基于反应堆热中子的中子照相孔道设计

俞伯祥

核探测与核电子学国家重点实验室

高能物理研究所实验物理中心

第十六届核电子学年会

2012-8-15





报告内容

■ 中子照相概述

■ 反应堆热中子孔道蒙特卡洛模拟

■ 反应堆热中子孔道实验测量

■总结





一、中子照相概述

工作原理:

辐射照相技术主要是基于射线通过物体后的衰减来达到的。

X射线与物体作用: 核外电子相互作用, 吸收能力与物体原子核外的电子数相关。 中子与物体作用: 与核散射或者直接被核吸收, 中子衰减与原子序数没有确定关系。 因而X射线照相无法区分原子序数相近的两种物质, 但是中子可以区分它们。 例如: 硼、碳、镉和锡, 有相近的原子序数, 但是能很容易被中子照相所区分。 对于轻元素, 如氢和硼, 对于X射线是透明的, 而对中子有很强的吸收能力, 中子很 难区分它们。

中子照相与X射线照相有很好的互补性,可以应用于不同的被照物体。

应用方向:航空、航天、考古、机械、材料、 核工业等领域。其中航空发动机扇叶的缺陷探 测、工业产品的缺陷探测等。







整个照相系统包括:

- 1、**热中子源孔道** (>5×10⁵ n/cm²/s**热中子通量)**;
- 2、旋转样品台;
- 3、CCD照相系统;
 - 3.1 **中子闪烁体(LiF-ZnS);**
 - 3.2 光路系统(反射、透镜);
- 3.3 CCD相机系统(低噪声,光放大, ICCD相机);
- 4、图像处理和重建软件。









二、反应堆热中子孔道蒙特卡洛模拟

与原子能研究院微型堆室的合作下(<mark>感谢李义国老师</mark>),在微型堆室主导的硼中子 治癌微型研究堆的热中子出口基础上,进行了模拟研究。



参考国际上在用的热中子孔道同时考虑现有实际情况提出的一些指标:

·孔道出口热中子通量:
·准直比(L/D>50):
·孔道出口直径:
·n/Gamma比大于:
·镉比(Mn):









IAEA<mark>报告中的一个热中子孔道结构</mark>



中子孔道Geant4模拟结构图

模拟采用的中子孔道结构: 在入射窗口采用铋金属来减少Gamma射线本底,热 中子狭缝为∳2cm和∳4cm两种,采用铅屏蔽与含硼中子吸收体间隔的方式,热中 子出口大小为10cm。

物理模型: 在GEANT4的各种中子的强相互作用模型中, 这项工作选择了 QGSP_BERT_HP相互作用物理模型, 这个模型设置了全热中子截面库, 能实现弹 性散射、非弹性散射、中子俘获和裂变等中子物理过程, 对于中子的工业应用、 医学应用、屏蔽应用及剂量研究GEANT4合作组都推荐使用这个相互作用物理模 型, 并且有很多成功应用的实例。





在Geant4模拟程序中,输入了反应堆给出的能量分布、角度分布等,采用Geant4

中的GPS模块对入射中子进行定义。



反应堆热中子出口的中子能谱及其出射方向(反应堆设计时的模拟结果)





模拟结果:

在模拟过程中对元件的尺寸进行了一系列的试验,包括硼 准直元件的厚度、铋金属的厚度、入口处加石墨准直元件置等, 进行了模拟研究,最终确定了金属Bi厚度为3cm,不加石墨原件, 每25cm铅屏蔽加入一个2cm厚的纯硼原件。



孔道出口的中子通量



中國科學院為能物肥為完備 Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences



Gamma剂量率随铋厚度的变化



模拟结果:

根据确定的元件尺寸: 3cm的金属铋,入口狭缝为∳2cm和∳4cm两种,每25cm 的铅屏蔽加一个2cm硼中子吸收体,总体长度为115cm,热中子出口大小为10cm。



中子照相孔道Geant4模拟热中子通量分布图



在固定中子孔道参数的情况下,对样品成像进行了Geant4模拟。



指标名称	结果参数
总长度 (mm):	1150
准直比(L/D):	29或58
<u>狭缝尺寸(cm):</u>	4 或 2
孔道出口中子通量 (n/cm ² /s):	1.28×10 ⁶ 或 6.29×10 ⁵
铋厚度(cm):	3
孔道出口尺寸(cm):	10
偏移角(degree):	4.1
n/Gamma比(n/cm ² /mrem):	6.1×10⁵或 3.0×10 ⁵



中國科學院為能物招納完所 Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences

三、反应堆热中子孔道实验测量

热中子孔道布局:

根据模拟结果,在入射窗口采用3cm的铋金属 用于减少Gamma本底射线,热中子狭缝为φ2cm 和φ4cm两种,每25cm的铅屏蔽加一个2cm硼中 子吸收体,总体长度为115cm,热中子出口大 小为10cm。

<mark>热中子探测器:</mark> 锰活化片中子探测器(9个) 每个相距2cm。

Gamma剂量探测器: 13个热释光剂量探头,对热中子孔道出口进行剂量测量,分布与中子探测一致,在外围多加了4个。







中子照相孔道实验布置





中子通量测量结果:

Φ4cm热中子狭缝:中心热中子通量满足 1.0×10⁶ n·cm⁻²s⁻¹), 垂直和水平分布, 在r<2cm的范围内,约为最大值的90%, r>2cm 的范围内,变化较大,最外围r=4cm 处约降为60%。

ϕ2cm热中子狭缝:

中心热中子通量: 5.41×10^{5} n • cm⁻²s⁻¹; 热中子通量分布与 ϕ 4cm热中子狭缝基本一致。

Gamma剂量测量结果:

热中子狭缝的大小,对Gamma射线剂量没有 影响,中心位置Gamma剂量为11.5mRem/s,在 r<2cm的范围内为最大值的90%,外围r=4cm 处约降为60%。总体而言Gamma本底明显偏大, 是设计值的5倍左右,原因应该是没有屏蔽 散射回来的Gamma射线,需要进一步进行加 强Gamma屏蔽。



中子孔道出口热中子通量归一化分布





总结

本工作通过Geant4蒙特卡洛程序对反应堆热中子照相孔道进行了模拟设计, 对一系列参数进行了优化,最终确定了热中子照相孔道的各个元件的尺寸以及 中子通量、准直比(L/D)、Gamma剂量率等一系列的重要参数。

通过模拟得到的参数,设计了热中子孔道用的各个元件,在反应堆热中子 出口搭建了中子照相孔道,并对两种入口狭缝的中子通量和Gamma本底剂量率进 行了测量,结果显示热中子通量模拟结果与实验测量基本符合,孔道出口Gamma 剂量率偏高,在进行进一步的Gamma射线屏蔽后,可以应用于三维中子照相研究。



