

文章编号: 1007-4627(2001)01-0035-04

兰州重离子冷却储存环工程*

夏佳文, 詹文龙, 魏宝文, 原有进, 宋明涛, 张文志, 杨晓东, 赵红卫

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 兰州重离子加速器冷却储存环是兰州重离子研究装置的后续工程. 它的建造目的是将重离子束的能量提高到 1 GeV/u 附近, 同时利用储存环电子冷却技术将束流品质提高一个数量级, 并提供更多种类的重离子束, 以开展更广泛范围和更高精度的物理实验. 兰州重离子加速器冷却储存环是一个双储存环系统, 由一个主环和一个实验环构成. 对其总体布局、总体参数、主要功能进行了介绍.

关键词: 重离子加速器; 储存环; 电子冷却

中图分类号: TL56 **文献标识码:** A

1 引言

兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)是兰州重离子回旋加速器系统 HIRFL 的后续工程. 预计 2004 年 12 月建成出束.

当前, 世界上很多重要实验室为了进一步提高重离子束的品质和能量, 纷纷采用重离子冷却储存环作为后续装置, HIRFL-CSR 也是基于这个概念而设计建造的. 其主要设计思想是: 采取双储存环系统, 将放射性束(RIB)与高品质重离子束技术相结合, 并适当提高束流能量. 该系统具有能量范围宽(低、中能及高能低端)、束流种类多(短寿命丰中子、丰质子放射性核束、特别是远离稳定线的具有极短寿命的滴线核束, 同质异能态核束以及高离化态重离子束)、束流品质高、准连续运行、能量可调等特点, 并可以作为高灵敏度、高分辨谱仪. CSR 的科学目标是:

- (1) 放射性束物理、特别是滴线核的研究;
- (2) 高温高密度条件下核物质性质研究;
- (3) 高离化态高 Z 原子物理研究;
- (4) 高品质重离子束和放射性束应用研究.

2 概述

HIRFL-CSR 总体目标是:

- (1) 以最优的性能价格比选定最高能量和增能方式. 采用同步加速的方法将 HIRFL 束流能量提

高, 如重核铀到 400 MeV/u, 轻核碳到 900 MeV/u.

- (2) 能产生短寿命的 RIB. 采用中高能重离子弹核碎裂反应获得短寿命 RIB.

- (3) 内外靶实验及高分辨测量. 主环为外靶实验提供多种高能重离子束, 而实验环采用大接收度进行内靶实验, 以提高 RIB 或高电荷态重离子束的使用效率. 实验环作为高分辨谱仪, 对内外靶实验中产生的稀有离子进行探测, 从而实现高分辨测量.

- (4) 高品质束流. 采用电子冷却对重离子束流(RIB 或高剥离态重离子)进行冷却, 从而获得高品质的束流, 以供高精度的物理实验使用.

如图 1 所示, CSR 是由主环 CSR_m 和实验环 CSR_e 构成的双储存环系统. HIRFL 的重离子束(10—30 MeV/u)注入到 CSR_m, 经过累积、冷却, 然后将束流能量提高、快引出打靶产生 RIB 或剥离成类氢类氦或全裸的高电荷态重离子束(如 U⁹⁰⁺, U⁹¹⁺, Au⁷⁹⁺), 这些次级束流被 CSR 的 RIB 传输线分离选择后注入到 CSR_e 中冷却储存.

在 CSR_e 中可以利用所冷却储存的循环束流连续不断地进行内靶实验, 且每隔一个运行周期(约 17 s)就补充一次束流, 从而实现准连续束的运行. CSR_e 还可利用自身的大接收度、电子冷却和 Shotky 频谱分析进行高分辨实验.

表 1 和表 2 分别是 CSR 的总体参数及束流参数.

收稿日期: 2000-12-01

* 基金项目: 国家科学工程

作者简介: 夏佳文(1964—), 男(汉族), 重庆人, 博士生导师, 研究员, 从事加速器物理研究.

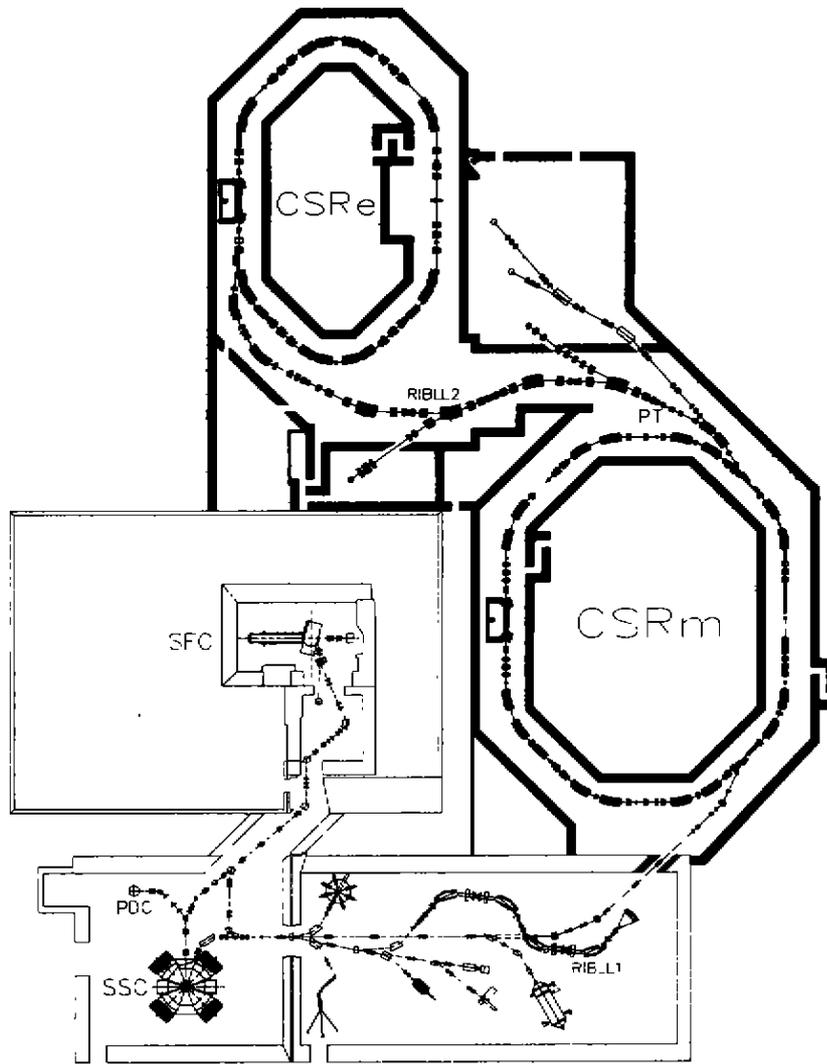


图1 HIRFL-CSR 总体布局图

表1 CSR 总体参数

	CSRm		CSRe
环周长 (m)	161.00		128.80
最高能量 (MeV/u)	900(C ⁶⁺), 400(U ²²⁺)		600(C ⁶⁺), 400(U ²⁰⁺)
最大磁刚度 (T·m)	10.64		8.40
磁场上升速度 (T/s)	~0.4		~0.2
重复周期 (s)	~17 (其中10 s 用于累积)		
水平接收度 (πmm·mrad)	200 (δP/P = ±0.15%)		150 (δP/P = ±0.5%)
垂直接收度 (πmm·mrad)	30		75
动量接收度 (%)	1.25 (ε _h = 50 πmm·mrad)		2.6 (ε _h = 10 πmm·mrad)
被冷却离子能量 (MeV/u)	10-50		25-400
真空度 (mbar)	6.0 × 10 ⁻¹¹		6.0 × 10 ⁻¹¹
谐波数	1	16, 32	1
频率范围 (MHz)	0.25-1.7	6.0-14.0	0.5-2.0
电压 (kV)	1 × 7.0	1 × 20.0	2 × 10.0
高频系统	加速	累积	俘获及减速

表 2 CSR 束流参数

	CSRm	CSRe
离子种类	稳定核 C-U 放射性束(A<238) 丰中子, 丰质子	全剥离重离子 C-Ta 类氢类氦重离子 Ta-U 放射性束(A<238) 丰中子, 丰质子
最高能量	900 MeV/u(¹² C ⁶⁺), 400 MeV/u(²³⁸ U ⁷⁰⁺)	600 MeV/u(¹² C ⁶⁺), 400 MeV/u(²³⁸ U ⁹⁰⁺)
流强	每周期10 ⁵ -10 ⁸ 个粒子(稳定核)	10 ¹¹ -10 ¹⁴ ions/s(稳定核, 内靶实验) 10 ⁷ -10 ¹² ions/s(放射性束, 内靶实验)
动量分散	$\delta P/P \approx 10^{-4}$ (稳定核), $\delta P/P \approx 10^{-3}$ (放射性束)	$\delta P/P \approx 10^{-5}$
发射度	$\leq 5 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ (稳定核), $20 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ (放射性束)	$\leq 1 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$

3 CSRe 准连续束内靶实验

CSRm 每隔一个运行周期就向 CSRe 注入一次束流, CSRe 就可以利用所储存(或减速后储存)的

束流连续不断地打靶进行内靶实验. 其中, 循环束打靶频率为每秒10⁶次量级. 内靶厚度根据 CSRe 的接收度、电子冷却对束流发射度和动量散度增长

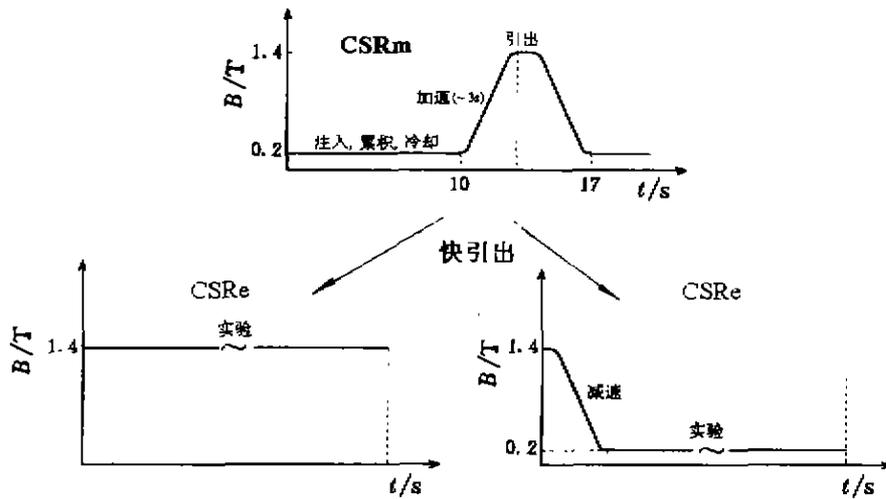


图 2 CSR 磁场激励曲线

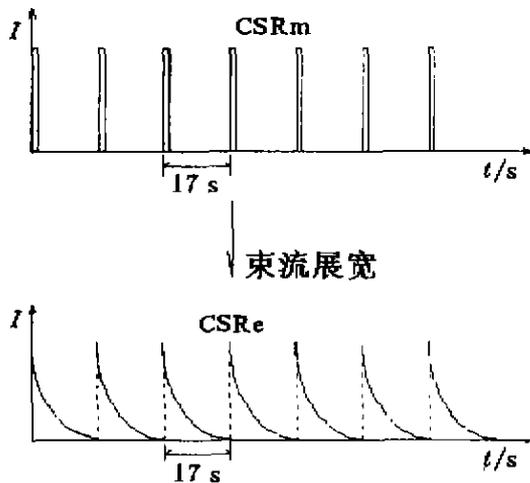


图 3 CSR 准连续束运行时的束流时间结构

$I = I_0 e^{-t/\tau}$, 其中 I 为瞬时流强, I_0 为初始流强, τ 为束流寿命.

的补偿能力以及注入的初始束流强度 I_0 来决定. 图 2 是 CSR 磁场激励曲线, 其中 CSRe 有两个运行模式. 图 3 是 CSR 准连续束运行时的束流时间结构.

4 CSRe 高分辨谱仪^[1]

对于储存环, 可以通过对回旋离子的 Shottky 噪声^[2]测量来获得离子的回旋频率谱(简称频谱). 离子回旋频率 f_{rev} 与离子速度 v 及离子回旋一周的周长 C 的关系是

$$f_{rev} = v/C.$$

不同质荷比的离子回旋一周的周长不相等, 因此有

$$df_{rev} = \frac{df_{rev}}{dv} dv + \frac{df_{rev}}{d(m/q)} d(m/q),$$

经过数学处理, 得到

$$\frac{df_{rev}}{f_{rev}} = \left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\gamma_i^2} \right) \frac{dp}{p} - \frac{1}{\gamma_i^2} \frac{d(m/q)}{(m/q)},$$

其中 γ 是离子的能量参数, p 是离子的动量, γ_i 是机器的特征参数. γ_i 与机器的动量紧缩因子 α_p 及在偏转磁铁(曲率半径为 ρ) 中的水平方向色散 $D(x)$ 的关系是

$$\frac{1}{\gamma_i^2} = \alpha_p = \frac{1}{C} \oint \frac{D(s)}{\rho} ds,$$

不同离子间的相对谱线距离在一阶近似下有

$$\frac{\Delta f_{rev}}{f_{rev}} \approx - \frac{1}{\gamma_i^2} \frac{\Delta(m/q)}{(m/q)},$$

而相对谱线宽度(半高宽)是

$$\frac{\delta f_{rev}}{f_{rev}} = \left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\gamma_i^2} \right) \frac{\delta p}{p},$$

原则上从频谱中要区分两种离子, 必须有判据 $\Delta f_{rev} > \delta f_{rev}$, 即

$$\left| \frac{\Delta f_{rev}}{f_{rev}} \right| = \left| - \frac{1}{\gamma_i^2} \frac{\Delta(m/q)}{(m/q)} \right| \geq \frac{\delta f_{rev}}{f_{rev}}$$

参 考 文 献:

- [1] Bernhard Schlitt. Schottky Mass Spectrometry at the Heavy Ion Storage Ring ESR[Z]. GSI, DISS, 1997, 97-01.
[2] Schottky W. Über Spontane Stromschwankungen in Ver-

$$= \left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\gamma_i^2} \right) \frac{\delta p}{p},$$

定义储存环的质荷比分辨本领为

$$R_v = \left| \frac{(m/q)}{\Delta(m/q)} \right|,$$

则相关的分辨率为

$$R_v^{-1} = \left(\frac{\gamma_i^2}{\gamma^2} - 1 \right) \frac{\delta p}{p}.$$

根据 R_v^{-1} 的定义, 对 CSRe 可采取以下两种运行模式来进行高分辨质量测量.

(1) 正常模式 使机器 γ_i 尽量小, 并利用电子冷却将离子束的动量分散 $\delta p/p$ 尽量减小. 例如 $\gamma_i = 2.6$, $\gamma = 1.395$, $\delta p/p \approx 1 \times 10^{-6}$ 时, 则分辨率可达到 $R_v^{-1} \approx 4 \times 10^{-6}$. 此模式可用于寿命大于秒量级核的质量测量.

(2) 等时性模式 储存环处于此模式运行时, 机器的 γ_i 与束流能量 γ 相等, 分辨率 R_v^{-1} 与离子束的动量分散 $\delta p/p$ 无关, 此时可用飞行时间方法进行质量测量. 此模式可用于短寿命 $10 \mu\text{s}$ 量级核的质量测量.

Heavy Ion Ring Project in Lanzhou*

XIA Jia-wen, ZHAN Wen-long, WEI Bao-wen, YUAN You-jin, SONG Ming-tao,
ZHANG Wen-zhi, YANG Xiao-dong, ZHAO Hong-wei

(Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: HIRFL-CSR, a new accelerator project at the Heavy Ion Research Facility in Lanzhou (HIRFL), is a multipurpose Cooling Storage Ring system which consists of a main ring (CSRm) and an experimental ring (CSRe). Beams from HIRFL will be accumulated and accelerated in CSRm, and then transported to CSRe for internal-target experiments. The layout, major parameters and main functions of the CSR were described.

Key words: heavy ion accelerator; storage ring; electron-cooling

* Foundation item: National Scientific Project

schiedenen Elektrizitätsleitern [M]. Annalen der Physik, 1918, 57: 541.