

秦山第二核电厂核空气净化系统的现场试验

丘丹圭 侯建荣 乔太飞 张计荣 孔海霞 张 群

中图分类号: TL75 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2012)01-0036-02

【摘要】 目的 确保秦山第二核电厂核空气净化系统的良好运行,防止放射性污染环境。方法 按照法国标准方法荧光素钠法和放射性甲基碘法。结果 国产化的试验设备性能良好;在核空气净化系统初次安装到位及使用过程中,净化单元不可避免地会出现影响系统性能的问题。结论 为确保核电站安全有效运行,高效过滤器和碘吸附器的现场试验是非常必要和十分重要的。

【关键词】 高效过滤器;碘吸附器;现场试验

核电站在运行过程中(特别是事故情况下)会产生气载放射性污染物,主要包括放射性气溶胶、放射性碘以及放射性惰性气体等。若不经处理排入大气,将会对环境造成严重的污染。一般核设施中均设置了核空气净化系统。核空气净化系统中的碘吸附器,用以去除废气中的放射性碘;高效空气粒子过滤器用以过滤气溶胶。核空气净化系统是核电站正常运行及事故状态下阻止放射性气溶胶和放射性碘进入周围大气的最后屏障,保证它们处于良好的状态是减少放射性物质释放源项的重要环节。核空气净化是核设施辐射防护措施与技术中的重要组成部分。核空气净化系统的运行状态直接关系到核设施的安全。按照核设施相关标准和法规的要求,需要在现场对核空气净化系统与部件进行一系列标准的、规定的性能检测,即进行现场试验,以验证系统各项性能指标是否达到核安全标准的要求,确保核设施工作人员的健康及周围环境的安全。

1 核空气净化系统的现场试验分类

1.1 验收试验 试验目的是验证核空气净化系统中首次安装到位的高效过滤器和碘吸附器等净化设备是否满足设计要求。试验内容包括:系统试验注入与采样装置与接口的设计、高效过滤器泄漏率试验、碘吸附器泄漏率试验。该试验是竣工验收试验的主要内容之一,也是核燃料装堆许可要求的调试试验内容及运行后定期试验内容。

1.2 定期试验 碘吸附器和高效过滤器的效率不是一个固定值,会受各种因素的影响而产生变化。对于碘吸附器,由于存在自身老化现象,即使安装在备用系统中效率也会发生变化。因此,为保证核空气净化系统在任何时候的性能均满足规定的要求,防止放射性气溶胶和放射性碘排入环境,必须进行定期现场试验。各国规定的试验周期不完全一致,通常,对连续运行的系统至少每半年进行一次,备用系统每一年进行一次。秦山第二核电厂过滤器的定期性能试验每年进行一次,一般在大修前或大修期间进行。

1.3 更换试验 高效过滤器或碘吸附器更换后进行的试验。该试验的目的是验证部件更换后安装是否合适,确保系统的净化性能。

中国辐射防护研究院(简称:中辐院)承担了秦山第二核电厂运行前验收试验和每年的定期试验。主要工作内容包含三个方面:① 系统试验接口的设计、管件安装和施工指导;② 主要试验设备的提供和调试;③ 现场高效过滤器及碘吸附器单元的过滤效率试验。

2 核电站通风空气净化系统简介

秦山第二核电厂于 1996 年开建,2002 年并网发电,是首个法国 CPR1000 模式核电站全部国产化的示范工程。通风系统系统的净化单元及试验设备皆由国内厂家提供。其结构与大亚湾核电站类似,个别系统的设置略有差异,为两个 60kW 压水堆电站。

核电站空气净化系统的过滤单元由预过滤器、高效过滤器、电加热器(降低空气相对湿度)、碘吸附器按顺序组成一个完整的金属箱体或小室。系统还设置有风机、防火阀、调节阀、截止阀或换热器等。每个过滤单元由多个标准的过滤器并排组成。秦山第二核电厂通风系统过滤器全部为国内设计、生产。试验涉及 16 个系统,57 个回路,其中高效过滤器回路 44 个,碘吸附器回路 13 个。

3 试验方法及原理

国际上核设施排风净化系统中安装的高效过滤器和碘吸附器的现场试验方法主要有两种:以美国为代表的 DOP 法和氟利昂法;以法国为代表的荧光素钠法和甲基碘法。秦山第二核电厂是按照法国标准设计而建的,对应的现场试验方法也应该是荧光素钠法和甲基碘法,每个系统或回路的合格判定值是以净化系数给出。

3.1 试验方法依据 试验方法依据为法国标准 AFNOR NFX-44-011 荧光素钠法和 AFNOR M62-206 放射性甲基碘法。

3.2 试验原理

3.2.1 高效过滤器试验 将荧光素钠气溶胶注入到过滤器上游通风系统中,用采样器分别在过滤器的上、下游采集气体样品,采样器内装有一层标准高效滤膜。之后,用荧光分光光度计测定其上、下游荧光浓度。

3.2.2 碘吸附器试验 将甲基碘气体注入到过滤器上游通风系统中,用采样器分别在过滤器的上、下游采集气体样品,采样器内除有一层高效滤膜外,还串联了两个由浸渍活性炭装填的标准炭盒。用 γ 谱仪分别测量上、下游炭盒的放射性活度。试验时要求系统运行风量为额定风量 10% 范围内,气流相对湿度 $\leq 40\%$ 。

3.3 计算公式

3.3.1 高效过滤器的净化系数 CE 的计算公式:

$$CE = \frac{C_1 \times V_1 \times (273 + t_D)}{C_2 \times V_2 \times (273 + t_U)} \times \frac{P_N - P_U}{P_N - P_D} \times \frac{V_C}{V_U} \quad (1)$$

式中: t_U 、 V_U 、 P_U 、 P_V 、 V_1 、 C_1 - 高效过滤器系统上游气流温度、上游取样体积、上游取蒸汽流的真空度、标准大气压上游滤膜冲洗溶液体积、溶液浓度。 t_D 、 V_D 、 P_D 、 V_2 、 C_2 - 高效过滤器系统下游气流温度、下游取样体积、下游取蒸汽流的真空度、下游滤膜冲洗溶液体积、溶液浓度。

3.3.2 碘吸附器的净化系数 E 的计算公式:

$$E = \frac{A_0 + A_1 + A_2}{a_0 + a_1 + a_2} \times \frac{d}{D} \quad (2)$$

式中: A_0 、 A_1 、 A_2 - 对于碘吸附器分别为上游高效滤膜、一级和二级采样炭盒的放射性活度, 代表上游荧光浓度; a_0 、 a_1 、 a_2 - 对于碘吸附器分别为下游高效滤膜、一级和二级采样炭盒的放射性活度, 代表下游荧光浓度; D 、 d - 上、下游采样流量。

3.4 计算与验收 将样品测量值按式(1)、(2)进行处理, 即可得受试通风系统的净化系数。对于秦山第二核电厂, 首次验收试验时, 通风系统高效过滤器的合格指标为净化系数 $E \geq 1\,000$, 碘吸附器合格指标 $E \geq 1\,000$ 。对于运行后的定期试验, 高效过滤器的合格指标均为 $E \geq 1\,000$, 对于碘吸附器, DVC、ETY、DWR 系统的合格指标为 $E \geq 1\,000$, 其他系统为 100。

若不合格, 需分析原因, 采取必要的纠正措施, 并对受试系统再次进行试验, 直至满足验收指标。

4 试验设备及仪器

4.1 主要试验设备

4.1.1 荧光素钠气溶胶发生器 荧光素钠气溶胶发生器用来产生试验用荧光素钠气溶胶颗粒, 粒子直径呈正态分布, 要求质量中值直径为 $0.25\mu\text{m}$, 几何标准偏差为 1.6。该设备由中辐院生产。

4.1.2 甲基碘发生器 甲基碘发生器用来产生试验用甲基碘 (CH_3I) 气体。该设备由中辐院生产。

4.1.3 采样装置 采样装置由采样器、文丘里流量计和空气喷射泵等组成。采样器内装一级高效滤膜或(和)两级串联的浸渍活性炭盒。该设备由中辐院生产。

4.2 测量仪器

4.2.1 荧光分光光度计 F-2500 型, 日本日立公司生产;

4.2.2 高纯锗 γ 谱仪 GMX40P-S(N), 美国 ORTEC 公司生产;

4.3 辅助试验设备

4.3.1 碘源储存柜 用于存放放射源, 中辐院生产。

4.3.2 手套箱 用于分装放射源, 由中辐院生产。

5 问题与讨论

5.1 系统中的常见问题

5.1.1 在首次调试时经常发现的问题 ① 高效过滤器或碘吸附器排架夹具调整不当, 使得过滤器密封不严。② 安装排架墙体与小室屋顶连接处有较大缝隙。③ 安装排架与墙体之间存在较大缝隙。④ 安装排架墙体贯穿件形成泄漏。⑤ 系统的注入采样点未设置或设置不合理。⑥ 高效过滤器破损。⑦ 碘吸附器失效。

5.1.2 定期试验中经常发现的问题 ① 高效过滤器破损。② 碘吸附器失效。③ 经过一个燃料周期后, 部分过滤器的压紧装置有松动现象, 过滤器与排架之间出现漏点。

5.2 试验设备的常见问题 甲基碘发生器是用于产生放射性气体的试验设备, 该设备易出现的问题如下: ① 长期放置或使用后, 由于锈蚀或胶塞碎屑等因故, 发生管路堵塞。② 由于受到酸性试剂的腐蚀, 气路控制部分的管路断裂。

5.3 防护问题 现场试验中要使用碘-131 和硫酸二甲酯, 前者为放射性物质, 后者为剧毒品。若防护不当易出现的问题为: ① 工作人员污染或受照。② 环境污染。

5.4 讨论 在首次调试时, 由于个别净化小室过滤器框架的密封性不好, 造成实验结果偏低或不达标。针对这些问题, 中辐院协助电站进行了整改, 最终确保过滤器净化系数达到电站规定指标。为减小过滤器框架的泄漏影响, 建议在现场安装结束后, 应尽快对小室和框架的密封性进行检查试验。过滤器安装应在厂房施工清洁都彻底完成后进行。

在首次调试时, 高效过滤器和碘吸附器失效多是由于运输安装过程受损或净化小室的环境条件差造成的, 建议过滤器的安装工作应在厂房整个清洁工作彻底完成后进行。

针对定期试验中出现的问题, 更换过滤器或调整压紧装置后, 进行再次现场试验。建议在每个系统试验前, 先对净化小室或箱体做预先检查, 发现问题及时处理。

对于放射性试验设备, 在每次试验工作开始前, 建议对甲基碘发生器进行检查、整修和调试, 以确保其使用功能正常。

对于使用碘-131 和硫酸二甲酯的工作人员, 应进行专门培训。在工作中, 应有专人监督, 确保其穿戴适宜的防护用品, 并严格按照程序操作。

6 结论

在秦山第二核电厂核空气净化系统的现场试验中, 中国辐射防护研究院承担了从试验设备供货到技术服务及培训的整个试验项目。迄今为止, 共完成验收及定期试验项目九个, 每个项目中包括 16 个系统, 57 个回路的高效过滤器和碘吸附器现场试验。

在每个项目的试验工作中, 都发现了核电站核空气净化系统中存在的一些缺陷。通过现场试验工作, 及时发现了系统中存在的问题, 经整改后, 核电站高效过滤器和碘吸附器净化单元的性能均满足了运行要求。这充分说明, 在核空气净化系统初次安装到位及日常运行过程中, 净化单元或设备不可避免地会出现影响系统性能的质量问题, 不仅要在生产过程中和出厂时进行严格的质量控制, 还需要进行严格的现场试验, 以确定过滤器在运输、安装及使用过程中是否被损坏, 过滤器与安装框架配合是否良好, 安装框架是否存在其他泄漏等。

在该电站的现场试验工作中, 国产现场试验设备也替代国外产品, 首次应用于国内核电站, 实现了此类系列产品的国产化。通过多年使用情况证明, 这些试验设备性能良好。

秦山第二核电厂十年现场试验工作经验表明, 为确保核电站安全有效运行, 在核空气净化系统运行前和运行中, 现场试验工作是非常必要的, 是核电站辐射防护工作中的不可或缺的重要部分。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国核行业标准 EJ/T 1183-2005, 核空气净化系统碘吸附器净化系数的测定—放射性甲基碘法[S].
- [2] 中华人民共和国核行业标准 EJ/T 791-93, 核空气净化系统的现场试验[S].
- [3] 法国标准 AFNOR NFX44-011-72, 用荧光素钠气溶胶测定过滤器的方法[S].
- [4] 美国标准 ASME N510-2007, 核空气净化系统的现场试验[S].
- [5] 美国标准 ASME N511-2007, 核空气净化、加热、通风和空调系统的现场试验[S].

(收稿日期: 2011-10-19)