

文章编号: 1007-4627(2017)04-0740-05

放射性次级束流分离器真空系统的压力分布

王嘉琛^{1,2}, 李朋¹, 杨建成^{1,†}, 柴振¹, 蒙峻¹, 吴波^{1,2}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 放射性次级束流分离器是强流重离子加速器装置中, 连接增强器和高精度环形谱仪的束流输运线, 用于传输重离子束流以及放射性次级束流。为了满足束流传输的要求, 并维持相连增强器和高精度环形谱仪的极高真空, 放射性次级束流分离器真空系统的平均压强应低于 5×10^{-7} Pa。因此, 需要验证真空系统设计方案的可行性, 以及设计方案能否满足要求的压强范围。通过现有的同步储存环 CSRm 中的真空计监测数据以及软件 BOLIDE 的模拟结果对比, 对真空压力计算软件 VAKTRAK 的使用方法和计算结果进行验证; 采用 VAKTRAK 模拟计算不同真空参数下(流导、出气率以及泵速)放射性次级束流分离器真空系统的压力分布。根据计算结果, 放射性次级束流分离器真空系统的平均压强可以达到 1.79×10^{-7} Pa(H₂), 满足物理实验和工程设计的要求。通过模拟计算结果, 放射性次级束流分离器真空系统的设计方案的可行性得到验证, 系统设计的真空度满足要求。

关键词: 真空压力分布; 放射性次级束流线; 超高真空系统

中图分类号: TB7; TL50 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.04.740

1 引言

放射性次级束流分离器(HFRS)是强流重离子加速器装置(HIAF)中连接增强器(BRing)和高精度环形谱仪(SRing)的束运线, 也是开展放射性次级物理研究的重要装置。在离子加速器中, 获得超高空的作用是减少束流与残余气体碰撞对束流寿命造成的损失^[1], 从而满足物理实验的要求。从BRing引出的束流在HFRS中只是一次性通过, 直接传输到SRing中, 因此束流与残余气体的碰撞对束流寿命的影响较小, 系统的真空度低于 5×10^{-7} Pa即可满足束流寿命的要求。

HIAF, 是“十二五”期间由中国科学院近代物理研究所提出建造的新一代重大科技基础设施, 致力于开展核物理、核天体物理、原子分子物理、以及应用物理等研究^[2]。HIAF主要由超导电子回旋共振(ECR)离子源、超导重离子直线加速器(iLinac), BRing, HFRS, SRing及各实验终端组成。图1为HIAF总体布局。

其中, HFRS由预分离器和主分离器组成, 采用 $B\rho\text{-}\Delta E\text{-}B\rho$ 方法分离及纯化弹核碎裂反应和裂变反应产生的奇异粒子, 并开展高精度环内实验及环外实验研究。HFRS真空系统全长160 m, 有18台二极管,

11个低温超导磁铁单元以及1个常规磁铁单元, 包含的束诊元件有荧光靶、多丝束流剖面探测器、分条电离室等。HFRS真空系统的布局主要受到磁铁元件和束诊元件位置的限制, 如图2所示, 其中压力传感器将在局部真空压力高于设定的压力阈值时关闭快关阀, 以实现连锁保护。对于要求的超高真空, HFRS真空系统采用分子泵和离子泵实现。

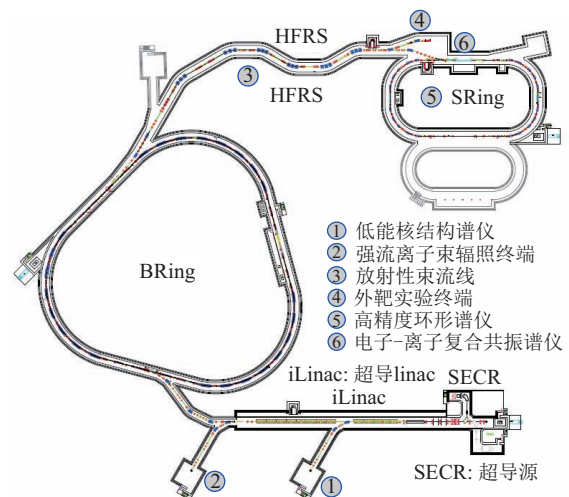


图 1 (在线彩图) HIAF 总体布局

收稿日期: 2017-01-10; 修改日期: 2017-02-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11675235)

作者简介: 王嘉琛(1992-), 男, 辽宁大连人, 学生, 硕士, 从事加速器物理研究; E-mail: wangjiachen@impcas.ac.cn

† 通信作者: 杨建成, E-mail: yangjch@impcas.ac.cn.

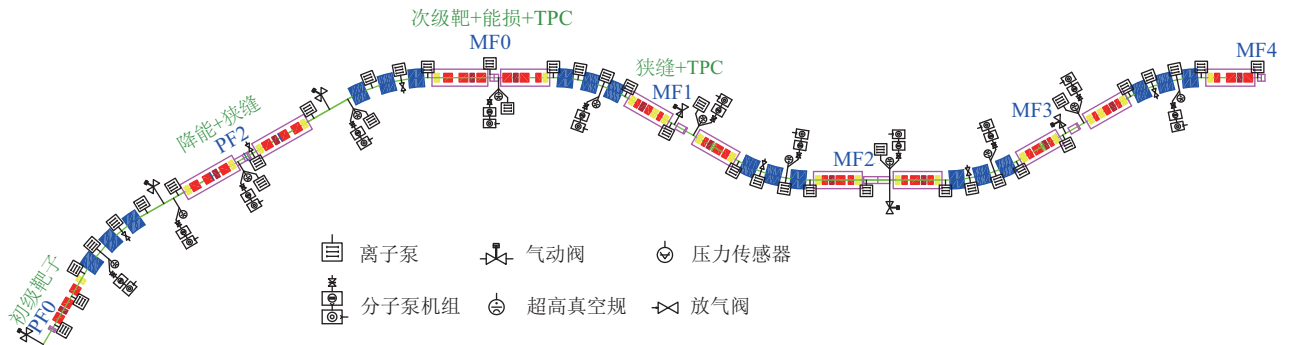


图 2 (在线彩图) HFRS 真空系统布局

HFRS 系统的真空室材料不仅需要满足真空度的要求，还必须满足磁场的要求，所以选用不锈钢材料。对于烘烤段法兰，需要承受 250~300 °C 高温的反复烘烤^[3]，所以选用 316LN 不锈钢材料；对于波纹管，则选用 0.3~0.4 mm 的 316L 超薄板来制作。HFRS 真空系统不需要在线烘烤，要求的超高真空通过溅射离子泵实现，全线系统共配备 39 台工作压强在 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ Pa 范围的 600 L/s 溅射离子泵。粗抽机组由涡轮分子泵和无油干泵组成，分别采用抽速为 500~700 L/s 的陶瓷轴承涡轮分子泵和抽速约为 4 L/s 的干泵，共安装 12 套分子泵粗抽机组。全线采用 6 套一拖二全量程真空计，共 12 只规管，测量范围 $5 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^5$ Pa。真空隔断阀门采用橡胶密封超高真空插板阀，漏率 1×10^{-8} Pa·L/s。全系统共使用 6 台气动阀门分别置于各隔段，另外 12 台 CF150 手动插板阀安装在分子泵口，与主系统隔开。放气阀门采用全金属密封角阀，全线安装 6 只放气阀，分别置于各隔段。采用高灵敏度检漏仪(最小可检漏率 1×10^{-9} Pa·L/s) 分别对零件、部件及系统检漏。

2 研究方法介绍

VAKTRAK^[4] 由斯坦福大学直线加速器中心的 Volker Ziemann 提出，并逐渐成为离子加速器真空系统设计的基础软件。VAKTRAK 软件通过对长距离管状真空系统建立传输矩阵模型，准确、快速地对分子流条件下的气体分子传输，并根据边界条件计算出纵向压强的分布曲线。分子流条件下，计算纵向压力分布采用的是如下线性微分方程：

$$c \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} - sP = -q, \quad (1)$$

其中 c 是特定分子流导 (L·m/s)； s 是单位长度下的线性泵速 (L/(s·m))； q 是特定出气率 (Pa·L/(s·m))。线性微分方程可以通过传输矩阵方法求解。根据各种真空元件的特性，计算包含流导、出气率、泵速以及元件长

度等参数的特征矩阵，通过公式分段计算真空系统的压力变化，得到压力分布曲线。实际真空泵的泵速根据真空度的变化而有所不同，VAKTRAK 软件也考虑了泵的抽速曲线^[5]。VAKTRAK 软件对于模拟计算几何形状简单的真空系统相当简便，不仅可以基于 DOS 和 Windows 设计和优化，也可以在 Matlab 环境下即时得到压力分布曲线。

BOLIDE^[6] 是由俄罗斯杜布纳联合核子研究所的 Alexander Smirnov 开发的真空计算软件，被引入 CSRm 中计算压力分布，并与 VAKTRAK 软件的计算结果比对验证。BOLIDE 是根据 VAKDYN^[7] 软件的动态过程，计算最终平衡状态下的静态压力。与 VAKTRAK 软件的短泵(忽略泵的长度)近似不同，BOLIDE 软件的输入文件将所有元件看作真空管道，因此真空泵的长度不能忽略。二者的输入文件中都包含了真空管道的流导，真空管道的流导需要单独计算。重离子加速器一般采用的是矩形管道，在分子流条件下，矩形管道的流导公式如下^[8]：

$$U_f = 3.069K_j \frac{a^2 b^2}{(a+b)L} \sqrt{T/M}, \quad (2)$$

其中 K_j 是形状系数(无量纲)，与管道的尺寸 a/b 相关， a 和 b 分别代表管道的宽度和高度(单位 m)， T 代表气体温度(K)， M 代表分子质量(kg/mol)， U_f 的单位是 m^3/s 。

3 CSRm 中 VAKTRAK 的结果验证

VAKTRAK 软件的使用方法和计算结果，将在现有的超高真空加速器 HIRFL-CSRm 中加以验证。兰州重离子研究装置(HIRFL)^[9] 由主冷却存储环(CSRm)、实验环(CSRe)、2 条放射性次级束线以及 2 个回旋加速器，即扇形聚焦回旋加速器(SFC)和分离扇回旋加速器(SSC)组成。

CSRm 是跑道型同步环，周长为 161 m，由 4 个周期性弧段组成。CSRm 的真空管道一般为矩

形, 经过在线烘烤 (*in situ*), 出气率可达 5×10^{-11} Pa·L/(s·cm²)^[10]。CSRm 真空系统主要由溅射离子泵 (SIP) 和钛升华泵 (TSP) 进行抽气, 钛升华泵的抽速大约为 2000 L/s。表 1 列出了 CSRm 的主要参数^[11]。

表 1 CSRm 主要参数

参数	值
周长/m	161.0014
最大磁刚度/(T/m)	12.04
接受度/(π mm·mrad)	200,30(H,V) $\pm 1.5 \times 10^{-3}$
上升时间/(T/s)	0.05 - 0.4
循环周期/s	17
离子种类	质子~铀
频率范围/MHz	0.24~1.81
真空压强/Pa	$\leq 6.0 \times 10^{-9}$
二极铁孔径/mm ²	156×61
四极铁孔径/mm ²	180×110

CSRm 中的真空管道认为只有四极铁和二极铁 2 种矩形尺寸, 以此简化输入文件中的流导计算, 除二极铁外, 其他元件均认为与四极铁孔径一致。四极铁和二极铁的孔径大小由表 1 列出。CSRm 跑道型结构可以划分为 4 个象限, 分别模拟计算。

图 3 显示的是 CSRm 中真空计的监测数据和模拟软件 (VAKTRAK 和 BOLIDE) 的计算结果。实际监测数据由误差棒表示, 真空计位置的监测数据与 2 款软件计算数据基本一致。图 3 中, 曲线极小值对应的位置为真空泵所在的位置, 由于二极铁真空室的流导较小, 所以二极铁真空室的压力梯度较大, 2 段的真空泵作用受到二极铁长度 (2.9845 m) 限制。2 条曲线 120 m 处出现最大值, 对应于电子冷却段, 此段长度为 4.5 m 但内部无法排泵; 此处 2 条曲线差别较大, 因为 BOLIDE 和 VAKTRAK 对泵长度的考虑不同, 导致电子冷却段的流导出现差别, 所以表现为压强曲线的区别。综上所述, VAKTRAK 软件的计算结果分别得到了实验验证

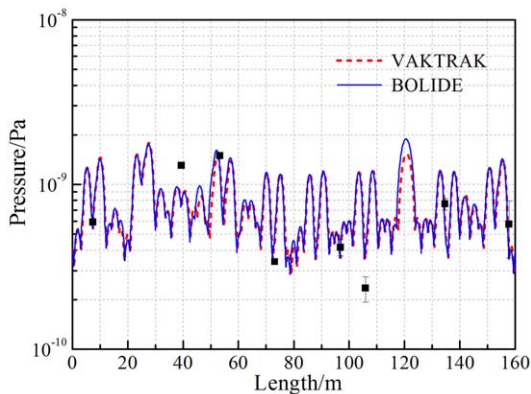


图 3 (在线彩图) CSRm 的计算数据与监测数据比较

和模拟验证, 因此将 VAKTRAK 软件应用于 HFRS 中, 计算不同参数对真空度的影响。

4 不同参数下 HFRS 的压力分布

影响 HFRS 真空压力分布的因素, 主要有真空泵的抽速、管道材料处理后的出气率以及真空室的流导。HFRS 真空系统由溅射离子泵和分子泵机组抽气, 要求的超高真空超出分子泵的作用范围, 所以计算时只需考虑溅射离子泵的抽速。HFRS 的超高真空范围不需要对管道进行在线烘烤, 设计的出气率为 3×10^{-9} Pa·L/(s·cm²), 为了比较出气率的影响, 参考兰州重离子加速器放射性束线 II 的 7×10^{-10} Pa·L/(s·cm²) 出气率进行模拟计算。根据公式 (2), 影响真空室的流导取决于真空管道的横向尺寸和纵向长度, 管道的横向尺寸和长度又由束流传输过程中各种磁元件的接收度来决定, 除此之外, 管道内残余气体的组成和气体温度也会影响流导的数值。HFRS 管道尺寸为 320 mm×120 mm, 残余气体的主要成分有氢气 H₂、一氧化碳 CO 以及甲烷 CH₄。

图 4 显示的是 HFRS 段在 2 种出气率下 3 种不同气体的压力分布, 选用抽速为 600 L/s 的溅射离子泵, 用于抽除甲烷和氩气。VAKTRAK 计算时假设只存在一种气体, 所以分别对 3 种不同分子质量的气体模拟计算。如图所示, 束线两端有一个压强的突变, 该突变由出气率的变化而引起。HFRS 两端相邻的 BRing 引出线和 SRing 注入线, 经过在线烘烤出气率可达 5×10^{-11} Pa·L/(s·cm²), 目的是维持 BRing 和 SRing 的极高真空。同时在接近两环的位置连续安装了多台大抽速的钛升华泵, 以保证环内真空维持稳定。曲线的各个极小值代表 HFRS 真空泵的位置, 根据计算公式, 压强最大值在离泵口最远处, 即两真空泵中间, 所以压力分布呈抛物线型。

如图 4 所示, 由设计的材料出气率 3×10^{-9} Pa·L/(s·cm²) 优化到 7×10^{-10} Pa·L/(s·cm²), 总体的真空压强可以低于 10^{-7} Pa, 甚至 H₂ 的平均压强可以达到 5×10^{-8} Pa。在设计出气率下, CO 的最大压强 4×10^{-7} Pa, 低于设计要求的 5×10^{-7} Pa 的真空范围。HFRS 经过足够长时间的抽气作用, 残余气体绝大部分由 H₂ 占据, 则平均压强可以低于 2×10^{-7} Pa, 远小于设计要求的 5×10^{-7} Pa。

为了衡量泵速对压力分布的影响, 更大的溅射离子泵速 (800 L/s) 和更小的泵速 (400 L/s) 将应用于 VAKTRAK 软件的模拟计算中。由于管道与真空泵的连接处的流导远大于真空泵的泵速, 因此有效泵

速近似等于名义抽速。图 5 所示的是 3 种泵速下 (400, 600, 800 L/s), H₂ 和 CO 的压力分布, 出气率采用的是设计的 3×10^{-9} Pa·L/(s·cm²)。

如图 5 所示, 泵速的改变并不影响真空压力曲线的趋势, 而是整体改变真空分布的水平。相同条件下, H₂

的分子质量远小于 CO 的分子质量, 所以真空室对于 CO 的流导远小于 H₂ 的流导, 对应于压力曲线则是梯度的变化, H₂ 的曲线变化平缓, 而 CO 的曲线起伏较大。

在 HFRS 中, 将泵速由 600 提高到 800 L/s, 对于

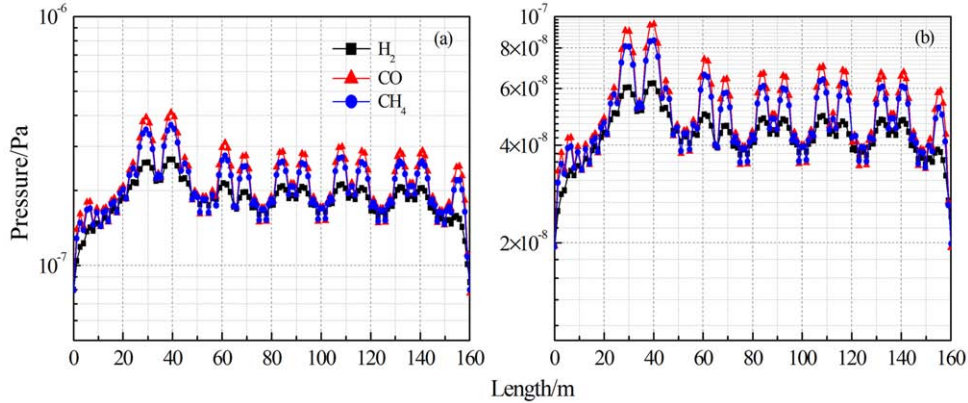


图 4 (在线彩图) 不同出气率下 H₂, CO 以及 CH₄ 的压力分布 (a) 材料出气率为 3×10^{-9} Pa·L/(s·cm²); (b) 材料出气率为 7×10^{-10} Pa·L/(s·cm²)。

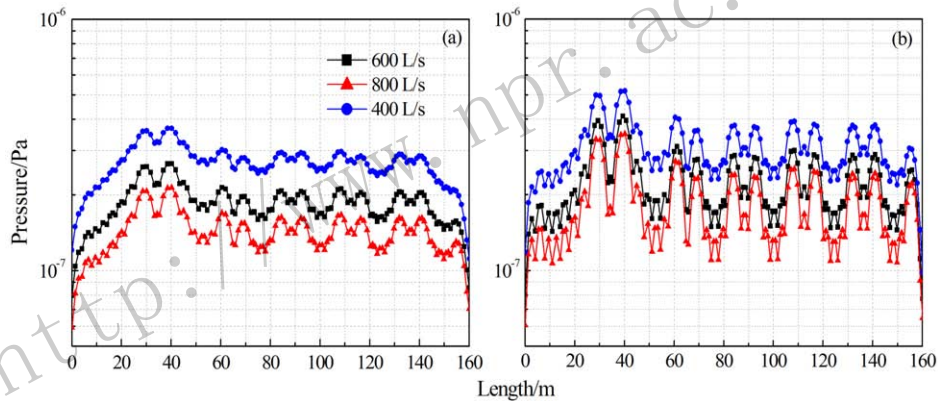


图 5 (在线彩图) 不同出气率下各种气体的压力分布 (a) H₂ 在泵速为 600, 800, 400 L/s 下的压力分布; (b) CO 在泵速为 600, 800, 400 L/s 下的压力分布。

H₂ 和 CO 的平均压强分别降低 23.28% 和 21.23%; 当泵速由 400 提高到 600 L/s 时, 2 种 H₂ 和 CO 的平均压强分别降低 31.22% 和 28.76%。HFRS 平均真空压力随溅射离子泵速变化的曲线如图 6 所示。

5 结论

本文在 CSRm 中验证了 VAKTRAK 软件计算结果的可靠性, 再用于计算 HFRS 的真空压力, 增强了 VAKTRAK 软件模拟计算结果的可信度。计算不同泵速下的压力分布, 表明 HFRS 的真空系统受限于真空室的流导。比较不同参数的计算结果, 选用出气率为 3×10^{-9} Pa·L/(s·cm²) 和泵速为 600 L/s 的方案, 管道内的残余气体经过足够长时间的抽气由 H₂ 主导, 该方案下的平均压强为 1.79×10^{-7} Pa(H₂), 远小于设计要求的 5×10^{-7} Pa, 完全满足 HFRS 真空系统的设计要求。

致谢 感谢俄罗斯杜布纳联合核子研究所的 Alexander Smirnov 博士对我工作的指导和帮助。

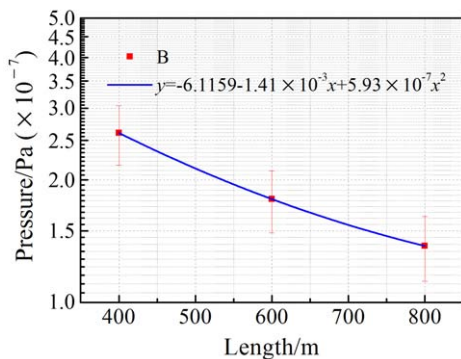


图 6 HFRS 平均真空压力随溅射离子泵速的变化

参考文献:

- [1] RAO Yinong. Lifetime of Ion Beam Stored in HIRFL-CSR[C]. Proceedings of the 14th International Conference on Cyclotrons and their Applications. South Africa, 1995: 358.
- [2] YANG Jiancheng, XIA Jiawen, XIAO Guoqing, *et al.* Nucl Instr Meth B, 2013, **317**: 263.
- [3] ZHANG Junhui, YANG Xiaotian, MENG Jun, *et al.* Vacuum, 2003, **7**(02): 27. (in Chinese)
(张军辉, 杨晓天, 蒙峻, 等. 真空, 2003, **7**(02): 27.)
- [4] ZIEMANN V. SLAC- PUB 5962, Oct. 1992.
- [5] ZHANG Junhui, YANG Xiaotian, MA Xiangli, *et al.* Vacuum and Cryogenics, 2007, **13**(1): 28. (in Chinese)
(张军辉, 杨晓天, 马向利, 等. 真空与低温, 2007, **13**(1): 28.)
- [6] Private communication with Alexander Smirnov.
- [7] ZIEMANN V. Vacuum, 2007, **81**: 866.
- [8] DA Daoan, QIU Jiawen, XIAO Xiangzheng, *et al.* Vacuum Design Manual[M]. 3ed. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 116. (in Chinese)
(达道安, 邱家稳, 肖祥正. 真空设计手册[M]. 第3版. 北京: 国防工业出版社, 1995: 116.)
- [9] ZHAN Wenlong, XIA Jiawen, ZHAO Hongwei, *et al.* Nucl Phys A, 2008, **805**: 533c.
- [10] YANG Xiaotian, ZHANG Junhui, *et al.* Vacuum, 2001, **61**: 55.
- [11] XIA Jiawen, ZHAN Wenlong, WEI Baowen, *et al.* Chinese Physics C, 2009, **33**(8): 804.

Pressure Profiles of HFRS Vacuum System

WANG Jiachen^{1,2}, LI Peng¹, YANG Jiancheng^{1,†}, CHAI Zhen¹, MENG Jun¹, WU Bo^{1,2}

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: HIAF Fragment Separator(HFRS) is connected with Booster Ring(BRing) and Spectrometer Ring(SRing) in the HIAF and used to transfer the ion beams and radioactive secondary beams. To satisfy the requirements of beam transmission and maintain the extremely high vacuum of BRing and SRing, the average pressure of HFRS vacuum system should be lower than 5×10^{-7} Pa. Therefore, the feasibility of the design scheme and whether the design scheme would fulfill the required vacuum range or not should be verified. Based on the measured data on the current synchrotron CSRm and the simulation results of BOLIDE, the calculation results of VAKTRAK are verified and then VAKTRAK is used to calculate the pressure profiles of different parameters(such as the conductance, out-gassing and pumping speed) for HFRS. According to the calculation results, the average pressure of HFRS vacuum system could be 1.79×10^{-7} (H₂) which achieves the required pressure for physics experiments and engineering design. According the calculation results of this paper, the feasibility of the designed HFRS vacuum system has been verified and the design of system satisfies the vacuum requirements.

Key words: pressure profile; radioactive secondary beam line; ultra high vacuum system

Received date: 10 Jan. 2017; Revised date: 15 Feb. 2017

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11675235)

† Corresponding author: YANG Jiancheng, E-mail: yangjch@impcas.ac.cn.