

四川盆地页岩气勘探开发进展、挑战及对策

张烈辉¹ 何 骁² 李小刚¹ 李昆成¹ 何 江¹
张 智¹ 郭晶晶¹ 陈怡男¹ 刘文士¹

1. “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学 2. 中国石油西南油气田公司

摘要：2020 年中国页岩气年产量已经超过 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，创造了我国天然气发展史上的一个奇迹。四川盆地已经并将继续成为我国页岩气勘探开发的主战场。为了进一步推动我国页岩气大规模高效益开发，在全球新冠肺炎疫情蔓延和国内提出“碳达峰碳中和”目标的新形势下，从资源勘探、气藏工程、钻采工程和产业规制 4 个方面梳理了四川盆地页岩气勘探开发的进展和挑战，提出了实现页岩气大规模高效开发的对策建议。研究结果表明：①四川盆地页岩气大规模高效开发必须以中浅层页岩气持续稳产和深层页岩气规模建产为基础；②较之于北美地区，四川盆地页岩气勘探开发在地理环境、地质条件、钻采技术、产业规制等方面具有自身的特点，很难复制北美大规模、高密度、连片化布井的开发模式，因此需要立足于“少井高产”的策略，一方面在页岩气井全生命周期，继续坚持采用地质工程一体化技术，开展“一体化研究、一体化设计、一体化实施和一体化迭代”，另一方面以问题为导向，从地质评价、开发政策、工程技术、产业规制等方面开展持续攻关，完善地质评价理论与技术、创新气藏工程理论与方法、研发降本增效工程技术、健全页岩气产业规制，形成技术要素与非技术要素协同促进的新格局。结论认为，该研究成果对于四川盆地乃至全国页岩气大规模高效益开发具有重要的借鉴指导意义。

关键词：四川盆地；页岩气；大规模开发；高效开发；持续稳产；中浅层；深层；少井高产

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.08.013

Shale gas exploration and development in the Sichuan Basin: Progress, challenge and countermeasures

ZHANG Liehui¹, HE Xiao², LI Xiaogang¹, LI Kuncheng¹, HE Jiang¹,
ZHANG Zhi¹, GUO Jingjing¹, CHEN Yinan¹, LIU Wenshi¹

(1. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation//Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610051, China)

Natural Gas Industry, Vol.41, No.8, p.143-152, 8/25/2021. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: China's shale gas production in 2020 exceeds $200 \times 10^8 \text{ m}^3$, which creates a miracle in the history of natural gas development in China. The Sichuan Basin has already been and will be the main battlefield of shale gas exploration and development in China. In order to further promote the large-scale efficient development of shale gas in China, under the new situation of global COVID-19 spread and domestic "carbon peak and carbon neutrality" goal, this paper analyzes the progress and challenges of shale gas exploration and development in the Sichuan Basin from four aspects, including resource exploration, gas reservoir engineering, drilling and production engineering and industrial regulation, and puts forward countermeasures and suggestions for achieving large-scale efficient development of shale gas. And the following research results are obtained. First, the large-scale efficient development of shale gas in the Sichuan Basin has to take the sustainable and stable production of middle-shallow shale gas and the large-scale productivity construction of deep shale gas as the base. Second, compared with the shale gas exploration and development in the North America, the Sichuan Basin has its own characteristics in terms of geographical setting, geological condition, drilling and production technology and industrial regulation, which makes it difficult to copy the development mode of large scale, high density and continuous well deployment from the North America, so it is necessary to adopt the strategy of "high production with few wells". On the one hand, continue to apply the geology and engineering integration technology to carry out "integrated research, integrated design, integrated implementation and integrated iteration" in the whole life cycle of shale gas well; and on the other hand, carry out problem-oriented continuous researches from the aspects of geological evaluation, development policy, engineering technology and industrial regulation, so as to improve geological evaluation theory and technology, innovate gas reservoir engineering theory and method, research and develop engineering technology for cost reduction and efficiency improvement, improve shale gas industrial regulation, and form a new pattern of collaborative promotion of technical and non-technical elements. In conclusion, the research results provide important reference and guidance for the large-scale efficient development of shale gas in the Sichuan Basin and even the whole country.

Keywords: Sichuan Basin; Shale gas; Large-scale development; Efficient development; Sustainable and stable production; Middle-shallow; Deep; High production with few wells

基金项目：国家自然科学基金项目“耦合压裂缝网扩展机制的页岩气藏动态模拟研究”（编号：51874251）。

作者简介：张烈辉，1967 年生，教授，博士研究生导师，本刊编委、《Natural Gas Industry B》编委；现任西南石油大学副校长，主要从事油气藏渗流、数值模拟和气藏工程等领域的科研和教学工作。地址：（610500）四川省成都市新都区新都大道 8 号。ORCID: 0000-0001-8970-8512。E-mail: zhangliehui@vip.163.com

0 引言

天然气是公认最清洁的低化石能源。加大国内天然气勘探开发力度,符合“坚持清洁低碳导向”的新时代能源政策理念^[1]。经过十余年勘探开发研究和实践^[2-4],页岩气已经成为我国天然气领域增储上产的主力资源^[5]。四川盆地已经并将继续成为我国页岩气勘探开发的主战场。面对全球新冠肺炎疫情蔓延、北美页岩气行业“破产潮”^[3]、国内“碳达峰”“碳中和”目标^[1]等国际国内最新形势,及时解剖四川盆地页岩气勘探开发进展、挑战,研究应对挑战的攻关策略,对于推动我国页岩气大规模高效益开发具有极其重要的示范意义。

1 四川盆地页岩气勘探开发进展

四川盆地页岩气,特别是川南页岩气先后经历了评层选区(2006—2009年)、先导试验(2009—2014年)、示范建设(2014—2016年)和规模开采(2017年至今)四个阶段^[6]。现已掌握埋深3 500 m以浅的页岩气勘探开发核心技术,正在攻关深层页岩气勘探开发技术,已建产涪陵、长宁、威远、昭通、綦江、威荣、太阳等7个重点勘探开发区。但四川盆地或者全国大规模有效开发形势尚未形成,目前仅有长宁—威远国家级页岩气示范区年产量突破了 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$,实现了规模有效开发。

1.1 勘探理论与技术进展

四川盆地页岩气勘探理论与技术获得长足进步,主要体现在地震、测井、地质综合评价等方面。

1) 形成了宽方位角度地震勘探、各向异性地震勘探、叠前成像、全波形反演、三维和四维地震勘探、全数字精细地震采集、高密度地震采集、人工智能与地震勘探结合、多震源采集以及多波多分量地震等新技术^[7-10],集成了一套基于地震反演为主的页岩气甜点预测手段^[11]。

2) 自主研发了存储式阵列感应测井仪、自然伽马能谱仪、交叉偶极声波仪等仪器,配套完善了页岩气国产化测井采集仪器,形成了川南地区海相页岩气水平井国产测井采集技术系列,并在此基础上开展了以“七性关系”为核心的页岩有机碳含量、孔隙度、饱和度、含气量、脆性指数和岩石力学等6项关键地质工程参数的精细评价,使得页岩气储层测井综合解释的符合率超过92%。

3) 在“二元富集”^[12]“四大因素控制”^[13]等页岩

气富集高产理论基础上,揭示了“沉积—成岩作用控储、保存条件控藏、I类储层连续厚度控产”的“三因素控制”海相页岩气富集高产规律,明确了长宁—威远区块页岩气示范区上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩气富集控制因素,建立了适应于川南地区页岩气的富集高产模式,创建了多期构造演化、高过成熟页岩气地质综合评价技术,基本落实了川南地区下古生界海相页岩气有利分布区及资源规模。

4) 综合考虑成藏地质条件、开发利用条件、经济效益、地理环境等因素,建立了埋深3 500 m以浅页岩地质和资源评价方法,集成了3 500 m以浅低缓构造页岩气地质工程一体化建模手段,打造了多个“透明页岩气藏”。

1.2 气藏工程理论与方法进展

经过十余年的技术攻关,四川盆地页岩气的气藏工程理论和方法取得了显著进展。特别是页岩裂缝特征和页岩气复杂流动规律表征、压裂后产能评价、气藏数值模拟等方面进展突出。

1) 针对四川盆地页岩储层特征,采用多重连续介质—离散裂缝耦合模型构建了页岩气藏三维、两相综合渗流数学模型,实现了对裂缝产状、分布特征的科学表征和页岩气藏多尺度复杂流动规律的联合表征。

2) 针对四川盆地页岩气流动特点,引入“拟多重孔隙介质模型”刻画页岩气的跨尺度流动效应,同时引入多区复合模型表征体积压裂改造后多重渗流区域的耦合流动特征^[14],建立了页岩气井全生命周期渗流生产模型,形成了页岩气藏压裂水平井压后参数快速解释和动态产能评价技术。

3) 形成了四川盆地页岩气藏数值模拟的二维、三维非结构网格快速生成技术,实现了三维、多层页岩储层和复杂缝网体积压裂水平井空间网格离散,显著提高了页岩气藏数值模拟的适应能力、求解精度和计算效率,为页岩气藏井网部署、开发制度优化提供了有效技术支撑。

1.3 钻采工程技术进展

1.3.1 钻井技术进展

“十二五”以来,四川盆地页岩气水平井钻井技术飞速发展。已形成油基钻井液、长水平段丛式水平井高效钻井完井技术、一趟钻钻井技术、个性化钻头、地质导向钻井等代表性的钻井技术体系,形成了井身结构优化、充气钻井、丛式井防斜打快、钻头优选、页岩气油基水泥浆、长水平段轨迹控制等钻井提速

配套技术^[15]。特别是针对页岩长段水平井的钻井技术难题,创新开发了山地环境、大偏移距页岩气三维水平井设计技术和“三高两大”(高钻压、高转速、高泵压、大排量、大扭矩)提速方法^[16],研发并大规模应用了国产旋转导向技术(中国石油川庆钻探工程有限公司威远页岩气区块国产旋转导向技术使用占比达53%),采用膨胀套管封闭局部低压、恶性漏失层段,实现了高效快速钻进。截至2021年5月,四川盆地中深层页岩气最短钻井周期已低于30 d,深层页岩气最短钻井周期已低于70 d,页岩气井最深完钻井深已达7 318 m,页岩气最长水平段达3 150 m。

1.3.2 压裂技术进展

四川盆地页岩气压裂理论和技术都取得了明显进展,其中不乏重要创新。

1)建立了缝网可压性综合评价方法^[17]。该方法引入发育缝网概率指数和改造体积概率指数对缝网可压性进行定量分级。突破Rickman等^[18]仅依据脆性指数而忽略天然裂缝特征来判别页岩可压性的局限。

2)研发出新一代变黏滑溜水压裂液体系^[19]。该压裂液体系通过调整多功能降阻剂浓度实现滑溜水、线性胶、交联液在线转换,在中深层页岩气井中得到了推广应用。

3)形成了新一代水平井压裂工艺。四川盆地页岩气开发初期,主要借鉴北美页岩气压裂的经验,采用多段少簇的布缝模式,以大排量、大液量、低砂比方式造缝。随着相关理论和配套技术的进步,逐渐形成了旨在降本增效的新一代水平井压裂工艺。该工艺采用少段多簇、密集切割的布缝方式,通过暂堵调压、控液提砂方式造缝。截至2021年5月,川南地区页岩气水平井单井最高加砂强度已超过5.3 t/m,单井最大总液量已超过 $8.4 \times 10^4 \text{ m}^3$,最小平均簇间距已小于6.5 m。宁209井区采用新一代压裂工艺的水平井折算测试产量比采用传统压裂工艺的邻井提升了103%^[20]。太阳气田浅层页岩气井通过采用多簇密切割布缝,单段射孔簇数由3簇增加为5~11簇,簇间距由18~25 m减小为7~11 m,在保证水平段改造效果和单井产量的同时,单井压裂施工费用降低 $200 \times 10^4 \sim 300 \times 10^4$ 元^[21]。

1.3.3 排液采气技术进展

针对页岩气井“低压、低产为主,气、液产量较低,生产周期长”等生产特点,形成了以优选管柱、柱塞气举、泡排、井口增压和气举为核心的采气工艺技术。

深入研究了井筒流动规律,改进了水平井携液临界流量模型,为优化油管下入时机提供依据^[22];优化了柱塞气举装置及运行参数,柱塞气举工作筒已突破70°井斜角^[23];已建成平台整体橇装化远程控制起泡剂和消泡剂自动加注装置,形成了适用于长宁区块页岩气平台井的整体泡排工艺技术^[24];采用了平台增压和集中增压两种方式进行增压开采,有效降低了油管压力^[25];对水淹气井采用了车载式气举,在低压低产的页岩气平台对气井进行轮换气举,有效地维持了页岩气井生产^[26]。

1.3.4 绿色开发与工厂化作业技术进展

绿色开发方面,严格按照国家法律法规标准要求,严格保护页岩气开采区块的地表水、地下水、土壤和植被;同时加强压裂返排液和钻井固废的资源化利用,加强逸散气体排放管控;推广电驱动压裂泵,改善了因为噪声污染影响周围居民生活的情况。工厂化作业方面,实现了钻井、压裂、排采多工种交叉作业、各工序无缝衔接、资源共享,有效解决了复杂山地地形条件下场地受限、大规模、多工序、多单位同时作业效率较低的难题。

1.4 产业规制改革进展

产业规制是指政府或社会为实现某些社会经济目标而对市场经济中的经济主体作出各种直接和间接的具有法律约束力或准法律约束力的限制、约束、规范,以及由此引出的政府或社会为督促产业经济主体活动符合这些限制、约束、规范而采取的行动和措施^[27]。产业规制属于影响产业发展的非技术要素,良好的产业规制对产业健康发展具有重要作用。

我国页岩气产业规制以政府规制为主,正在逐步加强行业规制和社会规制。过去十多年,我国页岩气产业规制建设的主线有两条,一是放宽进入规制以实现公平的市场竞争,引导各类主体公平进入页岩气产业的上游市场;二是进一步强化市场公平、环境保护以及能源安全方面的规制。我国不同时期页岩气产业规制或重要事件如表1~3所示。

1)“十一五”期间,针对页岩气调查研究初步制定了政府规制,通过加强国际合作、加大科技研发扶持、放宽产业进入限制等,摸清资源量,尽量吸纳更多市场主体来参与页岩气开发,储备页岩气勘探开发关键技术(表1)。

2)“十二五”期间,打破了中石油、中石化等大型国企独立从事勘探开发的局面,更多类型的资本进入页岩气开发。开始制定页岩气价格、补贴等

表 1 我国“十一五”(2006—2010 年)期间页岩气产业规制与重要事件表

时 间	产业规制或重要事件
2007 年 10 月	中石油与美国新田公司签订《威远地区页岩气联合研究》协议
2008 年 11 月	中石油钻探长芯 1 井拉开我国页岩气工业化勘探序幕
2009 年 7 月	国土资源部启动“全国页岩气资源潜力调查评价与有利区优选”项目
2009 年 8 月	国土资源部在重庆綦江启动全国首个页岩气资源勘查项目
2009 年 9 月	国家发改委、国家能源局开始制定鼓励页岩气勘探开发利用的政策
2009 年 11 月	中美签署《中美关于在页岩气领域开展合作的谅解备忘录》
2009 年 11 月	中石油与壳牌公司签订《四川盆地富顺—永川区块页岩气联合评价协议》
2010 年 1 月	国土资源部发布我国页岩气资源战略调查和勘探开发战略构想
2010 年 5 月	中美签署《美国国务院和中国国家能源局关于中美页岩气资源工作行动计划》
2010 年 8 月	国家发改委、国家能源局等发布《科学发展的 2030 年国家能源战略》
2010 年 8 月	中石油成立我国首个页岩气开发科研机构国家能源页岩气研发(实验)中心

表 2 我国“十二五”(2011—2015 年)期间页岩气产业规制与重要事件表

时 间	产业规制或重要事件
2011 年 1 月	国家能源局发布《关于发展天然气分布式能源的指导意见》
2011 年 6 月	国土资源部面向国有企业首次页岩气探矿权招投标
2011 年 12 月	国务院批准将页岩气作为我国第 172 个独立矿种
2012 年 3 月	国家发改委、财政部、国土资源部、国家能源局发布《页岩气发展规划(2011—2015 年)》
2012 年 3 月	国务院《找矿突破战略行动纲要(2011—2020 年)》批准页岩气为重点能源矿产
2012 年 3 月	国家发改委、国家能源局批准成立长宁—威远、昭通、延安 3 个国家级页岩气示范区
2012 年 5 月	国土资源部面向包括民营企业的第二轮页岩气探矿权招投标
2012 年 9 月	国土资源部公开招标出让 20 个页岩气区块
2012 年 10 月	国土资源部发布《关于加强页岩气资源勘查开采和监督管理有关工作的通知》
2012 年 11 月	财政部、国家能源局发布《关于页岩气开发利用财政补贴政策的通知》
2013 年 6 月	中石油中国首条页岩气专用管道“长宁地区页岩气试采干线工程”开建
2013 年 7 月	成立页岩气标准化技术委员会
2013 年 9 月	成立国内首个央地合作页岩气开发公司——四川长宁天然气开发有限责任公司
2013 年 10 月	国家能源局制定中国第一个《页岩气产业政策》
2013 年 11 月	国家能源局发布《页岩含气量测定方法》
2013 年 11 月	国家发改委和国家能源局批准成立重庆涪陵国家级页岩气示范区
2014 年 2 月	国家能源局发布《油气官网设施公平开放监管办法(试行)》
2014 年 4 月	国土资源部发布《页岩气资源/储量计算与评价技术规范》
2014 年 4 月	国家发改委发布《关于建立保障天然气稳定供应长效机制的若干意见》
2014 年 6 月	国务院办公厅发布《能源发展战略行动计划(2014—2020 年)》
2014 年 8 月	四川省政府将页岩气列入五大高端成长型产业之首
2014 年 12 月	杰瑞集团成为国内页岩气液化行业首家达产的页岩气液化工厂
2015 年 3 月	重庆市政府发布《重庆市页岩气产业发展规划》
2015 年 4 月	财政部、国家能源局发布《关于页岩气开发利用财政补贴政策的通知》
2015 年 5 月	国家质检总局、国家标准化管理委员会发布《页岩气地质评价方法》
2015 年 8 月	中国地质调查局发布《页岩气基础地质调查工作指南(试行)》
2015 年 12 月	涪陵国家级页岩气示范区通过国家能源局验收

表 3 我国“十三五”（2016—2020 年）期间页岩气产业规制与重要事件表

时 间	产业规制或重要事件
2016 年 4 月	四川省政府发布《四川省页岩气产业发展 2016 年度实施计划》
2016 年 9 月	国家能源局发布《页岩气发展规划（2016—2020 年）》
2016 年 12 月	国家质量检总局、国家标准化管理委员会发布《页岩气技术要求和试验方法》
2017 年 5 月	中共中央、国务院发布《关于石油天然气体制改革的若干意见》
2017 年 7 月	国家发改委、国家能源局发布《中长期油气管网规划》
2017 年 12 月	国土资源部建设长江经济带页岩气勘探开发基地
2018 年 3 月	财政部、税务总局发布《关于对页岩气减征资源税的通知》
2019 年 6 月	财政部发布《可再生能源发展专项资金管理暂行办法》补充通知
2019 年 12 月	国家油气管网集团公司挂牌
2019 年 12 月	自然资源部印发《关于推进矿产资源管理改革若干事项的意见（试行）》
2020 年 6 月	国家发改委、国家能源局发布《关于做好 2020 年能源安全保障工作的指导意见》
2020 年 7 月	财政部、税务总局发布《关于继续执行的资源税优惠政策的公告》
2020 年 9 月	国家管网公司实现全国“并网”运行，产运销分离，彻底公平开放

经济方面和技术标准、规范开发活动等质量方面的行业规制（表 2）。

3)“十三五”期间，国家层面制定了第二个页岩气发展五年规划，地方政府也根据页岩气开发情况出台了一系列产业支持计划，政府规制进一步落实，行业规制逐渐完备。财税补贴方式由产量补贴变化为增量补贴，获得减征资源税的税收优惠，进一步激励页岩气开发企业。成立国家油气管网集团公司，打破页岩气管输环节垄断，放开了中游环节的进入规制，页岩气全产业链的进入管制均已放开。同时，政府加强了对页岩气产业的社会规制，对环境的保护以及对矿区群众的安全、健康给予了更多的关注（表 3）。

2 四川盆地页岩气勘探开发挑战

2.1 勘探理论与技术的挑战

四川盆地是我国页岩气主要勘探开发区域，中浅层已实现有效开发，深层页岩气资源潜力很大^[28]，但勘探难度很大。四川盆地寒武统筇竹寺组、五峰组—龙马溪组 2 套深层页岩气储层的热演化程度普遍很高，其中筇竹寺组在川南—昭通、川东、中扬子等地区出现大面积碳化^[29]，基本处于生气衰竭阶段。五峰组—龙马溪组页岩 R_o 值为介于 1.5%~3.5%，平均为 2.5%，整体处于高成熟阶段，目前在天宫堂、宜 202、宜 203 等井区五峰组—龙马溪组出现低阻与高碳化等现象，严重影响储层品质。概括起来，深层页岩气勘探理论与技术面临的挑战有以下几方面：

①深部页岩经历了多幕构造演化，地应力场—裂缝演化关系尚不清楚，裂缝预测、验证难度极大；②深部页岩在高温高压条件下，各向异性明显强于浅层，地球物理分辨率极低，浅层甜点评价及预测手段难以适用；③深层地震信号弱，井间预测精度低，潜力目标优选难度大；④高温高压下吸附气、游离气赋存机制与变化规律^[30-31]缺乏系统的实验攻关，未能科学揭示热效应对天然气赋存状态的影响规律。

2.2 气藏工程理论与方法的挑战

中浅层大规模高效益开发和深层页岩气规模有效开发，对气藏工程提出了诸多挑战。主要包括：①深层、高温、高压条件下（压力普遍高于 70 MPa、平均地层温度普遍超过 130 ℃），页岩储层孔隙中 CH₄ 的赋存状态及不同赋存状态间转换规律尚不明确。随着孔径减小和温度、压力的增大，CH₄ 在纳米级空间内的赋存状态、热力学参数、吸附—解吸特征等也会发生变化，而目前无论是室内等温吸附实验还是分子模拟，都无法同时有效考虑页岩真实孔隙结构与高温、高压储层原地条件。②深层页岩储层高温高压跨尺度气—水两相流动机理仍有待探索。不同大小孔隙内的页岩气—水两相流动规律存在差异，深层高温高压环境下限域效应和真实气体效应对页岩气流动规律的影响并不明确，页岩气井压裂后焖井过程中压裂液和页岩气置换的机理以及高温、高压条件下深层页岩变形对页岩孔隙结构、缝网形态和渗流特征的影响机理还需继续研究。③深层页岩气合理开发技术政策优化路径尚不明确。页岩气井开发

效果受地质、地质力学、压裂、开发方式等多因素影响。地质、工程、开发、经济等多因素非线性机制下的开发政策优化是页岩气开发面临的重大挑战。

2.3 钻采工程技术挑战

2.3.1 钻井技术方面挑战

水平井油基钻井液漏失的有效防治,卡钻、埋钻具事故的有效消除技术。川南页岩储层水平井经常发生漏失,油基钻井液特别是高密度油基钻井液堵漏材料种类少,有效堵漏手段有限;因井壁坍塌、掉块、井眼净化差,引起长水平段钻柱摩阻扭矩大,严重时导致埋钻具事故。

长水平段一趟钻钻井技术。2019年长宁区块、威远202井、威远204井区等平均需要3~5趟钻,而美国水平段长度从2500m增至2860m的情况下,机械钻速介于37~89m/h,平均机械钻速为60m/h,基本实现一趟钻完成。

降低或者消除水平段套损技术。水平井压裂套损井数量极高,单井套管变形点为1~3个;起下钻作业遇阻、遇卡现象时有发生,严重影响压裂效果,制约页岩气长期高效开发。

2.3.2 压裂技术方面挑战

现有理论体系难以满足压裂工程实践需要。压裂中的造缝输砂、压裂后的排液采气属于复杂的物理化学过程,背后蕴藏着诸多尚待解决的科学问题,以致工程实践常出现现有理论难以解释的现象。例如,经典理论从缝间应力干扰机理出发,可得出避免缝间应力干扰和渗流干扰的最小裂缝间距(簇间距),进而提出多段、少簇、大间距的布缝方式。新一代压裂工艺,采用少段、多簇、密切割布缝,簇间距已明显小于经典理论推荐的簇间距下限,却取得了更好的压后测试效果。这就需要更科学地揭示应力干扰与渗流干扰机理。

现有工艺模式难以满足深层页岩缝网改造需要。现有的压裂均是通过提高缝内净压力来实现更大的改造体积,最常用的方法是大排量和缝内暂堵憋压。较之中浅层页岩,深层页岩闭合压力高,水平应力差更大,若按照现有工艺模式则要则需要更大的排量、更精准的暂堵憋压,这就对施工设备和固井质量提出了相当苛刻的要求。

现有配套工艺难以满足浅层、中浅层页岩压裂持续降本增效需要。目前,少段多簇、石英砂替代陶粒、连续加砂替代段塞式加砂等工艺已显现出明显的降本作用。但是如何进一步提高页岩气产量还需

要持续攻关。特别是浅层页岩气中吸附气占比较高,现有配套工艺罕有考虑提高吸附气的持续动用。

2.3.3 高效排采与绿色开发方面挑战

深层页岩气井两种以上排采方法的复合排采理论与智能管理系统亟待研发。

山地丘陵地貌,土地征用与复垦难度大。按照现有的工厂化作业模式,单个页岩气平台建设期约占地50亩(1亩=666.67m²),进入采气投产后占地约10亩。四川盆地页岩气主产区人均耕地少,基本农田占用比大。页岩气钻采征地用地,协调难度大。

页岩气单井压裂平均耗水量超过4×10⁴m³,即使返排液完全回用,但在沟壑纵横的四川盆地页岩气主产区,大规模产能建设带来的压裂取水难题也非常棘手。

大规模页岩气开发过程还需控制CH₄泄漏,以减小甲烷气体逸散带来的安全隐患和温室效应。

2.4 产业规制改革挑战

尽管页岩气已被国家设立为独立矿种,但还未形成针对页岩气这一独立矿种的完备高效的规制体系。目前我国对页岩气规制主要参照天然气规制,仅有少量专门针对页岩气产业的规制,分布零散且层级较低。四川盆地页岩气产业规制改革主要面临三个方面挑战:①规制系统政策尚不完善。缺乏针对页岩气勘探开发特点的相关法律法规。特别是针对页岩气开发过程出现的水资源保护、废弃物处置等难题,存在多口监管但监管能力尚不能完全覆盖的问题。②规制政策有效性不足。规制政策不够稳定,如财政补贴政策不稳定、要求高,补贴总额难以预计;准入规制对市场主体吸引力并不大,部分企业已向自然资源部退回或延期了全部或部分页岩气区块矿权^[32],甚至部分外资退出了合作;减免探矿权使用费、采矿权使用费以及进口设备关税的作用有限;页岩气定价机制还不能真实反映市场供需关系和资源稀缺程度。③规制运行机制有缺陷。规制机构多且职能交叉分散,带来规制概念不清晰、规制边界模糊、规制程序不确定等问题。

3 四川盆地页岩气大规模高效开发对策

从我国页岩气产业发展趋势看,四川盆地页岩气大规模高效开发面临两大核心任务,即中浅层页岩气持续稳产和深层页岩气规模建产。与北美地区相比,四川盆地页岩气勘探开发在地理环境、地质条件、

钻采技术、产业规制等方面有自身特点,很难采用北美大规模、高密度、连片化布井的开发模式^[33]。因此,需要立足“少井高产”策略^[14],一方面在页岩气井全生命周期,继续坚持采用地质工程一体化技术开展“一体化研究、一体化设计、一体化实施和一体化迭代”^[34],另一方面,以问题为导向,从地质评价、开发政策、工程技术、产业规制等方面开展持续攻关。

3.1 完善地质评价理论与技术

3.1.1 科学揭示深层页岩孔隙特征与赋存机制

深层页岩微纳米孔隙体系中成岩矿物成因机理、成岩一有机与无机孔隙差异演化路径重构、含水页岩吸附气与游离气占比随温压变化规律及控制因素等研究尚属空白,可考虑在成岩矿物元素迁移识别、矿物一有机质一热演化控制下的成岩一孔隙演化过程重构及差异发育机理、温压环境含水页岩吸附气游离气分配机制与定量表征等方面重点突破。

3.1.2 创新研发深层页岩气地质一工程甜点精准预测技术

建议开展构造变形三维数值模拟,深层页岩矿物、有机质、含气量、裂缝、可压裂性等关键要素综合评价,建立深层页岩地质一工程甜点预测指标体系及高精度表征方法,重点突破复杂变形区构造裂缝识别与预测技术、地质一工程甜点预测的大数据深度学习技术和地质一地球物理一体化储层建模技术。

3.2 创新气藏工程理论与方法

3.2.1 科学揭示压裂水平井页岩气产出机制

开展原地温度、压力环境下,压裂焖井、压后生产阶段页岩孔隙结构的变化特征和 CH_4 流动机理研究,揭示气水共存条件下页岩气解吸、扩散、渗流主控因素和支撑剂充填裂缝、自支撑裂缝的全域导流能力长期变化规律。

3.2.2 加快建立“地质一工程一开发一经济”一体化的页岩气开发优化方法^[35]

建立页岩压裂水平井(组)跨尺度渗流一多相管流模型,研制耦合页岩基质、压裂缝网、采气管柱的跨尺度流动压后生产动态数值模拟器,为开发政策制定奠定理论和方法基础。基于页岩气甜点区“体积开发”理念^[36],结合数值模拟和矿场试验,以经济指标为目标量^[37],考虑地质、工程、环境和经济成本约束,优化井网参数、压裂裂缝参数、排采控制参数等影响产量和经济效益的人为可控参数。考虑浅层页岩直井开发、中浅层页岩水平井开发、中

浅层页岩水平井一直井组合开发、深层页岩水平井单层平面开发、深层页岩水平井多层立体开发等不同的开发模式,分类开展井网参数优化、裂缝布局优化、排采制度优化^[38]。以此为基础,可进一步优化钻井工程参数、压裂工程参数和排采工程参数。

3.3 研发降本增效工程技术

页岩气降本增效开发的关键在于不断优化钻井、压裂等各个环节的周期与成本,虽不过于追求“豪华与顶尖”的技术,但需致力于技术的持续改进与升级换代^[39]。

3.3.1 研发安全、智慧的优快建井技术

攻关长水平段一趟钻钻井配套技术,特别是环保型防塌钻井液、超轻减阻钻具、井眼高效净化技术和智能录井技术,在高钻压、高转速、高泵压、大排量、大扭矩环境下,进一步提高机械钻速,减少钻井事故,缩短钻井周期。攻关深层页岩水平井全生命周期的井筒完整性管理理论和技术,提升深层页岩长水平井井身质量,降低或者消除水平段套损,为大规模、长时间的储层改造(特别是重复压裂)和压后生产提供井筒保障。

3.3.2 研发物理一化学复合的储层改造技术

革新现有水平井压裂破岩、输砂、导流理论,为不同类型页岩储层优化布缝方式、压裂液、支撑剂规模和泵注程序提供科学依据。在此基础上,开展海相页岩超临界二氧化碳压裂技术^[40]研究,突破超临界二氧化碳减阻、增粘瓶颈,研发与之配套的超低密度、低成本支撑剂,利用二氧化碳的物理一化学双重作用,在充分造缝的同时提高吸附气的动用程度。探索深层页岩氧化致裂、液氮致裂工艺,进而建立从页岩纳微孔隙到填砂裂缝的跨尺度导流通道。此外,建议挖掘压裂施工数据,建立基于施工数据反演压裂裂缝参数的理论和方法,丰富裂缝监测和评价手段,降低压裂监测成本。在老井挖潜方面,建议加强页岩气水平井重复压裂选井选层和造缝工艺等方面的研究^[41],为恢复和提高老井产量奠定基础。

3.3.3 研发深层长水平井高效排采技术

研发高性价比的水平井流入剖面测试技术、井下积液监测技术,揭示压后水平井不同阶段的井底流入动态和水平段气液两相流动规律,在此基础上,考虑水平段井眼轨迹结构优化油管下深,发展平台压缩机整体气举、泡排辅助气举或气举辅助柱塞等复合工艺技术。

3.3.4 研发环保、安全的钻井、压裂配套技术

攻克油基钻屑制备压裂支撑剂的技术和经济瓶颈,构建从地面到地下的油基钻屑资源化利用新途径。研发适合高山深谷环境下的轻量化、模块化、智能化钻井、压裂装备(系统),减少钻井、压裂对自然和人居环境的不利影响;研发基于远程实时信息传输的钻井、压裂大数据集中控制系统,为工程施工优化和应急事件及时处置提供关键技术支撑。

3.4 健全页岩气产业规制

政府是页岩气产业规制的主体,必须通过深化产业规制改革提升其服务产业建设和发展的能力,同时应注重调动和发挥行业规制、社会规制对产业发展的积极作用。

深化规制机构改革。集中分散的规制权力,简化行政审批流程,提高配套政策适用性。

继续完善页岩气开发的相关法律法规。以环境保护为例,应该根据页岩气开发的特点制定排污权建议、水资源保护、油基泥浆无害化处理等法律法规,提高企业环境违法成本。

继续优化页岩气开发的经济性规制。进一步推进天然气产业价格市场化改革,放开气源准入和出厂价格,由政府定价向市场发挥价格决定作用过渡;加大财政补贴和税收减免对企业开发新区块的支持力度,鼓励技术创新。

完善页岩气勘探开发信息强制披露和数据共享制度。特别对有重大环境风险的信息必须强制披露;构建勘探开发共享数据平台,提升开发效率和减少重复成本。

建立公众参与制度。不断加大页岩气科普宣传工作力度,通过普及页岩气的能源安全战略意义以及页岩气开发与生态环境保护等相关知识,引导公众正确对待页岩气开发。增强公众的环保意识和风险识别能力,以便有效处理和规避。

4 结束语

四川盆地已经并将继续成为中国页岩气勘探开发的主战场。未来5~10年,四川盆地页岩气将从规模开采阶段发展到大规模高效开发阶段。大规模高效开发必须以中浅层页岩气持续稳产和深层页岩气规模建产为基础。针对勘探开发理论技术和产业规制方面的挑战,为实现大规模高效开发,需要坚持页岩气甜点区“体积开发”理念,攻克深层页岩气地质—

工程甜点精准预测技术,建立“地质—工程—开发—经济”一体化的页岩气开发优化方法,研发降本增效的钻井、压裂和排采工程技术,构建政府规制、社会规制、行业规制和间接规制有机协调的产业规制体系,实现技术要素与非技术要素对产业的协同促进。

致谢:本文选题和谋篇布局期间得到了在四川盆地从事页岩气勘探开发的相关企业和页岩气资源地基层政府大力支持,在撰写过程中得到了西南石油大学刘永辉、刘宇程等的帮助,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国务院办公厅.《新时代的中国能源发展》白皮书[R/OL].(2020-12-21)[2021-04-13]. <http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1695117/1695117.htm>. The State Council Information Office of the PRC. White paper on China's energy development in the new era[R/OL].(2020-12-21)[2021-04-13]. <http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1695117/1695117.htm>.
- [2] 中华人民共和国自然资源部.2014—2019年全国石油天然气资源勘查开采情况通报[R].北京:中华人民共和国自然资源部,2014-2019. Ministry of Natural Resources of the PRC. 2014-2019 national oil and gas resources exploration and exploitation circular[R]. Beijing: Ministry of Natural Resources of the PRC, 2014-2019.
- [3] 邹才能,赵群,丛连铸,等.中国页岩气开发进展、潜力及前景[J].天然气工业,2021,41(1):1-14. ZOU Caineng, ZHAO Qun, CONG Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 1-14.
- [4] 邹才能,董大忠,杨桦,等.中国页岩气形成条件及勘探实践[J].天然气工业,2011,31(12):26-39. ZOU Caineng, DONG Dazhong, YANG Hua, et al. Conditions of shale gas accumulation and exploration practices in China[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 26-39.
- [5] 央广网.2020年我国页岩气产量增长超过3成 成为天然气增产主力军[EB/OL].(2021-02-09)[2021-04-13]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1691230280447523341&wfr=spider&for=pc>. CCTV Central Broadcasting Network. China's shale gas production will increase by more than 30% in 2020, becoming the main force of natural gas production[EB/OL].(2021-02-09)[2021-04-13]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1691230280447523341&wfr=spider&for=pc>.
- [6] 何晓,吴建发,雍锐,等.四川盆地长宁—威远区块海相页岩气田成藏条件及勘探开发关键技术[J].石油学报,2021,42(2):259-272. HE Xiao, WU Jianfa, YONG Rui, et al. Accumulation conditions and key exploration and development technologies of marine shale gas field in Changning-Weiyuan Block, Sichuan Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 42(2): 259-272.

- [7] 孙成禹, 姚振岸, 伍敦仕, 等. 基于波动方程的叠前地震反演[J]. 地球物理学报, 2019, 62(2): 604-618.
SUN Chengyu, YAO Zhen'an, WU Dunshi, et al. Prestack seismic inversion based on wave-equation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(2): 604-618.
- [8] 苏海, 郑德德, 高棒棒, 等. 叠前地震反演技术在苏里格气田的应用[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(1): 179-184.
SU Hai, ZHENG Dede, GAO Bangbang, et al. Application of pre-stack seismic data inversion technology in Sulige area[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(1): 179-184.
- [9] 王振涛, 慎国强, 王玉梅, 等. 模型驱动的高精度叠前地震反演方法及应用[J]. 石油物探, 2020, 59(6): 927-935.
WANG Zhentao, SHEN Guoqiang, WANG Yumei, et al. Model driven high-precision prestack seismic inversion[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(6): 927-935.
- [10] 李应争. 基于黏性介质模型的全波形反演在页岩气“甜点”预测中的应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
LI Yingzheng. Application of full waveform inversion based on viscous medium in shale gas 'sweet spot' prediction[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [11] 孙焕泉, 周德华, 蔡勋育, 等. 中国石化页岩气发展现状与趋势[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 14-26.
SUN Huanquan, ZHOU Dehua, CAI Xunyu, et al. Progress and prospect of shale gas development of Sinopec[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 14-26.
- [12] 郭旭升. 南海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. 地质学报, 2014, 88(7): 1209-1218.
GUO Xusheng. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in southern China—understanding from the Longmaxi Formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(7): 1209-1218.
- [13] 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等. 中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 689-701.
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (I)[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 689-701.
- [14] 王文东. 体积压裂水平井复杂缝网分形表征与流动模拟[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
WANG Wendong. Fractal characterization and flow simulation of complex fracture network in volume fractured horizontal wells[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.
- [15] 骆新颖. 长宁威远区块页岩气水平井提速技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
LUO Xinying. Research on shale gas horizontal well speed-up technology in Weiyuan Block of Changning[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [16] 伍葳, 吴珂, 文春宇, 等. 长宁页岩气井水平段钻井参数强化对比评价[J]. 非常规油气, 2019, 6(5): 80-84.
WU Wei, WU Ke, WEN Chunyu, et al. The comparison analysis of drilling parameter optimizing practice in the horizontal section of two specific shale gas wells in Changning area[J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(5): 80-84.
- [17] 赵金洲, 任岚, 沈骋, 等. 页岩气储层缝网压裂理论与技术研究新进展[J]. 天然气工业, 2018, 38(3): 1-14.
ZHAO Jinzhou, REN Lan, SHEN Cheng, et al. Latest research progresses in network fracturing theories and technologies for shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(3): 1-14.
- [18] RICKMAN R, MULLEN M J, PETRE J E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett shale[C]//paper 115258-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 21-24 September 2008, Colorado, USA.
- [19] 李嘉, 李德旗, 孙亚东, 等. 可变黏多功能压裂液体系及应用[J]. 钻采工艺, 2020, 43(4): 105-107.
LI Jia, LI Deqi, SUN Yadong, et al. Variable viscosity multifunctional fracturing fluid system and its application[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(4): 105-107.
- [20] 乐宏, 杨兆中, 范宇. 宁209井区裂缝控藏体积压裂技术研究与应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2020, 42(5): 86-98.
YUE Hong, YANG Zhaozhong, FAN Yu. Research and application of volume fracturing technology fracture control in Ning 209 area[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2020, 42(5): 86-98.
- [21] 梁兴, 管彬, 李军龙, 等. 山地浅层页岩气地质工程一体化高效压裂试气技术——以昭通国家级页岩气示范区太阳气田为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(增刊1): 124-132.
LIANG Xing, GUAN Bin, LI Junlong, et al. Key technologies of shallow shale gas reservoir in mountainous area: Taking Taiyang gas field in Zhaotong national shale gas demonstration area as an example[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(S1): 124-132.
- [22] 王庆蓉, 陈家晓, 向建华, 等. 页岩气井积液诊断及排水采气工艺技术探讨[J]. 天然气与石油, 2020, 38(5): 83-87.
WANG Qingrong, CHEN Jiaxiao, XIANG Jianhua, et al. Discussion on shale gas well effusion diagnosis and drainage gas production technique[J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38(5): 83-87.
- [23] 杨智, 陈家晓, 段蕴琦, 等. 页岩气水平井柱塞排采工艺研究与应用[J]. 钻采工艺, 2020, 43(增刊1): 40-42.
YANG Zhi, CHEN Jiaxiao, DUAN Yunqi, et al. Plunger lift technology research and application in horizontal shale gas well[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(S1): 40-42.
- [24] 蒋泽银, 李伟, 罗鑫, 等. 页岩气平台井泡沫排水采气技术[J]. 天然气工业, 2020, 40(4): 85-90.
JIANG Zeyin, LI Wei, LUO Xin, et al. Foam drainage gas recovery technology for shale-gas platform wells[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(4): 85-90.
- [25] 范宇, 岳圣杰, 李武广, 等. 长宁页岩气田采气工艺实践与效果[J]. 天然气与石油, 2020, 38(2): 54-60.
FAN Yu, YUE Shengjie, LI Wuguang, et al. Practice and effect of gas production technology in Changning shale gas field[J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38(2): 54-60.
- [26] 商绍芬, 严鸿, 吴建, 等. 四川盆地长宁页岩气井生产特征及开采方式[J]. 天然气勘探与开发, 2018, 41(4): 69-75.
SHANG Shaofen, YAN Hong, WU Jian, et al. Production charac-

- teristics and development modes of shale-gas wells, Changning gas field, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2018, 41(4): 69-75.
- [27] 百度百科. 产业规制 [EB/OL]. (2015-11-26)[2021-04-13]. <https://baike.baidu.com/item/%E4%BA%A7%E4%B8%9A%E8%A7%84%E5%88%B6/2274316?fr=Aladdin>.
Baidu Encyclopedia. Regulation of industry [EB/OL]. (2015-11-26)[2021-04-13]. <https://baike.baidu.com/item/%E4%BA%A7%E4%B8%9A%E8%A7%84%E5%88%B6/2274316?fr=aladdin>.
- [28] 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等. 中国页岩气特征、挑战及前景 (二) [J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(2): 166-178.
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (II) [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(2): 166-178.
- [29] 刘曰武, 高大鹏, 李奇, 等. 页岩气开采中的若干力学前沿问题 [J]. *力学进展*, 2019, 49(1): 1-236.
LIU Yuewu, GAO Dapeng, LI Qi, et al. Mechanical frontiers in shale-gas development [J]. *Advances in Mechanics*, 2019, 49(1): 1-236.
- [30] 张烈辉, 唐洪明, 陈果, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩吸附特征及控制因素 [J]. *天然气工业*, 2014, 34(12): 63-69.
ZHANG Liehui, TANG Hongming, CHEN Guo, et al. Adsorption capacity and controlling factors of the Lower Silurian Longmaxi Shale Play in southern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(12): 63-69.
- [31] 张树文. 四川盆地页岩气储层微组构、吸附、解吸和基本力学特性的实验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
ZHANG Shuwen. Experimental study on microstructure, adsorption, desorption and basic mechanical properties of shale gas reservoirs in Sichuan Basin [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [32] 朱润民. “三桶油”合作进入共享新模式 [J]. *中国石油石化*, 2019(15): 32.
ZHU Runmin. "Three barrels of oil" cooperation enters into a new mode of sharing [J]. *China Petrochem*, 2019(15): 32.
- [33] 朱斗星, 蒋立伟, 牛卫涛, 等. 页岩气地震地质工程一体化技术的应用 [J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(增刊 1): 249-255.
ZHU Douxing, JIANG Liwei, NIU Weitao, et al. Seismic and geological integration applied in the shale gas exploration [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(S1): 249-255.
- [34] 陈更生, 吴建发, 刘勇, 等. 川南地区百亿立方米页岩气产能建设地质工程一体化关键技术 [J]. *天然气工业*, 2021, 41(1): 72-82.
CHEN Gengsheng, WU Jianfa, LIU Yong, et al. Geology-engineering integration key technologies for ten billion cubic meters of shale gas productivity construction in the southern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(1): 72-82.
- [35] 雍锐, 常程, 张德良, 等. 地质—工程—经济一体化页岩气水平井井距优化——以国家级页岩气开发示范区宁 209 井区为例 [J]. *天然气工业*, 2020, 40(7): 42-48.
YONG Rui, CHANG Cheng, ZHANG Deliang, et al. Optimization of shale-gas horizontal well spacing based on geology-engineering-economy integration: A case study of Well Block Ning 209 in the National Shale Gas Development Demonstration Area [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(7): 42-48.
- [36] 焦方正. 页岩气“体积开发”理论认识、核心技术与实践 [J]. *天然气工业*, 2019, 39(5): 1-14.
JIAO Fangzheng. Theoretical insights, core technologies and practices concerning "volume development" of shale gas in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(5): 1-14.
- [37] 郭彤楼. 深层页岩气勘探开发进展与攻关方向 [J]. *油气藏评价与开发*, 2021, 11(1): 1-6.
GUO Tonglou. Progress and research direction of deep shale gas exploration and development [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(1): 1-6.
- [38] 谢军, 鲜成钢, 吴建发, 等. 长宁国家级页岩气示范区地质工程一体化最优化关键要素实践与认识 [J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(2): 174-185.
XIE Jun, XIAN Chenggang, WU Jianfa, et al. Optimal key elements of geoengineering integration in Changning National Shale Gas Demonstration Zone [J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(2): 174-185.
- [39] 何治亮, 聂海宽, 蒋廷学. 四川盆地深层页岩气规模有效开发面临的挑战与对策 [J]. *油气藏评价与开发*, 2021, 11(2): 135-145.
HE Zhiliang, NIE Haikuan, JIANG Tingxue. Challenges and countermeasures of effective development with large scale of deep shale gas in Sichuan Basin [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(2): 135-145.
- [40] 陈晨, 朱颖, 翟梁皓, 等. 超临界二氧化碳压裂技术研究进展 [J]. *探矿工程 (岩土钻掘工程)*, 2018, 45(10): 21-26.
CHEN Chen, ZHU Ying, ZHAI Lianghao, et al. Research progress on supercritical carbon dioxide fracturing technology [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(10): 21-26.
- [41] 杨兆中, 李扬, 李小刚, 等. 页岩气水平井重复压裂关键技术进展及启示 [J]. *西南石油大学学报 (自然科学版)*, 2019, 41(6): 75-86.
YANG Zhaozhong, LI Yang, LI Xiaogang, et al. Key technology progress and Enlightenment in refracturing of shale gas horizontal wells [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2019, 41(6): 75-86.

(修改回稿日期 2021-07-12 编辑 韩晓渝)



本文互动