

文章编号: 1007-4627(2021)02-0175-07

氮气低温除氦技术与极低水平氦测量方法研究

安广朋^{1,2}

(1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

摘要: 高纯低本底氮气在低本底实验中有重要作用, 对氮气的放射性氦本底纯化技术和低本底氦测量方法进行的研究非常重要。利用低温物理吸附技术, 对氮气中的氦进行纯化, 同时建立了静电收集结合低温富集法的氦测量装置, 能够测量氮气中 $10 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ 的氦本底。利用氦测量装置测量了普通氮气中和纯化氮气中的氦, 结果表明, 纯化系统可以将氦本底为 $20 \text{mBq}/\text{m}^3$ 的氮气降低至 $(25.2 \pm 5) \mu\text{Bq}/\text{m}^3$, 即可将氦本底降低到纯化前的 0.125%。研究还发现, 纯化能力与氮气中氦本底相关, 在氮气中氦本底为几十 mBq/m^3 到几十 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ 范围内, 随着氦本底的下降, 纯化能力也随之下降。主要原因是, 随着氮气中氦的分压降低, 吸附能力下降。另外, 在极低本底下由系统本底及泄露引入的氦污染影响显著增大。

关键词: 低温吸附; 活性炭; 氦测量; 静电收集; 氦富集

中图分类号: TL81

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.38.2020063

1 引言

近年来, 国内外开展了一系列低本底实验, 如暗物质寻找、中微子实验、无中微子双贝塔衰变等^[1-5]。通常这些实验的探测器规模都较大, 如江门中微子实验^[5], 中心探测器主要由 2 万 t 液体闪烁体构成, 位于地下 700 m 处。这些低本底实验的要求是探测器材料和环境有极低的放射性本底, 宇宙射线、天然放射性核素、氦及其子体是低本底实验主要的本底来源。其中气体氦渗透能力较强, 且衰变出的放射性子体会逐渐沉积在探测器表面或材料中, 难以移除。因此降低氦本底水平, 是低本底实验的重要环节。低本底氮气在低本底实验中应用广泛, 在液氦、液氩探测器及液体闪烁体等探测器制备及运行中, 常用低本底氮气对探测器材料中的氦、氡、氩等放射性气体杂质进行剥离去除, 以降低材料中氦等放射性气体杂质含量。另外为减小宇宙射线影响, 低本底实验探测器大多都位于地下, 所处环境的放射性氦本底较高^[6], 实验运行时常用到低本底氮气以流气的方式对探测器进行覆盖保护。

近年来, 中国科学院高能物理研究所在大亚湾中微子实验基础上, 开展了江门中微子实验站建设工作, 目标是测定中微子质量顺序及精确测量中微子混合参数等,

实验要求氮气中氦本底低于 $10 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (太阳中微子实验)^[5]。普通的液氮蒸发氮气, 氦含量在几十到几百 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ ^[7], 不能满足实验要求。一般厂家很难提供所需要的低本底的氮气和测量手段, 因此有必要对氮气的纯化技术和本底测量方法进行研究。国内外的低本底实验室也对除氦技术和测量进行了相关研究^[1-3], 实验室空气中的氦浓度可以采用通风及活性炭常温吸附技术降低。GERDA(德国), Borexino(意大利), SNO+(加拿大)和 Super-Kamiokande(日本)等实验^[2-3,7-8], 采用低温活性炭吸附技术来获得低氦本底的氮、氩等气体, 如 Borexino 的低温吸附装置可以将氮气中的氦降到 $0.5 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ 以下。对于极低水平氦的测量, 常采用闪烁室、静电收集半导体谱仪、液体闪烁体及低本底正比计数管等方法进行测量^[9], Borexino 采用探测限为 $30 \mu\text{Bq}$ 的低本底正比计数管^[8], 结合低温富集方法, 对氦探测限达到了 $0.3 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ 。基于江门中微子实验的需求, 我们进行了低本底氮气纯化验证实验, 建立了低温活性炭吸附验证纯化装置以及基于静电收集半导体谱仪和低温富集结合的低本底氦测量装置。本文主要针对氮气纯化验证实验进行论述, 对低温纯化及氦测量实验进行介绍, 并给出相应的实验结果, 为开展其他低本底实验、低本底气体获得及测量提供借鉴和实验基础。

收稿日期: 2020-09-01; 修改日期: 2020-09-25

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA10010500)

作者简介: 安广朋(1974-), 男, 内蒙古开鲁县人, 副研究员, 博士, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: agp_74@163.com。

2 低温吸附纯化

2.1 低温吸附纯化原理

氮气的纯化主要是去除其中的杂质气体(氧、氩、氦、氙等),常采用低温纯化方法,包括低温冷凝纯化、低温吸附纯化两种方法。低温冷凝纯化是利用不同气体的熔点和沸点,通过降温加压后,实现不同组分的分离与提纯,一般用于工业大规模生产。本实验采用低温吸附纯化方法,采用活性炭作为吸附剂对杂质进行吸附。活性炭表面具有无数细小孔隙,微孔直径大多在2~50nm之间,活性炭的吸附能力与活性炭的孔隙大小和结构有关,即与孔径、孔容和比表面积等相关。

经液氮预冷后,实际经过活性炭的氮为气液混合相,吸附过程可用亨利定律描述,如式(1)所示:

$$n = Hp, \tag{1}$$

其中: H 为亨利常数 [$\text{mol}/(\text{kg}\cdot\text{Pa})$]; n 为吸附摩尔分数 (mol/kg); p 为气体的分压 (Pa); 亨利常数越大吸附能力越强,对柱状活性炭吸附床,亨利常数如式(2)所示^[8]:

$$H \left[\frac{\text{mol}}{\text{kg}\cdot\text{Pa}} \right] = \exp \left\{ \left(-0.05 + \frac{81}{T[\text{K}]} \right) \cdot \frac{T_c[\text{K}]}{\sqrt{p_c[\text{Pa}]}} \times 10^{-5} - 17.5 \right\}, \tag{2}$$

其中: T 为绝对温度; T_c 和 p_c 为凝结温度和压力; 参考 Grzegorz Zuzel 在 IDEA(2005)会议报告^[8],液氮温度下氮的 H 为 $10^{14} \text{mol}/(\text{kg}\cdot\text{Pa})@77\text{K}$,由式(2)可得到 H 随温度变化曲线如图1所示。液氮温度下 H 比常温大15个量级,即液氮温度下吸附效果要远好于常温。

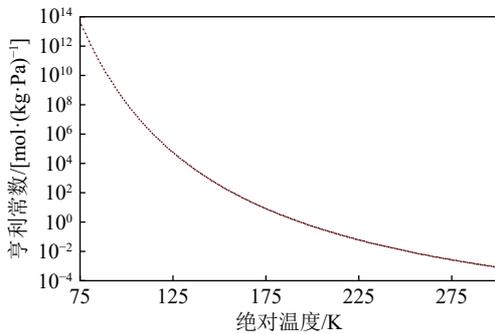


图 1 (在线彩图) 亨利常数随温度变化曲线

2.2 低温纯化实验装置

由图1可以看出,在压力一定情况下,活性炭吸附能力与温度相关,温度越低,吸附能力越强,因此我们采用液氮温区(77.4 K)的活性炭,对氮气进行纯化。纯化实验装置主要包括回热器、活性炭吸附柱、液氮杜瓦、

管路及控制阀等,结构如图2所示。回热器为无氧铜材料的翅片式逆流换热器,通过流入流出氮气的热交换,对流入氮气进行预冷,减少液氮消耗。氮气经过回热器预冷后,进入浸泡在液氮中的活性炭吸附柱中,活性炭吸附柱采用两级串联,增加吸附长度,以提高吸附效率。当活性炭吸附接近饱和时(由氦测量系统监测),由加热器对活性炭加热再生。为减少本底及泄露污染,所有与氮气接触管路均采用污染较小的316L不锈钢材料,管路及法兰连接均采用金属密封圈密封。纯化实验提供的低本底氮气,主要用于液体闪烁体气体剥离实验,根据气体剥离实验需求,氮气纯化装置能够提供的最大氮气流量为 $50 \text{Nm}^3/\text{h}$ 。

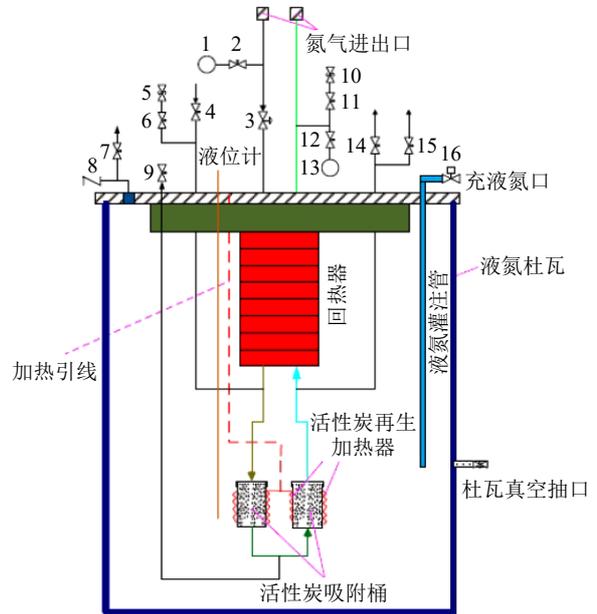


图 2 (在线彩图) 低温纯化实验装置示意图

活性炭选择 CarboAct 牌号的合成超纯活性炭^[10],因为该活性炭本底水平仅为 $(0.3\pm 0.1) \text{mBq}/\text{kg}$,远低于其他的活性炭^[7]。放射性铀、钍、钾的水平也较低^[7]。原料氮气质量能级控制在 5N9,即纯度为 99.999%,杂质含量为 10^{-5} ,氦活度在 $100 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ 左右,相当于氦含量为 10^{-24} 。低温吸附是对所有杂质多组分的吸附,为多组份动态竞争吸附过程,且活性炭对氦的吸附能力要比其他杂质高^[8]。如果要将氦降到 $10 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ 以下,相当于降低近两个量级,这里按对杂质含量为 10^{-7} 的有效杂质吸附计算,纯化实验装置工作周期为 240h,采用近似估算,取活性炭静态吸附容量^[11]为: 31kg (温区 77.4K),活性炭用量计算公式为: $(\text{流速}\times\text{时间}\times\text{杂质含量})/\text{吸附容量}$,则活性炭最小用量为: $(50 \text{m}^3/\text{h}\times 240 \text{h}\times 0.1\times 10^{-6})/(3\times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg})=0.4 \text{kg}$ 。

实验纯化装置活性炭实际用量为 1kg,与 Borexino

实验的氮气纯化装置^[7-8,12] 比对用量相符，在 100Nm³/h 流量下，Borexino 实验活性炭用量为 2kg。对活性炭氦析出的影响考虑如下，由文献 [7] 给出的 CarboAct 活性炭氦析出率为 0.3mBq/kg(加热后净析出率)，在 77K 时，CarboAct 活性炭对 ²²²Rn 吸附系数为 $(2.4\pm 1.5)\times 10^7$ ，这里吸附系数指分配系数，是吸附于固定相中的氦原子含量与游离于流动相中的氦原子含量的比值^[7]，为无量纲值。在流速为 50Nm³/h 时，由 1kg 活性炭带入氮气中的氦为：(活性炭氦析出率×时间)/(流量×液氮温区氦分配系数)，即 $(0.3\text{mBq}\times 3600)/(50\text{m}^3\times 2.4\times 10^7)=9\times 10^{-7}\text{mBq}/\text{m}^3$ ，即低温下活性炭氦析出要远低于本工作设定的氦本底目标值，10μBq/m³。

3 氦测量

3.1 氦测量实验装置

²²²Rn 衰变链中三个子体 ²¹⁸Po，²¹⁴Po 和 ²¹⁰Po 均带正电荷，²¹⁰Po 半衰期长，相对数少，忽略其影响，²¹⁴Po、²¹⁸Po 释放的 α 粒子能量分别为 7.83 和 6.11 MeV，通过静电场将氦衰变的钋核收集到半导体探测器表面，测量这些钋核 α 粒子的能量可以区分 ²¹⁸Po 和 ²¹⁴Po^[13-15]。静电收集测氦室结构如图 3 所示，室体积为 0.279m³，材料为 316L 不锈钢，所有法兰均采用金属密封，测量

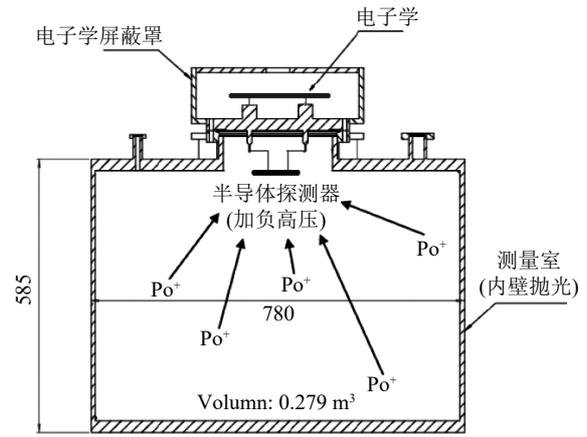


图 3 静电收集测氦室结构

室内表面做电抛光处理。

半导体探测器加相对外壳(地电位)的负高压，这样带正电的钋核在电场作用下漂移并被收集到探测器表面后，钋核释放的 α 粒子可以用半导体探测器测量。测量电子学线路如图 4 所示，负高压通过分压电阻链加到探测器上，同时提供探测器反向偏压，探测器信号经电荷前放、主放放大，由多道分析仪获取 α 粒子能量谱。半导体探测器采用 Hamamatsu 的硅 PIN 型探测器 (S3204-09)，有效探测面积 18mm×18mm，电荷前放为 BESIII 的低噪声电荷灵敏前放，主放大器为 ORTEC 的 572A，多道为 CAEN 的 N957。

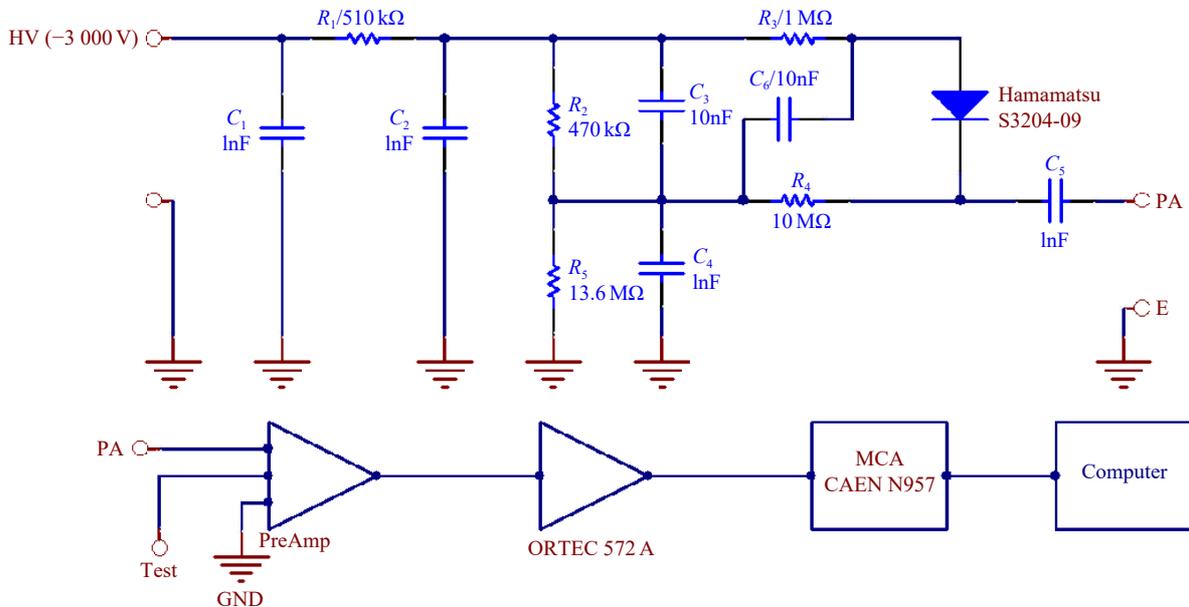


图 4 (在线彩图) 测量电子学线路

图 5 为测量空气中的氦得到的典型的 α 粒子能量谱。图中明显的两个峰为 ²¹⁸Po 和 ²¹⁴Po，²²⁰Rn 衰变链中的子体 ²¹²Po 计数较少(箭头所指处)，靠近零道处为本底噪声。这里采用 ²¹⁴Po 峰计算氦活度，因为 ²¹⁴Po 的 α

能量区域与其他 α 粒子没有重叠，谱峰附近本底较低，另外 ²¹⁴Po 有较高的收集效率，因为 ²¹⁴Po 为 ²¹⁸Po 的子体，而 ²¹⁸Po 首先漂移到探测器表面或探测器附近，²¹⁸Po 在漂移过程中有衰变损失，且子体为 ²¹⁴Po。氦

活度计算如式 (3) 所示:

$$A = 2N / (0.279 \cdot \eta \cdot t), \quad (3)$$

其中: A 为氦活度浓度 (Bq/m^3); N 为 ^{214}Po 的计数; 0.279 为测量室体积 (m^3); t 为时间 (s); η 为收集效率 (%), 乘因子 2 是因为只有向上 2π 立体角出射的 α 粒子才能被探测器接收到。

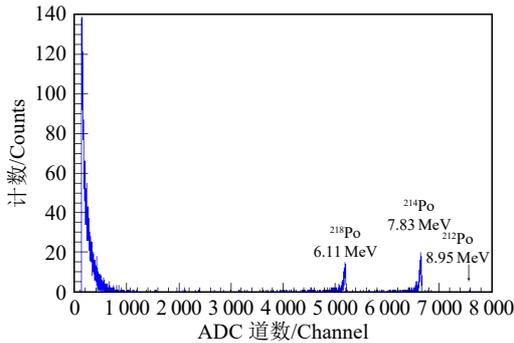


图 5 (在线彩图) 测量空气中氦得到的典型 α 能谱图

3.2 氦子体收集效率

测量室对氦子体的收集效率会随高压变化, 由于没有标准仪器或标准氦室, 为确定氦测量系统工作高压及氦子体收集效率, 利用 RAD7 氦测量仪^[16] 作为测量比对仪器, 与氦测量系统测量同一个气源, 将 RAD7 测量结果作为标准, 计算氦测量系统的收集效率。图 6 为测量加载氦的氮气得到的效率曲线。图 6 中高压端效率下降原因是在高电压下电晕放电噪声变大, 使电子学阻塞, 从而数据获取效率降低。低水平氦实验测量时间比较长, 仪器的稳定性非常重要, 为避免放电损坏探测器或电子学, 保证数据的完整性, 实际选取工作高压为 3 kV, 这时收集效率为 71%。

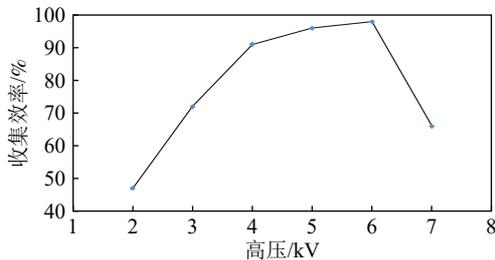


图 6 收集效率-高压曲线

3.3 氦测量系统本底

对系统本底测量, 标准做法是对系统抽真空测本底, 但由于探测器在低真空下容易高压放电, 所以采用另外两种方法对系统进行了实验。一种是直接测量纯度较高的液氮蒸发氮气, 在严格控制污染和漏率情况下, 蒸发氮气氦本底为 $\mu Bq/m^3$ 量级^[7], 而氦测量系统本底在

mBq/m^3 量级 (见本节及 4.1 节), 所以可以将氦本底比较低的蒸发氮气作为空白样, 充入氦测量室, 通过测量蒸发氮气, 代替抽真空的方法来确定系统氦本底, 测量结果如图 7 所示。另一种方法是加载少量氦到氮气中, 测量氦衰变曲线, 设 A_0 为氦加载氮气的氦活度, 氦活度服从指数衰减规律 $A = A_0 \exp(-0.18145t) + B_0$, B_0 为探测系统本底, 拟合氦衰变曲线可以得到 B_0 值, 图 8 为加载氦氮气测量结果。实验时数据获取软件每 20 分钟自动保存一个数据文件, 数据处理时按一天的累计为一个数据点, 由于计数率低, 这里只考虑统计误差。

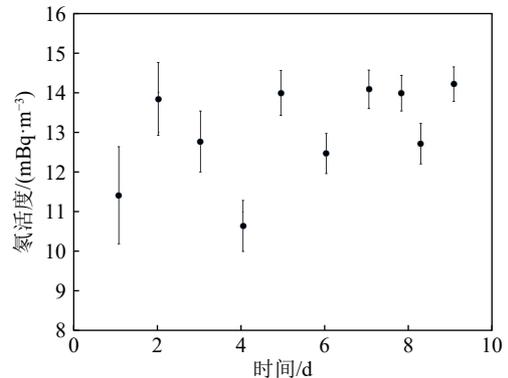


图 7 直接测量高纯氮气

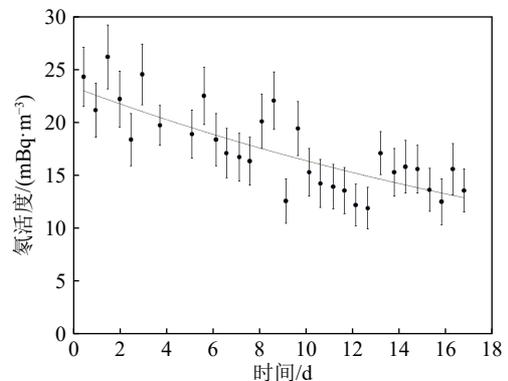


图 8 氮气加载氦衰变曲线

第一种方法通过充入高纯氮气测得系统的氦本底为 $(13.02 \pm 0.65) mBq/m^3$, 第二种拟合氦衰变曲线得到的测量系统的本底为 $(13.23 \pm 0.68) mBq/m^3$, 两种方法自洽。

3.4 氮气中氦富集

经纯化后的氮气中氦本底在 $\mu Bq/m^3$ 的量级, 而氦测量装置能达到的判断限在 mBq/m^3 量级 (测量 1 d, 见 4.1 节), 因此需结合氦富集装置来提高灵敏度。氦富集过程实质为增加取样体积, 富集原理类似纯化系统, 利用低温下活性炭对一定体积氮气中的氦进行吸附, 然后将活性炭加热到 $150\text{ }^\circ\text{C}$ ^[10], 将吸附的氦解析出来,

再由高纯氮气作为载气，将解析出的氦转移到氦测量系统进行测量。氦富集系统结构如图 9 所示，主要由过滤

器、质量流量计、液氮杜瓦、活性炭阱 (内装 100g CarboAct 超纯活性炭) 构成。

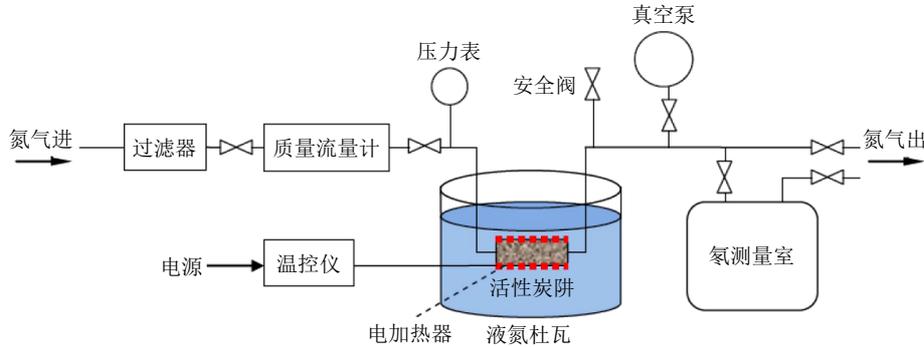


图 9 (在线彩图) 氦富集系统结构

为确定氦的富集效率，实验通过测量氦源加载氮气，比较测量经过富集系统和未富集氮气的氦活度，得到在流速为 25 L/min(sLm) 时富集效率为 51%。由于富集过程包含低温吸附、加热脱附、载气转移三个过程，所以效率不高。

系统测量时间 1 d 时的判断限为 1.05 mBq/m³。

4 氮气纯化前后氦本底测量

要实现 10 μBq/m³ 的氦活度测量，须考虑富集和氦测量两个过程。这里以富集时间一小时为单位，考虑到衰变修正后，第 n 小时富集系统富集的氦如下式所示：

4.1 测量系统本底的降低及富集时间计算

$$A_n = A_{n-1} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{24 \cdot 3.82}} + (1.5 \cdot 0.51 \cdot A_e) / 0.279, \quad (5)$$

实验目标是实现 10 μBq/m³ 的氦活度测量，前面得到系统本底为 (13.23±0.68) mBq/m³，相对较高，为实现 10 μBq/m³ 的氦活度测量，通过对测量系统清洁，高温烘烤，真空除气后，本底有很大的改善，主要原因是材料表面及安装缝隙中的污染以及吸附氦的影响。处理后本底测量结果如图 10 所示，本底降到了 (2.2±0.64) mBq/m³，采用下式^[14] 计算测量系统判断限：

这里 A_e 是期望达到的氦本底结果，即 10 μBq/m³； A_n 是当前的氦活度； A_{n-1} 为前一小时的氦活度；1.5(N/m³) 为富集流速；0.51 为富集效率；0.279(m³) 为氦测量室体积。经变换后，得到 A_n 为

$$L_c [\text{mBq/m}^3] = \frac{1.64\sigma_{BG} [\text{counts/d}]}{C_f [(\text{counts/d}) / (\text{mBq/m}^3)]}. \quad (4)$$

$$A_n = \frac{1.5 \cdot 0.51 \cdot A_e}{(1 - 0.99247) \cdot 0.279} \cdot (1 - 0.99247^{n-1}), \quad (6)$$

这里 L_c 为判断限， σ_{BG} 为本底计数标准偏差，1.64 为 90% 置信度水平系数， $C_f[(\text{counts/d})/(\text{mBq/m}^3)]$ 为测量系统测量 mBq/m³ 的计数 (每天) 期望值，实验本底计数为 (18.83±5.49) counts/d，这样由 (4) 式得到测量

氦测量系统本底为 (2.2±0.64) mBq/m³，测量 1 d，置信度水平 90%，富集增加氦活度至少为 1.05 mBq/m³ 计算，要测量低本底氮气氦活度 A_e 取 10 μBq/m³，由 (6) 式得到，最低富集时间为 1.93 d。

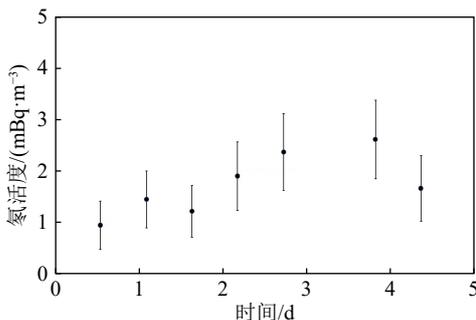


图 10 烘烤去气后氦测量室本底

4.2 纯化前后氮气中氦测量

为确定纯化系统的纯化效果，测量了纯化前的氮气和纯化后高纯氮气中的氦活度，测得纯化前氮气的氦本底为 (20.51±0.88) mBq/m³，这里氮气取自氦本底比较大的液氮罐。测量数据如图 11(a) 所示。对于纯化后的高纯氮气，经过富集后的氦本底计算公式如式 (7) 所示：

$$A_e = V_{ch} A / \eta_e \cdot V. \quad (7)$$

这里富集流速为 25 sLm， A_e 为所要测量未经富集的氦活度， V_{ch} 为氦测量室体积， A 为氦测量系统得到的测量值， η_e (51%) 为富集效率， V 为富集取样体积。实验富集了 36.4 m³ 的高纯氮气，由式 (6) 得到纯化后的高纯氮气氦本底为 (25.2±5) μBq/m³，见图 11(b)。比较纯化前和纯化后氮气的氦本底水平，可以认为低温吸附纯

化系统对氦本底为 20mBq/m^3 的氮气，可以将氦本底降低 0.125% 。

为研究纯化能力与氮气本底的关系，在气源采用高纯度氮气的情况下，对纯度比较高的氮气进行纯化实验。图 12 为高纯氮气纯化结果，图 12(a) 为纯化前氦本底，富集体积 34.6m^3 ，图 12(b) 为纯化后氦本底，富集体积 105.2m^3 ，富集流速均为 25sLm ，得到纯化前氦本底 $60\mu\text{Bq/m}^3$ ，纯化后 $20\mu\text{Bq/m}^3$ ，这里仅将氦本底降低到纯化前的三分之一左右，即纯化能力与气源的氦本底相关，对氦本底较低的氮气纯化能力下降。因为吸附脱附是一个竞争过程，对本底非常低的高纯氮，氮气中

氦的分压降低，由式 (1) 可知，氦吸附能力下降。目前纯化装置可以将氦本底降至 $20\mu\text{Bq/m}^3$ 左右，这里主要是受活性炭性能及系统本底的限制，在利用氦测量装置测量纯化氮气时，纯化装置已提前做好并工作一段时间，期间对活性炭进行过多次再生，由活性炭厂家^[10]给出资料，每次活性炭再生后，吸附能力会下降 10% 左右。同时活性炭及纯化装置在使用过程中污染增加，造成本底增大，系统纯化极限增大。如定期清洁管路并更换吸附性能下降的活性炭，进一步降低纯化系统本底和漏率，纯化氮气的氦本底可以控制在 $10\mu\text{Bq/m}^3$ 以下，能够满足实验需求。

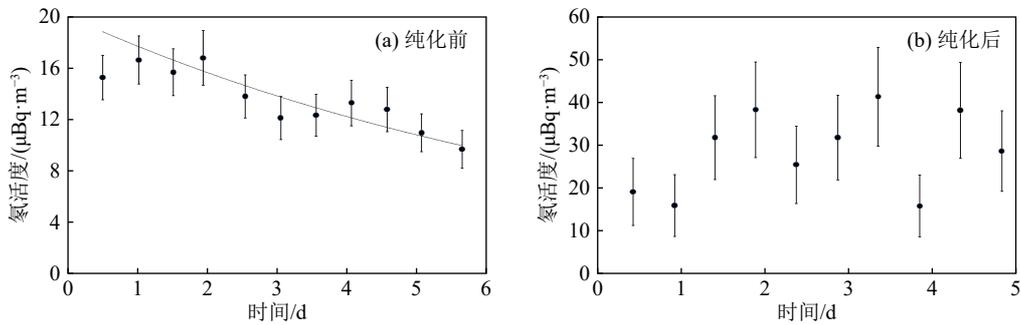


图 11 纯化前及纯化后氮气中氦本底

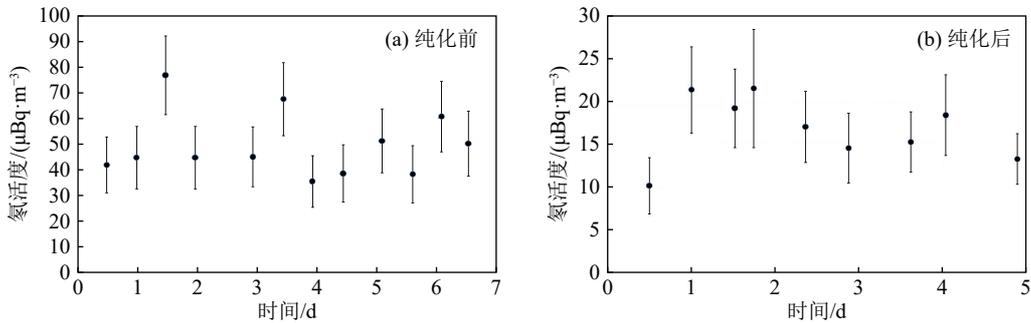


图 12 高纯氮纯化前及纯化后的氦本底

5 总结

本文讨论了低本底实验中常用到的氮气低温除氦技术和极低水平氦测量方法，利用液氮温区下低本底活性炭的高效吸附性能，吸附去除氮气中的氦等放射性杂质，达到降低氮气氦本底的目的。同时利用静电场收集氦衰变子体，结合低温富集氦的方法，测量了氮气中的氦本底，静电收集及低温富集结合后，氦本底测量判断限可以达到 $10\mu\text{Bq/m}^3$ 。对氦活度为 20mBq/m^3 左右的氮气进行了纯化，实验纯化氦的能力为将氦降低到纯化前的 0.125% ，纯化后高纯氮氦本底为 $(25.2\pm 5)\mu\text{Bq/m}^3$ 。另外可以将 $60\mu\text{Bq/m}^3$ 氦本底较低的氮气纯化到 $20\mu\text{Bq/m}^3$ 。如进一步降低气体输运管道材料本底和漏率，更换吸附性能下降的活性炭，将高纯氮的氦本底控

制在 $10\mu\text{Bq/m}^3$ 以下，能够满足大多数低本底实验的要求。纯化能力与氮气中氦本底相关，对较低本底高纯氮，纯化能力下降，纯化能力受纯化装置本底影响较大。

参考文献:

- [1] CHEN Qinghao, YUE Qian, CHENG Jianping, et al. Chinese Physics C, 2016, 40(11): 116002.
- [2] FUKUDA S, FUKUDA Y, HAYAKAWA T, et al. Nucl Instr and Meth A, 2003, 501: 418.
- [3] ABT I, ALTMANN M, CALDWELL A, et al. Nucl Instr and Meth A, 2007, 570(3): 479.
- [4] AN Fengpeng, AN Guangpeng, AN Qi, et al. J Physics G, 2016, 43(3): 030401.
- [5] JUNO Collaboration, Introduction to JUNO[EB/OL]. [2020-03-18]. <http://juno.ihep.cas.cn/ATEjuno/201309/110t20130912109433>.

- [6] XU Cheng, GUO Cong, QIU Shoukang, et al. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2018, 38: 341. (in Chinese) (徐程, 郭聪, 丘寿康, 等. 核电子学与探测技术, 2018, 38: 341.)
- [7] HEUSSER G, RAU W, FREUDIGER B, et al. Applied Radiation and Isotopes, 2000, 52: 691.
- [8] GRZEGORZ Z. Purification of Nitrogen(argon)[R]. IDEA meeting, LAL-Orsay, 2005.
- [9] SYLVAIN T, PATRICK R, THOMAS V, et al. Journal of Environmental Radioactivity, 2017, 171: 124.
- [10] Carboact Charcoal Specification[EB/OL]. [2020-03-18]. <https://www.carboactinternational.com>.
- [11] The fourth Design Institute of Ministry of Chemical Industry. Cryogenic Manual[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1979: 199. (in Chinese) (化学工业部第四设计院. 深冷手册[M]. 北京: 化学工业出版社 1979: 199.)
- [12] SIMGEN H. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2006 57: 266.
- [13] CHU, K D. HOPKE, PHILIP K. Environmental Science & Technology, 1988, 22(6): 711.
- [14] MITSUDA C, KAJITA T, MIYANO K, et al. Nucl Instr and Meth A, 2003, 497: 414.
- [15] KIKO J. Nucl Instr and Meth A, 2001, 460: 272.
- [16] DURRIDGE Company Inc. RAD7RADON DETECTOR User Manual[EB/OL]. [2020-08-16]. <https://durrige.com/support/product-manuals>.

Study of Low Temperature Radon Removal Technology and Low Background Radon Measurement in Nitrogen

AN Guangpeng^{1,2,1)}

(1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. Institute of High Energy physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: High-purity and low-background nitrogen plays an important role in the low-background experiments, and it is necessary to study radioactive impurities removal technology and low-background radon measurement in nitrogen. The research uses low-temperature adsorption technology to remove radioactive impurities in nitrogen. At the same time, electrostatic collection and low-temperature enrichment methods are combined to measure $\sim 10 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ radon in nitrogen. The result shows that the purification system can reduce the radon background in nitrogen by $20 \text{mBq}/\text{m}^3$ to $(25.2 \pm 5) \mu\text{Bq}/\text{m}^3$, namely, can reduce the radon background by 800 times. It is also found that the purification capacity is related to the radon background in nitrogen. In the range of radon background from dozens of mBq/m^3 to dozens of $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$, the purification capacity decreases with the lower radon background. The main reason is that the adsorption capacity decreases with the lower partial pressure of radon. In addition, the influence of radon pollution caused by system background and leakage increases significantly under very low background.

Key words: low temperature adsorption; activated carbon; radon measurement; electrostatic collection; radon enrichment

Received date: 01 Sep. 2020; Revised date: 25 Sep. 2020

Foundation item: Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences(XDA10010500)

1) E-mail: agp_74@163.com.