results and design values

参数	设计值	试验结果	误差率/%
气路膜片破裂压力	9±0.5 MPa	8.88	1.33
		9.21	2.33
		8.62	4.22
		8.91	1
		9.15	1.67
		8.79	
试验系统氮气加载速率	≥100 MPa/s	128	
		171	
		116	
		133	
		155	
		123	

由图 6 可见，在 $t=0.38\text{ s}$ 时，系统开始升压；在 $t=0.41\text{ s}$ 时，膜片前端压力达到 8.88 MPa ，膜片破裂，气体快速充填产品容腔，压力微降，随后调压稳压装置快速补压，压力很快升高；在 $t=0.44\text{ s}$ 时，系统压力达到 10 MPa ，此时总的升

压时间为 60 ms ，平均升压速率为 167 MPa/s ；在 $t=0.47\text{ s}$ 时，压力容器压力达到 11.5 MPa ，此时总的升压时间为 90 ms ，平均升压速率为 128 MPa/s 。气路膜片破裂试验结果与设计值比较见表 4。由表 4 可见，气路膜片破裂压力实测值全部在膜片破裂压力设计值范围之内，试验系统氮气加载速率均大于 100 MPa/s ，满足设计要求，由此证明，采用 ANSYS 软件平台数值仿真气路膜片的模型是合理的，仿真和计算结果是正确的，气路膜片满足设计要求，已应用于火工品试验台模拟药柱燃烧时产生的高温、高压气体快速充填试验系统。

5 结论

采用 ANSYS 软件平台数值仿真了气路膜片，研究了气路膜片等效力与位移之间的关系，得到了气路膜片材料、几何结构和结构尺寸的设计准则。采用该准则设计的气路膜片通过了火工品气体快速加载试验系统的考核。试验结果表明，气路膜片破裂压力范围满足设计值 $9\pm0.5\text{ MPa}$ ，试验系统氮气加载速率满足设计值 $\geq 100\text{ MPa/s}$ 。由此证明，气路膜片数值仿真是合理的，气路膜片数值仿真结果和气路膜片设计准则是正确的。该气路膜片已应用于火工品试验台气体快速加载装置以模拟火药柱燃烧时产生的高温、高压气体快速充填试验系统。

参考文献：

[1] 李志义. 爆破片技术及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

[2] 中国标准化技术委员会. 爆破片与爆破片装置: GB567-1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.

[3] 王志文. 化工容器设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

[4] 徐英华, 王自和, 李春辉. 临界流文丘里喷嘴[M]. 北京: 中国计量出版社, 2009.

[5] 宋瑜, 闫兴清. 正拱开缝型爆破片爆破性能有限元分析[J]. 辽宁化工, 2014 (4): 17-21.

(编辑：王建喜)