

350 kV 高压 X 射线密度测井探测深度特性 及影响

王虎¹ 刘睿^{2,3} 岳爱忠¹ 于华伟^{2,3} 张晓蕾¹ 杨争春^{2,3} 祝倩^{2,3} 郭智强⁴

1(中国石油集团测井有限公司测井技术研究院 西安 710077)

2(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院 青岛 266580)

3(深层油气全国重点实验室(中国石油大学(华东)) 青岛 266580)

4(中国石油集团测井有限公司西南分公司 重庆 400000)

摘要 密度测井中使用可控 X 射线源替代 ¹³⁷Cs 放射源已经成为新的趋势。X 射线源强度受靶基上高压影响较大,当高压为 350 kV 时密度测量不确定度可以保持在 0.01 g·cm⁻³。为探究 350 kV 高压 X 射线密度测井仪器的探测深度特性及影响,利用蒙特卡罗方法研究了不同源距探测器在 20% 含水石灰岩地层中的探测深度;并且通过与 ¹³⁷Cs 源密度测井仪探测特性的对比,分析了二者探测深度差异的原因。另外通过模拟分析了泥饼和地层对探测器的贡献度以及不同探测器的密度偏差,研究了井壁泥饼对密度测井响应的影响。研究结果表明:X 射线密度测井仪的探测深度随着源距的增加而变大;与 ¹³⁷Cs 源密度测井仪相比,X 射线密度测井仪散射粒子主要集中于井壁 1~3 cm 处,从而造成二者探测深度差异;此外,泥饼和地层对不同源距探测器的贡献度不同,探测器密度偏差随着源距增加而减小。

关键词 X 射线, 密度测井, 蒙特卡罗模拟, 探测深度, 泥饼影响

中图分类号 TL99, P631.8⁺17

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.100502

Depth-of-investigation characteristics and influence of 350-kV high-voltage X-ray density logging

WANG Hu¹ LIU Rui^{2,3} YUE Aizhong¹ YU Huawei^{2,3} ZHANG Xiaolei¹
YANG Zhengchun^{2,3} ZHU Qian^{2,3} GUO Zhiqiang⁴

1(Well Logging Technology Research Institute of China Petroleum Group Well Logging Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

2(School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

3(National Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

4(Southwest Branch of China Petroleum Logging Co., Ltd., Chongqing 400000, China)

Abstract [Background] The use of controlled X-ray sources instead of ¹³⁷Cs radioactive sources in density logging has become a new trend. The high voltage on the target substrate significantly affects the intensity of the X-ray

山东省自然科学基金(No.ZR2022MD019)、中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目(No.2021DJ3801)、中央高校基本科研业务费(No.22CX01001A-2)、中国石油大学(华东)探究性实验项目资助

第一作者: 王虎, 男, 1986年出生, 2019年于中国石油大学(北京)获博士学位, 从事放射性测井理论与仪器研制工作

通信作者: 于华伟, E-mail: yhwlog@163.com

收稿日期: 2023-02-18, 修回日期: 2023-03-15

Supported by Natural Science Foundation of Shandong Province (No.ZR2022MD019), China National Petroleum Corporation Scientific Research and Technology Development Project (No. 2021DJ3801), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 22CX01001A-2), Exploratory Experimental Project of China University of Petroleum (East China)

First author: WANG Hu, male, born in 1986, graduated from China University of Petroleum (Beijing) with a doctoral degree in 2019, engaged in nuclear logging methods and experimental research

Corresponding author: YU Huawei, E-mail: yhwlog@163.com

Received date: 2023-02-18, revised date: 2023-03-15

source, and the density measurement uncertainty can be maintained at $0.01 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ when the high voltage is 350 kV. **[Purpose]** This study aims to examine the depth-of-investigation characteristics and influence of a 350-kV high-voltage X-ray density logging instrument. **[Methods]** The depth of investigation of various source distance detectors in 20% water-bearing limestone formation was studied using the Monte Carlo method. By comparing the investigation characteristics of 350-kV high-voltage X-ray source and ^{137}Cs source density logging, the reasons for the differences in the depth of investigation among them were analyzed. Moreover, the contribution of mudcake and formation to the detector and the density deviations of various detectors were analyzed *via* simulation. Finally, the influence of mudcake on the density logging response of the well wall was explored. **[Results]** The results indicate that the depth of investigation of X-ray density logging instrument increases with the augment of source distance. Compared to the ^{137}Cs source density logging, the scattered particles of the X-ray density logging are mainly concentrated at 1~3 cm from the bore wall, resulting in the depth-of-investigation differences between the two techniques. Furthermore, the contributions of mudcake and formation to different source distance detectors are different, and the detector density deviation decreases with the increase in source distance. **[Conclusions]** This study affords a theoretical basis for the depth-of-investigation characteristics and influence of 350-kV high-voltage X-ray density logging.

Key words X-ray, Density logging, Monte Carlo simulation, Depth of investigation, Effect of mudcake

常规密度测井使用放射性同位素 ^{137}Cs 源,考虑到辐射影响、环境安全等因素,使用可控性源代替放射性 γ 源是核测井的必然趋势^[1]。Becker等^[2]提出在密度测井中使用电子加速器产生X射线代替放射性 ^{137}Cs 源测量地层信息,这种方法可控性强、对环境和人体危害性小,且测量精度高。Badruzzama等^[3]在此基础上,进一步对比了X射线密度测井数据与 ^{137}Cs 源密度测井数据,最终认为两者具有高度的相似性。因此,使用X射线发生器替代 ^{137}Cs 源已经成为了国内外密度测井新的趋势。周悦等^[4]通过模拟验证了 ^{137}Cs 源产生的单能能量和X射线源产生低能连续能量的区别,发现不同的能量(源)势必会导致各种测井参数的差异,如零源距、探测深度等;且200 kV、400 kV高压对应X射线的零源距分别为4.5~6 cm、6~7.5 cm。于华伟等^[5]认为随着X射线管高压的增大,密度测量的不确定度会降低。在350 kV高压时,X射线管密度测量不确定度小于 $0.01 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,满足X射线测井的精度要求,因此,在模拟试验中选择350 kV高压作为X射线管电压。近年来,随着设计水平和制造技术的进步,国外石油服务公司开始实验具有更好的密度测量精度和较好的探测深度,且适用于井下耐高温的X射线发生器。Simon等^[6]设计了井下X射线测井仪器样机(源距是常规密度仪器源距的60%),与常规双探测器密度测井仪器相比,探测器增加到4个,可以更好地反映地层信息,而且其探测深度与计数率的响应关系与 ^{137}Cs 源密度测井仪相差较小。Wraight等^[7]设计了使用X射线发生器的密度测井仪器,近远源距分别为8.89 cm、24.1 cm,并认为通过改变源距可以优

化仪器响应和探测深度,但缺乏对源距改变与探测深度、密度响应关系之间的研究。此外,在使用密度测井仪进行井下地层密度测量时,通常会受到泥饼的影响,仪器测量的密度值会与地层实际密度值存在一定差值。石玉江^[8]用蒙特卡罗方法,研究了常规密度仪器源距为30 cm和50 cm的仪器对纯石灰岩骨架的探测深度,结果表明,计数的90%来自径向厚度约为5 cm的地层,泥饼的影响不可忽视。因此,在X射线密度测井模拟中,同样需要考虑井壁泥饼的影响,并研究其与密度偏差的关系。

本文首先研究了X射线密度测井中各探测器的探测深度,并对比了X射线源与 ^{137}Cs 源探测深度的差异,以及不同深度地层对两种源密度响应的贡献度;并进一步分析了在不同泥饼和地层组合中X射线密度测井各探测器测量的密度偏差,为今后X射线密度仪器探测深度特性和密度响应关系研究提供依据。

1 X射线密度测井衰减规律及探测深度

同位素化学源 ^{137}Cs 源和X射线源发射的 γ 光子在介质中衰减都遵循窄束规律^[8],可以表示为:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (1)$$

在X射线密度测井中,式(1)中 I 为X射线在地层中衰减后的强度; I_0 表示为X射线的初始强度,与管电压相关; μ 表示物质对X射线线性衰减系数,与X射线穿越的介质密度 ρ 有关; x 表示X射线在地层中运移的距离。X射线穿过物质时,主要是通过光电效应、康普顿散射和电子对效应这三种作用来进行衰减。这些相互作用的发生对于物质的原子序数

和入射 X 射线能量有程度不同的依赖关系。

探测深度是指在地层中对测量结果起决定作用的那部分介质的范围。研究探测深度可以了解各部分介质对测量结果的影响,并且判断密度测井仪器对周围地层的响应能力。图 1 为 X 射线在地层中散射的简意图,其中探测深度 $h=x\cos\alpha$ ($0<\alpha<90^\circ$),将其代入式(1)中,可得:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \frac{h}{\cos\alpha}} \quad (2)$$

即 X 射线衰减还与探测深度 h 有关。因此,探测深度变化时,探测器所测得的地层参数也有一定差异。

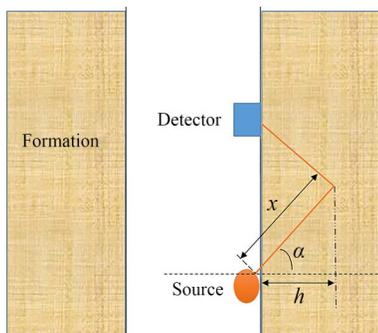


图 1 X 射线在地层中散射的简意图
Fig.1 Simple intention of X-ray scattering in formation

式(3)所示为 X 射线在含有泥饼的地层中散射时窄束衰减规律,其中质量衰减系数包含有泥饼 μ_1 、地层 μ_2 , x_1 为粒子在泥饼中运移的距离, x_2 为在地层中运移的距离。若探测深度较浅,探测信息主要来自于泥饼,即 X 射线的强度 I 主要受 μ_1 影响;若探测深度较大, X 射线穿过泥饼后在地层中散射,再穿过泥饼被探测器接收,即 I 受到 μ_1 、 μ_2 影响。

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu_1 x_1 - \mu_2 x_2} \quad (3)$$

2 仿真模型

为了研究 X 射线探测深度特性及影响因素,利用 MCNP 软件模拟探测器在不同源距与地层组合时的计数变化和密度响应。在参考杨争春^[5]、Simon^[6]等的 X 射线密度测井仪器结构后,本文模型综合考虑了实际中 X 射线测井仪器制作、探测器源距、仪器内部以及井眼散射 X 射线的屏蔽等。构建的模型如图 2 所示,其中地层高度为 80 cm,井眼半径为 10.6 cm,内部充满淡水;探测器距离地层 1 cm (仪器紧贴井壁);为了保证探测器尽可能多地接收来自地层的散射光子,探测器准直孔角度设置为 30°;探测器源距从 10 cm 开始,每增加 5 cm 放置一个探测器,最远探测器源距为 25 cm。为了减小探测器计数统计误差,模拟时投入 5×10^9 个粒子,并利

用权重卡降低误差,保证统计误差 $<2\%$ ^[9];电压恒定为 350 kV 高压,降低 X 射线源产额变化对测量的影响。

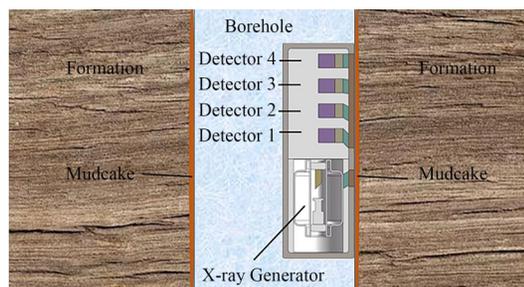


图 2 密度测井仪器模型示意图
Fig.2 Diagram of model of the density logging instrument for MCNP calculation

3 X 射线测井仪器探测深度研究

3.1 X 射线探测深度

为了研究 X 射线密度测井仪器的探测特性,得到不同源距探测器的探测能力,首先研究在纯地层中探测器各自的探测深度^[10-11]。选取 20% 的含水石灰岩地层,将其在径向方向上分为 15 层。考虑计数率误差及精确度,地层厚度从近到远分别为 4 个厚度 1 cm 的地层、4 个厚度 1.5 cm 的地层、4 个厚度 2 cm 的地层、外围 3 层厚度 5 cm 的地层。使用 F8 卡记录从源发射后经过地层散射被探测器接收的光子,得到探测深度和计数率归一化的关系,并对 γ 能量大于 150 keV 的计数进行研究,结果如图 3 所示。

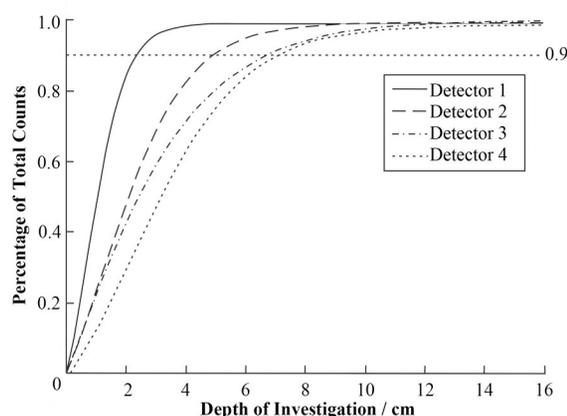


图 3 X 射线源探测深度
Fig.3 Depth of investigation of the X-ray source

通常定义的探测深度为给探测器总信息量提供 90% 信息的地层径向深度。从图 3 可知,随着探测深度增加,各个探测器的计数率增长幅度先增大后减小,达到最大值后基本保持不变;探测深度相同

时,远源距探测器计数率小于近源距探测器;10 cm、15 cm、20 cm、25 cm的探测器探测深度分别为2.4 cm、5.0 cm、6.9 cm、7.2 cm左右。综合分析可知,X射线密度测井仪器探测器源距越远,探测深度越深,且最远探测器对应探测深度与最近探测器对应探测深度差在4.8 cm左右。这是因为探测器接收的粒子数与源距有关,远探测器接收粒子的优势区域来源于远地层,而近探测器接收的粒子多数是近地层散射的。

3.2 X射线测井仪器与 ^{137}Cs 源测井仪器探测深度对比

通常常规 ^{137}Cs 密度源测井仪器的远探测器源距

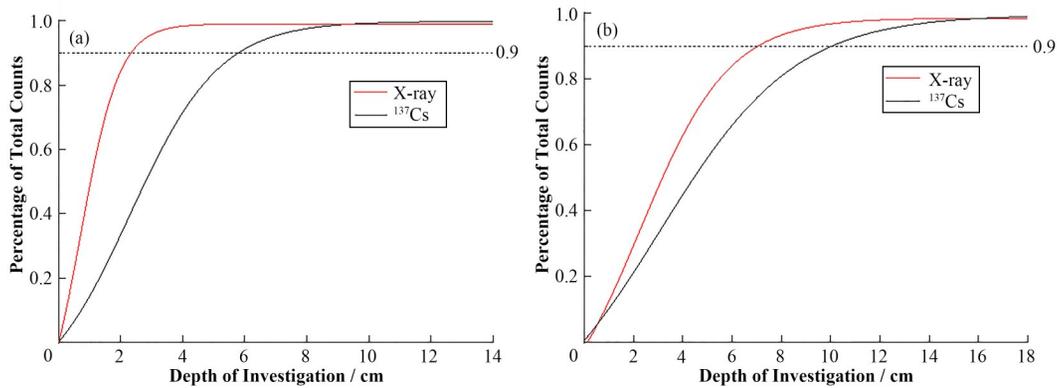


图4 远近探测器探测深度对比 (a) 近探测器,(b) 远探测器

Fig.4 Comparison of the depth of investigation of two sources for short-spacing detector (a) and long-spacing detector (b)

依然选择粒子总计数90%的地层径向深度为探测深度。由图4可知,X射线密度测井仪远探测器的探测深度为7.2 cm,近探测器的探测深度为2.4 cm; ^{137}Cs 源密度测井仪远近探测器所测得的探测深度分别为10.6 cm和6 cm。相比之下,二者近探测器探测深度相差3.6 cm,远探测器探测深度相差3.4 cm。分析认为:密度测井仪中不同源的探测深度存在差异, ^{137}Cs 源比X射线源探测深度深3.4~3.6 cm。在实际密度测井中测量地层信息时通常会受到泥饼或井眼环境等影响,因此,近源距探测器径向探测深度越小,越有利于真实反映泥饼及井眼等信息。所以,在密度测井仪近探测器选择上,X射线源优于 ^{137}Cs 源。而对于远源距探测器源距越大,探测深度越深反映地层信息越多。但综合到考虑源距与探测精度的关系,认为X射线密度测井仪虽然远源距探测器径向探测深度小于 ^{137}Cs 源,但是在探测精度方面要明显优于 ^{137}Cs 源。

3.3 X射线测井仪器与 ^{137}Cs 源测井仪器径向微分响应对比

探测深度是源发射的粒子数在积分上的表现形

为40 cm、近探测器源距为25 cm左右。而X射线密度测井仪器的最远探测器源距仅为25 cm,与 ^{137}Cs 源密度测井仪器近探测器源距基本一致。密度测井仪器的源距越大,探测精度越低^[12-13],所以在仪器结构方面,X射线密度测井仪在探测器精度方面优于 ^{137}Cs 源。已知探测精度优劣的情况下,考虑到X射线源与 ^{137}Cs 源源强、发射的 γ 能谱差异等,通过对比二者的探测深度,可以验证可控源和 ^{137}Cs 源对探测特性的影响,并选取X射线密度测井仪器中10 cm、25 cm处探测器作为近、远探测器源距,模拟计算 ^{137}Cs 源在20%含水石灰岩地层中探测深度和计数率归一化的响应关系,结果如图4所示。

式,可以反映探测器对整体地层的响应。可以通过分析每个地层粒子数的差别,研究X射线源和 ^{137}Cs 源探测深度在微分形式上的差别,找出二者探测深度差异的原因。图5为模拟得到地层对不同源探测器的贡献度与地层厚度的关系。

由图5可知,密度测井中不同地层贡献度存在差异,且同一地层对远、近探测器的贡献度不同。地层对X射线源、 ^{137}Cs 源测井仪不同源距探测器贡献度符合同一规律,即贡献度随着探测深度而增加,增加幅度越来越小,增加到峰值时,逐渐开始下降直至为零;远地层对远源距探测器贡献度明显高于近探测器。在X射线密度测井仪中,对探测器贡献度最大的地层范围为1~3 cm,贡献度峰值为48%、32%、23%和18%;在 ^{137}Cs 源测井仪中,对探测器贡献度最大的地层范围为2~6 cm,贡献度峰值为21%和12%。分析可知,X射线密度测井仪发射粒子在1~3 cm处地层散射较多,最终经过地层散射被探测器所接收。相比X射线测井仪, ^{137}Cs 源产生的 γ 粒子主要在地层2~6 cm区域内发生大量散射,因此导致 ^{137}Cs 源探测深度比X射线深3 cm左右。

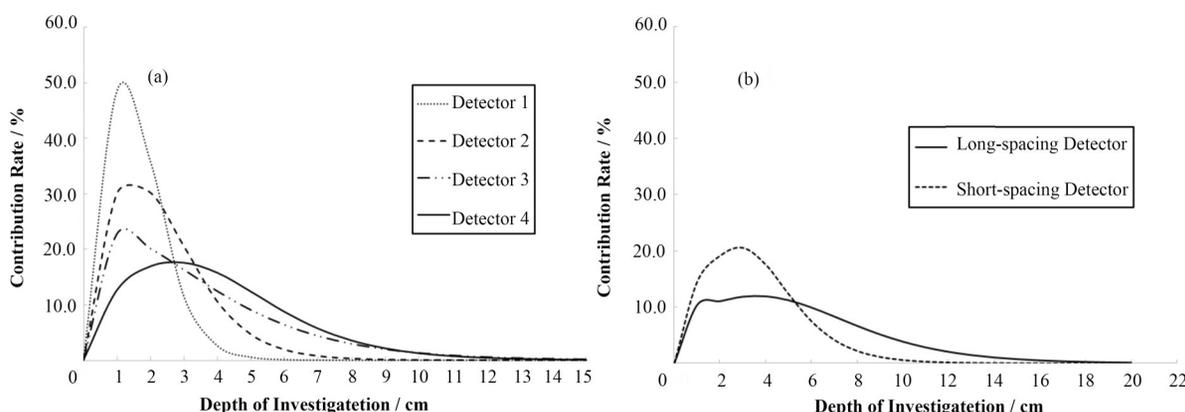


图5 探测深度与贡献度关系 (a) X射线源, (b) ¹³⁷Cs源
Fig.5 Relationship between the depth of investigation and contribution rate (a) X-ray source, (b) ¹³⁷Cs source

4 井壁泥饼对 X 射线密度测井响应的影响

通过对纯地层中 X 射线源和 ¹³⁷Cs 源密度测井仪探测深度的对比与分析,初步确定了 350 kV 高压 X 射线仪器探测特性。本部分通过重点模拟 X 射线密度测井模型中不同探测器对含泥饼地层的响应,分析来自能量大于 150 keV 时泥饼和地层的计数,研究二者对探测器的相对贡献及造成的密度偏差。

4.1 泥饼对计数率的影响

实际测井中泥饼的厚度并不是单一均匀厚度,随着测井深度呈现无规则变化,因此需要研究不同泥饼厚度和地层组合下探测器的计数率。选取泥饼材料为 20% 蒙脱石、80% 水,厚度为 1.27 cm、2.54 cm,地层为 20% 含水石灰岩,通过蒙特卡罗方法探究不同泥饼厚度情况与 X 射线密度测井仪探测器的计数率响应,结果如图 6 所示。

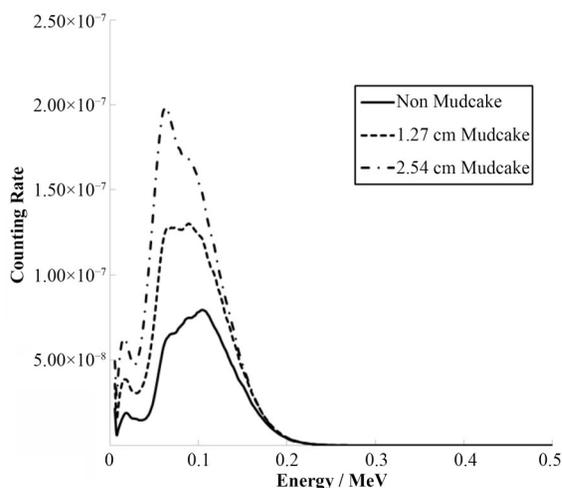


图6 泥饼对计数率的影响
Fig.6 Effect of mudcake on counting rate

由图 6 可知,地层中存在泥饼时探测器接收的计数率高于无泥饼的计数率;泥饼厚度为 2.54 cm 时,探测器接收的散射 X 射线粒子数是 1.27 cm 泥饼计数的 1.6 倍左右。分析认为:由于泥饼密度小于地层密度,X 射线强度在含泥饼地层中的衰减比在纯地层的衰减小,到达探测器的粒子数较多;相比 1.27 cm 的泥饼地层,2.54 cm 泥饼地层中的 X 射线在低密度泥饼中运移距离远,在高密度地层中运移距离相对较小,衰减后的 X 射线强度大,探测器所接收的粒子数也明显较多。

4.2 泥饼和地层对探测器的贡献度

由 §4.1 可知,泥饼厚度不同经地层散射被探测器所接收的粒子数不同。为了定量分析泥饼厚度变化对不同探测器计数的影响,分别模拟并得到 1.27 cm、2.54 cm 下泥饼和地层对探测器的计数率贡献,结果如图 7 所示。

泥饼厚度为 1.27 cm 时,泥饼对探测器(由近到远)的贡献率分别为 61.07%、30.46%、17.42% 和 10.37%;泥饼厚度为 2.54 cm 时,泥饼对探测器的贡献率分别为 89.57%、60.41%、35.15% 和 26.14%。分析可知,泥饼变厚,对探测器的贡献度增大;且探测深度越浅(探测器源距越小)泥饼的贡献度越大,随着探测深度变深(探测器源距越大),则地层的贡献度增加。

结合 §4.1 分析认为,在泥饼变厚时 4 个不同探测器接收经过泥饼和地层散射的粒子数增多,同时泥饼对探测器的贡献率增加;探测器计数率与泥饼贡献度满足正相关关系,与地层贡献度呈现负相关关系;而且探测器源距越大探测深度越深,接收来自地层散射的粒子数比例越大。

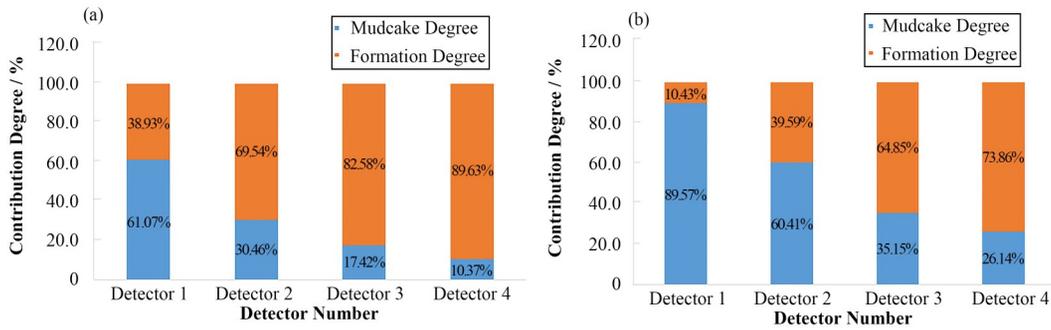


图7 泥饼与地层对探测器的贡献度 (a) 1.27 cm 泥饼, (b) 2.54 cm 泥饼
Fig.7 Contribution rate of mudcake and formation to detectors (a) 1.27 cm mudcake, (b) 2.54 cm mudcake

4.3 探测器的密度偏差

为了详细研究泥饼对远近探测器测量密度值造成的偏差,模拟不同泥饼厚度对探测器计数率、贡献

度的影响,确定了泥饼与探测器之间的响应。图8所示为1.27 cm、2.54 cm 泥饼厚度下模拟不同探测器的测量密度,得到的泥饼厚度与远近探测器测量密度偏差的关系。

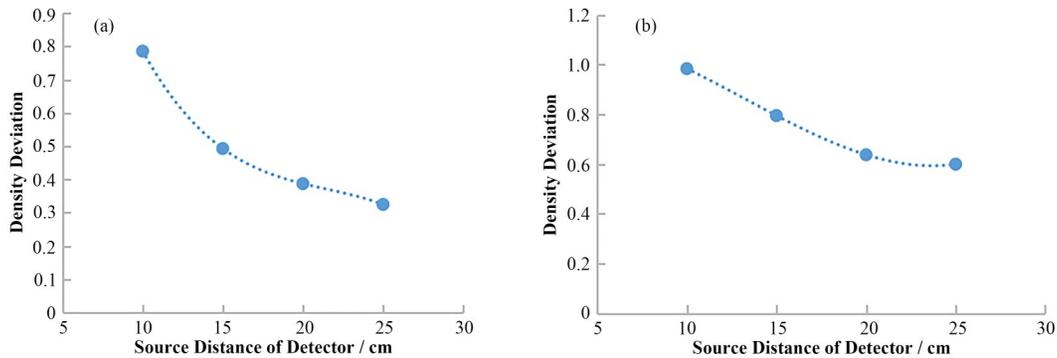


图8 泥饼厚度与密度偏差的关系 (a) 1.27 cm 泥饼, (b) 2.54 cm 泥饼
Fig.8 Relationship between the thickness of mudcake and density deviation (a) 1.27 cm mudcake, (b) 2.54 cm mudcake

如图8所示,当泥饼为1.27 cm时,探测器所测得的密度偏差分别为 $0.786 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $0.493 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $0.388 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $0.325 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;当泥饼为2.54 cm时,探测器所测得的密度偏差分别 $0.984 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $0.795 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $0.638 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $0.599 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,即地层中含有泥饼,探测器所测得的密度比真实密度低,而且泥饼越厚,密度偏差越大;此外,随着探测器源距的增加,测量密度偏差逐渐减小。分析可知,由于泥饼密度小于地层密度,线性衰减系数 μ_1 小于 μ_2 ,所以与纯地层相比,X射线散射时经过 μ_1 较小的泥饼介质以及经过 μ_2 较大的地层后, I 在衰减之后仍较大,故而探测器接收的计数较高。因此,经过计算后所得的探测密度小于地层真实密度,从而造成密度偏差。此外,探测器源距增加,地层贡献度增加,泥饼对探测器的影响降低,所以远源距探测器密度偏差小。

5 结语

1) 在能量大于150 keV的能窗内,X射线测井仪10 cm、15 cm、20 cm、25 cm的探测器探测深度分

别为2.4 cm、5.0 cm、6.9 cm、7.2 cm左右,10 cm近探测器的探测深度与25 cm远探测器的探测深度差值在4.8 cm左右。

2) X射线密度测井仪探测深度小于 ^{137}Cs 源探测深度,二者相差2~3 cm;X射线源的近源距探测器径向探测深度小于 ^{137}Cs 源,有利于反映泥饼及井眼等信息;但是其远源距探测深度小于 ^{137}Cs 源,因此不利于探测地层信息。然而,综合考虑探测深度以及精度等因素,认为X射线源探测特性优于 ^{137}Cs 源。

3) 井壁存在泥饼会对X射线探测器造成影响,探测器源距越小,泥饼贡献度越大、地层贡献度越小;泥饼的厚度对探测器的密度偏差产生显著影响,当泥饼为1.27 cm时,探测器(源距逐渐增加)所测得的密度偏差分别为 $0.786 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $0.493 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $0.388 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $0.325 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;当泥饼为2.54 cm时,探测器所测得的密度偏差分别 $0.984 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $0.795 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $0.638 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $0.599 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;即泥饼厚度与密度偏差呈正相关关系,且同等泥饼厚度下远源距探测器密度偏差小于近源距密度偏差。

作者贡献声明 王虎负责文章大纲拟定,参与模型搭建,参与探究过程和问题讨论,论文撰写和修改;刘睿参与模型搭建及参数调整,论文撰写和修改;岳爱忠参与研究问题和讨论,项目经费支持;于华伟负责技术制定与模型建设,论文修改指导;张晓蕾负责后期数据处理;杨争春参与数据处理,提供核测井相关技术咨询;祝倩参与密度偏差研究;郭智强负责论文收尾,参与密度偏差研究。

参考文献

- 1 Yu H W, Wang Z, Xue Z B, *et al.* Corrections of fast neutron inelastic scattering effects on D-T neutron porosity logging[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2022, **190**: 110486. DOI: [10.1016/j.apradiso.2022.110486](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110486).
- 2 Becker A J, Boyce J R, Corris G W, *et al.* Detection of scattered X-rays from an electron linac in a borehole[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms*, 1987, **24 - 25**: 995 - 998. DOI: [10.1016/s0168-583x\(87\)80296-3](https://doi.org/10.1016/s0168-583x(87)80296-3).
- 3 Badruzzaman A. An assessment of fundamentals of nuclear-based alternatives to conventional chemical-source bulk-density measurement[J]. *Petrophysics*, 2014, **55(5)**: 415 - 434.
- 4 周悦, 于华伟, 陈翔鸿, 等. 基于 X 射线源的密度测井近源距研究[J]. *核技术*, 2018, **41(12)**: 120401. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.120401](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.120401).
ZHOU Yue, YU Huawei, CHEN Xianghong, *et al.* Study on near detector-source spacing of density logging based on X-ray source[J]. *Nuclear Techniques*, 2018, **41(12)**: 120401. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.120401](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.120401).
- 5 于华伟, 杨争春, 刘超卓, 等. X 射线密度测井中 X 射线管高压对密度测量精度的影响[J]. *核技术*, 2021, **44(11)**: 110401. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110401](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110401).
YU Huawei, YANG Zhengchun, LIU Chaozhuo, *et al.* Effects of X-ray tube high-voltages on the density measurement accuracy in X-ray density logging[J]. *Nuclear Techniques*, 2021, **44(11)**: 110401. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110401](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110401).
- 6 Simon M, Tkabladze A, Beekman S, *et al.* A revolutionary X-ray tool for true sourceless density logging with superior performance[C]. London, UK: SPWLA 59th Annual Logging Symposium, 2018.
- 7 Wraight P, Becker A J, Groves J L, *et al.* High voltage X-ray generator and related oil well formation analysis apparatus and method: US7668293[P]. 2010-02-23.
- 8 黄隆基, 石玉江. 含气储集层泥浆侵入的动力学特征及其对补偿中子和补偿密度测井响应的影响[J]. *地球物理学报*, 1998, **41(6)**: 856 - 864.
HUANG Longji, SHI Yujiang. Dynamic characteristics of mud invasion and the effects on responses of compensated density and neutron logs to gas reservoir[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1998, **41(6)**: 856 - 864.
- 9 张丽, 韩笑, 于华伟, 等. D-D 中子孔隙度测井泥质影响及校正研究[J]. *核技术*, 2022, **45(5)**: 050501. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.050501](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.050501).
ZHANG Li, HAN Xiao, YU Huawei, *et al.* Lithology affects and correction of neutron porosity logging using D-D source[J]. *Nuclear Techniques*, 2022, **45(5)**: 050501. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.050501](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.050501).
- 10 周悦, 于华伟, 王猛, 等. 基于 CLYC 探测器的可控源中子孔隙度测井数值模拟研究[J]. *核技术*, 2021, **44(4)**: 040501. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.040501](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.040501).
ZHOU Yue, YU Huawei, WANG Meng, *et al.* Numerical simulation of controllable source neutron porosity logging based on CLYC detector[J]. *Nuclear Techniques*, 2021, **44(4)**: 040501. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.040501](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.040501).
- 11 Yu H W, Chen X H, Zhou Y, *et al.* Impact of photoelectric effect on X-ray density logging and its correction[J]. *Applied Radiation and Isotopes: Including Data, Instrumentation and Methods for Use in Agriculture, Industry and Medicine*, 2020, **156**: 108785. DOI: [10.1016/j.apradiso.2019.06.031](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.06.031).
- 12 Yu H W, Zhang Y X, Chen X H, *et al.* Numerical simulation and method study of X-ray litho-density logging[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2020, **31(12)**: 124. DOI: [10.1007/s41365-020-00826-2](https://doi.org/10.1007/s41365-020-00826-2).
- 13 于华伟, 王文定, 张丽, 等. 随钻方位伽马测井方位灵敏特性研究[J]. *核技术*, 2021, **44(1)**: 010202. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.010202](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.010202).
YU Huawei, WANG Wending, ZHANG Li, *et al.* Study on the azimuth sensitivity of azimuthal γ ray logging while drilling[J]. *Nuclear Techniques*, 2021, **44(1)**: 010202. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.010202](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.010202).