

含缺陷承压管道裂纹扩展计算及程序开发

刘 畅¹ 梁星筠² 钱 浩¹ 姚伟达¹

1 (上海核工程研究设计院 上海 200233)

2 (上海核工程研究设计院, 上海市核电工程重点实验室 上海 200233)

摘要 通过对某核电厂承压设备在役检查发现缺陷后的处理计算, 阐述了基于线弹性断裂力学机理的裂纹扩展的计算分析和评定方法, 计算方法中考虑了缺陷深度和长度的耦合作用。并在此基础上, 运用 Visual C++ 语言, 开发裂纹扩展计算程序。程序内全面考虑了反应堆冷却剂系统(RCS)一次侧设计瞬态、反应堆冷却剂系统二次侧设计瞬态的交变载荷及缺陷初始形状、方位分类等问题, 适用范围广泛。本文的计算方法及评定方法为电厂管道在役检修和能否继续运行提供重要依据。

关键词 裂纹扩展速率, 评定, 交变载荷, 程序开发

中图分类号 O344.5

核电厂承压管道和设备在制造和运行过程中, 不可避免地会产生一些缺陷。含缺陷的承压部件, 在交变载荷的作用下, 即使低于材料本身的疲劳强度限, 缺陷也会逐渐扩展而使材料断裂。而管道的特殊结构形式又为裂纹的持续扩展提供了连续通道, 为了避免事故的发生, 针对核电厂运行设备在役检查发现缺陷后, 如何准确地计算裂纹扩展速率, 对核电厂承压设备的寿命评估非常重要。

裂纹扩展机理可以分为线弹性断裂机理(LEFM)、弹塑性断裂机理(EPFM)和基于概率论的断裂机理(PFM)^[1]。本文主要应用 LEFM 机理, 通过对某核电厂承压设备在役检查发现缺陷后的处理计算, 进行了裂纹扩展的分析计算和评定。并在此基础上, 开发了裂纹扩展速率计算的通用程序。

程序内全面考虑了反应堆冷却剂系统一次侧、二次侧瞬态交变载荷及缺陷初始形状、方位分类等问题, 适用范围广泛。程序可根据裂纹扩展计算所需的必要参数进行计算方法的自动筛选, 免去了大量重复的手工计算, 同时也避免了手动计算带来的人为错误。对后续核电厂设备制造或加工时期出现断裂力学相关不符合项的计算处理提供便捷方法。

1 裂纹扩展分析和评定方法

1.1 疲劳引起的缺陷扩展

核电厂寿期内反应堆冷却剂系统预期会经受的各类瞬态事件, 包括正常、异常、危急、事故和试验工况, 假想的瞬态次数按电厂设计寿命 60 年考

虑。这些瞬态形成的交变循环载荷引起疲劳缺陷的扩展。

疲劳裂纹形成后, 在材料中的扩展可分为两个阶段^[1]。第一阶段是在与拉应力成 45° 角的最大剪应力方向扩展, 在这一阶段内裂纹扩展速率和深度都非常小。其后转为进入第二阶段, 裂纹沿着最大拉应力平面进行扩展, 其扩展速率与深度都比第一阶段大得多, 这是裂纹扩展研究分析较为重要的阶段。

裂纹按照其扩展方向, 可以分为 I 型裂纹 (即张开型裂纹), 裂纹受垂直于裂纹表面的拉应力, 使裂纹面产生张开位移; II 型裂纹 (即滑开型裂纹), 裂纹受平行于裂纹面, 并且垂直于裂纹前缘的剪应力, 使裂纹在平面内相对滑开; III 型裂纹 (即撕开型裂纹), 裂纹受平行于裂纹表面, 并且平行于裂纹前缘的剪应力, 使裂纹相对错开。其中 I 型裂纹较为典型, 是低应力断裂的主要因素, 也是工程上断裂失效的主要形式。对于实际裂纹为复合型裂纹时, 本文采用 I 型裂纹的方式进行处理, 因为这样更为保守。裂纹按照与管道轴向的相对方位, 可分为环向缺陷和轴向缺陷, 如图 1 和图 2 所示。裂纹按照其处于材料内部的位置, 又可分为深埋缺陷和表面缺陷, 如图 1 和图 2 中(a)和(b)所示。疲劳裂纹扩展受到较多的物理因素影响, 例如: 设备所处的腐蚀环境、构件厚度、缺陷的初始形状和尺寸、平均应力水平、应力条件、应力强度因子、加载频率、温度等。

第一作者: 刘畅, 女, 1987 年出生, 2011 年于上海交通大学固体力学获硕士学位, 专业: 反应堆结构力学, 助理工程师

收稿日期: 2012-10-31, 修回日期: 2013-03-07

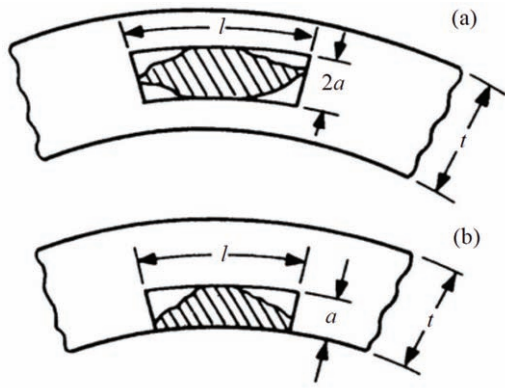


图1 缺陷特征-环向缺陷
(a) 深埋缺陷; (b) 表面缺陷
Fig.1 Flaw characterization-circumferential flaws.
(a) subsurface flaw; (b) surface flaw

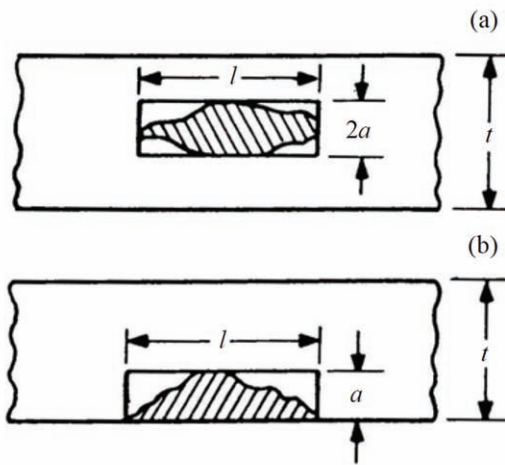


图2 缺陷特征-轴向缺陷
(a) 深埋缺陷; (b) 表面缺陷
Fig.2 Flaw characterization-axial flaws.
(a) subsurface flaw; (b) surface flaw

1.2 疲劳裂纹扩展分析方法

裂纹的静止、平衡或发展,都与裂纹尖端附近的应力场有直接关系。Irwin^[1]通过裂纹尖端附近的应力场研究,提出了应力强度因子的概念,并建立了断裂判据。对于本文关注的 I 型裂纹,应力强度因子用 K_I 表示。一般来说,应力强度因子可表示成: $K_I = \alpha \sigma \sqrt{\pi a}$, 式中 σ 为名义应力,即裂纹位置上按无裂纹情况下计算的应力; a 为裂纹尺寸; α 为形状参数,与裂纹大小和位置等有关。 K_I 的临界值 K_{IC} , 表征了材料阻止裂纹扩展的能力,称为断裂韧性。断裂韧性 K_{IC} 一般随材料的厚度增加而降低,它的大小还依赖于温度、加载速度、环境和裂纹尖端区域的冶金性质。应力强度因子及断裂韧性的量纲为[力][长度]^{-3/2}, 国际单位为 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。

以下应用线弹性断裂力学理论,以某核电厂制造承压设备缺陷不符合项为算例,以应力强度因子为断裂判据,进行疲劳裂纹扩展分析。

缺陷扩展速率 da/dN 可以用应力强度因子范围 ΔK_I 来表征:

$$da/dN = C_0 \cdot (\Delta K_I)^n \quad (1)$$

式中, C_0 和 n 是与材料和环境条件有关的参数, K_I 为 I 型应力强度因子。

缺陷扩展分析中,需综合考虑缺陷分类,缺陷形状,缺陷所处环境等物理因素对计算中参数选择的影响。

对于周向缺陷,根据 ASME 锅炉及规范第 XI 卷非强制性附录 C^[2]:

$$K_I = K_{Im} + K_{Ib} \quad (2)$$

$$K_{Im} = [P/(2\pi R_m t)](\pi a/1000)^{0.5} F_m \quad (3)$$

$$K_{Ib} = [M/(2\pi R_m^2 t)](\pi a/1000)^{0.5} F_b \quad (4)$$

其中, P 为管道承受的内压; M 为管道该处的弯矩; R_m 为管道的平均半径; F_m 和 F_b 为与管道尺寸及裂纹初始尺寸相关的函数,可根据参考文献[2]中 C-4311 节得到。对于轴向缺陷,根据 ASME 规范第 XI 卷非强制性附录 C^[2]:

$$K_I = (PR_m/t)(\pi a/1000Q)^{0.5} F \quad (5)$$

其中, P 为管道承受的内压; R_m 为管道的平均半径; Q 和 F 为与管道尺寸及裂纹初始尺寸相关的函数,可根据参考文献[2]中 C-4311 节得到。

具体裂纹扩展分析步骤如下:

- (1) 确定伴随瞬态有关的 K_I 最大波动范围 ΔK_I ;
- (2) 由公式(1)确定与 ΔK_I 对应的缺陷增量;
- (3) 更新缺陷尺寸 a (缺陷深度) 和 l (缺陷长度);
- (4) 以更新后的缺陷尺寸为初始尺寸,对下一个瞬态重复计算;
- (5) 得到评定周期末的缺陷尺寸。

1.3 疲劳裂纹扩展评定方法

用于缺陷扩展评定的方法,可以分为基于完全塑性机理或弹塑性断裂机理或线弹性断裂机理的控制方法。在实际评定中,首先需要对失效模式(以上三种机理)进行筛选。对于铁素体管道而言,筛选失效模式的计算流程见图 3。

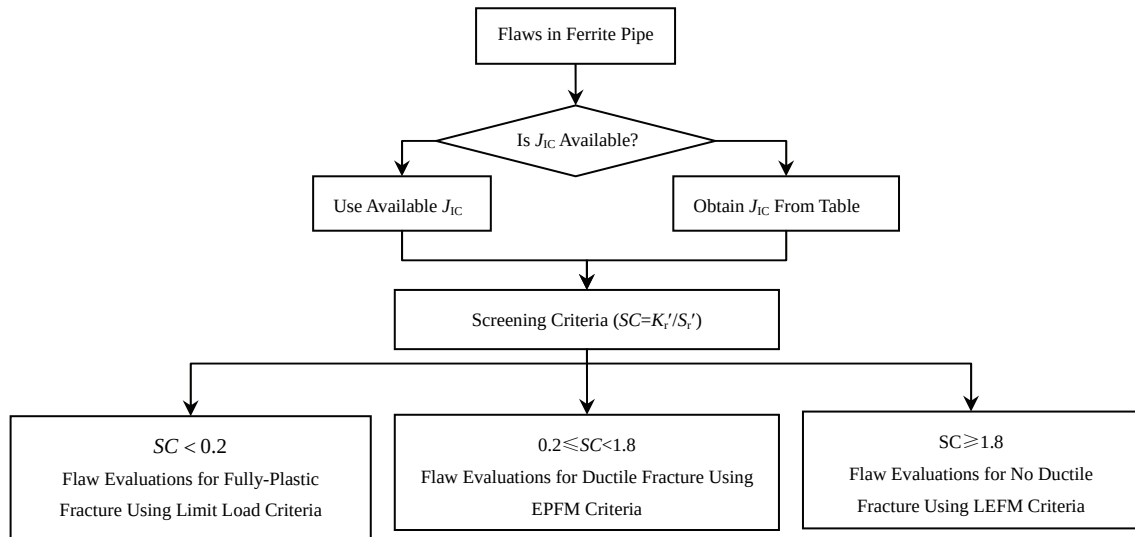


图3 失效模式筛选流程图
Fig.3 Flowchart for selecting failure mode.

流程图中， J_{IC} 为材料韧性，应从材料热态特殊实验或材料下限韧性数据表格中读出，本文所用的 J_{IC} 为根据文献[2]中 C-8000 节获得。 SC 为确定失效准则的参数，无因次量。 $SC=K_t'/S_t'$ ， K_t' 及 S_t' 的算法与应力强度因子及管道承受载荷有关，本文计算公式由文献[2]中 C-8000 节获得。

对于周向缺陷，若裂纹参数最终满足 $a_f \leq a_{allow}$ 、 $\sigma_b \leq S_c$ 、 $\sigma_m \leq S_t$ 条件，认为该承压设备安全可继续使用。其中， a_f 为评定周期末缺陷扩展计算得到的最大深度； a_{allow} 相对于缺陷长度 l_f 和作用应力的最大允许缺陷深度； l_f 为评定周期末缺陷扩展计算得到

的最大长度； σ_b 为缺陷位置对应的弯曲应力； σ_m 为缺陷位置对应的薄膜应力； S_c 管道允许的弯曲应力； S_t 管道允许的薄膜应力。

2 程序简介

依照第二节所述的基于 LEFM 的断裂力学裂纹扩展分析方法，以某核电厂寿期内经历的反应堆设计瞬态（蒸汽发生器二次侧设计瞬态）为输入疲劳交变载荷，进行程序开发。程序算法的基本流程图见图 4。

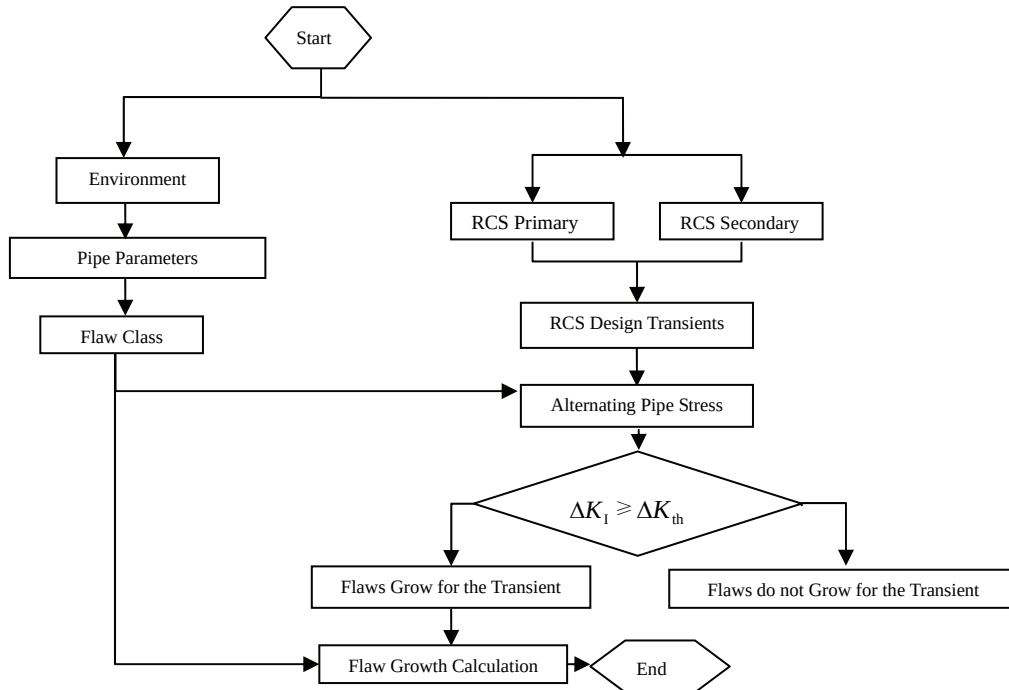


图4 程序流程图
Fig.4 Program flowchart.

依照 ASME 锅炉及压力容器规范第 XI 卷非强制性附录 C 进行在役承压管道的裂纹扩展计算和评定, 传统的手动计算, 每次需要重新整理大量瞬态载荷, 并且需要针对大量数据反复叠加, 计算工作重复性高且容易出现错误。本文开发的计算程序, 具有裂纹扩展计算过程逻辑清楚, 降低计算的复杂度并提高计算效率的特性。开发得到的裂纹扩展计算软件 V1.0 如图 5 所示。



图 5 裂纹扩展计算软件界面
Fig.5 Interface of flaw growth calculation software.

该计算软件可以通过输入参数一栏中第一行“设备”参数, 筛选不同核电厂反应堆冷却剂系统设计瞬态(RCS 一次侧设计瞬态, RCS 二次侧设计瞬态)作为疲劳输入载荷; 通过输入参数一栏中第一行“环境”参数可以对缺陷所处环境(空气、水)进行选定; 通过输入参数一栏中第一行“缺陷分类”参数可以筛选深埋型缺陷或者表面型缺陷; 通过输入参数一栏中第一行“缺陷方向”参数可以筛选周向缺陷或者轴向缺陷; 通过输入参数一栏中第二行“管道物理参数”参数可以输入缺陷所处管道的内径、外径、壁厚, 单位为 mm; 通过输入参数一栏中第三行“裂纹初始尺寸”参数可以输入缺陷初始长度和深度, 单位为 mm。上述输入参数的位置见图 5 上部, 这些参数均为裂纹扩展计算的必要输入, 通过本文开发的程序进行筛选计算, 较手动筛选快捷准确, 有助于提高计算效率。

本程序根据裂纹的初始长度与深度, 在扩展过程中进行二者的耦合计算。其中, 为了输入载荷便于更新以适用于不同核电厂瞬态计算, 本程序将核电厂反应堆冷却剂系统瞬态以数据库的形式内嵌在软件内部进行逐次调用, 若需要更换输入瞬态, 只需要更换该数据库, 而不需要改动程序源代码。用户只需确定输入瞬态、环境、缺陷分类及缺陷方位,

同时给出管道的物理参数及缺陷的初始尺寸, 即可进行裂纹扩展的计算, 其计算样例如图 6 所示。



图 6 裂纹扩展计算结果
Fig.6 Computation of flaw growth.

在图 6 中看到, 对于每一个瞬态, 如果裂纹在该瞬态下扩展, 程序会将瞬态名称及当前瞬态结束后裂纹扩展的长度与深度自动列出, 直观清晰。该软件极大地方便了工程技术人员在设备设计与力学校核过程中对管道裂纹扩展这一常见而且致命的设备故障进行计算或校核, 从而为设备优化或设备维护提供了一定的参考, 同时在一定程度上降低了裂纹扩展计算复杂程度, 提高了工作效率。

3 程序的验证

对于计算程序的验证, 有三种方法^[3]: 一是利用手工计算来考证程序的可靠性; 二是利用试验结果来考证程序的可靠性; 三是利用较为成熟的商用计算软件来考证程序的可靠性。本文采用第一种方法, 以所处理的某核电厂不符合项为算例, 分别进行手工裂纹扩展的计算和本文所编程序的计算, 前者管道寿期末裂纹尺寸为 7.6393 mm, 后者管道寿期末裂纹尺寸为 7.6392 mm, 相对误差仅为 0.0013%, 可认为结果一致, 验证了程序的正确性。

4 结论

通过对某核电厂承压设备在役检查发现缺陷后的处理计算, 阐述了基于线弹性断裂力学机理的裂纹扩展的计算分析和评定方法。

与以往裂纹扩展计算不同, 计算中考虑了缺陷深度和长度的叠加耦合作用。

运用 Visual C++ 语言, 开发裂纹扩展计算程序。程序内全面考虑了反应堆冷却剂系统一次侧、二次

侧瞬态交变载荷及缺陷初始形状、方位分类等问题，适用范围广泛，具有较强的工程实用价值。

参考文献

- 1 李庆芬. 断裂力学及其工程应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2004
LI Qingfen. Fracture mechanics and its application[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2007
- 2 ASME 锅炉及压力容器规范[S]. 美国机械工程师学会, 2004
ASME Boiler and Pressure Vessel Code[S]. The American

- Society of Mechanical Engineers, 2004
- 3 李岗, 梁兵兵, 孙学伟. 管道支吊架分析设计程序的开发[C]. 第十四届全国反应堆结构力学会议优秀论文, 2006
LI Gang, LIANG Bingbing, SUN Xuewei. The development of analysis and design program for pipe supporters and hangers[C]. Proceedings of the 14th national conference on structural mechanics in reactor, 2006

Calculation and evaluation methodology of the flawed pipe and the compute program development

LIU Chang¹ LIANG Xingyun² QIAN Hao¹ YAO Weida¹

1(Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Shanghai 200233, China)

2(Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Shanghai Key Laboratory of Nuclear Engineering, Shanghai 200233, China)

Abstract Background: The crack will grow gradually under alternating load for a pressurized pipe, whereas the load is less than the fatigue strength limit. **Purpose:** Both calculation and evaluation methodology for a flawed pipe that have been detected during in-service inspection is elaborated here base on the Elastic Plastic Fracture Mechanics (EPFM) criteria. **Methods:** In the compute, the depth and length interaction of a flaw has been considered and a compute program is developed per Visual C++. **Results:** The fluctuating load of the Reactor Coolant System transients, the initial flaw shape, the initial flaw orientation are all accounted here. **Conclusions:** The calculation and evaluation methodology here is an important basis for continue working or not.

Key words Flaw growth rate, Evaluation, Fluctuating load, Program developing

CLC O344.5