

文章编号:1673-9035(2008)06-0026-05

世界页岩气资源与勘探开发技术综述

江怀友¹ 宋新民² 安晓璇³ 齐仁理⁴ 乔卫杰³ 董利娟⁵

(1.中国石油经济技术研究院 2. 中国石油勘探开发研究院 3. 中国地质大学(北京)
4. 大庆石油学院 5. 大庆油田有限责任公司)

摘要 在当前国际能源供需矛盾日益突出的形势下,页岩气资源勘探开发备受世界瞩目。在概述世界页岩气储量、产量的基础上,介绍了页岩气地质理论、勘探方法和开发技术,以及美国、加拿大和中国3个国家页岩气勘探开发的情况。

关键词 页岩气 储量 产量 勘探开发 勘探技术 地质理论

页岩气是指主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中,以吸附或游离状态为主要存在方式的天然气聚集。这是天然气生成之后在烃源岩层内就近聚集的结果,表现为典型的“原地”成藏模式。页岩气是目前经济技术条件下天然气工业化勘探的重要领域和目标^[1-2]。

一、世界页岩气资源

1. 页岩气储量

从全世界范围看,泥、页岩约占全部沉积岩的60%,页岩气资源前景巨大。全球页岩气资源量为 $456.24 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。主要分布在北美、中亚和中国、拉美、中东和北非、前苏联(表1)^[3-5]。

中国南方志留系地层中发育黑色页岩,演化程度高,可形成的页岩气资源潜力大。四川盆地为古生代海相沉积背景下形成的富含有机碳页岩,与美国东部地区页岩气发育盆地相似。四川盆地威远和泸州地区的页岩气资源潜力为 $(6.8 \sim 8.4) \times 10^{12} \text{m}^3$,相当于四川盆地的常规天然气资源总量。

中国松辽盆地白垩系、江汉盆地的第三系、渤海湾盆地、南华北、柴达木以及酒泉盆地均具有页岩气资源。

2. 页岩气产量

页岩气产量与储层性质有关。影响储层性质的因素有:储层内流体的流动;利于油气流动的孔喉

表1 世界主要地区页岩气储量表(10^{12}m^3)

地区或国家	页岩气储量
北美	108.79
拉丁美洲	59.95
西欧	14.44
中欧和东欧	1.10
前苏联	17.75
中东和北非	72.15
非洲 Sahara 地区	7.76
中亚和中国	99.90
太平洋(经济合作和发展组织)	65.50
亚太其他地区	8.89
南亚	0
世界	456.24

资料来源: OIL&GAS JOURNAL on line, 2007。

大小;水动力系统是否良好以及开采技术水平的高低。目前美国有页岩气井4 259口,年产量已跃升至 $(168 \sim 204) \times 10^8 \text{m}^3$,图1反映了美国近年页岩气井数增加的情况。预测2010年美国页岩气产量将占其

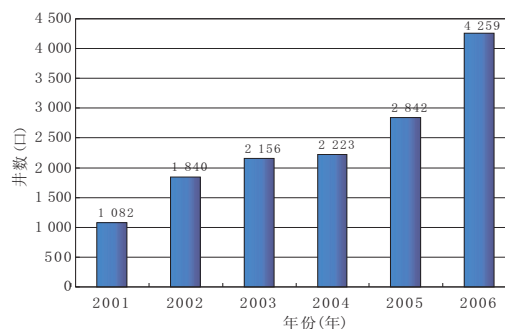


图1 美国近年页岩气井数变化图

* 本文受到中国石油科技重大专项“中国石油天然气可持续发展战略研究”(编号:2008D-5004)的资助。

作者简介: 江怀友, 1965年生, 硕士, 高级工程师; 毕业于大庆石油学院石油地质专业, 研究方向为油气勘探开发。地址: (100011)北京市安外安华里二区3号楼。电话: (010)64523253, 13426215091。E-mail: jianghuaiyou@cnpc.com.cn。

天然气总产量的13%。

二、页岩气勘探技术

1. 页岩气地质理论

页岩气藏因为页岩基质孔隙度很低,最高仅为4%~5%,渗透率小于 $1\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,因此,主要由裂缝提供其储气空间。

页岩在地层组成上多为暗色泥岩与浅色粉砂岩的薄互层。在页岩中,天然气的赋存状态多种多样,除极少量溶解状态的天然气以外,大部分均以吸附状态赋存于岩石颗粒和有机质表面,或以游离状态赋存于孔隙和裂缝之中。吸附状态天然气的赋存与有机质含量密切相关,其中吸附状态天然气的含量变化于20%~85%之间。页岩气介于煤层吸附气(吸附气含量在85%以上)和常规圈闭气(吸附气含量通常忽略为零)之间。页岩气成藏有着非常复杂的多机理递变特点,体现为成藏过程中的无运移或极短距离的有限运移。因此,页岩气藏具有典型煤层气、典型根缘气和典型常规圈闭气成藏的多重机理,如表2。

表2 页岩气与煤层气及天然气对比表

	页岩气	煤层气	天然气
成因类型	有机质热演化成因,生物成因	有机质热演化成因,生物成因	有机质热演化成因,生物成因,原油裂解成因
主要成分	甲烷为主,少量乙烷、丙烷等	甲烷为主	甲烷为主,乙烷、丙烷等含量变化较大
成藏特点	自生,自储,自保	自生,自储,自保	生、储、盖合理组合
分布特点	受页岩分布控制,有广布性	受煤层分布控制,有广布性	受生、储、盖组合控制
储集方式	吸附气和游离气并存,吸附气占20%~80%	吸附气为主,占80%以上	游离气为主
埋藏深度	200 m及以上,最浅8.2 m	风氧化带以下,一般大于300 m	一般大于500 m
资源潜力	不清	$37\times10^{12}\text{m}^3$	$44\times10^{12}\text{m}^3$
开采特点	排气降压解析开采	排水降压解析开采	自然压力开采

页岩气藏的形成是天然气在烃源岩中大规模滞留的结果。页岩气藏是“自生自储”式气藏,运移距离极短,其现今保存状态基本上可以反映烃类运移的状况,即天然气主要以游离相、吸附相和溶解

相存在。在生物化学生气阶段,天然气首先吸附在有机质和岩石颗粒表面,饱和后则富余的天然气以游离相或溶解相进行运移。当达到热裂解生气阶段,由于压力升高,若页岩内部产生裂缝,则天然气以游离相为主向其中运移聚集,受周围致密页岩烃源岩层遮挡、圈闭,易形成工业性页岩气藏。由于扩散对气态烃的运移能起到相当大的作用,天然气继续大量生成,会因生烃膨胀作用而使富余的天然气向外扩散运移,故此时不论是页岩地层本身还是薄互层分布的砂岩储层,均表现为普遍的饱含气性。

在陆相盆地中,湖沼相和三角洲相沉积产物一般是页岩气成藏的最好条件,但通常位于或接近于盆地的沉降—沉积中心处,导致页岩气的分布有利区主要集中于盆地中心处。从天然气的生成角度分析,生物气的产生需要厌氧环境,而热成因气的产生也需要较高的温度条件,因此靠近盆地中心方向是页岩气成藏的有力区域^[6](图2、表3)。

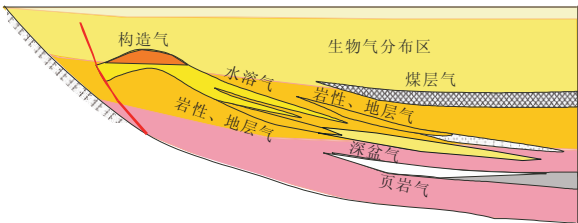


图2 页岩气成藏的有利区域图(据李玉喜,2007)

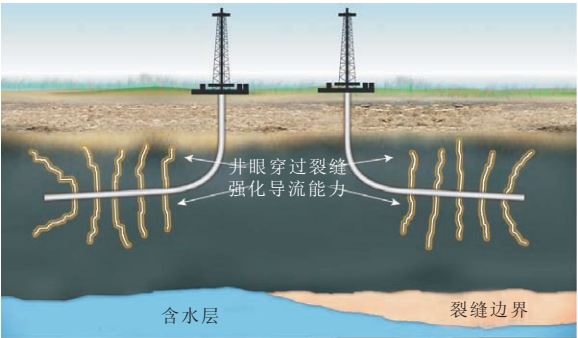


图3 水平井开发页岩气层图

2. 页岩气勘探方法

页岩气勘探方法有地质、地球物理、地球化学勘探、钻井等方法,采用多学科综合勘探是页岩气勘探发展方向。

3. 页岩气开发技术

由于页岩气藏的自身特性,页岩气只有在某些

表3 页岩气成藏模式(据葛岩,2007)

国家	页岩	盆地	地区	TOC (%)	吸附气(%)	Po (%)	天然气类型
美国	Barnett组	Fort Worth	密西西比系	1~12	40~60	0.6~1.6	热解气
美国	Ohio组	Appalachian	泥盆系	1~4.5	50	0.4~1.3	热解气
美国	Antrim组	Michigan	泥盆系	1~20	70~75	0.4~0.6	热解气
美国	New Albany组	Illinois	泥盆系	1~25	40~60	0.4~1.0	热解气
美国	Lewis组	San Juan	白垩系	1~2.5	60~85	1.6~1.9	热解气—生物气
加拿大	White Speckled组	加拿大西部盆地(WCSB)	白垩系	1~11.9	—	未成熟至过成熟	热解气
中国	龙马溪组	四川盆地	志留系	0.5~4	—	2.0~4.5	热解气干气

特定条件下才能被开采出来。美国地质调查局(USGS)认为,页岩气产自连续的气藏。USGS列举了16个特征,所有这些特征都可能在连续气藏中出现。与含气页岩有关的独特特征包括区域性分布、缺少明显的盖层和圈闭、无清晰的气水界面、天然裂缝发育、最终采收率低于常规气藏,以及极低的基岩渗透率等。此外,其经济产量在很大程度上还依赖于完井技术^[7-9]。

页岩气是充填于页岩裂隙、微细孔隙及层面内的天然气,其储层的渗透率低、气流的阻力比传统天然气大得多,从而难以开采。开采页岩气层需要采取某种增产措施和特殊的钻井与完井方法,目前多采用水平井或斜井开采,斜井钻进是开发透镜状气藏可选择的最佳方法,而水平井将成为开发边缘海相和海相席状砂岩的最佳方法。

岩石内必须具备足够的通道以使天然气流入井筒。在页岩中,气源岩中裂缝引起的渗透性在一定程度上可以补偿基质的低渗透率。因此,将页岩作为开采目标的作业者应事先考虑系统渗透率,即包含页岩基质和天然裂缝的综合渗透率。为了更好地利用储层中的天然裂缝,并且使井筒穿越更多储层,越来越多的作业者都在应用水平钻井技术(图3)。该技术在石油工业中并不是一项新技术,但它对提高页岩气开发成功率却有着重大的意义。从水平井中获得的最终采收率是直井的3倍,而费用只相当于直井的2倍。

采用三维地震解释技术设计水平井轨迹(图4)。由于采用了该技术,作业者将页岩钻井扩展到那些原来被一直误认为没有产能、含水且位于页岩下方的喀斯特白云岩区域。一般情况下,作业者通过沿垂直于最大水平应力方向钻井的方法来增加井筒与裂缝连接的可能性,从而打开更多的页岩表面进行

开采。但是,常规的定向钻井技术可能受到扭矩和阻力的影响,而扭矩和阻力通常是井筒造斜过程中由滑动和旋转所造成的。在更复杂的井眼轨迹中,扭矩和阻力可能限制横向位移,加大测井难度。为了避免上述问题的发生,在开采较直且曲折度不大的井时,可采用旋转导向系统。在某些情况下,从水平段底部到顶部的倾角变化低于0.5°。

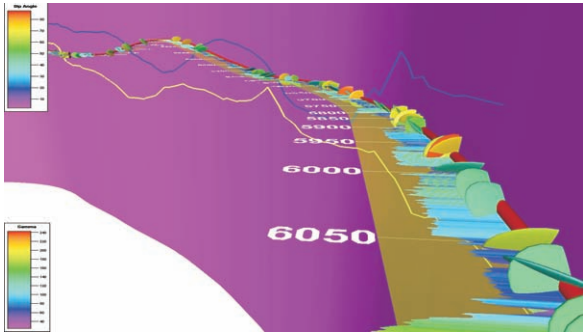


图4 应用三维地震解释技术设计水平井轨迹图

随钻成像测井系统已被应用于解决水平井测井存在的一些问题。应用该系统可以在整个井筒长度范围内进行电阻率成像和井筒地层倾角分析。成像测井提供构造信息、地层信息和力学特性信息,用于优化完井作业。成像能够将地层天然裂缝和钻井诱发裂缝进行比较,帮助作业者确定射孔和油井增产的最佳目标。利用测井得到的成像资料来识别地震资料无法识别的断层以及与之相关的从下伏喀斯特白云岩中产水的天然裂缝群。在进行加密钻井时,井眼成像有助于识别邻井中的水力裂缝,从而帮助作业者将注意力集中在储层中原先未被压裂部分的增产措施上。井中是否存在钻井诱发裂缝以及裂缝的方向如何,对确定整个水平井的应力变化及力学特性非常有用,而且在减轻页岩完井难度及降低相关费用方面也起到一定作用(图5)。

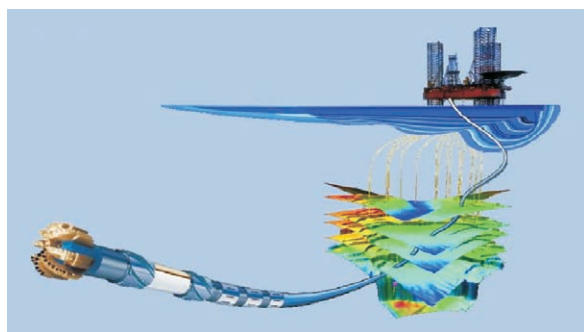


图5 应用随钻测井系统优化完井设计图

裂缝的发育程度是页岩气运移聚集、经济开采的主要控制因素之一,图6为页岩气储层裂缝模型。仅有少数天然裂缝十分发育的页岩气井可直接投入生产,其余90%以上的页岩气井需要采取压裂等增产措施沟通其天然裂缝,提高井筒附近储层导流能力。FortWorth盆地Barnett组页岩埋藏较深,地层压力较高,其开发历程印证了钻采技术的不断更新: N_2 压裂、泡沫压裂、凝胶压裂、清水压裂、水平井钻探技术。

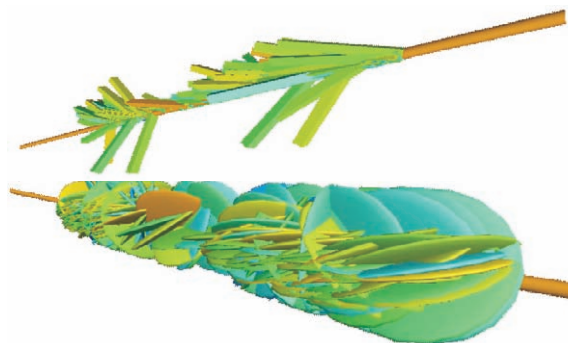


图6 页岩气储层裂缝模型图

页岩储层改造技术要求针对页岩储层特点优选压裂层位和施工工艺,才能取得比较好的开发效果和经济效益。对于埋藏较浅、地层压力较低的储层通常采用 N_2 泡沫压裂。清水压裂的压裂液中一般已加入适量抑制剂,但仍要求储层中膨胀性蒙脱石含量不能很高,原因是其水敏性强,遇水易膨胀、分散和运移,导致岩石渗透率下降,所以利用X—衍射和SEM测试结果分析黏土矿物的类型和含量十分必要。

三、页岩气勘探开发热点国家

随着非常规气体勘探开发技术的发展,非常规气的产量在天然气总产量中所占比重将有望从2000

年的35%提高到2012年的54%。

1. 美国

2007年美国天然气产量增长的主要来源为页岩气(见图7),增长率为20%,其他产量则有所下降。

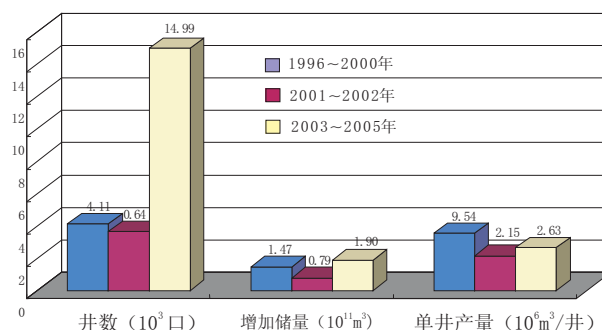


图7 美国近年页岩气储量增长情况图

2005年,北美的Barrent盆地页岩气产量为 $1.3 \times 10^4 m^3$,其中水平井产量较高,将近60%的产量来自于EOG、XTD以及边缘资源。开发技术不断提高,同时“技术实验室”也推动着页岩气的发展。Antrim盆地页岩气总产量为 $4.07 \times 10^8 m^3$; Appalachisn盆地产量将近 $1.35 \times 10^8 m^3$; Arkoma盆地当年钻页岩气井数较少,但产量却增加了 $5.94 \times 10^7 m^3$ 。

美国Barrent地区的页岩气产量逐年增长,特别是2002年以后发展迅速,2007年已达到 $1.84 \times 10^{12} m^3$ 。美国页岩气进一步的勘探开发方向为北部地区,预计维吉尼亚页岩气有望稳步增长。

2. 加拿大

对加拿大西部沉积盆地(British Columbia东部和Alberta地区)上白垩统Wilrich组及其同时代地层、侏罗系Nordegg/Fernie组、三叠系Doig/DoigPhosphate/Montney组、Exshaw/Bakken组和泥盆系Ireton/Duvernay组开展页岩气勘探潜力评价,预测该区页岩气资源量约为 $24 \times 10^{12} m^3$ 。加拿大非常规天然气协会(CSUG)认为西部(包括British Columbia北部Bowser盆地)Colorado页岩段、侏罗系及古生界页岩和东南部的泥盆系页岩具有开发的潜力。British Columbia油气委员会已核准的白垩系和泥盆系页岩气试验区块共计22个。

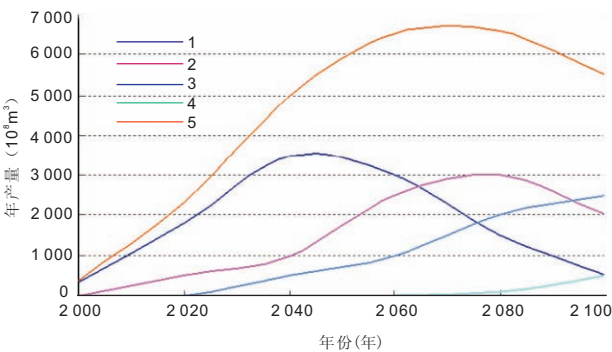
西加拿大沉积盆地页岩气产量达到 $(1.13 \sim 1.42) \times 10^8 m^3$,2008年将有望突破。

2008年3月,在北美洲东北部的哥伦比亚北部

偏远地区发现了一套泥盆纪的页岩气藏,该地区有望成为北美洲最大的储气盆地。该区带的Muskwa页岩分布于卡尔加里东北部的合恩河盆地,面积为 $5.67\times 10^8\text{ m}^2$,预计含气资源量为 $1.98\times 10^{12}\text{ m}^3$,是约翰逊县Barnett页岩的2.5倍。Muskwa页岩和Barnett页岩的埋藏深度相当,但厚度更大,渗透率更好,地质构造更简单且不含水。

3. 中国

中国页岩气具有良好的勘探前景,中国对页岩气的勘探研究也在逐步展开。在四川、鄂尔多斯、渤海湾、松辽、江汉、吐哈、塔里木和准噶尔等盆地均有页岩气成藏的地质条件。图8为中国页岩气产量预测图^[10]。



1为常规天然气;2为煤层气、致密砂岩气、生物气、无机气;3为页岩气、水溶气;4为天然气水合物;5为天然气总量

图8 中国页岩气产量预测图(据范柏江,2007)

四、结论与认识

页岩气是指主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中,以吸附或游离状态为主要存在方式的天然气聚

集。页岩气储层孔隙度一般为4%~5%,渗透率小于 $10\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。世界范围内泥岩与页岩约占全部沉积岩的60%,页岩气资源前景巨大,其资源量为 $456.24\times 10^{12}\text{ m}^3$,主要分布在北美、中亚、中国、拉美、中东、北非和前苏联。

页岩气产量与储层性质有关。储层内流体可否流动,是否具有利于油气流动的大孔喉和良好的水动力系统与先进的开采技术,是影响页岩气产量的重要因素。

开采页岩气层需要采取相应的增产措施和特殊的钻井和完井方法。采用水平井或斜井开采,斜井钻井是开发透镜状气藏的最佳方法,而水平井将成为开发边缘海相和海相席状砂岩的最佳方法。

参考文献

[1] Exxon Annual Report 2006[R]. Exxon, 2006.
[2] Mobil Annual Report 2007[R]. Mobil, 2007.
[3] BP Annual Report 2007[R]. BP, 2007.
[4] Chevron Annual Report 2007[R]. Chevron, 2007.
[5] ChevronTexaco Annual Report 2007 [R]. ChevronTexaco, 2007.
[6] 李玉喜. 我国非常规油气资源类型和潜力[R]. 国土资源部, 2007.
[7] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. 石油勘探与开发, 2007, 8(4):392-400.
[8] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 15-18.
[9] 孙超, 朱筱敏, 陈菁, 等. 页岩气与深盆气成藏的相似与相关[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(1): 26-31.
[10] 范泊江. 中国非常规天然气资源及前景分析[R]. 中国石油大学, 2007.

(修改回稿日期: 2008-09-09 编辑: 陈钰)

★小资料

1965~2005年世界人均天然气消费量 (m³/人)

国家或地区	1965年	1975年	1985年	1995年	2000年	2005年
世界	212.0	295.0	346.7	380.4	401.8	427.1
经合组织	651.4	889.4	889.3	1 094.3	1 196.3	1 214.5
非经合组织	66.2	120.3	204.2	210.4	219.8	252.8
美国	2 468.8	2 565.6	2 099.0	2 396.0	2 372.9	2 136.6
日本	20.2	79.5	326.3	487.9	590.4	633.8
中国	1.3	10.6	12.1	14.4	18.8	36.0
印度	0.4	1.5	5.1	20.8	26.5	33.4

资料来源:世界银行, BP《能源统计》

inactive in sandstone without shaly band, coal and snail shell, and seismic bright spot is interrupted by gravel bed. A comprehensive analysis indicates that this accumulation condition of main lithologic trap in the area is poor. So, its exploration risk is big.

KEY WORDS: Luliang Basin Hydrocarbon-generating center Migration Trap Fault Unconformity surface

The Effect of Rock Stress Sensitivity on Well Deliverability in Sulige Gasfield

By LUO Rui-lan, ZHU Hua-yin, WAN Yu-jin, WANG Jin-di

ABSTRACT: The permeability of rock samples from Sulige gasfield was tested at various overburden pressure. The deformation characteristics of low-permeability rock samples in overburden pressure experiments were discussed. Based on experimental and theoretical studies, the well deliverability equation in which rock stress sensitivity had been taken into consideration was established. Combined with the actual reservoirs in Sulige gasfield, the effect of rock stress sensitivity on well deliverability has been evaluated.

KEY WORDS: Stress sensitivity Sulige gasfield Gas well Deliverability equation

Application of Gas-lift Drainage Gas Recovery to Water-control Treatment in Carboniferous Gas Reservoirs, Eastern Sichuan Basin

By WANG Qiang, WEN Shao-mu, YOU Jian-guo, LIANG Bing

ABSTRACT: Gas-lift drainage gas recovery has been more and more widely applied to water-control treatment in Carboniferous gas reservoirs in Eastern Sichuan Basin and has achieved good results in protecting the reservoirs, prolonging the gas production period without water and enhancing the recovery efficiency. Based on analysis of high-pressure drainage gas recovery in Tiandong 90 well and Chi 27 well, results and existing problems during gas recovery have been summarized, and some relevant suggestions have also been proposed. These provide an experience and a technical support for drainage gas recovery in other wells.

KEY WORDS: Drainage gas recovery Gas-lift Technology Carboniferous Application

Global Shale Gas Resources and Its E & P Technologies

By JIANG Huai-you, SONG Xin-min, AN Xiao-xuan, QI Ren-li, QIAO Wei-jie, DONG Li-juan

ABSTRACT: An E & P of shale gas resources become attractive in the world even though an imbalance between the demand and supply of global energy are increasingly prominent. This paper at first summarizes the global shale gas reserves and production; and then presents the geological theory and its E & P technologies; at

last illustrates the E & P in USA, Canada and China.

KEY WORDS: Shale gas Reserves Production E & P Exploration technology Geological theory

Adsorption Property of High-rank Coal

By MA Jing-chang, WANG Bo, LIU Fei, LIU Hong-lin, LI Gui-zhong, ZENG Liang-jun

ABSTRACT: Utilizing the relative data and isothermal adsorption test for coalbed methane in Qinshui Basin, this paper analyzes the adsorption property of high-rank coal and its influencing factors. The analysis indicates: the adsorptivity of coal is affected by temperature and pressure; the adsorptivity of coalrock decreases with an increase of water content; Langmuir pressure enhances along with the increase of vitrinite reflectance under a certain condition. Finally, coal rank and microcomponent are considered as the main influencing factors on the adsorption property of high-rank coal in Qinshui Basin.

KEY WORDS: Qinshui Basin Coalbed methane High-rank coal Adsorption property Influencing factors

Layerwise Sand-packed Fracturing for Coiled Tubing in Straight Well and Multi-layer Interval

By YIN Cong-bin, YE Deng-sheng, LI Guo-qing, WEN Hao ZHONG Shui-qing

ABSTRACT: In recent years, as a new stimulation innovation, the coiled-tubing fracturing has been applied gradually to fields. Constrained with its pipelines, tools and fluid system, the application has a limitation to sand fracturing. Integrating states of the imported coiled tubing with large size and the storage and development of coiled tubing fracturing, avoiding the technical and economic constraints on both separate-layer and jet fracturing of abroad straddle packer, this study discovers under present technical conditions the feasibility of layerwise sand-packed fracturing implemented in straight well, perforated interval and multilayer interval using coiled tubing with single packer. Moreover, the process flow and key technical requirement have been initially proposed.

KEY WORDS: Coiled tubing Fracturing Process flow Technology

Grain-size Optimization of Proppant Slug

By LUO Tian-yu, ZHAO Jin-zhou, WANG Jia-huai, PAN Jing-jun, LUO Yao

ABSTRACT: Slug technology is one of the effective treatments for early sand plug in oil-gas wells. It's very important to optimize the grain size for slug to decrease both filtration and fracture number. According to the criterion that proppant can get into fracture, this paper analyzes some problems need to be considered