

# 煤层气井试井研究的意义

赵培华<sup>1</sup> 刘曰武<sup>2</sup> 鹿倩<sup>1</sup> 徐建平<sup>3</sup> 蒋华<sup>3</sup> 韩旭东<sup>3</sup>

(1. 中石油煤层气有限责任公司 北京 100028; 2. 中国科学院力学研究所 北京 100190;

3. 大港油田测试公司 天津 300270)

**摘要** 从国内外对煤层气井试井的主要认识的分析出发,对煤层气试井技术研究的基本观点进行了介绍;从了解煤层储层特征、煤层动态变化、措施效果评价、合理工作制度制定等方面,论述了煤层气井试井技术的研究意义。

**关键词** 煤层气 试井 煤层 两相流

## 0 引言

煤层气排采是煤层气开发技术的核心,决定了煤层气开发是否成功。煤层气排采制度是否合理是制约着单井产量提高的关键技术难题之一,要制定合理排采制度,必须了解煤层的特征、煤层气的赋存特征、煤层在开发过程中的变化状况等。煤层测试技术是了解煤层动态变化的主要动态手段之一,它通常被称为煤层气藏开发工程师的“眼睛”。煤层气井生产测试成果是可以提供煤层的特征参数描述、进行煤层措施效果的评价、分析煤层气井之间的连通情况、确定煤层分布的非均质性、得到各煤层的产出状况、区域压降效果,以及不同开发阶段的煤层中的流体分布状况等,是充分了解煤层气藏动态变化规律重要技术手段。煤层气井生产测试资料的分析成果可以为煤层气藏数值模拟、开发方案编制和调整提供第一手重要资料,对制定合理排采工作制度,保证连续、稳定排采,提高单井产量具有重要指导作用。煤层气井生产测试技术是确定合理排采制度、进行合理高效煤层气生产的重要技术保障。

目前,世界上已有74个国家进行了煤层气资源的勘探工作。据国际能源机构(IEA)预计,世界

2000 m以浅的煤层气资源总量约为 $260 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,其中90%分布在5个国家,资源量由高到低依次为:俄罗斯( $113 \times 10^{12} \text{ m}^3$ )、加拿大( $76 \times 10^{12} \text{ m}^3$ )、中国( $36.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ )、美国( $21.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$ )和澳大利亚( $14 \times 10^{12} \text{ m}^3$ )<sup>[1-2]</sup>。目前,世界上开发煤层气有地面开采和井下抽采两种方式。由于井下抽采的效率远低于地面抽采,而且井下抽采的煤层气中甲烷含量要比地面抽采的低,所以本文用煤层气年产量作为各国煤层气发展程度的评价标准时,未考虑煤层气井下抽采的部分。美国是世界上煤层气年产量最高的国家,其煤层气发展程度居世界首位,其次为加拿大、澳大利亚和中国。俄罗斯虽然煤层气资源量最为丰富,但由于本国常规天然气资源供应还很充足等原因,煤层气开发未得到充分重视,煤层气发展程度远远落后其他国家。中国煤层气虽然地面年产量低,但井下抽采量非常高,2008年的单年井下抽采量达到 $53 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,是目前世界上煤层气井下抽采量最高的国家。

我国煤层气开发具有以下几方面的重大意义:

①提高煤矿生产安全;②改善大气环境;③缓解能源危机;④改善能源结构等。我国的煤层气地面开发工作是从80年代末开始的,由于无论在甲烷浓度还是甲烷回收率上煤层气地面开发都明显高于井下抽

[基金项目] 本研究得到国家重大专项“大型气田及煤层气开发”专项支持,课题编号2009ZX05038001。

[作者简介] 赵培华,男,高级工程师,主要从事煤层气排采技术及研究项目管理工作。

[联系作者] 刘曰武,男,研究员,主要从事渗流力学及油气藏工程方面的研究工作。地址:北京市北四环西路15号力学所,邮政编码:100190。

采,因此煤层气地面开发得到重视并迅速发展起来。2005年,我国煤层气井钻井数已达到328口,当年煤层气地面开采量达 $0.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,实现了地面煤层气开发量零的突破<sup>[3]</sup>。截止到2008年底,中国煤层气地面年产量已突破 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,钻探各类煤层气井共约3400口,形成地面煤层气总产能约 $20 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[4]</sup>,说明煤层气商业性生产能力已初步形成,煤层气商业性开发进入启动阶段。

但是,由于我国煤层气藏的复杂性,国外的众多开发经验对我国的煤层气的开发适应性较差,尤其是我国煤层的低渗、低产、结构复杂等特点表现更为突出。因此,为了适应我国煤层气的开发进程,需要阐明我国煤层气井的测试技术研究的意义。本文从国内外对煤层气井试井主要认识的分析出发,分析了对煤层气试井技术研究的基本观点,从了解煤层储层特征、煤层动态变化、措施效果评价、合理工作制度制定等方面,论述了煤层气井试井技术的研究意义。

## 1 国内外对煤层气井试井的主要认识

### 1.1 关于解吸/吸附机理的认识

国外对煤层气的研究较早,但直到1970年才认识到煤层气解吸和吸附机理,Patching<sup>[5]</sup>首先总结和概括出了煤层气解吸和吸附机理。

1986年,Kolesar<sup>[6]</sup>研究了煤层微孔隙结构中煤层气的不稳定吸附和扩散特征。同年,Bumb和McKee<sup>[7]</sup>首先将解吸机理应用到煤层气井的试井分析当中。他们利用Langmuir等温吸附机理将微观解吸和宏观流动接合起来,给出了不考虑井储表皮效应的无限大煤层中煤层气井的试井分析模型,计算了不稳定试井的早期压力曲线,讨论了等温吸附影响。

### 1.2 关于两相流动的认识

1989年,Kamal和Six<sup>[8]</sup>最先讨论了考虑气水两相流流动的煤层气试井理论,他们采用均质径向流模型,在假定气体解吸瞬间完成的前提条件下,将气水两相的作用同时考虑在拟压力函数相中,对试井理论模型进行求解。同样,他们也计算出了无限大煤层中总产量下的不稳定试井的早期理论曲线,能求出煤层渗透率和井眼表皮因子。他们将这种方法

应用到San Juan盆地的两口煤层井中,并得到了合理的结论。这种方法需要有相对渗透率数据和等温吸附线,但这两种数据通常在煤层井中是无法得到的,尤其是在预探井中。

### 1.3 关于测试方法的认识

King<sup>[9]</sup>等人对各种单井和多井试井方法进行分析研究后认为,段塞试井特别适用于煤层甲烷气藏,并且详细介绍了段塞试井的实施和数据分析,举例说明了段塞试井数据的分析。

Koenig和Schraufnagel等人<sup>[10]</sup>讨论了煤层甲烷井段塞试井,并发表了在Warrior盆地煤层井的试井实例。用段塞试井描述新煤层井不仅简单、可靠,而且经济。但是,段塞试井有两个缺点,试井实际涉及的储层半径约为井眼直径的100倍,大约深入煤层30ft。段塞试井得出的渗透率精度不如井筒存储系数的精度高。段塞试井不能提供确定井筒存储系数的方法,存储系数的误差导致了渗透率的误差。

Zuber等人<sup>[11]</sup>报道了亚拉巴马州Warrior盆地和Black Creek煤层进行的注入试井设计和解释,这些试井好像受井筒存储控制,说明需要进一步考虑试井设计。Zuber等人在试井设计中采用了模拟软件,如果使用模拟软件拟合实际的试井响应,其结果的可信度将有所提高。

### 1.4 国内煤层气井试井的主要认识

1995年,马强<sup>[12]</sup>利用变井储理论研究了煤层气井注入/压降测试资料的分析方法,给出了井筒储效应突变情况下的试井分析理论方程、理论曲线的绘制方法及测试数据的分析方法,进行了10几口煤层气井注入/压降测试数据的分析和对比。认为煤层气近井煤层的变化归结为井筒存储的变化。

1997年,韩永新<sup>[13]</sup>结合煤层甲烷解吸及煤岩易破碎的特征,总结了国外专家推荐的煤层气井测试方法,说明了煤层气井的试井方法与常规油气井试井方法存在着区别。从煤层气井的井况出发,结合煤层压力及渗透率的大小,提出了测试方法实施中应注意的问题。

2002年,陈志胜<sup>[14]</sup>发表了“煤层气试井分析软件开发和设计”的文章,提出了软件开发设计的思路、技术要求及结构框架。实现了试井设计、数据预

处理、试井分析及自动生成报告一体化的目的。但是,所应用的理论模型仍然是常规天然气藏的试井模型。

2005年,刘曰武等<sup>[15]</sup>给出了均质地层中线性组合边界煤层气井的不稳定压力数值分析模型,考虑气体在煤层骨架微孔隙中的扩散遵从 Fick 的扩散原理,吸附气采用 Henry 等温吸附来描述。同年,刘曰武等<sup>[16]</sup>给出了均质地层中多井条件下煤层气不定常渗流问题的数值模型,对于不同外边界,如圆形、矩形以及任意四边形煤层中存在不同源汇情况下的不稳定渗流问题进行了求解,得到了计算问题不同时间下的压力场分布,并对压力扩展过程进行了分析讨论,认为压力传播过程在早期是不受边界形状和边界性质影响的,在压力传播到边界之前,源汇性质对压力传播过程有明显影响,在汇与汇之间不存在等压线相当于封闭边界的情况,在源与源之间存在等压线相当于定压边界的情况。

## 2 煤层气试井研究意义

### 2.1 煤层气井在储层特征描述上的意义

煤层在成份、结构、构造及其物理力学性质上与常规储层,如砂岩有着明显的差异;煤层气的赋存和采出机理与砂岩中天然气也有着本质区别。目前,我国尚处于煤层甲烷勘探开发的实验阶段。获取煤层准确参数、正确评价煤层,对确定煤层气的完井方法和制订合理的开发方案是至关重要的。

要科学合理地开发煤层气田,首先就需要深入了解煤层气层的特性。煤层气井测试能够获得的主要参数包括:①煤层渗透率;②煤层原始压力;③煤层破裂压力;④煤层气原位解吸压力;⑤煤层气井的污染系数;⑥水力压裂裂缝长度;⑦煤层渗透率的非均质性等。

在这些参数中,煤层气层的渗透率是最重要的参数之一,是开发方案编制、井网密度部署、压裂设计、生产产量配置等的依据。因此,准确确定煤层气层的渗透率具有重要的意义。试井是获取煤层气井特性的重要手段和方法之一,煤层跟常规砂岩有很大区别,煤层气的存储方式主要是吸附在煤岩中,并且由于煤储层渗透率、原始地层压力都比较低。如

果采用常规试井的方法,在开井期间则很容易造成水、气同出,且由于储层渗透率相对较低,压力恢复时间过长,在测试过程中很难准确取得煤储层的地层真实压力。所以,使试井解释很难准确的确定储层参数。

煤层气试井常用的方法有:注入/压降测试、压降测试、段塞流测试、变流量试井和水罐测试等。由于注入/压降测试提供的资料准确度高,而且比较经济,是目前国内外煤层气试井使用较多的方法。

测试渗透性最有效的方法就是注入/压降法,该方法是通过小型注入泵向地层以某一稳定的注入排量注入液体。当注入一定时间以后,关井测其压力降落曲线,故称作注入/压降测试。由于注入使地层压力增高,因此保证了单相流。值得注意的是,这种注入方法要严防伤害地层,要保证注入的流体与地层配伍,一般注入液选用2% XCl 水溶液。其次要严防将地层压开,注入的最高压力要低于地层的破裂压力。注入/压降测试的方法虽然很简单。但为了保证选到预期的目的,使霍纳直线段明显出现,并能够准确求取煤层的渗透性,必须设计出合理的注入时间、关井时间、井口最高注入压力、最大注入排量等;另外,为了在现场能很好地掌握和了解测试动态,以便及时调整注入参数,确保测试的成功,对于预测注入期和关井期井口压力的变化是非常必要的。

原地应力即原始的地层应力+最小原地应力,实际上是裂缝开启后闭合时的闭合压力,是压裂设计所必须的参数之一,它控制着水力压裂裂缝的方位、形状和高度等。微破裂实验过程中可以得到煤层的破裂压力。

通过观察井测试可以获得原位的煤层气解吸压力,压裂后的注入压降测试可以得到裂缝的长度。多井干扰试井可以得到煤层渗透率的非均质性。

### 2.2 在措施评价方面的意义

我国的煤层气藏多属于低渗透煤层气藏,大多数的煤层气井需要进行压裂后才能投产。如何判断煤层水力压裂是否有效、压裂的裂缝有多长、压裂有效时间是多少、措施是否合理,以及能否对水力压裂进行优化等,对于这些问题,煤层气井的测试资料分

析可以给出合理的解释结果, 并通过结果的应用得到相应的答案。图 1 给出了无限导流垂直裂缝煤层气井的一条试井理论曲线与未压裂煤层气井试井理论曲线的对比图。

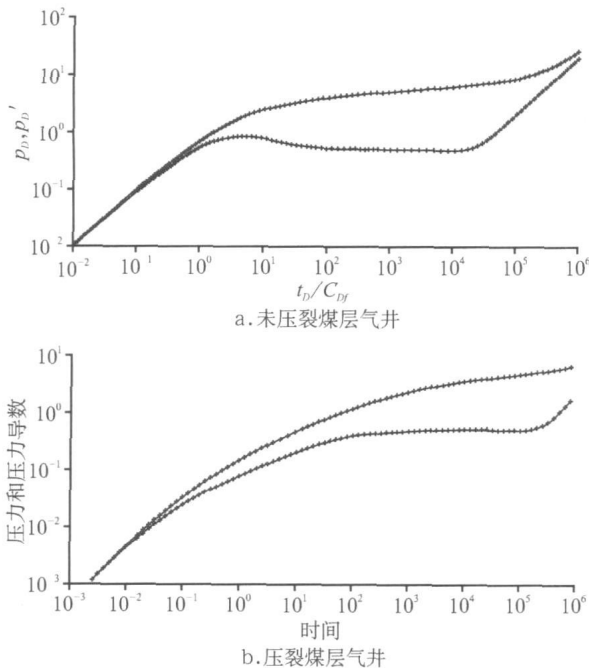


图1 煤层气井试井理论曲线

从图 1 可以看出, 压裂煤层气井试井理论曲线图中, 在早期压力和压力导数曲线存在一段平行的斜率为 0.5 的直线段, 这说明了煤层中存在着垂直裂缝, 煤层中的流动有线性流的存在。从另一方面说明水力压裂是成功的, 并且可以通过测试资料的分析得到裂缝的有效长度。可以利用测试资料分析结果, 预测压裂后的产量, 以及水力压裂的有效时间。

### 2.3 开发动态上的意义

煤层气是以吸附的形式存在于煤体中, 被水饱和。当煤储层压力降至吸附气的临界解吸压力之下, 气才从煤岩微孔隙表面上解吸出来, 然后以扩散方式进入煤岩割理系统, 再以渗透方式从割理系统中流入井筒。因此, 煤层气井中流体的产出过程可分为三个阶段, 依次为: 单相流状态阶段、非饱和流状态阶段, 以及两相流状态阶段。用常规的气井压降/压恢测试法, 对煤层进行测试, 压降期间很容易产生两相流, 给测试资料解释造成很大困难, 使解释结果多解性大。为了保证在对煤层气井测试时, 流

体流动状态为单相流, 注入/压降测试是行之有效的方法。采用注入/压降测试, 即保证了测试期间流体流动为单相流, 亦可获得可靠的储层参数。

在不同的煤层气开发阶段, 由于煤层中流体分布发生变化, 即煤层中的流体由单相水流发展到了存在游离态煤层气的两相流状态(见图 2)。因此, 需要使用不同的试井模型对测试资料进行分析。只有使用了合适的两相流试井模型, 才能得到正确的测试资料分析成果, 并可以得到解吸范围的大小, 才能更清楚地了解煤层中的流体分布和压力分布的变化。两相流分布条件下的一种试井理论曲线如图 3 所示。

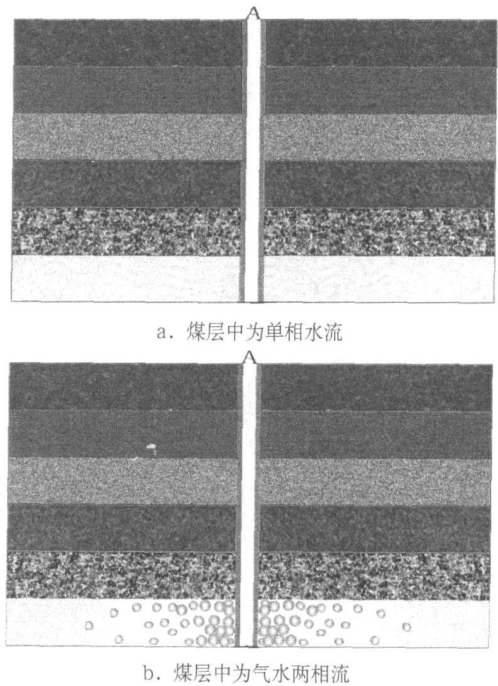


图2 煤层中流体分布的变化图

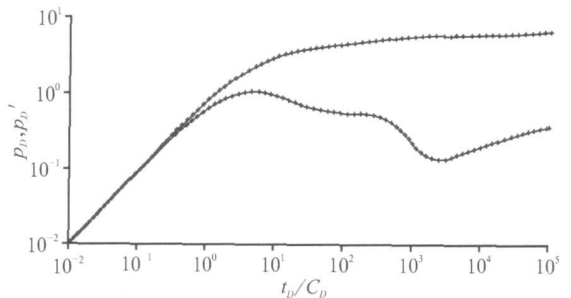


图3 一种气水两相流动条件下的试井理论曲线

可以通过流温流压测试, 判断产层产出与否、产出量多少, 为煤层气的多层混采提供可靠数据, 降低层间矛盾。

## 2.4 对合理工作制度制定方面的意义

井底流压的确定是煤层气井工作制度的核心。井底流压的获取方法有两种:一种是直接测量方法;一种是间接测量方法。直接测量方法是利用压力计直接进行测量,既可以将压力计下入井底,也可以将压力计永久固定在井底。这类方法存在的问题是:永久压力计费用较高,而将压力计下入井底进行测试需要安装偏心井口,施工繁琐,成本较高。间接测量方法多数是采用液面测量。液面测量的结果可以折算井底煤层流压的大小。该测试方法简单,但折算方法要求较高,目前精度较低,需要进一步发展。

但是通过液面高低,可以直接得到区域降压效果,可以在几乎相同的时间内得到煤层气开发区块内的测试井的液面变化情况,是一种值得推广的适合于煤层气低成本开发的煤层气井测试方法。

通过干扰试井可以了解井间连通情况,根据各井流压的变化,调整不同方向上的煤层气井产量,从而达到均匀降压、合理开发煤层气的目的。

## 3 结 论

(1) 从国内外对煤层气井试井主要认识的分析出发,分析了对煤层气试井技术研究的基本观点。

(2) 煤层气井试井可以了解煤层储层特征参数,如煤层渗透率、煤层原始压力、煤层破裂压力、煤层气原位解吸压力、煤层气井的污染系数、水力压裂裂缝长度以及煤层渗透率的非均质性等。

(3) 煤层气井试井可以评价措施效果,分析水力压裂是否有效,得到压裂的裂缝有多长等。

(4) 煤层气井试井可以分析煤层动态变化,包括煤层的纵向产出情况,以及横向的流体分布状况等。

(5) 煤层气井试井可以有助于确定合理工作制度、优化液面高度、确定合理井底等。

## 致 谢

本项目得到国家重大专项“大型油气田及煤层气开发”专项的支持,课题编号2009ZX05038001,感谢中石油煤层气有限责任公司允许本论文的发表。

## 参 考 文 献

[1] 司光耀,蔡武,等.国内外煤层气利用现状及前景展望.

中国煤层气,2009,6(2):44-46.

[2] 严绪朝,等.国外煤层气的开发利用状况及其技术水平.石油科技论坛,2007,12(6):24-30.

[3] 我国煤层气开发利用现状.中国燃气设备网,http://www.ccgas.net,2009.8.

[4] 2009-2012年中国煤层气产业投资分析及前景预测报告.

[5] Patching T H. The Retention and Release of Gas in Coal: A Review. The Can. Mining and Metallurgical Bulletin, (1970) 63, No. 703, 1302-08.

[6] Kolesar J E, Ertekin T and Obut S T. The Unsteady State Nature of Sorption and Diffusion Phenomena in the Micropore Structure of Coal: Part 2 Solution. SPEFE (March 1990) 89-97.

[7] Bumb A C and McKee C R. Gas Well Testing in the Presence of Desorption for Coalbed Methane and Devonian Shale. SPE 15227, presented at the 1986 Unconventional Gas Technology Symposium, Louisville, KY, May 18-21, 1986.

[8] Kamal M M and Six J L. Pressure Transient Testing of Methane Producing Coalbeds. SPE 19789, presented at the 64th Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX, October 8-11, 1989.

[9] King G R, Ertekin T and Schwemr F C. Numerical Simulation of the Transient Behavior of Coal Seam Degassing of Wells. SPEFE, (April, 1986), p. 165-183.

[10] Koenig R A and Schraufnagel R A. Application of the Slug Test in Coalbed Methane, Testing. paper 8743, presented at the 1987 Coalbed Methane Symposium, Tuscaloosa, AL, Nov. 16-19, 1987.

[11] Zuber M D, Sawyer W K et al. The Use of Simulation and History Matching to Determine Critical Coalbed Methane Reservoir Properties[A]. SPE/DOE 16420[C]. USA, 1987, 307-311.

[12] 马强.井储效应突变下的试井分析及实例.油气井测试.1995,4(2):36-39.

[13] 韩永新,刘振庆.煤层气井测试方法.油气井测试.1997,6(3):59-63.

[14] 陈志胜,李彬刚.煤层气试井分析软件开发和设计.煤田地质与勘探,2002,30(5):28-31.

[15] 刘曰武,张大为,等.多井条件下煤层气不定常渗流问题的数值研究.岩石力学与工程学报,2005,24(10):1679-1686.

[16] 刘曰武,张大为,等.线性组合边界中煤层气井的不稳定压力数值分析.天然气工业,2005,25(8):90-93.

本文收稿日期:2010-12-04 编辑:刘振庆

## WELL TESTING (YOUQLJING CESHI)

Vol. 19 No. 6 (Serial No. 123) 2010

## Abstracts

**Significance of Well Testing of Coalbed Methane.** 2010, 19(6): 1~ 5

Zhao Peihua, Lu Qian (Coalbed Methane Ltd. Company, Petrochina), Liu Yuewu (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences), Xu Jianping, Jiang Hua, Han Xudong (Well Testing Company, Dagang Oilfield)

By analyzing the key cognition on CBM well test both at home and abroad, the fundamental view points are introduced in this paper. The importance of researching the well test technologies are discussed from different points, such as understanding the coalbed characteristics and the coalbed dynamic changing, evaluating the stimulating effect, determining the suitable flowing pressure, etc.

**Key words:** coalbed methane, well test, coalbed, two phase flow

**Differences of Well Testing Between CBM and Conventional Gas Well.** 2010, 19(6): 6~ 11

Liu Yuewu (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences), Zhao Peihua, Lu Qian (Coalbed Methane Ltd. Company, PetroChina), Fang Huijun (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences), Xu Jianping, Jiang Hua, Lin Xuemin (Well Testing Company, Dagang Oilfield)

The analysis results of well test data are significant important for ascertaining the well completion method of CBM and arranging the development plan. The purpose of this paper is to solve the well test problems that CBM test process and data analysis method only use all be used for the conventional gas by now. The coalbed is distinctly different from the conventional gas reservoir (e. g. sand formation) in aspects of component, structure, physical and dynamics property. The storage form and production mechanism in CBM are intrinsic different from that in conventional gas. In order to get the accurate parameter and evaluate coal bed exactly, the related theoretical approach for CBM well test which is known less must be researched. Therefore, comparing the CBM well test with the conventional natural gas test, characteristics of CBM well test are proposed in the paper. The paper discussed the fundamental reasons of difference between CBM well test technology and conventional gas, which was researched in reservoir characteristics, storage characteristics, fluid distribution characteristics in various stage and so on. The distinction of CBM test technology and conventional natural gas was analyzed in detail from test method, test technics, interpretation model to material analytic method. The research results have positive significance to comprehend and understand CBM well test adequately.

**Key words:** CBM well, oil and gas well, well testing

**Evaluation of CBM Well Test Methods.** 2010, 19(6): 12~ 18

Zhao Peihua, Lu Qian (Coalbed methane Ltd. Company, Petrochina), Liu Yuawu (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences), Fang Huijun (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences), Jiang Hua, Han Xudong, Lu Mei (Well Testing Company, Dagang Oilfield)

The purpose of CBM well test is to obtain physical parameters of coalbed which can provide scientific fundamental data for exploration and development of CBM and evaluation of production potential. CBM well test method is one of effective dynamic methods which is able to obtain coalbed parameters accurately, and can be used to analyze and evaluate coalbed qualitatively and quantitatively. This method has obvious advantages in determining the basic parameters of coal reserves, whose primary goal is to obtain evaluative parameters of coal reservoir. This paper focuses on CBM well test methods from the practical point of view. Those methods include mainly DST Test, Slug Test, Injection/Falloff Test, Tank Test, Pressure drawdown/buildup Test and so on. Because CBM is different from conventional gas well in storage, migration, and production mechanism, the conventional well test methods have some limitations in CBM well test. By comparing the advantages and disadvantages, range of application of well test methods, the characteristics of CBM well test are analyzed in detail and the ways to improve the well test methods in various developing stages are discussed in this paper, and pointed out the direction of well test and test data analyzing method in CBM exploration and development.

**Key words:** CBM, well testing, test method, material analytic method

**Study on Equipment and Process in Injection/Falloff Test in Coalbed.** 2010, 19(6): 19~ 22, 36

Liu Yuewu (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences), Fang Huijun (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences), Xu Jianping, Lin Xuemin, Lu Mei (Well Testing Company, Dagang Oilfield)

The basic theory, test method, equipment, test process, test data analysis of injection/falloff well test are introduced in detail in this paper. The advantages and disadvantages are analyzed. Based on the fundamental theory, discussed the problems on injection/falloff test designing, equipment, and test data analysis method and so on, point out the developing trend of the injection/falloff test.

**Key words:** coalbed methane (CBM), well test, equipment, process, injection/falloff

**Why Coalbed Methane Is a New Clean Efficient and Safe Energy.** 2010, 19(6): 23~ 28

Su Zhongliang, Liu Yuewu (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences), Zhang Junqing (International Division, CNPC)

With the advent of low carbon economy time, coalbed methane (CBM), as is a clean, efficient and Safe energy, is paid more and more attention. By comparing the components of energy resources such as coal, oil and conventional natural gas etc, the analysis base is buildup to verify