

文章编号: 1001-1986(2005)06-0034-04

# 多分支水平井在煤层气开发中的应用机理分析

鲜保安<sup>1,2</sup>, 高德利<sup>1</sup>, 王一兵<sup>2</sup>, 王宪花<sup>2</sup>, 李安启<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学, 北京 102249; 2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007)

**摘要:** 应用多分支水平井开发煤层气资源, 受到煤层地质条件和分支井眼几何形态等主控因素的制约, 只有将二者有机结合并进行井身结构优化, 才能发挥多分支水平井的效率。多分支水平井增产机理在于能够有效沟通煤层割理和裂缝系统, 增加各分支井眼的波及面积和泄气面积, 降低裂隙内气液两相流的流动阻力, 加速流体的排出, 提高单井产量和采出程度。通过对沁水煤层气田的数值模拟与经济评价可知, 用多分支水平井开发煤层气具有明显的经济效益优势。

**关键词:** 煤层气; 多分支水平井; 开发; 主控因素; 增产机理; 沁水煤层气田

中图分类号: P618.11 文献标识码: A

## Analysis on applied mechanism of multiple laterals horizontal well in developing coalbed methane

XIAN Bao-an<sup>1,2</sup>, GAO De-li<sup>1</sup>, WANG Yi-bing<sup>2</sup>, WANG Xian-hua<sup>2</sup>, LI An-qi<sup>2</sup>

(1. China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang 065007, China)

**Abstract:** It is restricted by geologic setting of coal bed formation and geometric configuration of borehole to utilize multiple laterals horizontal well (MLHW) to develop coal bed methane (CBM) resources. Good efficiency can be obtained if only the two aspects above are considered comprehensively and the hole structure is optimized. Mechanisms of MLHW consist in effectively communicating cleats and fracture system, increasing area of multiple laterals well bore spreading and gas drainage, decreasing resistance of two phases flow in fractures, accelerating discharging speed of liquid and enhancing production and recovery percent of reserves. By numerical simulation and economic evaluation for Qinshui CBM Field, it can be derived that MLHW obviously has a superiority of economic benefit in developing CBM.

**Key words:** coalbed methane (CBM); multiple laterals horizontal well (MLHW); development; main control factors; increasing production mechanism; Qinshui CBM Field

## 1 引言

多分支井技术是在定向井、大位移井和水平井技术基础上, 迅速发展起来的一项石油开采技术, 它可以大大提高油藏的采收率, 降低油藏开采综合成本,

经济效益十分显著, 应用前景十分广泛, 是21世纪油气田开发的主体工艺技术之一。只要将多分支水平井与煤层特点有机结合起来, 其同样能作为低渗透储层煤层气的高效开发技术<sup>[1]</sup>。开发煤层气的多分支水平井与低渗透油藏的最大区别在于, 煤层多分支水

收稿日期: 2005-01-10

基金项目: 国家重大基础研究项目(973项目)子课题“煤层气经济开采增产机理研究”(编号: 2002CD211709)资助  
作者简介: 鲜保安(1966—), 男, 陕西户县人, 石油大学(北京)在读博士, 从事石油、天然气、煤层气钻井完井研究。

- [2] 张新民, 庄军, 张遂安等. 中国煤层气地质与资源评价[ M]. 北京: 科学出版社, 2002. 32—38.
- [3] 孙茂远, 黄盛初等. 煤层气开发利用手册[ M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998. 67—85.
- [4] 我国煤层气富集成藏规律与勘探开发有利地区优选[ A]. 国家“十五”重点攻关项目技术报告[ R]. 西安: 煤炭科学总院西安分院, 2003. 27—36.
- [5] SY/T 6129—1995. 岩石中烃类气体扩散系数测定[ S]. 中国石油天然气总公司.
- [6] 李小彦, 解光新. 煤储层吸附时间特征及影响因素[ J]. 天然气地球科学, 2003, 14(6): 502—505.
- [7] 杨其奎, 王佑安. 煤屑瓦斯扩散理论及其应用[ J]. 煤炭学报, 1986, (3): 87—93.
- [8] Crank J. The Mathematics of Diffusion[ M]. London: Oxford University Press, 1975.
- [9] Clarkson C R, R M Deuston. The effect of pore structure and gas pressure upon the transport properties of coal: a laboratory and modeling study[ J]. FUEL 78 (1999) 1345—1362.
- [10] Peter J Hall K, Mark T, Harry M. The relation between coal macromolecular structure and solvent diffusion mechanisms[ J]. FUEL 71 (1992) 1271—1275.

平井要追求更长的水平位移和更多的分支数。

## 2 多分支水平井类型

多分支井水平井按水平段几何形态可分为:集束分支水平井、径向分支水平井、反向分支水平井、叠状分支水平井和羽状分支水平井(图1)。集束分支水平井是在一垂直井段钻多个辐射状分支井眼;径向分支水平井是在一垂直段钻出多个超短半径分支井眼;反向分支水平井,即一个分支井眼下倾,另一个分支井眼上倾,并且井眼方向相反;叠状分支井,用于开采两个不同产层或在一个低渗透阻挡层之上或之下开采油气;羽状分支水平井,即在一主水平段两侧钻出多个分支井眼。

## 3 影响煤层气多分支水平井产能的主控因素

多分支水平井能够大幅度提高煤层气单井产量,但其影响因素也较多,要分析具体的影响因素还要从分支水平井的产量函数入手<sup>[2]</sup>。煤层水平方向的渗透率存在着各向异性,对煤层气井的产能有较大影响。煤层气分支井产量模型也属于多目标函数,其与煤层地质条件及分支井眼几何结构密切相关。根据煤层的物理特性,煤层气多分支水平井产能主要受以下与工程有关的因素控制。

### 3.1 煤层厚度

煤层厚度对煤层气井的产量影响较大。煤层厚度增加,煤层气产量会有所增加,但薄煤层的气产量提高的幅度更大。

### 3.2 分支水平井的井筒长度

根据产能模拟结果,分支水平井产量随井筒长度增加而增加。从图2可见,当水平段长度较短时,产量增加幅度越来越大;当分支水平段长度增长到一定程度,产量增加幅度并没有明显的变化,即并不是分支水平井长度越长越好,具体的合理长度需要优化。

### 3.3 水平分支数

水平井筒长度一定时,增加水平井井筒数,可以

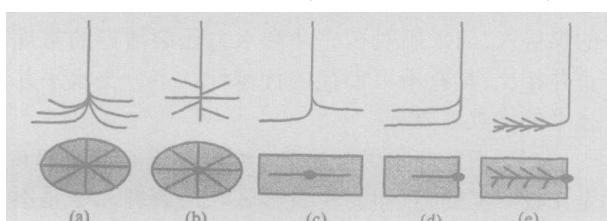


图1 多分支水平井分类图

Fig. 1 Classification chart of multiple lateral horizontal wells  
a—集束分支水平井; b—径向分支水平井; c—反向分支水平井; d—叠状分支水平井; e—羽状分支水平井

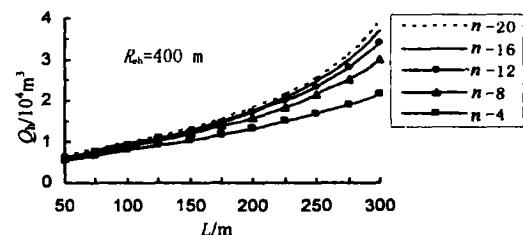


图2 供给半径  $R_{ch}=400\text{ m}$  时分支井产量与分支段长关系曲线

Fig. 2 Relation curve of lateral well's production and length (drainage radius=400 m )

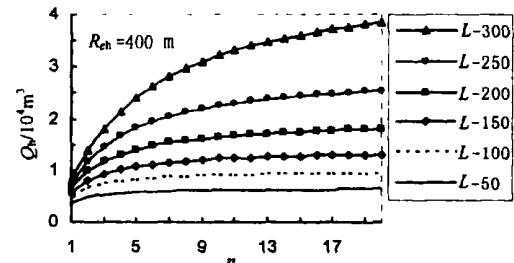


图3 供给半径  $R_{ch}=400\text{ m}$  时分支井产量与分支数关系曲线

Fig. 3 Relation curve of lateral well's production and quantity (drainage radius=400 m )

提高产量。但从图3可见,当水平分支数较少时,产量随分支数增加其产量大幅度增加;当井筒数增加到一定程度,产量的增加幅度逐渐减小。另外,随着分支数的大幅度增加,钻井成本必然大幅度增加。由此可见,并不是井筒数越多越好,井筒数也存在一个经济合理值。

### 3.4 煤层的非均质性

煤层的非均质性因素包括煤层渗透率、深度、厚度、含气量及饱和度的区域性差异。煤层的各向异性对煤层气井的产能有一定影响,并且,当井筒数减少时,煤层非均质性的影响会更大。另外,煤层中的泥岩夹层和断层是钻多分支水平井的最大障碍。

### 3.5 水平段位置

水平段在煤层中的位置对水平井产能有一定的影响,并且井筒数较少时,水平段位置对产能影响会更大。

### 3.6 分支水平井眼的方向

根据水平井渗流机理,各向异性气藏中,水平井筒与最大渗透率方向的夹角越大,水平井产能指数越大,所以水平井眼应垂直于综合渗透率方向( $K$ ),见图4。综合渗透率是指最大与最小水平渗透率的矢量叠加。如 $K_H$ 为最大水平渗透率; $K_h$ 为最小水平渗透率; $K$ 为最大和最小水平渗透率的矢量和; $W$ 为分支水平井眼长度; $\alpha$ 为综合渗透率与最大渗透率方向的夹角; $\beta$ 为分支水平井眼与最大水平渗透率方向夹角,则:

$$K = K_H + KK_h,$$

$$\vec{W} \perp K,$$

$$\alpha + \beta = \pi.$$

经过计算分析, 采用综合渗透率模拟的产能比采用最大水平渗透率模拟产能高出 11.8%, 从而证实, 采用综合渗透率是合理的。

### 3.7 面割理方向对产能的影响

裂缝方向对水平油井产能的影响主要取决于裂缝与水平井方向<sup>[3]</sup>。对于面割理和端割理不明显的煤层, 水平段的走向对水平井的开采效果和产能影响不大, 但对于面割理渗透率远高于端割理的煤层来说, 沿着高渗方向钻水平井是非常不利的。其结果, 第一, 沿高渗方向钻井, 即平行面割理方向钻水平井, 其结果导致水平井对面割理的钻遇率降低; 第二, 沿高渗方向钻水平井, 井眼波及面积小, 既不利于水平井产能的发挥, 也降低了采收率。相反, 沿低渗方向钻水平井, 有利于水平井最大限度地贯穿面割理, 沟通更多的渗透率较高的面割理(图 5), 这就大大提高了水平井的波及程度和采收率。因此, 单一水平井眼应垂直于面割理方向。

## 4 多分支水平井增产机理及主要优点

多分支水平井钻井完井技术是一项高效煤层气开发技术, 它是集钻井、完井与增产技术于一体的新型开发技术<sup>[4]</sup>。多分支水平井技术特别适合于开采低渗透储层的煤层气, 是低渗透储层煤层气开采技术的一次革命性进展。与采用射孔完井和水力压裂增产的常规直井相比, 多分支水平井具有得天独厚的优越性, 能够最大限度地沟通煤层割理(微裂隙)和裂缝系统, 增加井眼在煤层中的波及面积, 降低煤层裂隙内气液两相流的流动阻力, 大幅度提高单井产量, 减少钻井数量。与常规直井相比, 在开发低渗透储层煤层气资源时, 多分支井具有单井产量高、采出程度高、经济效益高的优势。

### 4.1 多分支水平井的增产机理

#### 4.1.1 增大解吸波及面积, 沟通更多割理和裂隙

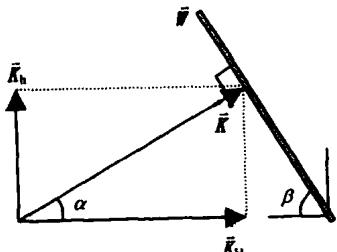


图 4 非均质煤层水平井眼走向图

Fig. 4 Trend of horizontal bore-hole in anisotropic coal bed

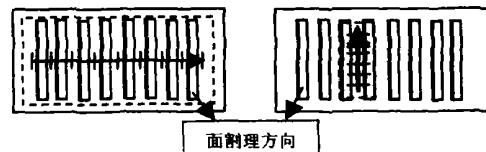


图 5 水平井沿不同渗透率方向钻井的波及面积对比

Fig. 5 Ratio of influence area of horizontal well in different permeability direction

多分支水平井突破了以往微小面积排水降压和裂缝内流体阻力大的束缚, 通过多分支井眼进行了大面积的网状沟通, 完全沟通了裂缝与割理系统(图 6), 使煤层内气体的解吸波及范围大大提高。

#### 4.1.2 降低区域内流体的流动阻力

分支水平井的地层水渗流阻力可按下面公式计算, 这里仅比较单一水平井和单一割理的渗流阻力。

$$R = \frac{\mu}{2\pi kh} \left| \ln \frac{4^{1/h} r_e}{L} + \frac{h}{nL} \ln \frac{h}{2\pi r_w} \right|$$

式中  $R$  为渗流阻力(MPa);  $L$  为分支水平井长度(m);  $k$  为地层渗透率( $10^{-3} \mu \text{m}^2$ );  $h$  为煤层厚度(m);  $\mu$  为流体粘度(MPa·s);  $r_e$  为供给半径(m);  $r_w$  为井筒半径(m);  $n$  为分支水平井井筒数。

计算割理阻力可将井筒半径换成割理半径, 当水平井段长为 100 m, 井眼直径取 152 mm, 割理简化成 1.5 mm 的圆孔时, 经计算比较, 地层水在割理中的摩阻, 比在分支水平井的摩阻高出 3 倍以上。可见, 分支水平井能够明显地降低流体在煤层中的摩阻。

#### 4.1.3 原始微裂纹的扩展

由于钻井和试采过程中抽吸压力和激动压力的存在, 导致水平井眼附近应力场发生变化, 诱导了井眼附近原始微裂纹的扩张与扩展。另外, 当煤层在试采降压后, 部分煤层水和游离气排出, 煤层基岩颗粒会有不同程度的收缩, 也促进了原始裂纹的扩张与扩展, 这样煤层的导流能力和产量会大大提高。原始裂纹的扩展程度取决于煤岩断裂韧性<sup>[5]</sup> 和井内压力激动的幅度与频率。

### 4.2 多分支水平井的主要优点

多分支水平井技术特别适合于开采低渗透储层的煤层气, 与采用射孔完井和水力压裂增产的常规直井相比, 具有不可替代的优越性。多分支水平井技术的优点主要有:

a. 增加有效供给范围 水平钻进 400~600 m 是比较容易的, 然而要压裂这么长的裂缝几乎是不可能的, 而且, 造就一条较长的支撑裂缝要求使用大型的压裂设备。多分支水平井在煤层中呈网状分布, 将煤层分割成很多连续的狭长条带(图 6c), 从而大大增加煤层气的供给范围。

表1 沁水煤层气田产量模拟  
Table 1 Production simulation of Qinshui CBM Field

参数	分支数 /个	分支段长 /m	分支间距 /m	主水平井长 /m	平均单井日 产量/ $m^3 \cdot d^{-1}$	年生产 时间/d	年单井产量 / $m^3$	采出程度 /%	生产年限 /a
指标	10	200~1 000	300	1 500	40 000	330	13,200,000	59	8
备注	不含主水平井		等间距					占探明储量	

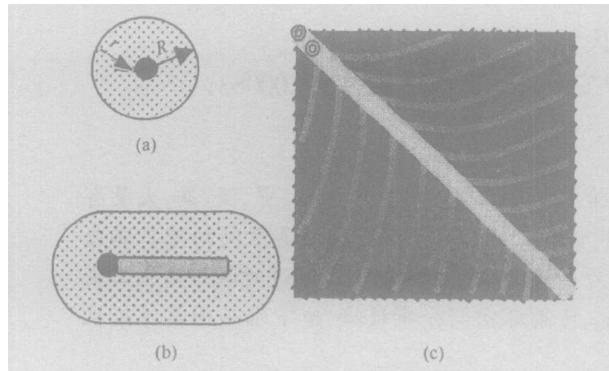


图6 不同类型井煤层气的供给范围比较

Fig. 6 Comparison of drainage area of coal bed methane in different kinds of well

a——直井供给范围( $r$ :井眼半径,  $R$ :供给半径);

b——单一水平井供给范围; c——多分支水平井供给范围

**b.** 提高了导流能力 压裂的裂缝无论长度多长,流动的阻力都是相当大的,而水平井内流体的流动阻力相对于割理系统要小得多。分支井眼与煤层割理的相互交错,煤层割理与裂隙更畅通,就提高了裂隙的导流能力。

**c.** 减少了对煤层的损害 常规直井钻井完钻后要固井,完井后还要进行水力压裂改造,每个环节都会对煤层造成不同程度的损害,而且煤层损害很难恢复。采用多分支水平井钻井完井方法,就避免了固井和水力压裂作业,这样只要在钻井时设法降低钻井液对煤层的损害,就能满足工程要求。

**d.** 单井产量高,经济效益好 采用多分支水平井开发煤层气,单井成本比直井高,但在一个相对较大的区块开发,可大大减少钻井数量,降低钻井工程、采气工程及地面集输与处理费用,从而降低综合成本。而且产量是常规直井的2~10倍,采出程度比常规直井平均高出近2倍,既提高了经济效益,最为重要的是更充分地开发了煤层气资源。

**e.** 具有广阔的应用前景 多分支水平井不仅可用于开发煤层气资源,还能应用于开发稠油或低渗透油藏、地下水资源,另外,还可以用于地下储油、储气工程。

## 5 多分支水平井应用分析

沁水煤层气田煤层属高煤阶、低渗透、高强度和

高含气量煤层气藏,适合应用多分支水平井技术开发。应用多分支水平井技术,尤其是定向羽状水平井,地面工程费用将是常规直井的三分之一。通过对沁水煤层气田产量模拟和对比分析,可得出以下结果(表1)。

经过经济评价,采用多分支水平井可大幅度提高经济效益,预计3a时间可收回全部投资,与常规直井相比,经济效益可提高10倍以上。如采用直井常规钻井方法和水力压裂增产措施,投资回收期将达到7.03a,而且,煤层气总产量和采收程度都明显低于分支水平井方案。

## 6 结语

**a.** 多分支水平井是未来油气开发的趋势,但受到多种因素的控制,最敏感的客观控制因素是地层渗透率、目的层厚度等。能够人为控制的主观因素有:分支井眼数目、分支段长、分支井眼方向及这个分支水平井眼系统的控制面积。将各种控制因素有机结合并进行优化,就能发挥多分支水平井的效率。

**b.** 多分支水平井,特别是羽状水平井能够最大限度地沟通煤层割理(微裂隙)和裂缝系统,增加井眼在煤层中的波及面积和泄气面积,降低煤层裂隙内气液两相流的流动阻力,大幅度提高单井产量,减少钻井数量,同时井眼有助于煤层微裂纹的产生与扩展。与常规直井相比,在开发低渗透储层煤层气资源时,多分支水平井具有单井产量高、采出程度高和经济效益高的优势。

**c.** 沁水煤层气田煤层属高煤阶、低渗透、高强度和高含气量煤层气藏,适合于应用多分支水平井技术开发。

## 参考资料

- [1] 鲜保安等.煤层气高效开发技术[J].特种油气藏,2004,11(4):63~66.
- [2] 程林松等.分支水平井产能的研究[J].石油学报,1995,16(2):49~54.
- [3] 万仁溥主编.不同类型油藏水平井开采技术[M].北京:石油工业出版社,1997.
- [4] 鲜保安等.中国煤层气开发关键技术及综合利用[J].天然气工业,2004,24(5):104.
- [5] 杨广里等.断裂力学及应用[M].北京:中国铁道出版社1990