

# 煤层气开采技术与发展趋势

张艳玉 魏晓霞

(石油大学石油工程系, 山东东营 257062)

**摘要:** 介绍了国内外煤层气的开采现状、储集特点, 论述了国外煤层气的钻井、完井技术以及提高煤层气采收率的方法, 并分析了国外煤层气勘探开发的发展趋势。指出我国煤层气资源十分丰富, 煤层气的开发和利用有广阔的前景, 要合理开发煤层气资源, 需借鉴国外的成功经验。

**关键词:** 煤层气; 勘探开发; 开采技术; 采收率

**中图分类号:** TE012

**文献标识码:** A

煤层气又称煤层甲烷, 是非常规天然气, 煤层既是它的生气源岩, 又是它的储集层, 煤层气的勘探开发已在国际上引起广泛的关注。我国煤层气资源十分丰富, 如能很好的开发利用, 将对我国今后的天然气工业有很大的帮助。目前我国的天然气勘探开发还处于起步阶段, 要尽快、合理地利用这一资源, 就得引进国外先进技术, 从煤层气的勘探到具体的钻井、完井, 开采技术以及各种提高采收率技术, 都有必要借鉴其成功经验。本文主要介绍国外煤层气的勘探开发技术及发展趋势。

## 1 煤层气的开采现状

### 1.1 国外煤层气开采现状

国外视煤层气为重要能源, 并把煤层气作为新的勘探目标。美国有较丰富的煤层气资源, 估计资源量为  $11.3 \times 10^{12} \text{m}^3$ , 占世界第三位。1977年2月, Amcoc公司首先在圣胡安盆地 Cedar Hill 地区完钻第一口煤层气井, 90年代美国煤层气已逐渐形成一门新兴的能源工业。目前美国煤层气生产井有7000口以上, 预计到2000年煤层气产量可达  $8495 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 。

美国煤层气勘探开发的成功很快引起的世界各国的重视与兴趣。加拿大把煤层气作为该国90年代的能源资源, 加紧开展评价和研究。英国也于1991年引进美国技术进行煤层气勘探开发。前苏联等国通过煤层资源的评价, 已肯定它是重要的第二动力资源。

### 1.2 国内煤层气开采现状

80年代前, 矿井瓦斯主要以井下抽放为主。80年代以后, 煤炭、地矿部门及一些省、市、自治区正式钻探煤层气井, 如沈阳煤气公司与美国 ECF 公司合作打井, 在沈阳5井压裂后产气  $1800 \text{m}^3$ ; 地矿部在河南安阳、山西柳林等地打井; 煤炭部已与外国公司合作开展煤层气评价及开采试验。

中国石油天然气总公司“七五”以来已注意到这一能源新领域, 80年代成立了煤层气技术开发中心。1993年选定华北大成凸起、辽河油田欧利坨子、江西丰城、湖南冷水江等地区作为试验区, 已见到初步成果。

总的来说, 我国煤层气勘探和生产试验虽然已经起步, 但是仍处于探索阶段。

## 2 煤层气开采技术

### 2.1 煤层气的勘探

煤层气勘探技术与油气勘探相似, 但必须针对其自身特点有针对性的进行。

煤层气的储集和富集与地下的构造有密切关系, 并不遵循背斜构造圈闭的理论。美国煤层气勘探实践证明, 大量产气的煤层气藏是一种压力圈闭气藏, 主要是水压圈闭气藏, 多分布在向斜和单斜的底部位置; 气压圈闭气藏形成机理与油气圈闭相似, 只是储集空间是煤层的微孔隙。裂缝发育带一般代表了高渗透带, 对于水压圈闭气藏, 向斜与背斜带底部的裂缝发育区往往是吸附气富集区。煤

收稿日期: 2000-02-13

作者简介: 张艳玉, 副教授, 1963年生。1984年毕业于华东石油学院采油专业, 1989年获油气田开发硕士学位。现在石油大学(华东)从事油藏工程的教学和科研工作。电话: 0546-8391192

层若处于区域或局部构造强烈变形或断裂发育带,则煤层气往往难于保存而易于散失。强烈火山岩活动对煤层有破坏作用,但活动较小却有利于煤层有机质向气态的转化或煤阶的逐渐升高,从而提高煤层气的产量。煤层顶底板的岩性对煤层含量也有影响,当煤气顶底板岩性致密时,从中扩散出去的气体少,煤层气含量就高。

因此,查明区域和局部构造的形态和地址特征、地质条件,选择煤层气勘探开发最佳领域是拟定煤层气井位之前十分重要而必须做的工作。

## 2.2 煤层气藏的钻井

### 2.2.1 钻井工艺技术

地质条件和储层特征决定钻井工艺。含水、低压、低渗、岩性比较稳定坚硬的煤层,常采用回转—冲击式钻井工艺,以空气和水为循环介质,这种工艺钻井速度较高,且成本低。超高压、地层变化大、硬岩层较少、水文条件复杂的煤层,一般采用有泥浆系统的钻井工艺,但更常采用液体回转钻井,以便尽量减少含煤层段的地层损害。

煤储层应采用优质钻井液和近平衡钻井。煤层气井使用无固相钻井液,用无机盐处理剂抑制煤岩的吸附膨胀,同时又可保持钻井液密度在 $1060 \sim 1080 \text{ kg/m}^3$ ,以稳定井壁,并加入适量的小分子聚合物,提高粘度降低钻井液滤失量。另外,为防止煤层漏失,主要采取小排量、低压耗措施。遇到井漏可加入桥塞堵漏剂,但禁止加入膨润土或粘土矿物,以减少对煤层的损害。

### 2.2.2 取心工艺技术

煤层取心不但要求煤心完整,而且应尽量减少甲烷吸附气的散失,这样才能准确计算吨煤含气量,预测产气能力,确定钻井位置和开采方式。甲烷含气量测定的误差取决于煤层岩心的取心时间,时间越短越好。目前适合煤层取心的是绳索取心工具,其优点是:取心外桶分别为两个独立结构,取心后不需起钻内桶总成便可以从钻进具内提到井口,出心速度快,取心收获率高。不仅大大缩短了起钻时间,而且可做到连续取心不起钻,使用于煤层气取心的特殊作业要求。

### 2.2.3 固井技术

煤层气由于埋藏浅,气层层位多,气层渗透性好,煤层气井井径扩大严重,顶替效率差,固井时易发生气窜,固井质量差。国内外对发生环空气窜的机理进行了深入细致的研究,并提出了相应的解决

方法,如采用管外封割器,控制失水和自由水,平衡压力固井,使用膨胀水泥、触变水泥、非渗透水泥、及发气水泥固井等,并在固井替浆过程中采用塞流顶替。

## 2.3 煤层气的完井技术

### 2.3.1 常用的完井方式

目前常用的完井技术有以下几种:

(1) 裸眼完井 这是在煤层气开发的最初阶段广泛采用的一种完井方式,可以避免在注水泥过程中造成地层伤害,且成本较低。但是使用这种完井方式不能选择在某一煤层进行测试和完井,不能割挡各单个煤层间的气窜,而且由于井筒中煤细粒的聚集不能在煤层之下,煤细粒也常堵塞井筒,使煤层中的气不能有效地流向井眼。因此这种完井方式逐渐被另一种裸眼扩眼完井方式所取代。

(2) 裸眼扩眼完井 在煤层之上下套管,然后在水、空气或泡沫的负压下钻穿煤层,再使用空气或泡沫排出循环钻井液,并在煤层段扩眼,形成一个大的中腹。因为负压钻井减少了地层损害,扩眼又进一步提高了井筒附近劈理系统的渗透性,所以可以获得较好的产能。煤层段的空腔有时是通过井的多次“冲击过程”,即可获得预期的扩眼效果。然后经高速空气或泡沫循环除去井筒中坍塌的煤屑和流入的地层流体,再下入 12 孔/ft(孔径为 1 in)的衬管,即可投入生产。

(3) 下套管射孔压裂完井 套管完井解决了裸眼完井遇到的许多问题,可以选择性的对某一煤层进行完井和开发,可以在煤层之下钻一段“鼠袋”,用于储集煤细粒和安装脱水泵,从而获得更高的产气量。压裂处理可以有效地提高产能,在对煤层实施水力压裂时,常采用较高的处理能力。压裂可以在煤层甚至邻层中产生相当复杂的裂缝形态,包括垂直裂缝和水平裂缝。

除上述二种基本完井方式之外,还有两项新技术可以提高气井产量和降低成本。

(4) 水平井 钻水平井是一项极具潜力的天然裂缝煤层气藏的完井技术。与最大渗透性方向垂直的长水平井眼(300m 以上)已被证明是十分有效的。最大渗透率方向通常与天然裂缝方向一致,或与壁理方向一致,所以在最大渗透率方向容易确定的情况下,可采用钻水平井有效地开发煤层气。但若最大渗透率方向不好确定,如在圣胡安盆地的一些地区,最大渗透率方向与壁理方向关系不

大, 这种情况下水平井就不一定比相当长度的水力压裂裂缝更有效。如在该盆地的几口水平井, 其结果并不比进行压裂增产处理的井好。

(5) 多层完井 多层完井是降低煤层气开发成本的一种重要手段。通过多层完井, 可以增大一口井的可采储量, 提高井的产量, 降低单位开发成本。如在黑勇士盆地, 整套煤系地层中有多个煤层和许多薄煤层, 用常规开采方法尽管实施了压裂处理, 不考虑税收, 井底最低气价也要 0.114 美元/ $\text{m}^3$  才经济可行。但通过多层完井, 每口井可提供  $0.17 \times 10^8 \text{m}^3$  的可采储量, 使最低要求气价降到 0.071 美元/ $\text{m}^3$ 。

### 2.3.2 完井方式的选择

煤层气井完井方式的选择需要考虑以下因素: 渗透率、孔隙度、煤层应力分布、煤层岩石力学性质、裸眼井产能大小、煤层厚度、煤层压力、煤的脆性、煤层是否含水等。

对于高渗透率的煤层, 一般产量较高, 从经济上考虑, 还是采用钻井成本较低的垂直井开采为好, 这类地层的完井方式应以裸眼洞穴完井为主。

对低渗透率的煤层, 一般产量较低, 可采用垂直井也可采用水平井来开发, 当采用垂直井时, 要采用套管射孔/水力压裂完井。对低渗透率的煤层, 采用侧钻水平井完井及水平井完井也是可行的。例如, 在石油工业中有许多油气井, 原来只用来开发深层的原油和天然气, 现在需要开发浅层的煤层气, 侧钻水平井是开发这种老井中气体的有效办法。

### 2.3.3 完井层位的选择

对不同的地质和储层特征的地层, 要应用不同的方法来找出高品质储层。在非均质、多层系煤层气储层中, 要成功地选择单层或多层完井层位, 就必须搞清纵向上具有不同地质和储层特征的气层分布。划分储层之后, 就能够更精确地、综合性地估算出储层模拟输入参数, 对储层做出定量评价, 选择出最佳完井层位。

## 3 提高煤层气采收率技术

### 3.1 动力裸眼完井

动力裸眼完井实际上是一种交变应力压裂技术。采用顺序注入和反排空气-水的工艺进行压裂。反复注入-反排作业可诱发井与储层的连通, 其效果与沿已有劈理系统和诱发的裂缝产生张

力、拉力和剪切破坏有关。凡是多个相交劈理网格间距小的地区, 动力裸眼完井一直是成功的。它能大幅度提高产量, 目前在美国应用广泛。

### 3.2 气井改造

Warrior 盆地在 80 年代后期钻井中, 许多井完井不当, 产能低。美国天然气研究所研究发现, 煤层气井产能低的许多因素, 其中包括: ①由于完井注水泥作业差, 不适当地封堵了完井层段; ②由于矿化水结垢堵塞了射孔孔眼, 深井更是如此; ③在最初的压裂中, 砂支撑剂没有进入煤层。评价认为, 改善二次完井约可增加  $154 \times 10^8 \text{m}^3$  煤层气储量。

### 3.3 注 $\text{N}_2/\text{CO}_2$

美国 San Juan 盆地正在试验两种提高煤层气采收率的方法:  $\text{CO}_2$  或其它强吸附气驱替煤层气。  $\text{N}_2$  注入煤层将降低被吸附的甲烷分压, 加速甲烷气的解吸附和生产, 而整个煤层的压力保持不变。实验室试验和计算机模拟表明, 相对均质煤层可采出 90% 的地层原始储量, 而一般的降压法只能采出 30% ~ 70%。

1993 年, Amoco 公司在 San Juan 盆地西北部的煤层甲烷储层, 成功的进行了第一次注  $\text{N}_2$  试验。试验井网包括 4 口外部注入井和 1 口中央生产井。一年的试验是成功的, 中央生产井的日产气量增加了 5 倍, 达到  $2.8 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

## 4 煤层气开采技术发展趋势

目前国外煤层气的勘探开发有下面几个发展趋势:

(1) 勘探开发煤层(包括试验性开发、示范项目和煤层气商业性生产)的规模有增大趋势;

(2) 煤层气井深增加, 因煤埋藏越深, 形成甲烷的熟化特性越优;

(3) 煤层气钻水平井数增加, 因水平井单井不压裂时煤层气产量高出直井压裂井的 4 倍;

(4) 煤层气井压裂工艺技术有进步, 美国能源部和矿业局研究和实施了一种名为 Kiel 的压裂法, 增产效果显著;

## 5 结论

(1) 煤层气藏为自生自储型气藏, 它有自己独特的性质, 不能完全按照油气勘探开发的方法对其进行开发。

(2) 钻井工艺由地质条件和储层特征决定。在

包含水、低压、低渗、岩石比较稳定、坚硬的地层采用回转冲击式钻井工艺,以空气和水为循环介质;在超高压、地层变化大、硬岩层较少、水文条件复杂的情况下,一般采用泥浆系统的钻井工艺。

(3) 目前适合煤层取心的是绳索取心工具,它的出心速度快,取心收获率高。

(4) 煤层气井的完井方式有裸眼完井、裸眼扩眼完井、下套管射孔压裂完井,采用水平井完井和多层完井可提高气井产量、降低成本。

(5) 一般高渗透率煤层采用垂直井裸眼洞穴完井,低渗透率煤层采用垂直井或水平井完井。

(6) 提高煤层气采收率技术有动力裸眼完井、气井改造和注  $N_2/CO_2$  驱替技术等。

(7) 国外煤层气勘探开发技术向大规模、深井、水平井等方向发展。

#### 参考文献:

- [1] M. Badri, Halliburton, et al. New Developments in Testing Procedures for Coalbed Methane Wells in Australia[C]. SPE 36983, 1996
- [2] 李彦, 苏学义. 提高美国煤层甲烷气采收率的技术[J]. 世界石油工业, 1997, (3)
- [3] 丁顺明, 常淑敏. 煤层气井钻井工艺技术探讨[J]. 石油钻采工艺, 1998, (1)

编辑: 李金华

(上接第 19 页)度会偏大。为判断处理结果是否合理可靠,应结合组合测井的声波时差、自然伽玛等岩性曲线进行综合判断。为消除岩性影响,可对处理井段做泥质校正。

#### 4.2 频散效应影响

由于介电测井曲线受频散效应的影响,资料处理时,储层的底界面含油饱和度会突然增大,影响解释成果参数和成果图的美观,应对储层底界面的介电常数进行校正。

当储层很薄时,频散效应会引起测井曲线失真,特别是厚度小于 1m 的薄层,曲线失真严重。在处理时,注意薄层饱和度是否合理。必要时,对薄层解释作厚度校正。

## 5 结论

(1) 依据介电测井的基本原理,给出了一种切实可行的解释模型。

(2) 通过介电测井和组合测井解释结论与投产效果对比,显示出介电测井在评价淡水淹、混合水淹层和水淹级别上有较高精度。

(3) 在介电测井资料处理解释中应注意的两个问题是储层岩性影响和介电频散效应影响。解决问题的具体校正公式有待于进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 李玉玲, 张宇晓. 介电常数确定含水饱和度的方法研究与应用[J]. 测井技术, 1994, (3)
- [2] 张超谟. 双频介电测井[M]. 北京: 石油工业出版社
- [3] 钟兴水. 测井资料计算机处理解释方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1986
- [4] W.D. 希尔契. 现代测井解释[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989

编辑: 彭 刚

forming conditions and distribution patterns are relatively abundant, thus there still remains large exploration potential. New discoveries are probable through full utilization of the abundant data and comprehensive research. It is proposed that future exploration should focus on the northern slope area and basic petroleum geological study should be strengthened in south of Dongzhuang and Beimazhuang areas.

**Key words:** Nanyang depression, oil and gas exploration, knowledge, proposal

#### 18 An Analysis of the Application Effects of Dielectric Logging in the Xiaermen Oilfield

DU Feng-lan et al

In view of the low interpretation accuracies of watered-out zones especially fresh water flooded zones and mixed watered-out zones with conventional logging data, this paper presents an interpretation model to calculate reservoir water saturation with dielectric logging data. Application in the Xiaermen oilfield shows that the interpretation accuracies of the fresh water flooded zones and the mixed watered-out zones with the dielectric logging data are high and the interpretation coincidence rate is up to 80%. Attentions should be paid to the influences of reservoir lithology and dielectric frequency dispersion effect and further research is needed to establish a specific modification formula.

**Key words:** dielectric logging, dielectric constant, Xiaermen oilfield, oil saturation, watered-out zone, frequency dispersion effect

#### 20 Comprehensive Evaluation of Reservoir Production Capacity Through Grey Association Analysis

TAN Cheng-qian et al

The influential factors on reservoir production capacity can be divided into artificial factors and reservoir factors. The reservoir production capacity depends mainly on reservoir itself on condition that the artificial factors are basically the same. Beginning with the Darcy's two-dimensional production equation, a theoretical equation of reservoir production capacity is derived and the multivariate function between reservoir production capacity and reservoir effective porosity, permeability and

resistivity is established through the use of the functional relation between relative permeability and water saturation. On base of the above studies, a reservoir production capacity predicting system is established with grey association analytical method. This method not only can comprehensively and quantitatively evaluate the categorization of reservoir production capacity but also can give out the reliability of evaluation results through relation degree. Its effectiveness has been verified by the predicted production capacity of the Keshang Formation in the District 8, Kelamayi oilfield.

**Key words:** grey system, association analysis, evaluation, reservoir, production prediction, Kelamayi oilfield

#### 24 Coal-seam Gas Recovery Technologies and The Trend

ZHANG Yan-yu et al

This paper introduces the development status and accumulation characteristics of coal-seam gas; presents the drilling and completion technologies and the ways to enhance coal-seam gas recovery; analyzes the trend of coal-seam gas exploration and development abroad. It is pointed out that development and utilization of the abundant coal-seam gas in China have bright prospect and the successful experience of other countries should be used for reference.

**Key words:** Coal-seam, exploration and development, recovery technology, recovery

#### 28 Application of TOC High-energy Gas Fracturing Technology in Oilfield Development

WANG Yuan-sheng

The prominent characteristics of TOC high-energy gas fracturing technology with rocket propellant as fuel are its controllable combustion rate, longer pressurization time and longer and wider fracture length compared with other high energy gas fracturing technologies. The basic principles and calculation formula of fractures are briefly introduced in this paper. Field application show that TOC high energy gas fracturing technology has the advantages of large scope of application, low cost and remarkable stimulation effects.

**Key words:** gas fracturing, oilfield development, mechanism, fracture system, test effect