

文章编号: 1007-4627(2013)04-0435-06

热中子分析探雷的中子源慢化装置设计与优化

曾军^{1,2}, 储诚胜², 郝樊华², 丁阁², 向清沛², 罗小兵¹

(1. 四川大学原子核科学技术研究所, 四川 成都 610064;

2. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 与传统的地雷探测技术相比, 热中子分析 (Thermal Neutron Analysis, 简称 TNA) 探雷技术具有准确率高、虚警率低和对环境适应性强的特点, 但探测速度较慢, 制约了其广泛应用。为了提高地雷位置处的慢热中子通量, 缩短探测时间, 提出了一种基于 ^{252}Cf 的中子源慢化装置设计构型, 主要包含中子慢化层、中子反射层、本底 γ 屏蔽层和侧向中子吸收层 4 个部分。采用数值模拟的方法比较了 4 种常用中子慢化(反射)材料的性能, 优选高密度聚乙烯作为慢化材料, 石墨作为反射材料。同时, 为了满足辐射安全要求, 对屏蔽材料的结构进行了优化计算。按照设计构型搭建了 TNA 探雷实验平台。在 10^4 n/s 中子源强下优化了慢化层和反射层的厚度, 测试了装置慢化效能, 在 10^7 n/s 中子源强下评估了装置辐射安全性能。结果表明, 采用该装置可使地雷位置处的慢热中子通量提升 11 倍以上, 并能有效保障辐射安全。

关键词: TNA 探雷; ^{252}Cf 中子源; 中子慢化

中图分类号: TL99 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.04.435

1 引言

地雷由于种类繁多, 埋设背景复杂, 因而探测也十分复杂, 探雷技术一直以来被公认为世界性难题, 各军事强国均针对地雷的不同特征不断地开展多途径的探索工作。从早期的电磁感应到后来的红外成像和探地雷达等技术, 以这些技术制成的探雷装备在一定程度上解决了地雷探测的难题, 但由于不是依据目标物中是否含有炸药这一本质特征来判定地雷的存在性, 因此存在对金属碎片或外形与地雷相似的异物产生较多原理性的虚警问题。

新兴的探雷技术大多关注地雷中是否含有炸药这一本质特征, 如以炸药分子电四极矩共振信号为探测目标的核电四极矩共振 (NQR)^[1], 以炸药中的 H 元素为探测目标的中子背散射 (NBS)^[2], 以中子激发瞬发 γ 射线为探测目标的热中子分析 (TNA) 和脉冲快热中子分析 (PFTNA)^[3] 等。其中, TNA 探雷方法早在 20 世纪 70 年代初就被首次提出^[4], 并在近年来受

到广泛的重视^[5-6]。TNA 探雷的基本原理是通过探测经慢化后的源中子与爆炸物中的 N 元素作用发出的 10.83 MeV 特征 γ 线, 来检测地表中 N (炸药) 含量是否异常, 进而判断地雷的存在性。由于炸药中的 N 含量 (15% ~ 40%) 要远远高于地表中的 N 含量 (< 1%), 加之在 10.83 MeV 的高能段干扰射线较少, 使得该项技术具有可靠性高、虚警率低和对土壤背景适应性强的优点。但另一方面, TNA 方法探雷速度相对较慢 (最长约数分钟), 制约了其广泛应用。为了提高 TNA 探雷的探测速度, 本研究在 ^{252}Cf 同位素中子源的基础上, 设计获得一套高效的慢热中子转化装置, 使得在相同的中子源强下进入地雷的慢热中子更多, 从而缩短对地雷的探测时间, 提高探测效率。

2 基本原理

TNA 的基本原理如图 1 所示, 其过程可概述为: 中子源发射的快中子束流经慢化材料慢化后形成热中

收稿日期: 2012-12-27; 修改日期: 2013-03-15

基金项目: 总装备部探索一代资助项目

作者简介: 曾军(1988-), 男, 四川绵阳人, 硕士研究生, 从事核技术应用研究; Email: pine2000@foxmail.com.

通信作者: 储诚胜, E-mail: chuchsh@tom.com

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

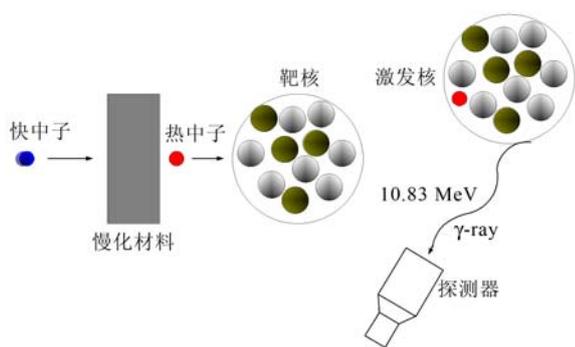


图 1 (在线彩图)TNA原理示意图

子束流, 热中子易与物质中的原子核发生俘获反应, 形成新的原子核, 新的原子核处于不稳定状态, 通过退激反应会产生特征 γ 射线, 通过测量这些特征 γ 射线能谱即可实现对元素的识别和检测。在将 TNA 技术应用于地雷(炸药)探测中, N 元素作为主要的待测和表征核素, 其反应式为



对于一次探测地雷目标物, 被记录到的 N 元素特征信号越强, 则探测时间越短, 而探测时间 T_D 与 N 元素特征信号的计数率之间的关系可以表示为

$$T_D \propto I_0 \eta N \sigma(n, \gamma) \epsilon_s, \quad (1)$$

其中: I_0 为源(快)中子束流强度; η 为源中子慢化效率; N 为地雷目标物中氮原子的个数; $\sigma(n, \gamma)$ 为中子俘获截面; ϵ_s 为探测器对 10.83 MeV 光子探测效率。从式(1)可以看出, 对于特定的地雷, 当探测立体角和中子源强一定时, 提高源中子的慢化效率 η 可有效地缩短探测时间 T_D 。

3 慢化装置构型设计

在本研究中, 选择 ^{252}Cf 裂变同位素为 TNA 探雷中子源, 与国外同类研究中所采用的其他中子源^[7-11](如 Am-Be 中子源和 D-D/D-T 中子管等)相比, ^{252}Cf 源具有体积小、源强稳定和能量低的优点, 并且对土壤含水量变化和地雷埋深增加的适应能力更强^[12]; 其缺点在于 ^{252}Cf 源本底 γ 较强, 并会无时不刻地放出中子, 储存和操作时需要特别注意辐射安全事故的发生。

^{252}Cf 源中子谱遵循 Watt 分布, 平均能量为 2.16 MeV, 若仅仅依靠土壤和地雷自身的慢化作用, 在地雷内形成的慢热中子通量很难满足实际探测需求。另外, ^{252}Cf 源中子呈 4π 方向分布, 在没有反射的条件下, 朝上出射的中子几乎全部浪费, 并且侧向泄露的非有效中子会显著增大 γ 探测器中的本底噪声, 淹没有用的特征信号, 增大操作人员所受辐射剂量。因此, 采用 ^{252}Cf 源的 TNA 探雷系统需要设计专门的慢化装置来提高中子源的利用率, 同时减少侧向出射的非期望中子和本底 γ 。

为了实现该目的, 针对 ^{252}Cf 源的固有特点, 采用功能分解的设计思路, 设计了一套在探雷场景使用的中子源慢化装置, 如图 2 所示。主要包括底端中子慢化层、顶端中子反射层、侧向中子吸收层和本底 γ 屏蔽层 4 部分。中子慢化层的核心作用在于通过中子与低 Z 物质的弹性散射, 慢化朝地表出射中子的高能中子, 从而提高地雷中 N 元素与中子发生 (n, γ) 反应的截面。中子反射层位于慢化层的上方, 其作用在于通过多次散射作用, 使得朝上出射的中子能被部分反射回地雷位置处。慢化层和反射层皆为圆柱体, 在其

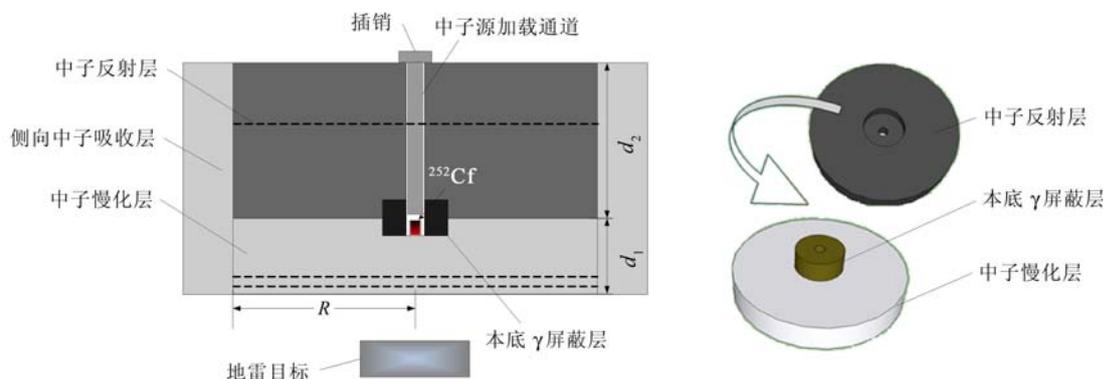


图 2 (在线彩图)慢化装置示意图

外部包裹了一层空心套筒(侧向中子吸收层), 用于吸收侧向出射的非有效中子。本底 γ 屏蔽层是包裹在中子源外的空心套筒, 用于吸收 ^{252}Cf 源自发裂变时放出的本底 γ 射线。根据 Cluzeau 等^[13] 的研究成果, 厚为 3 cm 的铅层可使中子源的本底 γ 射线减弱一个量级以上, 因此, 本底 γ 屏蔽层为外径 4 cm, 内径 1 cm 和高 5 cm 的铅筒。此外, 考虑到探雷实验需要多次更换目标物, 在中子反射层和本底 γ 屏蔽层中心开辟了一条空心通道, 用于在远距离外通过机械臂加载中子源, 并配备了与之相适应的聚乙烯插销。

4 模拟研究

4.1 中子慢化层优化计算

在相同的条件下, 采用 MCNP5 程序, 分别计算了高密度聚乙烯 (HDPE)、水、重水以及石墨作为慢化材料时的慢化效果, 如图 3 所示。从图中可以看出, 随着慢化层厚度的增加, 地雷内的慢热中子通量呈现先增大后减小的趋势, 这是因为在较薄厚度时, 慢化作用占据主导, 而当慢化层厚度继续增大时, 吸收作用逐渐占据上风。4 种材料中要实现最佳的慢化效果, HDPE 所需厚度最薄, 其次是水、重水和石墨。在相同的厚度下, 含 H 元素较多的 HDPE 和水的慢化效果明显优于重水和石墨, 考虑到 HDPE 兼有方便加工成形的优点, 因此最终确定选用 HDPE 作为慢化层材料。HDPE 密度一般介于 $0.94 \sim 1.10 \text{ g/cm}^3$ 之间, 对于不同密度的聚乙烯, 其慢化效果也有较大差别, 如图 4 所示。密度为 1.1 g/cm^3 的聚乙烯作为慢化层材料时, 其最优的慢化厚度对应为 5 cm, 而密度为 0.95 g/cm^3 的聚乙烯对应的厚度为 6 cm。因此采用密度越大的聚乙烯作为慢化层材料, 越有利于在较小的厚度下实现最优的慢化效果, 从而减小装备体积。

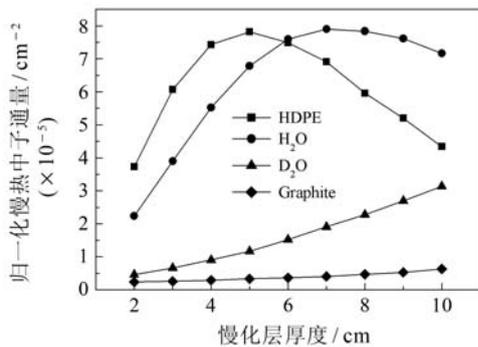


图 3 不同材料的慢化效果

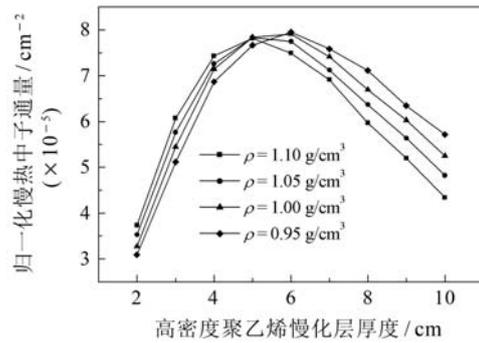


图 4 不同密度聚乙烯的慢化效果

4.2 中子反射层优化计算

反射层的作用是使朝上出射的中子能被尽可能地反射回来, 从而提高源中子的利用率。反射通常是多次散射的结果, H 元素虽然拥有较强的慢化本领, 但其热中子吸收截面 ($\sigma_a = 332.6 \text{ mb}$) 却远远大于 C 元素 ($\sigma_a = 3.5 \text{ mb}$), 采用含 H 较多的物质作为反射材料, 容易出现中子在经反射层进入慢化层之前就被吸收掉的情况。不同材料作为反射层时, 地雷内的慢热中子通量随反射层厚度的变化计算结果如图 5 所示。从图中可以看出, 随着反射层厚度的增加, 慢热中子的通量先迅速增大, 然后逐渐减缓, 最后到达平台区。这种变化过程一方面体现了反射层对改善慢热中子通量明显的作用, 另一方面也说明了离中子源越近的材料起到的反射效果越佳。在实际应用中, 考虑到装备小型化和费效比的因素, 反射层的厚度应尽量取在拐点处。从 4 种材料反射效果对比可以看出, 石墨和重水作为反射层时其效果明显优于水和 HDPE, 考虑到成本的因素, 反射层材料最终确定选用石墨。与慢化层材料类似, 石墨的密度与慢化效果密切相关, 如图 6 所示, 厚度同取 14 cm 时, $\rho = 2.62 \text{ g/cm}^3$ 比 $\rho = 1.40 \text{ g/cm}^3$ 的石墨反射效果高出 30%。因此在反射层中填充石墨粉末时应充分地压实。

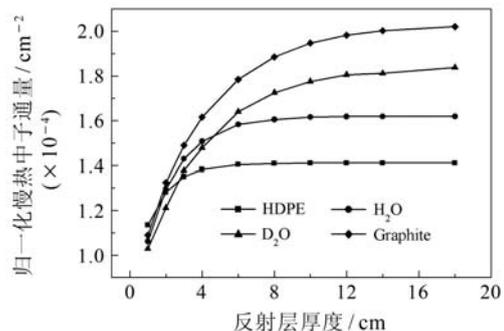


图 5 不同材料的反射效果

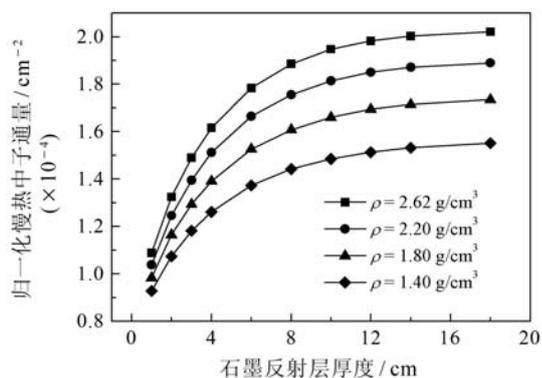


图 6 不同密度石墨的反射效果

4.3 中子吸收层优化计算

从慢化体侧向泄露的中子对于改善地雷内慢热中子通量没有任何帮助，但却会显著提高设置在慢化体旁的探测器中的噪声信号，并且增大操作人员所受的辐照剂量，因而需要对其进行专门的屏蔽和吸收。快中子的屏蔽通常分为慢化和吸收两个过程，一般采用“铁+含硼聚乙烯+铅”的“鸡尾酒”式组合。考虑到中子源外的铅筒、石墨以及 HDPE 已有的减速作用，只需额外再加一定厚度的含硼聚乙烯，即可满足对中子防护的需求。图 7 的计算结果显示了含不同质量分数 B₄C 的聚乙烯对中子的吸收效果。从图中可以看出，加入 B₄C 后聚乙烯的屏蔽效果明显改善，但不同硼含量之间并无显著差别。因此，本研究中选择在慢化(反射)层外设置一层 5 cm 厚的空心聚乙烯(含 5% B₄C)套筒作为中子吸收层。

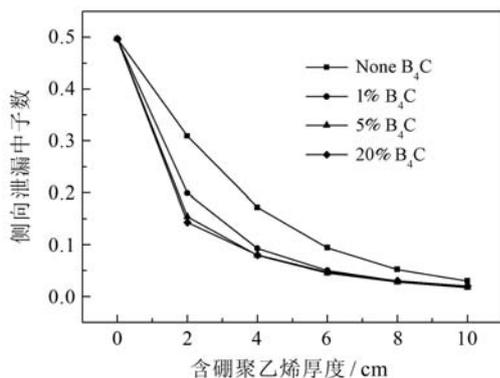


图 7 含硼聚乙烯对非有效中子的吸收效果

5 实验研究

5.1 实验方法

在选定慢化(反射)层材料，确定 γ 屏蔽层和中子吸收层参数的基础上，按照图 2 的设计思路将 TNA 探

雷慢化装置加工成形。由于条件的限制，所采用的慢化层 HDPE 密度仅为 0.95 g/cm³，反射层由粉状石墨填充而成，密度为 1.45 g/cm³。为了便于开展参数优化验证实验，慢化层和反射层分别被加工成不同厚度的片状，从而实现厚度的可调。慢热中子的测量采用 ³He 正比计数管，其测量系统组成如图 8(上)所示，图 8(下)是典型的慢热中子脉冲幅度谱，其峰位反映了 ³He(n, p)³T 反应的 Q 值，峰面积代表热中子计数，低能区的尾巴是边界效应所致，峰的宽度是气体的统计涨落以及电子学噪声所引起的。在实验研究中，通过测量相同时间下热中子活化峰的计数，来比较不同参数条件下装置的慢化效能。

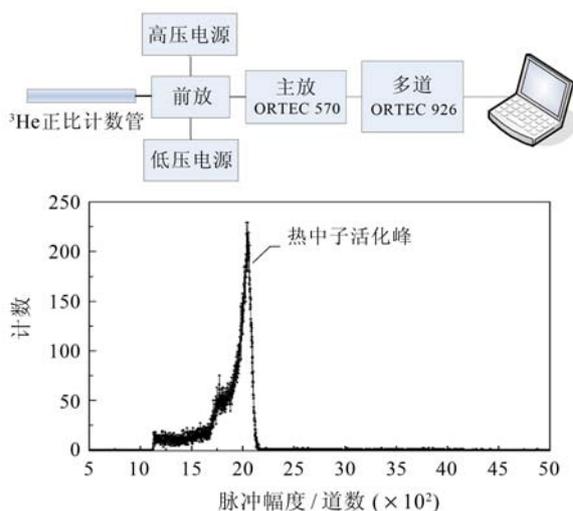


图 8 (在线彩图) 实验测量系统(上)及慢热中子脉冲幅度谱(下)

5.2 慢化(反射)层尺寸优化

为了真实模拟探雷场景，参数优化实验分别测量了在有土壤背景(³He 置于土壤表面)和无土壤背景时(架空)，不同慢化层厚度 d_1 和反射层厚度 d_2 状态下，300 s 内地雷位置处的慢热中子计数，中子源强为 1.89×10^4 n/s，测量结果见表 1 和表 2。

表 1 不同慢化层厚度下的慢热中子计数

d_1/cm	架空	有土壤背景
3.9	30 028	56 134
5.3	41 909	67 395
6.8	43 627	65 700
8.2	37 847	56 601
9.8	30 378	44 411
11.2	23 506	33 923

表2 不同反射层厚度下的慢热中子计数

d_2/cm	架空	有土壤背景
0	39 247	47 512
5	46 788	65 962
15	46 937	67 296
20	47 149	67 395
25	46 601	67 279

从表1列出的测量结果中可以看出,随着 d_1 的增加,慢热中子计数呈现先增大后减小的过程,符合理论计算的预期。在无土壤背景时,6.8 cm慢化层的效果最好,接近理论计算结果,而在有土壤背景时,最优的慢化层厚度下降到5.3 cm,并且慢热中子计数增大了54.5%。这说明土壤对置于其上的地雷中的慢热中子注量有较大的提升作用。关于土壤成分及含水量及地雷埋深对TNA探雷的影响是一个复杂的过程,将在下一步研究中做深入的讨论。表2中的测量结果显示,反射层厚度在15~25 cm之间时慢热中子计数基本处于平台区范围,它们之间的反射效果并无明显区别,因此从提高费效比角度出发,反射层厚度取15 cm比较合适。

5.3 慢化和屏蔽效果测试

在有土壤背景下,固定 ^{252}Cf 源与 ^3He 正比计数管的距离为11.2 cm,分别测试了裸源(无慢化层无反射层)、有慢化层无反射层和有慢化层有反射层条件下的慢热中子计数(测量时间300 s),评估装置的慢化效果。测量结果见表3。从表中可以看出,与不采用任何慢化措施相比,本装置可使目标位置处慢热中子通量增大11倍以上。同时,采用慢化层加反射层的组合式结构比只采用慢化层的效果好(41.9%)。

表3 不同条件下慢化效果测试

慢化层	反射层	慢热中子计数	计数率
0 cm HDPE	0 cm 石墨	5 683	18.94
5.3 cm HDPE	0 cm 石墨	47 512	158.37
5.3 cm HDPE	15 cm 石墨	67 395	224.65

为了评估侧向中子吸收层的效果及慢化装置的辐照安全性能,在 ^{252}Cf 源强度为 1.57×10^7 n/s的条件下,测得距装置6 m范围内间隔为1 m位置处的中子剂量率,结果如表4所示。从表中可以看出,随着距离的增加,中子剂量率急剧降低,6 m处的剂量率

已降为1 m处的3.6%。参照ICRP20 mSv/yr的剂量限值^[14],4 m处的工作时限可达10 000 h,完全满足辐射安全的需求。

表4 不同距离处的中子剂量率

测量点/m	中子剂量率/($\mu\text{Sv/h}$)	误差/($\mu\text{Sv/h}$)
1	38.8	0.37
2	9.1	0.23
3	3.6	0.05
4	1.9	0.04
5	1.5	0.04
6	1.4	0.04

6 结论

为了提高TNA探雷的中子源利用率,缩短地雷探测时间,本论文在小体积的 ^{252}Cf 同位素中子源的基础上,采用功能分解的设计思路,设计获得了一套 ^{252}Cf 源中子慢化装置,主要包括中子慢化层、中子反射层、侧向中子吸收层及本底 γ 屏蔽层4个部分。在此基础上,通过数值模拟的方法优选了慢化层和反射层材料,并开展实验对其厚度进行了优化。结果表明,最优的慢化装置结构应采用厚约6 cm的HDPE作为慢化层,外加15 cm厚的石墨作为反射层,并且HDPE和石墨的密度应越高越好。在最优的结构参数下,对装置的慢化性能测试结果显示,与不采用任何慢化措施相比,本装置可使地雷位置处的慢热中子通量提高11倍以上。并且在 10^7 n/s的中子源强下,能有效地保障操作人员所受的辐照安全剂量。

参考文献(References):

- [1] ZHOU Lijun, LIANG Lianzhong, SHI Ran. Geologic Equipment, 2003, 4(3): 3. (in Chinese)
(周立军, 梁连仲, 史冉. 地质装备, 2003, 4(3): 3.)
- [2] CAO Lin, CHU Chengsheng, TENG Junrui, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(10): 1274. (in Chinese)
(曹琳, 储诚胜, 滕君锐, 等. 原子能科学技术, 2012, 46(10): 1274.)
- [3] DING Ge, CHU Chengsheng, HAO fanhua, et al. Nuclear Techniques, 2013, 36(3): 010601. (in Chinese)
(丁阁, 储诚胜, 郝樊华, 等. 核技术, 2013, 36(3): 010601.)
- [4] COLEMAN W A, GINAVEN R O, REYNOLDS G M, et al. Nuclear Methods of Mine Detection[R]. Science Applications Inc, May 1974.

- [5] CLIFFORD E T H, MCFEE J E, ING H, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2007, **579**: 4185.
- [6] CINAUSERO M, LUNARDON M, NEBBIA G, *et al.* Applied Radiation and Isotopes, 2004, **61**: 59.
- [7] CHEN Hande. Chinese Engineering Science, 2008, **10**(1): 77. (in Chinese)
(陈涵德. 中国工程科学, 2008, **10**(1): 77.)
- [8] HASLIP D S. Hard X-ray and γ -ray Detector Physics III, 2001, **4507**: 232–242.
- [9] TERUHISA T. Proc of 8th US-Japan workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion, MAY 10-12, 2006, Kansai University, Osaka, Japan.
- [10] HASHEM M H, ALIREZA V N, HAMED P, *et al.* Applied Radiation and Isotopes, 2008, **66**: 606.
- [11] ZUIN L, INNOCENTI F, FABRIS D, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2000, **449**: 416.
- [12] HSIAO H H. Nucl Instr and Meth A, 1999, **422**: 914.
- [13] CLUZEAU S, HUET J, HURIET J R, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 1993, **79**: 851.
- [14] ICRP Publication 60. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection[R]. Ann ICRP, 1991, **21**: 1–3.

Design and Optimization of Neutron Moderation Device for Thermal Neutron Analysis Landmine Detection

ZENG Jun^{1, 2}, CHU Chengsheng², HAO Fanhua², DING Ge², XIANG Qingpei², LUO Xiaobing¹

(1. Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Institute of Nuclear Physics and Chemistry of CAEP, Mianyang 621900, Chengdu, China)

Abstract: Compared with the traditional landmine detection methods, Thermal Neutron Analysis (TNA) landmine detection has the advantages of high accuracy, low false alarm rate and strong adaptability to the environmental change. But the long detection time restrict the wide application of this technology. In order to shorten the detection time, one possible design of neutron moderation device based on ^{252}Cf neutron source is proposed to enhance the moderated neutron flux in mine position. The device consists of four parts, the neutron moderator, the neutron reflector, the γ background shield and the useless neutron absorbing layer. Then, the performance of four widely used materials in neutronics was compared with MCNP5 code, and HDPE was chosen as the neutron moderator material, graphite as the neutron reflector material. The thickness of the useless neutron absorbing layer was optimized at the same time. Finally, an experimental platform of ^{252}Cf neutron moderation device was assembled on the basis of simulation results, and a series of experiments were carried out to optimize the geometric dimensions and evaluate the dose equivalent with two different strengths neutron source, 10^4 and 10^7 n/s. The results indicate that this device can effectively enhance the thermal neutron flux at mine position by more than 11 times and ensure the radiation safety.

Key words: TNA landmine detection; ^{252}Cf neutron source; neutron moderation

Received date: 27 Dec. 2012; Revised date: 15 Mar. 2013

Foundation item: Exploring Program of PLA General Armament Department

Corresponding author: CHU Chengsheng, E-mail: chuchsh@tom.com

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