# 钐钴永磁漂移管出气及质谱分析

关玉慧<sup>1,2</sup> 王鹏程<sup>1,2,3\*</sup> 刘顺明<sup>1,2\*</sup> 刘佳明<sup>1,2</sup> 孙晓阳<sup>1,2</sup> 谭彪<sup>1,2</sup> 王一刚<sup>1,2</sup> 朱邦乐<sup>1,2</sup>

李阿红<sup>1,2</sup> 李波<sup>1,2</sup> 吴小磊<sup>1,2</sup> 于永积<sup>1,2</sup> 邓昌东<sup>1,2</sup> 袁月<sup>1,2</sup>

(1. 散裂中子源科学中心 东莞 523803; 2. 中国科学院高能物理研究所 北京 100049; 3. 中国科学技术大学 合肥 230029)

## Outgassing of SmCo Permanent Magnets Drift Tube and Residual Gas Analysis

GUAN Yuhui<sup>1,2</sup>, WANG Pengcheng<sup>1,2,3\*</sup>, LIU Shunming<sup>1,2\*</sup>, LIU Jiaming<sup>1,2</sup>, SUN Xiaoyang<sup>1,2</sup>,

TAN Biao<sup>1,2</sup>, WANG Yigang<sup>1,2</sup>, ZHU Bangle<sup>1,2</sup>, LI Ahong<sup>1,2</sup>, LI Bo<sup>1,2</sup>, WU Xiaolei<sup>1,2</sup>,

YU Yongji<sup>1,2</sup>, DENG Changdong<sup>1,2</sup>, YUAN Yue<sup>1,2</sup>

(1. Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China; 2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100049, China; 3. University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

**Abstract** This article explains the experimental principle of the synchronous gas path method to measure the outgassing rate of materials systematically. First, the outgassing rate of SmCo permanent magnets at room temperature is measured at different times and its fitting curve is given, which can predict the outgassing rate of SmCo materials corresponding to a longer period of time. Secondly, the total outgassing of the SmCo permanent magnet drift tube prototype was experimentally measured and compared with the total outgassing of the SmCo sample. It was analyzed that air inclusion was the main reason for the slow decline in the outgassing of the drift tube prototype, and an improvement plan was proposed. Then, the residual gas composition under different conditions is compared, and the analysis results provide improvement ideas for subsequent drift tube processing. Finally, the pressure change caused by the application of the SmCo permanent magnet drift tube in the DTL1# physical cavity was calculated, providing data support for the application of the SmCo permanent magnet drift tube.

**Keywords** Synchronized gas path method, Outgassing rate of SmCo, Outgassing of drift tube, Residual gas analysis, Application of SmCo permanent magnet drift tube

**摘要** 文章系统地阐述了同步气路法测量材料出气率的实验原理,首先实验测得钐钴永磁铁室温下不同时刻的出气率 并给出及其拟合曲线,可预测更长时间钐钴所对应的出气率。其次,实验测得钐钴永磁铁漂移管样机的整体出气量,并与钐 钴样品总出气量进行比对,分析夹气是导致漂移管样机出气量下降缓慢的主要原因,并提出改进方案。然后,对比不同状态 下的残余气体成分,分析结果对于后续漂移管的加工提供改进思路。最后,计算了钐钴永磁漂移管应用于 DTL1#物理腔引起 的压强变化,为钐钴永磁漂移管的应用提供数据支持。

关键词 同步气路法 钐钴出气率 漂移管出气量 残余气体分析 钐钴永磁漂移管应用 中图分类号: TB74 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202403013

中国散裂中子源(China Spallation Neutron Source, CSNS)漂移管直线加速器(Drift Tube Linac, DTL) 全长约 36 m, 工作频率 324 MHz, 负责把射频四极 子加速器(Radio Frequency Quadrupole, RFQ)出来 的 3 MeV 的 H 离子加速到 80 MeV。DTL 包括 4 节物理腔, 每节物理腔长约为 9 m, 由 3 段工艺腔构 成,安装有 153 个漂移管和 8 个半漂移管提供纵向 加速,每个漂移管内含电四极磁铁用于横向聚焦<sup>[1]</sup>。 电四极磁铁线圈采用先进的 SAKAE 结构,具有体 积小、易冷却、励磁电流大等优点<sup>[2]</sup>。与电磁铁相 比,永磁铁具有较高的磁通密度,可以减小漂移管 的体积且无电磁铁运行所产生的焦耳热负荷。目

收稿日期:2024-03-25

基金项目:国家重大科技基础设施建设项目中国散裂中子源二期工程项目(发改高技 [2022]1903)

<sup>\*</sup>联系人:E-mail: wangpc@ihep.ac.cn; smliu@ihep.ac.cn

前,国内外多家科研机构使用永磁铁来制造加速器 磁铁,如国际直线对撞机(ILC)上的永磁四极 (PMQ)、印度巴巴原子研究中心(BARC)低能高流 强质子加速器(LEHIPA)上的永磁漂移管等<sup>[3-7]</sup>。其 中,永磁铁漂移管的真空出气量是其能否在漂移管 直线加速器上应用的关键因素。

如图 1 所示, 永磁漂移管是由十余块永磁体 (内表面直接暴露于真空系统内)及其垫板、磁铁外 壳和大量螺钉构成的组合件, 材料表面出气、零件 间缝隙夹气等是气载的主要来源<sup>[8]</sup>。此外, 不同永 磁漂移管的组装方案、清洗工艺等也对气载大小有 很大影响。本文对钐钴永磁样品及永磁漂移管样 机的整体出气量进行测量和分析, 为后续正式永磁 漂移管的加工、组装、清洗以及在 DTL 腔上应用等 提供数据支持。





## 1 漂移管样机预处理

因永磁漂移管样机出气量未知,为避免出气量

过大对同步气路法的超高真空系统造成污染,先通 过极限真空法,大致估算放气量。将永磁漂移管样 机放置在真空腔体中进行抽真空,配备分子泵机组 用于粗抽、30 L/s 离子泵用于极限真空获得,未放置 漂移管时的本底真空度约为  $2.5 \times 10^{-5}$  Pa。如图 2 所 示,上方五角星标签曲线为首次对漂移管样机所在 的高真空腔室进行抽真空,腔室压强随时间的变化 曲线(转折处为转换离子泵单独抽气)。抽气2周后 对高真空腔室进行氮气置换/冲洗:即,将高真空腔 充氮气至1个大气压,然后再次抽气,压强变化曲线 如图 2 中三角形标签所示。对比两条曲线可见,氮 气置换/冲洗状态下 24 h 的极限真空与未氮气置换/ 冲洗状态下168h的极限真空非常接近,同时氮气 置换/冲洗状态下真空压强下降斜率明显增大,氮气 置换/冲洗大大缩短了抽气时间。主要原因:永磁漂 移管样机长时间暴露大气,表面吸附了大量水蒸气, 由于水分子的吸附热(22 kcal/mol)大于氮气分子 (2.7~4.6 kcal/mol),因此抽气时间明显较长;经氮气 置换/冲洗后,器壁表面吸附位先被氮气分子占据, 降低了水分子的吸附,因此,抽气时间明显缩短<sup>99</sup>。



未氮气置换/冲洗状态下 168 h 的极限真空约 为 3.0×10<sup>-5</sup> Pa, 放气量 Q≈1.5×10<sup>-7</sup> Pa·m<sup>3</sup>/s, 在此之前 放气量较大, 不适合放在出气率测量装置上直接测 量, 会对出气率测量装置的超高真空系统造成一定 污染; 经氮气置换/冲洗后, 放气量明显降低, 可在出 气率装置进行下一步测量。

## 2 实验装置和测试方法

测量出气率的方法包括传统的静态升压法、小 孔流导法等。近年来出现的转换气路法(SPP)<sup>[10]</sup>、 同步气路法<sup>[11-12]</sup> 都是在小孔流导法的基础上发展来 的。转换气路法通过在对称的两个测试室间转换 气体通路来减少测量元件引入的误差。同步气路 法通过同时读取对称的两个测试室的压强,来保证 真空规所测数据保持同步,排除了真空室、真空规 及时间不同步等因素带来的误差。因此,本文采用 同步气路法来完成。

同步气路法测量装置原理如图 3 所示。1、2、3、 16 为同一款冷阴极电离真空计; 4 为 MKS 公司的 残余气体分析仪(RGA); 5 为高真空室; 6 为超高真 空室; 7、8、17、18 为全金属角阀; 9、10 为 2 个完全 相同且对称的测试室, 9 为测试室①、10 为测试室 ②; 11、12 为两个完全相同、直径为 11.23 mm 的小 孔, 流导 *C*=11.5 L/s; 13 为溅射离子泵; 14、19 为分 子泵; 15、20 为机械泵。高真空室为样品分析室, 容 积是 7.35 L。



图3 测量装置原理图 Fig. 3 Schematic diagram of experimental device

测试过程如下: 当高真空室 5 无样品时, 开阀 门 8(阀门 7 关闭), 16 和 2 同时测得测试室②和测 试室①的压强分别为 pu'', pu''', 因此, 高真空室 5 $本底出气量为 <math>Q_{*\kappa} = C(pu'', pu''')$ , 其中 C 为小孔 流导。当高真空室 5 放置样品时, 重复上述实验过 程, 开阀门 8(阀门 7 关闭), 16 和 2 测得测试室②和 测试室①的压强分别为 pu, pu', 因此, 样品和高真 $空室总的放气量为 <math>Q_{\epsilon} = C(pu-pu')$ 。从而可得样品 的放气量为  $Q=Q_{a}-Q_{*\kappa} = C(pu-pu')-C(pu'', pu'')$ 。

## 3 实验过程及结果分析

#### 3.1 本底测量

将高真空室 5 经 3 h 由室温 25 ℃ 升至 200 ℃, 并维持 24 h@200 ℃ 真空烘烤, 再经 3 h 降至室温 25 ℃, 保温期间数次对 RGA 进行彻底除气。降温 结束后,对高真空室进行氮气置换/冲洗,重新抽真 空后,测量系统无样品时的本底出气量,结果如表1 所示,测量结果包含高真空室的出气以及系统本身 的漏气等,后续实验数据都对该本底予以扣除。

表1 高真空室不同时刻的本底出气量

Tab. 1	Background	outgassing of HV	chamber at differen	t time

时长/h	10	24	48	72	96	120	160
出气量/×10 <sup>-9</sup> Pa·m <sup>3</sup> /s	32.9	15.1	10	7.0	4.8	3.6	2.5

## 3.2 钐钴样品出气率测量

将漂移管样机使用的镀镍钐钴(SmCo)永磁铁 样品经 15 min、50℃ 酒精超声清洗后氮气吹干,然 后进行出气率测量,结果如表 2 所示。

#### 表 2 钐钴样品不同时刻的出气率

Tab. 2SmCo outgassing rate at different time

时长/h	10	24	48	72
出气率/×10 <sup>-6</sup> Pa·m <sup>3</sup> /(s·m <sup>2</sup> )	22.71	8.54	3.60	2.59

钐钴出气率散点及拟合曲线如图 4 所示,同时 可见对应时刻样品室的压强。依据真空设计手册 中放气率与时间的函数关系,拟合出钐钴放气率的 曲线方程为:

$$Q = \frac{4.73722 \times 10^{-4}}{t^{1.331}} \tag{(1)}$$

$$R^2 = 0.99564 \tag{2}$$

据此公式可预测出钐钴更长时间所对应的出 气率,方便计算获得极限真空所需的时间。





### 3.3 永磁漂移管样机整体出气量测量

将预处理后的永磁漂移管样机,经表面酒精擦

拭、氮气吹干后,用同步气路法出气率测试装置进 行测量,漂移管样机常温出气量曲线如图 5 所示,其 中部分时刻的出气量在表 3 中单独列出。



Fig. 5 Total outgassing of drift tube prototype

表 3 漂移管样机不同时刻的整体出气量

Tab. 3 Drift tube prototype outgassing at different time

时长/h	10	24	48	72	96	120	160
出气量/×10 <sup>-7</sup> Pa·m <sup>3</sup> /s	9.32	4.02	1.96	1.46	1.28	1.19	0.95

考虑到钐钴永磁漂移管运行期间外壳最高温 度<40℃,磁铁温升主要来源于与外壳之间的热传 导和热辐射,磁铁温度不会太高,因此本实验仅对 样品室进行了 48 h@80℃ 真空烘烤。烘烤期间及 烘烤后的出气量曲线如图 5 所示,烘烤后出气量降 低约半个量级。另外,真空中传热以热辐射为主, 故仅烘烤 48 h,放气量在 120 h 后明显下降。

图 1 可见,除钐钴永磁铁外,漂移管样机中其 它材料为常见金属,出气率可通过查阅真空设计手 册获得,并且随着时间的延长,放气率呈逐渐下降 的趋势。结合 3.2 中所测钐钴样品不同时刻的出气 率和漂移管样机中钐钴永磁铁的面积(约为0.038 m<sup>2</sup>), 可得钐钴永磁铁不同时刻的出气量曲线,与永磁铁 漂移管样机整体出气量进行比对,结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 在前几个小时, 钐钴永磁铁 的出气量略大于漂移管样机的整体出气量, 分析是 由于漂移管样机内部结构比较复杂, 钐钴永磁铁和 其他部件存在大量重叠和缝隙, 导致气体释放速度 减缓, 因此测量结果略小。随着时间的延长, 钐钴 永磁铁的出气量下降速度较快, 而漂移管样机由于 存在缝隙、夹气等, 导致出气量下降缓慢, 不利于极 限真空的快速获得,因此后续正式漂移管加工过程 中应该增加放气槽,加快缝隙中夹气的快速抽除。



Fig. 6 Outgassing comparison between SmCo permanent magnet and drift tube prototype

## 3.4 残气成分

对四种不同状态下(本底、钐钴样品、漂移管样 机未烘烤、漂移管样机 80℃ 真空烘烤)高真空样品 室的残余气体成分进行测量和比对,主要残余气体 成分的分压与其总压的比值(%)如表4所示。

#### 表 4 不同状态下主要残余气体成分的分压比

Tab. 4 Partial pressure ratio of main residual gas components under different states

质荷比(m/e)	2	12	14	16	18	28	44	≥65
本底	44.2	1.0	0.3	2.4	32.5	2.5	0.0	0.1
钐钴样品	16.4	1.2	0.6	3.5	47.8	4.4	0.1	0.2
漂移管样机未烘烤	18.1	1.9	1.6	4.5	32.5	7.1	0.1	3.0
漂移管样机 80℃ 烘烤	33.5	1.3	1.5	2.3	24.1	4.8	0.0	6.2

对比表 4可以看出, 钐钴样品与本底相比, 12 amu、14 amu、16 amu、18 amu、28 amu比例都有 不同程度的上升, 其中 28 amu ( $N_2^+$ )、14 amu ( $N^+$ ) 上升比例最高, 可能与钐钴样品长期放置于空气中, 吸附大量气体分子有关。未烘烤的漂移管样机与 本底相比, 12 amu、14 amu、16 amu、28 amu 比例都 有不同程度的上升, 虽然仍是 28 amu、14 amu 上升 比例最高, 但 12 amu、16 amu 上升也比较明显, 28 amu 应为 N<sub>2</sub>+CO 的组合; 同时 65 amu 之后出现 了较多的峰团, 可能是装配过程中没有严格按照超 高真空的工艺要求执行, 造成部分有机物及油污染, 后续须加强管理。80℃真空烘烤的漂移管样机与 本底相比, 14 amu、28 amu 比例仍有上升, 说明此时 样机内仍存在夹气, 需要长时间才能抽除, 也为后 续正式漂移管加工时预留放气槽提供数据支撑; ≥ 65 amu 的比例明显上升, 可能是真空烘烤促进了有 机物残留的释放, 同时也说明 80℃ 真空烘烤对有机 物的抽除效果有限, 后续可以考虑提高真空烘烤的 温度。

## 4 钐钴永磁漂移管在 DTL 腔上的应用

目前 CSNS DTL 采用电磁铁漂移管,漂移管外 壳为无氧铜电子束焊接拼接而成,其常温出气率约 为q1=1.0×10<sup>-9</sup> Pa·m<sup>3</sup>/(s·m<sup>2</sup>)<sup>[13]</sup>, DTL1#物理腔漂移管 数量最多,共63个漂移管和2个半漂,表面积A≈ 20 m<sup>2</sup>, 气载 Q<sub>1</sub>=q<sub>1</sub> A<sub>1</sub>=2.0×10<sup>-8</sup> Pa·m<sup>3</sup>/s; DTL 腔内表 面及密封面均为20#钢电铸无氧铜,实验测得其48 h 常温出气率约为 1.94×10<sup>-6</sup> Pa·m<sup>3</sup>/(s·m<sup>2</sup>), 经长时间 老炼除气后,放气率约降低至一半,为 q<sub>2</sub>=9.7× 10<sup>-7</sup> Pa·m<sup>3</sup>/(s·m<sup>2</sup>), 表面积 A<sub>2</sub>≈15 m<sup>2</sup>, 气载 Q<sub>2</sub>=q, A<sub>2</sub>= 1.46×10<sup>-5</sup> Pa·m<sup>3</sup>/s: 另外, 整个系统漏率 O<sub>3</sub><1.0×10<sup>-10</sup> Pa·m<sup>3</sup>/s,因此,总气载 Q=Q<sub>1</sub>+Q<sub>2</sub>+Q<sub>3</sub>≈1.46×10<sup>-5</sup> Pa·m<sup>3</sup>/s。 DTL1#物理腔共配备 2 套 1300 L/s 的分子泵机组 和7台1000 L/s的离子泵,为了减少高频场的泄漏, 抽气口都配备真空网栅,离子泵和分子泵网栅截面 分别由9个、7个宽度相同长度不同的近似矩形组 成,具体尺寸如图7所示。网栅流导计算公式为 U=309K<sub>i</sub>a<sup>2</sup>b<sup>2</sup>/[(a+b)L]<sup>[14]</sup>, a, b 为矩形两边长 (m), L 为 管道长 (m), K; 为形状系数。由于网栅、管道流导等 限制,总有效抽速 S≈3.26 m³/s,可获得的极限真空 *p*≈4.5×10<sup>-6</sup> Pa, 目前 DTL 腔实际测得的压强 *p*≈4.0× 10<sup>-6</sup> Pa, 与计算结果基本吻合。

钐钴永磁漂移管替代电磁漂移管是一个可行 性方案,下面以 DTL1#物理腔为例,计算钐钴永磁 漂移管放气、夹气等对腔体压强的影响。取单个漂 移管 120 h 整体放气量数据  $q=1.19\times10^{-7}$  Pa·m<sup>3</sup>/s,气 载  $Q'_1$ ≈7.62×10<sup>-6</sup> Pa·m<sup>3</sup>/s,因此,总气载 Q'≈2.22×10<sup>-5</sup> Pa·m<sup>3</sup>/s,可获得的极限真空  $p≈6.8×10^{-6}$  Pa,满足 DTL 腔压强<1.0×10<sup>-5</sup> Pa 的真空需求。

## 5 结论

通过同步气路法首先测得镀镍钐钴永磁铁材 料在室温下不同时刻的出气率及其拟合曲线,可预 测更长时间钐钴所对应的出气率,其24h出气率约 为8.54×10<sup>-6</sup> Pa·m<sup>3</sup>/(s·m<sup>2</sup>)。其次,实验测得钐钴永磁



图7 离子泵(a)、分子泵(b)抽气口网栅

Fig. 7 The pumping port grid of ion pump (a) and molecular pump (b)

铁漂移管样机的整体出气量,并与钐钴样品的总出 气量进行比对,分析夹气是导致漂移管样机出气量 下降缓慢的主要原因,并提出增加放气槽的改进方 案。然后,对比不同状态下的残余气体成分,分析 结果对于后续漂移管的加工提供改进思路。最后, 计算了钐钴永磁漂移管应用于 DTL1#物理腔引起 的压强变化,结果满足真空需求,也为钐钴永磁漂 移管的应用提供数据支撑。

#### 参考文献

- [1] Liu H C, Li A H, Peng J, et al. Design study on accelerating field distribution and stability tuning of drift tube linac[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(10): 1874–1879 (刘华昌, 李阿红, 彭军, 等. 漂移管 直线加速器加速电场分布及稳定性调谐研究 [J]. 原子 能科学技术, 2017, 51(10): 1874–1879 (in Chinese))
- [2] Li B, Liu H C, Wu X L, et al. Development of the drift tube magnet coil for China spallation neutron source[J].
  Nuclear Science and Engineering, 2023, 43(3): 576-580 (李波, 刘华昌, 吴小磊,等. 中国散裂中子源漂移管磁 铁线圈研制 [J]. 核科学与工程, 2023, 43(3): 576-580

(in Chinese))

- [3] Iwashita Y, Yamada M, Ushijima S, et al. Variable permanent magnet multipoles[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(3): 4000905
- [4] Kashikhin V S, Andreev N, Lamm M J, et al. Design and manufacturing main linac superconducting quadrupole for ILC at fermilab[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2008, 18(2): 155–158
- [5] Mihara T, Iwashita Y, Kumada M, et al. Super strong permanent magnet quadrupole for a linear collider[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004, 14(2): 469–472
- [6] Teotia V, Malhotra S, Mishra E, et al. Design, development and characterization of tunable permanent magnet quadrupole for drift tube linac[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, 982: 164528
- [7] Halbach K. Application of permanent magnets in accelerators and electron storage rings (invited)[J]. Journal of Applied Physics, 1985, 57(8): 3605–3608
- [8] Wang Y, Li G. Thermal outgassing of NdFeB permanent magnets[J]. Vacuum Science and Technology(China), 2000, 20(4): 296 (王勇, 李格. 永磁体钕铁硼的热出气 率 [J]. 真空科学与技术, 2000, 20(4): 296 (in Chinese))
- [9] Liu Y K. Vacuum engineering design[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 1250-1254 (刘玉魁. 真空工程

设计 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 1250-1254 (in Chinese))

- [10] Feng Y, Zeng X P, Zhang D X, et al. Design of measurement apparatus for material outgassing rates by orifice conductance method[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2010, 30(3): 66–69 (冯焱, 曾祥坡, 张涤新, 等. 小孔流导法材料放气率测量装置的设计 [J]. 宇航计测技术, 2010, 30(3): 66–69 (in Chinese))
- [11] Guan Y H, Song H, Dong H Y, et al. Measurement of low outgassing-rate in self-developed pumping-path switching algorithm: a methodological study[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2020, 40(6): 524–530 (关玉慧, 宋洪, 董海义, 等. 常见放气率测试方 法的量化比较 [J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(6): 524–530 (in Chinese))
- [12] Guan Y H, Dong H Y, Song H. Device and method for measuring material outgassing rate in dual test chambers: CN110501257A[P]. 2019 (关玉慧, 董海义, 宋洪. 一种 双测试室测量材料放气率的装置及方法: 110501257A
  [P]. 2019 (in Chinese))
- [13] Chimenti V, Di Raddo R, Lollo V, et al. Preliminary vacuum simulation results on ELI C-band accelerating structure[R]. 2014
- [14] Da D A. Vacuum design manual(3<sup>rd</sup> edition)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 116-117 (达道 安. 真空设计手册(第三版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 116-117 (in Chinese))