

煤层注入/压降测试的设备及工艺问题

刘曰武¹ 方惠军² 徐建平³ 林学敏³ 芦梅³

(1. 中国科学院力学研究所 北京 100190; 2. 中国科学院广州地球化学研究所 广东广州 510640;
3. 大港油田测试公司 天津 300270)

摘要 较为全面地介绍了煤层气注入/压降方法的基本原理、测试方法、测试设备、测试过程、测试数据分析以及注入压降测试的优缺点;分析了煤层气井在注入/压降设计、设备以及测试资料分析等方面存在的问题,提出了相应的改进及发展方向。

关键词 煤层气 测试 设备 工艺 注入/压降

0 引言

要科学合理开发煤层气田,首先就需要深入了解煤层气层的特性,在这其中最重要的参数之一是煤层气层的渗透率,这是开发方案编制、井网密度部署、压裂设计、生产产量配置等的依据。因此,准确地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,则在开井期间很容易造成水、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确定储层参数。

目前,煤层气常用的试井方法主要有注入/压降测试、DST测试、段塞测试、变流量试井、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,因此该方法是目前国内外煤层气试井使用较多的方法。

注入/压降测试包括两部分:一部分是注入过程;另一部分是关井过程。首先,按照设计的注入排量尽可能恒定的向煤层注入液体,达到设计注入时间和井口最高注入压力,而后关井测压降至设计关井时间。测试期间,注入过程和关井过程连续进行,且要连续测井底压力。根据注入数据和关井数据,如压力、时间和注入排量,以及其它基本数据,如流

体粘度、煤层厚度、孔隙度等,进行测试资料分析,获取煤层的渗透率、原始地层压力等储层参数。

国内外对注入/压降理论和测试方法的研究已有一定的进展^[1-6],但是在测试的设计、测试设备,以及测试工艺方面仍然存在许多问题。本文在总结国内外研究成果的基础上,结合目前注入/压降测试现场应用状况,分别从煤层气注入/压降设计、注入/压降设备和注入/压降测试工艺三个方面,给出了煤层气测试目前存在的问题,相应地提出了煤层气测试在设计、设备以及测试工艺方面的改进方向,从而为指导煤层气井现场实际测试施工提供了科学的依据。

1 煤层气注入/压降法试井测试方法

1.1 注入/压降测试的基本原理

注入/压降试井方法是一种单井压力不稳定试井方法,它是以稳定排量以及低于煤层破裂压力的注入压力,向所测试的煤层注水一段时间,然后关井进行压力恢复测试,使压力与原始储层压力逐渐平衡的试井方法。用压力计记录注入和关井阶段的井底压力随时间的变化。

由于现阶段注入过程中设备等客观条件的限制,稳定排量的控制比较困难,这将容易造成测试井井下压力数据的波动。因此,试井测试的关井压降阶段的压力数据分析通常最具有代表性。通过分析压力计记录的数据,可求取煤储层的参数。注入/压降测试是一种适用于高、中、低压煤层,是目前煤层气藏开发初期煤层气井测试最常用的方法。

[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] 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。

1.2 注入/压降试井的测试方法

注入/压降试井是认识煤层气储层参数的重要方法,其基本的测试方法是将测试管柱、封隔器及压力计等测试工具下入井内预定位置,采用小型注入泵以恒定的排量向煤层中注水一段时间,在井筒周围产生一个高于原始储层的压力分布区,然后开井,使注水压力与原始储层压力逐渐趋于平衡。注入和关井阶段采用压力计记录井底压力随时间的变化,从而测得各阶段煤层的响应参数。

注入和压降阶段的数据都可用于分析、求取储层参数。井下关井技术的应用是注入/压降试井的重要技术环节之一,该技术避免了井筒存储效应对压力测试资料的影响。因此,它是获取高质量煤层气试井成果的前提和保证。

1.3 注入/压降法煤层气试井的设备

注入/压降试井设备包括地面设备系统和井下设备系统两大部分。地面设备系统是由泵注系统、绞车系统和井口系统组成(见图1)。

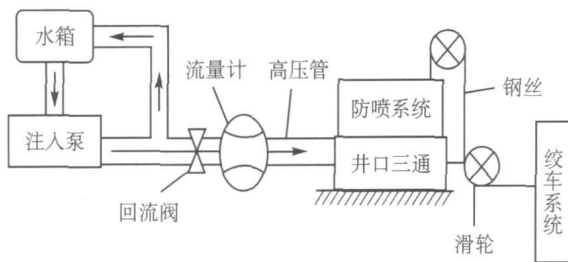


图1 注入/压降测试的地面设备系统

泵注系统主要包括注入泵、调速电机、水箱、高压管汇、压力安全阀、流量计、流量调节阀、压力表和供水泵等;绞车系统包括电机、滚筒、钢丝、计数器;井口装置系统由井口三通、防喷管、防喷头、手压泵等组成。

泵注系统的流量稳定控制和计量是注入/压降试井成功的关键环节之一。目前,注入/压降测试不成功或不精确的原因大多数是由于在泵注系统存在问题。

井下设备系统包括井下管柱系统、井下关井系统和井下测试设备(见图2)。井下管柱系统主要包括油管、膨胀式封隔器、塞管等;井下关井系统主要包括由绳帽、加重杆、震击器、万向节、平衡阀、关井阀、密封座节及封隔器等;测试设备主要包括钢丝、高精度电子压力计等。其中井下关井设备和高精度电子压力计是注入/压降测试的关键井下设备。

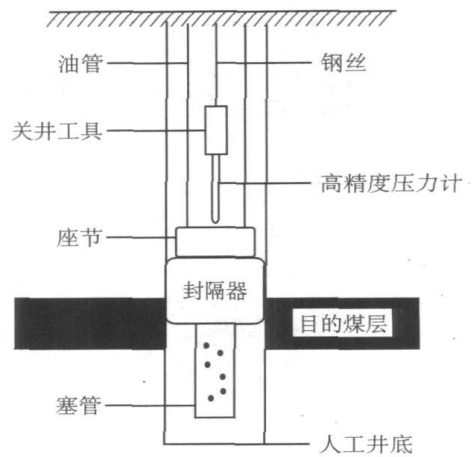


图2 注入/压降测试的井下设备系统

1.4 注入/压降法煤层气试井的测试过程

1.4.1 测试管柱下井

按测试要求和现场实际情况连接下井管柱,记录每一个部件尺寸以及下井油管的数量和长度,以确保测试过程的顺利进行。

1.4.2 安装和连接地面装置

管柱下至预定深度后,校正下井管柱的长度,确保深度无误后,安装井口设备,连接地面测试管柱。

1.4.3 测试管柱试压

实施井下关井,对测试管柱进行试压,确保管柱密封良好。保压 30 min 时间(尽可能在以上),以保证管柱的密封性。

1.4.4 顶替和封隔器坐封

根据管柱体积来计算顶替容积,根据封隔器的型号及坐封形式,实施封隔器坐封,检验封隔器坐封情况,并且记录压力的变化和坐封压力。

1.4.5 压力计编程

针对不同测试阶段,压力、温度数据点的采样时间间隔要求不同,压力计数据录取编程情况分别为:

①下井阶段:不大于 60 s 采 1 个数据点。②注入测试阶段:每 5~10 s 采一个数据点。③压降初期:每 2~20 s 采一个数据点。④压降后期:每 30 s 采一个数据点。

1.4.6 注入煤层气试井测试

通过向测试目标煤层注水,产生一个压裂煤层瞬时压力脉冲,注入时间一般控制在 10 h(可以根据实际情况进行调整)。完成注入时间后,实行井底关井,并且利用压力计和流量计记录压力变化和注入排量。

1.4.7 压降法煤层气试井测试

井底关井进行压降测试 20 h(可以根据实际情况进行调整)。测试结束后,现场录取压力计数据,处理数据,并求取煤储层参数结果。

1.5 试井数据资料分析

煤层气储层试井的资料分析主要包括常规试井解释和现代试井解释。常规试井解释包括 MDH 法和 Homer 法等,然而这些方法存在很大片面性。20 世纪 80 年代以来,随着电子计算机和精密仪器的发展,现代试井解释方法也日趋成熟。时至今日,Gringarton 压力典型曲线(1979)和 Bourdet 压力导数典型曲线(1983)已经成为 20 世纪 80 年代以来的工业性标准方法。

现代试井解释方法就是利用 Bourdet 压力导数典型曲线和 Horner 叠加时间,对原始数据的双对数和半对数曲线进行拟合分析。在取得理想拟合效果后,从典型曲线读取合适的压力拟合值、时间拟合值及曲线拟合值,从而计算出煤层的技术指标。注入/压降试井资料分析一般也是采用半对数分析法与图版压力及压力导数典型曲线拟合分析相结合,最后应用历史拟合曲线对其进行检验,从而判断资料分析结果的正确性。由于注入过程压力波动较大,并且希望所分析的渗透率值接近煤层的原地应力状态,因此压降曲线的分析结果最具代表性。

1.6 煤层气注入/压降试井主要优缺点

1.6.1 主要优点

(1) 流体的注入提高了地层压力,保证了在测试过程中为单相流,它适用于负压、正常压力和超压等各种情况的煤层气井。

(2) 不需要井下机械泵送设备,简化了操作步骤,降低了成本。

(3) 可以用标准试井分析方法来分析,结果比较可靠。

(4) 探测半径较大,时间相对较短。

1.6.2 主要缺点

其缺点主要是对于低渗透率煤层很难进行,因为要保持非常低的注入排量。所以,在采用注入/压降方法时,必须预防以下两点:

(1) 地层伤害。其原因之一,由于注入的流体可能与地层的化学环境不相容,发生反应;原因之二,有可能注入了会堵塞储层孔隙的微粒。因此,把取自被测试层位的地层水回注到测试井中是最理想

的,至少应当采用与地层和气藏流体相容的淡水。

(2) 压开地层。如果注入过程中排量控制不好,使井底压力超过了测试层的破裂压力,就可能压开地层,产生裂缝。这种裂缝的产生被认为是自然渗透率或井筒伤害的假象,使测试结果不可靠。因此,在注入/压降过程中,一定要保证井底压力低于地层破裂压力。

2 煤层气注入/压降测试存在的问题

2.1 测试设计存在的问题

目前,注入/压降测试设计主要分为三大部分:①微破裂试验阶段;②注入/压降测试阶段;③原始地应力测试阶段。

2.1.1 微破裂试验阶段

微破裂测试的主要目的是确定煤层的破裂压力。对于不同性质、不同埋藏深度的煤层,其破裂压力有所不同,有些煤层甚至没有破裂压力。在微破裂压裂实验时,应该考虑煤层的应力应变曲线,以此确定煤层变形的特征。目前因为破裂试验缺乏相应数据,主要靠测试试验过程中压力和流量的变化进行确定,往往导致煤层压死,对煤层气井存在严重的破坏性损伤。建议注入/压降之前,对煤层的采集样品进行实验室内应力应变实验,确定测试层的煤层特征,防止煤层压死。

2.1.2 注入/压降测试阶段

注入/压降阶段是煤层气注入/压降测试的主要阶段。目前,存在的问题主要有三个方面:

(1) 注入流量难以得到稳定控制,且注入流量过大,测试数据的结果一般表现为注入段的压力测试曲线变平,注入流量不稳定(见图 3)。建议应保持小流量稳定注入,始终保持压力曲线有一定的上升速度。

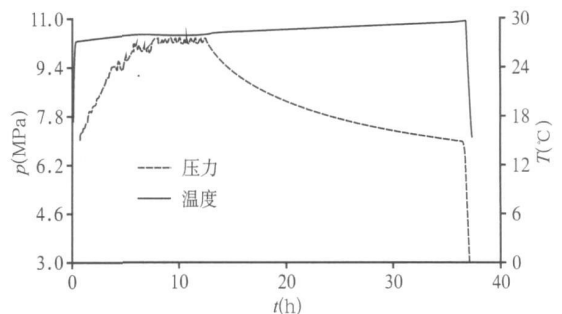


图3 现场注入/压降测试的压力及温度曲线

(2) 测试过程中,任意改变注入流量,使注入段的压力变化突然增加,影响压力降落段的数据分析。

压力突然增加的现场实际井例如图 4 所示。建议应保持小流量稳定注入, 始终保持压力曲线有一定的上升速度。

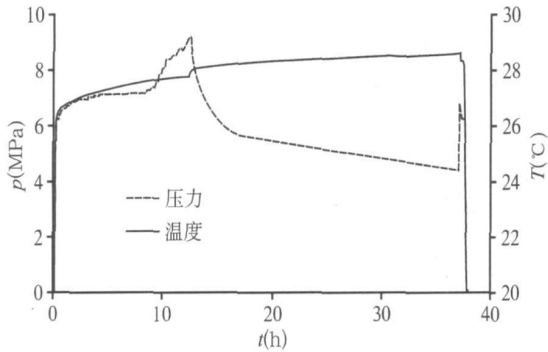


图4 现场注入/压降测试的压力及温度曲线

(3) 注入流量变化复杂, 记录不准确, 难以用于测试资料的解释分析。因此, 必须合理控制注入流量。

2.2 测试设备存在的问题

(1) 注入系统不完善, 流量不能自动控制, 不能自动计量。目前, 多数测试队伍所采用的注入系统的流量计量都是使用人工液面读数的方式或计量器液位读数的方法。这样的情况下, 无法得到准确的流量史, 只是一个平均的流量值, 对于现代试井分析帮助极少, 甚至给现代试井分析带来许多困难。建议建立流量自动记录系统, 并与压力测试数据同时进行测试, 以便进行更精确的现代试井分析。

(2) 井下关井器关井不严, 存在井筒存储的影响, 有时甚至导致整个煤层气注入/压降测试过程的失败。建议使用可自动控制的井下开关设备。

2.3 测试工艺存在的问题

从工艺方面讲, 煤层气测试工艺所存在的主要问题是注入时间问题和压力衰减时间问题。

由于煤层的性质不同, 传导压力的能力也不同。笔者对于国标中所确定的注入时间计算方法的实用性表示疑问。该公式只适用于渗透率较高的煤层, 当煤层的渗透率较低时, 此公式的实用性需要深入的讨论。而我国大多数煤层都是低渗透煤层或超低渗透煤层。因此, 对注入时间的确定需要结合实际情况进行分析。

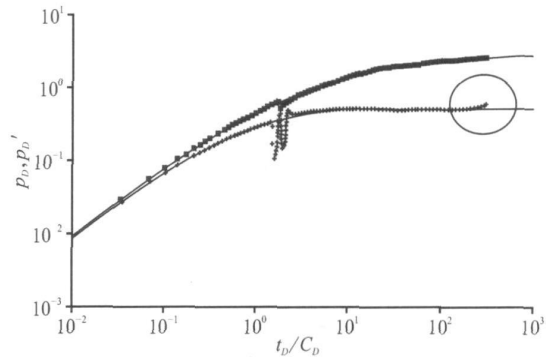
注入流量应参考煤层性质进行选定。目前, 部分测试已经利用了小流量测试结果, 取得了较好的研究成果。

鉴于上述情况, 建议在煤层气注入/压降测试实施过程中, 必须注意工艺问题, 以及设备问题, 尤其

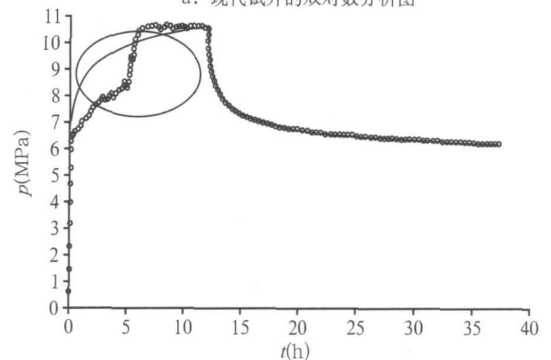
是注入设备和井下关井设备方面的问题。

3 煤层气注入/压降测试资料解释存在的问题

煤层气注入/压降测试需要相应的解释模型、真实的测试数据、合格的流量测试数据等。无论哪个条件出现问题, 都会给煤层气井的现代试井分析带来计算分析上的误差。图 5a 给出了注入流量变化条件下测试资料的分析评价分析图, 历史拟合分析图如图 5b 所示。



a. 现代试井的双对数分析图



b. 历史拟合分析图

图5 现场测试资料分析数据图

从图 5a 中看出, 由于注入历史的影响, 压力导数的后端不能与理论曲线有很好的拟合, 并且相对应的注入段的压力不能得到很好的拟合。要得到较好的双对数分析拟合, 以及良好的全测试历史的拟合, 较为准确的取得流量测试资料是不可缺少的。

另外建议考虑煤层特点, 建立更多的适合于煤层气试井资料分析的试井模型及资料分析方法。

4 结论及建议

(1) 全面介绍了煤层气注入/压降方法的基本原理、测试方法、测试设备、测试过程、测试数据分析以及注入压降测试的优缺点。

(下转 36 页)

- [7] Van der Waals J D. The Equation of State for Gases and Liquids. in Nobel Lectures in Physics, 1910.
- [8] Redlich O and Kwong J. On the Thermodynamics of Solutions. An Equation of State. Fugacities of Gaseous Solutions. Chemical Reviews, 1949.
- [9] Soave G. Equilibrium Constants from a Modified Redlich Kwong Equation of State. Chem. Eng. Sci., 1972.
- [10] Peng D Y and Robinson D B. A New Two Constants Equation of State. Ind. Eng. Chem. Fund, 1976.
- [11] Schmidt G and Wenzel H. A Modified Van der Waals Type Equation of State. Chem. Eng. Sci., 1980.
- [12] Patel N C and Teja A S. A New Equation of State for Fluids and Fluid Mixtures. Chem. Eng. Sci. 1982.
- [13] Trebble M A and Bishnoi P R. Development of a New Four Parameter Cubic Equation of State. Fluid Phase Equilibria, 1987.
- [14] Lawal A S. New Criticality Criteria for Equation of State Compositional Models. SPE Poster Session Paper Presented at the 1987 SPE Ninth Symposium on Reservoir Simulation, San Antonio, Texas, Feb. 1- 4.
- [15] Benedict M, Webb G B and Rubin L C. An Empirical Equation for Thermodynamics Properties of Light Hydrocarbons and Their Mixtures, Methane, Ethane, Propane and n Butane. J. Chem. Phys., 1940.
- [16] Starling K E. Fluid Thermodynamic Properties for Light Petroleum Systems. Gulf Pub, 1973.
- [17] GB/T 17747. 2- 1999. 天然气压缩因子的计算(第 2 部分): 用摩尔组成进行计算. 1999.
- [18] Standing M B and Katz. Density of Natural Gases. Trans. AIME., 1942, 146: 140- 149.
- [19] William C. Lyons(编者), 李晓明, 赵洪才, 等(译者). 石油与天然气工程技术手册. 北京: 中国石化出版社, 2003.
- [20] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [21] 张川如. 非烃天然气的偏差系数. 试采技术, 1992, 13 (1): 29- 33.
- [22] Neeraj Kumar, B Tech. Compressibility Factors for Natural and Sour Reservoir Gases by Correlations and Cubic Equations of State. MS Thesis, Department of Petroleum Engineering, Texas Tech University, 2004.
- [23] Bruce E Poling, John M Prausnitz, John P O' Connell(编者), 赵红玲, 王凤坤, 等(译者). 气液物性估算手册. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [24] Kay W B. Density of Hydrocarbon Gases and Vapors at High Temperature and Pressure. Ind. Eng. Chem., 1936, 28: 1014- 1019.
- [25] Joffe J and Zudkevitch D. Prediction of Critical Properties of Mixtures. Chem. Eng. Progr. Symp. Series, 1967, 63(81).
- [26] Stewart W F, Burkhardt S F and Voo D. Prediction of Pseudocritical Parameters for Mixtures. Paper Presented at the AIChE Meeting, Kansas City, MO, 1959.
- [27] Sutton J R. The Critical Pressure of Multicomponent Mixtures. Advances in Thermophysical Properties at Extreme Temperatures and Pressures. Am. Soc. Mech. Engrs., 1965.

本文收稿日期: 2010- 12- 04 编辑: 许兰婷

(上接 22 页)

(2) 在此基础上, 分析了煤层气井在注入/压降设计方面存在的问题, 提出了针对不同煤层进行设计, 尤其确定合理的流量、合理的注入压力及优化的注入时间序列。

(3) 分析了煤层气井在注入/压降设备方面存在的问题, 提出了必须对注入系统进行改进和优化、增加流量自动记录系统, 以及增强井下开关的可控性的建议。

(4) 分析了煤层气试井资料分析评价方面存在的问题, 建议考虑煤层特点, 建立更多的适合于煤层气试井资料分析的试井模型及资料分析方法。

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] 冯文光. 煤层气藏工程[M]. 北京: 科学技术出版社, 2009.
- [2] 陈彦丽, 刘启国, 等. 浅析煤层气井与常规油气井在试井方面的差别[J]. 中国煤层气, 2006, 3(4).
- [3] Anbarci K, Ertekin T. A Comprehensive Study of Pressure Transient Analysis with Sorption Phenomena for Single Phase Gas Flow in Coal Seams. SPE 20568.
- [4] Ertekin T, Sung W. Pressure Transient Analysis of Coal Seams in the Presence of Multi-Mechanistic Flow and Sorption Phenomena. SPE 19102.
- [5] 刘曰武, 张大为, 陈慧新, 等. 多井开采条件下煤层气渗流规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1679- 1686.
- [6] 庄惠农, 韩永新. 煤层气层渗流与煤层气试井[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2000, (S1): 18- 21.

本文收稿日期: 2010- 12- 04 编辑: 穆立婷

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