

文章编号: 1671-6612 (2022) 06-914-07

基于气流循环运行的 碘吸附器性能检测系统装置研制

王坤俊 郭哲斌 张崇文 张治权 常森 王 稹

(中国辐射防护研究院 太原 030006)

【摘要】 为了提升碘吸附器在生产及应用过程中性能检测的安全性、适用性和自动化程度,以气流闭式循环设计、精准自调控技术为突破,研制出具有多功能特点的自动化循环式碘吸附器性能检测系统装置,对装置的密封性及运行稳定性进行了测试,过滤部件及系统的密封性均满足相关标准要求;装置可实现运行风量400~1400m³/h范围内任意设定值下的精确调节控制,且气流参数控制精度高、稳定性好,可实现1200m³/h风量连续循环运行24h风量变化小于3.75%,露点温度差最大不超过0.75℃,提升了实验及产品检测的准确性和安全性。在开放工况和循环工况下分别进行机械泄漏率和吸附放射性甲基碘效率试验,结果具有一致性和稳定性。

【关键词】 碘吸附器;性能检测;循环式;机械泄漏率;效率
中图分类号 TQ110.5/TL941 文献标识码 A

Development of Performance Detection System of Iodine Adsorber based on Air Circulation

Wang Kunjun Guo Zhebin Zhang Chongwen Zhang Zhiquan Chang Sen Wang Zhen

(China Institute for Radiation Protection, Taiyuan, 030006)

【Abstract】 In order to improve the automation, applicability and safety of performance testing of iodine adsorber in the production and application process, closed-cycle design and precise self-regulation technology were taken as breakthroughs, and an automatic circulating performance testing system with multi-functional characteristics of iodine adsorber has been developed. The sealing and operation stability of the device have been tested, which met the requirements of relevant qualification standards. The device can realize the adjustment and control of the operating air volume in the range of 400-1400m³/h, which has high control accuracy and good stability of air flow parameters. The change of air volume was less than 3.75% during 24h continuous circulation operation at 1200m³/h, and the maximum dew-point temperature difference was not more than 0.75℃, which improved the accuracy and safety of experiment and product testing. Mechanical leakage rate and adsorption efficiency of radioactive methyl iodine were tested under open and cyclic conditions respectively, and the results were consistent and stable.

【Keywords】 iodine adsorber; performance testing; circulating; mechanical leakage rate; efficiency

0 引言

碘吸附器作为核电站等核设施通风净化系统的关键设备,通过吸附核空气中的气态放射性碘,来保障核设施在正常工况特别是事故工况下厂房、

环境及人员的安全^[1-3]。碘吸附器应用到核电站之前均需要对其性能进行检测,合格后方可出厂使用。

根据行业标准NB/T 20039.11-2011^[4]、NB/T

20039.12-2011^[5]以及NB/T 20196.1-2013^[6]的规定,碘吸附器设备无论在出厂之前还是安装在核电站通风净化系统上之后进行性能检测试验时,均需要满足一定的气流环境条件,一般规定:折叠式(也称I型)碘吸附器需要测试其去除放射性气态甲基碘的吸附效率(或净化系数),抽屉式(也称II型)碘吸附器需要测试其机械泄漏率以满足验收指标。性能检测均要求试验系统满足风量在额定风量的 $\pm 10\%$ 范围内,碘吸附器进出口的气流相对湿度达到要求值($RH_I \leq 40\%$; $RH_{II} \leq 80\%$)。当气流环境的相对湿度较大时,试验系统往往需要启动电加热器提高气流温度,以降低入口气流的相对湿度。若采用进出风开放式系统流程,外界环境湿度持续较大时,加热器会持续工作,被检碘吸附器上、下游湿度达到平衡慢,试验时间长,耗电量大;同时,即使已经采取了必要的净化防护手段,尾气排放等方面仍然存在一定的辐射安全风险;另外,根据运行经验,现有检测系统的风量调节依靠经验进行阀门开度的手动调整,精度及稳定性一般较差。

此外,除了对碘吸附器常规的性能检测需求,在针对碘吸附器相关研究中,经常需要模拟多种异常工况条件,如干燥、高湿度等正常范围外的环境条件,也需要借助技术手段创造稳定的气流环境条件^[7,8]。

基于对碘吸附器试验系统的各种条件要求和保护环境、安全运行的理念^[9,10],有必要建立一套开、闭式回路自由切换、且运行参数实时自动监测分析、测试环境精准自调控的碘吸附器性能测试装置,以实现稳定的试验环境条件,为碘吸附器的性能检测及科研试验提供技术保障。

1 系统装置

1.1 实验仪器

I型碘吸附器:5cm厚度活性炭床,中国辐射防护研究院;氟利昂检测仪(精度为1ppb):F-1000-HD型,美国NUCON公司;脉冲式氟利昂脉冲发生器:MLF-I型,中国辐射防护研究院;Maestro-32 γ 谱仪,中国辐射防护研究院;1223-8-W/MU型压力计:0-1600mmH₂O,美国Dwyer公司;SP05-B5温湿度计:-20~100℃、0~100%,瑞士Rotronic公司。

1.2 装置功能设计

本研究装置主要用于碘吸附器产品的出厂检验以及核电站现场碘吸附器的再鉴定检测,另外,增加了大范围温湿度调节等功能还可满足碘吸附器及相关研究的需求,设计具备两大主要功能:

(1)系统环境调节功能,包括:风量自适应调控、湿度自适应调控、温度自适应调控、内外循环回路切换、循环气流尾气净化。

(2)碘吸附器性能测试,包括:效率测试、机械泄漏率测试、阻力测试。

此外,还可进行不同类型碘吸附器试验箱体的快速切换、数据自动记录与存储等操作。

1.3 系统流程设计

为了实现装置的设计功能,特别是针对碘吸附器不同性能的工况测试,设计装置的系统流程分两种工况:循环工况(效率测试)、开放工况(泄漏率测试)。

整个系统流程及组成如图1所示。

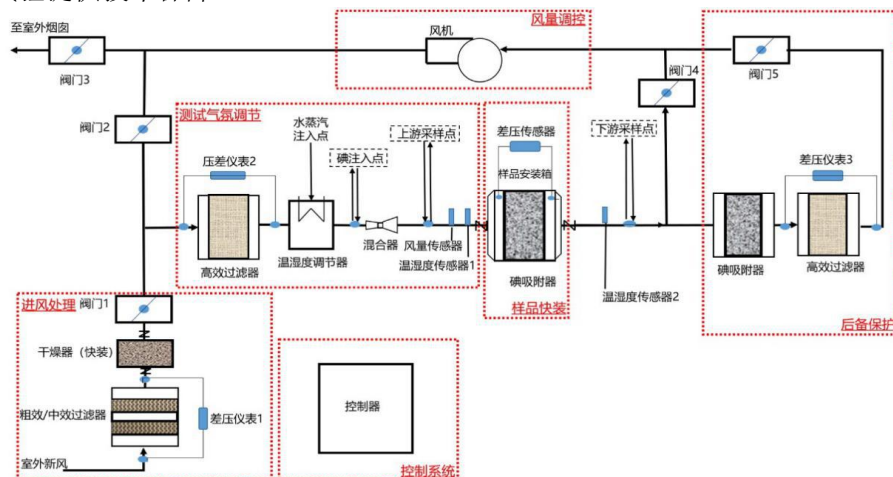


图1 循环式碘吸附器整机性能检测系统流程图

Fig.1 Process flow of the circulating performance testing system of iodine adsorber

整个检测装置系统主要由粗中效过滤器、干燥器、高效过滤器、温湿度调节器、样品安装箱、(后备)碘吸附器及过滤器、风机、阀门、连接管路、

安装支架等组成, 通过控制系统自动或手动控制; 所有设备最终集成于集装箱内。装置布局的三维示意图如图 2 所示。

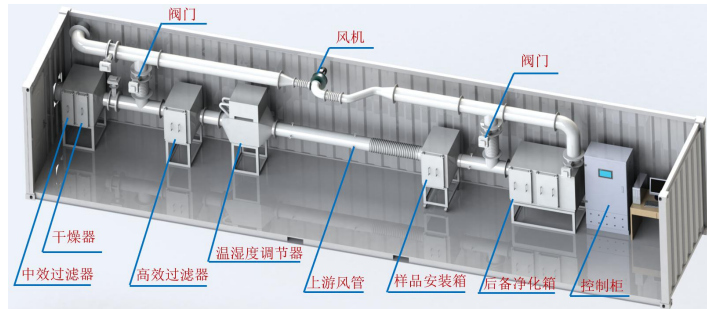


图 2 循环式碘吸附器性能检测装置的布局图

Fig.2 Layout diagram of the circulating performance testing device of iodine adsorber

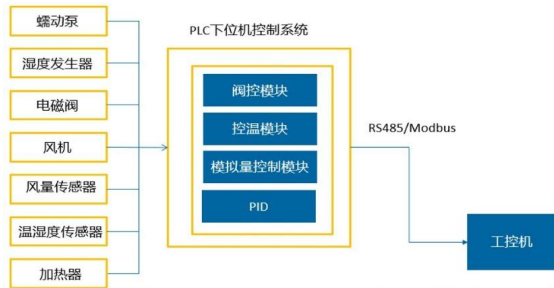


图 3 控制系统方案

Fig.3 Scheme of control system

其中, 示踪剂注入点前设置温湿度调节器, 用于增大或降低系统温湿度, 在其后设置有混合器, 用于将示踪剂充分混合均匀; 在样品安装箱上设置

有差压传感器, 用于测试被测碘吸附器的阻力; 后备保护的碘吸附器和高效过滤器用于循环工况效率测试时, 防止被测碘吸附器不合格而导致放射性示踪剂泄漏进入下游风管; 控制系统方案如图 3 所示, 各个模块通过 PLC 作为下位机快速实时响应控制, 通过计算机通讯协调各个控制器, 实现所需测试的试验流程, 计算机采用工控机。

(1) 装置在气流循环工况下的工艺流程

在进风状态下, 阀 1、阀 3、阀 5 打开, 阀 2、阀 4 关闭。设备由进风切换到循环工况时, 阀 1、阀 4、阀 3 关闭, 阀 2、阀 5 打开, 工艺流程图如图 4 所示。

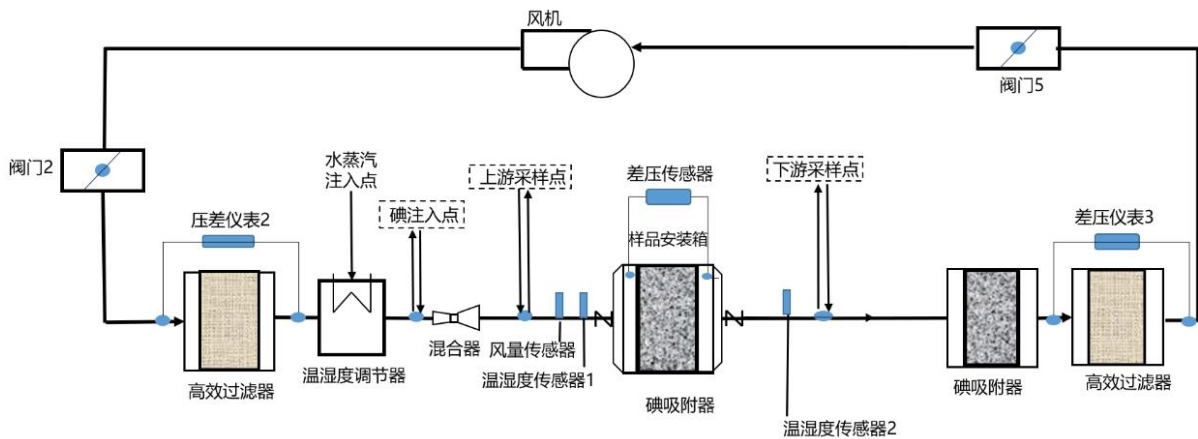


图 4 效率测试的循环工况工艺流程图

Fig.4 Process flow chart of efficiency test under cycle condition

在此工况下, 当气流环境条件达到要求范围后, 在温湿度调节器下游的注入点处注入放射性示踪剂(放射性甲基碘气体), 同时在上游采样点和下游采样点处采集气流样品, 待样品采集完成后分析其放射性活度, 进而求出被测样品的吸附效率。

(2) 装置在气流开放工况下的工艺流程

当进行泄漏率测试时, 所用试剂无毒无害, 切换至开放工况, 另外, 要求的相对湿度范围比较宽泛, 可拆掉干燥器, 阀 1、阀 3、阀 4 打开, 阀 2, 阀 5 关闭, 工艺流程图如图 5 所示。

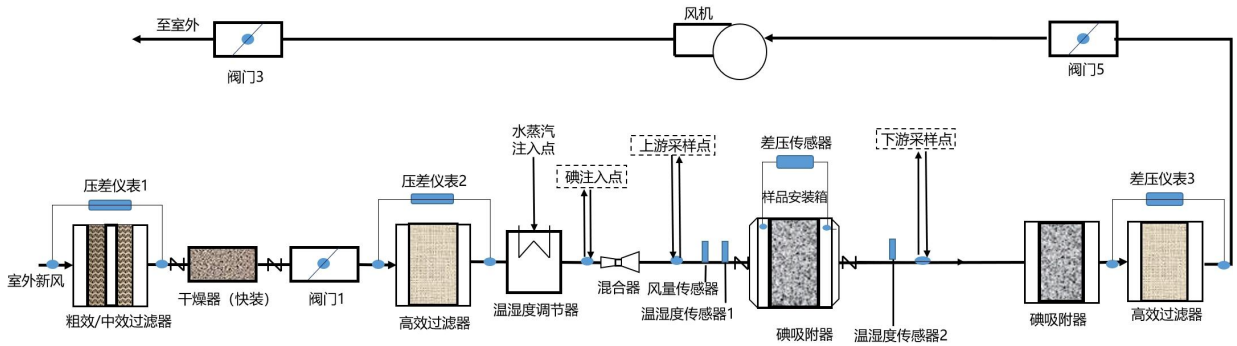


图 5 泄漏率测试的开放工况工艺流程图

Fig.5 Flow chart of leakage rate test under open condition

在此工况下, 当气流环境条件达到要求范围后, 在温湿度调节器下游的注入点处注入示踪剂(如氟利昂), 同时开启浓度检测仪测试上游采样点和下游采样点处的示踪剂浓度, 由下游浓度/上游浓度计算得到被测样品的机械泄漏率。此工况运行时, 起后备保护作用的碘吸附器和高效过滤器可以设置在系统回路中, 但由于采用的示踪剂多为无毒试剂, 所以一般不需要后备保护净化, 进而设置气流经过阀门 4。

2 装置关键部件及系统检测实验

为了验证循环式碘吸附器整机性能检测装置满足设计技术要求, 需进行包括: 过滤部件、系统管路密封性^[11,12]以及连续运行(≥24 小时)风量变化、露点温度差、湿度调节等功能是否满足标准和性能指标要求。

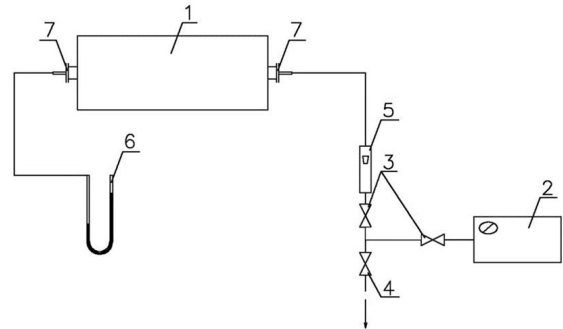
2.1 指标要求

- (1) 关键过滤部件的密封性试验: 各过滤部件箱体泄漏率小于额定工作风量的 0.1%;
- (2) 装置系统管路(除风机)的泄漏率小于额定工作风量的 0.25%;
- (3) 在额定运行风量 1200m³/h、闭式循环连续运行≥24 小时的风量变化小于±10%;
- (4) 闭式循环时, 上下游气流露点温度差 <1.0℃;
- (5) 相对湿度调节要求在环境初始湿度基础上加湿调节 20%以上。

2.2 试验方法

(1) 关键过滤部件的密封性试验
依据 ASME N510-2007 核空气处理系统试验

^[11], 采用恒压法进行试验, 开启压力源向箱体内平稳地充压至试验压力, 并依靠调节阀保持箱体内压力维持在试验压力, 保压十分钟。每隔一分钟记录一次转子流量计的读数, 记录十个读数, 取其平均值, 计算该过滤部件的泄漏率。关键过滤部件主要包括安装于系统的粗中效过滤箱、干燥箱、高效过滤箱、后备过滤箱、I 型碘吸附器安装箱、II 型碘吸附器安装箱等。



1-待测箱体; 2-压缩空气机; 3-流量调节阀; 4-旁通阀;
5-玻璃转子流量计; 6-U 型压力计; 7-盲板

图 6 箱体结构密封性试验示意图

Fig.6 Schematic diagram of sealing test of box structure

(2) 检测装置系统管路(除风机)的密封性试验

整个装置系统(见图 7)安装完成, 关闭待测系统所有箱体的门、操作口及电动阀, 所有永久性的密封都应在试验开始之前安装完毕。采用恒压法进行试验, 开启压力源向箱体内平稳地充压至试验压力, 并依靠调节阀保持箱体内压力维持在试验压力, 保压十分钟。每隔一分钟记录一次转子流量计的读数, 记录十个读数, 取其平均值, 计算系统管路的泄漏率。



图7 装置实物图

Fig.7 Physical drawing of detection device

(3) 风量稳定性试验

在闭式循环工况下，将系统风量设定至额定风量，长时间（≥24 小时）连续运行，记录系统风量

及对应的测试时间。

(4) 碘吸附器安装箱上下游露点温度差试验

在闭式循环工况下，将系统风量设定至额定风量，长时间（≥24 小时）连续运行，记录碘吸附器安装箱上下游露点温度及对应的测试时间。

(5) 相对湿度控制试验

在闭式循环工况下，记录系统内气流的初始相对湿度，将碘吸附器安装箱上游相对湿度设定为初始湿度基础上增加 10%以上，待系统运转平衡后记录上游相对湿度，并一定时间内持续保持其稳定性。

3 结果与分析

3.1 装置的密封性及运行稳定性测试

3.1.1 过滤部件的密封性实验

依据标准 ASME N510-2007 第 6 节，采用恒压法进行实验，测试装置关键过滤部件的泄漏率，结果如表 1 所示。可见，将用于系统固定安装的过滤箱体，平稳地充压到 3000Pa，并依靠调节阀保持箱体内压力维持在 3000Pa±25Pa，保压十分钟，最大允许泄漏率均小于额定工作风量的 0.1%，满足部件的密封性要求。

表 1 过滤部件泄漏率实验结果

Table 1 Experimental results of leakage rate of filter parts

序号	设备名称	额定风量/(m ³ /h)	实验压力/Pa	泄漏率/%
1	粗中效过滤、干燥箱	1200	3000	0.006
2	高效过滤箱	1200	3000	0.0074
3	后备净化箱	1200	3000	0.0074
4	I 型碘吸附器安装箱	1200	3000	0.0074
5	II 型碘吸附器安装箱	567	3000	0.014

3.1.2 系统管路（除风机）泄漏实验

根据 ASME AG-1-2019^[12]TA-A 及 TA-III 篇，采用恒压法进行实验，测试装置系统管路（除风机）的泄漏率，结果如表 2 所示，其泄漏率为 0.053%，

满足标准要求的小于工作风量的 0.25%。系统管路的密封性保障了试验过程中的安全性和测试数据的准确性。

表 2 系统管路泄漏率试验结果

Table 2 Test results of leakage rate of system pipeline

序号	设备名称	额定风量/(m ³ /h)	试验压力/Pa	泄漏率/%
1	系统管路	1200	3000	0.053

3.1.3 风量及露点温度差稳定性实验

循环式碘吸附器整机性能检测装置风量的调节通过设定风机频率来实现，由于不同运行模式下

的系统阻力不同，实测风量随设定频率的变化关系如图8所示。

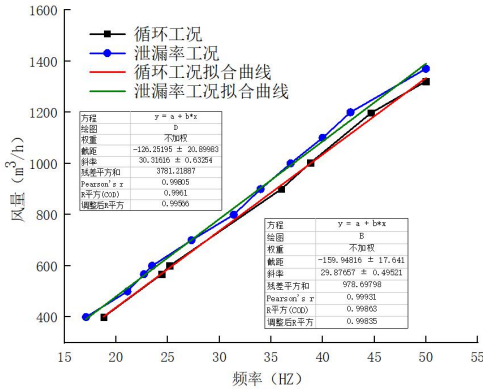


图 8 不同运行模式下实测风量随设定频率的变化关系

Fig.8 Variation of measured air volume with set frequency under different operating modes

试验风量范围从400m³/h到1400m³/h，选取了多个不同风量值进行了装置稳定运行，这其中也涵盖了核电站所用的 I、II 型碘吸附器在现场的实际运行风量。可以看出相同频率时，泄漏率测试工况下装置的运转风量要高于循环工况下的风量10%左右，这与泄漏率测试时气流不经过后备保护床而降低了回路的阻力有关，图8中风量-频率的拟合曲线对装置在使用时的风量设定起到了重要参考作用。

在循环工况下，将系统风量设定为1200m³/h，并测试被测箱体上游气流的初始相对湿度为22.6%，温度为17.5℃。设置上游相对湿度为42.6%，保持系统在循环工况下连续运行不低于24小时，连续记录系统的风量、上下游相对湿度、露点温度差等参数变化，结果如图9所示。

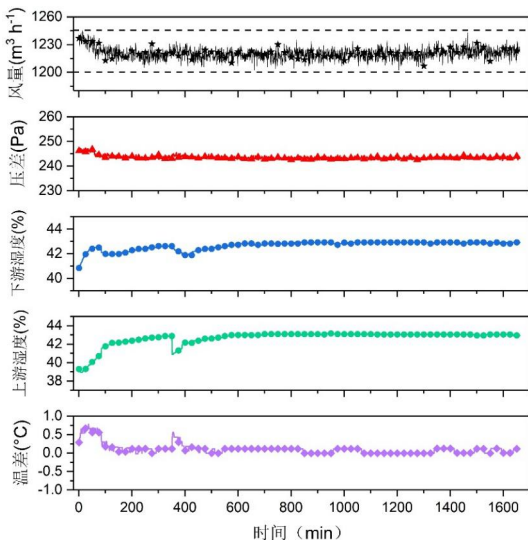


图 9 系统运行参数稳定性测试结果

Fig.9 Stability test results of operating parameters

可见，系统气流参数在连续运行情况下具有非常好的稳定性，连续运行大于24小时，其风量波动范围≤3.75%，远小于<10%的设计要求；全过程露点温度差最大不超过0.75℃，且最大值出现在系统刚达到平衡阶段（100min内），之后的波动范围变小，满足≤1℃要求；相对湿度从初始的22.6%增加20%，逐渐达到设置的42.6%附近，并基本保持了试验周期内的长时间稳定控制。系统气流条件参数的稳定自调控技术提升了实验及设备检测的准确性和安全性。

3.2 装置在碘吸附器性能测试中的应用

以两台折叠式碘吸附器为实验对象，在循环式碘吸附器性能检测系统上进行了氟利昂机械泄漏率试验及去除放射性甲基碘效率（及净化系数）试验。试验方法参照标准“NB/T20196.1-2013核空气和气体处理规范试验规程第1部分：空气处理系统的现场试验”。其中，机械泄漏率<0.01%，去除放射性甲基碘效率>99.9%分别是两种碘吸附器检验方法的合格标准。为保证计算结果准确有效，结合测量仪器的灵敏度，泄漏率试验中上游气流中示踪剂氟利昂的浓度应大于检测仪最低检出限（1PPB）的10000倍，通常上游浓度控制在10~50PPM范围；效率试验时上游活度一般控制在10³~10⁴Bq量级，而下游浓度/活度的下限是由不同仪器的探测限决定，上限取决于碘吸附器性能的好坏，即吸附示踪气体的情况。

试验时将一台碘吸附器样机装于样品安装箱中，注入、上下游采样探头安装到位，启动风机，调节系统风量至额定风量（1200m³/h）±10%范围，待平衡后，测量气流风量、相对湿度、温度以及碘吸附器阻力等参数，均满足试验规程要求后，首先进行碘吸附器机械泄漏率试验，此项试验结束后，风机持续运行，系统保持不变，更换注入、采样装置后重新测量系统参数，满足要求后进行效率试验，一台碘吸附器的两项试验结束后更换另一台碘吸附器进行如上试验。结果如表 3 和表 4 所示。

表 3 折叠式碘吸附器机械泄漏率试验结果

Table 3 Mechanical leakage rate test results of iodine adsorber

编号	系统风量/(m ³ /h)	阻力/Pa	温度/°C	湿度/%	上游浓度/ppm	下游浓度/ppb	泄漏率/%
1910-01	1245	253	21.6	30.5	35.5	1	0.003
1910-02	1248	250	21.3	31.2	38.7	1	0.002

表 4 折叠式碘吸附器效率试验结果

Table 4 Efficiency test results of iodine adsorber

编号	系统风量/(m ³ /h)	阻力/Pa	温度/°C	湿度/%	上游活度 ^a /Bq	下游活度 ^b /Bq	净化系数	效率/%
1910-01	1250	256	21.1	30.8	9725	0.95	10291	99.99
1910-02	1252	252	20.9	31.0	5865	0.31	18919	99.99

注：a, b均已扣除了本底活度。

从各试验结果可以看出，研制的循环式碘吸附器性能检测装置各参数均运行稳定，两台被测碘吸附器在两种工况下的机械泄漏率、净化系数的结果对照发现，编号1910-02的碘吸附器在密封性能（机械泄漏率）和净化性能（净化系数）上均略优于编号1910-01的碘吸附器，同一台碘吸附器采用不同标准试验方法得到的结果均具有一致性和稳定性，可以准确测试待测碘吸附器的性能。

4 结论

以实现闭式循环、运行条件的稳定调控以及提升检测效率和运行安全为研发目标，研制出基于气流循环运行的碘吸附器性能检测系统装置，用于碘吸附器泄漏率、效率性能的检测。该装置不仅可涵盖核电站所用的多种碘吸附器类型，且气流参数调节控制精度高、多项性能指标测试优于设计值，可实现运行风量400-1400m³/h范围可调节控制，循环工况下连续运行24h风量变化小于3.75%，上下游露点温度差最大不超过0.75°C，相对湿度调控稳定，提升了产品检测的准确性和安全性。在开放工况和循环工况下分别进行机械泄漏率和吸附放射性甲基碘效率试验，装置运行稳定性高，结果具有一致性。

参考文献：

[1] 张性旦.核通风与空气净化[M].北京:原子能出版社, 1993:22-47.
 [2] Emma A, Diana B, Mark R S. Affinity of charcoals for different forms of radioactive organic iodine[J]. Nuclear

Engineering and Design, 2018,328:228-240.
 [3] Zhou J, Hao S, Gao L, et al. Study on adsorption performance of coal based activated carbon to radioactive iodine and stable iodine[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014,72:237-241.
 [4] NB/T20039.11-2011,核空气和气体处理规范 通风、空调与空气净化第 11 部分:碘吸附器 (I型) [S].北京:原子能出版社,2011.
 [5] NB/T20039.12-2011,核空气和气体处理规范 通风、空调与空气净化第 12 部分:碘吸附器 (II型) [S].北京:原子能出版社,2011.
 [6] NB/T 20196.1-2013,核空气和气体处理规范试验规程 第 1 部分空气处理系统的现场试验[S].北京:原子能出版社,2013.
 [7] 王贞涛,董庆铭,王军锋,等.荷电喷雾技术在除尘与空气净化调节中的应用[J].环境工程,2014,32(2):72-76.
 [8] 唐怡然,郭勇,伍勇,等.吸附床在封闭气流循环中的除湿传质动力学研究[J].化学工业与工程技术,2010, 31(3):20-23.
 [9] 卓红艳,刘志强,彭文,等.一种气流净化循环控制系统设计与实现[J].工业控制计算机,2018,31(8):71-72.
 [10] 张立强,马春元,宋占龙,齐国杰.集成内循环烟气流化床脱硫塔内流动特性[J].环境工程,2010,28(2):83-86.
 [11] The American Society of Mechanical Engineers. ASME N510-2007 Testing of Nuclear Air Treatment Systems[S]. Philadelphia, PA: ASTM International, 2007.
 [12] The American Society of Mechanical Engineers. ASME AG-1-2019 Code on Nuclear Air and Gas Treatment[S]. New York: ASTM International, 2019.