

利用 MOCA 程序模拟 PGNAA 技术探测地雷的方法

张天宝¹, 何德东², 景士伟², 王 强³

(1. 国家核安保技术中心, 北京 100010; 2. 东北师范大学 物理学院, 吉林 长春 130024;
3. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要:利用 MOCA 程序设计地雷探测装置, 并模拟瞬发 γ 中子活化分析(prompt gamma neutron activation analysis, PGNAA)技术探测地雷过程。采用东北师范大学 NG-9 型中子发生器为中子源, 研究其内部绝缘材料(聚酰亚胺等)对中子能量分布的影响。在此基础上设计并优化装置, 确定钨、碳化钨、钨+含硼聚乙烯+铅组合, 分别作为慢化体、反射体与屏蔽体。相比单能中子源分布情况, 慢化体、反射体、屏蔽体厚度降低。使用硅酸钇镨(lutetium yttrium oxyortho silicate, LYSO)探测器探测埋藏于含水量 5% 的土壤中、不同深度下地雷产生的伽玛射线。对氢、碳、氮、氧元素进行分析, 定性确定了反坦克、步兵地雷的有效探测深度, 结果表明, 设计的装置具有可行性, 可利用该装置进行实际 PGNAA 测试研究。

关键词: MOCA 模拟; PGNAA; 地雷探测; 屏蔽

中图分类号: TL816

文献标志码: A

文章编号: 1000-7512(2021)02-0156-07

doi: 10.7538/tws.2021.34.02.0156

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Simulation of PGNAA Landmine Detection Method by MOCA Program

ZHANG Tianbao¹, HE Dedong², JING Shiwei², WANG Qiang³

(1. State Nuclear Security Technology Center, Beijing 100010, China;
2. School of Physics, Northeast Normal University, Changchun 130024, China;
3. China Institute of Atomic Energy Science, Beijing 102413, China)

Abstract: MOCA program is used to design landmine detection device, and the process of landmine detection by prompt gamma neutron activation analysis (PGNAA) is simulated. The Northeast Normal University NG-9 neutron generator was used as the neutron source to study the influence of its internal insulating material (polyimide, etc.) on the neutron energy distribution. On this basis, the device was designed and optimized to determine the combination of tungsten, tungsten carbide and tungsten + boron-containing polyethylene + lead as the moderator, reflector and shield respectively. Compared with the distribution of single-energy neutron sources, the thickness of the moderator, reflector and shield is reduced. The lutetium yttrium oxyortho silicate (LYSO) detector is used to detect gamma rays generated by landmines buried in soil

收稿日期: 2020-10-22; 修回日期: 2020-12-27

作者简介: 张天宝(1975—), 男, 山西忻州人, 高级工程师, 主要从事机电一体化研究

通信作者: 景士伟, E-mail: jingsw504@nenu.edu.cn

with 5% water content at different depths. The hydrogen, carbon, nitrogen, and oxygen elements are analyzed to determine the effective depth of detection for anti-tank and infantry landmines, which shows that the designed device is feasible and can be used for actual PGNAA test research.

Key words: MOCA simulation; PGNAA; landmine detection; shielding

目前,全世界每年仍有 1.5~2 万人因接触地雷致残或死亡,地雷严重影响人们生命安全,寻找一种有效探雷方法意义重大^[1-2]。常规探雷技术包括电磁和雷达等,针对地雷外壳和形状进行探测^[3-4]。中子探雷技术可以实现地雷中炸药元素和含量的探测,主要分为中子反散射法、热中子、快中子和脉冲快热中子分析法,具有探测速度快、受干扰小、性能优越等优点^[5-6]。基于密封中子管的中子发生器体积小,能谱单色性好,无伽玛本底,可产生脉冲中子,便于存储管理和运输,可作为中子探雷的中子源^[7]。瞬发 γ 中子活化分析(prompt gamma neutron activation analysis, PGNAA)能进行多元素检测且具有较大检测范围,其抗干扰性强、灵敏度高、分析速度快、无破坏性,在探测地雷方面有较大优势^[8-10]。

蒙特卡罗方法对多维问题有适用性,受问题条件限制影响小,程序结构简单,对于模拟粒子输运等问题有较大的优势^[11-13]。目前使用较多的程序是 MCNP4C 和 MCNP5,相对 MORSE 和 GEANT4 等程序其携带相关数据库并可以给出降低误差的方法,但其收敛速度慢,运算时间长。与国际通用的蒙特卡罗软件相比,MOCA 程序^[14]是由法国地质矿业研究局开发的多功能可视化蒙特卡罗中子、光子耦合输运程序,可较准确模拟光子与探测器的响应。

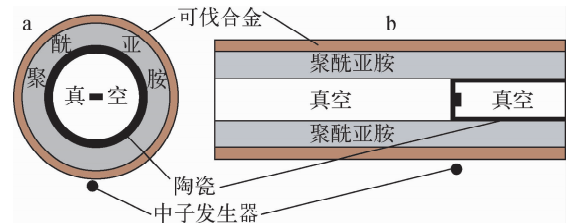
MOCA 操作简单,体积小,专业性强,尤其在模拟 PGNAA 方面^[15],其运算时间短,构型简单。

为了研究 D-T 中子发生器实际探雷过程,利用 MOCA 模拟 PGNAA 技术探测地雷。选用东北师范大学 NG-9 型中子发生器,分析其内部绝缘材料(聚酰亚胺、可伐合金、陶瓷)对产生中子能量的影响,进而确定该能量分布下地雷探测的最佳构型。然后对埋藏在含水量 5% 的土壤(密度为 1.575 g/cm^3 ,主要成分为 SiO_2)

中的反坦克地雷 1[#](模拟尺寸为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$,质量为 3.449 kg ,RDX:TNT=1:1)、反步兵地雷 2[#](模拟尺寸为 $2.5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$,质量为 517.35 g ,RDX:TNT=1:1)进行探测,最后对氢、碳、氧、氮元素进行分析确定探雷有效深度。

1 中子发生器绝缘材料慢化作用

东北师范大学自主研发的 NG-9 型中子发生器中子发射头部分由自成一陶瓷中子管、倍压电路、聚酰亚胺绝缘材料^[16-17]等组成,将 ^3He 探测器放在发生器下 0.1 cm 处探究其内绝缘材料对能量分布的影响,结构如图 1 所示。将发射头完整结构作为本底,模拟依次去掉可伐合金、聚酰亚胺、陶瓷材料,得到不同模型下中子计数与本底差值随能量变化的图像,结果示于图 2。无陶瓷、可伐合金与本底差值几乎为零,无聚酰亚胺在 $0 \sim 13 \text{ MeV}$ 计数低于本底, $13 \sim 14 \text{ MeV}$ 计数高于本底,即聚酰亚胺能慢化快中子,使慢、热中子数量增多。计算不同模型下快、热、慢中子所占比例,结果列于表 1,完整结构、无聚酰亚胺、无可伐合金、无陶瓷快中子比例分别为 84.33% 、 97.66% 、 84.86% 、 86.00% 。由此可见, 1.7 cm 厚聚酰亚胺对中子有较强慢化作用,使快中子比例减少了 13% 。NG-9 型中子发生器靶端产生的 14 MeV 中子受内部材料影响,能谱分布为 2.18% 热中子, 13.50% 慢



a—YZ 方向;b—XZ 方向

图 1 中子发生器投影图

Fig. 1 Neutron generator projection map

中子,84.33%快中子。

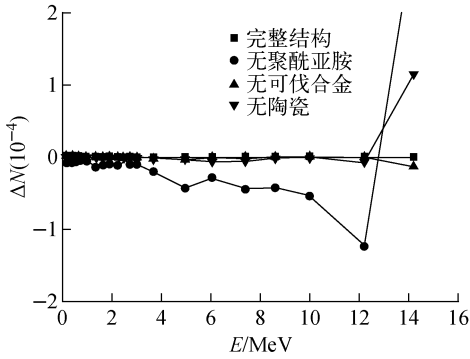


图2 不同模型下计数与本底的差值 ΔN 随能量变化
Fig.2 The difference between counts and background ΔN under different models varies with energy

表1 中子发生器内部材料慢化作用

Table 1 Moderation effect of internal materials of neutron generator

中子能量区间/MeV	快、热中子比例/%			
	完整结构	无聚酰亚胺	无可伐合金	无陶瓷
热中子(0~1)	2.18	0.41	2.02	1.72
慢中子(1~13)	13.50	1.93	13.12	12.28
快中子(13~14)	84.33	97.66	84.86	86.00

如图3所示,上面是碳化钨反射体,下面是钨慢化体,中间为半径4.3 cm的中子发生器。钨和碳化钨厚度均从4.4 cm开始,分别依次增加0.4 cm,1 cm,用 ^3He 探测器探测其不同厚度下热中子、总中子计数随深度的变化,结果示于图4、图5。由图4可以看出,热中子数随钨厚度

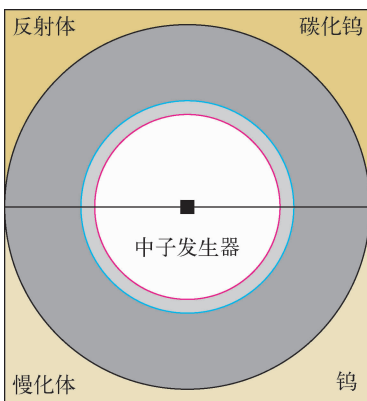


图3 慢化体、反射体沿YZ方向投影图
Fig.3 Projection of moderator and reflector along YZ direction

2 优化反射体及慢化体厚度

PGNAA技术探测地雷,需要探测中子与地雷作用发出的俘获和非弹伽玛射线,C和O元素对非弹反应有较大散射截面,而H、N、Si、Al、Fe、Ca元素热中子俘获截面很大,因此快、热中子数量及比例直接影响伽玛谱强弱和精度。为提高热中子数量、优化所需快、热中子比例,在中子发生器与土壤间加上快中子的慢化体钨进行第一步慢化,再利用土壤自身慢化作用在地雷处得到数量较高的热中子,并在中子发生器上侧加上散射截面较大的反射体碳化钨,提高中子源利用率及增高总中子通量^[18-20]。然后改变材料厚度,确定快、热中子比例合适的最佳厚度。

增加而减少,在4.4 cm(距中子发生器最上端0.1 cm)时数量最多,相对没有慢化体时增加13%,选取4.4 cm钨为慢化体。由图5可见,总中子数随深度增加而降低,与碳化钨厚度关系不大,选取4.4 cm碳化钨为反射体。

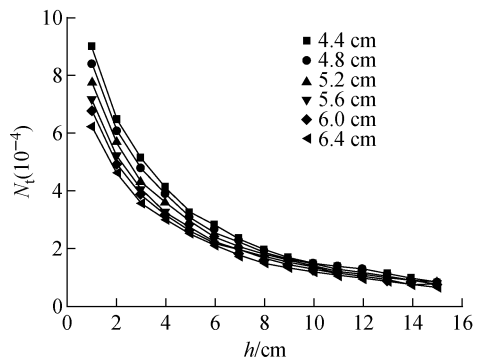


图4 不同厚度钨热中子计数随深度变化关系

Fig.4 Thermal neutron counts for tungsten with different thickness versus with depth

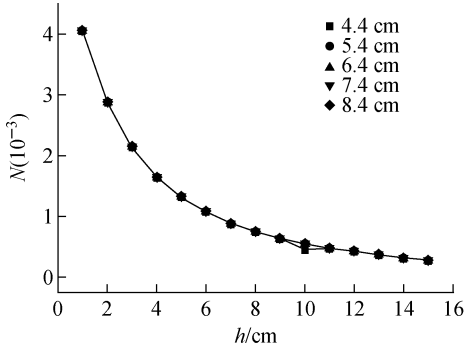


图5 不同厚度碳化钨总中子计数随深度变化关系

Fig. 5 Total neutron counts for tungsten carbide with different thickness versus depth

3 优化屏蔽体厚度

为防止中子发生器产生的高能中子对伽玛探测器造成损伤,选用钨为第一层屏蔽体对快中子进行慢化,含硼聚乙烯为第二层屏蔽体对慢化后中子进行吸收和再次慢化。慢化后的热中子会与硼、氢元素发生俘获反应产生伽玛射线,需屏蔽这部分伽玛射线,防止干扰地雷探测。铅对不同能量伽玛射线屏蔽效果都很好,选用铅为第三层屏蔽体。

屏蔽体设计示意图示于图 6。依次改变钨、含硼聚乙烯厚度,在其左侧用³He探测器测量各类中子比例,确定钨、含硼聚乙烯合适厚度,再改变铅厚度,在其左侧用伽玛探测器测量伽玛射线的数量,确定铅合适厚度。中子计数随钨厚度变化关系示于图 7,三种类型的中子数量都随钨厚度增加而减少,且减少速率也随厚度增加而降低,快中子在 8 cm 时总数已减少近 90%,慢化作用明显,将钨厚度定为 8 cm。中子计数随含硼聚乙烯厚度变化关系示于图 8,由图 8 知,热中子吸收作用在厚度低于 11 cm 时很明显,快中子和慢中子慢化效果相

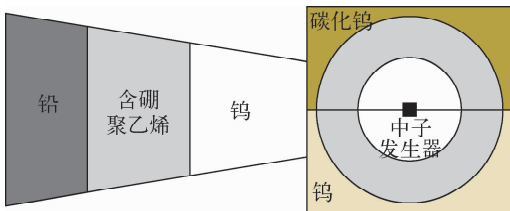


图6 屏蔽体设计示意图(沿 XZ 方向)

Fig. 6 Schematic diagram of shielding design (along XZ direction)

较之下略差,考虑厚度成本等因素将其定为 9 cm。伽玛计数随铅厚度变化关系示于图 9。由图 9 可见,在铅厚度小于 4 cm 之前,伽玛计数急剧减少,4 cm 时减少为原来的 6.64%,确定铅厚度为 4 cm。综上所述,选择 8 cm 钨、9 cm 含硼聚乙烯和 4 cm 铅为三层屏蔽体,由此确定最佳装置模型,模型示意图示于图 10,具体参数列于表 2。

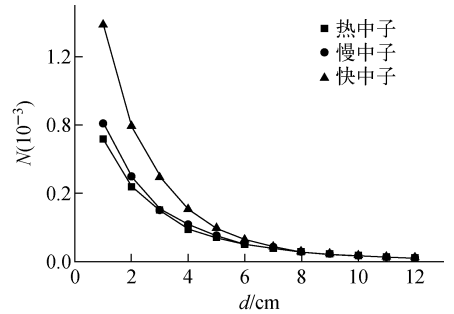


图7 中子计数随钨厚度变化关系

Fig. 7 Variation of neutron counts with tungsten thickness

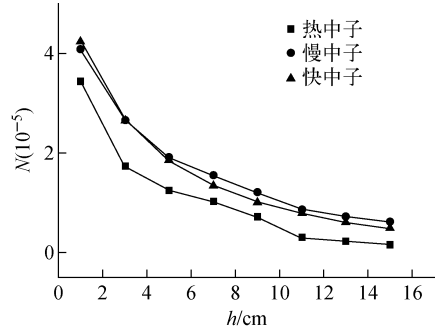


图8 中子计数随含硼聚乙烯厚度变化关系

Fig. 8 Variation of neutron counts with borated polyethylene thickness

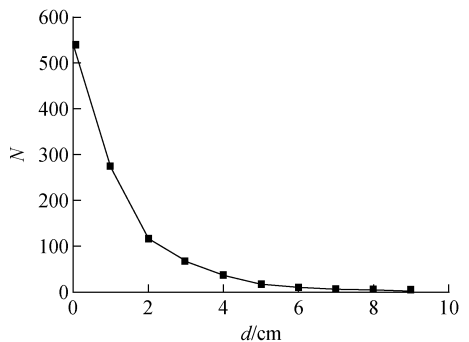


图9 伽玛计数随铅厚度变化关系

Fig. 9 variation of gamma counts with lead thickness

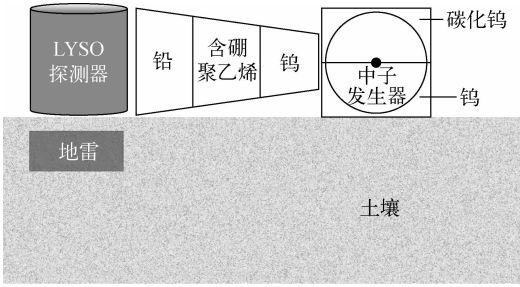


图 10 最终装置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the final device

4 探测地雷模拟与讨论

选取大小为 $\Phi 7.6 \text{ cm} \times 7.6 \text{ cm}$ 的 LYSO 探测器在距地面 0.7 cm 处分别对 1[#] (3.449 kg)、2[#] (517.35 g) 地雷进行探测, 测量其在 5% 含水量土壤中 0~25 cm 深度下伽玛能谱。以没有地雷时计数作为本底, 分析不同深度下各特征元素计数与本底差异, 定性给出探测地雷的有

效深度。由图 11 知, 1[#]、2[#] 地雷在 0~16 cm、0~12 cm 深度内, 2.22 MeV 氢元素特征峰计数高于本底, 即探测有效深度分别为 16 cm、12 cm。如图 12 所示, 1[#]、2[#] 地雷的 6.13 MeV 氧元素特征峰计数基本上低于本底, 这是因为地雷中氧含量远小于土壤中氧含量, 因此用氧来判定有无地雷比较困难。由图 13, 图 14 可知 1[#]、2[#] 地雷在 0~20 cm、0~6 cm 时, 10.8 MeV 氮、4.44 MeV 碳元素特征峰计数高于本底, 探测有效深度分别为 20 cm、6 cm。对氮、碳元素进行分析, 确定在 5% 含水量土壤中对 1[#]、2[#] 地雷探测有效深度分别为 20 cm、6 cm。反坦克地雷质量一般为 3 kg, 埋藏深度 20 cm, 反步兵地雷质量一般为 500 g, 埋藏深度 5 cm^[11-23]。因此, 本实验模型目前仅对 5% 含水量土壤中的反步兵、反坦克地雷有效。

表 2 最终装置模型参数

Table 2 Final device model parameters

模型部件	材料	参数/cm	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
地雷 1 [#]	1:1 混合的 TNT 和 RDX	10×10×20	1.724 5
地雷 2 [#]		2.5×2.5×6	
慢化体	钨(W)	5×4.4×10	19.35
反射体	碳化钨(WC)	5×4.4×10	15.63
中子发生器	D-T 中子源等	2R: 8.6 h: 89.4	/
探测器	LYSO	2R: 7.6 h: 7.6	7.1
土壤	49.95%O, 25.71%Si, 0.53%H, 7.62%Al, 4.76%Fe, 3.81%Ca	60×60×60	1.575
屏蔽体 1	钨(W)	8	19.35
屏蔽体 2	含硼聚乙烯	9	0.856
屏蔽体 3	铅(Pb)	4	11.343

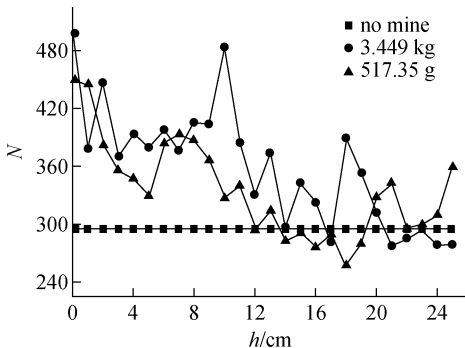


图 11 氢元素 2.22 MeV 特征峰计数随深度的变化
Fig. 11 Variation of characteristic peak counts of hydrogen at 2.22 MeV with depth

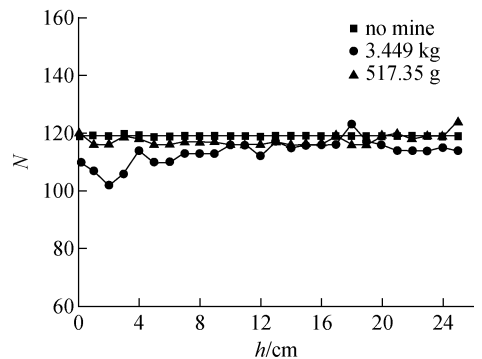


图 12 氧元素 6.13 MeV 特征峰计数随深度的变化
Fig. 12 Variation of characteristic peak counts of oxygen at 6.13 MeV with depth

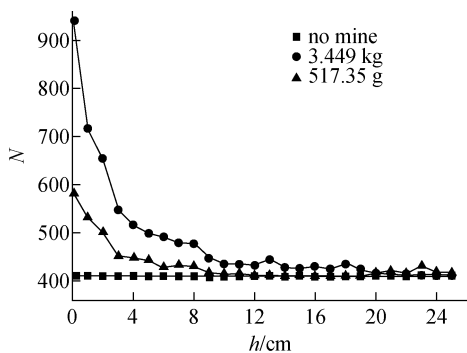


图 13 碳元素 4.44 MeV 特征峰计数随深度的变化

Fig. 13 Variation of characteristic peak counts of carbon at 4.44 MeV with depth

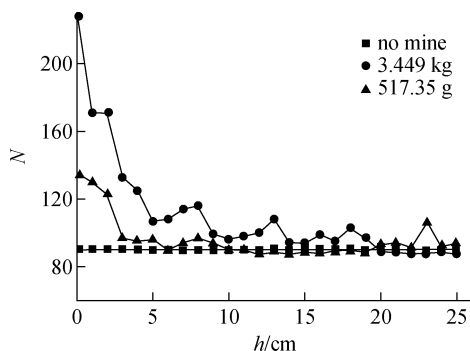


图 14 氮元素 10.8 MeV 特征峰计数随深度的变化

Fig. 14 Variation of characteristic peak counts of nitrogen at 10.8 MeV with depth

目前根据对碳、氮元素的分析仅定性给出地雷的有效探测深度参考值,地雷与其他干扰物的区分仍需进一步模拟研究与实验验证。并且在实际探雷过程中,地雷的埋藏环境复杂多样,周围土壤产生的本底会严重干扰来自爆炸物的有效信号。因此降低土壤本底干扰成为成功检测地雷关键因素,实现中子源准直可以降低土壤影响。针对常规快、热中子法难以检测的情况,可采用标记中子技术。通过 α - γ 符合时间测量获得伽马-时间谱,由时间窗挑选出与 α 粒子关联中子作用产生的伽马信号,获得被测物特征伽马能谱,可降低干扰本底,提升信噪比。

6 结论

东北师范大学 NG-9 型中子发生器内部含有较强慢化作用的聚酰亚胺绝缘材料,导致最终发射中子为 2.18% 热中子,13.50% 慢中子,

84.33% 快中子。在发生器上下加厚度 4.4 cm 碳化钨,钨用作反射体和慢化体。发生器与伽玛探测器之间加 8 cm 钨、9 cm 含硼聚乙烯、4 cm 铅为屏蔽体。相对单能情况,所需反射体、慢化体、屏蔽体厚度降低。使用该模型探测地雷,基于对氢、碳、氮、氧元素的分析,定性确定在 5% 含水量土壤中对 3.449 kg 地雷、517.35 g 地雷(TNT 和 RDX)的有效探测深度分别是 20 cm、6 cm,可为实际测量提供参考。

在实际探测地雷过程中,探雷精度及效率受多种因素影响,今后可改变地雷周围环境(含水量、类型、均匀度、干扰物)、地雷类型(成分、外壳),进一步优化构型丰富数据库,并进行算法研究建立科学完整的地雷识别算法,提高复杂背景下探雷效率和精度。下一步研究工作重点是固定地雷深度改变探测器位置,建立关于地雷定位的算法。

参考文献:

- [1] 丁卫,沈高炜,王驰,等. 用于非金属地雷探测的声-地震耦合识别方法[J]. 光学精密工程, 2014, 22(5): 1331-1338.
Ding Wei, Shen Gaowei, Wang Chi, et al. Acoustic-to-seismic coupling based discrimination for non-metallic mine detection[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(5): 1331-1338 (in Chinese).
- [2] 冯晖,鹿琪,刘财,等. 防步兵地雷地球物理探测技术国内外研究动态[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(3): 929-935.
Feng min, Lu Qi, Liu Cai, et al. Summarization of geophysical detection technologies for anti-personnel mines[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(3): 929-935 (in Chinese).
- [3] 丁阁,储诚胜,郝樊华,等. 脉冲快热中子分析探雷技术实验研究[J]. 核技术, 2013, 36(3): 030201-1-7.
Ding Ge, Chu Chengsheng, Hao Fanhua, et al. Experimental research on PFTNA landmine detection[J]. Nuclear Techniques, 2013, 36(3): 030201-1-7 (in Chinese).
- [4] 王群,何云龙,王春和,等. 基于神经网络的探地雷雷达探雷研究[J]. 电波科学学报, 2001, 16(3): 398-403.
Wang Qun, He Yunlong, Wang Chunhe, et al.

- Study of mine detection with GPR based on neural networks[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001, 16 (3): 398-403(in Chinese).
- [5] 丁阁. 脉冲快热中子分析探雷有效信号获取及解析[D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2013:4-6.
- [6] 丁文,窦玉玲,王国保,等. 爆炸物的探测技术综述[J]. 爆破器材,2011,40(5):33-37.
Ding Wen, Dou Yuling, Wang Baoguo, et al. Review on detection technology for explosives [J]. Explosive Materials, 2011, 40 (5): 33-37 (in Chinese).
- [7] 乔亚华. 中子管的研究进展及应用[J]. 核电子学与探测技术,2008,28(6):1134-1139.
Qiao Yahua. Progress in studies and applications of neutron tube[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008, 28(6): 1134-1139(in Chinese).
- [8] 黑大千. PGNAA 在线分析技术的发展与现状[J]. 科技资讯,2014,12(6):63-64.
- [9] 何伶俐,虞先国,穆克亮,等. 基于 PGNAA 技术在线分析系统的应用[J]. 物探化探计算技术, 2005,27(4):0317-0320.
He Lingli, Tuo Xianguo, Mu Keliang, et al. Development and applications of the on-line analysis system based on pgnaa technology[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 27 (4): 0317-0320(in Chinese).
- [10] 卢毅,宋朝晖. 瞬发伽玛中子活化分析技术发展现状[J]. 核电子学与探测技术,2013,33(12): 1527-1531.
Lu Yi, Song Zhaohui. Development of prompt gamma neutron activation analysis techniques[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, 33(12): 1527-1531(in Chinese).
- [11] 邵伟. 蒙特卡洛方法及在一些统计模型中的应用[D]. 济南:山东大学,2012: I - III.
- [12] 裴鹿成. 蒙特卡罗方法发展中的若干问题[J]. 计算物理,1992,9(4):563-565.
Pei Lucheng. Some problems on monte carlo method development[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 1992, 9(4): 563-565(in Chinese).
- [13] 杜龙. 基于 ${}^6\text{Li}$ 中子探测器的蒙特卡洛模拟及实验测量[D]. 上海:中国科学院研究生院,2014: 25-27.
- [14] Pinault J L. Moca training[C]. IAEA: Training organized in the framework of the ARCAL Project, 2002.
- [15] 贾文宝,陈晓文,徐爱国,等. 利用蒙卡程序 MOCA 模拟研究 BGO 探测器的 γ 响应谱[C]//中国核科学技术进展报告(第一卷),中国核学会 2009 年学术年会论文集. 北京:原子能出版社,2009: 206-265.
- [16] 黄孝华. 新型功能性聚酰亚胺的合成与性能研究[D]. 上海:上海交通大学,2011:1-18.
- [17] 张洋. 基于 DSP 的中子发生器控制台研究与设计[D]. 长春:东北师范大学,2015:8-10.
- [18] 蒋舟. 基于 PGNAA 技术的土壤中浅层掩埋爆炸物检测研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2017:28-40.
- [19] 阮景辉,赵裕民,王正民,等. 铅的快中子扩散系数和去弹性散射截面的测定[J]. 原子能科学技术,1965,2:108-108.
- [20] Uhlár, KaduloVá M, Alexa P, et al. A new reflector structure for facility thermalizing D-T neutrons[J]. Journal of Radio Analytical and Nuclear Chemistry, 2014, 300(2): 809-818.
- [21] 吴文雯. 地雷探测的声共振识别方法研究[D]. 上海:上海大学,2015:7-8.
- [22] 丁卫,沈高伟,周瑜秋,等. 地雷埋藏深度对声波激发的地表振动影响的实验研究[J]. 声学技术, 2013,32(4):263-267.
Ding Wei, Shen Gaowei, Zhou Yuqiu, et al. Experimental study of the influence of the mine burial depth on the acoustically induced ground vibration[J]. Technical Acoustics, 2013, 32 (4): 263-267(in Chinese).
- [23] 王驰,于瀛洁,李醒飞,等. 土壤地雷共振系统模型解析[J]. 物理学报,2010,59(9):6319-6325.
Wang Chi, Yu Yingjie, Li Xingfei, et al. Analysis of earth-mine resonance model[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(9): 6319-6325(in Chinese).