中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

深部煤层气 T 型井钻井技术

杨 刚[1],孟尚志[1],李 斌[1],李孝勇[2],张林强[1],马腾飞[1],陈小波[1]
(1.中联煤层气有限责任公司 北京 100016;2.上海巨龙石油技术有限公司 上海 201100)

摘 要:为解决常规侧钻窗口大、曲率半径大,水力喷射径向水平井钻头尺寸小、煤层中进尺短等问题,研发了以柔性钻具为核心的 T 型水平井技术,其侧钻窗口仅 20 cm,曲率半径 1.8、2.5 m,借助叠加式斜向器可以实现多目的层分支水平井;ø139.7 mm 套管内侧钻 ø112 mm 井眼,实现了大尺寸超短半径水平井钻进。井壁稳定性分析论证了清水+2%KCl 可以满足深部煤层造斜段及水平段钻进要求。摩阻转矩分析表明,旋转钻进、起钻及下钻 3 种工况下柔性钻具不会发生弯曲破坏,可以安全钻进 100 m。水力参数分析表明,泵排量 0.5~0.7 m^3/min 可以同时满足井眼清洁和快速破岩要求。在临兴-神府气田试验成功了国内第一口深部煤层气 6 分支 T 型水平井,2 个煤层内各部署 3 个分支,目的煤层深约 1 900 m,煤层中累计水平进尺达 478 m,其中 4 个分支水平进尺超 100 m。

关键词:T 型钻井技术;侧钻;柔性钻具;叠加式斜向器;深部煤层气
中图分类号:TD712;P618 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2336(2018)06-0189-06

Drilling technology of T-shaped well in deep coalbed methane

YANG Gang[1], MENG Shangzhi[1], LI Bin[1], LI Xiaoyong[2], ZHANG Linqiang[1], MA Tengfei[1], CHEN Xiaobo[1]
(1.*China United Coalbed Methane Co., Ltd., Beijing* 100016;
2.*Shanghai Julong Oil Technology Co., Ltd., Shangshai* 201100)

Abstract: In order to solve problems, such as the large window and curvature radius in conventional sidetrack drilling, small drilling bit in radial horizontal well with hydraulic jetting, and short drilling footage in coal seam, T-shaped horizontal drilling technology with flexible drilling tools has been developed. Its resultant window is only 20 cm and curvature radius ranges from 1.8/2.5 m. Using the superposition whip stock, multilayers can be targeted by multi-branch horizontal drilling once. With ø112 mm of sidetrack hole in ø139.7 mm casing, the drilling of horizontal well with ultrashort radius and large size is realized. The wellbore stability analysis demonstrates that the stability of the drilling of kick-off and horizontal sections can be guaranteed with only clean water +2% KCl. According to the torque analysis, the flexible drilling tools would not be destroyed with bending failure during rotatory drilling, drilling down or pulling out the hole, which permits 100 m of safety drilling. The analysis of hydraulic parameters shows that the pump delivery of 0.5~0.7 m^3/min can meet the requirement of borehole cleaning and fast rock cracking. An industrial test in Linxing-Shenfu gas field using this technology has been conducted. It is the first deep CBM T-shaped well with six branches, three branches in each of two layers of coal seam. At present, the target depth is around 1 900 m with total horizontal footage is up to 478 m, among which the horizontal footage of four branches has exceeded 100 m.

Key words: T-shaped drilling technology; side tracking; flexible drilling tools; superposition whip stock; deep coalbed methane

0 引 言

中国煤层气资源量丰富,但煤储层普遍具备低压、低渗、低孔特征,增产改造技术一直是低渗储层开发研究的主题之一[1-2]。受地质、工程、投资等因素的影响,直井或定向井是煤层气勘探开发的主要

收稿日期:2018-03-10;**责任编辑**:赵 瑞 **DOI**:10.13199/j.cnki.cst.2018.06.032
基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05066)
作者简介:杨 刚(1986—),男,山东青州人,工程师,博士。Tel:010-84527681,E-mail:yanggang9@cnooc.com.cn
引用格式:杨 刚,孟尚志,李 斌,等. 深部煤层气 T 型井钻井技术[J]. 煤炭科学技术,2018,46(6):189-194.
YANG Gang,MENG Shangzhi,LI Bin,*et al*.Drilling technology of T-shaped well in deep coalbed methane[J]. Coal Science and Technology,2018,46(6):189-194.

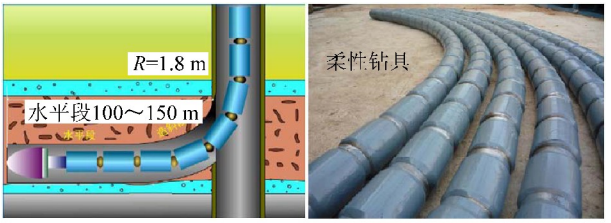
中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

井型[3-4]。目前投入规模开发的部分开发直井和定向井单井产量低,经济效益不足,故而低效井的改造势在必行[5-9]。20 世纪 80 年代,美国公司开发了超短半径水平井技术,核心技术为特殊斜向器和高压射流破岩钻头。该技术能使死井复活,大幅提高油气井产量和采出率,且能降低钻井成本,是油气田老井改造、油气藏挖潜和稳产增产的有效手段,尤其适合于薄储层、稠油、低渗透等油气藏的开发[10-15]。

该技术被成功引进到煤层气开发中[16-18],并取得了不错的应用效果,后期采气量明显增加。不过由于煤层脆弱易垮塌,导致高压软管遇卡,煤层中喷射进尺较短,一般为 10~50 m,且喷射进尺无法确定[19],在一定程度上阻碍了该项技术的发展。临兴区块主力煤层埋深深度一般在 1 600~2 000 m,单层厚度均大于 5 m,总体含气量较高,资源潜力较好,常规煤层气开发技术施工难度大、费用高、收效低;针对此类问题,研发了以柔性钻具为核心的 T 型超短半径水平井钻井技术,并在临兴-神府气田试验成功了国内第一口深部煤层气 6 分支 T 型水平井,目的煤层分别为 8 号煤 1 879.7~1 884.0 m,9 号煤 1 903.0~1 907.7 m。2 个煤层内分别部署 3 个分支,目的煤层累计水平进尺达 478 m,其中 4 个分支水平进尺超 100 m,施工成本为常规钻井费用的 1/2。该技术的成功试验为本区多层开发、深部煤层气、低产井二次开发提供了一种新的技术手段,具有很高的应用推广价值。

1　T 型钻井技术

T 型钻井是一种多目标储层钻完井技术,其技术核心为单根长度 0.15 m 的钻杆与柔性短接构成钻具组合,如图 1 所示。柔性钻具每个关节固定角度 4.5°(可调),长度 15 cm,可控制曲率半径 R 为 1.8、2.5 m。



(a) T型钻井　　(b) 柔性钻具

图 1　T 型钻井技术及柔性钻具

Fig.1　T shape drilling technology and flexible drilling tools

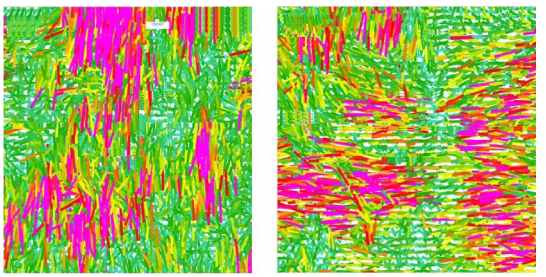
常规侧钻井窗口长度一般为 3 m 左右[20],而 T 型钻井技术窗口长仅 20 cm 左右,与常规开窗侧钻井相比对套管损伤较小。开窗点间距仅需大于 0.6 m,同时要求开窗点避开套管接箍,借助叠加式斜向器可以在一个储层内侧钻多个分支,并可以实现多层、薄互储层的水平井钻井。

利用特制连续多点测斜仪,实现轨迹的多点测量。由于柔性钻具中无螺杆,故而暂尚不能实现轨迹实时调整。对钻头附近 3 m 长钻柱进行了特殊设计,每节钻具内部设计一个可以自由活动的活塞,在泵压作用下活塞向前运动,将相邻 2 节钻具固定起来,形如钻挺,保障了轨迹的平直钻进。

2　T 型钻井设计及可行性分析

2.1　分支轨迹设计

分支部署原则:各目的煤层(8 号/9 号)内部分布署 3 个水平分支,每个分支尽可能多地垂直钻穿天然裂缝,以便最大限度沟通煤层天然裂缝,临兴区块 A1 井 8/9 号煤层裂缝分布平面如图 2 所示。



(a) 8 号煤层　　(b) 9 号煤层

图 2　8/9 号煤层裂缝分布平面

Fig.2　Plane map of No.8/9 coal seam fracture distribution

A1 井在开窗位置处实测井斜 1°左右,真方位 127°~131°,轨迹设计时考虑实际井斜及地层倾角影响,以确保煤层钻遇率,另外,开窗井段固井质量优,不会对侧钻造斜产生影响。6 个分支的轨迹设计如图 3 和表 1 所示。

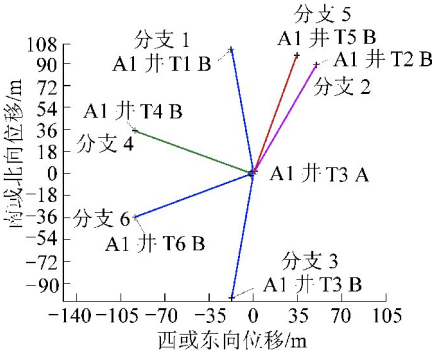


图 3　各分支设计水平投影图

Fig.3　Horizontal projection of each branch

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

表 1　A1 井 6 分支轨迹设计数据

Table 1　Six branch trajectory design datas for A1 well

A1 井	煤层测深/m	厚度/m	分支	井窗点位置/m	A 靶点		B 靶点		方位角/(°)	地层倾角/(°)	长度/m
					垂深/m	曲率半径/m	垂深/m	水平进尺/m			
8 号煤	1 879.7~1 884.0	4.3	T6	1 877.1	1 879.6	2.5	1 879.6	100	290	上 1.0	>100
			T5	1 877.7	1 879.5	1.8	1 885.5	100	250	下 1.0	>100
			T4	1 878.5	1 880.3	1.8	1 880.3	100	20	上 1.0	>100
9 号煤	1 903.0~1 907.7	4.7	T3	1 900.4	1 902.9	2.5	1 902.9	100	350	上 1.5	>100
			T2	1 901.0	1 902.8	1.8	1 909.4	100	190	下 1.0	>100
			T1	1 901.8	1 903.6	1.8	1 903.6	100	30	上 1.5	>100

2.2　井壁稳定性分析

A1 井壁稳定性和坍塌压力分析分别如图 4、图 5 所示,目的煤层及邻近层坍塌压力系数均小于 1,8/9 号煤层中沿不同方位钻进水平井时,坍塌压力系数均小于 1.02,井壁坍塌风险较小,另外,A1 直井煤层段井径扩大率平均 3%,由此可见,该井目的煤层稳定性较好,具备清水钻井条件,为保障储层保护及井壁稳定性要求,建议采用清水+2%KCL 钻井液体系,钻井过程中需加强固控,清除有害固相。

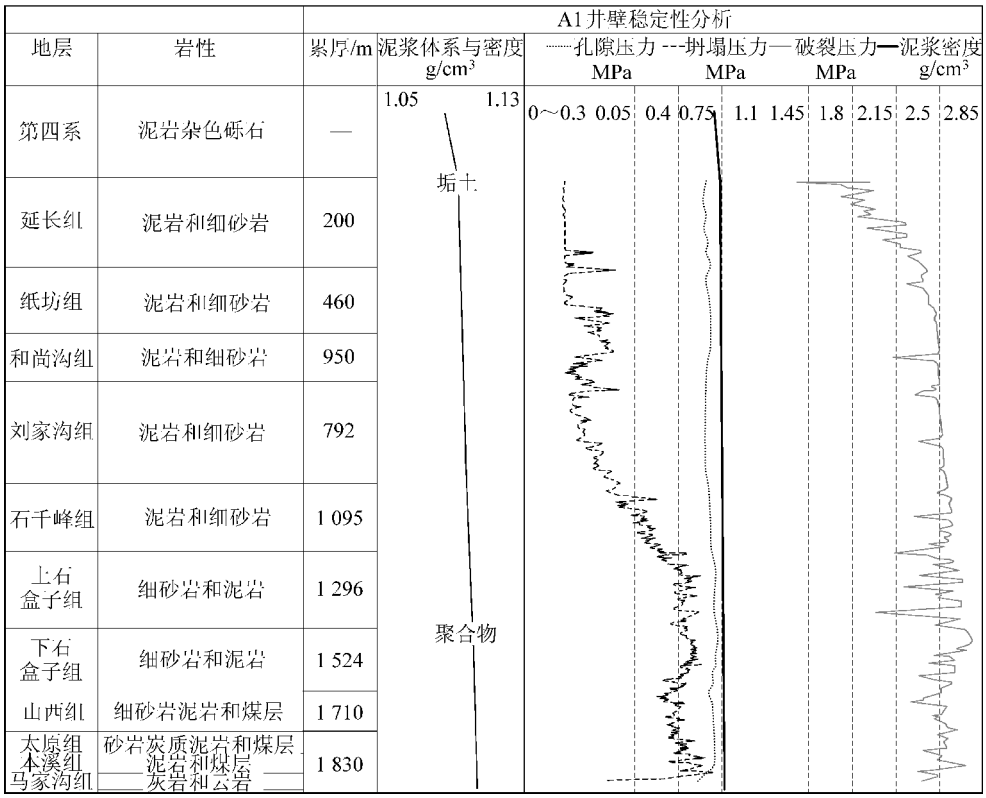


图 4　A1 井壁稳定性分析

Fig.4　Analysis of wellbore stability of A1

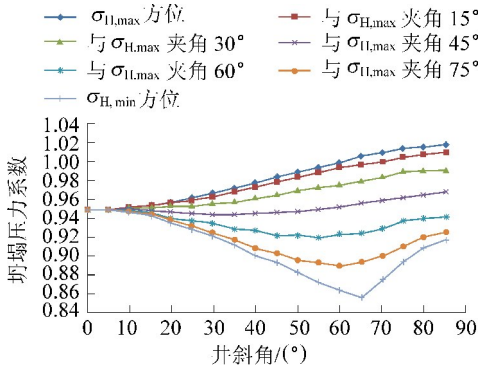
2.3　柔性钻具摩阻转矩分析

T 型钻井工序包括通井、下斜向器、开窗、定向、水平段钻进,各工序下钻具组合见表 2。对水平井钻进过程进行摩阻转矩分析,旋转钻进、起钻及下钻 3 种工况下柔性钻具不会发生正弦/螺旋弯曲及扭曲破坏,可以安全钻进 100 m。

以第一分支 T1 为例计算悬重、转矩(表 3):ø112 mm 水平段(计算井深 2 004 m,水平进尺 100 m)作业时最大钩载为 45.15 t,旋转钻进时最大转矩为 12.41 kN·m。ZJ-15 钻机最大钩载 90 t,安全系

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

数为1.99,满足作业要求,建议选用相当作业能力的钻机。



$\sigma_{H,max}$、$\sigma_{H,min}$分别为最大或最小水平主应力

图 5　8/9 号煤层坍塌压力分析

Fig.5　Collapse pressure analysis for No.8/9 coal seam

表 2　T 型井钻具组合

Table 2　Drilling rig hole assembly of T Shape well

序号	钻具	钻具组合
1	通井钻具	ø118 mm 铣锥+ø118 m×2 m 通径规+ø73 mm 钻杆
2	斜向器钻具	斜向器总成+ø73 mm 钻杆+定向接头+ø73 mm 钻杆+校深短接+ø73 mm 钻杆
3	开窗钻具	ø118 mm 复式铣锥+ø98 mm 柔性钻杆+ø73 mm 钻杆
4	定向钻具	ø116 mm 造斜钻头+ø102 mm 柔性钻杆+ø73 mm 钻杆
5	水平钻进	ø112 mm 钻头+ø102 mm 柔性钻杆(100 m)+ø73 mm 钻杆

表 3　悬重、转矩数据

Table 3　Hanging weight and torque data

项目	悬重/t	转矩/(kN·m)
起钻	45.15	0
下钻	44.40	0
旋转钻进	44.00	12.41

计算条件如下:摩擦因数套管内 0.25,裸眼内 0.35;钻井液密度 1.01 g/cm^3;起下钻速度 18.29 m/min;钻压 20 kN;钻头转矩 8 kN·m;井眼按照设计轨迹计算,考虑游动系统质量 5 t。

2.4　水力参数分析

水力参数分析表明,满足井眼清洁的最低排量为 0.25 m^3/min。ø112 mm 水平井段排量为 0.5 m^3/min 时,泵压为 8.12 MPa,既可以满足井眼清洁,又能满足快速破岩要求,建议选用不低于此作业能力的钻井泵。推进泵排量 0.5~0.7 m^3/min。

3　现场试验

2017 年,在临兴-神府气田试验成功了国内第一口 6 分支深煤层 T 型水平井,ø139.7 mm 套管内开窗侧钻,钻头尺寸 112 mm,钻井周期 63 天,6 个分支累计水平进尺 478 m,其中 4 个分支水平进尺 100 m,曲率半径为 1.8、2.5 m。

完成作业前期准备工作后,由下往上依次钻进各分支。第一分支钻井作业:下斜向器,通过电测仪器与陀螺仪测试深度及方位,打压座封斜向器,正旋钻杆 50 圈以上丢手;组合开窗钻具进行开窗、修窗作业;组合造斜钻具进行造斜;组合水平段钻具按设计要求完成水平段钻进。

开窗钻井参数:钻压 15~30 kN,排量 0.4~0.6 m^3/min,转速 40~60 r/min;造斜段钻井参数:钻压 20~30 kN,排量 0.4~0.6 m^3/min,转速 20~40 r/min;水平段钻井参数:钻压 20~30 kN,排量 0.4~0.6 m^3/min,转速 40~60 r/min。采用钻井液体系为清水+2%KCl,兼顾了煤储层保护及井壁稳定性,作业过程中未出现井壁失稳情况。

待第一分支完钻后,充分循环清理岩屑,下入叠加式导向器,完成第二分支转进,依次完成其余分支的钻进作业,最后组合打捞管柱,依次打捞出 6 个斜向器,完成 T 型井钻井作业。

各分支完钻参数及岩屑录井情况分别见表 4、图 6,各分支均在目的煤层中钻进,满足设计要求,其中 4 个分支达到了设计的 100 m 长度,另外 2 个分支由于 PDC 钻头磨损及卡钻落鱼原因提前完钻,整体上来讲,本次试验达到了预期。

表 4　各分支完钻参数

Table 4　Drilling parameters of each branch

项目	分支 1	分支 2	分支 3	分支 4	分支 5	分支 6
开窗/m	1 901.8	1 901	1 900.4	1 878.5	1 877.5	1 877.1
方位角/(°)	30	190	350	20	250	290
水平段长/m	34.3	100.23	100.52	100.5	41.5	100.5
时间/d	12	7	5	12	12	5

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

图 6　岩屑录井

Fig.6　Cuttings logging

4　结　　论

1)针对常规侧钻及水力喷射径向水平井的不足,研发了以柔性钻具为核心的 T 型钻井技术,该技术达到了国内外领先水平:开窗窗口仅 20 cm 左右,对套管损伤较小;曲率半径仅 1.8~2.5 m,目的层得到了充分利用;借助叠加式斜向器可以实现多层、薄互储层的水平井钻井;实现了大尺寸超短半径水平井钻进,139.7 mm 套管内采用 112 mm 钻头侧钻可以完成 100 m 水平进尺。

2)通过井壁稳定性分析,论证了目标区深部煤层造斜段及水平段井壁稳定性,采用清水+2%KCL 可以完成 T 型钻井;摩阻转矩分析表明,旋转钻进、起钻及下钻 3 种工况下柔性钻具不会发生正弦/螺旋弯曲及扭曲破坏,可以安全钻进 100 m;水力参数分析表明,泵排量 0.5~0.7 m^3/min 可以同时满足井眼清洁和快速破岩要求。

3)在临兴-神府气田试验成功了国内第一口 6 分支深煤层 T 型水平井,2 个煤层内分别部署 3 个分支,井眼尺寸 112 mm,目的煤层累计水平进尺 478 m,其中 4 个分支水平进尺超 100 m,为深部煤层气开发做了一个新的探索。

4)试验井 2 个分支由于钻头磨损及卡钻落鱼原因提前完钻,表明水平段煤层井壁稳定技术及柔性钻具稳定性有待提高,同时为解决煤层气生产中井壁失稳问题,有必要对柔性筛管进行攻关研究。

参考文献(References):

[1] 刘大锰,李俊乾.我国煤层气分布赋存主控地质因素与富集模式[J].煤炭科学技术,2014,42(6):19-24.
LIU Dameng, LI Junqian. Main geological controls on distribution and occurence and enrichment patterns of coalbed methane in China[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 19-24.

[2] 王博洋,秦　勇,申　建,等.我国低煤阶煤煤层气地质研究评述[J].煤炭科学技术,2017,45(1):170-179.
WANG Boyang, QIN Yong, SHEN Jian, *et al*. Summarization of geological study on low rank coalbed methane in China[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 170-179.

[3] 王益山,王合林,刘大伟,等.中国煤层气钻井技术现状及发展趋势[J].天然气工业,2014,34(8):87-91.
WANG Yishan, WANG Helin, LIU Dawei, *et al*. State-of-the-art and developing trend of CBM drilling technologies in China[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(8): 87-91.

[4] 郑　毅,黄洪春.中国煤层气钻完井技术发展现状及发展方向[J].石油学报,2002,23(3):81-85.
ZHENG Yi, HUANG Hongchun. Development of drilling and completion technology of coal-bed methane wells in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(3): 81-85.

[5] 叶建平.中国煤层气勘探开发进展综述[J].地质通报,2006,25(9/10):1074-1078.
YE Jianping. Advances in exploration and development of coalbed-methane in China: a review[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(9/10): 1074-1078.

[6] 张遂安,袁　玉,孟凡圆.我国煤层气开发技术进展[J].煤炭科学技术,2016,44(5):1-5.
ZHANG Suian, YUAN Yu, MENG Fanyuan. Progress on coalbed methane development technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5): 1-5.

[7] 赵旭生,龙伍见.我国煤层气开发现状及建议[J].中州煤炭,2001(6):13-14.
ZHAO Xusheng, LONG Wujian. Current situation and suggestion of CBM development in China[J]. Zhongzhou Coal, 2001(6): 13-14.

[8] 王忠德,阮　洋,李向东.中国煤层气勘探开发技术进展浅析[J].石油天然气学报:江汉石油学院学报,2008,30(2):517-519.
WANG Zhongde, RUAN Yang, LI Xiangdong. Progress in exploration and development of coalbed methane in China[J]. Journal of Oil and Gas Technology: J JPI, 2008, 30(2): 517-519.

[9] 冯三利,叶建平.中国煤层气勘探开发技术研究进展[J].中国煤田地质,2003,15(6):19-23.
FENG Sanli, YE Jianping. Progress in China's CBM exploration and exploitation technical researches[J]. Coal Geology of China, 2003, 15(6): 19-23.

[10] 宫　华,郑瑞强,范　存,等.大庆油田超短半径水平井钻井技术[J].石油钻探技术,2011,39(5):19-22.
GONG Hua, ZHENG Ruiqiang, FAN Cun, *et al*. Ultra-short radius horizontal well drilling technology in Daqing Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(5): 19-22.

[11] 倪益民,袁永嵩,赵金海,等.胜利油田两口超短半径侧钻水平井的设计与施工[J].石油钻探技术,2007,35(6):57-59
NI Yinan, YUAN Yongsong, ZHAO Jinhai, *et al*. Design and implementation of two ultra-short radius side-tracking horizontal wells in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(6): 57-59.

[12] 黄建东,苏　哲,郭梦如,等.径向水平井技术研究与应用[J].

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

石油工业技术监督,2014(10):45-46.
HUANG Jiandong,SU Zhe,GUO Mengru,*et al*.Research and application of radial horizontal well technology[J].Technology Supervision in Petroleum Industry,2014(10):45-46.

[13] 侯树刚,李帮民,郑卫建.中原油田超短半径径向水平井技术研究及应用[J].钻采工艺,2013,36(3):23-26.
HOU Shugang,LI Bangmin,ZHENG Weijian.Research and application of ultra short radius radial horizontal well in Zhongyuan Oilfield[J]. Drilling & Production Technology, 2013, 36(3):23-26.

[14] 李根生,黄中伟,李敬彬.水力喷射径向水平井钻井关键技术研究[J].石油钻探技术,2017,45(2):1-9.
LI Gensheng, HUANG Zhongwei, LI Jingbin. Study of the key techniques in radial jet drilling [J]. Petroleum Drilling Techniques,2017,45(2):1-9.

[15] 迟焕鹏,李根生,黄中伟,等.水力喷射径向水平井技术研究现状及分析[J].钻采工艺,2012,36(4):119-124.
CHI Huanpeng,LI Gensheng,HUANG Zhongwei,*et al*.Research status and analysis of hydraulic jet radial horizontal well technology[J].Drilling & Production Technology,2012,36(4):119-124.

[16] 鲜保安,夏柏如,张 义,等.开发低煤阶煤层气的新型径向水平井技术[J].煤田地质与勘探,2010,38(4):25-28.
XIAN Baoan,XIA Boru,ZHANG Yi,*et al*.Technical analysis on radial horizontal well for development of coalbed methane of low coal rank[J].Coal Geology & Exploration,2010,38(4):25-28.

[17] 侯玉品,张永利,章梦涛,等.超短半径水平井开采煤层气的探讨[J].矿山机械,2005,33(6):10-11.
HOU Yupin,ZHANG Yongli,ZHANG Mengtao,*et al*.Discussion of exploration of coalbed methane with ultra-short radius horizontal well[J].Mining & Processing Equipment,2005,33(6):10-11.

[18] 张 义,鲜保安,赵庆波,等.超短半径径向水平井新技术及其在煤层气开采中的应用[J].中国煤层气,2008,5(3):20-24.
ZHANG Yi, XIAN Baoan, ZHAO Qingbo, *et al*. Study on new technologies of ultra-short radius radial horizontal wells and application in coal-bed methane development[J].China Coalbed methane,2008,5(3):20-24.

[19] 施连海,杨 帆,黄志强,等.径向水平井技术的应用及其发展方向探讨[J].西部探矿工程,2014(7):60-64.
SHI Lianhai,YANG Fan,HUANG Zhiqiang,*et al*.Application of radial horizontal well technology and its development direction[J].West-China Exploration Engineering,2014 (7):60-64.

[20] 张德荣,孔春岩,冯文荣,等.双层套管高效快速分叉技术研究及应用[J].西南石油大学学报:自然科学版,2015,37(1):161-162.
ZHANG Derong,KONG Chunyan,FENG Wenrong,*et al*.Research and application of fast and efficient bifurcation technology of dual casing[J].Journal of Southwest Petroleum University:Science & Technology Edition,2015,37(1):161-162.

(上接第 84 页)

contentand permeability controlling enrichment zones of high abundancecoalbed methane[J].Acta Petrolei Sinica,2013,34(3):417-426.

[17] 秦 勇,申 建,王宝文,等.深部煤层气成藏效应及其耦合关系[J].石油学报,2012,33(1):48-54.
QIN Yong, SHEN Jian, WANG Baowen, *et al*. Accumulation effects and coupling relationship of deep coalbed methane[J]. Acta Petrolei Sinica,2012,33(1):48-54.

[18] 申 建,秦 勇,傅雪海,等.深部煤层气成藏条件特殊性及其临界深度探讨[J].天然气地球科学,2014,25(9):1470-1476.
SHEN Jian, QIN Yong, FU Xuehai, *et al*. Properties of deep coalbed methane reservoir-forming conditions and critical depth discussion [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25 (9): 1470-1476.

[19] 孟艳军,汤达祯,许 浩,等.煤层气解吸阶段划分方法及其意义[J].石油勘探与开发,2014,41(5):612-617.
MENG Yanjun,TANG Dazhen,XU Hao,*et al*.Division of coalbed methane desorption stages and its significance[J].Petroleum Exploration and Development,2014,41(5):612-617.

[20] 陈贞龙.解吸阶段划分对延川南煤层气田开发的指示意义[J].油气藏评价与开发,2017,7(5):80-84.
CHEN Zhenlong.The significance of desorption phase division on the development of coalbed methane fieldsin southern Yanchuan County[J].Reservor Evaluation and Development,2017,7(5):80-84.