

文章编号: 1007-4627(2018)01-0028-06

HIAF-BRing 的双向涂抹注入模拟

曲国峰^{1,2}, 夏佳文¹, 杨建成¹, 杜衡^{1,2}, 李钟汕^{1,2}, 葛文文^{1,2}, 郑文亨^{1,2},
李小妮^{1,2}, 胡雪静¹, 柴伟平^{1,†}

(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: BRing 是 HIAF 工程的主加速器, 其设计流强为每个脉冲内的粒子数 1×10^{11} 个 ($^{238}\text{U}^{34+}$), 为了达到此设计流强, 注入增益应达到 88 倍以上。BRing 采用了双向涂抹注入方案, 其满足 BRing 的注入增益要求, 同时具有注入时间短和累积束分布较均匀而减小了空间电荷效应的特点。双向涂抹注入方案利用水平和垂直两组凸轨磁铁以及倾斜的静电偏转板, 在水平相空间和垂直相空间内同时进行涂抹。为了检验双向涂抹注入方案能否达到 BRing 的设计要求, 利用 ORBIT 程序对双向涂抹注入过程进行了模拟, 模拟结果显示, 在单次双向涂抹注入 113 圈的情况下, 注入效率为 97.7%, 注入增益达到 110.3 倍, 满足了 BRing 流强要求。累积束的分布相对均匀, 空间电荷效应引起的工作点漂移约为 -0.02 , 粒子因共振损失风险很小。针对注入束流偏角、切割板角度、工作点偏差和 Bump 延时等不同注入参数进行了误差分析, 结果显示 BRing 的双向涂抹注入效率对注入参数偏差的容忍度较高。

关键词: HIAF-BRing; 双向涂抹注入; ORBIT; 重离子加速器

中图分类号: TL56 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.35.01.028

1 引言

强流重离子加速器装置^[1-3] (High Intensity heavy-ion Accelerator Facility), 简称为 HIAF, 是由中国科学院近代物理研究所提出的我国新一代重离子加速器设施。HIAF 目前处在施工建造阶段, 建成后, HIAF 将能够提供国际同类加速器中最强的中低能脉冲离子束以及最大功率的短脉冲、强聚焦、高能量重离子束。HIAF 在产生远离稳定线原子核、精确测量短寿命原子核质量、重离子驱动产生高能量密度物质方面极具优势。BRing 是 HIAF 的主加速器。经过预加速的粒子束在 BRing 中被累积到高流强并被加速到高能量。在强流加速器的注入累积阶段, 粒子能量较低, 强烈的空间电荷效应造成粒子的工作点漂移。当粒子的工作点穿越共振线时可能因共振而损失, 给加速器带来可维护性下降、发热、真空度降低等问题。为了在 BRing 中累积足够的粒子, 同时减少空间电荷效应造成的粒子损失, BRing 采用了双向涂抹注入方法^[4-9]。

双向涂抹注入方法是利用水平方向和垂直方向两组凸轨磁铁以及倾斜的静电偏转板 (ES), 在水平相空间

和垂直相空间同时进行涂抹。其注入增益远高于通常的多圈注入 (单向涂抹) 方法, 单次注入即可在 BRing 中注入足够的粒子, 不再需要进行多次多圈注入, 使注入时间从秒量级缩短到毫秒量级; 其次是累积束的横向分布相对均匀, 束流中心的粒子密度相对较低, 空间电荷效应因此较弱。双向涂抹注入方法的上述两个特性都有助于减小粒子的共振损失风险。

为了验证 BRing 双向涂抹注入方法, 我们利用 ORBIT 程序^[10, 11] 对 BRing 的双向涂抹注入过程进行了模拟。同时, 为了探究双向涂抹注入在实际运行中的稳定性, 我们还研究了注入参数偏差对注入效率的影响, 为 BRing 的硬件设计提供了依据。

2 BRing 的结构和基本参数

BRing 的结构布局如图 1 所示, BRing 的基本参数列于表 1。根据注入流强计算可知, BRing 的注入累积增益必须要超过 88 倍, 才能使 BRing 的流强达到每个脉冲内的粒子数 1×10^{11} 个 ($^{238}\text{U}^{34+}$)。

收稿日期: 2017-05-03; 修改日期: 2017-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11505256, 11405237)

作者简介: 曲国峰 (1989-), 男, 吉林人, 博士研究生, 从事核技术及应用研究; E-mail: qgfnut@impcas.ac.cn

† 通信作者: 柴伟平, E-mail: chaiwp@impcas.ac.cn.

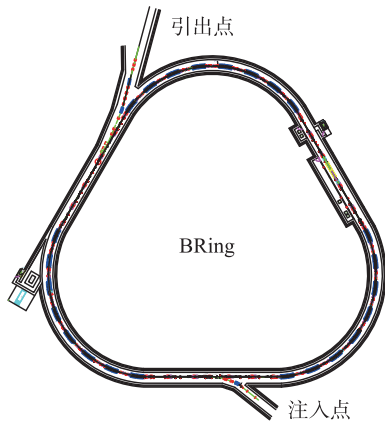


图 1 (在线彩图) BRing 总体布局

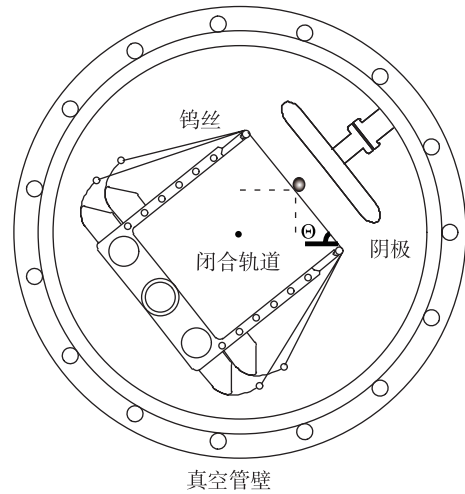


图 2 静电偏转板

表 1 BRing 的基本参数

参数	数值
周长/m	440.2
最大磁刚度/Tm	34
接受度/(π mm·mrad)	250(水平),100(垂直)
注入能量/(MeV/u)	25($^{238}\text{U}^{34+}$)
引出能量/(MeV/u)	800($^{238}\text{U}^{34+}$)
动量分散/($\Delta p/p$)	$\pm 5 \times 10^{-3}$
注入流强/pma	0.028($^{238}\text{U}^{34+}$)
引出粒子数/pulse	1×10^{11} ($^{238}\text{U}^{34+}$)
工作点	8.1704/7.6374
注入点处 twiss 参数	$\alpha_{xm}/\alpha_{ym} = -0.24/-0.16;$ $\beta_{xm}/\beta_{ym} = 13.212/18.846(\text{m})$
注入束全发射度/ (π mm·mrad)	5/5
注入束流 twiss 参数	$\alpha_{xi}/\alpha_{yi} = -0.065/-0.060;$ $\beta_{xi}/\beta_{yi} = 3.586/6.943(\text{m})$
注入束流方向 (与理想轨道夹角)	0.6/0.3(mrad)
注入静电偏转板倾斜角度/($^\circ$)	66

3 双向涂抹注入方法介绍

双向涂抹注入方法包含两部分元件。首先,注入段布置两组凸轨磁铁,其中一组为4台水平凸轨磁铁,另外一组为4台垂直凸轨磁铁。其次,ES(静电偏转板)是倾斜放置的^[12],如图2所示。

双向涂抹注入开始后,利用凸轨磁铁在注入点处形成水平和垂直方向的局部凸轨(Bump),使环的闭合轨道靠近ES。注入过程中,束流损失的主要来源是循环束撞击ES或者进入注入通道。设置合适的水平和垂直工作点,同时合理地控制Bump的高度变化,可使循环束在每次经过注入点时避免损失,同时也在水平和垂直相空间进行涂抹。注入完成后,Bump高度迅速降为零,使循环束远离ES以避免在后续的俘获和加速阶段中损失。

4 BRing 注入过程模拟与分析

我们采用ORBIT程序对BRing的注入过程进行了计算机模拟。ORBIT是一款粒子跟踪程序,该程序采用了PIC(Particle In Cell)^[13, 14]方法计算空间电荷效应对粒子的影响。以下的粒子跟踪模拟基于表1所列参数。注入过程中,Bump的移动路径如图3(a)所示,Bump高度变化如图3(b)所示,Bump在注入点处斜率为0。表1所列注入相关参数和图3(b)所示Bump高度变化曲线是通过基于MATLAB开发的注入参数优化程序得出^[15],其优化目标为避免粒子损失且使注入增益最大化。

粒子跟踪模拟200圈,其中113圈束流注入,注入完成后继续跟踪87圈。每圈注入1000个宏粒子,其为横向高斯分布,纵向平均分布,注入束中心的坐标为(61.4, 46.4)。Bump起始位置为(53.0, 27.5)。注入过程前期Bump位置离注入束较近,束流横向振荡幅度较小,难以凭借横向振荡避开ES,所以Bump高度须快速下降使循环束避开ES;注入过程后期束流横向振荡幅度较大,循环束可轻易凭借横向振荡避开ES,所以Bump高度缓慢下降即可避免循环束损失。当注入第113圈时,Bump高度下降到位置(8.4, 8.8),此时注入束恰好与环的接受度椭圆相切,继续注入将使粒子损失在真空管道壁上,此时应停止注入,使Bump高度迅速下降到(0, 0),以避免循环束在之后的俘获加速阶段损失在ES上。在共200圈的粒子跟踪模拟中,共注入宏粒子113000个,其中1.2%的粒子损失在ES处,1.1%的粒子损失在真空管壁上,注入效率为97.7%,最终注入增益为110.3倍。宏粒子数变化和全发射度增长如图4所示。

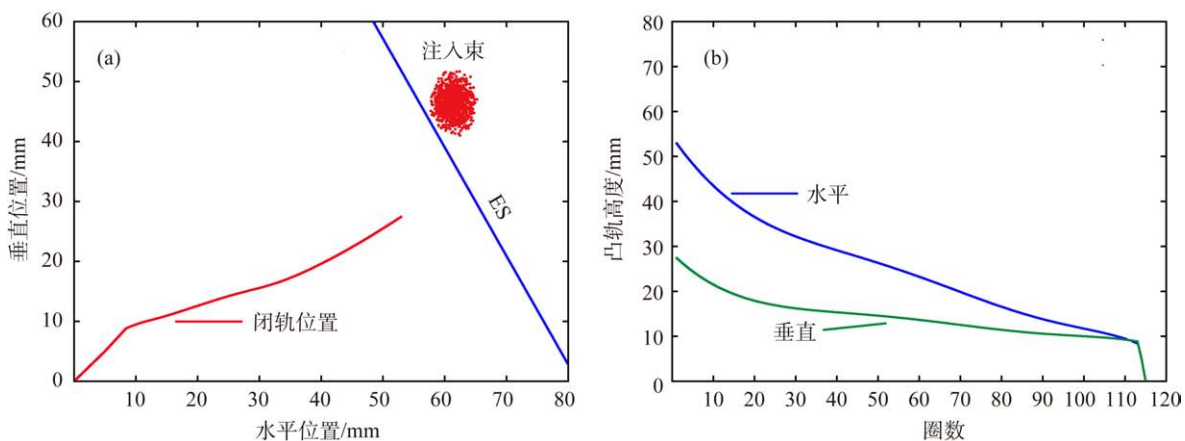


图 3 (在线彩图) 注入过程中闭合轨道位置 (a) 和 Bump 高度变化曲线 (b)

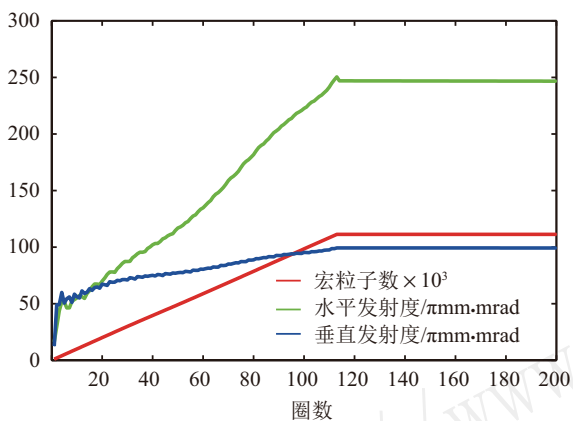


图 4 (在线彩图) 环内宏粒子数和全发射度随注入圈数变化

注入完成后累积束恰好填满环的接受度，其水平发射度为 $250 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ，垂直发射度为 $100 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 。如图 5(a) 所示，在实空间内，累积束分布在长 114 mm，宽 84 mm 的矩形范围内。如图 5(b) 和图 5(c) 所示，在水平相空间和垂直相空间内，累积束分布为空心圆环。累计束的分布较均匀，空间电荷效应造成的粒子工作点漂移值较小。最终累积束的水平和垂直工作点相对初始工作点漂移了约 -0.02 ，最终弥散在宽 0.010、高 0.015 的区域内，如图 5(d)。

在加速器实际运行时，注入参数受到机械误差和场强误差的影响可能偏离设定值，增加束流损失，降低注入效率，影响双向涂抹注入的稳定性。为此，我们研究

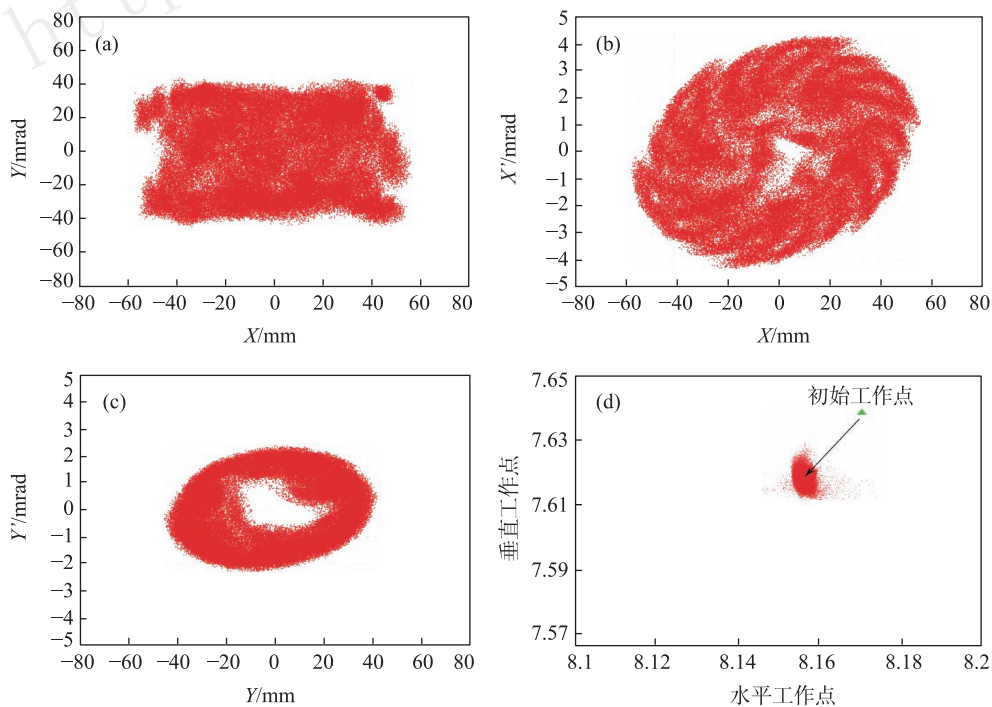


图 5 (在线彩图) 累积束横向分布和工作点漂移

了各注入参数偏差对 BRing 注入效率的影响。主要包括以下几方面: (1) 静电偏转板倾斜角度安装误差; (2) 注入束的发射度增长; (3) 注入束的方向偏差; (4) 环的工作点偏差; (5) Bump 电源延迟。

4.1 注入静电偏转板倾斜角度的安装误差

静电偏转板倾斜角度是双向涂抹注入方案的关键参数, 决定着循环束能否避开 ES。安装误差可能使其倾斜角度偏离设定值从而降低注入效率。在保持其他参数不变的情况下, 利用 ORBIT 程序对 ES 倾斜角度从 10° 到 80° 的注入过程进行了模拟, 结果如图 6 所示。ES 倾角在 10° 到 60° 范围时, 注入效率随 ES 倾角的增大而增加, ES 倾角在 60° 到 80° 范围内时, 注入效率随 ES 倾角的增大而减少。ES 倾角在 60° 到 70° 之间时, 注入效率变化平缓, 说明双向涂抹注入效率对 ES 倾角安装误差的宽容度较大。

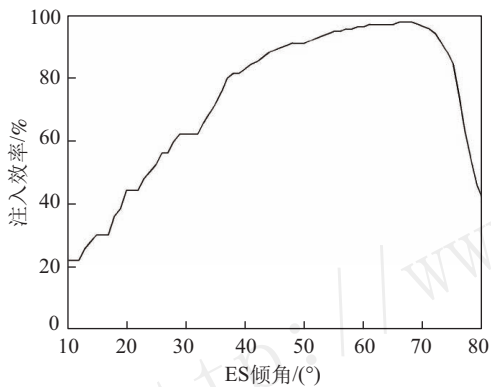


图 6 注入效率与注入束方向的关系

4.2 注入束发射度增长

注入器的准直误差和场强误差将造成注入束的横向发射度增长, 使更多的注入束损失在 ES 上, 而且会在注入后期使部分粒子因超出环的接受度而损失在真空管壁上。注入效率与注入束横向发射度增长的关系如表 2 所列, 当注入束横向全发射度从 $5 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 增长到 $10 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 时, 注入效率从 97.7% 降为 92.1%, 注入增益从 110.3 倍降为 105 倍。

表 2 注入效率与注入束横向全发射度的关系

注入束横向全发射度/ $(\pi\text{mm}\cdot\text{mrad})$	注入效率/%
5	97.7
6	97.1
7	96.1
8	94.9
9	93.6
10	92.1

4.3 注入束方向偏差

注入束方向偏差将改变粒子横向振荡的初始相位, 进而影响粒子在环内的横向振荡, 增加 ES 上的粒子损失。以注入束方向与理想轨道水平夹角在 0.6 mrad 、垂直夹角在 0.3 mrad 时注入效率最高。注入束方向与理想轨道夹角增大或者减小, 注入效率都会降低。图 7 显示了注入效率与注入束方向的依赖关系, 在水平夹角 0.3 mrad 至 1.2 mrad 、垂直夹角 -0.1 mrad 至 0.9 mrad 范围内, 注入效率保持在 95% 以上。

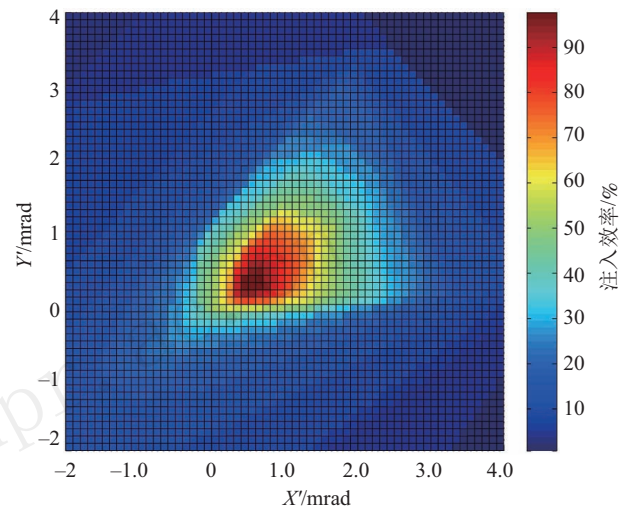


图 7 (在线彩图) 注入效率与注入束方向的关系

4.4 工作点偏差

磁铁安装误差和场强误差可使初始工作点产生偏差, 造成部分粒子不能凭借横向振荡避开 ES, 进而降低注入效率。模拟结果如图 8 所示, 在水平工作点偏差为 $(-0.001, 0.002)$ 、垂直工作点偏差为 $(-0.002, 0.002)$

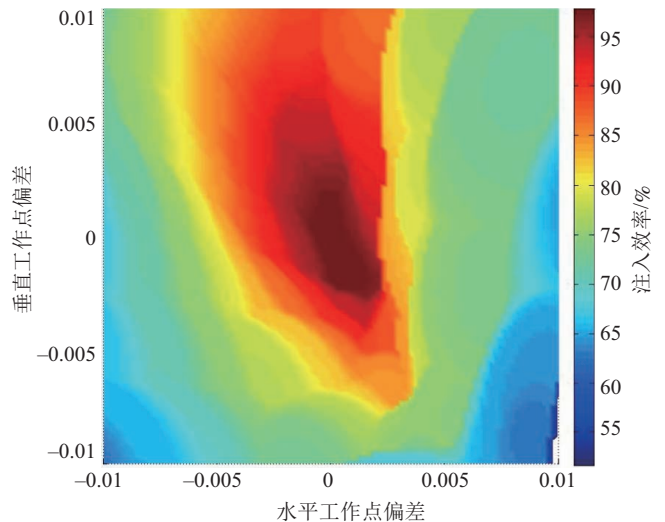


图 8 (在线彩图) 注入效率与工作点偏差的关系

范围内,注入效率保持在 95% 以上。

4.5 Bump 电源延迟

Bump 电源的延迟可使凸轨高度延迟下降,导致部分循环束损失在 ES 上。在其他参数保持不变的情况下,我们针对 0 到 13 μs 的 Bump 磁铁电源延迟进行了注入过程的模拟。模拟结果如图 9 所示,随着 Bump 电源延迟增加,注入效率有所下降。因 Bump 延迟而损失的主要为束流边缘粒子,但由于注入束横向为高斯分布,束流边缘粒子密度低,所以注入效率因 Bump 电源延迟时间增加而下降的幅度很小,当延迟达到 12 μs 时,注入增益保持在 97% 以上。

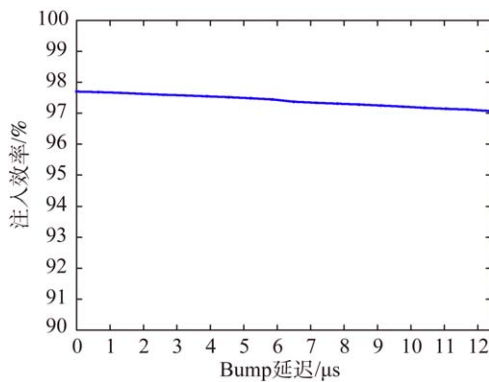


图 9 (在线彩图)注入效率与Bump电源延迟的关系

5 结论

利用 ORBIT 程序对 BRing 双向涂抹注入过程进行的模拟结果显示, BRing 的双向涂抹注入方案可注入 113 圈,注入效率达到 97.7%,注入增益达到 110.3 倍,能够满足 BRing 的设计流强要求。累积束的横向分布也较为均匀,空间电荷效应引起的工作点漂移仅为 -0.02 左右。基于不同参数偏差的模拟结果显示,双向涂抹注入效率对 ES 倾角安装误差、注入束发射度增长、注入束方向偏差、工作点偏差以及 Bump 电源延迟都有较大宽容度。

参考文献:

- [1] YANG J C, XIA J W, XIAO G Q, *et al.* Nucl Instr & Meth B, 2013, **317**(5): 263.
- [2] GAO Xiang, YANG Jiancheng, XIA Jiawen, *et al.* Chinese Physics C, 2014, **38**(4): 84.
- [3] LI C, SUN L, HE Y, *et al.* Nucl Instr & Meth A, 2013, **729**(1-2): 426.
- [4] PRIOR C R, REES G H. Nucl Instr & Meth A, 1998, **415**(1-2): 357.
- [5] PRIOR C R. Multiturn Injection for Heavy Ion Fusion[C]. Proc Symp on Accelerator Aspects of Heavy Ion Fusion, GSI, Darmstadt, March 1982: 290.
- [6] PRIOR C R, SCHONAUER H O. Multi-turn Injection into Accumulators for Heavy Ion Fusion[C]. Proc 5th European Particle Accelerator Conf, EPAC 96, Sitges, Barcelona, 1996: 2391.
- [7] PRIOR C R. HIDIF Horizontal-Vertical Multi-Turn Injection[R]. HIDIF/RAL2, CLRC, Rutherford Appleton Laboratory, 1997.
- [8] REES G H. HIDIF Lattice for Horizontal-Vertical Multi-Turn Injection[R]. HIDIF/RAL1, CLRC, Rutherford Appleton Laboratory, 1997.
- [9] HASSE R W, HOFMANN I. Nucl Instr & Meth A, 1998, **415**(1-2): 478.
- [10] GALAMBOS J, DANILOV S, JEON D, *et al.* ORBIT-a Ring Injection Code with Space Charge[C]. Particle Accelerator Conference, Proceedings of the IEEE, 1999: 3143.
- [11] GALAMBOS J D, HOLMES J A, OLSEN D K. ORBIT User Manual. 1999.
- [12] KIM D H, JANG B T. Design and Construction of the CERN LEIR Injection Septa[C]. 21st Particle Accelerator Conference(PAC 2005), 2005: 2690.
- [13] GALAMBOS J D, LUCCIO A U, OLSEN D K, *et al.* A Particle-in-Cell Model for Space Charge Dynamics in Rings. 6th European Particle Accelerator Conference, Stockholm, Sweden, 22-26 Jun, 1998.
- [14] HOCKNEY R W, EASTWOOD J W. Computer Simulation Using Particles[M]. New York: Adam Hilger, IOP Publishing, 1988.
- [15] QU Guofeng, CHAI Weiping, XIA Jiawen, *et al.* Nuclear Science and Techniques. 2017, **28**(8): 47.

Simulation of Two Planes Painting Injection for HIAF-BRing

QU Guofeng^{1,2}, XIA Jiawen¹, YANG Jiancheng¹, DU Heng^{1,2}, LI Zhongshan^{1,2}, GE Wenwen^{1,2},
ZHENG Wenheng^{1,2}, LI Xiaoni^{1,2}, HU Xuejing¹, CHAI Weiping^{1,†}

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

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

Abstract: BRing is the main accelerator of High Intensity heavy Ion Accelerator Facility(HIAF) and its design current is 1×10^{11} particles per pulse ($^{238}\text{U}^{34+}$). To accumulate beams up to the design current, the injection gain has to reach 88. Two planes painting injection scheme is proposed for BRing. This scheme uses a tilted electrostatic septum and 8 bump magnets to paint beams into horizontal and vertical phase space simultaneously. It can inject enough beams into the ring in a short time and paint beams uniformly. The injection process is simulated using ORBIT code and 113 turns is injected into BRing with an injection efficiency of 97.7% which meets the requirement for beam current of BRing. The accumulated beams are distributed uniformly in transverse and hence have a little tune shift of -0.02 which reduces the risk of beam loss due to the resonance. Errors of injection parameters are analysed and the result shows two planes painting injection scheme has a high tolerance for errors of injection parameters.

Key words: HIAF-BRing; two planes painting injection; ORBIT; heavy ion accelerator

Received date: 3 May 2017; **Revised date:** 28 May 2017

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11505256, 11405237)

† **Corresponding author:** CHAI Weiping, E-mail: chaiwp@impcas.ac.cn.