

唐晓川, 杜一滨, 王宇莹, 等. γ 测井仪野外核查装置设计过程中的理论计算及验证[J]. 世界核地质科学, 2025, 42(3): 630-639. doi: 10.3969/j.issn.1672-0636.2025.03.013

TANG Xiaochuan, DU Yibin, WANG Yuying, et al. Theoretical calculations and validation in the design of field verification equipment for gamma loggers[J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(3): 630-639(in Chinese).

γ 测井仪野外核查装置设计过程中的理论计算及验证

唐晓川, 杜一滨, 王宇莹, 管少斌, 沈长枫

1 核工业航测遥感中心, 河北 石家庄 050002

2 河北省核辐射测量技术重点实验室, 河北 石家庄 050002

摘要 镭源作为铀矿勘查工作中 γ 测井仪等放射性测量仪器的野外核查标准源, 发挥了检测仪器计量性能的良好作用。但受限于国家安全、环保政策, 我国现有固体镭源数量难以满足铀矿勘查工作量日益增长的需求, 急需开展替代核查装置的研制工作。设计采用天然铀矿粉等材料研制核查装置, 对放射性测量仪器进行期间核查。依据 γ 辐射场理论, 计算了核查装置的几何尺寸对内部 γ 场的影响关系, 并通过实验验证。内部钻孔直径50 mm、钻孔轴向长度600 mm的环状柱体核查装置, 可以保证核查装置中心具有200 mm的饱和坪区, 为探测器的便捷放置留有至少100 mm的冗余。在未达到饱和厚度前, 内部照射量率与水平方向矿层厚度正相关。通过理论计算获得了 γ 测井仪核查装置的实用几何尺寸, 避免了大量保守试验的材料浪费和时间浪费。

关键词 γ 测井仪核查装置; 几何尺寸; γ 场理论; 期间核查

中图分类号 TL99 文献标志码 A 文章编号 1672-0636 (2025) 03-0630-10

Theoretical calculations and validation in the design of field verification equipment for gamma loggers

TANG Xiaochuan, DU Yibin, WANG Yuying, GUAN Shaobin, SHEN Changfeng

1 Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China

2 Key Laboratory of Hebei Province on Nuclear Radiation Measurement Technology, Shijiazhuang 050002, China

Abstract: As the field verification standard for radioactive measuring instruments such as gamma loggers in uranium exploration work, radium sources have played a good role in controlling the metrological performance of the instruments. However, due to national security and environmental protection policies, the existing number of solid radium sources in China can hardly meet the increasing demand of uranium exploration workload, and there is an urgent need to carry out the development of alternative verification devices. It is planned to use natural uranium ore powder and other materials to develop verification devices to verify the radioactivity measuring instruments during the period. Based on the theory of γ radiation field, the relationship between the geometry of the verification device and the internal γ field was calculated, and it was

基金项目: 中国核工业地质局基础地质项目(编号: 201732-3、201944-2)资助

收稿日期: 2025-03-10 **改回日期:** 2025-03-21

第一作者: 唐晓川, 男, 1984年生, 高级工程师, 博士, 主要从事放射性勘查计量、核技术应用方面的工作。E-mail: insidelook007@163.com

Supported by Basic Geology Project of China Nuclear Geology (No. 201732-3, 201944-2)

Received date: 2025-03-10 **revised date:** 2025-03-21

First author: TANG Xiaochuan, male, born in 1984, senior engineer, PhD, focusing on radiological survey metrology, nuclear technology applications. E-mail: insidelook007@163.com

experimentally verified that an annular column verification device with an internal bore diameter of 50 mm and an axial length of 600 mm can ensure that the center of the verification device has a saturated plateau area of 200 mm, leaving at least 100 mm redundancy for convenient detector placement. The internal irradiation volume rate is positively correlated with the thickness of the horizontally oriented ore layer before the saturation thickness is reached. The practical geometry of the γ logger verification device was determined by theoretical calculations, avoiding the waste of material and time in a large number of conservative designs.

Keywords: gamma logger verification device; geometry; gamma field theory; period verification

γ 测井方法是我国目前界定铀矿品位和储量估算的重要手段,在我国铀矿勘查领域发挥了重要作用。因此在日常工作中监测 γ 测井仪的性能状态是否正常,是铀矿勘查工作中的一个重要环节^[1-2]。

自1955年我国开始铀矿勘查工作以来,继承于苏联的计量技术体系,固体镭源被用来作为实验室和野外现场校准的标准源。鉴于镭与天然铀矿 γ 能谱类似和行业使用习惯,在国际上其他领域已开始改用人工核素源替代镭源背景下,我国铀矿勘查领域使用镭源校准、核查的传统仍沿用至今^[3-4]。

目前,我国铀矿勘查领域在用镭源约80枚,全部为点状源(即辐射源的尺度与源和探测器间的距离相比很小,以至于源上不同位置对探测器灵敏区所张立体角的差异在探测器的测量精度范围内可以忽略不计),主要用于 γ 测井仪、 $\beta+\gamma$ 编录仪等放射性测量仪器的期间核查。这些镭源经过30至60 a的服役,部分已经损坏,而出于政策、安全环保和经济性的考虑,各单位已不再购置新镭源。随着铀矿勘查工作量的逐年上涨,放射性测量仪器期间核查的需求随之增长,现有镭源数量愈加难以满足工作需要,这引起了上级有关部门和领导的高度重视,研制镭源替代品被纳入规划^[3-8]。

在多方论证后,计划采用天然铀矿粉制作适合于野外携带和使用的便携式核查装置来替代镭源。本文基于 γ 辐射场理论,设计了 γ 测井仪核查装置,进行了相关实用性验证,表明核查装置可用于 γ 测井仪的野外现场核查。

1 核查装置外形设计

在使用点源对 γ 测井仪进行“三性”检查

时, γ 测井仪仅接收到来自点源方向的很小的一个立体角($<2\pi$)内的 γ 射线,立体角随 γ 测井仪与点源距离的增加而减小,此时两次 γ 测井仪测量结果可能因角响应问题而存在差异。实际测井工作中, γ 测井仪记录的是井孔中任意一点处,来自 4π 角度的 γ 辐射,与点源测量条件完全不同。因此,用点源测量时,要想得到准确的换算系数,必须使用角修正系数,该系数必须用从多个方向辐照探测器的方法来测定,但这种系数的获取难度较大^[9]。

γ 测井仪在地下环境中工作,其周围存在近似 4π 角度的 γ 辐射场。根据计量学的替代原则,用于检定 γ 测井仪的装置(即 γ 测井模型标准)完全模拟了这一实际工作环境。因此,在野外对 γ 测井仪进行期间核查时,所使用的核查装置也应提供 4π 角度的 γ 辐射场,并且该核查装置的 γ 场强应与 γ 测井模型标准的场强保持一致,这样才能确保期间核查结果的有效性和可靠性。因此, γ 测井仪的野外核查装置可以视为尺寸缩小后的 γ 测井模型标准。在考虑不同形状辐射场的各向异性之后,设计 γ 测井仪核查装置基本形状为环形柱状,内部带有模拟钻孔。但 γ 测井模型标准缩小之后带来了 γ 场不饱和的问题,必须开展相关计算和验证,以解决 γ 场不饱和以及尺寸缩小到什么程度的问题。

2 理论基础

根据窄束 γ 射线衰减规律和 γ 辐射场的叠加理论计算钻孔中 γ 照射量率,取柱坐标 (r, φ, z) ,其中 z 轴与钻孔轴线重合,矿体厚度为 h ,如图1所示。

根据井中 γ 辐射场理论可得钻孔轴线上任意点处 γ 照射量率为^[10-21]:

$$I_z = 2\pi K C \rho \int_{r_0+d}^{\infty} \frac{dr}{r} \int_{-h/2}^{h/2} \frac{e^{-[\mu_0 r_0 + \mu_1 d + \mu(r-r_0-d)] \cdot \sqrt{1+[(z-x)/r]^2}}}{1+[(z-x)/r]^2} \cdot dx \quad (1)$$

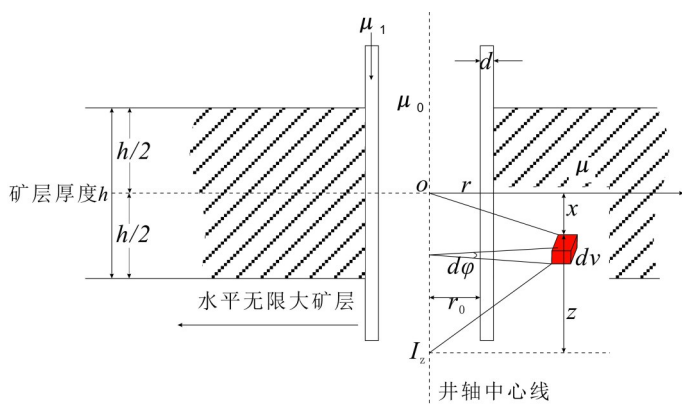


图 1 γ 辐射场照射量率计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram for calculating the exposure rate of gamma radiation field

式(1)中： I_z — z 轴上某一点处 γ 照射量率， $nC/(kg \cdot h)$ ； K —放射性元素的 γ 常数，在数值上等于质量为1g的点状放射性物质在1cm距离处产生的辐射强度，对于铀、镭、钍、钾 γ 源，分别有 $K_{\text{铀}}=7.380 \times 10^2 nC \cdot cm^2/(kg \cdot h \cdot g)$ ， $K_{\text{镭}}=2.131 \times 10^9 nC \cdot cm^2/(kg \cdot h \cdot g)$ ， $K_{\text{钍}}=3.175 \times 10^2 nC \cdot cm^2/(kg \cdot h \cdot g)$ ， $K_{\text{钾}}=1.847 \times 10^{-1} nC \cdot cm^2/(kg \cdot h \cdot g)$ ； C —矿石中放射性元素含量， g/g ； ρ —矿石密度， $g \cdot cm^{-3}$ ； r_0 —套管内径， cm ； d —套管厚度， cm ； r —小体积元 dv 到钻孔轴线的垂直距离， cm ； dr — dv 在水平面 r 方向的边长， cm ； h — z 轴方向矿层厚度， cm ； μ_0 、 μ_1 、 μ —分别为 γ 射线在水、铁套管和矿层中的线吸收系数； x —小体积元 dv 在 z 轴上的投影到矿层中心点的距离， cm ； z —小体积元 dv 在 z 轴上的投影到某一点的距离， cm 。

3 理论基础

3.1 标准模型的计算验证

根据式(1)，分别计算了现有 γ 测井模型标准装置(国防区域最高标准)UF-1.0-1、UF-0.5-1、UF-0.2-1和UF-0.03-1等4个铀模型中钻孔轴向矿层中心点处的照射量率，并将结果与 γ 测井仪实测的照射量率进行比较，4个模型的偏差均分别为-16.1%、-16.8%、-16.8%和-16.7%。这4个偏差近似一致，可归结为系统偏差，分析为理论上的窄束 γ 射线与实际环境中的宽束辐射场的差别所造成，这表明窄束 γ 射线与宽束 γ 射线在规律上是一致的，可以通过计算窄束规律，得出宽束规律，即用理论计

算模型内部 γ 场变化规律是可行的。

3.2 钻孔轴向矿层厚度变化过程的计算

为简化计算过程，先考虑单一方向，即钻孔轴向矿层厚度变化对体源内部 γ 场的影响(图2)。

计算前提条件：1)钻孔垂直地层，且整孔直径均匀一致；2)矿体水平方向饱和无限大；3)矿体物质均匀，各点 γ 射线的线吸收系数一致；4)钻孔无套管，内部仅为空气；5)矿体铀含量：1%eU。根据式(1)，计算结果见表1，绘制照射量率与矿层厚度关系见图3，其中可发现，矿层厚度自120至240cm，矿层中心点处照射量率几乎不变，即从120cm开始，中心点处 γ 场已几近饱和，随着矿层厚度的继续增加，对内部辐射场的贡献可以忽略。

因此将240cm厚度矿层产生的照射量率作为饱和无限大矿层的照射量率，分别计算不同钻孔轴向矿层厚度在轴向中心点处产生的照射量率与饱和无限大的相对偏差(表2)，发现矿层厚度自60至230cm，在轴向中心点处产生的照射量率与饱和无限大矿层所产生的照射量率相对偏差均小于5%，且自120至230cm近乎不变，接近于0。

考虑到 γ 测井仪检定规程、 γ 测井规范中均要求 γ 测井仪的准确性、稳定性和重复性在5%以内^[22-23]，即要求 γ 测井仪测量结果涨落不超过5%，因此因矿层厚度变化而引起的照射量率的变化也应控制在此限之内。以便 γ 测井仪在其中的测量结果与在 γ 测井模型标准中的结果进行比对，起到核查的作用。据此小型化模

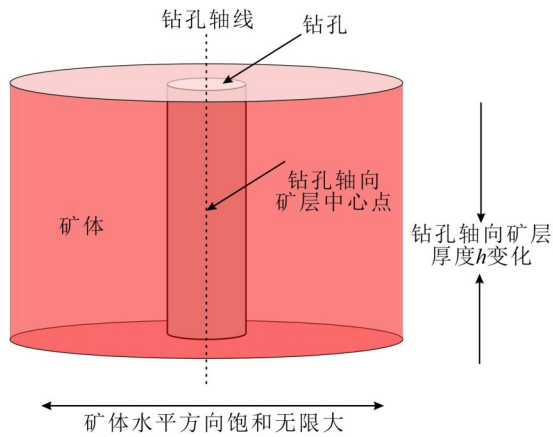


图2 轴向矿层厚度变化计算示意图

Fig. 2 The calculation diagram of axial thickness change of ore bed

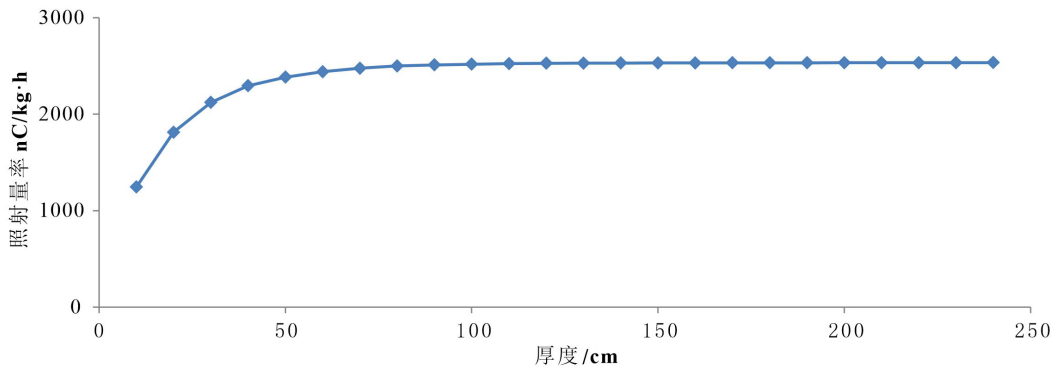


图3 钻孔轴向中心点照射量率与矿层厚度关系

Fig. 3 The relationship between the exposure rate of the axial center point of the borehole and the thickness of the ore bed

表1 钻孔轴向矿层厚度变化计算结果表

Table 1 Calculation results for variation of axial ore bed thickness in drill hole

| 矿层厚度/ cm | 中心点照射量率/ (nC·kg ⁻¹ ·h ⁻¹) | 矿层厚度/cm | 中心点照射量率/ (nC·kg ⁻¹ ·h ⁻¹) | 矿层厚度/ cm | 中心点照射量率/ (nC·kg ⁻¹ ·h ⁻¹) |
|-------------|---|---------|---|-------------|---|
| 10 | 1 243 | 90 | 2 509 | 170 | 2 531 |
| 20 | 1 812 | 100 | 2 517 | 180 | 2 531 |
| 30 | 2 120 | 110 | 2 522 | 190 | 2 532 |
| 40 | 2 294 | 120 | 2 526 | 200 | 2 532 |
| 50 | 2 382 | 130 | 2 528 | 210 | 2 532 |
| 60 | 2 439 | 140 | 2 529 | 220 | 2 532 |
| 70 | 2 475 | 150 | 2 529 | 230 | 2 533 |
| 80 | 2 498 | 160 | 2 530 | 240 | 2 533 |

型钻孔轴向矿层厚度可缩减至60 cm。

3.3 钻孔轴向矿层厚度变化过程中内部坪区的变化

在实际测量时,由于 γ 测井仪、操作人员和测量手法等条件的不同,探测器几何中心点不一定能够完全对准核查装置的中心点,因此核

查装置内部需要具有一定范围的坪区,允许探测器在位置出现一定的偏差情况下,仍能在一定准确度范围内测得标准量值。为此进一步计算钻孔轴向矿层厚度变化过程中内部坪区的变化情况,计算前提条件与第3.2节一致,计算结果绘制曲线见图4。

表 2 照射量率相对偏差计算结果表

Table 2 Calculation result of the relative deviation vs the exposure rate

| 矿层厚度/cm | 与饱和无限大照射量率相对偏差/% | 矿层厚度/cm | 与饱和无限大照射量率相对偏差/% | 矿层厚度/cm | 与饱和无限大照射量率相对偏差/% |
|---------|------------------|---------|------------------|---------|------------------|
| 10 | -50.9 | 90 | -0.9 | 170 | -0.1 |
| 20 | -28.5 | 100 | -0.6 | 180 | -0.1 |
| 30 | -16.3 | 110 | -0.4 | 190 | -0.1 |
| 40 | -9.4 | 120 | -0.3 | 200 | 0 |
| 50 | -5.9 | 130 | -0.2 | 210 | 0 |
| 60 | -3.7 | 140 | -0.2 | 220 | 0 |
| 70 | -2.3 | 150 | -0.1 | 230 | 0 |
| 80 | -1.4 | 160 | -0.1 | 240 | — |

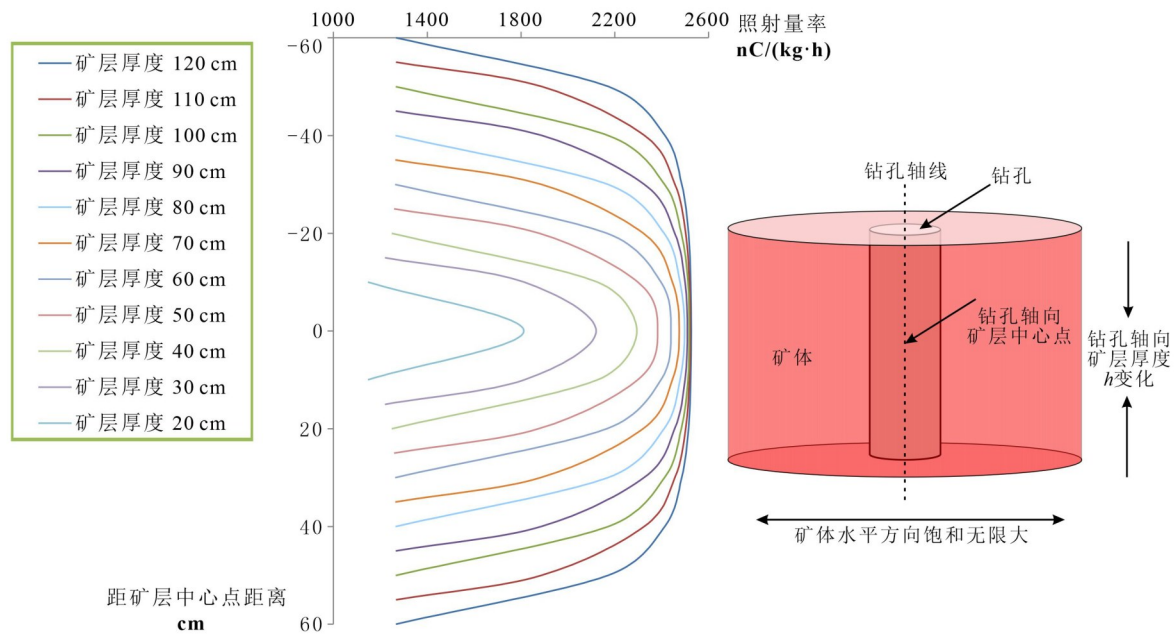


图 4 不同厚度轴向矿层内部坪区分布

Fig. 4 Distribution of plateau within axial ore bed of different thicknesses

不同轴向矿层厚度照射量率与各自中心点处相对偏差见表 3, 根据计算结果, 以与中心点照射量率相对偏差在 5% 以内为界限, 当矿层厚度减少至 50 cm 时, 仍能保持内部存在 20 cm 的坪区, 能够为 γ 测井仪提供足够的冗错空间。结合第 3.2 节中结论, 可最终确定核查装置沿钻孔轴向长度为 60 cm。

3.4 轴向 γ 场不饱和时孔径变化的计算

当钻孔轴向矿层不饱和时, 轴向矿层中心点处的探测器对矿层边界处钻孔的张角(图 5)将不再趋近于 0, 使得到达探测器的 γ 射线入射角度小于 4π 角度, 孔径对探测器张角不能忽略。

计算了在轴向矿层厚度为 60 cm, 水平方向矿层厚度无限大时, 钻孔直径变化对内部照射

量率的影响(表 4)。由表 4 可知井轴中心点处的照射量率随钻孔的变大而减小, 因此核查装置钻孔孔径应越小越好。为了能够容纳大部分现役 γ 测井仪, 设计核查装置钻孔直径为 5 cm。

3.5 钻孔径向矿层厚度变化的计算

计算条件为钻孔轴向矿体厚度为 60 cm, 钻孔直径 5 cm, 其他同第 3.1 节。为减少计算量, 结合场源互换原理和式(1), 获得了水平方向矿体半径 1 至 10 cm 变化过程中, 内部中心点照射量率的变化情况(图 6)。结果表明, 水平、轴向均不饱和的条件下, 在矿层厚度没有达到饱和之前, 钻孔轴向中心点处照射量率与水平方向矿层厚度正相关, 会随水平方向矿层厚度的增加而持续增大。

表 3 与各自中心点处相对偏差计算结果表

Table 3 Calculated relative deviation from the respective center point

| 轴向长度 80 cm | | 轴向长度 60 cm | | 轴向长度 50 cm | | 轴向长度 40 cm | |
|---------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|
| 与矿段轴向中心点距离/cm | 相对偏差/% | 与矿段轴向中心点距离/cm | 相对偏差/% | 与矿段轴向中心点距离/cm | 相对偏差/% | 与矿段轴向中心点距离/cm | 相对偏差/% |
| -40 | -49.4 | — | — | — | — | — | — |
| -30 | -13.1 | -30 | -48.2 | -25 | -47.2 | — | — |
| -20 | -3.5 | -20 | -11.2 | -20 | -21.2 | -20 | -45.5 |
| -10 | -0.8 | -10 | -1.8 | -10 | -3.6 | -10 | -7.3 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | -0.8 | 10 | -1.8 | 10 | -3.6 | 10 | -7.3 |
| 20 | -3.5 | 20 | -11.2 | 20 | -21.2 | 20 | -45.5 |
| 30 | -13.1 | 30 | -48.2 | 25 | -47.2 | — | — |
| 40 | -49.4 | — | — | — | — | — | — |

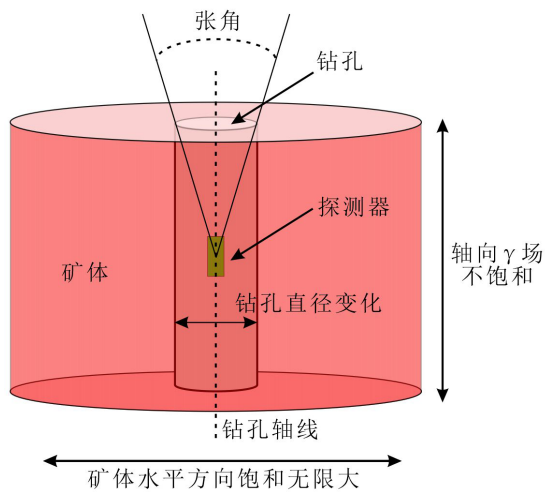


图 5 轴向 γ 场不饱和时孔径变化示意图

Fig. 5 Schematic diagram of aperture variation when the axial γ -field is not saturated

表 4 孔径变化的计算结果

Table 4 Calculated results of pore size changes

| 轴向矿层厚度/cm | 孔径/cm | 井轴中心点照射量率/ ($\text{nC}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) | 相对偏差/% |
|-----------|-------|---|--------|
| 240 | 9 | 2 533 | — |
| 60 | 4 | 2 456 | -3 |
| 60 | 5 | 2 441 | -3.6 |
| 60 | 6 | 2 425 | -4.2 |
| 60 | 7 | 2 410 | -4.9 |
| 60 | 8 | 2 394 | -5.5 |
| 60 | 9 | 2 378 | -6.1 |

在综合考虑经济性、装置重量、饱和度、仪器响应和装置制作工艺等因素之后,确定径向厚度为 4 cm。

4 实测验证

4.1 钻孔轴向辐射场分布(坪区)计算的验证

制作了孔径 5 cm, 钻孔轴向长度 60 cm, 水平

方向矿层厚度 4 cm 的核查装置,采用稳定的 γ 测井仪沿着井孔轴线每隔 5 cm 进行定点测量(图 7)。

根据测量数据计算每点与同一个核查装置中心点处照射量率的相对偏差,绘制核查装置井中辐射场分布相对偏差分布(图 8)。由图 8 可见,核查装置内部坪区曲线形态与理论计算结果趋势一致,距中心点前后 10 cm 测量值

钻孔径向矿层厚度变化对内部的影响

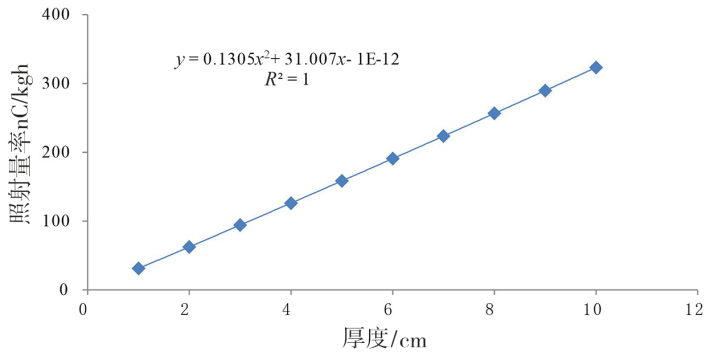


图 6 钻孔径向中心点照射量率与矿层厚度关系

Fig. 6 The relationship between the exposure rate of the radial center point of the borehole and the thickness of the ore bed



图 7 轴向辐射场分布测试

Fig. 7 Axial radiation field distribution test

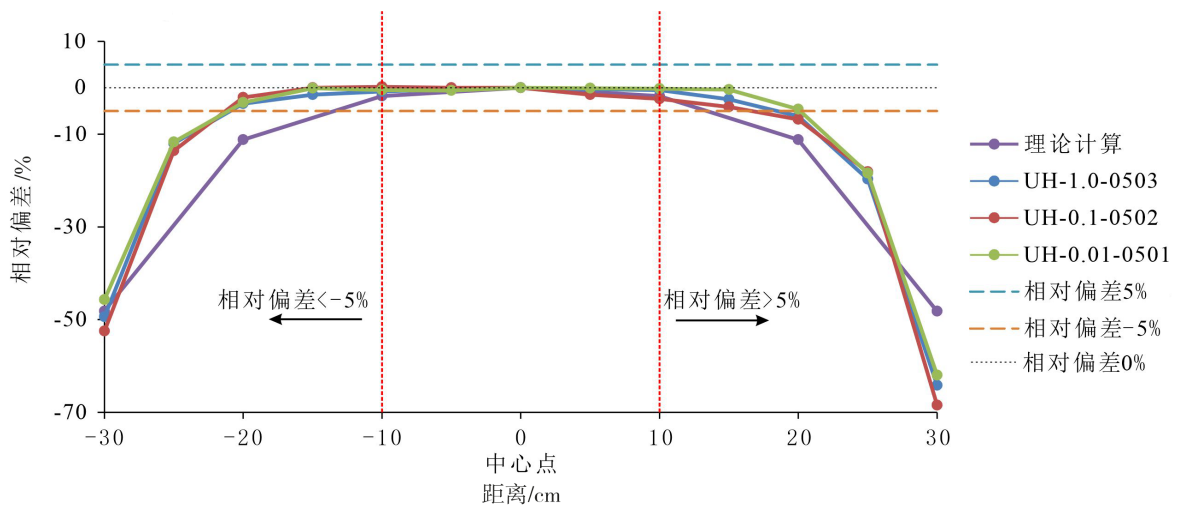


图 8 内部辐射场分布相对偏差对比图

Fig. 8 Comparison of relative deviation of internal radiation field distribution

与中心点处相对偏差不超过3%,证明第3.2节、第3.3节的计算结果可行。

4.2 水平方向矿层厚度变化影响验证

为了验证水平方向矿层厚度的影响,制作

了不同直径的套管,通过两个不同直径的套管两两嵌套,填充铀矿粉,形成不同厚度的水平方向矿层(图9),模拟水平方向矿层厚度变化的试验。



图9 径向不同厚度矿粉充填试验

Fig. 9 Radial filling test with different thicknesses of mineral powder

不同矿层厚度与 γ 测井仪测量结果的对比见图10。验证结果表明,在非饱和厚度条件下,当矿层铀含量不变时, γ 测井仪计数率与矿

层厚度正相关,响应关系与理论计算结果一致,验证了第3.5节的计算结果可行。

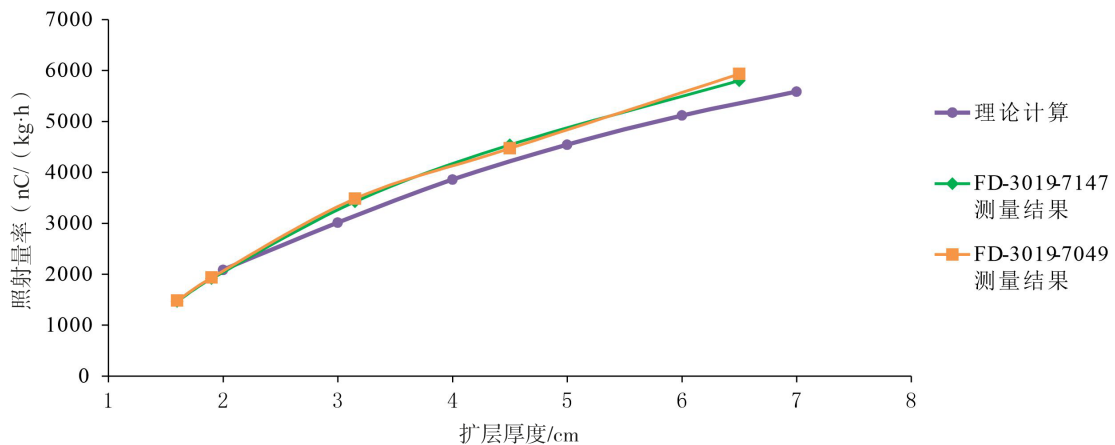


图10 不同矿层厚度理论计算与实测响应

Fig. 10 Theoretical calculation and measured response of different ore layer thicknesses

5 结 论

1)应用 γ 射线在物质中的衰减和 γ 辐射场叠加理论,计算了钻孔轴向矿层厚度变化时引起内部轴向矿层中心点处照射量率的变化规律,以及 γ 辐射场均匀性的变化规律,当矿层厚度轴向长度达 60 cm 时,可保证核查装置内部有 20 cm 长度的坪区,确保了不同尺寸探测器在核查装置中的定位可以有至少 10 cm 的冗余误差。实测距中心点前后 10 cm 内的相对偏差不超过 3%。

2)计算了当钻孔轴向矿层不饱和时,孔径变化的影响,即钻孔轴线上矿层中心点处的照射量率将随钻孔孔径的增大而减小,因此核查装置钻孔直径应尽可能地小,为满足大部分在役 γ 测井仪的尺寸,钻孔直径定为 5 cm。在此基础上计算了钻孔轴向矿层厚度变化的影响,结果表明钻孔轴向中心点处照射量率与钻孔轴向矿层厚度正相关。

3)实验验证了理论计算结果与实际测量较为一致,设计规格能够用于后续核查装置的制作。

参考文献

- 1 余水泉,杜建农,常桂兰,等.铀资源勘查地球物理测井现状与今后的主要任务[J].世界核地质科学,2003(1):36-38.
YU Shuiquan, DU Jiannong, CHANG Guilan, et al. Current status and future main tasks of geophysical logging for uranium resource exploration [J]. World Nuclear Geoscience, 2003(1):36-38(in Chinese).
- 2 焦仓文,冯延强,王恒,等.伽马能谱测井在罗辛铀矿勘查中的应用研究[J].世界核地质科学,2024,41(1):12-22.
JIAO Cangwen, FENG Yanqiang, WANG Heng, et al. Study on the application of spectral γ logging in Rossing uranium deposit [J]. World Nuclear Geoscience, 2024, 41(1):12-22(in Chinese).
- 3 胡明考,王新兴,张积运,等.中核地矿系统在用固体镭源之现状[C]//中国核学会.中国核科学技术进展报告:第5卷——中国核学会2017年学术年会论文集第2册(铀矿地质分卷(下)、铀矿冶分卷).西安:2017:633-637.
HU Mingkao, WANG Xinxing, ZHANG Jiyun, et al.

The actualities of solid radium sources are using in CNNC Department of Geology & Mining [C]// Chinese Nuclear Society. Progress Report on China Nuclear Science & Technology, Xi'an: 2017: 633-637.

- 4 丛慧玲,张金涛,刘新河,等.废放射源安全管理 [C]//全国放射源安全研讨会论文集汇编.西安:2001:3-7.
CONG Huiling, ZHANG Jintao, LIU Xinhe, et al. Safety management of waste radioactive sources [C]// National Symposium on Radiation Source Safety. Xi'an: 2001: 3-7(in Chinese).
- 5 银涌兵,李海英.线性回归法在照射量率换算系数校准中的应用[J].世界核地质科学,2016,33(2):102-105.
YIN Yongbing, LI Haiying. The application of linear regression in the calibration of exposure rate conversion coefficient [J]. World Nuclear Geoscience, 2016, 33(2): 102-105(in Chinese).
- 6 杨芮,乔宝强,刘福至,等.砂岩型铀矿随钻井斜- γ 测井系统研制[J].世界核地质科学,2024,41(6):1182-1191.
YANG Rui, QIAO Baoqiang, LIU Fuzhi, et al. Development of a logging-while-drilling inclination-gamma system for sandstone-type uranium deposits exploration [J]. World Nuclear Geoscience, 2024, 41(6): 1182-1191(in Chinese).
- 7 管少斌,唐晓川.铀矿放射性测量仪器野外核查装置研制及试验成果报告[R].北京:中国核工业地质局,2018.
GUAN Shaobin, TANG Xiaochuan. Development and experimental results report of field verification device for uranium radioactive measurement instruments [R]. Beijing: China Nuclear Geology, 2018(in Chinese).
- 8 胡明考,张积运,王新兴,等.国防1313站计量关键技术回顾[J].科技创新导报,2011(35):11.
HU Mingkao, ZHANG Jiyun, WANG Xinxing, et al. The retrospection of key metering technical of National Defence No.1313 Station [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2011(35): 11(in Chinese).
- 9 International Atomic Energy Agency. Construction and use of calibration facilities for radiometric field equipment [R]. Vienna: IAEA, 1990.
- 10 章晔.放射性方法勘查[M].北京:原子能出版社,1990:283-288.
ZHANG Ye. Radioactive exploration method [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990: 283-288 (in Chinese).

- 11 程业勋,王南萍,侯胜利.核辐射场与放射性勘查[M].北京:地质出版社,2005:97-107.
CHENG Yexun, WANG Nanping, HOU Shengli. Nuclear radiation field and radioactive exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 97-107 (in Chinese).
- 12 周四春,等.核测井原理及应用[M].北京:原子能出版社,2016:10-37.
ZHOU Sichun, et al. Principles and applications of nuclear logging[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2016: 10-37.
- 13 于孝忠.核辐射物理学[M].北京:原子能出版社,1981:356-390.
YU Xiaozhong. Nuclear radiation physics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1981: 356-390.
- 14 汤彬. γ 测井分层解释法[M].北京:原子能出版社,1993:1-11.
TANG Bin. Gamma logging layered interpretation method[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1993: 1-11.
- 15 吴治华等.原子核物理实验方法[M].北京:原子能出版社,1997:54-65.
WU Zhihua, et al. Atomic nuclear physics experimental Methods[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1997: 54-65.
- 16 庞巨丰.核测井物理基础[M].北京:石油工业出版社,2005:78-87.
PANG Jufeng. Fundamentals of nuclear logging physics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2005: 78-87.
- 17 黄隆基.核测井原理[M].东营:中国石油大学出版社,2008:36-47.
HUANG Longji. Principles of nuclear logging[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2008: 36-47.
- 18 陈伯显,张智.核辐射物理及探测学[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2011:171-185.
CHEN Boxian, ZHANG Zhi. Nuclear Radiation Physics and Detection[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2011: 171-185.
- 19 程业勋,梁兴中. γ 测井条件下有效质量吸收系数的研究[J].放射性地质,1983(6):61-66+34.
CHENG Yexun, LIANG Xingzhong. Study on the effective mass absorption coefficient under gamma logging conditions[J]. Uranium Geology, 1983(6): 61-66+34.
- 20 J. KENNETH SHULTIS, RICHARD E. FAW. Fundamentals of nuclear science and engineering[M]. New York: Marcel Dekker, Inc, 2002: 162-178.
- 21 唐晓川.铀矿 γ 测井仪便携式现场校准小体源研制[D].成都:成都理工大学,2022.
TANG Xiaochuan. Development of portable field calibration small body source for uranium mine γ logging instrument[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2022.
- 22 国家国防科技工业局. γ 测井仪检定规程:JJG(军工)27—2012[S].北京:国家国防科技工业局,2012.
State Administration of Science, Technology and Industry for National Defence. PRC. Verification Regulation for Gamma Ray Logger: JJG (Military Industry) 27—2012[S]. Beijing: SASTIND, 2012.
- 23 国防科学技术工业委员会. γ 测井规范:EJT 611—2005[S].北京:国防科学技术工业委员会,2005.
Commission of Science, Technology and Industry for National Defense. Specification for γ logging: EJT 611—2005[S]. Beijing: COSTIND, 2005.