

核电站用防冲击波阀阀体抗震分析

罗娟, 罗家成, 孙磊

(中国核动力研究设计院, 成都 610213)

摘要:采用有限元方法对田湾核电站 3、4 号机组采用的某型防冲击波阀阀体进行了抗震计算分析。计算得到了结构的固有频率、振型和地震载荷下的响应,并根据 ASME AG-1 对结构在重力、内压、冲击波载荷、地震等多种载荷组合下的应力和变形进行评定,根据 ASME III-NF 对连接紧固件进行应力校核。结果表明,防冲击波阀阀体的设计满足相关规范的要求。

关键词:防冲击波阀阀体;有限元;抗震分析;应力评定

中图分类号:TM623

文献标志码:A

引言

自日本福岛核电站由于地震造成核泄漏事故以来,核电厂设备的抗震安全性能愈加得到业界的广泛重视。核电厂中众多的抗震 I 类、抗震 II 类以及一些非核抗震类设备在设计时需要进行地震载荷下的抗震计算,以及与其他载荷组合的应力分析与评定工作^[1-3],从而为核电厂的抗震安全性提供保证。

核电厂所用防冲击波阀作为核电站安全运行关键附件,不仅可在正常情况下起流通与阻断气流作用,并可在冲击波等突发事故工况下保护厂房内设备安全。目前有限元法已成为各类核相关设备抗震分析评定的主要手段^[4-6],但国内对核电站用防冲击波阀的抗震安全性分析尚鲜见公开文献。

田湾核电站用某型防冲击波阀阀体的安全等级为 3 级,抗震类别为 I 类,需按有关规范进行抗震分析和应力评定。本文采用有限元软件 ANSYS^[7]建立了阀体的力学模型,对结构进行了抗震计算分析,并按照 ASME 规范对结构进行了应力分析和强度校核,为阀体的抗震设计提供了依据。

1 结构描述

防冲击波阀阀体规格为 425 mm × 420 mm,主要由上下阀框、左右侧框、上下安装板、左右安装板和加强板组成。上下安装板、左右安装板和加强板均由钢板裁切而成,分别焊接在上下阀框和左右侧框上。防冲击波阀阀体通过锚栓与墙体连接,总体结构如图 1 所示。

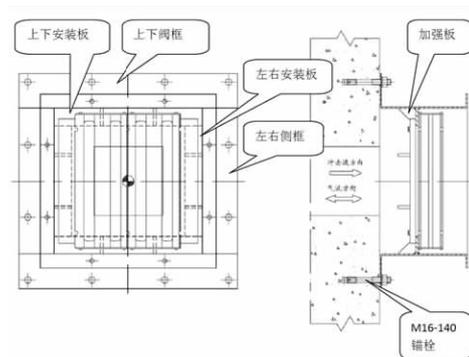


图 1 总体结构图

该防冲击波阀阀体材料为 Q235B,约束接管法兰上螺栓和接墙螺栓材料均为 8.8 级。阀体工作温度下各材料相关力学特性见表 1^[8]。

表1 材料的力学特性

| 材料 | 弹性模量 E/MPa | 泊松比 μ | 密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$ | 屈服强度 S_y/MPa | 抗拉强度 S_u/MPa | 许用应力 S/MPa |
|--------|------------------------|--------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| Q235B | 2.1×10^5 | 0.3 | 7830 | 235 | 375 | 93.75 |
| 8.8级螺栓 | — | — | — | 640 | 800 | 见表7 |

2 力学模型

主要采用板壳单元和梁单元建立有限元模型,其中,阀体采用壳单元(SHELL181)模拟,连接螺栓采用梁单元(BEAM188)模拟。阀体总质量40.55 kg,将阀芯组件的全部质量均分在安装板上,阀体有限元模型如图2所示,阀体安装(带风管)结构的有限元模型如图3所示。

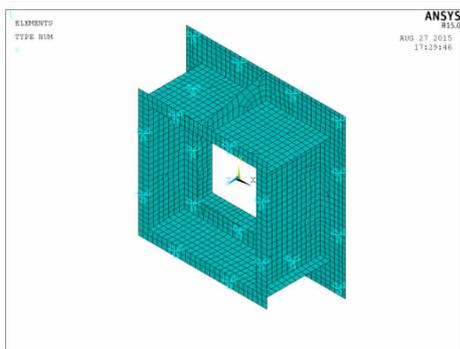


图2 阀体有限元模型

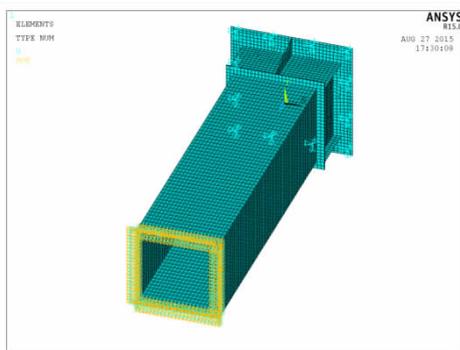


图3 阀体安装(带风管结构)的有限元模型

进行模态分析时,在阀体与风管连接的法兰连接螺栓处施加平动位移约束,在阀体与墙体连接位置处施加固定约束。进行抗震分析时,阀体一端连接长1.5 m的风管并固定约束风管末端面,一端连接墙体位置处施加固定约束。约束情况分别如图2和图3所示。

3 载荷条件

输入载荷包括自重、内压、检修人员活载荷、风管载荷、流体动量载荷、地震载荷等。对应参数取值分别为:自

重40.55 kg;设计压力10 kPa,冲击波压力21 kPa;检修活载70 kg;流体动量载荷20 m/s;对于地震载荷,根据设计方提供的文件,该阀体的基阶频率大于33 Hz。依照相关规范,对基频大于33 Hz的模型采用等效静力法进行抗震分析。所提供的运行基准地震(OBE)载荷三个方向均为3.2 g,安全停堆地震(SSE)载荷三个方向均为4.0 g。

根据ASME AG-1“核电厂空气和气体处理”,结合阀体应用过程中承受的载荷,抗震分析的载荷组合见表2。考虑到阀体工作的实际状态,在冲击波载荷对应的使用等级下(即表中C2载荷组合),阀门处于关闭状态,在其他使用等级下,阀门处于开启状态。

表2 载荷组合

| 使用等级 | 载荷组合 |
|------|------------------------------|
| A | DW + Ps + FML + EL + L |
| B | DW + Ps + FML + EL ± OBE |
| C/D | DW + Ps + FML + EL ± SSE(C1) |
| | DW + Ps + FML + EL + Pc(C2) |

DW:重量;Ps:设计压力;FML:流体动量载荷;L:阀门人员检修时负荷;EL:外部风管载荷;OBE:运行基准地震;SSE:安全停堆地震;Pc:冲击波载荷。

4 计算结果及评定

4.1 模态分析结果

采用Block Lanczos方法进行模态分析,计算得到阀体结构的一阶固有频率为266.5 Hz,验证了使用等效静力法的合理性。表3给出了防冲击波阀体X、Y、Z三方向模态参与质量较大的频率值,相应的振型如图4~图6所示。可见阀体第一阶模态是Z向参与质量最大的模态。

表3 固有频率

| 方向 | 阶次 | 频率值/Hz | 有效模态质量/kg |
|----|----|--------|-----------|
| X | 13 | 749.5 | 12.11 |
| Y | 16 | 861.8 | 9.85 |
| Z | 1 | 266.5 | 36.36 |

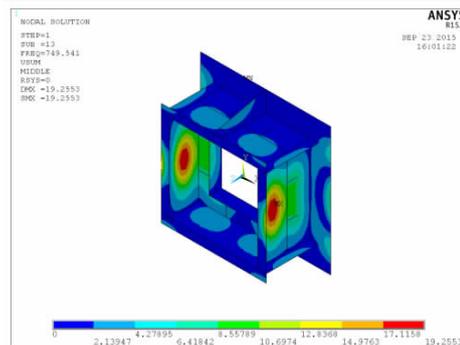


图4 X向参与质量最大振型

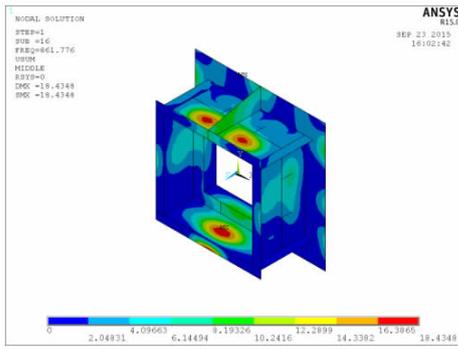


图 5 Y 向参与质量最大振型

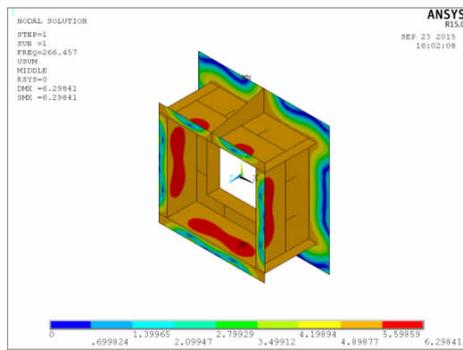


图 6 Z 向参与质量最大振型

4.2 地震响应计算结果

在结构三个方向分别输入 OBE 和 SSE 地震载荷,将 X、Y 和 Z 三个方向的计算结果采用平方和的平方根 (SRSS) 方法进行振型组合,得到阀体在地震载荷作用下的薄膜应力和薄膜加弯曲应力,即结构在地震作用下的应力,结果见表 4。

表 4 地震载荷下的应力响应 (MPa)

| 地震载荷 | 最大薄膜应力 | 最大薄膜加弯曲应力 |
|------|--------|-----------|
| OBE | 2.24 | 11.60 |
| SSE | 2.80 | 14.50 |

4.3 应力计算结果及评定

根据 ASME AG-1 规范^[2],将阀体在自重、内压、检修人员活载荷、风管载荷、流体动量载荷、地震载荷等条

件下的计算结果按照表 2 所示方法进行载荷组合,得到各使用等级下阀体的应力计算与评定结果,见表 5。从表 5 可知,该阀体的薄膜应力和薄膜加弯曲应力都小于相应的应力限值,满足规范的要求。

表 5 模型最大应力计算结果及评定 (MPa)

| 使用等级 | 薄膜应力 σ_1 | | 薄膜 + 弯曲应力: $\sigma_1 + \sigma_2$ | | 备注 |
|------|-----------------|-------|----------------------------------|---------|----|
| | 计算值 | 限值 | 计算值 | 限值 | |
| A | 12.39 | 93.75 | 52.68 | 140.625 | — |
| B | 12.41 | 93.75 | 60.68 | 140.625 | — |
| C | 12.72 | 112.5 | 63.56 | 168.75 | C1 |
| | 12.83 | | 38.50 | | C2 |

4.4 变形计算结果及评定

对防冲击波阀阀体在各使用等级下的变形进行了有限元分析,计算所得的结构最大变形见表 6。从表 6 可知,在各级工况下计算的最大变形值都小于变形限值,故该阀体的变形满足 ASME 规范的要求。表中 $d_{max} = 5 \text{ mm}$,为阀芯螺栓到框架的最小距离。

表 6 模型最大变形计算结果及评定

| 使用等级 | 最大变形/mm | 限值/mm | 备注 |
|------|---------|---------------------|----|
| A | 0.426 | $0.6 d_{max} = 3.0$ | — |
| B | 0.439 | $0.6 d_{max} = 3.0$ | — |
| C | 0.457 | $0.9 d_{max} = 4.5$ | C1 |
| | 0.105 | | C2 |

4.5 连接螺栓评定

防冲击波阀阀体与接管法兰通过 8 个 M10 的螺栓连接,与墙体通过 12 个 M16 的螺栓连接,根据 ASME 第 III 卷 NF 分卷^[9]对螺栓在各使用等级下所受到的载荷条件进行评定。经过计算,各使用等级下螺栓的最大拉伸应力、最大剪切应力和椭圆方程最大值分别见表 7 ~ 表 8。表中, f_t 为计算的拉伸应力, f_v 为计算的剪切应力, F_{tb} 为螺栓的许用拉伸应力, F_{vb} 为螺栓的许用剪切应力, S_u 为抗拉强度。由表 7 和表 8 可知,连接螺栓的设计满足规范要求。

表 7 连接螺栓 M10 的应力评定 (MPa)

| 螺栓位置 | 使用等级 | f_t | F_{tb} | f_v | F_{vb} | $\frac{f_t^2}{F_{tb}^2} + \frac{f_v^2}{F_{vb}^2}$ | | 备注 |
|-------------------|------|-------|----------|---------|----------|---|----|----|
| | | | | | | 计算值 | 限值 | |
| 阀体及风管 连接螺栓 M10 | A | 9.00 | 400 | 6.45 | 165.3 | 0.00202 | 1 | — |
| | B | 9.39 | 460 | 5.85 | 190.1 | 0.00135 | 1 | — |
| | C | 9.62 | 500 | 5.92 | 206.7 | 0.00118 | 1 | C1 |
| 14.94 | | 5.25 | | 0.00154 | | C2 | | |

表8 连接螺栓 M16 的应力评定(MPa)

| 螺栓位置 | 使用等级 | f_t | F_{tb} | f_v | F_{vb} | $\frac{f_t^2}{F_{tb}^2} + \frac{f_v^2}{F_{vb}^2}$ | | 备注 |
|-------------------|------|-------|----------|-------|----------|---|----|----|
| | | | | | | 计算值 | 限值 | |
| 阀体与墙体 连接螺栓 M16 | A | 2.79 | 400 | 2.91 | 165.3 | 0.00035 | 1 | — |
| | B | 3.24 | 460 | 3.43 | 190.1 | 0.00037 | 1 | — |
| | C | 3.40 | 500 | 3.67 | 206.7 | 0.00036 | 1 | C1 |
| | | 0.38 | | 1.11 | | 2.87E05 | | C2 |

其中: f_t 为拉应力 = 轴力/A;

f_v 为剪应力 = $\sqrt{(\text{剪力1})^2 + (\text{剪力2})^2}/A$;

A 为螺栓的有效截面积, M16 螺栓: $A = 144 \text{ mm}^2$; M10 螺栓: $A = 58 \text{ mm}^2$ 。

5 结束语

在考虑重力、压力、检修活载及地震载荷等条件下利用 ANSYS 软件对核电站用某型防冲击波阀阀体进行了力学分析,并根据 ASME 规范进行应力评定和强度校核。结果表明,防冲击波阀阀体的应力、变形以及各连接螺栓均满足抗震设计相关规范要求,研究结果具有良好的工程应用价值。

参考文献:

- [1] RCC-M, Design and construction rules for mechanical components of PWR nuclear islands[S].2007.
- [2] ASME AG-1, Nuclear air and gas treatment[S].
- [3] GB 50267-97, 核电厂抗震设计规范[S].
- [4] 侯硕, 贾晓峰. 压水堆核电站燃料厂房核燃料转运系统的抗震分析[J]. 核科学与工程, 2013, 33(3): 314-320.
- [5] 徐志新, 葛黎明. 核级风阀抗震分析[J]. 阀门, 2015(3): 23-25.
- [6] 毛飞, 闵鹏, 周肖佳, 等. 核主泵电机抗震分析[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(5): 55-59.
- [7] 刘浩. ANSYS 15.0 有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [8] 徐灏. 机械设计手册(第4卷)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [9] ASME boiler and pressure vessel code, section III, rules for construction of nuclear facility components, division 1, subsection NF, supports[S]. 2010.

Seismic Analysis for an Explosion-proof Valve Used in Nuclear Power Plant

LUO Juan, LUO Jiacheng, SUN Lei

(Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract: Based on finite element method, the seismic analysis for an explosion-proof valve used in Unit 3, 4 of Tianwan nuclear power plant has been conducted. The natural frequency, vibration mode and seismic response of the structure have been obtained through calculation, and the stress and strain evaluation under the combined loading of gravity, internal pressure, blast and seismic load has been done according to ASME AG-1. The bolts of the structure have been qualified according to ASME III-NF as well. The results show that the design of the explosion-proof valve is in compliance with the requirement of corresponding codes.

Key words: explosion-proof valve; finite element method; seismic analysis; stress evaluation