



中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊
全国中文核心期刊
美国《化学文摘》(CA) 收录期刊
俄罗斯《文摘杂志》(AJ) 收录期刊
EBSCO学术数据库收录期刊 (美)
AAPG协会期刊出版平台收录期刊 (美)
中国科技论文统计源期刊
RCCSE中国核心学术期刊

近钻头伽马成像仪测量结果环境校正方法研究

李洪强 王瑞和

Research on Environmental Correction Method of Measurement Results from Near-Bit Gamma Imagers

LI Hongqiang, WANG Ruihe

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021024>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

近钻头随钻伽马成像快速正弦曲线拟合方法

Rapid Sinusoidal Fitting Method for Near-Bit Gamma Imaging While Drilling

石油钻探技术. 2019, 47(6): 116–122 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019101>

随钻方位伽马能谱测井影响因素分析及校正研究

Correcting Errors Due to Borehole and Formation Factors during Azimuthal Gamma Spectrum Logging While Drilling

石油钻探技术. 2020, 48(1): 104–113 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019131>

高注水倍数相对渗透率曲线校正方法研究及应用

Study and Application of a Correction Method for the Relative Permeability Curve of a High Water Injection Multiple

石油钻探技术. 2018, 46(4): 104–108 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018080>

不同井眼偏心距下水平井阵列侧向测井围岩校正研究

Surrounding Rock Influence Correction for Array Laterolog Responses with Borehole Eccentricities in Horizontal Wells

石油钻探技术. 2018, 46(4): 121–126 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018056>

高精度随钻成像测井关键技术

The Key Technologies of High Precision Imaging Logging while Drilling

石油钻探技术. 2019, 47(3): 148–155 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019060>

近钻头井下钻具运动特征及异常状态分析方法

An Analytical Method for Determining the Motion Characteristics and Abnormal Conditions of Near-Bit Bottom Hole Assembly

石油钻探技术. 2018, 46(2): 50–57 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018026>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2021024

引用格式: 李洪强, 王瑞和. 近钻头伽马成像仪测量结果环境校正方法研究 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(3): 142-150.

LI Hongqiang, WANG Ruihe. Research on environmental correction method of measurement results from near-bit gamma imagers [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(3): 142-150.

近钻头伽马成像仪测量结果环境校正方法研究

李洪强^{1,2}, 王瑞和¹

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东东营 257000)

摘要: 实际工况下近钻头伽马成像仪在井筒中难以保持绝对居中, 需要根据偏心程度对不同方向上的伽马扇区原始测量数值进行环境校正。依据伽马成像测量原理以及近钻头伽马成像仪的结构特点, 分析了不同工况下近钻头伽马成像仪偏心程度对测量结果的影响, 建立了近钻头伽马成像仪偏心情况下钻井液衰减、钾基钻井液补偿等主要因素的修正图版和校正方法。试验结果表明, 偏心条件下, 由于井筒和近钻头伽马成像仪之间环空内钻井液的影响, 根据原始伽马成像图谱计算出的地层倾角存在较大误差。采用建立的校正方法对偏心情况下的近钻头伽马成像图谱进行测量环境校正后, 利用其计算出的地层倾角与地层真实倾角基本一致。研究结果表明, 采用建立的测量环境校正方法对近钻头伽马成像仪偏心情况下获得的伽马成像图谱进行环境校正后, 可以真实反映地层情况, 计算出的地层倾角更准确。

关键词: 近钻头; 伽马成像; 偏心; 钻井液衰减; 测量环境; 校正

中图分类号: P631.8⁺¹⁷ **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2021)03-0142-09

Research on Environmental Correction Method of Measurement Results from Near-Bit Gamma Imagers

LI Hongqiang^{1,2}, WANG Ruihe¹

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong, 266580, China; 2. Drilling Technology Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257000, China)

Abstract: It is difficult to maintain absolute centering in the wellbore under the actual working conditions of near-bit gamma imagers. For that reason, the environment associated with the original measurement values of gamma sectors in different directions should be corrected according to the eccentricity. Using the principle of gamma imaging and the structural characteristics of the near-bit gamma imager, the influences of the imager eccentricity on the measurement results under different working conditions were studied. The results were used to develop correction charts and methods for the main factors such as attenuation in drilling fluids and compensation in potassium-based drilling fluids when the near-bit gamma imagers were under eccentric condition. The results revealed that the formation dip calculated by the original gamma imaging analysis had a large error due to the influence of drilling fluid in the annulus between the wellbore and the instrument under such condition. In contrast, after environmental correction of near-bit gamma imaging under eccentric condition, the formation dip calculated by the correction method was essentially consistent with the real one. The research results showed that the gamma spectra obtained using near-bit gamma imager under eccentric condition could reflect the real formation after environmental correction, and could calculate the formation dip more accurately.

Key words: near-bit; gamma imaging; eccentricity; attenuation in drilling fluid; measure environment; correction

世界范围内不少油田已进入开发中后期, 开始开发厚度 1.00 m 左右的薄油藏。为提高薄油藏的开发效果和效益, 需要采用水平井开发。为保证水平段在薄油藏中穿行, 需要采用近钻头随钻测量仪测

收稿日期: 2020-11-28; 改回日期: 2021-02-19。

作者简介: 李洪强 (1974—), 男, 江苏沛县人, 1998 年毕业于河南科技大学工业电气自动化专业, 2010 年获中国石油大学 (华东) 计算机科学与技术专业工程硕士, 在读博士研究生, 主要从事随钻成像测量仪器软件、硬件系统的研究工作。E-mail: leehongqiang@hotmail.com。

通信作者: 王瑞和, wangrh@upc.edu.cn。

基金项目: 国家科技重大专项项目“复杂断块油田提高采收率技术”(编号: 2016ZX05011-002) 资助。

量井眼轨迹参数和地质参数。近钻头随钻测量仪位于钻头的后方, 测量点与钻头的距离小于 1.00 m, 可以及时反映地层和井眼轨迹的变化, 应用效果好, 使用成本相对较低, 适用于薄油藏地质导向钻井^[1-7]。

近钻头伽马成像仪是在常规动力钻具与钻头之间增加一个独立的测量短节, 该测量短节是测量钻头附近的井斜角和自然伽马值并传输至地面的随钻测量仪器^[8-11]。目前, 尽管国内外已经研制出了近钻头成像仪, 但仍处于边应用边改进优化阶段, 还是非常成熟, 其中主要的缺陷有 2 个: 1) 近钻头伽马成像测量环境校正方法需改进; 2) 近钻头处剧烈振动导致仪器可靠性较差。尽管人们已经认识到近钻头伽马成像仪的偏心对测量结果有较大的影响, 但由于钻柱在井下的运动存在不确定性, 难以实时确定钻进中仪器的位置。以往处理近钻头伽马数据时都是假设近钻头伽马成像仪在井眼中居中, 未考虑近钻头伽马成像仪偏离井眼轴线(偏心)的影响。对于均质地层, 近钻头伽马成像仪在偏心情况下, 钻铤衰减、钻井液衰减、钾基钻井液对测量结果的影响没有得到及时修正, 标识地层变化的上下伽马曲线经常出现分离现象^[10-13]。对于上下伽马曲线分离, 地质工程师会误认为地层发生变化。在地层发生变化时, 上述因素也会导致倾角计算出现误差^[14-17]。由此可见, 对近钻头伽马成像数据进行环境校正是处理近钻头伽马成像数据的重要步骤。笔者从近钻头方位伽马测量原理出发, 分析了影响近钻头伽马成像仪测量结果的环境因素及影响规律, 建立了校正原始测量数据的方法, 以得到更能真实反映地层特征的测量数据。

1 近钻头伽马成像仪与地层的接触关系

1.1 近钻头伽马测量方法

近钻头伽马成像仪是在常规动力钻具和钻头之间增加一个长约 1.00 m 的无磁钻铤, 在该无磁钻铤的外壁上开槽, 槽中安装有测量井斜角和判断旋转方位的传感器、自然伽马传感器、无线数据短传、电池等模块(见图 1)。在动力钻具后方安装有一个无线接收模块, 接收近钻头伽马成像仪传输的近钻头井斜角和伽马成像测量数据, 然后通过常规钻井液脉冲信号将近钻头井斜角和伽马成像数据传输至地面。钻进中, 由钻井液驱动动力钻具带动近钻头伽马成像仪旋转, 在钻头持续钻入地层过程中, 使用磁通门或陀螺仪将井筒 360°圆周均匀分隔为 8 个

或 16 个计数扇区, 在一定的时间段内统计每个扇区进入伽马传感器的伽马射线次数, 形成环绕井筒均匀分区对应的多个扇区伽马计数值。

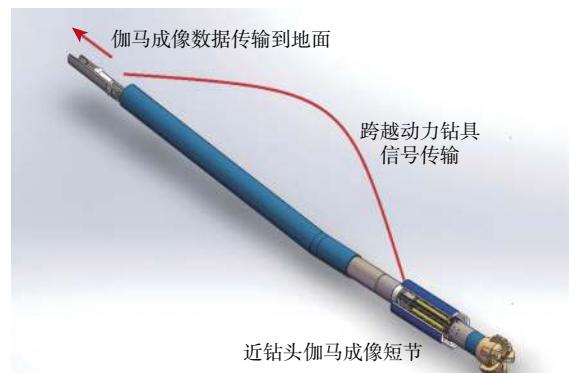


图 1 近钻头伽马成像测量系统示意

Fig.1 Schematic diagram of near-bit gamma imaging system

这些扇区的伽马计数值反映了环绕井筒岩石中的伽马射线水平。伽马计数扇区划分方式如下: 在井斜角小于切换角时, 成像数据描述的是按照方位信息显示的对应关系, 如图 2(a)所示; 在井斜角大于切换角时, 成像数据描述的是环绕井筒测量得到的上下左右等成像数据, 如图 2(b)所示。为利于测量人员认识井筒形状, 该切换角选择随钻测量重力工具面和磁场工具面转换时的井斜角度, 一般为 3°~5°。图 2 中内圈、中圈和外圈分别表示上下方位伽马、4 象限方位伽马和 8 象限方位伽马成像扇区对应的井筒范围。

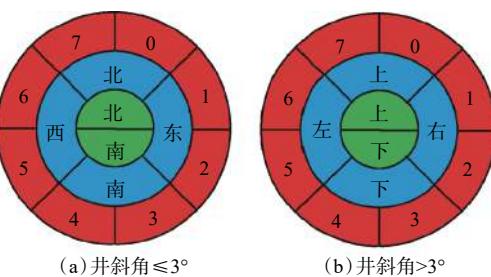


图 2 不同井斜状态下显示的伽马扇区划分

Fig.2 Division of gamma sectors at different well deviations

近钻头伽马成像仪测得多个扇区的数据经压缩后, 短程跨越动力钻具传输至常规 MWD, 进而上传至地面, 经解码形成各个扇区的伽马数据集, 然后按照井筒位置形成二维伽马成像图谱或立体三维随钻伽马成像彩色井筒。垂直井段伽马成像图谱二维展开以方位为基准, 定向井段和水平段伽马成像图谱二维展开以重力工具面为基准。

1.2 伽马成像采集与地层接触关系

图 3 所示为钻头穿越地层界面的不同形式。在图 3(a)中, 钻头自下而上从砂岩层(伽马值小)进入泥

岩层(伽马值大), 井眼轨迹与地层界面同时存在水平和方位上的倾角。在图 3(b)中, 钻头自上而下从砂岩层进入泥岩层, 井眼轨迹与地层界面仅存在水平上的倾角。

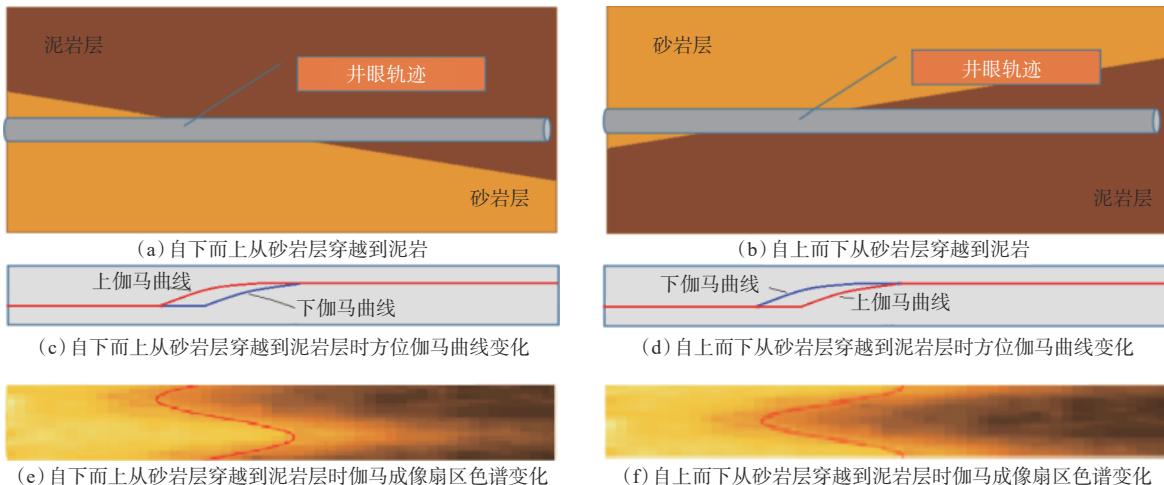


图 3 不同方式进入地层时的伽马测量数据形态

Fig.3 Data form of gamma measurement when the imager enters the formation in different ways

对于图 3(a)所示情况, 伽马曲线体现以下的变化: 在砂岩中上下方位伽马曲线重合显示较低的伽马值; 穿越界面时, 上方位伽马曲线(红色线)先变高, 下方位伽马曲线(蓝色线)保持不变, 从而上下方位伽马曲线出现分离现象; 随着近钻头伽马成像仪继续深入地层界面, 下伽马曲线也逐渐变高, 一直到上下方位伽马扇区全部进入泥岩, 2 条方位伽马曲线趋于一致, 显示为高伽马值, 如图 3(c)所示。对于图 3(b)所示情况, 上下方位伽马曲线的变化如图 3(d)所示, 上下伽马曲线都是从低变高, 穿越界面时曲线也发生了分离。图 3(d)与图 3(c)的不同之处是, 穿越界面时下伽马曲线先于上伽马曲线变高, 待全部进入泥岩中后, 上下方位伽马曲线吻合显示高伽马值。从上述分析可知, 上下伽马曲线分离和变化的先后顺序可以呈现近钻头伽马成像仪自上而下或自下而上穿越地层界面的现象。方位伽马曲线的分离顺序给出了钻头穿越地层界面的特征, 但是当地层与井眼轨迹的交互除了在水平上存在倾角, 同时在方位上也存在倾角时, 无法根据方位伽马曲线判断地层左右的倾斜。此时, 伽马成像测量将显示出其优点。

对于不存在左右偏斜的情况(见图 3(b)), 当近钻头伽马成像仪自上而下从砂岩层进入泥岩层, 各扇区伽马值变高的时机不同, 伽马成像图谱呈现的是居中向左箭头的形状(见图 3(f))。对于存在左

右偏斜的情况(见图 3(a)), 伽马成像图谱呈现正弦分布形状(见图 3(e))。由此可见, 伽马成像图谱既能够体现水平方向上的变化, 又能体现方位上的变化, 说明伽马成像图谱可以立体展现井眼轨迹与地层的交互关系。这样地质工程师在水平段既可以依据伽马成像图谱进行井斜调整(增降井斜), 也可以调整方位(扭方位), 控制水平段在储层中穿行。伽马成像图谱的形状变化为判别井眼轨迹穿越油藏的类型和计算地层倾角提供了初始依据。

利用上述特征, 在近钻头伽马成像仪进入地层界面的时候, 利用实时上传的井斜角和伽马成像数据可以实时计算地层倾角。近钻头伽马成像仪与地层倾角、井斜角的关系可表示(见图 4)为:

$$\varphi = \arcsin \frac{D}{h} - \alpha \quad (1)$$

$$\alpha = 90 - \theta \quad (2)$$

式中: φ 为地层倾角, ($^\circ$); θ 为近钻头井斜角, ($^\circ$); D 为井眼直径, mm; h 为伽马成像数据形成的箭头高度, mm。

原始测量图谱受到近钻头伽马成像仪所处环境的影响会使 h 不能真实反映地层倾角的变化, 因此需要针对钻铤衰减、钻井液衰减、钾基钻井液修正, 以及近钻头伽马成像仪的偏心进行校正, 以得到较为准确的井壁伽马测量数据集。在此基础上, 利用先进的计算机图形识别方法或数学算法得到 h , 进一步

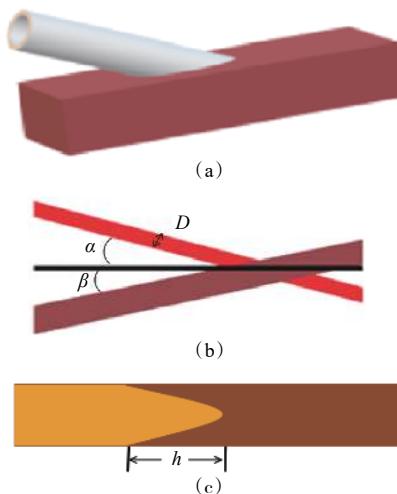


图4 近钻头伽马成像仪与地层倾角、井斜角的关系

Fig.4 Relationship of the near-bit gamma imager with formation dip and well deviation

利用式(1)和式(2)求得地层倾角 φ 。

2 近钻头伽马成像测量影响因素分析与校正方法

对于近钻头伽马成像数据的处理,通常是设定近钻头伽马成像仪在井眼中居中,然后经过钻铤衰减、钻井液衰减、钾基钻井液修正得到反应岩性变化的自然伽马计数值,用来识别岩性和计算穿越地层的倾角,以便更加精确地控制井眼轨迹在储层中穿行。但是在实际使用过程中发现一个现象,即近钻头伽马成像仪穿越预测均质地层时,上下方位伽马曲线发生了分离。这种上下伽马曲线的分离会使地质工程师产生疑惑,难以分清是预测地层时出错还是伽马测量出现误差。在排除仪器测量精度和地层的影响后,地质工程师开始怀疑测量仪器的偏心对方位伽马测量的影响,即当方位伽马在井筒中不居中时,方位伽马各个扇区受环境的影响不一致,这会导致均质地层中方位伽马曲线出现分离的异常现象。

分析近钻头伽马成像仪在井筒中不居中的影响因素,对近钻头伽马成像仪进行偏心校正是实际应用过程中解决和纠正上下伽马曲线分离、修正伽马成像图谱和精确计算地层倾角的重要步骤。

2.1 偏心对近钻头伽马测量的影响

近钻头伽马成像仪安装在动力钻具前方,由于后方存在动力钻具弯壳体,其与井筒的轴线形成一定的夹角,偏离中心位置,如图5所示。在复合钻进时,转盘带动上部钻柱和动力钻具进而带动近钻头

伽马成像仪在井筒中复合旋转,方位伽马传感器敏感面相对井筒的距离在井下动态变化,这时无法确定近钻头伽马成像仪在井筒中的位置,难以对近钻头伽马测量数据进行修正。但在滑动钻进时,动力钻具工具面处于相对稳定状态,井下钻具在井筒中也处于相对稳定状态。特别是定向工程师开始准备调整井眼轨迹时,往往采用滑动钻进,动力钻具工具面相对井筒稳定,近钻头伽马成像仪在井筒中一个相对稳定的位置旋转。

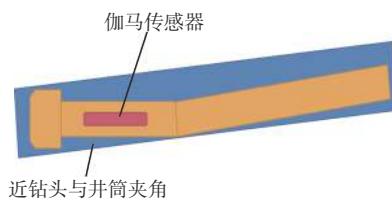


图5 近钻头伽马成像仪在井筒中的位置

Fig.5 Position of the near-bit gamma imager in the wellbore

图6中的剖面分别代表近钻头伽马成像仪在定向模式下滑动钻进时的4种常见姿态:降斜钻进(见图6(a))、增斜钻进(见图6(b))、向右扭方位钻进(见图6(c))和向左扭方位(见图6(d))。近钻头伽马成像仪开有4个槽分别安装伽马传感器(绿色),方位伽马井斜/扇区方位判断传感器(红色)、井下锂电池(黄色)、伽马数据处理电路和天线传输电路等(蓝色),图中棕色部分为钻铤内外环空中的钻井液。滑动钻进时,钻柱和动力钻具的外壳在井筒中相对静止,动力钻具中的螺杆带动近钻头伽马成像仪和钻头进行旋转钻进。由于动力钻具工具面摆放位置不同,处于不同定向模式的近钻头伽马成像仪在井筒中的位置相对稳定。

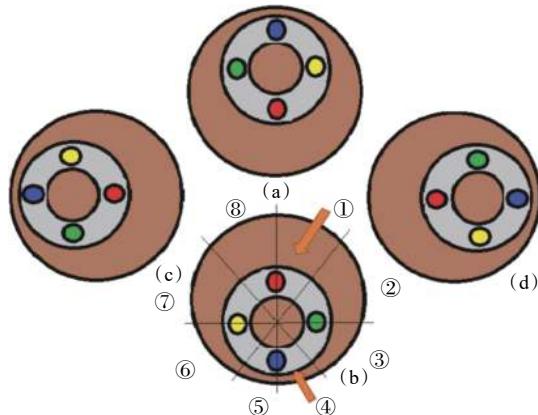


图6 定向模式下的近钻头伽马仪器在井筒中偏心位置示意

Fig.6 Eccentric position of the near-bit gamma imager in the wellbore in the directional mode

从图 6 可以看出, 在特定的定向模式下, 伽马传感器(红色)绕测量仪器的轴心旋转, 伽马传感器到井壁的距离不断发生变化。可见, 伽马传感器和井壁的距离与动力钻具工具面和旋转测量时的扇区都有关系。将图 6(b)(增斜)中的钻铤划分为 8 个象限, 可见由于偏心的影响, 地层中的伽马射线穿越井筒到达伽马传感器的距离不一样, 由于伽马射线在钻井液中会衰减, 在象限 1 受到钻井液的影响明显大于象限 4。为此需要准确分析得到上述不同测

$$L = \sqrt{D^2 + (D - d - l_0)^2 - 2D(D - d - l_0)\cos\left[180 - \beta - \arcsin\left(\frac{D - d - l_0}{D}\sin\beta\right)\right]} - d \quad (3)$$

式中: L 为近钻头伽马传感器到井壁的距离, mm; D 为井眼直径, mm; d 为近钻头伽马成像仪的直径, mm; β 为伽马传感器测量角度, ($^\circ$); l_0 为近钻头伽马成像仪中心与井眼中轴线的距离, mm。

对于图 6(b)所示情况, 式(3)中的 D 和 d 为已知量, l_0 可以按照井下钻具组合计算出造斜时近钻头伽马成像仪中心与井眼中轴线的距离, 这样就可以利用式(3)计算出不同测量角度下近钻头伽马传感器与井壁的距离。利用式(3)分别计算 $\phi 171.4$ mm 近钻头伽马成像仪在 $\phi 215.9$ mm 井眼和 $\phi 203.4$ mm 近钻头伽马成像仪在 $\phi 311.1$ mm 井眼中滑动钻进造斜时, 伽马传感器与井壁的距离, 结果如图 7 所示(近钻头伽马成像仪测量角度为 180° 时最贴近井壁)。

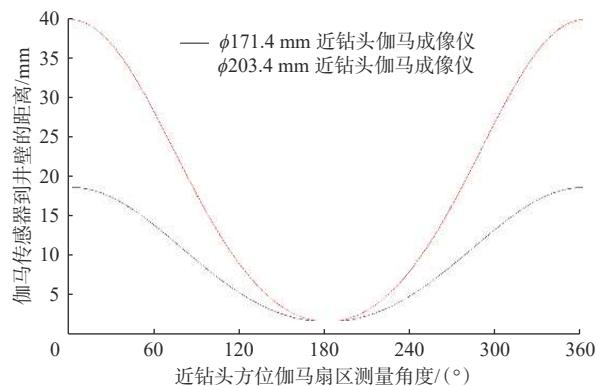


图 7 不同扇区近钻头方位伽马成像仪与井壁的距离

Fig.7 Distance between the near-bit gamma imager at different sectors and the borehole wall

从图 7 可以看出, 近钻头伽马成像仪的每个扇区和井壁之间的距离都是不同的。当这些空间充满钻井液时, 岩石中的伽马射线将会经过不同厚度的钻井液到达伽马传感器, 因而钻井液造成每个扇区伽马计数的衰减程度也不同。

上述情况仅描述了图 6 中近钻头定向增斜钻进的情况, 其他滑动钻进姿态和动力钻具工具面角相

量扇区伽马传感器相对井壁距离的变化, 对由于距离变化造成的衰减进行补偿。

笔者以常用的 $\phi 171.4$ 和 $\phi 203.4$ mm 近钻头伽马成像仪器为例进行分析。 $\phi 171.4$ mm 近钻头伽马成像仪器适用于 $\phi 215.9$ mm 井眼, $\phi 203.4$ mm 近钻头伽马成像仪器适用于 $\phi 311.1$ mm 井眼。对于图 6(b)所示的滑动钻进, 在动力钻具工具面静止不动的情况下, 近钻头伽马传感器与井壁的距离可利用式(3)求出。

各个扇区近钻头伽马传感器与井壁的距离也会根据动力钻具工具面角进行偏移计算。根据滑动钻进不同姿态下的动力钻具工具面角, 利用式(3)可以计算得到不同钻进姿态下每个扇区测量点与井壁的距离。

导致自然伽马射线受到偏心影响的因素主要有 2 个: 1) 地层伽马射线通过一定厚度钻井液造成的衰减; 2) 不同厚度的钾基钻井液对伽马计数的干扰。下面将进一步讨论 2 个因素的影响。尽管钻铤壁厚对伽马射线也有衰减作用, 但由于近钻头伽马成像仪本体的厚度一定, 钻铤对伽马射线的衰减为一个常数, 可以在近钻头伽马成像仪刻度的时候进行补偿, 不在此讨论钻铤壁厚的衰减。

2.2 偏心下钻井液衰减的影响

钻井液衰减是当地层中的伽马射线进入伽马碘化钠晶体前, 被钻井液阻挡造成的变化。在实验室中, 标准伽马刻度源和伽马传感器之间通过更换不同密度和厚度的钻井液, 可以测量得到伽马射线钻井液衰减修正图版(见图 8)。

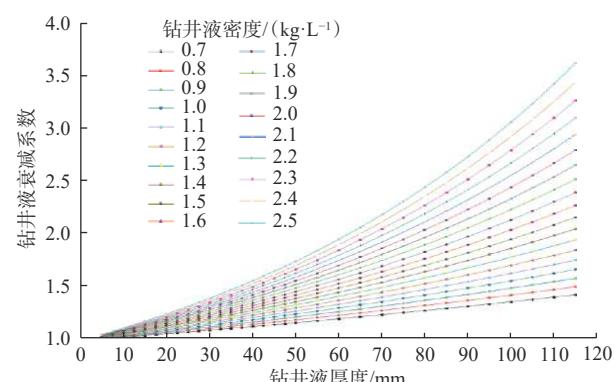


图 8 伽马射线钻井液衰减修正图版

Fig.8 Correction chart of gamma-ray for attenuation in drilling fluids

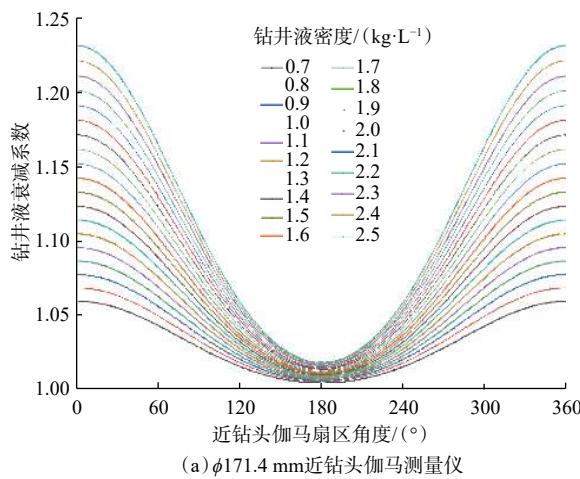
参照美国休斯顿大学的经验方法, 对伽马射线受钻井液密度和厚度的影响规律进行试验拟合, 得到式(4)及其对应的拟合系数:

$$Y_{GR} = a_1 e^{b_1 \rho \delta} \quad (4)$$

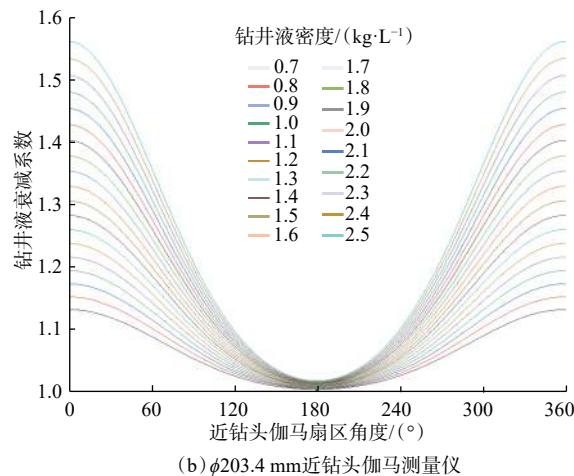
式中: Y_{GR} 为伽马钻井液衰减系数; a_1 一般取 1; b_1 的

拟合值为 0.00454; ρ 为钻井液的密度, kg/L ; δ 为伽马成像传感器与井壁之间环空的钻井液厚度, mm 。

在滑动钻进模式下, 进行造斜时, 其动力钻具工具面角为 0° 。将式(3)代入式(4), 可以得到图 9 所示近钻头伽马成像仪不同测量角度下的衰减修正图版。



(a) $\phi 171.4 \text{ mm}$ 近钻头伽马测量仪



(b) $\phi 203.4 \text{ mm}$ 近钻头伽马测量仪

图 9 $\phi 171.4/\phi 203.4 \text{ mm}$ 近钻头伽马钻井液衰减修正图版

Fig.9 Correction chart of $\phi 171.4/\phi 203.4 \text{ mm}$ near-bit gamma for attenuation in drilling fluids

由图 9 可知: 在动力钻具工具面相对稳定时, 近钻头方位伽马不同测量角度受钻井液的影响程度不同, 钻井液密度越大, 与井壁的距离越大, 衰减越厉害; $\phi 171.4 \text{ mm}$ 近钻头伽马成像仪的钻井液衰减系数为 $1.00\sim 1.23$; $\phi 203.4 \text{ mm}$ 近钻头伽马成像仪的钻井液衰减系数为 $1.00\sim 1.56$ 。可见, 在同样伽马计数的情况下, 钻井液会影响测量结果。这也是在钻井液密度较大的情况下, 在均质地层中方位伽马曲线产生分离的主要原因。

2.3 偏心下钾基钻井液修正

为了防止井壁坍塌, 也会用到钾基钻井液, 其氯化钾含量不低于 5%。钻井液中的钾离子同样释放射线进入伽马传感器。为了修正钻井液中钾离子的干扰, 需要研究偏心条件下钾基钻井液对伽马测量值的影响。在实验室, 标准伽马刻度源和伽马传感器之间通过更换不同密度和厚度的钻井液, 测量伽马值并进行拟合, 得到式(5)及其对应系数:

$$Y_k = w_{KCl}(a_2 \delta^2 + b_2 \delta + c_2) \quad (5)$$

式中: Y_k 为钾基钻井液干扰修正值, API; w_{KCl} 为氯化钾含量; a_2 , b_2 和 c_2 为系数, 拟合得到其值分别为 -0.019 , 0.441 和 0.016 。

分别选用氯化钾含量为 1%~15% 的钾基钻井

液进行试验, 测量得到了不同厚度钾基钻井液对应的钾基钻井液伽马修正值补偿图版(见图 10)。

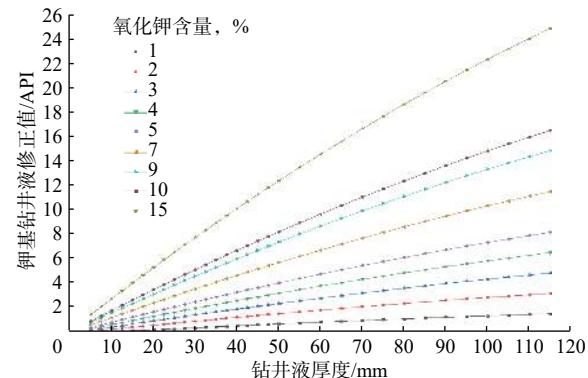


图 10 钾基钻井液补偿修正图版

Fig.10 Correction chart of compensation in potassium-based drilling fluid

同样将式(3)代入式(5)计算得到偏心条件下近钻头伽马成像仪不同测量角度下钾基钻井液的修正图谱(见图 11)。

2.4 偏心因素综合校正

由图 9 和图 11 可知, 在滑动钻进偏心情况下, 可以得到不同测量角度下的钻井液衰减系数和钾基钻井液伽马补偿数值。所以在滑动钻进时, 当原始测量得到的不同测量角度下的伽马数据传输到

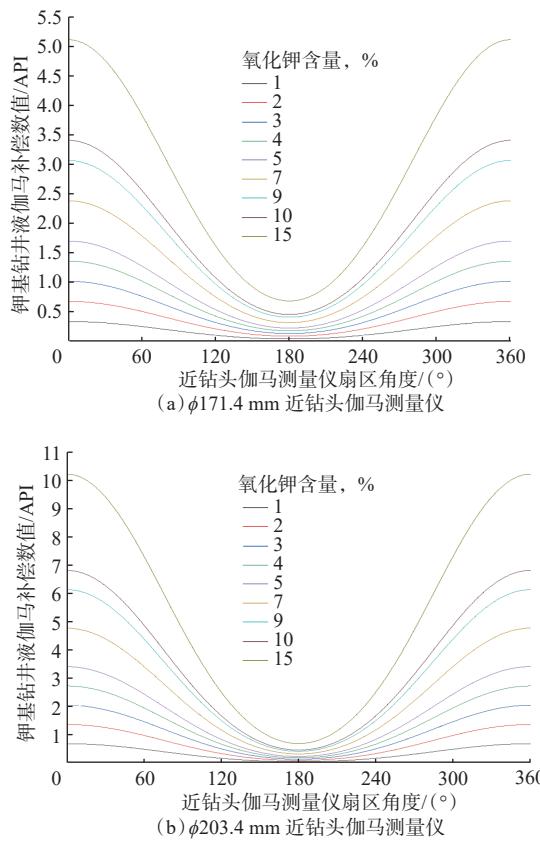


图 11 $\phi 171.4/\phi 203.4$ mm 近钻头伽马钾基钻井液修正图谱
Fig. 11 Correction chart of $\phi 171.4/\phi 203.4$ mm near-bit gamma in potassium-based drilling fluids

地面上,可以针对性地对其进行偏心校正。校正公式为:

$$\begin{pmatrix} G_{r_0}^c \\ G_{r_1}^c \\ G_{r_2}^c \\ \vdots \\ G_{r_{15}}^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{r_0}^b \\ G_{r_1}^b \\ G_{r_2}^b \\ \vdots \\ G_{r_{15}}^b \end{pmatrix} (K_{l0} K_{l1} K_{l2} \dots K_{l15}) - \begin{pmatrix} K_{kj0} \\ K_{kj1} \\ K_{kj2} \\ \vdots \\ K_{kj15} \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中: $G_{r_0}^b \sim G_{r_{15}}^b$ 为 16 个扇区校正后的伽马值; $G_{r_0}^b \sim G_{r_{15}}^b$ 为偏心条件下 16 个扇区测得的伽马值; $K_{l0} \sim K_{l15}$ 为偏心条件下 16 个扇区对应的钻井液衰减系数; $K_{kj0} \sim K_{kj15}$ 为 16 个扇区对应的钾基钻井液修正数值。

3 试验验证

为了验证上述校正方法和偏心修正图谱的准确性,需要更换不同的钻井液,并反复进行伽马传感器在井筒中不同位置的成像扫描试验。由于无法在实钻井中进行多次反复测量,为了验证上述推论的正确性,设计随钻伽马成像模拟试验装置,利用该

装置进行偏心伽马成像扫描试验。通过模拟试验分析伽马成像图谱在偏心情况下受环境因素的影响,并对偏心条件下的钻井液衰减进行校正,以验证上文偏心校正方法的准确性。

随钻伽马成像模拟试验装置由随钻伽马成像传感器旋转扫描控制装置(见图 12(a))和按照扇区组成的模拟井筒(图 12(b))组成。模拟井筒按照上部低自然伽马放射性和下部高自然伽马放射性的方式调整组合成一个 45°的地层夹角,模拟井筒中部空间充满钻井钻井液。随钻伽马成像传感器旋转扫描控制装置中的传感器为方位伽马传感器,它可以按照设定的钻铤尺寸、钻时和转速对模拟井筒进行螺旋扫描(见图 12(c)),方位伽马传感器测量得到的各个不同扇区伽马计数值可以实时传输至计算机进行处理。

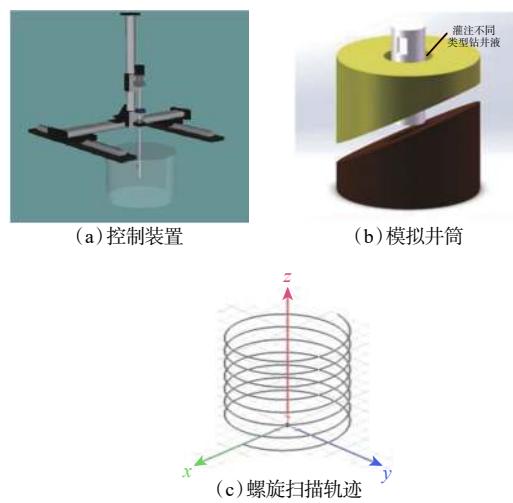


图 12 伽马成像测量扫描模拟试验装置
Fig. 12 Experimental device for the simulation of gamma imaging measurement and scanning

模拟井筒注满密度为 1.1 kg/L 的水基钻井液,将模拟井筒伽马高放射性部分冲北放置,方位伽马传感器在井筒中心居中旋转扫描时,可以得到 16 个扇区的伽马曲线(见图 13(a))和伽马成像图谱(见图 13(b))。伽马成像图谱从南面分割展开,中部为北,如图 14(a)所示,对伽马成像图谱进行边缘探测后可以得到高度 h_1 ,然后利用式(1)计算得到地层倾角为 45.1°。

当方位伽马传感器贴近北部对井筒进行扫描时,其北部离井壁近,南部离井壁远,测量得到的伽马成像图谱如图 14(b)所示。贴近高伽马井筒部分受到钻井液衰减影响较小,按照同样的边缘追踪得到的高度 h_2 明显变小,计算得到地层倾角为 40.3°,

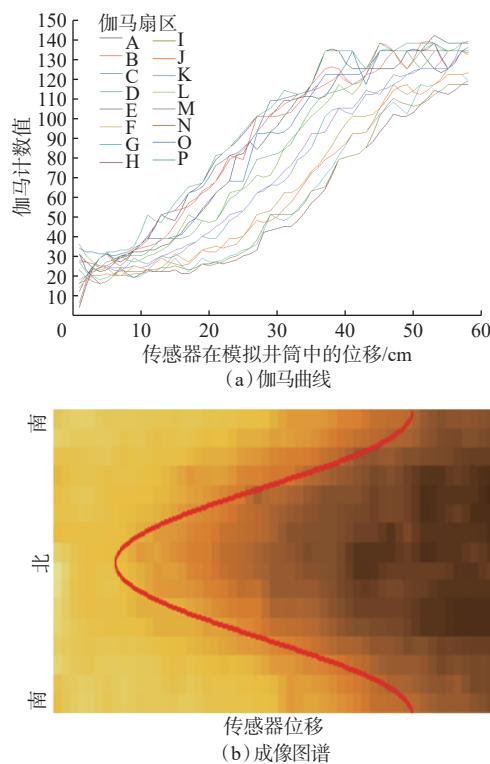
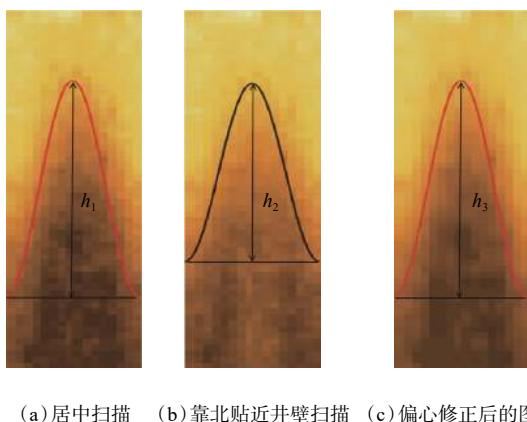


图13 居中扫描得到的16扇区伽马曲线和成像图谱

Fig. 13 Gamma ray curves and imaging spectra of 16 sectors obtained from the centered scanning



(a)居中扫描 (b)靠北贴近井壁扫描 (c)偏心修正后的图谱

图14 居中扫描、偏心扫描和偏心修正后的伽马图谱

Fig. 14 Comparison of gamma spectra obtained from centered scanning, eccentric scanning, and eccentric correction

与地层真实倾角的误差为 -4.7° 。通过对图14(a)和图14(b)发现,对同一井筒,方位伽马传感器居中和偏离井筒轴线扫描得到的图谱高度不一样,依照偏离井筒轴线扫描得到的图谱高度计算的地层倾角偏离了地层的真实倾角。

按照式(6)对偏离井筒中轴线扫描得到的伽马成像图谱(见图14(b))进行修正,修正后的图谱如

图14(c)所示。按照同样的边缘追踪原则得到的 h_3 和居中测量的 h_1 (见图14(a))趋于一致,计算得到的地层倾角为 44.8° ,与地层真实倾角的误差为 -0.2° 。由以上试验可知,近钻头伽马成像仪中心偏离井筒中轴线会对测量结果产生影响,利用其计算的地层倾角存在较大的误差,利用上文的校正方法对偏心情况下的测量结果进行校正后,计算出地层倾角的误差很小,说明上文的校正方法可靠。

4 结论及建议

1)在近钻头伽马成像仪中心偏离井筒中轴线的情况下,不同扇区伽马传感器与井壁的距离存在差异,需要针对近钻头伽马成像仪和井筒的尺寸分析计算伽马传感器与井壁的距离。

2)在近钻头伽马成像仪中心偏离井筒中轴线的情况下,钻井液密度以及其中氯化钾含量都会对原始伽马计数产生较大影响。在没有进行综合环境校正的情况下,使用原始伽马扇区测量数值识别地层和计算地层倾角,会出现较大的偏差。

3)采用文中提出的近钻头伽马成像仪测量环境校正方法,可以有效校正偏心条件下的近钻头伽马成像图谱,准确计算地层倾角,校正后的图谱更能显示地层的真实情况。

4)文中的校正方法是对相对稳定的滑动定向钻进的近钻头伽马成像图谱进行校正,但是当井下存在较为复杂的井下蠕动、近钻头伽马传感器绕井筒复合公转等现象时,还需对实时井径进行测距以得到更准确的补偿修正。

5)为了更加直观地理解和分析钻头钻遇的储层,需要进一步提高近钻头伽马成像测量的分辨率,增加近钻头实时超声井径测量、研究实时三维数字化井筒重建和实时地层评价技术。

参 考 文 献

References

- [1] WHEELER A J, BILLINGS T, RENNIE A, et al. The introduction of an at-bit natural gamma ray imaging tool reduces risk associated with real-time geosteering decisions in coalbed methane horizontal wells[R]. SPWLA-2012-103, 2012.
- [2] ZHENG Majia, LIU Xin, ZHAO Jianping, et al. RSS with near-bit GR imaging assist accurate steer drilling in shale gas project in Sichuan: a fit-for-purpose solutions for shale gas drilling case study: the 11th International Petroleum Technology Conference, Beijing, March 26-28, 2019[C].
- [3] VIENS C, CLARK T, LIGHTFOOT J, et al. Real-time downhole

- data resolves lithology related drilling behavior[R]. SPE 189697, 2018.
- [4] CARRILERO S G, CARSON D M, SHEARER E S, et al. Azimuthal gamma images uncover stratigraphic features in a seemingly featureless unconventional reservoir: the 5th EAGE Shale Workshop, Catania, May 2-4, 2016[C].
- [5] GREMILLION J, FLOWERS M, TVRDY N, et al. Selection of logging while drilling measurements for geosteering of horizontal wells in unconventional reservoirs[R]. URTEC-2019-934, 2019.
- [6] BØ Ø, DENICHOJ J M, EZIOBA U, et al. Reservoir mapping while drilling[J]. Oilfield Review, 2015, 27(1): 38–47.
- [7] AL-AWADH A, SANYAL A, KUMAR S, et al. Successful integration of geo-steering and geo-mechanics in real time: maiden application in Zubair Reservoir, Ratqa Field, Northern Kuwait[R]. SPE 187679, 2017.
- [8] SUN Jian, CHEN Mingqiang, LI Qi, et al. A new method for predicting formation lithology while drilling at horizontal well bit[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 196: 107955.
- [9] 路保平, 倪卫宁. 高精度随钻成像测井关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 148–155.
- LU Baoping, NI Weining. The key technologies of high precision imaging logging while drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 148–155.
- [10] 徐波, 汪中浩, 黎泽刚, 等. 随钻自然伽马测井资料环境影响自动校正 [J]. 石油天然气学报, 2009, 31(5): 82–85.
- XU Bo, WANG Zhonghao, LI Zegang, et al. Auto-correction method of environmental effect on gamma logging data of logging while drilling[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(5): 82–85.
- [11] 郑奕挺, 方方, 吴金平, 等. 近钻头随钻伽马成像快速正弦曲线拟合方法 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(6): 116–122.
- ZHENG Yiting, FANG Fang, WU Jinping, et al. Rapid sinusoidal fitting method for near-bit Gamma imaging while drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(6): 116–122.
- [12] 李安宗, 骆庆锋, 李留, 等. 随钻方位自然伽马成像测井在地质导向中的应用 [J]. 测井技术, 2017, 41(6): 713–717.
- LI Anzhong, LUO Qingfeng, LI Liu, et al. Application of azimuthal gamma imaging logging while drilling to geosteering[J]. Well Logging Technology, 2017, 41(6): 713–717.
- [13] THAKUR P D, AGNIHOTRI P, DENG Lichuan, et al. The most common impacts of drilling dynamics and environments on log-while-drilling data: a study from Abu Dhabi[R]. SPE 193113, 2018.
- [14] WANG Haijiang, STOCKHAUSEN E, WYATT D, et al. Modeling of azimuthal gamma ray tools for use in geosteering unconventional reservoirs[R]. URTEC-2018-2198135, 2018.
- [15] QIN Zhen, PAN Heping, WANG Zhonghao, et al. A fast forward algorithm for real-time geosteering of azimuthal gamma-ray logging[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2017, 123: 114–120.
- [16] VIENS C. Azimuthal gamma imaging and continuous inclination applications to spatial and stratigraphic wellbore placement in the Southern Midland Basin[R]. URTEC-2019-55, 2019.
- [17] 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 forward algorithm for LWD gamma ray response and its geosteering application[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(11): 3932–3942.

[编辑 刘文臣]

本刊入编多种全文数据库系统致作者

本刊已入编《中国学术期刊(光盘版)》全文数据库系统、《ChinaInfo 网络信息资源系统电子期刊》、万方全文数据库、维普全文数据库及《中国石油文摘》全文数据库等数据库。作者稿件一经录用, 将同时被上述文献信息系统全文收录, 如作者不同意收录, 请在向本刊投稿时提出声明, 否则视为同意收录。本刊按规定计付稿酬, 所付稿酬包含稿件内容入盘上网服务报酬, 不再另付。

《石油钻探技术》编辑部