

HIRFL-CSR加速器中束流与真空中剩余 气体的碰撞损失*

唐靖宇 雷文 王义芳

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 研究了重离子加速器中束流与真空中剩余气体的碰撞损失过程和碰撞截面,在依据大量实验数据的基础上,提出了一组计算离子-原子的电荷交换截面的经验公式.以兰州重离子加速器 HIRFL 及冷却储存环 CSR 为例,给出了依据碰撞截面的公式计算束流在加速器真空中的传输效率的方法,并计算了在不同真空度下 HIRFL 的 ECR 源轴向注入束运线、注入器 SFC、前束运线、主加速器 SSC 和后束运线等不同加速阶段及 CSR 的传输效率,并提出合理的真空度要求. HIRFL 的真空分布测量和束流的损失测量证明了该计算方法的可靠性.

关键词 电子俘获 电子损失 电荷交换截面 真空中剩余气体 传输效率

1 引言

带电粒子束只有在真空中传输和加速时才不至于很快损失掉,但不同的加速器类型和不同的加速离子对真空度的要求不同,从低真空到超高真空甚至极高真空.这里主要以兰州重离子加速器国家实验室 HIRFL 加速器系统和正在预研的 CSR 冷却储存环为对象,考察其中的重离子束与真空中剩余气体的碰撞损失情况,从而对现有真空条件提出评价并提出合理的真空度要求,同时也为 CSR 预研提供了理论依据.

HIRFL 加速离子范围很广,从轻的重离子 C、N、O 到较重的 Kr、Xe 等,今后还要扩展到 U,它们对真空度的要求相差较大.随着 HIRFL 的发展,现在有必要对该问题进行全面考察,并给出合理的真空度指标要求.而 CSR 尚处在初步设计阶段,根据国外的同类型储存环的情况,真空度应为 10^{-9} — 10^{-10} Pa 的极高真空,但不同的加速器的具体指标不完全一样,因而有必要针对 CSR 的具体情况,计算出其合理的真空度指标要求,这对确定其真空设备的投入(资金投入和人力投入)是很有意义的.

离子束与真空中剩余气体的碰撞过程较为复杂,可能同时发生多种过程,对应不同的

1997-05-16收稿

* 国家自然科学基金(19675056)资助

离子束和不同的能量范围,可能是不同的碰撞机制起主要作用. 这里考虑的又是宽范围的离子种类(C—U)和非常宽的能量范围(1.0keV/u—1.0GeV/u),需要对各种碰撞过程有个全面的认识. 重离子束与剩余气体的碰撞主要有以下过程(所考虑能区内):

$$(1) \text{ 电子俘获: } P^{+q} + T \rightarrow \tilde{P}^{+(q-n)} + \tilde{T}^{+(n+m)} + me^{-}$$

上方程表示入射离子 P 带有 q 个正电荷,与剩余气体靶原子 T 碰撞后俘获 n 个电子,电荷态变为 $(q-n)$,而靶原子除转移 n 个电子与入射离子外还被打出 m 个电子,其电荷态变为 $(n+m)$,并且碰后入射离子和靶原子都可能处在激发态(用波浪符号表示). 在低能情况下,一般单电子俘获($n=1$)起主要作用,且一般都没有附加电子发射($m=0$),原始电荷态 q 较大时多电子俘获截面不能忽略. 而在高能情况下,电子俘获截面明显减少且多电子俘获截面可以忽略,但有伴随电子发射.

$$(2) \text{ 电子损失: } P^{+q} + T \rightarrow \tilde{P}^{+(q+n)} + \tilde{T}^{+m} + (n+m)e^{-}$$

上方程的符号与电子俘获方程一样,但表示入射离子与靶原子碰撞后又损失 n 个电子,电荷态变为 $(q+n)$,靶原子也损失 m 个电子,电荷态变为 m .

(3) 角散射: 入射离子与靶原子发生弹性或非弹性碰撞,尽管没有电子转移发生,但对入射离子的运动方向和能量都产生影响,即主要引起束流的发射度增加,该过程在某些储存环中甚为重要.

$$(4) \text{ 气体电离: } P^{+q} + T \rightarrow \tilde{P}^{+q} + \tilde{T}^{+m} + me^{-}$$

在这个过程中,入射离子的电荷态不发生变化,仅有能量转移给靶原子,使其电离. 此过程中碰撞参数一般较大,且 q 也大. 该过程在加速器中的主要影响是靶离子和束流中损失的离子一起打在管壁上造成强吸附分子的释放,从而导致出气率增加和有可能造成真空不稳定性.

以上 4 种过程一般都会发生,其截面随入射离子和靶原子及入射能量的具体情况而变. 入射离子发生电子俘获和电子损失过程通常都称为电荷变化过程或电荷交换过程,一般为近距离碰撞,是造成重离子在真空中损失的主要过程.

2 离子与真空中剩余气体分子的碰撞过程描述

2.1 电荷变化过程

N. Bohr 于 1948 年用费米电子气模型(统计模型,或费米-托马斯模型)对离子与靶原子或分子的碰撞造成离子电荷态的变化进行了早期的研究^[1]. 他将碰撞过程分为电子损失和电子俘获两种,在作了简单的二体或三体碰撞假设后,他给出了电子损失和电子俘获的截面公式,并给出了一般性原则:对于重离子与重靶气体的碰撞,如果是电子损失,则通常发生在电子轨道速度 $u < v$ (离子运动速度)的情况下,当 $u \gg v$ 时其几率非常小;反过来如果是电子俘获,一般发生在 $u \geq v$ 情况下,当 $u \ll v$ 时电子被俘获到最外层的几率也非常小. 但 Bohr 的公式与实验数据相差较大,仅能定性地说明一些问题.

在 Bohr 的开拓性工作之后,G.I. Bell^[2], N. Bohr 和 J. Lindhard^[3], R. L. Gluckstern^[4] 都采用半经典模型来描述电荷变化过程. 纯量子力学的描述是比较困难的,与实验的符合也不理想.

2.1.1 电子俘获过程的经验和半经验描述

通常只有在入射离子带有的电荷态高于平衡电荷态时,电子俘获过程才有较大的截面. 俘获过程实际上是一个较深的势阱(入射离子)俘获另一个较弱的势阱(靶原子)中的电子,因此可以想象当入射速度 v 大时,俘获几率较小,但 v 小于一定值时($\frac{1}{2}mv^2 < U, U$ 是俘获势阱),反应截面达到饱和.

由于理论分析公式与实验结果有较大差距,因而一些研究人员给出了半经验公式或纯经验公式,这些公式也只在一定的范围内与实验符合^[5-8],而且测量结果本身随测量条件不同有时也相差几倍. 另外,原子结构的壳层效应难以在经验公式中较好地表示,使用这些公式作内插值一般还比较可靠,但在使用外推法时要小心.

由于这些公式不能较好的覆盖 HIRFL-CSR 的能区和离子范围,我们根据大量实验数据^[9-13](尤其是近年来发表的一些电荷态较高和能量较高的离子的实验数据)也给出了几个拟合经验公式. 实验结果表明在很低能量时($v \leq v_0, v_0 = e^2/h = 2.188 \times 10^6 \text{ m/s}$),俘获截面与靶气体基本无关(He 除外),且与入射离子速度也没有明显的关系. 根据实验数据(见图 1)可以给出下面的近似关系:

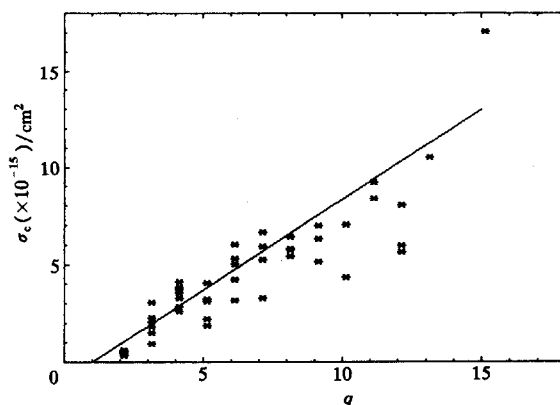


图 1 电子俘获截面与电荷态的关系

靶: H_2 和 N_2 , $v/v_0 \leq 0.5$.

$$\sigma_c(q) = 0.93 \times 10^{-15}(q-1), \quad (v/v_0 \leq 0.5, \text{ 在 } \text{H}_2 \text{ 和 } \text{N}_2 \text{ 中}), \quad (1)$$

俘获截面随 v 的增加而很快下降,并且在重靶气体中的截面明显大于在 H_2 中的截面和与 q^2 成正比,见图 2(a, b),分别用公式描述:

$$\sigma_c(q, v) = 6 \times 10^{-15} \frac{q^2}{50 + (v/v_0)^7}, \quad (0.5 \leq v/v_0 \leq 7, \text{ 在 } \text{H}_2 \text{ 中}), \quad (2)$$

$$\sigma_c(q, v) = 3 \times 10^{-15} \frac{q^2}{75 + (v/v_0)^{4.6}}, \quad (0.5 \leq v/v_0 \leq 25, \text{ 在 } \text{N}_2 \text{ 中}), \quad (3)$$

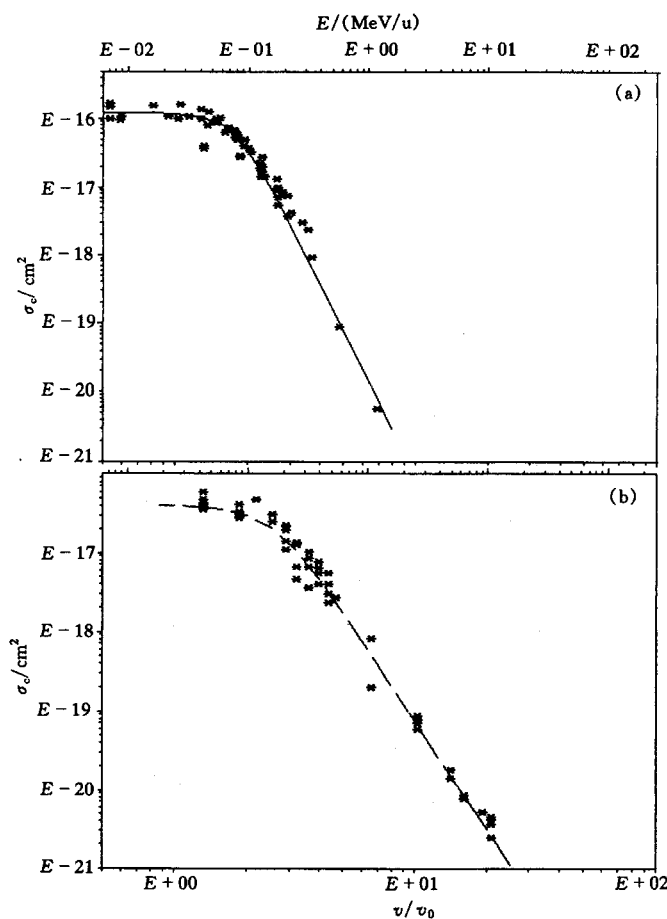


图 2 电子俘获截面与离子速度(能量)的关系

(a) H_2 靶, σ/q^2 , $0.5 \leq v/v_0 \leq 7$;

(b) N_2 靶, σ/q^2 , $0.5 \leq v/v_0 \leq 25$.

2.1.2 电子损失的半经验和经验描述

理论上描述电子损失过程应该比电子俘获过程容易些,但实际困难仍很大,比较成功的仅有 DZT 半经验方法^[14]. 该方法基于实验数据的分析和理论计算,从各种已知的碰撞截面 $\sigma_{i,i+m}$ 中提取某个壳 nl 中的 q_{nl} 个电子的单电子损失截面 σ_{nl} , 然后利用 σ_{nl} 可以计算任意离子的电荷态增加的截面:

$$S_i = \sum m \sigma_{i,i+m} = \sum_{nl} q_{nl} \sigma_{nl}, \quad (4)$$

还考虑了内壳层电子损失产生的级联填充造成的多电子损失截面. 为简化起见,我们根据大量实验数据^[9-18]给出了二个拟合公式,见图 3.

$$\sigma_l(q, v) = 1.5 \times 10^{-15} q^{-1.8} (v/v_0)^2, \quad (v/v_0 \leq 5, \text{ 在 } \text{N}_2 \text{ 中}), \quad (5)$$

$$\sigma_l(q, v) = 1.5 \times 10^{-17} Z_i^3 q^{-2} (v/v_0)^2, \quad (5 \leq v/v_0 \leq 25, \text{ 在 } \text{N}_2 \text{ 中}) \quad (6)$$

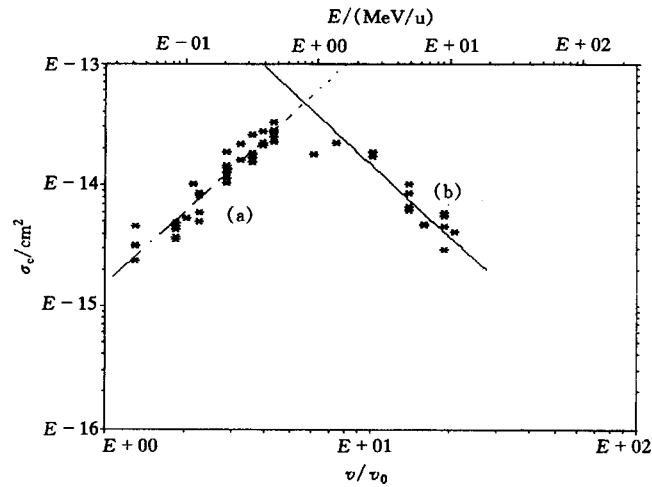


图 3 电子损失截面与离子速度(能量)的关系

$$\begin{aligned} \text{H}_2 \text{靶, a: } \sigma * q^{1.3}, v/v_0 \leq 5; \\ \text{b: } \sigma * q^2 / Z^3, 5 \leq v/v_0 \leq 25. \end{aligned}$$

当入射离子速度 $v < u$ 时, u 是要损失的轨道电子速度, 电子损失截面随 v 增加而增加, 而当 $v > u$ 时, 则截面随 v 增加而减少, 即在 $v \approx u$ 处有一极大值。

2.1.3 平衡电荷态

离子在与靶原子发生碰撞时, 电子俘获和电子损失过程可以同时发生, 相互竞争。当电子俘获截面大于电子损失截面时, 电荷态就会减小, 反之则增加。如果有足够的碰撞机会, 则离子束会达到一个平衡电荷态分布, 此时在最可几电荷态上, 电子俘获截面与电子损失截面大致相当, 而平衡电荷态的定义由下式确定:

$$\bar{q} = \sum_q q F(q), \quad (7)$$

其中 $F(q)$ 是电荷态分布函数。平衡电荷态的大小与初始电荷态无关, 但与离子的速度、离子和靶原子的原子序数有关。

从 N. Bohr 开始在理论上已对平衡电荷态进行有价值的考虑, 他认为在入射离子中除运动速度大于入射速度的内层电子外, 所有外层电子都将在碰撞中损失掉, 并用统计模型进行了处理。这些理论能预言基本趋势, 但定量地描述常借助于基于实验结果和理论的半经验公式^[15,16]。

2.2 多次散射过程

这是典型的二次碰撞问题, 通常也称为库仑散射过程, 可以得到较好的分析结果。我们感兴趣的是碰撞造成的离子能量损失和碰撞对入射离子的方向产生偏移。除了几率很小的近距离碰撞立即造成入射离子的损失外, 该碰撞过程主要是使束流的发射度增加并可能造成束流损失。经过多次碰撞后, 束流角散的均方角可以表示为^[17,18]:

$$\langle \Theta^2 \rangle = 4\pi Nt \left(\frac{Z_i Z_T e^2}{2\pi\epsilon_0 p v} \right)^2 \ln \left(\frac{204}{Z_T^{1/3}} \right), \quad (8)$$

其中, N 为单位体积中的原子数, t 为穿越距离, Z_i 、 Z_T 为入射离子和靶原子的原子序数, p 、 v 为入射离子的动量和速度. 从式中可见 $\langle \Theta^2 \rangle \propto (Z_i / A_i)^2$, 该作用在轻离子尤其是在质子情况下较强, 而在较重离子情况下经常可以忽略, 因为它相比重离子的电荷交换作用通常很小.

3 束流在 HIRFL-CSR 加速器真空中的传输效率

3.1 束流在真空中的传输效率的计算方法

根据相互作用截面的概念, 可将束流穿过厚度为 ds 的介质的损失率表示为

$$dI/I = N\sigma(E) ds, \quad (9)$$

其中, I 为束流强度, N 为真空中单位体积内剩余气体的分子数, $\sigma(E)$ 是与能量相关的总的电荷交换截面 ($\sigma(E) = \sigma_c + \sigma_i$). 对上式积分得到束流在真空中的传输效率的表示式

$$\eta = \frac{I}{I_0} = e^{-\int N\sigma(E) ds}. \quad (10)$$

而 N 可用真空度 P 表示, 若 P 以 Pa 为单位, 并以 $G(E)$ (单位 10^{-15}cm^2) 代替 $\sigma(E)$, 则有

$$\eta = e^{-26.6 \int P G(E) ds}, \quad (11)$$

其中 s 以米为单位. 在束流传输线上 E 不变, 所以有

$$\eta = e^{-26.6 P G(E) s}. \quad (12)$$

在回旋加速器中, 能量是每圈跳跃式地变化, 可将传输效率表示为:

$$\eta = e^{-26.6 \sum_{i=1}^{2n} P G(E_i) \pi R_i}. \quad (13)$$

上式表示每圈加速两次, n 是加速圈数, R_i 是第 i 次加速后的平均轨道半径. 在 CSR 储存环中因为采用慢注入积累技术, 该阶段的传输效率可用下式表示:

$$\eta = \frac{1 - e^{-t/\tau}}{t/\tau} \quad (14)$$

其中束流寿命 $\tau = 1/(26.6vPG)$. 用以上公式 (12—14) 和前一节中给出的电荷交换截面的公式, 就可以计算出束流在传输线和回旋加速器以及 CSR 冷却储存环的真空中的传输效率. 另外, 还需要考虑真空中的复杂气体成份的影响. 根据对真空中剩余气体成份的质谱分析, 在真空度低于 $1 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 时, H_2 约占 40%, 而较重的气体 (如 CO , N_2 , H_2O , Ar 等) 约占 60%, 因而可近似认为是在 N_2 中的作用. 随着真空度的提高, H_2 所占比例提高而重的气体所占比例降低. 如在 $1 \times 10^{-8} \text{Pa}$ 时, 实验测出的比例是 H_2 约占 85%, N_2 占 15%, 这时

需要考虑两种混合成份的总效果。

3.2 束流在 HIRFL-CSR 加速器真空中的传输效率和真空度要求

针对 HIRFL-CSR 中各加速段的具体情况, 分别计算其束流与剩余气体的碰撞损失情况, 并提出相应的真空度要求。HIRFL-CSR 可以分为以下的加速传输段: ECR 离子源-轴向注入束运线 (BL0) 传输-注入器 SFC 预加速-前束运线 (BL1) 传输-主加速器 SSC 加速-后束运线 (BL2) 传输-主环 CSRm 加速-束运线 (BL3) 传输-实验环 CSRe。

在束运线 BL0 上, 离子能量很低 ($1.0-10\text{keV/u}$), 离子电荷态较高, 因而单电子俘获截面非常高, 约 $10^{-15}-10^{-14}\text{cm}^2$ 量级, 双电子俘获也可占单电子俘获截面的 $10\%-30\%$, 而其它过程相对较小, 可以忽略。

在注入器的加速过程中, 电子俘获截面迅速减小, 而电子损失截面先是随能量的增加而增加, 在能量约为 0.25MeV/u 时也开始减小, 但其随能量增加而减小的速度比电子俘获截面要慢得多。此时仍是离子电荷态高于平衡电荷态, 在电子俘获截面与电子损失截面大致相等时, 离子电荷态也与平衡电荷态相等, 离子电荷态越高, 两者相等时的截面越小。随后能量再增加时, 离子电荷态小于平衡电荷态, 电子损失截面就成为主要的了, 一直到束流从 SFC 的引出, SFC 对不同离子的引出能量范围是 $0.5-8.5\text{MeV/u}$ 。

在前束运线 BL1 上一直到剥离器之前, 也是电子损失过程占主要地位, 但经过碳膜剥离器之后, 离子电荷态有了更进一步地提高, 电子俘获截面增加, 而电子损失截面减小, 导致电子俘获截面再次超过电子损失截面, 但总的电荷交换截面在通过剥离膜后, 可能增加也可能减小。

在主加速器 SSC 中, 随能量增加, 电子俘获截面和电子损失截面都减小。尽管总的电荷交换截面在主加速器中比在注入器中小得多 (差 1—2 个量级), 但因为其加速路径也长得多, 所以其真空度要求也不能降低。

从 SSC 到不同的实验终端或到 CSRm 的后束运线 BL2 的长度是不一样的, 最长的约为 80m 。因为此时束流能量较高, 电荷交换截面较小, 但考虑该段束运线有时直接传输从 SFC 来的束流, 因而还是要求 10^{-5}Pa 的真空度。

在冷却储存环的主环 CSRm 中, 尽管电荷交换截面已降到大约 10^{-20}cm^2 甚至更小, 但其影响更不能忽视, 因为 CSRm 需要累积较多的离子数, 注入时间非常长, 约 $3-5\text{s}$, 离子在这期间所走的路径为 10^7m 量级。多次碰撞过程对束流发射度的增加也开始与电荷交换过程竞争, 但在注入积累阶段由于电子冷却的作用而被抑制, 仅需在加速阶段考虑, 经计算其影响在 $1 \times 10^{-8}\text{Pa}$ 真空水平可以忽略。加速阶段的束流损失由于加速时间短 (约为 1s) 和电荷交换截面减小而可以忽略。采用电子冷却方法带来的辐射电子俘获 (REC) 过程也对束流寿命有影响, 但与真空度无关。所以在 CSRm 中的真空要求比 HIRFL 系统高得多, 为 $10^{-9}-10^{-8}\text{Pa}$ 水平。

在束运线 BL3 上, 束流能量高, 一般的 10^{-5}Pa 即可满足要求。在实验环 CSRe 中, 同样由于能量相对较高, 其真空度的要求可以比 CSRm 低 1—2 个量级。

图 4 给出计算的加速器各段的束流传输效率与真空度的关系, 表 1 给出对加速器各真空段的要求 ($> 90\%$ 的传输效率)。在 HIRFL 加速较重的离子如 Kr, Xe 时, 也观察到真空

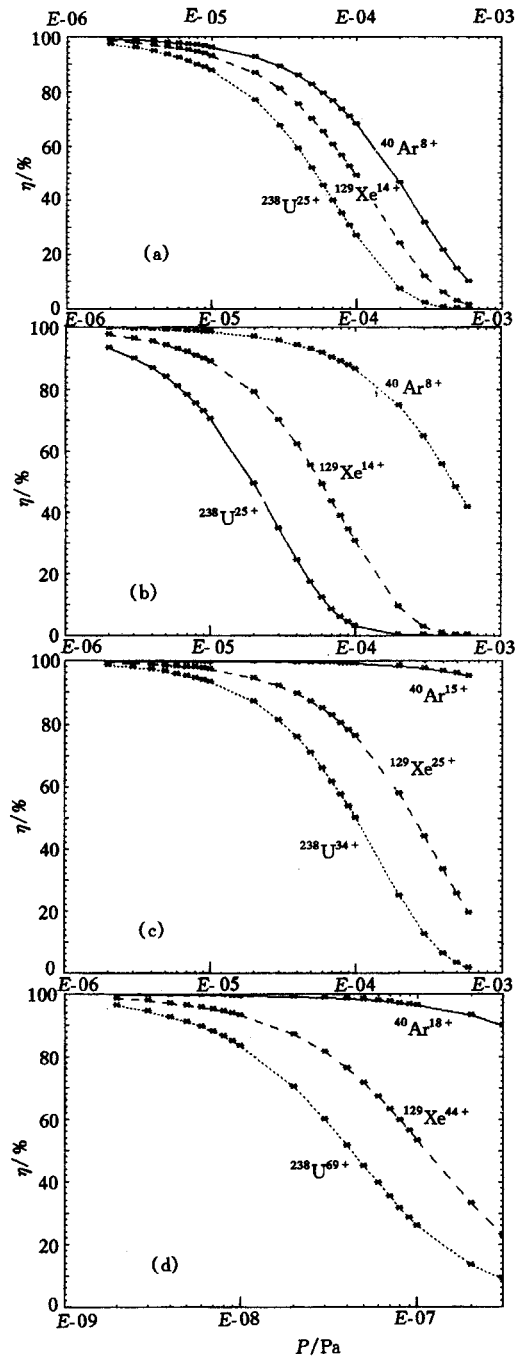


图 4 束流在 HIRFL-CSR 真空中的传输效率

- (a) ECR 源注入线 (keV/u): Ar—2.7, Xe—1, U—1;
 (b) SFC (引出—MeV/u): Ar—2.35, Xe—0.77, U—0.7;
 (c) SSC (引出—MeV/u): Ar—25, Xe—8, U—7.37;
 (d) CSRm (注入—MeV/u): Ar—25, Xe—8, U—7.37.

表1 HIRFL-CSR各段的真空度要求

加速传输段	要求真空(Pa)	目前真空(Pa)
束运线BL0	1×10^{-5}	1×10^{-4}
加速器SFC	1×10^{-5}	5×10^{-5}
束运线BL1	5×10^{-5}	1×10^{-4}
加速器SSC	2×10^{-5}	2×10^{-5}
束运线BL2	5×10^{-5}	5×10^{-5}
储存环CSRm	1×10^{-5}	设计
束运线BL3	1×10^{-5}	设计
储存环CSRe	1×10^{-5}	设计

度对束流传输效率的影响,且与真空分布的测量与计算结果一致.

4 结论

通过对重离子束在不同能量下与真空中剩余气体的碰撞研究,对重离子加速器中束流与剩余气体碰撞造成的损失给出了定量的计算,针对 HIRFL-CSR的具体情况,计算了不同加速阶段的束流损失情况和对真空度的要求.通过对大量实验结果的分析,提出了一组描述重离子在剩余气体中的电荷交换截面拟合经验公式,而电荷交换过程是造成束流损失的主要过程.计算结果表明,对作为全离子加速器的 HIRFL-CSR加速器系统,要求注入器 SFC 及其轴向注入线至少需要 1×10^{-5} Pa 的平均真空度;对 SSC 以及束运线至少要 2×10^{-5} Pa 的平均真空度;对于冷却储存环主环 CSRm 至少要 1×10^{-8} Pa 的平均真空度;而对实验环 CSRe 可以要求 1×10^{-7} Pa 的平均真空度.

目前 HIRFL 系统的真空度尚未达到上述要求,有必要进行局部改造以适应朝加速重重离子方向拓展的趋势.

感谢郝斌干、杨晓天及真空室其他同志的合作.

参 考 文 献

- [1] Bohr N. Dan. Mat. —Fys. Medd., 1948,18(8)
- [2] Bell G I. Phys. Rev., 1953,90:548—557
- [3] Gluckstern R L. Phys. Rev., 1955, 98:1817—1821
- [4] Bohr N, Lindhard J. Dan. Mat. —Fys. Medd., 1954, 28(7)
- [5] Angert N et al. Phys. Lett., 1968, 27A:28—29
- [6] Nikolaev V S. Sov. Phys. JETP, 1957, 6:417
- [7] Schlachter A S et al. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., 1987, B24 / 25:219—223
- [8] Schlachter A S, Stears J W, Graham W G et al. Phys. Rev., 1983, A27:3372—3374
- [9] Betz H D. Rev. of Mod. Phys., 1972, 44(3):465—539
- [10] Franzke B. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1981, NS.28(3):2116—2118
- [11] Tawara H et al. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1985, 32:235—304
- [12] Wu W K et al. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1988, 40:57—200
- [13] Alonso J, Gould H. Phys. Rev., 1982, A26:1134—1137

- [14] Dmitriev I S et al. Nucl. Instr. and Meth., 1979, **164**:329—335
[15] Betz H D et al. Phys. Lett., 1966, **22**:643—644
[16] Nikolaev V S, Dmitriev I S. Phys. Lett., 1968, **A28**:277—278
[17] Jackson J D. Classical Electrodynamics, John Wiley & Sons, 1975, 429—463
[18] Franzke B. CERN Accelerator School, CERN 92—01,100—119

Beam Loss in HIRFL-CSR Due to Collisions With Residual Gas in Vacuum *

Tang Jingyu Lei Wen Wang Yifang

(*Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

Abstract This paper discusses the collision of heavy ions with residual gas atoms in the vacuum and the cross-sections of the collision processes. The method calculating beam transmission efficiency in vacuum is presented taking HIRFL and CSR machine as examples. Based on rich experimental data, a series of empirical formulae of calculating the cross-section of charge changing process is given. The transmission efficiency curves of different sections in HIRFL and CSR are also calculated, and thus the reasonable requirements for HIRFL and CSR vacuum systems are given. The calculation method has been checked by the measurements of vacuum and beam loss in HIRFL.

Key words electron capture, electron loss, charge changing cross-section, residual gas in vacuum, transmission efficiency

Received 16 May 1997

* Supported by the National Natural Science Foundation of China (19675056)