

面向地外行星探测的脉冲中子元素分析仪

王智健¹, 张永强², 张飞³, 马涛², 赵海峰^{3,4}, 张喆¹,
韩如锦³, 王辅辅³, 穆瑞楠³, 王珂³

(1. 东华理工大学, 南昌 330032; 2. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210023; 3. 中国科学院太空应用重点实验室, 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094; 4. 中国科学院大学航空宇航学院, 北京 100049)

摘要:以模拟月球的地层为研究对象,设计了一种小型化的高产额中子管,开展了集成化中子-伽玛谱仪研究,建立了元素分析谱库和解谱方法,通过搭建已知元素含量的模拟井和地面测试验证平台,实现了对模拟月球次表层常量元素、稀有元素等元素的定量分析。中子发生器的产额在 $10^7\sim 10^8$ 个/s之间(分别对应脉冲和直流模式),探测时间在分钟量级,可达到5%的精度。该研究工作实现了对行星探测任务的中子-伽玛谱仪轻量化关键技术的重要突破,提高了探测速度,为在未来深空探测任务中的载荷应用工程化奠定基础。

关键词:月球探测; 脉冲中子元素分析仪; 解谱算法; 月球模拟地层; 伽玛谱仪

中图分类号: V1

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)05-0496-09

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230123

引用格式: 王智健, 张永强, 张飞, 等. 面向地外行星探测的脉冲中子元素分析仪[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(5): 496-504.

Reference format: WANG Z J, ZHANG Y Q, ZHANG F, et al. Pulsed neutron elemental composition analyzer for extraterrestrial planets exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(5): 496-504.

引言

目前,浅表层元素探测是月球矿产资源勘查的重要内容,是编制区域矿产资源分布图的基础^[1]。在月球资源勘查中,除H元素之外的其它元素不能用中子谱分析(Neutron Spectrum, NS)直接探测,需要利用其它数据进行补充解算含量,伽玛射线分析(Gamma Rays Spectrum, GRS)可以满足矿产勘查中元素分析的需求^[2]。宇宙线虽能活化核素产生特征伽玛射线,但存在产额低且测量时间长的缺点^[3],故采用高束流强度的可控中子源伽玛谱技术,以提高元素的探测精度和效率^[4]。可控中子源岩性探测技术是月球浅表层资源勘查的重要技术手段,攻关基于氘-氚中子发生器地外元素分析技术和高性能伽玛谱仪探测系统,建立基于中子活化和伽玛射线探测实现多元素能谱分析的探测系统,填补³He稀有矿产资源定量勘查的技术空白。根据“阿尔忒弥斯”(Artemis)计划,美国月球探测任务涉及月球地质勘测、月表取样返回等,其中水冰勘测月球极地探测车将携带中子分光仪系统、质谱仪等观测月球地质活动,对月壤环境进行采样^[5]。

近年来,国际上继续促进深空探测技术与发展,空间伽玛射线谱仪探测器配置月球伽玛射线与中子遥感属于被动式技术,主要搭载在轨道卫星飞行器上,伴随飞行器实现月球元素丰度的全球探测。美国“阿波罗15/16号”(Apollo 15/16)两次登月任务中,轨道舱上都携带了由NaI晶体作为主探测器的伽玛射线谱仪,观测能段覆盖0.2~10 MeV,观测结果验证了利用伽玛射线能谱分析月表元素丰度的思路,确认了伽玛射线谱仪作为月球资源勘查的有利工具。日本“月女神号”(SELenological and ENgineering Explorer, SELENE)伽玛射线谱仪采用超高能量分辨率的高纯锗探测器,实现了更精确、独立的K、U元素含量分布测量,并依据伽玛射线谱峰提出月球极区可能存在H/水^[6]。中国“嫦娥一号”“嫦娥二号”绕月探测任务也搭载了伽玛射线谱仪,对全月球表面有用元素的丰度与分布开展了探测,其中“嫦娥二号”伽玛射线谱仪能量分辨达3.6%@662 keV^[7],获得了更高分辨率的月表关键元素分布。

由于作为“光源”的宇宙线通量较低,激发获得的伽玛光子产额与采集信号的计数率也较低,月球伽玛

射线谱仪必须尽量增大探测器接收面积与厚度, 以增加载荷重量为代价, 提高探测器的接收度与探测效率^[8]; 另一方面, 由于月球伽玛光子通量较低, 通常还需要辅助探测器剔除宇宙线中的环境本底, 以及主探测器未能完全吸收伽玛光子而产生的连续谱本底, 因此需采用新型主动中子活化探测技术, 提高探测速度。

美国核动力火星车“好奇号”(Curiosity)中搭载的中子反照率探测仪(Dynamic Albedo of Neutrons, DAN), DAN仪器在空间应用中使用中子-中子激活分析的方法, 以研究火星地下水的深度分布, DAN通过向火星地面发射中子束探测火星勘测冰和含水矿物质, 能够发现地下约2 m深处浓度只有0.1%的水^[9]; 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发布Artemis登月计划的体元素组分分析仪(Bulk Elemental Composition Analyzer, BECA)由脉冲中子发生器、伽玛射线光谱仪、中子探测器, 可探测仪器下方半径约1 m范围内深度高达10 cm的体积元素成分, 探测元素包含23种^[10]。

本文主要设计一种小型化的脉冲中子元素分析仪, 将主动式与被动式探测手段集成一体, 采用新型主动中子活化探测技术, 解决了伽玛光子通量较低的问题, 建立了元素分析谱库和解谱方法, 实现了对月球次表层数米深度内常量元素、稀有元素等元素的定量分析, 探测速度可达秒级。

1 脉冲中子元素分析仪的设计与优化

1.1 脉冲中子元素分析仪原理样机

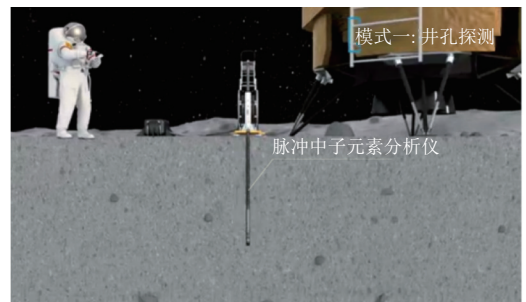
随着人类对月球探索的不断深入, 探月的需求开始从“发现月球”转变为“开发和利用月球”, 对月资源勘探也由普查走向详查。本课题研制的脉冲中子分析仪主要探测对象为月表矿产元素及水冰^[11], 面向月表原位资源勘探应用场景, 如航天员布设与井孔探测、巡视器挂载大范围扫描等(见图1), 对月表实现高精度、快速的矿产元素分析。为适应井孔探测应用场景, 本载荷设计为小型化的管状探针结构。

月球元素分析载荷主要由四部分组成: 中子发生器、溴化镭探测器、屏蔽体以及探管式主结构。为了降低月球元素分析载荷的重量以及体积, 因此采用直径2.54 cm、高2.54 cm的圆柱晶体作为闪烁体。

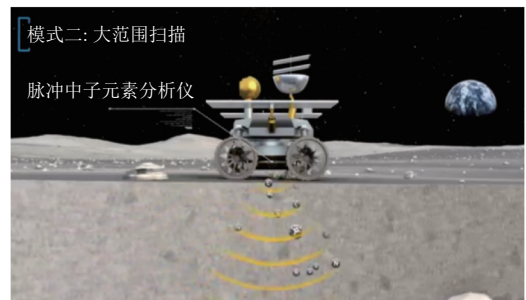
脉冲中子分析仪的核心部件为中子发生器和伽玛谱仪, 中子发生器产生大量的快中子, 激发月表物质元素产生特征伽玛射线, 由伽玛谱仪获取月表物质元素受激发产生的混合伽玛射线能谱; 建立多种元素受中子激发产生的特征伽玛射线的标准谱库, 利用标准

谱对混合伽玛射线能谱进行元素分析解谱, 最终识别元素的种类, 并给出元素的具体含量。中子发生器可产生高通量的快中子, 使探测速度达到秒级; 中子和伽玛射线均具有极强的穿透性, 可实现米级探测半径。

快中子激发元素产生伽玛射线主要有两个过程: ①快中子慢化过程中, 与周围物质发生非弹性散射, 产生特征伽玛射线; ②快中子被慢化后, 与周围物质发生俘获反应, 释放特征伽玛射线。相同的元素, 与中子发射非弹性散射和俘获反应产生的特征伽玛射线能谱不同。



(a) 井孔探测模式



(b) 巡视器挂载大范围扫描模式

图1 月面地层探测应用示意图

Fig. 1 Schematic diagram of lunar formation logging scenarios

使用脉冲式中子发生器, 可以有效区分上述两个过程, 从而获得更加丰富的元素特征信息: 当中子发生器产生快中子脉冲期间, 同时发生非弹性散射和俘获反应, 伽玛谱仪收集到的能谱为两种反应所产生特征伽玛射线的叠加; 脉冲停止后, 非弹性散射过程迅速结束, 伽玛谱仪可以收集到俘获反应产生的特征能谱。因此, 通过简单换算, 即可获得非弹性散射能谱和俘获反应能谱。基于上述探测原理, 脉冲中子发生器和伽玛谱仪需要以中子脉冲的起始时间为基准, 协同工作。

标准谱的建立和元素分析解谱, 是本载荷的主要关键技术难点。由于月球的地层信息比较匮乏和没法实地实验校正, 本项目使用蒙特卡模拟结合实验的方法获取元素标准谱库。蒙特卡洛模拟是在核科学领域常

用的技术手段, 最早用于美国曼哈顿计划的原子弹优化设计, 使用随机数抽样的方法, 模拟原子物理中的粒子碰撞发生概率、能量、角度等参数取样等。从微观多粒子的重复实验, 得出宏观数据显现。

通过实验装置建立计算模型的目的是为了通过模拟得到与实验一样的能量谱。模拟出来的能量谱是没有经过高斯展宽, 理论上源的特征峰, 应该是一个尖峰值。对模拟谱经过高斯展宽后, 就使得模拟谱与实验得到的能量谱相吻合了。

元素分析解谱优化过程使用蒙特卡洛模拟来实现, 如图2所示。蒙特卡洛模拟是在核科学领域常用的技术手段, 最早用于美国曼哈顿计划的原子弹优化设计, 使用随机数抽样的方法, 模拟原子物理中的粒子碰撞发生概率、能量、角度等参数取样等。从微观多粒子的重复实验, 得出宏观数据显现。图2中左侧中子从中子源出发经过仪器、地层, 发生相互作用产生的次生伽玛进入探测器的过程可以在模拟软件中实现, 通过调整探测器的位置, 屏蔽材料的厚度和位置等关键参数可以让热中子尽量少地进入探测器, 让次生伽玛射线尽量多地进入探测器。

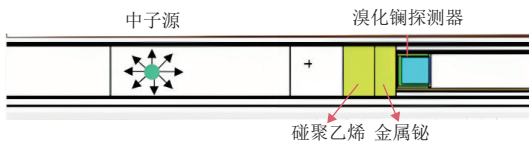


图2 元素分析解谱优化过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of elemental analysis despectral optimization process

脉冲中子元素分析仪主要包由中子发生器、伽玛谱仪、屏蔽体和主结构组成。根据小型化中子发生器的设计, 中子管尺寸为 $\phi 68 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$, 经设计脉冲中子元素分析仪整体尺寸为 $\phi 68 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$, 主结构采用7075铝合金, 样机总质量为11.96 kg, 总体设计图如图3所示。

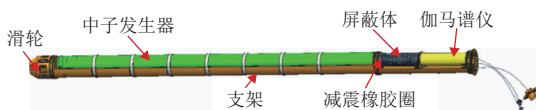


图3 脉冲中子元素分析仪总体设计图

Fig. 3 Overall design of pulsed neutron element analyzer

其中中子发生器单元主要由中子管、靶高压电源、离子源高压电源、驱动电路、采样电路及控制电路六组成^[12]。中子管和靶高压电源密封在绝缘套筒内, 并在筒内充入绝缘油或绝缘气体。靶高压电源是由一系列的倍压线路组成, 输出-100 kV的粒子加速电压。

伽玛谱仪内部主要由溴化镧晶体、硼套筒、光电倍增管及其分压电路组成。溴化镧晶体负责吸收入射伽玛射线能量, 转换为可见荧光, 设计尺寸为 $\phi 25.4 \text{ mm} \times 25.4 \text{ mm}$, 安装在硼套筒内; 选用25.4 mm直径光电倍增管用于光收集和光电转换, 收光面与溴化镧晶体出光面直接耦合; 分压电路由一系列电阻分压网络构成, 对输入电压(几百伏)进行分压, 为光电倍增管的阳极和打拿级提供内部电子倍增加速所需的电压。

在中子发生器与溴化镧探测器之间填充含硼聚乙烯和金属铋的屏蔽材料, 并在横向对探头外壳做碳化硼的涂层处理, 从而减少进入溴化镧探测器的中子。当中子进入溴化镧探测器时, 会使探测器本身被中子活化, 从而产生伽玛射线, 大大提高了结构本底, 影响探测结果以及精度。同时也屏蔽来自源本身在屏蔽中子的过程中产生的此伽玛射线。

1.2 探测器响应函数测试

探测器响应函数是形成标准谱的基础, 搭建探测器响应函数的标定实验平台如图4所示, 通过MCNP建立物理模型, 将探测器晶体设置为LaBr₃, 蒙特卡洛模拟结构示意图如图5所示, 通过模拟计算出不同的单能源进入探测器晶体的光子通量, 并通过使用脉冲计数卡将进入晶体内部的伽玛光子沉积为电子。探测器响应函数表征的是这个探测器含解析电路对不同能量光子的探测实际性能, 需要通过实验来标定。



图4 探测器响应函数的标定实验平台

Fig. 4 Calibration setup of detector response function

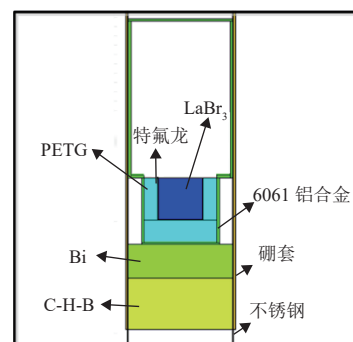


图5 蒙特卡洛模拟结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of Monte Carlo simulation domain

在模拟中完全一比一的仿真实验条件。实验和模拟结果对比如图6所示。

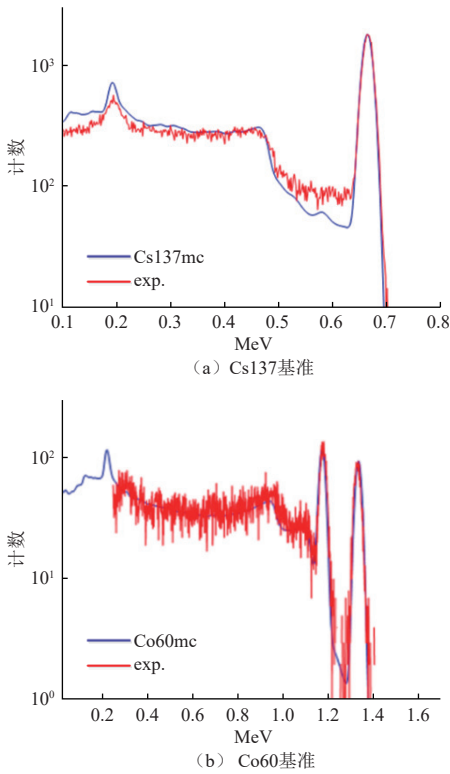


图6 Cs137和Co60的探测器响应函数实验对比

Fig. 6 Experimental comparison of detector response function of Cs137 and Co60

图6可见探测器响应函数在两个能量段的拟合都比较接近测量值, 在Co60的拟合更加准确, 如果有更多单能量的伽玛源会对整个能谱的拟合更加准确, 这也是下一步要做的工作之一。通过调整探测器响应函数的能量分辨率、坎普顿平台参数^[13], 形成本载荷中使用的探测器响应函数, 能量范围为0~11.382 MeV。

2 解谱算法的设计

2.1 解谱算法的原理

为了对测量的中子活化分析仪 (Prompt Gamma-Ray Neutron Activation Analysis, PGNA) 伽玛能谱进行定量分析, 有两种主流方法: 单峰分析法和蒙特卡洛库最小二乘法 (Monte Carlo Libraries Least-Square, MCLS)。Gardner^[14]分别使用单峰分析法和蒙特卡洛库最小二乘法对元素Al、Si和Fe进行了分析。分析结果表明, 蒙特卡洛库最小二乘法比单峰分析法好2.5倍。蒙特卡洛库最小二乘法使利用模拟元素库光谱应用最小二乘拟合分析未知样本光谱成为可能。

假定用 y_i 表示未知样品谱的第 i 道计数率, 单位为

计数/s, y_i 可以表示为

$$y_i = \sum_{j=1}^m x_j a_{ij} + e_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中: x_j 代表物料中元素 j 的含量, 单位为个/cm³; a_{ij} 是元素 j 在第 i 道 (共 n 道) 每单位原子密度下的计数率, 即元素 j 的库谱; e_i 是第 i 道的误差。

当 y_i 与 a_{ij} 已知时, 可以构造拟合方差, 其中 σ 是 x 的随机偏差

$$x_v^2 = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^n \frac{e_i^2}{\sigma_i^2} \quad (2)$$

当 $x_v^2|_{x_j}$ 最小时, 为 a_{ij} 的最优解。

2.2 标准谱

MCLS可以用来解析出未知地层中各元素的原子数密度, 进而再求出其地层的重量百分含量或密度等。因此地层常见元素的标准伽玛能谱是进行谱数据处理的关键, 建立精确的标准库谱是进行解谱的前提。地层常见元素的非弹和俘获标准伽玛能谱通常采用模型井实验和数值模拟方法获得。Grau^[15-16]在80年代开始的摸索过程中, 主要通过实验方法获取化学源元素标准谱。然而, 随着石油勘探难度的增加, 以及对勘探结果准确度的要求, 实体刻度井模型的不足越来越明显, 建井难度大、成本高, 难以获得测井方法的基本规律。王虎等^[17-18]主要通过MCNP (Monte Carlo N Particle Transport Code) 蒙特卡洛数值模拟的方式获取标准谱, 王智健指出该方法虽节省了成本和周期, 但由于理想化了产生标准谱的地层几何效应, 精度不够, 而元素测井技术对精度要求很高^[19]。Gardner^[14]把蒙卡的物理过程分为探测器响应和外部环境响应, 通过提高探测器响应函数的模拟精度来提高MCNP的蒙卡模拟精度。Pemper^[20]将这种方法使用与元素测井仪的研发, 用少量的模拟井较好地实现了脉冲中子元素测井仪器的开发和应用, 并通过数值模拟数据与实测数据的反复对比研究, 确定最终计算模型并获得了地层常见元素标准俘获和非弹伽玛能谱。王智健等^[21-23]进一步提高了探测器响应函数的精度和适用范围, 并成功地将这种技术应用于鹅卵石反应堆多粒子同时跟踪。

利用仪器测量已知元素组成的地层, 获得常见元素标准非弹和俘获伽玛能谱及不同岩性条件下的混合伽玛能谱, 以此为基础对仪器进行刻度校正, 为测量数据的处理解释提供依据。本文主要包括对地外脉冲中子元素仪结构的优化设计, 月球模拟测井环境的搭建以及所得元素标准谱的能谱峰位校正和能谱形状

校正。

具体实施为在实验场所搭建元素测量模拟井。将模拟井的数据整理,在自主开发的标准谱生成器 ECUTPG (East China University of Technology Prompt Gamma-ray) 软件中完全重现实际的模拟实验环境。通过对不同元素材料的实测与仿真。从而形成相应的实验谱以及模拟谱。再运用MCLLS算法解谱修正,使得实验谱与模拟谱获得最佳拟合,以确保后续其它元素模拟所得元素标准谱的精准。流程如图7所示。

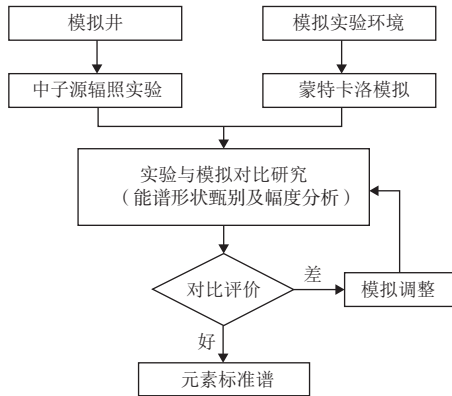


图7 标准谱建立的流程图

Fig. 7 Flow chart of standard spectrum establishment

标准谱特点和相关要求如下:

1) 确定分析的基准。岩层中每种元素的存在都会影响别的元素的标准谱系,作为一个全谱分析的方法,在特定的地层布局中各元素谱的相互影响有称为几何效应。而这个几何效应是用蒙卡的方法产生标准谱的时候,通过对单元素的独立跟踪和计数自动考虑进去。

2) 实验拟合。在每一个测量完毕后,获得的未知谱会与标准谱进行一次或多次(俘获谱,非弹谱,总谱)的最小二乘法的对比分析,以达到最佳拟合效果,获取标准谱贡献的因子。

3) 确定含量组成。获取每个元素的贡献因子后,经归一化处理实现元素含量的量化分析并给出结果。

3 系统实验测试与性能分析

本设计采用上文设计标准谱生成器,通过上述小型脉冲中子元素分析仪,根据不同的探测器LaBr3和不同的地层常见元素模拟计算得到相应的标准伽玛能谱,使用蒙卡方法,仿真运算中标识次生伽玛射线(包括俘获和非弹性散射)产生的原子,根据原子的元素类别和位置同时进行计数分析,这样不仅可以甄别各个元素的标准谱响应,还可以把不是标的(这里

的标的是地层)中的同种元素的影响自动分离,解析元素含量。

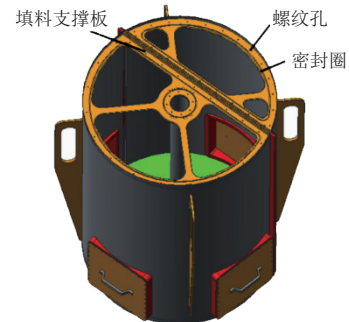
3.1 实验环境搭建

本文建立直径110 cm、高150 cm的模拟井,分别测试仪器在直流和脉冲(1 K, 占空比10%的时序)测试载荷的响应能谱^[24]。实验条件如表1所示。

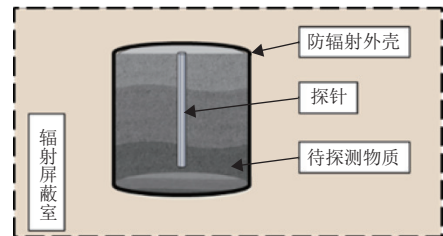
表1 6口模拟井内不同模拟月壤材料
Table 1 Different lunar simulant materials in six simulated wells

序号	材料	粒度/目	纯度/%
1	二氧化硅	200	92
2	碳	200	92
3	硫粉末	200	99
4	橄榄石粉末	200	元素比重恒定
5	羟基磷灰石粉末	200	元素比重恒定
6	羟基磷灰石与橄榄石1:1混合	200	元素比重恒定

模拟井的内径为100 mm,测试时仪器置于井中,如图8所示。



(a) 模拟井结构图



(b) 实验示意图

图8 模拟井结构和实验示意图

Fig. 8 Schematic diagram of simulated well and its testing layout

脉冲测量时中子发生器与探测器同步,在伽玛能谱上的可视时间谱如图9所示。

在时序控制上设置为1000 μ s,占空比为10%,但如图9所示,大约中子发生器需要120 μ s的上升延缓期,而下降延缓期,在200 μ s之后的表现会比较快,小于20 μ s,这是伽玛计数的视图时间谱,也直观地反映了中子时间谱。直流的工作模式就是占空比为100%,中子产额与占空比成正比率关系。

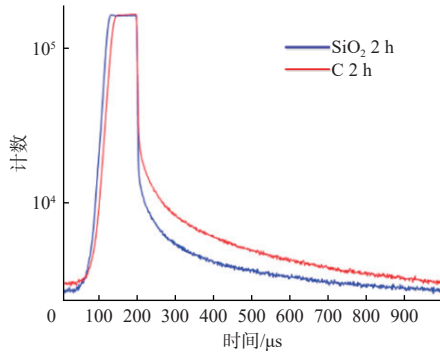


图 9 伽玛时间谱SiO₂和C
Fig. 9 Gamma time spectrum of SiO₂ and C

3.2 实验结果分析

基于用简单的单一元素作为标准谱的校正使用和复杂井的检验作用, 设计6口模拟井(二氧化硅、碳、硫、橄榄石、羟基磷灰石、橄榄石与羟基磷灰石混合 1:1) 所有的响应如图10所示, 从响应可以很直观地看到多种元素(Si、S、C、O等)。

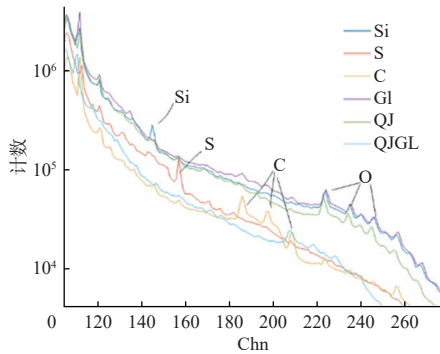
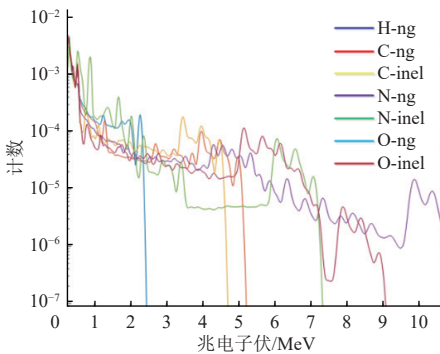
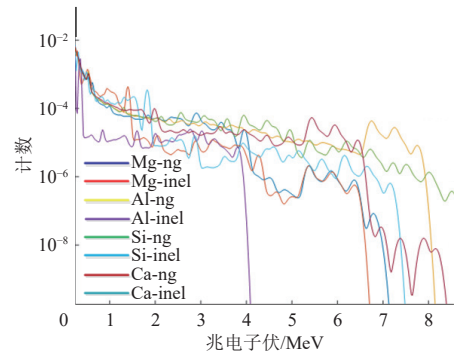


图 10 6口模拟井所有的响应
Fig. 10 All responses of six simulated wells

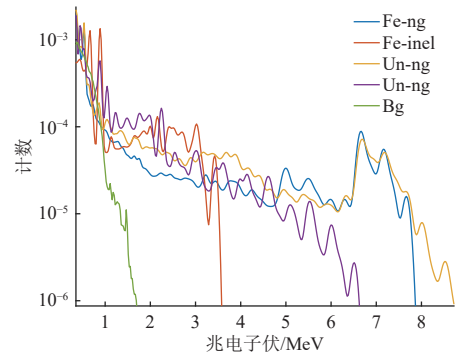
使用S、C、SiO₂做为标准谱的标定井, 校正探测器响应函数和标准谱生成器ECUTPG, 再用生成器生成各元素标准谱(图11), 标准谱的模拟条件与实验条件完全一致, 包括地层组分、结构布局和密度等。



(a) H、C、N、O 标准谱



(b) Mg、Al、Si、Ca 标准谱



(c) Fe结构本底和自然本底标准谱

图 11 主要标准谱

Fig. 11 Main standard spectra

图11中, H-ng表示H的俘获谱, C-inel表示C的非弹谱。Un-ng表示结构材料被中子活化的俘获谱, Un-inel为结构非弹谱, 这两个谱也叫做结构本底, Bg为本底, 它们都作为一个标准谱, 参与试验结果拟合, 拟合结果如图12和表2所示。

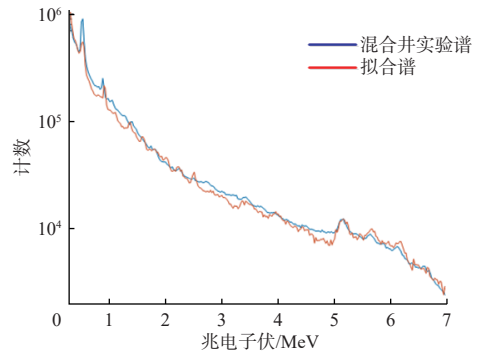


图 12 拟合结果
Fig. 12 Fitting results

如表2所示, 分析了主要的11种元素, 最大的绝对误差为Mg0.44% (绝对误差 = (分析结果 - 参考值) / 参考值 × 100%), 在本次拟合中使用其它化学方法获得模拟井材料的参考量, 并根据这个参考含量形成标准谱是一个自我方法检验的过程。在实际测量中, 元素种类和含量完全未知, 可能需要在能谱中进行初

始假设和多次拟合,这也是此次拟合结果比较好的一个主要原因。本次复杂模拟井的依据主要是根据项目总要求的对H元素的侧重,对羟基磷灰石和橄榄石作为地球上常见的岩层做了测试。

表2 主要的11种元素的元素含量分析及误差分析
Table 2 Elemental content analysis and error analysis of 11 major elements

序号	元素	参考含量/%	分析结果/%	绝对误差/%
1	H	0.85	0.92	0.07
2	C	7.07	7.13	0.06
3	N	0.70	0.50	0.20
4	O	32.77	33.08	0.31
5	F	1.02	1.12	0.10
6	Al	0.83	1.01	0.18
7	Mg	13.50	13.94	0.44
8	Si	3.02	3.09	0.07
9	P	6.50	6.78	0.28
10	Ca	16.50	16.22	0.28
11	Fe	0.95	0.78	0.17
12	其它	16.29		

本系统的开发是需要硬件和软件相辅相成的,在开发过程中,需要从探测器响应函数到整体仪器的解谱功能,逐步用实验进行校正的。在硬件上考虑到地外测量的特性,对仪器的生存能力周期要求比较,对探测的速度和精度要求较低,中子发生器工作在 $10^7\sim 10^8$ 之间(分别对应脉冲和直流模式),探测时间在分钟量级,即可达到要求的精度(5%)。实验表明探测器在这个中子产额下没有出现明显的堆积问题,探测器的响应速度符合解析的要求。但是由于探测器的体积比较小探测效率随能量的增高衰减比较明显,特别是在7 MeV之后,有两个数量级的差别,造成高能特征谱在分析中的影响权重下降。可以通过加大探测器的半径提高这方面的性能。

在中子发生器的工作状态下高压和高产额的中子流让发生器短节的生热效应明显,作为整体的仪器,热传导、热辐射可以让探测器的温度达到100 °C以上或是更高(与连续工作时长有关)。LaBr₃探测器的温度性能优越,是指能量分辨率受温度的影响较小,但还是会有比较明显的影响,温度产生的能谱温漂问题在这个解析中影响较大,这也是以后工作中要考虑的问题。可以通过自动寻峰和探测器高压自动稳谱技术解决。

本次实验周期较长,受环境的影响,在6口模拟井中的温漂问题比较明显,理论上说需要建立单独的标准谱库用于解析。在以后的工作中,拟提前做好所有的数据模拟,并通过地面数据库的学习实现智能化分析,通过能峰分析做出快速初始假设和快速收敛,这

都需要更多的数据支撑。

本工作建立特定的模型并可以检验对某些元素的探测精度。搭建已知元素含量的模拟井和地面测试验证平台,模拟月球的地层条件,通过实测谱分析,解析元素含量。

4 结论

本文所研制的小型化的高产额中子管实现了国内首次将1英寸直径伽玛谱仪成功应用于脉冲中子元素分析试验,利用解谱算法成功实现了对14种元素含量的解析,并获得了高质量的探测器数据,实现了对空间应用伽玛谱仪轻小型化关键技术的重大突破,证明了脉冲中子元素分析仪的元素分析能力,后续的实验过程将会使用更加接近月壤的底层特点的岩石材料。该技术有望实现对月球浅表层月岩和月壤的原位探测,服务于月岩和月壤的金属、非金属元素以及KREEP岩中稀土元素的分析。

致谢

本项目得到中国科学院空间应用工程与技术中心顾逸东院士、中国科学院地质化学研究所刘建忠研究员、山东大学凌宗成教授、中国科学院地质与地球物理研究所林杨挺研究员、南京大学惠贺九教授和中国科学技术大学秦礼萍教授等众多专家与同事的建议与指导,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 刘建忠,李雄耀,朱凯,等.月球原位资源利用及关键科学与技术问题[J].中国科学基金,2022,36(6):907-918.
LIU J Z, LI X Y, ZHU K, et al. Key science and technology issues of lunar in situ resource utilization[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2022, 36(6): 907-918.
- [2] 曹彬,亢武,郝樊华,等. HPXe γ 探测器的研究与应用[J].核电子学与探测技术,2010,30(1):130-135.
CAO B, KANG W, HAO F H, et al. Research and application of HPXe gamma detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, 30(1): 130-135.
- [3] 徐宏坤,方方,倪师军.绕月探测中伽玛能谱分析初步进展[J].核电子学与探测技术,2010,30(10):1378-1381.
XU H K, FANG F, NI S J. Preliminary analysis of gamma spectrum for lunar detection[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, 30(10): 1378-1381.
- [4] 舒双宝,常进,蔡明生.月球伽玛射线谱仪的研制及其性能[J].天文学报,2006,47(2):218-213.
SHU S B, CHANG J, CAI M S. The performance and development of lunar gamma ray spectrometer[J]. Acta Astronomica Sinica, 2006, 47(2): 218-213.
- [5] BRIDENSTINE J. Artemis plan - NASA's lunar exploration program

- overview: NP-2020-05-2853-HQ[R]. Washington, D.C: NASA, 2020.
- [6] 王驰. DAMPE离线数据分析软件框架的设计及BGO量能器的在轨刻度[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [7] LITVAK M L, MITROFANOV I G, BARMAKOV Y N, et al. The Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) experiment for NASA's 2009 Mars Science Laboratory[J]. *Astrobiology*, 2008, 8(3): 605-612.
- [8] PARSONS A M, GRAU J, LAWRENCE D J, et al. Pulsed neutron generator – gamma ray spectrometer measurements of venus elemental composition[C]//Proceedings of 2016 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop. Strasbourg, France: [s. n.], 2016.
- [9] 中科院探月工程总体部. 日本“月亮女神”探月计划最新研究成果[J]. *国防科技工业*, 2010(9): 24-27.
- General Department of Lunar Exploration Project. The latest research results of Japan's "Moon Goddess" lunar exploration program[J]. *Science Technology and Industry for National Defense*, 2010(9): 24-27.
- [10] MA T, CHANG J, ZHANG N, et al. Gamma-ray spectrometer onboard Chang'E-2[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, 726: 113-115.
- [11] 杜宇, 盛丽艳, 张焯, 等. 月球水冰赋存形态分析及原位探测展望[J]. *航天器环境工程*, 2019, 36(6): 607-614.
- DU Y, SHENG LY, ZHANG H, et al. Analysis of the occurrence mode of water ice on the Moon and the prospect of in-situ lunar exploration[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2019, 36(6): 607-614.
- [12] 赵海峰, 王智健, 张永强, 等. 一种地外探测用脉冲中子元素扫描分析系统: 中国, CN 2022116132861[P]. 2023-05-30.
- [13] LI F, HAN X. Status of development of gamma-ray detector response function code or GAMDRF[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2012, 70: 1175-1180.
- [14] GARDNER R P, SOOD A. A Monte Carlo simulation for generating NaI Detector Response Functions (DRF's) that accounts for nonlinearity and variable flat continua[J]. *Nuclear Instruments and Methods B*, 2004, 213: 87-99.
- [15] GRAU J A, SCHWEITZER J S. Prompt γ -ray spectral analysis of well data obtained with NaI(Tl) and 14 MeV neutrons[J]. *Nuclear Geophysics*, 1987, 1(2): 157-165.
- [16] GRAU J A, SCHWEITZER J S, ELLIS D V, et al. A geological model for gamma-ray spectroscopy logging measurements[J]. *Nuclear Geophysics*, 1989, 3(4): 351-359.
- [17] 王虎, 金为武, 卢中杰, 等. 地层元素俘获谱测井数值模拟研究[J]. *石油仪器*, 2013, 27(6): 75-76.
- WANG H, JIN W W, LU Z J, et al. Numerical simulation study of formation element trapping spectroscopy logging tool[J]. *Petroleum Instruments*, 2013, 27(6): 75-76.
- [18] 刘军涛, 张锋, 元哲珑, 等. 页岩气层脉冲中子元素测井蒙特卡罗研究[J]. *测井技术*, 2015, 29(5): 617-621.
- LIU J T, ZHANG F, YUAN Z L, et al. Monte Carlo simulation on pulsed neutron elemental logging for shale gas reservoir[J]. *Well Logging Technology*, 2015, 29(5): 617-621.
- [19] 王智健. 元素标准井设计和应用研究[C]//第八届测井技术进展国际研讨会——核测井与非非常规油气评价. 青岛: [s. n.], 2016.
- [20] PEMPER R, SOMMER A, GUO P, et al. A new pulsed neutron sonde for derivation of formation lithology and mineralogy[C]//Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, TX, USA: SPE, 2006.
- [21] WANG Z, SPEAKER D P, GARDNER R P. Two Monte Carlo approaches for the generation of scintillation Detector Response Functions (DRFs)[J]. *Transactions of the American Nuclear Society*, 2008, 985: 85-586.
- [22] WANG J X, WANG Z J, PEEPLES J, et al. Development of a simple detector response function generation program: the CEARDRFs code[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2012, 70(7): 1166-1174.
- [23] WANG Z, LEE K O, GARDNER R P. A dual system for monitoring the position of multiple radioactive tracer pebbles in scaled PBRs[J]. *Nuclear Technology*, 2014, 185(3): 259-269.
- [24] 王辅辅, 王智健, 赵海峰, 等. 一种中子元素分析系统用分体式地面模拟系统: 中国, CN 202211613561X[P]. 2023-04-28.
- 作者简介:
王智健(1977-), 男, 博士, 特聘教授, 主要研究方向: 蒙特卡洛模拟与反演的精确解析。
 通信地址: 江西南昌东华理工大学广兰大道418号(330032)
 E-mail: zjwang@ecit.edu
张永强(1988-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 空间高能粒子探测。**本文通信作者**。
 通信地址: 中国科学院紫金山天文台(210023)
 E-mail: yqzhang@pmo.ac.cn
赵海峰(1980-), 男, 中国科学院空间应用工程与技术中心研究员, 中国科学院大学岗位教授, 主要研究方向: 从事地外勘查采样、多物理探测仪器设计和考虑材料与结构不确定性的人工智能计算方法。**本文通信作者**。
 通信地址: 北京市海淀区邓庄南路9号(100094)
 E-mail: hfzhao@csu.ac.cn

Pulsed Neutron Elemental Composition Analyzer for Extraterrestrial Planets Exploration

WANG Zhijian¹, ZHANG Yongqiang², ZHANG Fei³, MA Tao², ZHAO Haifeng^{3,4}, ZHANG Zhe¹,
HAN Rujin³, WANG Fufu³, MU Ruinan³, WANG Ke³

(1. East China University of Technology, Nanchang 330032, China;

2. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China;

3. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to simulate the strata of the Moon, a miniaturized high-yield neutron generator and an integrated neutron-gamma spectrometer were designed, and an elemental analysis library and a solution method were established, a simulated well and a ground verification platform with known element content were constructed, enabling the realization of quantitative analysis for primary elements, rare elements, and other elements within the simulated lunar subsurface. The neutron generator has a yield of between 107 and 108 N/s (corresponding to pulse and DC modes, respectively), and the detection time is in the order of minutes, which can achieve an accuracy of 5%. A breakthrough in the key technology of lightweight miniaturization for neutron-gamma spectrometers in planetary exploration missions has been accomplished through this research. This achievement has established a strong foundation for future endeavors in payload space engineering.

Keywords: lunar exploration; pulsed neutron element analyzer; spectral solving algorithm; aaa; lunar Gamma spectrometer

Highlights:

- A new technology for detecting the composition of chemical elements based on the combination of neutron generator and gamma spectrometer on the Moon was described
- The analysis of the content of 14 elements was successfully enabled by the despectral algorithm.
- For the first time in China, the 1-inch diameter gamma spectrometer was successfully applied to the pulsed neutron element analysis test, the neutron yield was better than 1×10^8 , and the detection accuracy of key elements was 0.44%.
- It has achieved a major breakthrough in the key technology of lightweight and miniaturization of gamma spectrometer and neutron generator for space application, laying a solid foundation for future aerospace engineering.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]