

使用活化探测器和成像盘技术相结合的方法 测量混凝土屏蔽体内中子空间分布

王庆斌¹, 李铁辉¹, Masumoto K², Matsumura H², Shibata T²

(1. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049;

2. High Energy Accelerator Research Organization(KEK))

摘要:描述了1种联合使用活化探测器和成像盘技术(IP)探测中子注量的方法。利用这种方法,测量了高能中子束线装置 KENS(KEK spallation neutron source facility)中混凝土屏蔽体内中子的空间分布。高能中子注量衰减的实验结果与使用蒙特卡罗程序 MARS14 模拟计算的结果符合很好。结果表明,联合使用活化探测器和成像盘技术可以同时测量多个位置的中子注量,直观展现出混凝土屏蔽体内中子强度的分布。

关键词:活化探测器;成像盘技术;中子注量;屏蔽混凝土;空间分布

中图分类号:TL816.3 文献标识码:A 文章编号:1000-6931(2006)06-0650-04

Measurement of Neutron Spatial Distribution Inside Concrete Shield Using Activation Foil and Imaging Plate Technique

WANG Qing-bin¹, LI Tie-hui¹, Masumoto K², Matsumura H², Shibata T²

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. High Energy Accelerator Research Organization(KEK), Japan)

Abstract: The spatial distribution of neutrons inside the concrete shield of KENS was measured by the combined use of activation detectors and an imaging plate. Aluminium and gold foils were used for neutron fluence measurements of both high-energy and thermal neutrons. The obtained results concerning attenuation of the high-energy neutron fluence are in a good agreement with results obtained by Monte-Carlo simulation using the MARS14 code. It is concluded that the method, which combined the use of activation detectors and an imaging plate, is very useful to measure the activity of many pieces of the detector simultaneously without any efficiency or decay correction. A wide dynamic range and a high sensitivity are also merits of this method.

Key words: activation detector; imaging plate; neutron fluence; shielding concrete; spatial distribution

活化探测器方法广泛用于中子注量和中子截面测量。测量中子注量时,将活化探测器布置到测量位置,照射一段时间后取出,然后使用高纯锗 γ 谱仪测量活化探测器的放射性,根据活化探测器的放射性和核反应截面计算出测量位置的中子注量。这种方法简单、方便、经济、探测器体积小、对中子场干扰小、测量精度高。近年来,开发了1种新型的成像盘技术(imaging plate, IP)^[1-3],该技术可同时快速测量多个位置的放射性。目前,IP技术已成功应用到很多测量领域中,如中子空间分布测量^[4]、轻度表面污染放射性测量^[5],韧致辐射和光中子分布测量等^[6]。

对于高能质子加速器,高能质子打靶在很宽的能量范围内产生中子。其中,高能中子具有很强的穿透性,并且使周围的材料活化,这是辐射防护研究的重要课题之一。日本高能加速器研究机构(KEK)为进行中子屏蔽研究,建造了1条高能中子束线 KENS(KEK spallation neutron source facility)^[7],使用 500 MeV、5 μ A 质子轰击钨靶产生中子束。本工作使用活化探测器与 IP 相结合的方法,测量 KENS 混凝土屏蔽墙内中子注量的二维分布。

1 实验安排

1.1 KENS 高能中子束线

KENS 高能中子束线装置和混凝土屏蔽设置示于图 1。500 MeV、5 μ A 质子束轰击钨靶产生中子,靶后方为长 250 cm 的束流准直器,束流准直器出口设置 400 cm 厚的普通混凝土屏蔽和照射室。在混凝土屏蔽中设置 7 个实验孔道,7 个实验孔道分别距混凝土屏蔽表面(面向靶)0、40、80、120、180、240 和 320 cm。中子在 400 cm 厚的普通混凝土屏蔽中传输并衰减。

1.2 活化探测器选择和布置

选用金箔(直径 5 mm,厚 0.05 mm)和铝箔(10 mm \times 10 mm,厚 0.1 mm)作为活化探测器分别测量热中子注量和快中子注量;选用未包镉片金箔和外包镉片金箔,利用镉差法测量混凝土屏蔽中束流中心线上的超热中子与热中子的比率。实验通过核反应¹⁹⁷Au(n, γ)¹⁹⁸Au 来测量热中子(反应截面 9.87×10^{-23} cm²)和超热中子,通过核反应²⁷Al(n, α)²⁴Na 测量快

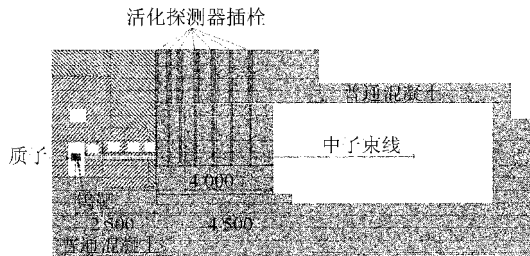


图 1 KENS 高能中子束线和混凝土屏蔽实验设置截面图

Fig. 1 Cross-sectional views of KENS high energy neutron beam course and experimental arrangement

中子。利用镉差法测量超热中子和热中子比率的实验结果参见文献^[7]。

为测量在 400 cm 厚混凝土屏蔽内中子注量的二维空间分布,在每个实验孔道距离束流线 0、40、80 和 120 cm 处,以及混凝土屏蔽末端的中子照射室内设置活化探测器。

1.3 使用 IP 测量活化探测器放射性

照射 1 周后,取下活化探测器,并把探测器按照监测点的相应位置贴到 1 张预先准备好的、与实验布置成比例的位置图上,用 IP(BAS III, Fuji Photo Film Co.)覆盖,曝光一段时间。表 1 列出各活化探测器的反应类型、反应阈能、活化核素的半衰期、冷却时间、IP 的曝光时间等。使用成像分析器(BAS-1800 II, Fuji Photo Film Co.)对 IP 进行扫描,同时测量各活化探测器的感生放射性。使用图像分析软件(MacBAS, FUJIX Co. 提供)获得与活化探测器感生放射性相对应的二维彩色图像,彩色图像的深浅度代表不同的活化水平;同时,系统为每个位置的活化探测器自动算出光致发光强度即 PSL 强度。

表 1 实验条件和活化反应的物理特性

Table 1 Experimental condition and physical properties of activation reactions

反应	阈值/MeV	$T_{1/2}$	冷却时间	IP 曝光时间/h
²⁷ Al(n, α) ²⁴ Na	3.25	14.959 h	6 h	22.5
²⁷ Al(n, x) ²² Na	22.34	2.6019 a	11.12 d	242
¹⁹⁷ Au(n, γ) ¹⁹⁸ Au	0	2.695 d	5.6 h	18.5

注:辐照时间为 1 周

为获得 PSL 强度与¹⁹⁸Au 放射性之间的转换关系,将事先准备的 5 个 Au 活化探测器放置在混凝土屏蔽中的 5 个不同位置照射。照射一周后取出,用自动取样 γ 谱仪测量其放射性。每个活化探测器的测量时间设置为 2 000~10 000 s,箔片放在 HPGe 探测器表面。自动取样 γ 谱仪由 HPGe 探测器 (Model-7229P, Canberra)、多道分析器 (TRUMP, SEIKO EG&G)、自动机械臂 (Movemaster EX, Mitsubishi Electric Co.) 组成,自动机械臂在程序控制下可自动更换样品。经自动取样 γ 谱仪测量后,再将金箔与 IP 覆盖曝光,曝光时间分别选为 5、20 和 60 min,经成像分析器扫描,获得金箔的 PSL 值,从而对 PSL 强度进行标定。

2 实验结果分析

2.1 感生放射性与 PSL 强度间的关系

如图 2 所示,PSL 强度与¹⁹⁸Au 的放射性、曝光时间成正比。对¹⁹⁸Au,可得到如下经验关系:PSL=0.09At,A 为放射性活度,t 为曝光时间。曝光时间在 5~60 min 之间时,相对标准偏差为 3%~6%。用同样方法获得了 PSL 强度与²⁴Na和²²Na 的放射性活度、曝光时间的经验关系。对²⁴Na,PSL = 0.129At;对²²Na,PSL=0.099At。

2.2 400 cm 厚混凝土屏蔽内中子的空间分布

图 3、4 分别示出¹⁹⁷Au(n, γ)¹⁹⁸Au 和²⁷Al(n, α)²⁴Na 反应的反应率(正比于中子注量率)在混凝土中的深度分布。图 5 示出了¹⁹⁷Au(n, γ)¹⁹⁸Au、²⁷Al(n, α)²⁴Na、和²⁷Al(n, x)²²Na 反应在束流线上的反应率。这 3 个反

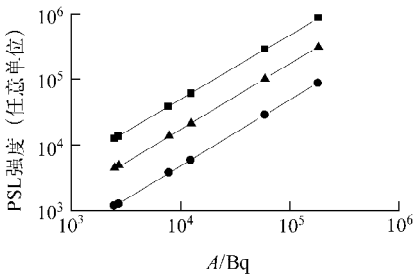


图 2 ¹⁹⁸Au 活度和 PSL 强度间的关系
Fig. 2 Relationship between activity of ¹⁹⁸Au and PSL intensity
■——60 min; ▲——20 min; ●——5 min

应的阈能不同,因此,可利用其特性分别测量热中子、快中子和高能中子注量。由图 5 可见,热中子和快中子在混凝土屏蔽墙中按指数衰减规律衰减,快中子比热中子衰减得更快些,这是因为,快中子在通过 400 cm 厚混凝土屏蔽墙时被显著慢化,部分转变为热中子。另外,混凝土屏蔽厚度大于 250 cm 时,已观察不到快中子。

2.3 与蒙特卡罗模拟计算结果的比较

图 6 示出²⁷Al(n, α)²⁴Na 反应的反应率实

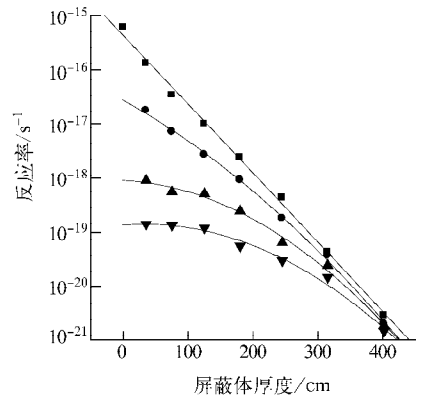


图 3 热中子反应¹⁹⁷Au(n, γ)¹⁹⁸Au 反应率在混凝土屏蔽体中的深度分布
Fig. 3 Depth profiles of neutron reaction rate of ¹⁹⁷Au(n, γ)¹⁹⁸Au in concrete shield
■——束流线上; ●——距束流线 40 cm;
▲——距束流线 80 cm; ▼——距束流线 120 cm

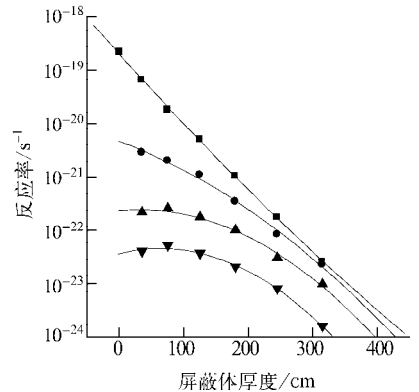


图 4 快中子反应²⁷Al(n, α)²⁴Na 反应率在水泥屏蔽体中的深度分布
Fig. 4 Depth profiles of neutron reaction rate of ²⁷Al(n, α)²⁴Na in concrete shield
■——束流线上; ●——距束流线 40 cm;
▲——距束流线 80 cm; ▼——距束流线 120 cm

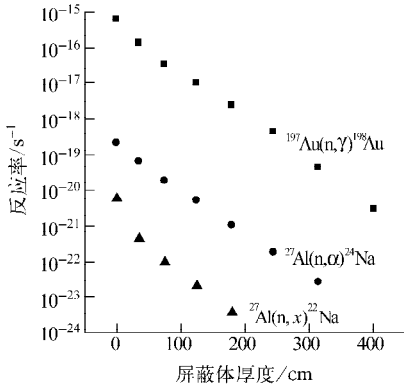


图5 束流线上¹⁹⁸Au、²⁴Na 和 ²²Na 的反应率比较

Fig. 5 Comparison of reaction rates of ¹⁹⁸Au, ²⁴Na and ²²Na on beam axis

■——Au; ●——²⁴Na; ▲——²²Na

验测量与蒙特卡罗程序 MARS14^[8] 模拟计算结果的比较。由图 6 可见,束流线上的模拟与实验结果符合很好,而束流线外的模拟计算结果比实验结果稍低,其原因是模拟计算时未考虑通过准直器外围渗透中子的贡献。

3 结论

将活化探测器和成像盘(IP)技术联合使用

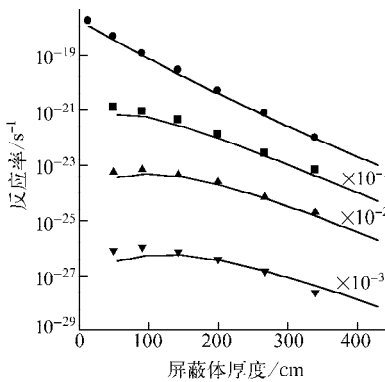


图6 热中子反应²⁷Al(n, α)²⁴Na 的反应率模拟与实验结果的比较

Fig. 6 Comparison of measured and calculated reaction rates of ²⁷Al(n, α)²⁴Na

实线——模拟计算结果;●——束流线上;

■——距束流线 40 cm;▲——距束流线 80 cm;

▼——距束流线 120 cm

的方法同时测量多个活化探测器的感生放射性,可获得很高的灵敏度和良好线性。在 KENS 混凝土屏蔽实验中成功地应用了这种方法,测量了从热中子到几十 MeV 中子在混凝土屏蔽中的衰减和空间分布。实验结果以彩色图像的形式在位置图上标出,使结果一目了然。

参考文献:

- [1] ABE K. Radiation imaging with particle discrimination[J]. Appl Phys, 1998, 67: 677-688.
- [2] SONODA M, TAKANO M, MIYAHARA J, et al. Computed radiography utilizing scanning laser stimulated luminescence[J]. Radiology, 1983, 148: 833-838.
- [3] SANAMI T, BABA M, SAITO K, et al. Fast neutron profiling with an imaging plate[J]. Nucl Instrum Methods, 2001, A458:720-728.
- [4] MASUMOTO K, TOYODA A, EDA K, et al. Measurement of the spatial distribution of neutrons in an accelerator room by the combination of activation detectors and an imaging plate[J]. Radiation Safety Management, 2002, 1(1):12-16.
- [5] MORI C, SUZUKI T, KOIDO S, et al. Measurement of the radioactivity distribution of material surfaces with an imaging plate[J]. Nucl Instrum Methods, 1994, A353:371-374.
- [6] MASUMOTO K, OHTSUKI T, MIYAMOTO Y, et al. Combined use of an activation detector and an imaging analyzer for measuring the spatial-distribution of neutron fluence in an accelerator building [J]. Radio Nucl Chem, 1999, 239: 495-499.
- [7] WANG Qingbin, MASUMOTO K, TOYODA A, et al. KENS shielding experiment (2): Measurement of the neutron spatial distribution inside and outside of a concrete shield using an activation foil and an imaging plate technique[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2004, 4(Suppl):26-29.
- [8] NAKAO N, YASHIMA H, KAWAI M, et al. KENS shielding experiment (1): Measurement of neutron attenuation through 4 m concrete shield using a high energy neutron irradiation room[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2004, 4(Suppl):22-25.