

远端钻铤式方位伽马在煤层储气开采中的应用

郭强¹, 贺云超^{1*}, 翁炜¹, 周沛², 徐军军¹, 吴烁¹, 赵永尚¹, 张杰丰³

(1. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 2. 中国石油华北油田公司培训中心, 河北 任丘 062550; 3. 河北省煤田地质局第四地质队, 河北 张家口 075100)

摘要:为降低厚煤层中煤层气开采成本, 提高水平井钻井经济效益, 本文对不同随钻方位伽马进行了综合对比, 重点阐述了远端钻铤式方位伽马的工作原理及技术优势。通过分析远端钻铤式方位伽马在煤层气水平井应用, 判断地层及二次入层关键工况的上下伽马曲线变化, 并与相应工况下的录井钻时、气测、岩屑等参数进行对比, 结果表明远端钻铤式方位伽马可精确判断井眼轨迹与地层相对位置关系, 并为现场地质导向提供判断依据, 满足实际钻井需求。同时远端钻铤式方位伽马比探管式方位伽马具有更高的响应度, 相同地层及工况条件下其使用成本比近钻头式方位伽马降低了50%以上。研究成果对远端钻铤式方位伽马在其他非常规能源开发中的推广应用具有借鉴意义。

关键词:煤层气; 水平井; 远端钻铤式方位伽马; 地质导向

中图分类号: TE243; P634.7 文献标识码: B 文章编号: 2096-9686(2025)S1-0330-07

Application of distal drill collar-type azimuthal gamma in coalbed methane extraction from thick coal seams

GUO Qiang¹, HE Yunchao^{1*}, WENG Wei¹, ZHOU Pei², XU Junjun¹,

WU Shuo¹, ZHAO Yongshang¹, ZHANG Jiefeng³

(1. Beijing Institute of Exploration Engineering, CGS, Beijing 100083, China; 2. Training Center of PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu Hebei 062550, China; 3. No.4 Geological Team of Hebei Coalfield Geological Bureau, Zhangjiakou Hebei 075100, China)

Abstract: To reduce the extraction cost of coalbed methane (CBM) in thick coal seams and improve the economic efficiency of horizontal well drilling, this paper conducts a comprehensive comparison of different types of azimuthal gamma-while-drilling (AGWD) tools, with a focus on elaborating the working principle and technical advantages of the distal drill collar-type azimuthal gamma tool. By analyzing the changes in upper and lower gamma curves of the distal drill collar-type azimuthal gamma tool in terms of formation identification and key working conditions of re-entry into the target formation during its application in CBM horizontal wells, and comparing these curves with logging parameters such as drilling time, gas logging, and cuttings under the corresponding working conditions, the results show that the distal drill collar-type azimuthal gamma tool can accurately determine the relative positional relationship between the wellbore trajectory and the formation. It also provides a basis for on-site geological steering, meeting the actual drilling requirements. Meanwhile, the distal drill collar-type azimuthal gamma tool has higher responsiveness than the probe-type azimuthal gamma tool, and its operating cost is reduced by more than 50% compared with the near-bit azimuthal gamma tool under the same formation and working conditions. This has reference significance for its popularization and application in the development of other unconventional energy sources.

Key words: coalbed methane; horizontal wells; distal drill collar-type azimuthal gamma; geosteering

收稿日期: 2025-06-23; 修回日期: 2025-09-21 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.S1.053

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“绿色勘查钻探应用示范”(编号: DD202402053)、“深部地热能钻探技术升级与应用示范”(编号: DD20221681)

第一作者: 郭强, 男, 汉族, 1990年生, 工程师, 机械工程专业, 硕士, 主要从事钻探装备及相关机具研发、随钻定向工艺研究等工作, 北京市海淀区学院路29号, 1171136936@qq.com。

通信作者: 贺云超, 男, 汉族, 1988年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 硕士, 长期从事定向井、水平井高效钻完井工艺技术研究工作, 北京市海淀区学院路29号, 1421838195@qq.com。

引用格式: 郭强, 贺云超, 翁炜, 等. 远端钻铤式方位伽马在煤层储气开采中的应用[J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 330-336.

GUO Qiang, HE Yunchao, WENG Wei, et al. Application of distal drill collar-type azimuthal gamma in coalbed methane extraction from thick coal seams[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 330-336.

0 引言

随着国家能源结构转型,油气资源勘探开发由常规油气逐步向非常规油气稳步转变,非常规油气资源的开发力度逐年增大。煤层气作为优质的非常规能源,储量丰富,高效环保,是非常规油气资源开采的重点。由于煤层气储层构造差异性大,储层特征和流体性质复杂,这对钻井中井眼轨迹控制和快速准确判层带来了新的挑战。

目前煤层气高效勘探开发中常采用水平井,该方式成功实施的关键在于地质导向技术,其中随钻方位伽马是地质导向准确判层的重要依据。随钻方位伽马的测量目前主要有探管式方位伽马、远端钻铤式方位伽马和近钻头方位伽马等形式。探管式方位伽马是在常规MWD仪器串中增加方位伽马短节,结构简单,使用成本低,但其测量零长较长,一般在10~12 m,且方位伽马短节位于无磁钻铤水眼中心,伽马信号被钻铤及环空钻井液逐级吸收后才进入伽马传感器,这会导致仪器测量的灵敏度和准确性降低。远端钻铤式方位伽马与探管式方位伽马测量零长一致,但钻铤式方位伽马探测器置于钻铤壳体表面安装槽内,大幅降低了伽马信号的过程衰减,提高了结果处理的准确性。近钻头方位伽马结构上与钻铤式方位伽马相似,但由于近钻头方位伽马测点距井底一般在0.6~1 m以内,因此可快速判断地层变化,及时调整井眼轨迹,减少出层井段,保证储层钻遇率,对于储层厚度不足等情况作业效果尤为显著,但其使用成本也相对较高^[1-2]。不同形式方位伽马特点对比如表1所示。

表1 不同形式方位伽马对比分析

类别	适用储层厚度/m	测量零长/m	伽马探测地层深度/m	使用成本/(万元·d ⁻¹)
探管式	≥3	10~12	0.1~0.2	1
远端钻铤式	≥3	10~12	0.2~0.3	1.5
近钻头式	≥0.5	0.6~1	0.2~0.3	3

根据不同形式方位伽马的仪器测量特性,结合各自使用成本及市场应用等综合分析,探管式方位伽马和远端钻铤式主要用于厚煤层(3.5~8 m)及特厚煤层(8 m以上)中煤层气开发,近钻头式方位伽马主要用于薄煤层(<1.3 m)及中厚煤层(1.3~3.5 m)中煤层气开发。目前国内煤层气储层的开采厚

度大部分属于厚煤层范畴,基于仪器地层探测深度和经济性综合考虑,远端钻铤式方位伽马在厚煤层的煤层气勘探开发中具有较好的应用前景。

1 远端钻铤式方位伽马工作原理及优势

1.1 仪器结构及工作原理

远端钻铤式方位伽马与探管式方位伽马测量原理基本相同,通过将伽马传感器安装于钻铤壳体中,并在钻铤壳体槽内加装屏蔽,使传感器只能测量特定角度的地层伽马值。根据工具面不同,将采集的伽马数据分为4或8个扇区,如图1所示。在钻进过程中,通过判断伽马传感器所在的扇区角度,记录每个扇区的伽马计数值,并根据设置的采集周期,对数据进行分析解算,获得不同扇区对应的伽马API值,然后通过泥浆脉冲将数据实时传送到地面,进行目的层构造分析,辅助地质导向^[3-4]。

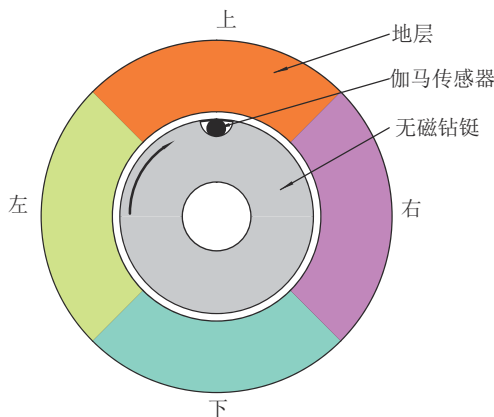


图1 扇区划分示意

远端钻铤式方位伽马的主体结构目前多采用盖板式设计,此方式便于安装调试,能承受较大的轴向拉压、扭矩等载荷,具备良好的结构完整性。同时可根据实际需求调整钻铤结构参数,扩展其他功能部件。该机械结构形式有助于提高仪器使用寿命、现场维护及后期技术优化升级。

远端钻铤式方位伽马仪器内部组件主要包括伽马传感器、电池单元、数据无线传输单元、主控处理单元等,仪器工作时需配合随钻MWD一起使用,如图2所示。其中伽马传感器用于测量地层伽马信号并将测量数据传输至主控处理单元,数据无线传输单元用于实现与主控处理单元进行数据通讯,并实时将井下测量数据无线发射至MWD的脉冲短

节,进而通过泥浆脉冲实现数据上传。主控处理单元用于与各传感器模块进行数据通讯,集中处理和存储伽马信号、加速度信号等。电池单元主要给各模块进行供电,采用多节锂电池并联,输出电压须满足各模块需求。结合实际钻探工程要求,电池单元使用寿命可达到200 h以上,完全满足煤层气、砂岩气等非常规清洁能源勘探开发需求^[5-6]。

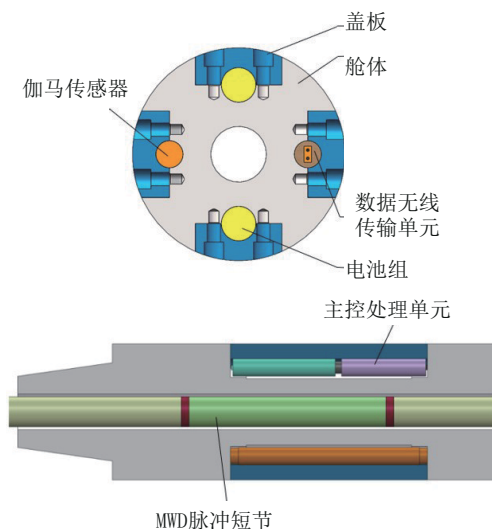


图2 远端钻铤式方位伽马结构示意图

由于泥浆传输速率较低,如果将各扇区的伽马数据全部传输至地面再进行解码分析,会严重滞后实钻轨迹与储层相对位置关系的判断,影响整井钻进效率。因此,在实际应用中通常采用将反映上下伽马扇区的伽马值进行编码上传,根据上下伽马值的变化快速判断井底钻柱与目的层的相对位置变化,有助于及时调整井眼轨迹,使轨迹最大限度位于储层内部,保证储层钻遇率。远端钻铤式方位伽马可通过自身的储存模块,将各扇区的伽马值存储在仪器中,待仪器出井后进行读取,验证储层判断评价的准确性^[7-8]。

依据上下伽马值进行快速准确判层是水平井钻井非常关键的节点。同时,在水平段钻进中实时判断地层倾角也是水平井轨迹控制的重要内容。采用随钻自然伽马计算地层倾角时,须同一地层被穿越两次,或地层厚度已知前提下,仪器先后穿越地层的上下边界,这对判断地层倾角产生较大滞后性,严重影响地层钻遇率和井眼轨迹控制。利用远端钻铤式方位伽马上传的上下伽马曲线,穿越一次地层就可计算出当前位置的视倾角。根据上下伽

马的变化曲线可判断出井眼与地层的接触位置关系,以探层过程中地层上倾为例(图3),计算地层的视倾角:

$$\theta \approx \arctan\left(\frac{D}{\Delta L}\right) + \alpha - 90^\circ \quad (1)$$

式中: θ ——地层视倾角, $^\circ$; D ——井眼尺寸,m; ΔL ——上下伽马曲线分离点和重合点间的测深,即井眼上下边界与地层交点 a 、 b 沿井眼轨迹轴线的投影距离,m; α ——井斜角, $^\circ$ 。

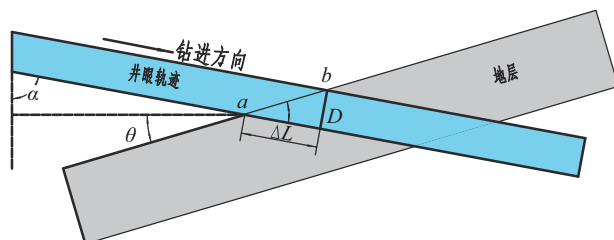


图3 地层视倾角计算示意

由于伽马传感器镶嵌在无磁壳体上,考虑到仪器自身探测深度,当上下伽马曲线出现分离时,说明伽马传感器已经探测到不同岩性,因此 D 的取值应为仪器外径与伽马探测深度之和。实际应用中,为方便计算往往将 D 按照井眼尺寸处理,可快速近似得出当前地层视倾角^[9-10]。

图3仅列举了探层时地层上倾时井眼轨迹与地层位置关系,在实际水平段作业过程中,需根据上下伽马的变化曲线、机械钻速及岩屑变化等工况确定当前井眼轨迹与地层的相互关系,快速获取当前地层倾角^[11-12]。在钻探现场实时掌握当前地层倾角,对及时调整井眼轨迹等地质导向工作提供了非常重要的技术依据。

1.2 技术优势

探管式方位伽马和远端钻铤式方位伽马在应用中仪器零长基本一致,但由于探管式方位伽马位于钻铤水眼内,伽马传感器的信号受钻井液、无磁钻铤壳体及井眼环空等多因素影响,大幅降低了伽马传感器的计数率,导致对地层判断不精确^[13-14]。相较于探管式方位伽马,远端钻铤式方位伽马的显著特征是将伽马探测器置于钻铤本体的表面开槽中,较大幅度地降低了钻铤、钻井液对伽马探测器的吸收,大幅提高了计数率。近钻头式方位伽马与远端方位伽马的工作原理基本一致,但近钻头式方

位伽马发射短节位于弯螺杆下端,由于受螺杆弯角影响,复合钻进时近钻头方位伽马发射短节相对井眼轴线存在偏心现象,根据其上下伽马用于定量判断切层变换时会存在较大误差,同时也存在较大井下卡钻风险。远端钻铤式方位伽马在钻具组合中与弯螺杆上端连接,基本位于井眼中部,提高了地层伽马的测量精度,有效改善了仪器井下卡钻事故发生^[15]。不同类型方位伽马作业时的钻具组合如图 4 所示。

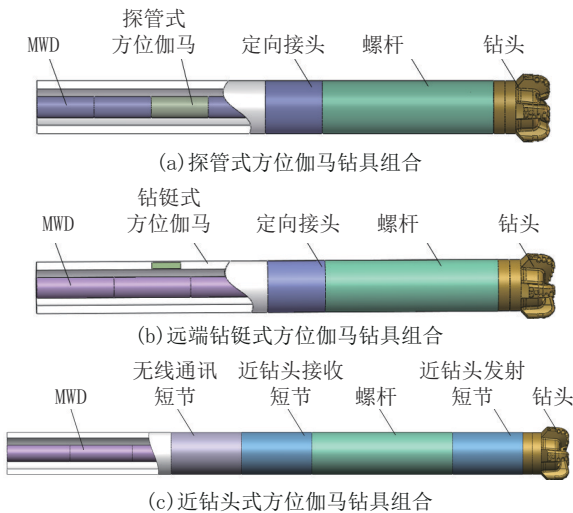


图 4 不同类型方位伽马钻具组合

远端钻铤式方位伽马可配合随钻 MWD 独立使用,其与近钻头方位伽马同时使用时,可对地层方位伽马的测量精度进行校准。

2 现场应用

2.1 性能指标

远端钻铤式方位伽马多用于目的储层较厚或区块地层构造已经查明且具有较丰富的邻井技术资料的地质工况。随着非常规清洁能源的勘探开发,远端钻铤式方位伽马在煤层气开采中的应用日益普及。煤层的自然伽马射线强度范围为 20~80 API,煤层气的开采逐步由浅层向深层推进,深层煤层气埋藏深度通常超过了 1500 m,其储层具有易碎、易坍塌、易扩径的特点,这要求远端钻铤式方位伽马须具备良好的测量精度、耐压能力及使用寿命,以提高井下作业的适用性,具体性能指标如表 2 所示。

2.2 实例分析

山西晋西区块深部煤层气储量丰富,煤层埋深

表 2 远端钻铤式方位伽马性能参数

规格/mm	测量范围/ API	连续工作 时间/h	耐温/℃	耐压/ MPa
172	0~500	>200	150	120

多集中于 1900~2100 m,储层厚度在 6~8 m,该区块已部署实施多口水平开发井,通过综合对比分析已完钻水平井目的层的工程参数,基本查明了该区块地层构造及储层倾角等地质资料。该区块在前期水平井开发中使用近钻头方位伽马进行随钻轨迹控制,工艺成熟稳定,同时由于仪器使用日费较高,导致钻井综合成本相应增加。基于该区块储层地质条件已查明,为节省钻井成本,提高经济效益,采用远端钻铤式方位伽马对该区块 LXX-1H 水平井进行煤层气开采。

该水平井完钻井深 3500 m,水平段长 1050 m,实际 A 靶点 2448 m,垂深 1930 m,靶前距 799 m,最终按照工程设计精确中靶,B 靶垂深 1923 m,储层钻遇率 95% 以上,完成了工程任务。该井施工过程中,远端钻铤式方位伽马在确定目的层位、钻头从储层顶部或底部钻出等关键工况中能够通过上下伽马变化曲线为地质导向提供准确的判断依据。

(1)确定目的储层:造斜段井斜增至 80°时,更换钻具组合,下放远端钻铤式方位伽马至井底按照工程设计缓慢增大井斜确定目的层位,同时控制轨迹狗腿度,保证靶前距余量。工程设计中该井 A 靶点为 2390 m,由于仪器至钻头底部具有 13 m 零长,当钻进至 2403 m 时,设计 A 靶点的上下伽马值均在 100 API 左右,结合井口返出岩屑为细砂岩,机械钻速 4.5 m/h,气测全烃 1.2%,综合表明尚未钻至目的层。对照邻井地质资料,继续增斜探层,当钻进至 2436 m 时,机械钻速开始增加,井口返出岩屑中夹杂少量煤屑,气测值开始缓慢上升,继续钻进至 2449 m,伽马值发生变化,下伽马值先下降,上伽马值后下降(如图 5)。井口返出大量煤屑时,机械钻速在 15~20 m/h,上下伽马值稳定在 40~50 API,气测全烃 72%,根据上下伽马曲线变化,可得出钻头在 2436 m 处开始进入煤层上部,持续钻进至 2448 m 钻头完全进入煤层,最终确定实际 A 靶点的位置为 2448 m 处。

确定 A 靶点后,按照地质导向指令进行水平段储层钻进。由于地层倾角和煤层变化影响,水平钻进过程中会出现钻头从煤层顶部或底部钻出情形,

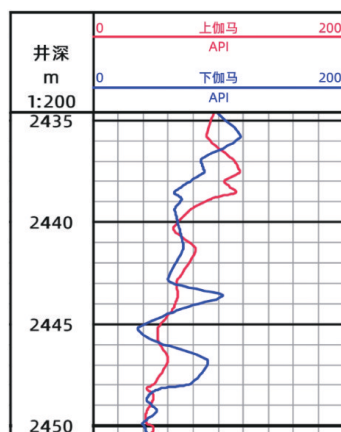


图5 仪器探层过程中上下伽马曲线变化

影响储层钻遇率,远端钻铤式方位伽马针对这两种工况均能通过上下伽马曲线变化准确反映。

(2)从储层底部钻出:当钻进至2903 m时,井斜 90.5° ,随着继续钻进,气测全烃由74%开始逐步下降至2.3%,同时机械钻速减小,钻时明显增大,由3~4 min/m增大至10~12 min/m,返出岩屑中细砂岩占比增大,由于仪器零长影响,该处上下伽马曲线尚未显示。现场地质导向根据实际工况,结合地层岩性,综合判断钻头从储层底部钻出,并及时调整钻具姿态重新入层。随着钻进深度持续增加,根据仪器上下伽马曲线可以看出,2903 m处上下伽马曲线发生明显变化(图6),此时下伽马先于上伽马开始增大,且下伽马大于上伽马,由58 API逐步增大至141 API,随着继续钻进上下伽马值趋于一致,说明在2903 m处钻头开始从储层底部钻出,这与该处机械钻速减小、气测值降低及岩屑变化等工况表现一致。随着钻具姿态调整,2912 m处上下伽马值再次发生变化,上伽马值先于下伽马值下降,且上伽马值小于下伽马值,上下伽马值最终趋于一致降至60 API左右,钻头从煤层底部再次进入煤层。

(3)从储层顶部钻出:井深2955 m处上下伽马值发生变化(图7),上伽马先于下伽马开始增大,且上伽马大于下伽马,由60 API逐步增大至122 API,最终上下伽马值趋于一致,该变化表明在2955 m处钻头开始从储层顶部钻出。同时根据录井显示,该处机械钻时开始缓慢增大,由3~4 min/m逐步增大至11~13 min/m,气测全烃降为1.6%,井口返出岩屑中泥质粉砂岩含量增大,对比邻井资料及地质设计该处地层上倾,综合分析得出钻头已经出层,因此

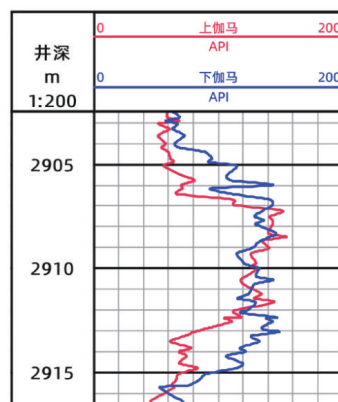


图6 井眼轨迹从煤层底部钻出再入层

上下伽马曲线变化和录井结果分别对井眼轨迹与地层相对位置判断一致。现场地质导向及时根据录井结果对井眼轨迹进行调整,在2964 m处下伽马值先于上伽马值开始减小,且下伽马值小于上伽马值,说明钻头在该处开始接触煤层顶部重新入层,最终上下伽马值均趋于45 API,完全进入煤层。该处录井显示的机械钻时、气测全烃值及岩屑成分等工况变化也进一步验证了上下伽马曲线判层的结论。

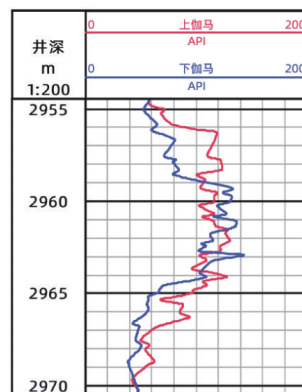


图7 井眼轨迹从煤层顶部钻出再入层

此外,在该区块同步开展了多口井的远端钻铤式方位伽马应用。根据前期查明的地质条件,结合已完钻水平井岩屑录井结果及其地层剖面,该区块地层分布基本一致。该区块所有水平井均为开发井,水平段长度集中在800~1100 m,钻探设备配置、井身结构设计、钻具组合、泥浆体系等钻井工艺及条件较为相似。排除施工人员操作差异影响,可近似认为该区块水平井具有相同的地层分布和钻井工况。针对该区块已完钻的水平井,选取采用远端钻铤式方位伽马和近钻头式方位伽马施工的水

平井各3口,不考虑测量、划眼、维护设备、地质循环等非钻进时间,分别对水平段的平均机械钻速进行统计分析,如表3所示。

表3 不同仪器水平段钻进效率

仪器类型	名称	有效进尺/ m	纯钻时 间/h	平均机械钻 速/($\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$)
远端钻铤式 方位伽马	1#	800	63	12.7
	2#	1000	80	12.5
	3#	1100	91	12.1
近钻头式方 位伽马	4#	1000	81	12.3
	5#	1000	83	12.0
	6#	1050	87	12.1

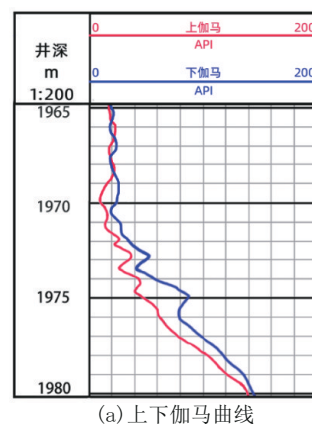
由表3可得出,水平段采用远端钻铤式方位伽马和近钻头式方位伽马的平均机械钻速基本相等,而远端钻铤式方位伽马的仪器日费远低于近钻头式方位伽马(参见表1),因此该区块水平段进尺相同前提下,使用远端钻铤式方位伽马的仪器使用成本节省了50%以上。

3 不同方位伽马应用对比

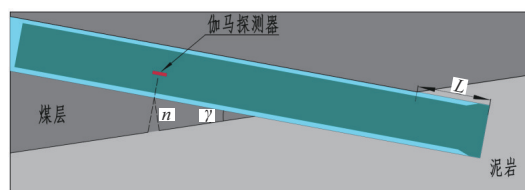
由于远端钻铤式方位伽马与近钻头式方位伽马在工作原理、仪器结构形式及实际探测地层厚度等方面基本一致,二者上下伽马曲线针对地层分层的分辨率和响应速度相同,因此本文主要对比分析使用探管式方位伽马和远端钻铤式方位伽马的相邻井位中井眼轨迹出层工况,对比二者判层过程中上下伽马曲线变化(图8),分析不同仪器分层的响应特性。

水平井完钻后,结合测井数据及录井结果进行地质分析,确定地层剖面数据。完钻后的地层剖面是水平井煤层气生产评价的重要依据。由图8(a)上下伽马曲线变化规律,可以得出在1969 m处探管式方位伽马探测到地层变化。同时基于完钻后的地层剖面,可以获取该处钻具轨迹与地层的位置关系如图8(b)。该处井斜 89.6° ,地层上倾 0.6° ,伽马传感器的探测深度0.3 m,水平段井眼216 mm,仪器零长13 m,忽略井径扩大影响,可以得出轨迹与地层夹角 γ 为 1° ,仪器与地层分界处垂直距离 n 为0.19 m时开始探测到地层变化,此时钻头已经钻出目地层,长度 L 约为2 m。

图9(a)采用远端钻铤式方位伽马进行水平段



(a) 上下伽马曲线



(b) 轨迹与地层相对位置

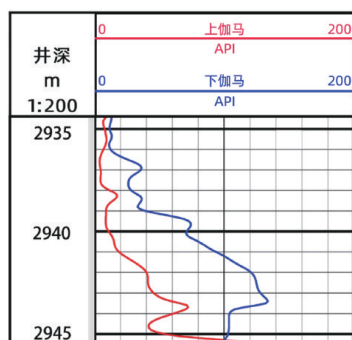
图8 探管式方位伽马针对地层变化的响应分析

钻进,该井水平段钻进至2936 m处远端钻铤式方位伽马探测到地层变化。根据实钻数据,该处井斜 89.8° ,地层上倾 0.8° ,地层夹角 γ 为 1° ,伽马传感器自身探测距离0.3 m,但由于其安装在钻铤外壳上,相较探管式方位伽马具有较大的地层探测深度,仪器零长及井眼大小与图8(a)中探管式方位伽马一致。基于完钻后的地层剖面数据,可知仪器与地层分界处垂直距离 n 约为0.3 m时开始探测到地层变化,并且此时钻头距离地层分界处 M 为4.2 m,没有钻出煤层底板,如图9(b)。

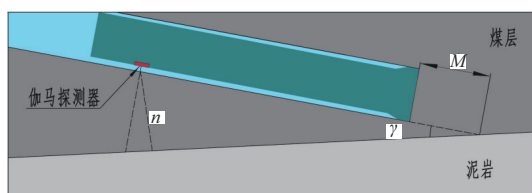
综上,在钻井轨迹与地层夹角相同前提下,探管式方位伽马由于自身结构特征,在地层探测深度方面受限,造成地层变化响应速度滞后,影响判层时效,导致水平段储层外无效进尺增加,降低了水平段储层钻遇率。而远端钻铤式方位伽马具备良好的地层探测深度,响应速度较快且针对地层变化上下伽马分离明显,可快速指导现场地质导向人员及时调整钻具姿态,大幅降低了钻头出层概率,很大程度避免了大段储层外无效钻进,有效保障了储层钻遇率。

4 结论及建议

(1)在相同地层及工况条件下的煤层气水平井开发中,针对相同长度水平段,采用远端钻铤式方



(a) 上下伽马曲线



(b) 轨迹与地层相对位置

图9 远端钻铤式方位伽马针对地层变化的响应分析

位伽马可有效节约仪器使用成本,较近钻头式方位伽马仪器的使用成本降低50%以上,提高了钻井综合经济效益。

(2)远端钻铤式方位伽马在煤层气水平井开发应用中,相同工况下上下伽马曲线变化与机械钻速、岩屑及气测值等录井结果反映一致,同时在储层探测及二次入层等重要工况中上下伽马曲线变化响应度高,完全满足实际钻井需要。

(3)相较于探管式方位伽马,远端钻铤式方位伽马针对地层变化时,上下伽马具有较好响应特性,可快速准确地为现场地质导向提供判断依据,及时调整钻具姿态,避免出现大段储层外无效进尺,降低了储层侧钻的风险,可保证储层钻遇率。

(4)远端钻铤式方位伽马可对近钻头式方位伽马的测量值进行精度校准,建议钻井中二者同时使用,可提高上下伽马值的测量精度。根据仪器特性

及实际钻井工况,可为相关非常规能源的开发提供新的技术手段。

参考文献:

- [1] 刘克强,陈财政,李欣,等.方位伽马随钻测量技术现状与发展展望[J].复杂油气藏,2022,15(4):86-90.
- [2] 程国,齐真真,王邦,等.近钻头方位伽马地质导向技术在东胜气田的应用[J].录井工程,2023,34(4):79-84.
- [3] 孙东鑫.小尺寸近钻头方位伽马随钻地质导向工具设计及性能优化[D].西安:西安石油大学,2023.
- [4] 陈龙,陈刚,张冀冠.矿用随钻动态方位伽马仪器的研制与应用[J].煤田地质与勘探,2022,50(1):86-91.
- [5] 张崇儒.小尺寸随钻方位伽马地质导向工具设计及结构优化[D].西安:西安石油大学,2022.
- [6] 胡斌,马鸿彦,黄秉亚,等.近钻头方位伽马随钻测量系统的研制与应用[J].石油钻采工艺,2021,43(5):613-618.
- [7] 郑奕挺,方方,吴金平,等.近钻头随钻伽马成像系统研制及应用[J].东北石油大学学报,2020,44(3):70-76,126,9.
- [8] 李继博,钱德儒,郑奕挺,等.近钻头伽马高精度实时成像技术研究与应用[J].石油钻探技术,2021,49(3):135-141.
- [9] 张鹏云,孙建孟,成志刚,等.随钻方位伽马成像测井在鄂尔多斯盆地H井区水平井地质导向中的应用[J].科学技术与工程,2021,21(23):9713-9724.
- [10] 李飞飞,冯利军,薛杰.随钻方位伽马测井在水平井地质导向中的应用——以延113-延133区块为例[J].石油地质与工程,2024,38(6):92-96,101.
- [11] 王忠良,吴思薇,钱晨,等.方位伽马成像技术在长庆油田陇东页岩油地质导向中的应用[J].石油地质与工程,2024,38(5):116-120.
- [12] 牛康.煤层气水平井方位伽马地质导向技术应用[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(18):169-171,174.
- [13] 武程亮.方位伽马在煤层气水平井中的应用[J].钻探工程,2021,48(5):69-75.
- [14] 刘春生,陈晓林,侯岳,等.方位伽马随钻测量技术在土耳其天然碱溶采对接井中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(8):28-34.
- [15] 张意,徐书荣,陈刚,等.随钻方位自然伽马在煤矿井下的应用[J].电子测试,2023(3):97-101.

(编辑 王文)