文章编号:1673-5005(2017)04-0078-07 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2017.04.010

随钻中子伽马密度测井的双源距含氢指数校正方法

张泉滢[1], 张 锋[1,2], 王玉伟[3], 刘军涛[1], 贾文宝[4], 谭永周[5], 李 静[6]

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院,山东青岛 266580; 2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室,山东青岛 266071; 3. 新疆油田公司勘探公司,新疆克拉玛依 834000; 4. 南京航空航天大学材料科学与技术学院,江苏南京 210016; 5. 河南省科学院同位素研究所有限责任公司,河南郑州 450015; 6. 喀左县蒙古族高级中学古塔分校生物科组,辽宁朝阳 122300)

摘要:针对中子伽马密度测井中利用单探测器信息进行含氢指数校正计算密度结果的不稳定问题,开展双源距含氢指数校正方法研究;采用蒙特卡罗方法模拟热中子、伽马分布与密度和含氢指数的响应规律,建立热中子、俘获伽马以及氢俘获伽马计数比进行含氢指数校正的密度计算模型,对比不同粒子含氢指数校正效果以及井径、矿化度的影响。模拟结果表明:含氢指数校正后密度准确度明显改善;其中,热中子含氢指数校正后的密度精度和准确度最高,氢俘获校正密度准确度略高于俘获伽马,但其密度精度远小于热中子和俘获伽马。双源距含氢指数校正密度误差随着井径和地层水矿化度的增大而增大;其中,热中子校正受井径和矿化度影响最小,氢俘获和总俘获伽马校正方法受影响较大。研究结果为随钻测井准确计算中子伽马密度提供了校正方法。

关键词:可控中子源; 双源距; 密度; 含氢指数; 蒙特卡罗模拟

中图分类号:P 631.817 **文献标志码**:A

引用格式:张泉滢,张锋,王玉伟,等. 随钻中子伽马密度测井的双源距含氢指数校正方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(4):78-84.

ZHANG Quanying, ZHANG Feng, WANG Yuwei, et al. Dual-spacing hydrogen index correction method for neutron gamma density measuring in LWD [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2017,41(4):78-84.

Dual-spacing hydrogen index correction method for neutron gamma density measuring in LWD

ZHANG Quanying[1], ZHANG Feng[1,2], WANG Yuwei[3], LIU Juntao[1], JIA Wenbao[4], TI Yongzhou[5], LI Jing[6]

(1. *School of Geosciences in China University of Petroleum*, *Qingdao* 266580, *China*;
2. *Laboratory for Marine Mineral Resources*, *Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology*, *Qingdao* 266071, *China*;
3. *Exploration Company of Xinjiang Oilfield Company*, *Karamay* 834000, *China*;
4. *College of Materials Science and Engineering*, *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, *Nanjing* 210016, *China*;
5. *Zhengzhou Key Laboratory of Isotope Tracing and Detecting*, *Isotope Research Institute of Henan Academy of Sciences Company Limited*, *Zhengzhou* 450015, *China*;
6. *Department of Biology*, *Guta Branch School of Mongolian Senior High School*, *Chaoyang* 122300, *China*)

Abstract: To resolve unstable density measurements using single detector hydrogen index correction calculation in neutron gamma density logging, a dual-spacing hydrogen index correction method is studied. The neutron and gamma ray distribution in different hydrogen index and formation conditions is simulated by a Monte Carlo method. A hydrogen index correc-

收稿日期:2016-04-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41374125,41574119);国家重大油气专项(2017ZX05019005-004);中央高校基本科研业务费专项(14CX05011A,15CX06008A)

作者简介:张泉滢(1988-),男,博士研究生,研究方向为核测井方法、核测井数据处理及蒙特卡罗模拟。E-mail:zqy_cn@sina.com。

tion calculation model is established by the dual-spacing count rate ratio of capture gamma ray, hydrogen capture gamma ray and thermal neutron. The results of hydrogen index correction and the impact of caliper and salinity are compared. As a result, the accuracy in the density measurements after hydrogen index correction has improved significantly. Among them, the precision and accuracy from thermal neutron correction is the highest. The accuracy from hydrogen capture gamma correction is slightly higher than that of the capture gamma; on the contrary, the precision of hydrogen capture gamma is far less than that of the capture gamma and the thermal neutron. The error of dual-spacing hydrogen index correction increases with the increasing caliper and salinity. The results from thermal neutron correction are less sensitive to caliper and salinity, while the results from capture gamma and hydrogen capture gamma correction are considerably are on the opposite. The research provides correction methods for obtaining neutron gamma density accurately in LWD.

Keywords: pulsed neutron source; dual-space; density; hydrogen index; Monte Carlo simulation

随着随钻测井技术在水平井、大斜度井地层实时评价中的广泛应用[1-3],人身安全和环境保护受到日益关注,利用可控源替代传统化学源进行地层密度测量已成为核测井发展的必然趋势[4-5]。Odom[6-8]采用非弹 γ 扩散长度确定密度,并利用快中子计数进行含氢指数校正。Weller 等[9-10]采用长—短源距非弹伽马"脊肋图"确定了地层密度,并利用超热中子计数进行含氢指数校正。Neuman 等[11-13]利用非弹伽马计数比确定地层密度,并采用俘获伽马计数比进行含氢指数校正。Reichel 等[14-15]采用长源距非弹伽马计数确定地层密度,并采用热中子计数比补偿快中子衰减,完成了含氢指数校正。采用单探测器快中子或超热中子进行含氢指数校正,或利用热中子计数比进行含氢指数校正,但仍利用单探测器的非弹伽马计算密度,其计数受中子源产额和探测器等因素影响,会导致计算地层密度结果的不稳定。笔者针对单探测器含氢指数校正或非弹伽马确定密度问题,开展双源距含氢指数校正的中子伽马密度测量方法研究,利用蒙特卡罗方法模拟不同条件下的中子、伽马分布,建立热中子、俘获伽马以及氢俘获伽马计数比进行含氢指数校正的方法,并对不同含氢指数校正方法进行对比分析。

1　中子伽马密度测井原理

脉冲中子源发出的 14 MeV 高能快中子进入地层,与地层元素发生非弹性散射释放大量特征伽马射线;其中部分 γ 射线与地层相互作用后携带着大量地层密度信息穿出地层,通过探测器记录这部分非弹 γ 射线可以实现地层密度的测量。

1.1　非弹伽马分布理论

根据中子伽马扩散理论[13],假定不同能量的非弹性散射伽马射线线性吸收系数 μ 近似相同,得到源距 r 处探测器非弹伽马计数 N_i 为

$$N_i=\frac{I_0 i\mathrm{e}^{-r/L_e}}{8\pi r L_e^3}\left\{\ln\left(\frac{\mu+1/L_e}{\mu-1/L_e}\right)+E_i[-(\mu-1/L_e)r]-\mathrm{e}^{2r/L_e}E_i[-(\mu+1/L_e)]r\right\}. \tag{1}$$

其中

$$E_i(-X)=-\int_X^{\infty}\left(\frac{\mathrm{e}^{-t}}{t}\right)\mathrm{d}t.$$

式中,I_0 为中子源产额;L_e 为快中子减速长度;i 为原子核发生非弹性散射放出的伽马光子数;r 为源距;μ 为地层线性吸收系数。

研究发现,单一探测器的非弹伽马计数与快中子减速长度、源距、地层线性吸收系数、中子源产额及原子核发生非弹性散射放出的伽马光子数等参数有关。

设 r_1 和 r_2 分别为近、远探测器源距,N_{1i}和 N_{2i}分别为近、远探测器非弹伽马计数,可以得到非弹伽马计数比

$$R=\left(\frac{N_{1i}}{N_{2i}}\right)=\frac{r_2\mathrm{e}^{-(r_1-r_2)/L_e}}{r_1}\frac{\ln\left(\frac{\mu+1/L_e}{\mu-1/L_e}\right)+E_i[-(\mu-1/L_e)r_1]-\mathrm{e}^{2r_1/L_e}E_i[-(\mu+1/L_e)r_1]}{\ln\left(\frac{\mu+1/L_e}{\mu-1/L_e}\right)+E_i[-(\mu-1/L_e)r_2]-\mathrm{e}^{2r_2/L_e}E_i[-(\mu+1/L_e)r_2]}. \tag{2}$$

非弹计数比 R 只与减速长度 L_e(含氢指数)和地层吸收系数 μ(密度)有关,因此通过含氢指数校正可以利用非弹计数比确定地层密度。

1.2　双源距含氢指数校正方法

地层中热中子以及俘获伽马射线都能指示含氢指数的变化。设近、远热中子(俘获伽马)探测器源距为 r_1 和 r_2,近、远探测器计数为 N_{1c}和 N_{2c},近、远热中子(俘获伽马)计数比为[16]

$$\left(\frac{N_{1c}}{N_{2c}}\right)\approx\frac{r_2}{r_1}\mathrm{e}^{-(r_1-r_2)/L_e}. \tag{3}$$

利用热中子(俘获伽马)计数比表征含氢指数(减速长度)用于中子伽马密度含氢指数校正,采用二元非线性回归方法,得到地层密度与非弹伽马计数比和热中子(俘获伽马)计数比的响应关系

$$\rho = A\ln\left(\frac{N_{1i}}{N_{2i}}\right) + B\left(\frac{N_{1c}}{N_{2c}}\right) + C\,. \tag{4}$$

式(4)为双源距含氢指数校正后的密度响应公式;其中,A、B 和 C 为常数。

2 蒙特卡罗模拟

利用蒙特卡罗方法建立水平井条件下随钻 D-T 中子伽马密度仪器模型,模拟中子、伽马分布与密度和含氢指数的响应规律,建立热中子、俘获伽马以及氢俘获伽马计数比含氢指数校正后的密度响应关系。

2.1 模型建立

建立计算模型参数如下:井眼直径 20 cm,井眼充满淡水;地层径向半径 10 ~ 70 cm,高 140 cm,地层分别填充不同的流体和物质;仪器直径 5 cm,置于钻铤内;钻铤直径 17.145 cm,钻铤下偏心开一个钻井液导流通道,直径为 7.1 cm,且钻井液导流通道内充满水;采用 D-T 脉冲中子源,脉冲宽度 20 μs,周期 400 μs;仪器采用 2 个 NaI 探测器和 2 个 He3 探测器;近、远 NaI 探测器源距分别为 35 和 65 cm,晶体长度 10 cm;He3 探测器源距分别为 25 和 55 cm,长为 10 cm。为讨论问题的方便,没有考虑探测器的响应特性,计算模型如图 1 所示。

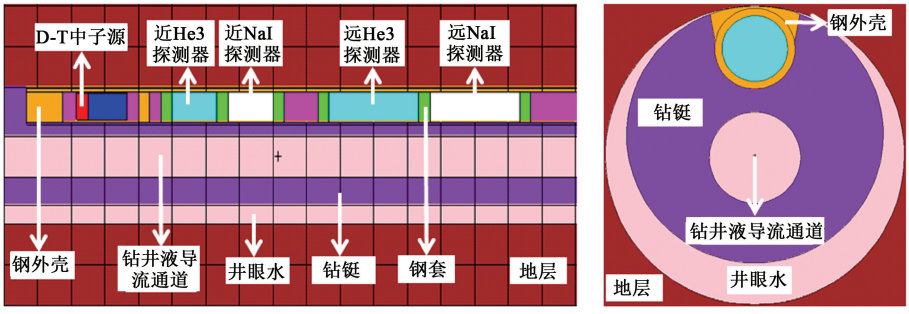

图 1 蒙特卡罗计算模型

Fig. 1 Monte Carlo simulation model

模拟中子数目为 3×10^8,能量 14 MeV;伽马射线能量间隔为 0.01 MeV,最大计数误差为 9%,总计数误差小于 0.05%,计算时间为 3 h;非弹伽马记录时间窗为 0 ~ 20 μs,俘获伽马和热中子记录时间窗为 25 ~ 400 μs;数据处理时采用能窗分别是非弹伽马:0.01 ~ 8.5 MeV;俘获伽马:0.01 ~ 8.5 MeV;氢俘获伽马:2.15 ~ 2.30 MeV;热中子:0.01 ~ 0.1eV。

2.2 非弹伽马计数比随密度和含氢指数的变化规律

利用图 1 所示的计算模型,地层为饱和水石灰岩,地层水矿化度为 0,分别模拟:①固定含氢指数 0.4(地层孔隙度 40%),人为改变地层密度从 2.026 g/cm^3 到 2.71 g/cm^3,间隔 0.12 g/cm^3;②固定密度 2.71 g/cm^3,人为改变含氢指数 I_H 从 0 到 0.4,间隔 0.05;③含氢指数从 0 改变 0.4(地层孔隙度由 0% 改变到 40%),密度由 2.71 g/cm^3 改变到 2.026 g/cm^3,孔隙度和密度同时改变,分别记录近、远探测器的非弹伽马射线,得到非弹伽马计数比值的变化规律,如图 2 所示。

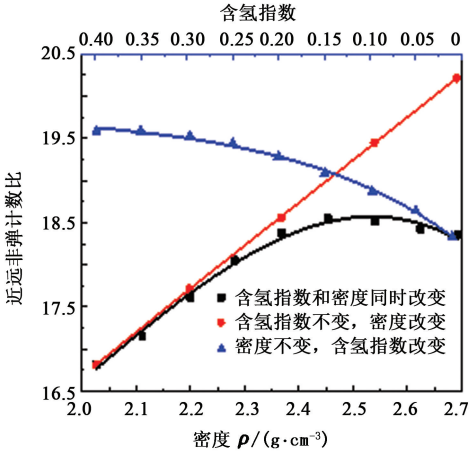

图 2 非弹计数比与密度和含氢指数的响应关系

Fig. 2 Relationship of inelastic gamma count ratio and density or hydrogen index

由图 2 可知,当假定地层密度不变,近远非弹伽马计数比随着含氢指数增加而增加;当地层含氢指数保持不变时,非弹伽马计数比随着密度增加而呈线性增加。对于实际地层来说,非弹伽马计数比同时受到密度和含氢指数的影响;尤其在低孔地层中,含氢指数对非弹计数比的影响占绝对优势,掩盖了

密度的影响,使得非弹计数比随着含氢指数增加而增加;在高孔地层中,密度对非弹计数比的影响占优势,非弹计数比随着密度增加而增大。因此,利用非弹伽马进行地层密度的测量,必须对含氢指数进行校正。

2.3　双源距俘获伽马、热中子计数比随含氢指数的变化规律

为了比较热中子、俘获伽马以及氢俘获计数比随含氢指数的变化规律,利用图 1 计算模型,固定地层密度 1.85 g/cm^3,人为改变含氢指数 I_H 从 0.05 到 0.4,间隔 0.05,记录近、远探测器俘获伽马计数、氢俘获计数以及热中子计数,研究近、远探测器俘获伽马计数比、氢俘获计数比以及热中子计数比与含氢指数的响应关系,如图 3 所示。

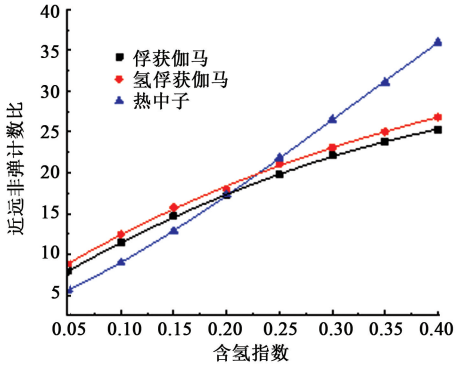

图 3　近远俘获、氢俘获伽马以及热中子计数比随着含氢指数的变化规律

Fig. 3　Relationship of capture, hydrogen capture gamma or thermal neutron count ratio with hydrogen index

如图 3 所示,近远俘获伽马、氢俘获以及热中子计数比在一定程度上都能反映含氢指数的变化;其中,热中子计数比对含氢指数的灵敏度要明显大于氢俘获和俘获伽马计数比,这是因为俘获伽马计数同时受到含氢指数和地层密度的影响,在高孔地层中,密度对俘获伽马的影响较大,使得含氢指数灵敏度降低;且由于钻铤的存在,氢俘获伽马衰减较大,使得氢俘获计数比对含氢指数的灵敏度降低,与总俘获伽马含氢指数灵敏度相近。

2.4　地层密度表征形式

利用模拟条件(3)开展模拟计算,记录近、远探测器非弹伽马、俘获伽马及热中子计数,分别得到非弹伽马计数比与密度的响应规律以及热中子、俘获伽马计数比与含氢指数的响应规律,如图 4 和图 5 所示。

将图 4 和图 5 中非弹和俘获伽马以及热中子计数比模拟数据带入式(3)中,通过多元非线性回归确定利用俘获伽马、氢俘获伽马以及热中子计数比进行含氢指数校正的方法。

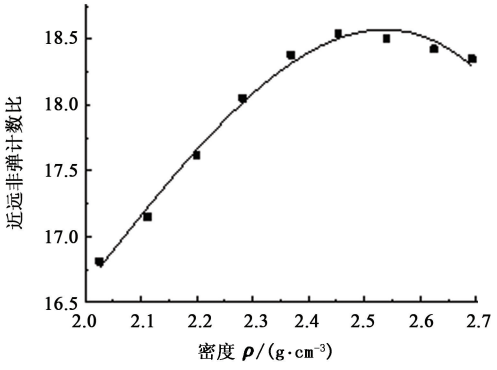

图 4　非弹计数比随密度变化规律

Fig. 4　Relationship of inelastic gamma count ratio and density

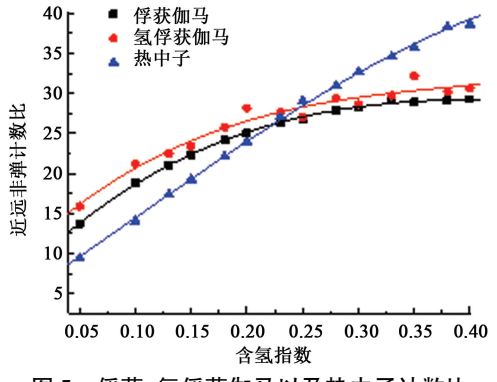

图 5　俘获、氢俘获伽马以及热中子计数比随着含氢指数的变化规律

Fig. 5　Relationship of capture, hydrogen capture gamma or thermal neutron count ratio with hydrogen index

双源距俘获伽马含氢指数校正方法:

$$\rho = 2.6739\ln\left(\frac{N_{1i}}{N_{2i}}\right) - 0.8191\ln\left(\frac{N_{1c}}{N_{2c}}\right) - 4.6376 . \tag{5}$$

双源距氢俘获伽马含氢指数校正方法:

$$\rho = 2.4736\ln\left(\frac{N_{1i}}{N_{2i}}\right) - 0.9218\left(\frac{N_{1c}}{N_{2c}}\right) - 3.5324 . \tag{6}$$

双源距热中子含氢指数校正方法:

$$\rho = 1.6689\ln\left(\frac{N_{1i}}{N_{2i}}\right) - 0.4229\left(\frac{N_{1t}}{N_{2t}}\right) - 2.3078 . \tag{7}$$

式中,N_{1i}/N_{2i}为非弹伽马计数比;N_{1c}/N_{2c}为总俘获(或氢俘获)伽马计数比;N_{1t}/N_{2t}为热中子计数比。

通过对校正公式(5)~(7)分析,俘获、氢俘获伽马以及热中子计数比含氢指数灵敏度会对校正公式中系数影响较大;含氢指数灵敏度越高,非弹计数比

的系数越小,校正公式中的常数项绝对值也会减小。

3 结果与讨论

3.1 密度精度分析

密度精度表示多次密度测量结果的集中程度,反映了测量结果的可重复性;密度精度越高,表示多次测量密度值相差越小,密度测量结果越集中。

为了对比不同粒子双源距含氢指数校正后的密度精度,基于双源距含氢指数校正基本公式(3),通过误差传递公式,得到密度精度的表达式

$$\Delta\rho=\sqrt{\left(\left|\frac{\partial\rho}{\partial N_{1i}}\right|\Delta N_{1i}\right)^2+\left(\left|\frac{\partial\rho}{\partial N_{2i}}\right|\Delta N_{2i}\right)^2+\left(\left|\frac{\partial\rho}{\partial N_{1c}}\right|\Delta N_{1c}\right)^2+\left(\left|\frac{\partial\rho}{\partial N_{2c}}\right|\Delta N_{2c}\right)^2}\quad(8)$$

式中,ΔN 为测量粒子的统计误差。

假定钻头钻进速度为 120 m/h,采样间隔为 0.1 m,脉冲中子发射率为 1×10^8 n/s,通过模拟得到近、远探测器伽马和热中子计数。根据含氢指数校正后的密度响应关系式(5)~(7)和密度计算精度(8),得到俘获伽马、氢俘获以及热中子三种粒子含氢指数校正的密度计算精度,如图 6 所示。

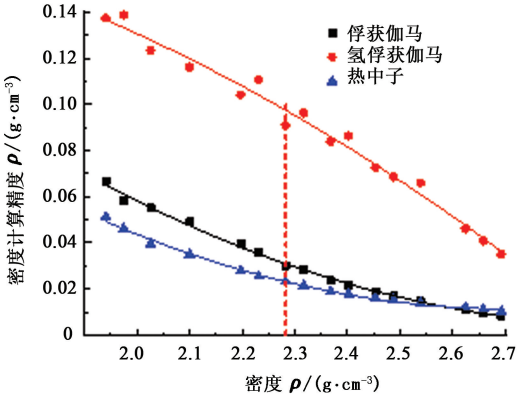

图 6 三种粒子含氢指数校正的密度计算精度

Fig. 6 Density precision of three kinds of hydrogen index correction methods

由图 6 可知,三种粒子含氢指数校正后的密度计算精度随着密度增大而增大。在地层密度为 2.283 g/cm³(孔隙度为 25%)时,热中子含氢指数校正后密度精度为 0.023 g/cm³,俘获伽马密度精度为 0.031 g/cm³,而氢俘获校正的密度计算精度为 0.097 g/cm³,远小于热中子和俘获伽马密度计算精度,这是因为氢俘获伽马计数能窗过窄,探测器计数远低于俘获伽马和热中子,使得计数统计性变差,随机误差变大,精度降低。

3.2 密度准确度分析

密度准确度表示多次测量视密度平均值与真密度的接近程度,常以密度误差表示。密度误差越小,测量视密度与真密度相差越小,准确度越高。

地层为饱和水石灰岩,改变孔隙度分别为 8%,13%,18%,23%,28%,33%,43%,地层密度分别为 2.573,2.488,2.402,2.317,2.231,2.146,1.975 g/cm³,记录非弹、俘获伽马以及热中子计数,分别采用密度响应公式(5)~(7)进行地层密度的反演计算,对比含氢指数校正前后的视密度与真密度误差,分析和比较三种含氢指数校正方法的密度准确度,如表 1 所示。

表 1 含氢指数校正前后的对比

Table 1 Comparison before and after hydrogen index correction g·cm⁻³

地层真密度	I_H 校正前视密度	I_H 校正前密度误差	热中子 I_H 校正后密度误差	俘获伽马 I_H 校正后密度误差	氢俘获伽马 I_H 校正后密度误差
2.573	2.092	−0.481	0.017	0.014	−0.017
2.488	2.387	−0.101	−0.018	−0.027	0.036
2.402	2.396	−0.007	−0.006	−0.007	0.002
2.317	2.361	0.045	0.012	0.010	−0.004
2.231	2.295	0.064	0.018	0.024	−0.027
2.146	2.216	0.070	0.022	0.045	−0.015
2.060	2.157	0.097	0.012	0.009	0.008
1.975	2.121	0.146	−0.026	−0.041	0.014

如表 1 所示,未经含氢指数校正,直接利用非弹伽马计数比计算的视密度与真密度存在较大误差,密度准确度很低;经过含氢指数校正后的视密度与真密度值相差很小,密度准确度明显提高。其中,热中子含氢指数校正后密度误差最大值为 0.026 g/cm³,氢俘获校正密度误差最大值为 0.036 g/cm³,俘获校正误差最大值为 0.045 g/cm³。通过比较三种含氢指数校正的密度误差,发现热中子含氢指数校正方法计算的密度准确度最高,氢俘获伽马次之,俘获伽马最小。

3.3 井径和矿化度的影响

3.3.1 井 径

地层为饱和水石灰岩,仪器紧贴井壁,矿化度为 0×10^{-6},井眼直径分别设为 20,22,24,26 cm,改变孔隙度分别为 3%,23%,43%,记录非弹、俘获伽马以及热中子计数,采用井径 20 cm 条件下的密度响应公式(5)~(7)计算不同井径条件下的地层密度误差,分析和比较井径对三种含氢指数校正方法密度计算结果的影响,如表 2 所示。

如表 2 所示,三种含氢指数校正后的密度误差随着井径的增大而增大;随着密度减小(孔隙度增

大),井径对密度计算误差的影响减小。其中,热中子校正后的密度误差受井径影响最小,俘获伽马校正密度受井径影响略大于热中子,而氢俘获由于受到井眼中氢含量的影响,氢俘获校正的密度误差受井径影响明显大于热中子和俘获伽马。

表 2　不同井径条件下的密度计算误差

Table 2　Comparison of density error under different caliper　　$g \cdot cm^{-3}$

地层密度	俘获校正密度误差			氢俘获校正密度误差			热中子校正密度误差		
	22 cm	24 cm	26 cm	22 cm	24 cm	26 cm	22 cm	24 cm	26 cm
2.659	−0.021	−0.036	−0.045	−0.037	−0.074	−0.120	−0.015	−0.025	−0.036
2.317	−0.012	−0.017	−0.029	−0.018	−0.072	−0.103	−0.005	−0.013	−0.023
1.975	−0.005	−0.008	−0.017	−0.008	−0.044	−0.055	−0.001	−0.010	−0.011

3.3.2　*地层水矿化度*

地层为饱和水石灰岩,仪器紧贴井壁,井眼直径设为 20 cm,地层水矿化度分别设为 0,$20\,000\times10^{-6}$,$50\,000\times10^{-6}$ 和 $100\,000\times10^{-6}$,改变孔隙度分别为 3%,23%,43%,记录非弹、俘获伽马以及热中子计数,采用矿化度 0 条件下的密度计算公式(5)~(7)反演计算不同地层水矿化度条件下的地层密度,分析和比较地层水矿化度对三种含氢指数校正方法密度计算结果的影响,如表 3 所示。

表 3　不同地层水矿化度条件下的密度计算误差

Table 3　Comparison of density error under different formation water salinity　　$g \cdot cm^{-3}$

地层密度	俘获校正密度误差			氢俘获校正密度误差			热中子校正密度误差		
	$20\,000\times10^{-6}$	$50\,000\times10^{-6}$	$100\,000\times10^{-6}$	$20\,000\times10^{-6}$	$50\,000\times10^{-6}$	$100\,000\times10^{-6}$	$20\,000\times10^{-6}$	$50\,000\times10^{-6}$	$100\,000\times10^{-6}$
2.659	0.011	0.015	0.021	−0.007	−0.013	−0.022	−0.001	−0.002	−0.010
2.317	0.025	0.052	0.084	−0.035	−0.052	−0.083	−0.006	−0.013	−0.033
1.975	0.050	0.117	0.168	−0.051	−0.099	−0.137	−0.008	−0.014	−0.038

如表 3 所示,三种含氢指数校正后的密度计算误差随着地层水矿化度的增大而增大;随着密度减小(孔隙度增大),矿化度对密度计算误差的影响增大。其中,热中子校正后的密度误差受矿化度影响最小,氢俘获伽马次之,俘获伽马校正的密度误差受矿化度影响最大。

综合对比三种双源距含氢指数校正方法,热中子含氢指数校正方法具有较高密度精度和准确度,计算结果受井径和矿化度影响较小;氢俘获和俘获伽马含氢指数校正方法密度准确度略低于热中子;其中,氢俘获伽马密度准确度大于俘获伽马,但密度精度远小于热中子和俘获伽马,计算结果受井径和矿化度影响较大。该研究结果为随钻中准确获取地层密度提供了理论基础,同时对中子和伽马多探测器密度测量系统的发展具有借鉴意义。

4　结　论

(1)非弹伽马计数比同时受密度和含氢指数的影响,因此利用非弹伽马获取地层密度必须进行含氢指数校正。

(2)俘获伽马、氢俘获以及热中子计数比都能反映含氢指数的变化;但由于密度的影响,使得氢俘获和俘获伽马计数比对含氢指数的灵敏度明显小于热中子计数比;且由于钻铤的存在,使得氢俘获计数比对含氢指数的灵敏度大幅度降低,灵敏度略大于俘获伽马计数比。

(3)建立了热中子、俘获伽马以及氢俘获伽马双源距含氢指数校正方法,经过含氢指数校正后的密度准确度与校正前相比明显改善。其中,热中子含氢指数校正后的密度精度和准确度最高,氢俘获伽马校正的密度准确度高于俘获伽马,但其密度计算精度远小于热中子和俘获伽马。

(4)三种含氢指数校正后的密度误差随着井径和矿化度的增大而增大;其中,热中子含氢指数校正后的密度受井径和矿化度影响最小,而俘获伽马校正后的密度受矿化度影响最大,氢俘获受井径影响最大。

参考文献:

[1]　于华伟,杨锦州,张锋. 随钻 D-T 中子孔隙度测井低灵敏度和岩性影响校正方法研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(3):45-49.
YU Huawei, YANG Jinzhou, ZHANG Feng. Correction method of low sensitivity and lithology effect of D-T neutron porosity logging-while-drilling[J]. Journal of China

University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(3):45-49.

[2] 杨震,杨锦舟,杨涛. 随钻方位电磁波仪器补偿测量方法研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(3):62-69.
YANG Zhen, YANG Jinzhou, YANG Tao. Research on azimuthal electromagnetic tool while drilling measuring method of compensation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(3):62-69.

[3] 范宜仁,胡云云,李虎,等. 随钻电磁波测井仪器偏心条件下响应模拟与分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(2):59-66.
FAN Yiren, HU Yunyun, LI Hu, et al. Numerical modeling and analysis of responses of eccentric electromagnetics logging while drilling tool[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(2):59-66.

[4] INANC F. Pulsed neutron generator-driven sourceless density measurements—expectations, physics and issues [C/OL]. SPWLA 55th Annual Logging Symposium, 18-22 May, Abu Dhabi, United Arab. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 2014 [2016-04-03]. https://www.onepetro.org/conference-paper/SPWLA-2014-HHHH.

[5] ALAKEELY A, MERIDJI Y. Can sourceless density LWD replace wireline in exploration wells? case study from Saudi Arabia[R]. SPE 172178, 2014.

[6] ODOM R C, TILLER D E, WILSON R D. Improvements in a through-casing pulsed-neutron density log[R]. SPE 71742, 2001.

[7] ODOM R C, WILSON R D, LADTKOW R K. Log examples with a prototype three-detector pulsed-neutron system for measurement of cased-hole neutron and density porosities[R]. SPE 71042, 2001.

[8] 于华伟,孙建孟,朱文娟,等. 随钻脉冲中子密度测井的蒙特卡罗模拟研究[J]. 测井技术,2009,33(6):521-524.
YU Huawei, SUN Jianmeng, ZHU Wenjuan, et al. Monte-Carlo simulation method in pulsed neutron density logging while drilling[J]. Well Logging Technology, 2009,33(6):521-524.

[9] WELLER G, GRIFFITHS R, STOLLER C, et al. A new integrated LWD platform brings next-generation formation evaluation services[C/OL]. SPWLA 46th Annual Logging Symposium, 26-29 June, New Orleans, Louisiana. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 2005 [2016-04-03]. https://www.onepetro.org/conference-paper/SPWLA-2005-H?.

[10] MIRTO E, WELLER G, EL-HALAWANI T, et al. New developments in sourceless logging while drilling formation evaluation: a case study from southern Italy[R]. SPE 100351, 2006.

[11] NEUMAN C H, SULLIVAN M J, BELANGER D L. An investigation of density derived from pulsed neutron capture measurements[R]. SPE 56647, 1999.

[12] JACOBSON L, DURBIN D, REED S. An improved formation density measurement using PNC tools[R]. SPE 90708, 2004.

[13] 张锋,袁超,刘军涛,等. 随钻脉冲中子-伽马密度测井响应数值模拟[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2013,38(5):1116-1120.
ZHANG Feng, YUAN Chao, LIU Juntao, et al. Numerical simulation of pulsed neutron-gamma ray density logging response in logging while drilling[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences,2013, 38(5):1116-1120.

[14] REICHEL N, EVANS M, ALLIOLI F, et al. Neutron-gamma density (ngd): principles, field test results and log quality control of a radioisotope-free bulk density measurement[C/OL]. SPWLA 53rd Annual Logging Symposium, 16-20 June, Cartagena, Colombia. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 2012[2016-04-03]. https://www.onepetro.org/conference-paper/SPWLA-2012-082.

[15] EVANS M, ALLIOLI F, CRETOIU V, et al. Sourceless neutron-gamma density (SNGD): a radioisotope-free bulk density measurement: physics principles, environmental effects, and applications[R]. SPE 159334, 2012.

[16] 黄隆基. 核测井原理[M]. 东营:石油大学出版社,2001.

(修荣荣)