

基于伴随 α 中子管的铀裂变瞬发中子 符合测井方法模拟研究

张焱^{1,2,3}, 张浩然^{1,2,3}, 刘翹^{1,2,3}, 胡文兴^{1,2,3}, 刘世梁^{1,2,3}, 刘琦^{1,2,3}

- 东华理工大学 铀资源探采与核遥感全国重点实验室, 江西 南昌 330013;
- 东华理工大学 核物理与核技术江西省重点实验室, 江西 南昌 330013;
- 东华理工大学 核技术应用教育部工程研究中心, 江西 南昌 330013)

摘要: 随着全球核能需求的增长,对铀资源分布质量的科学评估以及对铀储量的精确测量工作变得尤为重要。铀裂变瞬发中子测井技术作为重要的铀矿测井勘查手段,具有定量结果不受放射性平衡影响的优势,但其测量准确度受到中子源脉冲宽度与产额的影响。基于伴随 α 中子管的铀矿测井仪,可通过搭载在中子管上的伴随 α 探测器,对出射中子的伴随 α 粒子进行时间和空间上的统计,进而剔除源中子干扰,提升测井准确度。在模拟过程中,为了获取测井过程中的中子出射信息,以及伴随 α 探测器和超热中子探测器的响应时序信号,提高时序模拟效率,提出了一种结合蒙特卡洛模拟软件与MATLAB软件的响应时序模拟方法。通过合理设置预延迟时间和符合门宽,建立了地层铀质量分数为0~1.00%时,符合计数率与地层铀质量分数的关系曲线。对验证样的计算结果表明,地层铀质量分数的计算值与实际值之间的偏差值优于0.1%;当地层铀质量分数高于0.5%,相对偏差优于10%,该方法整体满足勘查需求,具有较强的铀矿测井应用价值。

关键词: 伴随 α 中子管;铀矿测井;时间序列;铀裂变瞬发中子

中图分类号: P631.8⁺17; TD868; TL8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)02-0001-08

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2024.09.05

在全球能源结构中,核能占比不断上升,各国对铀资源的需求也日益增加^[1],精确测量铀资源的储量和分布是核能产业可持续发展的重要前提和根本保障^[2]。随着铀矿勘查工作的深入,地表浅埋藏、易于勘探的矿产资源逐渐减少,勘查工作的重点已转向深部隐伏矿床中的铀资源^[3-4]。在铀资源勘查中,铀矿测井是进行铀矿储量测量的重要方法之一^[5],该工作旨在获取地层铀质量分数、物理特性等信息,用于评估铀矿层品位、边界和厚度等特征^[6],从而确定铀矿床的工业开采价值和经济价值,因此须保证测井结果的可靠性和准确性^[7]。

目前,国内常用自然伽马能谱测井技术作为铀矿测井的主要方法^[8],该方法通过测量铀的衰

变子体的特征 γ 射线强度^[9],再结合铀镭、镭氡平衡系数解释特征伽马计数与铀矿品位之间的关系,修正测量结果,以间接获取矿层中的铀品位^[10]。在放射性不平衡的砂岩型铀矿地区^[5]以及放射性平衡遭到破坏的地浸区^[11],使用自然伽马测井已不能准确解释矿层铀资源储量情况。

铀裂变瞬发中子测井技术是一种应用于测井领域的直接测铀方法^[12-14],利用工作在脉冲模式下的D-T中子源发射14 MeV的快中子,经井眼中的水及地层将快中子慢化到热中子后,主动激发地层中的铀裂变,再通过中子探测器记录的裂变中子情况对地层中²³⁵U的质量分数进行分层解释,具有不受放射性不平衡影响的优势。基于

收稿日期: 2024-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(42374226);江西省学科学术和技术带头人培养项目(20232BCJ23006);江西省自然科学基金项目(20232BAB201043, 20243BCE51132);铀资源探采与核遥感全国重点实验室(东华理工大学)(2024QZ-TD-09);东华理工大学青年人才托举(DHTJBJ202402)。

第一作者简介: 张焱(1989—),男,湖北襄阳人,博士,副教授,主要从事核技术及应用方向研究。

超热中子与热中子比值法的铀裂变瞬发中子测井仪^[15],其测量准确度受 D-T 中子源脉冲宽度和中子产额的影响,进一步提高测量准确度需要更窄脉冲、更高产额的中子源,实现难度较大。基于伴随 α 中子管与快中子探测器的铀矿测井装置^[16],通过伴随 α 探测器检测在 $T(d, n)^4\text{He}$ 反应产生中子过程中伴随产生的 α 粒子的时间与位置信息,对测量符合门进行选通;再搭配快中子探测器设置能量阈值,对符合门内的中子进行符合测量,以实现瞬发裂变中子的高效筛选,能够有效提高测量准确度。

本研究基于伴随 α 中子管铀裂变瞬发中子测井装置模型,提出了一种使用超热中子探测器对测井过程中的中子出射信息,以及伴随 α 探测器和超热中子探测器响应时序信号进行模拟仿真的方法。通过蒙特卡洛(MC)软件建立装置测井模型,通过 MATLAB 对测井事件过程中伴随 α 中子管发射的中子出射信息进行抽样,通过耦合叠加的方式完成对中子出射信息、伴随 α 探测器和超热中子探测器的响应时序信号获取,进而完成测井过程的全模拟及不同铀质量分数地层中超热中子计数工作曲线的获取。

1 伴随 α 中子管铀矿测井原理

1.1 伴随 α 中子管基本结构

伴随 α 中子管与密封管型 D-T 发生器的基础结构相似,均由氦储存器、离子源、加速与聚集电极、氦靶,以及陶瓷绝缘外壳等组成,用于产生 $T(d, n)^4\text{He}$ 反应,发射中子;但伴随 α 中子管在 D-T 中子管的基础上增加了伴随 α 探测器,可通过探测与中子伴随产生的 α 粒子信息反演出射中子信息;该装置具有发射中子的功能,并能给出中子出射时刻及出射方向的指示^[17]。在碳氧比测井、中子井下成像、核材料检测等领域,该装置已有广泛的应用^[18-20]。

非测井型伴随 α 中子管一般采用平面型伴随 α 探测器,将探测器置于中子辐照位置反方向的侧面,测井装置受井口大小的限制。因此,研究中采用带圆筒型 α 探测器的测井用中子管^[17],其通过氦靶后方的环绕型 $\text{ZnS}(\text{Ag})\alpha$ 探测器,探测靶正向方向出射中子的伴随 α 粒子,探测效率为 100%,测井用伴随 α 中子管结构见图 1。

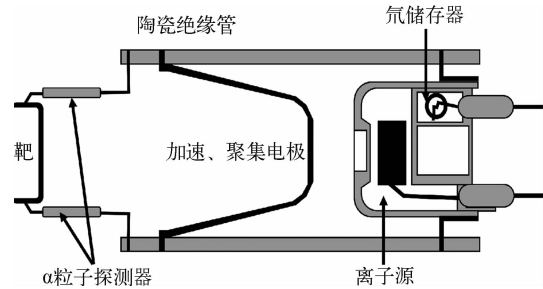


图 1 测井用伴随 α 中子管结构^[17]

Fig. 1 Accompanying alpha neutron tube structure for logging^[17]

1.2 基于伴随 α 中子管的铀矿测井原理

在基于超热中子与热中子比值(简称 $N_{E/T}$)的铀裂变瞬发中子测井技术中,采用离子源高压脉冲上升沿作为超热中子计数测量时间窗开启的同步信号,实现对裂变中子探测信号的提取(图 2)。当源中子衰减到不再对超热中子探测器计数有所贡献时,开启测量时间窗;此时,已有大量铀裂变中子信息损失。

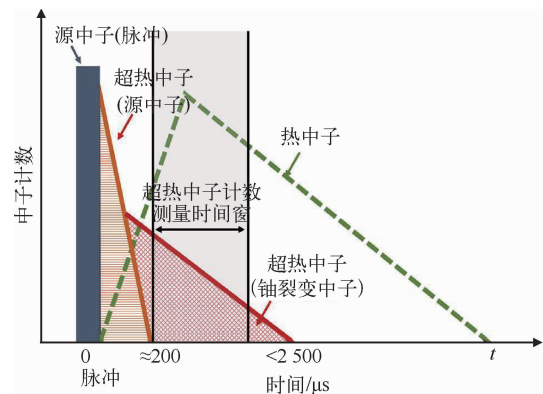
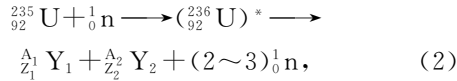
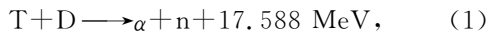


图 2 基于超热中子与热中子比值的铀裂变瞬发中子测井原理^[21]

Fig. 2 Principle of uranium fission prompt neutron logging based on the ratio of hyperthermic neutrons to thermal neutrons

理想状态下,伴随 α 中子管内发生 $T(d, n)^4\text{He}$ 反应,中子管同时向外发射一个 14 MeV 的快中子和一个与中子方向相反的 α 粒子,见式(1)^[22]。当伴随 α 探测器探测到 α 粒子时,选通开启测量时间窗;快中子经过与不锈钢外壳、水层及地层发生非弹性散射、弹性散射等作用后逐渐慢化至热

中子区,并诱发地层中的 ^{235}U 裂变,发射裂变中子,见式(2)^[23]。



式中, ${}_{Z_1}^{A_1}\text{Y}_1$ 、 ${}_{Z_2}^{A_2}\text{Y}_2$ 为裂变碎片,部分裂变中子在地层中经过慢化后被其中的核素俘获,而部分裂变中子会被 ${}^3\text{He}$ 管等中子探测器探测到并形成脉冲信号,见图 3。

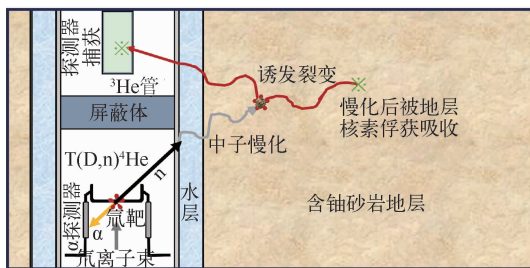


图 3 基于伴随 α 中子管的铀裂变瞬发中子符合测井方法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of uranium fission prompt neutron coincidence logging method based on associated particle sealed-tube neutron generator

伴随 α 探测器的测量范围有限,仅能对从侧方向进入地层中子的伴随 α 粒子进行记录。从氦靶正方向和负方向出射的中子,一部分会被屏蔽体吸收;另一部分在地层中经诱发裂变产生裂变中子,由于受到其与探测器距离的影响,裂变中子相较于伴随 α 探测器测量范围内的中子对探测器计数的贡献较小,经伴随 α 信号选通测量时间窗后其影响可忽略。

在基于伴随 α 中子管的铀矿测井中,认为铀裂变中子衰减在统计上符合 Rossi- α 原理,但测量时间窗(符合门)的触发不再依赖于中子发生器的同步信号。当 α 探测器探测到信号后,直接选通一次测量时间窗(符合门),经过一段时间的预延迟^[24]后, α 粒子的符合中子已经消失,不会被探测到,后续信号来源于其他源中子与地层中铀的裂变中子;再根据源中子与裂变中子的衰减时间(τ)的区别,判断超热中子计数符合门的开启时间,并对该时间节点后的有效符合门信息进行统计,完成一个周期内的计数统计(图 4)。

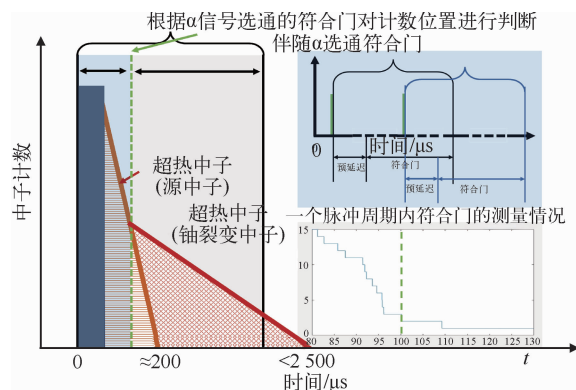


图 4 基于伴随 α 中子管的铀裂变瞬发中子符合测井方法原理图

Fig. 4 Principle diagram of uranium fission prompt neutron coincidence logging method based on associated particle sealed-tube neutron generator

伴随 α 中子管与 ${}^3\text{He}$ 管间的距离、屏蔽体的材料与厚度、中子管的工作模式与产额均会对测量的准确度与精度造成影响,各部分之间非线性响应,不易通过理论推导方式进行优化,一般通过模拟仿真方式对装置进行优化设计。

传统模拟方式仅对最终的测量结果进行统计,各部分时序信号间的关系符合统计规律;但在基于伴随 α 中子管的铀矿测井装置中,符合门选通以及信号间耦合方式采用各探测器信号间的时序规律确认。因此,建立基于伴随 α 中子管的铀裂变瞬发中子符合测井中探测器间信号的时序重建方法至关重要。

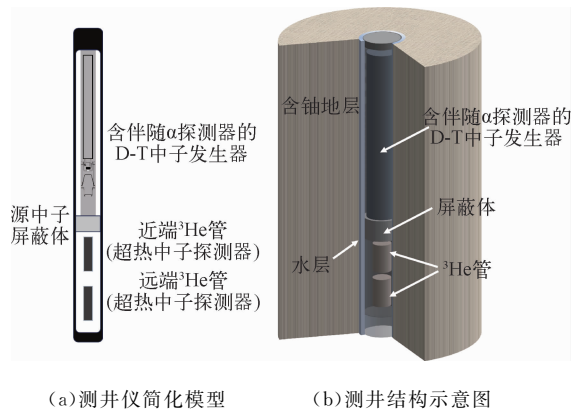
2 仿真模型建立与时序重建方法

2.1 仿真模型建立

根据图 1 设计的基于伴随 α 中子管的铀矿测井仪简化模型,见图 5(a)。其主体结构从上到下包括含伴随 α 探测器的 D-T 中子发生器、源中子屏蔽体、远近端 ${}^3\text{He}$ 管以及外部不锈钢外壳 5 部分。 ${}^3\text{He}$ 管从外向内分别包裹 1 mm 厚的镉和 5 mm 厚的聚乙烯,用于屏蔽吸收热中子及用于慢化进入探测器的超热中子,以形成超热中子探测器结构,提高图 4 中超热中子探测器信号时序分析过程中源中子和裂变中子的区分效率。

利用 MC 软件建立的测井结构示意图见图 5(b)。测井仪是直径 9.8 cm、长 200.0 cm 的圆柱体;底部是 2 个直径 5.0 cm、长 26.2 cm 的超热中子探测器(含 ${}^3\text{He}$ 管、聚乙烯和镉),用于对地层

中的超热中子信息进行记录,两探测器间距为 15 cm(^3He 管电子学部分长度)。砂岩地层是直径 300.0 cm、长 300.0 cm 的圆柱体,大于测量饱和厚度;井口直径为 15.0 cm,测井仪与地层空隙间用水进行填充。地层中铀质量分数设置在 0~1.00%。模拟并记录探测器中 ^3He 俘获的中子信息。



(a)测井仪简化模型 (b)测井结构示意图

图5 基于伴随 α 中子管的铀矿测井仪简化模型与蒙特卡洛仿真结构示意图

Fig. 5 Simplified model and Monte Carlo simulation schematic diagram of uranium logging tool based on accompanying alpha neutron tube

参考美国太平洋西北国家实验室(Pacific Northwest National Laboratory)给定的材料组分信息^[25]设置模型中的材料组分,采用 ENDF/B-VIII.0 评价核数据库中相关核素的反应完成模拟。以铀质量分数为 0.05% 的地层为例,核素设置信息见表 1。

表1 含铀地层核素设置信息
Table 1 Information on nuclide settings in uranium bearing formations

元素	核素编号	质量比/%	元素	核素编号	质量比/%
氧	8016	47.74	硫	16000	0.40
硅	14000	24.94	钠	11023	0.30
钙	20000	14.67	钛	22000	0.15
铁	26000	3.52	锰	25055	0.08
铝	13027	3.05	磷	15031	0.04
碳	6012	1.59	铀	92238	4.965×10^{-2}
钾	19000	1.52	铀	90232	4.570×10^{-3}
镁	12000	1.21	钍	92235	3.500×10^{-4}
氢	1001	0.79			

2.2 时序信息重建方法

采用 MC 软件与 MATLAB 进行测井中重要时序信息的模拟,流程见图 6(a)。通过设置源中子的出射方向,获取不同方向上中子出射到 ^3He 管捕获之间的时间(捕获时间, t_c),建立中子出射方向的 ^3He 管响应数据集^[26]。

数据集整合后导入 MATLAB 中,通过编程实现对发生器不同模式(直流/脉冲)下中子的出射时间(t_0)的抽样,将 t_c 与 t_0 进行合并后按时间顺序进行排序;再根据伴随 α 探测器的探测范围划分出 α 探测器的响应时间序列,完成对中子出射信息,以及伴随 α 探测器和超热中子探测器的响应时序信号获取的模拟仿真^[27]。

在脉宽 50 μs 、周期 2 ms 的脉冲模式时间序列模拟中,设置中子产额为 3×10^7 n/s,获得的中子出射时间谱、 α 粒子符合中子时间谱以及 ^3He 管探测信号时间谱见图 6(b)中①、②、③,单位时间内信号统计的波形及计数均符合要求。0~4 000 μs 的中子出射时间统计见图 6(c),根据该结果,程序能很好地完成出射时间的模拟,并记录不同时间段、各部分间的计数情况。任意脉冲模式下 0~100 μs 间伴随 α 探测器与 ^3He 管的响应信号时序信息见图 6(d),图中灰色部分为伴随 α 探测器一个测量周期内的响应信息,代表中子出射时间信息;红色部分为 ^3He 管一个周期内的计数响应时序。

3 数据获取与处理

在获取各部分时序信息后,需要对不同铀质量分数地层的测量结果进行统计分析。根据图 6(d),分别对地层铀质量分数为 0 与 1.00% 的模型进行 100 s 测量模拟后,对 ^3He 管探测到的源中子与裂变中子的中子捕获时间信息进行归一化统计(图 7)。在该超热中子探测器结构下,源中子在出射后, ^3He 管对其响应在 40 μs 时基本为 0,而对于裂变中子其响应时间最长达 1 000 μs 。

根据图 7 中不同来源超热中子的衰变情况,在一个中子发射后的 40~50 μs 内, ^3He 管对源中子的响应基本为 0。当中子源脉宽为 50 μs 时,以伴随 α 探测器信号作为触发信号,开启一次符合测量事件;设置预延迟时间为 40 μs ,经过预延迟后打开符合门进行统计;符合门宽设置为 800 μs ,进行超热中子计数统计,根据图 4 中的原

理进行计数区间的获取并确定区间内总的信号数量。单次模拟测量 3 s,重复 3 次,计算得到不同地层铀质量分数与符合计数率的关系(图 8)。图 8 中红色曲线为探测器符合计数率与地层铀质量

分数关系的拟合曲线。根据该拟合工作曲线,对 6 组验证样本中地层的铀质量分数进行了计算,结果见表 2。

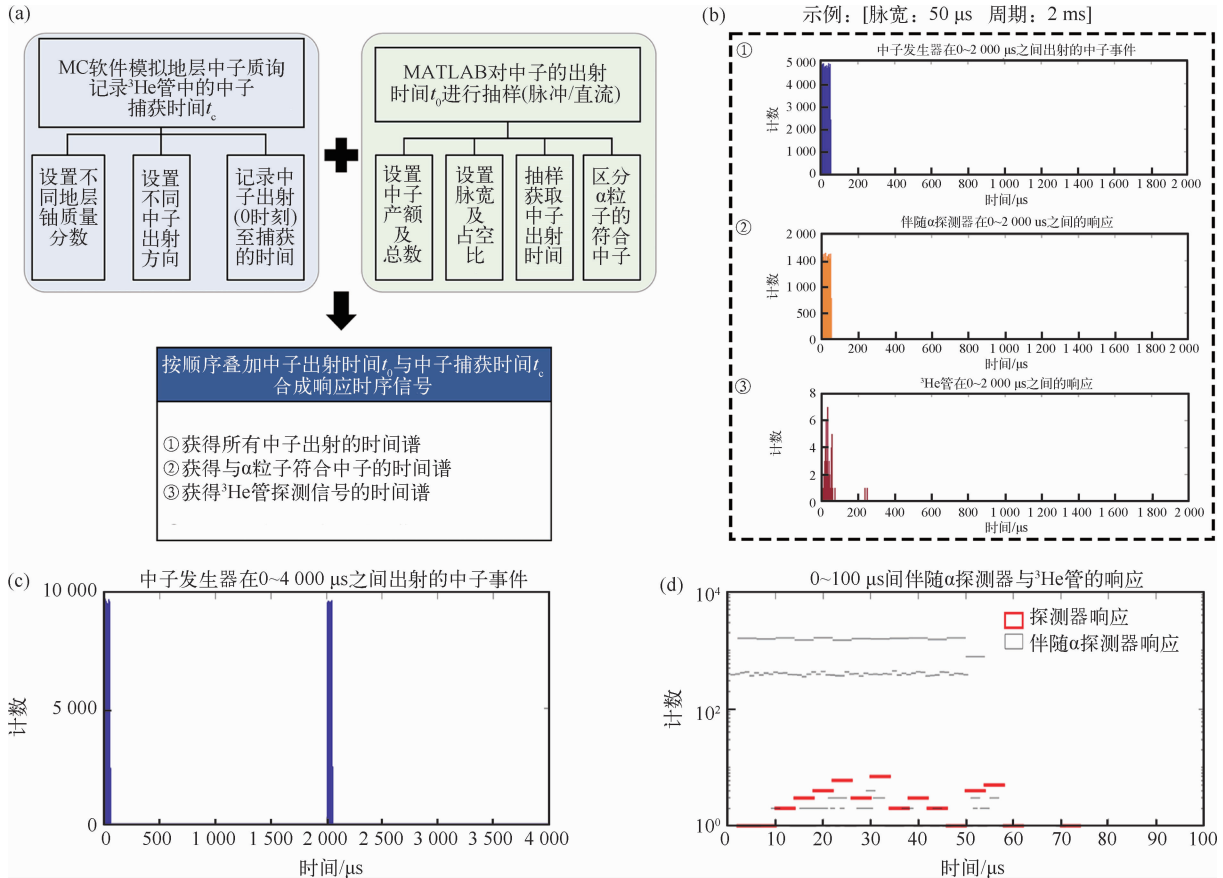


图 6 时序信息的模拟获取流程

Fig. 6 Simulated acquisition process of temporal information

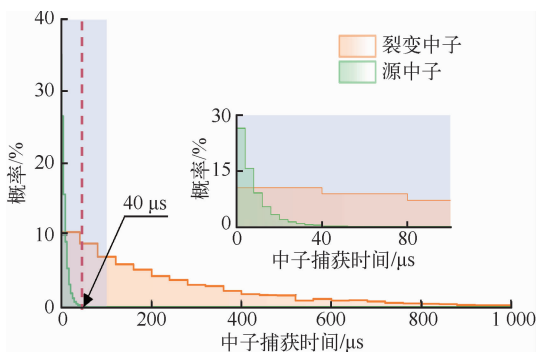


图 7 ^3He 管对源中子与裂变中子的捕获时间统计

Fig. 7 Statistics of capture time of ^3He tube for source neutrons and fission neutrons

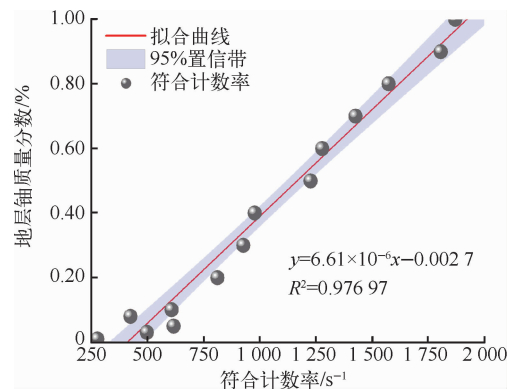


图 8 地层铀质量分数与统计计数之间的关系
Fig. 8 Relationship between uranium content in strata and statistical counting

表2 验证样模拟计算结果与偏差
Table 2 Verification sample simulation
calculation results and deviations

样品 编号	实际地层铀 质量分数/%	计算地层铀 质量分数/%	铀质量分数	
			偏差 值/%	相对 偏差/%
1	0.05	0.137	0.087	174
2	0.10	0.131	0.031	31.0
3	0.30	0.343	0.043	14.2
4	0.50	0.541	0.041	8.12
5	0.80	0.771	0.029	3.67
6	1.00	0.967	0.033	3.31

对于地层铀质量分数高于0.05%的地层,基于伴随 α 中子管的铀裂变瞬发中子符合测井方法的计算结果与实际值之间的偏差值均小于0.1%,铀质量分数较低时相对偏差较大;随着地层铀质量分数的增加,计算值与实际值之间的相对偏差逐渐减小;地层铀质量分数高于0.5%时,相对偏差优于10%,该方法整体满足测量需求。

4 结论

基于伴随 α 中子管的铀裂变瞬发中子符合测井方法,提出了一种结合蒙特卡洛模拟软件与MATLAB编程的方法,实现对基于伴随 α 中子管铀裂变瞬发中子测井装置关键响应时序信号的模拟。区别于传统测井模拟方法,该方法不再获取数据统计结果,直接获取探测器中 ^3He 的中子捕获信息,在MATLAB中进行重新抽样与时序排列,保证了时间序列的随机性与模拟结果的泛用性;在获取中子捕获时间信息后,变化预延迟时间、符合门宽等测量参数,不需要用蒙特卡洛软件进行重新模拟,提高了模拟效率。

在实现时间序列模拟的基础上,建立了地层铀质量分数为0~1.00%地层测量符合计数率与铀质量分数之间的工作曲线,通过对6组地层验证样(铀质量分数在0~1.00%)中铀质量分数实际值与计算结果之间的偏差分析,验证了方法的可行性,计算结果与实际值的偏差值优于0.1%;在地层铀质量分数高于0.5%时,相对偏差优于10%,该方法整体满足铀矿测井需求。后续可采用快中子探测器,提高直流区分过程的响应中子

能量,以提高区分效率。该方法对基于伴随 α 中子管的铀矿测井时序分析研究具有重要意义。

参考文献:

- [1] 陈军强,曾威,王佳营,等.全球和我国铀资源供需形势分析[J].华北地质,2021,44(2):25-34.
CHEN Junqiang, ZENG Wei, WANG Jiaying, et al. Analysis of supply and demand situation of uranium resources in the world and China[J]. North China Geology, 2021, 44(2): 25-34 (in Chinese).
- [2] 秦明宽,李子颖,刘章月.铀资源勘查技术新深度[J].中国核工业,2017(11):32-34.
QIN Mingkuan, LI Ziyang, LIU Zhangyue. New depth of uranium resource exploration technology[J]. China Nuclear Industry, 2017(11): 32-34 (in Chinese).
- [3] 罗齐彬,杨亚新,张叶,等.地气测量在隐伏铀矿找矿中的应用与现状[J].地球科学进展,2018,33(1):75-84.
LUO Qibin, YANG Yaxin, ZHANG Ye, et al. Application and current status of geogas prospecting in concealed uranium deposits exploration [J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(1): 75-84 (in Chinese).
- [4] 赵凯培,张丽丽,霍晨琛,等.某铀矿山资源储量动态监测及资源利用研究[J].铀矿冶,2024,43(4):1-13+64.
ZHAO Kaipei, ZHANG Lili, HUO Chenchen, et al. Dynamic monitoring of resource reserves and research on resource utilization in a uranium mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(4): 1-13+64 (in Chinese).
- [5] 梁永顺.瞬发裂变中子测井在砂岩型铀矿勘查中的应用综述[J].科技广场,2012(11):89-92.
LIANG Yongshun. Summary of application of the prompt fission neutron logging in sandstone-type uranium deposits[J]. Science Mosaic, 2012(11): 89-92 (in Chinese).
- [6] 管少斌,唐晓川,高国林.我国铀矿勘查测井仪校准装置的研究现状和展望[J].化工自动化及仪表,2022,49(4):424-429.
GUAN Shaobin, TANG Xiaochuan, GAO Guolin. The status and prospects of calibration devices for uranium prospecting logging instrument in China [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2022, 49(4): 424-429 (in Chinese).
- [7] LIU Z F, DING CH L, WANG R Y, et al. Current status and development trend analysis of neutron log-

- ging in uranium mines in China[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1865(2):022006.
- [8] ZHANG Y, YE Y, QIU J, et al. Study on quantitative interpretation of uranium spectral gamma-ray logging based on machine learning algorithm [J/OL]. Nuclear Engineering and Technology, 2024 [2024-09-11]. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.07.004>.
- [9] 汤彬, 乐仁昌, 周蓉生, 等. 一种新的伽玛能谱测井定量解释方法研究[J]. 地球物理学进展, 2006(2): 594-597.
TANG Bin, LE Renchang, ZHOU Rongsheng, et al. Spectrum striping technology research on gamma-ray spectrometric logs quantitative interpretation [J]. Progress in Geophysics, 2006(2): 594-597 (in Chinese).
- [10] 余冠军, 刘宏章, 尹旺明, 等. γ 能谱法测量铀矿石样品镭-氡平衡系数的初步探索[J]. 世界核地质科学, 2009, 26(4):237-240+244.
SHE Guanjun, LIU Hongzhang, YIN Wangming, et al. Preliminary study on determining radium-radon equilibrium coefficient of uranium ore sample by γ -ray spectroscopy [J]. World Nuclear Geoscience, 2009, 26(4):237-240+244 (in Chinese).
- [11] 魏宝军, 顾中亮, 周圆圆, 等. 瞬发中子测井法在地浸采铀中的应用[J]. 铀矿冶, 2022, 41(S1):1-4.
WEI Baojun, GU Zhongliang, ZHOU Yuanyuan, et al. Application of prompt neutron logging in in-situ leaching uranium [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(S1):1-4 (in Chinese).
- [12] 汤彬, 王仁波, 周书民, 等. 基于超热中子时间谱的瞬发中子测井及铀矿定量技术: CN103470252A [P]. 2013-12-25.
- [13] 汤彬, 王仁波, 张雄杰, 等. 基于超热中子与热中子比值的铀裂变瞬发中子测井仪: CN203515572U [P]. 2014-04-02.
- [14] JAN A, CZUBEK. Pulsed neutron method for uranium well logging [J]. Geophysics, 1972, 37(1): 160-173.
- [15] 汤彬, 王仁波, 周书民, 等. 基于超热中子与热中子比值的铀裂变瞬发中子测井技术: CN103711479A [P]. 2014-04-09.
- [16] 张小东, 何锦成. 基于伴随 α 中子管与快中子探测器的铀矿测井装置及方法: CN202211047225.3 [P]. 2022-12-30.
- [17] 董艾平, 李文杰, 王强. 能探测伴随粒子的测井中子管[J]. 核技术, 1997(9):32-34.
DONG Aiping, LI Wenjie, WANG Qiang. A new well logging neutron tube [J]. Nuclear Techniques, 1997(9):32-34 (in Chinese).
- [18] 黄炳升, 林谦. 伴随粒子碳氧比测井的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007(S1):1048-1050.
HUANG Bingsheng, LIN Qian. Application of associated particle C/O well logging [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007(S1):1048-1050 (in Chinese).
- [19] 张琼, 葛忆, 汪洋. 一种基于脉冲中子的伴随 α 粒子井下成像系统 [P]. 2023-05-12.
- [20] RHODES E, PETERS C W. Associated-particle sealed-tube neutron generators and hodoscopes for NDA applications: ANL/CP-74572, CONF-9111125-1 [R]. Argonne National Lab., IL (United States), 1991. <https://www.osti.gov/biblio/5936948>.
- [21] ZHOU P F, TANG B. Experimental study of the influence of borehole parameters on prompt fission neutron uranium logging and its corrections [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2024, 56(8): 3090-3096.
- [22] 刘世梁. 小型中子发生器的中子产额稳定控制系统设计 [D]. 抚州: 东华理工大学, 2022.
- [23] 周鹏飞. 铀裂变瞬发中子- γ 融合测井定量修正方法研究 [D]. 抚州: 东华理工大学, 2023.
- [24] ZHANG Y, ZHANG H R, WANG R B, et al. Passive neutron multiplicity device for ^{240}Pu measurement based on FPGA [J]. Nuclear Science and Techniques. 2024, 35(9):162.
- [25] MCCONN R, GESH C J, PAGH R T, et al. Compendium of material composition data for radiation transport modeling: PNNL-15870 Rev. 1 [R]. Pacific Northwest National Lab. (PNNL), Richland, WA (United States), 2011. <https://www.osti.gov/biblio/1023125>. DOI:10.2172/1023125.
- [26] 张浩然, 张焱, 胡文兴, 等. 主动式多重性方法对黄饼中铀定量的模拟研究 [J]. 核技术, 2024, 47(2): 53-61.
ZHANG Haoran, ZHANG Yan, HU Wenxing, et al. Simulation study of uranium content in uranium yellow cake using the active multiplicity method [J]. Nuclear Techniques, 2024, 47(2): 53-61 (in Chinese).
- [27] 张浩然, 文博, 李金岚, 等. 基于中子多重性的MOX燃料钚定量测量模拟研究 [J]. 同位素, 2024, 37(3):294-301.
ZHANG Haoran, WEN Bo, LI Jinlan, et al. Simula-

tion study on quantitative measurement of plutonium in MOX fuel pellets based on neutron multi-

plicity[J]. Journal of Isotopes, 2024, 37(3): 294-301(in Chinese).

Simulation Study on Uranium Fission Prompt Neutron Coincidence Logging Method Based on Associated Particle Sealed-tube Neutron Generator

ZHANG Yan^{1,2,3}, ZHANG Haoran^{1,2,3}, LIU Chi^{1,2,3}, HU Wenxing^{1,2,3},
LIU Shiliang^{1,2,3}, LIU Qi^{1,2,3}

(1. National Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Nuclear Remote Sensing, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. Jiangxi Key Laboratory of Nuclear Physics and Nuclear Technology, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

3. Engineering Research Center for Nuclear Technology Applications, Ministry of Education, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: With the growing global demand for nuclear energy, the evaluation of the quality of uranium resource distribution and the precise measurement of reserves have become increasingly important. The uranium fission prompt neutron logging technology, as a critical tool for uranium ore logging exploration, offers the advantage of providing quantitative results unaffected by radioactive equilibrium. However, the measurement accuracy is influenced by the pulse width and yield of the neutron source. This study utilizes a uranium logging instrument equipped with an associated particle sealed-tube neutron generator, which enables time and spatial statistics of the companion α particles emitted by the outgoing neutrons. This approach helps to eliminate interference from the source neutrons and enhances the accuracy of the logging results. In the simulation process, to obtain information on neutron emissions during logging and the timing signal responses of both the companion α detector and the epithermal neutron detector, we propose a response time simulation method that combines Monte Carlo simulation software with MATLAB. By appropriately setting the pre-delay time and gate width, a relationship curve between the count rate and uranium content in formations with uranium levels ranging from 0 to 1.00% was established. The results from validation samples indicate that the calculated uranium content show a deviation of less than 0.1% from the actual values. When the uranium content in the formation exceeds 0.5%, the relative deviation is within 10%. This method meets the exploration requirements and demonstrates significant application value for uranium ore logging.

Key words: associated particle sealed-tube neutron generator; uranium mine logging; time series; uranium fission prompt neutron