

ENT2465 长寿命中子管设计及性能测试

刘泽威, 岳爱忠*, 李兵, 赵静宜, 姜黎明, 刘炯,
麻惠生, 张晓蕾, 鲁宁, 王树声

中国石油集团测井有限公司 测井技术研究院, 陕西 西安 710077

摘要: 中子管是可控中子源测井仪的核心部件, 其工作的稳定性、耐高温、中子产额等指标对仪器的工作性能有重要影响。目前, 随着深地探测的发展, 应用于石油测井的中子管中子产额、耐高温性能、寿命、工作稳定性均有待提升。从结构、材料、制造工艺三方面, 对自成靶中子管进行优化设计, 进一步降低功耗, 提高工作时间。通过耐高温、寿命和中子产额三项指标对外径为 25 mm 的 ENT2465 样管进行了性能评估测试, 将样管置于中子实验测试平台的油槽内, 连接激励线缆, 记录样管工作过程中的温度、累计工作时间、中子产额、靶压、靶流和阳极电流。结果表明: 在靶压为 80 kV、靶流小于 60 μ A 条件下, 该样管累计使用寿命超过了 1 000 h, 其中 175 $^{\circ}$ C 下连续工作时间持续 23 h、累计工作超过 500 h, 室温下连续工作时间持续 36 h。在相同靶压、靶流条件下, 1 000 h 后中子产额仅下降 5.3%。

关键词: 中子管; 离子源; 自成靶

中图分类号: P631.817; O571.53 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2024)02-0131-06

doi: 10.7538/hhx.2024.YX.2023041

Design and Performance Test of ENT2465 Long-Life Neutron Tube

LIU Ze-wei, YUE Ai-zhong*, LI Bing, ZHAO Jing-yi, JIANG Li-ming, LIU Jiong,
MA Hui-sheng, ZHANG Xiao-lei, LU Ning, WANG Shu-sheng

Logging Technology Research Institute, China National Logging Corporation, Xi'an 710077, China

Abstract: The neutron tube is the core component of the controllable neutron source logging instrument. Its working stability, temperature resistance, neutron yield and other indicators have an important impact on the working performance of instrument. At present, with the requirement of deep logging, the neutron tube used in logging is supposed to improve neutron yield, temperature resistance, operating life and working stability. In this paper, the structure, materials and manufacturing process of drive-in target neutron tube are designed and optimized to reduce power consumption and improve operating time. The temperature resistance, operating life, and neutron yield of sample tube have tested to estimate the performance of ENT2465 with an outer diameter of 25 millimeters. Place the sample tube in the oil tank of the neutron testing platform and connect the cable. Record the temperature, cumulative working time, neutron yield, target voltage, target current and

收稿日期: 2023-04-11; 修订日期: 2023-10-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF0718500); 中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目(2020B-3714)

* 通信联系人: 岳爱忠

anode current during the work of the sample tube. The results show that under the target voltage of 80 kV and target current less than 60 μA , the accumulated operating life of the sample tube exceeds 1 000 hours, including 23 hours of continuous operation at 175 $^{\circ}\text{C}$ and more than 500 hours of accumulated operation, and 36 hours of continuous operation at room temperature. The neutron yield only decreases by 5.3% after 1 000 hours under the same target voltage and current.

Key words: neutron tube; ion source; drive-in target

核测井是利用井孔内岩层本身的放射性或采用人工辐射与井孔物质相互作用的多种效应来获取井下地层物理性质的方法,在石油测井领域具有不可替代的地位^[1]。伽马源和中子源是核测井中所用到的两种放射源。中子源主要分为同位素中子源(化学中子源)和小型加速器中子源。用于核测井的同位素中子源体积小,强度大,在存放、运输、装卸源、测井作业过程中,存在丢失、被盗、过剂量误照射、破损泄露、落井等风险^[2]。小型加速器中子源统称为中子发生器,是一种可控中子源,与同位素中子源相比,可控中子源具有发射频率可控、能量高、单色性好、可关断等特点^[3]。由于国际社会对健康、安全、环境问题(简称 HSE)和潜在的恐怖威胁敏感度提高,可控中子源替代同位素中子源,是核测井革命性变革的需要。

中子管是中子发生器的核心部件,随着深地探测的发展和需求的提高,国产中子管耐高温指标低、寿命短、中子产额低且稳定性有待提高,这些严重限制了国内可控源核测井技术和装备的发展。美国斯伦贝谢、贝克休斯等石油公司自主制造的高温长寿命测井中子管,技术指标明显优于国内产品,由于美国和西方国家对中子管技术封锁,国外石油公司也不提供测井中子管技术和产品。因此,急需研制测井高性能中子管,在耐高温指标、使用寿命、中子产额等方面取得突破,并形成配套的中子管生产工艺和标准,以满足新一代核测井装备的发展。

本工作拟从离子源结构设计、材料优选和制造工艺等方面对自成靶中子管进行优化设计,以降低功耗,提高无故障工作时间,通过对耐高温、寿命和中子产额三项指标对外径 $\phi 25\text{ mm}$ 样管进行性能评估测试,为高性能自成靶中子管定型设计提供参考。

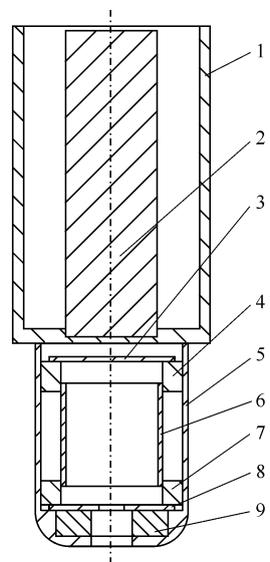
1 中子管结构设计

中子管是可控中子源的核心部件,基于潘宁

离子源结构的中子管具有体积小、可在低气压下稳定工作、工作寿命长、供电系统简单等特点,广泛应用于石油测井领域^[4]。本工作描述的自成靶中子管主要由离子源、加速系统、氘-氚靶(D-T靶)(包括靶二次电子抑制)、D-T 存储器(气压调节系统)四部分组成,将这四部分密封在一支陶瓷管内,构成一支结构简单紧凑和使用方便的电真空器件。

1.1 离子源结构设计

用于测井中子管的离子源一般采用冷阴极潘宁离子源,这种离子源具有结构和供电简单、寿命长和易于小型化等优点,其结构示于图 1,主要由磁钢罩、主磁钢、阴极、阳极上瓷环、离子源罩、阳极、阳极下瓷环、输出阴极、引导磁钢组成。阳极上下瓷环将阳极筒上下挤压固定,并由此两个阳极瓷环与两阴极隔离绝缘。同时,用离子源罩和封接环将整个离子源包围在内。

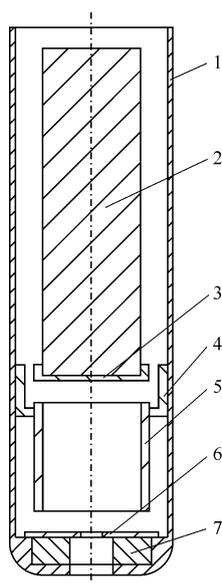


1—磁钢罩,2—主磁钢,3—阴极,4—阳极上瓷环,
5—离子源罩,6—阳极,7—阳极下瓷环,
8—输出阴极,9—引导磁钢

图 1 常规离子源结构示意图

Fig. 1 Ion source structure diagram

分析离子源结构,存在如下问题:(1) 主磁钢置于电离室外,受磁钢罩影响,没有形成闭合磁路,会减弱电离室内部的磁场强度,不利于束缚电子的运动轨迹;(2) 两个阳极瓷环的内壁分别与阴极和输出阴极直接接触,随着中子管工作时间的持续,由于离子溅射,两个瓷环内壁表面会形成一层金属膜,当这层金属膜积累到一定程度时,使瓷环内壁与两阴极之间绝缘程度变差,阳极会形成一定的本底电流,严重时甚至短路。为了避免上述现象的发生,对图 1 结构的离子源进行改进设计,结构示意图示于图 2。从图 2 可知:将主磁钢完全置于离子源罩内,主磁钢的磁力线通过导磁材料形成闭合磁回路,增强了电离室内的磁场强度,有利于紧密束缚电子,提高电离密度。同时,将图 1 中两个阳极瓷环设计为单个阳极瓷环,并且将阳极焊接在阳极瓷环内。由于离子溅射的轨迹为直线,离子从两阴极表面发生溅射时,瓷环内壁不会形成金属膜,从而可以保证阳极筒和两个阴极之间的良好绝缘。通过此种结构设计,中子管长时间工作也不会因离子溅射而使阴阳极之间绝缘变差或发生短路现象。



1——离子源罩,2——主磁钢,3——阴极,4——阳极瓷环,
5——阳极,6——输出阴极,7——引导磁钢

图 2 改进离子源结构示意图

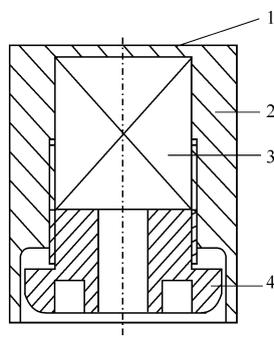
Fig. 2 Improved ion source structure diagram

1.2 自成靶结构设计

根据制造工艺不同可以将靶分为预制靶和自成靶^[5]。预制靶是靶内提前充满氘再组装为中子

管,此类中子管的排气温度不能太高。在 200 °C 以下,随着温度的升高靶内氘气释放率缓慢增加,当温度超过 250 °C 时,释放率增加迅速。因此,对于预制靶中子管来说,排气温度最高不能超过 250 °C,在该温度下排气,管内零件除气不彻底,会导致中子管工作不稳定。此外,预制靶内的氘会被氦置换,浓度降低,中子产额降低速率快,从而影响中子管的使用寿命。自成靶在靶内不吸气,由储存器吸入 D-T 等量混合气体,当中子管工作时,被加速的 D-T 离子逐渐注入靶内,经过一段时间后,靶内 D-T 含量达到饱和,便形成了自成靶。在制管时,由于不受靶内氘气的影响,所以排气温度可以达到 400 °C 以上,管内除气彻底。此外,由自成靶构成的中子管,靶内 D-T 含量在工作中自动补偿而保持中子产额输出稳定。

通过上面两种靶类型对比表明,自成靶中子管排气温度高于预制靶中子管,中子输出稳定性和温度稳定性也都优于预制靶中子管。因此,采用自成靶作为中子管的靶制造工艺。自成靶由靶基和靶膜两部分组成。对于外径 $\phi 25$ mm 中子管,靶结构一般采用平面靶(图 3),靶表面积为 2.4 cm²,中子产额难以达到 1×10^8 /s。此外,由于靶表面积小,散热效果差,很容易从靶内释放出 D-T 气体。



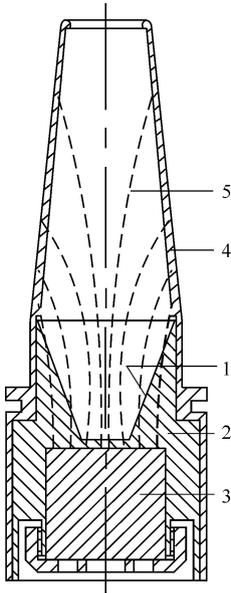
1——靶面,2——靶基,3——磁钢,4——磁钢托

图 3 平面靶结构示意图

Fig. 3 Plane target structure diagram

经过调研和分析后,对靶结构进行了改进设计,由平面靶改为梯形靶,梯形靶和靶电子抑制结构示意图示于图 4。改进后的靶表面积达到 6.1 cm²,在相同直径条件下,梯形靶增加了 D-T 在靶表面的反应面积,梯形靶表面积较平面靶扩大两倍多,靶承受离子束的轰击面积也扩大两倍多,从而提高了中子产额。同时,通过采用散热良

好的无氧铜和新型散热材料作为靶基材料,可增强靶的散热能力。



1—靶面,2—靶基,3—磁钢,
4—加速极,5—磁力线

图4 梯形靶和靶电子抑制结构示意图
Fig. 4 Trapezoidal target and electronic suppressor diagram

2 材料优选

2.1 离子源材料优选

离子源性能的优劣与所选用材料有直接关系。为避免形成磁分路导致离子源内部磁场强度降低,图2中阳极筒应选用非磁性材料,通过对钼和不锈钢进行反复研究,从性能上来说,这两种材料均可以作为阳极材料,但钼的成本远高于不锈钢,所以在实际设计中选用不锈钢作为阳极材料。

阴极材料是影响气体放电的最敏感部分,根据中子管对阴极材料性能的要求,图2中阴极和输出阴极应选用二次电子发射系数^[6](δ_m)大、溅射率低的材料。同时还需根据中子管结构工艺要求,将可能应用于阴极的5种材料相关特性列入表1。由表1可知,五种材料的二次电子发射系数(δ_m)较大,所需的原电子能量(E_{pm})不高,适合做阴极材料。基于这种性能,综合考虑制作工艺要求,最终选定钼材料作为阴极材料,因为钼材料有更低的原电子能量,而且为非磁性材料,不会影响离子源内部的磁场强度。

对于图2中主磁钢和引导磁钢的材料选用根

据中子管的结构及工作温度确定。铝镍钴磁钢磁能积较低,稀土磁钢工作温度和居里温度低,而钐钴磁钢工作温度为300~350℃,居里温度为800℃,可以满足设计要求,因此,选用钐钴磁钢。

表1 五种金属的 δ_m 和 E_{pm}

Table 1 δ_m and E_{pm} characteristics of five materials

材料	δ_m	E_{pm}/eV
Fe	1.32	400
Co	1.35	450
Ni	1.35	450
Mo	1.25	375
Ta	1.25	600

2.2 靶材料优选

靶材料包括靶基材料和靶膜材料。靶基材料应选择熔点高、在氢气氛围中强度高、吸收氢同位素少的金属,常用材料有钨、钨和铜等。此外,还有银、金、铂、钽、镍基不锈钢和铝等。由于无氧铜材料的氧含量极少,而且其散热效果优于其它材料,可有效防止靶膜过热而释气,所以选用无氧铜作为自成一体的中子管的靶基材料较为适宜。

靶膜常用材料为钛,此外还有锆、铪和铪等元素也可作为靶膜材料。由于钛是迄今为止发现吸氢密度最高的单质金属材料,且价格便宜,制备容易。因此,选用钛作为中子管的靶膜材料。

3 制造工艺

中子管工艺包括镀膜、封接、排气、充D-T混合气体、老炼等工艺。本工作主要研究排气和老炼工艺。

3.1 排气工艺

排气质量的优劣直接影响到中子管的性能好坏。排气不彻底,除了影响中子管耐压性能外,管内残留的杂气还会降低离子流的有效成分,自然降低了中子产额,在其它条件相同的情况下,因排气质量的差别,中子产额可相差1倍以上。同时,由于储存器对其它气体的吸气速率远低于D-T气,杂气的存在严重影响了管内气压调节效果,进而影响了中子管工作的稳定性。

通过改进完善排气设备和工艺,实现对中子管的彻底排气:(1)完善排气设备功能,将中子管内部真空排气改为中子管内外同时真空排气(即内外双排气工艺),既可以排除管内内表面杂气,

也可以排除管外外表面杂气,通过改进手动升降温度为自动升降温度,可以有效控制中子管排气温度的平稳升降,便于排出杂气的连续性;(2) 提高排气温度,更容易排尽中子管内外表面深层杂气;(3) 延长排气时间,可以保证中子管排气更彻底。中子管高温排气炉中的布局示于图 5。



图 5 中子管高温排气炉中的布局

Fig. 5 Layout of neutron tube high-temperature exhaust furnace

3.2 老炼工艺

老炼工艺主要是将 D-T 混合气体注入靶内,中子管工作一定时间后,使靶内 D-T 混合气体达到饱和状态,中子产额也达到了稳定状态。老炼工艺主要包括两方面:(1) 冷高压老炼:在不电离的情况下,逐步增高靶压,使中子管在靶压为 130 kV 内长时间工作而不出现打火现象;(2) 电离状态下老炼:在电离状态下,逐步增高靶压,将 D-T 混

合气体逐渐注入靶内,经过 10~20 h,使靶内 D-T 混合气达到饱和状态,中子产额和工作情况均达到了稳定状态,并且在 130 kV 下,不出现打火现象,至此老炼工作完成。

4 性能测试

工作温度、中子产额、使用寿命和产额输出稳定性是衡量中子管性能的四项重要技术指标。本单位具有通过环境影响评价认证的中子实验测试平台。中子管实验测试平台和打靶大厅示于图 6。测试油槽置于实验间中间,距实验间墙体 3 m 以上以减少反射中子对探测器的影响。中子探测器在中国原子能科学研究院经标定后,获取中子计数与中子产额的校正系数。控制系统置于实验间外操作室。

性能测试所需设备及测试流程如下。

(1) 将中子管置于充满绝缘油的油槽内,通过加热绝缘油达到预设温度,实现不同工作温度条件下的性能测试。

(2) 将中子探测器与中子管置于同一高度,且与标定测试相同距离处,对中子进行探测,获取中子产额。

(3) 将中子管各电极与相应激励线缆连接。

(4) 在工作温度测试中,设置阳极电源为脉冲模式,频率 10 kHz、靶压为 70~80 kV,记录油槽温度及中子产额,观察中子产额稳定性。工作温度测试结果示于图 7,分别在常温和 175 °C 高温环境下对样管的中子产额、工作温度进行了测试。ENT2465 样管在常温-高温(175 °C)-常温的

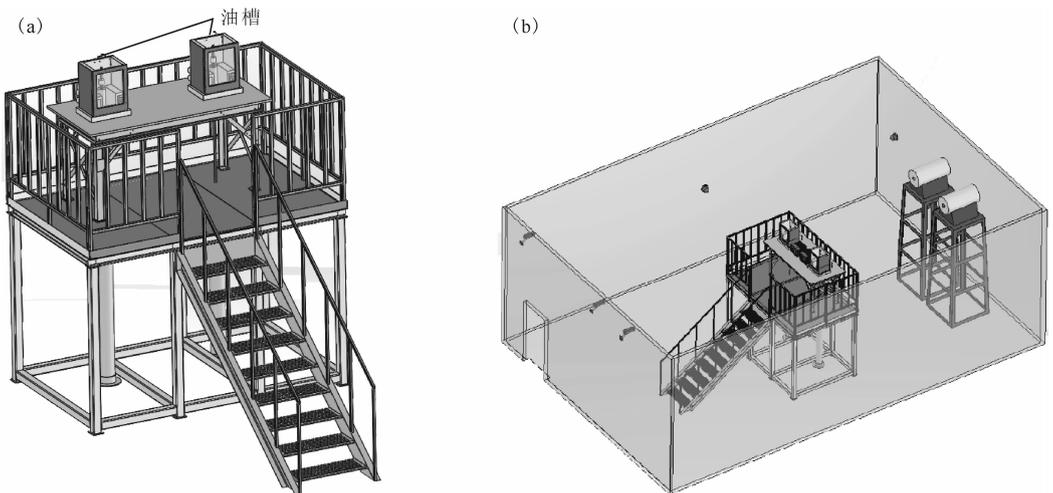


图 6 中子管实验测试平台(a)和打靶大厅(b)

Fig. 6 Neutron tube experimental test platform(a) and neutron emission chamber(b)

温度条件下,中子产额达到 $1.0480 \times 10^8/s$,并且在 175°C 环境中连续工作 2h ,中子产额稳定。

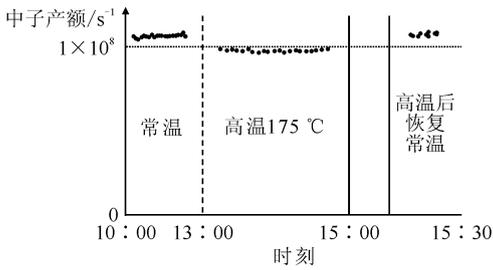
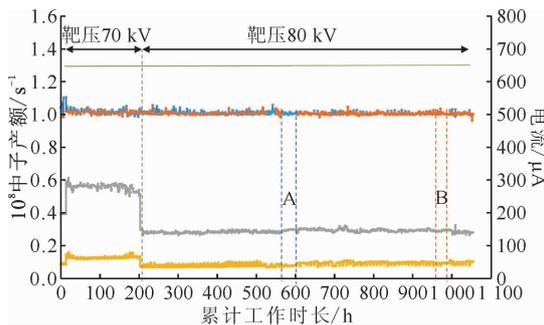


图7 常温-高温(175°C)-常温测试结果

Fig. 7 Test results of room

temperature- 175°C -room temperature

(5) 在使用寿命测试中,阳极电源为脉冲模式,频率 10kHz ,通过调节靶压使中子产额 $\geq 1 \times 10^8/s$,记录阳极电流、靶流及工作时长。使用寿命测试结果示于图8。由图8可知:在中子产额高于 $1 \times 10^8/s$ 情况下,ENT2465样管累计使用寿命超过 1000h , 175°C 高温累计工作超过 500h ,不论是常温还是 175°C 高温工作环境下,该样管均



— 常温下的中子产额,
— 175°C 高温的中子产额,
— 阳极电流, — 靶流
A区域——常温下不间断工作 36h ,
B区域—— 175°C 下不间断工作 23h

图8 使用寿命指标测试结果

Fig. 8 Test results of operating life

具有良好的长时间连续工作性能及稳定性。此外,在靶压/靶流为 $70\text{kV}/46\mu\text{A}$ 条件下,开始测试时和累计工作 1000h 后的中子产额分别为 $1.0481 \times 10^8/s$ 和 $0.9928 \times 10^8/s$,两者相比可以看出,中子产额只下降了 5.3% ,并且工作性能稳定。

5 结论

通过改进离子源和自成靶结构,提高了离子源工作的稳定性,降低了由于离子溅射对阴阳极之间绝缘的影响,创新设计梯形靶结构,提高了靶表面积,使承受离子束轰击的面积扩大两倍多,从而提高中子产额。通过优选离子源和靶材料提高了中子管的排气温度,避免形成磁分路而降低离子源内部的磁场强度。最后,通过改进制造工艺采用内外双排气工艺使零件去气更彻底,进一步提升中子管工作性能。测试结果表明,外径为 25mm 的ENT2465型中子管中子产额稳定,耐高温可达 175°C ,累计使用寿命超 1000h ,且工作稳定,解决了现阶段超深复杂井下环境长时间测井作业的技术难题。

参考文献:

- [1] 黄隆基. 核测井原理[M]. 东营:石油大学出版社, 2000.
- [2] 杨建峰. 测井仪可控式放射源替代伽马源和化学源可行性的分析[C]//中国核学会. 2007年中国核学会核技术工业应用分会学术年会,湖北宜昌. 2007:67.
- [3] 谢雨洁. 可控源元素测井仪数字化能谱采集电路设计[D]. 成都:电子科技大学, 2022.
- [4] 万瑞芸,谈效华,肖坤祥,等. 潘宁离子源研究概述[J]. 机电工程技术, 2009, 38(9): 17-19, 69, 159.
- [5] 褚庆军,于传武,姜世莲,等. 用于孔隙度测井的中子发生器产额影响研究[J]. 测井技术, 2022, 46(3): 262-267.
- [6] 谢爱根,裴元吉,孙红兵,等. 高能原电子能量与金属的有效真二次电子发射系数的关系[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(8): 1059-1062.