

非常规天然气

页岩气勘探开发技术进展

郑军卫^{1,2}, 孙德强³, 李小燕¹, 张加林⁴

(1. 中国科学院资源环境科学信息中心/国家科学图书馆兰州分馆, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100190;

4. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710021)

摘要:通过对全球页岩气的资源量、分布状况、勘探开发技术研究现状的分析, 指出页岩气的资源评价、储层评价、裂缝预测、储层改造、水平井钻采工艺等是当前国际页岩气勘探开发技术研究的热点。当前和未来国际页岩气研究将主要关注: 页岩气成因机理研究、成藏机制探讨、有效页岩气层识别、页岩气产层压裂改造、水平井和多分支井等技术。我国页岩气研发总体还处在起步阶段, 当前主要任务是进行资源量评价和有利目标区域优选, 以及开展关键技术的试验先导性研究。我国今后需要进一步加强页岩气成藏机理和模式研究、加大对页岩气勘探开发相关技术研究、深入开展页岩气开发先导性试验、加大国家政策对页岩气研发的支持力度以及加强国际交流与合作。

关键词:页岩气; 勘探开发; 资源评价; 储层改造; 水平井; 压裂

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1926(2011)03-0511-07

引用格式: 郑军卫, 孙德强, 李小燕, 等. 页岩气勘探开发技术进展[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 511-517.

随着全球经济发展对油气需求的不断增长和世界油气工业的快速发展, 那些规模大、储量大、资源丰度高、易勘探、好开采的油气资源在整个剩余油气资源总量中所占的比重越来越小, 而一些此前不被重视的、未列入主要勘探目标的、开发效益相对较低、勘探开发技术要求高的油气资源将逐步成为全球油气勘探开发的热点和接替资源^[1]。页岩气在全球分布范围广、储量大, 具有广阔的开发利用前景。近年来美国、加拿大等国家在页岩气开采方面取得的巨大突破, 使得开展页岩气研发的重要性日益凸显。本文拟通过对国内外页岩气资源的资源量、分布状况、勘探开发技术研究现状等进行系统调研, 分析归纳出当前国际页岩气勘探开发技术研究的热点和今后需要关注的主要技术领域, 以期对我国页岩气勘探开发研究有所裨益。

1 全球页岩气资源分布及勘探开发现状

页岩气(Shale Gas 或 Gas Shale)主要是以吸

附、游离或溶解状态赋存于暗色泥页岩、粉砂质泥岩地层及其夹层中的天然气^[2]。在页岩气藏中, 天然气不仅存在于暗色泥页岩或高碳泥页岩中, 也存在于夹层状的粉砂岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩甚至砂岩地层中, 为天然气生成之后在源岩层内就近聚集的结果, 表现出典型的“原地”成藏特征^[3]。也就是说, 页岩气是存在于富含有机质的泥页岩层系中的天然气, 而不仅是局限在某一单纯的富含有机质泥页岩层中的天然气。

页岩气主要由吸附气、游离气和溶解气 3 部分构成。游离气主要指储存在天然裂缝和粒间孔隙中的天然气; 吸附气是吸附在干酪根表面和粘土颗粒表面的天然气; 溶解气是溶解在页岩干酪根、液态烃、沥青中的天然气^[4-5]。但受页岩的岩性总体致密、互层或夹层发育的影响, 页岩气主要以游离气和吸附气形式存在。就成因而言, 页岩气是连续生成的生物成因气、热成因气或两者的混合; 而在成藏方面页岩气运移距离相对短暂, 属于典型的自生自储、

收稿日期: 2011-02-28; 修回日期: 2011-05-09.

基金项目: 国家科技重大专项“深层油气、非常规天然气成藏规律与有利勘探区评价技术”(编号: 2011ZX05008-004-11)资助.

作者简介: 郑军卫(1973-), 男, 陕西凤翔人, 副研究员, 主要从事天然气地质学研究和科技期刊编辑工作. E-mail: zhengjw@llas.ac.cn.

连续聚集的天然气藏,页岩气既可以在天然裂缝和孔隙中以游离方式存在,也可以在干酪根和粘土颗粒表面以吸附状态存在,甚至还可在干酪根和沥青质中以溶解状态存在。

据统计,在全世界 142 个盆地中存在超过 688 处的页岩气资源,目前已有 12 处(主要位于北美地区)得到开发^[6]。其主要分布在北美、中亚和中国、拉美、中东和北非、俄罗斯等地区,预计全球资源量约为 $456.24 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[7],约为当前世界常规天然气探明总储量的 2.46 倍。2011 年美国能源信息署发布研究报告^[8]对除美国以外的全球 14 个区域、32 个国家的 48 个页岩气盆地和近 70 个页岩气储层进行了资源评价,指出全球页岩气技术可采储量将超过 $187.40 \times 10^{12} \text{ m}^3$,而中国、美国、阿根廷、墨西哥和南非的页岩气技术可采储量居世界前五位,分别为 $36.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、 $24.39 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、 $21.90 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、 $19.27 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 和 $13.73 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。目前,在美国、加拿大、法国、德国、新西兰、澳大利亚、匈牙利、波兰、瑞典、英国、印度和中国等诸多国家,都发现相当规模的页岩气储量,而美国、加拿大、中国等是世界上页岩气勘探开发程度较高或资源量较大的国家。

1.1 美国页岩气勘探开发情况

美国页岩气资源丰富,在其本土的 48 个州均有分布。据美国能源信息署的最新资料,美国页岩气技术可采储量为 $24.39 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[8]。目前,美国主要有 5 套具有商业开发价值的页岩气系统,即:Fort Worth 盆地密西西比系 Barnett 页岩、Appalachian 盆地泥盆系 Ohio 页岩、Michigan 盆地泥盆系 Ant-rim 页岩、Illinois 盆地的泥盆系 New Albany 页岩和 San Juan 盆地白垩系 Lewis 页岩。其中,Fort Worth 盆地以密西西比系 Barnett 页岩为储层的 Newark East 页岩气田,勘探开发程度较高,目前产量已超过 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$,已是美国第二大气田。

美国是世界上最早从事页岩气研究和勘探开发的国家,其早在 1821 年就在肯特州东部 Appalachian 盆地的 Big Sandy 气田钻了第一口工业性页岩气井^[9]。此后美国陆续发现了多个页岩气藏。20 世纪 70 年代,美国政府机构相继投入了大量资金用于页岩气的地质和地球化学研究,并在页岩气的吸附机理研究等方面取得了重大突破,使美国页岩气的产量大幅度提升。此后,在国家政策、天然气价格和开发技术进步等因素的推动下,页岩气逐步成为美国重要的勘探开发领域和目标。2007 年美国页岩气生产井近 4.2×10^4 口,参与页岩气开发的石油企

业达到 64 家^[10]。2009 年美国页岩气产量接近 $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$,超过我国常规天然气的年产量。目前,美国拥有的页岩气生产井数已接近 10×10^4 口,页岩气已成为美国投入工业性勘探开发的三大非常规类型天然气(致密砂岩气、煤层气和页岩气,占美国天然气年产量的 40%)之一。据美国能源部能源信息署^[11]报告预测,至 2030 年,以页岩气为代表的美国非常规气产量将超过 $3\,681 \times 10^8 \text{ m}^3$,占美国天然气总产量的一半以上。

1.2 加拿大页岩气勘探开发情况

加拿大页岩气资源也十分丰富,且资源分布面积广、涉及地质层位多,主要分布在其西部地区的不列颠哥伦比亚省东北部的 Horn River 盆地泥盆系 Muskwa 页岩气聚集带和魁北克省奥陶系 Utica 页岩气聚集带。据世界能源委员会估计,加拿大西部 2 个主要盆地(Horn River 盆地和 Montney 深盆地)的页岩气资源量为 $39.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采资源量约为 $6.80 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[12]。目前,已有多家油气生产商在加拿大西部地区进行页岩气的开采或开发试验。

据加拿大非常规天然气协会(CSUG)资料^[13],加拿大西部(包括不列颠哥伦比亚北部和 Bowser 盆地)的 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。不列颠哥伦比亚能源矿产部 2004 年将页岩气区域资源评价列入能源发展目录,截至 2006 年,不列颠哥伦比亚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。

与美国相比,加拿大页岩气开发还处于初级阶段,大规模的商业性开采还尚未进行。但目前已有许多公司投入大量资金,应用先进技术在阿尔伯特、不列颠哥伦比亚、萨斯喀彻温省、魁北克、安大略、新斯科舍等地区开展页岩气资源勘探^[14],页岩气将有望成为加拿大重要的天然气资源之一。

1.3 我国页岩气勘探开发情况

我国页岩气资源也很丰富,在四川盆地、鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地、江汉盆地、吐哈盆地、塔里木盆地、准噶尔盆地等含油气盆地及其周缘,浅埋的暗色(泥)页岩大面积发育,有机碳含量高,具有页岩气成藏的有利地质条件^[14-15]。同时,在我国南方寒武系、志留系、二叠系等古老地层分布区的页岩气勘探前景亦不可忽视。

张金川等^[16]据现有资料保守估算,我国页岩气资源量约为 $26 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。而美国能源信息署^[8]预计的数字则更大,其通过对我国四川盆地寒武系筇竹寺组和志留系龙马溪组以及塔里木盆地的寒武系

页岩和奥陶系页岩的分析认为,我国页岩气技术可采储量超过 $36.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

2006年,中国石油与美国新田石油公司联合开展了四川盆地威远气田页岩气资源评价。2008年,国土资源部设立了页岩气项目“中国重点地区页岩气资源潜力及有利区带优选”。2009年10月,国土资源部油气资源战略研究中心在重庆市綦江县启动了中国首个页岩气资源勘查项目,正式开始页岩气的勘探开发。2009年11月下旬,国土资源部油气资源战略研究中心、中国地质大学联合在重庆市彭水县连湖镇启动了国内第一口页岩气勘探井。2010年8月,我国首个专门从事页岩气开发的科研机构——国家能源页岩气研发(实验)中心在中国石油勘探开发研究院廊坊分院揭牌。在国际合作方面,我国三大国家石油公司采取多种途径积极与国外油气企业在页岩气勘探开发方面寻求合作,其中:中国石油还与康菲、壳牌、埃克森美孚、挪威石油等跨国石油公司开展联合研究,探索页岩气开发的国际合作方式;中石化也积极同国外公司如BP、Chevron、Newfield等展开交流合作;2010年10月,中海油宣布将购入切萨皮克公司鹰滩页岩油气项目共33.3%的权益。所有这些说明,页岩气勘探开发将会在我国蓬勃发展。

此外,澳大利亚、德国、法国、瑞典、波兰、奥地利等国家也开始了页岩气的研究和勘探开发研究。

2 国际页岩气勘探开发主要技术

页岩气的勘探开发大致涉及资源评价、气田勘探和气层开采3个主要阶段。在资源评价阶段需要对页岩及其储层潜力做出评估,并综合考虑其他因素筛选出有利勘探目标区。在气田勘探阶段主要通过地质、地球物理、地球化学以及钻探试验井等多学科综合方法,确定主要产层。在气层开采阶段通过制定开发方案,大量钻探生产井,并采取增产措施,维持天然气产量增长和稳定,提高气层的采收率。此外,在页岩气生产过程中要使用大量的水用于压裂,并且在生产过程中还会在地层中注入化学试剂,这将可能导致开采区的淡水供应短缺和地下水污染,因而页岩勘探开发中的环境问题也引起了广泛关注。下面主要围绕资源评价、勘探、开发和环境4个方面进行归纳。

2.1 资源评价

就地质成藏机理而言,页岩气与常规油气在地质控制条件上有着明显区别。页岩气的成藏则相对

特殊,页岩除作为烃源岩外,还可作为页岩气藏的储集层和盖层。页岩气生成后直接或经过短距离的初次运移后,就储集到暗色泥页岩、粉砂质泥岩地层及其夹层中,页岩气藏是一种典型的“自生自储”型气藏。因而页岩气藏主要受有效烃源岩层兼储层和盖层,即富含有机质的黑色页岩或高碳泥页岩的分布控制。

页岩气资源评价除需考虑页岩本身特点(如岩层厚度、岩石结构、矿物组成、孔隙度、渗透率、裂缝发育程度等)、页岩成烃能力(如有机质类型、丰度、成熟度、生烃潜力等)、页岩聚烃能力(如吸附能力、影响因素等)等制约因素外,从商业开采方面还应考虑页岩气藏形成的含气性及页岩的可压裂性(脆性、力学性质等)等要素。目前对页岩气资源评价因素研究主要采用实验分析、测井评价、地震解译等方法。对页岩气资源量的计算,可根据不同勘探开发阶段,采用成因法、类比法和统计法等,目前常采用方法有类比法、FORSPAN法、单井(动态)储量估算法、容积法等^[17]。

在页岩气有利区优选方面,目前多数研究者主要依据页岩层厚度、埋深、岩石结构、矿物成分、岩石物性、总有机碳含量(TOC)、热演化程度(R_o)、地球物理、钻井、压裂改造等关键参数来优选有利区,部分研究者在此基础上还增加等温吸附能力参数指标。

2.2 页岩气勘探

目前用于页岩气勘探的方法有地质、地球物理、地球化学、钻井等方法,且呈现出以地球物理手段为主的多种方法综合研究。与常规油气勘探类似,地球物理勘探技术是当前用于页岩气勘探的最主要方法。地震勘探技术是目前从事页岩气勘探的最重要地球物理方法。由于泥页岩地层与上下围岩的地震传播速度不同,在泥页岩的顶底界面会产生较强的波阻抗界面,结合录井、测井等资料识别可以解释泥页岩,进行构造描述。在页岩气勘探中,可以通过测井解释等手段进行储层评价和裂缝预测。

2.2.1 储层评价技术

有效储层评价是页岩气勘探的关键。目前,测井和钻井取心技术是进行页岩气储层评价的2种主要手段。测井技术主要用于对页岩气层、裂缝、岩性的定性与定量识别。页岩气层在测井曲线上显示为高电阻、高声波时差、低体积密度、低补偿中子、低光电效应等特征。如成像测井可以识别出裂缝和断层,并能对页岩进行分层。声波测井可以识别裂缝

方向和最大主应力方向,进而为气井增产提供数据。岩心分析主要是用来确定孔隙度、储层渗透率、泥岩的组分、流体及储层的敏感性,并分析测试总有机碳含量(TOC)和吸附等温曲线。地层元素测井(Elemental Capture Spectroscopy, ECS)^[18]通过对该技术测量的图谱进行分析,可以确定岩石中矿物的含量,进而可准确判断岩性,并进而识别储层特征。此外,通过岩心一测井对比建立解释模型,还可获取含气饱和度、含水饱和度、含油饱和度、孔隙度、有机质丰度、岩石类型等参数。

2.2.2 裂缝预测技术

页岩储层中的裂缝多以微裂缝形式存在。页岩基质孔隙度很低,最高仅为4%~5%,渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,因而裂缝是页岩中游离气的主要储集空间。此外,裂缝还为页岩吸附气的持续解吸产出提供了通道。由此可见,寻找和识别泥页岩中的天然裂缝显得非常关键。三维地震技术有助于准确认识复杂构造、储层非均质性和裂缝发育带,可以提高探井的成功率。通常,裂缝的存在会引起地震反射特征的改变,应用高分辨率三维地震及相关处理技术(相干分析技术、地震属性分析、层时间切片等)可以依据反射特征的差异识别和预测裂缝,对井位优选起到关键作用。

2.3 页岩气开发

由于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,通常需要采取某种增产措施和特殊的钻井与完井方法。

2.3.1 压裂技术

页岩气储层致密,渗透率非常低,一般都无法直接进行生产,需要进行储层改造。页岩气储层改造包括压裂和酸化2种方法,而以压裂最为常用。

水力压裂是页岩气开发中最早使用也是目前最常用的压裂技术。水力压裂可以使储层产生密集的裂缝网络,进而提高储层渗透率,使地层中的天然气更容易流入井筒。进行压裂前,应先对井(竖直井或水平井)进行测试,以确保井经得住压裂的压力和注入泵率。目前,对页岩井的大型水力压裂可使人造裂缝的理论半长达到76.3~458.0 m,可使天然气初始产量达到 $(2.547 \sim 33.960) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[15]。

页岩气开采过程中可采用多种压裂方式:包括氮气泡沫压裂、凝胶压裂、多级压裂、清水压裂、同步压裂、水力喷射压裂和重复压裂等。其中:氮气泡沫压裂多用于深度较浅(小于1 524 m)或地层压力较

低的页岩^[19];凝胶压裂成本较高,已经逐渐被清水压裂取代;多层压裂多用于垂直堆叠的致密地层;清水压裂采用添加一定减阻剂的清水作为压裂液,其主要成分是水,以及很少量的减阻剂、粘土稳定剂和表面活性剂;同步压裂是指同时对2口或2口以上的井进行压裂压力液及支撑剂在高压下从一口井沿最短距离向另一口井运移,这样就增加了裂缝网络的密度及表面积,从而快速提高页岩气井的产量;重复压裂主要是在不同方向上诱导产生新裂缝进而增加裂缝网络,可有效改进单井产量与生产动态特征。

2.3.2 水平井钻井技术

在美国页岩气的勘探开发中钻井主要包括直井和水平井2种,直井多用于勘探井,用来取心获取地层参数,生产井多采用水平井。

页岩气储层的渗透率低,气流阻力比传统的天然气大得多,并且大多存在于页岩的裂缝中,页岩气开采中应尽可能的利用天然裂缝的导流能力,使之尽可能多的流入井筒,水平钻井技术能够连通多个裂缝系统,是页岩气开采的重要技术措施。水平井的形式包括单支、多分支和羽状等。一般来说,水平段越长,最终采收率就越高。但水平段也不可能无限长,因为水平段越长,成本就越高且增加的幅度越大,在实际生产中需要根据具体地质实际和成本效益等来确定最佳的水平段程度。

虽然水平井的成本比较高,但其经济效益也比较高,现代钻井技术使水平井的水平段在钻探过程中比较容易控制,因此页岩气可以从相同的储层但面积大于单直井的区域流出。在采用水平井增产技术过程中,水平井位与井眼方位应选在有机质富集、热熟度比较高、裂缝发育程度好的区域及方位。

2.3.3 特殊完井技术

由于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,又要避免地层损害是施工的关键,直接关系到页岩气的采收率,因此在固井、完井方式、储层改造方面需要有特殊技术。由于泡沫水泥有良好的防窜效果,能解决低压易漏长封固段复杂井的固井问题,页岩气井通常采用泡沫水泥固井技术。页岩气井的完井方式主要有组合式桥塞完井、水力喷射射孔完井和机械式组合完井,其中组合式桥塞完井是页岩气水平井最常用的完井方法。

2.4 环境

虽然页岩气是一种清洁能源,但其生产过程却存在环境风险,且这种风险比常规油气生产还要大。

水力压裂开采法需要消耗大量的水,每次压力需要消耗 $(200\sim 400)\times 10^4$ t水,并且通常在注入的压裂液中会加入化学试剂,废水与压裂液可能污染地下水源或发生泄漏。此外,与常规油气勘探开发相比,页岩气的勘探和开采需要打更多的井,这同样会导致地貌景观和地表环境的破坏。美国曾禁止在其北极自然生态系统保护区从事油气勘探生产活动,正是出于对当地地貌和生态系统保护的目的。随着对环境问题的重视,其已成为油气勘探开发中衡量技术进步的指标之一。近年来发展起来的小眼井钻井技术、激光钻井技术、多分支井技术、清水压裂技术等,都体现了这一趋势。此外,页岩气生产过程中的污水处理与循环利用、环境修复等也得到广泛的关注。

3 国际页岩气勘探开发技术发展趋势

3.1 页岩气成因机理研究

页岩气既可以是生物成因气也可以是热成因气,或是生物成因气与热成因气的混合气。作为生物成因气,通过在埋藏阶段的早期成岩作用或近代富含细菌的大气降水的侵入作用中厌氧微生物的活动形成;作为热成因气,通过在埋藏比较深或温度较高时干酪根的热降解或是低熟生物气再次裂解形成,以及油和沥青达到高成熟时二次裂解生成。成因多样性特点延伸了页岩气的成藏边界,扩大了页岩气的成藏与分布范围,使通常意义上的非油气勘探有利区带成为了需要重新审视并有可能获得工业性油气勘探突破的重要对象。

3.2 页岩气成藏机制探讨

广义上的页岩气普遍发育且分布广泛,但要形成具有工业勘探开发价值的页岩气需具备相应的地质条件。页岩气成藏经历了非常复杂的多机理过程,是天然气成藏机理序列中的重要构成和典型代表。根据不同的成藏条件,页岩气成藏可以表现为典型的吸附机理、活塞运聚机理或置换运聚机理。在特征上,页岩气介于典型的吸附气(如煤层气藏)、典型活塞式成藏的根源气(如狭义深盆气藏)和典型置换式运聚的游离气(如常规的背斜圈闭气藏)三大类气藏之间,页岩气藏表现为典型的“自生、自储、自封”的成藏特征。

3.3 有效页岩气层识别

页岩气赋存相态具有多样性。页岩气是否具经济开采价值,主要受天然气的生成(气源岩厚度较大、有机碳含量及成熟度较高等)、排出(单层页岩厚

度较大、裂缝发育但穿层断裂较不发育等)、储集(微孔隙发育、有效孔隙度较高、微裂缝发育程度较高等)以及其他影响因素(如与背斜构造重叠、碳酸盐岩等其他盖层发育等)等控制。在这些条件具备情况下,通过地质分析(成藏条件)、测井分析(泥页岩段气测异常等)、地震追踪(空间分布)等方法 and 手段,易于对页岩气进行快速识别和预测研究。

3.4 页岩气产层压裂改造

水力压裂是如页岩气等低渗透油气田开发中较早使用也是目前最常使用的技术。水力压裂处理的目的是建立能提供很大表面积的长而窄的裂缝。裂缝的半长可以在 30.5~305 m 这一数量级,开度在 3.05 cm 这一数量级。水力压裂的首要目的是改善储层与井眼之间的流体连通。近年来取得的进展包括:粘弹性表面活性剂压裂液、限流压裂完井等。粘弹性表面活性剂压裂液的优点是易于准备、没有地层损害和支撑剂充填体仍有很高的传导性,不需要交联剂、破胶剂或其他化学添加剂。限流压裂完井技术就是选择压裂所需的射孔直径和射孔数量,以便预期的注入速率产生足够的流速,在井眼与水力裂缝之间建立数十万帕的压差,这种做法可以保证流体流入所有炮眼,即使裂缝内各个炮眼之间的压力变化很大。

3.5 水平井和多分支井

水平井作为一种开发页岩气的一项成熟技术已经在美国得到广泛应用。从页岩气开发的角度来讲,水平井水平段在页岩层中的位置、延伸长度和延伸方向是决定水平井产能的关键因素,因此在水平井的建井过程中必须应用能保证水平井以最佳井身轨迹钻进的新工艺。美国 Andrill 公司研制出地质导向工具,可测得离钻头 1~2 m 范围内的方位、地层电阻率、伽玛射线、转速和井斜等,并把这些钻头附近的数据传到 MWD 系统,以便更好地引导钻头穿过薄层和复杂地层,利用测井数据直接进行地质导向钻井,而不是按预先设计的井眼轨迹钻井。多分支井的完井仍然是技术上的难点,其主要困难在于主井眼与分支井眼的连接技术。分支井的连接技术是分支井所特有的,支井眼与主井眼的密封连接问题是目前分支井完井作业技术难度最大的。因此分支井研究的主要方面集中在分支井完井中的主、支井眼连接技术。

4 结论

与常规油气相比,页岩气勘探开发在目标区评

价、钻完井工艺、增产技术措施、地震测井措施处理等方面存在明显差异,其勘探开发涉及多学科联合研究和高精尖技术的综合应用,今后在页岩气研发方面需要进一步发展页岩气资源评价理论与方法、成藏机制、水平井钻井技术、页岩储层改造技术等。

与美国、加拿大的聚气页岩有机质含量高(总有机碳含量达 0.3%~25%)、有机质成熟度较低(镜质体反射率为 0.4%~1.9%)、埋深较小(800~2 600 m)相比,我国聚气页岩有机质含量高(总有机碳含量达 0.2%~22%)、有机质成熟度较高(镜质体反射率为 0.2%~6.0%)、埋藏深度普遍较大(2 000~3 500 m),美国页岩气勘探开发的一些成熟经验在我国并不一定适用。

我国页岩气研发总体还处在起步阶段,对页岩气的规模性开发还任重道远,当前主要任务是进行资源量评价和有利区域优选,以及开展关键技术的试验先导性研究,我国今后应:加强页岩气成藏机理和模式研究;加大对页岩气勘探开发相关技术研究;深入开展页岩气开发先导性试验;加大国家对页岩气研发的政策支持力度;加强国际交流与合作。

致谢:中国地质大学(北京)张金川教授、西北大学张金功教授、中国石化胜利油田地质科学研究院张林晔教授、中国石油勘探开发研究院陶士振教授曾对本文提出修改建议,谨致谢忱!

参考文献:

- [1] Zheng Junwei, Yu Ling, Sun Deqiang. Main affecting factors and special technologies for exploration and exploitation of low-permeability oil and gas resources[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(5): 651-656. [郑军卫, 庚凌, 孙德强. 低渗透油气资源勘探开发主要影响因素与特色技术[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(5): 651-656.]
- [2] Ross D K, Bustin R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation[J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92: 87-125.
- [3] Zhang Jinchuan, Xue Hui, Zhang Deming, *et al.* Shale gas and its accumulation mechanism[J]. *Geoscience*, 2003, 17(4): 466. [张金川, 薛会, 张德明, 等. 页岩气及其成藏机理[J]. *现代地质*, 2003, 17(4): 466.]
- [4] Curtis J B, Montgomery S L. Recoverable natural gas resource of the united states: Summary of recent estimates[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(10): 1671-1678.
- [5] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [6] Jarvie D. Worldwide Shale Resource Plays[EB/OL]. 2008.

<http://energy. ihs. com/NR/rdonlyres/D341AE18-4532-4B6E-AAF8-842FDD71A138/0/f32sjarviefinalworldwideshalereso-urceplays. pdf>.

- [7] Rogner H H. An assessment of world hydrocarbon resources [J]. *Annual Review of Energy and Environment*, 1997, 22: 217-262.
- [8] US Energy Information Administration. World Shale Gas Resources: An Initial Assessment of 14 Regions Outside the United States[R]. Washington D C: EIA, 2011.
- [9] Milici R C. Autogenic Gas(Self Sourced) from Shales: An Example from the Appalachian Basin [R]//Howell D G. The Future of Energy Gases, US Geological Survey Professional Paper. Washington: US Geological Survey, 1993, 1570: 253-278.
- [10] Tan Rongrong. The status of American shale gas exploration and development in the early 21st century[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, (5): 62. [谭蓉蓉. 21 世纪初的美国页岩气勘探开发情况[J]. *天然气工业*, 2009, (5): 62.]
- [11] US Energy Information Administration. Annual Energy Outlook 2009[R]. Washington D C: EIA, 2009.
- [12] World Energy Council. Survey of Energy Resources: Focus on Shale Gas[R]. 2010.
- [13] Canadian Society for Unconventional Gas. Unconventional Resources and Technology Information[R]. 2010.
- [14] Guo Tonglou, Li Yuping, Wei Zhihong. Reservoir-forming conditions of shale gas in Ziliujing Formation of Yuanba area in Sichuan basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(1): 1-7. [郭彤楼, 李宇平, 魏志红. 四川盆地元坝地区自流井组页岩气成藏条件[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(1): 1-7.]
- [15] Zhang Kang, Tan Yundong. The status of world shale gas resources potential and production status as well as development prospect of china's shale gas[J]. *Petroleum & Petrochemical Today*, 2009, 17(3): 9-12, 18. [张抗, 谭云冬. 世界页岩气资源潜力和开采现状及中国页岩气发展前景[J]. *当代石油石化*, 2009, 17(3): 9-12, 18.]
- [16] Zhang Jinchuan, Jiang Shengling, Tang Xuan, *et al.* Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(12): 109-112. [张金川, 姜生玲, 唐玄, 等. 我国页岩气富集类型及资源特点. *天然气工业*, 2009, 29(12): 109-112.]
- [17] Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, *et al.* Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(6): 641-652. [邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(6): 641-652.]
- [18] Qian Jianshe, Li Hui. Overview of the latest Schlumberger logging tools[J]. *Foreign Well Logging Technology*, 2001, 16(4): 43-47. [钱建设, 李慧. 斯伦贝谢最新测井仪概况[J]. *国外测井技术*, 2001, 16(4): 43-47.]
- [19] Tang Ying, Zhang Jinchuan, Zhang Qin, *et al.* An analysis of hydraulic fracturing technology in shale gas wells and its application[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(10): 33-38. [唐颖, 张金川, 张琴, 等. 页岩气井水力压裂技术及其应用分析[J]. *天然气工业*, 2010, 30(10): 33-38.]

Advances in Exploration and Exploitation Technologies of Shale Gas

ZHENG Jun-wei^{1,2}, SUN De-qiang³, LI Xiao-yan¹, ZHANG Jia-lin⁴

(1. *Scientific Information Center for Resources and Environment/Lanzhou Branch of National Science Library, CAS, Lanzhou 730000, China*; 2. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China*; 3. *Institute of Policy and Management, CAS, Beijing 100190, China*; 4. *Exploration and development Research Institute of Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710021, China*)

Abstract: The reserve, the distribution as well as the status of exploration and exploitation technologies were systematically investigated. It has become an international hot research field for the technologies of shale gas resource evaluation, reservoir identification and evaluation, fracture prediction, reservoir reconstruction, horizontal well drilling process and so on. The current and future focus of the shale gas will be concerned as follows: shale gas formation mechanism study, the mechanism of accumulation, the effective identification shale gas, shale gas producing formation fracturing, horizontal wells and multilateral well technology. China's shale gas development in general is still in its infancy, the current main task is to evaluate the amount of resources and a favorable target area preferred, as well as key technology to carry out experimental pilot study. China need to further strengthen shale gas accumulation mechanism and mode of study, to increase technology research of shale gas exploration and development, to development pilot projects, to increase the national policy on R & D support and to strengthen international exchange and technical cooperation.

Key words: Shale gas; Exploration and development; Resource evaluation; Reservoir reconstruction; Horizontal well; Formation fracturing.

(上接第 481 页)

Effect of Micro-Pore Structure Parameter on Seepage Characteristics in Ultra-Low Permeability Reservoir: A Case from Chang6 Reservoir of Ordos Basin

HE Wen-xiang^{1,2}, YANG Le², MA Chao-ya³, GUO Wei⁴

(1. *Department of Geochemistry, Yangtze University, Jingzhou 434023, China*; 2. *Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Yangtze University, Jingzhou 434023, China*; 3. *No. 7 Production Plant, Changqing Oilfield Company, Wuqi 717606, China*; 4. *Research Institute of Exploration and Development of Changqing Oil Field, Xi'an 710018, China*)

Abstract: Based on mercury pressure and seepage experiments for the Chang6 reservoir rock with the ultra-low permeability in the Ordos basin, we discuss the pore-throat structure and seepage. Results of the mercury pressure experiments indicate that the capillary pressure curve is composed of B and C types. They are distributed in the up-right direction of typical patterns, with a higher pitch of parallel reach and a low angle between mercury-injection curve and mercury-ejection curve. Mercury pressure values for threshold pressure and middle pressure are high, suggesting moderate grain sorting. The contribution of pore-throat structure to permeability exists both single and several areas. There is a good correlations among permeability, threshold pressure value, and middle pressure value, but a weak correlation among permeability, mercury-ejection efficiency, and mercury-ejection saturation occurs. The single phase experiment indicates that non-darcy seepage for few samples exist when pressure gradient is low and change into darcy flow at high pressure. Two-phase experiment suggests that the reservoirs would have the high saturation of absorbing water and residual oil, associated with the small seepage areas both water and oil phase.

Key words: Ordos basin; Ultra-low permeability reservoir; Micro-pore structure; Capillary pressure ; Seepage.