复合材料学报 第23卷 第4期 8月 2006年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 23 No. 4 August 2006

文章编号: 1000-3851(2006)04-0124-05

纤维缠绕聚合物基复合材料压力容器的可靠性设计

沈 军*[1], 谢怀勤[1], 侯涤洋[2]
(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨玻璃钢研究院 工程二部, 哈尔滨 150036)

摘 要: 为对纤维缠绕聚合物基复合材料(FWRP)压力容器进行可靠性设计和安全测评, 引入可靠性理论; 应用统计学原理, 以同一失效概率为标准进行 FWRP 压力容器结构设计, 以取代目前应用的传统安全系数法设计。根据国家标准制备 8 个玻璃纤维缠绕复合材料(GFWRP)压力容器, 通过实验获得纤维强度、缠绕角、几何尺寸、爆破压力等随机变量特征值。GFWRP 压力容器结构可靠性设计值(纤维缠绕壁厚)与实验结果基本吻合, 并明显小于传统安全系数法设计值。通过对不同纤维强度随机分布可靠性设计理论计算结果的比较, 确知纤维强度的离散程度是 FWRP 压力容器可靠性设计的重要影响因素。传统安全系数设计法只考虑纤维强度(均值)大小, 而无视纤维强度随机分布特征值对 FWRP 压力容器结构抗力的影响, 显然是不合理的。可靠性设计实现了安全性与经济性的有效统一。

关键词: 聚合物基复合材料; 纤维缠绕工艺; FWRP 压力容器; 可靠性设计
中图分类号: TB323 **文献标识码**: A

Reliability design of fiber wound reinforced plastics pressure vessel

SHEN Jun*[1], XIE Huaiqin[1], HOU Diyang[2]
(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Engineering Ⅱ Department, Harbin FRP Institute, Harbin 150036, China)

Abstract: For reliability design and safety evaluation on fiber wound reinforced plastics (FWRP) pressure vessels, the traditional safety factor design was substituted by a reliability structure design based on the reliability theory and the statistical principle. Eight glass fiber wound reinforced plastics (GFWRP) pressure vessels were manufactured and the experiments were conducted to obtain the probabilistic distribution of design variables, such as the fiber strength, winding angle, geometric size, burst strength and so on. The results (thickness of the winding fiber) derived from the reliability design agree well with the experimental results and much lower than that from the traditional safety factor design. Through comparison between the reliability design results with different statistics of fiber strength, the significant influence of the variance level of fiber strength on reliability design of FWRP pressure vessel was demonstrated. The traditional safety factor design was verified to be not reasonable since it considers only the mean value of fiber strength without the effect of fiber strength statistics on the structural resistance of the vessel. The reliability design of FWRP pressure vessel in this study presents the effective unity of safety and economy.

Keywords: fiber reinforced plastics; fiber winding technique; FWRP pressure vessel; reliability design

纤维缠绕聚合物基复合材料(FWRP)压力容器以其比强度比模量高、耐腐蚀、可实现等强度设计等优异性能, 在航空航天、国防、民用领域的应用日趋广泛。目前, 国内外对 FWRP 压力容器均应用传统的安全系数法设计, 设计标准仅给出了安全系数范围, 并未给出可靠度指标。减轻结构质量对于性能和成本均具有非常重要的意义, 但其前提是安全可靠。结构抗力(强度)是由随机变量决定的, 因此应根据它们的统计特性来表征和设计。传统安全系数设计法将各设计变量视为确定量, 无视其随机性引起的结构各部分可靠性的不均匀与不合理性, 从而无法准确给出结构的可靠度。安全系数实

收稿日期: 2005-08-18; **收修改稿日期**: 2006-01-11
基金项目: 国家自然科学基金(50475034)
通讯作者: 沈 军, 博士研究生, 研究方向: 复合材料结构与性能 E-mail: sj98hit@yahoo.com

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为经验系数，具有主观性强科学性差的弊端。为满足对压力容器结构设计和安全评定愈来愈高的要求，发展和完善 FWRP 压力容器的可靠性设计理论和分析方法具有十分重要的意义。美、英等发达国家对该领域的研究起步较早，探讨并建立了一些初步的工程评定方法[1-6]。我国近年来主要偏重于对金属压力容器设计及其缺陷的评定[7-9]，而对 FWRP 复合材料压力容器结构可靠性设计理论的研究较少[10,11]。引入可靠性理论，应用统计学原理，并以某同一破坏概率为标准进行结构设计，可消除因采用同一传统安全系数值引起的结构各部分可靠性的不均匀与不合理性。因此，减少结构设计的盲目性，用可靠性进行合理设计以取代传统安全系数法设计已成必然趋势。

1　FWRP 压力容器可靠性设计的理论依据

可靠性设计是一种应用概率论和数理统计的方法，根据结构可靠性的定义(结构强度减去应力大于零的概率)，在假设各参量均为随机变量的前提下，由实验数据及工作环境确定其概率特征，再依照所要求的可靠度进行设计的方法。将可靠性设计应用于压力容器的结构设计中，不仅揭示了各设计参数隐含的概率特性，将常规设计方法加以延伸并赋予新的涵义，而且能够定量地评价压力容器的结构安全度以及影响其安全的因素。

1.1　数学模型

压力容器的可靠性设计，主要利用应力-强度的干涉模型(如图 1)。其设计结构的可靠度为

$$R = P(S_2 - S_1 > 0) = \int_{-\infty}^{\infty}\left[\int_{-\infty}^{S_2} f_1(S_1)\,\mathrm{d}S_1\right] f_2(S_2)\,\mathrm{d}S_2 \qquad (1)$$

式中：S_1、S_2 为压力容器的应力和强度；$f_1(S_1)$、$f_2(S_2)$ 为应力和强度的概率密度函数。

由实验得知，FWRP 压力容器的应力和强度为服从正态分布的随机变量，相应的均值与标准偏差分别为 μ_1、μ_2 和 σ_1、σ_2，则其概率密度函数分别为

$$f_1(S_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{S_1-\mu_1}{\sigma_1}\right)^2\right]$$

$$f_2(S_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{S_2-\mu_2}{\sigma_2}\right)^2\right]$$

1.2　可靠性设计基本方程

令强度与应力之差为可靠性随机变量 $Z = S_2 - S_1$，由正态分布函数特性可知，Z 也服从正态分布，

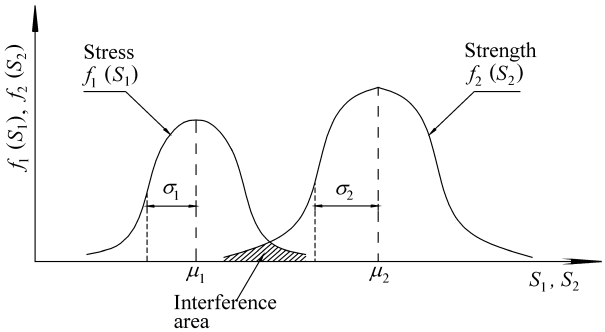

图 1　应力-强度干涉模型

Fig. 1　Stress-strength interference model

其均值、标准差分别为

$$\mu_Z = \mu_2 - \mu_1,\ \sigma_Z = \sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_1^2} \qquad (2)$$

令

$$\beta = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_1^2}} \qquad (3)$$

式中，β 为可靠性系数。可以看出，降低强度与应力的离散系数对提高结构可靠性相当有效。将 β 代入式(1)即可得到

$$R = P(Z > 0) = \int_{-\beta}^{\infty}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp(-Z^2/2)\,\mathrm{d}Z = 1 - \Phi(-\beta) \qquad (4)$$

由 β 值查标准正态分布函数表即可得到可靠度 R。

1.3　FWRP 压力容器的应力分析

由实验证明的网格理论可知，FWRP 压力容器筒体所受载荷主要由纤维承担，因此可近似认为纤维所受载荷即为筒体所受载荷。纤维强度为随机变量，其统计特性(均值与标准差)可由实验得知。而其综合应力可看作多维随机变量，对于 n 维随机变量 $y = f(x_1, x_2, \cdots, x_n)$，由泰勒级数展开可得其均值及方差为

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \cdots, \bar{x}_n),$$

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial \bar{y}}{\partial \bar{x}_i}\right)^2 \sigma_{x_i}^2. \qquad (5)$$

与金属压力容器不同，FWRP 复合材料压力容器的力学性能是各向异性的，因此前者的可靠性设计及其强度理论并不适用于后者。在 FWRP 压力容器中，纵向纤维与环向纤维的缠绕角不同，因此纤维在两个方向的抗力不同。

根据网格理论，纵向纤维厚度 $t_{f\alpha}$ 和环向纤维厚度 $t_{f\theta}$ 的函数式分别为

$$t_{f\alpha} = \frac{PR}{2fK\cos^2\alpha} \qquad (6)$$

$$t_{f\theta} = \frac{PR}{2f}(2 - \tan^2\alpha) \qquad (7)$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中：P 为压力容器的内压；R 为筒体半径；f 为纤维应力；K 为纵向纤维强度发挥系数；α 为纤维缠绕角。

若已知压力容器的内压 P，由式(6)、式(7)可得到纤维应力为

$$f = \frac{PR}{t_{f\theta} + t_{f\alpha}}\left(\frac{3}{2} + \frac{1 - K}{2K\cos^2\alpha}\right) = \frac{PR}{2t'}\left(3 + \frac{1 - K}{K\cos^2\alpha}\right) \tag{8}$$

式中，纤维缠绕层总厚度 $t' = t_{f\theta} + t_{f\alpha}$。

由于 α、P、R、$t_{f\alpha}$、$t_{f\theta}$ 均为服从正态分布的随机变量，根据正态分布函数特性，f 也是服从正态分布的随机变量。应用基本函数法，可知 f 的均值和标准差分别为

$$\begin{cases} \bar{f} = \dfrac{\bar{P}\bar{R}}{2\bar{t}'}\left(3 + \dfrac{1 - K}{K\cos^2\bar{\alpha}}\right) \\ \sigma_f = \sqrt{\left(\dfrac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{P}}\right)^2\sigma_P^2 + \left(\dfrac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{R}}\right)^2\sigma_R^2 + \left(\dfrac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{t}'}\right)^2\sigma_{t'}^2 + \left(\dfrac{\partial \bar{f}}{\partial \bar{\alpha}}\right)^2\sigma_\alpha^2} \end{cases} \tag{9}$$

应力的离散系数为

$$C_1 = \frac{\sigma_1}{\mu_1} = \frac{\sigma_f}{\bar{f}} \tag{10}$$

2　实　验

为了获得纤维缠绕聚合物基复合材料压力容器的荷载效应与结构抗力等参量的随机特征值，进行可靠性设计，并完成可靠性设计与传统安全系数法设计结果的验证，进行下述实验。

2.1　试件制备

采用 80 支/20 股无碱无捻连续玻璃纤维-环氧树脂体系。应用 FW500 型的三轴(三坐标)纤维缠绕机，缠绕成型 8 个 GFWRP 压力容器：筒体内径 $D = 150$ mm，长为 400 mm，封头形状为扁椭球型，使用橡胶内衬。缠绕线型为螺旋与环向复合缠绕，螺旋缠绕角 $\alpha = 25°$，缠绕工艺的张力制度，固化制度等均相同，对玻璃纤维束纱强度、容器爆破压力等随机量进行实验与测定。其中玻璃纤维束纱强度值按照国家标准 GB/T3362-1982 测得，容器爆破压力按照国家标准 GB 6058-85 进行水压爆破实验测得。

2.2　实验与测定结果

由实验得到 GFWRP 压力容器的爆破压力值如表 1 所示，GFWRP 压力容器各随机量的统计分布特征值如表 2 所示。

3　可靠性设计算例

对上述实验的 GFWRP 压力容器进行可靠性设计。GFWRP 压力容器可靠度 $R = 0.99999$。为便于对比，拟对压力容器纤维缠绕层总厚度采用传统安全系数法与可靠性设计方法分别进行设计计算。

3.1　安全系数法设计

根据网格理论，由式(6)、式(7)可分别计算得到纵向纤维厚度 $t_{f\alpha}$ 和环向纤维厚度 $t_{f\theta}$。通常螺旋向纤维强度发挥系数 $K = 0.7 \sim 0.9$[13]，本设计中取 $K = 0.8$。参照文献[14]和国家固体火箭发动机

表 1　GFWRP 压力容器的爆破压力

Table 1　Burst strength of GFWRP pressure vessels

Burst strength of GFWRP pressure vessels/ MPa								Mean value/ MPa	Standard deviation	C_v/ %
1	2	3	4	5	6	7	8			
41.0	42.2	37.6	41.6	43.0	44.4	39.8	42.4	41.5	2.08	5.01

表 2　GFWRP 压力容器的测定结果

Table 2　Experimental results of GFWRP pressure vessels

Experimental results	Radius of the pressure vessels/ mm	Thickness of the winding fiber/ mm	Burst strength of the pressure vessels/ MPa	Fiber winding angle/ (°)	Fiber strand strength/ MPa
Mean value	75	1.98	41.5	25	2560
Standard deviation[12]	0.33	0.02	2.08	0.33	108
C_v/ %	0.40	1.20	5.01	1.33	4.22

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

通用规范标准 GJB1026A - 1999[15]，通常 GFWRP 压力容器的安全系数 $n = 1.5 \sim 3.0$，本设计中取 $n = 2.0$。因而有 $[f] = f_b / n$，$[f]$ 为纤维许用强度，f_b 为纤维束纱强度。将 $[f]$ 代入式(6)、式(7)中，有

$$t_{t\alpha} = \frac{PR}{2[f]K\cos^2\alpha} = 1.850\ \text{mm};$$

$$t_{t\theta} = \frac{PR}{2[f]}(2 - \tan^2\alpha) = 2.167\ \text{mm}. \quad (11)$$

纤维缠绕层总厚度：$t' = t_{t\alpha} + t_{t\theta} = 4.017$ mm。

3.2　可靠性设计

3.2.1　确定各参数的随机分布特征值

在一般压力容器设计中，认为各部件的尺寸也是服从正态分布的随机变量，当取值为 $\pm 3\sigma$ 时，基本上包含了随机变量的全部概率，故可将公称尺寸视为均值，相应的极限偏差 Δ 视为 3σ，标准差则为 $\sigma = \Delta / 3$[12]。因而如表 1 中所示，有

(1) 几何参数：筒体半径的均值与标准差 $\bar{R} = 75$ mm，$\sigma_R = 0.33$ mm；

(2) 工艺参数：纤维缠绕角的均值与标准差 $\bar{\alpha} = 25°$，$\sigma_\alpha = 0.33°$；

(3) 原材料参数：实测得到纤维强度均值 $\mu_2 = f_b = 2560$ MPa，标准差 $\sigma_2 = \sigma_b = 108$ MPa。

3.2.2　确定应力随机分布特征值

由式(9)得纤维所受应力的均值、标准差分别为

$$\mu_1 = \bar{f} = \frac{\bar{P}\bar{R}}{2\bar{t}'}\left(3 + \frac{1-K}{K\cos^2\bar{\alpha}}\right) = 5203.14/\bar{t}'$$

$$\sigma_1 = \sigma_f = \sqrt{\left(\frac{\partial\bar{f}}{\partial\bar{P}}\right)^2\sigma_P^2 + \left(\frac{\partial\bar{f}}{\partial\bar{R}}\right)^2\sigma_R^2 + \left(\frac{\partial\bar{f}}{\partial\bar{t}'}\right)^2\sigma_{t'}^2 + \left(\frac{\partial\bar{f}}{\partial\bar{\alpha}}\right)^2\sigma_\alpha^2} = 247.3/\bar{t}'$$

式中：

$$\frac{\partial\bar{f}}{\partial\bar{P}} = \frac{\bar{R}}{2\bar{t}'}\left(3 + \frac{1-K}{K\cos^2\bar{\alpha}}\right) = \frac{125.38}{\bar{t}'};$$

$$\frac{\partial\bar{f}}{\partial\bar{R}} = \frac{\bar{P}}{2\bar{t}'}\left(3 + \frac{1-K}{K\cos^2\bar{\alpha}}\right) = \frac{69.37}{\bar{t}'};$$

$$\frac{\partial\bar{f}}{\partial\bar{t}'} = -\frac{\bar{P}\bar{R}}{2\bar{t}'^2}\left(3 + \frac{1-K}{K\cos^2\bar{\alpha}}\right) = \frac{-5203.14}{\bar{t}'^2};$$

$$\frac{\partial\bar{f}}{\partial\bar{\alpha}} = \frac{\bar{P}\bar{R}}{2\bar{t}'}\left(\frac{2(1-K)}{K}\cdot\frac{\sin\bar{\alpha}}{\cos^3\bar{\alpha}}\right) = \frac{498.4}{\bar{t}'}.$$

由可靠度系数 $R = 0.99999$，查得标准正态分布函数表 $\beta = 4.265$。

由式(3)得，$\beta = \dfrac{\mu_2 - \mu_1}{\sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_1^2}} = 4.265$；

由上式解得，$\bar{t}' = 2.32$ mm；

纤维缠绕层总厚度：$t' = \bar{t}' \pm 3\sigma_{t'} = (2.32 \pm 0.084)$ mm。

3.2.3　增强材料纤维强度的随机分布对 GFWRP 压力容器可靠性设计的影响

为此目的，另选用同种类玻璃纤维，通过实验得到其不同的强度随机分布。按前例相同设计(参数)与计算过程进行压力容器的可靠性设计，其计算结果及与上节计算结果的对比如表 3 所示。

表 3　纤维强度随机分布不同对 GFWRP 压力容器的可靠性设计结果影响对比

Table 3　Comparison between the reliability design results of GFWRP pressure vessel with different statistics of fiber strength

Mean value of fiber strength/ MPa	Coefficient of variance (C_v) of fiber strength/ %	Standard deviation of fiber strength/ MPa	Fiber thickness designed by reliability design/ mm	Fiber thickness designed by safety factor design/ mm
2560	4.22	108	2.32 ±0.084	4.017
2890	8.58	248	2.93 ±0.105	3.559

表 4　纤维强度离散系数不同的 GFWRP 压力容器的可靠性设计结果

Table 4　Reliability design results of GFWRP pressure vessels with different C_v of fiber strength

Fiber thickness designed by reliability design/ mm	2.18 ±0.078	2.23 ±0.080	2.32 ±0.084	2.42 ±0.087	2.54 ±0.091
Mean value of fiber strength/ MPa	2560	2560	2560	2560	2560
C_v of fiber strength/ %	1.98	3.01	4.22	5.16	6.25

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

可以看出，尽管所选用玻璃纤维强度均值增大，但由于其离散程度高，致使 GFWRP 压力容器可靠性设计厚度比前者大。

若纤维强度均值相同，但离散程度发生变化，其它设计参数分布与设计条件均与以上算例相同，对 GFWRP 压力容器进行可靠性设计，所得结果列于表 4 中。

4　结　论

(1) 由可靠性设计得到的 GFWRP 压力容器纤维缠绕层总厚度与实验结果较为吻合，且明显小于由传统安全系数法设计所得结果，表明对 GFWRP 压力容器结构进行可靠性设计可节省材料，更重要的是其在达到压力容器可靠度要求的同时，将各设计变量的随机分布特征与压力容器的结构设计有机结合，实现安全性与经济性的有效统一。

(2) 通过比较不同纤维强度随机分布的可靠性设计结果，可知纤维强度的离散程度是 GFWRP 压力容器可靠性设计的重要影响因素，绝不可忽视。仅追求材料的高强度(均值)而忽视其离散系数，效果反而不理想。传统安全系数设计法只考虑纤维强度均值大小而无视纤维强度随机分布规律对纤维缠绕压力容器结构抗力的影响，是不合理的。

(3) 对于实际工程应用的 FWRP 压力容器而言，如何将可靠性的指标合理分配到各个影响因素中去，使得设计更趋合理，还有待于进一步研究与探讨；由于可靠性设计是建立在实验基础之上的，需要知道各变量的分布特征值，因此需要足够多的设计数据以供参考，有关统计资料还需进一步完善。

参考文献：

[1] Cederberg V R B, Schimenti A R, Jack D. Design and analysis techniques for composite pressurant tankage with plastically operating aluminum liners, AIAA-90-2345 [R]. New York: AIAA, 1990.

[2] Cederberg V R B, Schimenti A R, Jack D. Fatigue analysis techniques for composite tankage with plastically operating aluminum liners, AIAA-91-1974 [R]. New York: AIAA, 1991.

[3] Bloom J M, Malik S N. Procedure for the assessment of the integrity of nuclear pressure vessels and piping containing defects, EPRI Report NP-2431 [R]. 1982.

[4] Kumar V, German M D, Shih C F. 弹塑性断裂分析工程方法, EPRI 报告 NP-1931 [R]. 周洪范, 译. 北京: 国防工业出版社, 1985.

[5] Provan J W. 概率断裂力学和可靠性 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1989: 194-248.

[6] Nilsson F. Reliability assessment by aid of probabilistic fracture mechanics [J]. Int J Pres Ves & Piping, 1993(54): 341-352.

[7] 压力容器缺陷评定规范编制组. CVDA-1984 压力容器缺陷评定规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1984.

[8] 王志文, 李培宁, 雷月葆, 等. 我国压力容器通用失效评定曲线的建议 [C] // 中国核学会第 8 届全国反应堆结构力学会议论文汇编. 北京: 原子能出版社, 1994: 289-294.

[9] 赵亚凡, 宋明大. 可靠性方法在压力容器设计中的应用及探讨 [J]. 化工设计, 2002, 12(5): 24-26.
Zhao Yafan, Song Mingda. Application and research of reliability procedure in the design of pressure vessels [J]. Chemical Engineering Design, 2002, 12(5): 24-26.

[10] 肖芳淳. 复合材料圆柱形压力容器价值可靠性设计的研究 [J]. 强度与环境, 1997(2): 57-60.
Xiao Fangchun. Study for value reliability design of composite cylinder pressure vessels [J]. Structure & Environment Engineering, 1997(2): 57-60.

[11] 晏　飞, 戴德海, 朱智春. 纤维缠绕压力容器结构有限元分析技术 [J]. 上海航天, 2003(6): 33-36.
Yan Fei, Dai Dehai, Zhu Zhichun. Finite element analysis technology of filament wound pressure vessel structures [J]. Aerospace Shanghai, 2003(6): 33-36.

[12] 牟致忠. 机械零件可靠性分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 110-159.

[13] 哈尔滨建筑工程学院. 玻璃钢结构分析与设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981: 241.

[14] 李顺林, 王兴业. 复合材料结构设计基础 [M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1993: 211.

[15] GJB1026A-1999 固体火箭发动机通用规范 [S].

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net