

页岩气藏开发的关键因素

房大志

中国石化股份有限公司华东分公司石油勘探开发研究院, 南京 210011

摘要 页岩气藏是一种非常规气藏,属连续型气藏,其储层结构复杂,为低孔、低渗型,对开发技术要求很高。本文简述国内外页岩气开发现状,对北美页岩气藏开展研究并总结其勘探开发成功经验,认为其有效开发的关键是甜点区优选及储层压裂改造,综合地质评价是页岩气资源投入开发的基础,储层改造技术是动用页岩气储量的核心。介绍了开发目标区优选的主要地质参数及钻完井优化的主要内容,同时结合中国页岩气井地质及工程参数实际对比,提出了页岩气成功开发的工作思路,即在水平段储层评价基础上,进行有针对性压裂射孔设计,采用适合工程参数以增大缝网改造体积和效率,进而提高单井产量。

关键词 页岩气;页岩气藏;目标区优选;钻采优化

中图分类号 TE37

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.31.012

Key Factors of Shale Gas Development

FANG Dazhi

Research Institute of Petroleum Exploration & Development, East China Company, Sinopec, Nanjing 210011, China

Abstract Shale gas is a kind of unconventional gas. Shale gas reservoirs are typically continuous, having complex texture with low porosity and low permeability, so they need advanced technology for production. Current situation of shale gas development in China and abroad is summarized. Through in-depth investigating and summing up shale gas exploration and production history and successful experience in North America, it is thought that key factors of shale gas effective production includes optimization of sweet areas and drilling and fracturing techniques. Comprehensive geological evaluation is the basis for shale gas development, and reservoir reconstruction technique is the core of producing reserves. The main geological parameters for selection shale gas enrichment areas and main aspects for drilling and well completion optimization are introduced. Together with actual comparison of the geological and engineering parameters in different shale gas wells, the ideas of successful shale gas development are proposed. Based on the study of reservoir description and evaluation, specific fracturing design and reasonable engineering parameters should be carried out in order to increase the ESRV(Effective Stimulated Reservoir Volume) and obtain high production.

Keywords shale gas; shale gas reservoir; target zone optimal selection; drilling and fracturing optimization

0 引言

页岩气泛指赋存于暗色页岩或高碳泥页岩中的有机质在一定温度或微生物条件下发生裂解或降解作用所产生的气态烃^[1],与煤层气、致密气同属于非常规天然气。页岩气藏属连续性气藏^[2],普遍具有含气面积广泛、资源量大、生产寿命长、产量稳定等特点^[3],是非常规气勘探开发的重要领域。

1 国内外页岩气开发现状

页岩气分布广泛,主要分布在北美、中亚、中国、中东和

拉美等地区^[4]。据美国国家石油委员会(NPC)统计,截止2007年底,全球页岩气资源量约为456万亿m³。页岩气主要分布在北美(占23.8%)、中亚和中国(占21.9%)、中东和北非(占15.8%)、拉美(占13.1%)等国家和地区^[5]。

北美地区是全球唯一实现页岩气商业开发的地区。美国于1821年完成第一口页岩气生产井,之后页岩气开发受制于高成本,发展缓慢^[6]。1986年,美国开始开发巴奈特(Barnett)页岩气田。随着水平井和水力压裂技术的应用,页岩气开发加快,并逐渐成熟。美国地区已发现页岩气盆地近30

收稿日期:2013-06-17;修回日期:2013-08-14

基金项目:国土资源部和财政部国家首批矿产资源综合利用示范基地项目(国土资发[2011]88号)

作者简介:房大志,工程师,研究方向为非常规油气勘探及开发,电子信箱:157334594@qq.com

个,发现巴奈特(Barnett)、海涅斯维尔(Haynesville)、费耶特维尔(Fayetteville)、伍德福特(Woodford)、马塞洛斯(Marcellus)、安特里姆(Antrim)6套高产页岩,据美国能源资料协会(EIA)统计数据显示2011年美国页岩气年产量达 $1.8 \times 10^{11} \text{m}^3$,约占总天然气产量的19%^[7]。值得注意的是近几年Haynesville、Fayetteville、Woodford及Marcellus页岩气产量呈指数增长(图1^[7])。

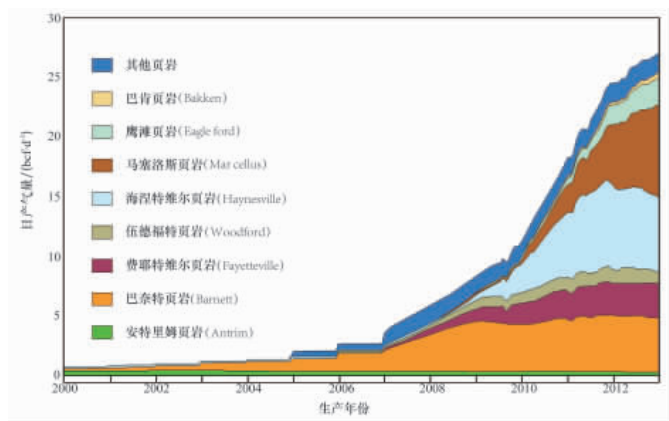


图1 美国2000—2011年页岩气年产量
(数据源自美国能源资料协会)

Fig. 1 Annual shale gas production in U.S. from 2000 to 2011(source from U.S. EIA)

加拿大是继美国之后世界上第二个对页岩气进行勘探开发的国家,使北美地区成为世界能源新的增长点。加拿大页岩气主要集中在西部盆地地区,其中霍恩河(Horn River)盆地和蒙特尼(Montney)盆地的页岩气资源最为丰富,截止2011年产量约 $4 \times 10^9 \text{m}^3$ 。此外,欧洲的德国、法国、瑞典、波兰等也开始了页岩气研究和试验性开发,波兰Lane能源公司获得了页岩气的区块勘探权。

中国页岩气勘探开发工作仍处于起步阶段。2009年10月,中国国土资源部在重庆启动中国首个页岩气资源勘查项目,标志着中国正式开始对页岩气资源进行勘探开发的研究工作^[8]。自2009年国土部油气中心在重庆彭水部署钻控了页岩气战略调查渝1井以来,石油公司已在川南、渝东、鄂西、泌阳、济阳、东濮、鄂尔多斯、沁水、辽河东部等开展了大量页岩气老井试气和钻探评价工作,加快了四川、泌阳、鄂尔多斯等盆地页岩气的勘探开发,并取得一定突破。2012年3月,中国批准设立“四川长宁—威远国家级页岩气示范区”和“滇黔北昭通国家级页岩气示范区”。目前,长宁—威远国家级页岩气示范区完钻17口井,直井日产量 $2 \times 10^3 \sim 3.3 \times 10^4 \text{m}^3$,水平井日产量 $1 \times 10^4 \sim 16 \times 10^4 \text{m}^3$ 。滇黔北昭通国家级页岩气示范区完钻7口井,完成压裂试气两口井,直井日产 $2.5 \times 10^3 \text{m}^3$,水平井日产 $1.5 \times 10^4 \sim 3.6 \times 10^4 \text{m}^3$ 。中国页岩气勘探已获得重大发现,从2009至2012年底,国土资源部、地方有关部门和油气公司累计完钻129口页岩气井,其中水平井28口,初步掌握了页岩气藏压裂技术,展示出较为良好的开发前景。

2 影响页岩气藏开发的关键因素

页岩油气藏作为一种非常规油气藏,其能否合理地开发利用取决于认识的提高和技术的进步:一方面评价技术的发展能够开展页岩的储层精细描述,进而对页岩气储量的评估更客观,另一方面水平钻井和多级分段压裂技术的进步在页岩油气的开采过程中起到了关键作用。综合地质评价是页岩气资源投入开发的基础,储层改造技术是动用页岩气储量的核心。通过综合地质评价选择储量丰度高的甜点区进行开发,并在储层精细描述基础上经过钻井方案优化实施压裂改造达到提高气井产能的目的以加速气田开发,实现时间与资源的有效利用。因此页岩气藏甜点区优选及储层压裂改造相结合是成功开发页岩气藏的关键(图2)。

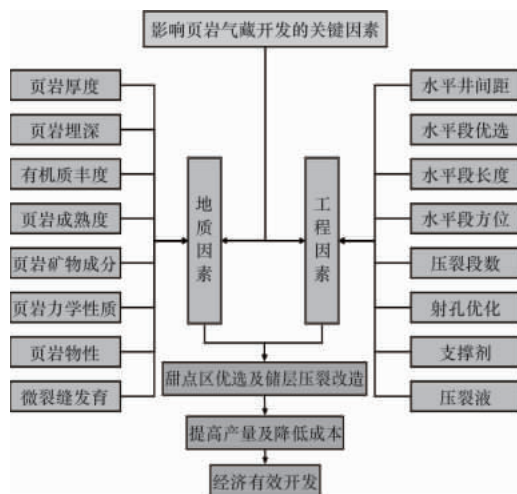


图2 影响页岩气藏开发的关键因素分析

Fig. 2 Analysis chart of key factors of shale gas development

2.1 页岩气开发目标区优选

页岩气开发目标区优选体系是一个包含多参数的评价系统,在对大量页岩气资料调研及北美页岩气开发成功经验基础上,认为页岩气藏地质评价要素主要有:①页岩厚度;②页岩埋深;③有机质丰度;④热演化程度;⑤页岩物性;⑥岩石矿物成分;⑦页岩力学性质;⑧微裂缝发育程度。优选储量丰度高、单井产量高的页岩气甜点区进行优先开发^[9]。

2.1.1 页岩厚度

一般富有机质页岩厚度愈大、页岩气藏富集程度愈高。页岩储层需要达到一定的有效厚度和分布面积,是保证页岩气藏有足够有机质及充足的储集空间的重要条件^[10]。具备一定规模的页岩气藏厚度一般应在有效排烃厚度之上^[11],一般单层泥页岩厚度应大于30m。

2.1.2 有机质丰度

总有机碳(TOC)含量是决定岩石生烃能力的主要因素,同时也是页岩吸附气的载体之一和页岩孔隙空间增加的重要因素之一,决定页岩新增游离气的能力^[12]。斯伦贝谢公司对北美页岩气盆地的研究认为,商业性页岩气藏的有机碳含量最低标准原则上应大于2%^[13]。

2.1.3 热演化程度

美国主要页岩层有机质热成熟度在生气窗范围之内,镜质体反射率(R_o)为1.1%~3.5%都有成功开发的实例,包括处于1.1%~2.0%生气高峰阶段的页岩气,也包括2.0%以上处于生气高峰后期的页岩气,如少数井揭示 Marcellus 页岩 R_o 高达3.0%^[13]。

2.1.4 页岩物性

页岩储层具有非常低的孔隙度和渗透率。孔隙度大小往往直接控制着天然气的含量,特别是游离气在储层中所占的份额与其密切相关。渗透率是判断页岩气藏是否具有经济开发价值的重要参数。美国含气页岩孔隙度一般大于4%,渗透率大于 $10^{-7}\mu\text{m}^2(100\text{nD})$ 。但页岩原始物性并非决定其有效开发的绝对条件,如圣胡安盆地 Lewis 页岩、沃斯堡盆地的 Barnett 页岩,虽然基质孔隙度和渗透率很低,但天然裂缝及页岩和粉砂岩互层的岩性组合特征改善了页岩渗透率,再加上后期对储层的改造(水力压裂),使得这两个地区都成为美国页岩气的主要产区^[14]。

2.1.5 岩石矿物组分及力学性质

页岩矿物成分除包括高岭石、蒙脱石、伊利石等黏土矿物外,还有石英、长石、云母、黄铁矿等脆性矿物。北美已开发的页岩储集层石英含量多超过40%,圣胡安盆地泥盆系 Lewis 组页岩石英含量高达75%^[15]。石英、长石等矿物含量高的页岩脆性大,容易在外力作用下形成天然裂缝和诱导裂缝,有利于压裂改造、提高天然气渗流能力。因此低泊松比、高弹性模量、富含石英等矿物的脆性页岩是勘探开发的首要目标,美国已开发页岩一般泊松比小于0.25,杨氏模量大于2.0。通过元素俘获测井(ECS)与常规测井曲线结合确定矿物组分、选择低黏土含量、高脆性矿物含量段,利用三维地震资料的叠前反演进行泥页岩脆性评价,包括振幅随炮检距变化(AVO)参数反演和叠前弹性波阻抗反演(EI)技术。

2.1.6 微裂缝发育

页岩发育孔隙和裂缝双重介质,页岩孔隙与微裂缝愈发育,气藏富集程度愈高。页岩气产量高低直接与泥页岩内部天然裂缝发育程度有关^[16],泥页岩中存在大量的天然裂缝体系,大部分裂缝属于天然开启裂缝、闭合裂缝和半充填缝。小型未密封的天然裂缝对页岩气储集是非常有利的,这类微裂缝的存在在某种程度上提高了水力压裂效应的有效性,极大改善了泥页岩的渗流能力,为页岩气从基岩孔隙进入井孔提供了必要的运移通道^[17,18]。但少量的大型天然开启裂缝具有宽度、长度和间距大,产状较陡等特点,虽然提高了泥页岩局部渗透率,但密封性被破坏,不会出现泥页岩聚集具有积极影响的超压^[19]。此外大型天然开启缝对人工水力压裂也会造成不利影响,水力压裂过程中该类裂缝吸收大量压裂液,阻碍新裂缝形成,同时压裂液沿裂缝壁发生漏失,降低压裂效果。裂缝性泥页岩储集层各向异性很强,页岩气可采储量最终取决于储集层内裂缝产状、密度、组合特征和张开程度。页岩裂缝评价可通过地层微电阻率扫描成像(FMI)测井确定裂缝密

度、走向、张开度、裂缝孔隙度等。利用三维地震叠前资料进行非常规储层的地震多属性的分析预测和描述储层的裂缝体系和应力特征。

2.2 储层压裂改造

美国非常规油气勘探开发是一个充满探索、试验、不断取得技术进步的过程。2006年以来,水平井分段改造技术的突破,推动了钻完井技术的进步,不仅大幅度提升了非常规油气的产量,还由此改变了世界能源格局。实现“页岩气革命”的关键就是储层改造技术的突破与快速发展,而水平井及水平井分段改造技术已经成为页岩气开发的关键技术^[20]。针对页岩气藏的地质特征,围绕“降低成本,提高产量”的思路开展页岩气井的钻完井优化可达到经济有效开发。钻完井优化包括水平段方位、长度、水平井间距、压裂段数、丛间距、压裂液及支撑剂类型、体积量等。

2.2.1 水平段优选

着陆点位置的选择对于页岩气井的开发效果具有重要的影响,井筒定位在合理的目的层段可以提高单井产量,还可以减少无产量贡献层段。需综合考虑测井、矿物成分、井眼质量、应力等因素选择最优着陆点:①选择相对较高孔隙度、渗透率和气测显示良好、含气量高的测井显示段;②通过ECS与常规测井曲线结合确定矿物组分、选择低黏土含量、高脆性矿物含量段;③选择井眼稳定段及低闭合应力井段。

2.2.2 水平段方位

水平井压裂由于其应力场的不同可以产生纵向缝、斜交缝和横截缝,其中横截缝为最优形态。横截缝有利于提高水平段整体渗流能力,扩大改造体积,因此,水平井布井时要了解储层地应力场,使得水平井段部署方位与地层最小主应力方位一致,这样在后期改造时容易实现横截缝。

2.2.3 水平段长度及压裂段数

水平井及其分段压裂技术可以显著增加泄气面积,提高单井产能。通常美国页岩气井水平段900~2000m,一般目的层水平井段分成8~20段,每压裂段长90~150m,每段射孔4~6簇,每个射孔段间距12~24m^[21]。通过分簇射孔,每段可以形成4~6条裂缝,同时分簇射孔方式使得裂缝间的应力干扰更加明显,压裂后形成的裂缝网络更加复杂。另外,水平井水平段被分成多段,改造完成后整个水平井段可形成8~12段的裂缝簇,改造体积更大,因此压裂后的效果也更好。

2.2.4 水平井间距

合理的水平井距能够使邻井间联通,后钻邻井压裂可增加初始井的产量,使单井和邻井之间裂缝相互交联,使裂缝的实际连通达到最大化。水平井间距要以压裂缝监测数据为基础,页岩气井压裂后,地下裂缝极其复杂,压裂诱导缝的导流能力、几何形态、复杂性及其方位等诸多信息是评价页岩气藏压裂增产效果及其气井产能和提高天然气采收率的重要依据^[22]。目前最常用的裂缝综合检测技术是利用地面、井下测斜仪与微地震监测的综合技术,可直接测量裂缝间距超过裂缝长度而造成的变形来表征所产生裂缝网络,实现页岩气

藏管理的最佳化。已最优水平井间距为基础可考虑同步压裂,对两口或两口以上的配对井进行同时压裂来增加水力压裂裂缝网络的密度和表面积,利用井间连通的优势来增大工作区裂缝的程度和强度。同步压裂相比依次压裂使页岩气井短期内增产非常明显,而且对工作区环境影响小,完井速度快,节省压裂成本,是页岩气藏开发中后期比较常用的压裂技术。

2.2.5 射孔优化

射孔优化对提高页岩气井单井产量及页岩气开发至关重要。页岩气高产水平井中通常超过 80% 的射孔簇对产量有贡献,而低产水平井中通常仅 65% 以下的射孔簇对产量有贡献。如果将产量贡献的射孔簇数量由 60% 增加到 80%,单井气产量可以提高至少 25%^[29]。综合产气剖面显示好的层段与储层特征选择射孔位置,射孔段应考虑低黏土含量、高游离气和孔隙度、密度等参数,每一级要选择最低应力层段射孔进而增加射孔簇被压裂改造的机会。因此在水平段储层评价基础上对每一级压裂进行有针对性的设计可提高单井产量,起初页岩气井射孔常采用几何等分的方式,随着评价技术的发展,在分析评价油藏质量和完井质量基础上,按照层段特征进行分级,每级射孔簇数量和层段长度可以不同,最终确定最优化的射孔位置,如美国 Eagle Ford 气田页岩气井采用选择性分级的射孔方式后每英尺产气量比邻井高 20%^[29]。不同页岩储层有不同射孔规律,Haynesville 页岩增加分段间距使每口井更少分段;Barnett 页岩缩短每段射孔间距;Woodford 页岩增大分段数量,采用更小射孔分段间距。

2.2.6 压裂液及支撑剂优选

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^[9]。页岩储层孔隙度、渗透率很小,钻井和储层改造过程中储层保护极其重要,包括钻井液体系、压裂液、支撑剂的选取。

压裂液体系优选应考虑压裂液的配伍性、携砂能力及成本选择低成本、低伤害压裂液。泥页岩储层压裂改造通常采用大排量、大液量、大规模的压裂改造思路,因此对井场规模、液灌摆放和管线连接、连续供液能力等都提出较大挑战。

(1) 清水、滑溜水压裂液:对于脆性较强的页岩储层,清水、滑溜水压裂液是较好选择。在美国 Fayetteville 等储层广泛使用,可减小在油套管内的摩阻,低黏度,传输性能差,一般高排量大于 16m³/min,携砂能力低但加砂规模大,所需液量巨大。

(2) FiberFRAC 清水压裂液:为提高滑溜水的携砂能力,提出了 FiberFRAC 压裂液,是一种含有纤维的滑溜水压裂液,纤维使支撑剂砂粒处于悬浮状态,直至裂缝在砂粒闭合,最后流体中的纤维溶解,从而增加裂缝中流体的流动能力。

(3) 低成本线性胶压裂液:为满足泥页岩油藏更好的铺砂浓度要求,提高压裂液携砂能力,减小对储层伤害而开发出低成本、低伤害线性胶压裂液,能满足中温储层较高砂比

施工的要求。

(4) 小分子胍胶压裂液:小分子胍胶的分子量仅为目前应用的胍胶原粉及改性的羟丙基胍胶分子量的 1/6 和 1/4。小分子胍胶不溶物含量低,对储层伤害较低,能实现可逆交联,达到返排液重复利用的目的,有利于环保和降低成本。因此,在丛式井组压裂具有较好的应用前景。

对于泥页岩储层压裂改造用支撑剂的选择应从支撑剂粒径以及支撑剂密度两个方面考虑。泥页岩储层压裂改造应选用小粒径支撑剂,如美国页岩气开发大多选用 40/70 目支撑剂。在相同铺砂浓度下,低密度支撑剂具有比高密度支撑剂更高的裂缝导流能力,有利于提高压裂改造效果。

3 中国典型页岩气井实例分析

中国石化华东分公司、勘探南方分公司等油气勘探公司在四川盆地周缘海相志留系页岩气部署的多口钻探井,直井钻遇厚度 70~103m 黑色硅质页岩,并实施侧钻水平井后开展分段压裂,试获高产天然气,取得了中国南方海相页岩气勘探的重大突破。其中位于川东南涪陵区块焦石坝构造高部位部署的焦页 1HF 在志留系龙马溪组页岩进行水平段长 1008m 分 15 段压裂获取气产量 2.03×10⁵m³/d;位于川东南武陵褶皱带彭水区块桑柘坪向斜部署彭页 HF-1 井水平段长度 1020m 分 12 段压裂获取气产量 2.5×10⁴m³/d。两口探井均针对相同目的层,具有相似的区域地层结构、页岩岩性及岩矿组分,含气页岩厚度相当,地化指标及水平段长接近,但产量差异较大。通过页岩地质特征及压裂工程参数的对比认为焦页 1HF 井所处构造相比彭页 1HF 具有更好页岩气富集条件,该井构造位置位于四川盆地内部、构造形态相对简单、断裂发育较少、属异常高压地层(压力系数 1.45)、TOC 含量较高(4.2%)、较好物性条件(孔隙度 4.5%)决定了页岩气藏具有较好的生烃、储集及保存条件;此外焦页 1HF 射孔考虑天然微裂缝发育,处于背斜核部易形成构造伴生及派生裂缝,压裂采用增加压裂段数,缩小段长,增大压裂规模(更多压裂液及支撑剂量、高砂地比及施工压力、大加砂量及大排量)的思路达到增大缝网改造体积和效率,扩大泄气面积进而提高单井产量,获取了更高的水平井分段压裂产能。

4 结论

(1) 通过综合地质评价选择储量丰度高的甜点区进行开发,并在储层精细描述基础上经过钻完井方案优化实施压裂改造达到提高气井产能的目的以加速气田开发,实现时间与资源的有效利用。页岩气藏甜点区优选及储层压裂改造相结合是成功开发页岩气藏的关键。

(2) 页岩气要选储量丰度高的甜点区作为开发区,纵向上选有机质丰富、硅质含量高、微裂缝发育、相对封闭的甜点段作为目的层段。

(3) 不同页岩储层具有不同地质特性,应在水平段储层评价基础上,进行有针对性压裂射孔设计,采用适合工程参

数以增大缝网改造体积和效率,提高单井产量。

(4) 中国已实施页岩气勘探的区块应寻找储量高丰度区,加强核心区甜点段储层预测描述研究,通过开展现场试验井组,确定合理开发井距与优化水平段压裂,配套国产化钻采工艺技术,努力降低投资,实现资源的合理有效开发。

(5) 与美国相比,中国页岩气地质条件更为复杂,页岩系老,热演化程度高,经历多期构造演化,埋藏深,开发技术要求更高。目前中国在资源评价与水平井压裂增产技术等方面尚未形成核心技术体系。为加快中国页岩气勘探开发进程,首先应加强基础地质调查与研究开展资源评价,优选有利目标区开展开发先导试验;此外,针对页岩气开发核心技术,近期要通过与国外公司合作方式和收购国外成熟页岩气项目等方式引进国外技术;长期来看要加大自主创新,通过示范工程建设,在开发技术、制度、管理等多个方面积累经验,确保页岩气资源的开发科学、有效、高效发展。

参考文献 (References)

- [1] 潘继平. 页岩气开发现状及发展前景——关于促进我国页岩气资源开发的思考[J]. 国际石油经济, 2009, 17(11): 12-15.
Pan Jiping. International Petroleum Economy, 2009, 17(11): 12-15.
- [2] 刘树根, 曾祥亮, 黄文明, 等. 四川盆地页岩气藏和连续型-非连续型气藏基本特征[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2009, 36(6): 578-592.
Liu Shugen, Zeng Xiangliang, Huang Wenming, et al. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2009, 36(6): 578-592.
- [3] 付斌, 杨春生, 王径, 等. 美国页岩气藏勘探开发及其启示[J]. 天然气技术, 2010, 4(6): 1-2.
Fu Bin, Yang Chunsheng, Wang Jing, et al. Natural Gas Technology, 2010, 4(6): 1-2.
- [4] 江怀友, 宋新民, 安晓璇, 等. 世界页岩气资源与勘探开发技术综述[J]. 天然气技术, 2008, 2(6): 26-30.
Jiang Huaiyou, Song Xinmin, An Xiaoxuan, et al. Natural Gas Technology, 2008, 2(6): 26-30.
- [5] 崔青, 高金龙. 世界页岩气勘探开发技术及我国勘探前景[J]. 内蒙古石油化工, 2011(17): 122-124.
Cui Qing, Gao Jinlong. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2011(17): 122-124.
- [6] Ground Water Protection Council and ALL Consulting. Modern shale gas development in the United States: A primer[R]. Washington: United States Department of Energy, 2009.
- [7] O'Sullivan F, Paltsev S. Shale gas production: Potential versus actual greenhouse gas emissions[R]. Cambridge: MIT Energy Initiative, 2012.
- [8] 刘树臣, 闫卫东. 世界页岩气资源勘探开发现状与启示[J]. 国土资源情报, 2012(2): 2-6.
Liu Shuchen, Yan Weidong. Land and Resources Information, 2012(2): 2-6.
- [9] Pollastro R M, Jarvie D M, Hill R J, et al. Geological framework of the Mississippian Barnett Shale, Barnett-Paleozoic total petroleum system, Bend arch-Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 405-436.
- [10] 秦建中. 中国烃源岩[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 102-104.
Qin Jianzhong. Source rock in China[M]. Beijing: Science Press, 2005: 102-104.
- [11] 孙超, 朱筱敏, 陈菁, 等. 页岩气与深盆气藏的相似与相关性[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(1): 43-47.
Sun Chao, Zhu Xiaomin, Chen Jing, et al. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(1): 43-47.
- [12] Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth basin, north-central Texas: Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(2): 155-175.
- [13] 李玉喜, 乔德武, 姜文利, 等. 页岩气含气量和页岩气地质评价综述[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 308-317.
Li Yuxi, Qiao Dewu, Jiang Wenli, et al. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 308-317.
- [14] 蒲泊伶, 包书景, 王易, 等. 页岩气成藏条件分析——以美国页岩气盆地为例[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(3): 33-39.
Pu Boling, Bao Shujing, Wang Yi, et al. Petroleum Geology and Engineering, 2008, 22(3): 33-39.
- [15] 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, 34(4): 392-400.
Li Xinjing, Hu Suyun, Cheng Keming. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 392-400.
- [16] 龙鹏宇, 张金川, 唐玄, 等. 泥页岩裂缝发育特征及其对页岩气勘探和开发的影响[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 525-531.
Long Pengyu, Zhang Jinchuan, Tang Xuan, et al. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3): 525-531.
- [17] Bowker K A. Barnett shale gas production, fort Worth basin: Issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [18] 王祥, 刘玉华, 张敏, 等. 页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(2): 350-356.
Wang Xiang, Liu Yuhua, Zhang Min, et al. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(2): 350-356.
- [19] 王多云, 郑希民, 李凤杰, 等. 低孔渗油气富集区优质储层形成条件及相关问题[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(2): 87-91.
Wang Duoyun, Zheng Ximin, Li Fengjie, et al. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(2): 87-91.
- [20] Pope C D, Palisch T T, Lolon E P, et al. Improving Stimulation effectiveness: Field results in the haynesville shale [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Florence, Italy: Society of Petroleum Engineers, 2010: 1-18.
- [21] 孙海成, 汤达祯, 蒋廷学, 等. 页岩气储层压裂改造技术[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(4): 90-97.
Sun Haicheng, Tang Dazhen, Jiang Tingxue, et al. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(4): 90-97.
- [22] 许洁, 许明标. 页岩气勘探开发技术研究[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2011, 8(1): 80-82.
Xu Jie, Xu Mingbiao. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2011, 8(1): 80-82.
- [23] Baihy J D, Malpani R, Edwards C, et al. Unlocking the shale mystery: How lateral measurements and well placement impact completions and resultant production[C]//Tight Gas Completions Conference. San Antonio, Texas, USA: Society of Petroleum Engineers, 2010: 333-347.
- [24] 刘德华, 肖佳林, 关富佳. 页岩气开发技术现状及研究方向[J]. 石油天然气学报: 江汉石油学院学报, 2011, 33(1): 119-123.
Liu Dehua, Xiao Jialin, Guan Fujia. Journal of Oil and Gas Technology: Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2011, 33(1): 119-123.

(编辑 李超)