

文章编号:1673-0062(2015)04-0007-05

LBB 在 AP1000 技术中的应用

蒋冬梅¹, 杜颖², 袁小兰²

(1. 南华大学 工程训练中心, 湖南 衡阳 421001; 2. 南华大学 核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要:压水堆核电厂的设计基准事故定义为主管道双端断裂, 这一假设过于保守. 管道的失效方式往往是先出现破口而后再泄漏, 即所谓的先漏后破(Leak Before Break, 简称 LBB), 而不是双端断裂. LBB 准则是防止核电厂压力管道发生灾难性破裂事故的重要评定准则. 本文介绍了 LBB 评定技术在国外的发展情况和意义, 阐述了 LBB 在 AP1000 核电厂中的应用情况及 LBB 评价的理论基础.

关键词:压水堆核电厂; AP1000; LBB; 双端断裂; 反应堆冷却剂管道; 主蒸汽管道
中图分类号:TM623 **文献标识码:**B

The Application of LBB in AP1000 Technology

JIANG Dong-mei¹, DU Ying², YUAN Xiao-lan²

(1. The Engineering Training Center, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: Design basis accident of pressurized water reactor nuclear power plant was defined as main pipeline double-end fracture, this assumption is too conservative. Pipeline failure modes often appear as first Break then Leak, that is so-called the Leak Before Break (Leak Before Break, LBB), rather than double end fracture. LBB is an important evaluation criteria of preventing pressure piping catastrophic rupture accident of nuclear power plant. This paper briefly introduces the development situation and the significance of the overseas LBB assessment technology and expounds the application of LBB in AP1000 nuclear power plant and the theoretical basis of LBB assessment.

key words: PWR nuclear power plant; AP1000; LBB; double-end fracture; reactor coolant pipe; main steam line

收稿日期:2015-05-14

基金项目:湖南省自然科学基金与衡阳市联合基金重点基金资助项目(14JJ5019)

作者简介:蒋冬梅(1967-),女,湖南衡阳人,南华大学工程训练中心高级实验师. 主要研究方向:核燃料循环.

0 概 述

在 80 年代以前的核反应堆设计中,为了保证结构的可靠性,往往把压力管段的双端剪切断裂作为设计基准事故. 双端剪切断裂是指高压力等原因引起管道(如一回路主管道)的突然断裂,它会造成严重的冷却剂泄漏事故. 在大的泄漏事故中,高压液体和气体产生的强大喷射力,对周围的结构和设备构成危害. 为了应对这类事故,往往需要设置管道防甩击装置、液体喷射屏蔽装置和复杂的堆芯应急冷却系统等,以保证安全相关物项的完整性和堆芯的安全^[1].

自 80 年代以来的理论研究和实验发现,双端剪切断裂事故的发生概率非常小,以此作为设计基准事故会带来一些得不偿失的问题. 由此,新的技术 LBB LBB(Leak Before Break,先漏后破)就应运而生.

LBB 准则是防止核电厂高能管道发生灾难性破裂事故的重要评定准则. LBB 准则的定义就是承载核电厂冷却剂的管道的裂纹,在正常运行、预计瞬态和安全停堆工况载荷和其它因素的作用下,在发展到导致管道失效的尺寸之前,就已产生可探测到的泄漏,通过采取相应的措施,以避免发生冷却剂管道大破口事故^[2].

LBB 研究成果无论对现有核电厂的安全评定,还是应用于新核电厂设计,LBB 的应用都带来了显著的经济效益,同时也促进了 LBB 的研究. 在设计过程中,结合 LBB 准则和其它导则可以排除来自设计基准管道破裂事故的动力效应,如喷射流冲击、管道甩击、其它管道部分和部件上的喷射流反作用力、隔间增压等,使得保护性结构的尺寸和数量最小化,并且还可以消除管道防甩击装置^[3]. 这样使得设计最优化,避免设置保护性结构和约束件,同时也能给管道焊缝的在役检查带来便利,从而提高了电厂的安全性和经济性.

在美国,NRC(核管会)负责理论研究和试验的相关部门证明 LBB 是有效的,并同意将其评定方法应用于美国 76 座压水堆核电厂的主冷却回路和部分辅助管道. 对于 AP1000 核电厂,LBB 评价主要应用于反应堆冷却剂管道、波动管、选取的饱含冷却剂且公称直径不小于 6 英寸的分支管道,以及部分主蒸汽管道. AP1000 应用 LBB 的管道清单见表 1^[4-5].

表 1 AP1000 应用 LBB 的管道清单		
Table 1 Pipeline list of the application of LBB in AP1000		
系统	管道名称	管道编码
PXS	非能动余热排出的入口管道	L102
PXS	非能动余热排出热交换器至隔离阀之间的返回管道	L103;L104A/B
PXS	隔离阀之后的非能动余热排出返回管道	L105
PXS	非能动余热排出排气管道	L107
PXS	安注箱至隔离阀之间的管道	L029A/B
PXS	隔离阀门至堆芯补水箱之间的平衡管道	L007A/B;L070A/B
PXS	至反应堆压力容器直接注射管道	L021A/B;L025A/B
PXS	堆芯补水箱相关管道、安全壳内置换料水箱注射管道	L015A/B;L016A/B;L017A/B;L018A/B;L020A/B;L127A/B
PXS	安注箱隔离阀下游管道	L027A/B
PXS	正常余热排出系统排放管道	L019A/B
RCS	主冷却剂热管段	L001A/B
RCS	主冷却剂冷管段	L002A/B/C/D
RCS	正常余热排出管道	L139
RCS	波动管	L003
RCS	非能动余热排出入口管道/ADS 4 管道	L135A/B;L136A/B
RCS	非能动余热排出入口管道/ADS 4 管道	L133A/B;L137A/B;L134
RCS	自动降压系统 2、3 级管道	L004A/B;L006A/B;L020A/B;L030A/B;L131
RCS	非能动余热排出返回管道	L113
RCS	反应堆冷却剂系统与堆芯补水箱隔离阀之间的平衡管道	L118A/B
RCS	自动降压系统 2、3 级管道	L021A/B;L031A/B
RCS	自动降压系统母管与反应堆冷却剂系统安全阀之间的管道	L005A/B
RCS	正常余热排出入口管道	L140
RNS	正常余热排出入口管道	L001;L002A/B
SGS	主蒸汽管道	L006A/B

注:1) 高能管道:最高正常运行温度超过 93.33 ℃(200 ℉)或者最高正常运行压力超过 1.896 MPa 的系统管道或部分系统管道.

2) PXS:非能动余热排出系统
RCS:反应堆冷却剂系统
RNS:正常余热排出系统
SGS:蒸汽发生器系统

3) 与管道破裂相关的动力效应包括:管道断裂反应力载荷、喷射流和喷射冲击、隔间增加载荷、作用在其它部件上的因管道破裂引起的瞬时压降载荷.

1 LBB 在 AP1000 中的应用要求

根据美国联邦核安全法规(10CFR 50)附录 A 一般设计准则(GDC)4 的要求:安全相关构筑物、系统和部件的设计必须能承受正常运行、预期运行瞬态和假定事故工况所带来的影响.然而,当分析能够证明流体系统管道破裂的概率极低时,则可不考虑管道破裂引起的动力效应^[3]和水淹的影响.力学分析显示有较大的裕量、对管道破裂影响不敏感的管段也可以不考虑动力效应.

为了使 AP1000 相关管道系统满足 LBB 要求,则管道系统应满足与材料、退化机制、设计、建造、运行和在役检查相关的要求.

1.1 LBB 对材料和防退化的要求

核电厂管道系统应通过电厂设计、运行经验、试验或分析,充分保证下列各种因素导致管道失效的可能性最小^[6]:

- 低韧性
- 腐蚀和侵蚀导致壁厚减薄
- 应力腐蚀开裂
- 疲劳(热疲劳和机械疲劳)
- 热老化
- 蠕变疲劳
- 非间接原因
- 开裂

1.2 LBB 对设计的要求

在设计上应充分考虑如下情况^[7]:

- 管道布置、排气和疏水应充分考虑避免水锤的产生;
- 应避免发生超过耐久极限的连续震动;
- 管道布置应减少热分层现象的产生;
- 安全壳内泄漏监测系统应满足 RG 1.45《反应堆冷却剂压力边界泄漏探测系统》的要求;安全壳内主蒸汽管道泄漏应能通过安全壳地坑进行检测;
- 应限制 LBB 管道的应力,使之满足本文第 2 节中关于应力和断裂的要求;
- 管道附近的构筑物和部件应按照安全停堆地震(SSE)设计,以防止地震情况下管道间的影响.

1.3 LBB 对建造的要求

在建造上,LBB 要求考虑下述要求:

- LBB 管道系统应能实现 100% 役前检查;
- ASME III 3 级的 LBB 管道的焊接、焊工资

格以及焊缝检查的要求应等同于 2 级的要求;

- LBB 分析应根据竣工时候状态进行.

1.4 LBB 对运行的要求

LBB 对运行的要求如下:

- LBB 管道应有水化学控制能力,以防止发生腐蚀;
- 应降低冷却剂系统的 LBB 管道的冷却速率,防止对管道产生热冲击.

1.5 LBB 对检查的要求

LBB 对在役检查的要求如下:

- 应能对 LBB 管道阻尼器进行定期在役检查和试验,以保证阻尼器的可靠性;
- 应能对 LBB 管道进行定期检查,以发现因腐蚀/侵蚀产生的退化,以及腐蚀产生的空穴.应评估管道弯头壁厚和管道配件,以满足管道标准的要求;
- 每根采用 LBB 技术的 3 级管道的在役检查应包括超声检查,其要求应等同于高应力区或靠近高应力区 2 级焊缝的检查要求.

2 LBB 准则和分析方法

根据美国核安全法规(NUREG-1061)和标准审查大纲(SPR 3.6.3),LBB 分析应基于断裂机制的稳态分析,比较泄漏尺寸和临界裂纹尺寸大小.下述小节将概述分析方法^[8].

LBB 需应用于整个管道系统或者被分析过的管道部分,其中分析过的管道部分通常指两个终端或锚固点与另一个终端或锚固点之间的管道部分(终端是一个典型的、与大管道或设备的连接点,对于结构分析,一个承压和非承压管道部分之间的常关阀门不认为是一个终端),而不能应用于单个离散部分.图 1 是一个部分管道的示意图,其中 A 到 D 是可分析的管道.

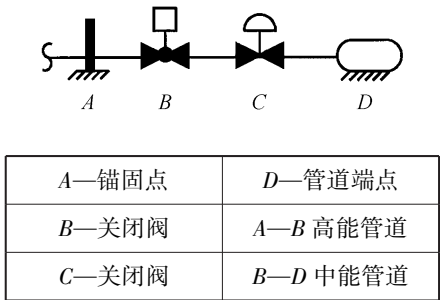


图 1 管道终端定义

Fig. 1 Pipe terminal definition

2.1 LBB 准则

在确定一根管道可以应用 LBB 分析技术,即需要对其进行断裂力学进行评定,判断其是否满足 LBB 准则. LBB 准则通常包括以下几方面的要求.

1) 载荷要求:载荷应包括正常运行条件下的静载荷和静弯矩以及与安全停堆地震有关的力和弯矩. 并且应假设裂纹位于应力和材质组合最不利的位置,即应力最高而材料韧性和强度最差的位置;

2) 泄漏裂纹尺寸:应假设缺陷的尺寸足够大,以保证泄漏能被及时监测到. 一般要求在正常运行载荷下裂纹的泄漏率是泄漏监测系统能够监测到的最小泄漏量的 10 倍;

3) 裂纹稳定性条件:在判断裂纹稳定性时,将正常运行载荷与安全停堆地震载荷相加,再乘以一个安全系数(根据载荷计算方法的不同,一般取 2.0 或 1.0),要求在此载荷的作用下,裂纹是稳定的. AP1000 设计中,为了满足 1.0 的载荷裕度要求,采用最大载荷绝对值组合来分析;

4) 临界裂纹尺寸:满足裂纹稳定性条件的失稳扩展的裂纹长度称之为临界裂纹尺寸. 临界裂纹尺寸应为泄漏裂纹尺寸的 2 倍.

2.2 LBB 界值分析

LBB 分析可通过使用界值分析方法在不同的材料、管道尺寸、压力和温度的组合上实施. 界值分析方法可用于绘制一组最大失效力和与之相关的正常应力曲线,以满足先漏后破准则. 这些曲线(界值分析曲线)能用于管道系统的设计阶段和竣工阶段的分析.

在被评价的关键位置(最大应力区域),其最大应力计算的载荷组合采用绝对值相加的方法,组合公式如下:

$$| \text{压力} | + | \text{自重} | + | \text{热应力}(100\% \text{ 功率})^* | + | \text{安全停堆地震} |$$

* 若适用,应包括热分层载荷.

在被评价的关键位置,正常应力应采用数学求和的方法,公式如下:

$$\text{压力} + \text{自重} + \text{热应力}(100\% \text{ 功率})^*$$

* 若适用,应包括热分层载荷.

2.2.1 应力计算

由于轴向载荷和合力矩产生的应力应由下列方程式计算^[9]:

$$\sigma = \frac{F}{A} + \frac{M}{Z}$$

其中:

σ = 应力

F = 轴向载荷

M = 弯矩

A = 管道截面积

Z = 管道抗弯模量

设计载荷组合的和弯矩应基于下述方程式:

$$M = \sqrt{M_X^2 + M_Y^2 + M_Z^2}$$

其中:

M = 弯矩

M_X = X 轴方向的弯矩

M_Y = Y 轴方向的弯矩

M_Z = Z 轴方向的弯矩

2.2.2 正常载荷

正常运行情况下和最大情况下的轴向载荷和弯矩应通过下述公式计算^[10]:

其中正常运行载荷通过下述公司计算:

$$F = F_{DW} + F_{Th} + F_p$$

$$M_X = (M_X)_{DW} + (M_X)_{Th}$$

$$M_Y = (M_Y)_{DW} + (M_Y)_{Th}$$

$$M_Z = (M_Z)_{DW} + (M_Z)_{Th}$$

其中:

DW = 自重

Th = 正常热膨胀(100% 功率) *

p = 内压载荷

* 若适用,应包括热分层载荷.

2.2.3 最大载荷

对于最大应力状态,载荷组合用绝对值相加的方法,这样可以导致较大的组合载荷裕量可以满足. 计算公式如下:

$$F = |F_{DW}| + |F_{Th}| + |F_p| + |F_{SSE \text{ INERTIA}}| + |F_{SSE \text{ AM}}|$$

$$M_X = |(M_X)_{DW}| + |(M_X)_{Th}| + |(M_X)_{SSE \text{ INERTIA}}| + |(M_X)_{SSE \text{ AM}}|$$

$$M_Y = |(M_Y)_{DW}| + |(M_Y)_{Th}| + |(M_Y)_{SSE \text{ INERTIA}}| + |(M_Y)_{SSE \text{ AM}}|$$

$$M_Z = |(M_Z)_{DW}| + |(M_Z)_{Th}| + |(M_Z)_{SSE \text{ INERTIA}}| + |(M_Z)_{SSE \text{ AM}}|$$

其中:

SSE = 安全停堆地震

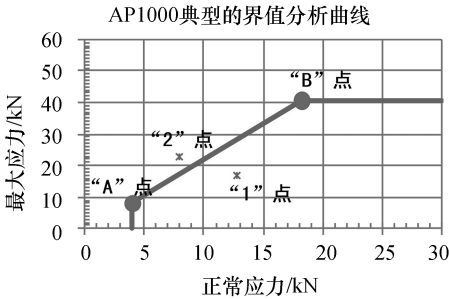
$INERTIA$ = 惯性

AM = 锚固件运动

2.2.4 界值分析曲线比较

对于指定管道系统,评价位置处的正常和最大应力根据 2.2 节中定义的载荷计算,然后将正常应力点和最大应力点在界值分析曲线上标出. 如果该

点位于界值分析曲线的下方或者在曲线上,则该管道系统满足 LBB 分析和裕度的要求;如果该点落在界值分析曲线的上方,则不满足 LBB 分析准则,必须修改其管道的布置和支撑结构,以满足 LBB 界值分析.典型的界值分析曲线如图 2.



注释:

- “A”点—界值分析曲线中的低点
- “B”点—界值分析曲线中的高点
- “A”点和“B”点通过直线相接
- “1”点—被分析的关键点满足 LBB 准则
- “2”点—被分析的关键点不满足 LBB 准则

图 2 AP1000 典型的界值分析曲线

Fig. 2 AP1000 typical boundary value analysis curve

3 结 论

LBB 技术是近 30 年发展起来的保证核反应堆结构高度可靠的一种新方法,和传统的以双端剪切断裂为设计基准事故的设计思想相比,LBB 方法更多地借鉴了弹塑性断裂力学的研究成果,充分利用了韧性材料的塑性变形和应变强化性

质,不仅可以提供结构的可靠性,而且可简化反应堆的设计,降低建设费用和对工作人员的辐照程度.

参考文献:

[1] 冯西桥,何树庭,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.

[2] 魏敏,王国珍,轩福贞,等. 核反应堆压力容器接管安全端堆焊修复结构的 LBB 分析[J]. 核技术,2014,37(1):1-5.

[3] Chattopadhyay J, Dutta B K, Kushwaha H S. Leak-before-break qualification of primary heat transport piping of 500 MWe tarapur atomic power plant[J]. Pressure Vessels and Piping,1999,76(4):221-243.

[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,2011,329(增刊1):189-191.

[5] 刘建章. 核结构材料[M]. 北京:化学工业出版社,2007.

[6] 薛飞,束国刚. 热老化铸造奥氏体不锈钢的冲击性能及预测[J]. 核动力工程,2010,31(1):9-13.

[7] Xue F, Yu W W, Wang Z X, et al. Thermal aging embrittlement evaluation of nuclear primary pipe steel by ductile to brittle transition test[J]. Advanced Materials Research,2010,97-101:797-800.

[8] 孙造占. LBB 对材料性能的要求[J]. 核安全,2006(3):5-10.

[9] 乔红威,刘志伟,李琦,等. LBB 裂纹稳定性分析方法研究[J]. 原子能科学技术,2013,47(11):2108-2113.

[10] Xue F, Wang Z X, Shu G G, et al. Thermal aging effect on Z3CN20.09M cast duplex stainless steel[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239 (11): 2217-2223.