

# 低压低渗煤层气多分支水平井开发关键技术研究

## ——以沁水盆地郑庄区块15号煤层为例

简阔<sup>1</sup>, 马斌<sup>2</sup>, 许晓晨<sup>2</sup>, 陈召英<sup>3</sup>, 茹忠亮<sup>1</sup>, 刘晓<sup>4</sup>

(1. 太原科技大学能源与材料工程学院, 山西晋城 048011; 2. 山西兰花煤层气有限公司, 山西晋城 048107;  
3. 山西蓝焰煤层气集团有限责任公司, 山西晋城 048204; 4. 河南理工大学能源科学与工程学院, 河南焦作 454003)

**摘要:** 沁水盆地太原组15号煤层总体低压低渗低饱和, 煤储层相对较薄, 地质条件复杂, 煤层气井产量普遍偏低。以沁水盆地郑庄区块为研究对象, 依据本区15号煤层LDP-22H多分支水平井的成功开发经验, 全面论述低压低渗煤储层煤层气钻完井工艺、标志层判定、井眼轨迹控制等关键技术。结果表明: 采用钻井-录井-测井一体化地质导向技术可以有效卡准目的煤层, 同时实时修正钻头轨迹, 煤层平均钻遇率在97%以上, 极大地提升了煤层有效进尺。865 d的排采实践表明, LDP-22H多分支水平井日产气量突破15万m<sup>3</sup>, 日产气量稳定在8万m<sup>3</sup>左右, 全程累计产气量为2091.5469.3万m<sup>3</sup>, 实现了超高产和稳产, 标志着多分支水平井在低压低渗煤储层煤层气高效开发上有很好的适用性。另一方面, 多分支水平井要优化井位, 加强水平井底部排采能力, 稳定压降速率, 减小对煤储层渗透率敏感性伤害, 提高排采的连续性, 减少停泵和检修作业频次, 保证产能的延续性。

**关键词:** 多分支水平井; 钻完井工艺; 排采实践; 低压低渗煤储层; 煤层气; 沁水盆地

**中图分类号:** TE243:P634.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)06-0099-08

## Research on key technologies for developing multi-branched horizontal of CBM wells in low pressure and low permeability coal reservoirs

JIAN Kuo<sup>1</sup>, MA Bin<sup>2</sup>, XU Xiaochen<sup>2</sup>, CHEN Zhaoying<sup>3</sup>, RU Zhongliang<sup>1</sup>, LIU Xiao<sup>4</sup>

(1. College of Energy and Materials Engineering, Taiyuan University of Science and Technology,

Jincheng Shanxi 048011, China;

2. Shanxi Lanhua Coalbed Methane Co., Ltd., Jincheng Shanxi 048107, China;

3. Shanxi Lanyan Coalbed Methane Group Co., Ltd., Jincheng Shanxi 048204, China

4. School of Energy Science and Engineering, Jiaozuo Henan 454003, China)

**Abstract:** The No. 15 coal bed of Taiyuan Formation in Qinshui Basin is generally featured with low-pressure, low-permeability and low-saturation. The coal reservoir is relatively thin with complex geological conditions, and the coal bed methane (CBM) production is commonly low. Taken the Zhengzhuang Block in Qinshui Basin as the example, the key technology of CBM drilling and completion technology, marker formation determination, and well trajectory control in low pressure and low permeability coal reservoir are discussed comprehensively based on the successful experience of the LDP-22H multi-branch horizontal well in No. 15 coal bed. The results show that the integrated geosteering technology of drilling and logging can effectively fix the target coal bed and modify the bit track in

收稿日期: 2023-04-05; 修回日期: 2023-06-04 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.06.013

**基金项目:** 国家自然科学基金项目“煤矿采空区遗煤生物气化利用机理研究”(编号: 42102218); 山西省基础研究计划项目(自由探索类)“煤层气解吸-扩散-渗流耦合机理及多尺度模型研究”(编号: 202303021211209); 2022年晋城市重点研发计划(高新领域)项目“煤层气低效井改造潜力评价及增产技术研究”(编号: 20220118)

**第一作者:** 简阔, 男, 汉族, 1986年生, 副教授, 硕士生导师, 地质资源与地质工程专业, 博士, 从事煤层气地质与开发技术研究工作, 山西省晋城市太原科技大学晋城校区, haikuo11@163.com。

**引用格式:** 简阔, 马斌, 许晓晨, 等. 低压低渗煤层气多分支水平井开发关键技术研究——以沁水盆地郑庄区块15号煤层为例[J]. 钻探工程, 2023, 50(6): 99-106.

JIAN Kuo, MA Bin, XU Xiaochen, et al. Research on key technologies for developing multi-branched horizontal of CBM wells in low pressure and low permeability coal reservoirs[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(6): 99-106.

real time, which can improve the average drilling rate to above 97% and greatly improve the effective footage. The 865-day drainage and production practice shows that the daily gas production of the LDP-22H multi branch horizontal well has exceeded 150,000 m<sup>3</sup>, the current daily gas production is stable at about 80,000 m<sup>3</sup>, and the total cumulative gas production is 20915469.3 m<sup>3</sup>, achieving ultra-high and stable production, which marks good applicability of the multi branch horizontal well in the efficient development of CBM in low-pressure and low-permeability coal reservoirs. Moreover, it is necessary to optimize the well position, strengthen the drainage and production capacity at the bottom of the horizontal well, stabilize the pressure drop rate, reduce the sensitivity damage to the permeability of the coal reservoir, improve the continuity of drainage and production, reduce pump downtime and the frequency of maintenance operations, and ensure the continuity of production capacity.

**Key words:** multi branch horizontal well; drilling and completion technology; drainage and production practice; coal reservoirs with low pressure and permeability; coal bed methane; Qinshui Basin

## 0 引言

煤层气的有效开发有赖于大幅度提高单井产气量和资源动用率,截至2020年底,全国煤层气累计钻井21217口,其中投产12880口,按投产井数测算,全国2020年煤层气单井日均产气量约1227 m<sup>3</sup>/d,单井日均产量总体达到盈亏平衡点<sup>[1]</sup>。目前多分支水平井和大位移定向井技术逐渐成为开发煤层气的主要手段,煤层气多分支水平井单井产量高,成本回收快,具有直井不能替代的优势和潜力,适合于低渗煤层气的开发。

我国地面煤层气抽采在沁水盆地南部获得了较好的商业化开发效果,但低压低渗煤储层发育,直井产量普遍偏低,部分直井日产量长期处于300 m<sup>3</sup>/d左右,而沁水盆地北部的阳泉、潞安、霍州等矿区直井低产状况也是长期没有得到解决。煤层气多分支水平井技术极大地提高了资源动用率和产能,为低压低渗煤储层煤层气高效开发提供了可能。2004年国内第一口煤层气多分支水平井在晋城矿区大宁井田完成,钻井进尺8018 m,最高日产量达到35000 m<sup>3</sup>,实现地面煤层气抽采工艺和产量的“双突破”<sup>[2]</sup>。之后煤层气水平井技术快速发展,当前煤层气水平井开发研究主要集中在钻完井工艺<sup>[3-7]</sup>、定向射孔技术<sup>[8-9]</sup>、分段压裂和密集多簇压裂技术<sup>[10-14]</sup>、一体化地质导向技术<sup>[15]</sup>以及地质适应性研究<sup>[16-17]</sup>等。

总的来说,煤层气多分支水平井开发的优势主要集中在:(1)极大地增大储层接触面积;(2)“上翘式”井身结构改变储层流动特征,实现“气-水分异流动”;(3)便于现场修井作业<sup>[18-21]</sup>。本次研究以沁水盆地郑庄区块太原组15号煤层多分支水平井LDP-22H(山西兰花煤层气有限公司设计施工)的钻完井

工艺和排采数据为依据,全面介绍低压低渗煤储层煤层气多分支水平井的开发技术和煤层气排采效果,以期为我国类似储层条件下地面煤层气开发提供技术借鉴和指导。

## 1 研究区地质背景

### 1.1 地质构造与含煤地层

郑庄区块主体位于沁水盆地南缘,寺头断层西侧,行政区划主要隶属于山西省沁水县和阳城县,整体为一个由东南向西北倾的斜坡构造,地层较为宽缓,平均倾角约4°;研究区内发育平行、低缓褶皱,呈近南北和北东向展布,褶皱幅度一般较小;区内断层距较大的断层主要有寺头断层、后城腰断层及与之伴生断层,形成一组NE-EW向的弧形断裂带;区内发育一定的陷落柱,基本无岩浆活动<sup>[22]</sup>。LDP-22H位于郑庄区块南部寺头正断层的东侧(见图1)。

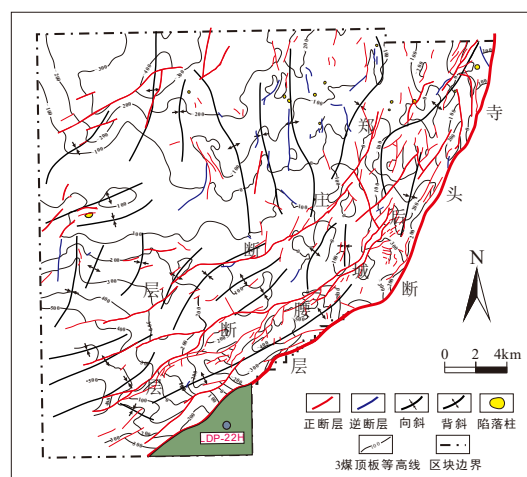


图1 郑庄区块构造纲要<sup>[22]</sup>

Fig.1 Structure profile of Zhengzhuang Block

郑庄区块含煤地层主要包括上石炭统一下二叠统太原组和下二叠统山西组,其中山西组( $P_{1s}$ )厚33~64 m,平均45 m,主要岩性为泥岩、粉砂岩、砂岩及煤层。含煤1~3层,其中3号煤层为全区稳定可采煤层,本组以底部K7砂岩与太原组分界,K7砂岩为灰色中-细粒砂岩,局部相变为粉砂岩。3号煤位于K7砂岩之上,与K7砂岩之间多为黑色泥岩;太原组( $C_{3t}$ )厚64~105 m,平均80 m,主要岩性为石灰岩、砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩及煤层,为典型的海陆交互相沉积组合,其中含灰岩5~6层,含煤11层左右,可采煤层15号煤位于本组下部。

### 1.2 煤层气储层地质特征

15号煤为本文研究的目标煤层,近年来郑庄区块开始大面积在15号煤部署L型水平井。15号煤

在本区块广泛分布且保存完整,在寺头断层西侧埋深较大,埋深主体位于800~1000 m,东侧埋深较浅,一般在500 m以深,地应力梯度为 $1.99 \times 10^{-2}$  MPa/m,地应力较大,煤层总厚度在2.07~6.40 m,平均4.63 m,以碎裂煤为主,煤体结构较差,含气性总体也低于山西组3号煤<sup>[23]</sup>。其中LDP-22H井所处的15号煤层埋深362.00~365.70 m,煤厚在3.6 m左右,含气量在 $15 \text{ m}^3/\text{t}$ 左右,总体含气性较好(见图2)。此外,15号煤层顶板一般为石灰岩、粉砂岩和砂质泥岩,具有弱含水性,渗透性差到中等,底板以泥岩和砂质泥岩为主,含水性也较弱,渗透性差<sup>[24-25]</sup>。试井实测储层平均压力为1.95 MPa,储层压力梯度平均为4.0 kPa/m,属于典型的低压储层。

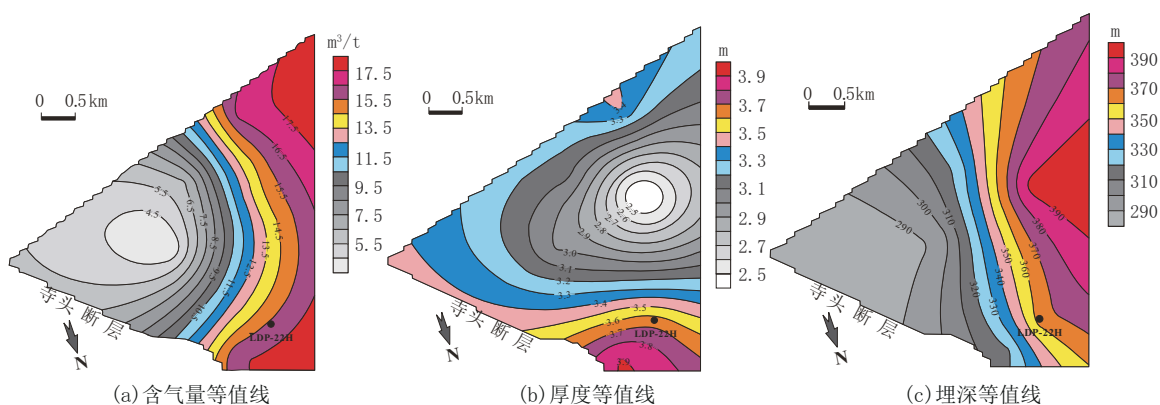


图2 郑庄区块南部15号煤层含气量、煤厚、埋深等值线

Fig.2 Gas content, coal bed thickness and contour lines of burial depth of No.15 coal bed

## 2 15号煤层多分支水平井开发关键技术

### 2.1 水平井钻完井工艺

LDP-22H井施工的煤层为太原组15号煤,需要克服煤层薄,倾角变化反复,煤层不稳定等多方面困难,设计井深1300 m以上,并与LDP-22V垂直井连通,施工多个分支,完成4500 m左右的煤层大进尺完钻,为了能在太原组15号煤层安全高效地钻进,采用了三开井身结构,主体井身结构如图3所示。

一开采用 $\varnothing 311.15 \text{ mm}$ 钻头,钻至井深44.55 m,进尺结束后使用大排量钻井液充分循环,确保井底无沉砂后,起钻下入 $\varnothing 244.48 \text{ mm}$ 表层套管,固井水泥浆返出地面,憋压候凝;

二开采用 $\varnothing 215.90 \text{ mm}$ 钻头,钻进井段44.55~510 m,并于井深107 m时开始定向造斜钻进,钻进

结束后下入 $\varnothing 168.28 \text{ mm}$ 技术套管,下入深度为509.06 m,此过程严格遵守每下5~10根套管灌浆原则,防止套管内空和套管环空挤压套管变形,固井水泥预返至370 m,敞压候凝;

三开采用 $\varnothing 130.18 \text{ mm}$ 钻头钻进煤层水平段,钻进井段510~5110 m,钻水泥塞结束后开始连通钻进,连通钻进至570.70 m连通成功,连通成功起钻甩强磁接头继续各分支钻进。此外该工程LDP-22H水平井主支采用 $\varnothing 110 \text{ mm}$  PE筛管,下入井深1081 m进行筛管完井,分支采用裸眼完井,而LDP-22V垂直井采用割缝衬管完井。

钻井采用T200XD型号钻机,补心高2 m,钻井周期36.46 d,完井周期37.33 d,建井周期41.96 d,钻进过程中,一开采用聚晶金刚石复合片(PDC)钻头,钻速为6.36 m/h,钻压为10 kN;二开采用PDC、

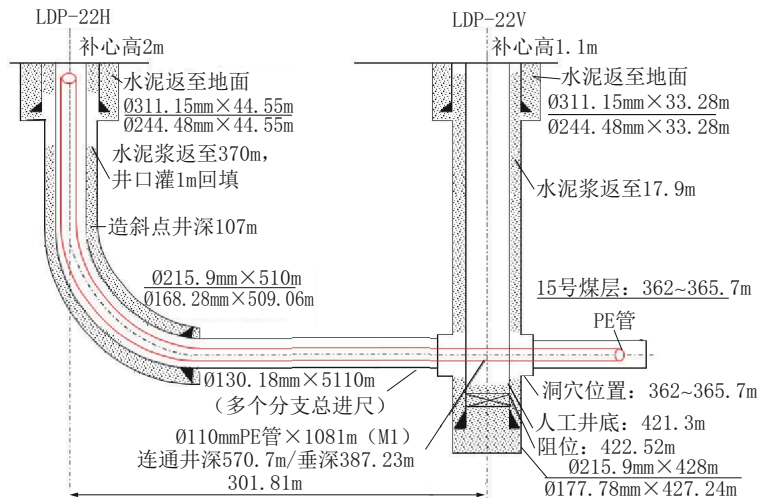


图3 LDP-22H井井身结构示意图

Fig.3 Structure of LDP-22H well

三牙轮钻头,钻速由浅至深分别为6.93、3.60、2.12 m/h,钻压依次为40、80和80 kN;三开水平段采用PDC钻头,钻速显著提高,为16.91 m/h,钻压为20 kN。全井有效总进尺5110 m,有效煤层总进尺4586 m,纯煤进尺4493 m,钻遇率97.97%。

## 2.2 地质录井与标志层判定

地质录井的目的是在钻井过程中获取各项反映地下地质情况的原始资料和数据,为煤层气地质评价和工程施工提供第一手资料,是贯穿煤层气勘探开发全过程中的一项重要技术。依据钻井程序,二开开始常规录井工作,三开井段只要求岩屑样观察录井,在录井过程中对工程参数等连续进行了测量,主要录井项目包括岩屑录井(44.55~230 m井段为4 m/包;230~510 m井段为1~2 m/包)、钻时录井(1 m/点)、钻井液录井(12 h/次)以及钻井液槽面观察。其中,岩屑录井是标志层判定的最主要手段,标志层是划分和对比地层的重要依据,同时也是预测下部地层及三开着陆点的重要参数,因此在上部地层录井过程中为了卡准各标志层和15号煤层,需要加强岩屑录井。同时针对15号煤层厚度薄、横向厚度变化大的特点,在预计进入标志层前需要加密岩屑录井间距,准确地卡准本井的区域性标志层,如上石盒子组底界灰色细砂岩、下石盒子组底界灰色细砂岩、山西组底界灰色细砂岩等,经录井分析各标志层特征同区域地层岩性特征基本一致,本井地层层序正常,钻遇地层自上而下依次为第四系(Q)、二叠系上统上石盒子组( $P_2s$ )、下统下石盒子组( $P_1x$ )、山

西组( $P_1s$ )、石炭系上统太原组( $C_3t$ 未穿)。各地层岩性组合特征见表1。

## 2.3 钻井液、钻具组合优选及其井眼轨迹控制

沁水盆地煤储层往往具有低压、低渗透、低饱和度和高吸附的特点,煤体结构疏松,钻进和排采时孔壁容易发生垮塌,尤其在水平段大进尺的情况下,容易形成岩屑床,造成起下钻阻卡,因此钻井液的选择尤为重要。一开采用膨润土钻井液,使用土粉、HV-CMC、纯碱配制而成,经过充分水化,密度为1.04 g/cm<sup>3</sup>。二开定向要求造斜率高,为了满足钻井和井下安全的需要,钻井液要求保证润滑性能和携砂效果良好,以确保井壁稳定和提高钻速,因而采用聚合物钻井液,密度为1.03 g/cm<sup>3</sup>。在整个施工过程中钻井液保持低密度固相,增强了护壁性、防渗漏、防塌;定向段随着井斜和位移不断增加,钻具在井筒内的摩阻及扭矩随之增加,要求钻井液具有良好的润滑性能,需较小的失水、含砂量,为此加入HV-CMC等提高钻井液的润滑、防卡性能,同时加入防塌剂、润滑剂改善、提高泥饼质量,这样既能巩固井壁又能减小摩阻,防止产生托压现象,充分实现了钻井施工设计中所要求的造斜后全面实施减阻防卡措施的要求。三开采用清水钻井液,密度为1.01 g/cm<sup>3</sup>,保证携岩能力,施工过程严格控制钻井液的固相含量,保持钻井液性能符合设计要求。

15号煤层厚度薄,煤层跟踪控制难度大,为了提高钻进速度,缩短钻井周期,全井总体采用“PDC钻头+螺杆”钻具组合。在偏心连通验证后,起钻甩RMRS

表1 LDP-22H井钻遇地层岩性特征

Table 1 Lithology of strata drilled by LDP-22H well

地 层				井深/ m	视厚/ m	垂深/ m	垂厚/ m	岩性特征
新生界	第四系(Q)	/	/	31.00	29.00	31.00	29.00	土黄色砂质粘土、砂砾。与下伏上石盒子组呈角度不整合接触
古生界	二叠系	上	上石盒子组(P <sub>2s</sub> )	206.00	175.00	203.97	172.97	中-厚层状灰、浅黄、灰褐、灰黄色泥岩、粉砂质泥岩与浅灰、灰、紫红色中砂岩、细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩呈略等厚互层,底部为灰色细砂岩。与下伏下石盒子组呈整合接触
		下	下石盒子组(P <sub>1x</sub> )	268.00	62.00	259.34	55.37	以灰色泥岩、粉砂质泥岩为主,夹灰色泥质粉砂岩,底部为灰色细砂岩。与下伏山西组地层呈整合接触
		山西组(P <sub>1s</sub> )	310.00	42.00	293.18	33.84	以灰、深灰色泥岩、粉砂质泥岩为主,夹灰、深灰色泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂岩及黑色煤层,3号煤为组主要煤层	
	石炭系	上太原组(C <sub>3t</sub> )	1202.00 (M1主支井深)	892.00 (未穿)	388.80 (各分支垂深最深处)	25.62 (未穿)	以黑色泥岩、灰、深灰色砂岩、粉砂岩、灰岩为主,夹灰、深灰色泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、砂质泥岩及黑色煤(线)层,15号煤为本井主要目的煤层	

接头,组合导向钻具下钻,进入主井眼及分支井眼施工,钻具组合为:Ø130.18 mm PDC 钻头×0.22 m+Ø101 mm 螺杆(1.5°)×4.36 m+Ø101 mm 浮阀×0.53 m+Ø101 mm UBHO(通用井底定向接头)×0.88 m+Ø101 mm NMDC(非磁性钻铤)×6.33 m+Ø101 mm

GAP×1.18 m+Ø101 mm NMDC×4.20 m+Ø101 mm NMDC×2.10 m+SLH90×210 接头×0.30 m+Ø73 mm DP(钻杆)×9.64 m+Ø101.6 mm DP×1167.39 m+方入。具体不同井段钻井液与钻头类型组合见表2。

表2 不同井段钻井液与钻头类型组合

Table 2 Drilling fluid and bit type combination in different well section

井 段/m	钻井液类型	钻井液密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	钻井液粘度/s	钻头直径/mm	钻头类型
0.00~44.55	膨润土	1.04	35	311.15	PDC
44.55~314.00	聚合物	1.03	40	215.90	PDC、三牙轮
314.00~510.00	聚合物	1.03	45	215.90	三牙轮、PDC
510.00~5110.00	清水	1.01	26	130.18	PDC

LDP-22H井口距LDP-22V井洞穴靶点水平位移301.81 m,方位196.45°。LDP-22H井于井深524 m、垂深384.50 m着陆(进入15号煤层),于井深570.70 m、垂深387.23 m与LDP-22V井洞穴连通。LDP-22H井主井眼及其分支井眼分布情况如图4所示,共完成主井眼及分支井眼11支。其中L1分支进尺最大,为724 m;主支井眼M1进尺最小,为223 m;L6(L4)分支结束井深最大,为1321 m(见表3)。

较高的煤层钻遇率得益于精准度较高的测井实

时数据和地层岩性辨识,从地层结构来看,15号煤层位于太原组下段,总体为半亮型煤,原生结构情况较好,底板为较厚的泥岩层(约3.40 m),顶板薄泥岩层(约0.65 m)与深灰色厚层灰岩(约11 m)相接。由图5中LDP-22V井15号煤层测井曲线可见,煤层与顶底板泥岩层的测井响应特征有明显的不同,由于煤层中铀、钍、钾等天然放射性物质含量很低,表现出较低的自然伽马值(GR);再者煤主要是由碳、氢、氧3种元素组成的碳氢高分子化合物,具有

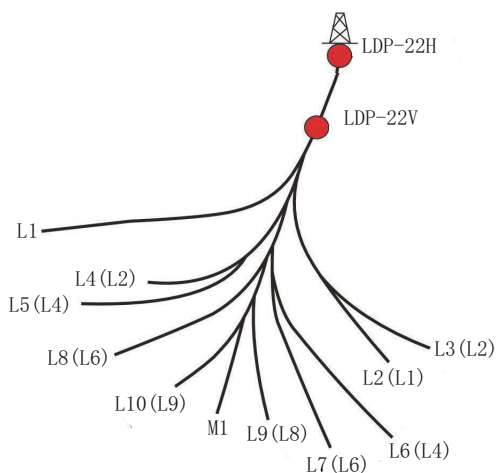


图4 LDP-22H井主井眼及其分支井眼分布示意  
Fig.4 Distribution of main borehole and branch boreholes of LDP-22H well

表3 LDP-22H井煤层钻遇情况统计  
Table 3 Coal beds drilled by LDP-22H well

分支井眼编号	起始井深/m	结束井深/m	分支进尺/m	分进尺(有效煤层进尺/纯煤进尺)/m	钻遇率/%
L1	510	1234	724	710/710	100.00
L2(L1)	621	1129	508	508/465	91.54
L3(L2)	922	1178	256	256/256	100.00
L4(L2)	678	1102	424	424/414	97.64
L5(L4)	866	1255	389	389/389	100.00
L6(L4)	744	1321	577	577/557	96.53
L7(L6)	866	1280	414	414/404	97.58
L8(L6)	800	1251	451	451/441	97.78
L9(L8)	857	1207	350	350/350	100.00
L10(L9)	923	1207	284	284/284	100.00
M1	979	1202	223	223/223	100.00
合计			4600	4586/4493	97.97

较低的基质密度,总体密度(DEN)也比较小,但对于泥页岩和砂岩,煤层的电阻率(RD,深侧向)显示高值,井径(CAL)方面由于煤层原生结构较好,相对于泥岩层变化不大(见图5)。

此外,LDP-22H井在 $\varnothing 130.18$  mm水平井眼的钻进中使用了定向螺杆和EM实时数据记录。在钻进过程中,仪器测量的原始信号、钻井参数和伽玛曲线的实时数据从井下传送到地面接收器,并且所有记录的实时数据被输入给随钻地质导向程序,通过该程序,这些实时数据记录与已钻模型对比分析,并不断修正对构造变化的认识,并通过对构造认识的

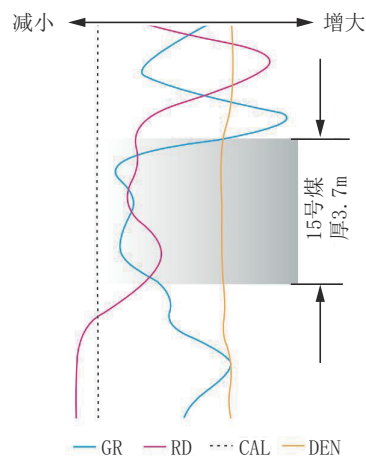


图5 LDP-22V井15号煤层测井曲线  
Fig.5 Logging curves of No.15 coal bed of LDP-22V well

不断修正,设计钻头将要走的轨迹路线。

### 3 排采实践

LDP-22V抽排直井于2019年7月15日投产,最新的排采数据截止到2021年11月25日,总共排采生产865 d(含修井、检泵作业),采用螺杆泵进行排采,前期排采产水量较高,一度达到 $137.09 \text{ m}^3/\text{d}$ ,短暂高峰后快速衰减,第400 d后衰减至零,476~649 d产水量在 $10 \text{ m}^3/\text{d}$ ,之后又迅速衰减至零,累计产水量 $13490.04 \text{ m}^3$ 。2019年12月27日(第166 d)开始产气,产气第1天仅为 $500 \text{ m}^3/\text{d}$ ,第3天就达到 $2568 \text{ m}^3/\text{d}$ ,之后迅速攀升,第243 d产气量突破 $10000 \text{ m}^3/\text{d}$ ,截止修井作业前(第792 d之前),已经稳产高产1年半的时间(550 d),该阶段产气最高峰为 $35069 \text{ m}^3/\text{d}$ ,此时的套压在 $0.933 \text{ MPa}$ ,井底流压为 $1.025 \text{ MPa}$ ;修井作业后(第794 d之后),气量突然增大,超过流量计最大估算值,日产气量最高峰达到 $156640 \text{ m}^3/\text{d}$ ,半个月的短暂高产,日产气量稳定在 $80000 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右,此时的套压在 $0.7 \text{ MPa}$ 左右,井底流压在 $0.8 \text{ MPa}$ 左右,全程累计产气量为 $20915469.3 \text{ m}^3$ (图6)。日产气量突破15万 $\text{m}^3$ ,这标志着多分支水平井在低压低渗煤储层煤层气高效开发关键技术上取得了重大进展。

值得关注的是,LDP-22H多分支水平井由于“上翘式”井身结构,在重力作用下使得气、水分异,前期排水量较大,上产慢,但见气后产量迅速攀升。但该井排采前期产水量过大、煤粉增多问题严重,排采过程频繁出现检泵停产事件,从而影响排采的连

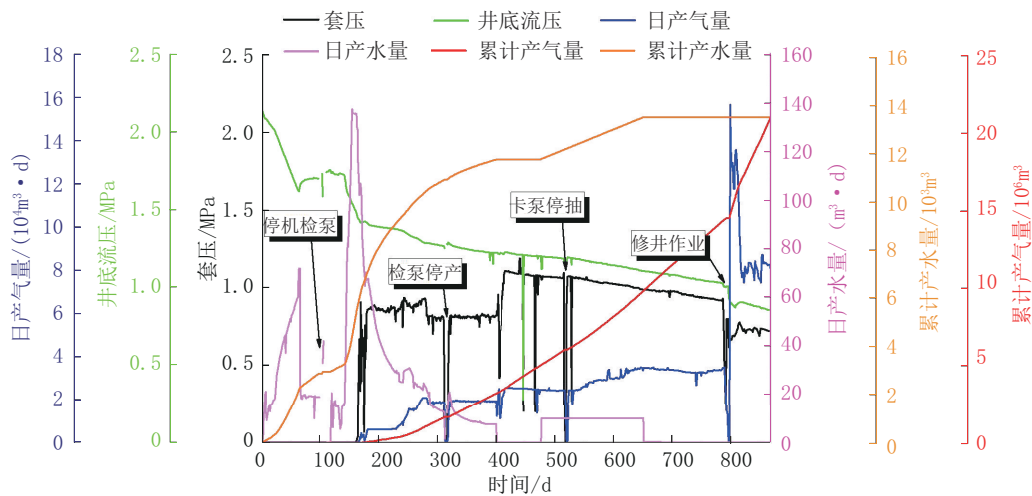


图6 LDP-22V井排采曲线

Fig.6 Drainage and production curves of LDP-22V well

续性,多次停排事件也会对储层压力进行频繁扰动,破坏储层降压的连续性,影响产能恢复。此外,排采早期压降不稳,陡升陡降,容易引起煤储层应力敏感性变化,对煤储层渗透率造成伤害,进而影响压降漏斗扩展和气、水产出效果。

#### 4 结论

(1)多分支水平井三开井身结构有助于克服煤层薄,煤层不稳定的问题,另外由于水平井与煤层接触面积大,滤失量也大,钻井液要保持低密度固相,增强防渗漏性能,同时要保证携岩和润滑防卡能力。LDP-22H水平井采用了钻井-录井-测井一体化地质导向技术,可以准确卡准目的煤层,同时实时修正钻头轨迹路线,极大地提高了煤层钻遇率和煤层有效进尺。

(2)优化水平井井位,加强低部位水平井前期排采强度,降低停泵和检修作业频次,有效提高排采连续性,稳定压降速率,减弱煤储层的压敏、速敏以及贾敏效应,减少对煤储层渗透率的伤害,实现高产稳产。

(3)LDP-22H水平井实现了沁水盆地太原组低压低渗煤储层超高产开发的突破,日产气量最高峰达到 $15 \text{万 m}^3$ 以上,为相似储层条件的煤层气水平井高效开发提供了先导试验和参考样板,值得进一步研究和推广。

#### 参考文献(References):

[1] 秦勇,申建,史锐.中国煤系气大产业建设战略价值与战略选择

[J].煤炭学报,2022,47(1):371-387.

QIN Yong, SHEN Jian, SHI Rui. Strategic value and choice on construction of large CMG industry in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022,47(1):371-387.

[2] 饶孟余,杨陆武,张遂安,等.煤层气多分支水平井钻井关键技术研究[J].天然气工业,2007,27(7):52-55.

RAO Mengyu, YANG Luwu, ZAHNG Suian, et al. Research on key technologies for drilling multi branch horizontal wells in coalbed methane[J]. Natural Gas Industry, 2007,27(7):52-55.

[3] 刘立军,陈必武,李宗源,等.华北油田煤层气水平井钻完井方式优化与应用[J].煤炭工程,2019,51(10):77-81.

LIU Lijun, CHEN Biwu, LI Zongyuan, et al. Optimization of drilling and completion methods for horizontal wells of coalbed methane in Huabei Oilfield[J]. Coal Engineering, 2019,51(10):77-81.

[4] 李伯尧,王洪亮,印中华,等.织金煤层气浅层大位移水平井钻完井技术[J].石油钻采工艺,2019,41(4):430-434.

LI Boyao, WANG Hongliang, YIN Zhonghua, et al. Drilling and completion technologies for extended-reach shallow CBM wells in Zhijin[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(4):430-434.

[5] 赵凌云,易同生.煤层气水平井井型结构分析及钻完井技术优化[J].煤炭科学技术,2020,48(3):221-226.

ZHAO Lingyun, YI Tongsheng, et al. Analysis on well type structure and optimization of associated drilling technology of CBM horizontal wells[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(3):221-226.

[6] 曹小军.复杂工况下顺煤层空气定向钻进应用研究[J].钻探工程,2023,50(2):150-154.

CAO Xiaojun. Research on application of in-seam air directional drilling under complex working conditions[J]. Drilling Engineering, 2023,50(2):150-154.

[7] 郝登峰,徐影,郭增付.煤矿水害治理多分支水平井精准定向技术研究[J].钻探工程,2023,50(1):125-132.

HAO Dengfeng, XU Ying, GUO Zengfu. Research on precise directional drilling technology for multi-branch horizontal wells in coal mine water hazard control[J]. Drilling Engineering, 2023,

- 50(1):125-132.
- [8] 张群,葛春贵,李伟,等.碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂煤层气高效抽采模式[J].煤炭学报,2018,43(1):150-159.  
ZHANG Qun, GE Chungui, LI Wei, et al. A new model and application of coalbed methane high efficiency production from broken soft and low permeable coal seam by roof strata-in horizontal well and staged hydraulic fracture [J]. Journal of China Coal Society, 2018,43(1):150-159.
- [9] 闫晓伦.煤层气水平井定向射孔数值模拟研究[D].北京:中国石油大学,2018.  
YAN Xiaolun. Numerical simulation of directional perforation of coalbed methane horizontal Wells[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2018.
- [10] 张永成,赵祉友.松软低渗煤层煤层气水平井小型压裂测试技术应用[J].煤炭工程,2017,49(9):130-133.  
ZHANG Yongcheng, ZHAO Zhiyou. Application research on mini-frac test in soft and low permeability coal seam in horizontal well[J]. Coal Engineering, 2017,49(9):130-133.
- [11] 许耀波,郭盛强.软硬煤复合的煤层气水平井分段压裂技术及应用[J].煤炭学报,2019,44(4):1169-1177.  
XU Yaobo, GUO Shengqiang. Technology and application of staged fracturing in coalbed methane horizontal well of soft and hard coal composite coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2019,44(4):1169-1177.
- [12] 许耀波.应力干扰下煤层顶板水平井穿层分段压裂规律[J].煤田地质与勘探,2020,48(4):11-18.  
XU Yaobo. Layer-penetrating staged fracturing law of horizontal wells within roof of coal seams under stress interference[J]. Coal Geology & Exploration, 2020,48(4):11-18.
- [13] 姜在炳,李浩哲,方良才,等.紧邻碎软煤层顶板水平井分段穿层压裂缝延展机理[J].煤炭学报,2020,45(S2):922-931.  
JIANG Zaibing, LI Haozhe, FANG Liangcai, et al. Fracture propagation mechanism of staged through-layer fracturing for horizontal well in roof adjacent to broken-soft coal seams [J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(S2):922-931.
- [14] 曹运兴,石玢,田林,等.低渗低压煤层水平井密集多簇压裂高效开发技术及应用[J].煤炭学报,2020,45(10):3512-3521.  
CAO Yunxing, SHI Bin, TIAN Lin, et al. Development and application of dense multi-cluster fracturing in horizontal wells for low permeability and low pressure coal reservoir [J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(10):3512-3521.
- [15] 申鹏磊,白建平,李贵山,等.深部煤层气水平井测-定-录一体化地质导向技术[J].煤炭学报,2020,45(7):2491-2499.  
SHEN Penglei, BAI Jianping, LI Guishan, et al. Integrated geo-steering technology of logging and orientation in deep coalbed methane horizontal well [J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(7):2491-2499.
- [16] 涂志民,张亮,吕娜,等.韩城矿区煤层气L型水平井套管钻井技术[J].石油钻采工艺,2019,41(4):424-429.  
TU Zhimin, ZHANG Liang, LÜ Na, et al. Casing drilling for L-shaped CBM horizontal wells in Hancheng Mining Area [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019,41(4):424-429.
- [17] 胡秋嘉,李梦溪,贾慧敏,等.沁水盆地南部高煤阶煤层气水平井地质适应性探讨[J].煤炭学报,2019,44(4):1178-1187.  
HU Qiujia, LI Mengxi, JIA Huimin, et al. Discussion of the geological adaptability of coal-bed methane horizontal wells of high-rank coal formation in southern Qinshui Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2019,44(4):1178-1187.
- [18] 傅雪海,秦勇,韦重韬,等.QNDN1井煤层气排采的流体效应分析[J].天然气工业,2010,30(6):48-51.  
FU Xuehai, QIN Yong, WEI Chongtao, et al. Fluid effect analysis of coalbed methane drainage and production in Well QNDN1 [J]. Natural Gas Industry, 2010,30(6):48-51.
- [19] 曹小军.复杂工况下顺煤层空气定向钻进应用研究[J].钻探工程,2023,50(2):151-155.  
CAO Xiaojun. Research on application of in-seam air directional drilling under complex working conditions [J]. Drilling Engineering, 2023,50(2):151-155.
- [20] 张晓昂,刘国卫,齐治虎,等.河南省煤层气钻井技术发展历程及展望[J].钻探工程,2022,49(5):86-93.  
ZHANG Xiao'ang, LIU Guowei, QI Zhihu, et al. Development and prospect of coalbed methane drilling technology in Henan province [J]. Drilling Engineering, 2022,49(5):86-93.
- [21] 吕玉民,柳迎红,陈桂华,等.沁水盆地南部煤层气水平井产能影响因素分析[J].煤炭科学技术,2020,48(10):225-232.  
LÜ Yumin, LIU Yinghong, CHEN Guihua, et al. Analysis of factors affecting productivity of CBM in horizontal wells in southern Qinshui Basin [J]. Coal Science and Technology, 2020,48(10):225-232.
- [22] 张晓阳.郑庄区块煤层气直井定量排采制度优化模型[D].徐州:中国矿业大学,2018.  
ZHANG Xiaoyang. Optimization model of quantitative discharge and production system of coalbed methane vertical Wells in Zhengzhuang block [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [23] 张强.沁水盆地郑庄区块15#煤L型水平井钻完井关键技术[J].煤炭工程,2021,53(11):61-66.  
ZHANG Qiang. Key technologies for drilling and completion of No. 15 coal L-shaped horizontal well in Zhengzhuang Block, Qinshui Basin [J]. Coal Engineering, 2021,53(11):61-66.
- [24] 赵贤正,杨延辉,孙粉锦,等.沁水盆地南部高阶煤层气成藏规律与勘探开发技术[J].石油勘探与开发,2016,43(2):303-309.  
ZHAO Xianzheng, YANG Yanhui, SUN Fenjin, et al. Enrichment mechanism and exploration and development technologies of high rank coalbed methane in south Qinshui Basin, Shanxi Province [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016,43(2):303-309.
- [25] 冯树仁,张聪,张建国,等.沁水盆地南部郑庄区块高煤阶煤层气成藏模式[J].天然气地球科学,2021,32(1):136-144.  
FENG Shuren, ZHANG Cong, ZHANG Jianguo, et al. Model of high rank coalbed methane in Zhengzhuang block in the southern Qinshui Basin, China [J]. Natural Gas Geoscience, 2021,32(1):136-144.

(编辑 王文)