

压力容器筒体内表面裂纹在疲劳作用下的扩展分析

李志杰¹ 周耕宇² 焦广臣¹ 马春雷¹

(1、上海辉策信息科技有限公司 2、苏州热工研究院有限公司)

摘要: 核电厂压力容器筒体是反应堆中的重要部件,其结构完整性是反应堆安全运行的一道屏障。核电厂的运行过程中,压力容器筒体会产生裂纹;核电厂中的各种工况又会使裂纹因疲劳而产生扩展。压力容器在工作过程中是不能更换的,因而带裂纹工作也是其工作的常态,这就要求对裂纹的发生和发展要有比较准确或相对保守的评估方法以确保压力容器的裂纹尺寸不会超过限值。另一方面,对裂纹扩展的计算分析也可对核电厂延寿时的压力容器筒体寿命做出评估;同时,对于表面裂纹到穿透裂纹的全过程分析可得出是否满足破前漏(LBB)的设计要求。可见,裂纹扩展分析是十分重要的。

本文基于 Zencrack 软件,通过有限元方法对压力容器内表面存在的环向表面裂纹进行了其在疲劳作用下的扩展分析,得到了表面裂纹扩展的全过程,并对过程中的主要断裂力学参数进行了监控,如应力强度因子、 J 积分等,得到了整个扩展过程中的具体数值和变化规律,为压力容器筒体在设计和安全评估提供了切实可行的方法,同时也为核电厂延寿过程中的寿命评估和 LBB 评估提供了一种途径。

关键词: 疲劳, 裂纹扩展, Zencrack

1 概述

核电厂压力容器筒体是反应堆中的重要部件,其结构完整性是反应堆安全运行的一道屏障。核电厂的运行过程中,压力容器筒体会产生裂纹;核电厂中的启停机等工况又会使裂纹因疲劳而产生扩展。而压力容器筒体在工作过程中是不能更换的,因而带裂纹工作也是其工作的常态,这就要求对裂纹的发生和发展要有比较准确或相对保守的评估方法以确保压力容器的裂纹尺寸不会超过限值。另一方面,对裂纹扩展的计算分析也可对核电厂延寿时的压力容器筒体寿命做出评估;同时,对于表面裂纹到穿透裂纹的全过程分析可得出是否满足破前漏(LBB)的设计要求。

在核电厂压力容器的设计过程中,包含了断裂力学的要求。但在进行评估时方法是相对保守和简单的,如在易产生裂纹的位置假想一定形状和尺寸的一系列裂纹,依据相应的工程方法计算裂纹尖端的断裂力学参数如 J 积分、应力强度因子等,并与相应的设计规范比较,得出压力容器是否符合设计要求的结论。对于裂纹扩展的计算,由于缺乏有效的工具,只能进行比较简单和粗放的考虑。这些设计通常具有极大的保守性,不利于有效地发挥材料的潜在性能。而要充分发挥材料潜能就要求要对裂纹扩展有较为可靠的计算分析。

本文针对上述现实和困难,通过建立简单的压力容器筒体模型,详述了具体的计算思路,应用有限元方法并基于 Zencrack 软件分析了其在热力耦合的疲劳载荷作用下所含初始裂纹的扩展情况,并给出了计算结果和基于计算结果的各种结论,为压力容器的裂纹扩展分析提供了一个新的切实可行的方法,也为压力容器的设计及各项安全评估提供了一个新的参考。

2 模型简介

以压力容器筒体(材料为 SA-508 钢)为分析对象,示意图见图 1,筒体内半径 $R_i=2075\text{mm}$,壁厚 $t=192.5\text{mm}$,为避免边界效应,在建模时取筒体长度为 10 倍筒体半径。裂纹位于压力容器筒体的内表面,为半椭圆型表面裂纹,裂纹方向为环向,其裂纹深度 $a=0.1t$,裂纹长度 $2b=0.6t$ (t 为容器壁厚)。

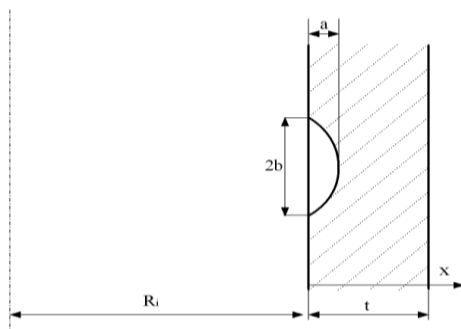


图 1 内表面半椭圆裂纹示意图

压力容器所受载荷工况如图 2 所示,在本次计算中,假定该种工况在寿期内作用多次。

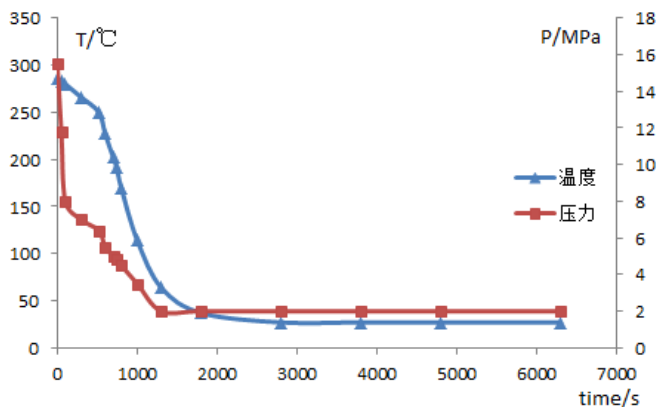


图 2 载荷工况

为进行环向表面裂纹的疲劳裂纹扩展计算,首先要建立带表面裂纹的压力容器筒体有限元模型。

用 Zencrack 进行裂纹扩展计算时,首先需要在有限元软件中建立不含裂纹的完整的有限元模型,然后将该模型导入 Zencrack,并用其特有的 Crack-block 技术进行裂纹的预置。

无裂纹的有限元模型网格划分如图 3 所示,由于问题具有一定的对称性,因而只建立其 1/4 模型,模型中最小单元尺寸为 2mm,最大单元尺寸为 80mm,该模型共包含 80560 个 C3D8T 单元和 94546 个节点。在预置初始裂纹的附近区域,需要划分为规则的扇形网格,如图 3 中的局部放大图所示。

模型的边界条件分为两个部分,一部分为对称面上的对称边界条件,另一部分为一个端面的位移边界条件。位移边界条件即在计算中约束某一端面上的节点位移。由于模型相对简单,对其边界条件不做过多的描述。

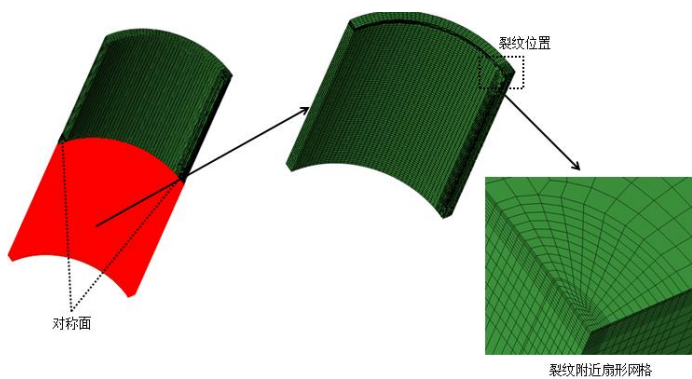


图 3 网格划分

基于无裂纹的有限元模型，即可将选定的 Crack-block 映射至其中，得到含裂纹的有限元模型，含裂纹的有限元模型如图 4 所示。

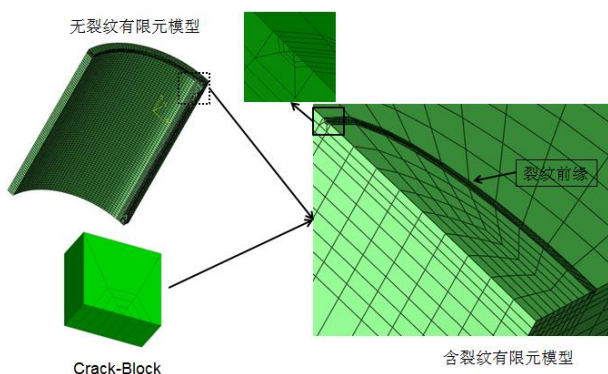


图 4 含裂纹的有限元模型

3 计算方法

进行裂纹扩展计算主要包括两个方面：裂纹扩展量和裂纹扩展方向。

在计算裂纹扩展量时，本文采用 Paris 公式进行计算，即：

$$da/dN=C(\Delta K)^n$$

其中， $C=1.216 \times 10^{-29}$ ， $n=3.1$ ，单位采用国际单位制。当裂纹位于特定位置，首先进行一次有限的瞬态计算，提取出整个瞬态过程中各个裂纹前缘节点 K 值，并计算出各个节点的 ΔK （即 $K_{max}-K_{min}$ ），在给定的容差内计算数个载荷循环内的裂纹扩展量。扩展方向本文中采用最大能量释放率准则进行控制，具体过程为，在给定的裂纹位置，计算每一裂纹前缘节点七个不同方向的能量释放率，并分别拟合成曲线，找到能量释放率最大方向作为裂纹扩展的方向，其示意图如图 5 所示^[1]。

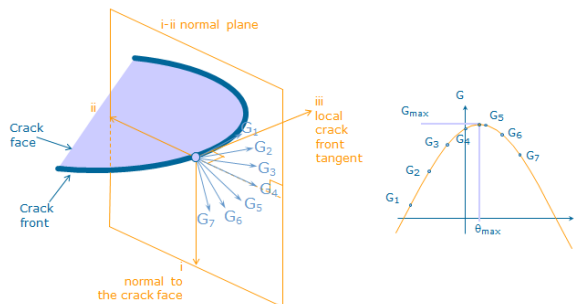


图 5 裂纹扩展方向的确定

为了保证计算的可行性和精确性，在本次计算中还有若干实际的考虑：

(1) 因要保证有限元求解的精确性，因而带裂纹区域的网格尺寸要足够小，而裂纹扩展量太小会使分析的意义不足，这就要求裂纹在扩展过程中需要穿过不同的网格。因而在计算中采用了 Zencrack 的 Crack-Block Transfer 技术，使包含裂纹前缘信息的 Crack-Block 可以在有限元模型中有序的移动，从而保证了计算的可行性。

(2) 随着裂纹扩展的进行，裂纹前缘会越来越贴近 Crack-Block 的边界，这会导致 Crack-Block 中的单元质量下降，可能导致计算的不精确甚至计算失败，因而采用了 Zencrack 中的边界释放技术保证裂纹前缘的网格质量，而由边界释放导致的周围单元质量下降的问题则通过网格松弛技术来解决，这就保证了计算的精确性。

4 计算结果及分析

在初始裂纹位置，裂纹前缘的应力强度因子随着时间的变化如图 6 所示，由曲线中可以看出，最深点处的应力强度因子较大，其变化的范围也较大，因而可以初步判断，在该种条件载荷工况和初始裂纹位置下，最深点的裂纹扩展速率要高于表面点的扩展速率。需要指出的是，此处采用的应力强度因子值为由 J 积分基于平面应力假设换算得到。

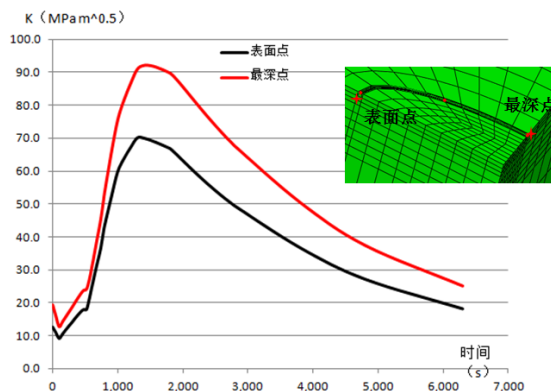


图 6 裂纹前缘节点的应力强度因子变化曲线

在同一时刻，初始裂纹前缘不同位置的应力强度因子如图 7 所示，图中给出了三个时间点的应力强度因子分布，不难看出，在该种载荷条件及初始裂纹位置下，同一时刻，裂纹前缘表面点应力强度因子最低，而最深点应力强度因子最高，随着裂纹深度的增加，应力强度因子呈现出单调递增的趋势。

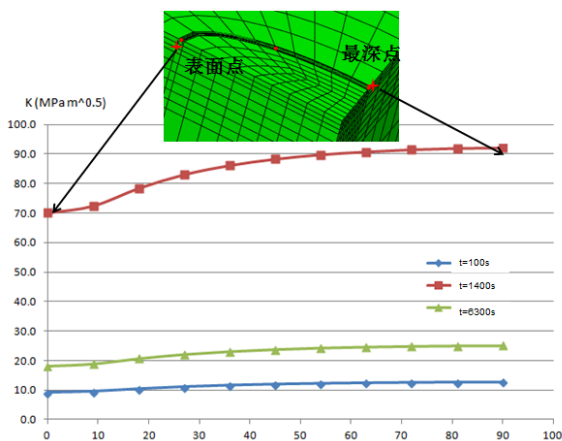


图 7 裂纹前缘应力强度因子比较

由以上计算结果不难看出，应用有限元方法基于 Zencrack 计算得到的裂纹前缘断裂力学参数信息较为丰富全面，对压力容器的设计和评估具有极大的帮助。

在疲劳载荷的作用下，裂纹会不断的扩展，裂纹扩展距离随着载荷循环的变化关系如图 8 所示。不难看出，表面点在开始时的扩展速度小于最深点的扩展速度，但随着裂纹位置的不断变化，表面点的扩展速度（曲线斜率）呈现增大趋势，而最深点的扩展速度有所下降，最终表面点扩展速度超过了最深点的扩展速度。这与图 9 中的应力强度因子变化趋势相一致。经计算经过 911 次载荷循环，表面点扩展 80.4mm，而最深点扩展 42.5mm。

通过对裂纹的疲劳扩展计算可以看出，应用有限元方法基于 Zencrack 可以得到疲劳裂纹扩展的全部过程，并能够对整个过程中断裂力学参数的变化进行监控，从而为设计和各种安全评估提供了更全面的判断依据。

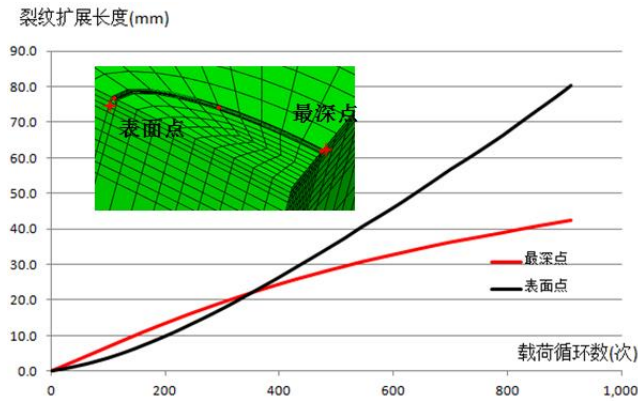


图 8 裂纹扩展长度与载荷循环数的关系曲线

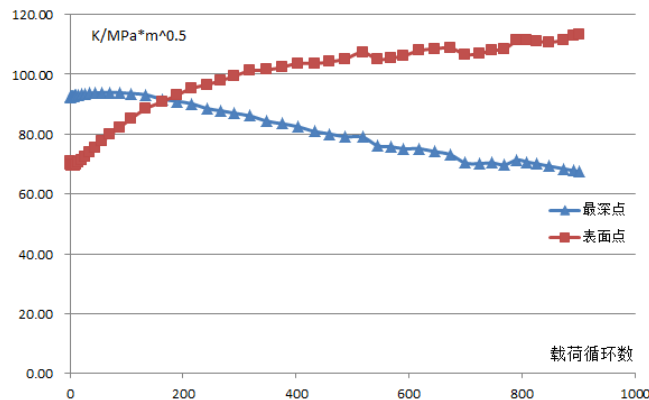


图 9 应力强度因子随载荷循环数的变化

裂纹扩展过程如图 10 所示，裂纹扩展扇面如图 11 所示。从图中可以看出，随着疲劳载荷的作用，裂纹不断的扩展，呈现出平面扩展的特征，这与基于模型对称且裂纹面位于对称面上所预测的结果是一致的。

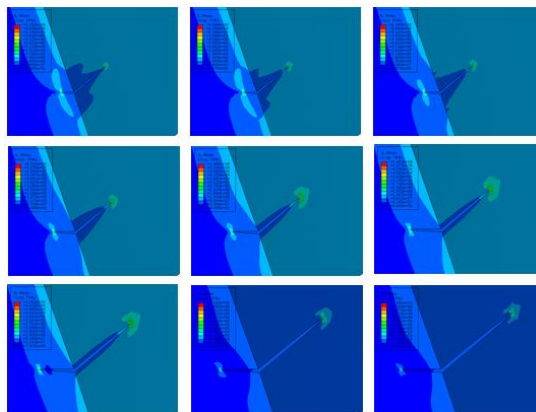


图 9 裂纹扩展过程

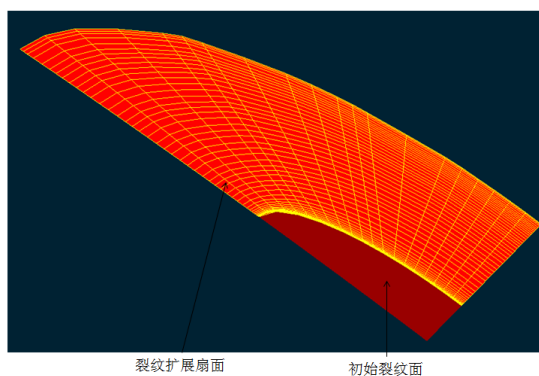


图 10 裂纹扩展扇面

5 总结

本文详细介绍了压力容器筒体环向表面裂纹疲劳扩展计算的思路及结果。可以看出，运用有限元方法并基于 Zencrack 软件进行的疲劳裂纹扩展分析具有可靠的理论基础，得到的结果丰富而全面，对于满足反应堆压力容器设计人员的需求具有极大的帮助。

参考文献

- [1]Zencrack User Manual v7.9-3