

基于开发技术的低渗透油藏未动用储量分类评价

凡玉梅

中国石化石油勘探开发研究院,北京 102206

摘要:低渗透油藏是未来石油勘探开发的主要对象,保有未动用储量经过多轮次筛选后,剩余储量品位差,因此开发技术的适用条件是油藏能否动用的关键因素。该文以中国石化低渗透油藏为例,研究了“十二五”以来不同渗透率级别的低渗透油藏探明未开发储量的开发技术现状及动用条件,分析了保有未动用评价储量的分类,结合现有难动用储量类型和技术发展趋势,进一步厘清了低渗透油藏未来技术需求和攻关方向。

关键词:开发技术;开发潜力;未开发储量;储量分类评价;低渗透油藏

中图分类号:TE155

文献标识码:A

Classification and evaluation of undeveloped reserves in low-permeability reservoirs based on development technologies

FAN Yumei

Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China

Abstract: Reservoir with low-permeability is the future object of oil exploration and development. After multiple rounds of screening, the remaining reserves have poor grade. Therefore, the applicable conditions of development technology are the key factors for whether the reservoir can be produced. Taking SINOPEC low-permeability reservoirs as an example, it is discussed in this paper for the status of development technology and production conditions of proved undeveloped reserves in low-permeability reservoirs with different permeability levels since the 12th Five-Year Plan. Moreover, the classification of development potential of undeveloped reserves was carried out. Combined with the existing types of hard-to-develop reserves and technological development trends, the future technical requirements and research directions of low-permeability reservoirs were further clarified.

Key words: development technology; development potential; un-developed reserves; classification and evaluation of reserves; low-permeability reservoir

低渗透油藏未开发储量是目前新区产建的主要阵地之一^[1]。随着勘探开发进展,低渗透油藏未开发储量的动用难度越来越大,对开发技术进步的依赖程度越来越高^[2]。因此,分析认清现有开发技术的适应性和针对性,进一步明确技术攻关方向和未开发储量的潜力,对促进低渗透油藏开发技术进步、推动低渗透油藏储量转化为产量和效益都具有重要意义。

1 技术现状及动用条件

“十二五”以来,中国石化共动用未开发储量 5.2×10^8 t,其中低渗透油藏动用储量 1.05×10^8 t,平均渗透率为 $11.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均储量丰度为

80×10^4 t/km²,以特低渗透、超低渗透油藏为主,占低渗透油藏动用储量的80.2%。

随着勘探开发技术进步,低渗透油藏开发技术也取得了较大的进步,开发技术针对性不断增强。攻关形成了适应于不同类型低渗透油藏储层甜点预测、仿水平井注水开发、长水平段多级压裂和直斜井多级压裂开发、水平井立体开发等多项技术,不断突破低渗透油藏渗透率下限和油藏地质条件(表1-2)。

针对渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的一般低渗透油藏,常规注水开发基本都能解决有效开发的问题,采用小规模压裂、或仿水平井开发、或CO₂驱会进一步改善开发效果。

表 1 “十二五”以来中国石化低渗透油藏开发技术应用情况
Table 1 Application of development technology for low-permeability reservoirs by SINOPEC ever since 12th Five-Year Plan

序号	开发技术	储量/ 10^4 t	占比/%
1	常规/超前注水	889	8
2	仿水平井注水开发	2 505	24
3	注二氧化碳开发	292	3
4	常规压裂	1 811	17
5	直井多级分层大型压裂	713	7
6	高导流压裂技术	210	2
7	水平井分段压裂	4 092	39
合计		10 512	100

表 2 低渗透油藏开发技术现状及动用条件

Table 2 Current situation and production conditions of development technology for low-permeability reservoirs

岩性	渗透率分级/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	动用储量占比/%	主要配套技术	深度范围/m	油层厚度最小值/m	储量丰度最小值/ $10^4 \text{ t}/\text{km}^2$
低渗砂岩	30~50	4.6	常规注水开发	1 850~3 200		
	10~30	15.1	小规模压裂/仿水平井开发/ CO_2 驱	2 130~3 650	3.2	21
	3~10	30.8	仿水平井注水开发/水平井分段压裂	2 050~3 700	3.5	23
	0.2~3	39.0	长水平段多级压裂/直斜井多级大型压裂	2 070~3 900	7.1	38
低渗砂砾岩	3~10	6.0	常规压裂小井距注水开发	3 500~4 010	35	75
	1.6~3	4.4	水平井立体开发技术/高导流通道压裂	3 400~4 300	75	178

针对渗透率大于等于 $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 且小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的低渗透油藏, 配套应用的主要技术有仿水平井注水开发技术、水平井分段压裂技术或常规压裂小井距注水开发技术。仿水平井开发技术首先是胜利油田提出来的^[3], 该技术集成创新了相控地应力预测技术、井网适配优化技术、长缝压裂技术以及径向水射流技术。该技术形成大井距小排距的注水开发井网模式, 累计动用储量 1.1×10^8 t。应用到砂岩油藏, 有效厚度下限扩展到 3.5 m、储量丰度下限 $23 \times 10^4 \text{ t}/\text{km}^2$; 砂砾岩油藏的有效厚度和储量丰度下限要高一些。

针对渗透率小于 $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩或砂砾岩油藏, 强调长水平段、多级压裂、大型压裂、高导流通道压裂、立体开发技术的综合应用^[4-5]。这类油藏一般利用天然能量开发, 有效开发需要油藏条件更好一些, 砂岩油藏有效厚度下限 7.1 m、储量丰度下限 $38 \times 10^4 \text{ t}/\text{km}^2$; 砂砾岩油藏有效厚度下限 75 m、储量丰度下限 $178 \times 10^4 \text{ t}/\text{km}^2$ 。

其中, 针对渗透率大于 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 且小于 $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩油藏, 采用长水平段多级压裂或直斜井多级大型压裂技术开发, 主要在鄂南长 8、长 9 储集体以及胜利油田浊积岩油藏应用^[6], 取得了一定效果。但长 8 致密油储层含油性较差, 可动油饱和度低, 压裂规模和强度较小, 平均单井加砂

量 200 多 m^3 , 入井液体 2 000 多 m^3 , 导致油井稳产期偏短, 累计产油量低, 油井由于能量太低而过早关井。

针对渗透率大于 $1.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 且小于 $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、油层厚度相对较大、无法注水开发的深层低渗透砂砾岩油藏, 采用水平井立体开发技术, 即水平井多级压裂结合立体井网技术, 形成井间缝面交错、层间井位交错式井网, 储层得以充分改造^[7], 实现储量最大控制。该技术在胜利油田盐 227 区块应用, 初产是直井的 1.8 倍, 递减率下降了 28.2%, 第一年年产油是直井的 2.6 倍。高导流通道压裂普遍应用于开发致密砂岩和裂缝性储层^[8], 通过脉冲纤维携砂, 由传统压裂的“面”支撑变为“点”支撑, 使得压裂后人工裂缝导流能力是常规压裂导流能力的几倍甚至几十倍, 大大增加油气井产能。胜利油田在盐 222 区块采用该技术, 压裂加砂强度下降 63.8%, 导流能力提高 25 倍以上, 原油生产能力提高了 3 倍, 取得比较好的效果。

2 低渗透油藏开发技术分类评价

2.1 未开发储量开发技术配套性分类

低渗透未开发评价储量 5.02×10^8 t, 按照探明未开发储量分类标准, 分属 2 大类 4 个小类 (表 3), 其中井控程度较高、地质认识较清楚的落

表3 低渗透油藏评价储量分类

Table 3 Classification of evaluated reserves in low-permeability reservoirs

	评价储量分类	地质储量/ 10^8 t	储量比例/%
落实储量	开发技术配套,效益待评价	0.36	7.2
	开发技术不配套,攻关方向明确	2.06	41.0
	开发技术不配套,攻关方向不明确	0.63	12.6
	小计	3.05	60.8
待落实储量	构造/储层/油水关系不清	1.97	39.2
	合计	5.02	100.0

实储量 3.05×10^8 t, 占总评价储量 60.8%; 井控程度较低, 构造、储层、油水关系复杂, 地质储量待落实储量 1.97×10^8 t, 占总评价储量 39.2%。落实储量根据开发技术配套程度, 进一步细分为开发技术配套储量和开发技术不配套储量。开发技术不配套储量指现有开发工艺技术尚不适应, 单井产能未获得实质性突破, 根据当前试采特征, 工程成本降低 30% 仍不具备经济开发条件的储量。根据技术攻关认识程度分为 2 类: 一类为已有技术攻关思路、方向, 正开展或准备开展前期研究、现场试验的储量; 一类为尚无技术攻关思路、方向, 暂无研究计划的储量。

2.2 技术配套储量潜力方向

在未开发储量细化分类的基础上, 开发技术配套储量 0.36×10^8 t, 占落实储量的 7.2%。主要包括两部分:

第一类主要属于储量丰度较高、渗透率相对较高的特低渗透油藏, 渗透率一般大于 $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 储量丰度平均大于 50×10^4 t/km²; 主要依靠仿水平井注水开发、水平井分段压裂、常规压裂小井距注水开发等技术实现有效动用。

第二类主要为较适宜 CO₂ 驱的特低渗透油藏, 根据砂岩油藏 CO₂ 驱筛选标准与潜力评价等级标准^[9], 渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、储量丰度 50×10^4 t/km² 左右(浊积岩储量丰度 70×10^4 t/km²)、地层原油黏度小于 50 mPa·s 的油藏具有 CO₂ 气驱潜力。胜利油田提出了“大井距、超前注、全过程超高压混相 CO₂ 驱”开发技术, 在樊 142 区块已初见成效^[10], 地层压力由 17.1 MPa 恢复至 33.7 MPa, 单井日油稳定在 5~6 t(注气前 1~2 t/d), 阶段 CO₂ 换油率为 0.37 t/t, 该技术将进一步扩大到梁 751、义 176 区块。但 CO₂ 驱技术应用项目总体处于边际效益, 投资回收期长, 品位较差的特低渗透油藏仍然有较大储量比例需要依靠工程降本才能达到效益开发。

2.3 技术不配套储量的攻关方向

采取工程降本后仍然达不到效益开发的区块

需要开展技术攻关。其中有明确技术攻关方向储量 2.06×10^8 t, 主要为特低渗透、超低渗透及致密油藏, 油藏平均埋深 3 000 m, 平均储量丰度 43×10^4 t/km², 平均渗透率 $3.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均地面原油黏度 18.3 mPa·s。主要攻关方向是 CO₂ 驱提高采收率技术和大型压裂提高储层渗流能力技术^[11-12]。

目前 CO₂ 驱提高采收率技术主要有 2 个攻关方向。针对原油重质组分含量高、混相压力高(30 MPa)的难点, 开展 CO₂ 驱混相机理研究, 降低混相压力; 针对储层非均质严重、气窜严重(井距小于 350 m)低丰度致密油藏, 开展 CO₂ 驱增稠体系研发、CO₂ 驱泡沫调剖技术研究等^[13-15]。

与国外相比, 我国 CO₂ 驱技术存在差距^[16]。我国陆相沉积、低渗透油藏非均质性较强, 天然裂缝和人工裂缝交织^[17-18], 埋藏深、原油黏度高, 对 CO₂ 驱油技术和效益开发带来了极大挑战。我国完成全生命周期的注气项目较少, 矿场试验规模不大, 气驱技术尚处于试验和完善阶段, 还存在若干需要解决或完善的技术问题。胜利高 89、华东草舍等区块开展 CO₂ 驱矿场试验, 增油效果明显, 但受储层非均质性、人工裂缝、单向注采等因素的影响, 导致气窜等问题突出^[19]。

大型压裂技术主要攻关 4 个方面: 一是攻关 CO₂ 复合体积压裂“压—注—采”水平井一体化技术^[20], 该技术压入大量功能性压裂液, 提高地层能量并改善原油性质, 优化工作制度, 待地层压力平衡后“控制式”采油; 二是针对微裂缝发育的油藏, 攻关直井全支撑压裂技术; 三是针对致密、厚层、深层浊积岩油藏, 攻关高导流通道压裂技术^[21]; 四是针对地层脆性指数较低、应力差较大的油藏, 攻关密切割压裂技术^[22]。这些体积压裂技术的攻关内容, 主要包括全过程储层保护、新型压裂液体系、大规模体积压裂优化设计及施工等(表 4)。

我国特低渗、致密油藏埋深大, 高温、高压, 含油饱和度低, 地应力各向异性较强, 在低成本、环保的大环境下, 迫切需要攻关解决大规模体积改造技

表4 低渗透砂岩油藏压裂技术攻关类型分布

Table 4 Types of fracturing techniques for low-permeability sandstone reservoirs

序号	压裂技术类型	储量/ 10^4 t	占比/%
1	高导流通道压裂	436	32.3
2	水平井“压+注+采”一体化	502	37.2
3	薄差层压裂增产	230	17.1
4	长水平段水平井多段压裂	84	6.2
5	直井全支撑压裂	96	7.1
总计		1 348	100.0

术^[23]。体积压裂改造技术是压裂技术发展的总趋势,“缝网”是体积改造追求的裂缝形态,体积压裂技术不仅在非常规储集层广泛应用,在低饱和度油藏、稠油油藏,甚至常规油气藏中均有应用^[24]。近年来体积改造技术新进展主要体现在井距与簇间距不断缩小,对多层或厚层油气藏采用立体式体积改造,以及超长水平井大幅降低成本并提高最终可采储量等方面。

2.4 暂无技术攻关方向储量

无明确攻关方向储量约 $6\ 300 \times 10^4$ t,主要是以下几类油藏:超低丰度(储量丰度小于 30×10^4 t/ km^2)滩坝砂、砂砾岩、浊积岩油藏,单井累产低;深层基岩油藏,原始含油饱和度低,油水互层,不压裂无产能,压裂后含水高。上述几类油藏,无论注气还是压裂都难以提高产能、实现效益开发。

3 结论

(1)明确了现阶段不同类型低渗透油藏开发技术现状及动用条件。针对渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的一般低渗透油藏,常规注水开发基本都能解决有效开发的问题,采用小规模压裂、或仿水平井开发、或 CO_2 驱会进一步改善开发效果;针对渗透率大于等于 $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的低渗透油藏,强调应用仿水平井注水开发技术、或水平井分段压裂技术或常规压裂小井距注水开发技术,砂岩油藏的油藏条件可以扩展到有效厚度下限 3.5 m、储量丰度下限 23×10^4 t/ km^2 ,砂砾岩油藏的油藏条件有效厚度和储量丰度下限要高一些;针对渗透率小于 $3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩或砂砾岩油藏,强调长水平段、多级压裂、大型压裂、高导流通道压裂、立体开发技术的综合应用,这类油藏一般都是天然能量开发,砂岩油藏有效厚度下限 7.1 m、储量丰度下限 38×10^4 t/ km^2 ,砂砾岩油藏有效厚度下限 75 m、储量丰度下限 178×10^4 t/ km^2 。

(2)明确了现有开发技术条件下未开发储量

的潜力和主要技术措施。可有效开发的储量 0.36×10^8 t,潜力小,包括两部分:第一类主要属于特低渗透油藏中渗透率较高、储量丰度较高的油藏,主要依靠仿水平井注水开发、水平井分段压裂、常规压裂小井距注水开发等技术实现有效动用;第二类主要属于特低渗透油藏中适宜 CO_2 驱的油藏。

(3)明确了低渗透油藏开展技术攻关的油藏类型、储量规模和技术方向。需要开展技术攻关储量 2.06×10^8 t,主要为特低渗透、超低渗透及致密油藏,主要攻关方向是 CO_2 驱提高采收率技术和大型压裂提高储层渗流能力技术。

(4)明确了无技术攻关方向的储量规模及油藏类型,储量约 $6\ 300 \times 10^4$ t,主要是超低丰度滩坝砂、浊积岩、砂砾岩油藏,及低含油饱和度的深层基岩油藏。

致谢:本论文撰写基础资料来自中国石化各分公司,中国石化石油勘探开发研究院的凡哲元、魏萍等领导同事也给予了极大的帮助,审稿专家和编辑老师也对本文提出了关键性的修改意见,在此一并感谢!

参考文献:

- [1] 赵庆飞,凡哲元,郑祥克,等.中国石化新区不同类型油藏开发指标快速评价模型的构建[J].油气地质与采收率,2019,26(4):77-81.
ZHAO Qingfei, FAN Zheyuan, ZHENG Xiangke, et al. Rapid development indexes evaluation models on different reservoirs of new development blocks, SINOPEC oilfields [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(4): 77-81.
- [2] 计秉玉.国内外油田提高采收率技术进展与展望[J].石油与天然气地质,2012,33(1):111-117.
JI Bingyu. Progress and prospects of enhanced oil recovery technologies at home and abroad [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 111-117.
- [3] 李荣强,吕爱民,王建忠,等.低渗透油藏仿水平井注采井网产能[J].石油与天然气地质,2016,37(3):439-443.
LI Rongqiang, LYU Aimin, WANG Jianzhong, et al. Productivity of the imitation horizontal well pattern in low permeability reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(3): 439-443.
- [4] 周林波.高导流自支撑酸化压裂室内实验研究[J].特种油气藏,2017,24(4):152-155.
ZHOU Linbo. Laboratory experimental research on high conductivity self-supporting acid fracturing [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(4): 152-155.
- [5] 卫秀芬,唐洁.水平井分段压裂工艺技术现状及发展方向[J].大庆石油地质与开发,2014,33(6):104-111.
WEI Xiufen, TANG Jie. Technical current status and development direction of horizontal-well staged fracturing technology [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2014, 33(6):

- 104-111.
- [6] 周立娟,何学文,王少飞,等.红河油田长8油藏压裂水平井生产规律研究[J].内蒙古石油化工,2013,39(13):131-133.
ZHOU Lijuan, HE Xuewen, WANG Shaofei, et al. Production law evaluation of fractured horizontal wells of Chang 8 section in Honghe oil reservoir [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2013, 39(13): 131-133.
- [7] 张全胜,李明,张子麟,等.胜利油田致密油储层体积压裂技术及应用[J].中国石油勘探,2019,24(2):233-240.
ZHANG Quansheng, LI Ming, ZHANG Zilin, et al. Application of volume fracturing technology in tight oil reservoirs of Shengli oilfield [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 233-240.
- [8] 严侠,黄朝琴,辛艳萍,等.高速通道压裂裂缝的高导流能力分析及其影响因素研究[J].物理学报,2015,64(13):134703.
YAN Xia, HUANG Zhaoqin, XIN Yanping, et al. Theoretical analysis of high flow conductivity of a fracture induced in HiWay fracturing [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(13): 134703.
- [9] 何应付,赵淑霞,计秉玉,等.砂岩油藏CO₂驱提高采收率油藏筛选与潜力评价[J].油气地质与采收率,2020,27(1):140-145.
HE Yingfu, ZHAO Shuxia, JI Bingyu, et al. Screening method and potential evaluation for EOR by CO₂ flooding in sandstone reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(1): 140-145.
- [10] 刘小波.CO₂混相驱技术在特低渗透滩坝砂油藏的开发实践及效果评价[J].油气地质与采收率,2020,27(3):113-119.
LIU Xiaobo. Application and evaluation of CO₂ miscible flooding in extra-low permeability beach-bar sand reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(3): 113-119.
- [11] 计秉玉,王友启,聂俊,等.中国石化提高采收率技术研究进展与应用[J].石油与天然气地质,2016,37(4):572-576.
JI Bingyu, WANG Youqi, NIE Jun, et al. Research progress and application of EOR techniques in SINOPEC [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 572-576.
- [12] 孙龙德,邹才能,贾爱林,等.中国致密油气发展特征与方向[J].石油勘探与开发,2019,46(6):1015-1026.
SUN Longde, ZOU Caineng, JIA Ailin, et al. Development characteristics and orientation of tight oil and gas in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6): 1015-1026.
- [13] 秦积舜,韩海水,刘晓蕾.美国CO₂驱油技术应用及启示[J].石油勘探与开发,2015,42(2):209-216.
QIN Jishun, HAN Haishui, LIU Xiaolei. Application and enlightenment of carbon dioxide flooding in the United States of America [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 209-216.
- [14] 李宛珊,王健,任振宇,等.低渗透油藏二氧化碳气溶性泡沫控制气窜实验研究[J].特种油气藏,2019,26(5):136-141.
LI Wanshan, WANG Jian, REN Zhenyu, et al. Gas-channeling control experiment with carbon dioxide gas-soluble foam in low-permeability oil reservoir [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2019, 26(5): 136-141.
- [15] 李金志.胜利油田低渗透油藏CO₂混相驱合理注采井距研究[J].油气地质与采收率,2020,27(3):64-69.
LI Jinzhi. Reasonable well spacing for CO₂ miscible flooding in low-permeability reservoirs of Shengli Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(3): 64-69.
- [16] 秦积舜,李永亮,吴德斌,等.CCUS全球进展与中国对策建议[J].油气地质与采收率,2020,27(1):20-28.
QIN Jishun, LI Yongliang, WU Debin, et al. CCUS global progress and China's policy suggestions [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(1): 20-28.
- [17] 牛小兵,冯胜斌,尤源,等.致密储层体积压裂作用范围及裂缝分布模式:基于压裂后实际取心资料[J].石油与天然气地质,2019,40(3):669-677.
NIU Xiaobing, FENG Shengbin, YOU Yuan, et al. Fracture extension and distribution pattern of volume fracturing in tight reservoir: an analysis based on actual coring data after fracturing [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 669-677.
- [18] 朱如凯,邹才能,吴松涛,等.中国陆相致密油形成机理与富集规律[J].石油与天然气地质,2019,40(6):1168-1184.
ZHU Rukai, ZOU Caineng, WU Songtao, et al. Mechanism for generation and accumulation of continental tight oil in China [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1168-1184.
- [19] 李绍杰.低渗透滩坝砂油藏CO₂近混相驱生产特征及气窜规律[J].大庆石油地质与开发,2016,35(2):110-115.
LI Shaojie. Performances and gas breakthrough law for CO₂ near-miscible flooding in the low-permeability bar and shoal oil reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(2): 110-115.
- [20] 苏建政,李凤霞,周彤.页岩储层超临界二氧化碳压裂裂缝形态研究[J].石油与天然气地质,2019,40(3):616-625.
SU Jianzheng, LI Fengxia, ZHOU Tong. Hydraulic fracture propagation behaviors and geometry under supercritical CO₂ fracturing in shale reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 616-625.
- [21] 吴顺林,李宪文,张矿生,等.一种实现裂缝高导流能力的脉冲加砂压裂新方法[J].断块油气田,2014,21(1):110-113.
WU Shunlin, LI Xianwen, ZHANG Kuangsheng, et al. A new method of pulse sand fracturing to achieve high conductivity of fracture [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(1): 110-113.
- [22] 慕立俊,赵振峰,李宪文,等.鄂尔多斯盆地页岩油水平井剖切体积压裂技术[J].石油与天然气地质,2019,40(3):626-635.
MU Lijun, ZHAO Zhenfeng, LI Xianwen, et al. Fracturing technology of stimulated reservoir volume with subdivision cutting for shale oil horizontal wells in Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 626-635.
- [23] 雷群,管保山,才博,等.储集层改造技术进展及发展方向[J].石油勘探与开发,2019,46(3):580-587.
LEI Qun, GUAN Baoshan, CAI Bo, et al. Technological progress and prospects of reservoir stimulation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 580-587.
- [24] 胥云,雷群,陈铭,等.体积改造技术理论研究进展与发展方向[J].石油勘探与开发,2018,45(5):874-887.
XU Yun, LEI Qun, CHEN Ming, et al. Progress and development of volume stimulation techniques [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(5): 874-887.