固体火箭发动机金属壳体的结构可靠性

冯 连 胜

摘　　要

本文采用威布尔分布来描述超高强度钢制成的固体火箭发动机金属壳体的破坏压力分布。由最小二乘法求得威布尔分布的三个参数值后，按照应力强度模型估算了固体火箭发动机壳体的结构可靠性。

一、前　　言

固体火箭发动机的壳体有时由超高强度钢制成，对其结构可靠性的评估较为复杂，因为它除了与壳体结构设计是否正确外，还要受到材料性能的偏差、生产工艺水平和使用环境条件等的限制。超高强度钢所固有的特点：即对裂纹、氢脆和应力腐蚀的敏感性，更是依赖于原材料、壳体在制造及使用保养过程中的损伤程度。

关于固体火箭发动机金属壳体的破坏类型，作者认为当壳体的结构强度设计正确，那么壳体的破坏型式主要可分为：（1）与损伤（材料或工艺等）有关的缺陷型脆性破坏；（2）壳体极限承载时的正常型塑性破坏两种型式。本文只讨论壳体在极限承载时的结构可靠性，并用威布尔分布对其进行统计处理。由最小二乘法求得威布尔分布的三个参数值后，按照应力强度模型估算固体火箭发动机金属壳体的结构可靠性。

二、壳体的强度——破坏压力分布

对于由超高强度钢制成的固体火箭发动机金属壳体，在预测其最大破坏压力时，应计入塑性变形对载荷增加所呈现出的附加抗力效应。实践证明超高强度钢壳体，在极限承载破坏时确有塑性变形产生。作者建议，超高强度钢圆筒壳体极限承载时发生正常型塑性破坏的最大压力，可使用下式进行计算

$$P = K\frac{\varphi\sigma_b t_0}{R_0} \tag{1}$$

式中　σ_b——壳体试片强度；

φ——焊接系数；

t_0——壳体板材的原始厚度；

R_0——壳体原始外半径；

K——增强系数，$K = 1.1547 - 0.30\delta_5$，

δ_5——壳体板材的延伸率。

（1）式中的各参数都遵循统计规律变化，各参数的单一值可从它们相应的分布函数中随机地抽取，因而可用这些值估算相应的破坏压力，此过程重复进行便可确定出壳体的破坏压力分布。为简化计算可以忽略径向尺寸的统计变化，原始壁厚取下限值，则壳体的破坏压力变化只取决于材料性能的单参数方程。

无论是从理论上还是由实验得到一组破坏压力值，都应采用统计分布规律来处理这些数据。按照壳体强度准则，壳体各部分中只要有一部分失效则壳体即破坏，因此它满足威布尔的“弱链”准则。对于这种由一个主要因素引起的强度问题，可采用威布尔分布来处理壳体的破坏压力分布，它是左边有界的。

若用S表示壳体破坏压力值的随机变量，则威布尔分布的概率方程为

$$F_s(S)=1-\exp\left\{-\left(\frac{S-S_T}{S_0}\right)^{\beta}\right\} \tag{2}$$

式中S_T可称为阈值压力，即位置参数。低于此压力壳体不会破坏，或破坏是由其它机理（如缺陷等）引起的；S_0是有压力量纲的规格化因子；β是分布的形状参数，它控制着分布的形状。

由（2）式知威布尔分布的均值和方差分别为

$$\overline{S}=S_0+S_T\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right) \tag{3}$$

$$\sigma^2=S_T^2\left[\left(1+\frac{2}{\beta}\right)-\Gamma^2\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\right] \tag{4}$$

式中 $\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)$表示$\left(1+\frac{1}{\beta}\right)$的$\Gamma$函数。

上述威布尔分布的三个参数，可利用最小二乘法求出。由方程（2）得非线性方程

$$S_i=S_T+S_0W_i^{1/\beta} \tag{5}$$

其中

$$W_i=\ln(1/1-F_i) \tag{6}$$

F_i是与破坏压力值的顺序量S_i相应的中位概率

$$S_i<S_{i+1} \tag{7}$$

按照最小二乘法原理

$$Q\left(S_T,\ S_0,\ \frac{1}{\beta}\right)=\Sigma[S_i-(S_T+S_0W_i^{1/\beta})]^2=\Delta_{min} \tag{8}$$

可得方程组

$$\Sigma S_i=NS_T+S_0\Sigma W_i^{1/\beta} \tag{9}$$

$$\Sigma S_iW_i^{1/\beta}=S_T\Sigma W_i^{1/\beta}+S_0\Sigma W_i^{2/\beta} \tag{10}$$

$$\Sigma S_iW_i^{1/\beta}\ln W_i=S_T\Sigma W_i^{1/\beta}\ln W_i+S_0\Sigma W_i^{2/\beta}\ln W_i \tag{11}$$

求解上述方程即得威布尔分布的三个参数值S_0、S_T和β分别为

$$S_0=\frac{N\Sigma S_iW_i^{1/\beta}-\Sigma S_i\Sigma W_i^{1/\beta}}{N\Sigma W_i^{2/\beta}-\Sigma W_i^{1/\beta}\Sigma W_i^{1/\beta}} \tag{12}$$

$$S_T=\frac{\Sigma S_i\Sigma W_i^{2/\beta}-\Sigma S_iW_i^{1/\beta}\Sigma W_i^{1/\beta}}{N\Sigma W_i^{2/\beta}-\Sigma W_i^{1/\beta}\Sigma W_i^{1/\beta}} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}\Sigma S_iW_i^{1/\beta}\ln W_i(N\Sigma W_i^{2/\beta}-\Sigma W_i^{1/\beta}\Sigma W_i^{1/\beta})=\Sigma W_i^{1/\beta}\ln W_i(N\Sigma S_i\Sigma W_i^{2/\beta}\\-\Sigma S_iW_i^{1/\beta}\Sigma W_i^{1/\beta})+\Sigma W_i^{2/\beta}\ln W_i(N\Sigma S_iW_i^{1/\beta}-\Sigma S_i\Sigma W_i^{1/\beta})\end{aligned} \tag{14}$$

其中（14）式为超越方程。用数值迭代法从（14）中解出β，代入（12），（13）式即得S_0、S_T。 $\left(公式中的\Sigma=\sum_{i=1}^{N}\right)$

三、结构可靠度估算

对于固体火箭发动机金属壳体，其承受的载荷主要为发动机工作时产生的燃烧室压力。大家知道，燃烧室压力的随机变量符合正态分布，其概率密度方程为

$$f_N(N)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{N-\mu}{\sigma}\right)^2\right\} \tag{15}$$

式中 N为发动机燃烧室压力值的随机变量；

μ为均值

$$\mu\doteq\hat{\mu}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}N_i;$$

σ为标准差 $$\sigma\doteq\hat{\sigma}=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(N_i-\hat{\mu})^2。$$

设$f_s(S)$为壳体破坏压力S的概率密度函数，即

$$f_s(S)=\frac{\beta}{S_0}\left(\frac{S-S_T}{S_0}\right)^{\beta-1}\exp\left\{-\left(\frac{S-S_T}{S_0}\right)^{\beta}\right\} \tag{16}$$

那么燃烧室压力N超过壳体破坏压力S的概率为

$$P(N>S)=\int_{-\infty}^{\infty}f_N(N)\int_{S=S_T}^{S=N}f_s(S)dSdN \tag{17}$$

即

$$P(N>S)=\int_{N=S_T}^{\infty}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{N-\mu}{\sigma}\right)^2\right]\left[1-\exp\left\{-\left(\frac{N-S_T}{S_0}\right)^{\beta}\right\}\right]dN \tag{18}$$

将μ、σ、β、S_0和S_T代入（18）式，则得到破坏概率值，由此可求出固体火箭发动机金属壳体在极限承载条件下的结构可靠度为

$$R=1-P(N>S) \tag{19}$$

四、实验结果

某发动机壳体受正态分布随机载荷作用，由30次实测载荷值求得该发动机燃烧室最大压力P_c的样本均值$\hat{\mu}=65.79$；标准差$\hat{\sigma}=2.96$。抽得264片（33台份）随炉试片壳体强度数据，按公式（1）计算出壳体发生正常型塑性破坏的一组最大破坏压力值。通过概率纸检验，发现子样数据与威布尔分布的拟合较好。用公式（12），（13）和（14）求得威布尔分布的三个参数值分别为$S_0=6.87$；$S_T=95.2$；$\beta=2.78$。将上述各值代入（18）式，截取积分上限$N=120$，用电子计算机算出某发动机金属壳体的破坏概率为

$$P(N>S)=9.98\times10^{-26}$$

由此可知该发动机壳体的结构可靠度为

$$R=1-P(N>S)\doteq0.\overbrace{999\cdots999}^{25}$$

本计算表明，从结构强度方面讲，其可靠度是足够的，完全满足了发动机的使用要求。但由于原材料和壳体在生产制造过程中的损伤的随机性，且这种损伤又多为累积型，因而壳体实际上还存在着发生缺陷型脆性破坏的概率。

航天部科技委召开发动机专业组会议

今年四月下旬，部科技委召开了将固体和液体火箭发动机二个专业组合并成一个发动机专业组的会议。出席会议的有国防科工委、部机关、各院、基地和上海航天局等单位。任新民主任作了重要讲话，宣布了发动机专业组正，副组长和成员名单。会议还总结交流了有关发动机的专业技术，讨论了发动机专业发展规划。与会专家还认为有必要开展航天飞机方面的工作。

（王绪文）