

文章编号: 1007-4627(2019)01-0049-06

BRing中电荷交换引起的束流损失分布模拟计算

董自强^{1,2,3}, 李朋¹, 杨建成^{1,3}, 刘杰^{1,2,3}, 谢文君^{1,3}, 阮爽^{1,3}, 王耿^{1,2,3},
王科栋^{1,2,3}, 姚丽萍^{1,2,3}, 蔡付成^{1,2,3}

1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049;
3. 惠州离子科学研究中心, 广东 惠州 516003)

摘要: 在强流重离子加速器运行中, 带电粒子与真空管道中的残余气体分子相互作用发生的电荷交换反应是影响重离子束流寿命的关键因素。这种电荷交换过程导致的束流损失将解吸出真空管壁上吸附的气体分子, 进而引起真空压力的动态变化, 将严重影响加速器的稳定运行和最终束流引出流强。中国科学院近代物理研究所将在广东省惠州市建造的强流重离子加速器装置(High Intensity heavy-ion Accelerator Facility, 简称HIAF)利用增强器(Booster Ring, 简称BRing)提供束流流强高达 2×10^{11} ppp的 $^{238}\text{U}^{35+}$ 用于核物理及原子物理等实验研究。对强流重离子加速器BRing中 $^{238}\text{U}^{35+}$ 束流发生电荷交换反应, 损失一个电子成为 $^{238}\text{U}^{36+}$ 的过程进行了追踪模拟, 计算得到了 U^{36+} 损失前的运动径迹和全环粒子损失位置分布, 模拟结果显示 U^{36+} 受到色散元件的影响, 将集中损失在位于二极磁铁后的漂移节区域中。基于模拟结果, 在束流损失位置处设计安装由低解吸率材料制作的准直器, 优化设计后的准直效率高达95%以上; 并模拟计算了有无准直器时真空压力和束流流强的变化, 安装准直器后BRing的平均真空度变化小于10%, 将确保BRing加速器的稳定运行。

关键词: 电荷交换; 粒子损失分布; BRing

中图分类号: TL501 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.01.049

1 引言

中国科学院近代物理研究所正在广东省惠州市筹建“十二五”工程——强流重离子加速器装置(HIAF), 其主体部分由强流超导离子源(SECR)、超导直线加速器(iLinac)、增强器(BRing)、放射性次级分离器(HFRS)、高精度环形谱仪(SRing)构成^[1]。图1为HIAF的总体布局图。在重离子加速器中, 由于空间电荷力的限制, 束流能达到的最高流强正比于 A/q^2 , 为了满足实验上高流强的要求, 同时兼顾加速器规模, HIAF的主加速器BRing将会累积并加速具有中间电荷态的重离子束流以达到更高的流强, 但中间电荷态的粒子有可能和真空管道中的 H_2 、 CO_2 、 CO 、 H_2O 等残余气体分子相互作用, 进而捕获或损失一定数目的电子。电荷态发生变化后的离子, 受到不匹配的磁场作用, 将会以近乎切线的角度入射到加速器内的真空管壁上, 并解吸出大量的气体分子和离子, 导致装置中的真空度变差。当粒子损失解吸出的气体分子不能被真空泵及时抽

除时, 新一轮注入的粒子束流将会与更多的残余气体分子相互作用, 造成更多的气体分子解吸, 如此往复, 装置的真空度将会急剧上升, 严重影响重离子束流的寿命、加速器装置的运行和物理目标的实现。这种由于束流损失引起的加速器装置中真空度动态变化的现象称为动态真空效应。在国际上, 运行人员陆续在欧洲核子研究中心(CERN)的ISR装置^[2]与LEAR装置^[3]、美国布鲁克海文国家实验室(BNL)的AGS装置^[4]和德国重离子研究中心(GSI)的SIS18装置^[5]上发现了动态真空效应, 这一现象严重影响了加速器的稳定运行。为了解决这一问题, 对于已经建成的加速器装置, 提高真空泵速、提高烘烤温度和对管道内表面进行特殊处理等方式可以有效缓解动态真空效应。对于计划中的加速器装置, 除了采用上述措施以外, 在加速器Lattice设计过程中, 可以预留空间来安装特殊材料制成的准直器, 降低气体分子解吸率^[6], 减少管壁的出气量, 从而控制装置的真空度下降^[7-8]。

收稿日期: 2018-07-19; 修改日期: 2018-08-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11675235); 广东省引进创新创业团队计划资助项目(2016ZT06G73)

作者简介: 董自强(1992-), 男, 甘肃兰州人, 学生, 博士, 从事加速器物理研究; E-mail: dongzq@impcas.ac.cn.

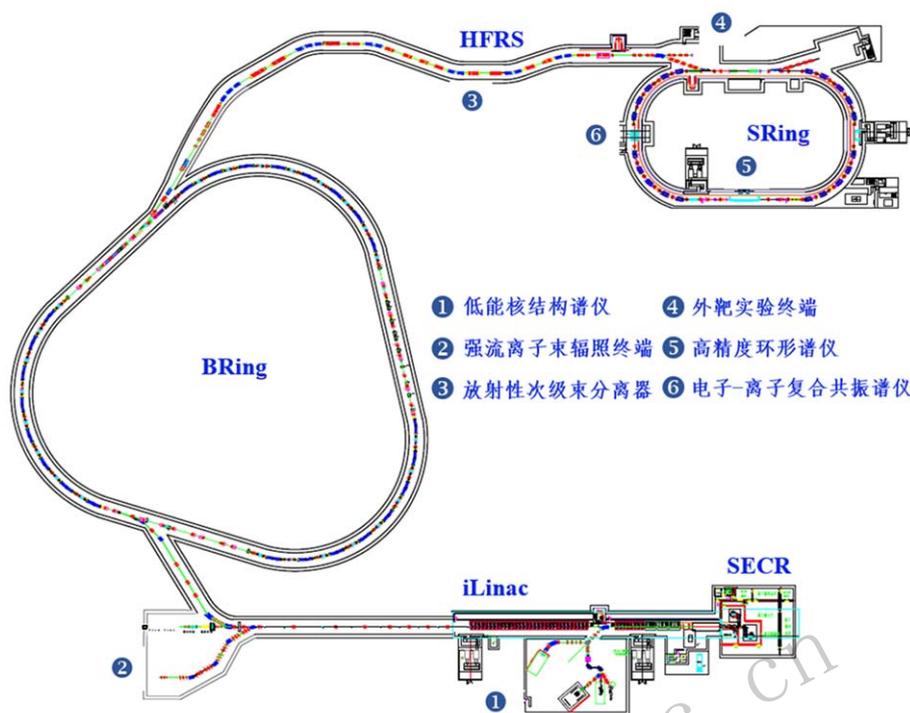


图 1 (在线彩图) HIAF 总体布局图

为了能在 BRing 上累积更高的流强和保持更长的束流寿命, 进而满足物理实验的要求, 研究动态真空效应是一项亟待开展的工作。而对电荷态发生变化后的粒子在 BRing 上的损失分布进行模拟计算是研究动态真空效应的必要前提。BRing 计划采用安装低解吸率材料制成的准直器来稳定装置的真空度, 这同样需要束流损失位置分布来找出准直器的合理安装位置, 并优化准直效率^[6]。计算结果可以在强流重离子加速器的设计阶段为束流光学设计优化及真空泵在装置上的排布提供一定的依据。本文将会在第二部分介绍计算原理, 在第三部分展示计算结果并进行讨论, 在最后一部分进行总结, 并对未来工作进行展望。

2 计算原理

在重离子加速器中, 束流与真空管道中残余气体相互作用的机制包括: 库仑散射、入射粒子电离和放射性衰变。由于在相同能量下, 入射粒子的电离反应截面比库仑散射截面和放射性衰变截面高多个数量级^[9-11], 因此作为束流损失的重要来源的入射粒子的电离反应将作为本文的重点研究方向^[12]。入射粒子电离截面由电子俘获截面和电子损失截面构成, 随着束流能量的提高, 入射粒子电离的截面会逐渐减小^[13-14]。BRing 设计的注入束流是能量为 17 MeV/u 的 U^{35+} 粒子, 在此能量下经过计算, 电子损失截面是 $1.67 \times 10^{-23} \text{ m}^2$, 电

子俘获截面是 $4.76 \times 10^{-26} \text{ m}^2$, 因此本文选取 U^{35+} 损失一个电子后生成的 U^{36+} 粒子作为追踪粒子, 模拟计算 U^{36+} 在 BRing 加速器中的损失分布。本文采用现行束流光学的追踪方式^[15]模拟计算电荷态变化的 U^{36+} 在加速器中的运动轨迹。通过三维的 Twiss 传输矩阵和色散传输矩阵, 计算得到 BRing 的包络和色散函数分布, 计算结果与 MAD 的模拟结果一致。图 2 显示了 BRing 第一个超周期结构的横向 β 包络和色散函数。

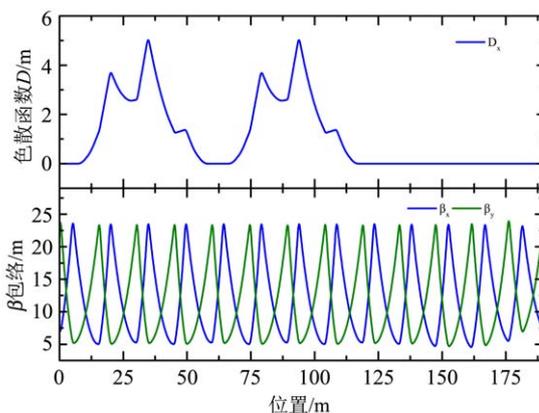


图 2 (在线彩图) BRing 一个超周期结构的横向 β 函数和色散函数

为了能够准确计算粒子损失位置, 在模拟过程中将 Lattice 元件按照 0.1 m 的固定步长进行切片, 总共将 BRing 切成 6 276 部分。在每个切片元件的入口处生

成横向相空间满足高斯分布的 1000 个 U^{36+} 粒子, 于 6 倍 RMS 发射度处进行截断, 因此在 BRing 上总共会生成 6 276 000 个满足条件的粒子, 跟踪这些粒子在全环的运动轨迹, 统计损失位置和分布。可以将全环粒子损失分布表示为一个 $n \times n$ 的矩阵

$$M_{\text{loss}} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & m_{nn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

矩阵的维数等于模拟中的切片数, 此处 $n=6\ 276$ 。矩阵的行表示粒子生成位置的切片编号, 矩阵的列表示粒子损失位置的切片编号。将矩阵按行归一化后, 就可以知道在每一个切片位置生成的电荷态变化的粒子在全环各个位置损失百分比结果, 这个结果是进行动态真空模拟计算的重要输入参数。表 1 列出了模拟计算的相关参数。

表 1 用于模拟粒子损失分布的束流参数及装置参数

参数名称	参数值
BRing 周长/m	569.0985
参考粒子 U^{35+} 能量/(MeV/u)	17
横向全发射度 $(6\epsilon_{\text{rms}})/(\pi\text{mm}/\text{mrad})$	200
动量接受度 $\frac{\Delta p}{p}$	$\pm 0.5\%$
设计真空度/Pa	1×10^{-9}
动量分散 $(3\sigma_{\text{rms}})$	$\pm 5\%$
$U^{35+} \rightarrow U^{36+}$ 等效动量偏移	-2.78%
工作点 (Q_x/Q_y)	9.47/9.43
二极磁铁孔径/(mm×mm)	180×100
四极磁铁孔径/(mm×mm)	200×110
漂移节孔径/(mm×mm)	200×120

当参考粒子在加速器装置的磁场中运动时, 满足

$$B\rho = \frac{P}{q}, \quad (2)$$

其中: B 为磁场; ρ 为弯转半径; P 为粒子动量; q 为粒子的电荷态。当带电粒子的电荷态发生变化时, 其动量与电荷态的比值 P/q 会发生变化。利用式(1), 可以将粒子电荷态的变化等效为动量的变化, 即电荷态变化的粒子是在参考粒子上增加了一个等效动量偏移

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{q_0}{q} - 1, \quad (3)$$

其中: $\Delta p/p$ 是等效动量偏移; q_0 是参考粒子电荷态; q 是粒子俘获或损失电子后的电荷态。例如对于参考

粒子 U^{35+} 来说, 当损失一个电子转变为 U^{36+} 时, 束流增加动量偏移 $\Delta p/p = (35/36 - 1) \times 100\% = -2.78\%$ 。相对于此等效动量偏移, 束流具有的初始动量可以忽略不计。另外, U^{35+} 也有一定概率俘获一个电子转变为 U^{34+} , 计算后得到的等效动量偏移的符号和 U^{36+} 相反, 因此它们会分别损失在环的外侧和内侧。因为两者的等效动量偏移在数值上近似, 所以两者在损失分布上不会有太大差别。

模拟过程中利用线性束流光学, 追踪在初始位置生成的、具有等效动量偏移的粒子运动轨迹, 在每一个切片的出口处, 根据管道横向孔径参数, 判断粒子是否损失, 剔除超出管道边界的粒子, 并统计该位置处的损失粒子个数。模拟过程中, U^{36+} 粒子因其自身具有的大等效动量偏移, 在经过色散元件时会迅速丢失, 而六极磁铁等非线性元件对粒子运动的影响是长时间多圈的累加效应, 因此模拟程序将六极磁铁视作漂移节处理, 同时因为用于注入及引出过程的冲击磁铁不会对加速器中的循环束产生影响, 因此将冲击磁铁元件也视作漂移节处理。本文旨在模拟计算入射粒子电离情况下粒子损失分布的情况, 因此暂时不考虑注入过程、高频俘获过程和引出过程等系统损失造成的粒子损失分布。因为粒子的纵向运动不会影响束流横向损失分布, 因此粒子传输只用到四维传输矩阵。

3 U^{36+} 损失粒子模拟结果

在模拟过程中, 程序自动记录 U^{36+} 粒子的生成位置、损失位置和其运动径迹。图 3 和图 4 展示了在某一切片入口处随机生成的 1000 个 U^{36+} 粒子, 其中红线是束流包络, 蓝线是 U^{36+} 经过多个元件传输的运动径迹。通过线性束流光学追踪粒子在经过切片时的横向运动, 当粒子横向位置超过管道孔径的时候, 停止追踪并记录损失信息。图 5 展示了 BRing 全环的粒子损失分布计算结果。统计结果下方为 BRing 的 Lattice 结构, 蓝色表示二极磁铁, 红色表示四极磁铁, 白色表示漂移节。

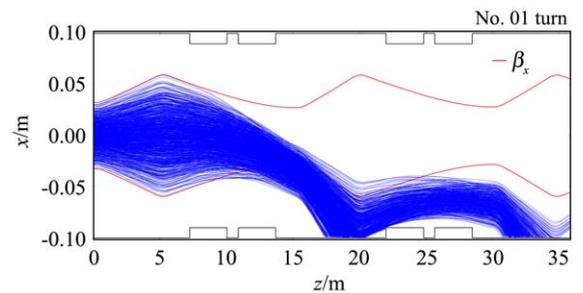


图 3 (在线彩图) BRing 弧区生成的 U^{36+} 运动径迹

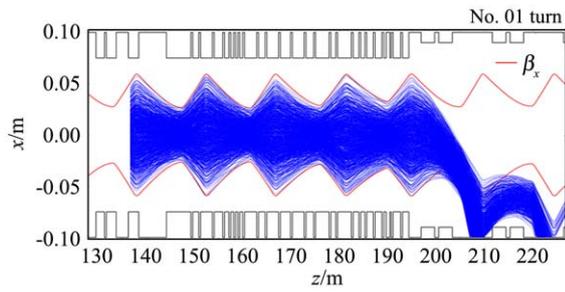


图 4 (在线彩图) BRing 直线节生成的U³⁶⁺运动径迹

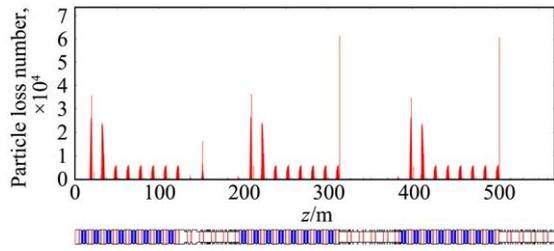


图 5 (在线彩图) BRing 全环U³⁶⁺损失分布统计

在粒子径迹追踪中, 计算结果显示, 由于电荷态变化的粒子具有大的等效动量偏移, 已经超出 BRing 的动量接受度, 这些粒子会迅速损失在管壁上, 并且多圈模拟结果显示, 单个切片上随机生成的 1000 个粒子在尚未传输完第一圈的情况下就会全部损失。图 3 和图 4 分别展示了在 BRing 弧区和直线节随机生成的粒子的径迹图。在弧区生成的粒子很快地损失在二极磁铁之后的漂移节, 而在直线节生成的粒子并不会立刻损失, 大部分都会经过直线节, 损失在下一个弧区的二极磁铁之后。这表明尽管电荷态变化的粒子生成的位置不同, 但这些具有很大等效动量偏移的粒子会受到色散元件的严重影响, 损失位置更集中在弧区的色散元件之后, 而四极铁这类非色散元件对电荷态变化的粒子运动不会产生明显影响。从图 5 展示的损失位置统计可以看出, 全环损失分布具有周期性, 和装置的超周期结构保持一致。每个周期前两个损失位置的粒子数高于其他位置, 这是因为大部分在直线节生成的粒子和少数未能在上一个弧区损失的粒子, 会在前两对二极磁铁的作用下迅速损失, 不会沉积在后续的二极磁铁后; 而大部分在弧区生成的粒子会迅速损失在该弧区, 不会进入下一个超周期结构。在现有的 BRing 束流光学和管道尺寸下, 损失位置多集中在漂移节, 这为安装具有低解吸率的准直器提供了空间。图 6 展示了粒子在 BRing 第一个超周期结构的损失分布情况, 根据粒子在漂移节处的损失位置, 安装管道内部的准直器, 准直器位置需要配合束流包络、闭轨畸变等束流参数来优化, 在保证不会影响束流正常运行的情况下, 阻挡电荷态发生变化的粒子并减少出气率。

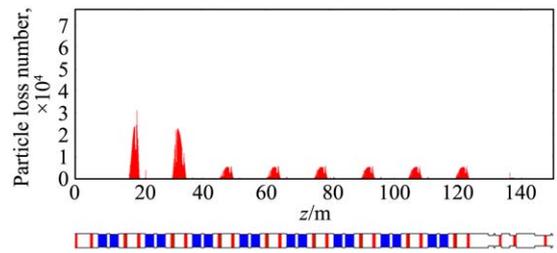


图 6 (在线彩图) U³⁶⁺在BRing第一个超周期结构内的损失分布

依据粒子损失分布结果, 将 24 块准直器安装在二极磁铁后面的漂移节处, 在保证不影响循正常束流的前提下, 将准直器逐步推向管道中心, 再次模拟 U³⁶⁺、U³⁷⁺ 和 Kr²⁰⁺ 的损失分布, 初步得到准直器在不同推入距离情况下的准直效率。图 7 显示了准直器在不同推入位置条件下, 针对不同束流种类和电荷态变化模拟得到的准直效率, 其中管道全宽是 200 mm, 管道中心位于 100 mm 处。结果表明, 随着准直器不断远离管道中心, 准直效率也随之下落。当准直器距离管道中心 40 mm 处时, U³⁶⁺ 具有 100% 的准直效率。同时, 准直效率会随着电荷态和束流种类的变化而改变, 因此在加速器的实际运行过程中, 需要根据束流种类和闭合轨道的测量结果优化准直器位于加速器中的位置。

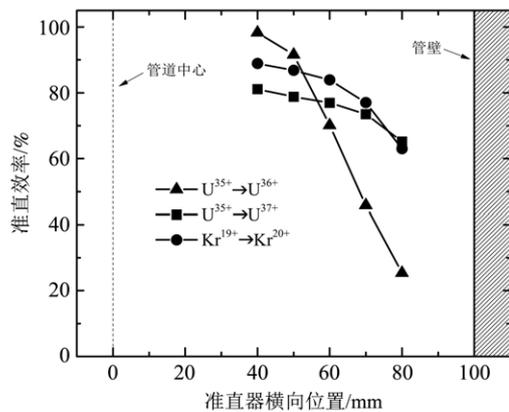


图 7 准直器在不同伸入距离下的U³⁶⁺、U³⁷⁺和Kr²⁰⁺的准直效率

由于自然界中尚无零解吸率的材料, 因此在加速器中安装低解吸率材料的准直器后, 仍然需要根据束流损失分布、加速器中真空泵的排布、管道的解吸率和加速器的运行周期对束流进行模拟计算, 以确定真空系统能否稳定运行。表 2 给出了 U³⁵⁺ 在 17 MeV/u 时的电子俘获总截面、电子损失总截面和库仑散射截面, 以及抽速和解吸率等参数。表 3 给出了 BRing 真空系统残余气体组成成分百分比和管壁解吸气体组成成分百分比。可以看出, 在同等能量下库仑散射截面小于电荷态交换截

表 2 用于模拟BRing真空演化的主要参数

参数名称	参数值
粒子种类	U ³⁵⁺
粒子能量/(MeV/u)	17
总粒子数	2 × 10 ¹¹
电子损失总截面/cm ²	8.3972 × 10 ⁻¹⁷
电子俘获总截面/cm ²	8.3972 × 10 ⁻¹⁷
库仑散射总截面/cm ²	5.1433 × 10 ⁻²¹
真空系统总体积/L	9500
真空系统总气载/(Pa·L/s)	5 × 10 ⁻⁴
真空系统总抽气速度/(L/s)	5 × 10 ⁵
管壁解吸率	22500
准直器解吸率	30

表 3 用于模拟计算的BRing残余气体成分

残余气体成分	放气百分比/%	解吸百分比/%
H ₂	88	40
N ₂	0	0
O ₂	0	0
Ar	1	0
H ₂ O	4	0
CO	2	25
CO ₂	1	10
CH ₄	4	25

面 3~4 个数量级, 因此在接下来的 BRing 真空系统模拟计算中可以忽略不计。配合准直效率, 利用公式^[13]

$$\dot{N} = -N \cdot \Gamma_{PI} = -N \cdot \beta c \sum_i n_i \sigma_i, \quad (4)$$

$$\dot{n}_i = -\dot{N}[\eta_{\perp,i}(1-\theta) + \eta_{c,i}\theta] + Q_{i,o} - Q_{i,p}, \quad (5)$$

即可对 BRing 真空系统的动态变化进行迭代计算。其中: Γ_{PI} 为电荷态交换造成的粒子损失率; N 为粒子总数; n_i 为某残余气体成分的分子数; η_{\perp} 表示管壁解吸率; η_c 表示准直器解吸率; θ 表示准直效率; Q_o 和 Q_p 分别表示总放气率和总抽气速度。图 8 展示了对 BRing 在 95% 准直效率和关闭准直器情况下的真空度变化和粒

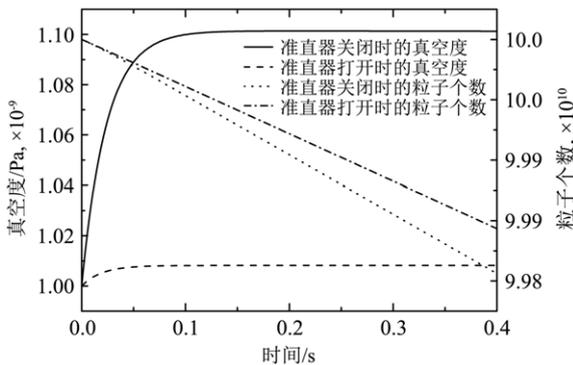


图 8 BRing在95%准直效率与关闭准直器情况下真空度和粒子个数的变化

子个数变化, 其中实线表示真空系统在有/无准直器时的变化, 虚线表示粒子个数在有/无准直器时的变化。可以看出, 准直器的加入能够有效稳定真空系统, 装置平均真空度变化不到 10%, 使系统重新达到平衡态时具有更低的真空度, 提高了束流寿命, 使更多粒子储存在 BRing 中。

4 结论及未来展望

针对束流与真空管道中残余气体分子相互作用而发生的入射粒子电离效应, 本文完成了 U³⁵⁺ 损失一个电子转变为 U³⁶⁺ 后的粒子损失分布模拟计算。通过对随机生成的 U³⁶⁺ 粒子进行追踪, 得到了粒子在纵向上的径迹图和 BRing 全环的束流损失分布。计算模型显示粒子会受到色散元件的严重影响, 损失位置多集中在装置弧区内的二极磁铁之后的漂移节。对 BRing 的 Lattice 进行优化, 可以将束流损失控制在漂移节, 为安装准直器提供足够的空间。

未来的工作将在此基础上进一步优化准直效率, 选取不同的粒子种类和更大的电荷态变化, 通过损失在准直器上的粒子数与总粒子数的比值, 可以得到并优化准直效率^[6]。除此之外, 解吸率测量实验也在进行当中, 通过对不同材料在束流轰击下的气体解吸率测量, 可以得到解吸率与束流种类及能量的关系^[16]。准直器的设计将选用具有低解吸率性质的材料, 配合粒子损失分布等模拟结果, 为研究和解决动态真空问题提供可行方案。为了研究束流在注入、俘获等过程中的系统损失, 模拟计算真空度在装置纵向上随时间的变化将是未来的工作重点。

参考文献:

- [1] YANG Jiancheng, XIA Jiawen, XIAO Guoqing, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 2013, **317**: 263.
- [2] GROBNER Ö, CALDER R S. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1973, **20**(3): 760.
- [3] J BOSSER, M CHANEL, C HILL, et al. *Part Accel*, 1999, 63(CERN-PS-99-033-DI): 171.
- [4] ZHANG S Y, AHRENS L A. *Gold beam losses at the AGS Booster injection[C]//Particle Accelerator Conference, IEEE, 1999, 5: 3294.*
- [5] KRÄMER A, BOINE-FRANKENHEIM O, MUSTAFIN E, et al. *Measurement and Calculation of U²⁸⁺ Beam Lifetime in SIS[C]//Proc of EPAC. 2002, 2547.*
- [6] LI Peng, YUAN Youjin, YANG Jiancheng, et al. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2014, **17**(8): 084201.
- [7] MAHNER E. CERN Report No LHC/VAC-TN-2002-04, 2002.

- [8] MAHNER E, HANSEN J, LAURENT J M, *et al.* *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2003, **6**(1): 013201.
- [9] OMET C, P SPILLER, STADLMANN J. Simulation of Dynamic Vacuum Induced Beam Loss[C]//These Proceedings. 2006.
- [10] SCHLACHTER A S, STEARNS J W, GRAHAM W G, *et al.* *Physical Review A*, 1983, **27**(6): 3372.
- [11] FRANZKE B. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1981, **28**(3): 2116.
- [12] BOSSER J, CHANEL M, HILL C, *et al.* *Part Accel*, 1999, 63(CERN-PS-99-033-DI): 171.
- [13] MADSEN N. PS/DI Note, 1999: 99.
- [14] OMET C, SPILLER P, STADLMANN J, *et al.* *New Journal of Physics*, 2006, **8**(11): 284.
- [15] LEE S Y. *Accelerator Physics*[M]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2011: 129.
- [16] DONG Ziqiang, LI Peng, YANG Jiancheng, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2017, **870**: 73.

Simulation Results of Loss Distribution of U^{36+} due to Charge-exchange Process

DONG Ziqiang^{1,2,3,1)}, LI Peng^{1,3}, YANG Jiancheng^{1,3}, LIU Jie^{1,2,3}, XIE Wenjun^{1,3}, RUAN Shuang^{1,3},
WANG Geng^{1,2,3}, WANG Kedong^{1,2,3}, YAO Liping^{1,2,3}, CAI Fucheng^{1,2,3}

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

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Huizhou Research Center of Ion Sciences, Huizhou 516003, Guangdong, China)

Abstract: During heavy ion accelerator operation, the charge exchange effect between ions and residual gas molecules is the key factor to influence beam lifetime. The charge exchange process has ions lost on the wall and leads to a dynamical vacuum change, which will seriously affect the accelerator operation and reduce the extraction beam intensity. The Institute of Modern Physics' future project, called High Intensity heavy ion Accelerator Facility (HIAF), will be built in Huizhou city, Guangdong Province, China. The Booster Ring (BRing) will provide 2×11 ppp $^{238}U^{35+}$ for nuclear physics experiments. This article studies the track of particle U^{36+} before impacting on the wall, which is the reference particle U^{35+} losing one electron, and gets the U^{36+} loss distribution along the BRing. The simulation result shows that U^{36+} will be influenced seriously by dispersion elements, and will be lost in the drift sections after the dipoles. Collimators made out of materials with low desorption will be installed in the particles lost positions. The collimator efficiency after optimization can be larger than 95%. It also shows BRing average pressure change and beam intensity change between collimators on and off. The result points out that the BRing average pressure change will be less than 10% with collimators on, which makes BRing operate stably.

Key words: charge-exchange; particle loss distribution; BRing

Received date: 19 Jul. 2018; **Revised date:** 9 Aug. 2018

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11675235); Special Funding for Introduced Innovative R&D Team of Guangdong(2016ZT06G73)

1) E-mail: dongzq@impcas.ac.cn