

页岩气储层工程地质力学一体化技术进展与探讨

杨恒林^{1,2}, 乔磊^{1,2}, 田中兰^{1,2}

(1. 中国石油集团钻井工程技术研究院, 北京 102206; 2. 油气钻井技术国家工程实验室(中国石油集团钻井工程技术研究院), 北京 102206)

摘要:南方复杂山地海相页岩气水平井钻井完井过程中存在井壁稳定性、井筒完整性和储层可压性等工程地质力学问题与挑战,套管变形已经成为制约页岩气资源高效开发的生产技术难点。综述了地质力学一体化建模、岩石力学各向异性测试和胶结结构基础性研究进展,建立了龙马溪组优质页岩构造模型和地质力学参数模型,以龙₁亚段页岩为例,分析了矿物组分、胶结结构和剪切摩擦特性对裂缝稳态-非稳态扩展的影响,揭示了页岩颗粒矿物支撑结构的非稳态破坏和黏土胶结结构的稳态破坏机理。研究表明,强化地质工程一体化技术研究,依据水平井眼穿越不同小层的矿物组分、胶结结构和地质力学特征进行分段分簇压裂方案设计,可以实现我国页岩气的高效开发。

关键词:页岩气;水平井;钻井;完井;地质力学;一体化

中图分类号:TE21 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2017)02-0025-07

Advances in Shale Gas Reservoir Engineering and Geomechanics Integration Technology and Relevant Discussions

YANG Henglin^{1,2}, QIAO Lei^{1,2}, TIAN Zhonglan^{1,2}

(1. CNPC Drilling Research Institute, Beijing, 102206, China; 2. National Engineering Laboratory for Oil and Gas Drilling Technology (CNPC Drilling Research Institute), Beijing, 102206, China)

Abstract: Problems and challenges related to the reservoir engineering and geomechanics, such as wellbore stability, wellbore integrity and reservoir compressibility are often encountered in the process of horizontal drilling and completion in the shale gas reservoirs with marine facies and complex mountainous landforms in South China. Casing deformation has already become one of the problems hindering the development of shale gas resources efficiently. In this paper, the advance in modelling geomechanics integration, anisotropic tests of rock mechanics and basic research on cementation structure were summarized, and used to develop an excellent shale structure model and a geomechanics model for shale reservoirs in Longmaxi Formation. Taking the shale of Long₁ section as an example, the impacts of mineral composition, cementation structures and shear friction on the steady state-unsteady propagation of fractures were analyzed and revealed the mechanisms of unsteady destruction of shale granule mineral support structures and steady destruction of clay cementation structures. Research results indicated that it is essential to enhance the integration of geology and engineering, and design the fracturing plans staged based on the mineral compositions, cementation structures and geomechanics of the layers indicated in horizontal wells, so as to achieve the efficient development of shale gas in China.

Key words: shale gas; horizontal well; drilling; well completion; geomechanics; integration

“十二五”期间,我国通过持续技术攻关,初步形成了三维地震勘探与压裂微地震监测、水平井钻井、大型体积压裂和平台式“工厂化”生产模式等页岩气工程技术,并在推动长宁-威远、昭通和涪陵等3个国家页岩气示范区建设中发挥了重要作用^[1-2]。同时,我国在页岩非线性地质力学表征与评价、多重耦合下的页岩安全优质钻井完井理论、页岩

收稿日期:2016-11-30; 改回日期:2017-03-02。

作者简介:杨恒林(1973—),男,辽宁抚顺人,1996年毕业于石油大学(华东)石油机械专业,1999年获石油大学(华东)工程力学专业硕士学位,2007年获中国石油大学(北京)油气井工程专业博士学位,高级工程师,主要从事非常规油气地质力学与工程研究。E-mail: yhldri@cnpc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项“工厂化钻井关键技术研究与应用”(编号:2016ZX05000-001)和“昭通页岩气勘探开发示范工程”(编号:2017ZX05063)部分研究内容。

地层复杂裂缝扩展与控制及页岩气多尺度渗流与开采等基础理论方面进行了大量研究^[3-4]。虽然我国在页岩气工程技术和基础理论研究方面取得了长足的进步,但我国页岩气储层地质条件极为复杂,强隆升、强剥蚀和强变形作用导致下古生界页岩经历强改造作用^[5-6],使四川盆地及其周缘的页岩气储层应力环境复杂,尤其是长宁-威远和昭通页岩气示范区水平井钻井完井过程中井壁稳定性、井筒完整性等地质力学问题非常突出。国内进行了多因素耦合条件下的套管应力分析、压裂改造期间井筒温度压力变化和固井质量对套管强度的影响等研究并取得了一些成果,但均不能完全揭示页岩气水平井套管变形机理^[7-11]。为此,笔者开展了页岩气储层工程地质力学一体化技术研究,融合多学科信息进行了精细构造建模和地质力学属性建模研究^[12-14],基于XRD衍射、扫描电子显微镜和双轴实验机等分别测试了不同小层的矿物组分、胶结结构和剪切摩擦特性,以解决页岩气储层长水平段井壁失稳与控制、大型压裂过程中套管损坏机理与预防和单井产量敏感性评价等工程技术关键难题。

1 页岩气水平井钻井完井面临的地质力学问题

1.1 井壁稳定性

页岩气水平井钻井完井过程中一直存在井壁失稳问题。2013年以前,主要开展了柴油基、合成基和白油基钻井液现场试验,但在造斜段和水平段钻进过程中,依然发生了垮塌、卡钻和井漏等井下故障;2014—2015年,长宁-威远和昭通页岩气水平井所用钻井液的密度多维持在2.0 kg/L以上,但采用油基钻井液成本高、环保压力大,采用高性能水基钻井液易发生埋钻具事故。

页岩气井长水平段井壁失稳主要有以下特征:1)风险性,由于页岩气储层层理裂缝发育,存在裂缝破碎发育带,一旦井眼轨迹通过断层、破碎带或者存在非稳态破坏的地层,极易发生突发性井壁坍塌;2)固有性,页岩气储层多是层理状页岩,强度表现为明显的各向异性特征,层理弱面成为影响水平井井壁稳定性的主要因素;3)耦合性,页岩中黏土矿物主要为伊利石,水化膨胀不再是主要矛盾,但目前页岩气水平井水平段尚不能实现一趟钻完成,与直井相比,水基钻井液与井壁围岩的接触面积和接触时间

均成倍增加,应力-损伤、力学-化学耦合效应显著。

1.2 井筒完整性

截至“十二五”末,长宁-威远、昭通国家级页岩气示范区的90口页岩气水平井实施了压裂,其中30口井压裂期间发生了套管变形,变形率达到33.3%。分析24臂井径测井资料发现:套管变形符合剪切变形特征,存在多个剪切变形和挤压变形区,轴向剪切变形量为分米级,径向剪切变形量为厘米级,变形后的套管截面长短轴比达到1.30以上,剪切变形区两侧的挤压变形区轴向长度为2~3 m。

统计分析表明,长宁-威远、昭通国家级页岩气示范区具有岩性界面/层理相关性的套管变形井数量占套管变形井总数的61.7%。基于套管变形特征和地质力学分析,初步认为导致套管变形的主要原因为:1)水平井井眼轨迹在龙₁亚段不同小层穿越,套管斜穿层理界面,注入压裂液导致储层页岩膨胀并抬升地层,与注入点相距几百米的两翼位置层理或岩性界面发生滑移而剪切套管,使其在平行层理面方向发生剪切变形,存在多个剪切套变点;2)压裂过程中形成平行层理和岩性界面的水平裂缝,当套管斜穿该层理界面时,水平裂缝张开拉剪套管,使其在垂直层理面方向上发生剪切变形;3)压裂液进入地层,孔隙压力非均匀增加,地应力扰动或断层摩擦强度降低,导致延伸长度在百米以上量级的断层重新激活^[15],从而剪切穿越断层的套管,使其沿断层面走向发生剪切变形。

1.3 页岩基质脆性

页岩可压裂性定义为在水力压裂过程中具有能够被有效压裂从而获得增产能力的性质,可压裂性是页岩地质、储层特征的综合反映,影响因素众多^[16-17]。页岩可压裂性评价的主要内容是评价裂缝和层理、页岩脆性和水平应力差,这三者是决定页岩能否“压碎”的关键因素^[18-19]。目前,已提出了30多种页岩脆性评价方法,主要包括页岩矿物组分、弹性力学、强度参数、压入硬度和全应力-应变等5大类^[20-26],其中基于矿物组分和弹性力学的页岩脆性评价方法较为常用。

页岩脆性主要用来评价页岩基质破碎和形成多维破裂面的难易程度。玻璃中预制小裂纹和非稳态扩展模拟试验研究表明,裂纹发生稳态扩展时,初始压力和压缩量保持不变,一旦出现非稳态扩展,初始压力和压缩量便突然下降,试验中的应力降和地震

监测中的应力降在数量级上是相同的^[27]。大多数微地震监测侧重于高频微地震信号,监测到的是高脆性页岩的裂缝非稳态扩展;高黏土低脆性页岩表现为长周期多持续的裂缝稳态扩展,不能生成高频地震波,因而常规微地震无法采集到裂缝稳态扩展信号,导致页岩气产量与微地震信号的相关性不理想^[28-29]。

页岩的剪切摩擦系数和速率状态特性与黏土矿物质量分数关系密切^[30],当页岩中黏土矿物与有机质的质量分数低于 30% 时,页岩剪切破裂表现为摩擦系数较大和速率弱化,即裂缝非稳态扩展特性,易形成网状裂缝;当黏土矿物与有机质的质量分数高于 30% 时,页岩剪切破裂表现为摩擦系数降低和速率强化,即裂缝稳态扩展特性。这意味着随着黏土矿物质量分数增大,页岩基质脆性降低,压裂形成网状裂缝的难度增大。笔者认为,页岩基质脆性可表征页岩剪切裂缝发生非稳态扩展的能力,基于该机理对页岩基质脆性的表征与矿物组分模型是一致的。

2 页岩气储层工程地质力学研究进展

2.1 气藏尺度的地质力学一体化建模

页岩气储层的岩石物理和岩石力学属性在纵向和横向的非均质性非常明显,地质工程一体化可以针对页岩气藏的非均质性,开展储层质量和完井质量的评价,是非常规油气实现效益开发的最佳途径之一。所谓地质工程一体化就是围绕提高单井产量这个关键问题,不同来源、不同格式、不同维度和不同尺度的各学科数据,以三维构造模型为数字化载体,通过多学科数据分析与相互佐证,识别各学科数据元素的特征及其相互间的关系,揭示其包含的地质意义和工程意义,服务于油气藏的高效勘探、开发和管理。

气藏尺度的地质力学一体化建模以页岩气藏三维构造模型为载体,基于动静态测试、测井解释、地震解释及相互约束,建立三维储层地质力学参数属性模型,通过数值分析方法获得三维应力场模型^[14,31-32]。由于构造模型反映了地层空间格架特征,是建立地质力学参数模型的基础。因此,建立气藏尺度的地质力学模型时,首先必须建立页岩气储层的精细构造模型。在对比研究井间地层的基础上,以单井分层数据为约束条件,结合三维地震构造解释成果,建立储层顶面、底面构造图,然后根据各小层的厚度分别进行内插。例如,龙马溪组优质页

岩深度域精细构造模型包括龙 1₂ 层顶部,龙马溪组底部,五峰组底部及龙 1_{1a}、龙 1_{1b}、龙 1_{1c} 和龙 1_{1d} 层顶部。建立地质力学参数模型时,根据页岩岩心试验确定动静态岩石力学参数,加载测井解释的岩石力学数据,并将测井解释数据采样到井眼轨迹穿过的网格,进行测井数据粗化;以地震反演属性作为软数据控制属性的横向分布,测井数据作为硬数据控制属性的纵向分布,采用序贯高斯法协同克里金插值法完成三维岩石力学参数属性模型的建立;然后利用三维地质力学软件模拟初始原场地应力。三维地质力学模型可以用于页岩气储层工程“甜点”的三维空间表征、井壁垮塌的风险预测、套管变形机理的研究分析、井眼轨迹方位和长度的优化和防漏防塌钻井液的设计,实现安全顺利快速钻进。

对于页岩气等非常规油气储层,传统的基于单井的岩石力学测试、解释及一维地应力分析技术已经不能满足要求,必须融合地球物理、钻井、录井、测井等多学科信息资料建立气藏尺度的三维地质力学模型。目前,地质力学一体化建模研究工作多是基于国外油气服务公司的勘探开发一体化软件平台、在三维地质建模软件与大型有限元软件之间实现数据交换,进行三维乃至四维地应力场数值模拟。因此,我国需搭建具有独立知识产权的勘探开发一体化软件平台,以实现不同学科、不同专业的数据资源共享。

2.2 井筒尺度的岩石力学精细化测试

根据钻井取心或露头进行岩石力学试验是直接获取井筒尺度岩石力学参数的唯一手段。受层理面影响,页岩力学性质、强度特征和破裂模式均表现出明显的各向异性,国内外学者对井筒尺度页岩各向异性、强度特征和破裂模式进行了研究^[33-38],并取得了一些成果;按照岩心轴线和层理面之间不同的夹角分别进行取心,并开展单轴和三轴力学试验,页岩弹性模量一般在平行层理方向最大,垂直层理方向最小,这种在平行层理和垂直层理方向表现出明显不同力学性质的岩体,工程上通常视为横观各向同性体,其应力-应变本构关系共有 5 个独立的弹性力学参数;页岩强度通常在垂直层理方向最高,平行层理面方向次之,与层理面夹角为 30° 时抗压强度最低;平行层理面破坏模式主要为沿多个平行层理面竖向劈裂,与层理面夹角为 30° 时沿层理弱面剪切破坏,夹角为 60° 时为贯穿层理和沿层理的复合剪切破坏,垂直层理面方向主要为贯穿层理的拉张

破坏。由于层理弱面的影响,页岩强度总体上呈现出两边高、中间低的“U”形变化规律,一般采用弱面破坏准则表征井壁围岩强度的各向异性破坏。

由于不同页岩矿物组分和胶结结构的差异性,页岩的弹性力学参数、强度参数和黏塑性蠕变行为均与黏土、有机质的质量分数具有很强的相关性。页岩的动静态弹性模量随黏土、有机质质量分数增加呈单调下降,垂直层理面方向的黏塑性蠕变大于平行层理面方向。页岩黏塑性蠕变特性与弹性模量的各向异性,可以理解为发生在页岩柔性矿物组分(黏土和有机质)和刚性矿物组分(石英、长石、黄铁矿和碳酸盐等)之间的应力或应变分区。

页岩岩心的保存难度很大,低孔隙页岩孔隙水的损失会使岩心的强度和刚度明显增大,页岩露头或未经密封保存页岩岩心的测试结果与地层真实情况存在较大误差。除了常规三轴和动静态弹性参数测试外,国内尚缺乏矿物组分对页岩剪切摩擦强度的精细测试研究^[39-40]。页岩多是硅质、钙质和黏土的混合物,其剪切摩擦强度随着黏土质量分数增大而降低,不同黏土矿物质量分数对应不同的剪切摩擦强度和速率强化-弱化特征,对于理解页岩不同小层水力压裂效果的差异性具有重要意义。

2.3 矿物组分和胶结结构的基础性研究

井筒尺度的页岩三轴或直剪试验结果表明,页岩剪切破裂的非稳态-稳态特征、弹性特征、黏塑形特征与页岩的矿物组分、胶结类型密切相关,研究矿物组分和胶结结构对页岩宏观力学特征影响的规律,有利于解释页岩的脆性和稳态-非稳态破裂机理。

页岩的剪切摩擦强度和速率强化-弱化特性与页岩中的黏土矿物质量分数和胶结类型密切相关。页岩剪切摩擦强度从高降为中,是由于页岩微观胶结结构从石英等颗粒支撑向颗粒镶嵌于黏土基质中的局部支撑结构转化;剪切摩擦强度从中降为低,则是颗粒支撑结构完全转化为黏土基质胶结结构。由硅质等颗粒支撑结构转化为黏土基质胶结结构时,剪切摩擦系数从0.80降至0.40。石英和方解石等颗粒矿物的摩擦系数最高,约为0.70~0.80,黏土矿物中伊利石、蒙脱石和绿泥石的摩擦系数较低,其中伊利石约为0.48~0.49,蒙脱石约为0.19~0.23。页岩剪切摩擦特征可以采用Dieterich准则描述^[30-31],黏土矿物在高剪切应变条件下呈现出均匀的速度强化特征,在Dieterich准则中 $a-b>0$,即裂

纹发生稳态扩展;石英和长石类矿物,在剪应变超过临界值以后,表现出速度弱化特征,Dieterich准则中 $a-b<0$,即裂纹发生非稳态扩展。页岩剪切破坏形式从非稳态过渡为稳态时黏土与有机质的质量分数约为30%。

基于页岩纳米压痕试验,得到硅质弹性模量为 63 ± 8 GPa,钙质弹性模量为 53 ± 6 GPa,黏土基质弹性模量为 29 ± 1 GPa;有机质弹性模量为0~25 GPa,其中高成熟度有机质的弹性模量为15~16 GPa^[41-44]。黄金坝龙 1_1 亚段页岩纳米压痕试验结果表明,硅质、钙质、黏土基质和有机质的弹性模量分别为85.10,65.15,19.20和7.70 GPa。基于弹性力学参数归一化的脆性指数评价模型,弹性模量的最大值和最小值分别取80和10 GPa,这与页岩中硅质、有机质的弹性模量基本一致,说明采用弹性模量和泊松比归一化的评价方法和脆性矿物比例法得到的脆性指数是一致的。由于页岩能否发生非稳态剪切破裂与黏土矿物质量分数直接相关,所以矿物组分模型是评价页岩脆性既科学又实用的方法。

昭通和威远202井区龙 1_1 亚段矿物组分测试结果表明^[14,45-46],龙 1_{1a} 层、龙 1_{1b} 层页岩黏土和有机质的质量分数小于30%,龙 1_{1c} 层页岩黏土和有机质的质量分数在30%左右,而龙 1_{1d} 层页岩黏土和有机质的质量分数接近50%;胶结类型从龙 1_{1a} 层和龙 1_{1b} 层的颗粒支撑结构过渡到龙 1_{1d} 层的黏土基质胶结结构。显然,龙 1_{1a} 层和龙 1_{1b} 层页岩在大排量压裂作用下裂纹易发生非稳态扩展,形成网状裂缝,这与水平井龙 1_{1a} 层和龙 1_{1b} 层钻遇率高、单井产量亦高的统计规律相吻合。由于页岩层理起到速率弱化作用,层理越发育,速度弱化越显著,而黏土矿物质量分数大于30%时页岩基质表现为速率强化作用,所以龙 1_{1d} 层页岩在大排量压裂过程中裂缝易沿着层理面快速延伸,难以实现储层的有效改造。基于龙 1_1 亚段小层的脆性差异性,龙 1_{1a} 层、龙 1_{1b} 层与龙 1_{1d} 层应采取不同的开发方案,减小龙 1_{1d} 层水平井井距,优化不同小层的分段压裂施工参数。

3 页岩气储层工程地质力学研究趋势

1) 针对我国川南龙马溪组页岩气水平井单井产量差异大、套管变形风险高等问题,需要在气藏尺度上深入开展地质和工程“甜点”的非均质性建模,龙 1_1 亚段不同小层岩石力学参数差异性、各向异性

的测试,以及龙₁亚段不同小层矿物组分和胶结类型等对页岩脆性影响的机理研究。

2) 利用地球物理与钻完井工程地质力学一体化建模技术构建优质页岩储层构造模型,精细刻画地质“甜点”和岩石力学参数的纵横向非均质性分布规律;基于数值模拟方法研究区块甚至平台多井控制区域的初始地应力场分布特征、压裂扰动下的应力场与渗流场的耦合和层理裂缝激活规律,揭示套管损坏机理,确保全寿命周期内井筒的完整性。

3) 在常规岩石力学参数测试、解释基础上,开展优质页岩小层矿物组分、胶结结构、摩擦强度、剪切速率的差异性和各向异性测试,揭示矿物组分、胶结结构对裂缝稳态-非稳态扩展的影响规律,建立适合五峰组和龙马溪组底部优质页岩小层非稳态破裂的脆性评价模型及标准,指导页岩气水平井储层的脆性评价与精细分段压裂设计。

4) 根据页岩气水平井钻井完井质量、储层关键性能指标与单井累计产量的关系,基于大数据分析的人工智能建立产能预测模型,形成页岩气单井产量敏感性评价方法。因层制宜,优化页岩气分层开发、布井方式和不同小层之间分段分层分排量的压裂工艺。

4 结论及建议

1) 为了实现页岩气高效开发,必须强化地质和工程一体化研究,融合多学科信息进行系统分析,在评价页岩气藏地质“甜点”的同时,建立地质力学三维模型,根据精细构造模型、地质“甜点”和工程“甜点”模型,优化井位部署和轨迹方位、水平段长度设计。

2) 研究优质页岩不同小层矿物组分和胶结结构对裂缝稳态-非稳态扩展的影响机理,依据水平井眼穿越不同小层的矿物组分、胶结结构和地质力学特征进行分段分簇压裂方案设计。

3) 黏土基质胶结页岩在大排量压裂液作用下,裂缝易沿着页岩层理或岩性界面非稳态扩展,建议减小井间距,在压裂液中段塞式加入转向剂,实现近井地带的体积压裂。

4) 相邻平行水平井尽可能保持同步压裂,并优化不同小层相邻平行水平井压裂次序,降低邻井压裂导致套管变形的风险。

参 考 文 献

References

- [1] 路保平. 中国石化页岩气工程技术进步及展望[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(5): 1-8.
LU Baoping. Sinopec engineering technical advance and its developing tendency in shale gas[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(5): 1-8.
- [2] 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.
- [3] 陈勉, 葛洪魁, 赵金洲, 等. 页岩油气高效开发的关键基础理论与挑战[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(5): 7-14.
CHEN Mian, GE Hongkui, ZHAO Jinzhou, et al. The key fundamentals for the efficient exploitation of shale oil and gas and its related challenges[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(5): 7-14.
- [4] 庄茁, 柳占立, 王永亮. 页岩油气高效开发中的基础理论与关键力学问题[J]. 力学季刊, 2015, 36(1): 11-25.
ZHUANG Zhuo, LIU Zhanli, WANG Yongliang. Fundamental theory and key mechanical problems of shale oil gas effective extraction[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2015, 36(1): 11-25.
- [5] 郭彤楼. 中国式页岩气关键地质问题与成藏富集主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 317-326.
GUO Tonglou. Key geological issues and main controls on accumulation and enrichment of Chinese shale gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 317-326.
- [6] 刘树根, 邓宾, 钟勇, 等. 四川盆地及周缘下古生界页岩气深埋藏-强改造独特地质作用[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 11-28.
LIU Shugen, DENG Bin, ZHONG Yong, et al. Unique geological features of burial and superimposition of the Lower Paleozoic shale gas across the Sichuan Basin and its periphery[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 11-28.
- [7] 姜逸明, 张定宇, 李大华, 等. 重庆地区页岩气钻井井壁稳定主控因素研究[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(5): 19-25.
JIANG Yiming, ZHANG Dingyu, LI Dahua, et al. Major factors for wellbore stabilities of shale gas wells in Chongqing Area[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(5): 19-25.
- [8] 田中兰, 石林, 乔磊. 页岩气水平井井筒完整性问题及对策[J]. 天然气工业, 2015, 35(9): 70-76.
TIAN Zhonglan, SHI Lin, QIAO Lei. Research of and countermeasure for wellbore integrity of shale gas horizontal well[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(9): 70-76.
- [9] 蒋可, 李黔, 陈远林, 等. 页岩气水平井固井质量对套管损坏的影响[J]. 天然气工业, 2015, 35(12): 77-82.
JIANG Ke, LI Qian, CHEN Yuanlin, et al. Influence of cementing quality on casing failures in horizontal shale gas wells[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(12): 77-82.

- [10] 范明涛,柳贡慧,李军,等.页岩气井温压耦合下固井质量对套管应力的影响[J].石油机械,2016,44(8):1-5.
FAN Mingtao,LIU Gonghui,LI Jun,et al. Effect of cementing quality on casing stress of shale gas well under heat-mechanical coupling[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(8):1-5.
- [11] 刘奎,王宴滨,高德利,等.页岩气水平井压裂对井筒完整性的影响[J].石油学报,2016,37(3):406-414.
LIU Kui,WANG Yanbin,GAO Deli,et al. Effects of hydraulic fracturing on horizontal wellbore for shale gas[J]. Acta Petrolei Sinica,2016,37(3):406-414.
- [12] 曾义金.页岩气开发的地质与工程一体化技术[J].石油钻探技术,2014,42(1):1-6.
ZENG Yijin. Integration technology of geology & engineering for shale gas development[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1):1-6.
- [13] 吴奇,梁兴,鲜成钢,等.地质工程一体化高效开发中国南方海相页岩气[J].中国石油勘探,2015,20(4):1-23.
WU Qi,LIANG Xing,XIAN Chenggang,et al. Geoscience-to-production integration ensures effective and efficient South China marine shale gas development[J]. China Petroleum Exploration,2015,20(4):1-23.
- [14] 梁兴,王高成,徐政语,等.中国南方海相复杂山地页岩气储层甜点综合评价技术:以昭通国家级页岩气示范区为例[J].天然气工业,2016,36(1):33-42.
LIANG Xing,WANG Gaocheng,XU Zhengyu,et al. Comprehensive evaluation technology for shale gas sweet spots in the complex marine mountains, South China: a case study from Zhaotong national shale gas demonstration zone[J]. Natural Gas Industry,2016,36(1):33-42.
- [15] MAXWELL S.非常规储层水力压裂微地震成像[M].李彦鹏,王熙明,徐刚,等译.北京:石油工业出版社,2015:25-32.
MAXWELL S. Microseismic imaging of hydraulic fracturing: improved engineering of unconventional shale reservoirs[M]. Translated by LI Yanpeng, WANG Ximing, XU Gang, et al. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015: 25-32.
- [16] 唐颖,邢云,李乐忠,等.页岩储层可压裂性影响因素及评价方法[J].地学前缘,2012,19(5):356-363.
TANG Ying,XING Yun,LI Lezhong,et al. Influence factors and evaluation methods of the gas shale fracability[J]. Earth Science Frontiers,2012,19(5):356-363.
- [17] 赵金洲,许文俊,李勇明,等.页岩气储层可压性评价新方法[J].天然气地球科学,2015,26(6):1165-1172.
ZHAO Jinzhou, XU Wenjun, LI Yongming, et al. A new method for fracability evaluation of shale-gas reservoirs[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(6): 1165-1172.
- [18] 李文阳,邹洪岚,吴纯忠,等.从工程技术角度浅析页岩气的开采[J].石油学报,2013,34(6):1218-1224.
LI Wenyang,ZOU Honglan,WU Chunzhong,et al. An analysis of shale gas development in view of engineer technologies[J]. Acta Petrolei Sinica,2013,34(6):1218-1224.
- [19] 王建波,冯明刚,严伟,等.焦石坝地区页岩储层可压裂性影响因素及计算方法[J].断块油气田,2016,23(2):216-220.
WANG Jianbo,FENG Minggang,YAN Wei,et al. Influence factors and evaluation methods for shale reservoir fracability in Jiaoshiba Area[J]. Fault-Block Oil & Gas Field,2016,23(2):216-220.
- [20] 李庆辉,陈勉,金衍,等.页岩气储层岩石力学特性及脆性评价[J].石油钻探技术,2012,40(4):17-22.
LI Qinghui, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale gas reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 17-22.
- [21] 袁俊亮,邓金根,张定宇,等.页岩气储层可压裂性评价技术[J].石油学报,2013,34(3):523-527.
YUAN Junliang,DENG Jingen,ZHANG Dingyu,et al. Fracability evaluation of shale-gas reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica,2013,34(3):523-527.
- [22] 廖东良,肖立志,张元春.基于矿物组分与断裂韧度的页岩地层脆性指数评价模型[J].石油钻探技术,2014,42(4):37-41.
LIAO Dongliang,XIAO Lizhi,ZHANG Yuanchun. Evaluation model for shale brittleness index based on mineral content and fracture toughness[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(4): 37-41.
- [23] 蒋廷学,卞晓冰,苏媛,等.页岩可压性指数评价新方法及应用[J].石油钻探技术,2014,42(5):16-20.
JIANG Tingxue, BIAN Xiaobing, SU Yuan, et al. A new method for evaluating shale fracability index and its application[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(5): 16-20.
- [24] 王汉青,陈军斌,张杰,等.基于权重分配的页岩气储层可压性评价新方法[J].石油钻探技术,2016,44(3):88-94.
WANG Hanqing, CHEN Junbin, ZHANG Jie, et al. A new method of fracability evaluation of shale gas reservoir based on weight allocation [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(3): 88-94.
- [25] 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[R]. SPE 115258, 2008.
- [26] BULLER D, HUGUES S N, MARKET J, et al. Petrophysical evaluation for enhancing hydraulic stimulation in horizontal shale gas wells[R]. SPE 132990, 2010.
- [27] 姚孝新.用超小型压力机研究裂纹的稳态与非稳态扩展[J].地球物理学报,1984,27(5):439-444.
YAO Xiaoxin. The experimental studies of stable and unstable cracking by using a ultrasmall testing machine[J]. Acta Geophysica Sinica, 1984, 27(5): 439-444.
- [28] ZOBACK M D, KOHLI A, DAS I, et al. The importance of slow slip on faults during hydraulic fracturing stimulation of shale gas reservoirs[R]. SPE 155476, 2012.
- [29] DAS I, ZOBACK M D. Microearthquakes associated with long period, long duration seismic events during stimulation of a shale gas reservoir[R]. SEG-2012-1484, 2012.
- [30] KOHLI A H, ZOBACK M D. Frictional properties of shale reservoir rocks[J]. Journal of Geophysical Research: Solid

- Earth, 2013, 118(9): 5109-5125.
- [31] DIETERICH J H. Modeling of rock friction (1): experimental results and constitutive equations[J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84(B5): 2161-2168.
- [32] QIU Kaibin, CHENG Ning, KE Xiangui, et al. 3D Reservoir Geomechanics workflow and its application to a tight gas reservoir in Western China[R]. IPTC-17115-MS, 2013.
- [33] ABOUSLEIMAN Y N, TRAN M H, HOANG S, et al. Geomechanics field and laboratory characterization of Woodford Shale; the next gas play[R]. SPE 110120, 2007.
- [34] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 含气页岩破坏模式及力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊2): 3763-3771.
- LI Qinghui, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Experimental research on failure modes and mechanical behaviors of gas-bearing shale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(supplement 2): 3763-3771.
- [35] 贾长贵, 陈军海, 郭印同, 等. 层状页岩力学特性及其破坏模式研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊2): 57-61.
- JIA Changgui, CHEN Junhai, GUO Yintong, et al. Research on mechanical behaviors and failure modes of layer shale[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(supplement 2): 57-61.
- [36] 衡帅, 杨春和, 张保平, 等. 页岩各向异性特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 609-616.
- HENG Shuai, YANG Chunhe, ZHANG Baoping, et al. Experimental research on anisotropic properties of shale[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 609-616.
- [37] SONE H, ZOBACK M D. Mechanical properties of shale-gas reservoir rocks; part 1: static and dynamic elastic properties and anisotropy[J]. Geophysics, 2013, 78(5): D378-D389.
- [38] SONE H, ZOBACK M D. Mechanical properties of shale-gas reservoir rocks; part 2: ductile creep, brittle strength, and their relation to the elastic modulus[J]. Geophysics, 2013, 78(5): D390-D399.
- [39] TEMBE S, LOCKNER D A, WONG Tengfong. Effect of clay content and mineralogy on frictional sliding behavior of simulated gouges; Binary and ternary mixtures of quartz, illite, and montmorillonite[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(B3): B03416.
- [40] IKARI M J. Compositional, mechanical and hydrologic controls on fault slip behavior[D]. University Park, Pennsylvania State University, 2010.
- [41] YANG Zhenning, WANG Liming, ZHANG Guoping, et al. Micromechanical characterization of fluid; shale interactions via nanoindentation[R]. SPE 181833, 2016.
- [42] ELIYAHU M, EMMANUEL S, DAY-STIRRAT R J, et al. Mechanical properties of organic matter in shale mapped at the nanometer scale [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 59: 294-304.
- [43] ABOUSLEIMAN Y N, HULL K L, HAN Y, et al. The granular and polymer composite nature of kerogen-rich shale[J]. Acta Geotechnica, 2016, 11(3): 573-594.
- [44] BENNETT K C, BERLA L A, NIX W D, et al. Instrumented nanoindentation and 3D mechanistic modeling of a shale at multiple scales[J]. Acta Geotechnica, 2015, 10(1): 1-14.
- [45] 刘乃震, 王国勇. 四川盆地威远区块页岩气甜点厘定与精准导向钻井[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 1-8.
- LIU Naizhen, WANG Guoyong. Shale gas sweet spot identification and precise geo-steering drilling in Weiyuan Block of Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(6): 1-8.
- [46] 陆益祥, 潘仁芳, 唐小玲, 等. 四川盆地威远地区龙马溪组页岩储层上下亚段脆性差异[J]. 断块油气田, 2016, 23(4): 429-433.
- LU Yixiang, PAN Renfang, TANG Xiaoling, et al. Brittleness comparison between upper and lower sub-sections of Longmaxi Formation shale reservoir in Weiyuan Area, Sichuan Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(4): 429-433.

[编辑 滕春鸣]