

气体灭火剂储瓶的使用寿命和安全可靠性分析

路景志

南京理工大学, 江苏南京 210000

[摘要] 本文用概率论和数理统计方法及断裂力学理论, 对现有的几种气体灭火剂储瓶的使用寿命和安全可靠性进行了估算和分析, 进一步提出气体灭火系统的维修周期、间隔时间和设备报废年限的建议。

[关键词] 灭火剂储瓶; 安全性; 分析

1 概述

气体灭火剂储瓶是气体灭火系统的重要组成部分, 是一种特殊使用条件下的压力容器, 其使用环境、工作压力、制造材质和加工工艺的差异, 都直接影响到其使用寿命和安全可靠性。

产品的可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间内, 完成规定功能的能力。通常衡量可靠性的指标主要有两个: 即概率指标和寿命指标。完成功能的概率为可靠性, 称为可靠度, 反之, 完不成功能的概率称为失效率。在当今的技术领域中, 对产品进行可靠性估算, 就是将载荷、材料强度和零件的实际尺寸都看成是属于某些概率分布的统计量, 利用概率论和数理统计及强度理论推导出在给定条件下, 零件不产生破坏的概率公式, 利用这些公式来确定在给定条件下零件的尺寸, 或在给定零件尺寸的条件下, 确定其安全寿命。在对产品进行使用寿命和安全可靠性估算时, 要考虑允许产品在使用过程中出现零件的部分损伤, 但在两次运行期间又不会发生失效, 这就要求必须合理地制定维修计划, 正确地设定维修周期, 为正确制定检测验收标准作技术依据。

影响气体灭火剂储瓶使用寿命和安全可靠性的主要因素有: 长期加压的低周疲劳、应力腐蚀和裂纹(含冶炼、焊接及机械加工产生的类裂纹等)。在对气体灭火剂储瓶的使用寿命和可靠性进行估算时, 首先从可靠性(及失效概率)入手求得可靠性系数, 进而估算出平均寿命, 在此基础上提出设备维修周期间隔和报废年限的建议。

2 气体灭火剂储瓶技术参量的概率分布

2.1 载荷与强度的概率分布

在工程中, 结构件所受的载荷主要分为静载荷和动载荷两大类。其中动载荷又可分为交变载荷和疲劳载荷, 无论哪种载荷, 其大小总是随时间在不断变化的。(所谓静载荷只不过变化较小而已), 而且各种幅值的载荷出现的概率(机会)是不同的。大量的实际测量和分析表明, 各种载荷均服从某一概率分布。例如, 机器的主轴、设备机架、压力容器(包括灭火剂储瓶)等所受的载荷都可以用正态分布来描述。

在计算结构件可靠度(或失效概率)之前, 除要知道载荷的概率分布外, 还要考虑材料强度的变化。事实上, 材料的成分、冶炼、锻压、热处理和成型加工等条件的不一致性, 都会使材料强度发生波动, 它们也服从一定的分布规律。如材料的静强度大多服从正态分布, 而疲劳强度则大多服从威布尔分布。

当应力和强度均符合正态分布时, 其概率密度函数分别为:

$$f_s(s) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{s-\mu_s}{\sigma_s}\right)^2\right]}$$

$$f_r(r) = \frac{1}{\sigma_r \sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{r-\mu_r}{\sigma_r}\right)^2\right]}$$

其中, μ_s 、 μ_r 和 σ_s 、 σ_r 分别为应力和强度的数学期望和标准差。

定义强度差 $y=r-s$, 则 y 也服从正态分布, 其数学期望和标准差为:

$$\mu_y = \mu_r - \mu_s$$

$$\sigma_y = (\sigma_r^2 + \sigma_s^2)^{1/2}$$

于是, 可靠度 $R=P(y > 0)$,

$$R = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right]} dy$$

$$\text{令 } Z = \frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \text{ 则 } \sigma_y dz = dy$$

$$\text{代入上式得 } R = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-z}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

$$\text{式中的积分限为: } Z = \frac{\mu_Y}{\sigma_Y} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

此式将应力、强度和可靠性三者联系起来，称为联接方程，Z 称为可靠性系数。

当计算出 Z 后，即可从数学表中查得可靠度 R。

2.2 材料强度的概率分布

制造零件所选用的材料，其化学成分、冶炼方法、加工及热处理过程、装配工艺等方面均会存在差异，为了测量技术数据，在取样的部位、试验方法、试验环境和试样的尺寸误差等，都会造成零件力学性能的分散性。大量的实验数据积累和分析表明，材料的抗拉强度、拉伸屈服点、延伸率和硬度均可以用正态分布来描述。部分材料的强度概率分布见下表：

部分材料的强度概率分布

序号	材料名称	强度极限	屈服极限	强度极限的标准离差 S_{σ_b}		屈服极限的标准离差	
		σ_b Kg/mm ²	σ_s Kg/mm ²	Kg/mm ²	%	Kg/mm ²	%
1	碳素钢	66.7	44.3	2.53	3.79	2.75	6.21
2	锰钢	61.4	41.8	4.58	7.46	2.09	5.06
3	钼钢	93.5	83.0	1.875	2.00	1.406	1.69
4	低合金钢	140.6	127.6	5.39	3.83	5.74	4.50
5	铬钼钒钢	174.9	144.4	8.49	4.86	7.03	4.87
6	高强度合金钢	180.5	169.1	9.99	5.54	10.2	6.04
7	灰铸铁	17.3		1.67	9.46		
8	球墨铸铁	75.12	53.62	5.99	7.97	3.64	6.79
9	铜合金	77.16	32.94	3.38	4.31	3.46	10.50
10	钛合金	114.1		7.34	6.44		

2.3 零件疲劳强度的概率分布

疲劳载荷一般分为确定的和随机的两类。确定的疲劳载荷是一种按照一定规律变化的，而且可以重复的载荷，它可以用数学公式来表达。随机疲劳载荷是一种无规则的不能重复的载荷，只能用统计概率来描述。下表中是经过大量统计得出的部分材料的疲劳强度数据。

部分材料的疲劳强度数据

材料名称	强度极限 σ_b	屈服极限 σ_s	试验寿命N	疲劳极限 σ_r	疲劳极限的标准离差	
	Kgf/mm ²	Kgf/mm ²	(次)	Kgf/mm ²	Kgf/mm ²	Lg σ_r
碳素钢45#	85	70	104	42	1.333	0.01449
18CrNi4WA	116.8		105	47.3	2.267	0.02247
30CrMnSiA1	113~121	111	105	80	3.667	0.02141
30CrMnSiA ₂	113~121	111	105	45	2.00	0.02072
30CrMnSiNiA	145~165	113	5×104	42.4	2.133	0.02369
40CrNiMoA	106~115	93.5~114.8	5×104	77.5	4.5	0.02771
钛合金6Al-4V	102			59	3.8	0.03108
铝合金LC-9	66.0	61.5	105	27.5	1.367	0.02337
青铜5Ni-10Al	82			34	3.2	0.04803
铍铜2Be	123			25	1.9	0.03746

3 灭火剂储瓶的疲劳强度可靠性计算

在设定载荷、强度、应力的概率分布都服从正态分布的情况下，灭火剂储瓶的疲劳强度可靠性计算通常按下面的方法进行。

例 1、某灭火剂储瓶：

载荷 $P_m=232\text{Kg/cm}^2$ $P_n=178\text{Kg/cm}^2$

直径 $D_w=267\text{mm}$ $D_N=254\text{mm}$

强度 $\sigma_b=73\text{Kg/cm}^2$ $\sigma_s=61\text{Kg/cm}^2$

疲劳极限 $\sigma_{-1}=40\text{Kg/cm}^2$

计算其使用可靠性及寿命。

计算如下：

$$S_a = \frac{K^2}{K^2 - 1} \cdot \frac{P_m - P_n}{100} \quad S_m = \frac{K^2}{K^2 - 1} \cdot \frac{P_m - P_n}{100}$$

$$S_{eq} = \frac{S_a}{1 - \frac{S_m}{\sigma_b}} \quad S_a + S_m \leq \sigma_s \quad S_m = S_m$$

载荷标准离差 $S_{pm}=1.13\text{Kg/cm}^2$ $S_{pn}=0.6\text{Kg/cm}^2$

直径标准离差 $S_{pw}=0.2\text{mm}$ $S_{DN}=0.133\text{mm}$

强度标准离差 $S_{\sigma_b}=1\text{Kg/cm}^2$ $S_{\sigma_s}=0.7\text{Kg/cm}^2$

疲劳强度标准离差 $S_{\sigma_{-1}}=2\text{Kg/cm}^2$

$$K = \frac{D_W}{D_N} = \frac{267}{254} = 1.0512 \quad K^2 = 1.105$$

$$S_K = \frac{1}{D_n} \left[D_n^2 S_{DW}^2 + D_W^2 S_{DN}^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 9.6 \times 10^{-4}$$

$$S_{K^2} = 2KS_K = 0.002$$

$$\delta = \frac{K^2}{K^2 - 1} = 10.524$$

$$S_\delta = 0.2$$

$$m = \frac{P_m - P_n}{100} = 0.54$$

$$S_m = \frac{1}{100} \left[S_{pm}^2 + S_{pn}^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0.2$$

$$n = \frac{P_m + P_n}{100} = 4.1$$

$$S_n = \frac{1}{100} \left[S_{pm}^2 + S_{pn}^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0.2$$

$$S_a = \delta \cdot m = 5.68$$

$$S_{Sa} = \left[\delta^2 \cdot S_m^2 + m^2 \cdot S_\delta^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 1.136$$

$$S_m = \delta \cdot n = 43.15$$

$$S_{Sm} = \left[\delta^2 \cdot S_n^2 + n^2 \cdot S_a^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 5.58$$

$$S_a + S_m = 53.67 < \sigma_s$$

$$S_{eq} = \frac{S_a}{1 - \frac{S_m}{\sigma_b}} = 13.89$$

$$S_{Seq} = 6.129$$

$$\text{计算得可靠性系} Z = \frac{\sigma_{-1} - S_{eq}}{\left(S_{\sigma_{-1}}^2 + S_{Seq}^2 \right)^{\frac{1}{2}}} = \frac{40 - 13.38}{\left(2^2 + 6.129^2 \right)^{\frac{1}{2}}} = 4.0499$$

查数学表得到可靠度 $R = 0.9999738$

查数学表得到失效概率 $P_f = 0.0000262$

通过换算可求得此灭火剂储瓶的疲劳寿命约为 30.7 年。

4 带裂纹零部件的可靠性及剩余寿命计算

灭火剂储瓶制造完成后进行出厂检验时，或经过一定使用周期进行维修检查时，通过无损探伤，可能会发现有的储瓶的某些部位有裂纹存在。对于这些带有裂纹的储瓶是否可以继续使用，其使用可靠性和剩余寿命，要通过计算才能确定。进而合理地选择维修周期和设备报废年限。

在线弹性断裂力学中，把 $K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot Y = K_{IC}$ 作为判定依据，这是经典的静态的计算方法。这种方法计算时，把所有的参量都当作确定性的常量来考虑。然而在实际工程中，部件工作应力的大小、缺陷（裂纹、类裂纹）的部位、形状和大小，材料的断裂韧性 K_{IC} 都是带有某些不确定性的随机变量，这就必须用概率统计的方法，将线弹性断裂力学理论与概率论联系运用。

通过推导得出，可靠度表达式为： $R = \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(K_I) dK_I \int_{K_{IC}}^{\infty} f(K_{IC}) dK_{IC}$

在实际工程应用中，常常假设 K_I 和 K_{IC} 均服从正态分布。得到联结方程为： $u = -\frac{K_{IC} - K_I}{\left(\sigma_{K_{IC}}^2 + \sigma_{K_I}^2 \right)^{\frac{1}{2}}}$

式中： K_{IC} K_I 和 $\sigma_{K_{IC}}$ σ_{K_I} 分别为材料的断裂韧性和应力强度的平均值及标准离差。

根据 u 可以从数学表中查得可靠度 R 和失效率 P_f

上例中的灭火剂储瓶，如果发现其内表面有一沿轴线方向的纵向浅裂纹， $a=1.5\text{mm}$ ， $2C=6\text{mm}$ ，储瓶壁厚 $t=6.3\text{mm}$ 计算其剩余寿命。

根据线弹性断裂力学可求得： $\frac{a}{2C} = \frac{1.5}{6} = 0.25$ $\frac{a}{t} = \frac{1.5}{6.3} = 0.238$

查表得 $M=1.06$ $\Phi=1.208$

求得： $Q = \phi^2 - 0.212 \left(\frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^2 = 1.1564$

应力强度因子 $K_1 = 1.1\sigma \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} = 104.29$ 标准偏差 $\sigma_{K1} = 11.4$

材料断裂韧性 $K_{IC}=154$ 标准偏差 $\sigma_{KIC}=6.3$

可靠性系数 $Z = \frac{K_{IC} - K_1}{(\sigma_{KIC}^2 + \sigma_{K1}^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{41.7}{13.03} = 3.8$

查数学表得到可靠度 $R=0.9999277=99.99277\%$

查数学表得到失效概率 $P_f=0.0000723$

计算求得该灭火剂储瓶的剩余寿命 $N=17.3$ 年。

通过上面计算表明，原使用寿命为 30.7 年的灭火剂储瓶，经过一段时间使用，由于某种原因（如应力腐蚀、疲劳腐蚀等）在内表面形成了一条 $a=1.5\text{mm}$, $2C=6\text{mm}$ ，的纵向裂纹后，其剩余寿命仅为 17.3 年。如果某新制造的灭火剂储瓶在出厂检验时发现上述裂纹，则此储瓶的寿命就只有 17.3 年。

5 灭火剂储瓶使用可靠性分析及检测周期建议

灭火剂储瓶的使用可靠性和寿命计算，是确定检测周期和制定检验维修规范的理论依据。利用这种方法对目前国内现有的灭火剂储瓶的使用可靠性和寿命进行了计算。根据使用压力、瓶体材料、成型工艺的不同使得计算结果各有差异。但这些灭火剂储瓶的安全使用寿命基本在 30 ~ 38 年左右。

科学合理地制定检测周期，具有重大的社会经济效益。既要保证灭火剂储瓶使用的安全，又要防止造成经济上的浪费。国外一些先进的国家在这方面都有明确的规定。美国的《NB 检查规范》中规定“领取了使用证的压力容器，定期内部检查的间隔是十年，或容器剩余使用寿命（年）的一半，两者取较小的值”。美国消防协会标准 NFPA12《二氧化碳灭火系统标准》8.5.1 条规定“用于灭火系统的高压钢瓶，从最后一次试验的日期算起，如果超过 5 年，不经水压试验（并重新标记），不得再次充装。充装以后的钢瓶，如果一直没喷放，最多可延续使用 12 年。满 12 年后应把气放掉，并重新试验后才能再次使用。”联邦德国技术监督协会的《压力容器检查规程》中规定：“定期检查周期是：外部检查为 2 年，内部检查为 5 年，耐压试验为 10 年。抽样数量为 10%”。

根据我国气体灭火系统的生产制造水平和经济发展状况，再考虑一定的使用安全系数（ $n=1.2$ ），灭火剂储瓶的实际安全使用寿命应该在 25 ~ 32 年左右。因此建议：我国气体灭火系统的灭火剂储瓶的第一检查周期为 8 ~ 10 年，第二检查周期为 5 ~ 6 年，随后根据设备的堪用情况，确定是否继续检测使用或报废。当灭火系统剩余寿命的一半不足两年（含两年）时，予以报废。目前迫切希望随着新的《消防法》的贯彻执行，出台相应的政策法规性文件。

[参考文献]

- [1] 杨海涛《压力容器的安全与强度计算》天津科学技术出版社
- [2] 徐 灏《机械强度的可靠性设计》机械工业出版社
- [3] 陈 箴《工程断裂力学》国防工业出版社
- [4] 《压力容器安全监察与管理》化学工业出版社
- [5] NFPA12《Code of design for carbon dioxide fire extinguishing systems》