

93.27 (3)
①
193-197

分析束强流中子发生器中子比 产额及靶寿命

O571.5

朴禹伯 牛占歧 王学智 苏同龄 陈尚文
姜汴婴 姚泽恩 苟全补 贾文宝

(兰州大学原子核研究所, 730001)

将在分析束(D⁺)轰击下, 大面积高速旋转靶半寿命、中子比产额等指标与非分析束作了比较。中子比产额从 $1.1 \times 10^{11} \text{s}^{-1} \cdot \text{mA}^{-1}$ 提高到 $1.6 \times 10^{12} \text{s}^{-1} \cdot \text{mA}^{-1}$, 钷靶半寿命提高一个数量级, 靶寿期由 $1 \text{mA} \cdot \text{h/cm}^2$ 提高到 $6.9 \text{mA} \cdot \text{h/cm}^2$ 。

关键词 分析束 中子比产额 靶半寿命

, 中子发生器^v

因为钷靶价格昂贵, 强流中子发生器运行费用是很高的, 靶寿命由束流品质、制靶工艺、靶冷却状况、靶表面上有机蒸汽和氧化物沉积、氩核在钷靶中沉积等多种因素决定。但其中束流品质和靶的冷却状况是最重要的因素。

采用大面积高速旋转靶(转速为 1100r/min)基本解决了靶冷却问题^[1], 它可以使靶表面温度低于 200℃, 从而保证恒定的氩饱和密度。兰州大学原 $3 \times 10^{12} \text{s}^{-1}$ 强流中子发生器采用非分析氩离子束。众所周知, 由双等离子源产生的离子束中包含单原子、双原子和三原子等 3 种离子。另外, 由于离子源阴极发热体中含有钨、硼化钨、钨等重金属, 且在离子源放电区中含有微量空气成分和真空系统中的微量油气, 离子束中必然含有少量重离子成分。对非分析束中子发生器, 这些重离子同样被加速并输运到靶上。

在 D-T 中子发生器中, 主要是由 D⁺ 离子束产生中子, 其他一些成分不仅不产生中子, 而且对靶寿命有害。特别是重离子, 因为产生强烈的溅射, 对靶寿命影响很大。因此, 原 $3 \times 10^{12} \text{s}^{-1}$ 强流中子发生器即使采用大面积高速旋转靶, 一块 $\phi 20 \text{cm}$ 的几百居里的钷靶, 维持 $1 \times 10^{12} \text{s}^{-1}$ 中子产额的时间不到 16 h。

在聚变-裂变混合堆材料辐射损伤研究中, 要求中子注量 $10^{17} - 10^{18} \text{cm}^{-2}$ 。用非分析束中子发生器来达到上述注量要求是很困难的, 而且其费用很高。鉴于上述情况, 我们根据现有中子厅的条件, 设计安装了后分析系统和输运线, 在中子产额接近原来水平的情况下, 把靶半寿命提高了一个数量级, 产生了显著的社会效益和经济效益^[2]。

收稿日期: 1992-08-03

收到修改稿日期: 1992-09-01

1 氚靶的中子产额及寿命

单原子氚离子束在氚靶上产生的中子产额由下式计算^[3]

$$Y = \frac{j}{e} \int_0^R \sigma_{DT}[E(x)] C(x) dx \quad (1)$$

其中 Y 为单位时间、单位面积上产生的中子数, j 为氚离子束密度, $\sigma_{DT}[E(x)]$ 为氚离子能量 $E(x)$ 所对应的 D-T 反应截面。而 $C(x)$ 为 x 深度 T-Ti 靶中氚核密度, R 为氚离子在氚靶中射程, e 为电子电量。由于 $C(x)$ 随 x 变化不大, 可近似地看成常数。于是

$$Y = \frac{j}{e} C(x) \int_0^R \sigma_{DT}[E(x)] dx = \frac{j}{e} C(x) V_{DT} \quad (2)$$

其中 $V_{DT} = \int_0^R \sigma_{DT}[E(x)] dx$, $C(x)$ 在氚靶中约 $6 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ 。对于分析束强中子发生器, $I = 12 \text{mA}$, 束斑直径 $\phi 15 \text{mm}$, 故 $Y = 6 \times 10^{12} \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

实际的实验数据是 Y 约 $4 \times 10^{12} \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。这主要取决于 $C(x)$, $C(x)$ 中包含着钛原子吸氚系数, 因此, $C(x)$ 和制靶工艺有关。

关于靶寿命, 有时用维持某种中子产额的时间, 如 $1 \times 10^{12} \text{s}^{-1}$, 或者用初始中子产额下降一半所需时间来表示, 这两种表示方法比较形象和直观。通常所说“靶寿命”, 指的是靶半寿命, 即初始中子产额下降一半所需时间。但实际上, 靶半寿命既和束流有关, 也和中子产额下降的速度有关。因此, 要用靶寿期来表示靶寿命较为恰当。靶寿期定义为^[4]

$$T = \frac{IT_{1/2}}{S}$$

其中 I 为束流强度, 以 mA 为单位, $T_{1/2}$ 为中子产额下降一半所需的时间 (有时称为靶子半寿期), 以小时为单位, S 为产生中子的靶面积, 以 cm^2 为单位。如果束流在变化, 则应取平均电流, 即

$$I = \int_0^t i dt / t$$

其中 i 为束流强度。

固体氚靶平均寿期一般 $2 \sim 4 \text{mA} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$, 最高为 $4 \text{mA} \cdot \text{h}/\text{cm}^2$ 。采用高速旋转靶等新技术后, 靶的冷却条件大有改善, 因而靶寿期也显著地增加。

2 靶寿命实验结果

2.1 非分析束强流中子发生器靶寿命

兰州大学原 $3 \times 10^{12} \text{s}^{-1}$ 非分析束强流中子发生器中子产额随束流、运行时间的变化, 如图 1 所示。由图 1 看出的保持 $1.1 \times 10^{12} \text{s}^{-1}$ 中子产额, 在 5.1 h 内, 束流强度需从 9 mA 提高到 21 mA。图 2 表示在同样情况下, 中子比产额和中子产额随运行时间的变化。图 2 中曲线 1 表示中子比产额随运行时间的下降趋势。如果束流保持 9 mA, 不到 5 h, 中子产额下降到一半。而中子产额从 $1.7 \times 10^{12} \text{s}^{-1}$ 下降到一半, 只经过 1.3 h (见图 2 中曲线 2)。总之, 在非分析束轰击下, 该环保持 $1 \times 10^{12} \text{s}^{-1}$ 中子产额的时间约 6.5 h。因为该环面积占整块靶活性区的 40%, 故整块靶维持 $1 \times 10^{12} \text{s}^{-1}$ 的时间约 16 h。

$$\text{靶寿期 } T = \frac{\int_0^t i dt}{I} \cdot \frac{T_{1/2}}{S} = 1 \quad (\text{mA} \cdot \text{h}/\text{cm}^2)。$$

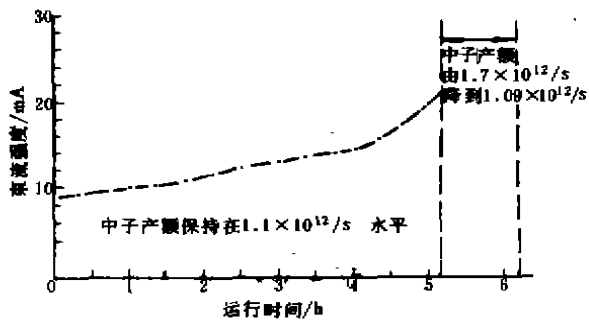


图 1 非分析束轰击时束-靶特性

Fig. 1 Variation of neutron yield as function of running time for nonanalyzed D⁻ beam

轰击面约占整个活性区的 40% (1988 年 7 月)。

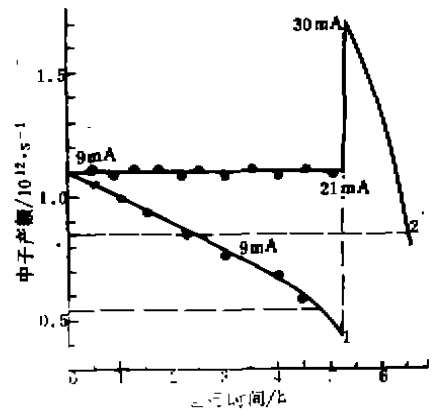


图 2 非分析束轰击下的靶半寿命

Fig. 2 Neutron yield as a function of running time for nonanalyzed D⁻ beam

该环所占面积为整个活性区的 40%。

2.2 分析束轰击下靶寿命

在改造后的强中子发生器中,氘离子束经后分析系统,成为单原子氘束。中子发生器有关技术指标测试结果如下:

分析束流强度: H_1^+ 束 24 mA, 单原子比为 56%。 D_1^+ 束 13 mA, 14 MeV 中子产额: $2 \times 10^{12} s^{-1}$ (D_1^+ 能量为 270 keV, 流强 12 mA)。最大中子注量率: $5.5 \times 10^{11} s^{-1} \cdot cm^{-2}$ 。中子比产额: $1.6 \times 10^{11} s^{-1} \cdot mA^{-1}$ 。靶寿命: 维持 $1 \times 10^{12} s^{-1}$ 中子产额使用寿命为 160 h, 半寿命为 220 h。

图 3 为分析束轰击下中子产额随运行时间变化。图中右上边曲线是分析束轰击下氘靶靶寿命实验曲线。实验中产生中子的区域仍是最外环,它占整块活性区的 40% 的面积。实验结果是该环的半寿命为 87.77 h, 维持 $1 \times 10^{12} s^{-1}$ 的中子产额的时间为 63.85 h。因此,整块氘靶半寿命为 220 h, 而维持 $1 \times 10^{12} s^{-1}$ 中子产额的时间为 160 h。

图 3 中左边直线是 9 mA 非分析束轰击下中子比产额随运行时间变化。对比表明,分析束的靶半寿命有明显的改进。

靶寿期 $T = 6.9 mA \cdot h/cm^2$ 。

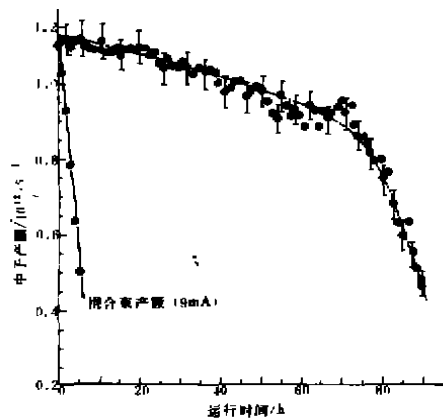


图 3 分析束轰击下中子产额随运行时间变化

Fig. 3 Neutron yield as a function of running time for D⁺ beam

离子能量为 270 keV, 流强为 8 mA, 轰击面积占总活性区 40%。
●——实测值; ———— 实验值的拟合曲线, 误差 $\leq \pm 8\%$, 主要由束流涨落引起的。

这一结果和日本大阪大学 OKTAVIAN 强流中子发生器的靶寿期是相同的。世界上几台主要强中子发生器有关靶性能的比较示于表 1。日本 OKTAVIAN 强中子发生器是靶寿期最长的一种强流中子发生器。

表 1 世界上几台主要强流中子发生器有关靶性能比较

Table 1 Specifications of T-Ti targets for several main Intense Neutron Generator in the world

中子源名称	RTNS- I (美国)	RTNS- II (美国)	FNS (日本)	OKTAVIAN (日本)	LZ-2 (中国)
高压/kV	400	380	400	300	300
旋转靶直径/cm	25	50	23	20	20
靶转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	1100	50000	1100	800	1100
束斑直径/mm	6	10—20	15	30	15
直流中子产额/ s^{-1}	6×10^{12}	3×10^{13}	5×10^{12}	3×10^{12}	2×10^{12}
初始中子比产额/ $\text{s}^{-1} \cdot \text{mA}^{-1}$	2.4×10^{11}	2.3×10^{11}	2.5×10^{11}	1.7×10^{11}	1.6×10^{11}
靶半寿命/h	100	100	100	100	200
靶寿期/h	6.0	6.6	4.8	7	6.9

综上所述,分析束轰击下靶寿命提高一个数量级,从而降低了强中子发生器运行费用约一个数量级。

束流流强、离子能量以及束流中密度分布变化等都影响中子产额。因此,加速器的正确运转对延长靶寿命,有一定的作用。

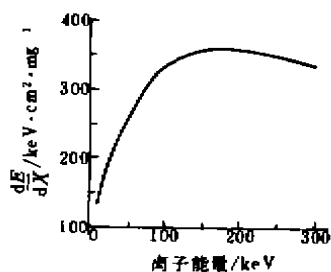


图 4 在氘钛靶中氘离子能量和阻止本领之间关系

Fig. 4 Relation between stopping power and D^+ energy in T-Ti target

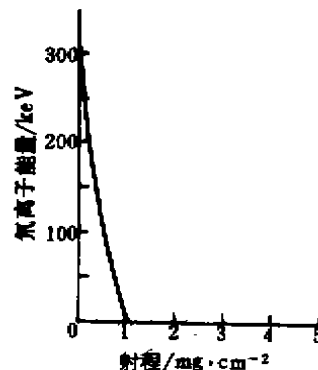


图 5 300 keV 氘离子在氘钛靶中射程

Fig. 5 The range of D^+ particle with 300 keV in T-Ti target

图 4 表示氘离子在氘钛靶中的能量损失率^[4]。而图 5 是根据图 4 计算出的 300 keV 氘离子在氘钛靶中的射程。由图 5 看出,在 0.5 mg/cm^2 附近,氘离子能量降至 100 keV,即 D-T 反应截

面峰值所在之处。对 300 keV 运行,不需要厚靶。目前我们使用的是 0.8 mg/cm^2 、 $740 \times 10^{10} \text{ Bq}$ 的氟钛靶,效果很好。

3 结论

(1)分析束技术和大面积高速旋转靶技术是提高中子产额和靶寿命的关键。分析束与非分析束相比提高靶寿命一个数量级以上。

(2)改造后的兰州大学强中子发生器靶寿期为 $6.9 \text{ mA} \cdot \text{h/cm}^2$,靶半寿命为 220 h。有关靶寿命等主要技术指标达到目前运行中的同类中子发生器国际水平。

(3)要大幅度提高中子产额,需要增加前分析系统。如能安装前分析系统,分析束流强可提高到 35—45 mA,中子产额可达 $5-6 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ 。这将是国际上最强的中子发生器之一。该计划正在付诸实现之中。

参 考 文 献

- 1 Su Tongling, Sun Biehe, Yang Baotai, et al. An Intense 14 MeV Neutron Source. Nucl Instrum Methods, 1990, A278: 452—454.
- 2 朴禹伯,牛占歧,陈勤,等. $3 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ 强中子发生器后分析系统调试结果. 原子能科学技术, 1990, 26(4): 91—94.
- 3 Jinchoon Kim. Neutron Sources Using D-4 Mixed Beams Driven Into Solid Target. Nucl Instrum Methods, 1977, 145: 10.
- 4 丁厚本,王乃彦编著. 中子源物理. 第一版. 北京:科学出版社, 1984. 161.

NEUTRON YIELD AND LIFETIME OF T-Ti ROTATING TARGET BOMBARDED BY ANALYZED D_1^+ BEAM

PAIO YUBO NIU ZHANQI WANG XUEZHI
SU TONLING CHEN SHANGWEN JIANG BIANYING
JAU ZHEEN GOU QUANBU CTIA WENBAU

(Institute of Nuclear Research, Lanzhou University, 730001)

ABSTRACT

The neutron yield and lifetime of T-Ti rotating target bombarded by analyzed deuterium beam are described and compared with that for nonanalyzed beam. The neutron yield is increased from $1.1 \times 10^{11} \text{ s}^{-1} \cdot \text{mA}^{-1}$ to $1.6 \times 10^{11} \text{ s}^{-1} \cdot \text{mA}^{-1}$, lifetime of T-Ti target is increased from $1 \text{ mA} \cdot \text{h/cm}^2$ to $6.9 \text{ mA} \cdot \text{h/cm}^2$ after improvement of the accelerator.

Key words Analyzed ion beam Neutron yield Life time of T-Ti rotating target