

钢制内压力容器可靠性安全系数的研究

刘小宁^{1,2}, 张红卫¹, 刘 岑², 刘 兵¹, 袁小会¹, 韩春鸣¹

(1. 武汉软件工程职业学院 机械制造工程系, 湖北 武汉 430205;

2. 武汉工程大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要:应用应力-强度干涉模型,分析按中国标准设计的三种结构钢制内压力容器初始屈服与爆破强度在压力试验和正常操作时的可靠度系数范围,建立了安全系数、试验压力系数与许用可靠度系数之间的定量关系.基于屈服、爆破和断裂等三种失效准则,从等可靠度观点,确定了四种结构容器在压力试验和正常操作时的许用可靠度,得到基于许用可靠度的安全系数与试验压力系数.

关键词:内压力容器;许用可靠度;可靠性安全系数;试验压力系数

中图分类号:TH 49

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2011.05.027

0 引 言

考虑压力容器强度与载荷的随机性,应用可靠性设计理论进行容器的工程设计与安全评定,是压力容器领域研究的热点与前沿课题之一.文献[1]采用定性和定量相结合的办法,按重要度推荐选取压力容器的可靠度系数,文献[2]按压力容器的分类,定量推荐了其许用可靠度系数;文献[1,2]对压力容器工程设计和安全评定的可靠性方法进行了一些有益的探索,但是推荐的可靠度系数没有考虑中国压力容器设计标准^[3-6]的影响.

文献[7,8]应用可靠性理论中的应力-强度干涉模型,对扁平绕带式容器初始屈服和爆破强度在压力试验和正常操作时的可靠度系数进行探索,分析了安全系数和试验压力系数与可靠度系数的关系,但是没有考虑容器断裂失效和其他结构的内压力容器;文中以按中国标准^[3-6]设计、制造和检验的钢制内压力容器为研究对象,在探索其初始屈服和爆破强度在压力试验和正常操作时可靠度系数的基础上,基于屈服、爆破和断裂失效准则,从等可靠度观点,确定了钢制薄壁内压圆筒、薄壁球形容器、扁平绕带式容器和超高压厚壁圆筒的初始屈服强度、爆破强度和断裂强度,在压力试验和正常操作时的可靠度系数,建立了安全系数、试验压力系数与许用可靠度系数的关系.

1 建立模型

为讨论方便,文中分析的是不考虑腐蚀等因素影响时的钢制内压力容器的初始静强度(屈服与爆破强度).容器的载荷是指容器压力试验时的试验压力,或指容器操作时的正常工作压力.

内压力容器的可靠度是指其初始屈服与爆破强度大于载荷的概率,决定可靠度的功能函数为:

$$y = p_r - p_T \quad (1)$$

式(1)中, p_r 为初始静强度, MPa; p_T 为载荷, MPa.

当 p_r 下标 r 取 s 与 b 时, p_s 与 p_b 分别表示容器的初始屈服强度与爆破强度;当 p_T 下标 T 取 L 与 l 时, p_L 与 p_l 分别表示试验压力与工作压力.

对有限的试验结果进行统计,可得到 p_r 分布参数在一定置信度下的取值区间^[9-13]:

$$\mu_{pr} = \mu_{pr}^l \sim \mu_{pr}^u = (\mu_r^l \sim \mu_r^u) u_r \quad (2)$$

$$C_{pr} = C_{pr}^l \sim C_{pr}^u \quad (3)$$

式(2)、(3)中,上标 l 与 u 分别表示分布参数在一定置信度下可能的较小值与较大值;屈服失效准则的 μ_{pr} 、 C_{pr} 分别为 p_s 的均值 μ_{ps} 与变异系数 C_{ps} ;爆破失效准则的 μ_{pr} 、 C_{pr} 分别为 p_b 的均值 μ_{pb} 与变异系数 C_{pb} ; μ_r 为 p_r 统计量的均值,在屈服和爆破失效准则下分别取 μ_s 与 μ_b ; u_r 为内压力容器初始静强度的名义值,在屈服与爆破失效准则下,分别取 u_s 与 u_b .

如果不考虑封头对薄壁内压圆筒的加强作

用^[14-16],对于薄壁内压圆筒与球形容器,其初始静强度的名义值可用中径公式计算^[14-15]:

$$u_r=2Z\frac{K-1}{K+1}\sigma_r$$

(4)

式(4)中, Z 为结构系数,内压圆筒 $Z=1$,球形容器 $Z=2$; K 为径比; σ_r 为容器材料机械性能,在屈服和爆破失效准则下分别为 σ_s 与 σ_b 。

对于扁平绕带容器^[12]:

$$u_r=\sigma_{r1}\ln K_1+\sigma_{r2}\cot^2\alpha(K_2^{\sin^2\alpha}-1)$$

(5)

式(5)中, σ_{r1} 、 σ_{r2} 分别为内筒与绕带材料的机械性能,在屈服和爆破失效准则下分别为 σ_{s1} 与 σ_{s2} , σ_{b1} 与 σ_{b2} ; K_1 、 K_2 分别为内筒与绕带层径比; α 为绕带的缠绕倾角。

对于超高压厚壁圆筒^[13]:

$$u_b=\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s\left(2-\frac{\sigma_s}{\sigma_b}\right)\ln K$$

(6)

1.1 可靠度系数与可靠度

当 p_r 和 p_T 基本符合正态分布时,在不同失效准则和不同使用状态,根据应力-强度干涉模型^[7],由式(1)~(3)可知容器初始静强度的可靠度系数的可能较小值 β_r^l 与较大值 β_r^u :

$$\beta_r^l=\frac{\mu_r^l-[\alpha]_r}{\sqrt{(\mu_r^lC_{pr}^u)^2+([\alpha]_rC_{pT})^2}}$$

(7)

$$\beta_r^u=\frac{\mu_r^u-[\alpha]_r}{\sqrt{(\mu_r^uC_{pr}^l)^2+([\alpha]_rC_{pT})^2}}$$

(8)

式(7)、(8)中, $[\alpha]_r$ 为在压力试验与正常操作时,容器载荷的均值与容器静强度名义值之比的许用值,在屈服与爆破失效准则下分别为 $[\alpha]_s$ 与 $[\alpha]_b$ 。

根据式(7)、(8)所得的可靠度系数,查正态分布积分表,可得对应的可靠度范围为

$$R=\Phi(\beta_r^l)\sim\Phi(\beta_r^u)$$

(9)

式(9)中, $\Phi(\beta)$ 为标准正态积分。

由 $\Phi(\beta)$ 的性质可知,可靠度的大小可以用可靠度系数表示,可靠度系数越大则可靠度越大。

1.2 安全系数、试验压力系数与许用可靠度系数

安全系数是确定性设计方法中采用的,目前往往是根据经验确定其值的大小;尽管把设计变量认为是随机变量的可靠性设计方法不需要安全

系数,但是,如果将可靠度与安全系数联系起来,得到可靠性安全系数,可以推动确定性设计方法的发展。

在正常操作与压力试验时,有:

$$[\alpha]_r=\lambda/n_r$$

(10)

式(10)中, λ 为试验压力系数,正常操作时 $\lambda=1.00$; n_r 为安全系数,在屈服和爆破失效准则下,分别取屈服与抗拉安全系数 n_s 与 n_b 。

把式(10)代入(7)、(8)中可得

$$\frac{\lambda_l}{n_{rl}}=\mu_r^l\frac{1-(\beta_r^lC_{pr}^u)^2}{1+\beta_r^l\sqrt{(C_{pr}^u)^2+(C_{pT})^2}-(\beta_r^lC_{pr}^uC_{pT})^2}$$

(11)

$$\frac{\lambda_u}{n_{ru}}=\mu_r^u\frac{1-(\beta_r^uC_{pr}^l)^2}{1+\beta_r^u\sqrt{(C_{pr}^l)^2+(C_{pT})^2}-(\beta_r^uC_{pr}^lC_{pT})^2}$$

(12)

式(11)、(12)中, λ_l 、 n_{rl} 分别为与 β_r^l 对应的试验压力系数与可靠性安全系数; λ_u 、 n_{ru} 分别为与 β_r^u 对应的试验压力系数与可靠性安全系数。

如果从等可靠度的观点,确定了容器在压力试验与正常操作时许用可靠度系数 β_r^l 、 β_r^u 与有关参数,取式(11)、(12)中 $\lambda_l=\lambda_u=1.00$ 可得 n_{rl} 与 n_{ru} ,基于可靠性要求的安全系数为

$$n_r=\max[n_{rl},n_{ru}]$$

(13)

试验压力系数的下限值为^[7]

$$\lambda_{\min}=\frac{1}{1-1.645C_{pT}}$$

(14)

如果已知常规安全系数 n_r 、压力试验时的许用可靠度系数 β_r^l 、 β_r^u 与有关参数,由式(11)、(12)可得 λ_l 与 λ_u ,试验压力系数的上限值为:

$$\lambda_{\max}=\min[\lambda_l,\lambda_u]$$

(15)

2 静强度与载荷的分布规律与参数

2.1 初始静强度的分布规律与分布参数

用公式(4)~(6)预测压力容器的初始屈服与爆破强度基本符合正态分布,分布参数如表 1 所示^[9-13]。

表 1 钢制内压力容器初始静强度 p_r 的分布参数

Table 1 The distribution parameters of initial static strength p_r for steel internal pressure vessel

失效准则	参数	薄壁内压圆筒	薄壁球形容器	扁平绕带容器	超高压厚壁圆筒
屈服失效	$\mu_s^l\sim\mu_s^u$	0.943 8~1.009 7	0.984 8~1.049 58	1.021 8~1.094 0	—
屈服失效	$C_{ps}^l\sim C_{ps}^u$	0.0846 9~0.130 9	0.080 78~0.118 8	0.083 56~0.137 8	—
爆破失效	$\mu_b^l\sim\mu_b^u$	0.988 3~1.013 1	0.984 8~1.049 58	1.021 8~1.094 0	0.922 7~1.010 9
爆破失效	$C_{pb}^l\sim C_{pb}^u$	0.070 98~0.085 13	0.066 42~0.106 6	0.063 87~0.124 6	0.057 62~0.123 0

2.2 载荷的分布规律与分布参数

为确保内压容器的安全性,新制造或检修后再用的容器,必须经过压力试验检验合格后才能使用,内压容器的载荷可分为试验压力与正常工作压力.研究表明^[7]:内压容器的正常工作压力 p_t 与试验压力 p_L 基本符合正态分布,工作压力 p_t 的变异系数为 $C_{\mu}=0.091$,试验压力 p_L 的变异系数为 $C_{\mu_L}=0.045$.

3 可靠度系数与许用可靠度

3.1 可靠度系数

为确保钢制内压容器在压力试验与正常操作时的安全性,中国采用有关标准^[3-6]规范压力容器的设计、制造和检验,标准应用的长期实践为确定内压容器在压力试验与正常操作时的可靠度系数提供了依据.

1)气压与液压试验时的 $[\alpha]_r$.

气压与液压试验时,钢制薄壁内压圆筒容器、薄壁球形容器和扁平绕带式容器的最大试验

压力,分别不得超过容器屈服压力的 0.8 与 0.9 倍^[3~5],在屈服准则下和气压试验时, $[\alpha]_s=0.8$,在屈服准则下和液压试验时, $[\alpha]_s=0.9$.

由于 $\frac{\mu_{ps}}{\mu_{pb}}=\mu_{\gamma}$ (μ_{γ} 为容器材质屈强比的均值),钢制薄壁内压圆筒与球形容器制造材料屈强比的均值往往不大于 0.800,因此,在气压试验和爆破失效准则下 $[\alpha]_b=0.640$,在液压试验和爆破失效准则下, $[\alpha]_b=0.720$.超高压厚壁圆筒的最大试验压力系数为 1.25,安全系数 $n_b=3.00$ ^[6],则 $[\alpha]_b=\frac{1.25}{3.00}=0.417$.

2)正常操作时的 $[\alpha]_r$.

钢制薄壁内压圆筒、薄壁球形容器和扁平绕带式容器的安全系数为 $n_b=2.40$ 与 $n_s=1.50$ ^[5],超高压厚壁圆筒的安全系数可取 $n_b=3.00$ ^[6];把有关数据代入式(10),可得正常操作时的 $[\alpha]_r$.

由式(7)、(8)可得初始静强度在气压、液压试验与正常操作时的可靠度系数范围,如表 2 所示.

表 2 按中国标准得到的可靠度系数
Table 2 The reliable index with according to the Chinese standard design

容器结构	失效准则	可靠度系数	压力试验		正常操作
			气压试验	液压试验	
薄壁内压圆筒	屈服失效	$\beta_s \sim \beta_r$	1.12~2.26	0.34~1.16	2.01~3.27
薄壁内压圆筒	爆破失效	$\beta_b \sim \beta_s$	3.92~4.82	2.98~3.72	6.19~7.34
薄壁球形容器	屈服失效	$\beta_s \sim \beta_r$	1.51~2.71	0.68~1.59	2.41~3.67
薄壁球形容器	爆破失效	$\beta_b \sim \beta_s$	3.17~5.43	2.41~4.29	5.09~7.98
扁平绕带式容器	屈服失效	$\beta_s \sim \beta_r$	1.40~2.20	0.70~1.08	2.61~4.06
扁平绕带式容器	爆破失效	$\beta_b \sim \beta_s$	2.80~6.40	2.15~5.29	4.55~8.52
超高压厚壁圆筒	爆破失效	$\beta_b \sim \beta_s$	—	4.70~10.33	5.02~10.32

由表 2 可知:1)在相同安全系数和相同失效准则下,薄壁内压圆筒与球形容器的可靠度系数并不相等.2)文献[1,2]中推荐的压力容器许用可靠度系数没有结合中国压力容器标准,推荐值在正常操作时比较小,偏于不安全.

3.2 许用可靠度(系数)

为解决上述问题,应基于表 2 从等可靠度的观点确定容器在压力试验与正常操作时许用可靠度(系数).确定的原则为:1)危害性原则.如果容器失效后的危害大,其许用可靠度应该大,因为在压力试验和正常操作时容器爆破失效的危害比屈服失效大,所以容器初始爆破强度的许用可靠度必须比初始屈服强度的大;而容器断裂失效与爆破失效造成的危害相当,因此断裂与初始爆破强度的许用可靠度可相等.容器在正常操作失效的危害往往比压力试验时的大,因此在相同

失效准则下,容器在正常操作的许用可靠度比压力试验时大.相同准则下,同一容器在气压压力试验时的可靠度应大于液压压力试验的,例如,屈服准则下,薄壁内压圆筒在内压气压试验时的许用可靠度应大于液压试验时的.2)整体性原则.由于容器往往是由筒体与封头构成的整体,因此整体容器在相同失效准则和工作状态时的许用可靠度应相等,例如内压圆筒与球形封头;3)可接受原则.不同容器在相同准则和工作状态时的许用可靠度,应符合中国标准对最小可靠度的要求.

根据表 2 和以上分析,钢制薄壁内压圆筒、薄壁球形容器、扁平绕带式容器及超高压厚壁圆筒等四种结构钢制内压容器,在正常操作与压力试验时,基于屈服、爆破和断裂失效准则的许用可靠度(系数),可按表 3 分别确定.

表 3 内压力容器的许用可靠度

Table 3 Allowable reliability of steel internal pressure vessel

容器结构	失效准则	许用可靠度系数 与许用可靠度	压力试验		正常操作
			气压试验	液压试验	
薄壁内压圆筒,薄壁球形容器, 扁平绕带容器	屈服失效	$\beta'_s \sim \beta'_e$	1.12~2.20	0.34~1.08	2.01~3.27
		$\Phi(\beta'_s) \sim \Phi(\beta'_e)$	0.868 6~0.936 1	0.633 1~0.859 9	0.977 78~0.9 ³ 2378*
薄壁内压圆筒,薄壁球形容器, 扁平绕带容器,超高压厚壁圆筒	爆破失效	$\beta'_b \sim \beta'_e$	2.80~4.82	2.15~3.72	4.55~7.34
	断裂失效	$\Phi(\beta'_b) \sim \Phi(\beta'_e)$	0.9 ² 7445~0.9 ⁶ 3173	0.984 22~0.9 ⁴ 0039	0.9 ⁵ 7318~0.9 ¹² 56

注: * 0.9³2378=0.999 237 8,以此类推.

4 可靠性安全系数与试验压力系数

4.1 可靠性安全系数

正常操作时,把表 1、2 及有关数据代入式(11)及(13),并取 $\lambda_l = \lambda_u = 1.00$,可得基于许用可靠度要求的可靠性安全系数计算值与初选值,如表 4 所示.

4.2 试验压力系数

由式(14)可得试验压力系数下限值: $\lambda = 1.08$.

把表 1、2、4 中可靠性安全系数的初选值和有

关数据代入式(11)、(12)、(15),可得试验压力系数上限的计算值与确定值,如表 5 所示.

由表 5 可知,1)钢制薄壁内压圆筒、薄壁球形容器和扁平绕带容器试验压力系数的上限值是由屈服失效准则决定的,超高压厚壁圆筒的是由爆破失效准则决定的,中国压力容器标准^[3-6]所规定的试验压力系数,均在文中试验压力系数取值范围内.2)表 4 中可靠性安全系数的初选值,可作为确定中国压力容器标准^[3-6]安全系数的参考.

表 4 可靠性安全系数的计算值与初选值

Table 4 Reliability safety factor predicted value and primary election value

容器结构	失效准则	$\beta'_s \sim \beta'_e$	安全系数	
			计算值 $n_m \sim n_n$	初选值 n_r
薄壁内压圆筒	屈服失效	2.01~3.27	1.499~1.500	1.50
	爆破失效	4.55~7.34	1.838~2.400	2.40
薄壁球形容器	屈服失效	2.01~3.27	1.397~1.424	1.45
	爆破失效	4.55~7.34	2.131~2.200	2.25
扁平绕带容器	屈服失效	2.01~3.27	1.408~1.276	1.45
	爆破失效	4.55~7.34	2.396~2.054	2.40
超高压厚壁圆筒	爆破失效	4.55~7.34	2.614~2.094	2.65

表 5 试验压力系数上限的确定值

Table 5 Test pressure coefficient upper limit indeed definite value

容器结构	安全系数	试验压力系数					
		气压试验			液压试验		
		$\beta_r \sim \beta_e$	计算值	确定值	$\beta_r \sim \beta_e$	计算值	确定值
薄壁内压圆筒	$n_s = 1.50$	1.12~2.20	1.200~1.208	1.20	0.34~1.08	1.349~1.361	1.30
	$n_b = 2.40$	2.80~4.82	1.764~1.535		2.15~3.72	1.900~1.727	
薄壁球形容器	$n_s = 1.45$	1.12~2.20	1.228~1.225	1.20	0.34~1.08	1.366~1.372	1.35
	$n_b = 2.25$	2.80~4.82	1.527~1.535		2.15~3.72	1.683~1.712	
扁平绕带容器	$n_s = 1.45$	1.12~2.20	1.244~1.269	1.20	0.34~1.08	1.409~1.427	1.40
	$n_b = 2.40$	2.80~4.82	1.574~1.734		2.15~3.72	1.773~1.924	
超高压厚壁圆筒	$n_b = 2.65$	—			2.15~3.72	1.776~1.984	1.75

5 结 语

1)以按中国标准设计、制造和监察的压力容器为研究对象,应用可靠性设计理论中的应力-强度干涉模型,在压力试验和正常操作时,得到钢制薄壁内压圆筒、薄壁球形容器和扁平绕带式容器初始屈服与爆破强度的可靠度系数范围,从等可

靠度的观点,确定钢制薄壁内压圆筒、薄壁球形容器、扁平绕带式容器及超高压厚壁圆筒在正常操作与压力试验时的许用可靠度.建立了安全系数、试验压力系数与许用可靠度系数的关系.

2)基于屈服失效准则,钢制薄壁内压圆筒、薄壁球形容器和扁平绕带式容器的许用可靠度系数,在气压试验、液压试验与正常操作时,分别为

1.12~2.20、0.34~1.08 与 2.01~3.27。基于爆破和断裂失效准则,钢制薄壁内压圆筒、薄壁球形容器、扁平绕带式容器和超高压厚壁圆筒的许用可靠度系数范围,在气压试验、液压试验与正常操作时,分别为 2.80~4.82、2.15~3.72 与 4.55~7.34。

3)在满足上述许用可靠度(系数)的前提下,钢制薄壁内压圆筒屈服安全系数应不小于 1.50,抗拉安全系数应不小于 2.40;薄壁球形容器屈服安全系数应不小于 1.45,抗拉安全系数应不小于 2.25;扁平绕带式容器屈服安全系数应不小于 1.45,抗拉安全系数应不小于 2.40;超高压厚壁圆筒抗拉安全系数应不小于 2.65。

4)钢制薄壁内压容器试验压力系数在气压与液压试验时应不小于 1.08。在满足上述许用可靠度(系数)和安全系数最小值的前提下,钢制薄壁内压圆筒、薄壁球形容器和扁平绕带容器试验压力系数的上限值由屈服失效准则决定,超高压厚壁圆筒试验压力系数的上限值由爆破失效准则决定。在气压试验时,钢制薄壁内压容器试验压力系数应不大于 1.20;在液压试验时,钢制薄壁内压圆筒试验压力系数应不大于 1.30,薄壁球形容器试验压力系数应不大于 1.35;扁平绕带式容器试验压力系数应不大于 1.40;超高压厚壁圆筒试验压力系数应不大于 1.75。

参考文献:

[1] 赵建平. 压力容器概率安全评定失效准则研究[J].

化工设备与管道, 2000, 37(5): 15-17.

[2] 胡宽, 常新龙, 杨海生. 推进剂贮存容器 J 积分安全评定与寿命预测[J]. 机械设计与研究, 2010, 26(1):15-18.

[3] GB150-1998. 钢制压力容器[S].

[4] GB12337-1998. 钢制球形贮罐[S].

[5] TSG R0004-2009. 固定式压力容器安全技术监察规程[S].

[6] TSG R0002-2005. 超高压容器安全技术监察规程[S].

[7] 吴元祥, 刘小宁. 扁平绕带式容器的可靠性研究[J]. 武汉工程大学学报, 2008, 30(2): 115-116.

[8] 吴元祥, 张红卫, 刘小宁. 扁平绕带式容器试验压力系数和安全系数分析[J]. 武汉工程大学学报, 2008, 30(3): 114-117.

[9] 刘小宁. 钢制薄壁内压圆筒爆破压力的概率分布研究[J]. 化工设计, 2004, 14(1): 23-28.

[10] 刘小宁, 叶四合. 薄壁内压容器屈服强度的初始可靠度[J]. 锅炉压力容器安全技术, 2004, (4):32-35.

[11] 刘小宁. 球形容器静强度概率分布研究[J]. 石油化工设备, 2004, 33(4): 17-19.

[12] 刘小宁. 扁平绕带式压力容器模糊静强度的确定[J]. 化工设计, 2007, 17(6): 28-30.

[13] 刘小宁. 超高压圆筒爆破强度的模糊可靠度[J]. 石油化工设备, 2005, 34(5): 36-38.

[14] 刘小宁, 张红卫, 刘 岑, 等. 钢制薄壁内压短圆筒静强度的试验研究[J]. 压力容器, 2009, 26(7): 11-14.

[15] 张红卫, 陈 刚, 刘 岑, 等. 标准椭圆封头对薄壁内压圆筒承载能力的影响[J]. 武汉工程大学学报, 2010, 32(3): 103-106.

Research on reliability safety factor of steel internal pressure vessel

LIU Xiao - ning^{1, 2}, ZHANG Hong - wei¹, LIU Cen², LIU Bing¹, YUAN Xiao - hui¹, HAN Chun-ming¹

(1. Department of Mechanical Manufacture Engineering, Wuhan Polytechnic College of Software and Engineering, Wuhan 430205, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: By means of application of stress-intensity interference model, the allowable reliability coefficients range of initial yield and burst intensity were analyzed during the pressure test and the normal operation in which Three kinds of steel internal pressure vessel structures are desinged according to the Chinese standard. The quota relations are established among the safety factor, the test pressure coefficient and the allowable reliability coefficients. Based on three kinds of the failure criterion such as yield, burst and fracture, from equal-reliability viewpoints, the allowable reliability coefficient of four kinds of vessel structure intensity during the pressure test and the normal operation are determined. The safety factor and the test pressure coefficient are obtained based on the allowable reliability.

Key words: internal pressure vessel; allowable reliability; reliability safety factor; test pressure coefficient

本文编辑:陈小平