第9卷 第4期
1996年12月
盐城工学院学报
Journal of Yancheng Institute of Technology
Vol. 9 No. 4
Dec. 1996

化工压力容器可靠性设计*

孙志国
(盐城工学院化学工程系,盐城,224003)

摘　要　可靠性设计是一种新方法,不仅能得到精确的设计计算结果,同时还能对设计对象的可靠性预先估算,在多个领域的设计中等到广泛应用。介绍如何将化工压力容器设计的壁厚计算公式与可靠性公式相互结合,根据工程上规定或要求的可靠度来设计化工压力容器。

关键词　压力容器　可靠性设计　正态分布　变异系数
分类号　TQ2

化工生产中,化工压力容器常处于高温、高压、强腐蚀等条件下,由于操作条件苛刻,对可靠性要求是相当高的。

目前压力容器常规设计规范中,把工艺参量(压力、温度)和材料性能的有关参数等视为确定量,忽略了因各种条件的变化而产生的随机因素,安全系数确定则是建立在一定经验基础之上,因而,对设计的压力容器及零部件结构尺寸具有多大的可靠性无法确定。显然,只有在设计中考虑各种随机因素的影响,将设计参量作为随机变量处理,建立概率统计模型,才能全面地描述设计对象,科学的设计方法是按概率统计方法进行可靠性设计。

1　可靠性设计原理简述

假定压力容器的应力 s、强度 r 都为随机变量,服从正态分布,将应力与强度的分布密度分别记为 $f(s)$ 与 $g(r)$,均值分别为 μ_s、μ_r,标准差分别为 σ_s、σ_r。由应力—强度干涉模型(图1),设计对象强度>应力的概率为:$p(r-s>0)$,即为可靠度,用 R 表示,$R=1-\Phi(-\beta)$,β 是失效概率 $\Phi(-\beta)$的函数,可从正态概率积分表中查得,β 越大,结构越可靠。强度和应力之差 $y=r-s$ 为可靠性随机变量,亦服从正态分布,由正态分布函数特征性知其均值、标准差、β 值分别为

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

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2} \tag{1}$$

$$\beta = \frac{\mu_r - \mu_s}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}} \tag{2}$$

可靠性设计就是根据应力和强度的统计特征,使设计出的平均强度满足可靠性要求,即[1]

$$\mu_r - \mu_s \geq \beta\sigma_y \tag{3}$$

---

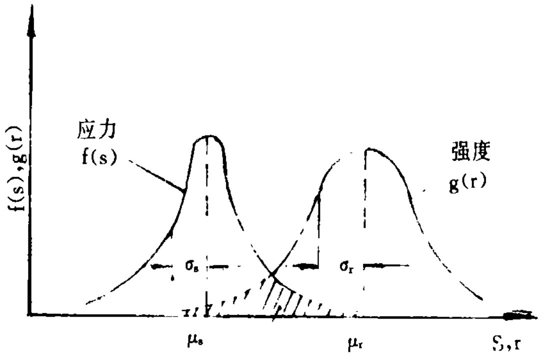
* 收稿日期:1996-09-20

2 可靠性设计中的设计参量统计处理

2.1 金属材料的性能参数

金属材料的各种性能参数，一般服从正态分布，因此，材料强度可用其分布的均值 $\mu_{\sigma a}$，$\mu_{\sigma b}$ 和标准差 $\sigma_{\sigma s}$，$\sigma_{\sigma b}$（或者变异系数 C_r）来描述，为反映实际用材与试件的偏差，对金属材料的强度指标 σ_s、σ_b，可用下面的公式计算其均值 $\mu_{\sigma s}$、$\mu_{\sigma b}$[2]

$$\mu_{\sigma s} = \frac{\sigma_s}{1 + 1.282 C_{\sigma s}}$$
$$\mu_{\sigma b} = \frac{\sigma_b}{1 + 1.282 C_{\sigma b}} \tag{4}$$



干涉分布区

图 1　应力强度干涉区图

式中 σ_s，σ_b 为手册中查得的强度指标，$C_{\sigma s}$，$C_{\sigma b}$为变异系数，其定义为

$$C_{\sigma s} = \sigma_{\sigma s}/\mu_{\sigma s}, C_{\sigma b} = \sigma_{\sigma b}/\mu_{\sigma b}$$

大量统计表明，金属材料机械性能的变异系数在 $C_r = 0.05 \sim 0.15$ 范围内，变异系数是在大量模型试验数据分析基础上获得的，强度的标准差可根据变异系数求得。

2.2 容器零部件和钢板的几何尺寸

化工压力容器设计中，各零部件和钢板的几何尺寸，总是有偏差的，一般也是服从正态分布的随机变量，当取值为 $\pm 3\sigma$ 时，基本上已包含了随机变量的全部概率，故公称尺寸可视为均值，相应的极限偏差 Δ 看成是 3σ，标准差则为 $\sigma = \Delta/3$。

2.3 载荷和许用应力

以上处理方法同样适用于容器所受的载荷，材料的许用应力统计参数的计算。

2.4 安全系数

在压力容器的常规设计中，安全系数为强度和应力均值之比 $n_c = \mu_r/\mu_s$。由于强度和应力均为随机变量，服从正态分布，应由均值和标准差两个参量来确定。由可靠性安全指标 β 可求得可靠性安全系数 n_c[3]

$$n_c = \frac{1 + \beta\sqrt{C_r^2 + C_s^2 - \beta^2 C_r^2 C_s^2}}{1 - \beta^2 C_r^2} \tag{5}$$

从安全系数表达式可见：可靠性安全系数与容器可靠度之间不是简单的正比关系，可靠性安全系数大的，可靠度并不一定大，反之亦然。

3 设计算例

某容器，筒体直径 $D = 800 \pm 4$mm，$p = 10 \pm 0.5$MPa，材料为 16MnR。钢板厚度的变异系数为 0.04；屈服极限的变异系数为 0.07。试求：$R = 0.99999$ 时容器的计算壁厚。

(1)常规设计

根据 GB1150－89《钢制压力容器》计算壁厚为

$$\delta \geqslant pd_i/(2[\sigma]^t\varphi - p)$$

式中：$p=10MPa$，$d_i=800mm$，$\varphi=1$，$[\sigma]^t=\sigma_s/n_s$；材料16MnR的$\sigma_s=350MPa$，$n_s=1.6$；以屈服极限计$[\sigma]^t=350/1.6=219MPa$。代入得

$$\delta = 10 \times 800/(2 \times 219 \times 1 - 10) = 18.7mm$$

(2)可靠性设计

首先计算设计参数的均值和标准差。

筒体半径的均值 $\mu_R=40cm$；筒体半径的标准差 $\sigma_R=\Delta_R/3=0.067cm$

设计压力的均差 $\mu_P=10MPa$；设计压力的标准差 $\sigma_P=\Delta_P/3=0.167MPa$

材料的屈服极限的均值由公式(4)得

$$\mu_{\sigma s} = \frac{350}{1 + 1.282 \times 0.07} = 321MPa$$

材料屈服极限的标准差 $\sigma_{\sigma s} = \mu_{\sigma s} \cdot C_{\sigma s} = 321 \times 0.07 = 23MPa$

以周向应力为计算标准基准，以材料屈服作为工作极限，因

$$\sigma_\theta = pR/\delta$$

故周向应力的均值 $\mu_s = \mu_R\mu_P/\mu_\delta = 40 \times 10/\mu_\delta MPa$

周向应力的标准差 $\sigma_s = 17.35/\mu_\delta$

由$R=0.99999$，查$\beta=4.626$，又知强度的均值$\mu_{\sigma s}=321MPa$，标准差$\sigma_{\sigma s}=23MPa$，代入(2)式：

$$\beta = \frac{\mu_r - \mu_s}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}} = \frac{321 - 40 \times 10/\mu_\delta}{\sqrt{23^2 + (17.35/\mu_\delta)^2}} = 4.265$$

$$\mu_\delta = 1.859cm$$

所以筒体壁厚为：$\delta=\mu_\delta\pm3\sigma_\delta=18.6\pm1.6mm$。

对比算例的两种结果，当按屈服极限安全系数$n_s=1.6$进行可靠性设计时，所得容器壁厚比常规设计设计的容器壁厚略薄，但关键在于能指出设计容器的安全可靠程度，这对化工压力容器的使用和安全生产有着十分重要的意义，算例也说明我国《钢制压力容器设计》规定取$n_s\geqslant1.6$，相当于可靠度$R\geqslant0.99999$，足够安全。

4 结语

可靠性设计较常规设计更符合实际情况，更科学。当然可靠性设计是建立在实验基础上的，它未考虑计算公式本身的误差和离散性、因此常规设计中的安全系数法仍有相当的使用价值。建立可靠性设计的数据库是可靠性设计的基础工作。

参考文献

1 徐灏编著. 机械强度的可靠性设计. 机械工业出版社. 1984

2 孟湘波主编. 现代压力容器设计. 华中理工大学出版社. 1986

3 戴树和，王明娥编著. 可靠性工程及其在化工设备中的应用. 化学工业出版社. 1987