

Radiation Environmental Impact Assessment of Neutron Generators

Chunna Diao

Radiation Environment Supervision Station of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi Xinjiang
Email: diaochunna@126.com

Received: May 21st, 2020; accepted: Jun. 3rd, 2020; published: Jun. 10th, 2020

Abstract

Objective: In this paper, the theoretical calculation method is used to estimate the influence of the neutron generator on the people and the environment. **Methods:** The radiation dose rate at 0.3 m on the external surface of the neutron generator was calculated at 1 h after shutdown using the estimation model recommended in the literature. **Results:** The estimated annual additional effective dose equivalent rate was 0.046 mSv/a for professionals and 0.005 mSv/a for the general public. **Conclusion:** The estimated results are all lower than the occupational personnel dose constraint value of 5 mSv/a and the public personnel management limit value of 0.1 mSv/a specified in the basic standard for ionizing radiation protection and radiation source safety (GB18871-2002). The neutron generator logging process will not cause harm to the environment and the public.

Keywords

Neutron Generator, Radiation, Environmental Impact, Dose

中子发生器辐射环境影响估算

刁春娜

新疆维吾尔自治区辐射环境监督站, 新疆 乌鲁木齐
Email: diaochunna@126.com

收稿日期: 2020年5月21日; 录用日期: 2020年6月3日; 发布日期: 2020年6月10日

摘要

目的: 本文运用理论计算方法, 估算测井作业过程中中子发生器对周围人员和环境产生影响。 **方法:** 利

用文献推荐的估算模式, 计算停机后1 h中子发生器外表面0.3 m处的辐射剂量率水平。结果: 估算的职业人员所受年附加有效剂量当量率为0.046 mSv/a, 公众人员受到的附加有效剂量当量率为0.005 mSv/a。结论: 估算结果均低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)中的规定的职业人员剂量约束值5 mSv/a, 公众人员管理限值0.1 mSv/a, 中子发生器测井过程中不会对环境 and 公众产生危害。

关键词

中子发生器, 辐射, 环境影响, 剂量

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

测井中子发生器现主要应用在地层岩性、含油饱和度、空隙度及地层动态测井, 是氧活化水流测井、中子寿命测井以及脉冲伽马能谱测井等仪器的核心部件。随着中子发生器越来越多的应用前景, 与之相关的辐射防护问题也日益引起关注。在中子发生器测井过程中, 对环境和公众的危害, 主要由产生的中子、 γ 射线造成。本文从理论计算方面来估算测井应用作业过程中子发生器对周围人员和环境产生一定的放射性危害。在使用的中子发生器内的氚靶为氟化靶, 氟化靶是将氟吸附在金属薄层内制得。中子发生器的氚靶在累计使用 100 小时后, 需连同中子发生器送回生产厂家进行更换处理。在正常工况下, 中子发生器不产生放射性污水和废气。

2. 载运中子发生器(含氚靶部分)的车辆(简称运源车)辐射监测要求

依据 GB11806-2019《放射性物质的安全运输规程》和 GBZ118-2020《油(气)田非密封型放射源测井卫生防护标准》, 运源车内外的空气比释动能率不得大于表 1 的控制值。

Table 1. Control values of specific release kinetic energy ratio of air inside and outside the vehicle

表 1. 运源车内外的空气比释动能率控制值

| 监测位置 | 空气比释动能率($\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$) |
|-----------|---|
| 驾驶员座椅 | 外照射剂量应小于相应的年剂量限值 |
| 车厢外表面 | 25 |
| 车厢外 1 m 处 | 2.5 |

3. 中子发生器井下测井时井口理论计算

一般应用中子发生器(脉冲中子测井仪)石油测井时, 放置井下至井口大于 3000 m 后方供电开始测量, 中子管发射出的中子几乎都是快中子, 在屏蔽层中主要通过散射和非弹性散射损失能量, 最后被井水和岩层物质吸收, 主要放出 γ 射线[1]。由实际经验可知中子的危害与 γ 射线的危害相比, 中子是主要的, 因此, 主要考虑中子的屏蔽, 中子的屏蔽一般较为复杂, 除考虑快中子的减弱过程和吸收过程外, 也就

是屏蔽层对中子是足够的话,还必须满足对 γ 射线的安全屏蔽,为此将中子剂量增加一倍。

利用《中子发生器及其应用》[2] (原子能出版社)推荐的估算模式和参数,估算脉冲中子发生器在井下大于 200 m 测井时,井口附近的剂量如下:

利用水层厚度公式:

$$T_{\text{H}_2\text{O}}(\text{cm}) = T_{1/10} \cdot \log \eta \quad (1)$$

式中: $T_{\text{H}_2\text{O}}(\text{cm})$ ——水层厚度(水深 200 m), $T_{\text{H}_2\text{O}}(\text{cm}) = 2 \times 10^4 \text{ cm}$;

$T_{1/10}$ ——水中的 1/10 减弱厚度值 $T/10$, ($T_{1/10} = 40 \text{ cm}$);

η ——中子减弱比。

再利用中子减弱比公式:

$$\eta = \varphi_0 / \varphi_{mp} (1/R)^2 \quad (2)$$

求出关心点 R (井口)处中子注量率 φ_{mp} ($\text{n/s} \cdot \text{cm}^2$)。

式中: φ_0 ——离靶 1 cm 处的中子注量率, ($1.5 \times 10^8 \text{ n/s} \cdot \text{cm}^2$);

φ_{mp} ——离靶 R (cm)处最大允许的中子注量率, ($\text{n/s} \cdot \text{cm}^2$);

R ——井口到中子发生器的距离,水下 200 m, $R = 2 \times 10^4 \text{ cm}$ 。

中子剂量率公式:

$$Hn = 3.6 \times 10^3 \cdot \varphi_{mp} \cdot d_H \quad (3)$$

式中: Hn ——经水屏蔽后井口处的中子比释动能率, $\mu\text{Gy/h}$; d_H ——中子剂量转换因子(各向同性照射),根据《油(气)田测井用密封型放射源卫生防护标准》(GBZ142-2002)附录 B,查出 $En = 14 \text{ MeV}$ 时, $d_H = 3.33 \times 10^{-10} \text{ Sv}/(\text{n/cm}^2)$ 。

根据公式(1)查得: $T_{1/10} = 40 \text{ cm}$ (水), $t_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \times 10^4 \text{ cm}$, 则中子减弱比 $\eta = 10^{500}$ 。

由公式(2)求得: $\varphi_{mp} = 0.375 \times 10^{-500} \text{ n/s} \cdot \text{cm}^2$ 。

由公式(3)求得: $Hn = 4.4955 \times 10^{-507} \text{ Sv/h}$ 。

中子被探测的岩层吸收中子后会放出一些 γ 射线,照射量约为中子照射剂量当量的两倍。 γ 射线贡献值为 $2Hn = 8.991 \times 10^{-507} \text{ Sv/h}$ 。

中子和 γ 射线的贡献 $Hn + 2Hn = 1.349 \times 10^{-506} \text{ Sv/h}$ 。

每口井测量时间平均 3~5 h。

则每口井井口总剂量 $4.046 \times 10^{-506} \text{ Sv} \sim 6.743 \times 10^{-506} \text{ Sv}$ 。

由上述计算结果可得出:在进行中子发生器(脉冲中子氧活化水流测井)测井时,每次测井平均时间取 5 h,每年按测井最大量 100 口井(工作量由北京紫贝龙科技股份有限公司库尔勒分公司提供),测井作业人员的年附加有效剂量当量为 $6.743 \times 10^{-506} \text{ Sv} \times 100 \text{ 口井} = 6.743 \times 10^{-504} \text{ Sv/a}$,远远低于背景值;公众人员取职业照射的 1/16,为 $4.215 \times 10^{-505} \text{ Sv/a}$,远远低于背景值。

以上理论计算结果表明测井作业在 200 m 以下时,对井口附近无辐射影响,对井口附近的工作人员及公众是安全的。

4. 中子发生器活化剂量估算

当中子发生器在井下工作时,快中子对测井仪本身的材料进行照射,使氚靶被激活,中子发生器停止工作后,中子发生器本身仍会释放出 γ 射线。参照其他脉冲中子发生器连续工作 3 h,关机后不同时间仪器周围的 γ 辐射剂量率见表 2。

Table 2. The peak dose rate around the instrument after the pulsed neutron generator is turned off (after deducting the background value)**表 2.** 脉冲中子发生器关机后仪器周围的 γ 剂量率(扣除本底值后)

| 距离(m) | 10 min 后剂量率($\mu\text{Sv/h}$) | 1 h 后剂量率($\mu\text{Sv/h}$) |
|-------|---------------------------------|------------------------------|
| 0.05 | 34 | 12 |
| 0.3 | 3.0 | 1.0 |
| 1 | 0.8 | 0.02 |

由表 2 中的数据可看出: 中子发生器连续工作 3 h, 关机 1 h 后 1 m 处的剂量率是 0.02 $\mu\text{Sv/h}$ 。现场调查, 拟测井工作场所和运输中子发生器测井车周围的本底 X、 γ 辐射致空气吸收剂量率检测结果在 0.080~0.109 $\mu\text{Gy/h}$ 之间。叠加本底后 1 m 处的剂量率在 0.100~0.111 $\mu\text{Gy/h}$ 之间; 当地天然贯穿辐射室外剂量率在 0.0762~0.218 $\mu\text{Gy/h}$; 脉冲中子发生器关机 1 h 后 1 m 处的剂量率在环境天然贯穿辐射剂量率正常水平范围。因此, 要求在井口周围有工作人员情况下, 测井中子发生器在井下工作深度停机 30 min 后到提升至井口的时间不得少于 1 h; 在井口周围无工作人员情况下, 从停机后到中子管装箱时间不得少于 1 h。

由中子发生器井下测井时井口理论计算可知, 该中子发生器在非使用状态下的库存、搬运过程以及正常的测井操作过程中, 对操作人员的辐射影响基本可忽略。主要的辐射影响是测井工作完成后, 中子发生器因被活化而短时间内对工作人员的辐射照射。以停机后 1 h 中子发生器外表面 0.3 m 处的辐射剂量率水平估算工作人员一年内的可能受照剂量:

年附加有效剂量当量计算公式如下:

$$E = \sum W_r \cdot H_T = \sum W_T \cdot \sum W_r \cdot D = \sum W_T \cdot \sum W_r \cdot \dot{D} \cdot T \quad (4)$$

其中: E ——有效剂量(Sv/a);

H_T ——组织或器官 T 所接受的当量剂量(Sv/a);

W_T ——组织或器官 T 所接受组织权重因子, 对全身取 1;

W_r ——辐射权重因子, 对 X、 γ 射线取 1;

\dot{D} ——X、 γ 致空气吸收剂量率(Gy/h);

T ——年受照时间(h/a)。

参数选择: \dot{D} 为实际测量值减去该地区的环境本底值后的数值, T 为工作人员一年内所接受的照射时间。

1) 职业人员附加受照剂量估算

根据测井公司提供的测井数量, 每年不大于 100 次, 由两个测井小队轮流操作。每次测井后拆卸设备、装车累计受照剂量时间按照 0.5 h 计算, 本着偏安全考虑时间翻倍。操作过程中操作人员距离设备的最近距离在 0.3 m 左右。环境本底值为 0.080~0.109 $\mu\text{Gy/h}$, 此处取最小值 0.080 $\mu\text{Gy/h}$ 。

职业人员所受的年附加有效剂量当量估算:

$$[(1.0 - 0.080) \times 1] \mu\text{Sv} \times 50 \text{次/年} = 0.046 \text{ mSv/a}$$

从事中子发生器测井活动职业人员所受的年附加有效剂量当量估算值为 0.046 mSv/a。低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》[3] (GB18871-2002) 中的规定的职业人员剂量约束值 5 mSv/a。

2) 公众人员附加受照剂量估算

由于测井作业均在人烟稀少的戈壁滩、沙漠上进行, 公众人员受到的放射性影响的可能性几乎没有,

本着偏安全角度考虑,选择职业人员的十分之一(0.005 mSv/a)作为公众人员附加受照剂量值。低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)中的规定的公众人员管理限值 0.1 mSv/a。

5. 中子发生器井下测井时操作区边界划分理论计算

中子发生器测井时在井下 3000 m 以下进行测井,通过中子发生器井下测井时井口理论计算可知,测井时中子发生器距井口 200 m 时,井口处的剂量率都远远低于背景值。但出于辐射安全和降低事故时的辐射影响考虑,根据《油(气)田测井用密封型放射源卫生防护标准》(GBZ142-2002)规定,室外操作放射源时,须在空气比释动能率为 2.5 $\mu\text{Gy/h}$ 处的边界上设置警告标志(或采取警告措施),防止无关人员进入边界以内的区域(按照从严格管理的规定,以上区域内划定为监督区)。

计算中子发生器作业的控制边界时,可认为中子发生器作业于井口位置处(事故状态),此时,中子发生器对公众所致剂量为最大,以此计算控制边界对公众和职业人员来说是偏安全考虑的。边界计算公式根据《中子发生器及其应用》(原子能出版社)中推荐的模式计算:

$$R = \left[3600 \times s \times d_H / (4\pi \times D \times 1.1) \right]^{1/2} \quad (5)$$

式中: s ——中子发生器源强(n/s),这里 $s = 1.5 \times 10^8$ n/s; d_H ——中子剂量转换因子(各向同性照射),根据《油(气)田测井用密封型放射源卫生防护标准》(GBZ142-2002)附录 B,查出 $E_n = 14$ MeV 时, $d_H = 3.33 \times 10^{-4} \mu\text{Sv}/(\text{n}/\text{cm}^2)$; D ——控制边界比释动能率, $D = 2.5 \mu\text{Sv/h}$ 。

由式 8 可计算得出, $R = 2282 \text{ cm} = 22.82 \text{ m}$ 。

由上述计算结果可知,中子发生器测井作业过程中,设置约 23 m 的测井操作区边界即能满足《油(气)田测井用密封型放射源卫生防护标准》(GBZ142-2002)规定的管理要求。从辐射防护最优化的角度考虑,根据《石油测井中子发生器及中子管技术条件》(SY/T5419-2007)的要求(在没有辐射屏蔽条件的情况下,应将距产品不小于 30 m 的区域划为安全防护区,设置明显标志,设专人警戒,确保区内无人,方可发射中子),建议选取 30 m 划为测井操作区,并在边界实施可行、有效的警戒线、警示标志以及其他安全措施。

6. 小结

经理论计算,正常工况下,中子发生器操作人员所受的最大有效剂量为 $6.743 \times 10^{-504} \text{ Sv/a}$,低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)中“剂量限值”的要求。以停机后 1 h 中子发生器外表面 0.3 m 处的辐射剂量率水平,估算的职业人员所受年附加有效剂量当量率为 0.046 mSv/a,公众人员受到的附加有效剂量当量率为 0.005 mSv/a。以上结果均低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)中的规定的职业人员剂量约束值 5 mSv/a,公众人员管理限值 0.1 mSv/a。

应用中子发生器(脉冲中子测井仪)石油测井时,放置井下至井口大于 3000 m 后方供电开始测量,其井口处产生的辐射对地面环境已无影响。使用的中子发生器内的氚靶为氟化靶,氟化靶是将氚吸附在金属薄层内制得。中子发生器的氚靶在累计使用 100 小时后,需连同中子发生器送回生产厂家进行更换处理,并与厂家签订相关的回收协议。在中子发生器厂家不回收废氚靶时,公司必须严格按照《关于做好放射性废物(源)收贮工作的通知》中的要求,使用 V 类放射源的单位,应将 V 类废旧放射源进行包装整备后,交送有相应资质的社会放射性废物集中贮存单位(含生产单位)贮存[4]。

本文从理论估算角度,探讨了中子发生器在测井应用作业过程中对周围人员和环境产生的放射性危害影响。随着中子发生器使用的越来越广泛,对其管理和辐射防护要求也越来越高,在执行国家规定的标准下,采取可行的辐射防护措施方法,特别是减少不必要的辐射发生很有必要。从辐射防护最优化的

角度考虑,应严格划分测井操作区,并在其边界实施可行、有效的警戒线、警示标志以及其它安全措施[5]。当测井现场由于空间有限无法按照以上划分操作区时,应根据现场实际情况设置警示标志,限制周围的人员活动。

参考文献

- [1] 杨本,王云飞.石油测井中子发生器辐射防护与安全管理[J].现代科学仪器,2011(5):135-137.
- [2] 刘林茂,刘雨人,景士伟.中子发生器及其应用[M].北京:原子能出版社,2005:272.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局.电离辐射防护与辐射源安全基本标准(GB18871-2002) [S].北京:中国标准出版社,2002.
- [4] 刘博.石油测井中子发生器辐射防护与安全管理[J].当代化工研究,2017(3):77-78.
- [5] 王晓涛,彭慧,许忠杨,王寅宁,李雪琴.测井用密封型中子发生器管理建议[J].中国职业医学,2017,44(4):478-481.