

文章编号: 0258-0926(2018)03-0138-05; doi:10.13832/j.jnpe.2018.03.0138

核电厂主蒸汽隔离阀研制难点分析

熊冬庆, 贺振宇, 李世欣*, 石红

环境保护部核与辐射安全中心, 北京, 100082

摘要: 以我国百万千瓦级压水堆核电机组主蒸汽隔离阀为例, 对主蒸汽隔离阀的设计要求与结构特点进行了详细的介绍, 结合主蒸汽隔离阀的国产化研制现状, 对该设备技术难点和研制过程中应重点关注的问题, 如阀门设计计算、阀门执行机构的选用、原材料的质量保证、阀门密封性能、样机的鉴定等方面进行分析, 相关内容在主蒸汽隔离阀的国产化过程中均得到了验证。

关键词: 主蒸汽隔离阀; 气液联动; 鉴定试验; 国产化

中图分类号: TK05 文献标志码: A

Analysis of Development Difficulty for Main Steam Isolation Valves of Nuclear Power Plants

Xiong Dongqing, He Zhenyu, Li Shixin*, Shi Hong

Nuclear and Radiation Safety Center, Beijing, 100082, China

Abstract: Taking the Main Steam Isolation Valve(MSIV) of the million kilowatt class pressurized water reactors in China as the examples, the design requirements and structure characteristics of MSIV were introduced in detail, and considering the present situation of the localization of MSIV, the technical difficulties and the key issues during the development were analyzed in-depth, such as the valve design and calculation, the driving device selection, quality assurance of materials, valve sealing performance, and valve prototype qualification. The relevant contents have been verified in the localization of MSIV.

Key words: Main steam isolation valve, Gas-liquid linkage, Qualification test, Localization

0 引言

主蒸汽隔离阀是核电机组中一个极其重要的阀门, 压水堆核电厂该阀门位于安全壳外, 安装在二回路主蒸汽系统管道上, 属于核安全2级设备。每条主蒸汽管线上安装一台主蒸汽隔离阀, 当安全壳内或安全壳外的主蒸汽管线部分发生破裂时, 主蒸汽隔离阀提供主蒸汽的快速隔离, 以限制失控的蒸汽释放量不超过一台蒸汽发生器的装水容量, 从而防止反应堆冷却剂系统的过分冷却和安全壳压力的过分升高而超过设计压力。在电厂稳态运行工况下, 主蒸汽隔离阀应保持在全开位置, 除具备正常的开关功能之外, 在所有预

计的正常、异常或事故工况(主蒸汽管线破裂)下, 在接到隔离信号后, 主蒸汽隔离阀能够在5 s内快速关闭, 起到隔离作用^[1]。

目前, 国内已运行核电机组的主蒸汽隔离阀全部采用进口设备, 其较长供货周期以及高昂的价格已经成为制约我国核电发展的一个重要因素。为提高我国核电装备的技术水平, 避免在高端核电设备领域受制于人, 中核苏阀科技实业股份有限公司和大连大高阀门股份有限公司开展了百万千瓦级压水堆主蒸汽隔离阀的研制工作, 目前已完成了样机的设计、制造和鉴定试验, 本文以百万千瓦级压水堆核电厂主蒸汽隔离阀为例,

收稿日期: 2017-04-26; 修回日期: 2018-01-03

作者简介: 熊冬庆(1983—), 男, 高级工程师, 现主要从事民用核安全设备技术审查工作

*通讯作者: 李世欣, E-mail: lishixin@chinansc.cn

对其设计要求、结构特点以及研制过程中应重点关注的问题进行介绍和说明。

1 设计要求

以国内二代加百万千瓦级压水堆核电站主蒸汽隔离阀为例,其主要设计参数及性能指标如表1所示。

表1 主蒸汽隔离阀主要设计参数及性能指标
Table 1 Main Design Parameters and Performance Indicators of MSIV

参数	指标
安全等级	核安全2级
质量保证要求	QA1
抗震要求	1A
公称通径/mm	800
设计压力/MPa	8.6
设计温度/	316
工作介质	饱和蒸汽
最大流量/t·h ⁻¹	2035
关闭时间/s	5(快关)
寿命要求	3000次
驱动方式	气液联动

主蒸汽隔离阀是核安全2级设备,为了确保阀门在各种可能遇到的工况下完成其设定的功能,必须具备特殊安全功能的特性,同时在结构设计、设计计算上需要满足一些特殊要求,主要包括如下内容^[2]:

(1) 无论主蒸汽隔离阀上游或是下游管线发生破裂,阀门均能在接到隔离信号5 s内自动快速关闭以切断上游或下游蒸汽流。

(2) 能够进行在线功能试验(全开位置动作到90%开度位置,再回到全开位置)。

(3) 全开、全关和90%开度位置远距离指示。

(4) 能够满足设计工况条件下3000次循环寿命。

(5) 任何情况下阀门应能够保证其结构完整性和可操作性。

(6) 阀门固有频率不小于33 Hz。

(7) 温度、压力等变化下的密封可靠性,密封面的耐磨、耐冲刷密封寿命。

(8) 阀座密封最大泄漏率应小于阀门公称直径(mm)×0.1 cm³/h(正向)和设计流量的0.005%(反向)。

(9) 阀门执行机构为气-液联动型式。

(10) 控制系统设备冗余设计,保证在任何情况下其控制系统与执行机构可用,即阀门驱动机构应设有独立相似的A、B通道的液压控制系统,使其在执行安全功能时能满足单一故障准则的要求。

(11) 阀门执行机构及控制系统应为1E级、满足IEEE323、IEEE344及IEEE382或RCC-E的要求。

2 结构特点

主蒸汽隔离阀由阀门本体、执行机构以及控制系统构成。目前我国运行和在建的百万千瓦级压水堆核电机组主要采用平行双闸板闸阀和楔式双闸板闸阀等型式。目前国内研制主蒸汽隔离阀结构形式为平行双闸板闸阀,平行双闸板闸阀形式主蒸汽隔离阀其结构形式如图1所示^[2]。

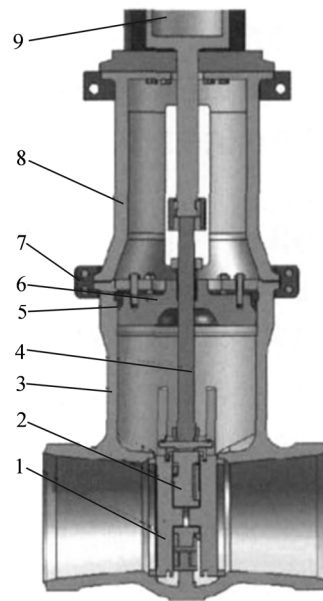


图1 平行双闸板闸阀结构图

Fig. 1 Structure Diagram for Parallel Double Gate Valve
1—闸板; 2—楔形块; 3—阀体; 4—阀杆; 5—密封圈; 6—阀盖; 7—夹环; 8—支架; 9—驱动机构

平行双闸板闸阀形式主蒸汽隔离阀主要结构特点:

(1) 依据主蒸汽隔离阀功能性要求,阀门采用自压密封式结构,阀体、阀盖之间采用自压密封型式。这种密封结构性能可靠,温度、压力波动对其无影响,保证高温密封性能,使介质无任何外漏。以往密封环设计一般采用柔性石墨或金属密封圈,考虑主蒸汽隔离阀的高温、高压运行

工况,为保证产品的安全可靠密封性能,采用柔性石墨加外包金属的密封环结构。

(2) 阀门采用平行楔块式双闸板结构和气-液联动控制的执行机构。平行式双闸板结构减少了对密封面的磨损,执行机构可以实现5 s内快速关闭。上下楔块之间存在角度,在关闭力矩作用下产生水平方向推力,从而达到密封。

(3) 采用上密封结构,当填料函密封失效时,上密封装置能确保阀杆密封的可靠性。

(4) 阀杆采用填料密封。填料螺栓处加有碟簧,可以有效的补充温度、压力波动填料螺栓扭矩的损失,保证长时间使用下的密封效果。

(5) 阀盖和填料箱处的螺栓增加了碟簧,使填料箱始终对密封组件保持压力,保证长时间使用过程中温度、压力变化的密封性。

(6) 阀体和闸板上设计有导向结构,闸板的开关位置准确。

3 研制过程中应重点关注的问题

3.1 设计计算

主蒸汽隔离阀为核安全2级设备,阀门及旁路阀的设计需符合ASME BPVC-III-1 NC3500或RCC-M C3500的要求,但在进行阀体壁厚计算和应力分析时,应按核1级设备的要求进行,即需满足ASME BPVC-III-1 NB3500或RCC-M B3500的相关要求。

阀门应能承受核电厂寿命期内的设计载荷和使用载荷(包括地震载荷、汽锤载荷、主蒸汽安全阀排放载荷及静载荷等载荷组合),并保证压力边界完整和不丧失功能。正常工况的设计计算,需要确定阀门压力级、阀体最小壁厚、阀体应力及阀体形状校核等。阀体应力包括内压引起的总体一次薄膜应力,阀体拐角区危险断面的一次应力和二次应力。应进行疲劳分析及瞬态工况下阀体循环应力分析,填料函膜应力及内压引起的一次应力和二次应力的分析、阀杆的稳定性分析,拉伸应力分析。阀门的抗震分析包括:阀门自振频率的分析、阀门承压部件危险断面的应力分析、阀门主要连接件危险断面应力分析、阀门偏心质量扭转效应等。

对于主蒸汽隔离阀的应力分析及抗震分析,可采用有限元分析法、ASME BPVC-III的规则法

和等效静力法对阀门进行应力计算和抗震分析,确保阀门压力边界的完整性。目前,研制单位均采用行业认可的力学分析软件进行该阀门应力计算和抗震分析。

3.2 阀门执行机构的选用

阀门执行机构是主蒸汽隔离阀最为关键的部件,主蒸汽隔离阀完成所有的动作均需通过其执行机构来完成,执行机构的选择关系到阀门的主要功能及产品的寿命,执行机构的控制力矩过大易损坏密封面,力矩太小就达不到密封阀门的目的。

主蒸汽隔离阀的驱动方式是采用气-液联动。气-液联动装置由液压缸、氮气储罐、液压系统及管路附件及仪表等组成。液压装置上储罐中的氮气起到不会失效的关闭弹簧作用,因而在阀门快速关闭时不要任何动力。反之,在开启阀门时由带有液压泵的液压系统提供足够的能量以克服氮气的压力。

这套装置对阀门制造厂来说有比较大的难度,国内目前也无专业的生产厂家。研制单位需要在充分理解阀门执行机构控制原理的前提下,提出执行机构的采购技术要求,包括阀杆的推力、启闭时间、对控制系统和控制原理的要求、接口形式等,以及应能承受温度、压力、湿度、地震破坏、端部载荷、所供电源变化的最大值等,在各工况条件下,在接到主蒸汽管线隔离信号后必须在5 s内能够自动快速关闭。

此外,阀门执行机构的选用,对于整个阀门固有频率的影响也非常大,主蒸汽隔离阀安装方式为立式安装,阀门执行机构安装在阀门本体上方,整个结构比较“细长”,满足技术规格书规定的最小自振频率大于33 Hz的要求,对于阀门整体设计来说是一个很大的难题,驱动装置的体积应尽可能的小,重心位置应尽可能低,阀门驱动执行机构应设计紧凑,刚性较好,但同时阀门执行机构的驱动力不能降低。

阀门执行机构控制系统的稳定性也比较关键,主蒸汽隔离阀快关和慢关2种不同的动作方式,还有正常驱动力、最小驱动力的动作方式,以及在线功能试验(全开位置到90%开度位置,再回到全开位置)等,不同需求对于控制系统要求也较高。

执行机构为1E级设备,进厂必须有机械老化、热老化、辐照老化、机械振动、承压试验、抗震试验、失水事故湿热试验的鉴定报告,并符合IEEE 323、IEEE 344、IEEE 382或RCC-E的要求。

阀门执行机构及其控制系统是主蒸汽隔离阀的关键技术,如不解决此项关键技术,将无法保证其执行快速关闭、在线试验等功能。目前,由于国内暂无该阀门执行机构专业的生产厂家,且研制单位暂不具备相应的研发能力,故采取专业化分工的模式,向国外技术成熟的专业公司购买该产品,完成样机的研制工作,之后再进行研究和消化,掌握该装置的关键技术,逐步实现该装置的国产化。

3.3 原材料的质量保证

主蒸汽隔离阀原材料采购和加工过程中应重点关注的是铸锻件及非金属材料的质量。

(1) 铸件

阀体和阀盖一般采用碳钢铸件,由于主蒸汽隔离阀在其管道破裂或地震工况条件下,其阀体所承载荷较大。铸件质量是主蒸汽隔离阀能够承载荷、保证其密封性的关键,因此需要确保铸件质量。

阀体和阀盖铸件毛坯质量较大,在铸造过程中需采取一系列措施以有效预防其主体铸件产生缺陷并通过无损检验保证铸件质量。供应商应进行相应的铸件原型件评定,严格按照编制的工艺规程及工序卡开展制造活动,以确保满足铸造工艺要求,并对铸件进行了化学成份、机械性能的复检,铸件内部质量通过100%射线检验来保证,表面质量通过液体渗透检验来保证。

(2) 锻件

闸板、阀座、阀杆采用锻件,为保证锻件质量,锻造时,应严格控制始锻温度、终锻温度、变形程度和变形速度,按照工艺规程规定的冷却方法进行冷却。锻件在锻机和锻锤上经历热机械成形,保证锻件在整个截面上的金属锻透,并尽可能的锻至零件规定的形状和尺寸。锻件内部质量通过超声检验来保证,表面质量通过液体渗透检验来保证。

(3) 非金属材料

与介质接触的非金属材料按照标准,必须满足耐辐照、耐高温的要求,并且不能锈蚀与其接

触的金属材料,不能对与其接触的介质和其他材料产生有害影响,因此填料和中法兰缠绕垫片采用通常采用柔性石墨材料制作,其柔性石墨材料中氯含量不大于50 mg/L,硫含量不大于200 mg/L,氟含量不大于50 mg/L;满足耐辐射、耐高温等核电厂规定的特殊环境条件及使用要求。

对于铸件和锻件,若为研制单位自制,在制造过程中应做好自制件的质量管控,并通过理化性能检验和无损检验确保自制件满足技术条件的要求;若为外购则应选择持有民用核安全设备制造许可证和具备相关产品良好供货业绩的单位,做好采购件的质量验收和验证,确保产品质量。非金属材料应选择成熟产品并从行业内具备相关产品良好供货业绩的单位进行采购,确保采购件满足采购技术条件的要求。

3.4 阀门密封性能的保证

主蒸汽隔离阀处于高温高压的蒸汽工作环境下,阀门的密封性能是其重要的性能指标,在各工况条件下、阀门动作过程中均要满足其密封要求,故其密封性及密封可靠性都非常重要,在设备制造过程中,以下几个方面较为关键:

(1) 密封面堆焊

阀门阀座、阀瓣密封面以及导向面等需进行硬质合金堆焊,堆焊之前需对加工面的成型进行研究,进行堆焊面性能测试,对焊材进行控制,进行焊接工艺评定试验,研究在不同的焊接参数(如电流、电压、焊接速度、熔敷的堆焊层厚度、预热温度及焊后热处理等)下的焊接性能。

通过对密封面堆焊工艺的研究,固化其堆焊工艺,制定堆焊工艺规程,指导相关的焊接操作,确保密封面堆焊质量。

(2) 密封面的加工

闸板与阀座的密封,对保证产品的密封性能起到关键的作用,若闸板与阀座密封的吻合度出现问题,容易在装配过程中和使用中出现密封泄漏,其泄漏量超过规定的标准。因此在机械加工过程需采用闸板加工专用夹具,并用特殊的加工方法,编制相应的程序,在数控机床上加工。先加工闸板,保证其闸板的加工精度,经测试后加工阀座,最后经过研磨、抛光等工序后便于工作闸板与阀座达到密封要求。

(3) 上、下楔板的加工

由于主蒸汽隔离阀为楔块式双闸板结构,楔块分为上下两块,闸板装在上、下楔块中,因此上、下楔块的加工对保证产品的密封有着至关重要的作用,若上下楔块组装后不平行,与闸板装配后密封面不吻合,容易出现泄漏,因此在机械加工过程必须保证其加工精度。

在机械加工过程中通过对上下楔块的加工应采用专用夹具,并在精度较高的机床上进行加工,保证其加工精度能够达到设计要求。

3.5 样机的鉴定

主蒸汽隔离阀应按ASME B16.34 和ASME QME-1 进行阀门的功能性鉴定,阀门样机鉴定需完成以下项目试验:壳体强度试验;阀座密封试验;填料函密封试验;冷态循环试验;冷态寿命试验;热态循环试验;热态寿命试验;端部加载试验;动态特性探查;抗震试验;⑪流体阻断试验。

对于上述所有的试验,需有相应的试验设备、台架或设施,保证所有的试验都能够满足技术规格书和鉴定试验大纲中要求的试验条件,使样机能够顺利通过所有鉴定试验。在试验过程中,应注意对清洁度的控制,使用A级水,严格按照试验大纲及试验规程的要求进行每项鉴定试验,直至所有的鉴定试验完成。

其中,部分鉴定试验由于研制单位不具备相应的试验条件,需采取外委分包的方式完成,如端部加载试验、动态特性探查及抗震试验、流体阻断试验。由于主蒸汽隔离阀重量、体积均较大,无法上地震台进行抗震试验,在确定阀门本身的固有频率大于等于33 Hz后,地震载荷试验可由模拟地震静载力施加在阀门延伸结构重心的方式来

进行。主蒸汽隔离阀的流体阻断试验非常重要,验证主蒸汽管线破裂和全流量动态力状态下切断实际流体的能力,并保证于5 s内快速关闭,是主蒸汽隔离阀能否执行其安全功能的关键。由于主蒸汽隔离阀口径达到了800 mm,目前国内无蒸汽试验台架满足该流体阻断试验要求,流体阻断试验可在德国AREVA实验室的试验台架上进行。

4 结束语

鉴于主蒸汽隔离阀的高技术含量,随着该设备的国产化,意味着国内阀门行业在结构设计、理论验证方法、试验技术以及气液联动控制等多专业技术领域飞跃。主蒸汽隔离阀国产化的实现,必将导致关键阀门进口产品的价格大幅下降,进一步促进核电建造成本下降,不但能带来较高的经济效益,同时相关专业技术在其他类型阀门的推广应用,势必大大推动国内阀门行业企业整体技术水平的提升。随着我国核电项目建设的重新启动,主蒸汽隔离阀设计和制造相关能力的积累,国产化的主蒸汽隔离阀在我国的核电建设中拥有较好的应用前景。此外,目前国内无主蒸汽隔离阀执行机构的专业生产厂家,待对主蒸汽隔离阀执行机构相关技术完全消化吸收后,也可进行阀门执行机构的国产化。

参考文献:

- [1] 中核苏阀科技实业股份有限公司. 主蒸汽隔离阀的国产化研究[J]. 通用机械, 2012, 10: 58.
- [2] 高翔, 李彦华, 高志虎. 核电主蒸汽隔离阀及国产化进程[J]. 通用机械, 2013, 12: 35-37.

(责任编辑:张祚豪)