

文章编号: 1007-4627(2016)01-0077-05

## PGNAA系统中D-T中子管的慢化装置优化设计

黄红<sup>1,2</sup>, 李锐<sup>2</sup>, 王琦标<sup>2</sup>, 庾先国<sup>1,2,3</sup>, 杨剑波<sup>1,2</sup>, 王旭<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学, 地球探测与信息技术教育部重点实验, 成都 610059;

2. 成都理工大学, 地学核技术四川省重点实验室, 成都 610059;

3. 四川理工学院, 四川 自贡 643000)

**摘要:** 为了提高PGNAA系统中D-T中子管的中子慢化效率, 获得更高的热中子产额, 借助蒙特卡罗模拟, 确定了以铅为中子反射层、5个聚乙烯层和铅层相互交替作为中子慢化层、碳化硼含量为5%的含硼聚乙烯作为中子吸收层以及铅作为 $\gamma$ 屏蔽层的中子慢化装置模型。针对中子产额为 $3 \times 10^7$  n/s的D-T中子管, 该慢化装置出射方向低于5 eV的中子产额可达 $5.28 \times 10^6$  n/s, 占总中子产额的30.8%, 有效提高了中子慢化效率。经过验证模拟结果能够满足实验要求。

**关键词:** PGNAA; D-T中子管; 中子慢化; 蒙特卡罗

**中图分类号:** TL84      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.33.01.077

### 1 引言

瞬发 $\gamma$ 中子活化分析技术(Prompt Gamma Neutron Activation Analysis, PGNAA)是通过测量中子和物质元素发生 $(n, n'\gamma)$ 和 $(n, \gamma)$ 反应在短时间( $10^{-14}$  s)放出的特征 $\gamma$ 射线的能量和强度进行定性和定量分析的方法<sup>[1-2]</sup>。因其具有深穿透、快速、无需制样等特点, 有效地解决了复杂昂贵的采样系统和繁琐的制样过程, 在水泥、煤炭等行业在线物料检测中应用日趋广泛<sup>[1-10]</sup>。中子发生器具有可控性强、单色性好等特点, 近年来随着中子产额和使用寿命的提高, 满足了PGNAA在线物料检测系统对中子源的要求。

D-T中子管产生的中子平均能量为14 MeV<sup>[11]</sup>, 国外Tsuji-mura<sup>[12]</sup>, Biju<sup>[13]</sup>等模拟研究了不同材料对中子的慢化, 取得了较好的效果。国内ShanQing<sup>[14]</sup>、王鑫<sup>[15]</sup>、何丽华<sup>[16]</sup>、窦玉玲<sup>[17]</sup>等利用MCNP模拟软件对D-T中子管的结构进行了优化, 曾军<sup>[18]</sup>、曹琴琴<sup>[19]</sup>、羊奕伟<sup>[20]</sup>等对D-T中子管慢化准直屏蔽系统进行了模拟设计, 并得到了满足实际需求的D-T中子管慢化准直系统。但是现有的D-T中子管慢化装置大多采用单一的慢化材料对中子进行慢化, 其主要针对中子照相、中子探雷等应用而设计, 由于结构和材料的限制这些现有的装置无法直接适用于PGNAA系统中。本

文提出一种采用中子慢化材料和金属层相间隔放置的新型结构慢化装置, 并借助蒙特卡罗模拟软件MCNP进行PGNAA系统中D-T中子管的结构设计与优化, 通过对常用中子慢化材料、反射增殖材料、中子反射层、中子慢化层、中子吸收层、 $\gamma$ 屏蔽层的结构和尺寸等参数进行模拟分析, 得到最优的慢化装置参数, 能够有效提高中子的慢化效率。

### 2 慢化装置模型

模拟装置如图1所示, 主要由D-T中子管、中子反射层、中子慢化层、中子吸收层和 $\gamma$ 屏蔽层几部分构成。其中D-T中子管模型由95#氧化铝陶瓷外壳、钛靶以及位于钛靶中心附近的14 MeV各向同性中子点源构成, 中子产额为 $3 \times 10^7$  n/s。中子发生器模型内部真空, 外径为3 cm, 长度30 cm, 陶瓷外壳厚度为0.5 cm。中子反射层采用重金属材料, 包裹在中子发生器外层, 对出射中子进行反射和增殖; 中子慢化层采用多慢化材料层和重金属材料层相间的结构, 通过重金属材料反射对中子进行多次慢化, 提高慢化效率; 中子吸收层采用中子吸收材料, 对非出射方向的中子进行慢化吸收;  $\gamma$ 屏蔽层采用高密度金属材料, 对中子与物质反应产生的 $\gamma$ 射线进行屏蔽, 完成PGNAA系统中的第一层

收稿日期: 2015-10-19; 修改日期: 2015-11-19

基金项目: 四川省青年科技创新研究团队项目(2015TD0020); 国家自然科学基金资助项目(41374112); 国家高新技术研究发展计划资助项目(2012AA063501);

作者简介: 黄红(1992-), 女, 四川南充人, 硕士研究生, 从事核技术应用研究

通信作者: 杨剑波, E-mail: yjb@cdu.edu.cn.

辐射防护。

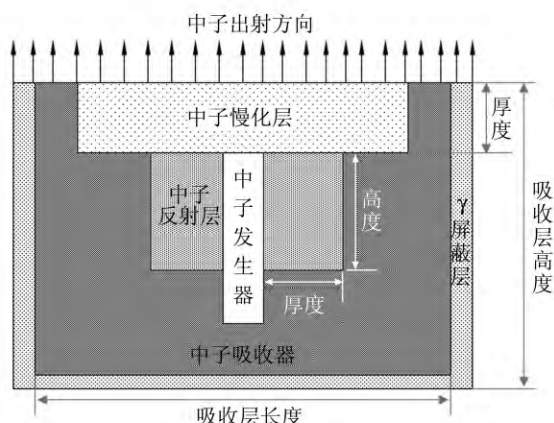


图 1 慢化中子装置示意图

### 3 模拟结果及分析

#### 3.1 中子反射层

在本工作中，将中子的能量划分为三个能量段，能量低于 5 eV 为低能中子、 $5\text{ eV} < E < 3\text{ eV}$  为中能中子，能量高于 3 MeV 为高能中子。高原子序数物质是较好的中子反射材料，和中子增殖材料<sup>[12,20]</sup>，将其包裹在

中子发生器外层能够提高中子出射方向的中子产额。图 2 对比了不同高度和厚度下天然铀、贫铀、铅、钨、铋五种重金属材料对中子的反射和增殖效果。从图 2(a) 中可以看出，在高度为 30 cm 时，随着材料厚度增大，出射方向的中子数呈上升趋势，在厚度足够大时，中子产额增加趋于平缓。天然铀、贫铀、和钨在厚度大于 15 cm 趋于平缓，铅和铋在厚度大于 25 cm 时趋于平缓。

从图 2(b) 可看出，在天然铀、贫铀和钨 15 cm、铅和铋 25 cm 厚度下，出射方向中子产额随高度增加而上升，在高度足够大时，中子产额不再增加。天然铀、贫铀在高度为 17 cm 时达到最大饱和值  $3.6 \times 10^7\text{ n/s}$ ，铅在高度为 27 cm 时达到最大饱和值  $2.85 \times 10^7\text{ n/s}$ ，铋在高度为 30 cm 时达到最大饱和值  $2.75 \times 10^7\text{ n/s}$ ，钨在高度为 19 cm 时达到最大饱和值  $2.7 \times 10^7\text{ n/s}$ 。通过对比可知，天然铀和贫铀对中子的反射增殖效果最好，能够将出射方向中子产额提高到不加反射增殖材料的 2.4 倍；铅、铋和钨对中子反射增殖效果相当，可将中子产额提高到 1.8 倍。由于大量的天然铀和贫铀材料不易获得，而在其他三种材料中铅效果略好，同时也是常用的金属材料，所以选用铅作为中子反射材料，其最优尺寸为厚度 25 cm，高度 27 cm。

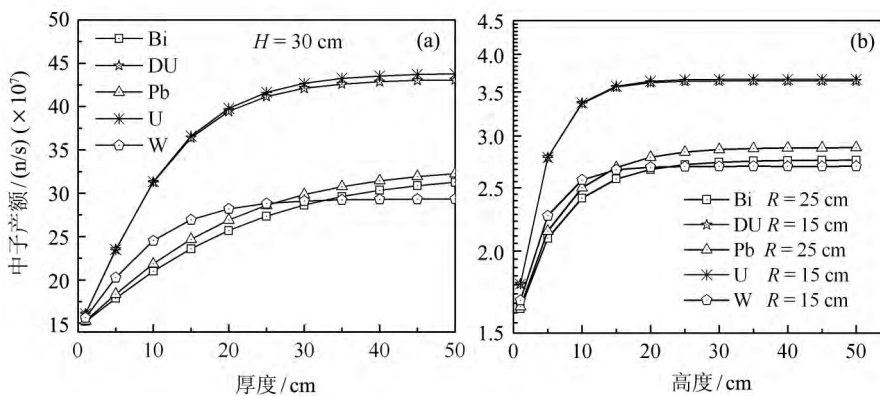


图 2 不同尺寸和材料的中子反射层对出射方向中子产额影响  
(a) 高度为 30cm 时出射方向中子产额随厚度变化；(b) 最优半径时出射方向中子产额随高度变化。

#### 3.2 中子慢化层

中子慢化层位于中子反射层上方，采用多中子慢化材料层与铅反射层相间的结构，每层的长和宽均为 60 cm。常用的中子慢化材料主要是含氢材料和含硼材料，图 3 为不同慢化材料时，出射方向的低能中子产额随慢化厚度变化。从图 3 中可以看出，随着慢化厚度的增加，出射方向的低能中子产额呈先增大后减小的趋势。聚乙烯、石蜡、水和 5% 含硼聚乙烯最大低能中子产额出现在厚度为 5 cm 左右，重水、石墨最大低能中子产额出

现在厚度为 25 cm 左右。碳化硼和 5% 含硼聚乙烯这两种含硼材料吸收的低能中子数与慢化产生的低能中子数相当，使得低能中子产额很低。重水、水、聚乙烯和石蜡的最大低能中子产额相当，在  $3.5 \times 10^6\text{ n/s}$  左右。由于水和重水常温下均为液体，不适合装置的装配，且重水价格昂贵，其最佳厚度在 25 cm，要求材料多，所以聚乙烯和石蜡均适合作为本装置中的慢化材料，我们在本工作中选取聚乙烯，最佳厚度为 5 cm。此时，出射方向低能中子产额为  $3.73 \times 10^6\text{ n/s}$ ，占总中子产额的 19.7%。

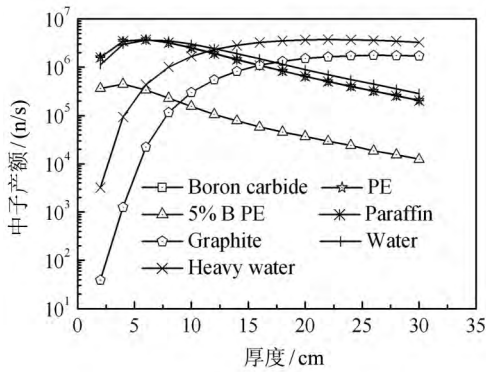


图 3 不同慢化材料下低能中子产额随厚度变化

将 5 cm 聚乙烯分为若干层, 在每层之间插入铅反射层。1~5 层聚乙烯, 1~5 cm 铅层厚度下, 出射方向的低能中子产额变化如图 4 所示。从图中可看出, 铅层厚度不变时, 出射方向低能中子产额随着慢化层数增加先增大后减小; 铅层厚度越大, 低能中子产额减小的速度越快。当慢化层数为 5, 每层厚度为 1 cm, 插入铅层厚度为 1 cm 时, 出射方向的低能中子产额达到最大, 为  $4.56 \times 10^6$  n/s, 占总中子产额的 27.7%。相比单一聚乙烯慢化层, 出射方向的低能中子产额和占总中子产额比均显著提高。

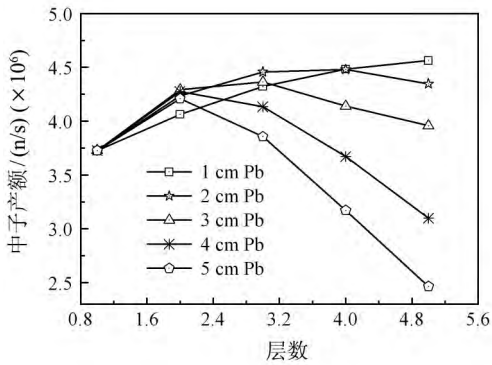


图 4 不同铅层厚度下出射方向低能中子产额随慢化层数变化

### 3.3 中子吸收层

中子吸收层包裹在反射层与慢化层外, 采用长方体结构, 长和宽相等。中子吸收主要通过慢化后的热中子进行俘获, 硼元素俘获截面高于氢元素, 所以选用含硼聚乙烯作为中子吸收材料。高度为 30 cm 时, 62~160 cm 宽度下碳化硼含量为 0~30% 的含硼聚乙烯吸收层对单个侧面中子的吸收效果如图 5(a) 所示。从图 5(a) 中可看出, 随着吸收层宽度增大, 侧面中子产额呈负指数降低; 不同碳化硼含量的含硼聚乙烯吸收效果差异很小, 其中碳化硼含量为 5% 含硼聚乙烯的吸收

效果最好, 当其宽度大于 140 cm 时, 侧面中子产额低于  $10^4$  n/s, 相应的中子通量为  $2.38$  n/( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ), 若取中子的能量为 14 MeV, 经周围剂量当量转换系数转换可得一小时内的中子周围剂量当量为  $4.59$   $\mu\text{Sv}$ , 满足国际和国家规定的剂量标准。

底面中子产额随吸收层高度变化如图 5(b) 所示, 底面中子产额同样呈负指数降低。底面直接与地面接触, 所以其防护要求比侧面低。在高度大于 67 cm 时底面中子产额低于  $10^5$  n/s, 继续增加底面的 3% 含硼聚乙烯厚度, 底面中子产额变化趋于平缓, 因此选用含硼聚乙烯厚度为 67 cm 作为最佳的底面吸收层厚度。同时, 由于含硼聚乙烯也是慢化材料, 使得出射方向低能中子产额提高到  $5.28 \times 10^6$  n/s, 占总中子产额的 30.8%。

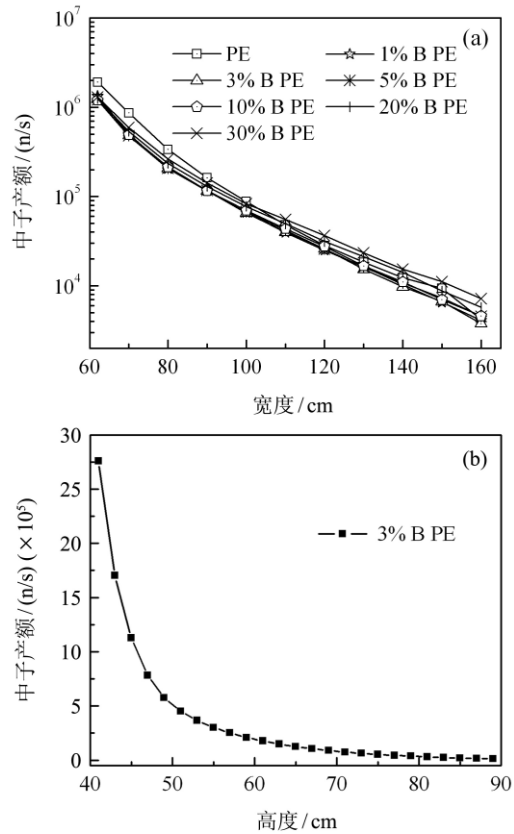


图 5 不同尺寸和材料的中子吸收层对侧面和底面中子的影响 (a) 侧面中子产额随吸收层宽度变化; (b) 底面中子产额随吸收层高度变化。

### 3.4 $\gamma$ 屏蔽层

$\gamma$ 屏蔽层在中子吸收层外, 与吸收层结构相同, 材料为铅。从图 6 可看出, 随着侧面和底面铅层厚度增加,  $\gamma$ 射线产额呈负指数降低。当侧面厚度大于 10 cm 时, 侧面  $\gamma$ 射线产额低于  $10^3$ /s, 低于不加  $\gamma$ 屏蔽层时

的 1%，并且随着侧面屏蔽层厚度继续增大， $\gamma$ 射线产额变化较小，因此选用侧面铅层的厚度为 10 cm。 $\gamma$ 屏蔽层底面与地面接触，防护要求比侧面低，选用底面 $\gamma$ 屏蔽层的厚度为 8 cm，此时底面 $\gamma$ 射线产额低于 $10^4$ /s。同时随着侧面和底面 $\gamma$ 屏蔽层厚度的增加，侧面和底面的中子产额也有所降低，侧面厚度为 10 cm 时，侧面中子产额为  $4.89 \times 10^3$  n/s；底面厚度为 8 cm 时，底面中子产额为  $5.43 \times 10^4$  n/s。

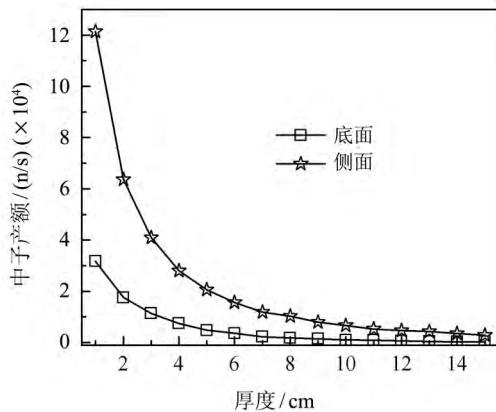


图 6 侧面和底面 $\gamma$ 产额随 $\gamma$ 屏蔽层厚度变化

#### 4 PGNAA初步实验

根据上述蒙特卡罗模拟结果，选用最佳参数设计出实验装置，由于慢化装置只是PGNAA系统中的一部分，不能单独实验，必须放在PGNAA系统中整体实验。利用西安石油仪器厂生产的CZF90型(D,T)14 MeV-D-T中子发生器(中子脉冲宽度为5  $\mu$ s)作中子源，6英寸NaI探测器，ORTEC公司生产的DSPEC-jr-2.0多道谱仪，自研制控制台及防护屏蔽体，将CaCO<sub>3</sub>、FeSO<sub>4</sub>、SiO<sub>2</sub>分别以5:2:5的比例均匀混合制成样品进行PGNAA初步实验，测量时间为60 min，得到实验结果如图7所示(已转成计数率)，从图7中可以看出H

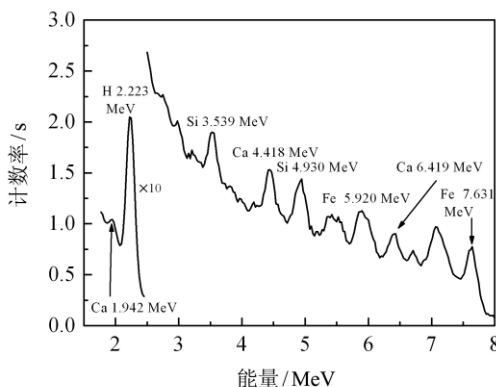


图 7 PGNAA初步实验

在 2.23 MeV, Ca 在 1.942, 4.418, 6.419 MeV, Fe 在 5.920, 7.631 MeV, Si 在 3.539, 4.930 MeV 分别出现 PGNAA 瞬发 $\gamma$ 射线谱峰。因此，通过蒙特卡罗模拟得到的最佳参数能够较好地满足初步实验要求。但从图 7 中还可以看出，在实验样品全为纯样的条件下，所测量得到的 PGNAA 瞬发 $\gamma$ 射线计数率偏低，且测量时间偏长，说明要满足现场 PGNAA 测量的要求，PGNAA 装置还需要进行大量优化及实验。

#### 5 结论

本工作通过模拟及实验获得如下结论：(1) 以厚度 25 cm、高度 27 cm 的铅作为反射层；(2) 在中子发生器出射方向 5 个 1 cm 厚的聚乙烯中分别镶嵌 1 cm 厚的铅层作中子慢化层；(3) 以 140 cm $\times$ 140 cm $\times$ 67 cm 的含硼聚乙烯(碳化硼含量占 5%)作为中子吸收层；(4) 以侧面厚度 10 cm、底面厚度 8 cm 的铅作为 $\gamma$ 屏蔽层；(5) 经过实验进行验证，蒙特卡罗方法模拟结果较好地满足初步实验要求,但要获得更高性能的 PGNAA, 尚需进一步优化改进。

#### 参考文献:

- [1] LU Yi, SONG Zhaohui. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, **12**(33): 1527. (in Chinese)  
(卢毅, 宋朝晖. 核电子学与探测技术, 2013, **12**(33): 1527.)
- [2] HEI Daqian. Science & Technology, 2014, **6**: 63. (in Chinese)  
(黑大千. 科技资讯, 2014, **6**: 63.)
- [3] NAQVI A A, NAGADIM.M. AL-AMOUDI Omar S. B, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2004, **225**: 331.
- [4] NAQVI A A, Fazal-ur-Rehman, NAGADIM M, *et al.* Radiation Measurements, 2007, **42**: 241.
- [5] HAN Xiaogang, GARDNER R P. Nucl Instr and Meth B, 2007, **263**: 320.
- [6] YANG Jianbo, TUO Xianguo, MU Keliang. Atomic Energy Science and Technology. 2008, **4**(42): 329. (in Chinese)  
(杨剑波, 虞先国, 穆克亮. 原子能科学技术, 2008, **4**(42): 329)
- [7] YANG Jianbo, YANG Yigang, LI Yuanjing. Nuclear Science and Technologies, 2012, **23**(6): 337.
- [8] YANG Jianbo, YANG Yigang, LI Yuanjing, *et al.* Laser Physics Letters B, 2013, **9**: 056002.
- [9] YANG Jianbo, TUO Xianguo, LI Zhe, *et al.* Nuclear Science and Techniques, 2010, **10**: 221.
- [10] WANG Qibiao, YANG Jianbo, TUO Xianguo, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 2014, **S1**: 807. (in Chinese)  
(王琦标, 杨剑波, 虞先国, 等. 原子能科学技术, 2014, **S1**: 807.)
- [11] YANG Guangzhi, SONG Yahui, LIU Mingzhe. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, **8**: 935. (in Chinese)  
(杨光志, 宋亚辉, 刘明哲. 核电子学与探测技术, 2013, **8**: 935.)
- [12] TSUJIMURA N, YOSHIDA T. Radiation Measurements. 2010, (45): 1359.

- [13] BIJU K, TRIPATHY S P, SUNIL C P. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2012, **682**: 54.
- [14] SHAN Qing, CHU Shengnan, JIA Wenbao. Applied Radiation and Isotopes, 2015, **105**: 204.
- [15] WANG Xin, GU Deshan, CHENG Daowen. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008, **5**(28): 958. (in Chinese)  
(王鑫, 谷德山, 刘林茂. 核电子学与探测技术, 2008, **5**(28): 958.)
- [16] HE Lihua, LING Qiu, LIU Fudong. The Moderator Collimator Preliminary Design of Neutron Radiography Equipment for D-T neutron Source, 2010, **4**(24): 14. (in chinese)  
(何丽华, 凌球, 刘福东. 南华大学学报. 2010, **4**(24): 14)
- [17] DOU Yuling, WANG Guobao, ZHANG Guoguang. Progress report on China Nuclear Science Technology, 2011. (in Chinese)
- [18] ZENG Jun, CHU Chengsheng, HAO Fanhua. Nuclear Physics Review. 2013, **30**(4): 435. (in chinese)  
(曾军, 储诚胜, 郝樊华. 原子核物理评论, 2013, **30**(4): 435.)
- [19] CAO Qing-qing. Simulation Design on Beam Shaping Assembly for Neutron Radiography Based d-D and D-T Neutron Source[M]. 2006. (in Chinese)  
(曹琴琴. d-D和d-T中子源中子照相慢化准直屏蔽系统模拟设计[M]. 2006.)
- [20] YANG Yiwei, LIU Rong, JIANG Li. Acta Phys. Sin, 2014, **16**: 122. (in Chinese)  
(羊奕伟, 刘荣, 蒋励. 物理学报, 2014, **16**: 122.)

## Optimal and Design of D-T Neutron Generator Moderation Setup in PGNA A System

HUANG Hong<sup>1,2</sup>, LI Rui<sup>2</sup>, WANG Qibiao<sup>2</sup>, TUO Xianguo<sup>1,2,3</sup>, YANG Jianbo<sup>1,2</sup>, WANG Xu<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Earth Exploration Information Techniques of Ministry of Education, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Provincial Key Laboratory of Applied Nuclear Techniques in Geosciences, Chengdu 610059, China;

3. Sichuan University of Science Engineering, Zigong 643000, Sichuan, China)

**Abstract:** To improve the moderating efficiency of D-T Neutron Generator in PGNA A system, and get higher thermal neutron yield, the Monte Carlo code MCNP was used to optimize the moderation setup. The lead was selected as neutron reflector and gamma absorber, 5 polyethylene layers and 4 lead layers constituted the neutron moderator and 3% boron-doping polyethylene was selected as neutron absorber. For the yield of  $3 \times 10^7$  n/s D-T Neutron Generator, this moderation setup can provide a yield of lower than 5 eV of  $5.28 \times 10^6$  n/s, accounting for 30.8% of total neutron yield, dramatically improves the moderating efficiency. It is proved that the simulation results can satisfy the requirement of PGNA A system by preliminary experimental verification.

**Key words:** PGNA A; D-T neutron generator; neutron moderating; Monte Carlo

**Received date:** 19 Oct. 2015; **Revised date:** 19 Nov. 2015

**Foundation item:** Science and Technology Innovation team of Sichuan(2015TD0020); National Natural Science Foundation of China(41374112); National High Technology Research and Development Program of China(2012AA063501); Research Projects of National Defense Science and Technology (JSJL2014404B001)

**Corresponding author:** YANG Jianbo, Email: yjb@cdut.edu.cn.