

加速器驱动次临界系统的 中高能质子轰击厚靶中子学实验研究

郭士伦¹, 李丽¹, 史永谦¹, 申庆彪¹, 万俊生², R. Brandt³,

P. Vater³, B. A. Kulakov⁴, M. I. Krivopustov⁴, A. N. Sosnin⁴

(1. 中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024;

3. Kernchemie, Universitat Marburg, Marburg, Germany; 4. Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia)

摘要:利用俄罗斯杜布纳联合核子研究所的高能加速器进行加速器驱动次临界系统(ADS)靶区中子学研究。用 0.533、1.0、3.7 和 7.4 GeV 质子轰击 U(Pb)、Pb 和 Hg 靶的测量结果表明:U(Pb)和 Pb 与 Hg 靶的中子产额比分别为 (2.01 ± 0.10) 和 (1.76 ± 0.33) 。从获得较强中子的角度看, Hg 作为 ADS 靶是不利的;沿厚 20 cm 靶的中子产额随入射质子穿透深度增大而下降,质子能量越低,中子产额下降越快,为在较大厚度范围内获得较均匀的中子场,质子能量不应低于 1 GeV;不同能量质子产生的次级中子能谱相近,但随质子能量提高,较高能量中子的比例逐渐增大。

关键词:加速器驱动次临界系统;厚靶;中子学

中图分类号:X382;O571.422

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2002)06-0554-04

Experimental Study on Neutronics in Bombardment of Thick Targets by High Energy Proton Beams for Accelerator-driven Sub-critical System

GUO Shi-lun¹, LI Li¹, SHI Yong-qian¹, SHEN Qing-biao¹, WAN Jun-sheng², R. Brandt³,

P. Vater³, B. A. Kulakov⁴, M. I. Krivopustov⁴, A. N. Sosnin⁴

(1. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-96, Beijing 102413, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-19, Xi'an 710024, China;

3. Kernchemie FB 15, Universitat Marburg, D-35032 Marburg, Germany;

4. Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia)

Abstract: The experimental study on neutronics in the target region of accelerator-driven sub-critical system is carried out by the high energy accelerator in Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia. The experiments with targets U(Pb), Pb and Hg bombarded by 0.533, 1.0, 3.7 and 7.4 GeV proton beams show that the neutron yield ratio of U(Pb) to Hg and Pb to Hg targets is (2.10 ± 0.10) and (1.76 ± 0.33) , respectively. Hg target is disadvantageous to U(Pb) and Pb

收稿日期:2002-01-11;修回日期:2002-03-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(19975071);中-德-俄科技合作项目

作者简介:郭士伦(1937—),男,河北河间人,研究员,核物理专业

targets to get more neutrons. Neutron yield drops along 20 cm thick targets as the thickness penetrated by protons increases. The lower the energy of protons, the steeper the neutron yield drops. In order to get more uniform field of neutrons in the targets, the energy of protons from accelerators should not be lower than 1 GeV. The spectra of secondary neutrons produced by different energies of protons are similar, but the proportion of neutrons with higher energy gradually increases as the proton energy increases.

Key words: accelerator-driven sub-critical system; thick target; neutronics

与现有核电站相比,加速器驱动次临界系统(ADS)有以下优点:1) 安全性强,无外能输入时,其基准态为次临界态;2) 不产生或少产生长寿命核废物,并能嬗变长寿命锕系废物,减少核燃料后处理投资和长寿命核废物深地层处置的潜在风险;3) 把²³⁸U 和²³²Th 转变成²³⁹Pu 和²³³U,成为可用核燃料,提高燃料利用率。

中国原子能科学研究院、高能物理研究所和北京大学合作已开始在中国原子能科学研究院建造中高能强流质子加速器,用质子束轰击轻水反应堆堆芯区厚靶,作为 ADS 原理验证装置^[1]。为在这一装置建成前进行物理实验研究,中国原子能科学研究院与德国马堡大学和俄罗斯杜布纳联合核子研究所在国家自然科学基金委员会支持下利用杜布纳的高能加速器进行靶区中子学实验研究,探索靶中的中子产额、中子能谱及其空间分布特性,为选定加速器质子能量、靶物质成份及堆芯结构参数提供基础数据,并开始研究 ADS 进行核嬗变的规律。

和 O 发生核反应,产生的反冲核或核反应产物在 CR-39 中产生径迹并被记录。

2) U(Pb) 和 Hg 靶由长 20 cm、直径 3.6 cm 的圆柱和外面的 Pb 套筒组成。Pb 套筒内径 3.6 cm、外径 8 cm,内壁与 U 或 Hg 靶紧密接触,外壁与石蜡慢化体紧密接触(图 2)。CR-39 探测器的尺寸和位置与 Pb 靶的相同。不同能量质子照射到各靶的质子数 N_p 列于表 1。

照射结束后,用 6.5 mol/L NaOH 液蚀刻 CR-39 探测器 45 min(70 °C),以显示 CR-39 中由反冲核和核反应产物产生的径迹,用图像分析仪测量 CR-39 位置的径迹面密度 T_0 。

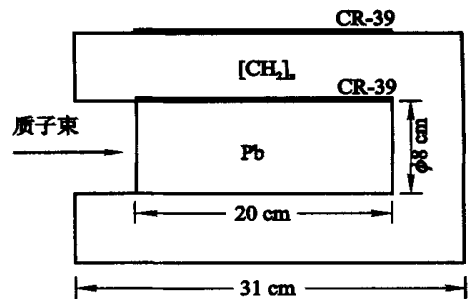


图 1 Pb 靶的实验布置

Fig. 1 Experimental arrangement of Pb target

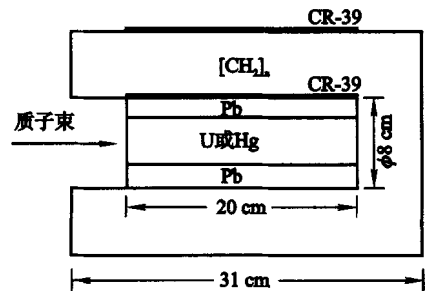


图 2 U(Pb) 或 Hg 靶的实验布置

Fig. 2 Experimental arrangement of U(Pb) or Hg target

1 实验装置

实验在俄罗斯杜布纳联合核子研究所同步稳相加速器 Synchrophasotron 上进行,质子能量分别为 0.533、1.0、3.7 和 7.4 GeV,轰击对象为 U(Pb)、Pb 和 Hg 靶。

1) Pb 靶为长 20 cm、直径 8 cm 的圆柱体(图 1)。Pb 靶外用厚 6 cm、长 31 cm 的石蜡套筒作慢化体,用以模拟次临界反应堆的慢化介质。加速器质子束沿 Pb 靶轴线入射,在靶中与 Pb 发生核反应,产生次级中子;核反应的各种产物与 Pb 进一步发生核反应,产生中子,依此类推。用放在 Pb 靶表面和慢化体外表面的 CR-39 固体径迹探测器记录靶中产生的次级中子。CR-39 为厚 1 mm、长 20 cm 和宽 1 cm 的长条,其化学成份 $[C_{12}H_{18}O_7]_n$ 。次级中子与 CR-39 中 C、H

表 1 照射到各种靶上的 N_p 和束流时间

Table 1 Proton numbers and beam time irradiated to every target

| 质子能量/ GeV | 靶 | $10^{-13} N_p$ | 束流时间/ h |
|-----------|-------|----------------|---------|
| 0.533 | U(Pb) | 1.52 | 7.27 |
| 0.533 | Pb | 1.50 | 3.58 |
| 1.0 | U(Pb) | 2.03 | 1.95 |
| 1.0 | Pb | 2.03 | 3.70 |
| 1.0 | Hg | 1.91 | 1.67 |
| 3.7 | U(Pb) | 1.20 | 0.27 |
| 3.7 | Pb | 1.15 | 0.15 |
| 7.4 | U(Pb) | 0.90 | 3.35 |
| 7.4 | Pb | 0.90 | 1.36 |

2 测量结果与讨论

2.1 Hg 靶产额

测量 U(Pb)、Pb 和 Hg 靶及慢化体表面 CR-39 各位置处单位面积的径迹数(τ),定义每个质子在 CR-39 各位置处的径迹产额为 $Y = \tau / N_p$ 。

用 1.0 GeV 质子轰击 U(Pb) 和 Hg 靶,在靶表面和慢化体表面处的径迹产额示于图 3。图中, $x = 0$ 为靶的起点; $x = 20$ cm 为靶的终端位置。U(Pb) 与 Hg 靶在 CR-39 的径迹产额比 $R = Y_{U(Pb)} / Y_{Hg}$ 绘于图 4。

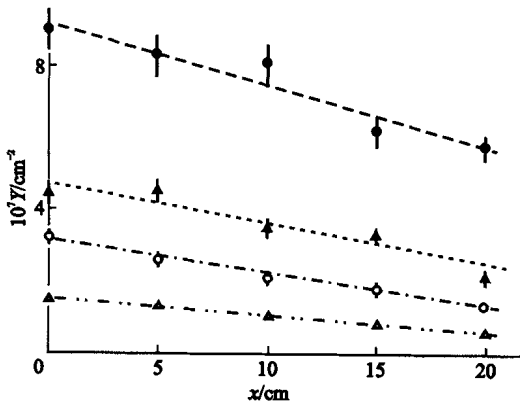


图 3 1.0 GeV 质子轰击 U(Pb) 和 Hg 靶在 CR-39 上的径迹产额

Fig. 3 Track yields on CR-39 detectors in irradiation of U(Pb) and Hg targets with 1.0 GeV protons
 —●— U(Pb) 靶表面; —▲— Hg 靶表面;
 —○— U(Pb) 靶,慢化体表面; —△— Hg 靶,慢化体表面

由图 4 可见:尽管在 CR-39 上的径迹产额相差很大,但各位置 U(Pb) 与 Hg 靶的径迹产额比 R 是一致的, $E_p = 1.0$ GeV 时,其平均值

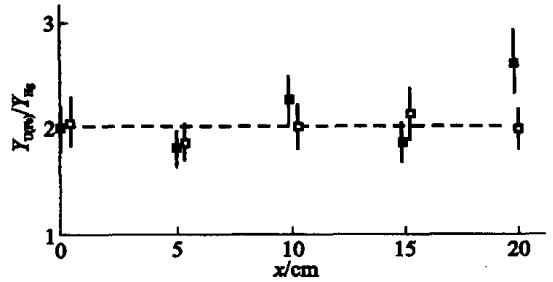


图 4 U(Pb) 和 Hg 靶在 CR-39 的径迹产额比

Fig. 4 Ratio of track yields of CR-39 detectors on U(Pb) target to that on Hg target
 —●— 靶表面; —○— 慢化体表面; 虚线 — 平均值

$$R = 2.01 \pm 0.10.$$

若假定不同能量入射质子、不同靶和靶中不同位置产生的次级中子的能谱相似,且其区别不会对 CR-39 中径迹形成产生明显差异,则 CR-39 上的径迹密度与该位置处次级中子注量成正比,即径迹产额与相应位置处的中子产额成正比。此假设对 44 和 18 GeV $^{12}C + Cu$ 核反应近似正确^[2],后文第 2.3 节的分析也将证明如此。由图 3 和 4 可见,U(Pb) 靶的中子产额比 Hg 靶高 1 倍。同样, $E_p = 1.0$ GeV 下 Pb 与 Hg 靶的径迹产额比 $R = Y_{Pb} / Y_{Hg} = 1.76 \pm 0.33$ 。这说明,与 U(Pb) 和 Pb 靶相比,Hg 靶的中子产额低。若要在加速器驱动的次临界堆中获得较强的中子场,采用 Hg 靶是不利的。

2.2 中子沿靶的分布

在不同入射质子能量下,测量 U(Pb) 靶表面 CR-39 上的径迹产额,并以 $x = 0$ cm 处的径迹产额归一。归一后的径迹产额(Y_{nor})分布示于图 5。由图 5 可见:就 U(Pb) 靶而言,随质子在靶内穿行,中子产额近似直线下降;入射质子能量越低,中子产额下降越快。不同入射质子能量下,在 U(Pb) 靶 $x = 20$ cm 和 $x = 0$ cm 处的径迹产额比 Y_{20} / Y_0 示于图 6。由图 6 可见,径迹产额比 Y_{20} / Y_0 随入射能量升高而增大。这表明,质子能量越高,沿靶的中子分布越均匀;低能质子产生的中子大部分集中在靶的起始端;能量大于 1 GeV 的质子在 20 cm 长的靶中可产生相当均匀的中子分布。因此,加速器的质子能量在 1.0 GeV 以上是必要的。

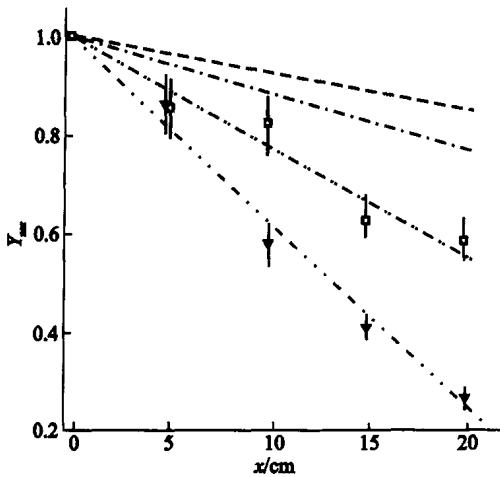


图5 CR-39 上以 $x = 0$ cm 归一后的径迹产额分布(U(Pb) 靶)

Fig. 5 Distribution of normalized track yields on CR-39 detectors for the U(Pb) target
- - - 7.4 GeV; - · - · 3.7 GeV;
— 1.0 GeV; ▽ — 0.533 GeV

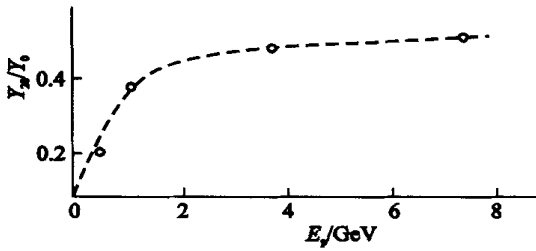


图6 不同 E_p 下 U(Pb) 靶的 $x = 20$ cm 对 $x = 0$ cm 处的 CR-39 径迹产额比 Y_{20}/Y_0
Fig. 6 Track yield ratios on CR-39 at $x = 20$ cm to $x = 0$ cm under different incident for U(Pb) target

2.3 次级中子的能量分布

3 种靶慢化体表面与靶表面 CR-39 的径迹产额比 Y_{out}/Y_{in} 示于图 7。由图 7 可见: 尽管质子的入射能量相差近 7 GeV, 3 种靶的径迹产额比 Y_{out}/Y_{in} 彼此相近。测量的径迹产额比出现较大起伏, 其原因可能是某些能量的质子束偏离靶轴线。图 7 说明, 对不同能量的入射质子和不同靶物质, 次级中子的能谱是相近的。这与文献 [2] 的结论一致, 也证明本文第 2.1 节的假设是正确的。同时可见: 随入射质子能量增加, 发射出较多高能中子, 其易穿过慢

化层到达外面的 CR-39 探测器, 故随入射质子能量增加, Y_{out}/Y_{in} 略有增加。

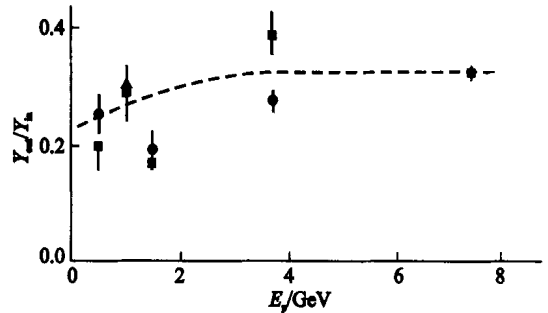


图7 Y_{out}/Y_{in} 与入射质子能量 E_p 的关系

Fig. 7 Relationship of track yield ratio of CR-39 detectors on moderator to that on target
— U(Pb); - - - Pb 靶; ··· Hg 靶

3 结论

1) 1.0 GeV 质子入射下, Hg 靶的中子产额远低于 U(Pb) 和 Pb 靶。仅就获得尽量高的中子注量而言, 采用 Hg 靶是不利的。2) 入射质子轰击长 20 cm 厚靶时, 靶的入射端中子产额高, 随着质子入射深度增加中子产额迅速下降。低于 0.5 GeV 的质子不能在靶中形成足够大的均匀中子场。为得到较大活性区以建造反应堆回路和得到较高中子通量, 质子能量不应低于 1.0 GeV。3) 对不同能量入射质子和靶物质, 次级中子能谱相近, 但也可见不同能量下次级中子能谱的差异, 随入射质子能量升高, 高能中子数增加。有关它们对次临界反应堆的控制和运行的影响有待进一步研究。

感谢俄罗斯杜布纳联合核子研究所同步稳相加速器运行人员为本工作提供质子束。

参考文献:

[1] 丁大钊. 未来核能利用的方案探讨——加速器驱动放射性洁净核能系统[A]. 赵志祥. 加速器驱动放射性洁净核能系统概念研究论文集[C]. 北京: 原子能出版社, 2000. 3~16.
[2] Bisplinghoff B, Bradnova V, Brandt R, et al. On Neutron Generation in Massive Curtarget at Irradiation With 22 and 44 GeV Carbon Ions[J]. J Radioanal Nucl Chem, 1995, 189: 196~206.