

# 产生放射性核束的厚靶的物理设计

张焱 蒋渭生 关遐令

(中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京, 102413)

介绍用来产生放射性核束的厚靶的物理设计过程, 提出对靶材料特性和温度条件的严格要求, 列举了几种候选靶材, 设计了 1 个石墨靶衬并合理安排靶的水冷散热结构, 计算了厚靶的三维温度分布情况。计算结果表明: 此厚靶完全能够承受最高达 14 kW 的质子束入射束流功率, 靶的温度可以根据不同要求控制在 1300—2000 。

关键词 放射性核束 厚靶 散热结构

中图法分类号 TL 503.4

在线同位素分离器 (ISOL) 是北京放射性核束装置 (BRNBF) [1] 计划的主要设备之一, 产生放射性核素的厚靶为技术关键, 它涉及初级强流离子束与靶物质的核反应, 放射性核素的产生、扩散和引出, 这些因素决定了放射性核束的产生效率及总强度, 设计中须重点考虑。为了提高放射性核素的扩散速度, 减少短寿命核素的衰变损失, 靶的温度应尽可能高, 但是, 过高的温度将带来一系列的问题, 因此, 靶温一般应控制在 1300—2000 。

厚靶技术对靶材料的物理、化学性质, 靶物质的尺寸和形态, 以及靶结构和散热系统设计等方面都提出了严格要求。特别是 BRNBF 计划中的初级束功率很大, 很难控制靶温。针对上述条件应进行厚靶结构的物理设计。

## 1 产生放射性核束的流程

在线同位素分离器的靶-源系统产生放射性核素离子束的基本流程是: 前级加速器提供初级强流离子束 (如质子、氘核等) 轰击特殊材料制成的厚靶, 初级束与靶原子发生核反应, 生成放射性核素的中性原子, 这些原子扩散到靶表面, 从表面释放并通过蒸气管道进入离子源电离室, 通过电离和加速引出放射性核素的离子束 (图 1)。厚靶产生放射性核素过程中的损失, 除各种泄漏外, 主要是短寿命核素在传输过程中的衰变损失, 其中最重要的过程包括从核素生成地点扩散到靶表面和各表面对核素的吸附滞留。

放射性核素的中性原子在固体靶物质中形成后, 将产生扩散运动以达到浓度平衡<sup>[2]</sup>, 流量

张焱: 男, 32 岁, 加速器物理专业, 硕士, 助理研究员

收稿日期: 1997-01-24 收到修改稿日期: 1997-04-02

$q$  用 Fick 第一方程给出为:

$$q = -D \cdot \nabla n \quad (1)$$

其中:  $\nabla n$  为放射性核素原子浓度的梯度,  $D$  为靶材料扩散系数。

$$D = D_0 \cdot \exp[-H_A/(kT)] \quad (2)$$

其中:  $D_0$  为材料固有扩散系数,  $k$  为玻耳兹曼常数,  $T$  为绝对温度,  $H_A$  为激发能。

物体表面对粒子的吸附作用通过 Frenkel 方程表示为滞留时间  $t$ :

$$t = t_0 \cdot \exp[Q/(kT)] \quad (3)$$

其中:  $Q$  为吸热量,  $t_0$  为材料常数(约  $10^{-13}$  s)。

从式(2)、(3)可以看到, 为了提高放射性核素的扩散速度, 减少放射性核素在靶表面的吸附时间, 都要求提高靶的工作温度, 从而降低短寿命核素在传输过程中的衰变损失。如果靶的温度过高, 靶材料则被融化或烧结, 阻碍放射性核素的扩散, 同时还会引起靶-源系统真空度下降, 影响离子源的电离效率。因此, 根据靶材料的蒸气压特性和离子源真空度的要求(一般小于  $10^{-2}$  Pa), 靶的温度通常控制在 1300—2000 。

## 2 靶材料选择

选择的靶物质必须能与初级束粒子发生核反应, 产生所需的放射性核素, 并且应具有较大的反应截面和较高的产生效率, 其次, 靶材料应耐高温, 具备低蒸气压特性。核反应产生的放射性核素本身应具有高蒸气压、易扩散, 而且不能与靶材料发生化学反应生成难挥发物质。由于初级束为轻离子, 与靶物质反应后产生的放射性核和靶核一般只差一两个质量单位, 在这种情况下要求它们的物理性质完全不同, 这给靶材料的选择带来了难度。有许多物质符合上述要求, 可作为靶的材料, 如: C、B、Cr、Hf、Ir、Mo、Nb、Os、Re、Ru、Ta、V、W、Zr 等, 一些金属硼化物、碳化物、氮化物、氧化物、硫化物等, 许多金属铝酸盐、硅酸盐、钛酸盐, 某些金属合成材料如  $Hf_3Si_2$ 、 $La_2$ 、 $Zr_3Ge_3$ 、 $Zr_3Si_3$  和一些更复杂的化合物等<sup>[3]</sup>。

选择靶的尺寸和形态同样重要, 理想条件下的靶物质应呈微细的粉状、很薄的薄片状或极细的纤维状, 这些材料结构都具有较好的渗透性, 有利于放射性核素的迅速扩散。选择疏松结构的靶材, 材料的有效导热系数非常小, 靶本身的散热问题就更为突出。由于初级束流打到靶中后, 绝大部分的能量将转换成热能形式沉积下来, 需要在靶上合理安排散热系统。为保持靶在强流辐照条件下的结构完整性, 既要使靶控制在一定的高温, 又要使靶具有比较均匀的温度分布。

## 3 靶的散热结构

靶温一般在 1300—2000 , 因为靶处于真空中, 主要散热方式为热传导和热辐射。通常的设计是在靶的底部加水冷衬板冷却, 当束功率较大时, 适当扩大靶面积来增强散热。北京放射性核束装置计划中, 前级回旋加速器提供的 70 MeV 质子束流强高达 200  $\mu$ A, 约有 14 kW 的束流功率将以热的形式沉积在靶中。对于如此强的束流功率, 不能采用通常的靶结构。计算表明: 当靶的厚度较大时, 单纯依靠扩大靶的面积并不能使靶内部的温度降到允许数值。为此, 设

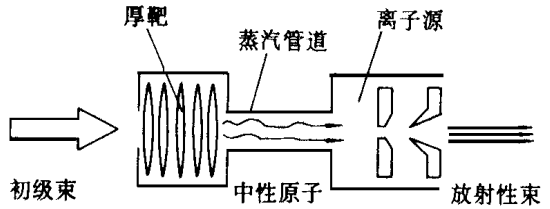


图 1 放射性核素离子束的产生示意图

Fig 1 Process of generating radioactive ion beam

计了 1 种特殊的靶结构(图 2), 束流入射的表面为狭长形, 两个侧面均可安装水冷板, 有利于热量的导出。

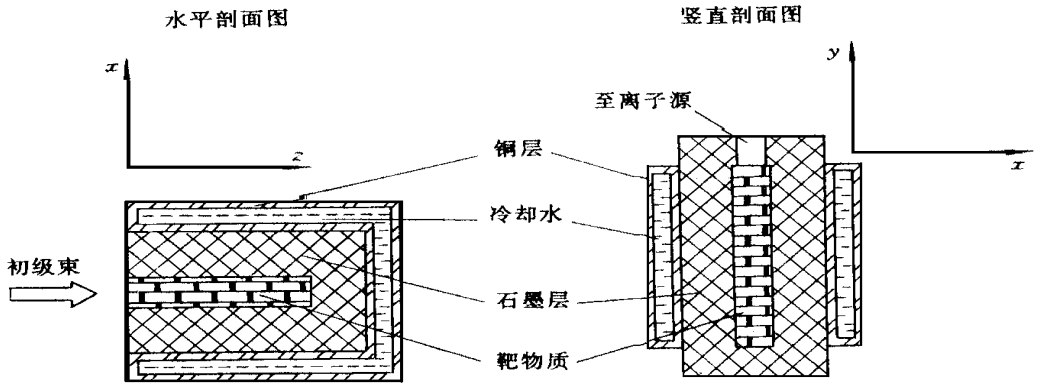


图 2 靶衬和散热结构示意图

Fig 2 Target and its heat removal system

因为靶材料结构疏松, 导热性能很差, 应将靶材料构成的区域  $x$  方向做得很薄(约 1 cm), 两侧及底部石墨层厚度为 1.5 cm, 石墨层一方面把靶内高温与水冷板隔开, 另一方面也把热能传导出来。石墨具有耐高温、导热系数适中、产生的放射性较小等特性, 因此, 可作为束流阻挡层和隔热材料。水冷板置于靶外侧的两边和阻挡靶的后面, 进行水冷散热。靶的前面接受初级束辐照, 安装 5  $\mu\text{m}$  厚的 Re 金属膜, 减少放射性核素的泄漏, 通过热辐射散热; 靶的上下两面不加水冷板, 也通过热辐射散热, 这样可使靶内温度的分布更为均匀。

靶材料  $z$  向的厚度是根据初级束流的能量沉积情况来选择的, 应使初级束的能量尽可能被用来产生放射性核素, 而当束流能量降低到库仑位垒以下不再发生核反应时, 立即打到石墨阻挡层上, 有利于热能的传导。靶的  $y$  向宽度约为 6 cm, 束流在这个区间的分布应尽可能均匀, 采用散宽束包络或利用扫描方法均能做到这一点。

#### 4 温度分布计算

利用 TR M 程序计算了能量为 70M eV 的质子束在靶材料和阻挡层中的能量损失情况, 采用 CBCF 碳纤维靶时质子束能量损失曲线示于图 3, 靶前面是 5  $\mu\text{m}$  厚的 Re 金属膜, CBCF 碳纤维靶的厚度为 50 mm, 后面是 15 mm 厚的石墨阻挡层。

把束流在靶中的能量损失作为有限元三维温度场计算程序 AD NAT 的热量输入数据,

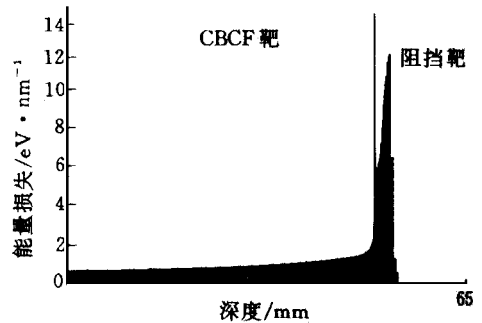


图 3 70M eV 质子束在靶和阻挡层中的能量损失曲线

Fig 3 Energy loss curve of 70M eV proton beam in the target

计算靶的三维温度分布, 由于对称性, 只计算整个靶的四分之一。通过多种不同靶结构参数的计算, 获得了比较满意的结果。入射质子束功率为 16、14、12 和 10 kW 时沿  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴的靶温度分布情况示于图 4。从图中可以看到, 靶在  $z$  轴上的温度分布呈两端略低, 靠近底部一定距离处的温度最高, 这是由于束流在靶前部的能量沉积较小, 因而靶前端温度较低 (热辐射起很小作用), 虽然在靶后部的能量沉积很大, 但因距离水冷板近, 所以温度也不高。  $x$  轴的温度分布说明, 靶从中心到两侧有一定的温度梯度, 这是传导散热的结果。14 kW 束功率时, 靶在  $z-x$  和  $z-y$  平面上的温度分布示于图 5, 其中靶中最高温度约 2000 , 说明此厚靶能承受束流总功率为 14 kW 的质子束, 达到了设计要求。

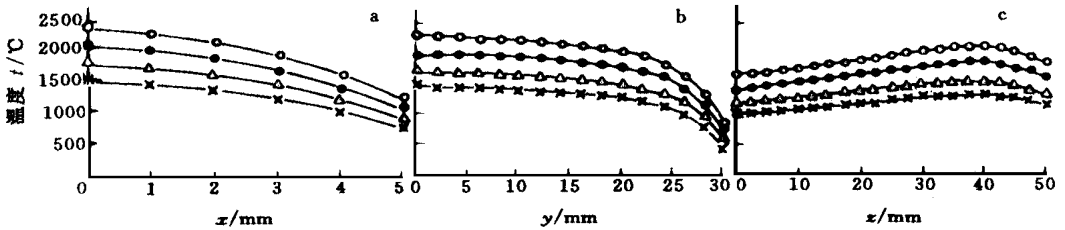


图 4 靶在几种束功率下的温度分布

Fig 4 Target temperature distribution at different beam power  
 a——沿  $x$  轴的温度分布; b——沿  $y$  轴的温度分布; c——沿  $z$  轴的温度分布;  
 ————16 kW; ————14 kW;  $\Delta$ ——12 kW;  $\times$ ——10 kW

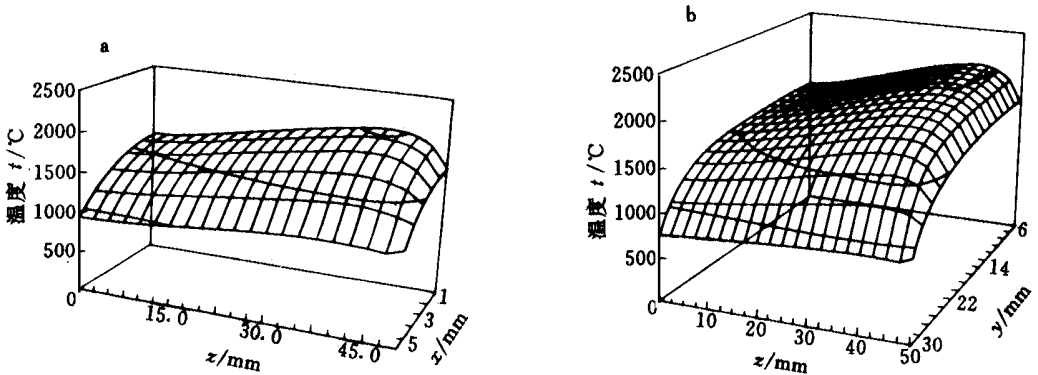


图 5 14 kW 束功率时的靶温度分布

Fig 5 Target temperature distribution at 14 kW beam power  
 a—— $z-x$  平面上的温度分布; b—— $z-y$  平面上的温度分布

### 5 结论

通过对靶材料的慎重选择和设计特殊的靶结构, 得到了北京放射性核束装置计划中用来

产生放射性核束的厚靶的物理设计方案,利用温度场计算软件,获得了满意的靶温分布。这个厚靶可以充分地利用前级加速器提供的强流离子束,最高束流功率可达 14 kW,靶温能够控制在 1300—2000 ,从而使产生的放射性核素迅速扩散出来并被离子源电离和引出,减少短寿命核素的衰变损失,最大限度地提高放射性束的流强。

### 参 考 文 献

- 1 北京放射性核束装置建议书 北京:中国原子能科学研究院资料 1994
- 2 Alton GD. Targets and Ion Sources for RB Generation at the Holifield Radioactive Ion Beam Facility. Oak Ridge National Laboratory. 1991.
- 3 Alton GD. A Proposal for Physics with Exotic Beams at the Holifield Heavy Ion Research Facility. Oak Ridge National Laboratory. 1991.

## CONCEPT DESIGN OF A THICK TARGET FOR GENERATING RADIOACTIVE ION BEAM

Zhang Yan Jiang Weisheng Guan Xialing

(China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413)

### ABSTRACT

Concept-design procedure of a thick target used to generate radioactive ion beam (RB) is introduced, several requirements to the target material are presented and some candidate materials are listed too. A graphite target matrix and its water-cooling heat-sink system are designed and the three dimensional temperature distributions of the target are calculated. The result shows that the target can bear the hit of proton beam at power of 14 kW and the temperature can be controlled within the range of 1300—2000 in accordance with different demands.

**Key words** Radioactive ion beam Thick target Heat-sink system