含裂纹核级管道三维有限元分析与 LBB 评定

梁文甫[1,2],刘　彤[1,2],刘敏珊[2]
(1. 郑州大学 力学与工程科学学院,河南 郑州　450001;2. 郑州大学 热能工程研究中心,河南 郑州　450002)

摘　要:三维裂纹仿真分析和防断裂设计问题一直是断裂理论和工程应用研究的主要课题。管道系统是核动力工程中的关键部件。运用三维有限元分析软件 ANSYS 和裂纹分析专用程序 Franc3D,针对中国实验快堆(CEFR)一段余热排放系统中的含裂纹管道进行了三维裂纹仿真模拟分析和 LBB(Leak - Before - Break)评定。快堆管道工作时处于高温状态,因此,采用适用于高温环境下的材料和法国结构安全设计规范 RCC - MR. A16 标准文件。研究的管道材料为 9Cr1Mo 钢的改良型——T91/P91 管材,分析模型为含裂纹的三维结构,且包括管道高温工况和蠕变效应。仿真计算结果表明,针对所研究的工况,蠕变较疲劳对三维裂纹扩展的影响更大。采用 T91 钢的管路系统能够满足相关规范中的 LBB 设计准则。该研究为快堆管道选材、含缺陷管道安全评估和高温完整性评定提供设计参考。

关键词:三维裂纹;蠕变疲劳;先漏后破(LBB);核级管道;T91/P91
中图分类号:TH49;TL353　　**文献标志码:**B　　**文章编号:**1001 - 4837(2014)11 - 0056 - 05
doi:10.3969/j.issn.1001 - 4837.2014.11.009

Three - dimensional Finite Element Analysis and Leak before Break(LBB) Assessment of Nuclear Piping Containing Creak

LIANG Wen - fu[1,2], LIU Tong[1,2], LIU Min - shan[2]
(1. School of Mechanics and Engineering Sciences, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Thermal Energy Engineering Research Center, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Three - dimensional crack behavior simulation analysis and anti - crack fracture design have been a main subject in fracture theory and engineering application. Piping system is a key part of nuclear power engineering. Utilizing the three - dimensional finite element analysis software ANSYS and the specialized crack analysis programs Franc3D, three - dimensional crack behavior and leak before break (LBB) case were simulated and evaluated of a pipe with a crack in waste heat exhaust system of China Experimental Fast Reactor(CEFR). In fast reactor, the piping is working under a high temperature. Therefore, the code RCC - MR. A16 was adopted that is suitable for materials and structural safety design at high temperature. Material used in this article is modified 9Cr1Mo——T91/P91. The analysis model of pipe section was built in three - dimensional entity structure containing a cracks and the high temperature and creep effects were considered. The simulation results show that creep contributes more effect on crack

基金项目:国家自然科学基金(51376163)

growth than fatigue. The evaluation results on LBB of studied T91 steel pipe with a crack - like defect can satisfy the need of LBB design guidelines. The research results can be referenced in pipe material choose, safety assessment and structural integrity evaluation of a pipe containing defects at high temperature in a fast reactor design.

Key words: three - dimensional crack; creep - fatigue; leak before break (LBB); nuclear pipelines; T91/P91

0　引言

随着经济发展和环境保护意识的提升,核电和其他清洁能源的开发和利用成为能源开发和利用的主线。核电具有运营成本低和可以规模化建设等优势,在我国已经进入高速发展时期;并且通过在土耳其、英国等国外核电建设项目竞标,积极参与国际核电发展。核电的众多技术中,有关设备结构运行安全的内容一直都是核电建设与发展中的重点关注问题。

中国实验快堆是第四代核能系统的优选堆型,快堆将铀资源的利用率提高到了 60% ~ 70%,对核电可持续发展具有战略意义。快堆中事故余热排放系统采用直接冷却主容器内钠的非能动系统,系统的安全可靠性直接影响快堆主容器的性能。由于系统在蠕变范围内承受交变载荷的作用,蠕变 - 疲劳的交互作用使系统使用寿命比只在疲劳作用下的寿命很大程度的缩短[1]。为保障快堆余热排放系统的安全,采用先漏后破(LBB)设计理念对系统进行分析评估和结构优化具有重要的工程意义。国内外对 LBB 分析方法和工程应用进行了较为详细的研究[2-4]。国内冯西桥等[5-6]都对核电管道进行了 LBB 分析;朝鲜在建的钠冷快堆(SFR)已经对其设计的薄壁管道采用 LBB 分析技术[7]。

1　LBB 分析评定技术

1.1　LBB 评定分析流程

LBB 分析的技术目的是用于测量通过管道上穿透裂纹的冷却剂泄漏量。分析的前提一般采用稳定裂纹模型,并且认为管道不发生双端剪切断裂。因此,裂纹的稳态扩展、裂纹扩展量和可测裂纹尺寸的计算是 LBB 分析的核心内容。在核反应堆的设计和建设中,LBB 分析主要用于一回路主管道和辅助管道中,比如波动管道、蓄压器管线和余热导出管线等。针对管道结构进行 LBB 评定分析的主要过程见流程图 1[8]。

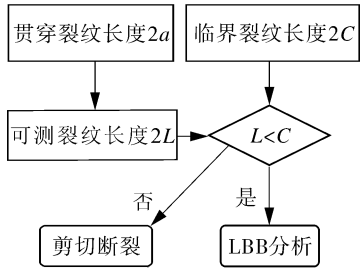

图 1　LBB 评定分析流程

1.2　LBB 评定分析细则

选定了拟进行 LBB 分析评定的一段管道模型后,根据 LBB 设计细则可按照以下几个步骤对含裂纹管道实施 LBB 评定[5]。

(1)确定无裂纹结构的载荷和应力。需要确定在各种工况下的各种载荷,包括弯矩、内压力、轴向力、热应力等。计算相应的应力分布。

(2)获得材料性质。LBB 分析中要经常用到材料的各种性质以及有关性质变化曲线,例如:应力应变曲线、屈服极限和阻力曲线等。

(3)确定裂纹位置、形状和大小。在直管道中,一般以环向和轴向的表面或贯穿裂纹为主,大多数情况下需要对环向裂纹特别关注,因为环向裂纹较轴向裂纹更危险,因此,一些 LBB 分析程序更强调研究环向的贯穿裂纹和表面裂纹。

(4)泄漏检测系统的分析:包括泄漏检测的方法、灵敏性等。泄漏检测系统的分析应以试验和反应堆的实测数据为基础,并考虑裂纹张开面积、表面粗糙度和两相流等因素的影响。

(5)确定可以被泄漏检测系统检测到的最小裂纹尺寸,一般取 10 倍的安全裕度。

(6)确定发生室温扩展的临界裂纹尺寸。

(7)计算从开始泄漏到裂纹失稳的时间。

(8)进行总体稳定性分析,判断含裂纹的构件是否发生塑性失稳破坏。

(9)进行局部稳定性分析,判断裂纹是否发生脆性失稳断裂。

(10)对分析结构进行全面评定,判断是否满足 LBB 条件。

2 含裂纹核级管道分析模型

2.1 模型裂纹的蠕变疲劳扩展

通过管道系统整体结构分析,本研究选取快堆余热排放系统中受力较严重部位的一段管道[9]。裂纹为沿周向的贯穿扇形裂纹,内壁裂纹半长度沿周向从 5 mm 到 40 mm。快堆一般采用液态钠作为冷却剂,此时管内温度已经达到或超过管材的蠕变温度。文中采用法国的规范 A16,主要考虑结构的疲劳和蠕变问题。

对于第 i 个循环,A16 中裂纹蠕变疲劳扩展公式为[10]:

$$\delta = \delta_0 + (\delta_{ft})_i + (\delta_{cp})_i \tag{1}$$

式中 δ_0——初始裂纹半长度,mm

δ_{ft},δ_{cp}——疲劳裂纹扩展和蠕变裂纹扩展长度,mm

疲劳裂纹扩展部分的计算公式:

$$(\delta_{ft})_i = C[(\Delta K_{eff})_i]^n \tag{2}$$

式中 C,n——P91 钢材料常数。根据 A16 给出的参考值,C 取 3.36×10^{-11},n 取 2.63

ΔK_{eff}——有效应力强度因子幅,MPa·m$^{1/2}$,它根据各个工况循环的 J 积分的变化幅度 ΔJ 求得

对于蠕变扩展:

$$(\delta_{cp})_i = \int_{t_i}^{t_i+t_{mi}} A(C_i^*)^q \mathrm{d}t \tag{3}$$

式中 A,q——材料常数。根据 A16,选取 $A = 0.00805$,$q = 0.75$

为保守起见,设定管道蠕变期间温度为 550 ℃。在此温度下,C^* 为在该稳态蠕变下裂纹 C 积分,假设在每个工况循环内扩展是稳态的,C^* 取恒定值。简化后为:

$$\delta a_{fl} = A(C^*)^q t_c \tag{4}$$

式中 t_c——每次功率循环所用的时间,h/次,根据工况计算 $t_c = 14.6$ h/次

2.2 分析参数

管道是夹套管结构,分析时对原结构进行简化处理。简化后管道参数为:外径 108 mm,壁厚 4.5 mm。模型采用的是已经在国内外快堆得到广泛应用的改良型 9Cr1Mo 材料——T91/P91 马氏体不锈钢。T91 具有较好的力学性能,可以应用于更薄的管壁以增加传热效率,减少管材的使用,具有很好的经济性[11]。对于奥氏体不锈钢管材,基于 A16 的 LBB 分析已经被应用;但是,对于改良型 9Cr1Mo 材料的 LBB 分析在报道中还未见研究[12]。其中,材料 T91 的密度 7770 kg/m^3,弹性模量 2.18×10^{11} Pa,泊松比0.31。

该快堆有堆名义、停堆、部分功率和包络 4 种工况,各种工况参数见表 1[8]。其中包络工况的载荷是正常工况下的载荷和安全停堆地震载荷(SSE)总和。

表 1 快堆各工况下的参数

项目	堆名义	停堆	部分功率	包络
温度/℃	516	250	396	516
内压/MPa	0.46	0.4	0.45	0.6
扭矩/N·m	1075.25	239.9	454.497	7524.11
弯矩/N·m	2726	477.5	724.8	3127

3 含裂纹核级管道 LBB 分析

3.1 管道模型的力学分析

确定了结构分析力学模型和工况相关参数后,运用 ANSYS 软件建立相应的有限元模型,并进行静力学分析和热力学分析。在分析过程中,按照表 1 运用接触技术对模型施加扭矩和弯矩,并运用间接法对模型进行热力学分析,然后应用 Franc3D 软件将裂纹嵌入到模型中。其中,裂纹形状是周向扇形穿透裂纹,内壁上裂纹半长度沿周向从 5 mm 到 40 mm。

Franc3D 是新一代裂纹分析软件,用来计算工程结构在任意复杂几何形状、载荷条件和裂纹形状下的三维裂纹扩展和疲劳寿命问题。它采用流程向导方式进行操作,并使用多种单元类型对裂纹区域进行网格划分;采用 M - 积分和位移法

等方法来计算应力强度因子,能够考虑温度、裂纹面牵引和残余应力的影响,有很高的精确度。模型选取管系受力最恶劣的一段;在裂纹引入过程中,裂纹采用梯形参数,根据极坐标和转换坐标的方法,准确确定引入后裂纹在内壁上形成的裂纹长度大小。引入裂纹并划分网格后模型的整体图和剖视图如图 2 所示(其中,裂纹为贯穿性裂纹,初始裂纹长度 $a=5$ mm)。

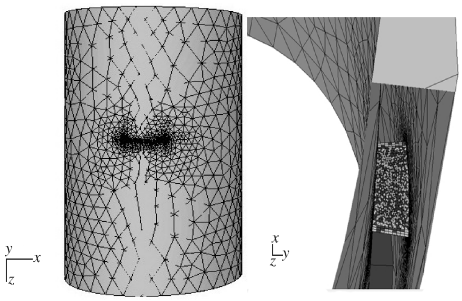

图 2　含裂纹管道模型整体和局部图

3.2　断裂力学参数的处理与分析

对于疲劳和蠕变裂纹扩展,分析时需要分别用到参数 J_s 和 C^*。由于二者均是在弹塑性条件下的断裂力学参数,因此,直接运用有限元计算比较繁琐。根据 A16 的计算公式,二者可以通过 Franc3D 计算的不同工况下裂纹尖端的 J 积分 J_e 得到。按照规定,分别计算含裂纹的模型在力学载荷和热载荷作用下的 J 积分,然后按照 A16 中公式进行转化。根据计算结果并通过数据拟合,最后得到 4 种工况下 J_S—a 和 C^*—a 的拟合关系式分别为:

$$J_{S1}=-27872.832+6.918\times10^6a-4.097\times10^8a^2+9.061\times10^9a^3 \quad (5)$$

$$J_{S2}=126.446+1.994\times10^5a-1.060\times10^7a^2+3.523\times10^8a^3 \quad (6)$$

$$J_{S3}=-3739.2238+1.112\times10^6a-6.291\times10^7a^2+1.473\times10^9a^3 \quad (7)$$

$$J_{S4}=-246734+9.534\times10^7a-9.394\times10^9a^2+3.409\times10^{11}a^3 \quad (8)$$

$$C^*=-27852+6.78\times10^6a-3.9\times10^8a^2+9.06\times10^9a^3 \quad (9)$$

式中　a——周向贯穿裂纹半长度,mm

$J_{S1}\sim J_{S4}$,C^*——相应 4 种工况下的断裂力学参数

3.3　LBB 参数评定

3.3.1　裂纹扩展稳定性评定

根据式(5)~(9),按照 A16 的 ΔJ_S 方法,运用公式:

$$\Delta J_{S1}=J_{S1}-J_{S2} \quad (10)$$

$$\Delta J_{S2}=J_{S4}-J_{S3} \quad (11)$$

可以得到启停循环和功率循环下的裂纹参数。再通过式(5)~(9)编程计算即可得到裂纹在疲劳循环载荷作用下的寿期末裂纹扩展量为 12.24 mm。而在考虑蠕变疲劳循环情况下,寿期末裂纹扩展量为 23.65 mm。从中可以看出蠕变裂纹扩展确实对裂纹扩展有重要的影响[13]。

参考 A16 标准中核电材料 A42 的 J_R 阻力曲线以及工况 4 情况下的 J_S 曲线得到 $\mathrm{d}J_R/\mathrm{d}a$ 和 $\mathrm{d}J_S/\mathrm{d}a$ 曲线,综合绘制后得到两者的相交图如图 3 所示。可以看出,随着裂纹长度增加,裂纹尖端的 J 积分值呈加速增大趋势;由图 3 中交点可知,管道的临界裂纹尺寸为 53.45 mm。

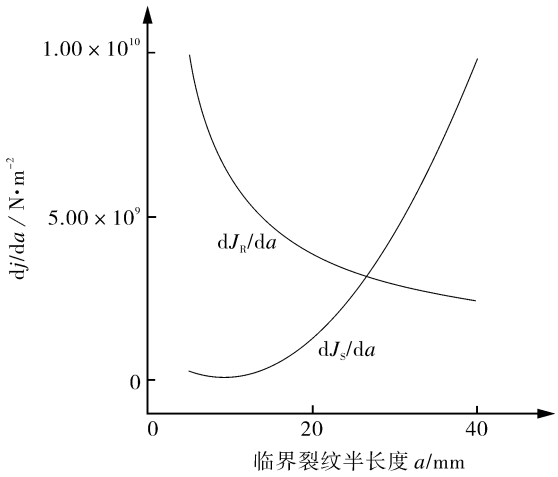

图 3　临界裂纹长度的确定方法

当寿期末裂纹为 23.65 mm 时,根据工况 4 的式(9)求得相应的 J_S 值为:$J_S=130.85$ kN/m,在此裂纹数值下,相对应的材料的 J_R 值为:$J_R=2024.92$ kN/m。由于 $\sqrt{2}J_S<J_R$,所以裂纹在稳定性上符合 LBB 准则的要求。

3.3.2　泄漏量和响应时间评定

关于钠泄漏量的测量,钠气溶胶探测器可以探测灵敏度达 10 ppb 的钠浓度[14]。规范 A16 中,钠泄漏一般取安全因子 $S_t=10$。基于保守估计,当周向贯穿裂纹半长为 9 mm 时,可以探测到

泄漏[9]。由于 LBB 规定,临界裂纹长度要大于可检测到的裂纹长度的 2 倍。所以,泄漏量的评定满足 LBB 的评定要求。

响应时间是指从检测出钠泄漏到裂纹扩展至裂纹失稳的总时间。响应时间可按下式估算:

$$t_{LBB} = (C/2 - L)/V \quad (12)$$

式中 t_{LBB}——响应时间,s

C——临界裂纹半长度,mm,由上节可知 $C = 26.73$ mm

L——可测裂纹半长,mm

V——裂纹扩展速率,mm/s,取裂纹寿期末的速率为 2.67×10^{-3} mm/s

经计算得到响应时间 $t_{LBB} = 1635$ s。在一般工况下,从检测到泄漏再到采取措施的时间 $t = 45$ s,所以 $t_{LBB} > S_t T$。即响应时间 t_{LBB} 符合 LBB 评定的要求。

4 结论

基于法国规范 RCC - MR A16,运用 ANSYS 和 Franc3D 等软件,通过编程计算和三维力学分析,对含有三维裂纹的核级管道进行了 LBB 评定。得到结论如下。

(1)通过对含有三维裂纹的核级管道进行蠕变和断裂力学分析,可知含缺陷管道安全分析过程中要综合考虑蠕变和疲劳对裂纹扩展的影响,且蠕变影响较疲劳为严重。

(2)改良型 9Cr1Mo 钢含裂纹管道计算结果表明:当含有微裂纹的此管道在快堆高温环境下,其寿期末裂纹的稳定性、泄漏量的可测性以及响应时间等都符合 LBB 的评定标准,即该管道符合 LBB 评定准则。

(3)对改良型 9Cr1Mo 钢材在核动力工程工况下的分析结果为该材料用于核级管道提供了设计参考。应用改良型 9Cr1Mo 能简化快堆回路结构,这为快堆结构的高性能、多级优化以及经济性提供了可能性。

参考文献:

[1] 章骁程,关凯书,王志文,等. 2.25Cr - 1Mo - V 钢制承压设备按 ASME 案例 2605 - 1 的蠕变 - 疲劳设计方法[J]. 压力容器,2014,31(3):28 - 33.

[2] Chattopadhyay J, Dutta B K, et al. Leak - before - break qualification of primary heat transport piping of 500 MWe tarapur atomic power plant[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping,1999,76:221 - 243.

[3] Klimasauskas A, Rimkevicius S, et al. Complex leak - before - break analysis demonstrated on RBMK - 1500 austenitic piping[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping,2003,80:655 - 663.

[4] 李强,岑鹏,甄洪栋. 核电厂高能管道 LBB 分析技术概述[J]. 核动力工程,2011,32(增刊1):189 - 191.

[5] 冯西桥,何树延,董铎. 核反应堆管道和压力容器的 LBB 分析[J]. 力学进展,1998,28(2):198 - 217.

[6] 董碧波. 中国实验快堆高温钠管道蠕变分析方法研究[D]. 北京:中国原子能科学研究院,2006:1 - 37.

[7] Park J S, Choi Y H, Im S. Generation of plastic influence function for J - integral and crack opening displacement of thin - walled pipes with a short circumferential through - wall crack[ ]. International Journal of Pressure Vessels and Piping(2013), Accepted Manuscript.

[8] Yoo Y S, Huh N S. On a leak - before - break assessment methodology for piping systems of fast breeder reactor[J]. Engineer Failure Analysis,2013,33:439 - 448.

[9] 张立殷,陆道纲. LBB 在蠕变温度以上核级管道设计中的应用[J]. 原子能科学技术,2009,43(12):1100 - 1105.

[10] RCC - MR: Appendix A16: Guide for Leak Before Break and Defect Assessment[S]. AFCEN,2002.

[11] 付晓刚,龙斌,张金权,等. 改进型 9Cr - 1Mo 钢在快堆蒸汽发生器上的应用[J]. 中国原子能科学研究院年报,2009:29 - 32.

[12] Wakai T, Machida H, Yoshida S, et al. Demonstration of leak - before - break in Japan Sodium cooled Fast Reactor (JSFR) pipes[J]. Nuclear Engineering and Design,2013,269(8):88 - 96.

[13] Mani N, Thanigaiyarasu G. Leak before break analysis of stream generator shell nozzle junction for sodium cooled fast breeder reactor[J]. Journal of Pressure Vessel Technology,2013,134:1 - 8.

[14] Biswas A, Srinivasan R, Chellap P, et al. Leak - before - break analysis of prototype fast breeder reactor main vessel[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals,2010,63(2 - 3):653 - 656.

收稿日期:2014 - 03 - 21 **修稿日期:**2014 - 08 - 06

作者简介:梁文甫(1988 -),男,主要从事核反应堆中结构的断裂问题的研究工作,通信地址:450002 河南省郑州市文化路郑州大学工学院郑州大学热能工程研究中心,E - mail:lwf314159@163.com。