热和机械载荷下的压力容器接管区的应力强度因子

焦广臣¹, 曹明², 沈睿², 李志杰¹, 马春雷¹, Chris Timbrell³ (1. 上海辉策信息科技有限公司; 2. 上海核工程设计研究院; 3. Zentech International Limited)

摘要:分别采用有限元法和 ASME 附录 G (2013)中的方法,计算热和机械载荷作用下的压力容器接管区 结构的裂纹尖端应力强度因子。由于 ASME 附录 G (2013)中的方法仅说明可用于分析特定裂纹位置的接 管结构,受限于工程应用。因此,本文采用有限元法计算不同裂纹结构的裂纹尖端应力强度因子,研究 ASME 附录 G (2013)中的计算方法的适用性,评估压力容器接管区结构的运行安全性。 关键词:应力强度因子;核电;压力容器接管区;ASME 附录 G;热机载荷。

Stress Intensity Factor of Nozzle Corner in Pressure Vessel Under

Condition of Thermal and Mechanical Loads

Guang-chen Jiao¹, Ming Cao², Rui Shen², Zhi-jie Li¹, Chun-lei Ma¹, Chris Timbrell³ (1. Consys Group Limited, 2. Shanghai nuclear engineering research & design institute, 3. Zentech International Limited)

Abstract: Stress intensity factor (SIF) of nozzle corner in pressure vessel was calculated by using FEA and method of ASME appendix G (2013 section XI) under condition of thermal and mechanical loads. Because the computational formula in ASME appendix G can only be explained in analysis of nozzle structure with specific crack position, but engineering application is limited by using this formula. So the Stress intensity factors of nozzle corner with different crack positions were calculated, the application condition of this method and safety assessment of vessel nozzle were investigated in this paper.

Keywords: Stress intensity factor, nuclear, nozzle corner of pressure vessel, ASME appendix G, thermal-mechanical loads.

1. 研究目的

核电压力容器的工作条件恶劣,接管区等局部位置极易产生裂纹,结构通常处于带裂纹的工作状态。 因此,评估裂纹结构的断裂安全性是核电压力容器强度分析中的重要目标。

核电结构的裂纹尖端应力强度因子 *K* 值的计算方法包括有限元法和工程经验公式法。对于有限元法, 由于核电结构的几何形状复杂,通用的有限元软件较难处理复杂的裂纹尖端网格,严重制约了断裂力学有 限元法在核电工程中的应用。而 ZenCrack 软件^[1]是断裂力学有限元分析的重要工具,可以快速的生成裂纹 尖端的有限元网格;对于工程经验公式法,热-机械载荷作用下的核电压力容器接管区结构,仅 ASME 附录 G^[2]给出了压力容器接管区的裂纹尖端应力强度因子的计算方法,但仅是对于特定的裂纹位置,标准中并未 给出计算方法的适用条件。

对于热-机械载荷作用下的核电压力容器接管结构的简化模型,文中采用 ZenCrack 软件计算结构不同裂 纹位置的应力强度因子,与基于 ASME 附录 G 中的方法的计算结果作对比,研究经验公式的适用条件,判断结构的运行安全性。

2. 研究方法

(1) 有限元法

本文采用 ZenCrack 软件计算简化的核电压力容器接管区结构的裂纹尖端应力强度因子。基于 ABAQUS 无裂纹有限元模型的计算结果,ZenCrack 软件设置有限元模型的裂纹尖端网格,提交计算并输出应力强度 因子等断裂力学参量。

(2) 工程经验公式

对于热-机械载荷作用下的结构接管区结构(图1),通常采用多项式拟合预设裂纹位置的应力场,进而 计算应力强度因子,预设裂纹位置应力场的多项式拟合公式为:

$$\sigma = A_0 + A_1 \left(\frac{x}{a}\right) + A_2 \left(\frac{x}{a}\right)^2 + A_3 \left(\frac{x}{a}\right)^3 \tag{1}$$

应力强度因子的计算公式为:

$$K_{I} = \sqrt{\pi a} \left[0.723 \cdot A_{0} + 0.551 \cdot \left(\frac{2a}{\pi}\right) \cdot A_{1} + 0.462 \cdot \left(\frac{a^{2}}{2}\right) \cdot A_{2} + 0.408 \cdot \left(\frac{4a^{3}}{3\pi}\right) \cdot A_{3} \right]$$
(2)

式中, K_1 为应力强度因子,a为裂纹深度, σ 为接管位置的应力分布函数, A_0 , A_1 , A_2 , A_3 为多项式拟合系数。



3. 有限元模型

本文研究对象为某型核电压力容器接管区结构的简化模型,无裂纹模型的有限元网格如图 2 所示,其中接管区局部考虑三种不同的拐角类型,图 2 (a),(b),(c)分别为圆弧拐角、直角拐角和带凸台的拐角 类型。对于圆弧拐角模型,有限元模型包括 22843 个节点和 19050 个六面体单元 (C3D8T);对于直角拐角 模型,有限元模型包括 10374 个节点和 8300 个六面体单元 (C3D8T);对于带凸台的拐角模型,有限元模 型包括 30852 个节点和 26204 个六面体单元 (C3D8T)。



图 2 无裂纹模型的有限元网格





模型内表面设置第三类热力边界条件,不同时刻的压力和温度曲线如图 3 所示;结构外表面施加绝热 边界条件。接管和主管断面施加由内压导致的拉力载荷(*p*·*r*/2*t*,其中 *p*为管道内压,*r*为管道中径,*t*为 管道壁厚),模型采用对称边界条件。

4. 结构应力场及预设裂纹位置

对于三种接管模型,瞬态时刻 t=0s(仅机械载荷)条件下的 Tresca 应力分布如图 4 所示。对于圆角接 管模型,由图 4 (a)可以看出,接管拐角位置均处于高应力区;对于直角拐角模型(图 4 (b)),高应力区 向接管位置偏移;对于带凸台的接管模型(图 4 (c)),高应力区位于接管区域。基于图 4 给出的计算结果, 预制接管结构的不同裂纹模型,如图 5 所示。其中图 5 (a),(b),(c)对应于圆角接管模型,图(d)对应 于直角接管模型,图(e)对应于带凸台的接管模型。



图 5 带裂纹模型的有限元网格

5. 应力强度因子

图 6 给出裂纹位于圆角接管模型的应力强度因子计算结果,裂纹深度分别为 37mm,55mm 和 84mm,分别基于 ZenCrack 有限元法和 ASME 附录 G 中的方法计算得到裂纹尖端应力强度因子。由图 6 可以看出,随着裂纹深度的增加,裂纹尖端应力强度因子增大。对于三种裂纹尺寸(37mm,55mm 和 84mm)的计算模型,稳态运行时刻(t=50000s)的裂纹尖端应力强度因子(基于有限元法)分别为 110.2MPam^{0.5},126.4 MPam^{0.5}和 143.1MPam^{0.5},而基于 ASME 附录 G 中方法的计算结果分别为 109.6 MPam^{0.5},128.2 MPam^{0.5},150.3 MPam^{0.5}。有限元法和 ASME 附录 G 的方法得出的计算结果差异较小。



图 6 圆角接管模型的应力强度因子

图 7 (a)给出裂纹位于圆角接管模型(裂纹偏置于接管)的应力强度因子计算结果,裂纹深度分别为 22mm,40mm 和 80mm,分别基于 ZenCrack 有限元法和 ASME 附录 G 中的方法计算得到裂纹尖端应力强 度因子。由图 7 (a)可以看出,基于有限元法和 ASME 附录 G 的方法得出的计算结果差异较大,尤其是对 于稳态运行时刻的计算结果。但是基于 ASME 附录 G 给出的计算结果均大于基于有限元法给出的计算结果, ASME 附录 G 中的方法更加保守,可用于评估这种裂纹结构的断裂安全性。

图 7 (b)给出裂纹位于圆角接管模型(裂纹偏置于主管)的应力强度因子计算结果,裂纹深度分别为 32mm,44mm 和 84mm,分别基于 ZenCrack 有限元法和 ASME 附录 G 中的方法计算得到裂纹尖端应力强 度因子。与图 7 (a)给出的计算结果的趋势相同,图 7 (b)中基于有限元法和 ASME 附录 G 的方法得出 的计算结果差异较大,尤其是对于稳态运行时刻的计算结果。但是基于 ASME 附录 G 给出的计算结果均大 于基于有限元法给出的计算结果,ASME 附录 G 中的方法更加保守,可用于评估这种裂纹结构的断裂安全 性。





图 8 给出裂纹位于直角接管模型的应力强度因子计算结果,裂纹深度分别为 21mm,40mm 和 84mm, 分别基于 ZenCrack 有限元法和 ASME 附录 G 中的方法计算得到裂纹尖端应力强度因子。同样,基于两种 方法的计算结果差异较大,ASME 附录 G 中的方法更加保守。图 9 给出裂纹位于凸台接管模型的应力强度 因子计算结果,裂纹深度分别为 21mm,40mm 和 49mm,分别基于 ZenCrack 有限元法和 ASME 附录 G 中 的方法计算得到裂纹尖端应力强度因子。同样,ASME 附录 G 中的方法更加保守。对于裂纹深度 *a*=40mm



的模型,稳态条件下直角接管模型的裂纹最深点的应力强度因子为103 MPam^{0.5},而凸台模型的计算结果为74.9 MPam^{0.5},由此可知,仅对断裂力学参数的分析而言,当工程设计中不考虑凸台时,结构偏危险。

6. 结论

本文分别采用有限元法和 ASME 附录 G 中的方法,计算不同接管区模型的结构裂纹尖端应力强度因子,研究 ASME 附录 G 中的方法的适用条件,评估裂纹结构的断裂安全性。主要结论如下:

1) 对于圆角的接管模型(裂纹不偏置), 基于 ZenCrack 有限元法和 ASME 附录 G 中的方法得到的计算差异较小,有限元解具有较高的计算精度;

2)对于裂纹偏置的圆角接管模型、直角接管模型和凸台接管模型,基于两种方法的计算差异较大,ASME 附录 G 中的方法更加保守,适用于评估裂纹结构的断裂安全性;

3) 仅对断裂力学参数的分析而言,当不考虑结构凸台时,裂纹尖端应力强度因子偏大,结构偏危险。

7. 参考文献

[1] ZenCrack 7.9-3, Zentech International Limited, UK

[2] ASME NONMANDATORY APPENDIX G, 2013 SECTION XI