

文章编号: 1007-4627(2014)04-0550-05

加速器驱动次临界系统散裂靶参数优化计算

李军^{1, 2}, 罗文¹, 肖拥军¹, 宋英明¹, 朱志超¹, 郭谦¹, 李卓成¹

(1. 南华大学核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001;

2. 新疆辐射环境监督站, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 采用国际开源程序包 Geant4, 构建高能质子束轰击加速器驱动次临界系统 (ADS) 散裂靶的物理模型, 模拟计算质子轰击液态金属铅、铅-铋合金和汞靶的泄漏中子谱分布, 以及计算不同能量质子对应的铅靶泄漏中子产额和轴向积分分布, 获得 1 GeV 质子对应的铅圆柱靶优化参数, 考虑入射质子的利用率和整个堆芯的体积质量, 优化靶半径范围为 16~24 cm, 靶高为 100 cm, 相关研究结果可为 (ADS) 散裂靶的物理和工程设计提供理论依据。

关键词: 散裂靶; Geant4 模拟; 中子泄漏谱; 参数优化; 加速器驱动次临界系统

中图分类号: TL503.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.04.550

1 引言

加速器驱动次临界嬗变系统 (ADS) 是一种高效的核废物嬗变器 (或焚烧炉), 主要是由中高能强流质子加速器、外源中子产生靶以及次临界反应堆组成。ADS 能将长寿命的高放的核废料嬗变成短寿命核废料, 可降低核废料的危害时间。同时还能将一部分核乏燃料嬗变可使用的核燃料, 提高核燃料的利用率和使用时间。由于 ADS 可以大幅度减低核废料减小体积, 以及提高反应堆的安全性, 被认为是目前最有效的核废物处置技术方案之一^[1-2]。

由于 ADS 是由外加中子源构建的新核能系统, 对外中子源和散裂靶问题进行系统研究变得十分关键。然而, 散裂靶作为 ADS 组成中最具创新的部分之一, 目前散裂靶的研究仅限于理论计算和实验验证阶段。一般而言, 强流质子轰击散裂靶后产生的高能粒子和散裂产物对材料有损害, 导致散裂靶承受严重的放射辐射和机械应力。考虑的以上因素, 铅 (Pb)、铅-铋合金 (LBE) 和汞 (Hg) 等液态重金属材料常作为 ADS 系统设计的液态散裂靶件。迄今国内外学者开展了 ADS 靶物理的初步计算分析^[3-5], 为进一步研究 ADS 靶的散裂中子学特征, 本文采用国际开源

程序包 Geant4^[6] 构建 GeV 质子束轰击 ADS 散裂靶的物理过程, 计算散裂靶产生的中子通量与能谱分布, 模拟获得不同能量的质子对应的靶材的优化尺寸及优化后泄漏中子谱, 相关研究成果可为加速器驱动次临界系统散裂靶的工程设计提供理论依据。

2 物理模型构建

Geant4 是由欧洲核子中心基于 C++ 面向对象技术开发的国际开源蒙特卡罗模拟工具包, 用于模拟粒子在物质中运输的物理过程。目前已广泛应用于核物理、核技术、空间物理、医学研究等研究领域。

中高能质子辐照重金属靶时, 涉及多个物理过程产生多种次级粒子。在 GeV 能段, 入射质子与靶相互作用主要包含“激发”和“退激”过程。前者指通过散射、俘获、裂变、级联等核反应过程产生中子、质子、 α 粒子、正负电子、 π 介子、 γ 等各种次级粒子。后者即激发态的末态核通过中子蒸发形式回到基态。本文基于 Geant4 的强相互作用模型 QGSP_BERT^[7], 构建高能 GeV 质子轰击金属靶继而产生散裂中子的物理过程。其中, QGSP_BERT 物理模型设置了全热中子截面库, 能实现弹性散射、非弹性散

收稿日期: 2014-04-14; 修改日期: 2014-05-24

基金项目: 湖南省自然科学基金资助(13JJ4074)、湖南省教育厅重点基金资助(13A080)、南华大学博士科研启动基金(2012XQD57)

作者简介: 李军(1981-), 男, 四川南通人, 工程师, 从事核能与核技术研究; Email: kirk1026@163.com

通信作者: 罗文, E-mail: wenluo-ok@163.com.

<http://www.npr.ac.cn>

射、中子俘获和裂变等中子物理过程, 能量适用范围是 $0 \sim 10$ GeV; 相比低能参数化模型QGSP而言, QGSP_BERT充分考虑了次级粒子的级联效应, 其模拟结果与实验观测值吻合较好。事实上, QGSP_BERT模型是Geant4合作组推荐使用的强相互作用物理模型, 已有很多成功应用的实例。

散裂靶设计成圆柱体结构, 模拟时选用散裂靶材有铅、铅-铋合金和汞, 其密度分别取 11.35 g/cm^3 、 10.14 g/cm^3 和 1.36 g/cm^3 , 模拟温度 673 K , 压力 1.0 MPa 。在工程实践中, 通过减小散裂靶径向设计尺寸, 可有效增加入射端泄漏中子。但需科学合理设计散裂靶的整体尺寸, 工程设计时常选用 20 cm 左右半径的圆柱体靶。计算模型中靶区高度取 100 cm , 靶半径取 16 cm , 质子在中心坐标零点下方 30 cm 处沿竖直方向向下入射。即入射坐标为 $(0, 0, -0.3)$, 方向矢量为 $(0, 0, 1)$ 。几何模型构建以及次级粒子产生示意图见图1。

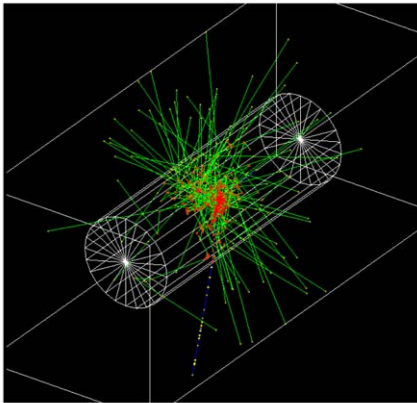


图1 (在线彩图) Geant4模拟高能质子轰击一个理想的中子转换靶

3 模拟结果

3.1 泄漏中子谱

泄漏中子谱分布决定次临界堆的运行特征, 包括活性区的燃耗分布、裂变能量分布、倒料频率等。泄漏中子产额大小决定次临界堆的能量放大系数和核废料的嬗变效率。图2是 1.0 GeV 质子轰击液态金属铅、铅-铋合金和汞靶的泄漏中子能谱, 模拟采用 10000 个入射质子。由图2可知, 三种靶材的泄漏中子能谱谱形相近, 能谱峰值均在 $0.1 \sim 0.5 \text{ MeV}$ 范围内, 不同的是泄漏中子谱密度的大小, 它决定了泄

漏中子产额。由比较可知, 液态金属铅的中子能谱峰最小, 且有最小的泄漏中子谱密度。对于 1 GeV 质子射入标准铅、铅-铋合金和汞靶的侧壁泄漏中子数分别为 16.86 , 15.44 和 12.57 。虽然汞常温下为液体, 反应堆运行前不需加热系统, 不产生高放射性物质Po, 但由于其产生的泄漏中子产额较低, 目前通常选用液态铅和铅-铋合金靶作为ADS散裂靶材。

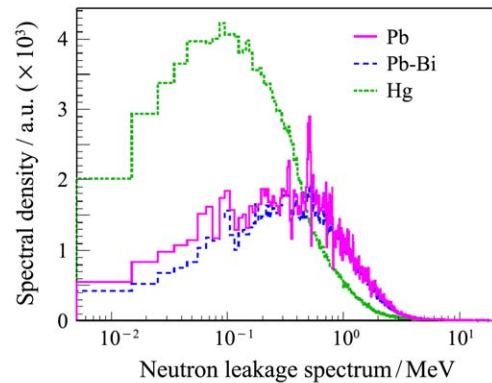


图2 (在线彩图) Geant4模拟的泄漏中子能谱分布

3.2 泄漏中子产额

对于半径为 16 cm 的液态铅靶和 10000 个入射质子, 中子总泄漏和侧壁泄漏中子产额如表1所示。随着入射质子能量的增大, 中子总泄漏数和侧壁泄漏数随之递增, 但侧壁中子产额比(侧壁中子泄漏产额与中子总泄漏产额比)基本保持一致, 约为 93% 。

表1 半径 16 cm 铅靶的总泄漏和侧壁泄漏中子数

能量/GeV	中子总泄漏产额	侧壁中子泄漏产额	侧壁中子产额比重(%)
1.0	181 127	168 635	93.10
2.0	191 573	178 009	92.92
2.5	247 544	231 569	93.55
3.0	279 418	261 642	93.64

表2给出了不同靶半径、不同能段的靶侧壁泄漏中子产额模拟结果。随着靶半径的增大, 能量 $< 1 \text{ MeV}$, 即低能段的泄漏中子产额不断增加; 中能段 ($1 \sim 10 \text{ MeV}$) 的泄漏中子产额有减小趋势, 但并不显著; 高能段 ($> 10 \text{ MeV}$) 的泄漏中子产额份额并不多, 但产额递减趋势明显。这表明泄漏中子能谱随半径增加在逐渐变软。能谱变软的主要原因是, QGSP_BERT模型充分考虑初级和次级粒子的级联过程, 当散裂靶半径增大时, 初级和次级中子在输运过

程中与散裂靶发生非弹性散射等物理过程的几率相应增加,造成部分能量损失。不同靶半径对应的侧壁泄漏中子能谱分布如图 3。通过表 2 和图 3 不难发现,绝大部分的泄漏中子都处于中低能段。例如,对于半径 20 cm 以上的铅靶,中低能段的泄漏中子产额占泄漏总产额的 95%以上。

表 2 不同能段的靶侧壁泄漏中子产额分布 (%)

靶半径 /cm	<1 MeV	1~10 MeV	10~20 MeV	>20 MeV
12	56.24	34.13	2.34	7.29
16	63.19	30.35	1.60	4.86
20	66.87	28.27	1.22	3.63
24	70.16	26.05	0.96	2.83
28	75.75	21.66	0.63	1.96
32	77.57	20.21	0.56	1.67

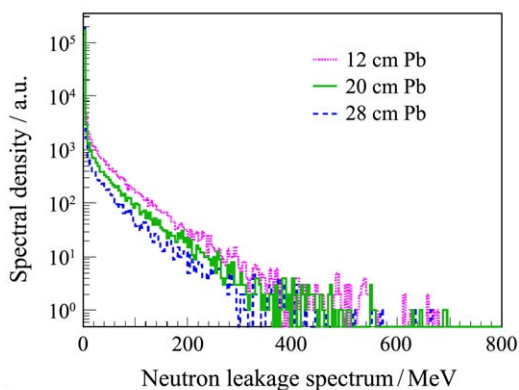


图 3 (在线彩图) 不同半径靶的侧壁泄漏中子能谱分布

3.3 泄漏中子轴向积分分布

分别选用 1.0, 2.0, 2.5 和 3.0 GeV 的入射质子至半径 16 cm 铅靶,入射坐标为 (0, 0, -30),方向矢量为 (0, 0, 1),模拟获得靶泄漏中子轴向积分分布如图 4 所示。不难发现,不同能量质子入射对应的泄漏中子轴向积分分布形状基本一致,但随着入射质子

能量的增大,泄漏中子轴向积分峰位逐渐向 z 轴正方向移动。当入射质子能量为 1.0 GeV 时,泄漏中子轴向积分峰位约为 z = -19 cm, 3.0 GeV 时为 z = -14 cm。

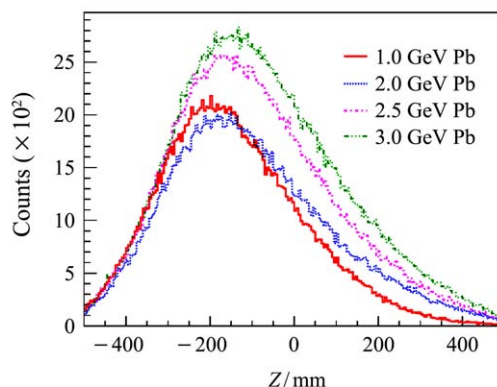


图 4 (在线彩图) 半径 16 cm 铅靶泄漏中子轴向积分分布

3.4 靶半径的优化选择

泄漏到次临界堆的中子数是由入射粒子、靶材料、靶半径和高度决定的。因此,在选择靶半径时需要尽量考虑靶内产生中子数和靶泄漏中子产额高,以及泄漏中子的利用率大。由于强流质子加速器束流半径和形状对靶内产生中子数和靶泄漏中子产额影响不大,在此仅考虑理想的质子加速器束流,假定铅圆柱靶高 100 cm、入射质子能量 1 GeV,分别统计平均 1 个质子在靶内产生的中子以及靶侧壁和底部泄漏的中子(见表 3 和图 5)。从表 3 和图 5 可看出,1 个质子在靶内产生的中子数随靶半径增大而增大,而沿靶侧面泄漏的中子数却随靶半径先增大后减小;当靶半径为 24 cm 时,侧壁中子泄漏产额有最大值,对应的单位泄漏产额为 17.72。在不损失中子泄漏的情况下,体积小的靶会减小整个堆芯的质量和体积。因此,建议圆柱靶的半径尺寸选择在 16~24 cm 之间。

表 3 不同半径铅靶的中子泄漏数

靶半径/cm	靶内中子产生总产额	侧壁中子泄漏产额	底部中子泄漏产额 Z = -500	底部中子泄漏产额 Z = 500	单位泄漏产额
12	317 769	156 303	4 870	168	15.63
16	349 406	168 635	11 859	633	16.86
20	373 077	175 484	21 215	1 577	17.54
24	389 635	177 241	33 074	3 290	17.72
28	401 240	174 426	46 590	5 693	17.44
32	404 682	167 936	59 669	9 048	16.79

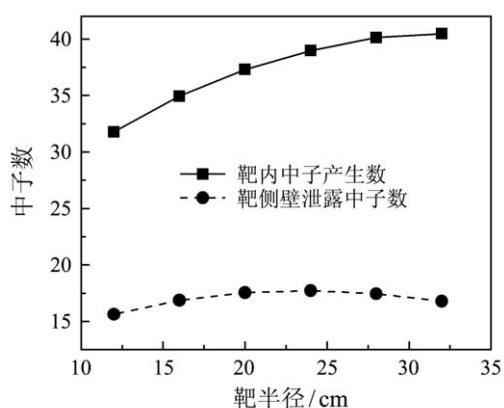


图5 (在线彩图) 平均每个质子入射产生的铅靶内中子数和侧壁泄露中子数

3.5 靶高度的优化选择

靶高度的选择要求是在保证泄漏中子数的同时, 避免增加不必要的体积和质量, 从而有利用于堆芯功率的展平。采用能量为1 GeV、半径为24 cm的铅靶, 入射坐标同上, 分别模拟研究高度为60和150 cm的靶产生和泄漏的中子产额。结果表明, 平均入射1个质子时, 高度为60 cm的靶产生和泄漏的中子产额分为37.62和13.87, 分别占高度为100 cm靶的96.55%和78.25%; 高度为150 cm的靶产生和泄漏的中子产额分为39.13和19.32, 分别占高度为100 cm靶的100.4%和109.0%。由于在不损失中子泄漏的情况下, 考虑到整个堆芯的体积质量和经济因素, 对于1 GeV的入射质子圆柱靶的较理想高度选择为100 cm。

4 小结

本文利用Geant4模拟计算了三种潜在的(ADS)

散裂靶材的泄漏中子谱分布。分析了不同靶半径下不同能段的靶侧壁泄漏中子产额分布, 计算了不同能量质子入射情况下液态金属铅靶的泄漏中子产额和轴向积分分布。最后从入射质子的利用效率角度出发, 由侧壁泄漏中子产额和泄漏能谱分析, 获得入射质子能量为1 GeV对应的铅圆柱靶的优化几何尺寸。相关研究成果可为(ADS)散裂靶的物理和工程设计提供理论依据。

参考文献:

- [1] NIFENECKER H, DAVID S, LOISEAUX J M, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2001, **463**(3): 428.
- [2] ZHAO Zhixiang, XIA Haihong. China Science and Engineering, 2008, **10**(3): 66. (in chinese)
(赵志祥, 夏海鸿. 中国工程科学, 2008, **10**(3): 66.)
- [3] WANG Yuwei, YANG Yongwei, CUI Pengfei. Atomic Energy Science and Technology, 2011, **45**(9): 1065. (in chinese)
(王育威, 杨永伟, 崔鹏飞. 原子能科学技术, 2011, **45**(9): 1065.)
- [4] TAN Xinjian, LI Jinying. Neutron leakage spectrum study of spallation target of ADS. Atomic Energy Science and Technology, 2013, **47**(9): 1590. (in chinese)
(谭新建, 李金英. 原子能科学技术, 2013, **47**(9): 1590.)
- [5] SELTBORG P, WALLENUS J, TUCEK K, *et al.* Nuclear science and engineering, 2003, **145**(3): 390.
- [6] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2003, **506**(3): 250.
- [7] [2014-04-18][EB/OL]http://geant4.cern.ch/support/proc_mod_catalog/physics_lists/referencePL.shtml

Parameter Optimization and Calculation of Spallation Target in Accelerator Driven sub-critical System

LI Jun^{1, 2}, LUO Wen¹, XIAO Yongjun¹, SONG Yingming¹, ZHU Zhichao¹, GUO Qian¹, LI Zhuocheng¹

(1. School of Nuclear Science and Technology, Nanhua University, Hengyang 421001 Hunan, China;

2. Xinjiang Department of Environment Protection, Urumqi 830011, China)

Abstract: We use Geant4 toolkit to model high-energy proton irradiating spallation target in an Accelerator-Driven sub-critical System (ADS). The simulated neutron leakage spectrum resulting from proton bombarding liquid metal targets of lead, lead-bismuth eutectic, and hydrargyrum are obtained. The neutron leakage yields from lead target and their axial integrated distributions are calculated with different incident proton energies. Considering the incident proton efficiency and the whole size and mass of the reactor core, the optimized target radius and target height are suggested to be a range of 16~24 cm and 100 cm, respectively, which is helpful for the physical and engineering design of the ADS spallation target.

Key words: spallation target; Geant4 simulation; neutron leakage spectrum; optimized parameter; accelerator driven sub-critical system

Received date: 14 Apr. 2014; **Revised date:** 24 May 2014

Foundation item: Natural Science Foundation of Hunan Province, China(13JJ4074); Research Foundation of Education Bureau of Hunan Province, China(13A080); Ph.D. Start-Up Foundation of University of South China(2012XQD57)

Corresponding author: LUO Wen, E-mail: wenluo-ok@163.com.

<http://www.npr.ac.cn>