文章编号: 1008-1542(2011)02-0192-05

压力容器概率安全评定的可靠指标研究

张红卫[1], 刘 兵[1], 刘 岑[2], 袁小会[1], 陈 刚[1], 刘小宁[1,2]

(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: 应用信息熵理论, 在最苛刻压力试验和正常操作时, 分析了 4 种结构压力容器的初始屈服与爆破强度的可靠度系数。基于屈服、爆破和断裂 3 种失效准则, 从等可靠度的观点, 确定了压力容器的可靠指标: 1) 钢制薄壁圆筒、薄壁球形容器和扁平绕带容器初始屈服强度的可靠指标, 在气压试验与液压试验分别为 1.920 与 0.815, 在正常操作时为 3.189; 2) 钢制薄壁圆筒、薄壁球形容器、扁平绕带容器及超高压厚壁圆筒初始爆破和断裂强度的可靠指标, 在气压试验与液压试验分别为 4.729 与 3.740, 在正常操作时为 6.828, 从而解决了压力容器概率安全评定的一个基础问题。

关键词: 压力容器; 概率安全评定; 可靠指标

中图分类号: TH49 文献标志码: A

Reliable index research in pressure vessel probability safe evaluation

ZHANG Hong-wei[1], LIU Bing[1], LIU Cen[2], YUAN Xiao-hui[1], CHEN Gang[1], LIU Xiao-ning[1,2]

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

Abstract: By using information entropy theory, the four kinds of structure pressure vessel's allowable reliable coefficients of initial yield and burst intensity were analyzed under the harshest pressure test and the normal operation. Based on three kinds of failure criteria, such as yield, burst and fracture, from the equal-reliability viewpoints, the reliable index of pressure vessel is determined: 1) for steel thinness wall cylinder, spherical vessel and flat ribbon-wound pressure vessel, the reliable index of initial yield intensity is equal to 1.920 or 0.815 during barometrical or hydraulic pressure tests, and equal to 3.189 under the normal operation; 2) for steel thinness wall cylinder, spherical vessel, flat ribbon-wound pressure vessel and super-high pressure thick wall cylinder, the reliable index of initial burst intensity is equal to 4.729 or 3.740 during barometrical or hydraulic pressure tests, and equal to 6.828 under the normal operation. The foundational question of pressure vessel probability safe evaluation is solved.

Key words: pressure vessel; probability safe evaluation; reliable index

应用可靠性理论对压力容器进行概率安全评定是压力容器领域研究的热点与前沿课题, 由于压力容器的可靠指标是指度量其许用可靠度的数值指标, 因此确定压力容器概率安全评定的可靠指标或许用可靠度

收稿日期: 2010-11-03; 修回日期: 2011-01-04; 责任编辑: 冯 民
基金项目: 武汉市教育局重点科研基金资助项目(2008K027); 武汉市创新人才开发资金重大创新专项资助项目
作者简介: 张红卫(1970-), 男, 湖北武汉人, 副教授, 高级工程师, 主要从事压力容器可靠性方面的教学与研究。
通讯作者: 刘小宁教授。E-mail: lxngjxy@163.com

是其中的基础问题。

GB 50153－2008《工程结构可靠性统一设计标准》[1]按安全等级和破坏类型确定工程结构的可靠指标。尽管该标准的适用对象是建筑、铁路和公路等行业的一般工程结构,但是其思路可为确定压力容器的可靠指标提供参考。赵建平和胡宽等对压力容器概率安全评定的可靠指标进行了一些有益的探讨[2-3],但是其推荐值没有充分考虑中国压力容器标准[4-7]的影响。

压力容器是石化、食品、制药、能源和航空等行业常用的特种设备,为确保安全,中国采用有关标准规范压力容器的设计、制造、检验和监察[4-7],标准的长期应用实践为确定压力容器概率安全评定的可靠指标提供了依据。

由于压力容器失效的不确定性是由随机性和模糊性引起的,因此,笔者以按中国压力容器标准设计、制造、检验和监察的钢制薄壁圆筒与薄壁球形容器、扁平绕带容器和超高压厚壁圆筒为研究对象,在文献[8]—文献[13]的基础上,应用信息熵理论分析压力容器初始屈服和爆破强度在最苛刻压力试验和正常操作时可靠度,基于等可靠度观点和断裂失效等 3 种准则,确定了压力容器在压力试验和正常操作时的可靠指标,解决了压力容器概率安全评定的一个基础问题。

1　力学模型

为讨论方便,笔者分析的是不考虑腐蚀等因素影响时的压力容器的初始模糊屈服和爆破强度;压力容器的模糊载荷是指容器的试验压力或工作压力。

压力容器的模糊可靠度是指其初始模糊屈服与爆破强度大于模糊载荷的概率,决定可靠度的功能函数为

$$\tilde{y}=\tilde{R}-\tilde{L}, \tag{1}$$

式中:$\tilde{R}$ 为模糊屈服与爆破强度;$\tilde{L}$ 为模糊载荷。

基于信息熵中模糊等效随机原理[8-9],可得模糊可靠度,见式(2)和式(3)。

$$R=P(\tilde{R}\geqslant\tilde{L})=\Phi(\beta_r), \tag{2}$$

$$\beta_r=\frac{\sqrt{2}(a_r-a_L)}{\sqrt{k_r^2+k_L^2}}, \tag{3}$$

式中:β_r 为可靠度系数,在屈服与爆破准则时分别取 β_s 与 β_b;$\Phi(\beta_r)$ 为标准正态积分;a_r 为模糊屈服与爆破强度的中心值,在屈服与爆破准则时分别取 a_s 与 a_b;a_L 为模糊载荷的中心值;k_r 为模糊屈服与爆破强度的标准差,在屈服与爆破准则时分别取 k_s 与 k_b;k_L 为模糊载荷的标准差。

模糊屈服与爆破强度的中心值为

$$a_r=\eta_r u_r, \tag{4}$$

式中:η_r 为模糊屈服与爆破强度统计量的均值,在屈服与爆破失效准则下分别取 η_s 与 η_b;u_r 为屈服与爆破强度的名义值,在屈服与爆破失效准则下分别取 u_s 与 u_b。

对于薄壁内压圆筒形容器与球形容器,

$$u_r=2Z\frac{K-1}{K+1}\sigma_r, \tag{5}$$

式中:Z 为结构系数,薄壁圆筒 $Z=1$,薄壁球形容器 $Z=2$;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],

$$u_r=\sigma_{r1}\ln K_1+\sigma_{r2}\cot^2\alpha(K_2^{\sin^2\alpha}-1), \tag{6}$$

式中: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],

$$u_b=\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s\left(2-\frac{\sigma_s}{\sigma_b}\right)\ln K。 \tag{7}$$

模糊载荷的中心值为

$$a_L = [k]_r u_r, \tag{8}$$

式中: $[k]_r$ 为模糊载荷的中心值与名义初始屈服或爆破强度之比的许用值, 在屈服与爆破准则时分别取 $[k]_s$ 与 $[k]_b$。

由式(3)、式(4)与式(8)可得钢制压力容器初始模糊屈服和爆破强度的可靠度系数,

$$\beta_r = \frac{\eta_r - [k]_r}{\sqrt{(\eta_r V_r)^2 + ([k]_r V_L)^2}}, \tag{9}$$

式中: V_r, V_L 分别为模糊静强度与模糊载荷等效随机的变异系数, 分别表示为 $V_r = \frac{\sqrt{2}k_r}{2a_r}$ 和 $V_L = \frac{\sqrt{2}k_L}{2a_L}$。

2 按中国标准得到可靠度系数

2.1 分布参数

为确保钢制压力容器的安全性, 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, 压力容器的使用状态可分为压力试验与正常操作。

在压力试验条件和正常操作时, 模糊载荷的分布参数为气压试验 $V_L = 0.036\ 45$, 液压试验 $V_L = 0.039\ 36$, 正常操作 $V_L = 0.064\ 18$[8-10]。

压力容器初始屈服与爆破强度的分布参数见表 1[8, 13]。

表 1 η_r 与 V_r 的值

Tab. 1 Values of η_r and V_r

容器类型	失效准则	η_r	V_r
钢制薄壁圆筒	屈服准则	0.976 8	0.089 40
	爆破准则	1.000 7	0.059 45
钢制薄壁球形容器	屈服准则	1.017 2	0.081 33
	爆破准则	1.017 2	0.072 99
扁平绕带容器	屈服准则	1.057 9	0.094 11
	爆破准则	1.057 9	0.085 09
超高压厚壁圆筒	爆破准则	0.966 8	0.083 01

2.2 $[k]_r$ 的取值

对于薄壁圆筒、薄壁球形容器、扁平绕带容器和超高压厚壁圆筒, 在正常操作时有

$$[k]_r = 1/n_r, \tag{10}$$

式中: n_r 为安全系数, 在屈服与爆破失效准则时分别取屈服与抗拉安全系数 n_s 与 n_b。

按中国标准规定[6], 对于钢制薄壁圆筒、薄壁球形容器和扁平绕带容器, 取 $n_b = 2.40$, $n_s = 1.50$。对于超高压厚壁圆筒, 按标准[7]取 $n_b = 3.00$。

对于钢制薄壁圆筒、薄壁球形容器和扁平绕带容器, 在最苛刻压力试验条件和屈服与爆破失效准则下, 按相关标准[4-5, 8-9]的分析确定。超高压厚壁圆筒必须进行耐压(液压)试验, 最大耐压试验压力系数为 1.25[7], 此时, $[k]_b = 1.25/3.00 \approx 0.416\ 7$。

因此, 在压力试验和正常操作时, $[k]_r$ 的值可按表 2 确定。

表 2 $[k]_r$ 的值

Tab. 2 Values of $[k]_r$

容器类型	失效准则	压力试验 $[k]_r$		正常操作 $[k]_r$
		气压	液压	
钢制薄壁圆筒	屈服准则	0.800 0	0.900 0	0.666 7
	爆破准则	0.640 0	0.720 0	0.416 7
钢制薄壁球形容器	屈服准则	0.800 0	0.900 0	0.666 7
	爆破准则	0.640 0	0.720 0	0.416 7
扁平绕带容器	屈服准则	0.800 0	0.900 0	0.666 7
	爆破准则	0.600 0	0.675 0	0.416 7
超高压厚壁圆筒	爆破准则	–	0.416 7	0.333 3

2.3 按中国标准得到的可靠度系数

把表 1、表 2 与有关数据代入式(9)中, 可得按中国压力容器标准确定的可靠度系数, 见表 3。

表 3　按中国标准得到的可靠度系数

Tab. 3　Reliable indexes design according to the Chinese standard

容器类型	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	
钢制薄壁圆筒	屈服准则	β_s	1.920	0.815	3.189
	爆破准则	β_b	5.645	4.260	8.953
钢制薄壁球形容器	屈服准则	β_s	2.476	1.302	3.763
	爆破准则	β_b	4.729	3.740	7.609
扁平绕带容器	屈服准则	β_s	2.486	1.494	3.610
	爆破准则	β_b	4.943	4.080	6.828
超高压厚壁圆筒	爆破准则	β_b	–	6.716	7.627

由表 3 可知: 1) 在相同安全系数、相同失效准则和相同工作状态下, 薄壁圆筒、薄壁球形容器、扁平绕带容器及超高压厚壁圆筒的可靠度系数并不相等。2) 文献[1] 中推荐的工程结构的可靠指标对压力容器不适用; 文献[2] 和文献[3] 推荐的可靠指标没有充分考虑中国压力容器标准的影响, 推荐值在正常操作时比较小, 如果把其作为压力容器概率安全评定的可靠指标, 偏于不安全。3) 尽管超高压厚壁圆筒的抗拉安全系数比薄壁圆筒容器大, 但是, 其正常操作时的可靠度系数比薄壁圆筒容器小, 即其可靠度也比较小。4) 由文献[6]、文献[7] 以及表 3 可知, 文献[2] 和文献[3] 按容器分类确定可靠指标的方法似有不妥。

3　从等可靠度观点确定可靠指标

根据等可靠度的观点, 确定压力容器的可靠指标或许用可靠度, 见表 4。

表 4　从等可靠度观点确定压力容器可靠指标

Tab. 4　Reliable indexes design of pressure vessel according to the equal-reliability viewpoints

容器类型	失效准则	可靠指标与许用可靠度	压力试验		正常操作
			气压试验	液压试验	
钢制薄壁圆筒, 钢制薄壁球形容器,	屈服失效	$[\beta_s]$	1.920	0.815	3.189
扁平绕带容器		$\Phi(-[\beta_s])$	0.972 57	0.792 5	0.999 288 6
钢制薄壁圆筒, 钢制薄壁球形容器,	爆破失效	$[\beta_b]$	4.729	3.740	6.828
扁平绕带容器, 超高压厚壁圆筒	断裂失效	$\Phi(-[\beta_b])$	0.999 998 887 6	0.999 907 99	0.999 999 999 995 51

其主要是考虑以下 3 个因素。

1) 压力容器失效后的危害性　如果容器失效后的危害大, 其可靠指标应该大。该因素包含 3 个方面, 其一是与容器失效准则有关, 在相同的工作状态下, 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可靠指标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, 因此初始断裂与爆破强度的可靠指标可相等。其二是与容器工作状态有关, 在相同的失效准则下, 容器在正常操作失效的危害往往比压力试验时的大, 因此, 容器在正常操作的可靠度系数比压力试验时大。其三是与容器的工作介质有关, 在相同失效准则和相同工作状态下, 当工作介质为有毒、有害、易燃和易爆气体时, 容器失效后造成的危害往往比液体介质大。因此, 工作介质为气体时的可靠指标应大于液体时的可靠指标。例如: 屈服准则下, 薄壁内压圆筒在内压气压试验时的可靠度应大于液压压力试验时的。

2) 整体性因素　由于容器往往是由筒体与封头等不同结构组成的整体, 因此, 在相同的工作条件下, 容器不同结构的可靠指标应相等, 如内压圆筒与球形封头。

3) 标准可接受的因素　长期的应用实践证明了中国压力容器设计、制造、检验和监察标准[4-7] 的可靠性, 因此, 容器的可靠指标必须符合中国压力容器标准的要求。

根据以上分析和表 3 认为, 钢制薄壁圆筒、薄壁球形容器, 扁平绕带容器及超高压厚壁圆筒 4 种结构钢

制压力容器,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可靠指标,可按表 4 分别确定。

4 结 语

1) 应用信息熵理论,以按中国标准设计、制造、检验和监察的钢制薄壁圆筒、薄壁球形容器、扁平绕带容器及超高压厚壁圆筒为研究对象,在压力试验和正常操作时,得到其初始屈服与爆破强度的可靠度系数。

2) 基于等可靠度的观点和屈服、爆破与断裂失效准则,确定钢制薄壁圆筒、薄壁球形容器、扁平绕带容器及超高压厚壁圆筒 4 种结构压力容器的可靠指标,解决了压力容器概率安全评定的一个基础问题。

3) 在屈服失效准则下,钢制薄壁圆筒、薄壁球形容器及扁平绕带容器在正常操作的可靠指标为3.189,许用可靠度为 0.999 288 6;在气压试验时的可靠指标为 1.920,许用可靠度为 0.972 57;在液压试验时的可靠指标为 0.815,许用可靠度为 0.792 5。

4) 在爆破与断裂失效准则下,钢制薄壁圆筒、薄壁球形容器、扁平绕带容器及超高压厚壁圆筒在正常操作的可靠指标为 6.828,许用可靠度为 0.999 999 999 995 51;在气压试验时的可靠指标为 4.729,许用可靠度为 0.999 998 887 6;在液压试验时的可靠指标为 3.740,许用可靠度为 0.999 907 99。

参考文献:

[1] GB 50153—2008, 工程结构可靠性统一设计标准[S].
[2] 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(Process Equipment & Piping), 2000, 37(5): 15-17.
[3] 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(Machine Design & Research), 2010, 26(1): 15-18.
[4] GB 150—1998, 钢制压力容器[S].
[5] GB 12337—1998, 钢制球形贮罐[S].
[6] TSG R0004—2009, 固定式压力容器安全技术监察规程[S].
[7] TSG R0002—2005, 超高压容器安全技术监察规程[S].
[8] 刘小宁. 钢制薄壁内压容器模糊静强度的可靠度[J]. 机械强度(Journal of Mechanical Strength), 2009, 31(5): 771-775.
[9] 刘小宁, 张红卫, 韩春鸣. 基于信息熵的钢制薄壁内压容器试验压力[J]. 机械强度(Journal of Mechanical Strength), 2010, 32(2): 260-264.
[10] 刘小宁, 张红卫, 韩春鸣, 等. 钢制薄壁内压容器的压力试验超压限制系数[J]. 机械强度(Journal of Mechanical Strength), 2010, 32(4): 596-599.
[11] 韩春鸣, 张红卫, 刘 岑, 等. 钢制薄壁圆筒外压试验压力的研究[J]. 河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology), 2009, 30(4): 314-318.
[12] 胡成龙, 刘小宁. 扁平绕带式压力容器爆破压力的计算[J]. 化肥设计(Chemical Fertilizer Design), 2006, 44(2): 20-21.
[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(Petro-Chemical Equipment), 2005, 34(5): 36-38.

IJMIC“专刊”征稿通知

英国《International Journal of Modelling, Identification and Control》(简称 IJMIC, 中文名称为《模型、识别与控制国际杂志》)是面向全世界发行的一本国际性的学术期刊。它现为被美国 EI 核心区(而非网络版及扩展版)收录的期刊,且正进行争取被美国 SCI 收录的工作。从 2009 年至今,河北科技大学学报编辑部已成功组织、编辑 IJMIC“专刊”2 期,现均已顺利出版,均被美国 EI 核心区收录,并得到了英方的高度评价和赞赏。经商谈,英国 IJMIC 编委会继续授权我编辑部进行第 3 期“专刊”的组稿工作,同时按英方要求的编排规范进行编辑加工,而英方仍负责“专刊”的印刷、出版、发行工作。

现面向广大读者征稿,欢迎大家踊跃赐稿。

征稿内容: 要符合 IJMIC 的报道方向。

征稿要求:

1 论文要求

1) 论文须用 Word 文档排版撰写,符合 Inderscience 规范,详见http://www.inderscience.com/ijmic;

2) 页码范围在 5~ 9 页;

(下转第 **204** 页)