

随钻方位 γ 能谱测井探测特性的数值模拟研究

董 夺¹ 吴文圣¹ 岳文正¹ 郑 健² 高 辉³ 黄禄刚³ 段军亚³

1(中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249)

2(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

3(西安汇能电子设备有限责任公司 西安 710065)

摘要 研究仪器探测特性对于前期的仪器结构优选设计及后期的资料解释都有重要意义。首先确定随钻方位 γ 能谱测井仪的仪器结构,建立相应的 MCNP 模型,然后仿照感应测井中的几何因子,模拟仪器的径向、纵向、方位积分几何因子;最后模拟研究井眼尺寸、泥浆密度、地层密度、天然放射性物质类型对仪器探测特性的影响。模拟计算结果表明:井眼尺寸、地层密度、天然放射性物质类型对探测特性影响较大,而泥浆密度基本无影响。

关键词 随钻方位 γ 能谱测井, 几何因子, 数值模拟

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.010503

Numerical simulation of detecting characteristics of the spectral azimuthal γ -ray logging while drilling

DONG Duo¹ WU Wensheng¹ YUE Wenzheng¹ ZHENG Jian² GAO Hui³

HUANG Lugang³ DUAN Junya³

1(State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

2(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

3(Xi'an Huineng Electronic Equipment Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract [Background] The detection characteristics of the spectral azimuthal γ -ray (SAGR) logging while drilling (LWD) tool are important for the early design of the instrument structure and subsequent interpretation of the logging data, so it is necessary to study its detection characteristics and its influencing factors. [Purpose] This study aims to investigate the effects of wellbore size, mud density, formation density, and natural radioactive material types on the SAGR instrument detection characteristics. [Methods] First of all, the instrument structure of the LWD spectral azimuthal gamma ray tool was determined, then the corresponding MCNP model was established. Based on the geometric factors in the induction logging, the radial, longitudinal and circumferential integral geometry factors of the SAGR instrument were simulated. Finally, the influence of wellbore size, mud density, formation density and different natural radioactive materials on the detection characteristics of the SAGR were studied by simulation. [Results] The results show that the wellbore size, formation density and natural radioactive material types have a great influence on the SAGR detection characteristics, while the mud density have no effect. [Conclusion] This study provides a theoretical reference for instrument design and logging data interpretation of the spectral azimuthal γ -ray logging while drilling tool.

Key words LWD spectral azimuthal γ -ray, Geometric factors, Numerical simulation

中国科学院 A 类战略性先导科技专项(No.XDA14020600)资助

第一作者: 董夺, 男, 1991 年出生, 2016 年于中国石油大学(华东)获硕士学位, 现为博士研究生, 研究方向为核测井技术

通信作者: 吴文圣, E-mail: wwsheng@cup.edu.cn

收稿日期: 2019-01-09, 修回日期: 2019-10-10

Supported by Chinese Academy of Sciences Class A Strategic Pilot Technology Program (No.XDA14020600)

First author: DONG Duo, male, born in 1991, graduated from China University of Petroleum (East China) with a master's degree in 2016, doctoral student, focusing on nuclear logging technology

Corresponding author: WU Wensheng, E-mail: wwsheng@cup.edu.cn

Received date: 2019-01-09, revised date: 2019-10-10

与随钻方位 γ 相比,随钻方位 γ 能谱除测量总计数率外还测量能谱,它不仅能提供方位 γ 成像图、计算地层相对倾角^[1-2],还能计算KUTh含量、估算TOC含量,为地质导向提供更加全面、准确的信息,是随钻测井的重要测量项目。研究随钻方位 γ 能谱的仪器探测特性对于前期的仪器结构优选设计及后期的资料解释都有重要意义。本文采用双晶体(NaI)的仪器结构,并建立相应的MCNP(Monte Carlo N Particle Transport Code)模型,仿照感应测井中的几何因子,研究仪器的探测特性。然后分别模拟研究井眼尺寸、泥浆密度、地层密度、天然放射性物质类型对仪器探测特性的影响。

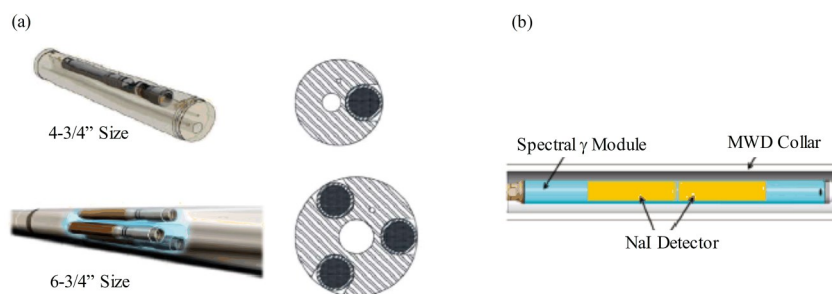


图1 SAGR仪器结构
Fig.1 The instrument structure of SAGR

本文仪器以Mickael的仪器结构为基础,在保证仪器结构稳定的前提下,将探测器尽可能靠向钻铤的外边缘,以减少地层和探测器之间 γ 的衰减,同时增大NaI晶体体积,以保证足够的计数率^[11]。在保证计数统计精确性高、成本节约的情况下,最终采用两个晶体互成 180° 的仪器结构,相应的MCNP模型如图2所示。

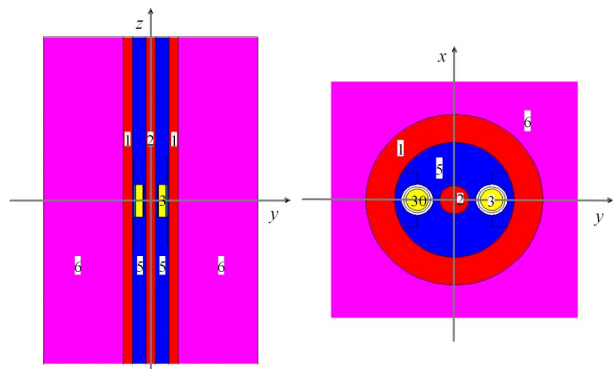


图2 仪器的MCNP模型
Fig.2 The MCNP model of SAGR instrument

MCNP模型参数:1代表钻铤5和地层6之间的井眼间隙 ΔR ;2是泥浆通道;3和30是两个互成 180° 的NaI晶体。模型外半径60.44 cm,模型高200 cm,

1 仪器结构及MCNP计算模型

国内关于随钻方位 γ 能谱的文献并不多,国外直到2000年以后才有相关研究文献。2002年Mickael等^[3]提出了采用三个NaI(Tl)晶体的随钻方位 γ 能谱测井仪SAGR(Spectral Azimuthal Gamma Ray Tool),并于2007年,给出了单晶体仪器及三晶体仪器的详细结构^[4],如图1(a)图。2013年Nye、Marsala、Maranuk等^[5-8]介绍了SAGR在非常规油气藏(页岩油气藏、煤层气等)中的应用,所采用的仪器结构与Mickael相同。2015年Xu等^[9-10]提出了仪器结构不同于Mickael的方案,如图1(b)。

井眼间隙 $\Delta R=5$ cm,地层6为泥质砂岩(40%泥质+10% H_2O +50% SiO_2 , $2.06\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,其中40%泥质=16%高岭石+16%蒙脱石+1% U+1% Th+6% K,%代表质量百分比),上述参数都可根据研究内容调整,且以下模拟研究只对晶体3计数。

2 仪器探测特性的MCNP模拟

仿照感应测井中的几何因子,采用MCNP方法模拟仪器的径向、纵向、方位积分几何因子来研究仪器的探测特性。

2.1 径向积分几何因子

图3是研究径向积分几何因子的建模示意图。其中圆环柱体代表放射性地层, R 代表放射性地层外柱面到井壁的径向距离,模拟时从0~45 cm改变 R ,并记录晶体3的计数,归一化后得到径向积分几何因子 G_R ,如图4所示。

将 $G_R=0.9$ 处对应的 R 称为径向探测深度,一般来讲,探测深度越深,原状地层的贡献占比越大,对测井解释越有利。由图4得,该模拟条件下的仪器探测深度为19.5 cm。

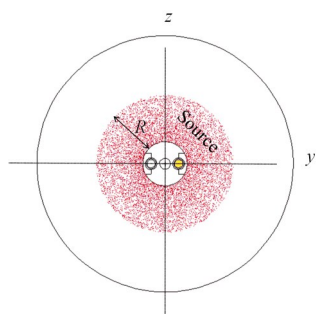


图3 径向积分几何因子建模
Fig.3 Schematic diagram of radial integral geometry factor modeling

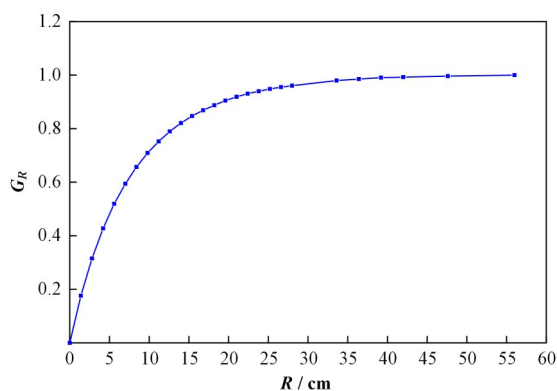


图4 径向积分几何因子模拟结果
Fig.4 Simulation results of radial integral geometry factor

2.2 纵向积分几何因子

图5是研究纵向积分几何因子的建模示意图,其中圆环柱体代表放射性地层(关于 $z=0$ 平面对称), H 代表放射性圆环柱体的厚度,模拟时从0~90 cm改变 H ,并记录晶体3的计数,归一化后得到纵向积分几何因子 G_H ,如图6所示。

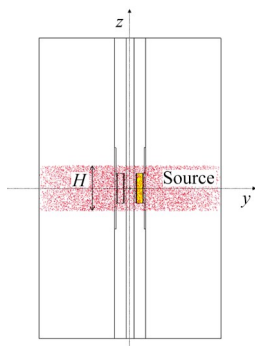


图5 纵向积分几何因子建模
Fig.5 Schematic diagram of longitudinal integral geometric factor modeling

将 $G_H=0.8$ 时对应的 H 称之为纵向分辨厚度,纵向分辨厚度越小,纵向分辨能力越高,即纵向分辨率越高。由图6知,该模拟条件下的纵向分辨厚度为24 cm。

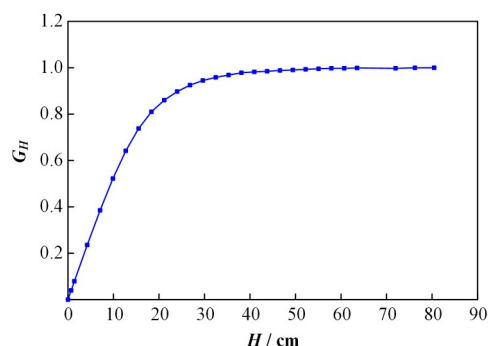


图6 纵向积分几何因子模拟结果
Fig.6 Simulation results of longitudinal integral geometric factor

2.3 方位积分几何因子

图7是研究方位积分几何因子的建模示意图,其中扇环柱体代表放射性地层(关于 $x=0$ 平面对称), A 代表放射性扇环柱体的圆心夹角,模拟时改变 A (在图7中,当 A 的增量为 ΔA 时, y 轴上半部分、下半部分源对应的圆心角增量均为 $0.5 \times \Delta A$), A 的取值范围为0~360°,并记录晶体3的计数,归一化后得到方位积分几何因子 G_A ,如图8所示。

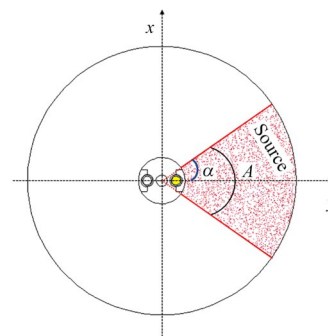


图7 方位积分几何因子建模
Fig.7 Schematic diagram of azimuth integral geometry factor modeling

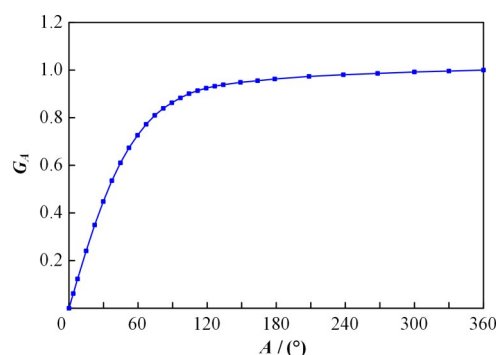


图8 方位积分几何因子模拟结果
Fig.8 Simulation results of azimuth integral geometry factor

综合国内外文献发现,仪器方位分辨率通常用两种方法表征:1)将方位积分几何因子取0.8时所对

应的角度称为方位角度探测范围,并利用该角度范围表征方位分辨率,角度探测范围越大,方位分辨率越低,两者成反比关系。由图8得, $G_A=0.8$ 时方位角度探测范围为 70° ;2)用某方位角度范围(将井周地层均匀划分为16扇区时每一扇区对应 22.5° 、8扇区对应 45° 、4扇区对应 90°)所对应的方位积分几何因子值表征方位分辨率,其代表该角度范围下的放射性地层计数率占 360° 放射性地层计数率的百分比,该值越大,方位分辨率越高,两者成正比关系。

3 探测特性的影响因素分析

按照上述思路,模拟不同井眼尺寸、泥浆密度、地层密度、天然放射性物质类型下的径向、纵向、方位积分几何因子,并分析这些因素对仪器探测特性的影响。

3.1 井眼尺寸

其他条件保持不变,增大井眼尺寸(增大井眼间隙),模拟不同井眼尺寸下的径向、纵向、方位积分几何因子,结果如下。

3.1.1 径向探测特性

不同井眼尺寸下的径向积分几何因子模拟结果如图9所示,可以看出井眼尺寸对仪器方位探测特

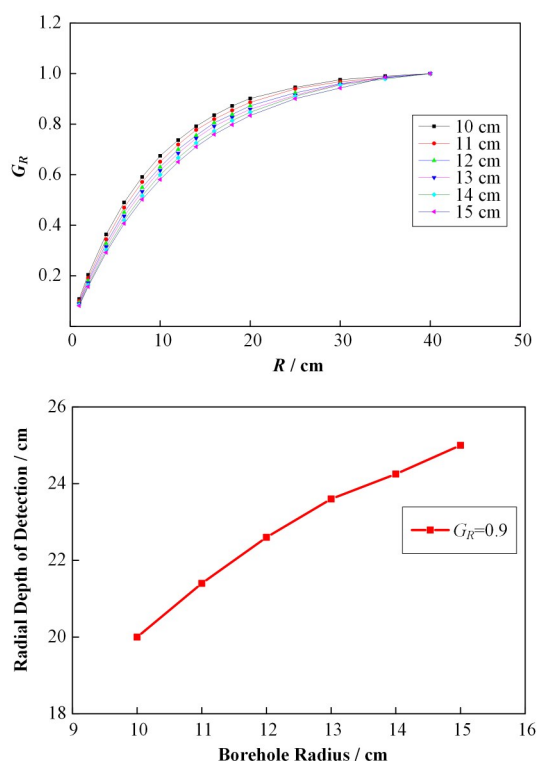


图9 不同井眼尺寸下的径向探测特性

Fig.9 Radial detection characteristics at different wellbore sizes

性的影响比较大。径向积分几何因子取0.9时,对应的径向探测深度 R (从井壁处算起,详见图3定义)随井眼尺寸的增大而增大。

随着径向深度的增加,径向积分几何因子之所以趋于稳定是因为,径向深度越深的放射性地层其产生的 γ 射线被探测器接收到的越少(因为径向深度越深,衰减距离越长),直至到达探测器时刚好全部被井眼和地层吸收,假设此时 $R=R_0$,这表示 R_0 处放射性地层所产生的 γ 射线对探测器计数率的贡献刚好为零, $R>R_0$ 处的地层所产生的 γ 射线还没到达探测器就被衰减完了,对探测器计数的贡献为零,使得 $R>R_0$ 时积分几何因子稳定不变。

影响探测器 γ 计数率的因素有两个:放射性地层产生 γ 射线的过程(对探测器计数产生正贡献)、井眼及地层对 γ 射线的衰减过程(对探测器计数产生负贡献)。

假设井眼半径增大后 R_0 保持不变,此时地层衰减不变,井眼半径增大会导致井眼衰减增强(负贡献),但同时会导致放射性地层体积增大,进而源强增加(正贡献),又因井眼衰减变化相对源强变化小,最终导致 R_0 处地层对探测器计数率的贡献为正贡献,即 R_0 处地层产生的 γ 射线在探测器处还没有衰减完。根据 R_0 的定义,此时应通过增大 R_0 引入更多地层衰减、引入负贡献(这是因为 R_0 增大引起的地层源强增大不如地层衰减的增强),以保持 R_0 处地层对探测器计数率的贡献为零。所以,井眼半径增大导致径向探测深度增大。

3.1.2 纵向探测特性

不同井眼尺寸下的纵向积分几何因子模拟结果如图10所示,可以看出井眼尺寸对仪器纵向探测特性的影响较大。纵向积分几何因子取0.8时,对应的纵向分辨厚度随井眼尺寸的增大而增大,即井眼尺寸越大,纵向分辨能力越低。

仿照径向积分几何因子,纵向积分几何因子也有类似的定义 H_0 , $|Z|=H_0/2$ 处地层所产生的 γ 射线对探测器计数率的贡献刚好为零, $|Z|>H_0/2$ 处的地层所产生的 γ 射线还没到达探测器就被衰减完了,对探测器计数的贡献为零,使得 $H>H_0$ 时积分几何因子稳定不变。

假设井眼半径增大后 H_0 保持不变,仿照径向几何因子的分析得知,探测范围内整体表现为源强增加、衰减变弱(正贡献)。根据 H_0 的定义,此时应通过增大 H_0 引入地层衰减、引入负贡献(这是因为 H_0 增大引起的地层源强增大不如地层衰减的增强),以保持 $|Z|=H_0/2$ 处地层对探测器计数率的贡献为零。所以,井眼半径增大导致纵向分辨厚度增大。

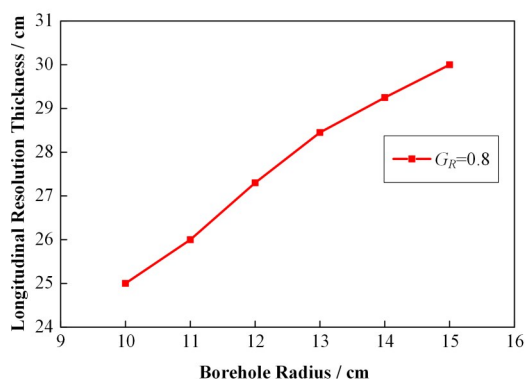
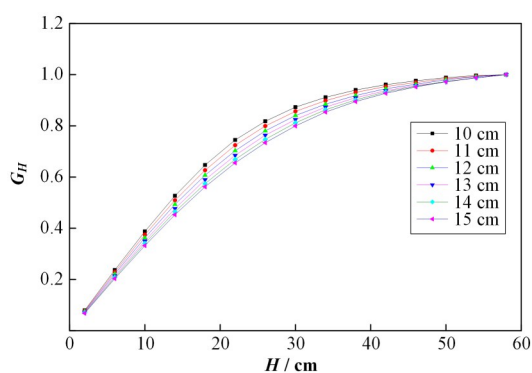


图10 不同井眼尺寸下的纵向探测特性
Fig.10 Longitudinal detection characteristics at different wellbore sizes

3.1.3 方位探测特性

不同井眼尺寸下的方位积分几何因子模拟结果如图11所示,可以看出井眼尺寸对仪器方位探测特性有一定影响。方位积分几何因子取0.8时,对应的角度探测范围随井眼尺寸的增大而增大,如图12所示;当方位角度探测范围为22.5°、45°、90°时,对应的方位积分几何因子均随井眼尺寸的增加而降低,即井眼尺寸越大方位分辨率能力越低。

仿照径向积分几何因子,方位积分几何因子也

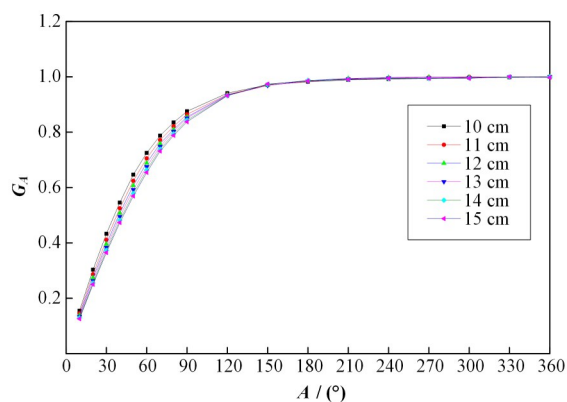


图11 不同井眼尺寸下的方位积分几何因子
Fig.11 Azimuth integral geometry factor vs. azimuth angle at different wellbore sizes

有类似的定义 A_0 , $|\alpha|=A_0/2$ 处的地层所产生的 γ 射线对探测器计数率的贡献刚好为零(α 定义见图7), $|\alpha|>A_0/2$ 的地层所产生的 γ 射线还没到达探测器就被衰减完了,对探测器计数的贡献为零,使得 $A>A_0$ 时积分几何因子稳定不变。

假设井眼半径增大后 A_0 保持不变,仿照径向几何因子的分析得知,探测范围内整体表现为源强增加、衰减变弱(正贡献)。根据 A_0 的定义,此时应在此基础上通过增大 A_0 引入地层衰减、引入负贡献(这是因为 A_0 增大引起的地层源强增大不如地层衰减的增强),以保持 $|\alpha|=A_0/2$ 处地层对探测器计数率的贡献为零。所以,井眼半径增大导致方位角度探测范围增大、方位分辨率降低。

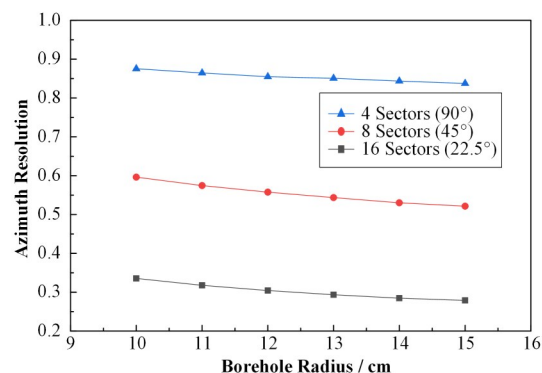
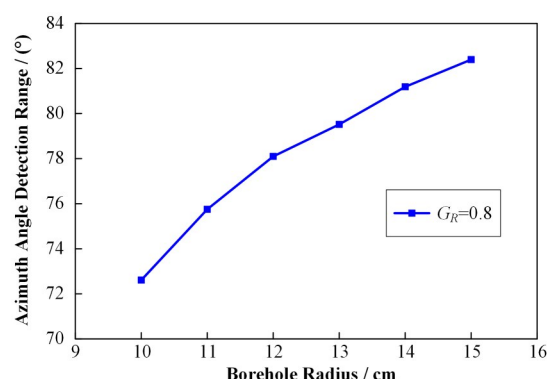


图12 不同井眼尺寸下的方位分辨率
Fig.12 Azimuth resolution at different wellbore sizes

3.2 泥浆密度

其他条件保持不变,只改变泥浆密度(常规泥浆,不含放射性物质KCl),模拟不同泥浆密度下的径向、纵向、方位积分几何因子,结果分别如图13~图15所示,可以看出,仪器的径向、纵向、方位探测特性基本不受泥浆密度影响。泥浆密度变化只改变井眼衰减,不改变地层衰减和地层源强,并且井眼衰减与地层衰减、地层源强相比较小。所以,泥浆密度的变化对三种几何因子的影响很小。

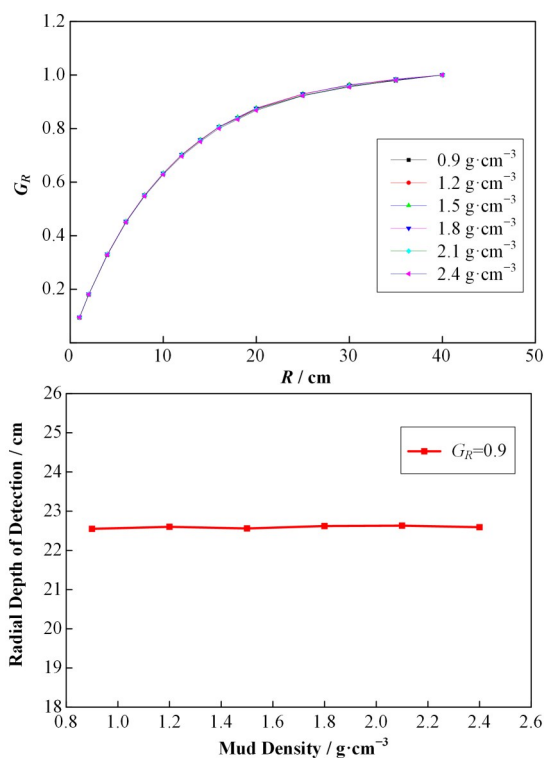


图13 不同泥浆密度下的径向探测特性
Fig.13 Radial detection characteristics at different mud densities

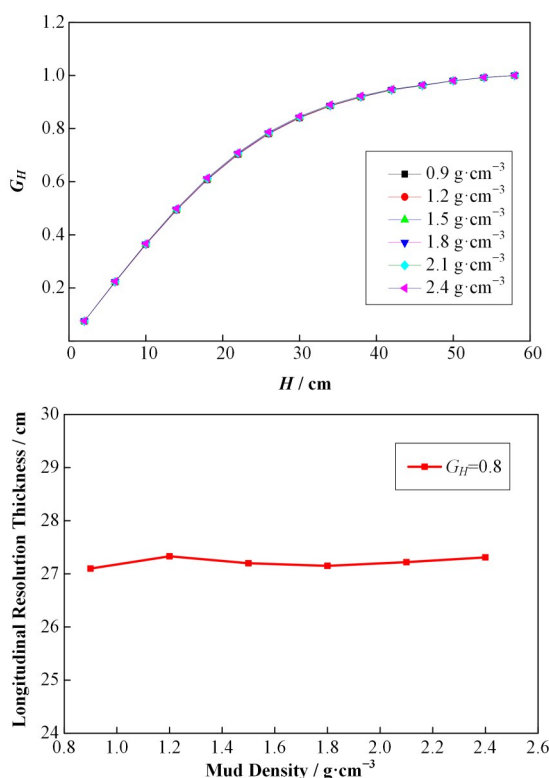


图14 不同泥浆密度下的纵向探测特性
Fig.14 Longitudinal detection characteristics at different mud densities

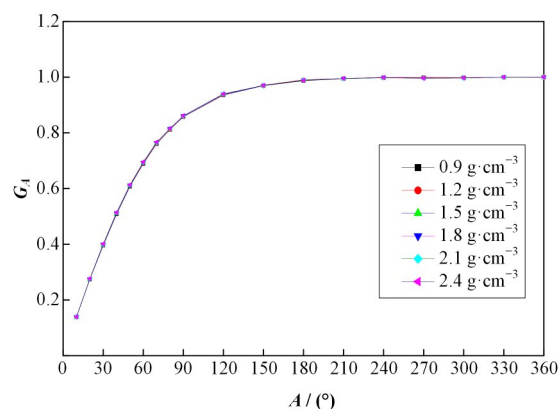


图15 不同泥浆密度下的方位积分几何因子
Fig.15 Azimuth integral geometry factor vs. azimuth angle at different mud densities

3.3 地层密度

其他条件保持不变,只改变地层密度,模拟不同地层密度下的径向、纵向、方位几何因子,结果如下。

3.3.1 径向探测特性

不同地层密度下的径向积分几何因子模拟结果如图16所示,可以看出,仪器的径向探测特性受地层密度影响较大。径向积分几何因子取0.9时,对应的径向探测深度随地层密度的增大而减小。

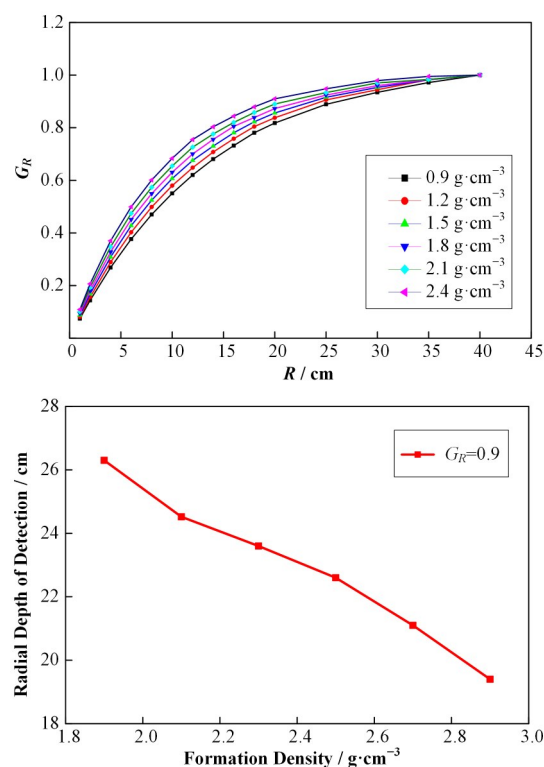


图16 不同地层密度下的径向探测特性
Fig.16 Radial detection characteristics at different formation densities

假设地层密度增大后 R_0 保持不变,此时井眼衰减不变,但地层密度增大会导致地层衰减增强(负贡献)、地层源强增大(正贡献),因为地层衰减变化的贡献占主导地位,最终导致 R_0 处地层对探测器计数率的贡献为负贡献。根据 R_0 的定义,此时应通过减小 R_0 引入正贡献,以保持 R_0 处地层对探测器计数率的贡献为零。所以,地层密度增大导致径向探测深度减小。

3.3.2 纵向探测特性

不同地层密度下的纵向积分几何因子模拟结果如图17所示,可以看出,仪器的纵向探测特性受地层密度影响,但不如径向探测特性明显。纵向积分几何因子取0.8时,所对应的纵向分辨厚度随地层密度的增大而降低,即地层密度越大纵向分辨能力越高。

仿照§3.3.1的分析,假设地层密度增大后 H_0 保持不变,最终会导致 $|Z|=H_0/2$ 处地层对探测器计数的贡献为负贡献。根据 H_0 的定义,此时应在此基础上通过减小 H_0 引入正贡献,以保持 $|Z|=H_0/2$ 处地层对探测器计数的贡献为零。所以,地层密度增大导致纵向分辨厚度减小。

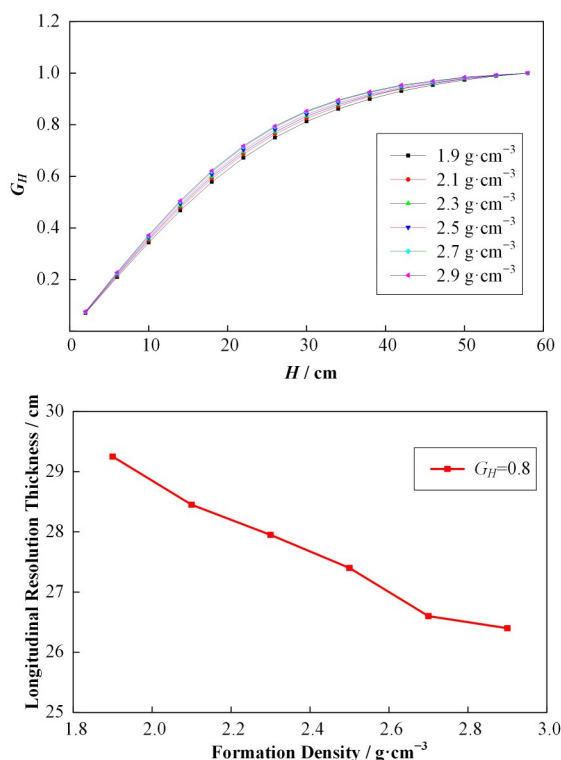


图17 不同地层密度下的纵向探测特性

Fig.17 Longitudinal detection characteristics at different formation densities

3.3.3 方位探测特性

不同地层密度下的方位积分几何因子模拟结果如图18所示,可以看出地层密度对仪器方位探测特性有影响。当方位积分几何因子取0.8时,对应的方位角度探测范围随地层密度增大而减小,如图19所示;当方位角度探测范围为 22.5° 、 45° 、 90° 时,对应的方位积分几何因子均随地层密度的增加而增高,即地层密度越大方位分辨能力越强。

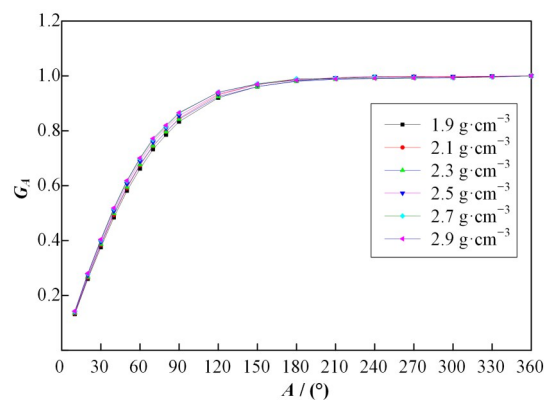


图18 不同地层密度下的方位积分几何因子

Fig. 18 Azimuth integral geometry factor vs. azimuth angle at different formation densities

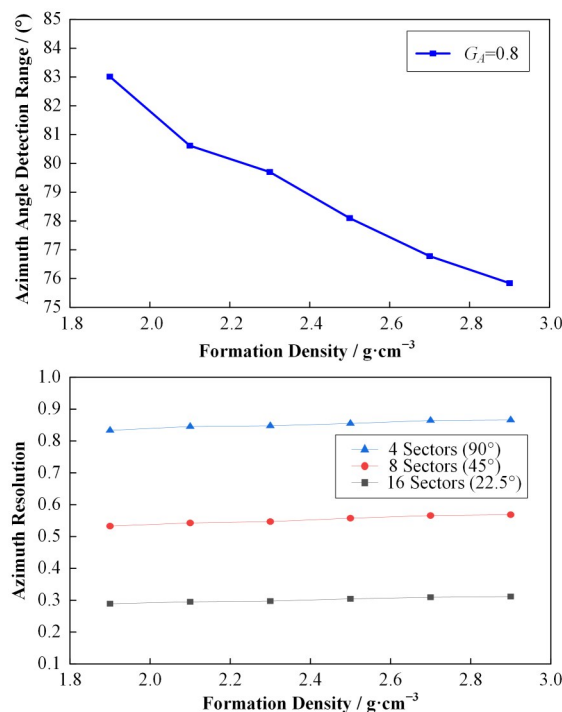


图19 不同地层密度下的方位分辨率

Fig.19 Azimuth integral geometry factor vs. azimuth angle at different formation densities

假设地层密度增大后 A_0 保持不变,仿照§3.3.1径向几何因子的分析得知,地层密度增大最终导致

$|\alpha|=A_0/2$ 处地层对探测器计数率的贡献为负贡献。根据 A_0 的定义, 此时应在此基础上通过减小 A_0 引入正贡献, 以保持 $|\alpha|=A_0/2$ 处地层对探测器计数率的贡献为零。所以, 地层密度增大导致方位角度探测范围变小、方位分辨率增大。

3.4 天然放射性物质类型

井眼条件不变(井眼流体设为纯水), 改变地层物质组分(具体见表1), 模拟研究不同天然放射性物质下的径向、纵向、方位几何因子, 模拟结果如下。

表1 模拟地层的组分
Table 1 The composition of the simulated formation

地层名称 Formation name	放射性物质 Radioactive material	地层组分 Formation components / % (By mass percentage)			地层密度 Formation density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	特征能量 Characteristic energy / MeV	源密度 Source density / $\text{s}^{-1}\cdot(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})^{-1}$
		SiO_2	H_2O	放射性物质 Radioactive material			
U层 U stratum	仅含U Only U	58	30	12	1.90	1.76	6 397.44
K层 K stratum	仅含K Only K	58	30	12	1.52	1.46	0.62
Th层 Th stratum	仅含Th Only Th	58	30	12	1.89	2.62	2 268.12

3.4.1 径向探测特性

三种放射性地层的径向积分几何因子模拟结果如图20所示, 可以看出径向探测深度的变化规律: U层 < K层 $\approx$ Th层。保持U层组分不变, 只改变特征能量, 模拟不同源能量下的径向积分几何因子, 结果如图21所示, 可以看出源能量越大径向探测深度越大。

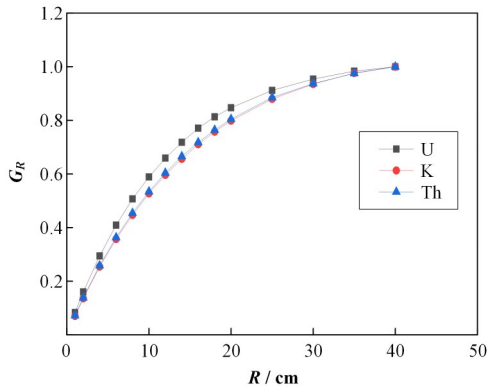


图20 不同天然放射性物质下的径向探测特性
Fig.20 Radial detection characteristics at different natural radioactive materials

首先, 分析源能量对径向积分几何因子的影响。源能量增大后假设 R_0 保持不变, 此时井眼衰减、地层衰减、地层源强均不变, 但源能量增大会使 R_0 处地层对探测器计数率的贡献增大, 表现为正贡献。根据 R_0 的定义, 此时, 应通过增大 R_0 引入负贡献, 以保持 R_0 处地层对探测器计数率的贡献为零。所以, 源能量增大导致探测深度增大。

然后, 分析三种放射性物质对径向积分几何因子的影响。当地层由U层变成K层时, 假设 R_0 保持不变, 此时, 地层密度变小(地层衰减变弱, 对探测器计数为正贡献)、源强密度变小(负贡献)、源能量变

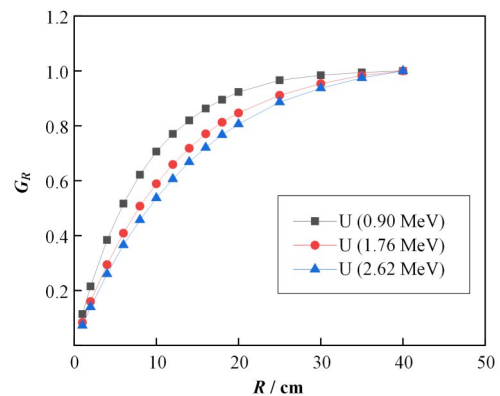


图21 不同能量下的径向探测特性
Fig.21 Radial detection characteristics at different energies

小(负贡献, 由1.76 MeV到1.46 MeV), 其中地层密度变化的贡献占主导地位, 最终导致 R_0 处地层对探测器计数率的贡献增强, 表现为正贡献。根据 R_0 的定义, 此时, 应在此基础上增大 R_0 引入负贡献, 以保持 R_0 处地层对探测器计数率的贡献为零, 所以径向探测深度的变化规律为U层 < K层。当地层由K层变成Th层时, 假设 R_0 保持不变, 此时, 地层密度增大(负贡献)、源强密度增大(正贡献)、源能量增大(正贡献, 由1.46 MeV到2.62 MeV), 由于源能量增大幅度很大, 其对探测器计数率的贡献明显增加, 与地层密度变化引起的贡献大致相抵, 加上源强密度的贡献程度很小, 最终导致 R_0 处地层对探测器计数率的贡献大致保持不变, 所以径向探测深度的变化规律为K层 $\approx$ Th层。

3.4.2 纵向探测特性

三种放射性地层的纵向积分几何因子模拟结果如图22所示, 可以看出纵向分辨厚度的变化规律: U层 < K层 < Th层。保持U层组分不变, 只改变特征

能量,模拟不同源能量下的纵向积分几何因子,结果如图23所示,可以看出源能量越大纵向分辨厚度越大。

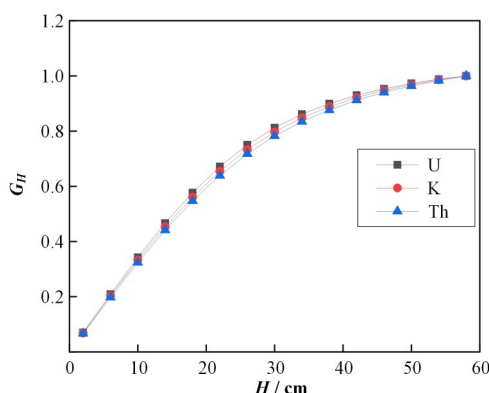


图22 不同天然放射性物质下的纵向探测特性
Fig.22 Longitudinal detection characteristics at different natural radioactive materials

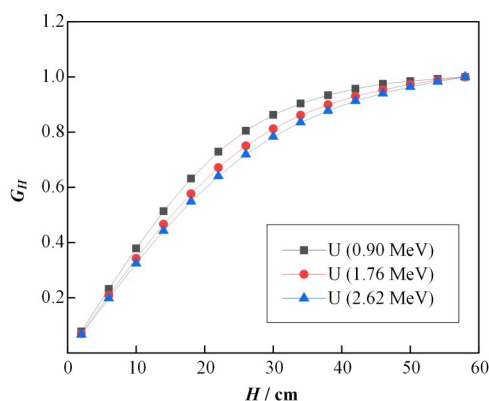


图23 不同能量下的纵向探测特性
Fig.23 Longitudinal detection characteristics at different energies

首先,分析源能量对纵向积分几何因子的影响。假设源能量增大后 H_0 保持不变,此时,井眼衰减、地层衰减、地层源强均不变,但能量增大会使 $|Z|=H_0/2$ 处地层对探测器计数率的贡献增大,表现为正贡献。根据 H_0 的定义,此时,应在此基础上通过增大 H_0 引入负贡献,以保持 $|Z|=H_0/2$ 处地层对探测器计数率的贡献为零。所以,能量增大导致纵向分辨厚度增大。

然后,分析三种放射性物质对纵向积分几何因子的影响。当地层由U层变成K层时,假设 H_0 保持不变,此时地层密度变小(正贡献)、源强密度变小(负贡献)、源能量变小(负贡献),其中地层密度变化的贡献占主导地位,最终导致 $|Z|=H_0/2$ 处地层对探测器计数率的贡献增强,表现为正贡献。根据 H_0 的定义,此时,应在此基础上通过增大 H_0 引入负贡献,

以保持 H_0 处地层对探测器计数率的贡献为零,所以纵向分辨厚度变化规律为U层<K层。当地层由K层变成Th层时,假设 H_0 保持不变,此时地层密度增大(负贡献)、源强密度增大(正贡献)、源能量增大(正贡献),源能量增幅很大,其对探测器计数率的贡献明显增加,最终导致 $|Z|=H_0/2$ 处地层对探测器计数率的贡献为正贡献,此时应在此基础上通过增大 H_0 引入负贡献,以保持 $|Z|=H_0/2$ 处地层对探测器计数率的贡献为零,所以纵向分辨厚度变化规律为K层<Th层。

3.4.3 方位探测特性

三种放射性地层的方位积分几何因子模拟结果如图24所示,可以看出方位角度探测范围的变化规律:U层 $\approx$ K层<Th层。保持U层组分不变,只改变特征能量,模拟不同源能量下的方位积分几何因子,结果如图25所示,可以看出源能量越大方位角度探测范围越大。

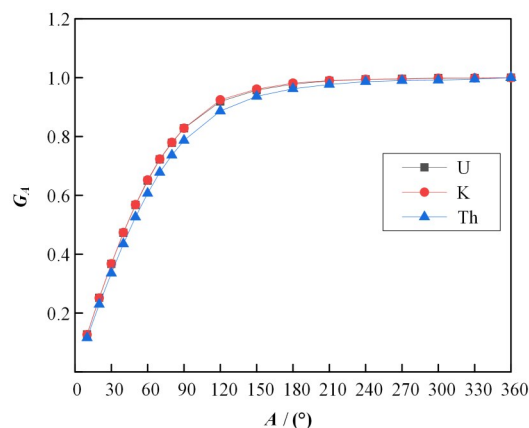


图24 不同天然放射性物质下的方位积分几何因子
Fig.24 Azimuth integral geometry factor vs. azimuth angle at different natural radioactive materials

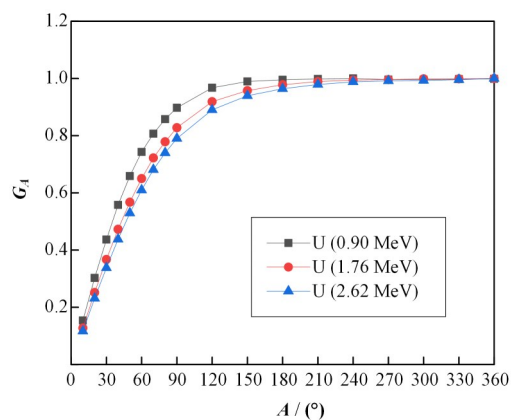


图25 不同能量下的方位积分几何因子
Fig.25 Azimuth integral geometry factor vs. azimuth angle at different energies

首先,分析源能量对方位积分几何因子的影响。源能量增大后假设 A_0 保持不变,此时井眼衰减、地层衰减、地层源强均不变,但能量增大会使 $|\alpha|=A_0/2$ 处地层对探测器计数的贡献增大,为正贡献。根据 A_0 定义,此时应在此基础上通过增大 A_0 引入负贡献,以保持 $|\alpha|=A_0/2$ 处地层对探测器计数的贡献为零。所以,源能量增大导致方位角度探测范围增大。

然后,分析三种放射性物质对方位积分几何因子的影响。当地层由U层变成K层时,假设 A_0 保持不变,此时,地层密度变小(正贡献)、源强密度变小(负贡献)、源能量变小(负贡献),由于 A_0 整体较小使得上述三种因素造成的贡献之间差异变小,并且U层与K层的能量接近,最终导致 $|\alpha|=A_0/2$ 处地层对探测器计数率的贡献变化很小,所以,方位角度探测范围的变化规律为U层 $\approx$ K层。地层由K层变成Th层时,假设 A_0 保持不变,此时地层密度增大(负贡献)、源强密度增大(正贡献)、源能量增大(正贡献),源能量增幅度很大,其对探测器计数率的贡献明显增加,最终导致 $|\alpha|=A_0/2$ 处地层对探测器计数率的贡献为正贡献,此时,应在此基础上通过增大 A_0 引入负贡献,以保持 $|\alpha|=A_0/2$ 处地层对探测器计数率的贡献为零,所以方位角度探测范围规律为K层<Th层。

4 结语

1)泥浆密度对仪器径向、纵向、方位探测特性基本无影响。

2)井眼尺寸对仪器探测特性的影响比较明显,井眼尺寸越大,径向探测深度越大,纵向分辨厚度越大(纵向分辨能力越低),方位角度探测范围越大(方位分辨能力越低)。

3)地层密度对仪器探测特性的影响同样比较明显,地层密度越大,径向探测深度越小,纵向分辨厚度越小(纵向分辨能力越高),方位角度探测范围越小(方位分辨能力越高)。

4)当井眼尺寸变大、地层密度变小时,探测深度增大,而纵向分辨能力、方位分辨能力反而降低,三者难以兼顾。

5)地层放射性物质能量增大使径向探测深度、纵向分辨厚度、方位角度探测范围均增大。

参考文献

- 袁超. 随钻方位伽马测井方法基础研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012.
YUAN Chao. Fundamental study on LWD azimuthal gamma ray well logging[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2012.
- 邵才瑞, 曹先军, 陈国兴, 等. 随钻伽马测井快速正演算法及地质导向应用[J]. 地球物理学报, 2013, 56(11): 3932–3942.
- SHAO Cairui, CAO Xianjun, CHEN Guoxing, *et al.* A fast algorithm for LWD gamma-ray response and its geosteering application[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(11): 3932–3942.
- Mickael M, Phelps D, Jones D. Design, calibration, characterization, and field experience of new high-temperature, azimuthal, and spectral gamma ray logging-while-drilling tools[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 2002.
- Mickael M W, Jones D A, Phelps D A, *et al.* Spectral gamma ray logging-while-drilling system[P]. U.S. Patent 7,253,401, 2007.
- Diab M, Combs J. Unconventional Horizontal Well placement challenges-LWD geosteering applications utilizing a unique spectral azimuthal gamma ray in real time[C]. SPE Western North American and Rocky Mountain Joint Meeting. Denver, Colorado, 2014.
- Marsala A F, Kasprzykowski P, Kimour F. Spectral gamma ray complements innovative real time advanced mud logging characterization while drilling[C]. SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, Al-Khobar, Saudi Arabia, 2013.
- Maranuk C, Mickael M, Zimmermann P. Applications of a unique spectral azimuthal gamma ray tool to unconventional reservoirs[C]. SPWLA 54th Annual Logging Symposium, New Orleans, Louisiana, 2013.
- Nye R, Di Tommaso D. Well optimization using a LWD spectral azimuthal gamma ray tool in unconventional reservoirs[C]. Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, Ravenna, Italy, 2013.
- Zeghlache M L, Palmer R, Abdelkader A. Slim LWD spectral gamma ray for both well placement and petrophysical evaluation of clastic reservoirs in Saudi Arabia[C]. SPE Saudi Arabia Section Annual Technical Symposium and Exhibition, Al-Khobar, Saudi Arabia, 2015.
- Xu L B, Huiszoon C, Wang J X, *et al.* Spectral gamma ray measurement while drilling[C]. SPWLA 56th Annual Logging Symposium, Long Beach, California, 2015.
- 范宇翔, 骆庆峰, 李留, 等. 伽马成像随钻测井仪钻铤布局设计可靠性分析[J]. 石化技术, 2015, (10): 213–214.
FAN Yuxiang, LUO Qingfeng, LI Liu, *et al.* Analysis on design reliability of drill collar of gamma imaging logging while drilling instrument[J]. Petrochemical Industry Technology, 2015, (10): 213–214.