

文章编号:1673-5005(2007)01-0045-04

# 套管井中补偿密度测井响应特性的 Monte Carlo 数值模拟

吴文圣, 肖立志

(中国石油大学 资源与信息学院, 北京 102249)

**摘要:**为了研究常规密度测井在套管井中的测井响应特性,应用 Monte Carlo 方法,从光子与物质相互作用的机理出发,利用 Schlumberger 公司的 TLD 仪器,计算得到了不同套管条件下光子通量的能量谱、光子通量与源距和地层电子密度的关系、长源距计数与短源距计数的交会图以及套管或水泥环厚度对长、短源距计数的影响等。计算结果表明,当套管和水泥环厚度小于 4.4 cm 时,常规的 TLD 密度测井仪器在套管井中对地层密度的变化反应仍然灵敏。也就是说,在套管井中,密度测井仪器能够测量地层的密度;可以用双源距裸眼井密度测井的补偿原理来处理套管井密度测井的数据。但在套管井密度测井中,当套管厚度大于一定值后,仪器将难以正确识别地层的岩性。

**关键词:** 密度测井; 套管; 响应特性; Monte Carlo 方法

**中图分类号:** P 631.8      **文献标识码:** A

## Monte Carlo numerical simulation of response characteristics of compensated density logging in cased hole

WU Wen-sheng, XIAO Li-zhi

(School of Resource and Information Technology in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** To investigate the response characteristics of traditional density logging tool in cased holes, using TLD density tool of Schlumberger company by Monte Carlo method, photon flux spectrum distribution and the crossplot of long-spacing versus short-spacing count rates were gained based on the mechanism of the interaction between photon and matter. The response relationship between photon flux and spacing, and formation electron-density, the effects of the thickness of casing or cement mantle on long-spacing versus short-spacing count rates were studied. Calculated results show that the traditional TLD density tool is very sensitive to formation density change in cased hole when the thickness of casing or cement mantle is less than 4.4 cm. The traditional density tool can measure formation density in cased hole. The results show that the compensated principle of density logging used in open hole can also be used in cased hole. The formation lithology can't be correctly distinguished using density tool behind casing and cement mantle in cased hole when the casing thickness is greater than a certain value.

**Key words:** density logging; casing; response characteristics; Monte Carlo method

在最近几年中,有些石油公司或研究机构开始研究把裸眼井地层评价的测井方法应用到套管井中进行地层评价,其中,最为典型的就是在套管井中实现常规的地层密度测井。多年的研究结果<sup>[1-3]</sup>表明,在合适的套管和水泥环条件下,在套管井中进行地层密度测井是完全可行的。Moake 等<sup>[4]</sup>推出了套管井地层密度测井仪器,并成功地进行了现场测试,不

过这种仪器没有投入商业应用。套管井地层密度测井的实现,可以为井眼稳定性差的井在下套管后提供地层评价参数;可以为没有孔隙度测井资料套管井或数据质量有问题的老井提供孔隙度测量资料;可以在套管井中识别气层,并且还可以对油藏进行动态监测。笔者利用 Monte Carlo 方法通用程序 MC-NP,计算 Schlumberger 公司的小井径三探测器密度测

收稿日期:2006-05-08

基金项目:中国石油青年创新基金资助项目(04E7016)

作者简介:吴文圣(1972-),男(汉族),安徽庐江人,副教授,博士,从事核辐射测井方法、数据处理和解释研究。

井仪器(TLD)<sup>[5]</sup>的长源距(40 cm)和短源距(15 cm)探测器在套管井中对地层密度的响应。

### 1 Monte Carlo 计算模型

考虑到测井的实际情况和计算方便,建立的模型为半圆柱状,如图1所示。

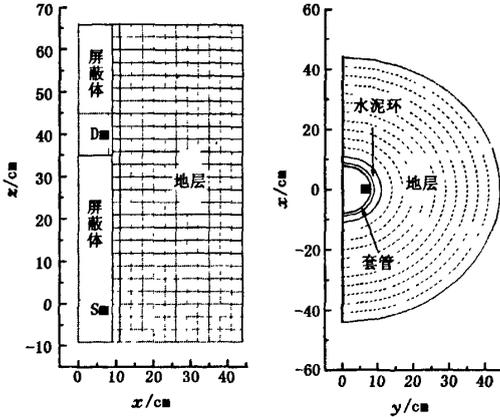


图1 Monte Carlo 计算模型

地层纵向高度为75 cm,径向半径为10~43 cm,井眼半径为10 cm。井眼的外侧依次是套管、

水泥环和地层。密度仪器推靠井壁,外壳厚3 mm,源仓材料是钢,探测器承压壳为铍,源为0.661 MeV<sup>137</sup>Cs点源。两块半圆柱状理想屏蔽体,半径为10 cm,厚度随源距改变。用点探测器记录光子通量(注:文中光子通量与探测器计数的含义是一致的)能谱。模型之外的空间充满理想屏蔽体。计算中使用了多种方差减小技巧<sup>[5]</sup>。计算的统计相对误差控制在1%以下。

由于钢管的密度为7.6 g/cm<sup>3</sup>,光电吸收指数为31.2,对套管井密度测井的影响最大,因此本文中重点放在仪器对不同厚度套管的响应上。

### 2 光子通量与源距的关系

只考虑地层为纯石灰岩地层骨架,饱含淡水的情况。套管厚度H<sub>c</sub>分别为0,0.7,1.5 cm,源距L为10,20,30,40,50,60 cm,计算地层孔隙度φ为0和0.4时光子通量N<sub>v</sub>与源距L的关系。在计算时忽略井眼的影响,只考虑光子在地层中的运输过程。计算结果如图2所示(图中的点是Monte Carlo计算结果,曲线是拟合的结果)。

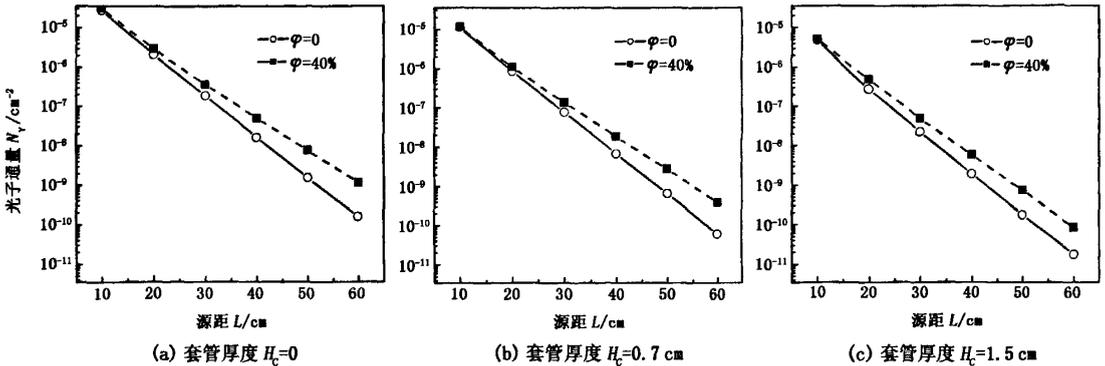


图2 光子通量与源距的关系

从图2中可以看出,当源距为10~60 cm时,在半对数坐标系中,在套管厚度不同的情况下,地层的光子通量与源距均呈很好的线性关系,即随着源距的增大光子通量呈线性下降,其中密度大的地层下降得较快,密度小的地层下降得较慢;随着源距的增大,不同密度地层之间的光子通量差异增大,这是密度测井的物理基础。

从图2中还可以看出,在相同源距处,不同密度地层光子通量的差异随着套管厚度的增加而逐渐减小。这说明,在套管井中常规的密度测井仪器对地层密度仍具有很好的灵敏度,可以用来测量地层的

密度;套管厚度越大,测量密度的灵敏度越低。

### 3 光子通量能谱

在计算时,光子通量能谱的能量范围设置为0.010~0.665 MeV,每道0.001 MeV。虽然能谱积分计数的相对误差小于1%,但由于统计涨落仍较大,在处理能谱时,做了11点FFT平滑处理。

图3显示了套管厚度分别为0,0.7,1.5 cm,长源距L为40 cm处,纯灰岩和纯砂岩地层的光子通量能谱。

从图3中可以看出,在不同套管厚度条件下,所

有能谱曲线上均出现一个极值点即散射峰,将  $\gamma$  射线分成两部分,这个分界点随着套管的出现而向能量高的方向偏移。在分界点右侧,康普顿效应占优势的区域,随着套管厚度的增加,砂岩和石灰岩能谱曲线之间差别逐渐缩小,但这种差别仍旧非常明显。这说明在套管井中,其计数率的变化仍然能清晰地

反映地层电子密度  $\rho_e$  的变化,可以用来计算地层密度。在分界点左侧,光电效应占优势的区域,随着套管厚度的增加,砂岩和石灰岩能谱曲线之间差别逐渐不明显,甚至出现重叠现象。这说明在套管井中,利用该区域的计数率计算地层的光电吸收子数  $P$  来识别地层岩性的能力大大降低,甚至不可行。

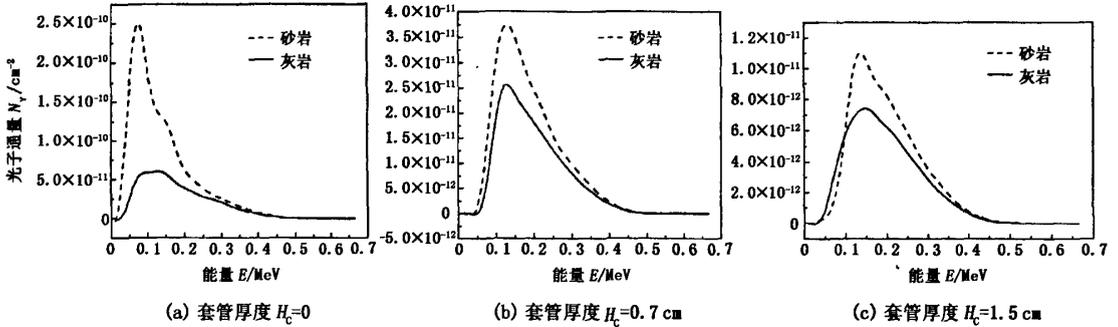


图3 不同套管厚度的光子通量与能量的关系

#### 4 套管和水泥环厚度的响应

在套管井中进行密度测井,影响测量结果的主要因素是套管和水泥环的厚度。为了使密度测井仪器对地层密度有很好的灵敏度,套管和水泥环的厚度必须限定在一定的范围内。为了计算方便,把套

管和水泥环作为一个整体来进行研究,设其密度为中等地层密度,即  $2.35 \text{ g/cm}^3$ ,厚度从0 逐渐增加到 24 cm。取地层密度  $\rho$  为  $1.6 \text{ g/cm}^3$  和  $3.0 \text{ g/cm}^3$ 。图4 显示了长、短源距情况下套管和水泥环厚度变化的响应关系。

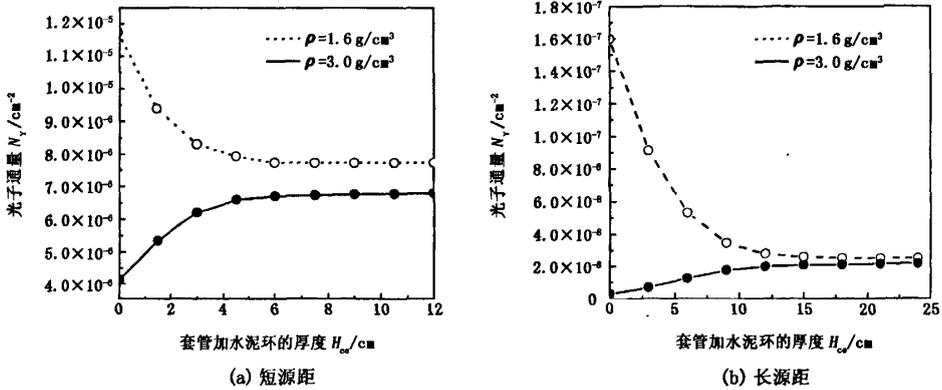


图4 光子通量与套管加水泥环厚度的关系

从图4 中可以看出,当地层密度小于套管和水泥环密度时,在套管和水泥环厚度比较小的区域,随套管和水泥环厚度的增加,长、短源距探测器处光子通量下降很快,说明这一部分对探测器处光子通量贡献很大;而随着套管和水泥环厚度的逐渐增加,探测器处光子通量变化缓慢,到一定距离呈饱和状态(即套管和水泥环厚度的增加已不能带来探测器处光子通量的变化)。当地层密度大于套管和水泥环密度时,响应的变化趋势与地层密度小于套管和水泥

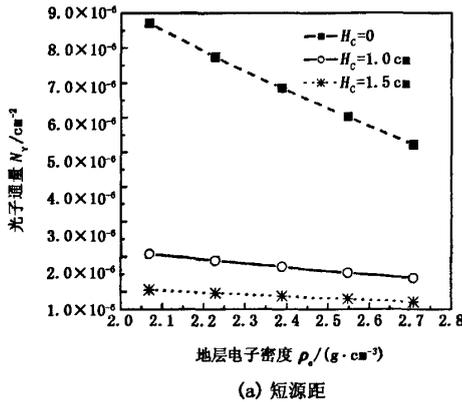
环密度的情况相反。  
对于长源距,当套管和水泥环厚度增加到 10 cm 左右时,探测器处光子通量已处于饱和状态,此时,探测器对地层密度的变化没有任何反应。也就是说,在这种情况下,密度测井仪器在套管井中的探测深度为 10 cm 左右。  
对于短源距,当套管和水泥环厚度增加到 4.4 cm 左右时,探测器处光子通量处于饱和状态,此时,探测器对地层密度的变化没有任何反应。由于短源

距是用于对长源距进行补偿作用的,因此若要使短源距有好的补偿效果,套管和水泥环厚度必须小于4.4 cm。

### 5 光子通量与地层电子密度的关系

对长、短源距,分别计算了套管厚度  $H_c$  为 0, 1.0, 1.5 cm, 孔隙度  $\varphi$  为 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 饱和水的石灰岩地层的光子通量,结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,对不同套管厚度的井眼,不



同孔隙度的石灰岩地层的光子通量  $N_p$  与其电子密度  $\rho_e$  呈现很好的线性关系,地层电子密度越大,光子通量越小。对短源距或长源距探测器来说,套管厚度越大,光子通量与地层电子密度的线性关系的斜率越小,也就是说,套管厚度的增加,使得仪器区分地层电子密度  $\rho_e$  的灵敏度降低。对套管厚度相同的情况,长源距探测器的线性关系的斜率明显大于短源距,这说明长源距区分地层的能力远大于短源距。

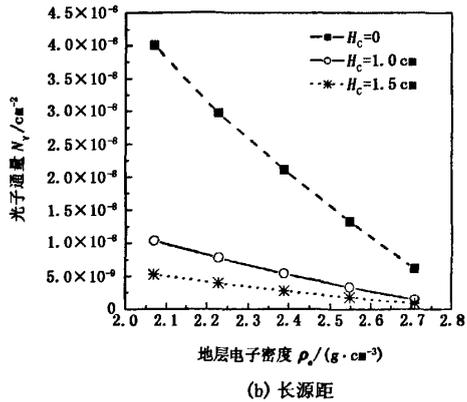


图 5 光子通量与地层电子密度的关系

### 6 长、短源距计数交会图

在裸眼井中,当有泥饼存在时,密度仪器的长、短源距计数交会图在双对数坐标系中表现为“脊-肋”图<sup>[6]</sup>,这是裸眼井双源距补偿密度测井测量地层密度的依据。

在套管井中,设套管厚度  $H_c$  为 0, 0.7, 1.3, 1.5 cm, 对每一套管厚度情况,设地层密度  $\rho$  为 1.6, 1.9, 2.2, 2.5, 2.8, 3.1  $g/cm^3$ , 计算得到的长、短源距计数交会图如图 6 所示。

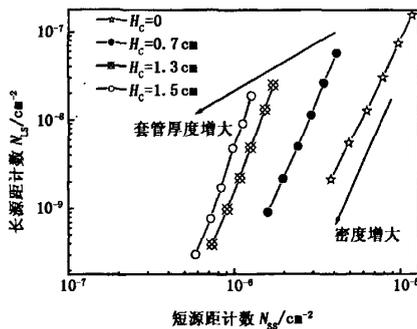


图 6 不同套管厚度的长、短源距计数交会图

从图 6 中可以看出,对于每一种套管厚度,随着

地层密度的变化,长、短源距计数交会图近似为一直线,即等同于裸眼井密度测井长、短源距交会图中的“脊”,如果再考虑地层密度一定的情况,随着套管厚度的增加,交会图上也出现多条“肋”线。也就是说,套管井密度测井的长、短源距计数交会图也表现为“脊-肋”图形式。这也说明,可以用裸眼井密度测井的补偿原理来处理套管井密度测井的数据。

### 7 结论

(1) 在一定的套管和水泥环厚度范围内,套管井密度测井对地层密度的变化具有很好的灵敏度,可以用来测量地层密度。其响应与裸眼井地层密度测井响应有很好的一致性。

(2) 只有当套管和水泥环的厚度小于 4.4 cm 时(在模型中的井眼条件下),双源距套管井密度测井 TLD 才能提供好的地层密度测量结果。

(3) 套管井中长、短源距计数交会图仍表现为“脊-肋”图形式,因此,仍然可以用双源距裸眼井密度测井的补偿原理来处理套管井密度测井的数据。

(下转第 55 页)

量沿 $z$ 轴是反对称的,且由于不同背景介质的电参数不同,该分量在背景介质界面处出现突变,但其变化量满足 $\varepsilon, E_z^{inc}$ 连续。

#### 4 结束语

将新开发的计算层状介质中并矢 Green 函数的递推矩阵方法与体积分方程相结合,用于计算层状介质中具有任意形状的 3 维物体的电磁散射问题。在求解体积分方程时将“屋顶”函数作为基函数和试探函数对其进行弱化离散,从而有效地避免了体积分方程的奇异性。离散后的体积分方程采用稳定型双共轭梯度迭代方法进行求解,而在每一次迭代过程中可以同时 $x, y, z$ 方向采用快速 Fourier 变换技术加快运算速度,从而得到异常体内电场的分布,并进而得到接收位置处的散射电场。数值算例说明了本文算法的精确性和有效性。

#### 参考文献:

- [1] WANNAMAKER P E, HOHMANN G W and SANFILIPPO W A. Electromagnetic modeling of three-dimensional bodies in layered earths using integral equations[J]. *Geophysics*, 1984, 49(1): 60-74.
- [2] ZWAMBORN P and van den BERG P M. The three-dimensional weak form of the conjugate gradient FFT method for solving scattering problems[J]. *IEEE Trans Microwave Theory and Tech*, 1992, 40(9): 1757-1766.
- [3] ZHANG Z Q and LIU Q H. Three-dimensional weak-form conjugate- and biconjugate-gradient FFT methods for volume integral equations[J]. *Microwave Opt Technol Lett*, 2001, 29(5): 350-356.
- [4] XU X M, LIU Q H and ZHANG Z Q. The stabilized biconjugate-gradient fast Fourier transform method for electromagnetic scattering[J]. *J Appl Comput Electromagn Soc*, 2002, 17(1): 97-103.
- [5] XU X M and LIU Q H. The BCGS-FFT method for electromagnetic scattering from inhomogeneous objects in a planarly layered medium [J]. *IEEE Antennas Wireless Propagat Lett*, 2002, 1(1): 77-80.
- [6] MILLARD X and LIU Q H. Simulation of near-surface detection of objects in layered media by the BCGS-FFT method[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2004, 42(2): 327-334.
- [7] MICHALSKI K A and ZHENG D. Electromagnetic scattering and radiation by surface of arbitrary shape in layered media, part I: theory [J]. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1990, 38: 335-344.
- [8] van der VORST H A. Bi-CGSTAB: a fast and smoothly converging variant of Bi-CG for the solution of nonsymmetric linear systems [J]. *SIAM J Sci Statist Comput*, 1992, 13: 631-644.
- [9] LIU Q H. An FDTD algorithm with perfectly matched layers for conductive media [J]. *Microwave Opt Technol Lett*, 1997, 14(2): 134-137.

(编辑 修荣荣)

(上接第 48 页)

(4) 当套管厚度增加到一定值时,不同岩性能谱曲线在光电效应区的差别非常小,因此,在套管井中密度测井仪器将难以正确识别地层的岩性。

#### 参考文献:

- [1] COSENTINE L, SPOTTI G. Reevaluation of hydrocarbon reserves in old fields through cased hole interpretation: a new approach[R]. *SPE 22345*, 1992.
- [2] WOLOTT D S, VITTACHI A. Through casing formation density measurements using a gamma-gamma density tool [C]//Society of Professional Well Log Analysis, 2nd International Well Logging Symposium Transactions, 1994: 279-295.
- [3] QUINT E. Monitoring contact movement during depressurization of the Brent field[R]. *SPE 56951*, 1999.
- [4] MOAKE G L. Design of a cased-hole-density logging tool using laboratory measurements[R]. *SPE 49226*, 1998.
- [5] EYI K A, CHAPPELLAT H, CHEVALIER P, et al. High-resolution density logging using a three detector device [R]. *SPE 28407*, 1994.
- [6] 黄隆基. 放射性测井原理[M]. 北京:石油工业出版社, 1985: 81-94.
- [7] 吴文圣, 黄隆基. 三探测器密度测井的 Monte Carlo 模拟[J]. *地球物理学报*, 2004, 47(1): 164-170.
- WU Wen-sheng, HUANG Long-ji. Monte Carlo simulation of three-detector density logging[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(1): 164-170.

(编辑 刘艳荣)