

国外页岩气勘探开发综述

胡进科 李 皋¹ 陈文可² 姚 远³ 蒋延娜⁴

(1.西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,成都 610500;

2.中石化江苏油田钻井处泥浆公司,扬州 225263; 3.中石化胜利油田钻井泥浆公司,东营 257064;

4.中石化西南石油局地质录井公司,绵阳 621605)

摘 要:美国是世界上勘探开发页岩气最成功的国家,主要采用水平井+水力压裂进行开发。调研表明,页岩气资源量约占全球非常规天然气资源量的一半。国外页岩气勘探主要采用三维地震和微地震技术优化设计,已形成一套资源评价系统。国外钻井选择直井和水平井两种方式。完井储层改造多采用裸眼、筛管等完井方式,配合大型水力压裂改善页岩的超低渗透率。

关键词:页岩气;钻井;完井;储层改造

中图分类号:TE132

文献标识码:A

文章编号:1673-1980(2011)02-0072-04

页岩是一种渗透率极低的沉积岩,通常被认为是油气运移的天然遮挡。在含气油页岩中,天然气产自其中,页岩既是气源岩,又是储层。天然气可以储存在页岩岩石颗粒之间的孔隙空间或裂缝中,也可以吸附在页岩中有机物的表面上。我国页岩气勘探开发起步较晚,尚有待进一步发展完善。美国是世界上勘探开发页岩气最成功的国家。在此我们对国外页岩气勘探开发现状进行分析,以资借鉴。

1 资源量概况

从全球范围来看,页岩气拥有巨大的资源量。据统计,全世界的页岩气资源量约为 $456.24 \times 10^{12} \text{m}^3$,相当于致密砂岩气和煤层气资源量的总和,具有很大的开发潜力,是一种非常重要的非常规资源^[1]。页岩气资源量占3种非常规天然气(煤层气、致密砂岩气、页岩气)总资源量的50%左右,主要分布在北美、中亚和中国、中东和北非、拉丁美洲、前苏联等地区,与常规天然气相当。页岩气的资源潜力甚至还可能明显大于常规天然气。世界各地区非常规天然气分布和资源量情况如表1和图1所示,图1中 $1 \text{tcf} = 2.8317 \times 10^{10} \text{m}^3$ 。

表1 世界各地区非常规天然气资源量分布情况 m^3

地 区	页岩气	煤层气	致密砂岩气	合 计
北 美	108.7×10^{12}	85.4×10^{12}	38.8×10^{12}	232.9×10^{12}
拉丁美洲	59.9×10^{12}	1.1×10^{12}	36.6×10^{12}	97.6×10^{12}
中欧+西欧	15.5×10^{12}	7.7×10^{12}	12.2×10^{12}	35.4×10^{12}
前苏联	17.7×10^{12}	112.0×10^{12}	25.5×10^{12}	155.2×10^{12}
中东+非洲	79.9×10^{12}	1.1×10^{12}	45.5×10^{12}	126.5×10^{12}
中亚+中国	99.8×10^{12}	34.4×10^{12}	10.0×10^{12}	144.2×10^{12}
太平洋地区	65.5×10^{12}	13.3×10^{12}	20.0×10^{12}	98.8×10^{12}
其他亚太地区	8.9×10^{12}	1.1×10^{12}	21.0×10^{12}	31.0×10^{12}
全世界	456.0×10^{12}	256.1×10^{12}	209.6×10^{12}	921.7×10^{12}



图1 页岩气全球资源分布情况

2 勘探开发情况

2.1 勘探

勘探方面主要采用地震勘探技术。高分辨率三维地震技术有助于准确认识复杂构造、储层非均质

收稿日期:2010-11-29

基金项目:国家重大专项(2008ZX05022-005)

作者简介:胡进科(1985-),男,四川合江人,西南石油大学在读硕士研究生,研究方向为页岩气储层保护理论与技术、欠平衡钻完井。

性和裂缝发育带,主要是通过相干分析技术、地震属性分析、层间切片等预测页岩裂缝以提高探井(或开发井)成功率。微地震裂缝技术可用于预测裂缝生成方向,以及优化水力压裂设计和裂缝走向,改善水平井水力压裂评估^[2]。微地震裂缝技术分析数据如图2所示(图中1ft=304.8mm)。

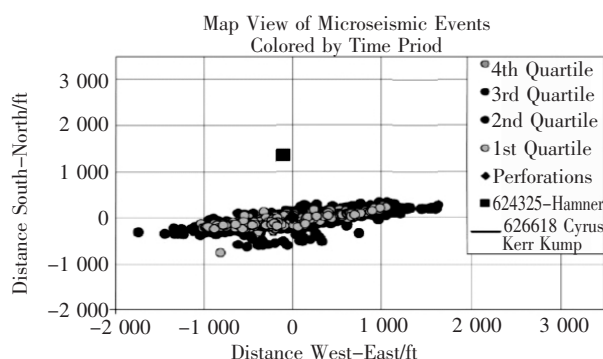


图2 微地震裂缝监测技术分析图

资源评估方面主要考虑地质、技术的不确定性,不同勘探开发阶段适用的方法有所不同。Forspan法可用于连续型页岩气藏^[3],如美国Appalachian盆地泥盆系页岩气藏,通过统计已有开发数据资料来预测剩余资源潜力。美国现已形成一套页岩气资源评价系统,如图3所示。

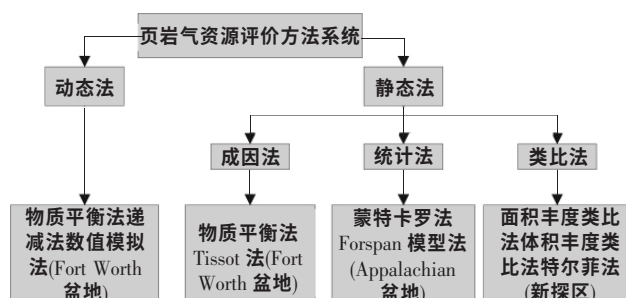


图3 美国页岩气资源评价方法系统

2.2 钻井

国外页岩气藏主要有直井和水平井两种钻井方式。一般情况下,若页岩储层为水平裂缝,主要采用垂直井。若页岩储层为垂直裂缝,多采用水平井,形式包括单支、多分支和羽状水平井等。直井与垂直裂缝相交的机会较少。水平井在裂缝性气藏中得到应用,不仅钻遇更多的裂缝,还能明显改善储层流体的流动状况。与直井相比较,水平井中同一储层、相同压力下产气量有大幅提高。水平井应钻在裂缝带上。水平井井位和水平井眼方位的选择由岩层中裂缝的发育方向和密集程度确定。两种钻井方式选择

如图4所示。

在泥页岩层中钻进时,泥页岩裸眼井段容易变形而使井下情况较复杂,通常是在钻入水平井眼前下入一层技术套管封固上部地层。在钻开泥页岩层时应当主要考虑打开储层时的防污染、防泥页岩层变形等问题。泥页岩储层的裂缝较易堵塞。裂缝张开的程度较小时,主要是液相沿张开的裂缝进入地层;裂缝张开较大时,不仅钻井液中的液相侵入裂缝,而且固相也会沿张开的裂缝进入地层。进入裂缝的液相和固相形成坚硬的、低渗透的、稳定的阻碍物质。裂缝并不总是敞开的,在一定的条件下也会闭合。钻开储层,形成井眼后,岩石内的应力会重新分布。岩石的新应力分布状态受到岩石的上覆压力、流体压力和渗流载荷大小的影响。作用在井壁岩石上的轴向和径向应力比未钻开岩石上的相应应力减小,因此需要用钻井液的液柱压力来弥补。

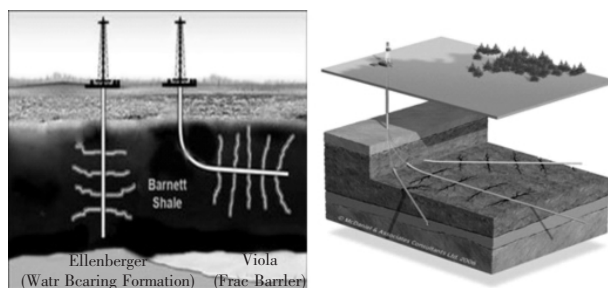


图4 水平井和直井

在水平井钻井中采用了旋转钻井导向工具(RSS),有许多技术优势:可使用先进井下工具;井眼质量好;可下生产套管;运行中可转向;水平段更长;开采周期更长;使用近钻头传感器。旋转导向技术不允许每30m全角变化率大于 $8^{\circ}\sim 10^{\circ}$,可钻更长的水平段。在某些成熟、稳定、地层相对干燥的区块,气体钻井比较常用,机械钻速成倍提高。气动震击钻井/金刚石硬齿合金钻头钻井方式(空气压缩机、燃料、冲击锤、冲击钻头、技术监督)的相关费用可通过泥浆和使用较少的牙轮钻头、稳定作用或泥浆马达节省的费用来弥补。用于非常规气藏的实时井眼成像、随时需要的欠平衡技术、CT管钻井技术和多分支井技术预计将于2030年得到有效利用。Halliburton采用有效的井底钻具组合(BHA)应对复杂的钻井情况穿越更长的水平段,研究测井数据和协调Haynesville区域的地质力学使用高级“fit-for-purpose”钻头对非生产时间进行最小化,以延长钻头寿命,使平均钻井周期由100d降至最少35d。

美国宾夕法尼亚州Ohio页岩钻直井成本约80~130万美元,水平井钻井成本约为300~400万美元。钻井承包商必须考虑产出能否大于投入的费用。采用垂直井只能钻开15m的储层,而水平井眼的钻进长度可达600~1 800m,从而可以钻开厚度为15~90m的储层。与常规气井相比较,页岩的渗透率较低,垂直井相互间的位置更加靠近才能有效采出资源。这就导致在0.16km²或者更小的面积上需要一口垂直井来开采致密页岩中的天然气。另外,水平井可以很大程度上减少总的井眼数量、道路数量、管道数量以及生产设备,因此可以减少对生物栖息地的破坏,降低对居民生活的影响。水平井钻井技术已经成为钻大多数泥页岩气体的最佳选择^[2]。

2.3 完井与储层改造

裂缝储层中的水平井完井多采用裸眼、筛管、衬管、封隔器等完井方式。在短半径水平井或多底、分支水平井中,考虑到套管弯曲应力的限制和多根完井管柱的干扰,一般尽量采用裸眼或裸眼变种的完井方式。当地层不能满足裸眼完井的条件时,在裸眼内也会使用封隔器封堵薄弱层位,或下入不注水泥的筛管或衬管以支持薄弱地层。密歇根盆地Antrim页岩气大部分以吸附态赋存于页岩中,而其储层渗透率低,既要通过完井技术提高其渗透率,又要避免地层损害,这是施工的关键,直接关系到页岩气的采收率。Halliburton集合连续钻井和高质量的储层评估数据,采用HT-2000TM增产单元(特别的设备和完井液)来优化完井效率,提高生产效率。哈里伯顿公司研制的两项技术——滑套完井和连续油管压裂,扩大了完井和压裂技术的应用范围,使套管完井水平井压裂更加有效。滑套完井技术应用于水平段套管完井压裂中。该技术可以在最少或没有修井作业的情况下,经济有效地进行多层完井。其中使用了两项最新发明的工具——增产套和膨胀封隔器,可以在同一井筒内打开或关闭选定的一个或多个层位(如图5所示)。连续油管压裂技术包含一套无封隔高压水射流底部钻具组合(BHA),可以压裂多个层段,相比传统工艺速度更快、操作风险。滑套完井系统和连续油管压裂装置都已经通过现场测试,可以对水平井套管完井水平段进行准确压裂。如图6所示,斯伦贝谢采用纤维压裂改造储层,优化压裂设计,提高页岩气采收率^[4]。

水力压裂是页岩气开采中的一项关键技术。水

力压裂是提高产层渗透率的增产措施,可以克服流体流入井眼过程中的天然阻力。这些阻力包括页岩地层通常具有的低渗透率或者钻井活动中引起的井眼附近渗透率降低。水力压裂包括计算泵入地层压裂液的量、预测目的层中生成裂缝的成功率和压力。在页岩气开发过程中,压裂液主要由水基流体与添加剂组成,这些添加剂用于帮助水携带压裂支撑剂进入裂缝。当压裂泵不再泵入压裂液时,砂岩支撑剂需要支撑已打开的裂缝。一旦裂缝形成,添加液被泵入井眼而使得裂缝继续发育,并将支撑剂带入更深的地层中。添加液需要保持必要的井底压力,以适应地层中开放性裂缝长度的日益增长。

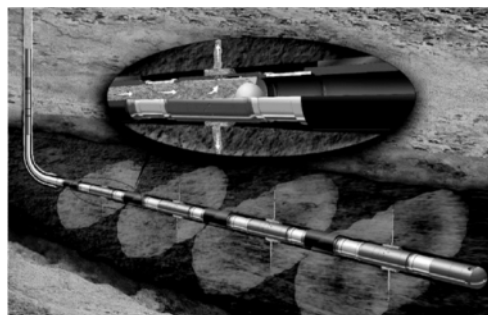


图5 哈里伯顿Pinpoint Stim完井技术

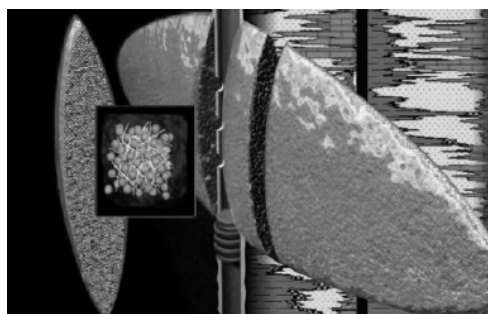


图6 基于纤维机理的支撑剂充填层

岩层的各向异性导致不同的地层有不同的破裂压力。水力压裂设计过程包括确定目的层的各种特性,其中包括破裂压力和符合要求的裂缝长度。水力压裂方法是一个对目的层特殊情况(页岩的厚度,岩石的破裂特性,等等)都可以控制的过程。油田增产成功的重点是了解现场储层情况及其动力学性质。水力压裂设计不断改进,以优化裂缝网络 and 实现气体产量的最大化。虽然各种压裂的理论和方法都很相似,但是每个盆地和每口井的压裂细节不同。在水平井中,对水平段尾部进行多次压裂处理时,要控制好压裂过程。对水平段非连续层段分别进行压裂,操

作员需要根据实际地层的特殊变化,对完井段每一段压裂进行调节。地层特殊差异包括:页岩厚度不同;有无天然裂缝;破裂系统相似与否;井眼是否偏离地层中心点。水力压裂的关键在于压裂液需加入一些特殊的添加剂,如特殊的降阻剂(不含苯酚)、微乳化表面活性剂、裂缝清洁加强剂和导流增强剂等,以改善页岩气层本身超低的渗透率,提高导流性,降低储层损害,压裂液添加剂主要成分如表2所示。需要注意的是,页岩储集层改造技术的应用始终不能脱离地质条件的约束,要针对页岩储集层特点优选压裂层位和施工工艺,才能取得比较好的开发和经济效益^[5]。阿科马盆地Woodford页岩完井主要采用同

步压裂,相隔152~305m钻两口水平井,然后同时对两口水平井进行压裂,能有效产生裂缝网络,提高最终采收率,节约成本。最初水平井的压裂阶段一般采用单段或两段,目前已增至9段或更多^[2]。如美国新田公司位于Woodford页岩气聚集带的Tipton21-H223井,经过7段水力压裂措施改造后,增产效果显著,页岩气产量高达 $14.16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[6]。水平井水力多段压裂技术的广泛运用,使原本低产或无气流的页岩气井更具工业价值,极大地延伸了页岩气开采范围。开发后期当页岩气井初始压裂改造已经失效,或现有的支撑剂因时间关系损坏或质量下降,而导致气体产量大幅下降时,可重复压裂重建储层到井眼的

表2 压裂液添加剂主要成分和常规用途

添加剂类型	主要成分	目的	主要成分的常规用途
稀酸(15%)	盐酸	溶解矿物,形成最初裂缝	泳池化学剂和清洁剂
杀虫剂	戊二醛	在水中产生腐蚀性副产品消除细菌	消毒剂,用于医疗和牙科设备的消毒
破碎剂	过硫酸铵	延迟打破凝胶聚合物链	漂白剂和头发化妆品,家用塑料制造剂
溶蚀抑制剂	二甲基甲酰胺	防范管柱的腐蚀	用于制药,丙烯酸纤维,塑料
交联剂	硼酸盐	温度上升时,保持液体粘度的稳定	洗涤剂,肥皂和化妆品
降摩剂	聚丙烯酰胺	减少液体和管柱之间的摩擦	水处理,土壤调理剂
	矿物油		卸妆,泻药,和糖果
凝胶	瓜尔豆胶或羟乙基纤维素	增厚水,以延缓排砂	化妆品,牙膏,酱油,烘焙食品,冰淇淋
铁控剂	柠檬酸	防止金属氧化物沉淀	食品添加剂,食品和饮料调味品,柠檬果汁(7%柠檬酸)
KCl	氯化钾	形成盐水传递液	低钠食盐替代品
除氧剂	亚硫酸氢铵	出去水中的溶解氧,保护管柱免于腐蚀	化妆品,食品和饮料加工,水处理
pH值调节剂	碳酸钾或碳酸钠	保持化学成分的有效性,比如交联剂	洗涤苏打水,洗涤剂,肥皂,水软化剂,玻璃,陶瓷
压裂支撑物	二氧化硅或石英砂	促使亚裂缝张开,使气体通过	饮用水过滤,沙砾,水泥,砖砂浆
阻垢剂	乙二醇	防止水垢沉积在管柱上	汽车防冻液,家用清洁剂和去除冰剂
表面活性剂	异丙醇	增加压裂液的粘度	玻璃清洗剂,止汗剂,发色

备注:在给定的压裂施工中选用特定的化学成分,这取决于公司的偏好及水源质量和特定地点的目标地层。上面的化合物是天然气页岩水力压裂所用主要化合物的代表。

线性流,恢复或增加生产产能,估计最终采收率可提高8%~10%,可采储量增加60%。

3 结 论

(1)国外页岩气藏勘探开发过程中,主要采用水平井+水力压裂模式进行勘探,集合了先进的技术和工具。水平井是现阶段钻井的主流选择,结合欠平衡钻井技术(气体钻井),注重良好的储层保护。页岩储集层改造技术的应用始终不能脱离地质条件的约束,改善页岩的超低渗透率是增产改造的重点。

(2)页岩气藏的勘探开发,地质和工程应该密切配合。针对页岩气而言,工程因素略大于地质因素,国内可学习国外先进的勘探开发技术和经验,结合国内储层情况加以优化,形成国内页岩气藏勘探开发的一套方法。

参考文献

- [1] Perry K, Lee J. Unconventional Gas Reservoirs-Tight Gas, Coal Seams, and Shale [R]. Working Document of the NPC Global Oil and Gas Study,2007.
- [2] Ground Water Protection Council. Modern Shale Gas Development in the United States -- a Primer [R]. Washington, D.C: The U.S. Department of Energy, 2009.
- [3] USGS. Forspan Model Users Guide [G]. USGS, 2003.
- [4] Frantz J H, Jochen V, Holditch S, et al. Shale Gas White Paper[R]. Schlumberger, 2005.
- [5] Bowker K A. Barnett Shale Gas Production, Fort Worth Basin: Issues and discussion [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91 (4): 523 - 533.
- [6] 《页岩气地质与勘探开发实践丛书》编委会. 北美地区页岩气勘探开发新进展[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.

(下转第 83 页)

SHU11进行全元素连续测定。需特别注意的是,微波消解压力不能高于0.5MPa,否则部分Si以氧化物的形式析出,使Si的测定结果偏低;但微波消解压力也不能低于0.3MPa,否则碳化物溶解不完全,Cr的测定结果会偏低。

3 结 论

研究表明,用微波消解技术结合ICP-AES连续测定耐热钢4Cr10Si2Mo中Si、Cr、Mo等3种元素,与传

统酸解法处理样品相比,不但结果基本一致,而且微波消解更具有快速、高效、试剂用量少、不易沾污、减少了酸气对分析人员的伤害等优点,能满足金属材料分析的要求。

参考文献

- [1] 但德忠.分析测试中的现代微波制样技术[M].成都:四川大学出版社,2003:34-35.
- [2] 辛仁轩.等离子体发射光谱分析[M].北京:化学工业出版社,2005:160-165.

Research on Microwave Digestion ICP-AES Method to Determine Si, Cr, Mo of Heat-resistant Steel with High Silicon

PENG Rong-Hua¹ ZHOU Xi-lin² JIANG He³

(1.Chongqing Tiantai Aluminum Industry Corporation,Chongqing 401328;2.Physical and Chemical Center of Chongqing Zongshen Engine Manufacture Co., Ltd., Chongqing 400054;
3.Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331)

Abstract: Combined with ICP-AES method, this article uses the microwave digestion sample techniques to determines Si, Cr, Mo, etc in heat-resistant steel 4Cr10Si2Mo. The research shows that compared with traditional acid hydrolysis method, the method has advantages of fast, efficient, clean, less pollution and a continuous analysis, etc., which completely meets the requirements of the metal material analysis. This method shall also analyze elements of heat-resistant steel SUH1 and SHU11.

Key words: microwave digestion; ICP-AES; heat-resistant steel

(上接第 75 页)

Review on Overseas Exploration and Exploitation of Shale Gas

HU Jin-ke¹ LI Gao¹ CHEN Wen-ke² YAO Yuan³ JIANG Yan-na⁴

(1.State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500;2.Slurry Company of Jiangsu Oilfield Drilling Department, Sinopec, Yangzhou 225263;
3.Drilling Slurry Company of Shengli Oilfield, Sinopec, Dongying 257064;4.Geological Logging Company of Southwest Petroleum Bureau, Sinopec, Mianyang 621605)

Abstract: The United States is the most successful country about shale gas exploration and exploitation, which makes exploitation mainly by horizontal wells + hydraulic fracturing. Research shows that the amount of shale gas resource accounts for about half the amount in unconventional natural gas. It proposes a resource evaluation system by the three-dimensional seismic and micro-seismic technology in overseas shale gas exploration. There are two types of overseas drilling, including vertical wells and horizontal wells. The naked eye, screens and other completion methods are more used in completion. It improves the ultra-low permeability of shale with large-scale hydraulic fracturing.

Key words: shale gas; well drilling; completion; reservoir reconstruction