

锈蚀样件在动态钠回路中的实验研究

刘泽军, 孙树海

(环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082)

[摘要] 中国实验快堆的蒸汽发生器在安装过程中发现其中一个蒸发器和一个过热器壳程内存在较为严重的锈蚀现象。为此中国原子能研究院快堆工程部钠工艺研究室进行了钠中静态浸泡实验,但是静态除锈温度要求较高,快堆现场在运行前不易达到该要求。为了进一步研究蒸汽发生器锈蚀表面在动态钠中的行为,为现场进行蒸汽发生器的清洗提供依据,快堆工程部决定进行蒸汽发生器锈蚀样件动态清洗实验。本实验利用“PEC堆电磁泵特性实验钠回路”,模拟蒸汽发生器的运行工况,前后对比样件的照片,得出不同条件下的清洗效果,为中国实验快堆蒸汽发生器现场在线清洗提供依据。

[关键词] 蒸汽发生器;样件;锈蚀;动态清洗

[中图分类号] TL411 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)11-0099-04

1 前言

蒸汽发生器是中国实验快堆(CEFR)的主要设备之一,用于从二回路导出热量并输出过热蒸汽,每台蒸汽发生器由蒸发器模块和过热器模块组成,材料是10×2M钢,基本结构是管-壳式,由俄罗斯设计制造。该设备在快堆现场存放了约2年后,安装前在钠侧发现了比较严重的锈蚀现象。为了保证二回路的运行安全,初步方案在蒸汽发生器进水前对其钠侧进行在线动态钠清洗。在动态清洗前,先进行了样件的静态液态钠浸泡试验,在250℃和360℃两种温度下分别浸泡520h和65h后,锈蚀基本被清洗干净,并化验出锈蚀的主要成分就是铁的氧化物。为进一步研究蒸汽发生器锈蚀表面在动态钠中的行为,同时也为现场的动态清洗提供依据,决定在实验回路上进行锈蚀样件动态钠清洗实验。通过定性观察锈蚀样件的清洗效果,以便确定CEFR蒸汽发生器上锈蚀部分的具体清洗方法、最佳冲洗流程和冲洗时间,制定合适的中国实验快堆蒸汽发生器锈蚀在线清洗方案。

2 实验准备

2.1 样件的选取

所用样件从CEFR 508/2过热器生锈钠管的大、小封头上切取,其尺寸为90mm×40mm×6mm。样件成分与过热器相同,通过从过热器内表面观察,锈蚀情况与现场实际过热器锈蚀程度基本一致,此次实验共准备此类样件30块,并进行了编号。其中一个样件的原始照片见图1。

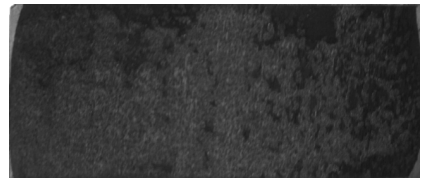


图1 样件原始照片

Fig.1 The photo of a sample

2.2 实验回路介绍

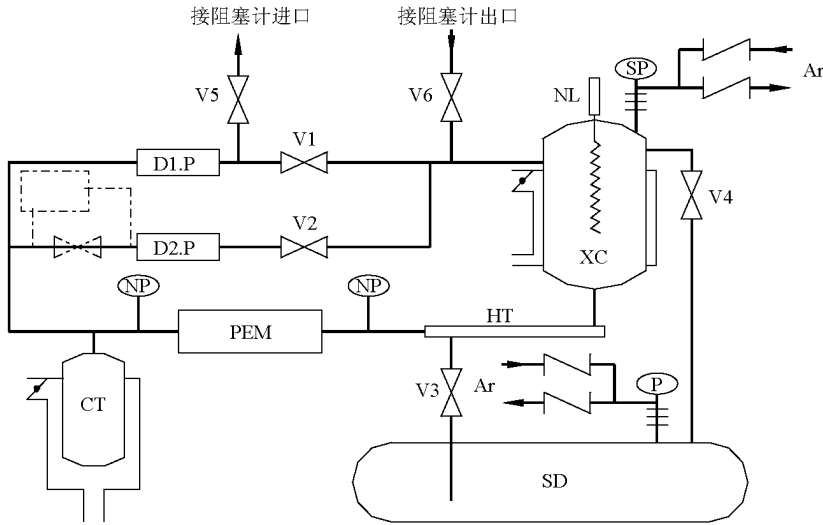
实验的钠回路是由“电磁泵特性实验钠回路”改建而成的。该回路的主要参数如下:运行最高温

[收稿日期] 2012-06-04

[作者简介] 刘泽军(1970—),男,湖北孝感市人,高级工程师,研究方向为反应堆运行;E-mail: liuzejun@china核.cn

度 420 °C,最大流量 15 m³/h,电磁泵在 410 °C 压头为 0.11 MPa;主加热器功率:6 kW/220 V AC;辅助加热器功率:2.4 kW/220 V AC。

实验回路流程图见图 2(虚线部分为加装的实验段的相关管道和阀门)。



PEM—电磁泵; NP—钠压力传感器; CT—自然循环冷阱; D—永磁式流量计; SP—精密压力表; NL—感应式钠液位计; XC—膨胀箱兼冷却器; HT—加热器; P—压力表; SD—储钠罐; V—钠阀门

图 2 实验回路流程图

Fig. 2 The flow chart of test loop

其中实验段为自己设计并委托加工而成,一次可以安放 6 个样件。

借助于对电磁泵 PEM 电压控制和钠阀 V1、V2,可以调节流经实验段的钠流量。

3 流速设计计算

实验因为需要尽量模拟现场实际清洗的工况,主要是实验工况与一定运行清洗工况下蒸汽发生器钠侧的表面流速一致,因此需要计算实验回路所应达到的流速。

3.1 实际流通截面面积

根据蒸汽发生器的设计参数计算流通截面面积(A)

$$A = \frac{1}{4} \pi (D - 2d)^2$$

$$= \frac{1}{4} \pi [(0.63 - 0.016 \times 2)^2 - 0.016^2 \times 239]$$

$$= 0.233 (\text{m}^2) \quad (1)$$

式(1)中,D为换热管管道外径;d为换热管管道内径。

3.2 流速计算

分别计算两种工况下蒸汽发生器钠侧表面的

流速。

3.2.1 二回路钠泵运行

在二回路钠泵额定转速下的钠流速

$$\frac{G}{A} = \frac{570}{0.233 \times 3600} = 0.68 (\text{m/s}) \quad (2)$$

在二回路钠泵 150 转情况下的钠流速

$$\frac{G_{150}}{A} = \frac{86.4}{0.233 \times 3600} = 0.103 (\text{m/s}) \quad (3)$$

式(2)、式(3)中,G为额定工况下钠流量;G₁₅₀为二回路钠泵 150 转下钠流量。

3.2.2 二回路钠泵不运行

二回路钠泵不运行,只在二回路电磁泵运行情况下,计算 4 m³/h 和 10 m³/h 的流量下流速分别为 0.005 m/s 和 0.012 m/s。

二回路电磁泵在 4 m³/h 下对应的蒸汽发生器表面的流速很低,相当于静态浸泡,同时实验回路的电磁泵实现该工况较为困难,因此不考虑这种流量下的清洗方案。同时出于保护主泵的角度,也不考虑二回路钠泵额定转速运行下的清洗方案,因此本次实验,初步确定了 0.012 m/s 和 0.103 m/s 两种工况。

3.3 实验段设计直径下流量的计算

由于实验回路有两个支路,电磁泵的流量又是可以调节的,因此不难满足实验条件,采用内径

$d_1 = 40$ mm的实验段管道,在上面提到的两种流速下对应的流量分别如下。

$$S = \frac{1}{4} \pi d_1^2 = \frac{1}{4} \pi 0.04^2 = 0.00126 (\text{m}^2) \quad (4)$$

$$Q_1 = 3600V_{150}S = 0.103 \times 3600 \times 0.00126 = 0.47 (\text{m}^3/\text{h}) \quad (5)$$

$$Q_2 = 3600V_2S = 0.012 \times 3600 \times 0.00126 = 0.0544 (\text{m}^3/\text{h}) \quad (6)$$

根据实验回路特性,实验段 Q_1 流量下对应电磁泵流量 $10.75 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

4 实验步骤

实验只是定性了解锈蚀样品在动态钠流中的行为,没有借助精密的仪器进行材料分析。实验的主要方法是外观对比,初步制定的实验步骤如下。

1) 加工一批样品,并逐一进行编号,拍照。

2) 加工实验段,并将6个样品(90 mm × 40 mm)放在实验段中,然后将实验段安装在小实验回路中。

3) 首先进行200 °C下0.103 m/s流速下样品的清洗实验,分别在不同时间段取出两个样品(空出的位置放入新的样品)进行观察,如样品被清洗干净则不进行下个时间段的清洗。如果表面没有清洗干净,回路继续运行进行冲洗,直到取出的样品被清洗干净。

4) 进行200 °C下0.012 m/s流速下样品的清洗实验,重复以上步骤。

5) 进行250 °C下0.012 m/s流速下样品的清洗实验,重复以上步骤。

6) 进行250 °C下0.103 m/s流速下样品的清洗实验,重复以上步骤。

7) 进行320 °C下相关流速下样品的清洗实验,重复以上步骤。

8) 进行360 °C下相关流速下样品的清洗实验,重复以上步骤。

9) 整理实验数据,编制实验报告。

5 实验实际过程及结果

5.1 200 °C下0.103 m/s流速下冲洗实验

第一阶段在200 °C下0.103 m/s流速下样品的清洗,初始放入6个样品,2 d后取出第一批2个样

品,并重新放入新的样品,以后又分别在2 d、7 d、14 d后取出一定的样品,得到不同冲洗时间的样品。

当把取出的实验样品放入无水乙醇中除钠时,乙醇成为灰黑色浑浊液,底部有黑色粉末沉积物,这可能是样品表面生成的铁溶到了乙醇中。冲洗后的样品在无水乙醇中晃动,表面黑色粉末洗掉很多,说明实验的钠回路流速较低时,不能很好的达到冲洗效果。

实验结果显示,在200 °C下0.103 m/s流速下,样品很短时间内(46 h内)表面成为棕黑色,这表明锈管样品表面已和钠发生作用生成了黑色的铁,但由于时间很短,还原反应尚未充分,铁锈依然存在,擦拭后表面仍然有黑色铁锈存在。长时间(200 ~ 300 h)冲洗后,样品表面仍然为黑色粉末状,擦拭后样品表面露出金属光泽,表明样品表面铁锈基本被钠置换掉,但是由于钠的流速较低,表面铁粉末不能冲洗掉。

鉴于以上分析,在低流速下的样品表面的铁屑存在滞留,影响进一步的清洗,比0.103 m/s更低流速下的清洗实验没必要再做,即原定的实验步骤4)和5)取消。

5.2 250 °C下0.103 m/s流速下样品的清洗

第二阶段在250 °C下0.103 m/s流速下样品的清洗,分别得到两个冲洗时间的样品。

实验结果显示:250 °C下0.103 m/s流速下冲洗效果与200 °C下0.103 m/s流速下冲洗效果相差不大。冲洗后,表面为棕黑色,粉末状,经擦拭,样品表面露出金属光泽。

5.3 320 °C下0.103 m/s流速下样品的清洗

第三阶段在320 °C下0.103 m/s流速下样品的清洗,分别得到12 h、30 h、42 h三种冲洗时间的样品。图3为清洗30 h后样品的照片。



图3 320 °C、0.103 m/s 下清洗 30 h 后样件照片

Fig.3 The photo of the sample having been cleaned for 30 hours on 320 °C、0.103 m/s

实验结果显示,320 °C 下 0.103 m/s 流速下,12 h 后样件表面已经除去一部分铁锈。30 h 后,样件表面已经有金属光泽,表面只有很少黑色粉末状物质,说明在此工况下,较短时间后样件表面铁锈已经清洗掉很大部分,仅有少量部分残留,擦拭前后样件表面相差不大。

实验结果显示,在 320 °C 时,样件表面铁锈在短时间内可以被冲洗掉。

5.4 360 °C 下 0.103 m/s 流速下样件的清洗

最后还完成了 360 °C 下 0.103 m/s 流速下样件的清洗,通过与 320 °C 下的实验结果比较,没有发现明显改善。

6 结语

根据在本实验条件下的实验结果,可得出以下几点结论。

1)200 °C 时样件表面铁锈已经可以被高温清洁钠置换出铁,但是速度很慢,大概 400 h 能被全部置换;温度在 320 °C 以上时,置换速度很快,30 h 后仅有少量残余。

2)在 320 °C 时锈蚀的去除效果有一个明显的提升,再继续提高温度,在 360 °C 下改善则非常有限。

3)相对于温度来说,速度的影响不大,但是需要一定的最小速度,便于反应后金属颗粒离开金属表面,对清洗有利。

4)样件表面的锈去除后,表面比较粗糙。

Experimental research of rust removed by flowing sodium

Liu Zejun, Sun Shuhai

(Nuclear and Radiation Safety Center, MEP, Beijing 100082, China)

[Abstract] It was found that there were badly oxidation phenomena in a superheater and a evaporator of CEFR's steam generators when they were being installed. So a static immersion test had been finished firstly by the sodium technology department of CEFR to investigate how to removing the rust from the CEFR's steam generators. But the site condition of CEFR's steam generators can not achieve the condition of the means of removing rust only by static immersion. We decided to do the test of removing rust by flowing sodium of the samples of CEFR's steam generators to investigate behavior of the oxidation surface of CEFR's steam generators in the flowing sodium. The test would provide the testing foundation for the work of removing rust by flowing sodium on CEFR site. The test has utilized a mini-loop of sodium—"sodium loop for characteristic test of PEC's electromagnetism pump" and simulated the work condition of CEFR's steam generators. Through the comparison between the photos of the samples which are before and after the test, the results about effect of removing rust of the samples under different conditions have been reached. These would provide the testing foundation for the work of removing rust by flowing sodium of CEFR's steam generators.

[Key words] steam generator; sample; oxidation; removing rust by flowing sodium