

反应堆压力容器的临界裂纹长度分析*

刘冉* 黄美 刘军
(华北电力大学, 102206)

摘要 LBB 技术 (Leak-Before-Break) 是保证核反应堆结构安全、可靠的一种重要的分析方法, 若反应堆压力容器适用该技术条件可以极大的提高经济性。但目前 LBB 分析方法的应用主要集中在结构相对简单的核动力厂高能管道上, 在反应堆压力容器上的应用很少。本文以法国结构安全设计规范 RCC-MR.A16 为基础, 对反应堆压力容器的活性区及下封头进行 LBB 分析。分析结果表明, 在所研究的运行工况下, 反应堆压力容器满足 LBB 设计准则。

关键词: 反应堆压力容器 缺陷 LBB 分析

一、引言

20 世纪 80 年代以来, 各国的核电专家研究发现, 核电厂中双端剪切断裂事故发生的概率是非常小的, 以此作为设计基准事故会带来很多得不偿失的问题。如果在设计中高能管道和反应堆压力容器能够采用破前漏 (LBB) 分析技术, 就能够避免管道的双端剪切断裂事故的发生。^[1]

在核反应堆压力容器和高能管道内表面中, 不可避免的会有表面缺陷或内埋缺陷。在循环载荷的作用下, 这些表现为裂纹形式的缺陷就会进行扩展, 甚至会穿透壁面, 形成贯穿裂纹, 造成内容物的泄露。有的裂纹在贯穿后的一定长度内能够进行稳定的扩展, 但更多情况下裂纹在贯穿后会失稳扩展从而导致灾难性的事故发生。如果从检测到内容物的泄露到裂纹失稳扩展前能够有足够长的时间来采取安全处理措施 (如, 停堆、泄压等), 则不至于灾难性事故的发生, 认为该管道或压力容器满足 LBB 条件。^[2]

二、问题的描述

如图 1 所示为压力容器活性区及下封头, 筒体内半径 $R1=2.02m$, 壁厚 $T1=0.203m$ 。下封头内半径 $R2=1.98m$, 壁厚 $T2=0.1524m$ 。载荷为设计工况下的温度和内压。对压力容器的环向剖面施加轴向的位移约束, 两个纵向剖面施加对称约束。材料的性质见表 1。

表 1 材料参数

温度 $^{\circ}C$	25	50	100	150	200	250	300	350
弹性模量 $E(\times 10^5)$	2.04	2.03	2.00	1.97	1.93	1.90	1.86	1.83
热膨胀系数	11.22	11.45	11.79	12.14	12.47	12.78	13.08	13.40

* 注: The financial support from the fund of the State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, SKLIPR1402X.

*报告人简介: 1991.10-, 工程应用, 研究生: huangmei_team@163.com

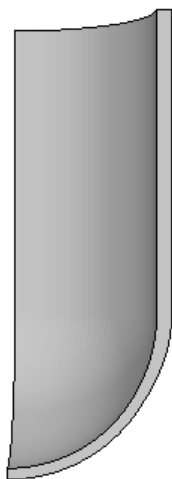


图 1 模型图

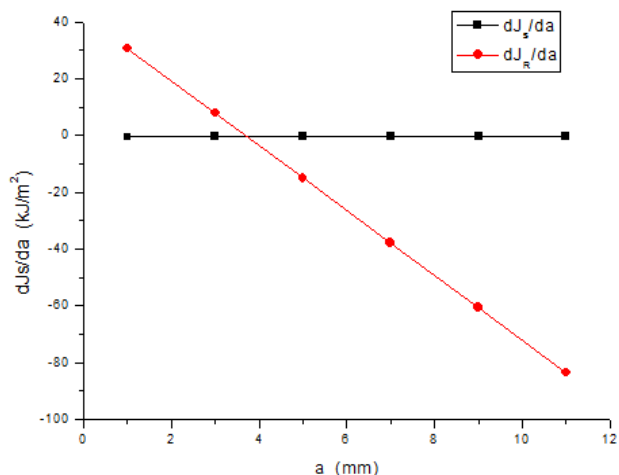


图 2 临界裂纹长度曲线

三、计算结果及分析

通过对压力容器进行结构分析，选取环向应力最大的筒体部分作为裂纹分析的部位。裂纹为沿轴向的贯穿裂纹，裂纹半长沿轴向从 30mm 到 60mm。通过裂纹分析专用程序 Franc3D 将裂纹引入模型，进行断裂力学参数计算。按照规定计算含不同尺寸裂纹的模型在热载荷和内压载荷作用下的 J 积分，然后按照 A16 中的公式进行转化。根据计算结果并通过数据拟合的到 J_s-a 的拟合关系式为：

$$J_s = 0.0121a^2 - 0.5142a + 22.152$$

由以上公式和 A16 标准中的 JR 曲线得到 dJ_s/da 曲线和的 dJ_R/da 曲线，见图 2。两条曲线交点处对应的裂纹长度就是临近裂纹尺寸。^[3]

四、结论

由以上分析可以得到该反应堆压力容器的临界裂纹长度为 4mm 左右，计算结果较为保守。反应堆压力容器壁很厚，结构相对复杂，应力水平较高，材料性能受到辐照影响而减弱，并且标准中给出的材料断裂性能参数非常保守，这些原因会使得压力容器 LBB 分析结果偏于保守。

参 考 文 献

- 1 李强,岑鹏,甄洪栋等.核动力厂高能管道 LBB 分析技术概述[C].//第十六届全国反应堆结构力学会议论文集.2010:1109-1115.
- 2 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,1998,02:54-73.
- 3 赵 RCC—MR: Appendix A16: Guide for Leak Before Break and Defect Assessment [S]. AFCEN,2002.