

文章编号: 1001-4322(2006)04-0701-04

# 高功率离子束在漂移管中的中性化传输\*

孙剑锋, 邱爱慈, 杨海亮, 李静雅, 任书庆, 黄建军

(西北核技术研究所, 西安 710024)

**摘要:** 介绍了“闪光二号”加速器产生的高功率离子束在漂移管中的传输实验。对比了采用中性化措施前后的传输情况,分析了中性化措施对离子束束斑半径、束流均匀性的影响。根据实测的二极管电压模拟得到了传输一定距离后的束流波形,与实测结果符合较好。采取适当的中性化措施后,高功率离子束可以有效传输 80 cm 以上,束流发散得到抑制,束流均匀性得到改善。

**关键词:** 高功率离子束; 中性化; 漂移管; 传输

**中图分类号:** O571; TL81 **文献标识码:** A

高功率离子束(HPIB, 以下简称为离子束)是脉冲功率技术应用的一个新领域,已在能源、国防、材料和环境等科学技术领域中发挥重要作用。在“闪光二号”加速器上,利用新研制的强箍缩离子束二极管产生了峰值能量约 500 keV,峰值束流强度约 170 kA 的高功率离子束<sup>[1-2]</sup>。

利用高功率离子束轰击含<sup>19</sup>F 核素的靶,获得 6~7 MeV 的准单能脉冲  $\gamma$  射线,可以用于电流型脉冲  $\gamma$  射线探测器的能量响应研究<sup>[3]</sup>。由于 HPIB 二极管中双向流的存在,电子轰击阳极及其周围材料产生的韧致辐射本底较强,这使测量的准单能脉冲  $\gamma$  射线信号淹没在韧致辐射信号中。为减少该影响,将离子束传输一定距离后再轰击辐照靶,这样既可以从距离上减弱韧致辐射强度,又可以从时间上将准单能脉冲  $\gamma$  信号与韧致辐射信号分开。另外,高功率离子束应用于材料表面改性研究,为满足辐照均匀性要求,同样需要将离子束传输一定距离再轰击材料。

高功率离子束的束流密度很高,可达  $1 \text{ kA} \cdot \text{cm}^{-2}$  以上,这使得其空间电荷效应非常强,束流在传输很短距离内(约 20 cm)即完全崩溃。由于强库仑力的作用,用于弱流离子束的传输技术不能直接用于高功率离子束的传输。而且由于离子质量远大于电子质量,高功率离子束传输也不能套用相对论电子束的传输技术。必须针对高功率离子束的特点,采取中性化措施解决这一难题。

## 1 离子束传输实验布局

在“闪光二号”加速器上进行了离子束传输的实验,图 1 是实验装置的示意图。实验中采用偏压法拉第筒阵列测量束流密度分布;目击靶测量束斑形貌;PIN 探测器测量准单能脉冲  $\gamma$  射线。实验测得的典型炮离子束参数列于表 1。

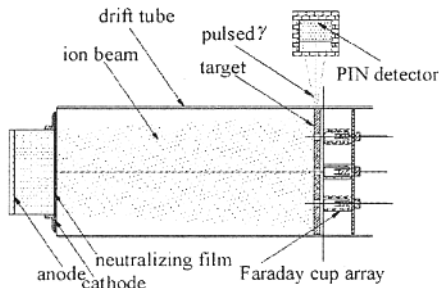


Fig. 1 Experimental provision of HPIB transportation

图 1 离子束传输实验装置示意图

表 1 典型炮(shot109)离子束参数  
Table 1 Parameters of HPIB in shot109

density of current / $(\text{kA} \cdot \text{cm}^{-2})$	current /kA	FWHM /ns	rising edge /ns
3.4	170	72	47

## 2 中性化措施对离子束传输的影响

由于空间电荷效应的存在,离子束在真空中传输时发散严重,传输距离很短,不超过 30 cm,而在具体的应

\* 收稿日期:2005-08-31; 修订日期:2006-02-13  
基金项目:国家自然科学基金资助课题(10375048);国防科技基础研究基金资助课题  
作者简介:孙剑锋(1978—),男,核技术及应用专业;heliosjf@tsinghua.org.cn.

用中,需要传输 50~80 cm。为达到传输要求,应采取在二极管和漂移管之间加装 2 μm 厚的 Mylar 中性化膜,在漂移管中充 133 Pa N<sub>2</sub> 气体等中性化措施。采取中性化措施后,离子束在漂移管的前端迅速被中和,形成准中性的粒子团,可以传输较远距离。

分析表明<sup>[2]</sup>,离子束被中和、等离子体通道形成的时间尺度远小于离子束的上升沿(30~50 ns)。数值模拟的结果也说明中和过程对离子束的波形影响很小。

### 2.1 中性化对束斑半径的影响

在相同条件下重复传输实验,测量不同靶距时离子束在靶上形成的束斑半径,可以得到束斑半径随传输距离的变化曲线。图 2(a)和图 2(b)分别是在高真空和 133 Pa 的中性 N<sub>2</sub> 气中传输时的实验结果。对比可以看出,在 133 Pa 的中性 N<sub>2</sub> 气中传输 80 cm,束斑的扩散程度与高真空中传输 20 cm 的扩散程度相当。这表明,采取中性化措施后,离子束的发散得到了抑制。

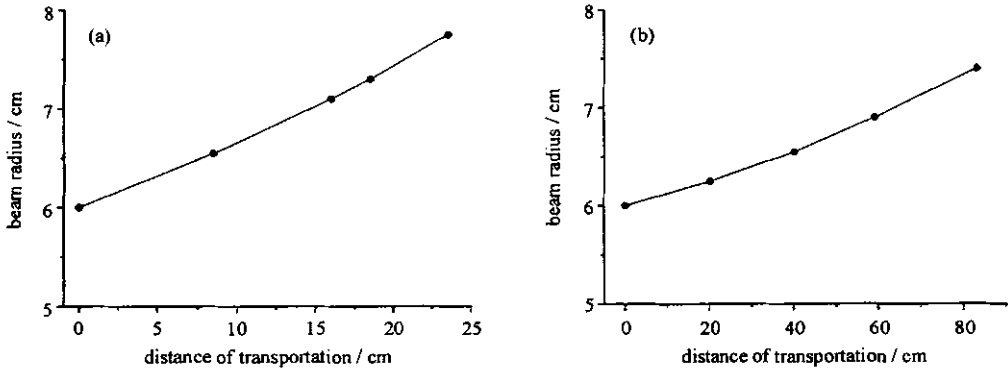


Fig. 2 Radius of HPIB transporting in high vacuum condition(a) and in neutral condition(b)

图 2 高真空中(a)和充 133 Pa N<sub>2</sub> 气(b)束斑半径随传输距离的变化

### 2.2 传输对束流均匀性的改善

利用法拉第筒阵列对离子束的束流密度和均匀性进行了测量。图 3 是偏压法拉第筒阵列测量的原始波形,1# 偏压法拉第筒位于漂移管轴线,3#, 5#, 7#, 11#, 12# 偏压法拉第筒到漂移管轴线的距离分别为 1.5, 1.5, 3, 4.5 和 4.5 cm。从图上可以看出,随着传输距离的增加,束流分布的均匀性得到改善。

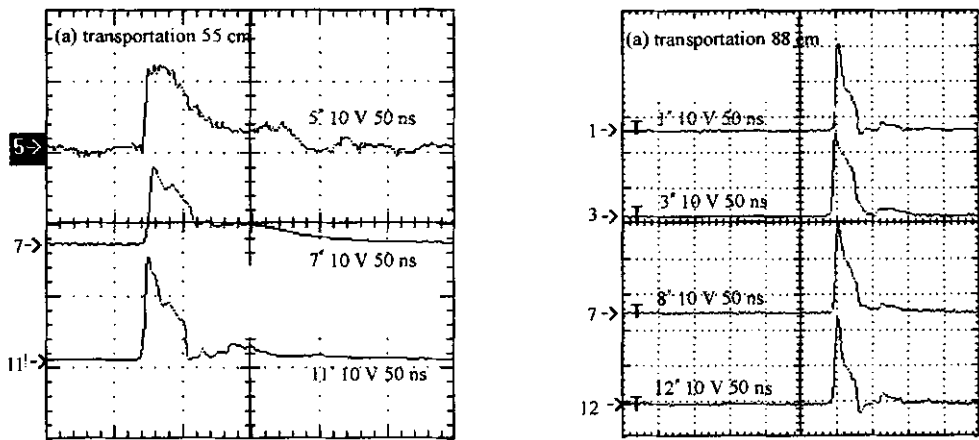


Fig. 3 Waveform of current density measured by Faraday cup array

图 3 法拉第筒阵列实测的离子束束流均匀性波形

### 2.3 三种不同传输条件下的对比实验

进行了相同靶距,高真空、低真空和中性化三种不同传输条件的对比实验,得到的靶上束斑如图 4 所示。三炮的实验条件基本一致,均为:发生器充电电压 50 kV,阳极膜为 40 μm 聚乙烯,阴阳极间隙 5.1 mm,辐照靶为相同材质、相同抛光工艺的铜靶,距二极管阴极 40 cm。081 炮采用高真空传输,真空度  $3 \times 10^{-2}$  Pa,束流发散,在靶上未形成明显的束斑(图 4(a));085 采用中性化膜,低真空(1 Pa)中传输,形成半径为 6.9 cm 的束斑(图 4(b));084 炮采用中性化膜,133 Pa N<sub>2</sub> 气中传输,形成半径为 6.5 cm 的清晰束斑(图 4(c))。这说明了中性化膜和中性气体对束流的发散有抑制作用,可以使束流有效地传输较远距离。

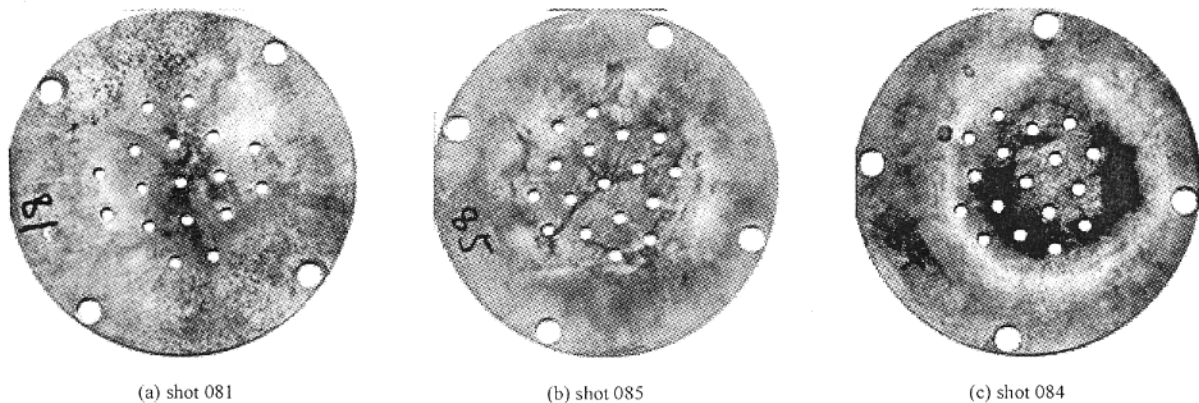


Fig. 4 Stroked targets by HPIB after different transporting distance

图 4 相同靶距情况, 三种不同传输条件下的靶上束斑形貌对比

### 2.4 束流波形模拟

利用顺位流模型, 考虑了离子束能谱、背景等离子体和中性化膜等因素对传输的影响, 编制了模拟离子束束流强度波形随传输距离变化的程序。在模拟过程中, 采用大纵横比二极管的饱和顺位流模型计算得到二极管产生的离子束束流强度, 采用 Bether-Block 公式计算离子束在传输过程中的能量损失。

利用该模拟程序, 根据实测的二极管电压和电流, 计算了传输一定距离后的束流强度。图 5 为模拟得到的离子束传输一段距离后的束流强度与法拉第筒实测的束流强度对比; 图 5(a) 为高真空条件下的传输情况, 图 5(b) 为采用中性化膜、在低真空条件下的传输情况; 图 5(c) 为采用中性化膜、在 133 Pa N<sub>2</sub> 气体中的传输情况。由于二极管状态不同, 三炮入射到漂移管的离子束流峰值分别为 38 kA、40 kA 和 35 kA。对比实测结果和模拟结果可知, 在三种传输条件下, 离子传输效率依次为 60%、90% 和 95%。由于引入中性化措施, 离子的传输效率得到明显提高。

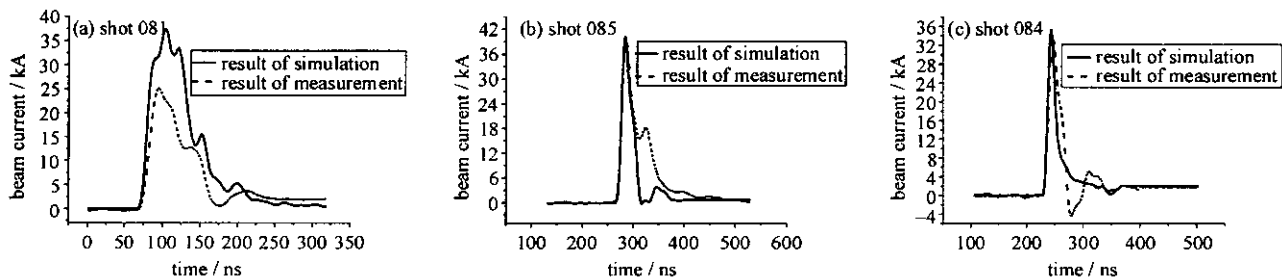


Fig. 5 Beam current results of the simulation and experiments

图 5 束流强度的模拟计算

### 2.5 中性化膜和中性气体对离子束的影响散射

虽然中性化措施的引入抑制了束流中离子间的库仑散射, 但中性化膜和中性气体中的原子对离子束的弹性碰撞又造成束流发散。图 6(a) 是利用 Srim 程序计算得到的, 离子束传输 1 m 后束流的径向分布图; 图 6(b) 是传输过程中束流随传输距离扩散的模拟图; 图 6(c) 是图 6(b) 中离子束穿过中性化膜情况的局部放大图, 中线左侧 (图中阴影部分) 为中性化膜, 右侧为中性气体。由于中性化膜和中性气体的散射, 离子束的发散角为

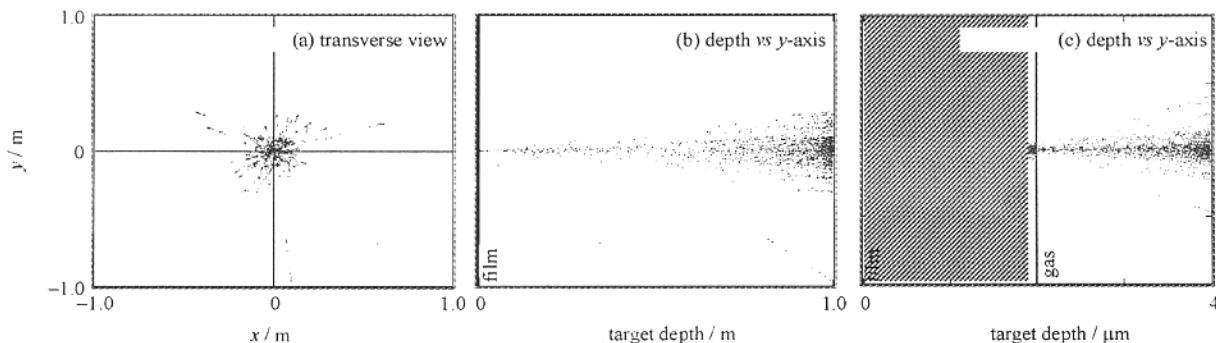


Fig. 6 Defocusing of HPIB due to neutralizing film and neutralizing gas

图 6 通过中性化膜和中性气体的束流发散

30 mrad 左右,这与空间电荷库仑力作用导致的发散相比,明显得到抑制。

### 3 结 论

理论分析和总结实验可知,通过采用中性化膜和中性气体等中性化措施,可使“闪光二号”加速器产生的高功率离子束有效地传输 80 cm 以上,传输效率达到 90%。中性化传输使离子束的均匀性得到改善,束流均匀的面积扩大。

#### 参考文献:

- [1] 杨海亮, 邱爱慈, 张嘉生, 等. “闪光二号”加速器 HPIB 的产生及应用初步结果[J]. 物理学报, 2004, **53**(2): 406-412. (Yang H L, Qiu A C, Zhang J S, et al. Preliminary research results for generation and application of high power ion beams on FLASH II accelerator. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(2): 406-412)
- [2] 邱爱慈, 张嘉生, 彭建昌, 等. 用于模拟 X 射线热-力学效应的高功率脉冲离子束研究进展[J]. 核技术, 2002, **25**(9): 714-719. (Qiu A C, Zhang J S, Peng J C, et al. Progress in studying high power pulsed ion beams for simulating thermal-mechanical effects on the material to be irradiated by X-rays. *Nuclear Techniques*, 2002, **25**(9): 714-719)
- [3] 杨海亮, 邱爱慈, 孙剑锋, 等. 强流脉冲质子束轰击<sup>19</sup>F 靶产生 6~7 MeV 准单能脉冲  $\gamma$  射线初步实验研究[J]. 核技术, 2004, **27**(3): 188-192. (Yang H L, Qiu A C, Sun J F, et al. Preliminary experimental research for 6~7 MeV quasi-monoenergetic pulsed  $\gamma$ -rays generation via intense pulsed proton beam striking <sup>19</sup>F target. *Nuclear Techniques*, 2004, **27**(3): 188-192)
- [4] Miller R B. Introduction to the physics of intense charged particles[M]. New York and London: Plenum Press, 1982: 67-70.

## Neutralized transportation of high power ion beams in drifting tube

SUN Jian-feng, QIU Ai-ci, YANG Hai-liang, LI Jing-ya, REN Shu-qing, HUANG Jian-jun  
(Northwest Institute of Nuclear Technology, P.O. Box 69-10, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** The transportation experiments of high power ion beams(HPIB) on the FLASH II accelerator are presented. The transportation of HPIB in different transporting conditions and distances was studied. The influence of neutralization on the radius of beam and the uniformity of the current distribution was analyzed and numerically simulated. The results of the simulation are consistent with the experimental data. Being neutralized, the HPIB can be effectively transported to a distance farther than 80 cm. During the transportation, the distribution of current is uniformed; the defocus of HPIB is reduced.

**Key words:** High power ion beam; Beam transportation; Neutralizing; Drifting tube