

基于煤层渗透率的钻井完井方式选择分析

付利^{1,2} 申瑞臣¹ 屈平^{1,2} 杨恒林¹

(1. 中国石油钻井工程技术研究院, 北京 100195; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100093)

摘要: 煤层渗透率不仅是评价煤层气勘探开发潜力的重要地质参数, 也是选择钻井、完井方式的关键参数之一。本文在系统分析比较了国外煤层气开发的成熟经验和工程技术特点的基础上, 提出了根据煤储层渗透率的不同来选择钻井完井方式的基本理念和策略, 以期为煤层气钻井完井工程的经济有效实施提供一定的参考借鉴作用。

关键词: 煤层气 渗透率 钻井完井方式选择

The Selection of Drilling & Completion Methods Based on the Permeability in Coal Seam

Fu Li^{1, 2} Shen Ruichen¹ Qu Ping^{1, 2} Yang Henglin¹

(1. CNPC Drilling Research Institute, Beijing 100195; 2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100093)

Abstract: The permeability in coal seam is not only the important geologic parameter to evaluate the CBM potentiality of exploratory development, but also one of the key parameters to select drilling & completion methods. Firstly, the systematical analysis and comparison based on the mature CBM development experience and engineering characteristic abroad are introduced. Secondly, one elemental strategy of the selection of drilling & completion methods in accordance with the permeability in coal seam is proposed. Finally, some valuable advices are provided for the efficiently economical field operations of the drilling & completion engineering.

Keywords: Coalbed methane; permeability; the selection of drilling & completion methods

在煤层气的开发过程中, 即使煤层厚度、煤层含气量、煤层赋存深度基本相当的情况下, 就是因为其具有不同的煤层渗透性而往往需要采取不同的钻完井开发方式才能取得较好的经济效益。例如, 在低渗透率煤层一般采用了水平井技术, 而在中、高渗透煤层宜采用直井洞穴完井、直井压裂措施等。针对不同渗透率究竟采用何种技术更适应煤层

气的开发, 目前尚未形成明确的认识。煤储层渗透性是煤层气开发的关键技术参数, 研究分析其对钻井、完井方式以及增产措施对单井产量的影响, 对经济有效开发煤层气具有一定的指导意义。

1 煤层渗透率级别划分

煤储层从宏观角度上来说具有均一性, 但从微

基金项目 国家重大专项 36 课题煤层气钻井工程技术及装备研制 (2008ZX05036-003)。

国家重大专项 36 课题煤层气钻井工程技术及装备研制 (2008ZX05036-003)

作者简介 付利, 男, 现为中国石油勘探开发研究院在读硕士, 主要从事煤层气钻井、完井技术研究。

观角度来分析却具有各向异性。我国各地煤层渗透率值相对于国外来讲比较低,据不完全统计,渗透率一般在 $0.002 \sim 30\text{md}$ 之间,变化范围很大,极值相差4个数量级,其峰值分布在 $0.05 \sim 5\text{md}$ 范围内。在美国成功实施煤层气经济有效开发区块,煤储层的渗透率通常在 $3 \sim 30\text{md}$ 之间。例如最早开发煤层气的圣胡安盆地,渗透率值分布在 $1 \sim 60\text{md}$;虽然黑勇士盆地煤储层的渗透率比圣胡安盆地稍低,但其分布范围也在 $1 \sim 25\text{md}$ 之间。加拿大煤层气开发主要集中在西加拿大盆地,该地区的渗透率分布范围为 $1 \sim 15\text{md}$ 。澳大利亚最主要的含煤层气盆地之一鲍恩盆地渗透率比较低,分布范围为 $0.1 \sim 2\text{md}$,但是另一高含煤层气盆地苏拉特盆地渗透率则很高,渗透率值达到 $10 \sim 300\text{md}$ 。国内外部分盆地煤层渗透性的统计数据见表1。

表1 世界主要含煤层气盆地渗透率变化(单位:md)

含煤层气盆地名称	国家	渗透率范围(md)
沁水(永红区块)	中国	1.01
沁水(郑庄区块)	中国	$0.01 \sim 2.96$
沁水(樊庄区块)	中国	$0.025 \sim 2$
鄂尔多斯(保德区块)	中国	$0.05 \sim 3$
鄂尔多斯(韩城区块)	中国	$3 \sim 5$
圣胡安(Fairway)	美国	$10 \sim 60$
圣胡安(Cedar Hill)	美国	$0.5 \sim 10$
黑勇士(玛丽·李)	美国	$1 \sim 25$
黑勇士(Black Creek)	美国	$0.1 \sim 3.5$
阿巴拉契亚北部	美国	$0.01 \sim 1$
阿巴拉契亚中部	美国	$1 \sim 15$
阿尔科马	美国	$1 \sim 30$
粉河	美国	$35 \sim 500$
拉顿	美国	$5 \sim 15$
鲍恩	澳大利亚	$0.1 \sim 2$
苏拉特	澳大利亚	$10 \sim 300$
加拿大西部沉积地区	加拿大	$1 \sim 15$

为此,通过优化选择主要含煤层气盆地的渗透率范围,将煤层分类为致密低渗透性煤层($< 5\text{md}$)、中渗透性煤层($5 \sim 20\text{md}$)、高渗透性煤层($> 20\text{md}$)。

2 以渗透率为基础的钻井完井策略

通过对国内外的现场作业实践和研究报告分析,分别对低渗透、中渗透、高渗透这三种煤层所

应用的钻完井方式进行了归类总结,得到了图1所示的以渗透率为基础的钻完井策略图。

国外经过多年的尝试,针对不同的煤层渗透率采用了不同的完井方法,取得了良好的经济效益。从图1中可以看出,开发低渗煤层($< 5\text{md}$)的气藏大都采用水平井的方式,只有在煤层渗透率大于 5md 时才会运用直井进行开采,而在渗透率大于 20md 的高渗透性煤层则几乎没有水平井的运用。在完井方式上,多分支水平井基本采用了裸眼完井,而普通的水平井或SIS井大都采用了塑料筛管完井作业;在直井的完井中最常用到的方式是下套管固井压裂或者直接裸眼洞穴完井。当然在一些特高渗透性煤层($> 100\text{md}$)也有运用裸眼筛管完井或裸眼扩孔完井的尝试。

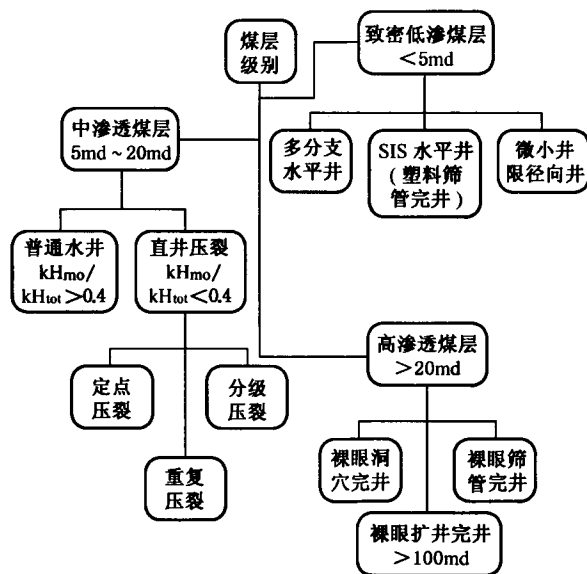


图1 以渗透率为基础的钻完井策略图

3 钻井完井策略的应用分析

3.1 致密低渗透性煤层

在致密低渗煤层,多分支水平井、SIS(Surface-In-Seam)水平井是目前开发煤层气的最主要技术;微小井限径向井技术则是未来进行低渗煤层气藏开采的有效技术,现在还没有得到广泛的应用。

(1) 多分支水平井技术:在该渗透率范围煤层,多应用多分支水平井。多分支水平井是在常规水平井和分支井的基础上发展起来的,是指在一个主水平井眼的两侧再钻出多个分支井眼作为泄气通道。为了降低成本和满足不同需要,有时在一个井场朝对称的3或4个方向各分布一组水平井眼,有

时还利用上下两套分支同时开采两套煤层。该技术在我国的阿巴拉契亚盆地北部得到了广泛应用,在我国沁水盆地的煤层气开发中也有应用。

分支水平井能在煤储层内形成相互连通的网络,最大限度的沟通低渗煤层裂隙和割理系统,大大降低煤层裂隙内流体的流动阻力,起到提高煤层排水降压速度和煤层气解吸运移速度,增加煤层气产量的效果。与普通单一水平井方式相比,多分支井的煤层气产量可以达到普通水平井的2~3倍,压裂直井的6~10倍。

表2 沁水盆地樊庄区块多分支水平井与直井产气量对比

井号	井型	煤层渗透率 (md)	日产气量 (m ³)
樊平1-1井	多分支水平井	0.5	1.9 × 10 ⁴
晋试1井	直井压裂	0.5144	1000 ~ 1100
晋试2井	直井压裂	0.32	3146 (最高日产气量)
晋试3井	直井压裂	0.58	3519 (最高日产气量)

(2) SIS (Surface-In-Seam) 水平井技术: SIS水平井技术是在普通U型水平井技术上发展而来的。普通U型水平井是指从地面钻一口定向水平井,贯穿煤层,并和较远处的一口生产直井相连通;而SIS水平井技术则是施工成V字型的两口工程水平井,贯穿同一煤层或两不同煤层,与同一生产直井相连通,组成象征意义上的两组U型井,两口工程井水平投影方位V型夹角大小一般在45°左右,如图2所示。SIS水平井在澳大利亚的鲍恩盆地得到广泛应用。

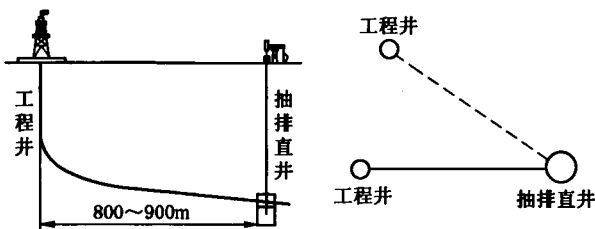


图2 SIS水平井垂直剖面与水平投影示意图

在低渗煤层应用SIS水平井技术进行煤层气开采,一组井的产气量可以达到两口普通水平井的产气量之和,但作业成本可以大大降低。在SIS井水平段,可采用割缝塑料筛管进行完井,这样一旦井眼发生堵塞现象,就可以在工程井口注入清洗液进行洗井。

(3) 微小井眼径向井技术: 微小井眼径向井技

术也是开发致密低渗煤层的一种新技术。径向井技术是指钻柱以极短的弯曲半径(约0.3m)实现从垂直方向到水平方向的转向,并以水力驱动钻杆钻进、以完全高压水喷射破碎岩石的一种水平钻井方法。在低渗煤层,可以在已钻直井中,快速钻进直径1"~2"的径向井眼(每一煤层3~4个井眼),这样可以增大储层的泄压面积,扩大煤层气解吸范围,提高低渗煤层气井的产量和采收率,解决了低渗煤层射孔、压裂效果不理想的问题。

3.2 中渗透性煤层

在中渗透性煤层,可以采取普通水平井或直井进行气藏开采,二者的具体选择取决于最优煤层的产气能力。

(1) 普通水平井技术: 在美国,大部分可商业开采的煤层气区块渗透率都在此范围内,此类煤层应用最多的就是普通水平井方式开采。在拉顿盆地,直井压裂开采(8层煤层)单井产气量 Q_N 为 $2.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{天}$,而运用水平井在煤层底部钻进开采的单井产气量 Q_h 为 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{天}$,其水平井与直井单井产气量之比 Q_h/Q_v 为2.7;阿尔克马尔盆地大部分只有一层煤,水平井与直井单井产气量之比 Q_h/Q_v 为5~10;切诺基盆地,通常含有6~8层煤,有半数的水平井约 Q_h/Q_v 为3,其余半数水平井 Q_h/Q_v 约为1;在圣胡安盆地北部地区已经完成了大约100口水平井,其 Q_h/Q_v 大约为4~5。总之,在中渗透性煤层,水平井的产气量基本为直井压裂产气量的3~10倍。

对于含有多煤层的盆地,水平井的应用要选择条件最好的煤层,这一煤层必须具有比较高的 Q_h/Q_v 值(一般大于3)。这里用 kH 来表示煤层的产气能力, k 是煤层渗透率, H 是煤层净厚度。最优煤层的产气能力定义为 kH_{\max} ,而 kH_{tot} 则代表全部煤层总的产气能力。对美国水平井应用广泛的拉顿盆地、切诺基盆地、阿尔克马尔盆地等进行统计得到,当 $kH_{\max}/kH_{\text{tot}}$ 低到0.4时, Q_h/Q_v 的值约为3(图3)。所以,当 $kH_{\max}/kH_{\text{tot}}$ 大于0.4时,水平井的应用才具有很好的经济效益。

(2) 直井压裂技术: 当 $kH_{\max}/kH_{\text{tot}}$ 小于0.4时,中渗透性煤层也可应用直井开采,水力压裂进行增产。该技术主要在美国黑勇士盆地、拉顿盆地、尤因和皮申斯盆地、加拿大西部沉积地区等地广泛运用。

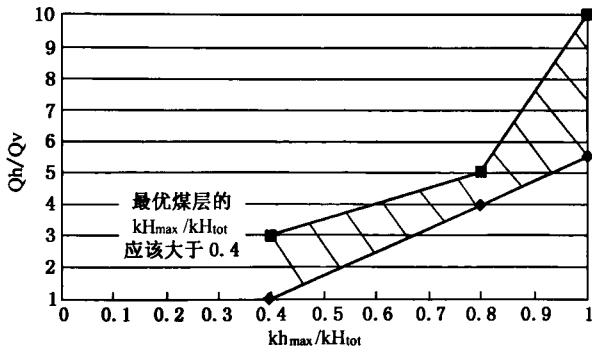


图3 Q_n/Q_v 与 kH_{max}/kH_{tot} 之间的关系

根据煤层数目和间距, 压裂增产采用单煤层定点压裂或多煤层分级压裂, 当煤层间距大于 12m 时, 多采用分层压裂措施。在生产过程中可能发生裂缝闭合或堵塞、套压下降, 并影响到煤层气产量。此时可进行重复压裂, 促使套压上升, 从而恢复生产能力。

最常用的水力压裂液有泡沫、清水体系(滑溜水)、充能体系(充氮或二氧化碳)和聚合物基凝胶体系。压裂液的选择取决于目标煤层的含水饱和度和压力梯度。如果煤层含水饱和度小于 5%, 充能体系(充氮或二氧化碳)压裂液是最好的选择。如果煤层含水饱和度大小为 5% ~ 50% 或煤层压力梯度小于 0.2psi/ft, 则采用具有支撑剂的泡沫压裂液更为有效。当煤层含水饱和度大于 50% 或压力梯度大于 0.2psi/ft, 清水体系(滑溜水)或具有支撑剂的聚合物基凝胶压裂液是最好的选择。

3.3 高渗透性煤层

国外对于高渗透性煤层大多采用了直井方式进行开采, 只是在完井方式选择上有所不同, 主要有裸眼洞穴完井、裸眼扩孔完井、裸眼筛管完井三种方式。

(1) 裸眼洞穴完井: 在含气量高, 储层压力大的高渗透性煤层, 主要采用裸眼洞穴完井进行煤层气开采。该方法最早应用在圣胡安盆地, 它使得该煤田煤层气单井产量达到直井压裂产量的 10 倍左右。现在裸眼洞穴完井主要在美国圣胡安盆地、澳大利亚鲍恩盆地的 Fairview 和 Spring Gully 区块得到了持续应用, 并取得了成功, 而在其它地区的应用还不多见。

洞穴形成过程对井眼的影响表现为: ①消除了钻井污染, 增加了井眼和储层的连通性; ②造成的大洞穴使洞穴直径 5 倍左右范围内的地应力显著降

低, 扩大了煤层的裸露面积, 提高了自然裂隙的渗透率。

裸眼洞穴完井的对象必须是裂隙发育完好的煤储层(渗透率通常大于 20md), 同时也必须以内生裂隙为主, 外生裂隙次之。发育良好的裂隙系统为压力的传递提供了通道; 较高的施工压力使得在卸压阶段从井筒表面到周围地层较深的范围内形成较大的压力差, 井筒附近的煤体所受压力超过其破裂极限而发生破碎。较厚的煤层不仅能形成较大的洞穴, 而且有利于形成较长的诱导裂隙。在超高压、含气量高的高渗透率煤层, 洞穴完井的应用效果最为理想, 十分优于压裂增产井。

(2) 裸眼筛管完井: 高渗透性煤层的另一开采方式是直井裸眼筛管完井。该方法主要在澳大利亚苏拉特盆地应用最为成功。直井裸眼筛管完井开发成本低, 不用压裂, 并可同时对多煤层进行开采。

(3) 裸眼扩孔完井: 该方法是裸眼完井方法的一种改进, 主要应用于渗透率相当高 (> 100md), 埋深比较浅的煤层, 例如美国的粉河盆地。裸眼扩孔完井方法, 首先钻至煤层上方下入套管, 然后钻过煤层并扩孔(48"或 72"), 最后进行水力激励增产, 以此消除钻井作业时对地层带来的渗透率的损害, 进而提高煤层气的产量。由于煤层渗透率很高, 增产过程不使用任何支撑剂, 仅用清水即可。

与洞穴完井相比, 裸眼扩孔完井由于没有支撑剂的使用, 煤粉产出易导致运移通道堵塞; 而洞穴完井会使使洞穴直径 5 倍左右范围内的地应力降低, 扩大了煤层的裸露面积, 提高了自然裂隙的渗透率, 煤粉的运移和堵塞并不能降低对渗透率的提高, 所以相对而言, 洞穴完井能更好的提高单井产量。

但是对于极高渗透率煤层, 裸眼扩孔完井的优势在于施工作业快, 钻井费用低, 完井方法也比较简单; 而且扩孔作业的煤层比较精确, 并不像洞穴作业时压力波动那样, 有时会对两层甚至更多的煤层进行作业, 有可能导致某一煤层洞穴作业无效。

4 结论

(1) 通过多年来的煤层气开发试验, 同一煤层气开发技术在不同渗透性煤层下具有不同的表现, 因此不同渗透性的煤层选择适宜的煤层气开发技术

(下转第 17 页)

(上接第46页)
是非常重要的。

(2) 对世界主要含煤层气盆地的煤层渗透率进行统计,明确主要的渗透率波段范围,并暂将煤层划分为低渗透、中渗透、高渗透三种级别。多分支水平井和 SIS 水平井技术是开采低渗透煤层的最好选择;在中渗透煤层,根据 $kH_{\max}/kH_{\text{tot}}$ 值的关系来选择应用水平井或压裂直井进行开采;高渗透煤层主要应用洞穴完井,对大于 100md 的高渗透煤层,也可应用裸眼扩孔完井或裸眼筛管完井。

(3) 受高渗透煤田分范围小的限制,在很大程度上看来,未来煤层气的开采技术应该主要是水平井-多分支水平井、径向井、普通水平井、SIS 水平井。

参 考 文 献

- [1] 赵庆波,李贵中,孙粉锦,李五忠编著.煤层气地质选区评价理论与勘探技术[M].石油工业出版社,北京,2009.
- [2] 李五忠,赵庆波,吴国干等主编.中国煤层气开发与利用[M].石油工业出版社,北京,2008.
- [3] 要惠芳,王秀兰著.沁水盆地南部煤层气储层地质特征[M].煤炭工业出版社,北京,2009.
- [4] Sunil Ramaswamy. Selection of best drilling, completion and stimulation methods for coalbed methane reservoirs [D]. 2007.12.
- [5] Ian Palmer. Coalbed methane completions: A world view [J]. International Journal of Coal Geology. Volume 82, Issues3-4, June 2010: 184-195.

(责任编辑 刘 馨)