

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.03.003

# 含缺陷压力容器的概率失效分析研究进展

师俊平, 肖志艳, 曹小杉, 胡义锋

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 不确定性因素的统计模型和失效概率的计算方法是解决含缺陷压力容器概率断裂力学分析的重要环节。本文对以概率断裂力学理论为基础的各种不同工况下含缺陷压力容器失效分析和安全可靠性的研究现状进行了综述,总结了材料强度、断裂韧性、温度、缺陷尺寸及检出率等不确定性因素的常用分布特征,归纳了常用压力容器失效概率的计算方法,并进一步分析了失效概率的三种计算方法——直接解析积分法、近似法和数值模拟法的特征。本文不但提供了解决该领域内工程问题最新的方法,而且指出了目前面临的理论挑战。

**关键词:** 压力容器; 概率断裂力学; 失效概率

**中图分类号:** O346.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2017)03-0265-05

## Review on failure analysis of pressure vessels containing defects based on probabilistic fracture mechanics

SHI Junping, XIAO Zhiyan, CAO Xiaoshan, HU Yifeng

(School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The statistical model and the evaluation method of the failure probability play a key role in the probability fracture mechanics analysis of pressure vessels containing defects. In this paper, a survey is conducted on the recent progress of the failure analysis and safety reliability assessment of pressure vessels containing defects under different conditions in terms of the probabilistic fracture mechanics. With the review of statistical characteristics of material strength, toughness, temperatures, defect scales, detection rate, and other uncertainty factors, the frequently used evaluation methods of failure probability for pressure vessels are surveyed. Furthermore, three evaluation methods, namely, directly analytic integral method, approximate method and numerical simulation method, are analyzed in details. It not only provides some feasible methods for handling practical engineering problems, but also proposes some challenging theoretical problems in this field.

**Key words:** pressure vessels; probabilistic fracture mechanics; failure probability

压力容器和储氢罐广泛应用于核能、石油化工等领域,并正在向大型化、高强度、严工况的方向发展,工作环境更加复杂,在役压力容器的安全日益引起人们的关注。压力容器在其服役的过程中,不可避免地存在着不同程度的缺陷,如焊接技术本身固有缺点(焊接应力与变形、瞬间热应力和残余应力及变形等)、焊接制造中的各种缺陷(气孔、加杂、未焊透、裂纹等等)以及材料冶金(位错、微裂纹)、容器制造的缺陷(表面裂纹等)都可能导致结构局部开裂或整体破坏,因此进行压力容器安全性评定非常

必要。

## 1 国内外研究现状

随着科技水平和人类认知水平的提高,考虑到很多结构完整性的不确定性因素,含缺陷压力容器的概率评定方法受到广泛的关注。含缺陷压力容器的概率评定方法依据概率断裂力学分析,考虑材料的机械性能、载荷工况、缺陷分布(包括焊接、制造、使用过程中产生的裂纹等)和温度效应等不确定性因素,建立概率分析模型,采用数值模拟等方法计算

**收稿日期:** 2017-01-03

**基金项目:** 国家自然科学基金联合项目(U1630144)

**作者简介:** 师俊平,男,教授,博导,博士,研究方向为断裂理论及其工程应用。E-mail:shijp@xaut.edu.cn

压力容器的失效概率,并与压力容器的可接受概率进行比较。

从20世纪七、八十年代开始,针对压力容器的概率失效分析问题,国外研究者已经开发出一些可靠的分析程序,如OCA-P、VISA-II等。近些年,用到较多的有概率断裂力学分析程序FAVOR(Fracture Analysis of Vessel-Oak Ridge)<sup>[1,2]</sup>、PRAISE程序<sup>[3]</sup>等,也有许多研究者选用MATLAB、Visual C++实现数值模拟,进行概率失效分析。

国外研究者对含缺陷压力容器的概率评定方法及结构安全可靠性评定进行了大量研究,取得了不少成果。Katsuyuki Shibata<sup>[4]</sup>等基于带缺陷结构的完整性评定标准(R6)研究了压力容器上裂纹的扩展过程,运用弹塑性断裂准则得到J-R阻力曲线图,给出了压力容器在承压热冲击下,裂纹尖端断裂韧性和初始裂纹的几何尺寸。Li<sup>[5]</sup>等也对承压热冲击下的压力容器进行了分析,给出了PASCAL概率断裂力学分析程序,运用改进的Monte-Carlo数值模拟方法,估算了压力容器上启裂条件概率和失效条件概率,且与前人的研究成果进行对比,证实了此分析程序的有效性。另外,Kanto<sup>[6]</sup>等对承压热冲击下反应堆压力容器的应力和温度进行了确定性分析和概率分析,讨论了两种分析结果之间的差异。Qian<sup>[7]</sup>等运用确定性方法和概率方法分析热冲击下核反应堆容器的裂纹萌生和破坏行为,研究表明概率方法所得结论与实际吻合更好。近几年,除了对承压热冲击下的压力容器进行概率分析,研究者还对其他载荷工况下的压力容器进行了大量研究。Huang<sup>[8]</sup>等对低温超压下沸水堆压力容器进行了概率断裂分析。基于Monte-Carlo法,采用FAVOR计算了压力容器的失效概率。Park<sup>[9]</sup>等计算了低温超压和冷却瞬态时反应堆压力容器的失效概率,讨论了不确定性因素对敏感性分析的影响。Sandvik<sup>[10]</sup>等建立了在拉伸载荷作用下,含表面裂纹管道的三维有限元模型,基于一次或二次可靠度法,讨论了裂纹尺寸、载荷工况等对裂纹张开位移的影响。Dirgantara<sup>[11]</sup>等对一个内部有多个表面裂纹的圆柱形压力容器进行了概率断裂力学分析,预测了压力容器的使用寿命,确定了在单轴载荷作用下,多裂纹结构的应力强度因子,分析了多裂纹相互影响的失效概率。Onizawa<sup>[12]</sup>等运用改进的PASCAL程序,分析了压力容器堆焊层处残余应力的分布情况及其对断裂概率的影响,并估算了焊接处应力强度因子和压力容器的失效条件概率。

国内对压力容器的可靠性评估始于20世纪80

年代,至今也有不少研究成果。近些年,国内研究者大都采用Monte-Carlo数值模拟法,对各种不同载荷工况下的含缺陷压力容器进行概率分析,在压力容器的可靠性分析中取得了一定的进展。左尚志<sup>[13]</sup>等考虑到R6安全失效评定中因素的不确定性,提出了安全评定中概率分析的新思路,可以更准确地进行失效概率的评定及安全等级的划分。但是,基于R6安全失效评定的结果一般比较保守。而李曰兵<sup>[14]</sup>等采用R6失效评定图和线弹性 $K_{Ic}$ 准则,基于Monte-Carlo法对含周向内表面裂纹圆筒体进行了概率分析,讨论了各随机变量对其失效概率的敏感性。分析证明了R6安全失效评定图比起线弹性 $K_{Ic}$ 准则得到的失效概率更高,是一种较保守的评定方法。另外,基于Monte-Carlo数值模拟法,燕秀发<sup>[15]</sup>等考虑到油气管道上的缺陷尺寸、断裂韧性、载荷工况、机械强度等不确定性因素的分布特征,对各缺陷进行了概率失效分析,得到了油气管道上各缺陷的失效概率;刘志伟<sup>[16]</sup>等运用MATLAB软件得到各不确定性因素的随机数,然后根据概率断裂力学评定准则建立功能函数,最终得到承压热冲击下反应堆压力容器的失效概率。任欢<sup>[17]</sup>等分别运用一次二阶矩阵法和Monte-Carlo数值模拟法计算了含凹坑缺陷压力管道的失效概率,并对压力管道进行了可靠性分析和敏感性分析。对比分析的结果表明,在随机变量较多的情况下,选用Monte-Carlo法计算失效概率更具有优势,其得到的解更精确。基于前人的研究成果,Liu J<sup>[18]</sup>等将概率断裂分析方法推广至T型焊接结构,对结构参数的不确定性和卸载过程进行了概率断裂分析,并且进行可靠性分析,讨论了结构的疲劳时效概率。这些研究对于工程应用都提供了较好的参考。

## 2 不确定性因素的统计模型

近年来,含缺陷压力容器的研究主要考虑材料的机械性能、载荷工况、裂纹分布和温度效应影响,它们都不同程度地存在随机性、分散性和不确定性因素。建立概率断裂力学可靠性评定方法,首先要明确各随机变量的分布特征。

大量统计资料表明,材料强度的分布近似服从对数正态分布和正态分布,而断裂韧性<sup>[19]</sup>的分散性比其它机械性能指标要大得多,近似服从三参数Weibull分布、对数正态分布和正态分布。但考虑到实际工程,材料强度一般选用对数正态分布,而断裂韧性选用三参数Weibull分布最佳。Williams<sup>[20]</sup>通过对实际工程中承压热冲击下反应堆压力容器的

研究,选用了三参数 Weibull 分布来描述材料的断裂韧性。Wallin<sup>[21]</sup>运用 Master-Curve 方法描述试验中所得材料的断裂韧性数据,选用三参数 Weibull 分布对断裂韧性进行了统计分析。姜凯华<sup>[22]</sup>等分别利用三参数 Weibull 分布和对数正态分布对材料的断裂韧性进行了统计分析和对比,指出了三参数 Weibull 分布的特点。

含缺陷压力容器的截面应力是由压力容器的内压、温度、各种约束等多种因素的作用而产生的,因此,需将压力和温度作为重要参量。正常工况下压力和温度都是波动的,具有一定的随机性。而目前参考无延性温度作为重要的输入参数之一,通常考虑选用正态分布。

在进行压力容器失效风险分析时,缺陷的状态及不同缺陷对结构强度有很大的影响。缺陷分布<sup>[23]</sup>涉及两个重要的参考量:缺陷尺寸和缺陷的检出率。其中,缺陷的检出率近似服从指数分布<sup>[24]</sup>;缺陷尺寸近似服从正态分布、对数正态分布、Marshall 分布。另外,若只考虑表面裂纹,则裂纹长度一般选用指数分布,裂纹深度一般选用修正过的 Marshall 分布。

### 3 失效概率的计算方法

基于概率断裂力学的压力容器的失效分析中,失效概率的计算是分析问题的关键所在。从概率断裂力学开始被应用于结构的可靠性评估至今,研究者们不断提出和总结出很多方法,大致可分为直接解析积分法、近似法以及模拟法三类。

#### 3.1 直接解析积分法

在压力容器的失效分析中,直接解析积分法适用于压力容器上失效区域相对比较规则的情况,另外,对联合概率密度函数较简单的情况也可通过直接解析积分法来得到失效概率。较常用的积分方法有 Gauss-Hermite 积分公式、Simpson 公式等。贡金鑫<sup>[25]</sup>等通过工程实例验证了 Gauss-Hermite 积分公式的精确性和高效性。

若结构中的随机变量为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 其对应的概率密度函数为  $f_{X_1}(x_1), f_{X_2}(x_2), \dots, f_{X_n}(x_n)$ , 那么结构的失效概率表示为:

$$P(Z < 0) = \int_{Z < 0} \dots \int f_{X_1}(x_1) f_{X_2}(x_2) \dots f_{X_n}(x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (1)$$

式中,  $Z$  表示结构的功能函数。

而  $n$  维 Gauss-Hermite 积分公式为:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} f(u_1, u_2, \dots, u_n) \times$$

$$\exp\left(-\sum_{i=1}^n u_i^2\right) du_1 du_2 \dots du_n \approx$$

$$\sum_{k_1=1}^m \sum_{k_2=1}^m \dots \sum_{k_n=1}^m \prod_{i=1}^n A_{i,k_i} f(u_{1,k_1}, u_{2,k_2}, \dots, u_{n,k_n}) \quad (2)$$

式中,  $u_1, u_2, \dots, u_n$  为积分节点;  $m$  为节点个数;  $A_{i,k_i}$  为积分系数;  $f(u_{1,k_1}, u_{2,k_2}, \dots, u_{n,k_n})$  为被积函数,  $k_i = 1, 2, \dots, m, i = 1, 2, \dots, n$ 。

对比式(1)和式(2),会发现 Gauss-Hermite 积分公式和结构失效概率的表达式不完全相同,不能直接应用 Gauss-Hermite 积分公式。则需要通过等概率变换,把非正态随机变量变为标准正态随机变量,可得到标准正态空间中结构的失效概率为:

$$P = \int_{Z < 0} \dots \int \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}}} \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) dy_1 dy_2 \dots dy_n \quad (3)$$

令  $y_i = \sqrt{2} u_j (j = 1, 2, \dots, n-1)$ , 式(3)变为:

$$P = \int_{Z < 0} \dots \int \frac{1}{\sqrt{2} \pi^{\frac{n}{2}}} \exp\left(-\sum_{j=1}^{n-1} u_j^2 - \frac{1}{2} y_n^2\right) du_1 du_2 \dots du_{n-1} dy_n \quad (4)$$

然后通过极限状态方程将  $y_n$  表示为  $u_1, u_2, \dots, u_{n-1}$  的函数,就可运用式(2) Gauss-Hermite 积分公式来计算结构的失效概率。

#### 3.2 近似法

近似法是通过某种或某些数值方法来近似简化求解问题的功能函数,通过得到可靠度指标,从而计算失效概率。一般来说,近似法因有一定的精度和计算效率,所以受到广泛应用。最常用的近似法是一次或二次可靠度法,此外还有高阶矩法<sup>[26]</sup>、响应面法<sup>[27]</sup>等。

一次可靠度法是将功能函数展开为 Taylor 级数,然后用取级数后的一次项为简化的功能函数来代替原来的非线性功能函数。而二次可靠度法则是将线性近似变为二阶近似。Zhao<sup>[28]</sup>等讨论了应用一次或二次可靠度法解决工程问题时的基本步骤及程序。

采用高阶矩法计算失效概率主要分为两个步骤,首先运用点估计法获得功能函数的前阶矩,然后利用所获得的功能函数的前阶矩计算失效概率。Rahman<sup>[29]</sup>等讨论了利用高阶矩法进行可靠度分析时,计算失效概率的高效性。响应面法的基本思路是将隐含的或者难以确定的复杂功能函数用简单的响应面函数代替。常用的响应面函数形式是基本随机变量的多项式,其中二次多项式最为常用。Bucher<sup>[30]</sup>等利用响应面法对几个工程实例进行分

析,证实了响应面法的简便性。

### 3.3 数值模拟法

目前,国内外研究者计算失效概率较常用的方法是数值模拟法。模拟法对所求解的工程问题没有限制,而且计算精度较高,但精度越高,计算量也越大,所以计算效率也较低。Monte-Carlo法是计算失效概率最常用的模拟方法,该方法首先对随机变量进行大量抽样,然后计算结构的极限状态函数值,在统计分析后得到结构的失效概率。Chen<sup>[31]</sup>等分别利用一次二阶矩阵法(FOSM)和Monte-Carlo法对含缺陷压力容器进行可靠性评估,并对两种方法的计算结果进行了对比。一般来说,在随机变量较多的情况下,通过Monte-Carlo法能够得到精确解,所以常常用其检验其他方法的准确性。但其精度依赖于随机变量的样本数,要想获得较精确的失效概率,就需要有足够多的样本数目。特别是在计算小概率问题时,计算量很大。

Monte-Carlo法引入指示函数 $I_F(x)$ ,而 $f_X(x)$ 为3.1中随机变量空间中的联合概率密度函数,那么结构的失效概率为:

$$P_F = \int \cdots \int_{R_n} I_F(x) f_X(x) dx = E[I_F(x)] \quad (5)$$

其中 $I_F(x) = \begin{cases} 1, & x \in F \\ 0, & x \notin F \end{cases}$ ,  $E$ 为数学期望, $F$ 为失效样本; $R_n$ 为样本空间。

由大数定理可知,失效概率可近似为:

$$\hat{P}_F \approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_F(x) = \frac{N_F}{N} \quad (6)$$

式中, $N_F$ 表示 $N$ 组样本中落在失效区域内的样本数。

为了提高计算效率,许多研究学者便提出了一些改进的Monte-Carlo法,有分层抽样法<sup>[32]</sup>、重要性抽样法<sup>[33]</sup>等。分层抽样法和重要性抽样法都是通过减小失效概率的方差达到提高计算效率的目的。其中,分层抽样是在不改变原本的概率分布的前提下,将抽样区间 $D$ 分成许多个小区间 $D_1, D_2, \dots, D_L$ ,然后在各个小区间进行抽样。这些小区间满足下列关系:

$$\begin{aligned} \bigcup_{l_1=1}^L D_{l_1} &= D \text{ 且 } D_{i_1} \cap D_{j_1} = \emptyset, \\ i_1 \neq j_1; i_1, j_1 &= 1, 2, \dots, L \end{aligned} \quad (7)$$

则有:

$$P_{l_1} = \int_{D_{l_1}} f(x) dx, \quad l_1 = 1, 2, \dots, L \quad (8)$$

式中, $P_{l_1}$ 为第 $l_1$ 个小区间 $D_{l_1}$ 在整个抽样区间中所占的比重,对应的失效概率为:

$$P_{l_1} = P_{l_1} \sum_{l=1}^{N_l} \frac{I(x_l)}{N_l} \quad (9)$$

式中, $x_l$ 表示在区间 $D_l$ 中抽取的第 $l$ 个样本; $N_l$ 为区间 $D_l$ 中的样本数; $I(x_l)$ 为 $x_l$ 对应的指示函数。那么基于分层抽样的失效概率为:

$$\hat{P}_f = \sum_{l_1=1}^L P_{l_1} = \sum_{l_1=1}^L \left[ P_{l_1} \sum_{l=1}^{N_l} \frac{I(x_l)}{N_l} \right] \quad (10)$$

而重要性抽样通过减少抽样次数来提高效率,即改变随机变量的抽样中心,从而增加样本点落入失效域的机会。重要性抽样引入重要抽样函数 $h_X(x)$ 代替原来的概率密度函数,失效概率可表示为:

$$\begin{aligned} P_f &= \int \cdots \int_{R_n} I_F(x) f_X(x) dx = \\ &= \int \cdots \int_{R_n} I_F(x) \frac{f_X(x)}{h_X(x)} h_X(x) dx = E \left[ I_F(x) \frac{f_X(x)}{h_X(x)} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

近似得到:

$$\hat{P}_f = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_F(x) \frac{f_X(x)}{h_X(x)} \quad (12)$$

## 4 结 语

从目前国内外的研究现状可以看出,运用概率断裂力学进行压力容器的失效分析具有一定的优势和实际意义,它弥补了传统断裂力学在解决此类问题时的局限性,未来会得到更广泛的推广和应用,尤其是解决含缺陷压力容器的失效概率等实际工程问题。本文对以概率断裂力学理论为基础的各种不同工况下含缺陷压力容器的失效分析和安全可靠性的研究现状进行了综述;总结了材料强度、断裂韧性、温度、缺陷尺寸及检出率等不确定性因素的常用分布特征,归纳了常用压力容器失效概率的计算方法,并进一步分析了失效概率的三种计算方法——直接解析积分法、近似法和数值模拟法的特征。其中,本文中提到的改进的Monte-Carlo法是解决这类问题的关键,不但应用范围广,而且计算精度高,可以满足实际工程的需求,为压力容器的失效分析提供可靠的依据。

纵观压力容器的概率失效分析的发展历程以及研究现状,我国在这方面的研究工作相对来说比较保守,导致今后的研究工作也具有一定的挑战。而得到符合国产压力容器的参数统计模型和含缺陷压力容器的安全性评定标准或评估准则,是当前压力容器工程发展的主要研究方向。

## 参考文献:

- [1] CHEN B Y, HUANG C C, CHOU H W, et al. Reactor pressure vessel integrity assessment by probabilistic fracture mechanics—a plant specific analysis [J]. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, 2014, 117-118: 64-69.
- [2] CHEN M, LU F, WANG R, et al. The probabilistic structural integrity assessment of reactor pressure vessels under pressurized thermal shock loading [J]. *Nuclear Engineering & Design*, 2015, 294(6): 93-102.
- [3] KATSUYAMA J, ITOH H, LI Y, et al. Benchmark analysis on probabilistic fracture mechanics analysis codes concerning fatigue crack growth in aged piping of nuclear power plants [J]. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, 2014, 117-118: 56-63.
- [4] SHIBATA K, ONIZAWA K, LI Y, et al. Importance of fracture criterion and crack tip material characterization in probabilistic fracture mechanics analysis of an RPV under a pressurized thermal shock [J]. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, 2004, 81(9): 749-756.
- [5] LI Y, KATO D, SHIBATA K, et al. Improvements to a probabilistic fracture mechanics code for evaluating the integrity of a RPV under transient loading [J]. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, 2001, 78(4): 271-282.
- [6] KANTO Y, JHUNG M J, TING K, et al. Summary of international PFM round robin analyses among Asian countries on reactor pressure vessel integrity during pressurized thermal shock [J]. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, 2012, 90-91(1): 46-55.
- [7] QIAN G, NIFFENEGGER M. Deterministic and probabilistic analysis of a reactor pressure vessel subjected to pressurized thermal shocks [J]. *Nuclear Engineering & Design*, 2014, 273(8): 381-395.
- [8] HUANG C C, CHOU H W, CHEN B Y, et al. Probabilistic fracture analysis for boiling water reactor pressure vessels subjected to low temperature over-pressure event [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2010, 43(1): 61-67.
- [9] PARK J S, CHOI Y H, JHUNG M J. Probabilistic fracture mechanics analysis of boiling water reactor vessel for cool-down and low temperature over-pressurization transients [J]. *Nuclear Engineering & Technology*, 2015, 48(2): 545-553.
- [10] SANDVIK A, ØSTBY E, THAULOW C. A probabilistic fracture mechanics model including 3D ductile tearing of bi-axially loaded pipes with surface cracks [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(1): 76-96.
- [11] DIRGANTARA T, WICAKSONO T S, AHMAD T, et al. Probabilistic fracture mechanics analysis of multiple cracks in cylindrical pressure vessel [J]. *Key Engineering Materials*, 2011, 462-463: 1314-1318.
- [12] ONIZAWA K, NISHIKAWA H, ITOH H. Development of probabilistic fracture mechanics analysis codes for reactor pressure vessels and piping considering welding residual stress [J]. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, 2010, 87(1): 2-10.
- [13] 左尚志, 钟群鹏. 以 R6 为基础的概率安全等级评定技术和方法 [J]. *机械工程学报*, 2001, 37(11): 32-35. ZUO Shangzhi, ZHONG Qunpeng. Probabilistic safety grade evaluation techniques and methods based on R6 [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2001, 37(11): 32-35.
- [14] 李曰兵, 金伟娅, 包士毅, 等. 基于概率断裂力学的承压热冲击条件下含周向裂纹圆筒体的结构完整性研究 [J]. *核技术*, 2013, 36(4): 040629-1-6. LI Yuebing, JIN Weiya, BAO Shiyi, et al. Structural integrity study of cylindrical cylinders with circumferential crack under thermal shock condition under probabilistic fracture mechanics [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2013, 36(4): 040629-1-6.
- [15] 燕秀发, 谢禹钧, 戴耀. 基于概率断裂力学的管道失效分析 [J]. *机械设计*, 2004, 21(11): 35-38. YAN Xiufa, XIE Yujun, DAI Yao. Pipe failure analysis based on probabilistic fracture mechanics [J]. *Mechanical Design*, 2004, 21(11): 35-38.
- [16] 刘志伟, 乔红威, 张勇. 反应堆压力容器承压热冲击概率断裂力学分析 [J]. *核动力工程*, 2013, 34(5): 37-40. LIU Zhiwei, QIAO Hongwei, ZHANG Yong. Analysis of thermal shock probabilistic fracture mechanics of pressure vessel under pressure [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2013, 34(5): 37-40.
- [17] 任欢, 王伟. 基于概率断裂力学含凹坑压力管道的安全评定 [J]. *石油化工设备*, 2016, 45(2): 22-27. REN Huan, WANG Wei. Safety assessment of pressure pipelines containing pits based on probabilistic fracture mechanics [J]. *Petro-Chemical Equipment*, 2016, 45(2): 22-27.
- [18] LIU J, QING Q, DENG Y, et al. Fatigue reliability study on T-welded component considering load shedding [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2015, 38(7): 780-788.
- [19] WALLIN K, NEVASMAA P, LAUKKANEN A, et al. Master curve analysis of inhomogeneous ferritic steels [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2004, 71(16): 2329-2346.
- [20] WILLIAMS P T. Weibull statistical models of  $K_{IC}/K_{Ia}$  fracture toughness databases for pressure vessel steels with an application to pressurized thermal shock assessments of nuclear reactor pressure vessels [J]. *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, 2001, 78(2): 165-178.

- 2007,(7): 27-29.
- [11] 王西琴, 高伟, 曾勇. 基于 SD 模型的水生态承载力模拟优化与例证 [J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(5): 1352-1360.  
WANG Xiqin, GAO Wei, ZENG Yong. Methods and case study on water ecological carrying capacity using SD model [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2014, 34(5): 1352-1360.
- [12] MARTIN DE W, Douglas J C. Improved decision-making on irrigation farming in arid zones using a system dynamics model [J]. South African Journal of Science, 2013, 109(11-12): 78-85.
- [13] 邢军, 孙立波. 基于因子分析与模糊综合评判方法的水资源承载力评价 [J]. 节水灌溉, 2014,(4): 52-55.  
XING Jun, SUN Libo. Evaluation of water resources carrying capacity based on factor analysis and fuzzy comprehensive evaluation [J]. Water Saving Irrigation, 2014(4): 52-55.
- [14] 桓颖, 张文静, 王楠. 基于主成分分析的吉林西部地区农业水资源承载力评价 [J]. 长江科学院院报, 2014, 31(9): 11-16.  
HENG Ying, ZHANG Wenjing, WANG Nan. Assessment of the carrying capacity of agricultural water resources in western region of Jilin based on principal component analysis [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(9): 11-16.
- [15] 刘晓君, 付汉良. 基于变权信息熵改进 TOPSIS 法的水资源承载力评价——以陕西省地级城市为例 [J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 187-191.  
LIU Xiaojun, FU Hanliang. Evaluation on water resources carrying capacity based on varibale-weight and entropy-weight methods with improved TOPSIS—A case study of prefecture cities in Shaanxi province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(6): 187-191.
- [16] 付强, 赵小勇. 投影寻踪模型原理及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
(责任编辑 王绪迪)

(上接第 269 页)

- [21] WALLIN K. Master curve analysis of the “Euro” fracture toughness dataset [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69(4): 451-481.
- [22] 姜凯华, 刘长军, 李培宁. 直接由  $K_{IC}/K_{IA} \sim (T-RT-NDT)$  的实测数据统计分析反应堆压力容器用钢断裂韧性值的概率分布 [J]. 压力容器, 2012, 29(3): 6-11.  
JIANG Kaihua, LIU Changjun, LI Peining. Statistical analysis of the probability distribution of the fracture toughness value of reactor pressure vessel using directly measured data from  $K_{IC}/K_{IA} \sim (T-RT-NDT)$  [J]. Pressure Vessel, 2012, 29(3): 6-11.
- [23] DOCTOR S R, SCHUSTER G J, SIMONEN F A. Density and distribution of fabrication flaws in the Shoreham reactor vessel [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 3995: 512-522.
- [24] CRONVALLO, SIMOLA K, MÄNNISTÖ I, et al. A study on the effect of flaw detection probability assumptions on risk reduction achieved by non-destructive inspection [J]. Reliability Engineering System Safety, 2012, 105(6): 90-96.
- [25] 贡金鑫, 陈晓宝, 赵国藩. 结构可靠度计算的 Gauss-Hermite 积分方法 [J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(11): 1625-1629.  
GONG Jinxin, CHEN Xiaobao, ZHAO Guofan. Gauss-Hermite integral method for structural reliability calculation [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2002, 36(11): 1625-1629.
- [26] 张凯, 李刚. 基于改进降维法的可靠度分析 [J]. 计算力学学报, 2011, 28(2): 187-192.  
ZHANG Kai, LI Gang. Reliability analysis based on improved reduced dimension method [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011, 28(2): 187-192.
- [27] GUPTA S, MANOHAR C S. An improved response surface method for the determination of failure probability and importance measures [J]. Structural Safety, 2004, 26(2): 123-139.
- [28] ZHAO Y G, ONO T. A general procedure for first/second-order reliability method (FORM/SORM) [J]. Structural Safety, 1999, 21(2): 95-112.
- [29] RAHMAN S, XU H. A univariate dimension-reduction method for multi-dimensional integration in stochastic mechanics [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2004, 21(4): 393-408.
- [30] BUCHER C, MOST T. A comparison of approximate response functions in structural reliability analysis [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2008, 23(2): 154-163.
- [31] CHEN G, DAI S. Study on the reliability assessment methodology for pressure vessels containing defects [J]. International Journal of Pressure Vessels & Piping, 1996, 69(3): 273-277.
- [32] SONG S, LU Z, QIAO H. Subset simulation for structural reliability sensitivity analysis [J]. Reliability Engineering System Safety, 2009, 94(2): 658-665.
- [33] RUBINSTEIN R Y. Simulation and the Monte-Carlo method [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007.  
(责任编辑 周 蓓)