

LBB 在蠕变温度以上核级管道设计中的应用

张立殷, 陆道纲

(华北电力大学 核科学与工程学院, 北京 102206)

摘要: LBB(Leak-Before-Break)技术是保证核反应堆结构安全和可靠的一种重要分析方法。对于在蠕变温度以上高温堆(如快堆)的核级管道,运用 LBB 分析时应考虑疲劳和蠕变对裂纹扩展的影响。本工作以法国规范 RCC-MR 的 A16 为基础、以快堆余热排放系统的一段管道为研究对象进行 LBB 分析,总结出一套运用于蠕变温度以上核级管道安全分析的 LBB 方法。经计算得到,在蠕变温度以上,蠕变对裂纹扩展的影响较大。经验证,该管道符合 LBB 技术对于裂纹稳定性及泄漏量可探测性的条件,满足从开始泄漏到裂纹失稳的时间要求。

关键词: LBB; 蠕变温度; 疲劳蠕变; 核级管道

中图分类号: TL353

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)12-1100-06

Application of LBB Technology for Design of Nuclear Pipes Beyond Creep Temperature

ZHANG Li-yin, LU Dao-gang

(School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: LBB (Leak-Before-Break) is an important analysis method for insuring the structure safety and reliability of nuclear reactor. It must consider the affection of fatigue and creep to the crack growth for the nuclear pipes in the high temperature reactors (as fast reactor) beyond the creep temperature. The paper summarizes a set of LBB method applying for the safe analysis of the nuclear pipes beyond the creep temperature, basing on A16 in the France RCC-MR standard and carrying on LBB analysis for a section of pipe in the heat drainage system in fast reactor. By calculation, creep affects the crack growth greatly beyond the creep temperature. It is demonstrated that the pipe meets the conditions that the crack is stable and the leakage is detectible which LBB asks for, and it also satisfies the time request from the beginning of leak to the moment at which the crack is unstable.

Key words: LBB; creep temperature; fatigue-creep; nuclear pipes

LBB^[1-2] (Leak-Before-Break) 是在近三十多年里发展起来的保证核反应堆结构安全性和

可靠性的一种重要分析方法。在核级管道设计中,采用 LBB 分析技术可排除管道双端剪切断裂事故发生的可能性。

LBB 的思想由意大利核电专家提出后,很快得到世界各国的重视。美国、英国、日本、德国、法国、加拿大、俄罗斯等国都对 LBB 分析的相关问题和技术进行了大量的理论和实验研究,发展了一些工程上便于运用的 LBB 分析方法,积累了一些重要数据,并将一些研究成果编入核反应堆规范,但国际上尚未形成统一的 LBB 分析方法。我国对 LBB 技术的研究起步较晚,目前还只是参照国外的一些标准,尚未形成完整的具有自主知识产权的体系。

裂纹扩展的稳定性分析是 LBB 分析的核心,而其中最重要的是对裂纹扩展量的计算。压水堆在运行工况下,其压力容器和管道温度不超过 400 °C(蠕变温度),其蠕变问题不突出,蠕变对裂纹扩展的影响可忽略。事实证明,只考虑疲劳对裂纹扩展的作用对于目前运行的商用压水堆进行 LBB 分析是可行的。然而,通过提高反应堆的温度是提高效率的一个重要方法,这也成为先进堆型研发的一种趋势。在先进堆型中,如快堆的主管道、余热排放系统管道以及超临界水堆的主管道等这些高温管道,其工作温度均超过了 400 °C。在超过蠕变温度的高温下,蠕变对裂纹的扩展则不能忽略。从安全的角度出发,应综合考虑疲劳蠕变作用下裂纹扩展问题。

目前,国外已对 LBB 分析中疲劳蠕变裂纹扩展计算进行相关研究,并形成规范 A16^[3],但国内尚未见到相关报道,也未形成系统、完整的 LBB 分析体系。A16 是由法国原子能委员会(CEA)、法国电力公司(EDF)和法国 NOVATOME 联合研究的成果,并于 1993 年作为 RCC-MR 的一个附录发表。A16 内容主要包括:基于 δ_a 方法的疲劳和蠕变疲劳裂纹起裂、疲劳裂纹扩展、蠕变疲劳裂纹扩展、韧性撕裂和扩展、LBB 评定,并提供了平板、管道、弯头及试件在机械和热冲击下的 J 和 C 参量的计算方法,包括了基于最新参考应力和应力强度因子的表面裂纹和穿透裂纹的计算公式。这一规程的适用性已得到工程案例验证。

本工作以规范 A16 为基础,将疲劳蠕变裂纹扩展引入 LBB 分析体系中,对快堆余热排放系统的一段管道进行分析研究。

1 理论与方法

1.1 LBB 分析体系

一套较为完整的 LBB 分析方法主要包括以下步骤^[4]。

1) 确定结构的载荷和应力。需确定在各工况条件下的各种载荷,包括弯矩、内压力、轴向力、热应力等;计算相应的应力分布,并区分哪些应力对裂纹塑性失稳有影响。

2) 确定材料性质。LBB 分析中常用到的材料性质有应力应变曲线、屈服极限和强度极限应力、临界应力强度因子 K_{IC} 、 J 阻力曲线等。

3) 确定裂纹的位置和形状。在直管道中,往往分析环向和轴向的表面和贯穿裂纹,由于环向裂纹可能造成双端剪切断裂(DEGB)事故,因此,一些 LBB 分析程序中更强调研究环向的贯穿裂纹和表面裂纹。

4) 泄漏监测系统的分析,包括泄漏监测的方法、灵敏性等。泄漏监测系统的分析应以实验和反应堆实测数据为基础,并考虑裂纹张开面积、表面粗糙度、两相流等因素的影响。

5) 确定可被泄漏监测系统测到的最小裂纹尺寸。

6) 确定发生失稳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) 对分析结果进行全面评定,判断是否满足 LBB 条件。

1.2 蠕变疲劳裂纹扩展计算

依据 A16,疲劳蠕变裂纹的扩展计算公式为:

$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{da}{dN} \right)_f + \left(\frac{da}{dN} \right)_c \quad (1)$$

其中,疲劳扩展项为:

$$\left(\frac{da}{dN} \right)_f = Q \Delta J_s^m \quad (2)$$

式中: $\left(\frac{da}{dN} \right)_f$ 为疲劳裂纹扩展率; $\left(\frac{da}{dN} \right)_c$ 为蠕

SSE 所荷载荷。

表 1 不同运行工况下的参数
Table 1 Parameters in different operating conditions

工况	$t/^{\circ}\text{C}$	p/MPa
堆名义工况	516	0.46
停堆工况	250	0.40
部分功率运行工况	396	0.45
包络工况	516	0.6

在反应堆寿期内,管道运行状态参数特性列于表 2。

表 2 管道运行状态参数特性
Table 2 Parameter characteristics of pipes in operation

工况标准	温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	寿期内循环次数
启动	250~516	1 000
部分功率运行	396~516	12 000
额定功率运行	516	12 000
停堆	516~250	1 000

3 核级管道的 LBB 分析

3.1 管道系统的应力强度计算

根据图 1 所示模型,利用有限元软件进行建模,并计算下列载荷组合条件下主管道上最大应力强度。这里的应力强度为第三强度理论的应力强度值。结果如下:由压力引起的应力强度,计算得到最大值为 7.92 MPa;由压力和载荷控制的力矩引起的应力强度,计算得到最大值为 61.56 MPa;由压力、载荷控制的力矩和位移控制的力矩而引起的应力强度,计算得到最大值为 170.3 MPa;由压力、载荷控制的力矩和位移控制的力矩+SSE 地震引起的应力强度,计算得到最大值为 224.7 MPa,位于节点 131 处(823.79,0,158.24)。

根据计算结果,假设在受力最恶劣的节点 131 的管段处存在 1 条初始环向贯穿裂纹,半长度 a_0 为 5 mm。在服役前,管道出现裂纹的尺寸是随机的。理论上,初始裂纹尺寸取任何数值都是可能的。但如果初始尺寸大于可检测尺寸,则在使用前就应被检测出来,从而进行更换。因此,初始尺寸必须小于可检测尺寸。后

面的计算结果表明,初始裂纹半长度的取值是合理的。

3.2 计算各工况下的断裂力学参数

对于疲劳裂纹的扩展计算需用到断裂力学参数 J_s ,对于蠕变裂纹扩展计算需用到参数 C^* 。由于 J_s 及 C^* 均为弹塑性下的断裂力学参数,因此,直接用有限元计算比较复杂,且计算精度也难保证。而 J_e 为弹性条件下的 J 积分,可通过有限元简便计算得出。A16 给出了通过 J_e 计算 J_s 及 C^* 的公式,计算过程方便简洁,精度有保证。

为了区分各工况下的断裂力学参数,用下标来代表各工况下对应的参数,1 为堆名义工况,2 为停堆工况,3 为部分功率运行工况,4 为包络工况。

在工况一定的情况下,管段的受力情况确定,断裂参数则依赖于裂纹长度。按照 A16 的方法,求得不同裂纹尺寸 a 对应的断裂力学参数,并利用 Origin 软件进行曲线拟合,结果如下:

$$J_{s1}(a) = -2\,728.2 + 799\,656a - 3.7 \times 10^7 a^2 + 6.321\,06 \times 10^8 a^3 \tag{8}$$

$$J_{s2}(a) = 2.7 + 2\,774a + 14\,526.8a^2 + 191\,484a^3 \tag{9}$$

$$J_{s3}(a) = 5.7 + 6\,776.7a + 22\,971a^2 + 597\,461.8a^3 \tag{10}$$

$$J_{s4}(a) = -105\,494.9 + 6.343 \times 10^7 a - 3.6 \times 10^9 a^2 + 8.01 \times 10^{10} a^3 \tag{11}$$

$$C_1^*(a) = -2\,721 + 796\,778a - 3.7 \times 10^7 a^2 + 6.3 \times 10^8 a^3 \tag{12}$$

3.3 计算裂纹扩展量

根据计算公式进行编程,计算得到在疲劳蠕变影响下,寿期末裂纹扩展为 28.9 mm。如果仅计算疲劳裂纹扩展,寿期末的裂纹尺寸仅为 6.62 mm,两者显然相差很大。因此,从反应堆的结构完整性和安全性出发,在高温管道的 LBB 分析中考虑疲劳蠕变裂纹的扩展是非常重要的。

3.4 计算临界裂纹

利用材料的阻力模量 J_R 曲线获得的 dJ_R/da - a 曲线与包络工况下的 dJ_s/da - a 曲线交汇得到临界裂纹的尺寸(图 2)。由图 2 可知,临界裂纹半长度为 36.6 mm。

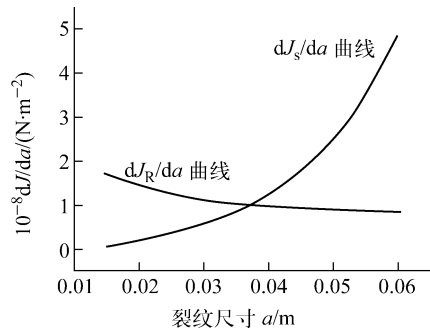


图 2 临界半长度的确定方法

Fig. 2 Method for determination of critical half-length

3.5 计算泄漏量

1) 最小探测量计算

求裂纹的泄漏流量时,近似认为裂纹在张开时为标准的椭圆形。椭圆短轴半径为 δ ,长轴半径为裂纹长度 a 。

水力直径为:

$$D_H = \frac{\pi \delta}{2} \tag{13}$$

流体层流速度为:

$$V_{lam} = \frac{\Delta p D_H^2}{48 \mu_{Na} h} \tag{14}$$

其中: Δp 为压差; μ_{Na} 为动力粘度; h 为壁厚。查表可得 $\rho_{Na}=828 \text{ kg/m}^3, \mu_{Na}=2.316 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ 。

雷诺数为:

$$Re_{lam} = \frac{\rho_{Na} V_{lam} D_H}{\mu_{Na}} \tag{15}$$

裂纹张开面积为:

$$A_L = \frac{\pi \delta a}{2} \tag{16}$$

流量为:

$$Q = A_L V_{lam} \tag{17}$$

目前,泄漏监测仪器 NA101 探测器^[6]可探测到的质量比(安全壳内钠的气溶胶和气体的质量比)为 50 ppm(百万分之一),现假设安全壳内的空间体积为 8 000 m³,气溶胶在安全壳中的平均滞留时间为 10 h,以上假设均基于保守估计。由此求得,最小可探测流量 $Q_{min} = 1.68 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$,一般情况下可探测流量取 $Q_{det} = 10 Q_{min}$,因此, $Q_{det} = 10 Q_{min} = 1.68 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2) 计算可探测裂纹尺寸

在堆名义工况下,通过有限元求解半裂纹开口端点处的位移得到椭圆短轴半径 δ ,即图 3

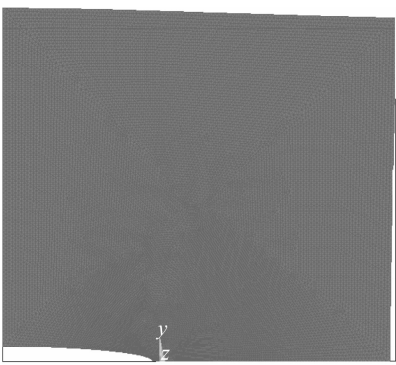


图 3 裂纹端点张开位移

Fig. 3 Displacement of endpoint of crack

中裂纹开口处的左端点在 y 方向上的位移。

采用不同的裂纹尺寸,计算得到张开面积,再根据式(13)~(17)计算泄漏量,结果列于表 3。

表 3 不同裂纹尺寸下的泄漏量

Table 3 Leakage rate under different crack lengths		
裂纹长度/mm	端点位移/ μm	10^8 泄漏量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
5	4.73	1.84
6	5.68	3.83
7	6.64	6.39
8	7.59	1.22
9	8.55	19.6
10	9.51	29.9

由表 3 可见,当裂纹半长度大于 9 mm 时,可探测到泄漏量。该裂纹长度大于裂纹初始裂纹尺寸,证实初始裂纹尺寸的取值满足要求。

3.6 综合评估

1) 评价裂纹的稳定性

根据上面的计算可知,寿期末裂纹的长度为 28.9 mm。在包络工况下, $a=28.9 \text{ mm}$ 对应的 J_s 值可由式(4)得到, $J_s=4\,571.4 \text{ N/m}$ 。

在对应的裂纹长度下,根据材料的 J_R 曲线得到 $J_R=102\,000 \text{ N/m}$ 。

因为 $\sqrt{2} J_s < J_R$, 所以,寿期末的裂纹是稳定的。在确认裂纹稳定性的基础上,LBB 还要求泄漏量可监测。

2) 评价泄漏量的可测性

根据 3.5 节的计算得到临界裂纹长度大于两倍的可监测到的裂纹长度,满足 LBB 对可监测到的裂纹长度的要求。

3) 评价响应时间

裂纹由监测到泄漏量扩展至失稳的时间是监测泄漏和停堆泄压可利用的时间。半长度为9 mm的裂纹扩展至临界裂纹尺寸的1/2所需的时间由下式计算:

$$t_{\text{LBB}} = (C/2 - L)/V \quad (18)$$

式中: t_{LBB} 为穿透裂纹由探测到泄漏量扩展至临界裂纹所需的时间; C 为临界裂纹的半长,该管道为36.6 mm; L 为穿透裂纹半长,取9 mm; V 为裂纹扩展速率,根据计算,裂纹寿期末的裂纹扩展速率在整个裂纹扩展过程中最快。为了保守估计,这里取裂纹寿期末的裂纹扩展速率为 2.67×10^{-3} mm/s。

计算得到 t_{LBB} 为 3.483×10^3 s。正常工况下,泄漏监测所需时间以及采取必要措施时间 T 为45 s^[7],因此, $t_{\text{LBB}} \gg S_i T$ 。其中: S_i 为安全裕度因子,这里取10。

由此可知, t_{LBB} 符合LBB的时间要求。

4 结论

1) 通过裂纹扩展计算得到:在蠕变温度以上,蠕变对裂纹扩展的影响不能忽略,应综合考虑疲劳蠕变裂纹扩展量。在LBB分析中引进了疲劳蠕变裂纹扩展的计算方法,完善整个分析体系。

2) 对于计算的管道,其寿期末裂纹在包络工况下是稳定的,满足LBB的要求。

3) 管道的泄漏量监测符合LBB的要求。

4) 从监测到泄漏量到裂纹扩展至临界裂纹有足够的时间进行处理。

5) 该管道符合LBB分析技术的要求。

本工作系统地提出了蠕变温度以上核级管道的LBB分析方法,对先进高温堆管道的设计具有一定的参考价值。由于本工作计算所采用的参数与中国实验快堆的具体参数有一定的差别,所以,本工作结论不作为其安全审查的依据。

参考文献:

- [1] 郑敏荣. 先漏后爆准则的研究[J]. 北京石油化工学院学报, 2003, 11(2): 28-32.
ZHENG Minrong. Research on leak-before-break [J]. Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2003, 11(2): 28-32(in Chinese).
- [2] 冯西桥, 何树延. 压力管道破前漏分析的一种简化方法[J]. 核动力工程, 1998, 19(1): 53-59.
FENG Xiqiao, HE Shuyan. A simplified leak before break analysis method of pressured pipes [J]. Nuclear Power Engineering, 1998, 19(1): 53-59(in Chinese).
- [3] 法国核岛设备设计和建造规则协会. RCC-MR快中子增殖堆核岛设备设计和建造规则附录: A16[S]. 法国: AFCEN, 2002.
- [4] 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.
FENG Xiqiao, HE Shuyan, DONG Duo. Leak before break analysis of pipes and vessels in nuclear reactor[J]. Advances in Mechanics, 1998, 28(2): 198-217(in Chinese).
- [5] 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.
- [6] 熊冬庆, 陆道纲. 破前漏(LBB)分析方法在钠冷快堆管道分析中的应用探讨[J]. 核动力工程, 2008, 29(5): 9-14.
XIONG Dongqing, LU Daogang. Application of leak-before-break (LBB) analysis method for liquid metal cooled fast breeder reactors (LMFBR) in pipeline analysis[J]. Nuclear Power Engineering, 2008, 29(5): 9-14(in Chinese).
- [7] 董建令, 傅激扬, 于溯源, 等. LBB思想在HTR-10蒸汽发生器传热管上的应用[J]. 高科技通讯, 2000, 10: 81-84.
DONG Jianling, FU Jiyang, YU Suyuan, et al. LBB concept application to HTR-10 steam generator heat transfer tube [J]. High Technology Letters, 2000, 10: 81-84(in Chinese).