

# RIBLL 次级束流强度的提高

朱 昆, 王胜利, 尹全民

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 为了提高兰州重离子加速器放射性次级束流线的束流强度, 在现有的输运线基础上, 设计了一个由一组超导螺线管和一个产生靶组成的次级束流增强系统. 简要介绍了这个系统的束流光学设计原理和系统的初步设计.

**关键词:** 次级束流线; 超导螺线管; 束流强度; 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(HIRFL)放射性次级束流线(RIBLL)<sup>[1]</sup>自 1997 年建成以来, 已为许多种实验提供了放射性次级束. 但为适应更多种实验的要求, 需要提高次级束的束流强度. 通常有两种方法可达此目的. 一种方法是提高初级束的束流强度, 另一方法是增大装置对次级束的接收立体角来提高传输效率<sup>[2,3]</sup>.

弹核碎裂过程产生的次级离子在靠近初级离子的前冲方向上出射. 次级离子的角分布依赖于初级束的能量和次级离子的质量. 次级离子与初级离子的质量差越大, 其发射角越大. 次级离子通常分布在半角为 80-100 mrad 的圆锥里. 而目前 RIBLL 系统的接收角为 60 mrad. 从这点可以看出, 要增加次级束流的强度, 就必须将分布在更大方位角上的次级离子收集起来. 这意味着要增加系统的接收立体角. 这对于已经建成的、并且从技术上讲已经达到最大接收度的 RIBLL 系统来说, 如果不进行改造是绝对不可能的. 为此我们计划在 HIRFL 的束流后输运系统和 RIBLL 之间加入一个次级束流增强系统, 它既能大大增加次级离子的强度, 又能保持 RIBLL 原有的接收度和分辨率等性能参数.

## 2 原理

由于 RIBLL 系统的接收立体角的限制, 只有一部分次级离子能够被传输, 有大量次级离子在

RIBLL 入口处损失了. 为提高次级束的传输效率, 我们拟在 HIRFL 的束运线与 RIBLL 之间增加一个束流匹配系统, 使 RIBLL 入口处的束流参数和 RIBLL 系统原有的参数相匹配. 系统由一组超导螺线管和一个新的靶子组成. 系统的束流光学原理如图 1 所示. 在靶子前面放置一个聚焦系统, 使束斑缩小, 次级离子的发射角相应增大; 再通过靶后的聚焦系统使次级束的参数与 RIBLL 的接收参数匹配. 预计经这一改造后次级束流强度可增至 2.5-3 倍.

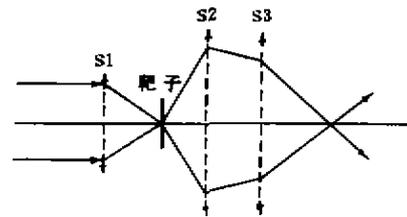


图 1 提高系统的接收立体角原理简图

## 3 系统的结构和光学设计

螺线管与四极透镜两种聚焦元件相比较, 螺线管有以下优点: 螺线管的设计比较容易实现; 能够充分利用螺线管的磁场空间来聚焦束流; 螺线管产生的磁场是轴对称的, 容易实现对称的束斑. 而四极透镜有以下缺点: 四极磁铁的设计和实现比螺线管较难; 需要用两个四极透镜才能实现在  $x$  和  $y$  方向上同时聚焦的目的; 较难实现对称的束斑; 由于

磁铁的孔径大小与磁铁的长度相比较, 孔径相对较大, 使得四极磁铁的磁场结构与理想的四极磁铁的磁场结构偏差较大. 所以次级束流增强系统采用螺线管作为聚焦元件.

螺线管的磁场与四极磁铁的磁场相比较弱, 而本系统需要非常高的磁感应强度, 如表 1 所示的磁感强度值, 因此必须使用超导螺线管.

表 1 超导螺线管的磁感强度的计算值

元件	长度 (m)	磁感强度 (T)
S1	0.6	9.48
S2	0.6	11.18
S3	0.4	6.75

设计的运输系统如图 2 所示. 由于弯曲磁铁之前的系统不能改动, 进行设计的空间就是从弯曲磁铁到 RIBLL 的入口处这一段空间. 总长度有 5.368 m. 使束流在进入螺线管透镜 S1 之前变为平行束, 再

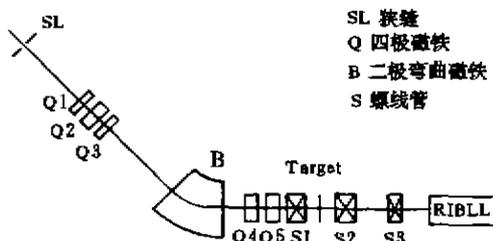


图 2 HIRFL 与 RIBLL 匹配系统简图

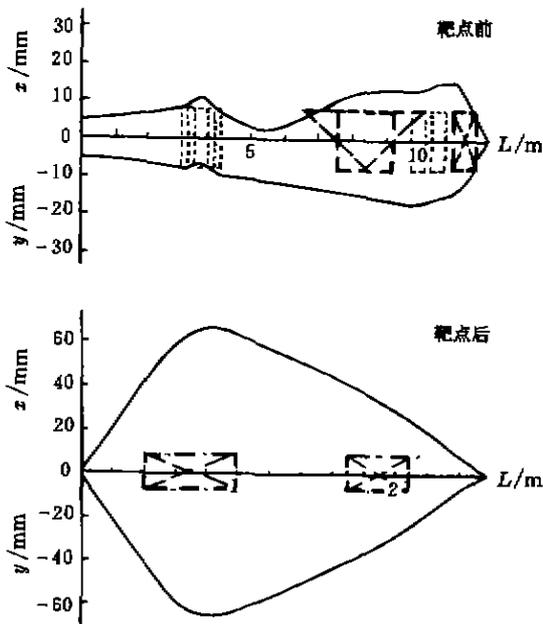


图 3 用 TRANSPORT 程序计算的束流包络图

将该平行束用螺线管透镜 S1 聚焦, 在靶子上形成直径为 0.1 cm 的圆形束斑, 产生的次级束流通过两个螺线管 S2 和 S3 聚焦后, 与 RIBLL 入口的束流参数相匹配. 图 3 为系统的束流包络图.

### 4 元件的设计

超导材料的选择, 目前主要的超导材料有 NbTi 和 Nb<sub>3</sub>Sn 两种. NbTi 主要用于磁场强度低于 8 T 的情况, Nb<sub>3</sub>Sn 主要用于磁场强度高于 10 T 的情况. 在 8—10 T 之间用 NbTi 和 Nb<sub>3</sub>Sn 都可以, 但 NbTi 必须用 1.8 K 的超流氮冷却, Nb<sub>3</sub>Sn 可用 4.2 K 的液氮冷却. 我们拟采用 4.2 K 的液氮制冷, 螺线管 1 和螺线管 2 产生的磁场值都高于 8 T, 需采用 Nb<sub>3</sub>Sn 材料. Nb<sub>3</sub>Sn 材料却有低场不稳定性, 因此拟将两超导螺线管用两种材料制成一种同轴线圈结构, 里边需要承受较高磁场的线圈用 Nb<sub>3</sub>Sn 材料绕制, 外边需承受较低磁场的线圈用 NbTi 材料绕制. 而螺线管 3 的磁场值低于 8 T, 只需用 NbTi 材料绕制就可以. 表 2 给出了 3 个螺线管的参数.

表 2 超导螺线管的参数

	S1	S2	S3
最大轴向场 (T)	11.63	13.73	7.9
线圈长度 (m)	0.6	0.6	0.4
线圈最大直径	内层 (cm)	18.6	20.3
	外层 (cm)	26.2	28.4
孔径直径 (cm)	15.0	15.0	15.0
运行温度 (K)		4.2	
单位面积受电磁力 (kN · cm <sup>-2</sup> )	11	14	10
最大电流强度 (A · mm <sup>-2</sup> )		180	

制造超导磁体的两个关键技术是低温和失超保护技术.

(1) 超导的冷却 超导的冷却方法有很多种, 可以建立液氮站来给超导提供冷却所需的液氮, 也可用各种制冷机来进行制冷. 由于建立液氮站所需的资金过多, 本系统计划用制冷机制冷. 法国 GANIL 实验室的 SISSI (Superconducting Intense Source for Secondary Ions) 系统采用的是 CEA 最近研制的一种封闭式的冷却系统. 该系统的工作原理为: 将用于冷却超导磁体的液氮和用于低温装置的液氮完全分开, 并将冷却超导磁体的液氮完全封闭起来. 被汽化的液氮通过管道进入装有冷凝器的容器, 经冷凝器冷却液化后, 再通过管道进入冷却

超导磁体的容器, 形成一个封闭循环. 冷却装置分三级(用来冷却氦气), 第一级是用液氮来冷却, 温度是 80 K, 第二级和第三级是用两个冷头, 温度分别是 42 K 和 12 K, 然后通过一个 JOULE-THOMSON 节流阀门将气体温度降到 4 K. 因此这个制冷装置除了在降温期间需要消耗液氮外, 在其他时间既不需要外部的液氮供应, 也不需要再次回收汽化的液氮. 这种制冷方法液氮消耗量很小, 比较经济. 参考上面的设计, 我们初步给出了一个冷却系统的设计方案, 计划采用带外冷源(液氮)、膨胀机和节流三级冷却的制冷机, 其示意图如图 4 所示. 节流氦气与膨胀机氦气都在压缩机 1 内压缩到同一个压

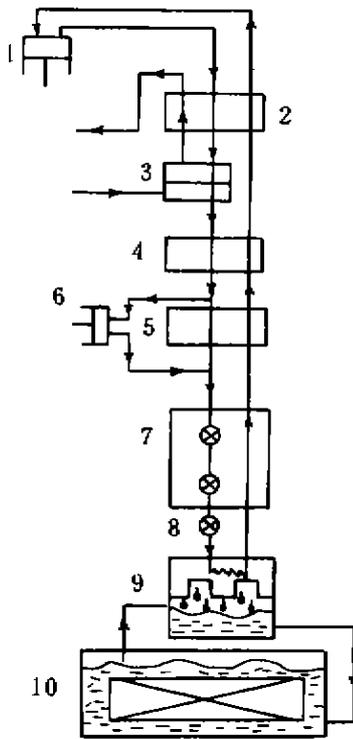


图 4 冷却系统示意图

力  $P$ , 高压氦气在换热器 2、液氮槽 3 和换热器 4 内冷却. 流出换热器 4 的氦气, 一部分在膨胀机 6 内膨胀到低压  $P_0$ , 另一部分节流气体在换热器 5 内继续冷却, 再经过换热器 7 进一步冷却, 同时用节流装置降压. 经过节流装置 8 最后一次节流后, 液氮流入冷凝器 9, 在冷凝器内吸收热量并且沸腾. 然后, 节流氦气又在低压下通过回热式换热器 7 复热, 与膨胀机内流出的氦气汇合, 再在换热器 5、4 和 2 内复热后返回压缩机. 其中假设外部环境的温度是 300 K, 液氮冷却级的温度是 80 K,  $P_0 = 0.1$

MPa. 在这种情况下, 制冷机的最佳能量工作状态是循环终压  $P = 2.5$  MPa、温度  $T = 11.7$  K. 经初步计算, 制冷机循环的单位制冷量约是 14.975 kJ (以节流级循环内循环 1 kg 氦气为基准单位, 下同). 膨胀机内单位循环气量约 0.848 kg, 单位液氮消耗量约为 0.177 37 kg. 每获得 1 W 的制冷功率, 须消耗的能量约为 464 W. 恒温器中产生的热量大约为 3.5 W, 因此制冷机的功率最小应为 1 624 W. 这只是一个初步设计, 要想进一步研究, 必须通过热力学方程的计算.

(2) 低温容器的设计 低温容器的绝热性能在很大程度上影响着超导的工作状态. 我们打算采用高真空多层绝热技术, 因为液氮温度与室温相差很大, 为了更好地抑制热辐射, 在液氮杜瓦外边用液氮保护. 从室温到 4.2 K 液氮温度, 低温容器的结构依次为真空绝热层、多层反射绝热屏蔽层(由几十层高反射率的单面镀铝涤纶薄膜缠绕而成)、液氮杜瓦、多层反射绝热屏蔽层和液氮杜瓦.

(3) 超导的失超防护 超导磁铁在工作中, 当发生磁通跳跃、导体的移动、导体本身的机械效应、电源的扰动和其它的外界大的扰动等时, 都可能引起超导体中出现正常态区域. 这种现象称为超导体失超. 超导体失超有很大的危害性, 主要有以下几点: 1) 在已进入正常态的绕组内, 产生大量的焦耳热, 可能烧毁这部分绕组; 2) 在失超过程中, 可能感应出很高的电压, 加在变为正常态绕组的两端, 导致绕组匝间绝缘的电击穿, 同时可能产生电弧, 烧毁导体; 3) 在失超过程中, 会产生大量的热, 这些热量将被液氮吸收. 液氮汽化会导致恒温箱内压力升高, 这会加速液氮汽化率, 形成恶性循环, 可能引起恒温箱爆炸.

防止超导磁体的失超主要从以下两方面考虑. 一方面要减小超导磁体失超因素, 另一方面当失超现象发生时, 可积极地采取措施, 保护设备的安全.

## 5 靶子的设计

束流打在靶子上时会产生很大的热量, 因此我们拟采用旋转靶, 以改善它的散热性能. 可靠的靶子必须能驱散 100 MeV/u 的重离子在  $0.78 \text{ mm}^2$  的横截面上积聚的功率. 应考虑到: 1) 靶材料的熔化和升华是限制在靶上释放功率的因素; 2) 辐射水平

必须保持在低温环境能接受的水平; 3) 尽量减少换靶时个人受到的辐射剂量。

我们设想用高电阻非磁材料, 水冷外壳加上石墨衬里, 靶子夹在石墨里大约以每分钟 3 000 转的速度转动。热量主要靠热辐射驱散, 用锆材料热绝缘层保持轴承。进一步的设计需同时考虑热传导和热辐射, 通过靶子的运动和形状建立热力学方程,

才能给出合理的设计。

## 6 结论

这种通过改进现有的传输系统来提高 RIBLL 次级束流强度的方案, 可使次级束流强度提高 2.5—3 倍, 能满足更多的实验要求。此方案是可行的, 并且成本比较低, 实现起来也比较容易。

### 参 考 文 献:

- [1] 詹文龙, 郭忠言. 兰州放射性束流线[J]. 原子核物理评论, 1999, 16(4): 218—223.
- [2] Joubert A, Baron E, *et al.* The SISSI Project: An intense secondary ion source using superconducting solenoid lenses[C]. IEEE Particle Accelerator Conference, San Francisco, 1991, 594—597.
- [3] Baelde L, Baron E. The SISSI Project: A new tool for radioactive beams[M]. Nouvelles du GANIL, 1993, 43: 59—65.

## Improvement of Beam Intensity of RIBLL

ZHU Kun, WANG Sheng-li, YIN Quan-min

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

**Abstract:** In order to meet the needs of nuclear physic research, the beam intensity of RIBLL (Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou) should be improved. This can be carried out by two ways; increasing the primary beam intensity or improving the transmission of the beam line. A system consisting of three superconducting solenoids and a new target frame is designed.

**Key words:** secondary beam line; superconducting solenoid; beam intensity; cooling