

文章编号: 1007-4627(2012)01-0081-04

小直径石油测井中子发生器研制

肖坤祥, 艾军, 史桂娟, 向伟, 梁川, 梅林

(中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为满足国内油田石油测井的迫切需要, 对小直径测井中子发生器进行了研发。该发生器离子源采用微型化冷阴极 Penning 离子源, 离子光学采用结构简单的单极加速系统。经实验室测试和用户现场刻度及测井表明, 研制的中子发生器具有耐高温、产额高、稳定性好等特点, 是目前国内研制的最小直径的工业测井中子发生器。所测数据与其它测井方法相比较, 地质资料符合性好, 满足了用户测井要求, 现已用于油田生产测井。

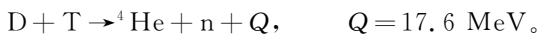
关键词: 石油测井; 离子源; 中子发生器

中图分类号: O461 **文献标志码:** A

1 引言

石油测井用的密封中子发生器是一种小型化加速器中子源^[1], 其基本结构是将离子源、加速系统、靶以及气压调节系统密封在一个陶瓷或金属管内, 形成一个小型的电真空器件, 简称中子管。测井中子管主要的优点是体积小、重量轻, 与普通放射性同位素中子源相比, 其中子产额高和单色性好, 既可输出连续时间中子谱, 也可获得石油测井中所要求的脉冲时间中子谱。不使用时, 既无中子输出也无放射性, 存储管理方便, 不需像同位素中子源那样笨重的中子和 γ 射线屏蔽防护层, 与实验室常用的小型加速器相比, 结构简单, 不需要真空系统和冷却设备, 使用成本也低。

在测井中子发生器中, 主要应用(D, T)反应获得所需的中子。



通过此反应可以获得约 14 MeV 的单能快中子。能量较高的快中子具有很强的穿透能力, 它能够穿透测井仪器的钢外壳、套管、水泥环, 射入几十厘米深的地层, 引起各种核反应。快中子的这种特性使得中子测井比电法测井、声法测井等具有独特的优势, 在石油测井中得到广泛的应用。

新研制一种小型化综合测井仪所使用的中子发生器, 可满足 C-O 比测井、中子寿命测井、氧活化测井 3 种测井模式。国内原有的中子管直径为 $\phi 30 \text{ mm}$ ^[7], 只能装配成外径 $\phi 43 \text{ mm}$ 的中子发生器。为此, 提出了新型中子发生器的研制指标, 该中子发生器具有体积小($\phi 35 \text{ mm}$, 为发生器配套研制的陶瓷中子管直径为 $\phi 27 \text{ mm}$), 重量轻($\leq 3 \text{ kg}$)、工作频率可变(频率范围 $0 \sim 20 \text{ kHz}$)、中子产额高($1.5 \times 10^8 \text{ neutrons/s}$ 以上)的特点。该产品的研制成功, 能替代进口同类产品, 还可满足国产测井仪器的需要, 使先进的中子测井技术在全国各油田得到推广和普及, 对于促进采油技术的进步有着深远的意义。

2 中子发生器的组成及原理^[2, 6]

测井中子发生器主要由中子管和靶端高压电源组成, 中子管和靶端高压电源密封在不锈钢筒内, 并在钢筒内充入几个大气压的 SF_6 气体或绝缘油。高压电源由变压器和倍压线路组成, 其作用是输出高达 -100 kV 的高压。中子管的结构如图 1 所示, 由以下几个部分组成: 产生入射粒子的部件, 即离子源^[1, 4]; 加速带电粒子的部件, 即引出、加速系统; 补偿氙气的氙气存贮器(俗称灯丝); 带电粒子

收稿日期: 2011-05-23; 修改日期: 2011-09-14

基金项目: 中国工程物理研究院基金资助项目(JM201050801)

作者简介: 肖坤祥(1975-), 男, 四川内江人, 高级工程师, 硕士, 从事工业中子管、中子发生器的研究和设计;

E-mail: xiaokun-hu@126.com

轰击产生中子的靶；玻璃-金属或陶瓷-金属的密封外壳。

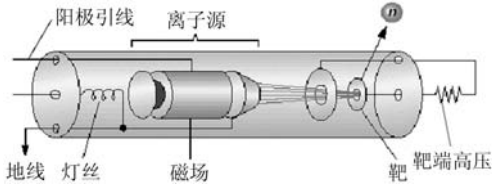


图 1 中子管的内部结构图

一般的石油测井用中子管属于充气型中子管，在未工作时管内真空度约 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ Pa，工作时，氘气从气体存储器中释放出来，整个中子管内部空间压强约 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ Pa。测井用中子管的离子源^[1]一般采用结构相对简单、寿命长的冷阴极 Penning 离子源，离子源是由阳极、阴极和永久磁铁等组成。离子源工作时，先给氘气存储器通电，使气体释放出来，根据所需离子流的大小，将压强稳定在某一范围后施加阳极电压 1.5~2.0 kV，在电磁场的共同作用下，气体电离获得所需的氘离子，氘离子流被加速系统加速并轰击氦靶，通过 $T(d, n)^4He$ 核反应产生快中子。 $T(d, n)^4He$ 核反应的截面 σ 与氘核的能量 E_d 有关，可用下式表示^[3]：

$$\sigma = \left(\frac{58}{E_d} \right) \frac{0.174^2}{0.174^2 + (E_d - 0.096)^2} e^{-1.72/\sqrt{E_d}}, \quad (1)$$

式中能量单位为 MeV，截面单位为 b。该反应在 $E_d = 0.110$ MeV 处出现共振，截面最大值可达 5 b，因此测井中子发生器可利用此反应获得较高的中子产额。

3 小直径中子发生器的研制

3.1 发生器研制

中子发生器由新研制的小型中子管和高压电源组成。在控制器的驱动下，借助于 $T(d, n)^4He$ 反应，通过控制离子源的阳极脉冲频率和脉冲宽度，可得到所需要的脉冲中子束流。中子发生器在直流稳压电源、控制器、贮氘器电源、离子源电源的配合下工作，产生满足要求的中子束流。直流稳压电源的功能是为控制器的驱动电路提供电源电压以及为中子管的贮氘器提供工作电流。离子源电源的功能是为离子源的阳极提供约 1.8 kV 电压，并决定中子发生器发射中子束流的方式。高压电源是由变

压器和高压倍加器组成，控制器的主要功能是为高压电源提供 1 kHz 的驱动脉冲，用以产生中子管工作时所需的最高约为 -100 kV 的工作靶压。

发生器的外部接口和供电参数与用户现有测井系统兼容，中子发生器的供电输入参数能满足测井系统的全自动工作模式认证刻度，使工作参数基本在其规定的范围内。

为使各型号发生器的零部件和器材能统一采购与应用，降低生产成本，提高产品的工作稳定性，在中子管靶、源结构、加速间隙、耐高压陶瓷及高压绝缘等方面可借鉴已有小型中子管。在离子源引出结构、底座结构、密封结构、引线方式等方面进行了重新设计，在确保总体尺寸和用户希望的源距前提下，满足了中子管各项技术指标要求。

中子管工作时，抑制二次电子能减小靶流、降低靶上功率、减轻电源负载，有利于中子管靶散热和中子管稳定工作。新研制的中子管采用了偏压电场二次电子抑制设计，具有结构简单、稳定可靠的优点。对引出束流在几十微安量级的小型中子管，在靶极与加速极间有 500~800 V 的电压差，基本上能抑制靶上产生的大部分二次电子流，在试验测试和实际工作中二次电子抑制效果良好。有无偏压结构的中子管抑制二次电子对比效果如图 2 所示。从图中曲线和数据可以看出，有偏压电场中子管的靶流约为无偏压电场中子管靶流的 1/2 左右，且工作时靶流稳定性也更好。

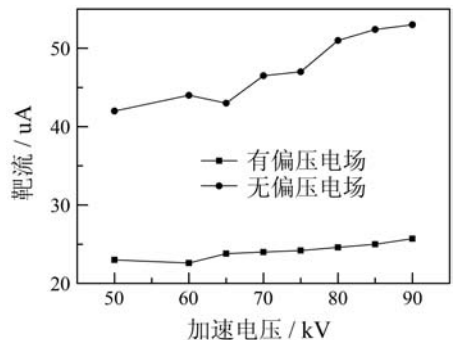


图 2 偏压电场对二次电子抑制效果的影响

高压电源的驱动器原理电路如图 3 所示，主时钟振荡器(CD4069)产生一个频率为 10.5 kHz 的脉冲信号，此信号是十分频器(MC14017)的时钟信号，十分频器输出两个频率为 1.05 kHz、脉宽为 100 μ s、幅度为 15 V、相位差为 500 μ s 的脉冲信

号,推动开关电路工作,从而在脉冲变压器初级获得 0~100 V 的重复脉冲信号,再经过脉冲变压器升压及倍压整流电路后,可获得 0~90 kV(负极性)的靶压供到中子管的靶极。同时,高压电源还提

供一个 0~500 V 的抑制极信号给中子管的抑制极以及一个 15 V 的反馈信号,该信号反馈到测井仪中,将它转换成离子源电流模拟信号,中子发生器控制板利用这一模拟信号实现对中子发生器的全自

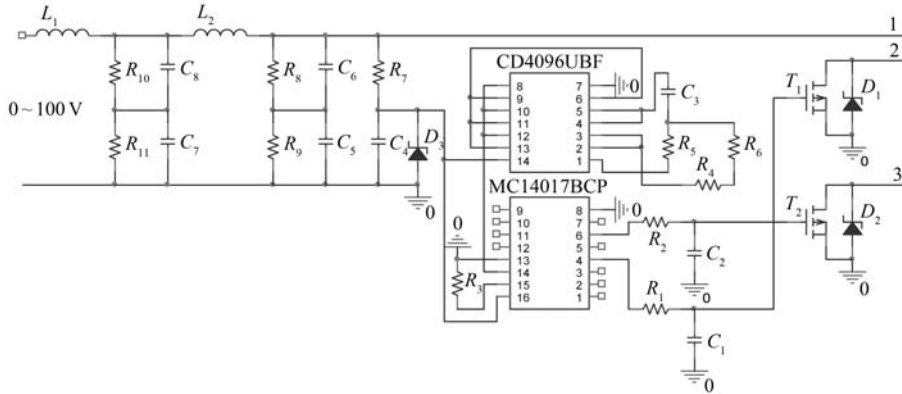


图 3 高压电源驱动电路图

动控制。

中子发生器高压电源骨架外径尺寸支撑结构最大为 $\phi 33.4$ mm,安装元器件后的绝缘外径仅有 $\phi 27$ mm,要在其骨架上安装多个元器件,输出高压既要满足耐压绝缘又要长时间稳定工作是比较困难的。为此采用了以下措施:选用介电强度和温度性能良好的绝缘材料作为电源骨架,在元件板制作工艺上采取了特殊的防闪络措施;合理设计装配线路及布放元器件,尽可能增大高压间隙。元器件在电源支撑骨架上的装配位置与电源外筒呈轴向分布,以减少内部场强的不均匀性。对高压电源的元器件进行高温高压筛选老炼,解决了该电源在 135 °C 的高温下长时间稳定工作的问题。

3.2 中子发生器测试

研制成功的中子发生器在实验室进行了中子参数测试,中子探测器采用经刻度校准后的 BF3 探头,根据测试数据所得的中子产额随时间变化曲线如图 4 所示。

在灯丝电流保持 400 mA 不变的情况下和长达 2.5 h 内,离子流、输入电压、电流、中子产额等稳定性好,完全满足了测井稳定工作要求。

将环境试验和参数调试合格的中子发生器赴用户现场进行地面刻度和现场测井,经用户实际测井验证,该中子发生器稳定性好,所测数据与其它测井方法相比较,地质资料符合性好,满足了生产测井的实际需要,该型号产品现已批量供应油田进行

生产测井。

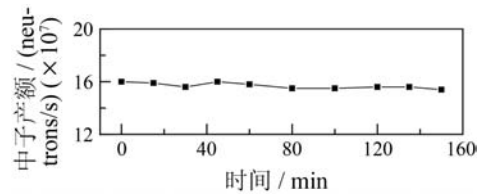


图 4 中子参数数据图

4 总结

为满足用户测井需求,我们研制了国内最小直径为 $\phi 35$ mm 的小型测井中子发生器,通过测试和用户现场测井表明,研制的小型测井中子发生器设计较为完善,工艺性能好、产品质量可靠、各项指标达到了预期要求,能替代进口同类产品,还可满足国产小型化测井仪器的需要,促进了测井技术的发展,现已批量向油田供货,解决了国内新一代小型石油测井仪器的生产急需。

参考文献 (References):

- [1] XIAO Kunxiang, ZHOU Minggui, TAN Xiaohua, *et al.* Nuclear Techniques, 2005, **28**: 550(in Chinese).
(肖坤祥,周明贵,谈效华,等.核技术,2005,**28**: 550.)
- [2] XIAO Kunxiang, ZHOU Minggui. Oil Instrument, 2004, **18** (4): 7(in Chinese).
(肖坤祥,周明贵.石油仪器,2004,**18**(4): 7.)
- [3] WEI Baojie, ZHONG Haiming. The Neutron Tube and Its

- Application Technology. Changchun: Northeast Normal University Publishing House, 1997, 52–61(in Chinese).
(魏宝杰, 钟海明. 中子管及其应用技术. 长春: 东北师范大学出版社, 1997, 52–61.)
- [4] ZHANG Huashun. Ion Source and Neutral Beam Source. Beijing: Atomic Energy Press, 1987, 125–132(in Chinese).
(张华顺. 离子源与大功率中性束源. 北京: 原子能出版社, 1987, 125–132.)
- [5] WEBBER G D. Pulsed Neutron Tool Experiments to Find the Limitations of Oxygen Activation Flow Measurements in and Outside Pipe//10th European Formation Evaluation Symposium. Aberdeen U. K. , April , 1986, 22–25.
- [6] STEVE H. The Bell Jar, 1997, 6(3/4): 2.
- [7] LIANG Feng. Well Logging Technology, 1994, 6: 449(in Chinese).
(梁峰. 测井技术, 1994, 6: 449.)

Development of Small Neutron Generator for Well Logging

XIAO Kun-xiang¹⁾, AI Jun, SHI Gui-juan, XIANG Wei, LIANG Chuan, MEI Lin

(*Institute of Electronic Engineering, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: A small neutron generator has been developed for meeting the need of well logging in oil fields. The miniature cold cathode Penning ion source and single electrode ion optics system are used in neutron generator. The good performance of the generator has been proved in the laboratory test and well logging in oil field. The generator has good characteristics, such as small diameter, high temperature resistant, high neutron output and good stability. At present, the neutron generator is the smallest logging generator in China, which has been used in oil field generally for conforming the geological data.

Key words: well logging; ion source; neutron generator