

# 致密砂岩支撑裂缝气测导流能力研究

何思源<sup>1</sup>,赵立强<sup>1</sup>,罗志锋<sup>1</sup>,李骏<sup>1</sup>,李化<sup>2</sup>

(1.西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500;

2.中国石油西南油气田分公司川西北气矿,四川 邛崃 611530)

**摘要:**用气测导流能力结果指导致密气藏的压裂设计优化,压后效果预测,支撑剂优选评价等更具有针对性和合理性。目前常见的气测导流能力测试主要研究了闭合压力、支撑剂粒径、支撑剂类型对于导流能力的影响。基于分析研究压裂液类型与铺置方式对导流能力影响的实验方案,采用DL—2000支撑裂缝导流能力测试仪,根据SY/T6302—1997《压裂支撑剂填充层短期导流能力评价推荐方法》进行气测导流能力测试。结果显示,随着闭合压力的增加,裂缝导流能力的下降;支撑剂粒径越大导流能力越大,但随着闭合压力的增加,导流能力降幅越大;铺置方式为尾追时裂缝气测导流能力最好;压裂液伤害使裂缝气测导流能力下降了80%~95%。

**关键词:**支撑裂缝;气测导流能力;渗透率;压裂液伤害;铺置方式

中图分类号:TE357.2

文献标识码:A

## Study on indoor gas measurement of supporting fracture conductivity of tight sandstone

He Siyuan<sup>1</sup>, Zhao Liqiang<sup>1</sup>, Luo Zhifeng<sup>1</sup>, Li Jun<sup>1</sup> and Li Hua<sup>2</sup>

(1.State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2.Northwest Sichuan Gas Mine, PetroChina Southwest Oil and Gasfield Company, Qionglai, Sichuan 611530, Sichuan)

**Abstract:** After the guidance of the results of gas flow conductivity test for the optimization of fracturing design of tight gas reservoirs, the prediction of post fracturing effect and the optimization evaluation of proppant were more pertinent and reasonable. The current common gas flow conductivity tests mainly focused on the influence of the closure pressure, proppant particle size and proppant type on the flow conductivity. Based on the analysis, we designed the experimental scheme about the influence of fracturing fluid type and laying mode on gas flow conductivity by using the DL—2000 fracture support conductivity tester and according to the SY/T6302—1997 "proppant filling layer short-term conductivity evaluation and recommendation method". The results showed that the fracture conductivity decreases when the closure pressure increased; the larger the proppant diameter was, the greater the conductivity would be; while the greater the closure pressure was, the greater the decreasing amplitude of the flow conductivity would be. The laying mode for the rear gas logging fracture conductivity was the best. The fracturing fluid damage made the cracks in the gas logging diversion capacity decreased by 80%~95%.

**Key words:** supporting fractures, gas flow conductivity, permeability, fracturing fluid damage, paving methods

近年来,随着常规能源勘探开发的难度逐渐加大,非常规能源已成为下一步开发重点,我国砂岩气发展前景相当可观<sup>[1-3]</sup>。致密储层孔喉半径小,渗透率低,基质渗透率低是致密储层最主要的特征,对这类储层的开发,基本都要进行压裂改造。虽然压裂

的方式、工艺较多,但最终决定压裂成败的关键因素是在储层中产生一条高导流能力的裂缝,因此对支撑裂缝的导流能力及其影响因素的研究就显得尤为重要。压裂支撑剂室内导流能力研究是支撑剂优选<sup>[4-9]</sup>、压裂设计的重要因素。1996年,国内首次开展

收稿日期:2018-02-05。

第一作者简介:何思源(1994—),男,在读硕士研究生,油气田开发。

基金项目:中国石化石油工程技术研究院“可视化复杂缝网支撑剂运移规律研究”(10010099-16-ZC0607-0021)。

了不同铺砂浓度的支撑剂短期导流能力及渗透率实验,研究了渗透率差异对增产效果与经济净现值的影响<sup>[10]</sup>。2007年赵金洲<sup>[11]</sup>从支撑剂颗粒物性与环境因素出发,分析了影响支撑裂缝导流能力的几种不同因素。金智荣<sup>[12]</sup>就复杂条件下支撑剂裂缝导流能力进行了实验研究与分析。从试验角度分析研究了支撑剂嵌入、不同支撑剂粒径组合、层微粒、时间和温度、地层压裂液残渣等因素对导流能力的影响。2009年,Weaver<sup>[13]</sup>通过电镜照片对人造陶粒与地层的适配性进行相关研究,结果表明,在一定条件下,支撑剂溶解破碎后矿化胶结将使裂缝渗透率下降90%以上。2009年肖勇军<sup>[14]</sup>开展不同粒径组合的支撑剂短期与长期导流能力的试验研究。试验结果表明,在高闭合压力下,不同粒径支撑剂如按照适当比例组合后,其抵抗破碎的能力和导流能力较单一粒径支撑剂有显著的改善。2010年陈娟<sup>[15]</sup>对支撑剂的导流能力进行了试验研究与分析。利用导流能力测试仪,测试分析了压裂液残渣、支撑剂嵌入、地层微粒侵入、压裂液破胶效果、酸碱性、闭合时间等各个复杂条件对裂缝导流能力的影响。2014年Kathryn Briggs<sup>[16]</sup>研究了不同铺砂浓度对裂缝导流能力的影响,针对不同性质的页岩设计了三组对比试验,发现在低浓度支撑剂情况下裂缝导流能力很大程度取决于岩石性质和形成裂缝面的粗糙度,不同性质的岩石在裂缝剪切破裂时碎屑脱落、滑移和支撑程度不同,这些在低闭合应力和低铺砂浓度条件下对裂缝导流有着较大的影响。目前的导流能力实验研究很少有研究压裂液伤害和不同铺置方式对于导流能力的影响,同时由于气体分支小,黏度低,具有压缩性,气渗流特征和液体存在较大差别,目前常规的支撑剂短期液测导流能力实验<sup>[17,18]</sup>,用于预测压裂气井生产动态时会存在较大的误差。而且实验过程中主要采用钢板展开实验,由于钢板的硬度较大,难以模拟实际底层条件下支撑剂嵌入岩石导致的裂缝导流能力降低。通过对支撑剂裂缝气测导流能力进行全面的分析,明确了支撑剂裂缝在不同条件下特别是压裂液伤害后和不同铺置方式下的气测导流能力的变化情况。

## 1 支撑剂导流能力测试装置

该次气测实验采用中国石油大学生产的DL—2000型支撑剂导流能力评价测试仪,流程如图1所

示。流量输出采用氮气瓶提供稳定的输出流量,试验采用岩芯板为致密砂岩岩心加工而成的天然岩板以及API支撑剂导流室结构(图2,图3)。

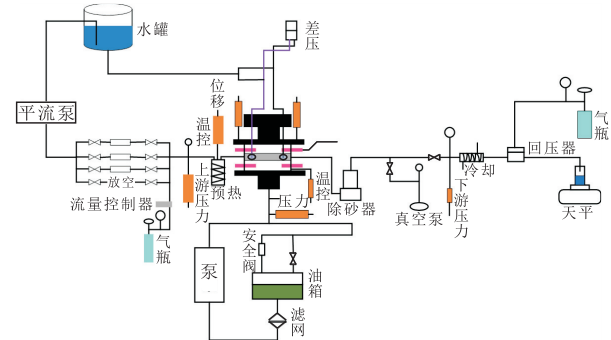


图1 酸蚀裂缝导流能力测试仪流程

Fig. 1 Flow capacity of acid corrosion crack tester flowchart



图2 实验岩板

Fig. 2 Experimental rock plate

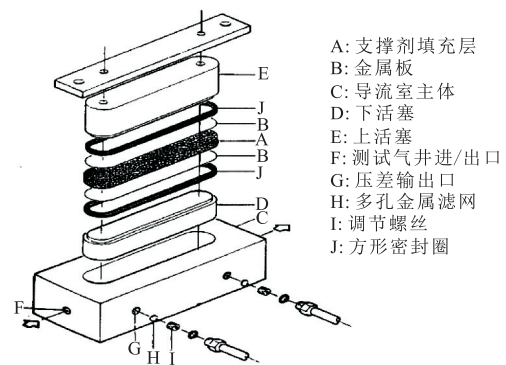


图3 API支撑剂导流室结构

Fig. 3 Structure of API support chamber

## 2 实验原理及方法

实验是根据SY/T6302—1997《压裂支撑剂填充层短期导流能力评价推荐方法》进行的导流能力测试<sup>[9]</sup>。测试中,在试样上加足够长时间的闭合压力以使支撑剂层达到半稳定状态。在一定闭合压力下使

流体流过支撑剂填充层,在不同的闭合压力下分别测量支撑剂的充填宽度、压差以及流量,由达西公式计算出支撑剂填充层的导流能力和渗透率。

DL-2000 支撑裂缝导流能力试验仪是基于达西定律见式(1),来计算支撑剂裂缝的导流能力,在层流状态下,气测渗透率见式(2),而根据支撑剂裂缝导流能力的定义,裂缝导流能力测试分析系统相对应的导流能力见式(3):

$$k = \frac{Q\mu l}{A\Delta P} \quad (1)$$

$$k_f = \frac{2Q\mu_g LP_0}{WW_f(P_1+P_2)(P_1-P_2)} \quad (2)$$

$$k_f W_f = \frac{2Q\mu_g LP_0}{W(P_1+P_2)(P_1-P_2)} \quad (3)$$

式中: $k_f$ 为支撑剂充填层气渗透率, $\mu\text{m}^2$ ;  $W$ 为导流室宽度,cm; $W_f$ 为支撑剂充填层的厚度,cm; $L$ 为差压传感器取压孔之间的距离,cm; $P_0$ 为大气压力, $10^{-1}\text{MPa}$ ;  $k_f W_f$ 为支撑剂层的导流能力, $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ ;  $Q$ 为气体流量, $\text{cm}^3/\text{s}$ ;  $\mu_g$ 为测试流体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $P_1, P_2$ 为上下游压力, $10^{-1}\text{MPa}$ 。

上述数据中,只有上游压力 $P_1$ ,下游压力 $P_2$ ,流量 $Q$ 为待测量。将待测量在试验仪上得到数据,再把所有的数据带到式(2)、式(3)中便可得到API实验室支撑剂充填空、液测渗透率和导流能力。

### 3 实验方案

实验在室温 $20^\circ\text{C}$ 条件下,气体采用氮气,气体密度 $0.00125\text{g}/\text{cm}^3$ ,气体黏度为 $0.017\text{mPa} \cdot \text{s}$ ,铺砂浓度为 $2.75\text{kg}/\text{m}^2$ 。分别考虑不同支撑剂粒径、不同铺置方式、不同压裂液伤害后的气测导流能力,设计了实验方案(表1)。

实验中的压裂液采用常用的三种压裂液配方如下:

EM50可回收压裂液配方:0.35%EM50稠化剂+0.5%TGF-1气井高效助排剂+0.5%ZJ-2助剂(图4a)。

EM60防水锁滑溜水配方:0.08%EM60减阻剂+0.5%TGF-3防水锁剂+0.5% COP-2黏土稳定剂(图4b)。

高黏胍胶压裂液配方:0.35%羟丙基一级胍胶+0.7%多功能添加剂+0.1%pH调节剂(图4c)。

表1 实验方案  
Table 1 Experimental scheme

支撑剂粒径	铺置方式	闭合压力/ MPa	承压时间/ d	压裂液
20/40		7~70	短期	
30/50		7~70	短期	
40/70		7~70	短期	
20/40, 40/70	尾追	7~70	短期	
20/40, 30/50, 40/70	组合	7~70	短期	
20/40, 40/70	脉冲	7~70	短期	
20/40, 40/70	尾追	42	15	
20/40, 30/50, 40/70	组合	42	15	
20/40, 40/70	脉冲	42	15	
20/40, 40/70	尾追	7~70	短期	高黏胍胶压裂液
20/40, 40/70	尾追	7~70	短期	EM60
20/40, 40/70	尾追	7~70	短期	EM50
20/40, 40/70	尾追	42	15	高黏胍胶压裂液
20/40, 40/70	尾追	42	15	EM60
20/40, 40/70	尾追	42	15	EM50

实验中采用尾追、组合、脉冲三种铺置方式(图5)。

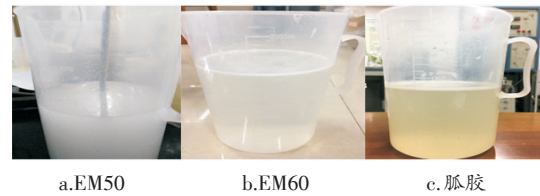


图4 压裂液

Fig. 4 Fracturing fluid

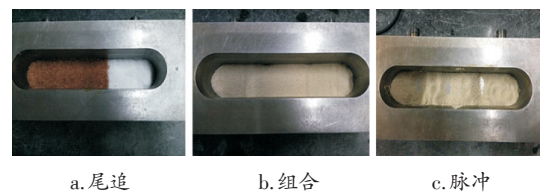


图5 不同铺置方式

Fig. 5 Different placement

### 4 实验结果及分析

#### 4.1 不同支撑剂粒径气测导流能力对比

在不同闭合压力下,对比20~40目、30~50目单一粒径支撑剂气测短期导流能力(图6)。在闭合

压力较低时,支撑剂没有破碎、嵌入,比较完整,因此大粒径支撑剂其孔隙也比较大,流体通过比较容易,所以导流能力相应比粒径小的支撑剂要高,即20~40目支撑剂比30~50目支撑剂的导流能力高。随着闭合压力的增加,支撑剂铺层被逐渐压实,支撑剂在闭合压力的作用下嵌入岩石壁面或者破碎,使得两种支撑裂缝的导流能力逐渐减小。

相同情况下,支撑剂粒径越小,其承压能力越强,抗破碎能力越高。主要原因是由于小粒径支撑剂颗粒与颗粒间的接触面积比大粒径支撑剂大,在相同压力下所受压强要小,更不容易破碎。因此随着闭合压力的增加,小粒径支撑剂由于接触面积大,承压能力较强,破碎率更低。支撑剂破碎后,产生的充填孔隙导致其流动能力变差的碎屑更少,故小粒径支撑裂缝导流能力下降更加缓慢。

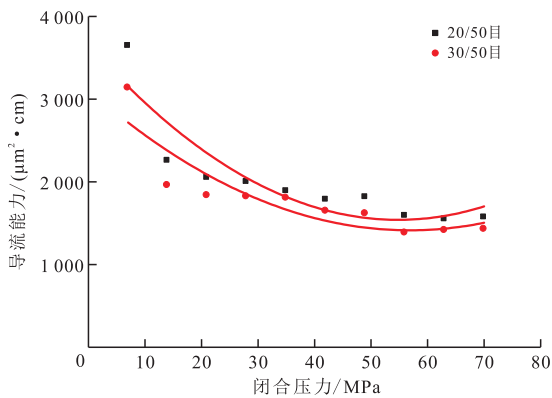


图6 不同支撑剂粒径短期气测导流能力对比

Fig. 6 Comparison of air conductivity in short-term with different proppant particle sizes

#### 4.2 不同铺置方式气测导流能力对比

由图7可知,其他实验条件相同情况下,支撑裂缝气测短期导流能力因支撑剂铺置方式的不同而不同。在低闭合压力下,三种不同铺置方式的支撑裂缝气测短期导流能力差距较大,铺置方式为尾追(40/70:20/40=1:2)的导流能力最大,脉冲(40/70:20/40=1:2、间距2 cm)次之,组合(40/70:20/40:30/50=1:1:1)最低。随着闭合压力的增加,三种铺置方式的支撑裂缝其气短期导流能力均减小,不同铺置方式减小的幅度不同,尾追的导流能力随闭合压力增加的降幅最大,组合次之,脉冲最小,因此随着闭合压力的增加三种铺置方式导流能力之间的差距逐渐减小。

由于支撑剂铺置方式的不同,实验初期支撑剂

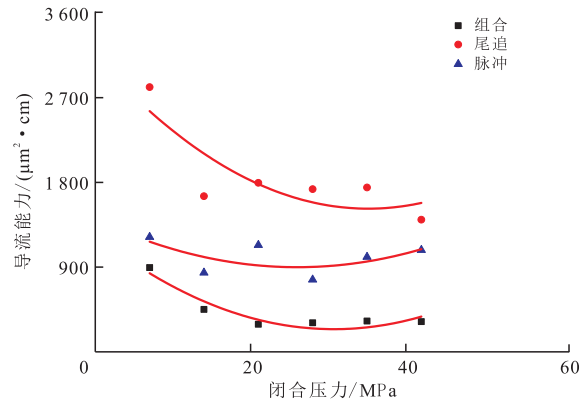


图7 不同铺置方式短期气测导流能力

Fig. 7 Comparison of air conductivity in short-term with different placement

层的厚度和孔隙度具有一定的差异,因此当闭合压力作用在支撑剂层上,支撑剂层因支撑剂被压碎堵塞孔隙通道而引起的裂缝渗透率降低的幅度不同,在低闭合压力作用下尾追方式的导流能力高于脉冲和组合,但随闭合压力增加,尾追方式导流能力的降幅明显大于脉冲和组合,可能是由于该铺置方式下的支撑剂层在实验初期具有最高的孔隙度,而随着闭合压力的加载作用支撑剂破碎引起的孔隙通道堵塞大于其他两种铺置。

由图8可知,支撑裂缝气测长期导流能力同样因支撑剂铺置方式的不同而不同。在42 MPa的闭合压力作用下,铺置方式为脉冲和尾追方式的导流能力相差不大,但是都远大于组合的导流能力。随着加载时间的增加,三种铺置方式的支撑裂缝气测导流能力均呈现减小的趋势,且不同铺置方式降幅不同。组合的降幅几乎可以忽略,尾追的降幅最大。

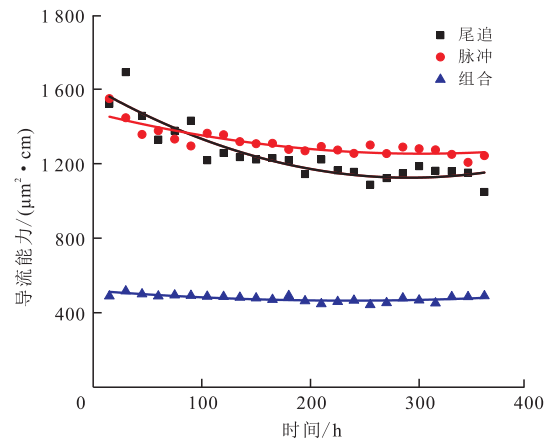


图8 不同铺置方式长期气测导流能力

Fig. 8 Comparison of air conductivity in long-term with different placement

对比实验初期与经过 360 h 加载时间后的导流能力值可知,尾追的导流能力降低了 31.14%,脉冲的导流能力降低了 19.75%,组合的导流能力降低了 5.04%。

通过对短期导流能力和长期导流能力研究可以发现气测导流能力的高低受支撑剂平均粒径的影响较大,粒径越大,气测导流能力越高,在铺置方式为组合时,由于 30~50 目粒径支撑剂的加入降低了 20~40 目支撑剂的质量和体积,降低了整个支撑剂层的平均粒径,因此其气测导流能力明显低于其他两种铺置方式。由于长期导流能力实验初期加载 42 MPa 闭合压力在支撑剂层上,支撑剂层被压实以后造成的厚度降低以及压碎以后堵塞孔隙造成的孔隙度降低已经趋于稳定,因此铺置方式为组合时,气测导流能力随加载时间延长的变化很小,同时也能说明在支撑剂中添加 30~50 目的支撑剂起到了支撑作用。

因此,在高闭合压力和长期导流的情况下,适当铺置方式的支撑剂在导流能力和抗压能力上都能显示一定的优势。考虑导流能力的大小及现场施工加砂的难易程度,铺置方式为尾追(40/70:20/40=1:2)较合适,因此,在此后研究压裂液伤害对导流能力的影响时,支撑剂的铺置方式选用尾追。

#### 4.3 不同压裂液伤害气测导流能力对比

经过三种压裂液伤害后的支撑裂缝系统气测导流能力均有明显的降低,降低幅度因压裂液种类的不同而不同,但裂缝导流能力随闭合压力增加而降低的趋势依然没有改变。由于高黏度胍胶压裂液中的高分子固结与残渣更容易残留于裂缝中的孔隙之中,堵塞孔喉,导致导流能力下降更多。对比分析三种压裂液伤害之后的导流能力,由此可知,EM60 防水锁压裂液伤害之后的裂缝导流能力约是高黏胍胶压裂液伤害之后的导流能力的五倍。高黏胍胶压裂液对支撑裂缝气测短期导流能力的伤害最大,EM50 可回收压裂液次之,EM60 防水锁压裂液伤害最小(图9)。

对比压裂液伤害前后的裂缝导流能力可以发现,压裂液残渣对支撑裂缝气测导流能力的伤害是非常严重的,压裂液伤害之后的导流能力下降了 80%~95%。所以在压裂设计中应尽可能采用低残渣压裂液,以获得较为理想的气测导流能力。

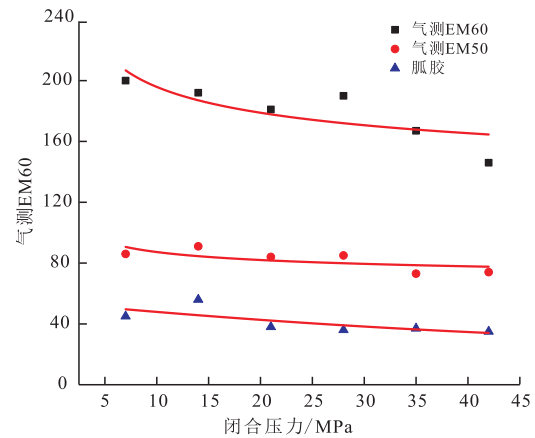


图9 不同压裂液伤害气测导流能力

Fig. 9 Comparison of air conductivity in short-term with different fracturing fluid damage

#### 4.4 方差分析

多因素方差分析用来研究两个及两个以上控制变量是否对观测变量产生显著影响<sup>[20,21]</sup>。多因素方差分析不仅能够分析多个因素对观测变量的独立影响,更能够分析多个控制因素的交互作用能否对观测变量的分布产生显著影响。因此对于导流能力的影响因素进行方差分析,找到关键的影响因素。

根据表2的数据可以分析:闭合压力、铺置方式、压裂液类型对气测导流能力都有显著的影响。在设计的过程中都是需要考虑的主要因素。

表2 气测导流能力方差分析  
Table 2 Variance analysis of gas conductivity

来源	离差平方和	自由度	均方离差	F值	显著性
修正的模型	39 344 826.103	42	936 781.574	10.763	0.000
截距	757 458.243	1	757 458.243	8.702	0.016
闭合压力	5 325 898.134	10	532 589.813	6.119	0.006
铺置方式	8 567 467.543	2	4 283 733.771	49.215	0.000
压裂液类型	23 050 651.840	3	7 683 550.613	88.275	0.000

## 5 结论与建议

针对致密气藏,通过四种不同条件下的支撑剂裂缝气测导流能力实验研究,运用DL-2000型压裂裂缝导流能力评价试验仪采用页岩或砂岩作为测试岩心,将N<sub>2</sub>作为测试流体,考虑支撑剂嵌入及模拟地层压力降低对导流能力的影响,分析支撑剂粒径、闭合压力、铺置方式、压裂液伤害因素对裂缝气测导流

能力的影响规律。通过分析所得的多组对比实验,得到如下结论:

1) 影响裂缝导流能力的主要因素有:闭合压力、支撑剂粒径、铺置方式、压裂液伤害等。

2) 当其他条件相同时,随着闭合压力的增大,裂缝导流能力减小。随着支撑剂粒径越大,裂缝导流能力增大,但对压力的变化更敏感。

3) 当其他条件相同时,在同一闭合压力下。铺置方式为尾追的裂缝导流能力最好,但随着闭合压力增加,降幅也最大。在尾追的铺置方式下支撑剂层在实验初期具有最高的孔隙度,裂缝的导流能力自然也越大。随着闭合压力的增大,尾追方式的导流能力下降较快。

4) 压裂液伤害对裂缝导流能力的影响较大,在相同闭合压力条件下,EM60的导流能力较好,对于导流能力的影响最小。压裂液中的残渣与高分支固结,堵塞支撑剂空隙,同时压裂液中的水可能引起水锁,导致压裂液伤害之后的导流能力的降幅都比较大,故对于致密页岩气藏压裂而言,应该优选伤害较低的压裂液来获得更高导流能力的支撑裂缝。

#### 参考文献

- [1] 贾承造,邹才能,李建忠,等.中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J].石油学报,2012,33(3):343-350.
- [2] 庞正炼,邹才能,陶土振,等.中国致密油形成分布与资源潜力评价[J].中国工程科学,2012,14(7):60-67.
- [3] 李鸣,王晓明.短期气液测裂缝导流能力影响因素分析[J].石油化工应用,2017,36(2):35-39.
- [4] L K Britt, C O Bennett. Determination of fracture conductivity in moderate permeability reservoirs using bilinear flow concepts [C]// paper SPE-14165-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 22-26 September 1985, Las Vegas, Nevada, USA.
- [5] 吴国涛,胥云,杨振周,等.考虑支撑剂及其嵌入程度对支撑裂缝导流能力影响的数值模拟[J].天然气工业,2013,33(5):65-68.
- [6] 王雷,王琦.页岩气储层水力压裂复杂裂缝导流能力实验研究[J].西安石油大学学报(自然科学版),2017,32(3):73-77.
- [7] 蒋建方,张智勇,胥云,等.液测和气测支撑裂缝导流能力室内实验研究[J].石油钻采工艺,2008,30(1):67-70.
- [8] 郭天魁,张士诚.影响支撑剂嵌入的因素研究[J].断块油气田,2011,18(4):527-529+544.
- [9] 郭建春,卢聪,赵金洲,等.支撑剂嵌入程度的实验研究[J].煤炭学报,2008,33(6):661-664.
- [10] 朱文,朱华银.支撑剂裂缝渗透率差异及其优质问题对压裂后经济净现值的影响[J].石油钻采工艺,1996,18(4):85-89.
- [11] 金智荣,郭建春,赵金洲,等.支撑裂缝导流能力影响因素实验研究与分析[J].钻采工艺,2007,30(5):36-38.
- [12] 金智荣,郭建春,赵金洲,等.复杂条件下支撑裂缝导流能力试验研究与分析[J].石油天然气学报,2007,29(3):284-287.
- [13] Jim D Weaver, Richard D Rickman, Hongyu Luo. Fracture-conductivity loss caused by geochemical interactions between man-made proppants and formations[J]. Society of Petroleum Engineers, 2010, 15(1): 116-124.
- [14] 肖勇军,郭建春,王文耀,等.不同粒径组合支撑剂导流能力实验研究[J].断块油气田,2009,16(3):102-104.
- [15] 陈娟,郭建春,李勇明,等.复杂条件下支撑剂导流能力的实验研究与分析[J].国外油田工程,2010,26(11):22-24.
- [16] K Briggs, A D Hill, D Zhu, et al. The relationship between rock properties and fracture conductivity in the Fayetteville Shale [C]// paper SPE-170790-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 27-29 October 2014, Amsterdam, The Netherlands.
- [17] 李玉伟,贾丹,高睿,等.煤岩复杂裂缝长期导流能力实验研究[J].天然气与石油,2017,35(1):94-99.
- [18] 蒋建方,张智勇,胥云,等.液测和气测支撑裂缝导流能力室内实验研究[J].石油钻采工艺,2008,30(1):67-70.
- [19] 中国石油天然气总公司.SY/T6302—1997压裂支撑剂充填层短期导流能力评价推荐方法[S].北京:石油工业出版社,1997.
- [20] 辛益军.方差分析与实验设计[M].北京:中国财政经济出版社,2002.
- [21] 王松桂.线性统计模型:线性回归与方差分析[M].北京:高等教育出版社,2000.

(编辑 常燕)