

方位伽马在煤层气水平井中的应用

武程亮

(山东省煤田地质局第二勘探队, 山东 济宁 272000)

摘要:水平井作为煤层气开发的一种井型,施工难度相对较大,主要体现在安全着陆、钻遇率、储层保护、防塌防卡等,其中煤层钻遇率是提高产气量的重要指标。随着钻井技术和随钻仪器的不断发展,保障储层钻遇率的相关地质参数探管、短节和地质导向技术也相继应用在煤层气水平井施工中。现阶段在煤层气水平井中,伽马探管,特别是方位伽马探管的运用较广,利用伽马测井划分岩性、地层对比、计算地层视倾角的功能,为现场决策者提供井内地质参数,能够有效地为钻井服务。本文通过一口煤层气水平井的施工,介绍了方位伽马在煤层气水平井中的应用。

关键词:煤层气;水平井;地质导向;方位伽马;上伽马;下伽马

中图分类号:P634;TE24 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2021)05-0069-07

Application of azimuth gamma in coal bed methane horizontal wells

WU Chengliang

(The Second Prospecting Team of Shandong Coal Geology Bureau, Jining Shandong 272000, China)

Abstract: As one of the well types for coal seam methane development, horizontal wells present difficulties for drilling, including safe landing, coalbed intersection rate, reservoir protection, anti-collapse and anti-sticking; and among them the coal seam intersection rate is an important index to improve gas productivity. With the continuous development of drilling technology and MWD tools, geological logging probes, short subs and geo-steering technology have also been applied in the drilling of coal bed methane horizontal wells. At present, gamma probes, particularly azimuth gamma probes, have found wide use in coal bed methane horizontal well drilling. Gamma probes can provide downhole geological parameters for the field decision-makers with their functions of lithological identification, formation correlation, and apparent formation dip calculation; thus, effectively serving the drilling. This paper describes the application of azimuth gamma probes in coal bed methane horizontal well drilling in the context of drilling of a coal bed methane horizontal well.

Key words: coal bed methane; horizontal well; geo-steering; azimuth gamma; upper gamma sensor; lower gamma sensor

0 引言

我国煤层气地面勘探开发的探索始于20世纪80年代末90年代初,起初只以减少煤矿瓦斯灾害为目的,利用率偏低;90年代后期,政府及相关企业以开发新能源为目的,积极引进西方国家的新技术和设备,相继开展煤层气勘探研究和先导性试验,取

得了一批煤储层测试参数和部分气井生产资料,为后期的大规模开发奠定了基础^[1]。近些年,随着开发技术的相对成熟,水平井逐渐成为各企业的首选井型。水平井优势明显:地面占地面积小、基本不受地面条件的影响、钻前成本小、单井揭露储层面积大、单井产气量大等。在施工水平井时,除前期

收稿日期:2020-03-27; 修回日期:2020-10-16 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.05.010

基金项目:山东省煤田地质局2019年度科研专项奖励基金项目“长距离煤层气对接井钻井设备仪器的配套实验研究”(编号:鲁煤地科字(2019)7号)

作者简介:武程亮,男,汉族,1980年生,工程师,探矿工程专业,从事定向井施工与管理工作,山东省济宁市任城区任城大道120号煤田地质大厦1306室,wxwerrorsx@126.com。

引用格式: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.

WU Chengliang. Application of azimuth gamma in coal bed methane horizontal wells[J]. Drilling Engineering, 2021,48(5):69-75.

需要准备的资料外,在施工过程中需要根据遇到的实际情况及时对设计进行完善。

随着随钻测量技术的日趋成熟,在20世纪80年代末90年代初,发展起来了一种新的钻井技术——地质导向钻井技术。所谓地质导向钻井,就是使用随钻测量数据和随钻地层评价测量数据来控制井眼轨迹的钻井技术,它以井下实际地质特征来确定和控制井眼轨迹,而不是按照预先设计的井眼轨道进行钻井^[2]。作为煤层气中常用的随钻地质参数测量仪器,方位伽马在煤层气水平井中的应用越来越广泛。

1 地质导向技术

地质导向技术自20世纪90年代发展以来,一直是钻井领域的前沿技术。地质导向钻井是在钻井作业的同时,能实时测量地层参数和井眼轨迹,并能绘制各种测井曲线的一种钻井技术。单纯的几何导向是依据事先设计好的轨道作为导向依据,钻进至设计靶区的一种导向技术,但是由于地质不确定性带来的误差,导致几何导向不能更好地为工程服务。地质导向不同于几何导向,是根据井下实时上传的地层数据和井眼数据,结合现场掌握的其他资料,有效指导钻井施工,使井眼轨迹最大限度地按照地质目的穿行,提高储层钻遇率^[3]。

受常规煤层气水平井开发成本约束,在煤层气水平井施工中,随钻地质参数仅为自然伽马或方位伽马,其中以方位伽马应用较广。鉴于此,在煤层气水平井钻井过程中,地层评价必须结合钻时、地质录井、气测录井、工程参数录井等手段作为地质导向的依据,来指导水平井的施工。

2 方位伽马

自然伽马作为地层评价的重要因素,在煤层气水平井施工中应用广泛,方位伽马对地层的判断,特别是水平段施工时,能够准确地对地层界面做出判断。常规自然伽马测井是通过测量地层岩石中自然存在的放射性核衰变过程中发出的 γ 射线来获取不同的地层信息的,具有能准确识别地层岩性的特点,但是在水平井的施工中,由于本身没有方位信息且不具备实时性,不能及时有效地确定层位。在水平段钻井施工过程中,常因导向错误导致钻头钻出目的矿层,影响钻井施工周期和降低储层钻遇率^[4]。

方位伽马通过与MWD的高低边相结合,能够在复合和滑动钻进过程中,准确判别储层边界位置,有助于地质导向工作,根据方位伽马的数据,可以计算出该地区的地层倾角,实时进行地层构造研究分析,有效地指导水平井的钻井施工。

2.1 方位伽马工作原理

方位伽马测井仪测量的是岩层中自然存在的放射性核衰变过程中放射出来的 γ 射线的能级宽度,通过闪烁计数器俘获来自地层的伽马射线,采用API刻度,也可同时在裸眼井和套管井中施工^[5]。从工作原理上来讲,方位伽马和普通的周向测量伽马没有本质的区别,数据的处理可沿用传统伽马的数据处理方法。

但方位伽马除具有自然伽马的功能外,还具有以下功能:

- (1)测量特定方向的自然伽马值。
- (2)准确判断不同地层的界面位置。
- (3)计算及预计地层倾角。

传统的自然伽马测井虽然能够较好地指示钻井轨迹是在煤层中还是在非煤层中,但是在意外钻出煤层后,不能及时地指明如何钻回至煤层。方位伽马除有自然伽马的功能外,还具有方位信息,即方位伽马测井时,可以实时上传上下伽马数据,明确地告诉定向工程师如何调整钻井轨迹回到煤层中。

常见的两种钻出煤层的模式如图1所示,上下伽马数值表现为:

钻头从顶板钻出煤层时,上伽马数值先增大,然后下伽马增大,直至趋于相近。

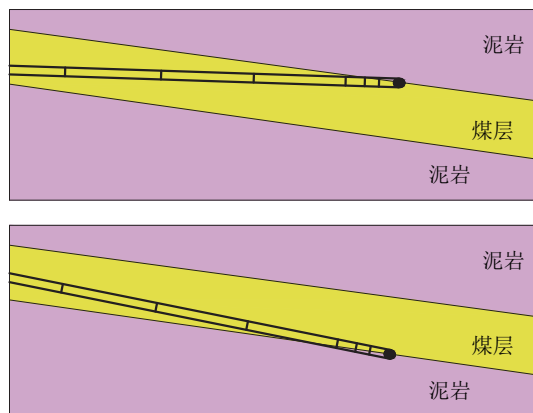


图1 钻头分别从顶、底板钻出煤层
Fig.1 Drill bits exiting coal seams from the roof and the bottom respectively

钻头从底板钻出煤层时,下伽马数值先增大,然后上伽马增大,直至趋于相近。

2.2 方位伽马仪器结构简介

国外方位伽马大多采用对称排列的2个传感器或是90°排列的4个传感器进行测量^[5],国产方位伽马不同于国外仪器,是在普通自然伽马仪器的基础上加装了270°~300°的屏蔽,保留60°~90°的开放测量区,使传感器只能测量特定角度的伽马值,同时增加了窗口扫描位置判断功能以及井眼姿态测量单元^[6]。方位伽马测量有两种模式:旋转测量和滑动测量^[7]。旋转测量模式下,方位伽马的微处理器利用井眼姿态测量单元的实时测量数据解算出窗口中心线的位置,根据窗口中心线位置和设定位置比较,确定测量的伽马数据来自哪个方向,从而实现上下伽马的测量,如图2所示;滑动测量模式下,钻进一段距离后,将测量窗口处于上部的位置,重复以上钻进轨迹,得到上伽马;再将测量窗口处于下部的位置,重复以上钻进轨迹,得到下伽马。上下伽马测量范围:0~500 API,精度:±7%。

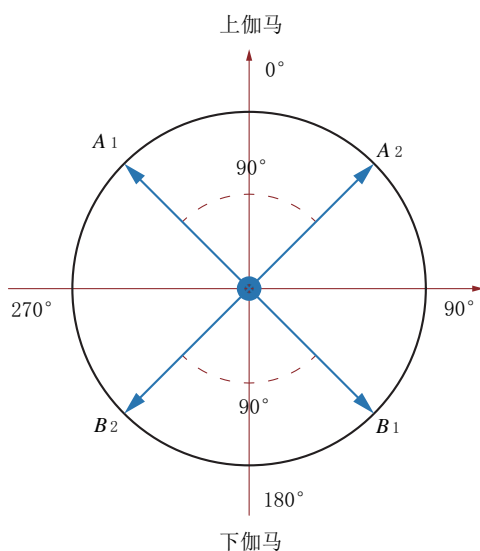


图2 上下伽马判定示意

Fig.2 Identification of the upper and the lower gamma sensors

2.3 方位伽马测量仪器及其选择

随钻方位伽马测量仪器是在传统的无线随钻测量仪器的基础上进行扩展,加装方位伽马测量探管,地面传感器增加井深传感器、钩载传感器等,并在地面解码程序中加载伽马解码单元。方位伽马测量仪

器按随钻仪器的传输方式分为泥浆脉冲式和电磁波式。

泥浆脉冲测量仪器:仪器将测得的数据经编码发送给脉冲传感器,引起脉冲传感器阀杆动作,使立管内泥浆压力按照一定的规律发生变化,产生脉冲信号,在地面计算机接收到脉冲信号后,按照预先设定的程序进行解码得到地层伽马值。

泥浆脉冲测量仪器适合于含砂量 $1\% < B < 4\%$ 、含气量 $< 7\%$ 的钻井液钻进施工,优点是通讯结果可靠,相对简单实用,目前国内已可自行生产;缺点是对钻井液有严格要求,不能实现双向通讯,传输速度较慢,对含气量特别敏感,不能用于空气钻进、泡沫钻进等没有连续液相的欠平衡钻进。

电磁波测量仪器:井下仪器完成工程参数和地质参数的随钻测量,并通过发射机将所测参数以电磁波形式发往地面。电磁波信号主要沿钻柱传输,经过地层返回到钻具。地面系统接收信号,经过放大、去噪和解码,将数据送至计算机,计算机将这些信息和无线深度系统发过来的井深及工程参数等信息进行综合处理,恢复井下仪器的实测工程参数和地质参数^[8]。

电磁波传输方式适合于3000 m以浅的钻井,优点是数据传输速度快,速率可达100 b/s以上,可在钻进、循环及起下钻过程中随时接收数据;使用范围广,不受钻井液介质、钻井方式等条件的限制,适合于普通钻井液钻进、欠平衡钻进和充气钻进的相关参数测量,可以直接对井内测量仪器进行控制,实现地面与井下的双向通讯。缺点是对地层电阻率反应敏感,特别是低电阻率地层,电磁波信号衰减较快甚至不能穿过,传输距离相对较短,不适合深井的测量。

目前在煤层气水平井施工中,山西柳林区块运用电磁波仪器较广^[9],晋城区块两种仪器均有运用。根据施工井型设计,浅井或水平段较短的井大多使用电磁波仪器,深井或水平段较长的井一般用泥浆脉冲仪器,也有两种仪器结合使用的。

3 应用实例

3.1 水平井简介

该井位于山西省沁水盆地某区块,系煤层气赋存条件较好的区块,该区域煤层气含量达 $28 \text{ m}^3/\text{t}$,尤以3煤含气量最高。该水平井就是3煤L形水平

井,煤层埋深480.00 m,设计水平段900.00 m,钻遇率达90%,水平段清水钻进。

3.2 施工简介

该水平井一开井径311.15 mm,钻进至基岩20.00 m,井深60.00 m,下 $\varnothing 244.5$ mm表层套管,并固井。二开井径215.9 mm,钻进至190.00 m,换造

斜钻具组合定向钻进,至井深616.00 m,煤层顶板以上5.00 m,下入 $\varnothing 177.8$ mm套管并固井。三开井径152.4 mm,井深657.20 m进入煤层,沿煤层水平钻进至井深1560.00 m完钻。

井身结构如表1所示。

表1 某煤层气水平井井身结构

Table 1 Structure of a coal bed methane horizontal well

序号	井身结构	套管程序	钻进井段/m
1	$\varnothing 311.15$ mm $\times$ 60.00 m	$\varnothing 244.5$ mm $\times$ 60.00 m	0~60.00
2	$\varnothing 215.9$ mm $\times$ 616.00 m	$\varnothing 177.8$ mm $\times$ 615.80 m	60.00~616.00
3	$\varnothing 152.4$ mm $\times$ 1560.00 m		616.00~1560.00

3.3 轨迹控制技术

3.3.1 造斜段轨迹控制

(1)结合区域地质资料,特别是邻井钻探、地质资料,对水平井着陆点进行预判。参照本地区方位漂移规律合理确定方位提前量;设计轨道尽量为双增模型,留足够的调整井段,根据调整井段测量和中靶预测结果、造斜难易程度合理选择马达弯壳体度数,调整工具面,达到中靶要求^[10]。

(2)加强现场实钻资料的录取工作,对岩屑录井、钻时录井、气测录井和随钻录井资料实时分析,准确判层,特别是对标志层的判定要准确。掌握钻具造斜能力,在地质目标不确定的情况下,对井眼轨道实施优化,精控钻井轨迹,以保证探得煤顶顺利着陆。

(3)优化钻井液体系,使其有较高的携岩能力、护壁能力及润滑能力,确保钻井安全;适时进行短起下作业,消除岩屑床,修整井眼,使其更加圆滑、稳定,为下步钻进提供安全保障。

3.3.2 水平段轨迹控制

在顺利着陆后,进入水平段施工,水平段的轨迹控制既要保证井下安全,又要保证钻遇率,水平井段也必须达到设计要求的长度。现场施工必须充分结合钻时、岩屑、气测录井、随钻方位伽马及井眼轨迹参数等数据进行综合分析,并对后续井段的地层状况做出预判,包括煤层、夹矸、顶底板界面、地层倾角等,有效指导施工,使钻头最大限度地煤层中钻进,提高煤层钻遇率,不能盲目地按照事先设计的钻井轨道施工^[11]。

水平段施工过程中,岩屑床更容易形成,要坚持“多转少定”,提高携岩能力;坚持短起下作业,消除岩屑床,修正井壁,保证井壁圆滑,减少起伏;提高机械钻速,控制MWD测量时间,缩短钻井液对煤层的冲刷。水平段钻进,为保证煤层结构稳定不坍塌,复合钻进时宜采用小钻压、低转速的钻进参数^[12]。

在该井水平段钻进时,方位伽马有明显特征的显示段如图3所示。在井深772.00 m,上伽马比下伽马大,并且都变大,已经接近泥岩,此时钻时是唯一实时反映实钻情况的数据,钻时明显比煤层钻进时大,煤层钻进时钻时为5~7 min/m,此时的钻时达到10~12 min/m。到井深775.00 m时,上下伽马趋于一致,说明是上切,就是从煤层打到顶板。然后开始降斜,降到比地层倾角还小的角度,较煤层走势,轨迹开始往下走,即下伽马比上伽马小,且都变小,到井深805.00 m重新钻回至煤层,上下伽马趋于一致。在随后上返至地面的岩屑,结合气测录井资料,和已掌握的地质资料做对比,也证明是从煤层顶板钻出了煤层。

如图4所示,井深1240.00 m,下伽马比上伽马大,并且都变大,最后趋于一致,说明是下切,就是从煤层打到底板。钻时明显变大,然后开始增斜,增到比地层倾角还大的角度,较煤层走势,轨迹开始往上走,即上伽马比下伽马小,且都变小,到井深1263.00 m重新钻回至煤层,上下伽马趋于一致。后期对上返至地面的岩屑,结合气测录井资料,和已掌握的地质资料做对比,证明此次是从煤层底板钻出了煤层。

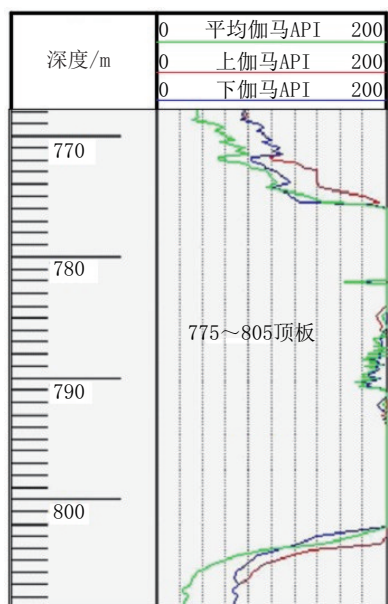


图3 轨迹上切后返回煤层

Fig.3 Return to the coal seam after cutting through the roof

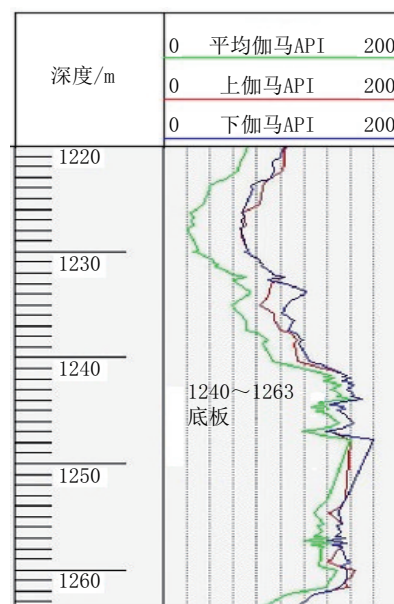


图4 轨迹下切后返回煤层

Fig.4 Return to the coal seam after cutting through the bottom

3.4 地层倾角的计算

利用传统的伽马探管计算地层倾角时,只有钻井轨迹穿越同一个地层界面两次或者明确知道目标层厚度并且同时穿越该层顶、底界面,利用所得到的界面位置和穿越距离,结合钻井轨迹参数可以计算出地层视倾角。如果利用方位伽马测井,任何情况下,只要一次经过顶或底界面,就可以准确获得穿越点处的视地层倾角信息,而且可以准确判断出层位

置,为及时调整轨迹赢得时间^[13]。

利用上下伽马计算视地层倾角的公式^[14]:

$$\alpha \approx \arctan(D/\Delta d) + \beta - 90^\circ$$

式中: α ——视地层倾角, ($^\circ$); D ——井径, cm; Δd ——上、下伽马数值变化点的间距, cm; β ——井斜角, ($^\circ$)。

式中各参数间关系见图5所示。

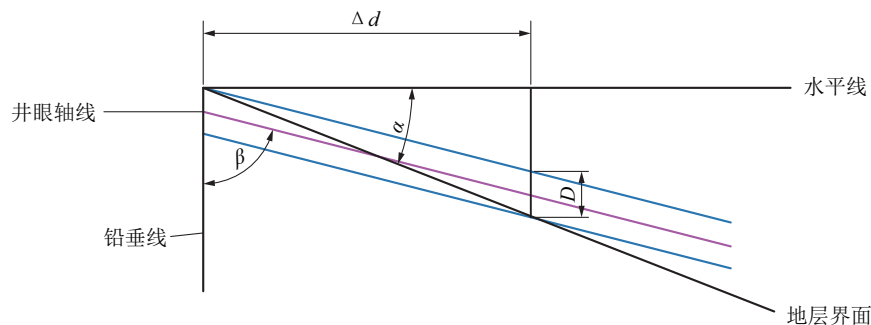


图5 计算地层倾角公式各参数间关系示意

Fig.5 Calculation of the formation dip and the relationship between various parameters

以图3井深770.00~780.00 m井段为例,上下伽马明确指示钻头从煤层顶部出层,与综合录井资料的判断一致,计算该点的视地层倾角为 0.9° ,与构造图拾取的 2° 相比,该位置地层产状变缓,也印证了以

88° 的井斜穿顶板的事实。

地层倾角与井斜角的变化关系对井眼轨迹的控制至关重要,钻进过程中,如果对地层倾向判断失误,轨迹也可能钻出煤层^[15]。

3.5 运用对比

见表2。

该井水平段进尺数据及煤层钻遇率统计

表2 某煤层气水平井水平段进尺及煤层钻遇率

Table 2 Horizontal drilling length and coal seam intersection rates of a coal bed methane horizontal well

起止井段/m	段长/m	非 煤 层			钻遇率/%
		井段/m	段长/m	顶/底	
657.20~1560.00	902.80	775.00~805.00	30.00	顶	
		1240.00~1263.00	23.00	底	
合计	902.80		53.00		94.13

某水平分支井包括1个主井眼和4个分支井眼,水平段总进尺3163.00 m,该井施工较早,受当时技术限制,随钻仪器带自然伽马探管作为地质参数测

量单元。水平段进尺数据及煤层钻遇率统计见表3。

表3 某水平分支井水平段进尺及煤层钻遇率

Table 3 Horizontal drilling length and coal seam intersection rates of a horizontal branch well

井眼	起止井段/m	段长/m	非 煤 层			钻遇率/%
			井段/m	段长/m	顶/底	
L1	750~1205	455.00	925.00~1013.00	88.00	底	80.66
L2	710~1320	610.00	1143.00~1202.00	59.00	底	90.32
L3	640~1350	710.00	947.00~988.00	41.00	顶	89.29
			1217.00~1252.00	35.00	底	
L4	625~1165	540.00	819.00~865.00	46.00	顶	91.48
M	502~1350	848.00	917.00~954.00	37.00	顶	81.25
			1204.00~1238.00	34.00	底	
合计		3163.00		340.00		89.25

对比发现,运用方位伽马施工水平井确实对提高钻遇率有明显优势,在钻出煤层后可以较早地运用工程手段尽快地使轨迹重新回到煤层中,减少非煤层井段的长度。当然,任何仪器、工具只是起辅助作用,工程的施工与人员整体素质、前期资料收集、研究等因素也有很大的关系,决策人员及时地发现、调整才能更好地发挥仪器、设备的作用。

4 结语

(1)方位伽马测井较传统伽马测井有明显优势,不但能够准确判定钻井轨迹所在层位,而且在意外钻出储层时,能够明确告知决策人员钻头是从储层的上部还是下部出层,并且可以利用上下伽马数据计算地层视倾角,为决策者及时调整轨迹钻回储层提供明确指导,减少非储层钻井量,从而提高钻效和钻遇率,是水平井,特别是薄储层水平井钻进的有效

工具。

(2)现应用在煤层气水平井中的随钻仪器测点均距离钻头有12~14 m的滞后距离,测量数据的滞后,对水平井轨迹的实时调整带来不小的挑战,必须结合钻时等录井资料进行施工。

(3)钻井迟到时间导致岩屑录井及气测录井数据也相应的滞后,给导向作业带来一定的难度。

(4)地质导向作业依靠钻时、岩屑录井、气测录井、随钻伽马等随钻数据,结合轨迹控制技术,实时更新、修正钻井轨迹,以更好地指导施工。

参考文献(References):

- [1] 李嘉川,王小峰,石兆彬,等.中国煤层气开发现状与建议[J]. 科技创新导报,2011(8):49-51.
LI Jiachuan, WANG Xiaofeng, SHI Zhaobin, et al. Status and proposal of coal bed methane development in China[J]. Science

- and Technology Innovation Guide, 2011(8):49-51.
- [2] 刘玉霞.地质导向钻井随钻预测方法研究[D].东营:中国石油大学,2007.
- LIU Yuxia. Study on the method of predicting while geosteering drilling[D]. Dongying: China Petroleum University, 2007.
- [3] 张福强,易铭.提高煤层气水平井煤层钻遇率的关键技术[J].中国煤炭地质,2012,24(9):61-65.
- ZHANG Fuqiang, YI Ming. Key techniques to improve multilateral horizontal CBM well coal seam intersecting rate[J]. Coal Geology of China, 2012,24(9):61-65.
- [4] 江旗洪,吴冬凤,张野,等.方位伽马随钻测井仪在苏里格水平井地质导向中的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2014(3):57,94.
- JIANG Qihong, WU Dongfeng, ZHANG Ye, et al. Application of MWD with azimuth gamma in geo-steering for Suriig horizontal wells[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2014(3):57,94.
- [5] Gamma ray API definition-related issues, model based LWD tool characterization and calibration[C]//SPWLA 58th Annual Logging Symposium, 2017.
- [6] 袁超.随钻方位伽马测井方法基础研究[D].北京:中国石油大学,2012.
- YUAN Chao. Basic research on gamma logging method with drilling orientation [D]. Beijing: China Petroleum University, 2012.
- [7] 唐海全.随钻方位伽马数据成像处理方法[J].岩性油气藏,2017,29(1):110-115.
- TANG Haiquan. Image processing method of LWD azimuthal gamma data[J]. Lithologic Reservoirs, 2017,29(1):110-115.
- [8] 杨涛,易铭.Blackstar EM-MWD在煤层气水平井中的应用[J].中国煤炭地质,2010,22(S1):137-139.
- YANG Tao, YI Ming. Application of blackstar EM-MWD system in CBM horizontal wells[J]. Coal Geology of China, 2010, 22(S1):137-139.
- [9] 王学强.柳林区块煤层气多分支水平井地质导向钻井技术应用[J].中国化工贸易,2018,10(16):98-99,102.
- WANG Xueqiang. Geo-steering drilling technology for CBM multi-branch horizontal wells in Liulin Block [J]. China Chemical Trade, 2018,10(16):98-99,102.
- [10] SYT 6332—1997,水平井轨迹控制技术[S].
- SYT 6332—1997, Bit trajectory control technology for horizontal well[S].
- [11] 朱云峰,张维.水平井轨迹控制技术浅析[J].中国石油和化工标准与质量,2014(22):52-52,57.
- ZHU Yunfeng, ZHANG Wei. Analysis of horizontal well trajectory control technology[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2014(22):52-52,57.
- [12] 牛洪波,刘建刚,左卫青.弱胶结地层水平井钻井技术探讨[J].石油钻探技术,2007,35(5):61-64.
- NIU Hongbo, LIU Jiangang, ZUO Weiqing. Horizontal well drilling technology for weakly consolidated formations[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007,35(5):61-64.
- [13] 王乾江.方位伽马在焦页32-1HF井的应用[J].管理学家,2014(17):687.
- WANG Qianjiang. Application of azimuth gamma probes in Jiaoye-32-1HF well[J]. Management Scientist, 2014(17):687.
- [14] 段友祥,闫亚男,孙歧峰,等.基于随钻方位伽马测井的地层倾角自动识别[J].测井技术,2018,42(5):30-36.
- DUAN Youxiang, YAN Yanan, SUN Qifeng, et al. Automated detection of dip angle based on LWD azimuthal gamma-ray logging[J]. Well Logging Technology, 2018,42(5):30-36.
- [15] 鲍清英,张义,何伟平,等.煤层气羽状水平井井眼轨迹控制技术[J].石油钻采工艺,2010,32(4):86-90.
- BAO Qingying, ZHANG Yi, HE Weiping, et al. Study on well path control technologies for pinnate horizontal CBM wells [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32 (4) : 86-90.

(编辑 荐华)