

# 固体火箭发动机密封结构 随机有限元可靠性分析

孙兵晓, 常新龙, 胡成荣, 马章海  
(第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)

**摘 要:** 通过研究固体发动机密封结构主要部件橡胶 O 形密封圈的力学性能, 应用积分随机有限元法实现了密封结构随机因素下的结构响应, 完成了固体发动机密封结构在长时间贮存老化和工作状态下的力学性能模拟及随机有限元可靠性分析。

**关键词:** 密封结构; 力学性能; 积分随机有限元

**中图分类号:** V435

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2008) 05-0022-05

## Reliability analysis of the SRM sealing structure based on stochastic finite element method

Sun Bingxiao, Chang Xinlong, Hu Chengrong, Ma Zhanghai  
(The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** This paper has researched the mechanical property of the rubber O-ring which is the major part of the sealing structure, and obtained the structural respond of the rubber sealing ring of the SRM under uncertain factors by the integral stochastic finite element method (ISFEM). The paper has accomplished the mechanical property simulation and the reliability analysis of the SRM sealing structure respektively under natural aging and working conditions.

**Key words:** sealing structure; mechanical property; ISFEM

### 0 引言

固体火箭发动机, 由于其结构简单、易于维

护、可靠性高、作战反应快等优良特性, 广泛运用于各种型号的导弹武器, 其性能的优劣、使用的有效性将直接影响武器系统的战斗力。导弹武器在服役过程中, 由于材料本身老化导致材料性

收稿日期: 2008-05-30; 修回日期: 2008-08-14。

作者简介: 孙兵晓 (1983—), 男, 硕士研究生, 研究领域为失效物理与可靠性。

能下降带来的失效模式成为影响导弹武器可靠性的主要因素。固体导弹武器系统在服役条件下, 随着部件的逐渐老化, 对导弹武器系统当前的质量状态掌握不清, 特别是一些关键结构部件受老化影响, 其可靠性评估很难进行准确的计算机数值模拟。本文对固体导弹发动机密封结构进行了分析与研究, 利用有限元软件 ANSYS, 结合随机有限元可靠性分析原理, 分析计算了密封结构在经过贮存老化之后的可靠性。

1 密封结构失效分析

固体发动机密封结构多采用静密封的形式, 根据橡胶密封圈的材料特性和 O 形橡胶圈与沟槽接触的密封应力分布特点, 固体发动机一般采用橡胶 O 形圈密封结构, 自紧密封特征使得该结构具有高度的可靠性<sup>[1]</sup>。表 1 列出密封结构的密封圈和连接组件的常见主要故障模式。

表 1 对接密封结构主要失效模式  
Tab.1 Main failure pattens of contact sealing structure

名 称	失 效 模 式
对接密封结构	泄 漏
橡胶 O 形密封圈	老化、破损、撕裂、切口、磨损、锻痕、裂纹、破裂、过分擦伤、变形
螺栓组件	断裂、疲劳破坏、应力松弛

以上失效模式是密封结构的橡胶密封圈和螺栓组件在各阶段中可能出现的主要故障现象, 可以认为密封结构可靠性变化主要由橡胶 O 形密封圈老化决定<sup>[2,3]</sup>。因此将 O 形密封圈的老化失效作为固体发动机密封结构可靠性研究切入点, 利用密封圈的应力松弛来模拟老化后的性能变化。

应用大型有限元分析程序 ANSYS10.0 建立了密封结构的轴对称超弹性二维非线性有限元数值分析模型 (图 1)。

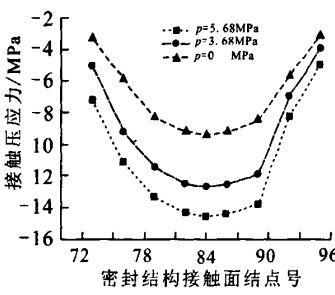


图 2 不同工况下密封接触压应力分布  
Fig.2 Distribution of sealing contact crushing stress under different working conditions

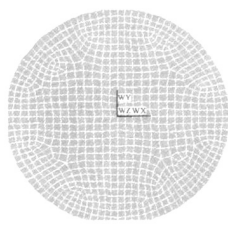


图 1 密封结构有限元模型及网格划分  
Fig.1 Finite element model and meshes of sealing structure

根据建立的计算模型, 以基本结构参数为基础, 对密封结构设计的主要参数, 如压缩率、张开间隙、工况条件等对密封性能的影响进行了计算, 从而对密封结构的等效应力、接触应力、剪切应力进行了分析 (图 2)。

由其结果可以发现, 接触压应力的大小反映了 O 形圈的密封能力, O 形圈保证密封的必要条件是密封界面上的最大接触压应力大于或等于工作压力。一般来说, 对同一密封结构的材料而言, 密封结构的接触压应力的大小与密封圈的压缩率以及发动机工作后受到的燃气压力有关。因此本文建立了可靠性分析中的密封结构最大接触压应力失效判据, 据此可以建立密封结构的极限状态方程:

$$Z=R-S=\sigma_{x\max}-p=G(v, E, p)-p \tag{1}$$

式中,  $\sigma_{x\max}$  为最大密封接触压应力;  $p$  为发动机工作内压。

## 2 积分随机有限元与可靠度计算

### 2.1 积分随机有限元

利用对输入随机变量的概率密度函数进行积分得到结构随机响应的方法称为积分随机有限元, 由于输入和响应之间通常不存在显式关系, 需要通过数值积分来实现。

设含有随机参数  $a$  的结构有限元方程为

$$K(a, \delta) \cdot \delta = F(a) \quad (2)$$

式中,  $K$ ,  $F$  为总刚矩阵和载荷向量。由公式 (2) 解得的位移响应  $\{\delta\}$  是随机的。结构应力、应变、反力以及由此建立的结构功能函数等响应量均为位移响应  $\{\delta\}$  的导出量, 因而也是随机的。设为

$$Z = G(a) \quad (3)$$

$Z$  为上述的各种随机响应量, 一般地, 公式 (3) 没有解析表达式。需通过数值方法进行求解。假设随机参数  $a$  服从标准正态分布, 其密度函数

$$f(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{a^2}{2}\right) \quad (4)$$

由概率论可知  $Z$  的各阶统计量为:

均值:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} G(a) \cdot \exp\left(-\frac{a^2}{2}\right) da \quad (5.1)$$

$k$  阶中心矩:

$$M^k = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} (G(a) - \mu)^k \cdot \exp\left(-\frac{a^2}{2}\right) da \quad (5.2)$$

公式 (5) 可用如下的 Hermite 数值积分求解

$$\int_{-\infty}^{+\infty} F(x) \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot F(x_i) \quad (6)$$

式中,  $x_i (i=1, 2, \dots, m)$  是积分点;  $\lambda_i$  为相应的权重。

对于多变量的积分随机有限元, 可以设  $U$  为  $n$  维随机向量  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ , 其均值为  $\bar{U} = \{\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_n\}$ , 令,  $\bar{U}_i = \{\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_i, \bar{u}_n\}$ , 即  $U_i$  中除了  $u_i$  外, 其余的随机变量为其均值。与公式 (3) 对应的响应  $Z = G(U)$  的统计量由如下方法获得:

取  $Z$  的近似表达式为:

$$Z' = \sum_{i=1}^n [Z_i - \bar{Z}] + \bar{Z} \quad (7)$$

其中  $Z_i = G(U_i)$ ;  $\bar{Z} = G(\bar{U})$ , 则  $Z$  的统计量可由其近似量  $Z'$  导出

$$\text{均值: } \mu = \sum_{i=1}^n (\mu_i - \bar{Z}) + \bar{Z}$$

$$\text{方差: } \sigma^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2$$

$$3 \text{ 阶中心矩: } M^3 = \sum_{i=1}^n M_i^3$$

$$4 \text{ 阶中心矩: } M^4 = \sum_{i=1}^n M_i^4 + 6 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>i}^n \sigma_i^2 \sigma_j^2$$

式中,  $\mu_i$ ,  $\sigma_i^2$ ,  $M_i^k$  分别为  $Z_i$  的均值、方差和  $k$  阶中心矩, 可由公式 (5) 得到。如果  $U$  为相关的非标准正态分布的随机向量, 可采用 Rosenblatt 变换将其变换成标准正态随机向量再按上式计算。公式 (7) 式的近似可大大减少计算量。

值得注意的是, 高斯类积分随机有限元利用确定性有限元来进行随机分析, 它不涉及到有限元的具体实现过程, 因此可利用有限元软件进行建模和完成确定性计算, 对于复杂几何形状以及材料非线性结构的计算可节省大量时间。

### 2.2 结构可靠度计算方法

设  $X_1, X_2, \dots, X_n$  为影响结构功能的  $n$  个随机变量, 结构功能函数可表达为,

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (8)$$

$X_1, X_2, \dots, X_n$  可以是结构的几何尺寸、材料的物理参数、结构受到的外载荷等。

当  $Z > 0$  时, 结构具有规定功能, 状态可靠;

当  $Z < 0$  时, 结构丧失规定功能, 状态失效;

当  $Z = 0$  时, 结构处于极限状态或临界状态。

结构功能函数出现小于零 ( $Z < 0$ ) 的概率即为失效概率, 用  $p_f$  表示。由公式 (8) 知  $Z$  为随机变量  $X_1, X_2, \dots, X_n$  的函数, 所以也是随机变量, 设其概率密度函数为  $f(z)$ , 则  $Z < 0$  的概率为

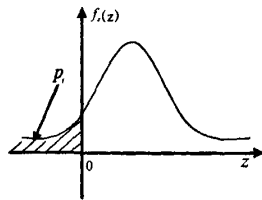
$$p_f = \int_{-\infty}^0 f(z) dz \quad (9)$$

若  $Z'$  为  $Z$  的标准化随机变量 ( $Z' = (Z - \mu_z) / \sigma_z$ ), 则失效概率又可表示为

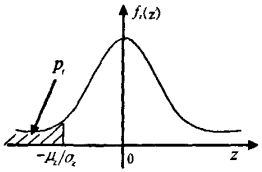
$$p_f = \int_{-\infty}^{-\mu_z / \sigma_z} f(z') dz' \quad (10)$$

其中  $f(z')$  为  $Z'$  的概率密度函数, 如图 3 所示。结构的可靠度为

$$P_r=1-P_f \tag{11}$$



(a) 一般随机变量



(b) 标准化随机变量

图 3 失效概率示意图

Fig.3 Sketch of failure probability

通常, 功能函数的分布类型是未知的, 为此可用 Gram-Charlier 级数拟合其概率密度函数<sup>[4]</sup>。该级数可表示为

$$f(X)=\Phi'(X)=\sum_{n=3}^{\infty}\frac{(-1)^nC_n}{\sqrt{n!}}\Phi^{(n+1)}(X) \tag{12}$$

式中,  $\Phi(X)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^Xe^{-\frac{t^2}{2}}dt$ ,  $\Phi'(X)$  为  $\Phi(X)$  的一阶导数;  $\Phi^{(n+1)}(X)$  为  $\Phi(X)$  的  $n+1$  阶导数;  $X$  为  $X'$  对应的标准化随机变量;  $C_n$  为系数, 与  $X'$  的各阶矩有关, 表达式为:

$$\begin{aligned} C_0 &= 1 & C_1 &= C_2 = 0 \\ C_3 &= \frac{1}{\sqrt{3!}}\frac{\mu_3}{\sigma^3} & C_4 &= \frac{1}{\sqrt{4!}}\left(\frac{\mu_4}{\sigma^4}-3\right) \\ C_5 &= \frac{1}{\sqrt{5!}}\left(\frac{\mu_5}{\sigma^5}-10\frac{\mu_3}{\sigma^3}\right) \\ C_6 &= \frac{1}{\sqrt{6!}}\left(\frac{\mu_6}{\sigma^6}-15\frac{\mu_4}{\sigma^4}+30\right) \end{aligned} \tag{13}$$

式中,  $\mu_k$  为  $Z'$  的  $k$  阶中心矩;  $\sigma^k$  为  $Z'$  均方差的  $k$  次方。可由积分随机有限元计算得到。通常取 6 阶即可达到较高精度。

得到功能函数  $Z$  的概率密度函数后代入公式

(10) 进行数值积分就可计算结构的失效概率  $P_f$ , 进而得到可靠度  $P_r$ 。

### 3 密封结构随机有限元可靠性分析

利用积分随机有限元方法对密封结构进行随机响应分析, 编制随机有限元程序, 考虑密封结构橡胶圈的泊松比  $\nu$ , 弹性模量  $E$  即参数  $C_1$ ,  $C_2$  为动态随机场, 其中泊松比  $\nu$  取 0.495, 均方差为 0.001, 弹性模量的均值取老化后变化对应的值, 变异系数为 0.05。根据航天工业部门的统计经验, 发动机工作时内压最大值  $p$  也是一个不确定性的数值, 为计算方便, 拟定服从一定的分布, 均值为 4.68MPa, 均方差为 0.08。

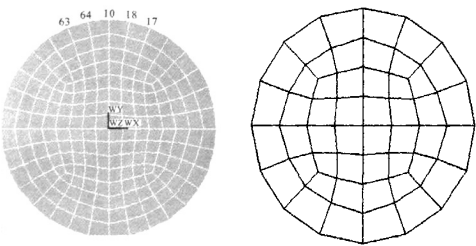


图 4 密封结构计算模型及随机场网格图

Fig.4 Calculation model and random field meshes of sealing structure

随机场类型为高斯型, 相关距离为 3mm, 各个随机场之间互相独立, 随机场网格划分遵照文献[5]的原则, 根据密封圈结构将随机场划分为 48 个单元, 其中每个随机场单元包含 4 个有限元单元。计算模型如图 4 所示。计算得到密封结构贮存老化后最大接触压应力的均值与方差的响应值, 如表 2 所示。利用建立的密封结构极限状态方程, 根据积分随机有限元法, 得到的密封结构在老化各个时期受到工作压力时最大接触压应力的结构响应各阶矩, 最后依据本文的可靠度计算方法, 计算得到在该时期密封结构的可靠度。选取密封结构接触压应力抛物线分布中间的 5 个节点来计算, 以保证最大接触压应力出现在这 5 个节点之间。密封结构节点可靠度计算结果如表 3 所示。

表 2 密封结构最大接触压应力的响应均值及方差

Tab.2 Respond means and variances of max contact crushing stress

贮存时间	初始密封	贮存 10 年	贮存 20 年	贮存 25 年	贮存 30 年
响应均值/MPa	3.801	3.784	3.546	3.081	3.013
响应方差/MPa	0.083	0.078	0.074	0.064	0.064

表 3 接触点各个时期的可靠度

Tab.3 Reliability degrees of contact points in different years

接触节点	初始密封	贮存 10 年	贮存 20 年	贮存 25 年	贮存 30 年
64	0.9676	0.9132	0.8441	0.8201	0.7887
63	0.9810	0.9243	0.8446	0.8199	0.7919
10	0.9967	0.9391	0.8710	0.8462	0.8044
17	0.9941	0.9377	0.8668	0.8501	0.8135
18	0.9766	0.9216	0.8647	0.8341	0.7989

可以看出，密封结构接触点可靠度受老化因素影响有明显的变化，在同一时期，密封结构不同接触点具有不同的可靠度，这是因为密封结构橡胶圈与法兰的接触区域的接触压应力各不相同呈抛物线形式分布，因此接触点可靠度大小也有类似的分布；随着贮存时间的延长，接触点的可靠度逐渐下降。若在此利用这五个接触点的可靠度平均值来表示密封结构的可靠度，则初始密封、贮存 10 年、贮存 20 年、贮存 25 年、贮存 30 年密封结构受发动机工作内压的可靠度分别为 0.9832、0.9272、0.8582、0.8341、0.7995。密封结构贮存 20 年后，由接触点可靠度平均的结构可靠度下降到 0.85 左右，密封结构的可靠性基本还能满足使用要求，在贮存 30 年后，可以知道密封结构受老化因素影响平均可靠度下降到不到 0.8，对于高性能的导弹武器系统来说，是不可接受的。

4 结论

利用基于 ANSYS 的积分随机有限元程序能够较准确地计算出密封结构的可靠度，其计算结果显示密封结构接触点的可靠度大小近似抛物线分

布，密封结构的可靠度随老化而减小，贮存 20 年左右，密封结构的可靠性已经不能满足导弹武器高性能的要求，计算结果符合前期实验工作结论。

参考文献：

[1] 常新龙. 火箭发动机薄弱部位结构可靠性研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 1998.

[2] 胡宽. SRM 对接密封结构失效模式与工程评定方法研究[D]. 西安: 第二炮兵工程学院, 2001.

[3] 张永鑫. DF-31 导弹动力系统密封结构环境适应性研究[D]. 西安: 第二炮兵工程学院, 2006.

[4] 杨杰. 非线性结构随机分析数值模拟的方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.

[5] Vanmarche E, Shinozuka. M, Nakagiri S, et al. Random Fields and Stochastic Finite Elements[J]. Structure Safety, 1986,Vol.7,No.7:604-611.

(编辑：王建喜)