

# 中石油页岩气开发中的几个岩石力学问题

石林<sup>1,2\*</sup>, 史璨<sup>2</sup>, 田中兰<sup>1</sup>, 张矿生<sup>3</sup>

1 中国石油钻井工程研究院, 北京 102206

2 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

3 中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院, 西安 710018

\* 通信作者, shilindri@cnpc.com.cn

收稿日期: 2019-06-12

**摘要** 页岩气是一种重要的非常规油气资源, 未来发展前景广阔。中石油在四川盆地的页岩气勘探开发实践中形成了一套综合地质评价技术, 页岩气开发技术进步显著。同时, 在页岩气的实际开发过程中发现了一系列亟待解决的岩石力学问题: (1) 水平井井眼方向问题。由于四川盆地地质构造复杂, 目前的垂直于水平最大主应力方向的水平井井眼方向给施工带来一系列工程问题, 并且这种井眼方向与页岩气形成复杂裂缝的设计相矛盾; (2) 压裂液液量问题。压裂液的渗吸、置换和增能作用, 要求尽可能加大压裂液液量; (3) 储层保护问题。在页岩气开发过程中应该正确的认识页岩储层中的储层保护问题, 鼓励页岩储层的渗吸作用; (4) 套管变形问题。套管变形问题形势严峻, 造成的经济损失严重。解决这些工程中的关键问题可以进一步增加页岩气产量, 降低生产成本, 具有重要的意义。

**关键词** 页岩气; 水平井; 压裂液; 岩石力学

## Several rock mechanics problems in the development of shale gas in PetroChina

SHI Lin<sup>1,2</sup>, SHI Can<sup>2</sup>, TIAN Zhonglan<sup>1</sup>, ZHANG Kuangsheng<sup>3</sup>

1 China Petroleum Drilling Engineering Research Institute, Beijing 102206, China

2 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 Oil & Gas Technology Research Institute of Changqing Oilfield Branch Company, CNPC, Xi'an 710018, China

**Abstract** Shale gas is an important unconventional gas resource. PetroChina is using geological evaluation technology in shale gas exploration and development in the Sichuan Basin, and has made remarkable progress. At the same time, there are several rock mechanics problems found in the development of shale gas: (1) The horizontal wellbore direction problem. Due to the complex geological structure of the Sichuan Basin, the current wellbore direction is perpendicular to the direction of the maximum horizon stress and the direction of horizontal boreholes brings a series of engineering problems; (2) The problem of fracturing fluid volume: The imbibition, displacement and energization of fracturing fluid, requiring the maximum increase of fracturing fluid; (3) The reservoir protection problem: In the process of shale gas development, reservoir protection should be correctly understood, and the imbibition of fracturing fluid should be encouraged; (4) The casing deformation problem: Casing deformation is severe, causing serious economic loss. Solving these key problems can further increase shale gas production and reduce production costs, which are of great significance.

引用格式: 石林, 史璨, 田中兰, 张矿生. 中石油页岩气开发中的几个岩石力学问题. 石油科学通报, 2019, 03: 223-232

SHI Lin, SHI Can, TIAN Zhonglan, ZHANG Kuangsheng. Several rock mechanics problems in the development of shale gas in PetroChina. Petroleum Science Bulletin, 2019, 03: 223-232. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2019.03.020

**Keywords** shale gas; horizontal stress; fracturing fluid; rock mechanics

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2019.03.020

## 0 序言

页岩气资源是目前全球非常规油气勘探开发中发展最快的天然气资源,也是潜力较大、较重要的天然气开发目标。中国页岩气可采资源量约为12.85万亿 $\text{m}^3$ 。页岩气资源潜力丰富,可能是改变中国天然气发展乃至整个能源发展格局的重要能源构成。四川盆地的页岩气预计可采储量6.45万亿 $\text{m}^3$ ,约占全国总储量的30%<sup>[1]</sup>。截止2017年,中石油在四川盆地的页岩气探明储量为3192亿 $\text{m}^3$ ,钻井299口,实现产量30.2亿 $\text{m}^3$ 。整体区域页岩气资源潜力丰富,开发前景广阔。

中石油在页岩气勘探开发的长期实践过程中,逐渐形成了一套基于页岩气勘探开发的综合地质评价技术。主要包括页岩气甜点区评价技术和页岩气选层技术两部分内容。页岩气甜点区评价技术从压力系数、距剥蚀线距离和距断层距离3个方面对地质条件进行筛选。页岩气选层技术包括小层划分技术以及储层分类评价技术。基于储层分类评价技术,明确了长宁、威远I类储层主要分布在龙一11和龙一12小层。页岩储层的增产改造技术在长期实践经验和理论上,逐渐形成了“桥塞分段、分簇射孔、大液量低黏滑溜水、大排量泵注、小粒径大砂量石英砂”为核心的浅页岩气(埋深3500m以内)主体压裂技术,使得单井产量大幅提高。根据现在页岩气开发现状以及技术发展状况为基础,预计未来十几年中石油页岩气开发将会以每年产量增加20亿 $\text{m}^3$ 左右、每年钻井增加300口井左右的速度发展。目前,页岩气开发技术进步显著,开发前景广阔。

为了实现高效开发页岩油气,许多基础的理论知识和科学问题都需要进一步研究。其中,岩石力学问题是保证安全、高效钻井的关键性研究内容,可以解决钻井过程中井壁稳定、水力压裂裂缝扩展等问题。在井壁稳定方面,Chen等人通过建立泥页岩物理力学参数与含水量之间的非线性关系式,得到了井周岩石的水化应力<sup>[2]</sup>。Zhou等人针对膨胀性页岩,建立了力-化-热耦合的线性与非线性井壁稳定有限元模型<sup>[3]</sup>。金衍等人利用力学-化学耦合的方法,提出了泥页岩井壁坍塌周期的计算方法<sup>[4]</sup>。在水力压裂物理模拟方面,从20世纪90年代末开始,陈勉等人利用真三轴物理模拟实验设备对水力压裂相关问题展开了相关研

究<sup>[5]</sup>。侯冰等人通过室内实验结合声发射研究了压裂不同阶段过程中的声学响特征<sup>[6]</sup>。Liu等人研究了水力裂缝在具有不同天然裂缝产状的人造试样中的起裂及扩展规律<sup>[7]</sup>。Hou和Tan等人采用页岩露头开展了压裂物理模拟实验,研究了地质及施工参数对裂缝扩展形态的影响。真三轴试验研究表明页岩压裂裂缝不总垂直于最小地应力,而是呈现多方向共同扩展的组合物体<sup>[8-9]</sup>。但是目前页岩油气开发中许多关键的基础理论和力学问题都尚未解决。陈勉,庄茁以及柳占立等人分别针对页岩气开发中的关键岩石力学问题进行了总结,提出了高效开发页岩油气所必须的关键力学和科学技术问题<sup>[10-12]</sup>。李明耀等人提出了水力压裂过程中的关键力学问题,并归纳总结了水力压裂数值模拟方法,分析了各个方法的优劣性<sup>[13]</sup>。此外,在中石油的生产实践中也发现了一些亟待创新解决的岩石力学问题。

## 1 钻井设计中的问题

水平井井眼方向是重要的钻井设计内容,通常水平井眼的方向决定了钻井时泥浆密度窗口的大小,地层中压裂施工后裂缝的形态以及钻井过程中的井壁稳定问题。常规储层水平井井眼方向的确定应该主要考虑两个因素:(1)保证钻进过程中井壁稳定;(2)水平井井眼方向尽量有利于油气井获得高产。对于各向同性的岩石,从井壁稳定性考虑,最不利的钻井方向是平行于中间主应力的方向<sup>[14]</sup>。表1为地层中三种地应力模式下水平井井眼方向对井壁稳定性的影响。最利于井眼稳定性的钻井方向取决于 $S_1-S_2$ 和 $S_2-S_3$ 的大小,即当平行于井眼横截面内的两个主应力的差值越小,越有利于井眼稳定性。

水平井井眼方向的布置应该在保证钻进过程中井壁稳定性的前提下,尽可能考虑水力压裂后的裂缝形态,努力增大储层的裸露面积,进而增加油气井的产量。Hubbert和Willis在1957年利用沙箱实验研究了地层中的水力裂缝扩展方向<sup>[14]</sup>。实验证明,水力裂缝总是垂直于最小主应力方向 $S_3$ 方向扩展。Fjaer等人指出,裂缝的类型主要取决于水平井井眼方向,当水平井井眼方向垂直于最大水平地应力方向时产生横向裂缝;当垂直于最小水平地应力方向时产生纵向裂缝,

表 1 不同地应力模式下水平井井眼方位对井壁稳定性的影响

Table 1 Influence of horizontal wellbore direction on borehole stability under different stress states

地应力模式	主应力关系	最不利的钻井方向
正断层环境	$S_v > S_H > S_h$	水平最大主应力方向
逆断层环境	$S_H > S_h > S_v$	水平最小主应力方向
走滑断层环境	$S_H > S_v > S_h$	垂直主应力方向

其中横向裂缝与储层的裸露面积较大<sup>[15]</sup>。孙焕泉等人也指出，当水平井井眼垂直于水平最大地应力方向时，水平井产量最高<sup>[16]</sup>。中石油勘探与生产公司通过研究表明，在低渗透地层中，横向裂缝可以最大限度的减小节流表皮，从而更有利于油气的开采<sup>[17]</sup>。此外，周德胜等人指出，当水平段较长时，多采用分段压裂技术来增加对于储层的改造效果，而此时横向裂缝则可以最大限度的动用储层的储量，并且可以有效的防止裂缝间的干扰<sup>[18]</sup>。因此在保证水平井井壁稳定的前提下，水平井井眼方向一般垂直于最大主应力方向。

目前在长宁威远地区，水平井井眼轨迹的设计一方面要使得井眼方向垂直于最大水平地应力方向；另一方面要尽可能提高优质储层钻遇率，从而提高产量。但是该地区复杂的地质构造给钻井施工带来了一系列工程问题。以太阳大寨区块为例，该地区地层构造起伏较大，起伏的微构造发育断层发育并且地层内部最大主应力方向最大差异可达 90°。复杂的地质构造导致该地区钻井时会遇到长度较大的上行井段，给钻井施工带来了一系列问题：如难以提供足够的钻压，导致钻进速度慢；由于重力的作用水力携砂会很困难，容易造成砂的堆积；套管下入困难，套管的变形几率增大等一系列问题。此外，西南油气田分公司对长宁地区下一步实施建产井的宁 216、宁 209 区块地质状况进行了统计。表 2 为长宁地区地质模式与复杂井统

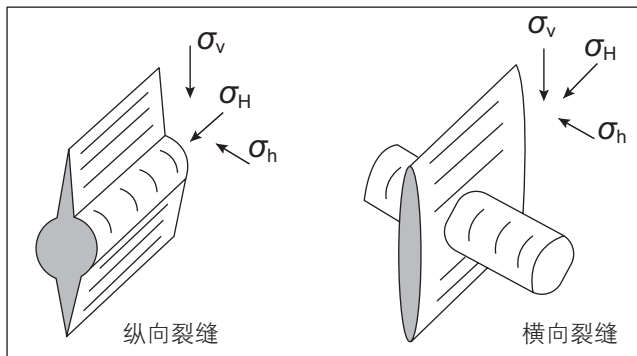


图 1 水平井不同裂缝方向示意图<sup>[15]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of different fracture directions in horizontal wells<sup>[15]</sup>

计情况。从中可以看出，该地区复杂井占到建产井总数的 28.7%。这些复杂井同样给钻井施工以及后期完井带来诸多施工问题。

实际微地震裂缝监测发现，垂直于水平最大主应力方向布置的水平井，压裂后其裂缝形态多为沿水平方向展布的水平缝。图 3 为威 202H3-5 井，威 204H2-4 井，威 204H2-5 井以及威 204H2-6 井的水力压裂过程中的微地震检测图像。从微地震图像中可以看出，裂缝在水平方向上的展布范围明显大于垂向上的延伸范围，裂缝呈现水平扩展的趋势。上述现象说明，实际的裂缝形态与设计的裂缝形态出现了矛盾。此外，微地震裂缝监测还发现分段压裂后各段形成的裂缝走向也不统一，走向无规律。图 4 为威 204H4-4 井和威 204H6-4 井的微地震检测图像很明显的展示出了这一问题。造成这种现象的原因可能是在分段压裂过程中，对一段进行压裂后，由于压裂液的注入以及裂缝的产生使得周围地层的局部应力场分布产生了变化，导致裂缝并没有按照垂直于水平井井筒的方向扩展。

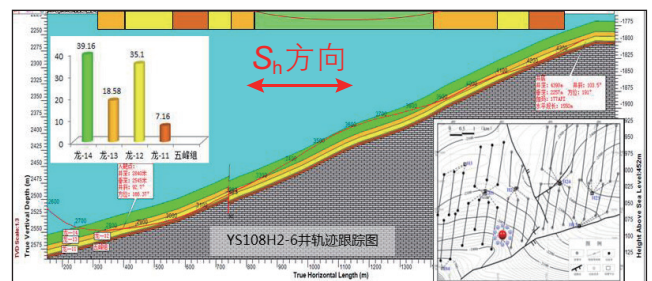
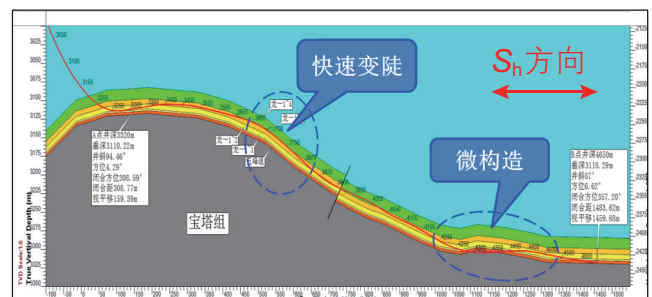


图 2 太阳大寨区块水平井井眼轨迹图

Fig. 2 Horizontal wellbore trajectory map of the Dazhai block

此外,常规储层的水力压裂是通过在储层中创造一条高导流能力的裂缝来增加储层泄油面积,实现对储层的改造,进而提高油气井的产量。但是由于页岩储层渗透率低,通过体积压裂技术在储层中形成复杂裂缝,有效地通过密切割和破碎岩石形成复杂裂缝网络,实现对储层长、宽、高方向的三维改造,才能最大限度的增加储层动用率,促使更多的油气流向井筒<sup>[18]</sup>。因此,垂直于最大主应力方向的水平井井眼方向与形成复杂缝网是有矛盾的。

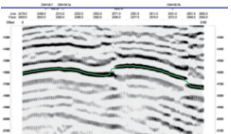
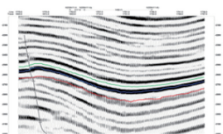
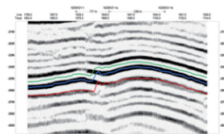
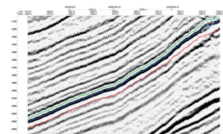
综合上述因素,钻井过程中垂直于水平最大主应力方向进行钻进,一方面会导致钻井过程中的一系列施工问题;另一方面与页岩气形成复杂裂缝的设计相违背。因此如果将水平井的井眼方向调整一个角度,

使得井眼方向顺着较为有利的工程方向布置,就可以大大减少上行井或者井眼方向不断抬升和扭摆的问题。如图5中,将原本垂直于水平最大主应力方向的水平井井眼方向(红色曲线所示)调整为水平井井眼方向最为简单平直的方向(绿色曲线所示,此时的井眼方向垂直于水平最小主应力方向),钻井难度将大大降低。

按照上述设计思路,既需要开展规模性的试验来充分对比,也需要深入探讨一些理论问题。对于水平井井眼方向来说,目前可以概括为以下几个关键的问题:(1)水平方向展布的裂缝以及顺着水平层理发展的裂缝是否受到最大水平主应力的影响尚不明确;(2)水平井分段压裂中已压裂的井段多长时间可以影响到邻段的水平应力;(3)对于已经实施压裂的井来说,多长

表2 长宁地区地质模式与复杂井统计情况

Table 2 Geological model and complex well statistics in Changning area

项目	钻遇断层	U型井	N型井	上倾角大(大于10°)
地质模式				
分布区域	宁201井区 宁209井区	宁209井区 宁216井区	宁209井区	宁209井区
复杂井井数	56	9	2	31
占建产井比例	16.5%	2.6%	0.5%	9.1%

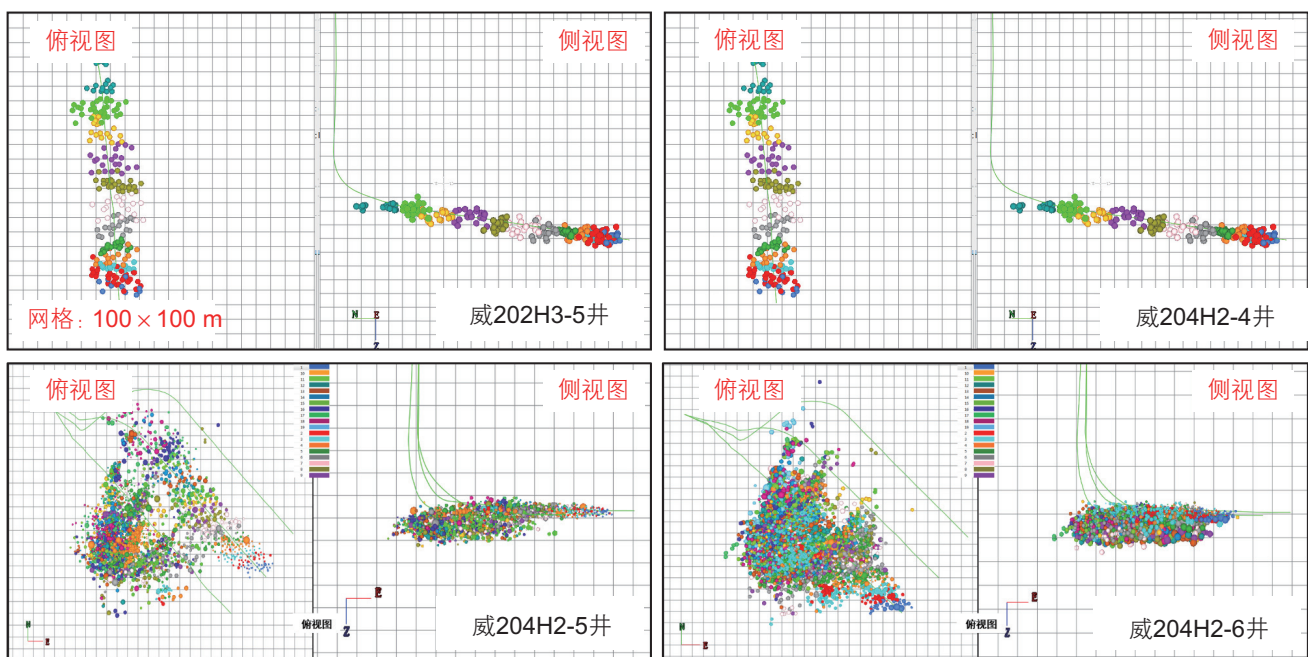


图3 微地震裂缝检测图像

Fig. 3 Image of the microseism detection

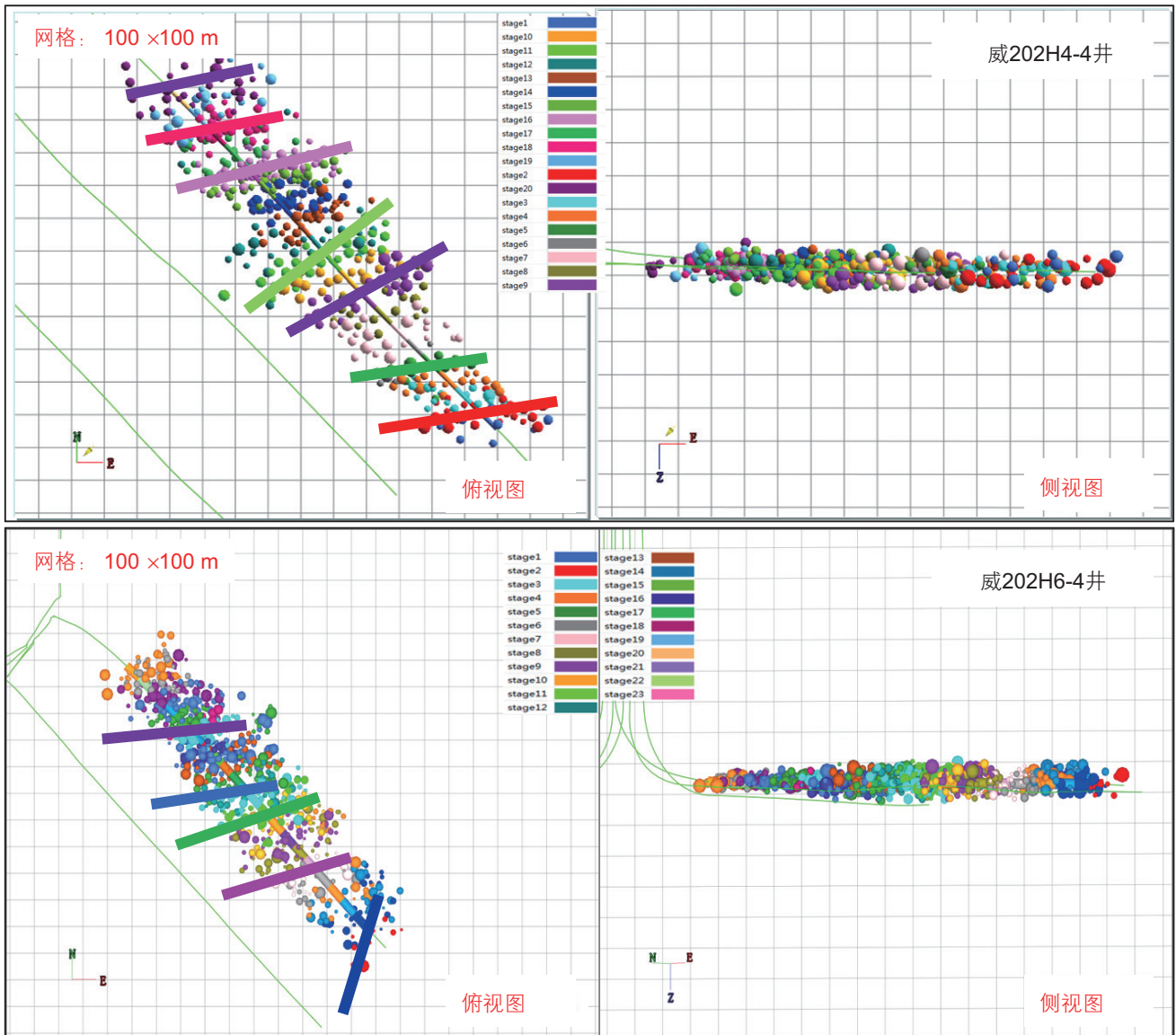


图 4 威 204H4-4 井和威 204H6-4 井微地震裂缝监测图像  
 Fig. 4 Microseism monitoring image of Well 204H4-4 and Wei 204H6-4

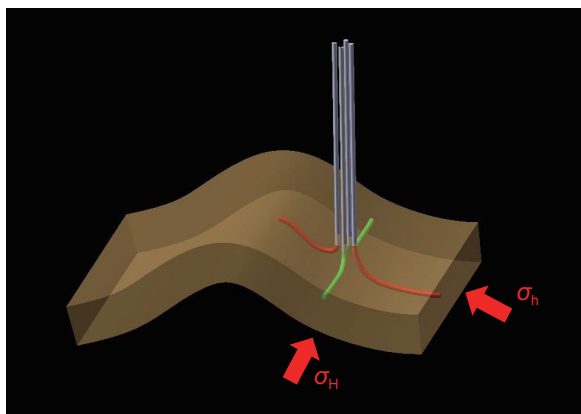


图 5 两种水平井并眼方向布置示意图  
 Fig. 5 Schematic diagram of the arrangement of two horizontal wells

时间会影响到邻井的水平应力。

## 2 压裂液液量的问题

常规压裂施工中压裂液的作用主要有两个：造缝、以及携砂功能。但是近年来，实验室实验和现场实践均证明，压裂液的渗吸、增能、置换功能也是导致非常规油气产量增加的重要原因之一。

长庆油田对压裂液的渗吸能力进行了室内实验研究，发现在低黏度压裂液环境中，砂岩的渗吸能力随着渗透率降低而增强。同时，实验研究了不同渗透率岩心的渗析置换速率关系，见图 6。从图中可以看出，随着岩心渗透率的降低渗吸置换出的油量逐渐增多，

即砂岩的渗吸能力随渗透率降低而增强。另一方面,长庆油田在鄂尔多斯致密油储层的生产实践过程中研究了不同物性地层的油水置换能力。得到了陇东油区不同层位试排见油时压裂液的返排率,见图7。从图中可以看出,渗透率低、物性更差的长7层位的油水置换的速度更快,并且见油时的返排率远远低于其他物性较好的储层。实验室和现场实验结果证明低渗透储层中的渗吸和置换能力更强。

此外,长庆油田通过矿场实践的方式对压裂液的增能作用进行了证实。实践指出,存地压裂液量可以有效地增加地层压力。以阳平地区为例,该地区存地压裂液量为 $3005\text{ m}^3$ ,地层压力为原始地层压力的119%,见图8。另一方面,长庆油田统计了西233、庄183和庄230这三个区域气井的压裂液存地液量和年累计产油量的关系,见图9。从统计图中可以明显的观察到,水平井一年累计产油量与压裂入地液量存在明显正相关关系,随着压裂液存地液量的增加,单

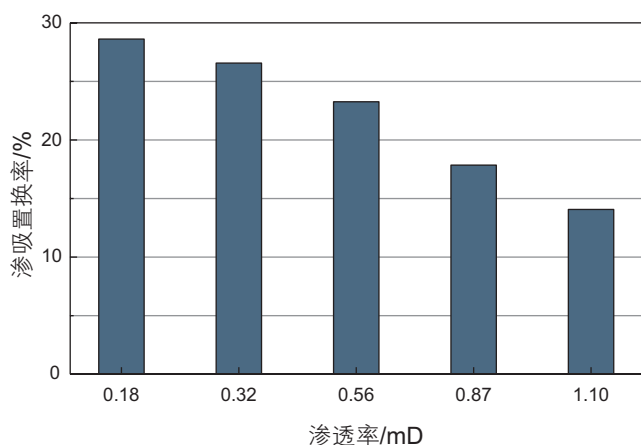


图6 不同渗透率下的渗吸置换率

Fig. 6 Imbibition rate at different permeability

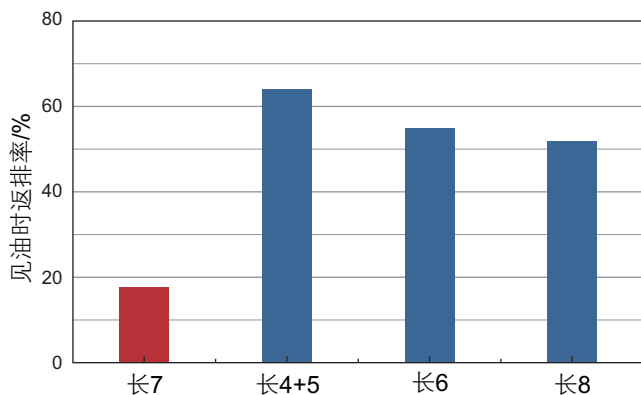


图7 陇东油区不同层位试排见油时压裂液返排率对比图

Fig. 7 Comparison of fracturing flow back rate in different layers of Longdong Oilfield

井年累计产油量也呈现增加趋势。

Fakcharoenphol等人于2014年从机理的角度对渗吸和置换作用进行了研究,提出了渗吸置换作用的概念图,见图10。同时研究还指出,矿化度是渗吸置换的主控因素,低矿化盐水在渗透压作用下容易引起黏土膨胀,排驱微孔原油,从而达到了油水置换的结果<sup>[19]</sup>。上述室内实验和现场实践启示在页岩开发过程中,压裂液也具有造缝、渗吸、置换、增能和携砂5个功能。为了提高油气产量,作用于单位体积的页岩气储层的液量也应该尽可能提高。目前施工中常用的

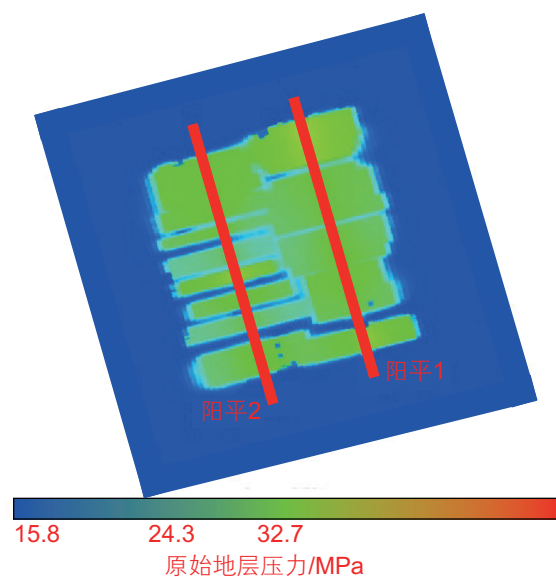


图8 阳平2地区地层压力图

Fig. 8 Formation pressure map of Yangping 2 area

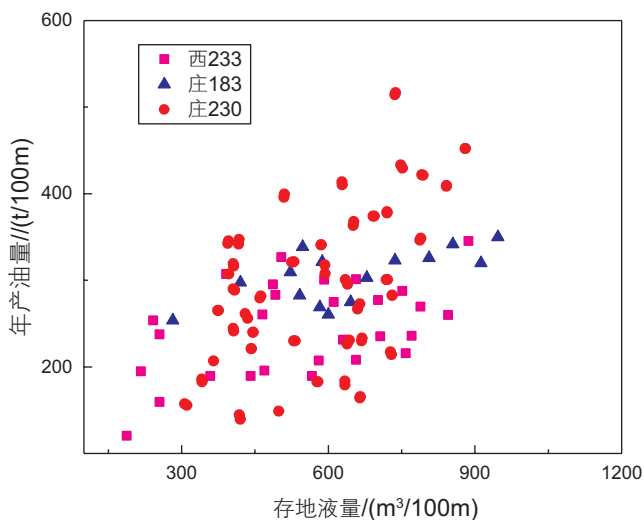


图9 水平井存地液量与年累计产量关系图

Fig. 9 Relationship between the amount of fracturing liquid stored and the annual cumulative output

压裂液液量为 6 万 m<sup>3</sup>，对于 1000 m 水平段、50 m 半径井眼的体积来说，单位体积的液量仅有 0.007 64 液方/石方；对于 2000 m 水平井段、50 m 半径井眼的体积来说，单位体积的液量仅有 0.003 82 液方/石方。从数据中可以看出，目前施工所使用的压裂液总量很小。因此，未来页岩气水力压裂过程中总液量问题仍然是压裂施工中亟待解决的一个关键问题。

### 3 储层保护的问题

储层保护是在钻井、完井、储层改造、井下作业和增产及开采过程中，最大限度的降低储层伤害的方法。储层伤害是指由于作业过程所导致的油气流动阻力增加，油气层渗透率下降的现象。在压裂施工中，如果地层的水敏性黏土含量较高，敏感性黏土矿物把

水吸附到晶体结构内，造成黏土膨胀。同时由膨胀引起的不稳定性促进了分散和运移，造成储层孔喉结构的堵塞和土锁，导致储层渗透率的严重下降。常规油气储层的孔隙度和渗透率较大，油气在生产压差的作用下流入井筒中。黏土膨胀和运移会造成储层孔隙和吼道的堵塞，造成渗透率的大幅度下降<sup>[20]</sup>。

实验室和现场施工证明，页岩储层压裂液造成的黏土膨胀虽然会导致页岩基质的渗透率降低，但是会重启地层中的微裂缝并且产生新的微裂缝，导致页岩储层的整体渗透率提高。Zhou 等人在对美国 Niobrara 页岩地层研究后表明，储层渗吸量与渗透率存在明显的正相关性。图 11 为该页岩储层渗析量与渗透率关系的实验结果对比图。在渗吸实验开始阶段，页岩样品的渗透率变化很小；当渗吸液体饱和度达到 40% 之后，对应页岩样品的渗透率急剧上升。这是因为压裂

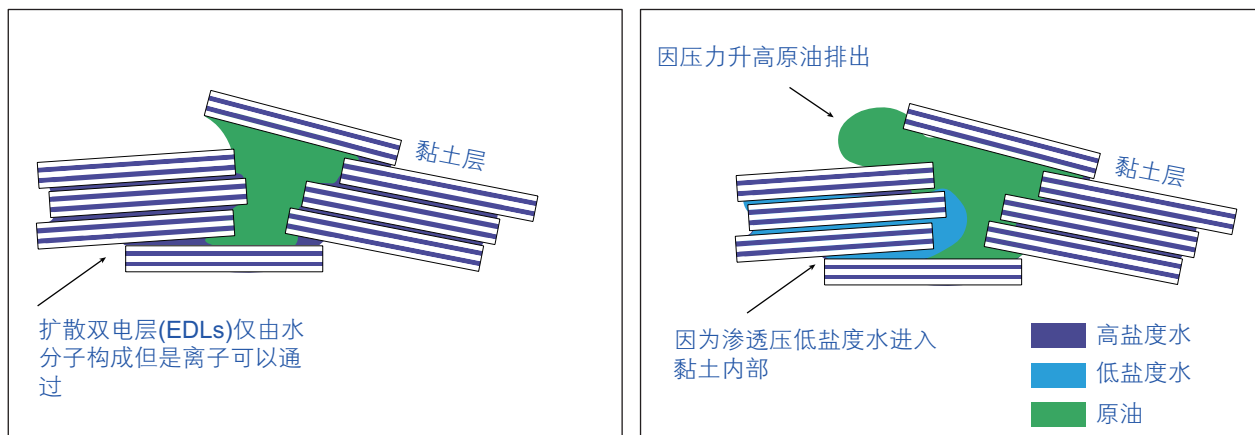


图 10 渗吸置换作用概念图<sup>[19]</sup>

Fig. 10 Schematic diagram of imbibition effect<sup>[19]</sup>

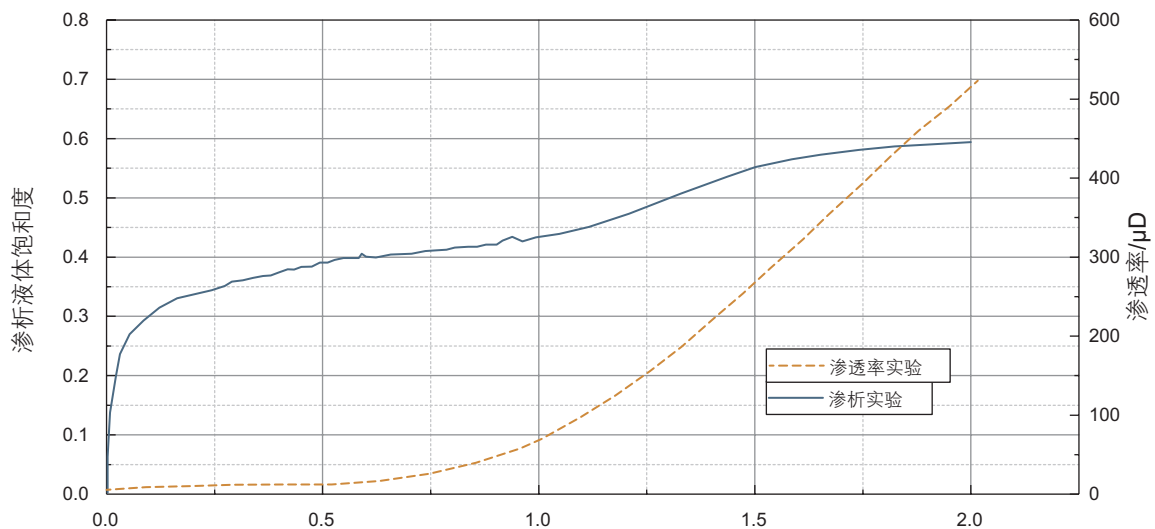


图 11 渗吸液体饱和度与渗透率变化关系曲线<sup>[21]</sup>

Fig. 11 Relationship between fluid saturation and permeability during the imbibition experiments<sup>[21]</sup>

液作用于岩石内重启裂缝需要一定的时间,当页岩的渗析量达到一定量之后,压力才足以重启地层中的微裂缝<sup>[21]</sup>。

此外,Zhou等人通过实验得到了渗吸实验前后泥岩基质渗透率和微裂缝渗透率变化结果见表3和表4。从实验结果中可以看出,渗吸作用会导致泥岩基质的渗透率降低,但是渗透率降低最大为96%;但是微裂缝渗透率增加最大可达到800000%,这也极大地提高了储层的整体渗透率。Zhou等人还指出,泥质含量越高,压裂液进入储层越容易打开微裂缝,导致储层的综合渗透率增加<sup>[21]</sup>。

在页岩气储层开发过程中,压裂液渗吸作用和黏土膨胀作用是可以提高储层渗透率的,并且黏土的膨胀是有益于复杂缝网的产生的,可以促进油气井的增产。因此,页岩气压裂中黏土稳定剂、黏土防膨剂等添加剂应该减少使用,尽量使用低黏度清洁压裂液,促进储层的渗吸作用。

## 4 套管变形的问题

目前长宁—威远地区气井的套管变形严峻趋势。西南油气田公司和田中兰的研究指出:截止2018年6月18日,长宁—威远区块共压裂180口井,79口井疑似出现套管变形状况,占比44%。表5为统计的长宁地区,威202井以及威204井的套管变形情况<sup>[22]</sup>。从表格中可以看出,威202区块的套管变形状况最为严重,平均套变比例高达为81.13%。

通过对套管变形井的地质以及施工状况分析,总结了可能造成套管变形的原因:(1)从测井检测来看,套管变形以剪切变形为主,套变的发生可能来自于地层形变;(2)压裂时的大压差、多次作业导致套管外水泥产生残余、累积形变;由此产生套管与水泥之间的间隙;压裂液穿过环形间隙,到达地层裂缝,促成了裂缝的滑移;(3)压裂液通过地层缝隙,在地层天然裂缝处聚集,形成润滑作用和应力场改变作用,导致裂缝扩张滑移;(4)压裂液造成地层内压力增加,流体增

表3 渗吸实验后岩心基质渗透率变化<sup>[21]</sup>

Table 3 Change of core matrix permeability after imbibition test<sup>[21]</sup>

	泥岩含量/%	吸渗前渗透率/mD	吸渗后渗透率/mD	渗透率降低/%
1	11%	73	37	49%
2	3.8%	506	20	96%
3	12%	70	8	88%

表4 渗吸实验后岩心微裂缝渗透率变化<sup>[21]</sup>

Table 4 Change of permeability of core micro-fracture after imbibition test<sup>[21]</sup>

	泥岩含量/%	吸渗前渗透率/mD	吸渗后渗透率/mD	渗透率增加/%
1	30.2%	250	654	160%
2	43%	23	195	700%
3	52.6%	38.5	305417.3	800000%

表5 长宁—威远页岩气套管变形统计

Table 5 Changning-Weiyuan area shale gas casing deformation statistics

	单位名称	套变井	总井	套变比例/%
长宁	西南	19	76	25.00
	长城	28	34	82.35
威202	川庆	15	19	78.95
	小计	43	53	81.13
威204	川庆	13	33	39.39
	长城	4	18	22.22
	小计	17	51	33.33



加导致的岩石总体积增加、页岩吸水膨胀,由此类因素产生的岩石移动和错动。

结合套管变形规律以及可能出现的原因,为缓解套管变形及其影响提出了以下几点建议:(1)加强工程地质力学一体化研究,加强断层、裂缝等弱面精细描述,开展地质力学建模,模拟分析压裂前后地应力场的变化、裂缝或断层的滑移;(2)严格控制井眼轨迹,优化压裂位置;(3)提高套管壁厚和强度,缓解地层滑移致套变问题;(4)优化井筒质量,提高应对套管变形能力;(5)优化水泥石性能,缓解套变量;(6)试验并推广套变井压裂新工艺,减少丢段。

## 5 结束语

(1)目前中石油四川页岩气井的水平井多按照垂直于水平最大主应力的方向钻井。一方面会导致钻井过程中上行井等复杂井比例增多,给施工带来一系列工程问题;另一方面与页岩气形成复杂裂缝的设计相违背。实际压裂施工后发现,裂缝的形态多为水平向扩展的水平裂缝,与传统认识中产生垂直缝也产生了矛盾。因此如果水平井的井眼方向顺着较为有利的工程方向布置,就可以大大降低钻井难度;

(2)页岩储层渗透率低,压裂液与地层会发生渗吸作用,排驱孔内的油气从而使得储层内发生油水置换。渗吸作用还会使得储层的压力系数提高,并且压裂液存地液量与压力系数的增加值呈现正相关特征。因此页岩储层中压裂液的功能除了造缝和携砂之外,还有渗吸、置换和增能作用;

(3)页岩储层的黏土矿物含量高,压裂液与储层黏土矿物接触会造成黏土的水化膨胀,从而造成基质渗透率的降低,造成储层伤害。但是,黏土的水化膨胀还会重启地层中的微裂缝并且产生新的微裂缝,使得地层整体渗透率大幅增加,更有利于提高产量。因此要正确看待页岩储层中的储层伤害问题,减少压裂液中黏土稳定剂、黏土防膨剂等添加剂的使用,促进储层的渗吸作用;

(4)压裂液的造缝、渗吸、置换和增能作用可以有效地提高页岩储层的产量,增大液量可以使得压裂液的增产作用最大化。未来页岩气水力压裂过程中的总液量问题仍然是压裂施工中亟待解决的一个关键问题;

(5)长宁—威远地区气井的套管变形问题形式严峻。套管变形以剪切变形为主,造成套变的主要原因可能是由于裂缝和断层的滑移等造成的地层形变。

## 参考文献

- [1] 董大忠,高世葵,黄金亮,等.论四川盆地页岩气资源勘探开发前景[J].天然气工业,2014,34(12):1-15. [DONG D Z, GAO S K, HUANG J L, et al. A discussion on the shale gas exploration & development prospect in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(12): 1-15.]
- [2] CHEN M, CHEN Z X, HUANG R Z. Hydration stress on wellbore stability[C]. Proceedings of the 35th US Rock Mechanics Symposium. Reno, 1995.
- [3] ZHOU X, GHASSEMI A. Finite element analysis of coupled chemo-poro-thermo-mechanical effects around a wellbore in swelling shale[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2009, 46: 769-778.
- [4] 金衍,陈勉.水敏性泥页岩地层临界坍塌时间的确定方法[J].石油钻探技术,2004,32(2):12-14. [JIN Y, CHEN M. A method for determining the critical time of wellbore instability at water-sensitive shale formations[J]. Petroleum Drilling Technology, 2004, 32(2): 12-14.]
- [5] 陈勉,庞飞,金衍.大尺寸真三轴水力压裂模拟与分析[J].岩石力学与工程学报,2000,19(增):868-872. [CHEN M, PANG F, JIN Y. Experiments and analysis on hydraulic fracturing by a large-size triaxial simulator[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(supplement): 868-872.]
- [6] 侯冰,陈勉,谭鹏,等.页岩气藏缝网压裂物理模拟的声发射监测初探[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39:66-71. [HOU B, CHEN M, TAN P, et al. Monitoring of hydraulic fracture network by acoustic emission method in simulated tri-axial fracturing system of shale gas reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum, 2015, 39: 66-71.]
- [7] LIU Z, CHEN M, ZHANG G. Analysis of the influence of a natural fracture network on hydraulic fracture propagation in carbonate formations[J]. Rock Mech Rock Eng, 2014, 47: 575-587.
- [8] HOU B, CHEN M, LI Z M, et al. Propagation area evaluation of hydraulic fracture networks in shale gas reservoirs[J]. Pet Explor Dev, 2014, 41: 833-838.
- [9] TAN P, JIN Y, HAN K, et al. Analysis of hydraulic fracture initiation and vertical propagation behavior in laminated shale formation[J]. Fuel, 2017, 206: 482-493.

- [10] 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 Z, LIU Z L, WANG Y L. Fundamental theory and key mechanical problems of shale oil gas effective extraction[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2015, 36(1): 11–25.]
- [11] 柳占立, 庄茁, 孟庆国, 等. 页岩气高效开采的力学问题与挑战[J]. 力学学报, 2017, 49(3): 507–516. [LIU Z L, ZHUANG Z, MENG Q G, et al. Problems and challenges of mechanics in shale gas efficient exploitation[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(3): 507–516.]
- [12] 陈勉, 金衍, 卢云虎. 页岩气开发: 岩石力学的基于与挑战[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47(11): 114601–1–114601–13. [CHEN M, JIN Y, LU Y H. Shale gas development: Opportunities and challenges for rock mechanics[J]. 2017, 47(11): 114601–1–114601–13.]
- [13] 李明耀, 贺甲元, 苏业旺. 页岩油气水力压裂的关键力学问题和数值计算方法[J]. 科技导报, 2016, 34(23): 32–42. [LI M Y, HE J Y, SU Y W. Key mechanical problems and numerical methods of hydraulic fracture in shale[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(23): 32–42.]
- [14] HUBBERT MK, WILLIS DG. Mechanics of hydraulic fracturing[J]. Petr. Trans. AIME, 1957, 210: 153–163.
- [15] FJÆR E, HOLT RM, HORSTRUD M, RAAEN AM, RISNES R. 2008. Petroleum related rock mechanics 2nd edition[M]. ELSEVIER, Amsterdam.
- [16] 孙焕泉. 水平井开发技术[M]. 石油工业出版社, 北京, 2012. [SUN H Q. Horizontal well development technology[M]. Petroleum Industry Press, Beijing, 2012.]
- [17] 中石油勘探与生产公司. 水平井压裂酸化改造技术[M]. 石油工业出版社, 北京, 2011. [Petrochina exploration and production corporation. Fracturing and acidizing technology for horizontal Wells[M]. Petroleum Industry Press, Beijing, 2011.]
- [18] 周德胜. 非常规油气储层提及改造裂缝扩展与织网机理研究[M]. 科学出版社, 北京, 2018. [ZHOU D S. Study on fracture propagation and meshing mechanism of unconventional oil and gas reservoirs[M]. Science Press, Beijing, 2018.]
- [19] FAKCHAROENPHOL P, KURTOGLU B, KAZEMI H, CHAROENWONGSA S, WU YS. The effect of Osmotic pressure on improve oil recovery from fractured shale formations [C]. The SPE Unconventional Resources Conference, April 1–3, 2012, Texas, USA, SPE–198998–MS.
- [20] 许明标, 刘卫红, 文守成. 现代储层保护技术[M]. 中国地质大学出版社, 北京, 2016. [XUM B, LIU W H, WEN S C. Modern reservoir protection technology[M]. China University of Geosciences Press, Beijing, 2016.]
- [21] ZHOU Z, ABASS H, LI XP, TEKLU T. Experimental investigation of the effect of imbibition on shale permeability during hydraulic fracturing[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 29: 413–430.
- [22] 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: 70–76. [TIAN Z L, SHI L, QIAO L. Research of and countermeasure for wellbore integrity of shale gas horizontal well[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35: 70–76.]

(编辑 马桂霞)