

doi:10.3799/dqkx.2013.110

随钻脉冲中子—伽马密度测井响应数值模拟

张 锋^{1,2}, 袁 超³, 刘军涛¹, 贾 岩⁴

1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

2. 新疆油田分公司勘探开发研究院, 新疆克拉玛依 834000

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

4. 中国石油大港油田测试公司, 天津 300280

摘要: 随钻过程中采用 D-T 可控中子源和 2 个 NaI 晶体探测器系统, 记录两个探测器的非弹性散射和俘获伽马射线, 采用俘获伽马计数比值进行含氢指数校正后, 建立非弹性散射伽马计数比和地层密度的响应关系, 从而实现脉冲中子—伽马密度测井。利用蒙特卡罗方法模拟地层条件下非弹性散射和俘获伽马分布, 得到非弹伽马计数与地层密度和含氢指数都有关, 但近、远探测器俘获伽马计数比反映含氢指数灵敏度高, 利用其对含氢指数校正后就可以得到非弹伽马计数与地层密度的关系; 通过二元回归方法得出地层密度校正后的响应公式, 校正后视密度和真密度值相差很小, 研究结果表明, 在随钻过程中利用脉冲中子伽马测井方法可以确定地层密度。

关键词: 随钻测井; 脉冲中子; 伽马射线; 地层密度; 蒙特卡罗模拟; 数值模拟。

中图分类号: P631

文章编号: 1000-2383(2013)05-1116-05

收稿日期: 2012-10-10

Numerical Simulation on Pulsed Neutron-Gamma Ray Density Logging Response in Logging while Drilling

ZHANG Feng^{1,2}, YUAN Chao³, LIU Jun-tao¹, JIA Yan⁴

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, Kelamayi 834000, China

3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China

4. Well Testing Company of Dagang Oilfield, PetroChina, Tianjin 300280, China

Abstract: The inelastic and capture gamma ray at different spacing can be recorded with the system of D-T pulsed neutron source and two NaI crystal detectors. The response of inelastic gamma ray counting ratio from near and far detectors and formation density can be obtained after hydrogen index was corrected by the capture gamma ray counts ratio. As a result, the formation density can be measured with pulsed neutron-gamma logging method. The distributions of inelastic and capture gamma ray under different formation conditions are simulated using Monte Carlo method, and then the inelastic gamma ray counting is related to formation density and hydrogen index. Owing to the higher sensitivity of capture gamma ray reflecting to hydrogen index than inelastic gamma ray, the response of formation density and the inelastic gamma ray counting ratio from near and far detectors is founded, which hydrogen index is corrected by capture gamma ray counting. In addition, the binary regression method is utilized to get the density response formula, with which the apparent density after correction is very close to the real one. It is concluded that the formation density can be determined by pulsed neutron gamma logging method while drilling.

Key words: logging while drilling; pulsed neutron; gamma rays; formation density; Monte Carlo simulation; numerical simulation.

传统密度测井使用化学放射源, 对工作人员和环境都存在潜在危害 (Committee on Radiation

Source and Replacement, 2008), 利用可控脉冲中子源替代传统化学源确定地层密度测井是核测井的发

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 40784065); 国家重大油气专项 (Nos. 2011ZX0520-002, 2011ZX05009-003); 山东省自然科学基金 (No. ZR2012DM002); 中石油创新基金 (No. 2012D-5006-0302); 中央高校基本科研业务费专项资金 (No. 10CX03001A).

作者简介: 张锋 (1970-), 男, 教授, 博士, 从事核测井方法、核测井数据处理及蒙特卡罗模拟研究. E-mail: zhfx_cn@upc.edu.cn

展趋势(Aitken *et al.*, 2002; 彭琥, 2009)。斯伦贝谢公司推出的新一代随钻测井平台技术 EcoScope (Weller *et al.*, 2005), 利用脉冲中子发生器(PNG)取代了传统 Am-Be 中子源, 在随钻过程中可以提供地层密度、中子孔隙度等测量参数, 并且在实际过程中得到应用。前人在套管井条件下研究了利用不同时间内的俘获和非弹性散射伽马射线确定地层密度的方法 (Neuman *et al.*, 1999; Jacobson *et al.*, 2004; Quirein *et al.*, 2005; Mirto *et al.*, 2006)。Odom *et al.* (1999, 2000) 研究了采用脉冲中子源和阵列探测器系统进行地层密度测量, 并利用记录的快中子对非弹伽马进行含氢指数校正, 建立伽马射线扩散长度与地层密度关系。

本文针对随钻过程中利用 D-T 可控中子源和双 NaI 探测器系统, 通过记录相应的伽马射线确定地层密度方法进行研究。利用蒙特卡罗模拟方法模拟了不同地层条件下的非弹和俘获伽马分布, 给出了地层密度、含氢指数与非弹性散射和俘获伽马射线的响应。采用俘获伽马计数比进行含氢指数校正, 建立了非弹性散射伽马计数比与地层密度的响应关系, 为随钻脉冲中子—伽马密度测井仪器研制和数据处理方法提供技术支持。

1 测井原理及计算模型

1.1 测井原理

利用中子 3 组扩散理论, 可控中子源产生的快中子经地层介质慢化后形成超热中子和热中子, 其中快中子的通量分布公式(黄隆基, 1985):

$$\varphi_f = \frac{1}{4\pi D_f L_f r} e^{-r/L_f}, \quad (1)$$

式中: φ_f 为快中子通量; D_f 为快中子扩散系数; L_f 为快中子减速长度; r 为中子源到地层中的位置距离。

假设一个快中子与原子核发生非弹性散射平均产生 i 个伽马光子, 单位时间内在体积元 dV 中产生的伽马光子数即为:

$$i \sum_f \varphi_f dV = i \sum_f \frac{1}{4\pi D_f L_f r} e^{-r/L_f} dV, \quad (2)$$

式中: Σ_f 为快中子非弹性散射截面。

因扩散系数 $D_f = L_f^2 \Sigma_f$, 则有:

$$i \sum_f \varphi_f dV = i \frac{1}{4\pi L_f^3 r} e^{-r/L_f} dV. \quad (3)$$

设中子源的产额为 I_0 , 则单位时间内由体积元

dV 在探测器点产生的中子伽马射线强度为:

$$dJ_{ny} = \frac{e^{-\mu X} I_0}{4\pi X^2} \cdot i \sum_f \varphi_f dV = \frac{i I_0}{16\pi^2 L_f^3} \cdot \frac{e^{-\mu X}}{X^2} \cdot \frac{e^{-r/L_f}}{r} dV, \quad (4)$$

式中: X 为体积元到探测器的距离; μ 为地层介质对非弹性散射伽马射线的线性吸收系数。

积分后可以得到单位时间内探测器处的非弹性散射伽马总计数为:

$$J_{ny} = \frac{I_0 i \cdot e^{-\frac{L}{L_f}}}{8\pi L L_f^3} \left\{ \ln \frac{\mu + \frac{1}{L_f}}{\mu - \frac{1}{L_f}} + E_i \left[-\left(\mu - \frac{1}{L_f}\right)L \right] - e^{\frac{2L}{L_f}} E_i \left[-\left(\mu + \frac{1}{L_f}\right)L \right] \right\}, \quad (5)$$

式中: L 为中子源到探测器之间的距离, 即源距。

显然探测器处记录的非弹性伽马射线强度与原子核发生非弹性散射放出的伽马光子数 i 、地层减速长度 L_f 、伽马线性吸收系数 μ 、源距 L 和中子源产额 I_0 有关, 而地层伽马线性吸收系数又与地层密度有关, 显然利用非弹性散射伽马计数可以确定地层密度, 但同时会受 L_f (与含氢指数 HII 有关)、 I_0 和 i 的影响, 采用不同处探测器记录的伽马计数比来消除 I_0 和 i , 并且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, 则有:

$$R = \frac{J_{ny1}}{J_{ny2}} = \frac{L_2 e^{-(L_1-L_2)/L_f}}{L_1} \cdot \frac{\ln \frac{\mu + \frac{1}{L_f}}{\mu - \frac{1}{L_f}} + E_i \left[-\left(\mu - \frac{1}{L_f}\right)L_1 \right] - e^{\frac{2L_1}{L_f}} E_i \left[-\left(\mu + \frac{1}{L_f}\right)L_1 \right]}{\ln \frac{\mu + \frac{1}{L_f}}{\mu - \frac{1}{L_f}} + E_i \left[-\left(\mu - \frac{1}{L_f}\right)L_2 \right] - e^{\frac{2L_2}{L_f}} E_i \left[-\left(\mu + \frac{1}{L_f}\right)L_2 \right]}, \quad (6)$$

式中: L_1 为近探测器源距; L_2 为远探测器源距。

显然两种源距处的非弹性散射伽马计数比 R 只和地层减速长度 L_f (含氢指数) 和伽马线性吸收系数 μ (地层密度) 有关, 对含氢指数进行校正后就可以确定地层密度。含氢指数的校正方法主要有快中子校正法、俘获伽马校正法和热中子校正法, 本次研究选用俘获伽马计数比法进行校正。

1.2 蒙特卡罗计算模型

利用蒙特卡罗方法(Briesmeister, 2000) 建立随钻条件下相应的地层模型, 模拟中子在地层中的输运过程, 记录快中子和伽马射线的空间和时间分布, 研究非弹性散射和俘获伽马射线与地层密度的响应关系。

建立的计算模型为: 井眼直径为 20 cm, 井眼内充

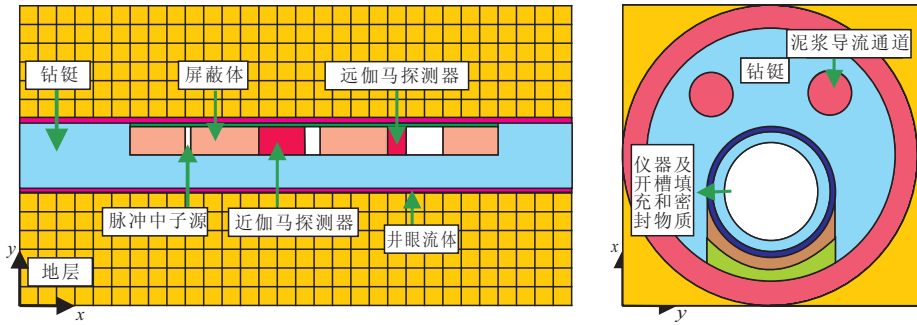


图 1 蒙特卡罗计算模型

Fig.1 MCNP calculation model

满淡水;地层尺寸为 $300\text{ cm} \times 300\text{ cm} \times 300\text{ cm}$,把整个地层划分 442 个栅元,地层分别填充不同岩性和流体物质;仪器直径为 85 mm,置于钻铤内;钻铤直径为 17.145 cm,钻铤上偏心开两个泥浆导流通道,直径都为 3.536 cm,且泥浆导流通道内充满淡水;采用 D-T 脉冲中子源,脉冲宽度为 $20\text{ }\mu\text{s}$,位于距仪器左端 25 cm 处;仪器采用 2 个伽马探测器,近、远探测器源距分别为 32.5 cm 和 62.5 cm,晶体长度分别为 5 cm 和 15 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。

2 地层密度测井响应的模拟

2.1 非弹性散射和俘获伽马射线计数与地层密度和含氢指数的关系

由于中子进入地层发生作用后放出的非弹性散射和俘获伽马射线都与地层密度和含氢指数有关。为研究其变化关系,人为设定地层密度或含氢指数相同,分别改变孔隙度和流体饱和度,模拟近、远探测器处相应的非弹性散射和俘获伽马。利用图 1 所示的计算模型,地层骨架为纯石英砂岩,密度为 2.65 g/cm^3 ,孔隙中饱含甲烷(CH_4)和水,其中甲烷密度为 0.10 g/cm^3 。当含氢指数不变时,改变地层含气饱和度从 0 到 100%,间隔为 10%,并相应调整孔隙度使地层的含氢指数始终保持 0.2 不变,记录近、远伽马探测器处 $0\sim 20\text{ }\mu\text{s}$ 和 $25\sim 500\text{ }\mu\text{s}$ 时间窗内非弹性散射和俘获伽马射线计数,得到含氢指数相同时非弹和俘获伽马射线的近、远探测器计数比值与地层密度的变化关系如图 2,当地层密度保持不变时,从孔隙度为 40% 的饱含水地层开始,改变孔隙度和含气饱和度,直至孔隙度变为 25.88% 的饱含气地层,使地层密度始终保持为 1.99 g/cm^3 ,得到非弹和俘获伽马射线的近远探测器计数比值与含氢指数变化关系如图 3 所示。

图 2 反映地层含氢指数相同条件下近、远探测器的非弹性散射伽马计数比和俘获伽马计数比都随着地层密度增加呈指数增加,且非弹性散射伽马计数比随着地层密度增加变化略快,说明非弹性散射伽马计数比与地层密度的响应关系比俘获伽马计数灵敏度稍高,且受地层水矿化度影响小,因此采用非弹性散射伽马计数比值确定密度更有利。由图 3 可以看出,地层密度相同时近、远探测器处的非弹性散射伽马计数比和俘获伽马计数比都随着含氢指数的增加而增加,但俘获伽马射线计数比变化更剧烈,说明俘获伽马计数比值反映含氢指数变化更明显,因此在利用非弹性散射伽马计数比值确定地层密度时可以通过俘获伽马射线计数进行含氢指数校正。

2.2 含氢指数对地层密度测井响应的影响

为了比较含氢指数对确定地层密度时的影响,利用同样的计算模型,且地层骨架为纯石英砂岩,孔隙中饱含水,改变地层孔隙度分别为 20.00%、22.86%、30.32%、35.31%、41.56%、49.62%、60.41%、75.60% 和 98.57%,含氢指数 HI 和地层密度也随之变化,同样记录在 $0\sim 20\text{ }\mu\text{s}$ 时间窗内,近、远伽马探测器处的非弹性散射伽马射线,得到近、远探测器伽马计数比值与地层密度的关系(图 4)。

由图 4 可知,含氢指数不同会对非弹性散射伽马计数比与地层密度的关系产生影响,含氢指数越大,非弹性散射伽马计数比值越大,对确定地层密度影响越大,因此利用非弹性散射伽马计数比确定地层密度时需要对含氢指数进行校正。

2.3 含氢指数校正方法

利用图 4 所示的变化关系,拟合得到含氢指数 $HI=0.2$ 时地层密度与非弹性散射伽马计数比值的

$$\rho = -0.79845 + 1.25257 \times \ln \left(\frac{N_s}{N_t} \right)_i, \quad (7)$$

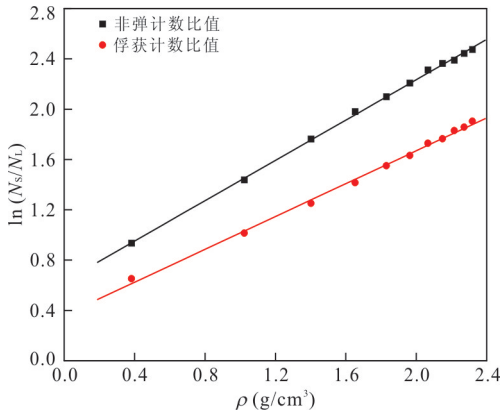


图 2 近、远探测器非弹、俘获伽马射线计数比值与地层密度关系

Fig. 2 Relationship between formation density and near-far detector's inelastic, captured gamma ratio

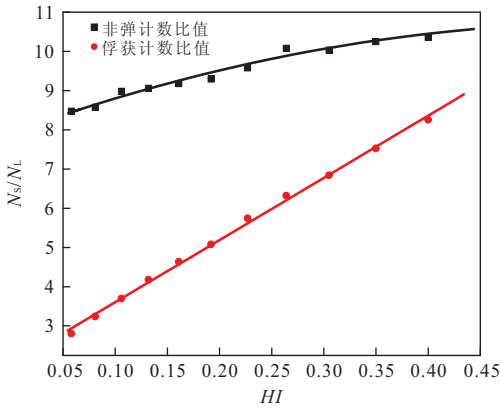


图 3 近、远探测器非弹、俘获伽马射线计数比值与含氢指数关系

Fig.3 Relationship between HI and near-far detector's gamma ratio

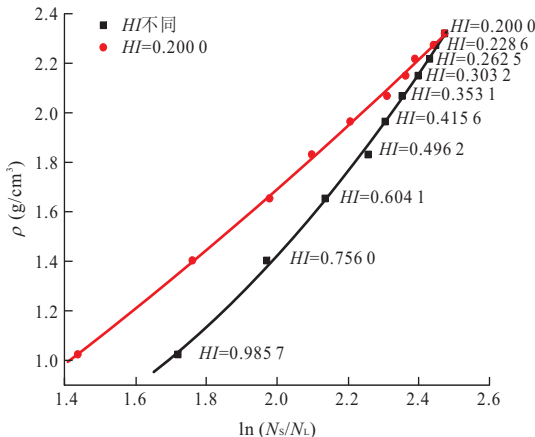


图 4 含氢指数对地层密度的影响

Fig.4 HI influence on formation density

表 1 含氢指数校正前后的对比

Table 1 Comparison before and after hydrogen index correction

地层密度 (g/cm ³)	校正前视密 度(g/cm ³)	校正前相对 误差(%)	校正后视密 度(g/cm ³)	校正后相对 误差(%)
1.023 6	1.357 3	32.610	1.057 1	-3.280
1.402 6	1.670 3	19.090	1.400 5	0.150
1.516 7	1.767 2	16.520	1.523 0	-0.420
1.653 3	1.876 9	13.520	1.661 5	-0.500
1.714 5	1.909 2	11.360	1.701 2	0.770
1.836 8	2.034 6	10.770	1.870 8	-1.850
1.902 5	2.065 4	8.560	1.910 8	-0.440
2.036 0	2.123 5	4.300	2.014 9	1.040
2.135 7	2.187 9	2.450	2.106 2	1.380
2.240 7	2.277 2	1.630	2.252 4	-0.520
2.402 5	2.341 0	-2.560	2.391 6	0.460
2.485 0	2.348 0	-5.510	2.434 1	2.050
2.518 0	2.407 0	4.400	2.502 0	0.617
2.567 5	2.435 0	5.253	2.560 0	0.304
2.600 5	2.449 0	5.812	2.597 0	0.139
2.633 5	2.466 0	6.364	2.635 0	-0.041

注:ρ_a为视密度;ρ为真密度;(ρ_a-ρ)/ρ为相对误差。

式中:(N_s/N_L)_i表示近、远探测器非弹性散射伽马计数比值。

当地层含氢指数 HI 发生变化时,得到近、远探测器处的俘获伽马计数比值与含氢指数的关系,利用二元回归得到校正后公式为:

$$\rho_a = -0.79845 + 1.25257 \times \left\{ \ln \left[\left(\frac{N_s}{N_L} \right)_i - 0.33 \times \left(\frac{N_s}{N_L} \right)_c \right] + 0.211229 \right\}, \quad (8)$$

式中:(N_s/N_L)_c表示近、远探测器俘获伽马计数比值。

2.4 校正处理结果

建立前述计算模型,任意改变地层密度和含氢指数,模拟快中子进入地层,在近、远探测器处分别记录非弹性散射和俘获伽马,并利用确定地层密度的校正公式,得到结果列于表 1。

由表 1 可以看出,直接利用近远探测器处非弹性散射伽马计数比确定地层密度时,含氢指数会使视密度与真密度偏离,含氢指数越高,视密度值与真值相差越大,相对误差越大。经过含氢指数校正后,视密度相对误差很小,因此,利用俘获伽马计数比值进行含氢指数校正后确定地层密度得到的结果更可靠。

3 结论

(1) 在随钻过程中采用 D-T 脉冲中子源和两个伽马探测器,采用一定的脉冲向地层发射中子,不同源距处的非弹性散射伽马射线计数比仅与地层减速长度和密度有关,可以实现随钻过程脉冲中子—伽马密度测量。

(2) 非弹性散射伽马计数比对地层密度响应比俘获伽马计数灵敏度稍高,且受地层水矿化度影响小;而俘获伽马计数比值反映含氢指数变化明显,根据非弹性散射伽马计数比来确定地层密度时,可以利用俘获伽马射线进行含氢指数校正。

(3) 通过二元回归得到俘获伽马计数比进行含氢指数校正后确定地层密度响应公式,校正后视密度和真密度值相差很小,因此利用随钻脉冲中子伽马测井方法确定地层密度是可行的。

References

Aitken, J. D., Adolph, R., Evans, M., et al., 2002. Radiation Sources in Drilling Tools: Comprehensive Risk Analysis in the Design, Development and Operation of LWD Tools. SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Malaysia.

Briesmeister, J. F., 2000. MCNPTM—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Los Alamos National Laboratory Press, Los Alamos.

Committee on Radiation Source and Replacement, 2008. National Research Council. National Academies Press, Washington D.C..

Huang, L. J., 1985. Radioactivity Logging Theory. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).

Jacobson, L., Durbin, D., Reed, S., et al., 2004. An Improved

Formation Density Measurement Using PNC Tools. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston.

Mirto, E., Weller, G., El-Halawani, T., et al., 2006. New Developments in Sourceless Logging-While-Drilling Formation Evaluation: A Case Study From Southern Italy. SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, Austria.

Neuman, C. H., Sullivan, M. J., Belanger, D. L., et al., 1999. An Investigation of Density Derived from Pulsed Neutron Capture Measurements. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston.

Odom, R. C., Bailey, S. M., Wilson, R. D., et al., 1999. Pulsed Neutron Density Measurements: Modeling the Depth of Investigation and Cased-Hole Wellbore Uncertainties. SPWLA Annual Logging Symposium, USA.

Odom, R. C., Tiller, D. E., Wilson, R. D., et al., 2000. Improvements in a Through-Casing Pulsed-Neutron Density Log. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Louisiana.

Peng, H., 2009. Review on Progress of Radioactive Well Logging Technology in 2000—2008. *Well Logging Technology*, 33(1): 1—8 (in Chinese with English abstract).

Quirein, J. A., Smith, H., Chen, D. D., et al., 2005. Formation Density Prediction Using Pulsed Neutron Capture Tools. SPWLA Annual Logging Symposium, USA.

Weller, G., Galvin, S., El-Halawani, T., et al., 2005. A New Integrated LWD Platform Delivers Improved Drilling Efficiency, Well Placement, and Formation Evaluation Services. Offshore Europe, United Kingdom.

附中文参考文献

黄隆基, 1985. 放射性测井原理. 北京: 石油工业出版社.

彭琥, 2009. 2000—2008 年放射性测井技术进展评述. *测井技术*, 33(1): 1—8.