



·粒子束及加速器技术·

NEG 镀膜真空盒在线激活的初步研究^{*}

马文静¹, 赵 壮¹, 张善才¹, 王思慧¹, 洪远志¹, 范 乐¹, 王成宏¹, 尉 伟²

(1. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 合肥 230029; 2. 深圳综合粒子设施研究院, 广东 深圳 518107)

摘 要: 合肥先进光源 (HALF) 是一台正在规划中的衍射极限同步辐射光源, 其紧凑的物理设计和小孔径磁铁导致传统离散分布的真空泵系统很难达到衍射极限储存环所需的超高真空环境。镀有 NEG (Non-Evaporable Getter) 薄膜的小孔径真空盒不仅节约空间, 还具有分布式吸气的能力, 能满足衍射极限装置对超高真空的需求。NEG 膜层需要在一定温度下激活才能具有吸气作用, 因此在满足其他部件安全的前提下, 它的激活方法与工艺十分重要。本文通过建立在线激活 NEG 薄膜的温度分析模型, 模拟在加热温度为 180 °C 和 200 °C 情况下的 NEG 镀膜真空盒及磁铁的温度分布; 采用聚酰亚胺加热膜缠绕管道的加热方式对管道的在线激活工艺进行初步研究, 完成银铜 (OFS) 真空管在线激活时的温度测量, 测得磁铁最高温度保持在 40 °C 左右, 验证了 NEG 镀膜真空管在线激活时四极磁铁的安全性。此研究为合肥先进光源 NEG 镀膜真空盒在线激活提供了解决方案和工作基础。

关键词: 衍射极限装置; 超高真空; 小孔径; NEG 镀膜真空盒; NEG 激活

中图分类号: TL76

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220030

Preliminary study on in-situ activation of NEG coated vacuum chamber

Ma Wenjing¹, Zhao Zhuang¹, Zhang Shancai¹, Wang Sihui¹, Hong Yuanzhi¹,
Fan Le¹, Wang Chenghong¹, Wei Wei²

(1. National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Institute of Advanced Science Facilities, Shenzhen 518107, China)

Abstract: The Hefei Advanced Light Facility (HALF), which includes an injector and a Diffraction Limited Storage Ring (DLSR), needs ultrahigh vacuum environment to satisfy the lifetime of beam. The small-diameter vacuum chamber coated with NEG (Non-Evaporable Getter) not only saves space, but also has a high pumping speed, which can well meet the demand of obtaining ultra-high vacuum in diffraction-limited devices. The NEG films need to be activated at a certain temperature to get the pumping speed. Therefore, the NEG film activation method and process is important to ensure the safety of the other system components, such as the magnets. Based on the appropriate activation temperature of the coated NEG films, a temperature analysis model was applied to simulate the temperature distribution of the NEG coated vacuum chamber and the magnet during in-situ activation at the temperatures of 180 °C and 200 °C, respectively. The oxygen-free silver bearing copper (OFS) vacuum tubes were baked out by polyimide (PI) heaters and the temperature of the tube and the magnet pole was measured. The maximum temperature measured at the magnet pole was about 40 °C, which confirmed the safety of the quadrupole magnet. This work will be a solution and basis of in-situ activation of the NEG-coated vacuum chamber in the Hefei Advanced Light Facility.

Key words: diffraction limited storage ring, ultrahigh vacuum, small diameter, the NEG coated vacuum chamber, in-situ activation

在粒子加速器中, 为了提高束流寿命, 需要尽量减少束流与残余气体碰撞造成的损失, 因此束流必须运行在超高真空环境^[1]。为满足加速器储存环真空室中所需的清洁超高真空环境, 需要高效的超高真空排气系统。在衍射

* 收稿日期: 2022-01-19; 修订日期: 2022-05-25
基金项目: 国家自然科学基金项目 (12175225)
联系方式: 马文静, mawenjing@mail.ustc.edu.cn。
通信作者: 王思慧, sihui@ustc.edu.cn;
尉 伟, weiwei@mail.iasf.ac.cn。

极限储存环(Diffraction Limited Storage Ring: DLSR)中, 紧凑的物理结构设计及相应的小孔径磁铁, 将真空室的内孔孔径限制在 20~30 mm。由于细长管道分子流的流导正比于真空室直径的 3 次方, 因此衍射极限真空室孔径的减小会造成流导的降低, 使得通过传统离散分布的真空泵系统获得超高真空极为困难^[2]。目前国内外衍射极限装置获取超高真空的方式主要有两种, 一是沿用第三代同步辐射光源的侧腔真空盒(antechamber)结构, 如 ESRF-EBS^[3], 二是在真空管道内壁镀非蒸发吸气剂薄膜(Non-Evaporable Getter: NEG)^[4-5], 如瑞典 MAXIV^[6]、巴西 SIRIUS 光源^[7]和中国北京高能所 HEPS 光源^[8-9]。

NEG 薄膜可吸附真空系统内的活性气体(即碰撞在其表面的残余气体分子, 尤其是氧气), 以维持真空室内的超高真空。NEG 膜必须在一定温度下通过热处理过程清除表面存在的氧化膜以得到清洁有效的活性表面, 即 NEG 薄膜的活化过程^[10-13]。由于合肥先进光源中磁铁极头与真空室之间的间距只有 1 mm, 同时磁铁的最高耐受温度有一定限制(容许工作温度 80~100 °C), 因此 NEG 膜层的激活是其应用的一个关键工艺步骤, 要求在能获得 NEG 激活温度的同时不会造成其他系统部件(如磁铁、支撑)的损坏^[12]。

作为首台使用 NEG 镀膜真空室的衍射极限光源, MAX IV 中 NEG 膜的激活采用整体分离式, 具体过程是将磁铁与真空室安装就位后, 用强力支撑将真空室整体吊出磁铁区域后, 在保温罩中进行 24 h 的 180 °C 烘烤以完成 NEG 激活^[6, 13]。此方案的优点是在激活过程中可有效防止高温对磁铁部件的影响, 并能有效控制真空室由于温度变化造成的热膨胀影响; 缺点是整体结构复杂, 需要增加额外的强力支撑及举升装置, 安装效率较低, 同时在运行期间的故障处理时所需要的时间较长。其他衍射极限装置中还有采用将真空管道外壁贴加热薄膜(SIRIUS)^[7, 14]、增加加热管(HEPS)^[8-9]的方法, 并在真空室安装到位后进行在线激活, 此方法的优点是结构相对简单、易于实现, 但却面临着加热薄膜受热后粘在真空管道外壁不易更换、加热管的增加受到紧凑空间限制的问题。

合肥先进光源(Hefei Advanced Light Facility: HALF)是正在建设规划中的一台衍射极限装置, 束流能量为 2.2 GeV, 自然发射度为 85 pm·rad, 其中 NEG 镀膜已经进行了大量的研究工作, 获得了激活温度低于 180 °C、极限真空好于 2×10^{-8} Pa、薄膜 CO 吸附系数约为 0.1 的 NEG 镀膜银铜(OFS)真空管, 且超高真空维持时间已经超过 12 个月^[15-16]。为满足 HALF 工程的设计和应用要求, 需要对 NEG 真空盒的安装、激活方式及其对真空系统中其他部件的影响进行详细的研究和实验测试。从简化安装设备和工艺, 利于后期装置运行维护的角度出发, 选择在线激活方式对真空盒内壁镀有的 NEG 薄膜进行激活。本文利用 ANSYS 软件建立了温度分析模型, 在激活温度为 180, 200 °C 的情况下对真空盒及磁铁温度分布进行模拟; 搭建了激活温度实验系统, 对管道进行在线激活工艺初步研究, 并完成了银铜(OFS)真空管在线激活时的温度测量。

1 四极磁铁有限元模拟

为模拟 NEG 薄膜在线激活的真实工作状态, 我们建立了真空盒及磁铁结构的模型, 对在线激活时真空盒和四极磁铁的温度进行有限元分析, 从而评估在线激活方式对磁铁正常工作的影响。

采用有限元分析软件 ANSYS 进行数值模拟。取四极磁铁、真空管整体为分析对象, 忽略四极磁铁上线圈、水管等其他部件对仿真结果的影响, 管道外包装 7 层镀铝聚酰亚胺(PI)薄膜作为保温, 简化模型如图 1(a)所示。模型网格自动划分, 为提高计算精度, 对磁铁极头处、真空管及管道外 PI 膜的网格进行细化, 设置网格尺寸为 2 mm。四极磁铁极头与空气、管道外 PI 膜表面与空气接触的部分为对流换热, 设置空气对流边界条件; 管道表面设置温度边界条件, 温度为 180 °C; 外层 PI 膜与四极磁铁之间还存在辐射换热, 设置热辐射为面对面辐射, 热辐射系数取 1。各材料热传导系数如表 1 所示, 其中为简化计算, 磁铁热传导系数参考铁芯部分, OFS 管道热传导系数参考 TU1 无氧铜。

管道温度为 180 °C 时, 仿真获得四极磁铁温度分布如图 1(b)所示, 磁铁的最高温度为 37.6 °C, 位于磁铁极头处, 远低于磁铁的容许工作温度(80~100 °C)。四极磁铁温度分布不均匀是由于四极磁铁与底座接触的面无空气对流换热。

考虑由于管道表面温度的不均匀性而存在的局部温度较高情况, 当全管温度为 200 °C 时, 仿真获得四极磁铁温度分布如图 1(c)所示, 磁铁极头最高温度为 40.5 °C, 仍远低于磁铁的容许工作温度。实际工程中在空间尺寸限制允许的情况下, 拟适当增加裹膜层数以达到增强隔热的效果。对包裹 12 层镀铝 PI 薄膜管道温度为 180 °C 时, 仿真获得四极磁铁温度分布如图 1(d)所示, 磁铁极头最高温度为 35.0 °C。

考虑到实际安装可能存在偏差, 对真空管在不同的偏心放置时四极磁铁的温度分布进行仿真分析。保持其他

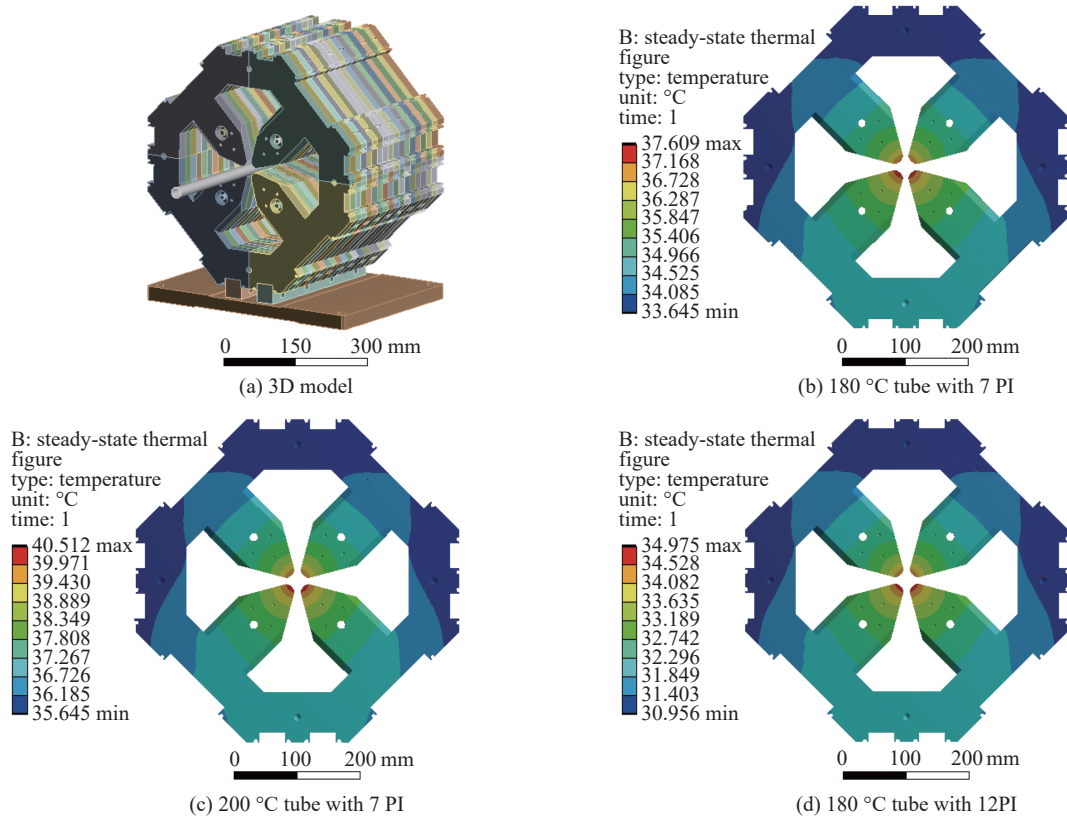


Fig. 1 Vacuum tube with magnet model and FEA temperature map

图 1 真空管磁铁结构模型及模拟温度云图

条件不变,模拟包裹 7 层镀铝 PI 薄膜管道温度为 180 °C,真空管沿重力方向分别偏心 0.1~0.8 mm 时,磁极最高温度的变化如图 2 所示。真空管偏心 0.1~0.6 mm 时,随着真空管偏心量增大,磁极的最高温度略有升高,但仍低于磁铁的容许工作温度。真空管偏心 0.7 mm 时,磁极最高温度开始超出磁铁容许工作温度范围。因此,实际安装过程中需精确定位,真空管的偏心量不得超过 0.7 mm。

2 真空盒及磁铁极头温度测量

2.1 NEG 在线激活温度实验装置

为校核温度分布的模拟仿真,搭建了 NEG 在线激活温度实验系统,利用已有磁铁及 OFS 管进行了模拟激活过程中的温度测试,系统由 OFS 银铜管、小孔径四极磁铁、加热元件、测温元件组成,如图 3(a)所示。为达成在小孔径磁铁内部管道的加热,采用薄型的加热元件及保温材料。其中真空盒的加热部件选用厚度为 0.2 mm 的聚酰亚胺(PI)电阻加热膜,真空盒外缠绕的保温材料为航天工程中采用的厚度为 25 μm 的双面镀铝聚酰亚胺(PI)薄膜。

其中小孔径磁铁为合肥光源预研工程中制作的孔径为 26 mm、有效长度为 344 mm 的四极磁铁;OFS 银铜管外径 24 mm,壁厚 1 mm,长 1.5 m;四条 PI 电阻加热膜紧密缠绕(不重叠)在银铜管的中间部分构成加热区(图 3(c)),并分别用 7 层和 12 层镀铝 PI 薄膜均匀包裹管道加热区以达到保温及隔热效果;管道两端的非加热部分用 3 层铝箔包裹,减少不必要的热量散失。如图 3(b)所示,调整支撑使测试管道处于四极磁铁极头中心处,与四极磁铁四个

表 1 材料热传导系数

material	thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)
air	5×10 ⁻³
magnet	20
OFS	391
PI	0.31

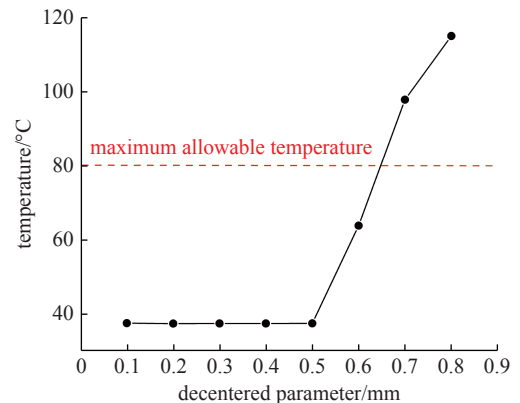


Fig. 2 Maximum temperature of quadrupole magnet changes with different decentered parameter

图 2 真空管位于不同偏心位置时四极磁铁最高温度的变化

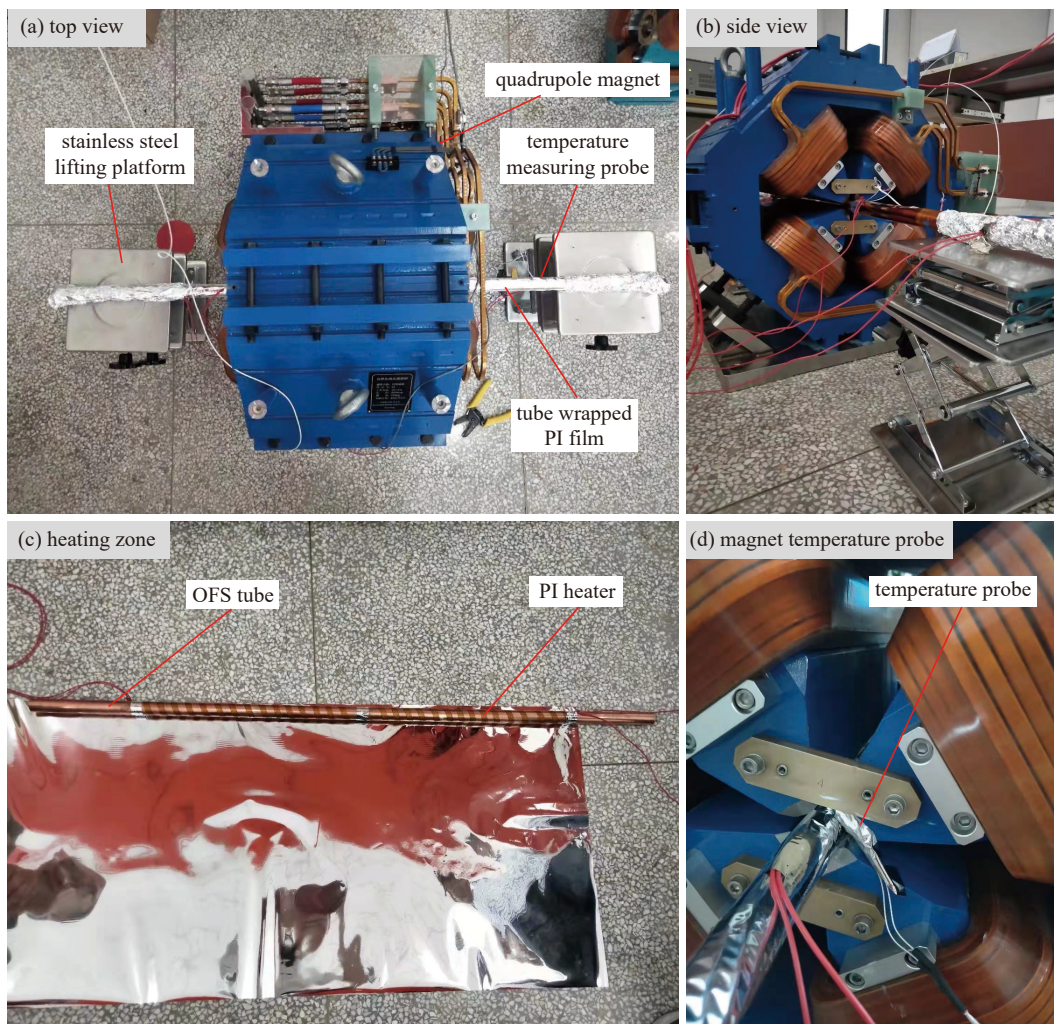


Fig.3 NEG activation temperature experiment system

图 3 NEG 在线激活温度实验系统

极头保持等间距。三个温度探头分别置于管道加热区、四极磁铁极头处(图 3(d))及空气中,用于测量管道表面、磁铁极头温度及室温。

通过计算实验中的加热功率与银铜管道缠绕加热带的长度的比值,得到将包裹 7 层镀铝 PI 薄膜的 OFS 管道加热至不同温度所需的单位功率密度(表 2)。表 2 为加热元件的选型和实验过程中的管道温控提供了依据,可以作为 HALF 真空系统设计工作的基础。

表 2 银铜管(包裹 7 层镀铝 PI 薄膜)加热功率表

Table 2 Heating power of OFS tube

OFS temperature/°C	magnet temperature/°C	power/W	power density/(W·cm ⁻¹)
132.4	35.0	120.7	1.4
167.1	39.4	166.6	1.9
180.0	38.9	193.8	2.2
207.5	40.7	226.5	2.6

2.2 NEG 在线激活温度实验结果与讨论

2.2.1 长磁铁内部真空管道的在线激活

通过 NEG 在线激活温度实验系统对长磁铁(纵向长度大于 200 mm)内部的银铜管道进行加热,并记录过程中管道(OFS)、磁铁极头(Magnet)温度及室温(R.T.)随时间的变化,如图 4 所示。

银铜管道温度分别为 180, 200 °C 时,实验数据与仿真数据如表 3 所示。从中可知,实验测量结果与仿真接近,

当银铜管道外裹 7 层 PI 薄膜, 在管温为 180 °C 时, 实测磁铁极头温度为 38.7 °C; 在管温为 200 °C 时, 实测磁铁极头温度为 41.3 °C, 均能保证磁铁在铜管加热过程中不受损害。

增加镀铝聚酰亚胺保温膜层数, 可有效降低磁铁极头处的温度。当管温 180 °C 时, 模拟和实验测得包裹 12 层镀铝 PI 薄膜管道外的磁铁极头的温度分别为 35.0, 36.2 °C, 同比包裹 7 层镀铝 PI 薄膜管道外的磁铁极头温度降低 6.5%。多次实验中, 极头温度测量值会有偏差, 偏差范围在 ±1 °C 范围内, 判断是由安装误差、环境温度变化、空调温度、周边人员等引起。

由此我们得到了 NEG 镀膜管道的激活工艺方案, 即对于长磁铁 (纵向长度大于 200 mm) 内部的 NEG 镀膜真空管道, 可采用加热膜缠绕银铜管道并包裹 PI 保温膜, 进入磁铁内部的方式进行在线激活, 即在真空管道的表面均匀地施加加热功率, 得到均匀的管道表面温度。

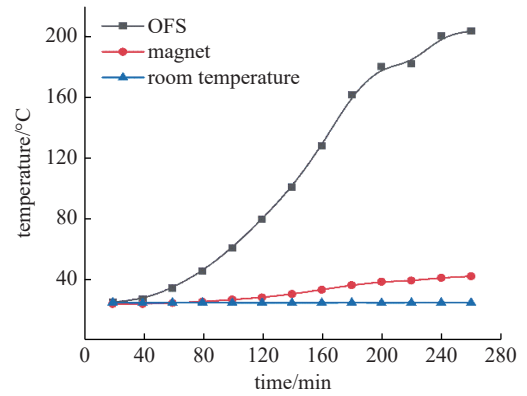


Fig. 4 Diagram of temperature change during heating of NEG activation experiment system

图 4 NEG 激活实验系统加热过程中温度变化图

表 3 铜管与四极磁铁温度

Table 3 Temperature of quadrupole magnet and OFS tube

No.	room temperature/°C	measure temperature/°C	FEA temperature/°C
1	24.8	38.7	37.6
2	24.8	41.3	40.5
3	24.8	36.2	35.0

2.2.2 短磁铁内部真空管道的在线激活

为降低安装调试工作量, 增强可靠性, 对于短磁铁 (纵向长度小于 150~200 mm), 拟采用热传导方式进行在线激活。将加热膜平整地缠绕在磁铁外部两端真空管道, 通过热传导的方式实现整个真空管的在线激活。仿真结果如图 5 所示, 将管道两端加热至 180 °C, 管道中部最低温度为 172.0 °C; 继续升温至 200 °C, 管道中部最低温度为 190.4 °C。对此种方案, 我们也进行了实验, 采用 OFS 银铜管外径 24 mm, 壁厚 1 mm, 长度 500 mm 的真空管, 其两端缠绕加热膜的管道长度为 200 mm, 实测结果表明当短磁铁外部两端银铜管道温度 180 °C 时, 真空管总平均温度为 178.9 °C, 磁铁中心银铜管 (未缠绕加热带处) 的温度可保持在 160 °C 以上, 也满足我们实验制作的 NEG 管道的最低激活温度要求^[17]。

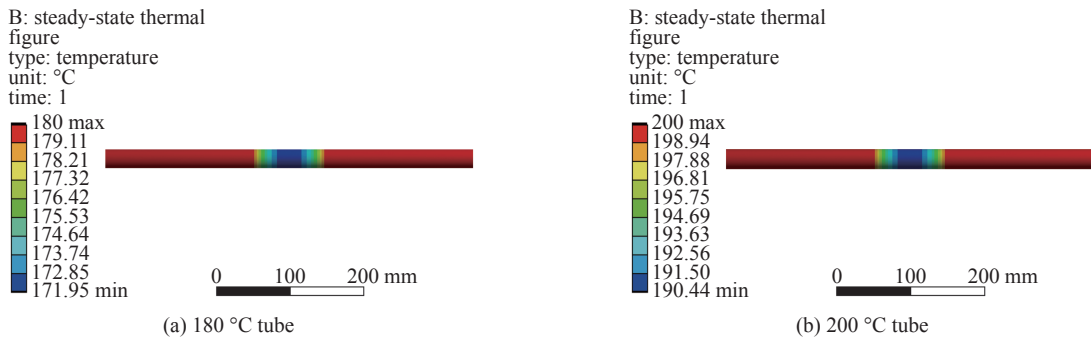


Fig. 5 FEA temperature map of OFS tube inside the short magnet

图 5 短磁铁内部银铜管道加热温度云图

3 结 论

本文研究了一种 NEG 镀膜真空盒在线激活工艺, 通过在真空管外壁缠绕聚酰亚胺电阻加热膜的方式实现在线激活过程中的管道升温, 与现有的激活方案相比, 具有结构简单、操作方便、节约空间以及受损易更换的优点。基于有限元分析方法建立温度分析模型, 模拟在加热温度为 180, 200 °C 情况下对 NEG 薄膜进行在线激活时的真空盒及磁铁的温度分布, 结果表明银铜管道达到指定激活温度 180 °C 时, 四极磁铁极头的温度低于其容许工作温

度 80~100 °C。基于仿真结果设计搭建 NEG 激活温度实验系统,对银铜(OFS)管道、四极磁铁极头温度进行实际测量。通过实验主要得出以下几个结论:(1)当银铜管道温度为 180~200 °C 时,四极磁铁极头的温度保持在 40 °C 左右,在其安全区间内,实验结果与仿真结果具有良好的一致性,验证了在线激活方式的可行性和磁铁的安全性;(2)增加在线激活时真空管道外的 PI 保温膜层数可有效降低磁铁极头的温度,管温 180 °C 情况下,包裹 12 层镀铝 PI 薄膜管道外的磁铁极头温度同比包裹 7 层镀铝 PI 薄膜降低 6.5%;(3)在管道两端加热温度为 180 °C 时,采用热传导方式进行在线激活的短磁铁内部真空管的全管温度均可达到激活要求。

本文研究的 NEG 镀膜真空管的在线激活工艺,为 HALF 超高真空的获得提供了实现路径和技术支持。后续研究工作将进一步贴近实际工况,对不同磁铁间隙、保温膜层材料的优化等方面开展进一步的研究。

参考文献:

- [1] 徐宏亮,张剑锋,黄贵荣,等.合肥储存环电子束流寿命分析[J].强激光与粒子束,2006,18(3):455-458.(Xu Hongliang, Zhang Jianfeng, Huang Guirong, et al. Analysis of beam lifetime in Hefei storage ring[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(3): 455-458)
- [2] Al-Dmour E, Ahlback J, Einfeld D, et al. Diffraction-limited storage-ring vacuum technology[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2014, 21: 878-883.
- [3] Sergei G. Lessons learned from the ESRF magnets and vacuum chamber assembling[C]//Beam Tests and Commissioning of Low Emittance Storage Rings. 2019.
- [4] Yang Yuchen, Ma Yongsheng, Wang Jia'ou, et al. Activation of Zr, ZrVHf and TiZrV non-evaporative getters characterized by in situ synchrotron radiation photoemission spectroscopy[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11: 4844.
- [5] Chuntunov K, Setina J, Douglass G. The newest getter technologies: materials, processes, equipment[J]. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 2015, 3(9): 57-67.
- [6] 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.
- [7] Rocha T. The vacuum system of the upcoming SIRIUS light source in Brazil[C]//Beam Dynamics Meets Vacuum, Collimations and Surfaces. 2017.
- [8] He Ping, Guo Dizhou, Liu Baiqi, et al. Deposition of non-evaporative getters R&D activity for HEPS-TF[C]//Proceedings of 2nd North American Particle Accelerator Conference. 2016.
- [9] He Ping, Ma Yongsheng, Yang Yuchen, et al. Preparation and characterization of non-evaporable Ti-Zr-V getter films for HEPS[C]//Proceedings of the 60th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Future Light Sources. 2018.
- [10] 颜攀,韩兴博,冷海燕,等.非蒸散型吸气剂的研究进展[J].真空科学与技术学报,2018,38(8):650-656.(Yan Pan, Han Xingbo, Leng Haiyan, et al. Latest development of non-evaporable getter materials[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2018, 38(8): 650-656)
- [11] 张波,尉伟,范乐,等. TiZrV吸气剂薄膜吸气性能的研究[J].真空科学与技术学报,2012,32(2):114-117.(Zhang Bo, Wei Wei, Fan Le, et al. Development and characterization of TiZrV getter films[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2012, 32(2): 114-117)
- [12] Prodromides A E, Scheuerlein C, Taborelli M. Lowering the activation temperature of TiZrV non-evaporable getter films[J]. *Vacuum*, 2001, 60(1/2): 35-41.
- [13] Al-Dmour E, Einfeld D, Pasquaud J, et al. Vacuum system design for the MAX IV 3 GeV ring[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Particle Accelerator. 2011.
- [14] Paolo C. The septum magnet vacuum chambers of the LHC: production procedure and vacuum characterization of the first prototypes[C]//The 9th European Vacuum Conference. 2005.
- [15] Zhu Bangle, Ge Xiaoqin, Wang Sihui, et al. Activation and pumping characteristics of Ti-Zr-V films deposited on narrow tubeds[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2021, 32: 50.
- [16] 张波,王勇,尉伟,等.直流磁控溅射法在管道内壁镀TiZrV薄膜[J].强激光与粒子束,2010,22(9):2124-2128.(Zhang Bo, Wang Yong, Wei Wei, et al. Deposition of TiZrV coatings onto inner wall of stainless steel pipe by DC magnetron sputtering[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(9): 2124-2128)
- [17] Wang Sihui, Wang Zhiwei, Shu Xin, et al. Activation characterization of the Ti-Zr-V getter films deposited by magnetron sputtering[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 528: 147059.