

# 焊接结构焊缝中缺陷参数不确定性处理方法

陈国华

(华南理工大学, 广州 510640)

**摘要** 提出了含缺陷焊接结构中缺陷参数不确定性的工程处理方法。对于不同板厚、不同形状容器焊缝中的缺陷参数,可分别采用直接法、间接法以及考虑无损检测检出概率(POD)时缺陷参数不确定性的处理方法。同时对缺陷尺寸参数的分布规律与POD的定量关系进行了推论。

**关键词** 焊缝 缺陷 概率 评价

## PROCESSING OF DEFECT PARAMETER UNCERTAINTY OF WELDS

Chen Guohua

(South China University of Technology)

**Abstract** The method for dealing with the uncertainty of defect parameter is put forward including direct method, indirect method, and the method with POD of NDT considered for the defects in the pressure vessels of different thicknesses and different shapes. In the meantime, the quantitative relationship between the defect size distribution and the POD is derived.

**Keywords** Weld Defect Probability Evaluation

Nichols 认为,保证焊接接头的可靠性在于有效地控制设计、制造和使用操作等所有阶段<sup>[1]</sup>。这表明焊接设备中缺陷的产生主要在于制造阶段和设备投入使用(服役)两个阶段。实际上,对于化工容器而言,服役阶段产生的缺陷更应引起重视。

结构在服役阶段、操作中材料性质蜕化、应力腐蚀、载荷波动以及维护和操作不当等因素均可能导致缺陷的产生。结构完整性评定所针对的缺陷多指结构服役阶段所产生的缺陷。

在多数情况下,缺陷的发现主要借助于无损检测技术,但一方面由于焊接工艺、材料、工件尺寸、焊接操作人员等因素导致缺陷形状、方位、大小及数目等的不确定性;另一方面由于无损检测方法、检测人员及环境等因素导致检测结果的不确定性。因此,较为准确而又偏于安全寻求缺陷尺寸参数的分布规律,显得非常必要。

现有的研究成果中几乎都将缺陷简化为相同类型和方向的表面缺陷,取缺陷深度尺寸作为随机变量进行统计分析,显然,这样处理会使评定结果偏于保守,对于具有埋藏缺陷的厚板焊缝更是如此。

对于同一焊接结构,由于纵向和环向焊缝焊接工艺和受力机制不同,缺陷参数及数目亦不相同,导

致危害程度不一致,因此有必要区别对待。在容器投入使用后,针对初始缺陷如何随时间演变及怎样较为合理地对其演变规律进行预测等问题,须建立合理的预测和统计模型,对焊缝中缺陷参数不确定性进行分析。

### 1 不同板厚焊缝缺陷参数不确定性处理方法

根据板厚的不同,可将焊缝分为两类,即中薄板焊缝和厚板焊缝。

利用高精度的无损检测方法可知晓缺陷类型、大小及数目,但要全部考虑裂纹可能出现的形状、位置和方向是十分困难的,通常将裂纹假定成全部是相同形式的模型(如假定它们全部是垂直于所在位置的主应力方向的表面裂纹),或最多将其分成两种或三种形式<sup>[2]</sup>。因此,对于中薄板焊缝可简化为表面裂纹,取其深度方向尺寸作随机变量进行统计分析,概率断裂力学评定时按表面裂纹处理;对于厚板,由于表面和内部缺陷可能同时存在,则分别简化为表面裂纹和埋藏裂纹,对表面裂纹取其深度尺寸作随机变量,进行统计分析,对埋藏裂纹,取缺陷深度尺寸或长径比及裂纹中心线到壁厚表面距离作随机变

量进行统计分析。也可简化为表面裂纹，取偏于保守的裂纹深度尺寸进行统计分析，同时简化了概率断裂力学分析过程<sup>[3]</sup>。

## 2 不同形状容器焊缝缺陷参数不确定性处理方法

对一般容器，环焊缝和纵焊缝是较为典型的焊接形式。容器上焊缝方向不同，采用的焊接工艺也可能不一致，受力方向不一样，焊缝中缺陷尺寸、数目及危害程度也不一样。已有试验研究表明<sup>[4]</sup>，在既有环焊缝又有纵焊缝的高压管道(φ6 000mm × 30mm)，无损检测发现有 500 多处缺陷，几乎所有缺陷位于环向手工焊缝中，不到半数的缺陷是沿轴向的，而且所有缺陷都是表面或近表面破裂，因此对于管道或圆筒容器，应着重考虑手工焊环焊缝上的缺陷参数不确定性。

对于球形容容器，由于各焊缝处受力较均匀，所有焊缝上的缺陷都应考虑。如文献[5]记载了对一台 400m<sup>3</sup> 球罐所含缺陷进行安全评定时，较为详细地分别对环焊缝、纵焊缝及丁字接头等焊缝区进行探伤和评定。

## 3 缺陷尺寸参数不确定性与 POD 的定量关系

在以上论述缺陷尺寸参数不确定性时均未直接考虑 NDT 系统的检测概率(POD)，相当于认为焊接结构中所有缺陷全部被检出的情况(即 POD 接近于 100%)，事实上，现有的 NDT 方法，均有其各自的局限性，一般情况下，POD 不可能达到 100%。如何定量地将 POD 反映到原始缺陷尺寸分布规律  $f_a(x)$  中，较为合理地表达缺陷尺寸参数的不确定性，始终引起工程界的极大兴趣，然而至今仍未得到满意的解答。本文给出如下推论方法，尺寸为  $x$  的缺陷被检出的条件概率为

$$POD(x) \cong P(D|x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} P\{x \leq a < x + \Delta x\} \quad (1)$$

式中  $a$ ——结构中存在的原始裂纹尺寸

$D$ ——缺陷被检出事件

$x$ ——缺陷尺寸

由全概率公式，缺陷被检出的概率为

$$P(D) = \int_0^{+\infty} P(D|x) dF_a(x) = \int_0^{+\infty} P(D|x) f_a(x) dx = \int_0^{+\infty} POD(x) f_a(x) dx \quad (2)$$

式中  $F_a(x)$ ——原始缺陷的分布函数

$f_a(x)$ ——原始缺陷的概率密度函数

在缺陷被检出的条件下，缺陷尺寸  $a$  的条件概率密度为

$$f(x|D) = f_D(x) \cong \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P\{x \leq a < x + \Delta x | D\}}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P\{(x \leq a < x + \Delta x) \cap D\}}{\Delta x \cdot P(D)} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P\{x \leq a < x + \Delta x\}}{\Delta x} \cdot \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P\{D|x \leq a < x + \Delta x\}}{P(D)} = f_a(x) \frac{P(D|x)}{P(D)} = \frac{POD(x) \cdot f_a(x)}{\int_0^{+\infty} POD(x) f_a(x) dx} \quad (3)$$

$$\text{因而 } f_D(x) = \frac{POD(x) \cdot f_a(x)}{\int_0^{+\infty} POD(x) f_a(x) dx} \quad (4)$$

式中  $f_D(x)$ ——缺陷被检出的条件下，缺陷尺寸  $a$  的概率密度函数

则式(4)定量地反映了 POD 与  $f_D(x)$  及  $f_a(x)$  三者之间的关系。

对式(4)的几点讨论与说明：

(1) 若 NDT 的  $POD(x) = 100\%$ ，则有  $f_a(x) = f_D(x)$ ，说明所有原始缺陷 100% 地被检出，然而，工程实际中，这几乎是不可能的。

(2)  $POD(x)$  的确定，可通过 NDT 试验得到。

(3)  $f_D(x)$  的获得，主要通过统计分析 NDT 检测数据得到。

## 4 概率安全评定时缺陷参数不确定性工程处理方法

对如何合理处理缺陷参数不确定性，较为准确地对含缺陷焊接结构进行可靠性评定，提出如下处理方法。

### 4.1 直接法

直接利用无损检测结果，对单一缺陷，直接取缺陷深度尺寸作为概率安全评定的依据；对于多个缺陷，直接利用多样本的实测数据，按上述方法对缺陷参数不确定性进行处理。直接法要求无损检测系统检出能力较高。

### 4.2 间接法

工程上，对含缺陷压力容器进行可靠性评定，大多数情况下是指服役一段时间后，容器在役检测发

现缺陷时的安全评定,此时缺陷尺寸要比初始服役时大,且危害程度也大,对某一服役时刻的缺陷尺寸分布规律的研究便显得极为必要。然而,对服役阶段容器检测比在初始服役时进行检测要困难得多,有些部位甚至难以检测。若能把握服役期间缺陷尺寸的随机扩展规律,从而可由初始时刻缺陷尺寸分布间接推知某一服役时刻的缺陷尺寸分布,无疑将给该结构的安全评定带来极大方便。

间接法的具体分析过程如下:

确定裂纹随机扩展规律。疲劳裂纹随机扩展模型可采用 Paris 公式<sup>[6]</sup>

$$\frac{da}{dt} = c(\Delta K)^n \quad (5)$$

一般而言,Paris 公式中参数  $c$  可取对数正态分布, $n$  当作常量处理<sup>[7]</sup>。在应力强度因子幅值  $\Delta K$  与裂纹深度的平方根成正比的条件下,有

$$\Delta K = \Delta\sigma \sqrt{\pi a} \quad (6)$$

$$\frac{da}{dt} = c(\Delta K)^n = c(\Delta\sigma \sqrt{\pi a})^n \quad (7)$$

对其变换后积分得到  $t_1$  时刻的裂纹尺寸表达式为

$$a_{t_1} = \left( \frac{2-n}{2} c M^n t + a_0^{\frac{2-n}{2}} \right)^{\frac{2}{2-n}} \quad (8)$$

式中  $M = \Delta\sigma \sqrt{\pi}$

得到式(8)后,由于  $c$ ,  $\Delta\sigma$  及  $a_0$  为随机变量,便可利用数值方法<sup>[8]</sup>对任意时刻  $t_1$  时的裂纹尺寸进行随机模拟,确定其分布规律。再利用统计分析方法,便可对时刻  $t_1$  时的缺陷尺寸参数进行统计分析。

$t_1$  时刻缺陷尺寸随机模拟及统计分析步骤如下:

(1) 确定影响裂纹随机扩展的随机变量,主要包括应力幅  $\Delta\sigma$ 、Paris 式中参数  $c$  及初始缺陷尺寸  $a_0$  等参数的分布规律及其均值和标准差。

(2) 产生  $\Delta\sigma$ ,  $c$  和  $a_0$  三组,每组  $N_i$  个  $[0, 1]$  之间均匀分布随机数的随机变量。

(3) 将三组均匀分布的随机数分别变换为应力幅  $\Delta\sigma$ (正态分布)、参数  $c$ (对数正态分布)及初始缺陷尺寸  $a_0$ (指数、正态、对数正态和极值分布)的  $N_i$  个抽样值。

(4) 将步骤(3)中产生的抽样值代入式(8),便可求得服役时刻  $t_1$  时的裂纹尺寸  $a_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N_i$ )。

(5) 采用 K-S 或  $\chi^2$  检验法<sup>[9]</sup>,对随机模拟得到的  $N_i$  个缺陷尺寸进行分布适应性检验,便可得到服役时刻  $t_1$ (循环次数  $N$ )时的裂纹尺寸  $a_i$  的最优

分布。

#### 4.3 考虑无损检测检出概率时缺陷参数不确定性的处理

对在役结构而言,考虑无损检测 POD,出现的裂纹数不多时,推荐的方法是,缺陷尺寸均值 + 1mm,标准差乘以系数  $(1/nn)^{1/2}$ ,  $nn$  表示无损检测次数<sup>[10]</sup>。

#### 5 小结

本文简要分析了焊接结构焊缝中缺陷产生的原因,对无损检测中如何定量评估检验结果的有效性、不同板厚和不同结构焊缝缺陷参数不确定性处理方法等方面作了重点分析和探讨,提出了缺陷参数不确定性的工程处理方法。

由于无损检测及缺陷产生存在许多不确定性,尚有许多问题有待于进一步完善和发展。最为必要的是:① 高检测能力的无损检测技术的开发。② 多种无损检测技术的结合及专家评议的考虑。③ 缺陷参数数据库的建立。④ 缺陷演变规律的模拟与仿真。⑤ 体积型缺陷参数的不确定性分析方法等。

#### 参 考 文 献

- Nichols RW, 李泽震, 周海成译. 压力容器技术进展(1). 北京:机械工业出版社, 1979. 192-211
- Provan JW. 航空航天工业部《AFFD》系统工程办公室译. 概率断裂力学和可靠性. 北京:航空工业出版社, 1989.
- Harris DO. Probabilistic fracture mechanics. Pressure Vessels & Piping Technology—A Decade of Progress, 1985. 771-791
- Wannenburg J et al. The use of probability theory in fracture mechanics—A case study. Int Pre Ves & piping, 1992, 50: 255-272
- 林均富等编著. 压力容器缺陷评定. 北京:中国石化出版社, 1991. 217-261
- 黄克智, 余寿文. 弹塑性断裂力学. 北京:清华大学出版社, 1985. 36-39
- Dai Shuho, Wang Mingo. Reliability analysis in engineering applications. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 216-218
- Bjerager P. On computation methods for structural reliability analysis. Structural Safety, 1990, 9: 76-96
- 茆诗松, 王玲玲. 可靠性统计. 上海:华东师范大学出版社, 1984. 203-287
- Gates RS. Probabilistic elastic-plastic fracture mechanics analysis based on the R6 methodology. Int J Pre Ves & Piping, 1985, 18: 1-34

收稿日期:1997-09-15