

基于响应面法的复合材料气瓶含缺陷内胆 屈曲可靠性分析

张国^{*1}, 刘宇琛¹, 张笑闻³, 薛姝楠¹, 任明法^{1,2}, 李刚^{1,2}

(1. 大连理工大学 工程力学系, 大连 116024; 2. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024;

3. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 大连 116024)

摘要:具有初始缺陷的内胆会对复合材料气瓶的服役性能造成严重危害, 本文基于响应面法, 提出了一种复合材料气瓶含初始缺陷内胆屈曲的可靠性分析方法。建立了铝合金 6061 内胆的 T700/环氧复合材料气瓶的三维有限元模型, 实现了复合材料气瓶内胆的收缩屈曲分析。基于响应面方法, 构造了复合材料气瓶极限状态方程, 并假设结构中的随机变量服从高斯分布, 开展了考虑几何尺寸和凹陷尺寸变化的气瓶结构可靠性分析, 结果表明, 在气瓶内胆加工过程中, 直筒段厚度的离散性会严重影响气瓶结构的可靠性; 直筒段半径、直筒段长度、封头段半径和封头段厚度在通用加工误差内对气瓶结构的可靠性影响较小; 对本文定型气瓶, 当内胆表面的凹陷半径超过 10 mm, 且深度超过 2 mm 时, 气瓶结构的可靠性会严重降低。

关键词:气瓶; 金属内胆; 缺陷; 可靠性

中图分类号: O213.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2023)02-0175-06

1 引言

含金属内胆的纤维缠绕复合材料气瓶(COPV)作为特种高压储存装置, 在航空、车辆、船舶和轨道交通等领域上的应用日趋广泛。为了保证气瓶在服役期间的安全, 需要在设计阶段充分考虑其可靠性。在生产制造阶段, 气瓶内胆部件会不可避免地出现缺陷, 如初始几何缺陷、边界条件、预屈曲变形、材料不均匀性和不连续性裂纹^[1,2]。这些缺陷将显著降低气瓶内胆的屈曲强度, 导致复合材料气瓶在服役期间早期失效。因此, 针对含缺陷金属内胆的复合材料气瓶, 提出准确的内胆屈曲强度可靠性分析方法对 COPV 的高效设计与安全应用具有重要意义。

气瓶内胆的几何缺陷敏感性是导致其屈曲载荷的预测值与实验值存在差异的主要原因。为了解决这个问题, 国外工业界普遍采用由美国宇航局空间飞行器结构指南(NASA SP-8007)和设计建议的敲落因子方法^[3]。但随着新材料和技术的出现, Victor 等^[4]认为该准则已经过时, 并提出了新的含几何缺陷气瓶屈曲荷载下界的预测方法。

Hilbur-ger^[5]提出了一种新的设计方法, 即单扰动载荷法(SPLA), 利用最差缺陷来更新复合材料结构几何缺陷敏感的经典破坏因子。SPLA 法认为横向施加的扰动载荷是直接影响设计载荷的最大缺陷, 在分析壳体结构的缺陷敏感性方面很重要^[6,7]。

可靠性是结构设计中的一个基本概念, 考虑了载荷和材料特性的不确定性, 结构可靠性对于确定结构是否安全至关重要。Choi 等^[8]采用基于响应面法(RSM)的时变结构可靠度分析方法进行了可靠度分析, 分析了板加筋柱形气瓶结构可靠性随时间的变化情况。Jin 等^[9]提出并试验了一种新型的非充气钢瓶完整性泄压装置。采用基于材料特性和爆破压力的可靠性方法对其性能进行评估, 对爆破压力的容限进行了百分比分析, 并建立了概率模型。Shi 等^[10]针对含输入随机变量和区间随机变量的动态结构的安全性问题, 通过构造二阶极限状态函数, 建立了一种新的动态可靠度分析模型。理论分析表明, 提出的可靠度等于实际可靠度的下界, 为动力结构的安全性度量提供了一种有效的方法。Gupta 等^[11]对 ASME 锅炉和气瓶(BPV)规范第 III 节规定的管道设计方程的可靠性水平评估进行了探索性研究。利用改进的一阶可靠性方法(AFORM), 针对表征不同失效准则的性能函数, 对直管段的可靠性水平进行了概率分析。由于闭式可靠性表达式的复杂性, 一般采用蒙特卡罗仿真

收稿日期: 2022-04-24; 修改稿收到日期: 2022-06-08.

基金项目: 国家自然科学基金(12272078)资助项目.

作者简介: 张国^{*} (1973-), 男, 博士, 教授级高级工程师
(E-mail: zhangguo@ctic.cn).

方法对闭式可靠性进行评估。

本文使用基于双向均匀载荷下薄板的临界屈曲理论,考虑缠绕层影响的含凹陷金属内胆的屈曲判据,建立了有效的含缺陷金属内胆 COPV 屈曲分析方法。针对实际制造过程中可能出现的内胆凹陷缺陷形式,采用响应面函数代替实际结构的极限状态方程,进一步建立了高效的含缺陷金属内胆 COPV 可靠性分析方法。最后,基于该方法研究了复合材料气瓶内胆的几何尺寸以及凹陷尺寸因素对薄壁金属内胆屈曲载荷的影响规律。

2 含初始缺陷内胆的气瓶结构可靠性分析方法

2.1 分析流程

复合材料气瓶含初始缺陷内胆屈曲载荷可靠性分析流程如图 1 所示。

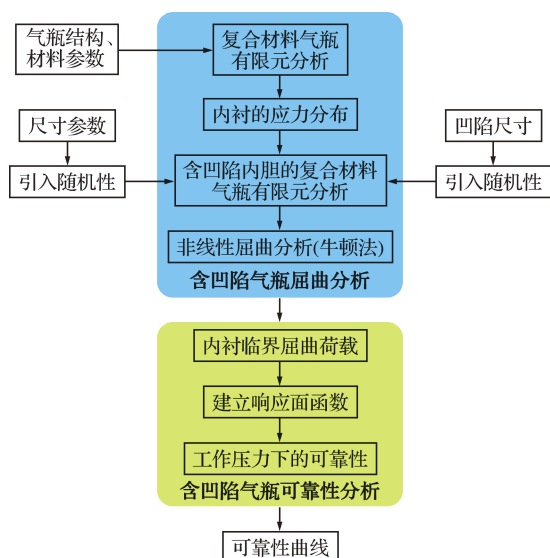


图 1 含缺陷气瓶的屈曲载荷可靠性分析流程

Fig. 1 Flow chart of buckling load reliability analysis of pressure vessels with defects

(1) 建立含金属内胆的柱形复合材料气瓶的三维有限元模型,计算内胆的应力分布,提取直筒段所有节点的轴向应力和环向应力,并在厚度方向上积分,计算内胆的面内压力。

(2) 根据凹陷轮廓修改内胆局部的节点坐标,建立含凹陷内胆的三维有限元模型,对其进行非线性屈曲分析,确定临界屈曲载荷。

(3) 保持凹陷尺寸和深度不变,分别选取气瓶内胆的半径 R_0 、长度 H_0 、厚度 T_0 和封头段的半径 R_1 、厚度 T_1 作为随机变量,假设其满足独立正态分布,计算在不同工作压力下的失效概率,绘制失效曲线。

(4) 保持气瓶尺寸不变,分别选取凹陷尺寸 R 和深度 T 作为随机变量,假设其满足独立正态分布,计算在不同工作压力下的失效概率,绘制失效曲线。

2.2 非线性屈曲分析

非线性屈曲分析是逐步增加有限元模型荷载,求解结构的临界屈曲载荷。主要方法为纯增量法和牛顿法^[12]。纯增量法中的荷载是在每个荷载步内增加,在增量步计算后再计算结构的总刚度矩阵,误差由此逐步累积。而牛顿法可以控制每个荷载对应的增量结果的误差在一定范围内,先计算单元应力和外荷载的插值,用非平衡荷载线性求解,并判断其收敛性,若不收敛,则重新估算其非平衡荷载,修改结构刚度阵以求新解,循环上述过程,直至计算结果收敛。

牛顿法不仅可以考虑缠绕层与内胆的接触以及内胆的弹塑性等非线性因素,还可以考虑加载历程和初始凹陷等作用。本文采用牛顿法对复合材料压力容器含凹陷的金属内胆进行非线性屈曲分析,获得其临界屈曲载荷。

2.3 响应面函数方法

对于复合材料气瓶等复杂结构的函数方程,采用响应面拟合函数来代替实际的结构极限状态方程,计算方法如下^[13]。

(1) 选用响应面函数表达随机变量与输出变量关系。

(2) 求解有限元模型并选取样本点。

(3) 构造权系数矩阵 W 。

(4) 通过最小二乘法求解响应面函数。

2.4 结构可靠度计算

假设结构中的基本随机变量为 $X = [X_1, X_2, \dots, X_3]^T$, 满足独立正态分布,则结构的失效概率表示为

$$P_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-\mu_z}{\sigma_z}\right)^2\right] dz \quad (1)$$

式中 μ_z 和 σ_z 为 Z 的平均值和方差,可靠度指标可表示为

$$\beta = \mu_z / \sigma_z \quad (2)$$

3 算 例

3.1 计算模型

考虑气瓶直筒段半径为 200 mm,长度为 862 mm,厚度为 0.8 mm,封头段半径为 200 mm,厚度为 0.8 mm,管嘴内径为 28 mm,接嘴厚度为 12 mm,封

头肩部距接嘴顶端轴向距离为 207 mm^[12]。复合材料有 54 层,厚 10.8 mm,缠绕方式为 $[\pm 90_2, \pm 14, \pm 21_2, \pm 90_2, \pm 25, \pm 29, \pm 36, \pm 90_2, \pm 42, \pm 90_2, \pm 14, \pm 21, \pm 90_2, \pm 25, \pm 29, \pm 36, \pm 90_2, \pm 42, \pm 14, \pm 90]$ 。

内胆为 6061 铝合金,选用双线性塑性本构模型,复合材料层为 T700/Epoxy。金属内胆采用 20 节点实体单元来划分;复合材料缠绕层采用 8 节点壳单元来模拟,建立三维有限元模型求解,如图 2 所示(为 1/2 对称有限元模型)。用有限元软件 ANSYS 计算得到各个样本点的临界屈曲荷载及自紧后的轴向和环向应力,代入 MATLAB 中进行可靠性分析。



图 2 1/2 气瓶有限元模型

Fig. 2 1/2 finite element model of pressure vessel

3.2 尺寸变化对气瓶失效概率的影响

假设凹陷为半径 10 mm 和深 1 mm 的半球形,位于直筒段中部。对直筒段半径 R_0 、直筒段长度 H_0 、直筒段厚度 T_0 和封头段半径 R_1 、封头段厚度 T_1 引入随机性,变异系数分别取 0.1%,0.3%和 0.5%。得到 5 个尺寸参数变化对应的失效概率曲线如图 3 所示。当某工作压力下气瓶失效概率为 0.01% 时,即该工作压力下气瓶可靠度为 99.99%;同理,当某工作压力下气瓶失效概率为 99.99% 时,即该工作压力下气瓶可靠度为 0.01%。99.99% 和 0.01% 可靠度对应的工作压力列入表 1。

由表 1 可知, T_1 的变异系数在 0.1%~0.5% 范围内变化时,气瓶结构的可靠度变化幅度无变化; R_0 , H_0 和 R_1 的变异系数在 0.1%~0.5% 范围内变化时,气瓶结构的可靠度变化幅度在 1%~3%; T_0 的变异系数在 0.1%~0.5% 范围内变化时,气瓶结构的可靠度变化幅度在 15% 以上。这就意味着,在气瓶内胆加工过程中,直筒段厚度需要保证很高的加工精度,其尺寸离散性需要保证在 0.3% 以内,直筒段半径、直筒段长度和封头段半径需要保证一定的加工精度,保证离散性在 0.5% 以内,但由于这类尺寸较大,0.5% 的离散性通常大于其加工公差绝对值,因此,其在通用加工误差内对气瓶的可靠性影响较小。

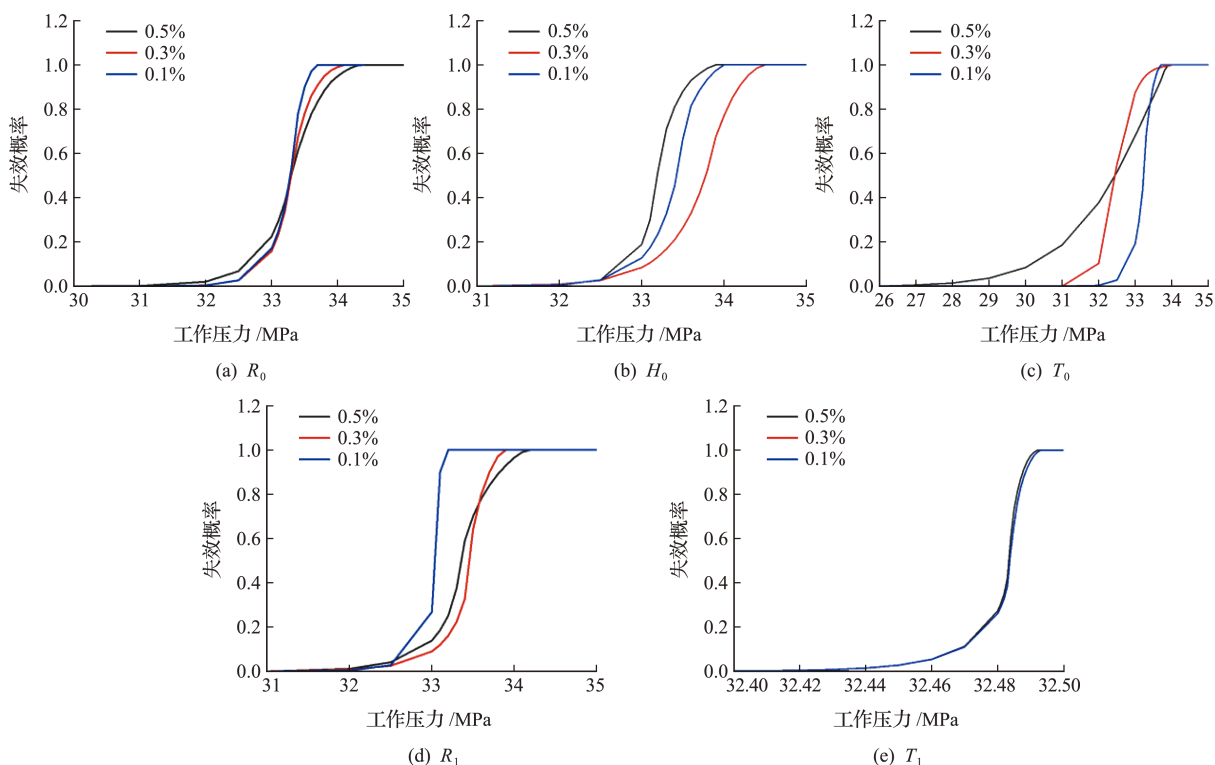


图 3 R_0 , H_0 , T_0 , R_1 和 T_1 的不同变异系数下的失效概率曲线

Fig. 3 Partial failure probability curve under different coefficient of variation of R_0 , H_0 , T_0 , R_1 , T_1 , respectively

表 1 R_0, H_0, T_0, R_1 和 T_1 不同变异系数下的可靠度变化幅度

Tab. 1 Variation range of reliability under different variation coefficients of R_0, H_0, T_0, R_1 and T_1

参数	变异系数	工作压力/MPa			
		99.99%可靠度	相对变化幅度	0.01%可靠度	相对变化幅度
R_0	0.1%	31.2	—	33.7	—
	0.3%	31.1	−0.32%	34.1	1.19%
	0.5%	30.6	−1.92%	34.4	2.08%
H_0	0.1%	31.2	—	34.5	—
	0.3%	31.7	1.60%	34.0	−1.45%
	0.5%	31.8	1.92%	33.9	−1.74%
T_0	0.1%	31.2	—	33.7	—
	0.3%	31.1	−0.32%	34.0	0.89%
	0.5%	26.0	−16.67%	33.9	0.59%
R_1	0.1%	31.8	—	33.2	—
	0.3%	31.6	−0.63%	33.9	2.11%
	0.5%	31.3	−1.57%	34.2	3.01%
T_1	0.1%	32.4	—	32.5	—
	0.3%	32.4	0.00%	32.5	0.00%
	0.5%	32.4	0.00%	32.5	0.00%

3.3 凹陷尺寸对气瓶失效概率的影响

保持气瓶直筒段的半径、长度、厚度和封头段的半径和厚度不变,变化凹陷半径和深度。计算包

含不同凹陷半径 R 和凹陷深度 T 的气瓶失效概率,绘制失效概率曲线如图 4 所示。99.99% 和 0.01% 可靠度对应的工作压力列入表 2。

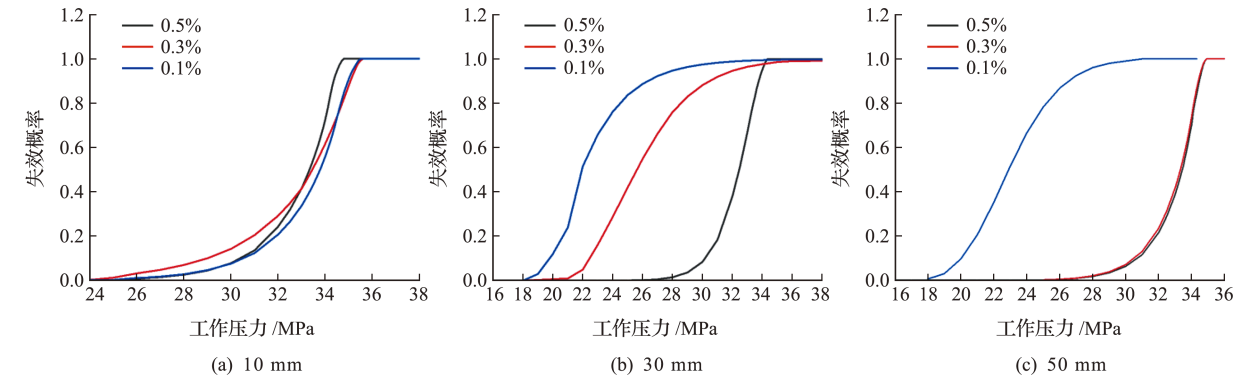


图 4 凹陷半径为 10 mm、30 mm 和 50mm 时凹陷深度对失效概率的影响关系
Fig. 4 Effect of different depression depths on failure probability when the depression radius is 10 mm, 30 mm and 50 mm

表 2 不同凹陷半径和凹陷深度下气瓶可靠度变化幅度

Tab. 2 Variation range of FWPV reliability under different depression radius and depression depth

凹陷半径 /mm	凹陷深度 /mm	工作压力/MPa			
		99.99%可靠度	相对变化幅度	0.01%可靠度	相对变化幅度
10	1	25.4	—	34.8	—
	2	24.2	−4.72%	35.6	2.30%
	3	25.6	0.79%	35.8	2.87%
30	1	25.6	—	34.8	—
	2	19.7	−23.05%	37.6	8.05%
	3	17.9	−30.08%	36.7	5.46%
50	1	24.6	—	34.9	—
	2	24.6	0.00%	34.9	0.00%
	3	17.3	−29.67%	30.3	−13.18%

由表 2 可知,凹陷半径为 10 mm 时,凹陷深度的变化对气瓶可靠度影响较小,其可靠度变化幅度在 5% 以内;凹陷半径为 30 mm 和 50 mm 时,凹陷深度的变化对气瓶结构可靠度有着较为显著的影响,其可靠度变化幅度最大值在 25% 以上。

4 结 论

本文通过构建复合材料气瓶缠绕有限元分析模型,使用了含内胆的复合材料气瓶的三维有限元模型,实现了复合材料气瓶内胆的收缩屈曲分析。针对实际制造过程中可能出现的内胆凹陷缺陷形式,通过构造响应面函数代替实际的结构极限状态方程,建立了高效的含缺陷金属内胆复合材料气瓶结构可靠性分析方法,研究了气瓶尺寸以及凹陷尺寸等因素对薄壁金属内胆屈曲载荷的影响规律。结果表明,在气瓶内胆加工过程中,直筒段厚度的离散性会严重影响气瓶结构的可靠性;直筒段半径、直筒段长度、封头段半径和封头段厚度在通用加工误差内对气瓶的可靠性影响较小。针对本文定型气瓶,当凹陷半径超过 10 mm 且凹陷深度超过 2 mm 时,气瓶结构的可靠性会严重降低。

参考文献(References):

- [1] Teng J G, Rotter J M. *Buckling of Thin Metal Shells* [M]. CRC Press, 2003.
- [2] Wunderlich W, Albertin U. Analysis and load carrying behaviour of imperfection sensitive shells[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2000, **47**(1-3): 255-273.
- [3] Ismail M S, bin Baharudin B T H T, Talib Z, et al. Improvement of cylinder buckling knockdown factor through imperfection sensitivity[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, **845**: 226-230.
- [4] Victor M C, Hinsch S, Jesús G G, et al. Effect of initial geometrical imperfection on the buckling load of cylindrical sandwich shells under axial compression [A]. 13th European Conference on Spacecraft Structures, Materials & Environmental Testing[C]. 2014.
- [5] Hilburger M. Developing the next generation shell buckling design factors and technologies [A]. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference [C]. 2012.
- [6] Hühne C, Rolfes R, Breitbach E, et al. Robust design of composite cylindrical shells under axial compression—Simulation and validation [J]. *Thin-Walled Structures*, 2008, **46**(7-9): 947-962.
- [7] Castro S G P, Zimmermann R, Arbelo M A, et al. Geometric imperfections and lower-bound methods used to calculate knock-down factors for axially compressed composite cylindrical shells[J]. *Thin-Walled Structures*, 2014, **74**: 118-132.
- [8] Choi Y, Ahn J, Chang D. Time-dependent reliability analysis of plate-stiffened prismatic pressure vessel with corrosion [J]. *Mathematics*, 2021, **9**(13): 1544.
- [9] Jin W Y, Li Y B, Zhuo M J, et al. Reliability study on a new integrity pressure relief device in nonrefillable steel gas cylinder [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2018, **140**(5): 051602.
- [10] Shi Y, Lu Z Z. Dynamic reliability analysis model for structure with both random and interval uncertainties [J]. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2019, **15**(3): 521-537.
- [11] Gupta A, Saigal R K, Ryu Y. Performance-based reliability of ASME piping design equations[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2017, **139**(3): 031202.
- [12] 张 国, 朱海洋, 蔡雅琪, 等. 复合材料气瓶含凹陷内胆屈曲的有限元分析[J]. *复合材料学报*, 2022, **39**(3): 1343-1352. (ZHANG Guo, ZHU Hai-yang, CAI Ya-qi, et al. Finite element analysis of the buckling of the liner of composite pressure vessel with depression [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, **39**(3): 1343-1352. (in Chinese))
- [13] 林 森. 基于响应面方法的复合材料压力容器可靠性分析[D]. 大连理工大学, 2019. (LIN Sen. Reliability Analysis of Composite Pressure Vessels Based on Response Surface Method [D]. Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese))

Buckling reliability analysis of liner with initial defects on composite overwrapped pressure vessel based on response surface method

ZHANG Guo^{*1}, LIU Yu-chen¹, ZHANG Xiao-wen³,
XUE Shu-nan¹, REN Ming-fa^{1,2}, LI Gang^{1,2}

(1. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The initial defects of the liner will cause serious harm to the service performance of the composite overwrapped pressure vessel (COPV). In this paper, a reliability analysis method for buckling of liner with initial defects of a COPV is proposed based on response surface method. The three-dimensional finite element model of a T700 carbon fiber/epoxy resin COPV with an aluminum alloy 6061 liner is established, and realize the shrinkage buckling analysis of the liner of COPV is realized. Based on the response surface method, the limit state equation of the COPV is constructed. Assuming that the random variables in the structure obey Gaussian distribution, the reliability analysis of the COPV considering the changes of geometric size and depression size is carried out. The results show that, during the processing, the dispersion of the thickness of the cylinder will seriously affect the reliability of the COPV; the radius of the cylinder, the length of the cylinder, the radius of the dome and the thickness of the dome have little influence on the reliability of the pressure vessel within the general processing error. For the type of COPV in this paper, when the depression radius exceeds 10mm and the depression depth exceeds 2mm, the reliability of the pressure vessel will be significantly reduced.

Key words: pressure vessel; metal liner; depression; reliability

引用本文/Cite this paper:

张 国, 刘宇琛, 张笑闻, 等. 基于响应面法的复合材料气瓶含缺陷内胆屈曲可靠性分析[J]. 计算力学学报, 2023, **40**(2): 175-180.

ZHANG Guo, LIU Yu-chen, ZHANG Xiao-wen, et al. Buckling reliability analysis of liner with initial defects on composite overwrapped pressure vessel based on response surface method[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2023, **40**(2): 175-180.