

压力容器裂纹寿命预测的概率分析方法

杨自春 胡德明 徐宜桂
(海军工程学院)

〔摘要〕 本文在《压力容器缺陷评定规范》^{〔1〕}的基础上,进一步考虑材料性能分散性和使用环境随机性的影响,用概率分析方法对含有裂纹的压力容器进行安全性分析,阐述了其可靠度指标和失效概率的分析计算步骤,并用 Monte-Carlo 方法预测裂纹扩展寿命,从而为正确确定压力容器的运行方式及合理的修理间隔期提供了重要的技术依据。

关键词 概率分析方法 断裂力学 压力容器

1 引言

目前,压力容器缺陷评定是按断裂力学方法进行的,为此,国内外制定出了相应的评定规范,如美国机械工程师学会(ASME)制定的压力容器缺陷评定规范^{〔2〕}、我国的标准规范 CVAD-1984《压力容器缺陷评定规范》等。本文则在这些规范的基础上,进一步考虑材料性能分散性和使用环境随机性对压力容器安全性和裂纹扩展寿命的影响,用基于概率断裂力学的结构可靠性研究方法,对压力容器进行更为准确的可靠性分析。文中以某舰船锅炉汽水联箱为实际算例,给出了定量的可靠度指标、合理的裂纹扩展寿命,为正确决策该汽水联箱的运行方式、维修时间提供重要的技术依据,也是将概率分析方法引入压力容器缺陷评定规范的有益探索。

2 影响压力容器可靠性的各种因素及其统计分布

2.1 压力容器裂纹深度的统计分布

压力容器工作至一定阶段,便可能产生大量的裂纹。这些裂纹的形成可能是由于制造时的原始缺陷,或者由于使用过程中受疲劳、腐蚀等因素所致。裂纹深度是一随机变量,服从一定的统计分布规律。根据对压力容器进行无损探伤所得到的裂纹数据,进行统计分析和分布假设检验(如 K-S 检验等),可以得到在给定显著性水平下的裂纹分布规律。通常,裂纹分布服从对数正态分布、正态分布或威布尔分布。当裂纹服从对数正态分布时,其分布密度函数为:

$$f(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\ln a} \cdot a} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln a - u_{\ln a})^2}{2\sigma_{\ln a}^2}\right) \quad (1)$$

2.2 压力容器裂纹区的应力分布

由于压力容器结构各异,工作环境千差万别,所以其应力分布也不尽相同。本文仅给出高温、高压工作条件下的厚壁圆筒应力计算公式。考虑在内压作用、端部效应、热载荷

收稿时期 1992-01-04

本文联系人 杨自春 男 26 硕士研究生 430033 武汉海军工程学院 306

和残余应力等因素的综合影响,所得应力计算公式为:

$$\sigma = \frac{p}{\zeta^2 - 1} + \frac{6M}{s^2 - 1} + \frac{\alpha E}{1 - \mu} \cdot \frac{V \cdot s^2}{8A} \cdot \frac{(3\zeta^2 - 1)(\zeta^2 - 1) - \zeta^4 \ln \zeta}{(\zeta^2 - 1)(\zeta - 1)^2} + \sigma_4 \quad (2)$$

式中:

P - 压力容器的内压,是一随机变量。依据实际运行工况或使用规程,可求出其均值和方差;

S - 压力容器的壁厚,是一随机变量。依据设计公差或实测数据,可求出其均值和方差;

E - 材料弹性模量,是一随机变量。依据

材料性能实验数据可求出其均值和方差;

V - 压力容器的温升速率,是一随机变量。由实际运行工况测试数据,可求出其均值和方差;

ζ - 压力容器的内外径比, $\zeta = r_{外} / r_{内}$, 是一随机变量。依据设计公差或实测数据,可求出其均值和方差;

A - 热扩散率, $A = \lambda / c\rho$, 其中 λ 为导热率, C 为定压热容, ρ 为密度;

其余有关参数分别为:附加弯矩 M , 导热系数 α , 波桑系数 μ , 残余应力 σ_4 。

按照平均值等于阶矩公式,可得总应力均值 μ_σ 和方差 σ_σ^2 :

$$\mu_\sigma = \frac{\bar{P}}{\zeta^2 - 1} + \frac{6M}{\bar{S}^2 - 1} + \frac{\alpha \bar{E}}{1 - \mu} \cdot \frac{\bar{V} \cdot \bar{S}^2}{8A} \cdot F(\bar{\zeta}) + \sigma_4$$

$$\begin{aligned} \sigma_\sigma^2 = & \frac{1}{\zeta^2 - 1} \cdot \sigma_p + \left(-\frac{12M}{s^3} + \frac{\alpha \bar{E}}{1 - \mu} \cdot \frac{\bar{V} \cdot \bar{S}}{4A} \cdot F(\bar{\zeta}) \right) \cdot \sigma_s + \left(\frac{\alpha}{1 - \mu} \cdot \frac{\bar{V} \cdot \bar{S}^2}{8A} \cdot F(\bar{\zeta}) \right) \cdot \sigma_x \\ & + \left(\frac{\alpha \bar{E}}{1 - \mu} \cdot \frac{\bar{S}^2}{8A} \cdot F(\bar{\zeta}) \right) \cdot \sigma_v + \left(-2 \frac{\bar{\zeta} \cdot \bar{P}}{(\zeta^2 - 1)^2} + \frac{\alpha E}{1 - \mu} \cdot \frac{\bar{V} \cdot \bar{S}^2}{8A} \right. \\ & \left. \cdot \left(2 \frac{(1 - 3\bar{\zeta})}{(\bar{\zeta} - 1)^3} - 4 \frac{\bar{\zeta}^3 (4 \ln \bar{\zeta} - 1)(\bar{\zeta}^2 - 1)(\bar{\zeta} - 1) - 2\bar{\zeta}^4 \ln \bar{\zeta} (2\bar{\zeta}^2 - \bar{\zeta} - 1)}{(\bar{\zeta}^2 - 1)(\bar{\zeta} - 1)^3} \right) \right) \cdot \sigma_\zeta \end{aligned}$$

其中,

$$F(\bar{\zeta}) = \frac{(3\bar{\zeta}^2 - 1)(\bar{\zeta}^2 - 1) - \bar{\zeta}^4 \ln \bar{\zeta}}{(\bar{\zeta}^2 - 1)(\bar{\zeta} - 1)^2}$$

由于正态分布或对数正态分布均能很好地描述结构的载荷效应⁽³⁾, 本文采用正态分布描述裂纹区的应力分布。故应力分布密度函数为:

$$f(\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_\sigma \cdot \sigma} \cdot \exp\left(-\frac{(\sigma - \mu_\sigma)^2}{2\sigma_\sigma^2}\right) \quad (3)$$

量,服从一定的统计分布规律。对实验测试数据进行统计分析和分布假设检验,可以得到 K_{Ic} 的分布规律。通常,对数正态分布和正态分布均可以很好地描述 K_{Ic} 的分布规律。当 K_{Ic} 服从对数正态分布时,其分布密度函数为:

$$f(K_{Ic}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\ln K_{Ic}} \cdot K_{Ic}} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln K_{Ic} - \mu_{\ln K_{Ic}})^2}{2\sigma_{\ln K_{Ic}}^2}\right) \quad (4)$$

3 压力容器结构可靠性的概率分析方法

3.1 安全边界方程

由断裂力学的安全性判定准则可知,当

2.3 材料断裂韧性值 K_{Ic} 的统计分布

材料断裂韧性值 K_{Ic} 可由实验测定。由于材料性能的分散性,所以 K_{Ic} 是一随机变

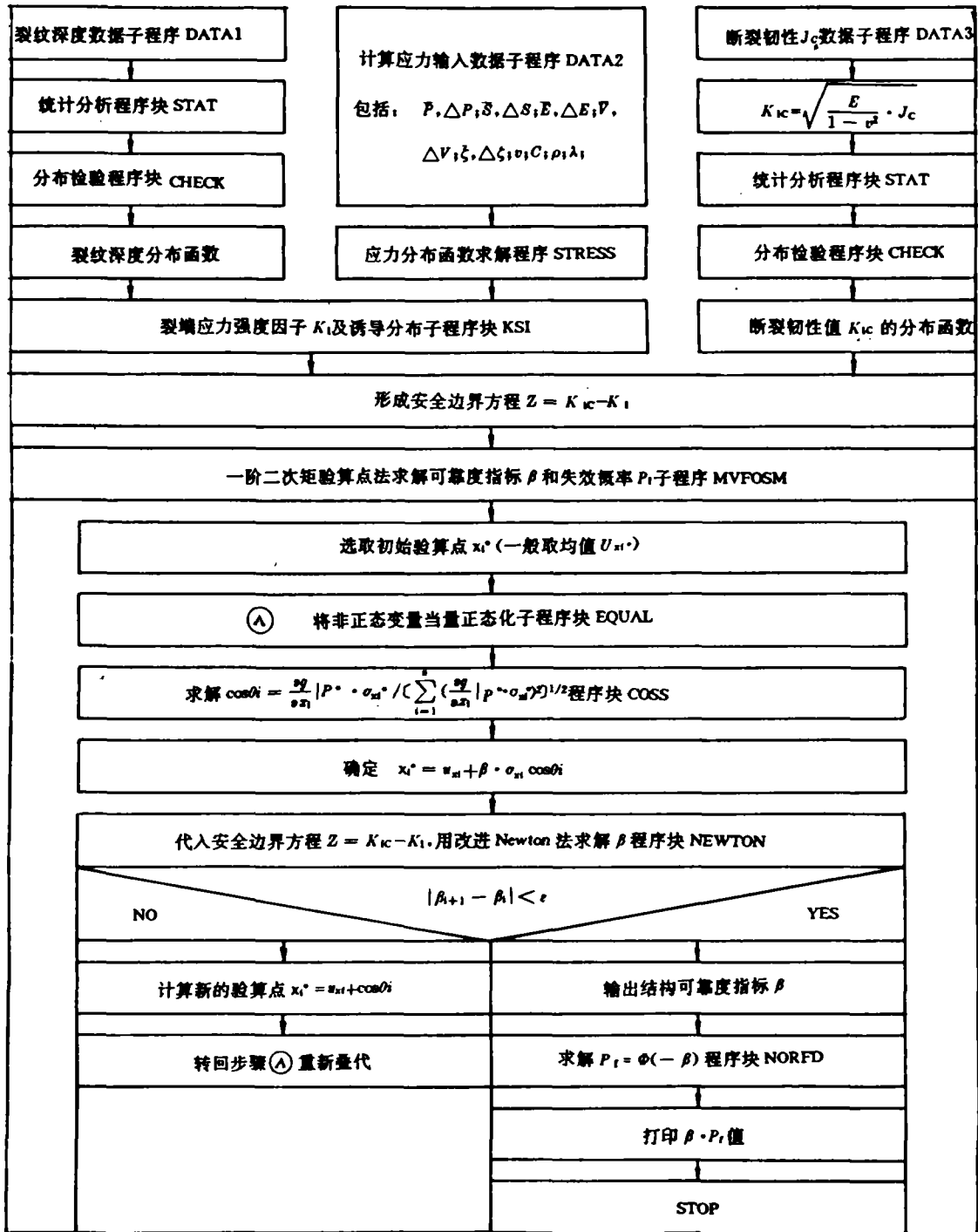


图 1 压力容器结构可靠性分析框图

裂纹尖端应力强度因子 K_I 大于材料的断裂韧性值 K_{Ic} 时, 结构遭受破坏。所以, 压力容器含裂纹单危险部位的安全边界方程为:

$$Z = K_{Ic} - K_I \quad (5)$$

式中应力强度因子 K_I 为^[1]:

$$K_I = \frac{\Phi}{F} \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \quad (6)$$

式中:

F —修正系数, 据不同的裂纹形状可查阅文献[1]。

Φ —第二类椭圆积分,

$$\Phi = \int_0^{\pi/2} [1 - \frac{C^2 - a^2}{C^2} \sin^2 \theta] \cdot d\theta$$

σ —裂纹尖端应力, 其分布密度函数由式(3)表示。

a —裂纹深度, 其分布密度函数由式(1)表示。

3.2 可靠度指标 β 和失效概率 P_f 的求解

由式(5)、(6)可得安全边界方程, 具体表达式为:

$$Z = K_{Ic} - \frac{F}{\Phi} \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \quad (7)$$

上式为三基本变量、非线性安全边界方程, 应用国际结构安全委员会(JCSS)推荐的一阶二次矩验算点法(MVFOSM), 求解压力容器的可靠度指标 β 和失效概率 P_f 。计算步骤见图 1 所示。

4 Monte—Carlo 模拟求解裂纹扩展寿命

根据 Paris 公式:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^n \quad (8)$$

解得裂纹扩展寿命 N_p :

$$\begin{aligned} N_p &= \int_a^{\infty} \frac{1}{C \cdot (\Delta K)^n} da \\ &= \int_a^{\infty} \frac{a^{-n/2}}{C \cdot (Y \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi})^n} da \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{C \cdot (Y \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi})^n} \cdot (a_c^{1-n/2} - a_0^{1-n/2}) \quad (9)$$

式中: Y —形状因子, 可由文献 1 查出; a_c —临界裂纹长度;

$a_0, \Delta \sigma, n, C$ 均为随机变量, a_0 的分布密度函数由式(1)给出; $\Delta \sigma$ 分布密度函数由式(3)求出; n, C 是材料特性数, 由材料的疲劳裂纹扩展速率实验数据统计分析, 可求出 n, C 的均值和方差及其统计分布规律。

用 Monte—Carlo 方法计算疲劳裂纹扩展寿命的框图如 2 所示。

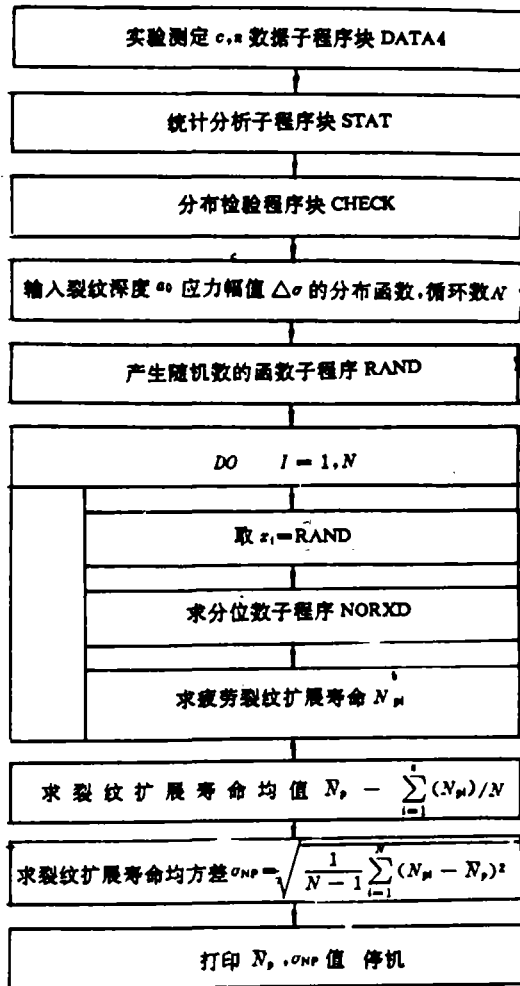


图 2

5 算例

某舰船主锅炉的汽水联箱在运行 15 年后,中修检查发现大量的环向裂纹,分布在端部焊缝区。对其进行 X 射线和超声波检查,并对联箱材料的断裂韧性值 K_{Ic} 和疲劳裂纹扩展速率作了测试,详细数据见文献[4]。

用上述的概率分析方法并按图 1、2 编制了相应的 FORTRAN 程序,求得该锅炉汽水联箱的可靠度指标 $\beta = 4.5644$,失效概率 $P_f = 2.5041 \times 10^{-6}$ 。

用 Monte-Carlo 方法求该汽水联箱的裂纹扩展寿命,得平均裂纹扩展寿命 $\bar{N}_p = 4.5452 \times 10^6$,均方差 $\sigma_{NP} = 3.4980 \times 10^5$ 。

6 结论

1 据算例的可靠性分析结果可知,该锅炉汽水联箱的可靠度指标 β 为 4.5644,失效概率 P_f 仅为 2.5041×10^{-6} ,说明该锅炉汽水联箱尽管含有大量裂纹,但在近期内不致有危险。

2 由 Monte-Carlo 模拟算例结果可知,现有裂纹扩展至穿透壁厚的平均循环次数为 4.5452×10^6 ,按文献[4]所给数据,每年以平均循环 417 次计算,考虑 20 倍的安全系数,并考虑腐蚀介质 5 倍的修正系数,那么要运行 11 年后裂纹方穿透壁厚。

3 本文提出的压力容器裂纹扩展寿命的概率分析方法及编制的相应计算机程序实用可行,略加扩展即可用于一般机械结构的可靠性设计和分析,以及机械设备运行方式和维修间隔的确定。同时,本文的工作对于如何将概率分析方法引入压力容器及一般机械设备的危险性评定亦有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 压力容器学会,化工机械与自动化协会.压力容器缺陷评定规范.压力容器,1985,1
- 2 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI (1980 Edition)
- 3 黄兴豫.工程结构可靠性设计.北京:人民交通出版社,1989.P,186-196
- 4 哈锅军代表室.舰用主锅炉联箱裂纹研究及安全性评定.1989
- 5 胡德明,徐宜桂.机械结构可靠性分析.武汉:海军工程学院研究生教材,1990

研制动态

高效小功率燃机

据“Turbomachinery International”1993年1-2月号报道,Eurodyn 是一型功率为 2.5-3MW,简单循环效率高达 35%的双轴燃气轮机。其紧凑的尺寸与轻的重量结合,使它成为工业和船用市场中一个有力的竞争者。

打算把该发动机应用于高速的地面和水面运输工具市场,如火车或轮船的推进装置,而且它也将是电力生产、泵或压缩机传动装置传统市场中一个强有力的竞争者。

第一台 Eurodyn 原型机已于 1992 年下半年在法国的 Turbomeca 工厂成功地进行了第一次试运转。计划的目标是,预系列发动机将于 1994 年在工业、船用和铁路应用中进行试验。其中包括,在法国进行燃气轮发电机组试验,在挪威进行高速船中的性能试验,以及装用高速火车的试验。

(学奥供稿)

(138) **Experimental Research of Coal Abrasion Indexes and Their Use in the Type Selection of Coal Pulverizing Mills**..... Cheng Qinggang, et al. (*Harbin Power Equipment System Design & Research Institute*)

On the basis of an assessment of the main parameters of American YGP abrasion test equipment a MS-YGP abrasion test device has been developed which takes into consideration the specific conditions of Chinese coal types. The wear indexes of some 30 typical types of power generation coals determined by using the above-cited device coincide with the actual conditions of several power plant industrial coal pulverizing mills, testifying to the relatively high reliability of the abrasion test device. The data obtained by using the MS-YGP wear test device can serve as a useful basis for the type selection of industrial coal pulverizing mills. **Key words:** *abrasion test device, coal pulverizing mill, wear, type selection*

(143) **An Experimental Study of a Channel Type Inertial Separator for Low Circulation Fluidized Beds** He Weicai et al. (*Harbin Institute of Technology*)

Channel type inertial separators feature a simple structural design, ease of installation and small resistance with a separation efficiency adaptive to low circulation fluidized bed boilers. Based on experimental data, the authors have studied such factors as channel structure, pitch, particle concentration and particle diameter, etc, which may have an influence on separation efficiency. **Key words:** *circulation fluidized bed, inertial separator, separation efficiency*

(147) **Probability Analysis Method for Predicting Crack Life Time of Pressure Vessels**.....

Yang Zichun, et al. (*Naval Academy of Engineering*)

This paper analyses the safety of pressure vessels affected with cracks by the use of a probability analysis method. On the basis of "Pressure Vessel Fault Evaluation Code" combined with due consideration of material property dispersion and the effect of service environment randomness the authors set forth the procedures for calculating structural reliability index and failure probability and make a prediction of the crack propagation life by employing Monte-Carlo method, thus providing a major technical basis for deciding the running condition and the proper time-between-repair of pressure vessels. **Key words:** *probability analysis method, fracture mechanics, pressure vessel*

(152) **Some Comments on Boiler Periodic Blowdowns**..... Huang Shengqi, et al. (*Wuhan Electrical Engineering School*)