

文章编号：0258-0926(2015)03-0125-04; doi:10.13832/j.jnpe.2015.03.0125

CPR1000 核电厂安全壳地坑滤网化学效应研究

李洁珪, 唐 辉, 赵延辉, 罗明坤, 王庆礼, 王争光

中广核工程有限公司, 广东深圳, 518000

摘要:研究了在冷却剂丧失事故(LOCA)工况下 CPR1000 核电厂安全壳地坑滤网堵塞的化学效应问题。化学效应评价采用模拟试验的方法进行。结果表明,在 CPR1000 核电厂中化学效应对应急再循环的影响非常轻微。

关键词:核电厂;地坑滤网;堵塞;化学效应研究

中图分类号:TL353+.5 文献标志码:A

Chemical Effect Evaluation of Containment Sump Filter of CPR1000 Nuclear Power Plants

Li Jieyao, Tang Hui, Zhao Yanhui, Luo Mingkun, Wang Qingli, Wang Zhengguang

China Nuclear Power Engineering Company, Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract: The chemical effects for the recirculation sump filter blockage of CPR1000 Nuclear Power Plant (NPP) under Loss of Coolant Accident (LOCA) is studied. In chemical effects evaluation, simulation experimentation is adopted. The result indicates that the effect of chemical effect on the emergency recycle is slight in CPR1000 NPP.

Key words: Nuclear power plant, Containment sump filter, Blockage, Chemical effect evaluation

0 引言

早期的核电厂安全壳地坑滤网设计中人为假设地坑滤网堵塞率不会超过 50%, 国际核电业界的广泛研究及多起运行事件表明, 这种假设不够保守, 在冷却剂丧失事故(LOCA)工况下, 应急堆芯冷却系统(ECCS)和安全壳喷淋系统(CSS)的再循环功能将受到碎片堵塞安全壳滤网的影响。我国新建核电厂采用了新型地坑滤网, 大幅度提升了地坑滤网的面积, 如岭澳核电站二期的地坑滤网面积从大亚湾的约 40 m²/机组提高至约 440 m²/机组, 提高了地坑滤网的安全性和可靠性。但是新型的地坑滤网仍需完成针对特定堆型的化学效应评价和下游效应评价才能确保安全可靠。

所谓化学效应, 即 LOCA 事故后, 安全壳内

的结构材料和保温材料在冷却剂和喷淋液的冲刷和浸泡下, 可能腐蚀溶解。这些被溶解的物质由于温度、压力及化学条件的变化, 或者与其他物质的反应, 可能会生成某些化学产物并析出, 这些化学产物会对地坑滤网压降产生一定的影响。因此, 在进行安全壳地坑滤网性能评价时, 应考虑这些化学产物带来的影响。化学效应的评价也被国家核安全局(NNSA)列为 CPR1000 堆型的共性安全问题。

1 CPR1000 核电厂地坑滤网化学效应评价方案

化学效应评价主要采用 WCAP-16530-NP(西屋公司报告《事故后安全壳地坑液体化学效应最终安全评估》)^[1]分析和化学效应压降试验相结

合的方法进行。评价过程分为两步：化学沉淀物的种类和数量分析；化学沉淀物的压降试验。

1.1 沉淀物的种类和数量分析

CPR1000 核电厂采用 NaOH 作为化学添加剂，安全壳内铝的使用严格受到限制，但并不能在化学效应评价时全部忽略。对于使用 NaOH 作为化学添加剂的电厂，生成沉淀取决于溶液中铝和硅的浓度：若 $[Si] > 3.11 \times [Al]$ （ $[Si]$ 、 $[Al]$ 表示 Si 元素和 Al 元素的浓度），则生成 $NaAlSi_3O_8$ 沉淀；若 $[Si] < 3.11 \times [Al]$ ，则生成 $NaAlSi_3O_8$ 和 $Al(OH)_3$ 沉淀。

参考 WCAP-16530-NP^[1] 提供的分析方法，可确定特定电厂 LOCA 环境中的化学产物的种类和数量。首先根据安全壳内暴露在硼酸溶液中的铝的质量和表面积计算出铝的溶解速率，金属铝的溶解速率 (R_R) 可按下式估计：

$$\lg R_R = A + C \left(\frac{1000}{T} \right) + D(pH_a)^2 + E \frac{(pH_a)T}{1000} \quad (1)$$

式中， T 为绝对温度； pH_a 为 25 下的初始 pH 值； A 、 C 、 D 、 E 为常数。

经计算，事故后安全壳地坑中的 $[Si]$ 为 $[Al]$ 的 3.11 倍。对地坑滤网性能构成潜在危害的化学产物为硅酸铝钠。硅酸铝钠的产生是一个持续的过程，对于 CPR1000 核电厂，30 d 内可产生 52.7 kg 硅酸铝钠。

1.2 化学沉淀物的压降试验

计算得到化学沉淀物的生成数量后，需通过试验的方法，测量出事故后化学效应对地坑滤网压降产生的影响，以评价化学效应对地坑滤网性能的影响。试验详细情况见本文第 3 节。

2 化学效应机理试验

为验证 CPR1000 电厂的化学效应的机理，探索电厂化学条件对化学效应的影响、电厂保温材料的化学效应行为机理，特设置了化学效应机理试验。

2.1 硅酸铝钠沉淀物的制备和表征

在室温下采用硝酸铝 $[Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O]$ 和正硅酸钠 (Na_4SiO_4) 按 Si、Al 摩尔比例 3:0.95 制备硅酸铝钠 ($NaAlSi_3O_8$)，稀释至最终浓度 9.6 ~ 9.8 g/L，观察并记录室温、60 min 内的沉积情况，研究硅酸铝钠沉淀在室温下的沉降速率。

试验结果显示，硅酸铝钠沉淀前 30 min 的沉降速率较快，沉降规律符合线性规律，沉降速率为 0.17 mL/min；30 min 后沉降已变得非常缓慢，在产生后 60 min 内接近完全沉淀。

2.2 硅酸铝钠溶解度特性试验

本次试验选取 4 个 pH 值 (7.7、8.7、9.7、10.7) 设置试验组，每组添加等量的、浓度是电厂几十倍的 Si 离子和 Al 离子，以制备硅酸铝钠溶液，静置后得到硅酸铝钠的完全沉淀溶液；然后逐渐升温，在 5 个温度值 (45、55、65、75、85) 处静置一段时间，检测溶液中 Si 和 Al 的浓度，研究不同温度和 pH 值对硅酸铝钠沉淀物溶解特性的影响。本次试验得到如下结论：在 pH 固定的情况下，随着温度的上升，硅酸铝钠的溶解度上升；在温度固定的情况下，随着 pH 的上升，硅酸铝钠的溶解度下降。

2.3 纤维材料的腐蚀和溶解特性研究

试验采用岭澳核电站二期提供的主管道保温材料经处理后，分 2 组 (pH 值分别为 9.7 和 8.7) 在烧瓶中进行试验。试验选取 5 个温度台阶，根据事故后地坑水温的变化曲线控制在各个温度台阶停留的时间；在每次降温前检测溶液中 Si 和 Al 离子浓度。

本试验结果表明，在电厂化学条件下通过保温材料的腐蚀和溶解逐渐释放出一定量的 Si 元素和 Al 元素，且 Si 元素的浓度远大于 Al 元素浓度的 3.11 倍。

2.4 机理试验结论

总结化学效应机理试验结果如下：

(1) 硅酸铝钠沉淀的沉降速率较快，在产生后 60 min 内几乎完全沉淀。

(2) 在 pH 固定的情况下，随着温度的上升，硅酸铝钠的溶解度上升。

(3) 在温度固定的情况下，随着 pH 的上升，硅酸铝钠的溶解度下降。

(4) 在核电厂化学条件下，保温材料将会腐蚀和溶解，事故后因腐蚀和溶解释放到安全壳地坑中的 Si 元素浓度远大于 Al 元素浓度的 3.11 倍。

3 化学效应试验

3.1 试验回路

化学效应试验回路旨在模拟冷却剂丧失/主蒸汽管道破裂 (LOCA/MSLB) 事故后安全壳内

环境特性,主要为混合溶液成分、pH 值、温度等。通过添加替代玻璃纤维和颗粒来模拟事故后所产生的物理碎片,添加 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 溶液模拟事故后产生的 Al 元素含量,最终通过反应生成的沉淀物附着在滤床上对压降的影响来评估核电厂事故后化学产物对地坑滤网性能的影响。化学效应试验回路见图 1。

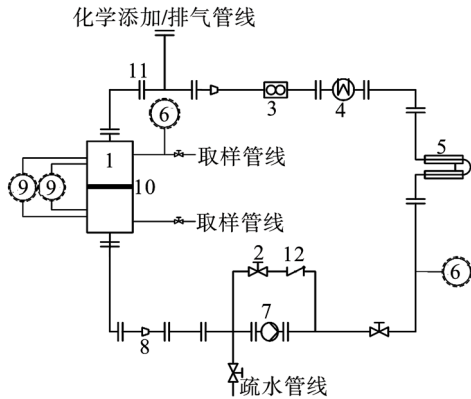


图 1 化学效应试验示意图

Fig. 1 Chemical Effect Test Loop

1—透明试验管；2—截止阀门；3—流量计；4—冷却器；5—加热器；6—测温仪表；7—泵；8—大小头；9—测压仪表；10—平板滤网；11—法兰；12—止回阀

3.2 化学效应试验

试验时模拟核电厂事故后再循环阶段的条件；使用面积比例法来确定流量、水装量、纤维和颗粒碎片投放量和化学药剂添加量,试验持续时间 30 d。为了研究化学效应试验的可靠性,排除试验中基于试验设备和仪表的影响,本试验设置了 2 组平行试验。

2 次试验的输入和操作完全相同,互为参照,在评价化学效应的同时验证试验的可重现性。2 次试验结果相近,都能观察到明显的化学沉淀物析出,同时碎片床本身压缩量较大,添加硝酸铝的操作并没有引起压降的明显变化,整个周期中压降一直较稳定,全过程滤网上压降有小幅上涨,但增长速率缓慢。试验结果如图 2 所示。

试验中对回路溶液进行了取样检测,观察回路中 Si、Al 浓度随时间的变化规律, Si、Al 浓度随时间的变化曲线如图 3。

检测结果显示, Si 浓度随时间推移持续上升,这主要是由于玻璃纤维被溶液腐蚀释放出 Si 元素的速率高于硅酸铝钠的生成速率; Al 元素浓

度随时间推移逐渐下降,这主要是由于溶液中的 Al 离子反应生成沉淀物析出的速率高于纤维腐蚀释放 Al 元素的速率,故沉淀物的生成速率由 Al 离子的消耗速率决定。Al 元素的变化规律与滤网上压降的变化规律对比如图 4。

由图 4 可以看到,硝酸铝钠的生成与压降的变化没有直接关联。

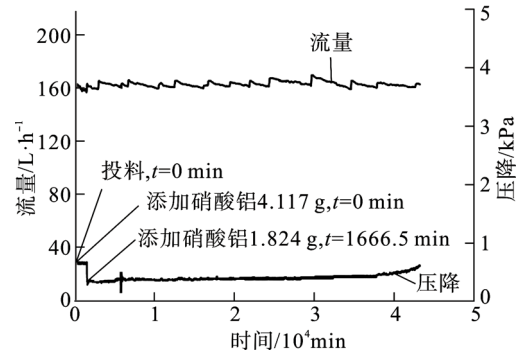


图 2 流量-压降曲线

Fig. 2 Flux-Head Loss Line

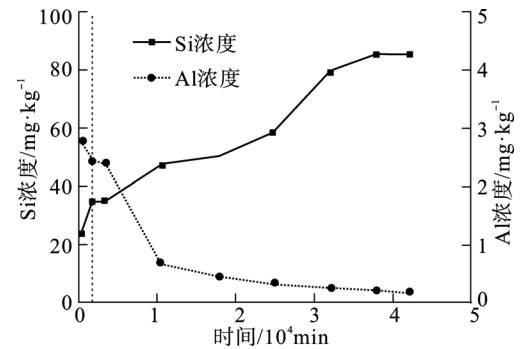


图 3 Si、Al 浓度随时间的变化曲线

Fig. 3 Silicon and Aluminum Release with Time

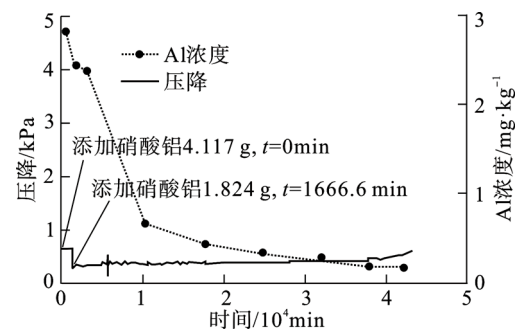


图 4 Al 释放-压降变化曲线

Fig. 4 Aluminum Release and Head Loss with Time

4 结论

根据机理试验分析,在 CPR1000 核电厂化学

条件下,保温材料会因腐蚀和溶解释放出 Si 元素和 Al 元素,事故后因腐蚀和溶解释放到安全壳地坑中的 Si 元素浓度远大于 Al 元素浓度的 3.11 倍,确定事故后生成的化学沉淀物为硅酸铝钠。

2 次化学效应试验的压降变化趋势相近:初始压降较低,在降温的过程中压降下降,添加化学药剂的操作未导致压降的明显增加。从图 4 也可以看出,滤网上的压降并未因硝酸铝钠的生成而出现变动。

同时考虑试验过程中碎片床在通流作用下存在显著的压缩,碎片床压缩后其孔隙率减小,滤床上的压降也会相应增加。在试验中无法将这种效应与化学效应分开,在将碎片床压缩的贡献也

考虑在内的情况下,滤床上的压降仍未出现显著增加。这说明,在 CPR1000 地坑滤网上化学效应的作用非常轻微。

根据以上分析可以认为,化学效应对 CPR1000 堆型地坑滤网压降的影响很小,可以忽略。进而可以推论化学效应不会导致下游应急再循环系统功能的恶化。

参考文献:

- [1] Westinghouse Electricity Company. WCAP-16530-NP: Final safety evaluation of post-accident chemical effects in containment sump fluids to support GSI-191[R]. Pittsburgh, PA: Westinghouse Electricity Company, 2003.

(责任编辑:刘胜吾)