

核供热堆压力壳组合阀接管热应力的有限元分析

陈在铁

(沙洲工学院, 张家港 215600)

摘要 运用非线性有限单元法对 200 MW 核供热堆压力壳组合阀接管的热应力进行了研究和数值计算, 得到了压力壳组合阀接管的热应力分布情况, 为核供热堆压力壳组合阀接管的强度校核提供了依据。

关键词 核供热堆 压力壳 接管 热应力 非线性分析

分类号 O39

核能作为可持续开发的新能源受到普遍的重视, 但核能装置的安全性要求很高, 结构每一部分的强度、刚度、密封性都必须经过严格的分析、计算和实验测试。作为 200 MW 核供热堆的组成部分, 压力壳组合阀接管的强度问题与整个装置的安全性有着密切的关系。本文即利用非线性有限单元法对 200 MW 核供热堆压力壳组合阀接管热应力进行计算和强度校核^[1]。

1 核供热堆压力壳组合阀接管的结构简图

核供热堆压力壳组合阀接管的结构简图如图 1 所示, 压力壳材料为 SA516-70, 接管材料为 321 型不锈钢 (OCr18Ni11Ti), 有关机械性能和热力学性能数据由工程手册查得。在工作状态下压力壳组合阀接管处于一个不均匀的温度场之中, 其中压力壳筒体的温度为 210 °C, 接管端盖的温度为 150 °C, 在压力壳筒体内侧还受到 3.0 MPa 的设计压力的作用。

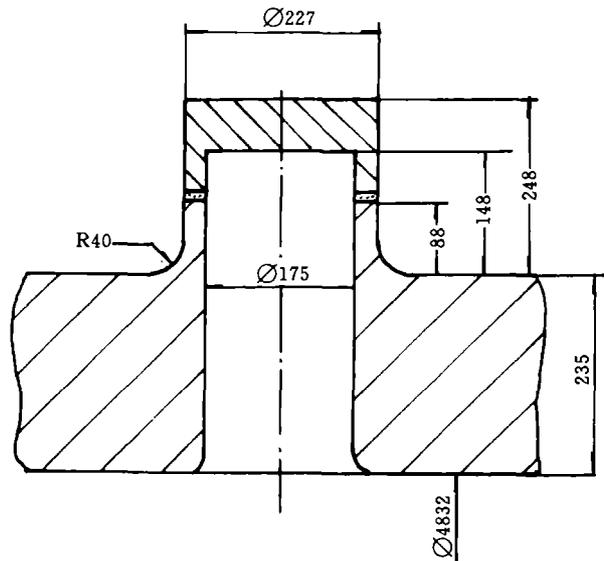


图1 压力壳组合阀接管结构图

c ——材料比热 (J/kg·K)

k_r, k_z ——分别为材料沿 r, z 方向的热传导系数 (W/m·K)

Q ——材料内部的热源密度 (W/kg)

边界条件是:

$$\phi = \bar{\phi}(\Gamma, t) \quad \text{在 } \Gamma_1 \text{ 边界上}$$

$$k_r \frac{\partial \phi}{\partial r} n_r + k_z \frac{\partial \phi}{\partial z} n_z = q(\Gamma, t) \quad \text{在 } \Gamma_2 \text{ 边界上}$$

$$k_r \frac{\partial \phi}{\partial r} n_r + k_z \frac{\partial \phi}{\partial z} n_z = h(\phi_0 - \phi) \quad \text{在 } \Gamma_3 \text{ 边界上}$$

2.2 轴对称问题的稳态热传导微分方程

当热传导达到稳态时, 其边界上的 $\bar{\phi}, \bar{q}, \phi_0$ 及内部的 Q 不随时间的变化而变化, 此时求解轴对

2 轴对称问题稳态热传导的有限单元法

2.1 轴对称问题的热传导微分方程

在轴对称情况下温度场函数 $\phi(r, z, t)$ 应满足的微分方程是:

$$\rho c r \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial r} (k_r r \frac{\partial \phi}{\partial r}) - \frac{\partial}{\partial z} (k_z r \frac{\partial \phi}{\partial z}) - \rho r Q = 0 \quad (1)$$

式中 ρ ——材料密度 (kg/m³)

· 收稿日期: 1999-05-04

称问题时的稳态热传导方程为

$$\frac{\partial}{\partial r}(k_r r \frac{\partial \phi}{\partial r}) - \frac{\partial}{\partial z}(k_z r \frac{\partial \phi}{\partial z}) + \rho r Q = 0 \quad (2)$$

2.3 加权余量的伽辽金法建立稳态热传导的有限单元格式

用伽辽金法建立的轴对称稳态热传导的有限单元格式是:

$$K\phi = P$$

式中 K 称为热传导矩阵

$\phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]^T$ 是节点温度列阵

P 是温度载荷列阵

矩阵 K 和列阵 P 的元素分别为

$$K_{ij} = \sum_r K_{ij} + \sum_r H_{ij}$$

$$P_i = \sum_r P_{\psi} + \sum_r P_{in} + \sum_r P_{\phi}$$

$$\text{式中 } K_{ij} = \int_{\Omega} (k_r \frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} + k_z \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z}) d\Omega$$

$$H_{ij} = \int_{\Gamma_3} h N_i N_j d\Gamma$$

$$P_{\psi} = \int_{\Gamma_2} N_i q d\Gamma$$

$$P_{in} = \int_{\Gamma} N_i h \phi_s d\Gamma$$

$$P_{\phi} = \int_{\Omega} N_i \rho Q d\Gamma$$

2.4 压力壳组合阀接管的有限元计算模型和单元划分

压力壳组合阀接管纵截面受力和约束情况如图2所示。图3为压力壳组合阀接管纵截面的有限元网格划分和节点编号图,网络单元为8节点4边形单元,计算模型为轴对称模型,材料为各向同性弹性材料。

3 计算结果

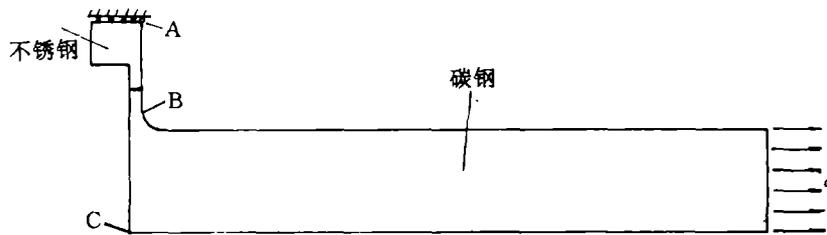


图2 压力壳组合阀接管受力和约束状况

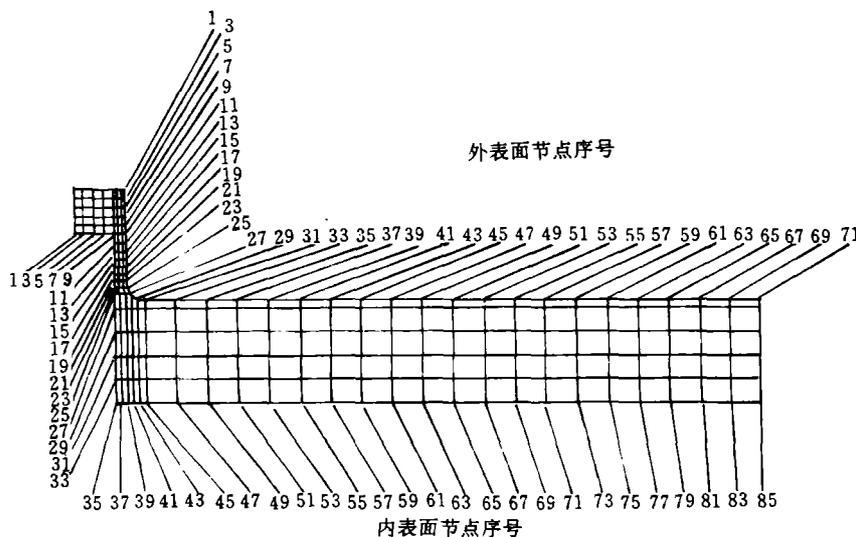


图3 压力壳组合阀接管有限元划分网络

3.1 压力壳组合阀接管仅受机械载荷作用时的应力

用 ADINAT 程序计算压力壳组合阀接管仅受设计压力时的应力。压力壳接管内表面计算结果如图4所示,应力强度($\sigma_1 - \sigma_3$)的最大值发生在28节点处,其值为32.73 MPa。内表面的第一主应力(σ_1)的最大值发生在35节点处,其值为32.23

MPa。计算表明,压力壳接管外表面的应力强度($\sigma_1 - \sigma_3$)的最大值发生在29节点处,其值为21.07 MPa,外表面的第一主应力(σ_1)的最大值发生在30节点处,其值为23.27 MPa。

3.2 压力壳组合阀接管的热应力

本文计算了两个工况下的热应力。工况1时压

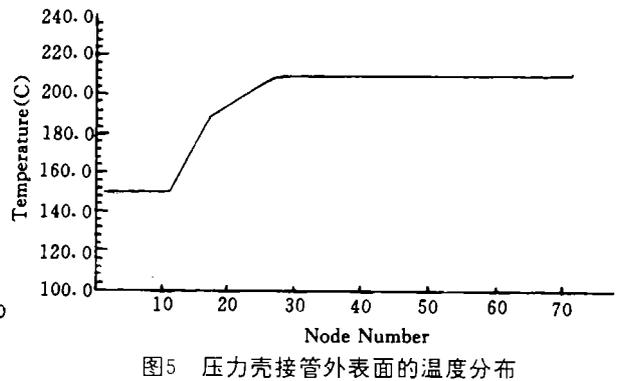
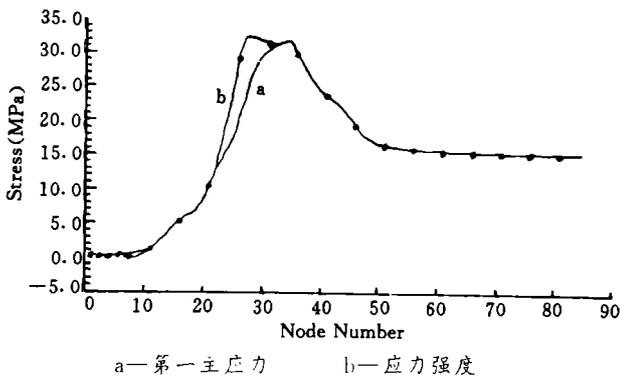


图5 压力壳接管外表面的温度分布

图4 压力壳接管内表面的应力强度 第一主应力分布
力壳筒体的给定温度为210 ℃,接管端盖的给定温度为150 ℃,接管部分为导热状态;工况2时压力壳筒体和接管的给定温度均为210 ℃,即整个结构处于210 ℃的均匀温度场中。

在工况1的情况下,先用 ADINAT 程序计算各节点的温度值,外表面计算结果如图5所示。在同时考虑机械荷载的情况下,再将 ADINAT 程序的计算结果作为载荷输入值输入 ADINA 程序进行计算。计算时设材料为各向同性热弹性,初始温度为25 ℃。图6为工况1时压力壳接管外表面的应力强度、第一主应力的分布图。计算表明,压力壳接管内表面的应力强度($\sigma_1 - \sigma_3$)的最大值发生在15节点处,其值为87.87 MPa;压力壳接管外表面的应力强度($\sigma_1 - \sigma_3$)的最大值发生在17节点处,其值为88.63 MPa,外表面的第一主应力(σ_1)的最大值发生在16节点处,其值为61.30 MPa。

工况2情况下直接用 ADINA 程序进行计算,计算结果表明,压力壳接管内表面的应力强度($\sigma_1 - \sigma_3$)的最大值发生在15节点处,其值为86.85 MPa,内表面的第一主应力(σ_1)的最大值发生在16节点处,其值为50.24 MPa;压力壳接管外表面的应力强度($\sigma_1 - \sigma_3$)的最大值发生在18节点处,其值为83.39 MPa,外表面的第一主应力(σ_1)的

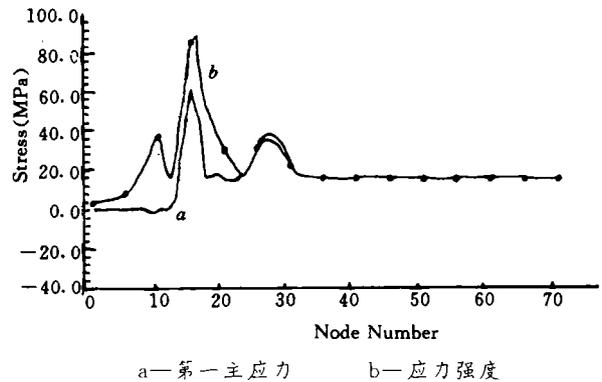


图6 压力壳接管外表面的应力强度 第一主应力分布
最大值发生在16节点处,其值为52.19 MPa。

4 结论

根据 ASME 规范第三卷第一册的 NB 分册中关于核结构的分析法设计的有关评价准则,本文采用最大剪应力破坏强度理论。根据 ASME-3-NB 的有关准则,SA516-70碳钢和不锈钢材料中的较小的许用应力 $[\sigma] = 360$ MPa,非线性有限单元法算得工作时最大剪应力破坏强度理论相当应力均小于许用应力 $[\sigma]$,故200 MW 核供热堆压力壳组合阀接管是足够安全的,这与实验结果相符。

参 考 文 献

1 王勖成,邵敏.有限单元法基本原理与数值方法.北京:清华大学出版社,1988.382~388

The Non-Linear Finite Element Analyse of Heating Stress of 200MW Heat-Providing Nuclear Reactor Pressure Shell Pipe Joint

Chen Zantie

(Shazhou Institute of Technology,Zhangjiang 215600,PRC)

Abstract This paper researches and calculates the heating stress of 200MW heat-providing nuclear reactor pressure shell pipe joint by means of the non-linear finite element method. The deposits of pressure shell pipe joint heating stress have been obtained. It provides the bases for stress strength calculation of Pressure Shell Pipe Joint.

Keywords Heat-providing nuclear reactor; Pressure shell; Pipe joint; Heating stress; Non-linear study