

一台氪-85探测器的性能测试

孙雨豪 徐旭涛

中国原子能科学研究院 北京 102413

摘要：对新型⁸⁵Kr自动分析仪中的PIPS探测器进行性能测试，测试结果表明，该设备探测限为28.55Bq/m³，该设备性能满足《核电厂流出物放射性监测技术规范（试行）》（国核安发{2020}44号）文中对于⁸⁵Kr测量的探测限小于10² Bq/m³的要求，该设备中的PIPS探测器对⁸⁵Kr的探测效率可达到21.5%，其本底计数率低至0.0875cps。

关键词：⁸⁵Kr测量；PIPS探测器；⁸⁵Kr自动分析仪；惰性气体监测；性能测试

引言：氪-85（⁸⁵Kr）是一种人工放射性核素，半衰期为10.756年。其衰变时放出最大能量为687千电子伏特的β射线，分支比为99.57%^[1]。自然界中铀的自发裂变所产生少量的⁸⁵Kr通常忽略不计，大气中自然存在的⁸⁵Kr平衡稳定含量约为0.09PBq^[2]。大气中的⁸⁵Kr主要由乏燃料后处理厂与铀的生产所产生，后处理厂所排放的⁸⁵Kr几乎全部以气体流出物的形式排放，业态流出物中的含量可以忽略不计，其所释放的活度由流出物的处理方式、后处理燃料的类型、辐照历史和冷却时间等因素所决定，每吨乏燃料产生约130-1800TBq的⁸⁵Kr和6-10千克的铀，一千克铀的后处理过程产生约10-35TBq的⁸⁵Kr^[3]。核武器实验与核事故对总量的贡献较小，截止至1973年，大气中约2%的⁸⁵Kr来自核武器实验，约111-185PBq，核事故例如切尔诺贝利核事故释放了约35PBq的⁸⁵Kr^[4]。

我国新发布的技术规范：《核电厂流出物放射性监测技术规范（试行）》（国核安发{2020}44号），其中明确规定了⁸⁵Kr测量的探测限为10² Bq/m³。当前市场上目前现有的在线辐射监测设备的探测下限远高于规定中提出的探测限要求（10⁴~10⁵ Bq/m³），测量设备较高的探测下限可能是我国核电厂排放量数据偏高的原因之一^[5]。当前测试方式仅在核电厂废气处理系统和安全壳内大气监测系统约定排放时可监测到⁸⁵Kr，而辅助厂房通风系统连续排放的⁸⁵Kr含量通常低于测量设备的探测下线，无法准确定量分析。由于当前⁸⁵Kr测量设备的探测下限不满足新法规的要求，因此使用新的⁸⁵Kr分析仪用于流出物样品处理、测量和定量分析是十分必要的。

纯化离子注入平面硅型PIPS半导体探测器的晶体表面采用了离子注入纯化技术，对β粒子响应好，受环境γ影响小，是当前低本底β活度分析的发展方向之一^[6]。

作者简介：孙雨豪，1994年8月10日，男，汉族，北京，硕士研究生，中国原子能科学研究院，无职称，研究方向为辐射安全与环境保护。

1 自动分析仪与其探测器简介

新型自动分析仪通过活性炭低温吸附、除杂和富集的方法，将流出物样品制样，制样后通过氦气载带转移至分析仪样品室中进行测量，测量完成后通过设备触摸屏记录数据，对结果进行分析。该设备样品制样时间约为3小时。

该设备的分析仪为一款低本底的⁸⁵Kr活度测量仪器，样品室采用纯化离子注入型硅面结探测器（PIPS）作为探测器，探测器外使用不小于100mm厚的老铅作为屏蔽层。在环境γ剂量率为100nSv/h的情况下，设备本底计数率不超过0.5cps。

分析仪进气口连接质量流量计（量程0~2SCCM,误差1%），质量流量计可单向密封气体，探测器排气口使用316不锈钢三通卡套分别连接排气电磁阀和真空泵及其电磁阀。分析仪的结构图如图1所示。



图1 分析仪外观

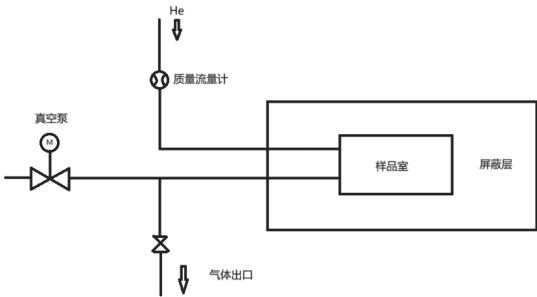


图2 分析仪结构图示

2 探测器性能测试

探测器性能测试主要围绕本底计数率测试和探测器对⁸⁵Kr探测效率测试,以及探测器管路气密性、和探测器清扫测试。

2.1 探测器气密性测试

探测器管路工作压力为50kPa左右。使用高纯氦气充满分析仪样品室和周围气路,连接电子压力计。充氦气后压力为0.143MPa,八小时后观察压力计读数,此时压力值为0.120MPa,压力下降值为0.023MPa,分析仪气密性达标。如图3所示。



图3 气路气密性测试照片

2.2 探测器本底测试

使用高纯氦气(纯度99.999%)对探测器样品室进行吹扫后封闭,在设备触摸屏上设置单次测量时间为3600秒,重复测试次数为11次,点击测试按钮。测试结果如表1所示。

表1 探测器本底测试结果

序号	本底计数率(cps)
1	0.078
2	0.079
3	0.081
4	0.085
5	0.084
6	0.094
7	0.093
8	0.096
9	0.090
10	0.093
11	0.090

分析仪内探测器平均本底计数率为0.0875cps,探测器实际工作本底计数率远低于设计指标(0.5cps)。

2.3 探测器对⁸⁵Kr的探测效率测试

分装⁸⁵Kr标准气体至定量环中,标准气体活度浓度为8Bq/mL,定量环为体积3.14mL,定量环内压力0.12MPa,环内⁸⁵Kr标气活度约30.14Bq,连接至探测器

排放口,打开定量环阀门,使用氦气载带标气进入探测器,载带的氦气体积为21.08mL。通过管路内气体压力和管路体积计算此时探测器内⁸⁵Kr标气活度浓度约为0.6768Bq/mL。

设置单次测量时间60秒,测量11次,测得平均计数率为1.913cps。测量结果如表2所示。

表2 探测效率测试结果

序号	计数率(cps)
1	1.767
2	1.617
3	2.233
4	1.767
5	2.083
6	1.967
7	1.950
8	1.833
9	1.750
10	2.283
11	1.800

探测器的探测效率 E 可以用公式1计算。

$$E = \frac{R_s - R_b}{V \times A_c} \tag{1}$$

其中 R_s 为样品平均计数率,单位为cps; R_b 为本底平均计数率,单位为cps; V 为探测器样品室体积,单位为mL; A_c 为样品室内被氦气稀释后的标气浓度,单位为Bq/mL。根据计算可以测得探测器效率约为21.5%。

2.4 探测器清扫时间测试

在完成探测器探测效率测试后,设定氦气流量为2SCCM,打开探测器排空阀门进行清扫。通气11分钟,使用真空泵抽空1分钟后,平均计数率降低至最小值0.133cps;静置15分钟后测量,平均计数率升高至0.185cps;继续通入氦气5分钟,使用真空泵抽空1分钟后,平均计数率降低至0.092cps;静置15分钟后,平均计数率升高至0.125cps;继续通入氦气5分钟,使用真空泵抽空1分钟后,平均计数率降低至0.119cps。

探测器在通完⁸⁵Kr标气后,无法通过氦气完全清扫干净探测器,探测器本底计数有略微升高,可能由于设备在设计时,探测器出口位置高于样品室,同时气体管路中存在L型弯折,由于氦气的密度较大,清扫时氦气容易附着在L型管路上^[7],导致氦气载带氦气时氦附着在L型管路的内侧,最终在通气结束后回流至样品室内。

3 自动分析仪的探测限计算

探测限MDC可以用公式2进行计算。

$$MDC = \frac{4.65 \times \sqrt{R_b \div t_b}}{60 \times \varepsilon \times V \times \varphi} \quad (2)$$

其中MDC为探测限,单位为Bq/m³; R_b 为本底计数率,单位为cpm; t_b 为本地测量时间,单位为min; ε 为探测效率; φ 为回收率; V 为待测样品标况体积,单位为m³。

在测量时间为3600s的情况下,设备本底平均计数率为0.0875cps,设备的探测效率为21.5%,待测样品标况体积为3L,通过前期测试计算得出设备化学回收率为88%,通过公式2计算得出设备的探测限为28.55Bq/m³

结束语

新型⁸⁵Kr自动分析仪的探测限为28.55Bq/m³,该设备性能满足《核电厂流出物放射性监测技术规范(试行)》(国核安发{2020}44号)文中对于⁸⁵Kr测量的探测限小于10² Bq/m³的要求,该设备中的PIPS探测器对⁸⁵Kr的探测效率可达到21.5%,其本底计数率低至0.0875cps。

参考文献

[1]黄颜君,郭贵银,张兵,陶云良,沙向东,陈超峰,上官志宏,核电厂排放的⁸⁵Kr的分析方法及剂量评估[J].辐射防护,2017,37(1):73-79.

[2]Schroter K.J.P., Roether W., The release of krypton-85 and tritium to the environment and tritium to krypton-85 ratios as source indicators[J]. Isotope ratios as pollutant source and behavior indicators, 1975.

[3]Kalinowski, M.B., Measurements and modeling of atmospheric krypton-85 as indicator for plutonium separation[J]. International Workshop on the Status of Measurement Techniques for the Identification of Nuclear Signatures,1997.

[4]Kalinowski, M.B.; Sartorius, H.; Uhl, S.; Weiss, W. Conclusions on plutonium separation from atmospheric krypton-85 measured at various distances from the Karlsruhe reprocessing plant[R], 2004,73(2):203-222.

[5]袁之伦,李宏宇,唐丽丽,韩善彪,喻正伟,我国核电厂气态流出物中惰性气体监测现状[J].同位素,2013,26(4):244-248.

[6]陈五星,安然,万新峰.低本底 α 、 β 测量技术发展现状[J].中国辐射卫生,2016,25(4):509-512.

[7]李捷,赵晓隆,长输气管道应力及内部附着物分布情况仿真计算[J].机械研究与应用,2023184(2):64-6