

激活后的 NEG 薄膜在氖气保护下的应用研究

徐晓鹏¹ 马文静¹ 尉健亚² 葛晓琴^{1*} 范乐¹ 洪远志¹ 夏小维¹ 黄涛¹ 王思慧^{1*}
(1. 中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029; 2. 安徽大学电气工程与自动化学院 合肥 230301)

Vacuum Performance of Activated NEG Coatings under Neon Venting

XU Xiaopeng¹, MA Wenjing¹, WEI Jianya², GE Xiaoqin^{1*}, FAN Le¹,
HONG Yuanzhi¹, XIA Xiaowei¹, HUANG Tao¹, WANG Sihui^{1*}

(1. National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230301, China)

Abstract Non-evaporable getter (NEG) coatings have become the main method of surface treatments for the vacuum chambers of new generation synchrotron radiation light source. Ti-Zr-V coatings are currently planned to be used in the vacuum chambers of Hefei Advanced Light Source Facility (HALF) storage ring to meet vacuum. Occasionally the vacuum chambers are inevitably exposed to the atmosphere to replace some damaged components or install insertion devices, which will damage the performance and life of NEG coatings, and take several weeks to restore the original vacuum. Therefore, a neon venting system is used, which could protect the vacuum performance of activated NEG coatings to a certain extent and avoid reactivating the coatings to prolong coatings' lifetime and save operation time. Meanwhile, a comparative experiment is carried out under N₂ venting. After neon venting, the results show that the vacuum can meet the static vacuum degree without activating coatings to prolong the lifetime and save recovery time, but it cannot meet the static vacuum after N₂ venting. After low-temperature activation of NEG coatings, the vacuum can meet the pressure in both cases but is better under neon gas. The percentage of neon is very low in both cases by analysis of residual gases, which does not affect the stability of the beam and further proves the feasibility of neon venting.

Keywords Ti-Zr-V coatings, Neon protecting, HALF, Ultra-high vacuum, Activation

摘要 NEG 薄膜目前已成为新一代同步辐射光源储存环真空室表面处理的主要手段, HALF 光源拟采用镀 Ti-Zr-V NEG 薄膜的方式以满足储存环真空度的设计要求。在一些情况下, 需要打开真空室以更换某些故障件或安装插入件等, 这将使 NEG 薄膜暴露大气, 严重损伤薄膜的吸气性能及使用寿命, 此外也需要数周时间使真空度恢复到原有水平。因此采取向真空室充入 Ne 气的方法能在一定程度上保护激活后的 NEG 薄膜, 从而避免再次激活薄膜以延长使用寿命和节省时间, 另外进行了充入 N₂ 的对比实验。结果表明, 充入 Ne 气后, 真空度恢复后能满足静态真空度的要求, 无需激活, 从而延长 NEG 薄膜的使用寿命并且节省时间。而充入 N₂ 后, 真空度恢复后达不到静态真空度的要求。但通过低温激活, NEG 薄膜均能恢复一定活性并达到静态真空度要求。相对于 N₂, 在 Ne 气保护作用下真空度恢复的更好。通过对残余气体的分析, 发现低温激活前后 Ne 的含量均极低, 对束流的稳定性不会产生影响, 进一步证明了充入 Ne 气的可行性。

关键词 Ti-Zr-V 薄膜 Ne 气保护 HALF 超高真空 激活

中图分类号: TL503.7

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202305002

合肥先进光源 (Hefei Advanced Light Source Facility, 简称 HALF) 的主体是一台第四代衍射极限储存环, 其为了获得更低的束流发射度, 使用了高

梯度的多极磁铁, 使得磁铁的孔径变小, 这就要求穿越各种磁铁的真空室的孔径也显著减小^[1]。由于小孔径真空室流导的限制, 传统加速器中分散式的

收稿日期: 2023-05-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12175225)

* 联系人: E-mail: xqge@ustc.edu.cn; sihui@ustc.edu.cn

真空泵抽气方案已不能满足使用要求,因此提出在储存环管道内壁镀 NEG 薄膜的方案以满足 HALF 束流运行对真空环境的要求^[2-3],储存环静态真空度需低于 2×10^{-8} Pa。

非蒸散型吸气剂 (Non-evaporable getters, 简称 NEG) 薄膜能吸附 H_2 , CO , CO_2 和 H_2O 等活性气体^[4],并具有很低的光致气体解吸 (Photon stimulated desorption, 简称 PSD) 产额、电致气体解吸 (Electron stimulated desorption, 简称 ESD) 产额和二次电子 (Second electron yield, 简称 SEY) 产额^[5-9],因此 NEG 镀膜技术逐渐成为第四代同步辐射光源真空系统实现超高真空的关键技术。但是在有些需要更换故障零件或安装插入件等情况下,不可避免地要打开真空室,而这会迫使 NEG 薄膜暴露大气,从而导致其迅速饱和,这将严重损伤薄膜的吸气性能及使用寿命。为了恢复 NEG 的吸气能力,通常在真空环境或惰性气体中将其加热,增强吸附在薄膜表面的气体分子在扩散过程的动能,使表面氧化物等解吸或向内部扩散并溶解,从而消除钝化层并重新获得清洁的活性金属表面,并释放出一定位置用以重新与残余气体相互作用,这个过程也被称为薄膜的激活^[10]。NEG 薄膜的激活原理决定了 NEG 薄膜有限的使用寿命。当 NEG 薄膜被反复激活后,薄膜会由于吸附容量的限制而饱和,从而失去吸气性能,这将严重影响光源的正常运行和使用。除此之外,为了恢复真空度,需要数周的时间对镀 NEG 薄膜管道重新进行烘烤、激活等。

因为 NEG 薄膜与惰性气体不发生反应^[11],为了尽可能延长薄膜使用寿命和减少真空恢复时间,故采用一种向真空室充入 Ne 气的方法进行短时间的干预,此方法能够在一定程度上保护已激活的 NEG 薄膜的真空性能。此方法已在瑞典 MAX IV 光源实际应用,其束流清洗时间短,真空度恢复的

快,具有良好的实际效果^[12]。在所有的惰性气体种类中,Ne 相对原子质量小,不影响检漏,是首选。其他惰性气体例如 He 和 Ar,作为常用的检漏气体,会降低检漏的灵敏度。而 Kr 和 Xe 的相对原子质量很大,与束流相互作用具有高的碰撞截面,因此即使很小的残余也会影响束流的稳定性^[13]。

文章通过对真空室充入过压 (大于一个大气压) 的 Ne 气,并保持一定时间对真空室抽真空,研究 Ne 气对激活后的 NEG 薄膜的保护作用。充入过压的 Ne 气可以防止空气回流,同时 NEG 薄膜不与 Ne 气反应,避免激活后的 NEG 薄膜的饱和,真空室可以在不激活 NEG 的情况下恢复到超高真空^[14-15]。本文通过对比充入 Ne 气和 N_2 对 NEG 薄膜真空抽气性能的影响,为 NEG 薄膜在 HALF 工程中的实际应用和后期维护提供了数据支撑以及理论依据。

1 实验装置及流程

1.1 实验装置

充气实验装置如图 1 所示,系统主要包含测试系统、抽气系统、充气系统。3 根 0.5 m、内径 22 mm 的短管道串联连接成一根长 1.5 m 的 NEG 镀膜管道作为待测样品。NEG 管道一端连接 Leybold IE514 电离真空计 2,另一端通过全金属角阀与辅助真空室相连,在辅助真空室上装有 Leybold IE514 电离真空计 1 和残余气体分析仪 (RGA),分别用于测量总压和分压以及残余气体成分。辅助真空室与分子泵机组和复合离子泵相连。充气系统与测试系统之间装有微漏阀,通过调节减压阀调节充入气体总量。

1.2 实验流程

在进行充气之前,首先需要单独对不锈钢气管

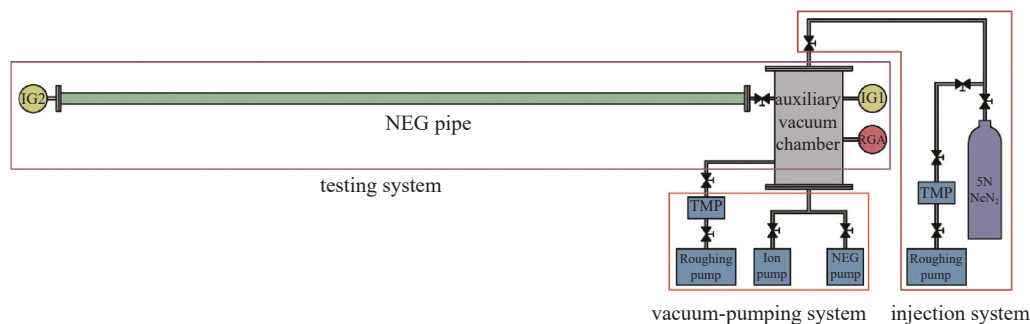


图1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of neon venting system configuration

加热至 120℃ 保持 48 h, 以除去充气气路中残余气体。其后对整个系统进行粗抽气, 对辅助真空室及真空计 1 加热烘烤至 250℃ 保持 24 h, 待其降至室温后, 再将 NEG 管道加热至 200℃ 保持 24 h 以激活, 激活期间分子泵阀门处于关闭状态, 仅使用离子泵进行抽气以避免激活过程中分子泵气体回流的影响。等待所有系统降至室温, 整个过程至少需要 5 天左右的时间。

在进行充气之前, 记录系统的本底真空度, 然后关闭所有电离计并冷却至室温防止高温氧化灯丝, 关闭溅射离子泵。通过充气系统对系统充入 1.6 个大气压、纯度为 5 N 的 Ne 气, 充气半小时, 然后打开分子泵机组抽气。再对辅助真空室、电离计 1、RGA 进行烘烤除气, 包括复合离子泵的烘烤除气激活, 在除气结束后打开电离计 1, 2 和 RGA 开始记录测试系统的真空度和残余气体成分及分压随时间的变化值。关闭 NEG 管和辅助真空室之间的阀门, 仅利用管道内表面的 NEG 薄膜作为抽气单元, 继续记录真空度随时间的变化值。经过约 1 天的真空恢复, 对 NEG 管进行低温激活 (150℃, 24 h), 然后再次关闭 NEG 管和辅助真空室之间的阀门, 观测真空度随时间的变化值。

2 结果与分析

2.1 充入 Ne 气 (纯度 5 N) 结果

充入 Ne 气前的系统本底真空度为 $p_1 = 7.10 \times 10^{-9}$ Pa, $p_2 = 1.51 \times 10^{-8}$ Pa (p_1 为辅助真空室的真空度, p_2 为 NEG 管的真空度, 下文均用 p_1 、 p_2 表示)。充入 0.16 MPa (即约 1.6 个大气压) 的 Ne 气 30 min, 经过约 4 天的真空恢复, $p_1 = 6.91 \times 10^{-9}$ Pa, $p_2 = 1.80 \times 10^{-8}$ Pa。关闭辅助真空室与 NEG 管道阀门后, 系统的真空度变差, 这是因为在关闭阀门的过程中会释放气体。经过约 1 天的真空恢复, $p_1 = 6.66 \times 10^{-9}$ Pa, $p_2 = 1.08 \times 10^{-7}$ Pa。然后对 NEG 薄膜进行 150℃ 的低温激活, 经过约 3 天的真空恢复, $p_1 = 6.20 \times 10^{-9}$ Pa, $p_2 = 1.48 \times 10^{-8}$ Pa, 再次关闭辅助真空室与 NEG 管道阀门, 经过约 1 天的真空恢复, $p_1 = 6.07 \times 10^{-9}$ Pa, $p_2 = 1.64 \times 10^{-8}$ Pa。真空度随时间实时变化如图 2 所示。

充入 Ne 气后需要对实验装置进行抽气、烘烤、真空计和 RGA 除气等, 因此图 2(a) 中真空度变化从充入 Ne 气后 60 h 处开始记录, 蓝色虚线处为关

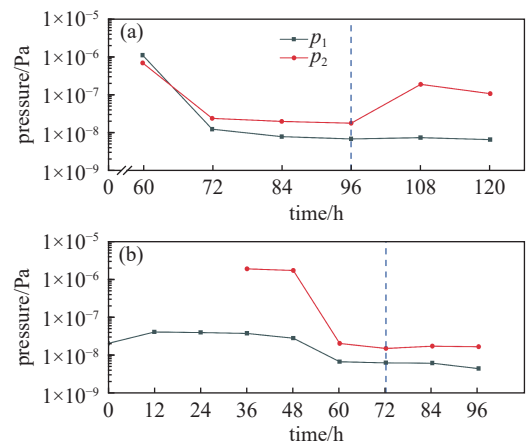


图2 充入 Ne 气后真空度随时间变化曲线。(a) 低温激活前, (b) 低温激活后

Fig. 2 Vacuum curve with time after injection of neon gas. (a) Before low temperature activation, (b) after low temperature activation

闭 NEG 管和辅助真空室之间的阀门。在开始低温激活后, 作者只对 NEG 管和电离计 2 进行烘烤, 因此图 2(b) 中前 36 h 并未记录 p_2 的数值变化, 蓝色虚线处同样为关闭 NEG 管和辅助真空室之间的阀门。极限真空结果汇总如表 1 所示。

表 1 充入 Ne 气后的极限真空

Tab. 1 Ultimate vacuum after injection of neon gas

	p_1 /Pa	p_2 /Pa	离子泵连通状态	恢复时间
初始真空度	7.10×10^{-9}	1.51×10^{-8}	开启	
充入 Ne 气	6.91×10^{-9}	1.80×10^{-8}	开启	4 d
	6.66×10^{-9}	1.08×10^{-7}	关闭	1 d
低温激活	6.20×10^{-9}	1.48×10^{-8}	开启	3 d
	6.07×10^{-9}	1.64×10^{-8}	关闭	1 d

注: 以上均为极限真空度

由表 1 可知, 充入 Ne 气之后, 最终 $p_2 < 2.0 \times 10^{-8}$ Pa, 满足储存环静态真空度要求, 相对于初始的 p_2 , 充入 Ne 气后 p_2 略有上升, 说明充入 5 N 纯度的 Ne 气能够在一定程度上保护 NEG 薄膜活性, 但其中的少量活性杂质气体如 O_2 、 H_2O 等会损伤薄膜的吸气性能。在关阀之后, $p_2 = 1.08 \times 10^{-7}$ Pa, 说明虽然充入 5 N 纯度的 Ne 气不能完全避免 NEG 薄膜抽气性能的降低, 但是 NEG 薄膜依然具有一定的活性。对 NEG 管进行低温激活, 用于恢复损伤的 NEG 薄膜的真空性能, 并尽可能地降低激活对真空室、磁铁等的影响, 最终 $p_2 < 2.0 \times 10^{-8}$ Pa, 真空度相较于低温激活前更好。在关阀之后, $p_2 = 1.64 \times$

10^{-8} Pa, 真空度较低温激活前提高了一个量级, 恢复到了初始真空度的水平, 说明薄膜可以在低温条件下实现一定程度上的激活。以上结果说明充入 5 N 纯度的 Ne 气可以一定程度上保护薄膜的性能, 并且薄膜在不激活的前提下能满足储存环静态真空度要求, 可见 Ne 气可以延长 NEG 薄膜的使用寿命和减少真空恢复时间。但是 Ne 气的不纯度会对激活的薄膜产生一定的污染, 造成薄膜的部分失效,

因此在未来实际工程应用中, 需对 5 N 纯度的 Ne 气进一步纯化。

由于溅射离子泵对 Ne 的抽送作用较弱且 Ne 的残余会对束流的稳定性产生一定影响, 因此对真空系统中 Ne 残余含量分析极其重要。在室温下分别对 NEG 管低温激活前后进行了 12 h 的残余气体成分分析, 结果如图 3 (图例为各气体质荷比) 所示。

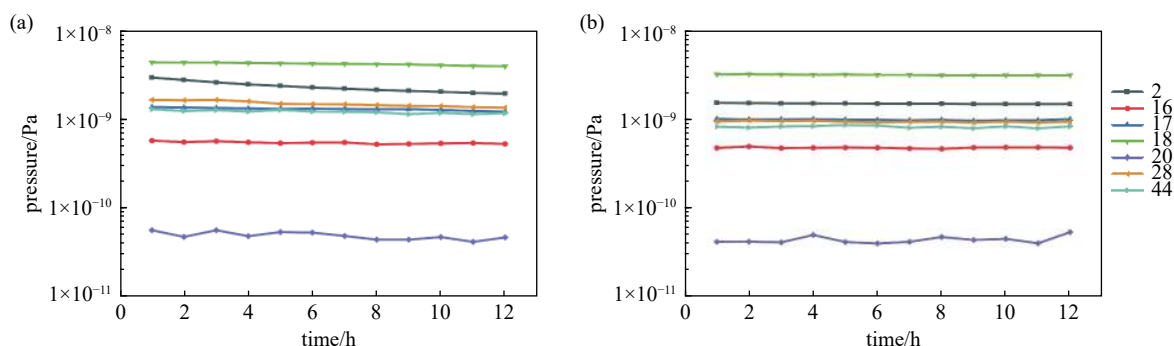


图3 充入 Ne 气后的残余气体分压。(a) 低温激活前, (b) 低温激活后

Fig. 3 Residual gas component after injection of neon gas. (a) Before low temperature activation, (b) after low temperature activation

低温激活前后, Ne 的分压占比可通过式(1)计算

$$pr = (p_{\text{Ne}}/p) \times 100\% \quad (1)$$

式中 pr 为分压占比; p_{Ne} 为 Ne 的分压, Pa; p 为总压, Pa。

低温激活前, $p_{\text{Ne}} = 1 \times 10^{-10}$ Pa, $p = 6.91 \times 10^{-9}$ Pa, 代入式(1)中计算可得占比为 1.447%。低温激活后, $p_{\text{Ne}} = 4 \times 10^{-11}$ Pa, $p = 6.20 \times 10^{-9}$ Pa, 代入式(1)中计算可得占比为 0.645%, 同样占比在所有气体中最少。说明充入的 Ne 气可以被离子泵抽走, 不会因为残余而影响束流稳定性。

2.2 充入 N_2 (纯度 5 N) 结果

充入 N_2 前的系统本底真空度为 $p_1 = 4.60 \times 10^{-9}$ Pa, $p_2 = 1.23 \times 10^{-8}$ Pa。充入 0.16 MPa (即约 1.6 个大气压) 的 N_2 30 min, 与充入 Ne 气实验流程一致, 经过约 4 天的真空恢复, $p_1 = 7.73 \times 10^{-9}$ Pa, $p_2 = 3.25 \times 10^{-8}$ Pa。关闭辅助真空室与 NEG 管道阀门后, 经过约 1 天的真空恢复, $p_1 = 6.79 \times 10^{-9}$ Pa, $p_2 = 2.37 \times 10^{-7}$ Pa。然后对 NEG 薄膜进行 150°C 的低温激活, 经过约 3 天的真空恢复, $p_1 = 7.07 \times 10^{-9}$ Pa, $p_2 = 1.88 \times 10^{-8}$ Pa, 再次关闭辅助真空室与 NEG 管道阀门, 经过约

1 天的真空恢复, $p_1 = 6.52 \times 10^{-9}$ Pa, $p_2 = 2.42 \times 10^{-8}$ Pa。真空度随时间实时变化如图 4 所示。

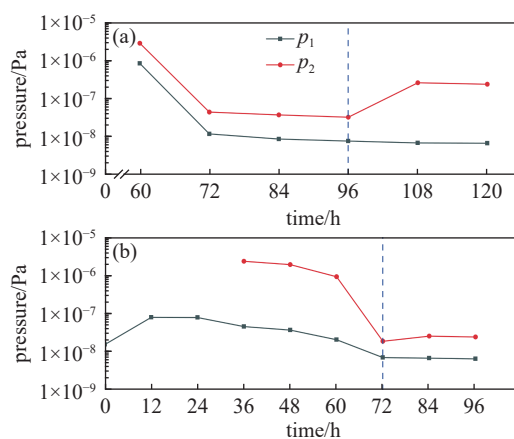


图4 充入 N_2 后真空度随时间变化曲线。(a) 低温激活前, (b) 低温激活后

Fig. 4 Vacuum curve with time after injection of N_2 . (a) Before low temperature activation, (b) after low temperature activation

充入 N_2 后与充入 Ne 气实验流程操作一样, 极限真空结果汇总如表 2 所示。

由表 2 可知, 充入 N_2 之后, 最终 $p_2 > 2.0 \times 10^{-8}$ Pa, 不满足储存环对静态真空度要求, 说明相较于

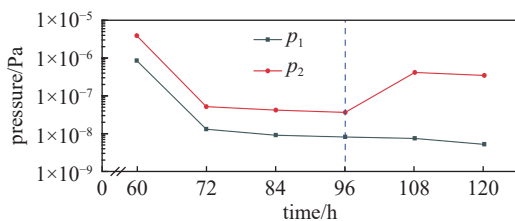
表 2 充入 N_2 后的极限真空Tab. 2 Ultimate vacuum after injection of N_2

	p_1/Pa	p_2/Pa	离子泵连通状态	恢复时间
初始真空度	4.60×10^{-9}	1.23×10^{-8}	开启	
充入 N_2	7.73×10^{-9}	3.25×10^{-8}	开启	4 d
	6.79×10^{-9}	2.37×10^{-7}	关闭	1 d
低温激活	7.07×10^{-9}	1.88×10^{-8}	开启	3 d
	6.52×10^{-9}	2.42×10^{-8}	关闭	1 d

注: 以上均为极限真空度

Ne 气, 5 N 纯度的 N_2 对薄膜的真空性能损伤更大。在关阀之后, $p_2 = 2.37 \times 10^{-7} \text{ Pa}$, 说明充入 5 N 纯度的 N_2 也能在一定程度上保护薄膜, 但效果较 Ne 气差。对 NEG 管进行低温激活, 最终 $p_2 < 2.0 \times 10^{-8} \text{ Pa}$, 真空度较低温激活前变好, 说明充入 5 N 纯度的 N_2 后 NEG 薄膜也可在低温条件下实现一定程度的激活。在关阀之后, $p_2 = 2.42 \times 10^{-8} \text{ Pa}$, 真空度较低温激活前提高了一个量级, 同样说明薄膜在一定程度上被激活, 吸气性能提高, 但激活程度要差于 Ne 气。以上结果说明充入 N_2 也可以一定程度上保护 NEG 薄膜, 但效果差于 Ne 气。薄膜在不激活的前提下不能满足储存环静态真空度要求。

NEG 薄膜能与 N_2 发生反应, 但 NEG 薄膜对 N 吸附能力有限, N_2 在较短时间内通常是物理吸附在 NEG 薄膜上, 延长 N_2 与 NEG 薄膜的接触时间^[16], 薄膜真空性能会更进一步遭受损失。因此, 进行了充入 4 h 的 N_2 对比实验, 真空度随时间实时变化如图 5 所示, 极限真空结果汇总如表 3 所示。

图 5 充入 4 h 的 N_2 后真空度随时间变化曲线 (低温激活前)Fig. 5 Vacuum curve with time after injection of N_2 for 4 h (before low temperature activation)表 3 充入 4 h 的 N_2 后的极限真空Tab. 3 Ultimate vacuum after injection of N_2 for 4 h

	p_1/Pa	p_2/Pa	离子泵连通状态	恢复时间
初始真空度	5.17×10^{-9}	1.36×10^{-8}	开启	
充入 N_2	8.27×10^{-9}	3.70×10^{-8}	开启	4 d
	5.30×10^{-9}	3.48×10^{-7}	关闭	1 d

注: 以上均为极限真空度

结论表明充入 4 h 的 N_2 后, 真空度进一步变差。

为进一步验证 N_2 与 NEG 薄膜的反应过程, 计划下一步进行关于充气保护实验的原位 X 射线光电子能谱 (XPS) 表征, 以监测 NEG 薄膜激活后在充入 N_2 前后表面化学状态变化, 进一步探讨 N_2 与 NEG 薄膜的反应机理。

3 结论

本文从 HALF 工程实际应用需求出发, 通过充入 Ne 气来确定其对 NEG 薄膜真空性能的保护效果, 同时进行充 N_2 对比实验。在充入 Ne 气或 N_2 后且离子泵处于连通状态, $p_{\text{NEG}}(\text{Ne}) = 1.80 \times 10^{-8} \text{ Pa}$, $p_{\text{NEG}}(\text{N}_2) = 3.25 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ 。在 HALF 储存环实际运行中, 电子储存环静态真空度应低于 $2.00 \times 10^{-8} \text{ Pa}$, 因此可初步说明充入 Ne 气在不激活的前提下就能满足静态真空度要求从而延长薄膜使用寿命和节省时间, 相反 N_2 不能满足静态真空度要求。两者关阀后, 极限真空度均上升一个量级, $p_{\text{NEG}}(\text{Ne}) = 1.08 \times 10^{-7} \text{ Pa}$, $p_{\text{NEG}}(\text{N}_2) = 2.37 \times 10^{-7} \text{ Pa}$, 对比之下充入 Ne 气较 N_2 真空度好 2.2 倍左右, 证明在 Ne 气下保护效果更好。在 150°C 低温激活 24 h 后且离子泵处于连通状态, $p_{\text{NEG}}(\text{Ne}) = 1.48 \times 10^{-8} \text{ Pa}$, $p_{\text{NEG}}(\text{N}_2) = 1.88 \times 10^{-8} \text{ Pa}$, 说明低温激活后两者均满足静态真空度要求, 但充入 Ne 气较 N_2 真空度更好。当再次关阀后, $p_{\text{NEG}}(\text{Ne}) = 1.64 \times 10^{-8} \text{ Pa}$, $p_{\text{NEG}}(\text{N}_2) = 2.42 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ 。关阀前后 $\Delta p_{\text{NEG}}(\text{Ne}) = 1.6 \times 10^{-9} \text{ Pa}$, $\Delta p_{\text{NEG}}(\text{N}_2) = 5.4 \times 10^{-9} \text{ Pa}$, 说明 N_2 作用下薄膜损失性能更大。在低温激活后, 薄膜均能恢复一定活性, 但在 Ne 气的保护下真空度恢复效果更好, 再次验证了 Ne 气能更大程度保护薄膜的活性。通过对残余气体的分析, 发现低温激活前后 Ne 的含量均极低, 占比分别为 1.447% 和 0.645%, 对束流的稳定性不会产生影响, 进一步证明了充入 Ne 气的可行性。

对比充入 30 min 和 4 h 的 N_2 后真空度变化发现, 在充气时间更长的情况下, 真空度更差, 说明薄膜性能进一步遭受损伤, 原因可能是较长时间后 N_2 与 NEG 薄膜发生一定不可逆反应, 而这需要进一步实验验证。

致谢

感谢青年创新促进会对本项目提供的资金资助。

参 考 文 献

- [1] Sun Z B, Shang L, Shang F L, et al. Simulation study of

- longitudinal injection scheme for HALS with a higher harmonic cavity system[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2019, 30(07): 21–26
- [2] Benvenuti C, Chiggiato P, Cicaira F, et al. Decreasing surface outgassing by thin film getter coatings[J]. *Vacuum*, 1998, 50(1): 57–63
- [3] Benvenuti C, Chiggiato P, Cicaira F, et al. Nonevaporable getter films for ultrahigh vacuum applications[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1998, 16(1): 148–154
- [4] Malyshev O B, Middleman K J, Colligon J S, et al. Activation and measurement of nonevaporable getter films[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2009, 27(2): 321–327
- [5] Collins I R, Ruzinov V L, Malyshev O B, et al. A photodesorption study of a TiZrV coated stainless steel vacuum chamber[J]. *Proceedings of EPAC 2002*, 2002: 2550–2553
- [6] Malyshev O B, Smith A P, Valizadeh A, et al. Electron stimulated desorption from bare and nonevaporable getter coated stainless steels[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2010, 28(5): 1215–1225
- [7] Malyshev O B, Valizadeh R, Hogan B T, et al. Electron stimulated desorption from polished and vacuum fired 316LN stainless steel coated with Ti-Zr-Hf-V[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2014, 32(6): 061601
- [8] Pimpec F Le, Kirby R E, King F K, et al. Properties of TiN and TiZrV thin film as a remedy against electron cloud[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2005, 551(2): 187–199
- [9] Pimpec F Le, Kirby R E, King F K, et al. Electron conditioning of technical aluminium surfaces: Effect on the secondary electron yield[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 2005, 23(6): 1610–1618
- [10] Li C C, Huang J L, Lin R J, et al. Activation characterization of non-evaporable Ti–Zr–Vr films by synchrotron radiation photoemission spectroscopy[J]. *Thin Solid Films*, 2009, 517(20): 5876–5880
- [11] Zhu Bangle. Study on vacuum properties and electrical conductivity of NEG films[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022 (朱邦乐. NEG薄膜的真空性能和导电特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022(in chinese))
- [12] Grabski M, Al-Dmour E. Commissioning and operation status of the MAX IV 3 GeV storage ring vacuum system[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2021, 28(3): 718–731
- [13] Bregliozzi G. Neon venting of activated NEG beam pipes in the CERN LHC long straight sections without losing vacuum performance[J]. 2010
- [14] Yang Y C, Duan H C, Huang T, et al. Neon venting of activated NEG-coated beam pipes in IHEP[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2022, 6: 479–483
- [15] Baglin V, Bregliozzi G, Calejari D, et al. The LHC experimental beam pipe neon venting, pumping and conditioning[C]. *IPAC 2011 - 2nd International Particle Accelerator Conference*
- [16] Abboud Z, Moutanabbir O. Temperature-dependent in situ studies of volatile molecule trapping in low temperature-activated Zr alloy-based getters[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2017, 121(6): 3381–3396