

文章编号: 1007-4627(2008)04-0355-07

HIRFL-CSR 实验环中束流损失机制及寿命研究*

薛迎利^{1,2}, 蔡晓红^{1, #}, 于得洋¹

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 分析了在储存环中回旋的离子束与残余气体分子、内靶和冷却电子束相互作用时的损失机制及相应的束流寿命, 针对兰州重离子加速器冷却储存环实验环内靶模式, 计算了 50—500 MeV/u $^{12}\text{C}^{6+}$, $^{36}\text{Ar}^{18+}$, $^{132}\text{Xe}^{54+}$ 和 $^{238}\text{U}^{92+}$ 等束流在各种损失机制影响下所对应的束流寿命和总的束流寿命。结果表明: 影响束流寿命的主要因素是与内靶分子(原子)之间的电荷交换及与冷却电子束之间的辐射复合; 对于重离子束 $^{132}\text{Xe}^{54+}$ 和 $^{238}\text{U}^{92+}$, 与冷却电子束之间的辐射复合是影响其储存寿命的主要因素。

关键词: HIRFL-CSR 实验环; 离子束; 束流寿命

中图分类号: TL594; O562 **文献标识码:** A

1 引言

储存环中的束流由于与真空管道中的残余气体分子、电子冷却装置中的电子束及内靶的相互作用而损失离子; 其离子数减少到起始数 e^{-1} 所用的时间, 称为束流寿命。束流寿命的合理估算和测量, 对储存环内束流的累积、内靶的设计以及物理实验的开展都具有重要的指导意义。

实验方面, 德国马普核物理研究所测得几个 MeV/u 的 C, O 和 Li 等较轻的离子束在 TSR 环中可以储存 1—200 s^[1]; 根据 Ekström 等^[2] 给出的 310 MeV/u 的质子束在 CELSIUS 环中, 氢 Pellet 靶 (10^{16} atoms/cm²) 影响下的束流流强衰减曲线, 可知其寿命为几十秒; 德国重离子研究中心(GSI)测得 ESR 环中 90—300 MeV/u 全裸 Ne, Ar, Kr 和类氢 Bi^{82+} , Au^{78+} 等束流的寿命是几个小时^[3]; Stöhlker 等^[4] 测得 49—358 MeV/u U^{92+} 束流在 ESR 内靶模式下的储存寿命是 6.7—1 300 s。最近, DuBois 等^[5] 测量了 10—50 MeV/u 的低电荷态 U^{28+} 束流在 ESR 中的储存寿命, 结果表明内靶关闭时为十几秒, H_2 靶厚为 1×10^{12} molecules/cm² 时为几秒, N_2 靶厚为 1×10^{12} molecules/cm² 时不到 1 s。

理论方面, 主要通过计算束流的每种损失机制所对应的截面, 通过下述公式(1)—(7)估算束流的储存寿命。所考虑的储存环中束流损失的机制主要有: (1) 离子与残余气体分子和内靶分子(原子)之间的单次库仑散射、多次库仑散射、电荷交换(电子俘获和电子剥离)、核反应; (2) 离子与冷却电子之间的辐射复合。离子和残余气体分子相互作用时, 任一种损失机制对应的束流寿命可以表述为

$$\tau_i(\text{s}) = (\sigma \rho_r \beta_i c)^{-1}, \quad (1)$$

式中, σ (cm²) 为相互作用截面(对于高能离子与简单分子, 例如, H_2 , CO , CO_2 和 CH_4 等的碰撞, σ 近似等于离子与构成分子的各个原子的相互作用截面之和), $\beta_i c$ (cm/s) 为离子速度, ρ_r 为残余气体分子的数密度, 可由理想气体状态方程给出

$$\rho_r (\text{molecules/cm}^3) = 7.247 \times 10^{18} \frac{P_r}{T}, \quad (2)$$

P_r (mbar) 为残余气体的平均压强, T (K) 为残余气体温度。

储存环中的残余气体一般由多种气体成分组成, 假设其由 a 和 b 两种气体成分构成, 比例分别

* 收稿日期: 2008-02-01; 修改日期: 2008-09-16

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10375080, 10775160)

作者简介: 薛迎利(1982-), 女(汉族), 河南洛阳人, 博士研究生, 从事实验原子物理研究; E-mail: xueyl@impcas.ac.cn

通讯联系人: 蔡晓红, E-mail: caixh@impcas.ac.cn

为 a 和 $b(a+b=1)$, 则任一种损失机制对应的束流寿命为^[6]

$$\tau_i(s) = ((a\tau_a^{-1}) + (b\tau_b^{-1}))^{-1}, \quad (3)$$

τ_a 和 τ_b 可由(1)式计算。

离子和内靶相互作用时, 任一种损失机制对应的束流寿命可以表述为

$$\tau_i(s) = (\sigma \rho_i f_0)^{-1}, \quad (4)$$

其中, $\sigma(\text{cm}^2)$ 为相互作用截面, $\rho_i(\text{particles}/\text{cm}^2)$ 为靶厚, $f_0(\text{s}^{-1})$ 是束流在储存环中的回旋频率。

离子和冷却电子束之间的辐射复合所对应的束流寿命可表示为^[7]

$$\tau_{rr}(s) = \gamma_i^2 (\alpha_r n_e \eta)^{-1}, \quad (5)$$

式中, γ_i 为离子的相对论因子, $n_e(\text{cm}^{-3})$ 为冷却电子束的电子数密度, η 为冷却段的有效长度与环周长之比, α_r 为俘获系数^[8], 可表示为

$$\alpha_r(\text{cm}^3/\text{s}) = 3.02 \times 10^{-13} \bar{Z}_i^2 (kT_e)^{-1/2} \times \left\{ \ln [11.32 \bar{Z}_i (kT_e)^{-1/2}] + 0.14 \left[\frac{kT_e}{Z_i^2} \right]^{1/3} \right\}, \quad (6)$$

其中, $kT_e(\text{eV})$ 表示电子束的横向温度, $\bar{Z}_i = (Z_i + q_i)/2$ 表示离子的有效电荷, Z_i 和 q_i 分别是离子的原子序数和电荷态。

总的束流储存寿命由(7)式计算得到:

$$\tau(s) = \left(\sum_i \tau_i^{-1} \right)^{-1}, \quad (7)$$

其中, τ 为总的束流寿命, τ_i 为某一种损失机制对应的束流寿命。

本文分析了储存环中束流的损失机制及相应的束流寿命, 并针对兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)^[9] 实验环内靶运行模式^[10], 计算了 HIRFL-CSR 实验环中 50—500 MeV/u $^{12}\text{C}^{6+}$, $^{36}\text{Ar}^{18+}$, $^{132}\text{Xe}^{54+}$ 和 $^{238}\text{U}^{92+}$ 离子束在残余气体分子、冷却电子束和非极化内靶影响下的束流寿命。

2 理论分析

2.1 离子与残余气体分子相互作用

2.1.1 单次库仑散射

当离子与残余气体分子发生库仑散射的散射角大于储存环的接收角 θ_{acc} 时, 离子将损失掉, 相应的

相互作用截面为^[11]

$$\sigma_{sc}(\text{cm}^2) = 4\pi r_p^2 \left(\frac{q_i Z_r}{A_i} \right)^2 \frac{1}{\beta_i^4 \gamma_i^2 \theta_{acc}^2}, \quad (8)$$

其中, $r_p = 1.547 \times 10^{-16} \text{cm}$, 是经典质子半径, q_i 和 A_i 分别为离子的电荷态和原子量, Z_r 为构成残余气体分子的原子的原子序数, β_i 和 γ_i 为离子的相对论因子, $\theta_{acc}(\text{rad})$ 是储存环的接收角。

2.1.2 多次库仑散射

多次小角度散射, 会使束流的发散度增大。当发散度大于储存环的接收度时, 会导致束流的损失。

多次库仑散射对应的束流寿命为^[12]

$$\tau_{ms}(s) = \frac{A_v - \epsilon_v}{4 \langle \beta_v \rangle (d \langle \vartheta^2 \rangle / dt)}, \quad (9)$$

式中, $A_v(\pi\text{m} \cdot \text{rad})$ 为环的垂直接收度, $\epsilon_v(\pi\text{m} \cdot \text{rad})$ 为束流的初始垂直发散度, $\langle \beta_v \rangle(\text{m})$ 是包络函数的平均值, $d \langle \vartheta^2 \rangle / dt(\text{rad}^2/\text{s})$ 为多次库仑散射的均方角在某一平面上投影对时间的微分^[6, 11—13]。

2.1.3 电子俘获

在离子与残余气体分子的相互作用过程中, 会俘获残余气体分子的电子而改变磁刚度, 从而逃逸出约束磁场。

Stöhlker 等^[14] 从实验上证实: 在 高能重离子与较轻的原子(分子)碰撞过程中, 辐射电子俘获(REC)是主要的作用机制。理论上用相对论二级近似和非相对论二级近似计算的俘获截面的差别不大。

我们拟合了 McLaughlin 等^[15] 非相对论二级近似的计算结果, 由此估算了高能全裸重离子与残余气体分子之间总辐射电子俘获截面。在 HIRFL-CSR 实验环的能量范围内 ($0.25 < \eta_e < 3.0$, $\eta_e = E_e^{-0.5} (Z_i + q_i)/2$, Z_i 和 q_i 分别是离子的原子序数和电荷态, $E_e(\text{Rydberg}) \approx E_i / (1.836 \times 13.6)$ 是电子在离子静止坐标系中的动能, $E_i(\text{eV/u})$ 为离子的能量), 用拟合曲线计算总的辐射电子俘获截面, 然后乘以构成残余气体分子的原子的准自由电子个数来估算相应的 REC 截面。

对于重离子与中高 Z_r 的原子之间的相互作用, 非辐射电子俘获是主要的作用机制^[14]。Dmitriev 等^[16] 给出了 $Z_r < 18$, 离子能量 E_i 在 40—1 000 MeV/u 范围内的单电子俘获截面经验公式, 其与

实验数据的相对偏差在50%以内,且该经验公式和其后的REC数据符合得较好^[7]。

$$\sigma_{nc}(\text{cm}^2) = K \times 10^{-33} Z_r Z_i^3 \beta_i^{-10},$$

$$K=1, Z_i \leq 18; K=1.20-0.01Z_i, Z_i > 18,$$

(10)

式中, Z_r 和 Z_i 分别是构成残余气体分子的原子的原子序数和离子的原子序数, β_i 是离子的相对论因子。

对于较轻离子的单电子俘获截面,可采用Nikolaev^[17]的近似公式进行计算:

$$\sigma_c(\text{cm}^2) \approx 3.21 \times 10^5 q_i^2 \beta_i^3 \sigma_c(p), \quad (11)$$

其中, q_i 和 β_i 分别是离子的电荷态和相对论因子, $\sigma_c(p)$ 是在与离子的能量、相互作用物质都相同的条件下,质子的单电子俘获截面。对 $\sigma_c(p)$,在较高的能区($E_p > 20$ MeV/u), $\sigma_c(p) \approx \sigma_0 E_p^{-4.25}$, E_p (MeV/u)是质子的动能,对于氢气 $\sigma_0 \approx 7.0 \times 10^{-21}$ cm²/atom,对于氮气 $\sigma_0 \approx 5.0 \times 10^{-20}$ cm²/atom^[12]。

2.1.4 电子剥离

对于非全裸的离子束,与残余气体分子的相互作用过程中,其电子可能会被进一步剥离,改变磁刚度而逃逸出约束磁场。

电子剥离截面可根据公式(12)和(13)^[1]计算,

$$\sigma_1(\text{cm}^2) \approx$$

$$4\pi\alpha_0^2 \left(\frac{\beta_i}{\alpha}\right)^{-2} (Z_r^2 + Z_r) \sum_{i=1}^{N_e} \frac{I_0}{I_i} \quad Z_i \geq Z_r, \quad (12)$$

$$\sigma_1(\text{cm}^2) \approx$$

$$\pi\alpha_0^2 \left(\frac{\beta_i}{\alpha}\right)^{-1} Z_r^{2/3} \sum_{i=1}^{N_e} \sqrt{\frac{I_0}{I_i}} \quad Z_i \leq Z_r^{1/3}, \quad (13)$$

其中, $a_0 = 0.529 \times 10^{-8}$ cm是玻尔半径, β_i 是离子的相对论因子, α 是精细结构常数, Z_r 是构成残余气体分子的原子的原子序数, I_i (eV)是被剥离电子的束缚能, $I_0 = 13.6$ eV是氢原子的电离能, N_e 是被剥离的电子数目。(12)和(13)两式适用于高能或者离子的电荷态小于其平衡电荷态的情况,轨道速度大于离子速度的电子对求和不做贡献。

Franzke^[18]给出了 $Z_i \geq 36$, $\gamma_i \leq 1.1$ 的电子剥离截面的经验公式。

2.1.5 核反应

本工作计算的能区为50—500 MeV/u,相应的核反应截面近似为

$$\sigma_{nr}(\text{cm}^2) \approx \pi [r_0 (A_i^{1/3} + A_r^{1/3})]^2, \quad (14)$$

其中, $r_0 = 1.3 \times 10^{-13}$ cm,是与核物质密度相关的一个常数; A_r 和 A_i 分别是构成残余气体分子的原子的原子量和离子的原子量。

2.2 离子与内靶相互作用

离子与内靶分子(原子)的相互作用机制和与残余气体分子的作用机制类似,包括单次库仑散射、多次库仑散射、电荷交换和核反应等。然而,真空管道中残余气体是均匀分布的,用数密度表征,其对应的寿命与环的周长无关。而内靶影响下的寿命除了与靶厚有关外,还与离子的回旋频率有关。相同的靶厚和相同的离子速度情况下,周长越短,离子的回旋频率越高,束流寿命就越短。

Boine-Frankenheim等^[19]给出了离子和内靶相互作用时离子能量损失 Δ ($\Delta > (\gamma_i + 1/\gamma_i)\delta_p T$)对应的束流寿命,其中, γ_i 为离子的相对论因子, δ_p 为储存环所允许的最大动量散度, T 为离子的动能。

2.3 离子与冷却电子束的相互作用

在储存环中,电子冷却装置中的电子束可以抑制残余气体分子、内靶的库仑散射及束内散射等因素造成的束流在纵向和横向发散度的增加,并减小离子之间的相对位置、角度和能量分散。但是,在离子与冷却电子束的相互作用过程中,离子可能俘获电子,改变磁刚度而损失。

3 数值计算结果和讨论

我们计算了在GSI重离子实验环ESR^[4]的实验条件下, $^{238}\text{U}^{92+}$ 离子束在ESR中的储存寿命,并与实验结果进行了比较(见表1)。

从表1可以看出,当离子束能量较低时,计算的 $^{238}\text{U}^{92+}$ 束的储存寿命比实验值大,偏差在80%左右,而当离子束能量较高时,计算结果略小于实测的 $^{238}\text{U}^{92+}$ 储存寿命,偏差在10%左右。从整体上看,高能时的计算结果与实验值相差较小,这主要是由于利用拟合公式计算的辐射电子俘获截面在低能时偏小而高能时又略微偏大所致。由于利用拟合公式计算的低能辐射电子俘获截面偏小,而高能的情况下又略偏大的原因所致。

利用上述方法和HIRFL-CSR实验环主要参数^[9],我们计算了HIRFL-CSR实验环中50—500 MeV/u全裸的 $^{12}\text{C}^{6+}$, $^{36}\text{Ar}^{18+}$, $^{132}\text{Xe}^{54}$ 和 $^{238}\text{U}^{92+}$

子束在各种损失机制影响下所对应的束流寿命和总的束流寿命, 计算结果列在表2—表4中。

表1 ESR的实验条件下 $^{238}\text{U}^{92+}$ 束流寿命的数值计算和实验值^[4]

能量/(MeV/u)	N_2 靶/(molecules/cm ²)	束流寿命	束流寿命
		(本工作, 没有冷却)/s	(实验值, 没有冷却)/s ^[4]
49	5.0×10^{11}	146	80
68	5.0×10^{11}	197	130
220	5.0×10^{11}	668	750
358	5.0×10^{11}	1 230	1 300

从表2—表4可以看出: 相应于HIRFL-CSR实验环的内靶模式(储存环允许的最大动量散度 $\delta_p = 2.0\%$), 与内靶分子(原子)的影响相比, 残余气体分子对束流寿命的影响基本可以忽略; 与内靶分子(原子)之间的电荷交换和与冷却电子束之间的辐射复合是影响束流寿命的主要因素; 在相同的冷却电子束密度的条件下, 较重离子束流的寿命主要取

决于它与冷却电子束间的辐射复合过程; 因而, 对于较重的离子束, 应根据实际情况适当地降低冷却电子束的流强; 对于同种离子束, 束流寿命随着能量的增加而增加; 能量相同时, 较轻的离子束的寿命大于较重的离子束的寿命。

上述计算结果为研究重离子在HIRFL-CSR实验环中的运行情况提供了有价值的参考数据。

表2 HIRFL-CSR实验环中离子束在残余气体分子的影响下的寿命*

离子种类	能量/(MeV/u)	与残余气体分子相互作用及对应的束流寿命 (3.0×10^{-11} mbar, 85% $\text{H}_2 + 15\% \text{N}_2$)				
		τ_{ss}/s	τ_{ms}/s	τ_c/s	τ_{nr}/s	τ_r/s
$^{12}\text{C}^{6+}$	50	1.01×10^7	1.05×10^6	2.40×10^5	1.06×10^8	1.91×10^5
	100	2.81×10^7	2.95×10^6	1.32×10^6	7.74×10^7	8.73×10^5
	200	7.81×10^7	8.18×10^6	8.24×10^6	5.86×10^7	3.66×10^6
	300	1.42×10^8	1.48×10^7	2.62×10^7	5.09×10^7	7.55×10^6
	400	2.16×10^8	2.26×10^7	6.24×10^7	4.66×10^7	1.16×10^7
	500	2.99×10^8	3.13×10^7	1.26×10^8	4.38×10^7	1.52×10^7
$^{36}\text{Ar}^{18+}$	50	1.01×10^7	1.11×10^6	5.96×10^4	6.40×10^7	5.62×10^4
	100	2.81×10^7	3.11×10^6	1.47×10^5	4.70×10^7	1.39×10^5
	200	7.81×10^7	8.63×10^6	9.15×10^5	3.55×10^7	8.00×10^5
	300	1.42×10^8	1.56×10^7	2.91×10^6	3.08×10^7	2.24×10^6
	400	2.16×10^8	2.38×10^7	6.94×10^6	2.82×10^7	4.42×10^6
	500	2.99×10^8	3.31×10^7	1.40×10^7	2.66×10^7	7.02×10^6
$^{132}\text{Xe}^{54+}$	50	1.50×10^7	1.79×10^6	1.53×10^5	3.30×10^7	1.39×10^5
	100	4.20×10^7	5.01×10^6	3.24×10^5	2.42×10^7	2.99×10^5
	200	1.17×10^8	1.39×10^7	7.87×10^5	1.83×10^7	7.12×10^5
	300	2.11×10^8	2.52×10^7	1.43×10^6	1.59×10^7	1.24×10^6
	400	3.22×10^8	3.84×10^7	2.29×10^6	1.46×10^7	1.87×10^6
	500	4.47×10^8	5.33×10^7	3.38×10^6	1.37×10^7	2.57×10^6
$^{238}\text{U}^{92+}$	50	1.68×10^7	2.09×10^6	3.45×10^4	2.39×10^7	3.38×10^4
	100	4.71×10^7	5.85×10^6	6.55×10^4	1.76×10^7	6.45×10^4

200	1.31×10^8	1.62×10^7	1.37×10^5	1.33×10^7	1.34×10^5
300	2.37×10^8	2.94×10^7	2.25×10^5	1.15×10^7	2.18×10^5
400	3.61×10^8	4.48×10^7	3.30×10^5	1.06×10^7	3.17×10^5
500	5.01×10^8	6.22×10^7	4.53×10^5	9.94×10^6	4.30×10^5

* τ_{ss} , τ_{ms} , τ_c 和 τ_{nr} 分别是和离子与残余气体分子之间的单次库仑散射、多次库仑散射、电子俘获和核反应等作用机制相对应的束流寿命, τ_t 是残余气体分子影响下总的束流寿命; 对于全裸离子, 不存在电子剥离机制。

表3 HIRFL-CSR实验环中离子束在内靶影响下的寿命*

离子种类	能量 / (MeV/u)	与内靶分子(原子)相互作用及对应的束流寿命 (N ₂ 靶: 2.5×10^{12} molecules/cm ²)				
		τ_{ss}/s	τ_{ms}/s	τ_c/s	τ_{nr}/s	τ_t/s
¹² C ⁶⁺	50	6.54×10^3	6.91×10^2	2.51×10^2	2.33×10^5	1.79×10^2
	100	1.83×10^4	1.93×10^3	1.38×10^3	1.71×10^5	7.68×10^2
	200	5.09×10^4	5.37×10^3	8.62×10^3	1.29×10^5	3.03×10^3
	300	9.21×10^4	9.72×10^3	2.74×10^4	1.12×10^5	6.28×10^3
	400	1.40×10^5	1.48×10^4	6.53×10^4	1.03×10^5	1.00×10^4
³⁶ Ar ¹⁸⁺	50	6.54×10^3	7.27×10^2	3.59×10^3	1.57×10^5	5.22×10^2
	100	1.83×10^4	2.03×10^3	1.54×10^2	1.15×10^5	1.41×10^2
	200	5.09×10^4	5.65×10^3	9.57×10^2	8.74×10^4	7.98×10^2
	300	9.21×10^4	1.02×10^4	3.04×10^3	7.58×10^4	2.22×10^3
	400	1.40×10^5	1.56×10^4	7.26×10^3	6.94×10^4	4.48×10^3
¹³² Xe ⁵⁴⁺	50	9.77×10^3	1.17×10^3	1.61×10^2	9.13×10^4	1.40×10^2
	100	2.73×10^4	3.27×10^3	3.42×10^2	6.70×10^4	3.05×10^2
	200	7.60×10^4	9.09×10^3	8.31×10^2	5.07×10^4	7.43×10^2
	300	1.38×10^5	1.65×10^4	1.51×10^3	4.40×10^4	1.33×10^3
	400	2.10×10^5	2.51×10^4	2.42×10^3	4.02×10^4	2.07×10^3
²³⁸ U ⁹²⁺	50	1.09×10^4	1.36×10^3	36.4	6.93×10^4	35.3
	100	3.06×10^4	3.82×10^3	69.2	5.09×10^4	67.7
	200	8.51×10^4	1.06×10^4	1.45×10^2	3.85×10^4	1.42×10^2
	300	1.54×10^5	1.92×10^4	2.37×10^2	3.34×10^4	2.32×10^2
	400	2.35×10^5	2.93×10^4	3.48×10^2	3.06×10^4	3.40×10^2
500	3.26×10^5	4.06×10^4	4.78×10^2	2.88×10^4	4.65×10^2	

* τ_{ss} , τ_{ms} , τ_c 和 τ_{nr} 分别是和离子与内靶分子(原子)之间的单次库仑散射、多次库仑散射、电子俘获和核反应等作用机制相对应的束流寿命, τ_t 是内靶影响下总的束流寿命; 在HIRFL-CSR实验环内靶模式所允许的最大动量散度 $\delta_p = 2.0\%$ 和50—500 MeV/u能量范围内。

表4 HIRFL-CSR实验环中离子束总的束流寿命*

离子种类	能量 / (MeV/u)	与冷却电子束相互作用及对应的束流寿命 (电子束数密度: 5×10^7 electrons/cm ³)			
		τ_{rr}/s	τ_r/s	τ_t/s	τ_{total}/s
¹² C ⁶⁺	50	3.77×10^3	1.91×10^5	1.79×10^2	1.71×10^2
	100	4.17×10^3	8.73×10^5	7.68×10^2	6.48×10^2
	200	5.02×10^3	3.66×10^6	3.03×10^3	1.89×10^3
	300	5.94×10^3	7.55×10^6	6.28×10^3	3.05×10^3
	400	6.95×10^3	1.16×10^7	1.00×10^4	4.10×10^3
³⁶ Ar ¹⁸⁺	50	3.54×10^2	5.62×10^4	5.52×10^2	2.15×10^2
	100	3.90×10^2	1.39×10^5	1.41×10^2	1.04×10^2
	200	4.70×10^2	8.00×10^5	7.98×10^2	2.96×10^2
	300	5.57×10^2	2.24×10^6	2.22×10^3	4.45×10^2
	400	6.51×10^2	4.42×10^6	4.48×10^3	5.68×10^2
¹³² Xe ⁵⁴⁺	50	33.8	1.39×10^5	1.40×10^2	27.2
	100	37.3	2.99×10^5	3.05×10^2	33.2
	200	44.9	7.12×10^5	7.43×10^2	42.3
	300	53.2	1.24×10^6	1.33×10^3	51.1
	400	62.2	1.87×10^6	2.07×10^3	60.4
²³⁸ U ⁹²⁺	50	10.9	3.38×10^4	35.3	8.3
	100	12.0	6.45×10^4	67.7	10.2
	200	14.5	1.34×10^5	1.42×10^2	13.1
	300	17.1	2.18×10^5	2.32×10^2	16.0
	400	20.0	3.17×10^5	3.40×10^2	18.9
	500	23.2	4.30×10^5	4.65×10^2	22.1

* τ_r , τ_t 和 τ_{rr} 分别是在残余气体分子、内靶和冷却电子束的影响下相应的束流寿命, τ_{total} 是总的束流寿命。

致谢 作者与中国科学院近代物理研究所杨晓天研究员在真空方面、宋明涛研究员和原有进研究员在加速器物理方面进行了深入讨论, 在此表示感谢。同时感谢张雪荧、阮芳芳和漆德君等同学所给予的有益讨论和帮助。

参考文献 (References):

[1] Habs D, Baumann W, Berger J, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1989, B43(3): 390.
 [2] Ekström C, Fridé C J, Jansson A, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1996, A371(3): 572.
 [3] Franzke B, Beckert K, Bosch F, *et al.* EPAC, 1992, 0 444.
 [4] Stöhlker Th, Reich H, Beckert K, *et al.* Hyperfine Interac-

tion, 1997, 108(1—3): 29.
 [5] DuBois R D, de Lucio O, Thomason M, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2007, B261(1—2): 230.
 [6] Poth H. Phys Rep, 1990, 196(3—4): 135.
 [7] Rao Yinong. Electron Cooling in HIRFL-CSR (Doctoral Thesis). Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 1997 (in Chinese).
 (饶亦农. HIRFL-CSR电子冷却(博士学位论文). 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 1997.)
 [8] Bell M, Bell J S. Part Accel, 1982, 12(1): 49.
 [9] Xia J W, Zhan W L, Wei B W, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2002, A488(1—2): 11.
 [10] Cai Xiaohong, Torpikov D K. Nuclear Physics Review, 2002, 19(2): 281 (in Chinese).
 (蔡晓红, Torpikov D K. 原子核物理评论, 2002, 19(2): 281.)

- [11] Jackson J D. Classical Electrodynamics(2nd ed.). New York; John-wiley & Sons Inc, 1975, 429. 1 313.
- [12] Franzke B. CERN 92-01, 1992, 100. [16] Dmitriev I S, Zaikov V P, Kral'kina E A, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1986, B14(4—6); 515.
- [13] Hinterberger F, Prasuhn D. Nucl Instr and Meth, 1989, A279(3); 413. [17] Nikolaev V S. Sov Phys Usp, 1965, 8(2); 269.
- [14] Stöhlker Th, Kozhuharov C, Mokler P H, *et al.* Phys Rev, 1995, A51(3); 2 098. [18] Franzke B. IEEE Trans on Nucl Sci, 1981, NS-28(3); 2 116.
- [15] McLaughlin J D, Hahn Yukap. Phys Rev, 1991, A43(3); [19] Boine-Frankenheim O, Hasse R, Hinterberger F, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2006, A560(2); 245.

Loss Mechanism and Lifetime of Ion Beam in HIRFL-CSR^{*}

XUE Ying-li^{1, 2}, CAI Xiao-hong^{1, #}, YU De-yang¹

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

2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The loss mechanism and lifetime of ion beams in collisions with residual gas, internal target and electrons in e-cooler in heavy ion cooler storage rings were studied. The partial beam lifetimes resulting from various loss mechanisms and the total beam lifetimes of 50—500 MeV/u $^{12}\text{C}^{6+}$, $^{36}\text{Ar}^{18+}$, $^{132}\text{Xe}^{54+}$ and $^{238}\text{U}^{92+}$ stored in the experimental ring of the Cooler Storage Ring at the Heavy Ion Research Facility in Lanzhou (HIRFL-CSR) were calculated. The calculations indicate that the charge exchange process between ion beams and the internal target, as well as the radiative recombination process with the electrons in e-cooler restrict the beam lifetime considerably. For heavy ion beams such as $^{132}\text{Xe}^{54+}$ and $^{238}\text{U}^{92+}$, the radiative recombination is the dominant loss mechanism.

Key words: HIRFL-CSR; ion beam; beam lifetime

* **Received date:** 1 Feb. 2008; **Revised date:** 16 Sep. 2008

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (10375080, 10775160)

Corresponding author: Cai Xiao-hong, E-mail: caixh@impcas.ac.cn