

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.04.012

反应堆压力容器防断裂一体化有限元分析

王辉, 何铮, 刚直

(国核华清(北京)核电技术研发中心有限公司, 北京 102209)

摘要: 压力容器在放射性等复杂的载荷下工作, 容易引起工程结构的疲劳裂纹扩展, 进而导致灾难性的破坏。我们利用自主开发的一体化结构有限元分析软件 ATLAS 对防断裂问题进行分析。该软件根据结构有限元分析的应用特点, 在特殊的数据结构基础上充分利用 GPU 的三维渲染能力, 并做了大量的优化工作, 能让 CAE 工程师在高度交互及可视化的环境下进行仿真分析工作。我们首先分析微观孔洞大小及位置对应力分布的影响, 然后以压力容器为例, 针对其结构及受力状况建立模型及载荷约束, 对其各部位受力及变形情况进行分析。在完成有限元求解后, 我们对计算结果进行应力线性化, 得到应力强度因子。我们依照 ASME BPVC III D1 附录 G 的标准进行防断裂分析校核, 通过计算数值的比较得出是否满足防断裂要求的结论。基于 ATLAS 软件提出的压力容器防断裂一体化有限元分析方法可用于压力容器延寿等工程实践中。

关键词: 压力容器; 结构有限元分析; 防断裂; 应力线性化

中图分类号: TQ051 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8676(2017)04-0059-07

Integrated Anti-Crack Finite Element Analysis of Reactor Pressure Vessel

WANG Hui, HE Zheng, GANG Zhi

(State Nuclear Hua Qing (Beijing) Nuclear Power Technology R & D Center Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: Under the loads of radioactive and other complex work conditions, reactor pressure vessel is prone to fatigue crack propagation of structures, which could lead to catastrophic damage. In this paper we introduced the developed finite element software ATLAS. By fully using of three-dimensional rendering capabilities of the GPU, ATLAS provided a large-scale highly interactive visualization environment for engineers. At first, ATLAS was used to analyze the size and location impact of the stress and displacement. Then, according to the structures and the forces of the pressure vessel, we created the model and load constraints, and analyzed the stress and deformation of the pressure vessel, simulated its working conditions, and determined its overall service life and weakness. We found that ATLAS can quickly calculate the stress linearization and the stress intensity factor, and complete the crack CAE analysis. In addition, we tested the anti-fracture analysis in accordance with ASME BPVC III D1 Standard Appendix G. By comparing the calculated values, conclusions can be drawn on whether it meets the anti-fracture requirements or not.

Key words: reactor pressure vessel; structural finite element analysis; anti-crack; stress linearization

反应堆压力容器是一回路压力边界部件中最重要核安全一级承压容器, 是防止放射性物质外泄的第二道安全屏障。压力容器长周期连续在放射

性、复杂载荷、极端化环境下服役, 引发各类腐蚀、环境开裂、材质劣化和机械损伤等失效模式, 进而导致灾难性的破坏^[1-2]。因此对反应堆压力容器的防断裂性能的评估具有重要的工程意义^[3]。

人们通常采用断裂力学分析方法对反应堆压力容器的一些缺陷进行疲劳裂纹扩展分析^[4], 或用连续损伤力学^[5]和裂纹扩展稳定性分析方法^[6]研究裂纹扩展规律, 依据规范对计算结果进行评定。

随着计算机硬件和软件技术的突飞猛进, 如果

收稿日期: 2017-01-05

基金项目: 国家重大科技专项经费资助项目(2012ZX06004-012)

作者简介: 王辉(1972), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 博士, 主要从事高性能计算技术研究及核电工程设计、分析软件研发工作 (e-mail) wanghui6@snpct.com.cn。

能够更充分地利用计算机硬件的飞速发展,如超级服务器、计算机集群等,和有限元分析技术的突飞猛进,如内存管理、并行计算等,使得大规模问题的快速求解成为可能,从而能够快速处理越来越复杂的反应堆结构问题。

目前在众多有限元分析软件当中,商业软件 ANSYS 分析软件^[7]和 ABAQUS 软件^[8]具有完全交互式的图形软件和前后处理功能,得到广泛的应用。但是这些商用软件在核电设备设计方面不具有良好的计算、评定功能。特别是在防断裂方面,虽然出现了一些专用的疲劳裂纹扩展计算软件,但这些软件不具备适用于核电工程规范评定功能,需要设计人员根据有限元计算结果,再依据相关规范人为进行评判^[9]。国际上开源软件如 Adventure^[10]、Code Aster^[11]、Impact^[12]、OpenFEM^[13]等均在开发中,但这些软件未进行核电工程方面的功能扩展,且并行效率都不太好,维护人员极度缺乏。

因此,我们自主开发了适用于国内核电工程的反应堆结构有限元软件 ATLAS^[14-15],本文主要介绍该软件的压力容器防断裂一体化结构有限元分析功能。自主开发的 ATLAS 软件根据反应堆结构有限元分析的特点,在特殊的数据结构基础上运用 OpenGL 图形引擎技术直接对硬件编程,并做了大量的优化工作,能让 CAE 工程师在高度交互及可视化的环境下进行仿真分析工作。

本文中,首先选用含孔洞材料的单轴力学数值试验作为算例,验证软件的常规应力应变计算分析功能,分析了含孔洞缺陷变化对材料性能及应力集中现象的影响。随后,选用实际的压力容器的结构及受力状况作为算例,建立模型及载荷约束,对压力容器的各部位受力及变形情况进行分析,模拟压力容器的工作状况并得到其整体的使用寿命,确定压力容器的薄弱环节。最终,将 ASME BPVC III D1 附录 G^[16]的防断裂分析评价标准嵌入到有限元分析软件中,自动对反应堆结构有限元计算结果进行防断裂评定,给出设备能否满足核电规范防断裂要求的结论。

1 计算方法

1.1 ATLAS 软件简介

ATLAS 是一个适用于核电工程的大规模结构快速有限元分析系统,集成了核电设计中所常用的

分析功能模块,如弹塑性分析功能、大开孔优化功能、热机耦合分析功能、瞬态分析功能、时程分析功能、楼层响应谱生成功能、反应谱分析功能、应力线性化功能、压力容器防断裂评定功能等。其有限元分析系统由三部分组成,包括前处理器 ATLAS Modeler,后处理器 ATLAS Viewer 和求解器 ATLAS Solver^[14-15]。软件的设计采用了先进的面向对象的设计模式,使用多态、虚拟继承与模板技术,在保证程序性能的前提下最大限度降低了程序模块之间的耦合性,具有非常高的可扩展性并且易维护。它最突出的特点是,在普通计算机上就可以很迅速地生成、处理上亿自由度的有限元分析模型,可适用于解决核电工程中核电设备、管道系统、核岛厂房三维有限元模型庞大、处理速度慢的相关的问题。

ATLAS 前处理器能直接读取 CAD 软件的几何模型进行有限元网格划分等操作,并进行材料属性和边界条件的设置,再提交给 ATLAS 求解器或 ABAQUS 求解器进行计算。其前处理器具备与 UG、Catia、ProE 等 CAD 软件的接口,并支持 ABAQUS、MARC 等求解器。

后处理器用于有限元计算得到的结果数据显示,其具有三维图形显示非常快等一些独特功能,也可以交互式的显示数据、进行数据捕捉、对后处理数据进行标准化设置,还可以根据客户需要查看动画结果。

1.2 ATLAS 求解器简介

ATLAS Solver 求解器基于高速并行原理开发,其计算收敛速度较常规有限元软件提升相当明显。

求解器中使用的有限元法的基本思路是把分析的连续体假想分割成有限个单元所组成的组合体,这些单元仅在定点处相互连接,这些连接点称为节点,单元之间只能通过节点传递内力,这些内力称为节点力,作用在节点上的载荷称为节点载荷,连续体受工况作用传递到节点上的位移称为节点位移。

以线性四面体单元为例,单元有四个节点 I 、 J 、 K 、 M ,每个节点有三个位移 u 、 v 、 w 和三个节点力 U 、 V 、 W 。节点力和节点位移的关系可表示为:

$$\{F\}^e = [K]^e \{\delta\}^e \quad (1)$$

式中: $[K]^e$ 为刚度矩阵。利用结构力的平衡条件

和边界条件把各个单元按照原来的结构连接起来,形成整体的有限元方程,对各个单元进行分析,建立节点载荷与节点位移的关系,以解出节点位移。最终将所有单元组合起来得到整体的方程:

$$[K]\{\delta\} = \{R\} \quad (2)$$

式中: $[K]$ 是整体刚度矩阵; $\{\delta\}$ 为全部节点位移组成的阵列; $\{R\}$ 为全部节点载荷组成的阵列。在位移法中,只有 $\{\delta\}$ 是未知的,求解该线性方程组就可得到各节点的位移,将节点位移带入各相应方程就可得到单元的应力分量。

1.3 应力线性化简介

在有限元方法中,当在分析中采用连续单元时,可得到总应力分布。因此,为得出薄膜和弯曲应力,总应力分布应线性化处理为应力分量成分,且用于计算其当量应力。如采用壳体单元,则由壳体总应力可直接得到薄膜和弯曲应力。

薄膜和弯曲应力都是在通过元件厚度的横截面上导出的,这些截面称为应力分类面(SCP),在二维结构中,由缩小两对应侧的分类面至无穷小长度而得到应力分类线(SCL)。分类面是通过元件截面所切出的平面,分类线是通过元件截面所切出的直线,当在轴对称或平面几何中观察时,分类线都是平面。

由有限元分析采用二维或三维连续单元所得的应力结果可以采用应力积分法进行处理,沿 SCLs 通过壁厚对应应力分量进行积分以确定薄膜和弯曲应力分量,采用这一方法由总应力分布扣除薄膜和弯曲应力分布可直接求得峰值应力分量。采用这些分量按下式计算当量应力:

$$S_e = \sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{0.5} \quad (3)$$

导出应力分布的薄膜、弯曲和峰值应力的方法在下面分步骤给出,用于计算的应力分量应以由 SCL 定位所规定的局部坐标为基础:

1) 第一步,计算薄膜应力张量,薄膜应力张量是由沿应力分类线每一应力张量的平均值组成的张量,或:

$$\sigma_{ij,m} = \frac{1}{l} \int_0^l \sigma_{ij} dx \quad (4)$$

2) 第二步,分三方面进行弯曲应力张量计算

(1) 仅对局部周向和径向(正)应力分量计算得弯曲应力,并不对平行于 SCL 的局部应力分量或面

内的剪切应力计算得弯曲应力。

(2) 仅对导致 SCL 扭转的剪切应力分布考虑剪切应力的线性部分(在垂直于周向平面中的面外剪切应力)。

(3) 弯曲应力分量是由沿应力分类线每一应力分量的线性变化部分所组成,或:

$$\sigma_{ij,b} = \frac{6}{t^2} \int_0^t \sigma_{ij} \left(\frac{t}{2} - x \right) dx \quad (5)$$

3) 第三步,计算峰值应力张量,峰值应力张量是分量等于下值中的张量:

$$\begin{cases} \sigma_{ij,F}(x) |_{x=0} = \sigma_{ij}(x) |_{x=0} - (\sigma_{ij,m} + \sigma_{ij,b}) |_{x=0} \\ \sigma_{ij,F}(x) |_{x=l} = \sigma_{ij}(x) |_{x=l} - (\sigma_{ij,m} + \sigma_{ij,b}) |_{x=l} \end{cases} \quad (6)$$

4) 第四步,以薄膜和薄膜加弯曲应力分量为基础,计算在 SCL 端部处的三个主应力。

5) 第五步,以薄膜和薄膜加弯曲应力分量为基础,用式(1)计算在 SCL 端部处的当量应力。

1.4 ASME 防断裂分析规范

1.4.1 计算临界应力强度因子

$$K_{IR} = 26.78 + 1.223 \times \exp[0.0145(T - RT_{NDT}) + 160] \quad (7)$$

计算得到的应力强度因子为允许的临界最大值。

1.4.2 计算分析模型的应力强度因子

本文分两种情况,临近接管、法兰区和远离接管、法兰区。

1) 对于远离接管、法兰区域,计算过程如下:

(1) 薄膜应力对应的应力强度因子

$$K_{im} = M_m \times \text{膜应力} \quad (8)$$

(2) 弯曲应力对应的应力强度因子

$$K_{ib} = M_b \times \text{最大弯曲应力}, M_b = \frac{2}{3} M_m \quad (9)$$

(3) 径向温度梯度对应的应力强度因子

$$K_{it} = M_t \times \text{壁厚温差} \quad (10)$$

(4) 评价依据

$$2K_{im} + 2K_{ib} + K_{it} < K_{IR} \quad (11)$$

壁厚温差可由 ASME 规范中的参考图得到。

2) 对于临近接管、法兰的区域,计算过程如下:

(1) 一次薄膜应力对应的应力强度因子

$$K_{im} = M_m \times \text{膜应力} \quad (12)$$

(2) 一次弯曲应力对应的应力强度因子

$$K_{lb1} = M_{b1} \times \text{一次最大弯曲应力}, M_{b1} = \frac{2}{3}M_{m1} \quad (13)$$

(3) 二次薄膜应力对应的应力强度因子

$$K_{lm2} = M_{m2} \times \text{二次膜应力} \quad (14)$$

(4) 二次弯曲应力对应的应力强度因子

$$K_{lb2} = M_{b2} \times \text{二次最大弯曲应力}, M_{b2} = \frac{2}{3}M_{m2} \quad (15)$$

(5) 评价依据

$$2K_{lm1} + 2K_{lb1} + K_{lm2} + K_{lb2} < K_{IR} \quad (16)$$

根据 ASME BPVC 第 III 卷 NB-3220, 确定各评定截面的应力限制。对于 D 级使用限制, 适用 ASME BPVC 第 III 卷附录 F 的规则。

1.5 软件操作界面示意

ATLAS 核电有限元软件中完成了上述分析功能的前后处理界面开发。如模型前处理界面开发如图 1(a) 所示, 有限元应力结果处理界面开发如图 1(b) 所示, 线性化界面开发如图 2 所示, 防断裂校核界面开发如图 3 所示。

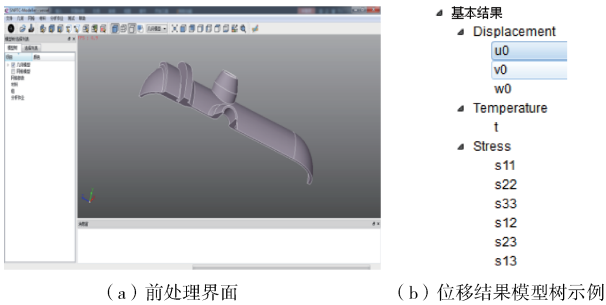


图 1 模型前处理和有限元应力结果界面

Fig. 1 Model creation and model tree of displacement distribution

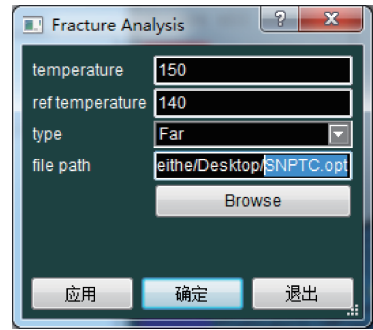


图 3 防断裂校核示例

Fig. 3 Sample of fracture analysis

如图 1(a) 所示, 根据模型尺寸填写网格的最大尺寸 75、平均尺寸 50 和最小尺寸 10, 点击确定按钮即可划分面网格。最后我们得到节点数 29 067, 面网格数 27 160, 体网格数 133 310。

在后处理器中选择左侧模型树中的基本结果—Displacement-u, 并双击, 然后选择工具栏中的“光滑云图”即可显示 X 方向位移云图, 对应的 v 为 Y 方向位移、w 为 Z 方向位移, 如图 1(b) 所示。应力结果和温度结果查看同位移的查看方法。

按照图 2 所示过程, 选择应力线、输入等分数确定之后, 选择应力线性化文件的保存位置, 则会在所选择的文件夹生成应力线性化结果文件, 其后缀名为 .opt。

依照图 3, 点击即可调出防断裂分析的界面, 按照 ASME BPVC III D1 附录 G 的要求, 需要输入参考无延性温度和允许 RT_{NDT} 的温度。点击确定之后, 消息窗会将参考应力强度因子 K_{IR} 和计算得到的应力强度因子 K_I 显示出来。

2 反应堆压力容器防断裂分析

2.1 微观孔洞大小对材料性能的影响

不失一般性, 我们首先建立一个立方体模型, 其尺寸为 10 mm × 10 mm × 10 mm, 弹性模量为 9.8 GPa, 泊松比为 0.14。立方体模型中随机分布 40 个大小不同的球型孔洞, 整个立方体体积为 1 000 mm³, 所有孔洞体积和为 50 mm³, 孔洞体积与整个立方体体积之比为 1/20。载荷分布为顶板上表面施加垂直于表面的面载荷 $P = 5 \text{ MPa}$, 方向 Z 轴负方向。约束分布为底板下表面固定 X、Y、Z 方向位移, 顶板分别固定 4 个侧面水平位移。



图 2 应力线性化

Fig. 2 Linearization of stress

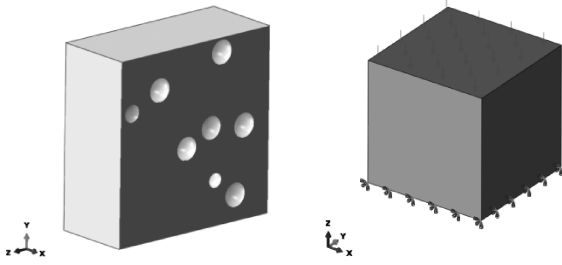


图 5 模型 (左) 及边界和载荷 (右)

Fig. 5 Model (left), loads, and boundary conditions (right)

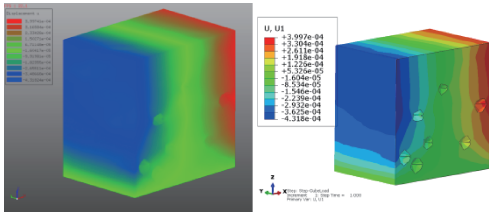


图 6 模型位移分布 (左: ATLAS; 右: ABAQUS)

Fig. 6 Distribution of displacements of model (left: ATLAS; right: ABAQUS)

对模型中孔洞占比 1%、2%、3%、4%、5%、10%、15%、20% 分别进行了计算, 并计算了弹性模量, 弹性模量计算公式如下:

$$E = \frac{\sigma L}{\Delta L} \tag{17}$$

式中: E 为弹性模量, 本文中为计算出的对应孔隙率的弹性模量; σ 为应力, 本文中为施加的面载荷; L 为立方体边长, 本文中为 10 mm; ΔL 为竖向位移, 本文中为施加面载荷的面上节点平均位移。

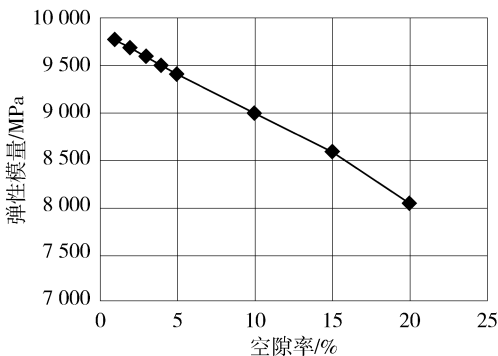


图 7 孔隙率与弹性模量的关系

Fig. 7 Relationship between porosity of cavities and elastic modulus

无孔洞模型的材料参数中弹性模量值为 9.8 GPa, 由于孔洞的存在, 使得整体模型的弹性模量

降低。随着孔隙率的增加, 弹性模量成近似线性递减的规律^[17]。

2.2 孔洞位置对应力集中现象的影响

算例模型如图 8 所示, 该模型仅受拉力 (大小为 30 MPa) 的作用。其中材料参数为: 密度 2 700 kg/m³, 弹性模量: 70 GPa, 泊松比: 0.3。网格为 4 966 个节点, 17 264 个线性四面体单元。

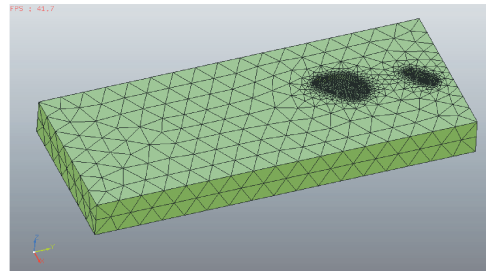


图 8 孔洞模型网格划分

Fig. 8 Meshing the model with cavities

我们点击左侧列表中的“位移”, 分别勾选 x 、 y 、 z 方向位移约束, 在模型显示区选择要施加约束的面 (对称边界条件), 软件左侧的选择列表会列出已经选择的面及编号, 点击创建荷载边界对话框中的确定按钮, 完成施加荷载和约束条件的设置, 如图 9 所示。位移结果如图 10 所示, 应力云图如图 11 所示。

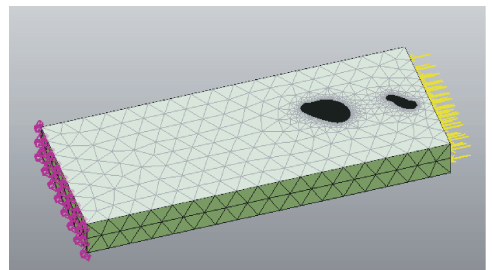


图 9 施加载荷和约束条件

Fig. 9 Loadings and boundary conditions

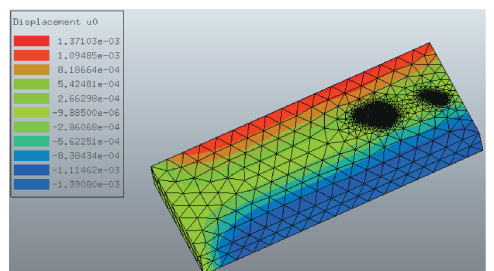


图 10 位移结果

Fig. 10 Distribution of displacements

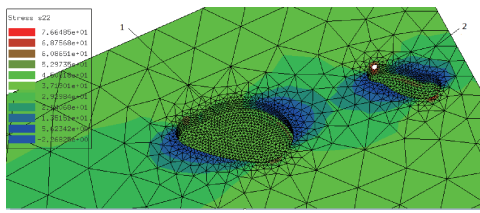


图 11 孔洞附近应力云图

Fig. 11 Contour of stress around the cavities

从图 11 中可明显看出，孔洞导致了严重的应力集中，尽管孔洞 1 比孔洞 2 的体积要大，然而在孔洞 2 周围的应力集中最大，达到了 76.65 MPa（途中白点处即为应力最大值处），由此可见，靠近边界的孔洞附近容易产生疲劳裂纹。由此可以看出，应力集中现象不能仅仅考虑单一孔洞的大小，更要对整体模型进行一体化结构有限元分析^[17]。

2.3 压力容器防断裂一体化有限元分析

为完成压力容器防断裂分析，我们针对压力容器设计的规范，按照容标委的规范设定一个应力分类线，然后对应应力分类线上的应力强度分布进行应力分类，也就是按照力平衡原则将应力分解为线性成分和非线性成分，然后根据这些规范数据对压力容器设计做校验。

选择应力分类线的两个端点的原则是确定位于应力强度最大部位壁厚方向的一个内壁点和一个外壁点的大概位置，使得分类线使得分类应力达到最大为止。

由于铸造过程中气体的卷入或使用过程中的腐蚀，压力容器可能存在微观孔洞现象，就会导致实际弹性模量的下降，影响疲劳寿命。另外，孔洞的大小、位置，以及形状，都会对应力有一定的影响。基于高精度三维 X 射线断层扫描技术对压力容器进行扫描，得到压力容器的三维模型。对压力容器真实模型进行一体化有限元分析，得到压力容器三维应力分布。然后根据防断裂分析规范，进行应力线性化，计算出应力强度因子。最后根据计算得到的应力强度因子与参考应力强度因子的比较，即可判断该压力容器是否满足防断裂的要求。因此，压力容器防断裂一体化分析方法对正在运行的压力容器采取措施进行延寿或按长寿命设计的新压力容器都能降低建造成本，提高经济效益。

我们采用实际的反应堆压力容器工程数据进行建模分析。因压力容器是对称的，取其 1/4 模型来

分析，该模型仅受内压（大小为 5 Pa）的作用。材料参数为：弹性模量：200 GPa、泊松比：0.3。

在图 12 中，我们添加弹性模量等材料参数，并施加载荷和约束条件。有限元计算结果位移云图如图 13 所示。

按照 ASME BPVC III D1 附录 G 的要求，需要输入参考无延性温度和允许 RT_{NDT} 的温度。

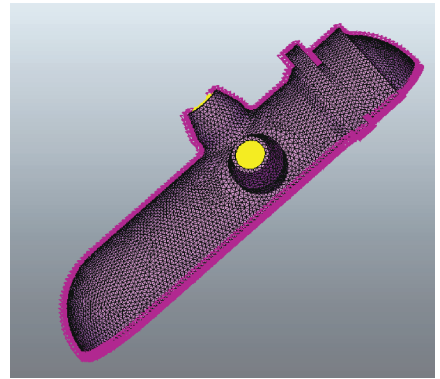


图 12 载荷和约束条件

Fig. 12 Adding loadings and constraint conditions

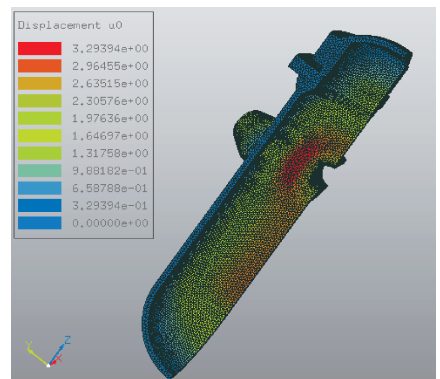


图 13 结果查看

Fig. 13 Distribution of displacements

该分析严格按照 ASME BPVC III D1 附录 G 的规程，针对接管、封头等不连续区和远离不连续区采用不同的公式。

本例中采用 $RT - RT_{NDT} = 10$ ，位置为远离不连续区，并指定到上一步的应力线性化结果文件：

根据本文第一章中的计算原理，以及第二章中软件的操作，本案例通过软件计算后得到的应力强度因子数值的比较就可以得出是否满足防断裂要求的结论。本算例中， $K_I = 8.456797$ ， $K_{IR} = 41.166740$ ，满足 $K_I < K_{IR}$ ，因此该压力容器满足防断裂的要求。

3 结论

1) ATLAS 可很好地完成含微观孔洞结构的结构有限元分析。ATLAS 计算结果的准确性可以得到保证,与 ABAQUS 相同模型的计算结果近似。

2) 由于微观孔洞的存在,使得整体模型的弹性模量降低。随着孔隙率的增加,弹性模量成近似线性递减的规律。靠近边界的微观孔洞导致更严重的应力集中,更容易产生疲劳裂纹,这与疲劳实验的结果相吻合。

3) 无需借助其他软件,自主开发的结构有限元分析软件 ATLAS 能独立完成反应堆压力容器防断裂有限元分析。压力容器防断裂一体化分析方法有助于解决压力容器延寿或设计长寿命压力容器等实际工程问题。

参考文献:

- [1] 韩峰,张亚军,张利娟,等. 压力容器用钢低周疲劳表面裂纹扩展速率试验研究[J]. 材料开发与应用, 2011, 26(4): 56-59.
- [2] 陈学东,杨铁成,蒋家玲,等. 压力容器高应变区应变疲劳裂纹扩展试验研究[J]. 实验力学, 2003, 18(4): 520-528.
- [3] 蔡力勋,左国,叶裕明,等. Inconel 718 合金短管高温低周疲劳行为[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(6): 1003-1008.
- [4] 孙英学,郑斌,臧峰刚. 反应堆压力容器出口接管管嘴缺陷断裂力学分析[J]. 核动力工程, 2009, 30(4): 21-24.
- [5] 冯西桥,何树延. 表面裂纹疲劳扩展的一种损伤力学方法

- [J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997, 37(5): 78-82.
- [6] 董亚民,冯峰,黄克智. 压力容器及管道 LBB 评估技术中的裂纹扩展稳定性分析方法[J]. 工程力学, 1999, 16(4): 16-24.
- [7] ANSYS. ANSYS 用户手册[M/OL]. <http://www.ansys.com>.
- [8] ABAQUS. ABAQUS 用户手册[M/OL]. <http://www.3ds.com>.
- [9] 郑连纲,谢海,苏东川,等. 基于 ANSYS 程序的反应堆压力容器疲劳裂纹扩展分析方法研究[J]. 核动力工程, 2015, 36(6): 67-70.
- [10] YAGAWA G, SHIOYA R. Parallel finite elements on a massively parallel computer with domain decomposition [J]. Comp. Syst. in Eng., 1993, 4(4-6): 495-503.
- [11] Code Aster. Code Aster 用户手册[M/OL]. <http://www.code-aster.org>.
- [12] Impact. Impact 用户手册[M/OL]. <http://impact.sourceforge.net>.
- [13] OpenFEM. OpenFEM 用户手册[M/OL]. <http://openfem.org>.
- [14] WANG H, LV P. Performance improvement of seismic analysis in a large scale interactive visualization [C]. IEEE HPCC/CSS/ICISS, 2015: 908-913.
- [15] WANG H, LV P. Evaluation of memory optimization in a large-scale structural finite element pre-processor [C]. IEEE MCSoc, 2014: 31-38.
- [16] ASME. ASME BPVC III D1 附录 G [S]. NewYork: ASME, 1998.
- [17] WAN Q, ZHAO H D, ZOU C. Three-dimensional characterization and distribution of micropore in aluminum alloy high pressure die casting [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(3): 284-290.

(责任编辑 高春萌)

订 阅

《南方能源建设》的办刊宗旨立足于为能源行业尤其是电力行业工程建设提供技术支持和信息服务,推广新理论、新技术的工程应用,提高我国能源建设质量和技术水平。主要面向全国能源行业尤其是电力行业设计、建设、制造等企业、以及相关的研究机构 and 高等院校的广大工程技术人员、管理人员、专家学者等。本刊设有能源资讯、专家论坛、规划咨询、勘测设计、施工建设、装备制造、工程管理、投资运营、运行维护、案例分析、简讯等栏目,将优先报道低碳环保、节能减排等技术研究和工程应用以及风能、太阳能、生物质能、海洋能等可再生能源的技术研究及工程建设。

出版周期: 季刊(季末 25 号)

订阅年价: 60 元

国内刊号: CN 44-1715/TK

国际刊号: ISSN 2095-8676

联系电话: 020-32116043

传 真: 020-32118078

期刊网站: <http://nynf.cbpt.cnki.net>

微信号: ceec-gedi