

MTS5 露点仪在 HTR-10 气体采样 分析系统中的应用

朱江, 李智慧

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要: 讨论了对 10 MW 高温气冷堆一回路高纯氦气进行湿度监测的仪器的特点, 并介绍了利用氧化铝电容式水分分析仪对氦气中的湿度进行在线监测的使用情况。在数年的使用中, 仪器测量结果满足反应堆运行要求, 需指出的是, 该仪器还存在工作过程中发生漂移的特点, 所以, 欲提高仪器测量的准确性, 就必须对该仪器进行定期标定。

关键词: 露点仪; 氦气; 水

中图分类号: TF068.24

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2010)10-1228-05

Application of Model MTS5 Dew-Point Meter in Gas Sampling and Analyzing System of HTR-10

ZHU Jiang, LI Zhi-hui

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The feature of humidity detector to measure the content of water in pure helium of main loop of reactor was discussed, and the circumstances using Al_2O_3 moisture sensor to measure the content of water in helium on-line were introduced. During those few years, the dew-point meter has sufficed to measure the content of water in the helium gas during the running of the reactor. On the other hand, excursion can happen when the instrument running. Demarcate must be made termly to improve the veracity of the meter.

Key words: dew-point meter; helium; water

10 MW 高温气冷堆(HTR-10)是由清华大学自行设计和建造的具备国际先进水平的核反应堆, 其一回路采用的冷却剂是纯度为 99.999% 的氦气。在 800 °C 高温下, 氦气中的 H_2O 会与堆芯结构材料或石墨燃料球反应生成 H_2 、 CO 和 CO_2 ; 而在低温区, 例如蒸汽发生

器的换热管表面, 氦气杂质中的 H_2 和 CO 反应又会生成 H_2O 和 C , 这种反应不仅会腐蚀堆芯结构, 还会使石墨由反应堆高温区向低温区迁移, 造成石墨粉尘在蒸汽发生器表面的大量沉积, 影响换热器的换热效率。在蒸汽发生器破管时, 被冲刷的石墨粉尘会导致一回路放射性

的增加。所以,高温气冷堆一回路冷却剂中的湿度是标志反应堆是否安全运行的一项重要参数。在高温气冷反应堆运行过程中,一回路进水事故属于重大事故,一旦一回路的氦气中水含量达到 800 ppm,反应堆将保护停堆。在反应堆热工仪表回路,有湿度测量装置为保护系统提供保护变量。气体采样分析系统中设置的露点仪不为保护系统提供保护信号,它用气体分析的方法来监测反应堆一回路氦气湿度是否达到运行技术规格书所要求的指标,并兼顾反应堆调试和事故后过程的湿度监测和氦气净化系统净化效率的在线监测。

1 系统仪器的选择

出于核反应堆对运行安全要求的特殊性,气体采样和分析系统中用于其高纯气中水分检测的仪器应具备如下特点。

1) 具有连续在线测量功能:由于水进入反应堆一回路的起因或过程不同,氦气中的水分含量可能是渐变的,也可能是突变的,可能是在一定范围内变化的,也可能是按照某种趋势变化的,所以,检测器应能实时地反映这些变化的情况。

2) 有较短的响应时间:对于球床堆芯的大

破口进水事故,可能导致燃料元件的损坏和堆芯结构的破坏等后果,因此是相当危险的^[1]。因而要求检测器能快速反映湿度的变化,以便反应堆操作人员能及时采取恰当的应对措施。

3) 有足够的测量范围^[2]:在正常运行工况下,对反应堆一回路氦气中水含量的要求为小于 2 ppm,但在一回路进水事故工况下,水含量可能会大于 1 000 ppm,所以,检测仪器必须有足够宽的测量范围以便能如实反映各种工况下氦气中的含水量。

用于气体中水分测量的仪器大致可分为电容式水分析仪、电解式水分析仪、目视露点式水分析仪和光电露点式水分析仪等,其优缺点比较列于表 1。其中,电容式水分析仪具有响应快、灵敏度高、操作方便、检测范围广阔等优点,能满足以上提出的检测要求,所以,本气体采样和分析系统采用此种仪器进行 10 MW 高温气冷堆一回路氦气的水分检测。PANAMETRICS、SHAW、MICHELL 和 XENTAUR 公司等均生产成熟的电容式水分测量系列产品,经实际调研和考察,最终本系统选用了 PANAMETRICS 公司生产的 MTS5 型微量水分析仪,简称露点仪。

表 1 各种水分析仪的优缺点比较

Table 1 Comparisons between several kinds of moisture sensors

仪器名称	优点	缺点
电容式水分析仪	响应范围宽,可远程安装,响应快,温度系数小,与流量变化无关,可在较宽的温度和压力范围使用,日常维护量较小,体积小	属间接测量法,会漂移,响应值非线性,需校准
电解式水分析仪	属绝对测量法,稳定,不漂移	电解池寿命有限,需要再生;对气体流量要求较高
目视露点式水分析仪	属基本测量,测量准确,且仪器稳定无漂移	人工测量,需专业操作人员,不适用于工程自动化场合
光电露点式水分析仪	属基本测量,测量准确,且仪器稳定无漂移	价格较高,对操作人员的要求较高,并需进行维护,对污染物敏感

2 MTS5 露点仪测量原理

MTS5 露点仪是设计用于测量干燥空气装置露点的紧凑型微量湿度变送器探头。仪器提供测量的露点相对应 4~20 mA 输出信号。MTS5 露点仪测量范围为 -110~+20 °C,精度为 ±2 °C,推荐再校验周期为 6~12 个月,最

大操作压力为 0~34.5 MPa。露点仪配有先进的薄膜氧化铝湿敏传感技术软件,超常的灵敏性,反应时间迅速,并具有校验稳定性和宽量程响应的特点。

MTS5 型微量水分析仪采用的是电容式传感器,电容由 3 层结构组成,在 1 块铝金属基底

的表面上,电镀产生多孔氧化层,再在该氧化铝上沉积1层金。金和铝衬底构成了电容的两极,氧化铝为其间的介质。氧化铝层和铝层之间有均匀的几何孔洞,易从周围气体中吸收水气,水气快速地渗透过金镀层,并平衡分布于氧化铝的孔隙壁上,氧化铝的介电常数为7~9,而水的则为81,较氧化铝大很多,当含水气体进入电容时,氧化铝层的水含量会发生变化,则该电容的介电常数就会改变,从而导致电容量的改变,仪器通过电子线路测定电容的变化,即可间接测量出气体中水的含量。

氧化铝电容式传感器的结构如图1所示,等效电路原理如图2所示。图中, C_0 表示整个氧化铝厚度隔开的两极之间的电容, R_0 表示氧化膜的漏电电阻, R_1 表示微孔内表面的电阻, C_2 和 R_2 分别表示孔底与铝基片之间的电容和漏电阻。在增湿时,由于孔壁吸附水汽, R_1 值迅速减小,与此同时, C_2 增大。假如湿度接近饱和, R_1 可忽略不计, C_2 则由于孔底厚度很小而大幅增加甚至比 C_0 高100倍,对比之下, C_0 、 R_0 和 R_2 随湿度的变化则较小。因此,通过检测具有决定影响的两个参量 R_1 和 C_2 即可检测出气体的湿度。

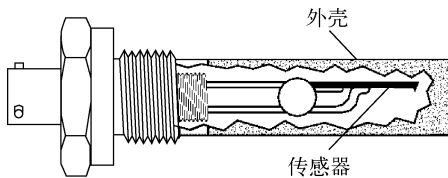


图1 电容式传感器结构示意图

Fig. 1 Capacitive sensor structure diagram

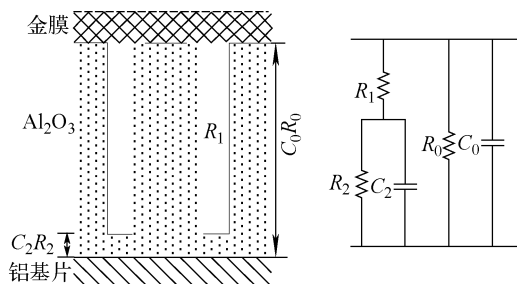


图2 电容式传感器等效电路原理图

Fig. 2 Capacitive sensor equivalent circuit diagram

仪器的测量原理图如图3所示。图中, V_s 为加在探测器上的固定频率和幅值的方波输入

电压,当被测气体的含水量增加时,传感器的电容随之增大、电阻随之减小,即传感器的导纳 Y 增加, V_s 在传感器上的压降减小,放大器 K 的输出电压 V_o 就增加;反之亦然。这样,通过校正因子 $V_s Z$,便能使放大器 K 的输出电压正比于传感器的导纳输出值。

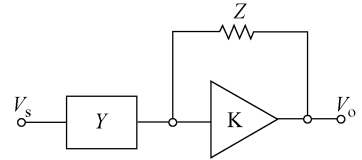


图3 电容式传感器测量电路原理图

Fig. 3 Capacitive sensor measuring circuit block diagram

传感器的导纳输出值与被测气体的含水量之间互成下式指数关系,因此,为使仪器表头得出线性读数,必须在导纳放大器后再加接一对数变换放大器。

$$R = \pi A e^{BT} + C$$

式中: R 为响应读数; A 、 B 、 C 为常数; T 为传感器周围空间气体的露点温度。

3 系统设计

MTS5型露点仪的量程为 $-110 \sim +20 \text{ }^\circ\text{C}$ 露点温度,分辨率为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$,在 $-110 \sim 66 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内的准确度为 $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$,达到变化的63%响应时间为5s。最大采样流速为 5000 mL/s ^[3],一般这种检测器的被测气体流量掌握在 $100 \sim 500 \text{ mL/min}$ 。

将MTS5型露点仪安装在高温气冷堆气体采样和分析系统中,图4为它的取样管线流程示意图。由于工艺管线中流动的是反应堆一回路气体,会带有石墨粉尘,这些粉尘落到检测器敏感元件上,可能会导致仪器的测量精度降低,甚至会导致仪器的损坏,所以在取样管线上设置了 μm 级过滤器用以过滤氦气中的石墨粉尘。电容式水分析仪的检测探头的电容量与水的露点温度成正比。当露点相同时,测量压力高的气体比测量压力低的气体中水的体积含量数值低一些。即同样体积含量的水,压力高的气体比压力低的气体中水的露点温度高且不成正比^[4]。如果测量传感器处的压力比大气压

高,就会造成同样水体积含量的气体,露点温度比其在大气压下的露点温度高。为避免这种由压力变化所导致的测量误差,测量中在检测器出口对取样气体不进行收集,而是经通风系统

将检测后的气体排往大气,这样就避免了因在仪器出口收集气体而造成整个系统压力的提高,检测器工作在恒定大气压下,其测量结果能正确反映实际氦气样品中水的体积含量。

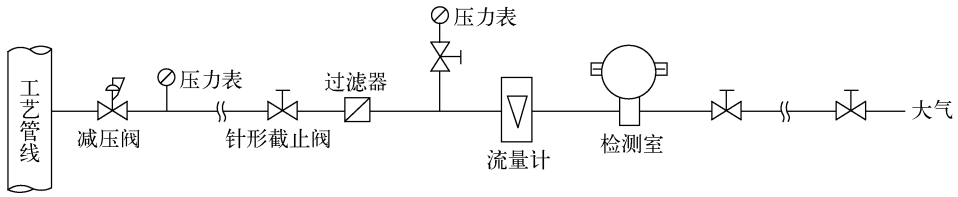


图 4 水分测量仪器在线取样系统流程图

Fig. 4 Humidity detector sampling on line system flow diagram

取样管路采用外径为 3.175 mm 的不锈钢管,这样可减小样品气滞留在取样管内的体积,减少测量的滞后时间。为减少管壁对样品气内杂质的吸附,取样管最好采用内抛光管。在仪器投入使用之初,先以 300~500 mL/min 样品气吹扫取样管路,并收集这部分吹扫气体。此吹扫过程约持续 5 min,然后将样品气流量调为约 40 mL/min,并将仪器的出口阀门切换为排空状态,实验证明,在密封性较好的回路中,在较小流量下,仪器仍能保持较稳定的读数。即检测器探头部分对水的吸附效果仍是完全的。保持小流量的目的是:1) 可减少和控制弱放射性气体的排放量;2) 可节省气体;3) 可不影响反应堆一回路氦气压力负变化率。

应堆气体采样分析系统中服役了 4 年,其运行情况一直较稳定。图 5 为 2003 年 12 月 8 日—29 日、2004 年 10 月 22 日—11 月 29 日、2005 年 3 月 1 日—4 月 28 日、2005 年 11 月 8 日—12 月 19 日期间该仪器的运行数据,反应堆运行功率分别为 3.7、2.6、6.7、3.2 MW。在以上时间段中,反应堆均曾经历过停堆、重新启动和稳定功率运行,所以,图中数据在时间上并无延续性。

从图 5 可看出,在反应堆稳定功率运行时,若无进水事故发生,仪器的测量数值比较稳定。运行一段时间后,仪器测得的一回路氦气湿度会向更小的趋势发展,造成这种趋势的原因是:

1) 随着反应堆运行时间的增长,堆芯石墨构件中的水会逐渐析出,这部分水和一回路氦气中的水会与石墨反应生成其他产物或被氦净化系统去除,所以,氦气中的水分会逐渐减少;

4 仪器的使用情况

MTS5型露点仪自投入使用以来,已在反

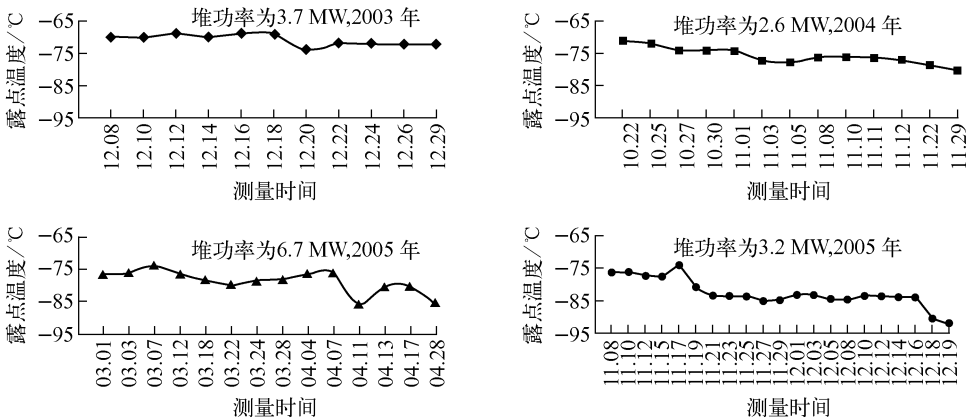


图 5 仪器运行数据

Fig. 5 Instrument operation data

2) 取样管道壁面会吸附水蒸气,且解析过程较吸附过程慢得多。取样点距离被测点很长,所以,管道中吸附的水蒸气很多,这样样气冲洗管壁,以使得样气中的水蒸气与管道壁吸附的水蒸气之间达到平衡的时间就会很长。随着运行时间的延长,管道会越来越干,测量的数值就会缓慢下降^[5];3) 露点仪测量值漂移。

图6所示为利用MTS5露点仪测量氦气净化系统氧化铜床后样气时的测量数值。一回路氦气中的 H_2 在氧化铜床中会被氧化为水,所以,氧化铜床后氦气湿度应大于一回路氦气湿度。露点仪的测量结果也反映了这一事实。基于以上观点,这种电容式湿度检测仪是满足反应堆运行要求的。本系统中所使用的MTS5型露点仪每年均送往中国计量科学研究院及PANAMETRICS公司进行标定,图7为该露点仪自投入使用以来每年校准标定所得到的曲线。可见,在2004—2005年间,该露点仪的年漂移量(对于同一传感器信号(MH)露点温度的最大差值)约为 $-12\text{ }^\circ\text{C}$,2005—2006年间约为 $-5\text{ }^\circ\text{C}$ 。露点仪传感器的湿敏性随时间下降的现象称为“老化”,它是造成元件性能不稳定的因素之一。Booker和Wood根据等效电路原理^[6],首先对这种现象进行了解释,他们认为由于阳极极化过程残存的硫酸对氧化铝的腐蚀作用,导致微孔堵塞,这是难以避免的。同时,在极化过程中产生的导电离子缓慢地向孔壁和孔基的晶格扩散,从游离状态趋向于固定的位置,这些过程将改变元件的电性质。造成元件性能不稳定的另外一个因素是零点漂移。传感器由于储存条件或环境条件不同会引起校正曲

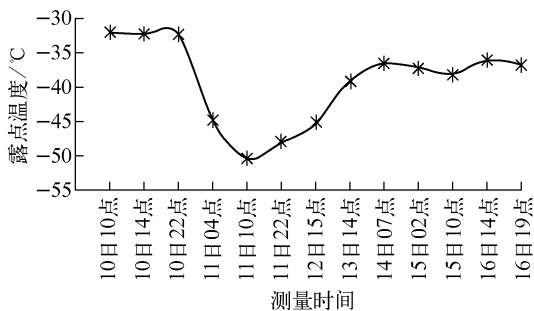


图6 2006年1月份仪器运行数据

Fig. 6 Instrument operation data in January, 2006

线位移,在实际测量中表现为对于同一湿度,若传感器储存条件不固定,则测量结果重复性差。

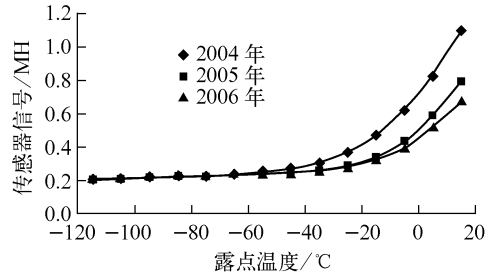


图7 仪器年校准曲线

Fig. 7 Instrument annual calibration curves

由此可见,以氧化铝传感器为探头而设计的露点仪在具有分辨率高、测量范围宽等优点的同时,还存在工作过程中会发生漂移的特点,所以,欲提高仪器测量的准确性,就必须对该仪器进行定期标定。

参考文献:

- [1] 徐小琳. 球床堆芯进水的实验研究[J]. 高技术通讯,1996,7:55-58.
XU Xiaolin. The experimental research of water ingress in HTR core[J]. High Technology Letters, 1996, 7: 55-58(in Chinese).
- [2] 朱江,王玉成,黄志勇. 10 MW 高温气冷堆气体采样分析系统研究[J]. 核动力工程,2005,2:51-53.
ZHU Jiang, WANG Yucheng, HUANG Zhiyong. Helium sampling and analyzing system of 10 MW High Temperature Gas-cooled Reactor[J]. Nucl Power Eng, 2005, 2: 51-53(in Chinese).
- [3] 毛平天,陆新根. 在线气体中微量氧和微量水的检测[J]. 工业计量,1999(S1):383-384.
- [4] 杨旭辉. SHAW 电容式在线水分析仪的正确使用[J]. 分析仪器,2000,27(1):65-66.
- [5] 马石申,文希孟. 氦气中微量氧和水的在线分析[J]. 郑州轻工业学院学报,2003,18(1):57-58.
MA Shishen, WEN Ximeng. On-line analysis of trace water and oxygen in argon gas[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Light Industry, 2003, 18(1): 57-58(in Chinese).
- [6] 李英干. 湿度测量[M]. 北京:气象出版社,1990:221-232.