

# 海上特低渗碳酸盐岩油藏酸化效果分析

张宏友, 陈晓祺, 王美楠, 邓琪, 别梦君

中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院 天津 300459

通讯作者:Email:zhanghy8@cnooc.com.cn

项目支持:“十三五”国家科技重大专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范”(2016ZX05058001)

引用:张宏友,陈晓祺,王美楠,等.海上特低渗碳酸盐岩油藏酸化效果分析[J].油气井测试,2019,28(1):67-71.

Cite: ZHANG Hongyou, CHEN Xiaoqi, WANG Meinan, et al. Acidification effect of offshore ultra-low permeability carbonate reservoir[J]. Well Testing, 2019, 28(1): 67-71.

**摘要** 针对海上某油田奥陶系潜山特低渗碳酸盐岩油藏,储层物性差,常规 DST 测试无产能,又难以实施人工压裂或酸压措施的问题,从油藏储集空间特点出发,提出利用酸化作业在储层中建立酸蚀人工裂缝、沟通天然微细裂缝和孔隙、改善储层渗流条件等措施,提高油井产能。经实施 2 口井酸化作业,酸化后日产量均达  $100\text{ m}^3$  左右,且产油量稳定。分析酸化施工曲线以及试井曲线特征,选用“井筒储存+无限导流+均质油藏+无限大地层”的试井模型进行拟合,得到井筒及储层物性的各项参数,表明酸化作业能够有效沟通储层中的天然微细裂缝和孔隙,起到人工压裂或酸压措施同样的增产效果,是提高此类特低渗碳酸盐岩油藏产能的有效措施。

**关键词** 碳酸盐岩油藏;特低渗储层;酸化;试井曲线;人工裂缝;增产效果**中图分类号**:TE257 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.01.011

## Acidification effect of offshore ultra-low permeability carbonate reservoir

ZHANG Hongyou, CHEN Xiaoqi, WANG Meinan, DENG Qi, BIE Mengjun

Tianjin Branch of CNOOC (China) Limited, Tianjin 300459, China

**Abstract:** For the Ordovician buried-hill ultra-low permeability carbonate oil reservoir in an offshore oilfield, which is characterized by poor physical properties, the conventional DST reveals no production, and artificial fracturing or acid fracturing is infeasible. According to the characteristics of reservoir space, this paper put forward some measures such as acidizing the reservoir to create induced fractures, communicating natural micro-fractures and pores and improving reservoir seepage conditions, so as to improve the well productivity. The acidizing operation was carried out in 2 wells, revealing the stable daily oil production of  $100\text{ m}^3$ . By analyzing the characteristics of acidizing curve and well test curve, and matching with the well test model of "wellbore storage + infinite conductivity + homogeneous reservoir + infinite thick layer", the parameters of wellbore and reservoir physical property were obtained. The results show that acidizing operation can effectively communicate the natural micro-fractures and pores in the reservoir, with the same effect as artificial fracturing or acid fracturing. Therefore, acidification is an effective measure to improve the productivity of such ultra-low permeability carbonate reservoirs.

**Keywords:** carbonate reservoir; ultra-low permeability reservoir; acidizing; well test curve; induced fracture; stimulation effect

近年来,国内外陆续发现了大量碳酸盐岩油藏,其中部分碳酸盐岩油藏为低渗、特低渗储层<sup>[1-3]</sup>。因此,在其开发过程中,大多采取人工压裂或酸压方式实施储层改造,形成较长人工裂缝来沟通天然孔隙和裂缝,从而改善储层渗流条件,提高油井产能,取得了较好的增产效果<sup>[4-5]</sup>。如国内的塔里木油田、塔河油田碳酸盐岩油气藏,酸化压裂已经成为其增储上产重要措施手段。同时,国内学

者在碳酸盐岩储层酸化压裂效果评价、工艺技术、酸压机理、影响因素等方面取得了大量研究成果<sup>[6-8]</sup>。如田东江等<sup>[9]</sup>利用酸压施工曲线、裂缝导流能力曲线、不稳定试井曲线建立了较为系统的碳酸盐岩储层酸压效果评价方法。王永辉等<sup>[10]</sup>针对国内碳酸盐岩储层埋藏深、温度高、非均质性强等特点,开展了相应的基础理论研究、技术配套研发,以及现场技术应用,形成了国内高温深层碳酸盐岩

储层酸压改造配套新技术。宋刚<sup>[11]</sup>通过研究温度、酸液质量浓度、酸液类型等因素对酸压效果的影响,指导控制酸压反应速率,提高酸压效果。耿宇迪等<sup>[12]</sup>根据塔河碳酸盐岩油藏特点,结合水平井储层特征,通过优选酸液体系、优化酸压工艺,形成了适合于塔河油田水平井的酸压工艺技术。王兴文等<sup>[13]</sup>综述了国内碳酸盐岩储层酸压技术与理论研究现状,预测了未来酸压理论研究的主要发展方向。柳明等<sup>[14]</sup>通过 Kalia 模型研究了孔洞、裂缝和内外径比等描述非均质性参数对碳酸盐岩储层酸化径向向蚓孔扩展的影响。这些研究成果有利指导了碳酸盐岩储层酸压增产措施的成功实施。

海上某油田奥陶系潜山为碳酸盐岩油藏,钻井过程未见明显井漏、井喷及钻具放空现象,岩心收获率高达 99%,且岩心形状规则,表明油藏不发育大的缝、洞。根据岩心观察、薄片资料及 FMI 资料研究,该油藏岩性为泥-粉晶白云岩,储集空间主要包括孔隙、溶洞、裂缝 3 种基本类型。其中孔隙主要为晶间孔和溶蚀孔两种类型;溶洞不太发育,多以孤立状分布,洞径一般小于 5 mm;裂缝以构造缝和构-溶缝为主,产状以中-高角度为主,薄片观察以微细裂缝为主,缝宽 0.1~25 mm,平均 1.3 mm,裂缝线密度为 1.5~2.0 条/m,且充填缝占大多数,少见未充者,充填物为方解石及白云石等。由于后期充填作用影响,孔隙和裂缝充填严重,物性较差,储层孔隙度分布范围为 1.4%~17.0%,平均 4.4%,渗透率分布范围 0.01~49.3 mD,平均 2.4 mD,为特低渗碳酸盐岩储层,常规 DST 测试无产能<sup>[15]</sup>。受海上平台设施种种因素限制,加上作业成本高,目前该油田仍难以大规模实施人工压裂或酸压增产措施手段。针对该油藏储层微细裂缝相对较发育,但充填程度高的特点,提出利用常规酸化作业中的酸液溶蚀近井地带储层孔隙和裂缝中填充物,形成小规模“酸蚀人工裂缝”,以此沟通天然微细裂缝和孔隙,同时解除近井地带储层污染,改善储层渗流条件,提高油井产能<sup>[16]</sup>。

目前,该奥陶系潜山油藏已经实施了 2 口井酸化作业,酸化后日产油量均达 100 m<sup>3</sup> 左右,且产油量稳定;酸化作业中,酸液进入储层后,施工压力、停泵压力下降快;关井压力恢复试井曲线表现出垂直裂缝压裂井典型的“线性流”特征,证实了酸化作业确实能够有效沟通天然微细裂缝和孔隙,形成高导流能力的渗流通道,从而大幅提高了油井产能,

起到人工压裂或酸压措施同样的增产效果,为该油藏后续开发提供了一种有效增产手段。

## 1 DST 测试、酸化方案设计与施工

目前,该油田奥陶系潜山处于评价阶段,一共完钻了 2 口井,1 口预探井(CFD1 井)、1 口开发评价井(CFD7 井)。其中,CFD1 井为 1996 年实施的一口预探井,在奥陶系潜山钻遇油层厚度 13.2 m,完钻后直接进行常规 DST 测试,测试期间液面仅能自溢到井口,达到自然关井状态,无自喷产量,反映储层渗流条件较差。因此,实施酸化措施作业,提高测试产能。DST 测试过程中,实施一开一关测试制度,采用 12.70 mm 油嘴,生产压差 18.12 MPa,求产时间 8.5 h,平均日产油量达到 102.0 m<sup>3</sup>,产油量较稳定,酸化效果明显,关井压恢 12 h(图 1)。

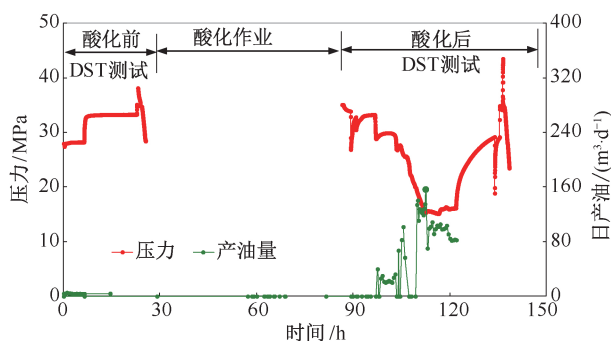


图 1 CFD1 井 DST 测试压力史曲线  
Fig.1 Pressure history curve of Well CFD1 by DST test

为进一步落实该油藏酸化增产效果,2017 年实施一口开发评价井(CFD7 井),该井奥陶系潜山钻遇油层厚度 50.3 m,完钻后直接实施酸化措施作业,酸化后进行延长测试。酸化方案相关工艺参数为:采用 20% 盐酸体系,正挤酸液 33.0 m<sup>3</sup>,包括处理液 20.0 m<sup>3</sup>(淡水+20% HCL+5% 乙酸+2% 铁稳剂+3% 稳蚀剂+2% 黏稳剂+2% 破乳剂+1.0% 润湿反转剂)、顶替液柴油 13.0 m<sup>3</sup>,施工排量 1.0~60 m<sup>3</sup>/h,施工压力小于 25 MPa。CFD7 井酸化作业施工过程:打开奥陶系生产滑套,关闭其他油层生产滑套,挤注处理液 7.0 m<sup>3</sup>,施工压力 21.2~21.7 MPa,施工排量 5.0~19.0 m<sup>3</sup>/h;挤注顶替液 14.5 m<sup>3</sup>,施工压力 18.5~22.6 MPa,施工排量 19.0~29.0 m<sup>3</sup>/h;停泵测压降,10 min 施工压力由 14.9 MPa 下降至 10.6 MPa,放喷返排,累计返出顶替液(柴油)8 m<sup>3</sup>,酸化作业结束。采用 9.53 mm 油嘴进行延长测试,生产压差 11.2 MPa,求产

时间 702.6 h, 平均日产油量达到  $115 \text{ m}^3$ , 产油量稳定, 关井压恢 112 h (图 2)。

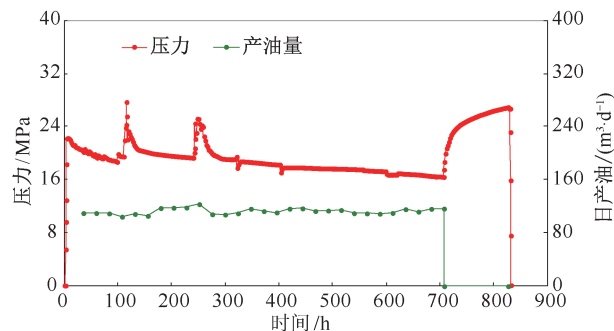


图2 CFD7 井延长测试压力史曲线

Fig.2 Pressure history curve of Well CFD7

## 2 酸化效果分析

利用酸化施工曲线、试井曲线特征开展 CFD1 井、CFD7 井酸化效果分析。

### 2.1 CFD1 井酸化效果分析

由于 CFD1 井实施时间较早, 酸化施工曲线缺失, 本次只利用试井曲线分析酸化效果。

从该井不稳定试井双对数曲线可以看出 (图 3), 续流段后压力曲线及压力导数曲线均呈  $1/2$  斜率直线, 即呈现出典型“线性流”特征, 类似于垂直裂缝压裂井的渗流特征<sup>[17-18]</sup>。

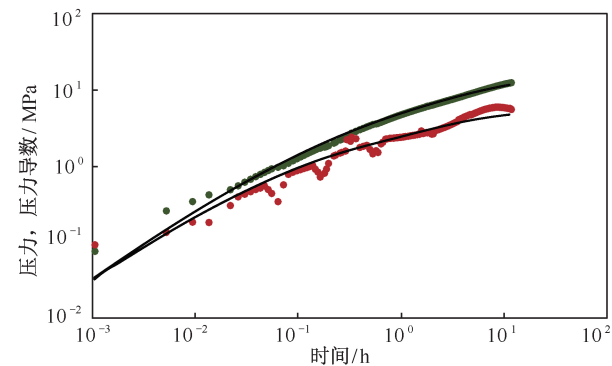


图3 CFD1 井不稳定试井双对数曲线

Fig.3 Log-log plot of Well CFD1 by pressure transient well test

分析认为, 由于该碳酸盐岩油藏主要发育微细裂缝, 且充填程度高, 不能形成有效渗流通道<sup>[19]</sup>。因此, 酸化前 DST 测试无产能; 而酸化作业中的酸液很好溶蚀了近井地带储层天然微细裂缝和孔隙中的填充物, 使得酸化前处于不连通状态的天然微细裂缝得到了有效沟通, 形成了类似于压裂井的“酸蚀人工裂缝”, 从而大大改善储层渗流条件, 有效提高了油井产能<sup>[20-21]</sup>。选用“井筒储存+无限导

流+均质油藏+无限大地层”的试井模型进行拟合, 拟合效果较好, 并得到了反映井筒及储层物性的各项参数: 井筒储存系数  $0.138 \text{ m}^3/\text{MPa}$ , 储层渗透率  $2.58 \text{ mD}$ , 裂缝半长  $19.6 \text{ m}$ 。由于本次 DST 测试关井压力恢复时间较短, 试井曲线未出现明显“拟径向流”和“边界”特征响应。

### 2.2 CFD7 井酸化效果分析

首先, 从该井酸化施工曲线可以看出 (图 4), 当酸液进入储层后, 施工压力迅速下降, 2 min 内下降了  $3.87 \text{ MPa}$ , 排量由  $25.8 \text{ m}^3/\text{h}$  上升到  $28.6 \text{ m}^3/\text{h}$ , 说明酸液酸蚀储层效果明显, 很快形成了一条高导流泄压通道, 即人工裂缝, 有效沟通了天然微细裂缝和孔隙。同时, 停泵压力呈弧形曲线下降 (初期快、后期慢), 表明酸蚀形成“人工裂缝”较发育, 储层渗流能力较强, 停泵后注入液体能够沿“人工裂缝”快速滤失扩散, 初期停泵压力下降速度快; 但“人工裂缝”延伸长度有限, 后期滤失扩散开始变慢, 停泵压力下降速度也开始变慢。

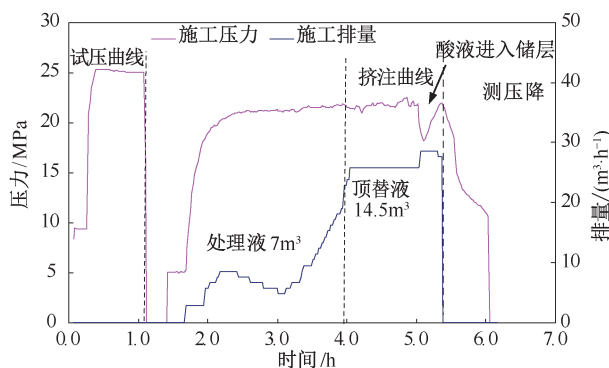


图4 CFD7 井酸化施工曲线

Fig.4 Acidizing curve of Well CFD7

其次, 从该井不稳定试井双对数曲线可以看出 (图 5), 早期阶段与 CFD1 井试井曲线特征一致, 续流段后压力曲线及压力导数曲线均呈  $1/2$  斜率直线, 即呈现出垂直裂缝压裂井典型“线性流”特征; 同时, 由于该井压恢关井时间长, 加上“酸蚀人工裂缝”长度较短, “线性流”之后又呈现出明显的“拟径向流”特征, 压力导数曲线出现水平段。

选用“井筒变储存+无限导流+均质油藏+无限大地层”的试井模型进行拟合, 拟合效果较好, 得到了反映井筒及储层物性的各项参数: 井筒储存系数  $0.18 \text{ m}^3/\text{MPa}$ , 储层渗透率  $2.0 \text{ mD}$ , 裂缝半长  $30.2 \text{ m}$ , 解释结果与 CFD1 井也基本一致。



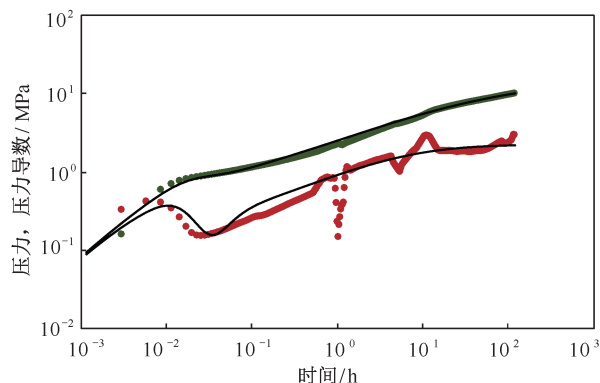


图5 CFD7井不稳定试井双对数曲线

Fig.5 Log-log plot of Well CFD7 by pressure transient well test

综上,从试井解释结果来看,CFD1井、CFD7井试井解释渗透率仅为2.00~2.58mD,表明储层物性差,属于特低渗碳酸盐岩油藏;其次,通过分析酸化施工曲线以及试井曲线特征,证实酸化作业确实能够有效沟通储层天然微细裂缝和孔隙,形成高导流能力的渗流通道,从而大大提高了油井产能,但酸蚀形成的“人工裂缝”延伸长度较为有限。

### 3 结论

(1)针对某奥陶系潜山特低渗碳酸盐岩油藏,提出了利用酸化作业在储层中建立“酸蚀人工裂缝”提高油井产能的方法,较好解决了海上油田目前难以大规模实施人工压裂或酸压措施的问题。

(2)试井曲线表明,两口井酸化后双对数曲线呈现出与人工压裂井相同的“线性流”特征,证实了酸化作业能够形成“人工裂缝”,有效沟通储层天然微细裂缝和孔隙,从而形成高导流能力的渗流通道。

(3)CFD1井、CFD7井实践表明,酸化作业能够大幅提升油井产能,为该油藏后续开发提供了一种有效增产手段,也为其他类似低渗、特低渗碳酸盐岩油藏开发提供了借鉴。

致谢:感谢中海石油(中国)有限公司天津分公司对论文研究工作所提供的支持。

### 参考文献

[1] 田东江,罗志锋,牛新年,等.复杂碳酸盐岩储层酸压沟通模式识别新方法与应用[J].钻采工艺,2017,40(3):62-64.  
TIAN Dongjiang, LUO Zhifeng, NIU Xinnian, et al. A new method recognizing fracture communication modes during acid frac in complicated carbonate reservoir and its application [J]. Drilling & Production Technology, 2017,40(3):62-64.

[2] 敬路敏,夏辉,潘勇.塔河油田酸压工艺及酸压效果分析[J].油气井测试,2006,15(6):48-50.  
JING Lumin, XIA Hui, PAN Yong. Analysis for acidizing and fracture tech in Tahe Oilfield and its effect [J]. Well Testing, 2006,15(6):48-50.  
[3] 黄建宁.长庆靖边气田碳酸盐岩储层加砂压裂工艺技术应用效果分析[J].油气井测试,2007,16(1):46-48.  
HUANG Jianning. Analysis for effect of adding sand fracture in carbonate rock reservoir in Changqing Jingbian Gas Field [J]. Well Testing, 2007,16(1):46-48.  
[4] 丁云宏,程兴生,王永辉,等.深井超深井碳酸盐岩储层深度改造技术——以塔里木油田为例[J].天然气工业,2009,29(9):81-84.  
DING Yunhong, CHENG Xingsheng, WANG Yonghui, et al. The intensive stimulation technologies of carbonate reservoirs in deep and ultra-deep wells: A case study of the Tarim Oilfield [J]. Natural Gas Industry, 2009,29(9):81-84.  
[5] 陈志海,戴勇.深层碳酸盐岩储层酸压工艺技术现状与展望[J].石油钻探技术,2005,33(1):58-61.  
CHEN Zhihai, DAI Yong. Actuality and outlook of acid-fracturing technique in deep carbonate formation [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005,33(1):58-61.  
[6] 郜国喜,田东江,牛新年,等.碳酸盐岩储层酸压停泵压降特征与缝洞规模关系[J].断块油气田,2013,20(5):652-655.  
GAO Guoxi, TIAN Dongjiang, NIU Xinnian, et al. Relationship of pump-stopping pressure drop characteristics of acid fracturing and hole size for carbonate reservoirs [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013,20(5):652-655.  
[7] 刘辉,袁学芳,周理志,等.缝洞性碳酸盐岩储层酸压效果影响因素研究[J].钻采工艺,2013,36(1):53-55.  
LIU Hui, YUAN Xuefang, ZHOU Lizhi, et al. Factors of affecting the acid fracturing effect in fracture-cavity carbonate reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2013,36(1):53-55.  
[8] 龚蔚.复杂岩性油气藏特殊酸压(酸化)技术[J].特种油气藏,2009,16(6):1-4.  
GONG Wei. Special acid fracturing (acidizing) techniques for complex lithology reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2009,16(6):1-4.  
[9] 田东江,牛新年,郜国玺,等.哈拉哈塘区块碳酸盐岩储集层酸压改造评价方法[J].新疆石油地质,2012,33(2):236-238.  
TIAN Dongjiang, NIU Xinnian, GAO Guoxi, et al. Evaluation method for acid fracturing in carbonate reservoirs of Halahatang Block in Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012,33(2):236-238.  
[10] 王永辉,李永平,程兴生,等.高温深层碳酸盐岩储层酸化压裂改造技术[J].石油学报,2012,33(S2):166-173.  
WANG Yonghui, LI Yongping, CHENG Xingsheng, et al.

- A new acid fracturing technique for carbonate reservoirs with high-temperature and deep layer [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(S2): 166-173.
- [11] 宋刚. 酸压对塔河油田碳酸盐岩储集层的影响因素[J]. *新疆石油地质*, 2013, 20(1): 101-103.  
SONG Gang. Factors affecting the acid fracturing effect on carbonate reservoir in Tahe Oilfield [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2013, 20(1): 101-103.
- [12] 耿宇迪, 张烨, 韩忠艳, 等. 塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏水平井酸压技术[J]. *新疆石油地*, 2011, 32(1): 89-91.  
GENG Yudi, ZHANG Ye, HAN Zhongyan, et al. Acid fracturing technique for fractured-vuggy carbonate reservoir by horizontal well process in Tahe Oilfield [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2011, 32(1): 89-91.
- [13] 王兴文, 郭建春, 赵金洲, 等. 碳酸盐岩储层酸化(酸压)技术与理论研究[J]. *特种油气藏*, 2004, 11(4): 68-73.  
WANG Xingwen, GUO Jianchun, ZHAO Jinzhou, et al. Acidizing (acid fracturing) technique and theoretical study for carbonate reservoir [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2004, 11(4): 68-73.
- [14] 柳明, 张士诚, 牟建业, 等. 碳酸盐岩油藏非均质性对蚓孔扩展的影响[J]. *特种油气藏*, 2012, 19(5): 146-150.  
LIU Ming, ZHANG Shicheng, MU Jianye, et al. Effect of heterogeneity in carbonate reservoirs on worm-hole propagation [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2012, 19(5): 146-150.
- [15] 王永恒. 大牛地低渗透气藏压裂井试井曲线特征研究[J]. *油气井测试*, 2012, 21(4): 14-16.  
WANG Yongheng. Study on the well testing curves characteristics of fractured wells in the Daniudi low permeability gas reservoir [J]. *Well Testing*, 2012, 21(4): 14-16.
- [16] 张汝生, 卢拥军, 丁云宏. 碳酸盐岩基质酸化/酸压裂中形成虫孔研究新进展[J]. *油田化学*, 2005, 22(3): 276-278.  
ZHANG Rusheng, LU Yongjun, DING Yunhong. New developments in understanding wormholing in carbonate formations during matrix acidizing/acid fracturing [J]. *Oilfield Chemistry*, 2005, 22(3): 276-278.
- [17] 刘能强. 实用现代试井解释方法[M]. 第5版. 北京: 石油工业出版社, 2008: 202-223.
- [18] 庄惠农. 气藏动态描述和试井[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 175-183.
- [19] 陈志海, 张士诚. 深层碳酸盐岩储层酸压改造后的地质效果评价——以塔河油田缝洞型碳酸盐岩储层为例[J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(6): 686-690.  
CHEN Zhihai, ZHANG Shicheng. Evaluation of geological effects of acid-fracturing in deep carbonate reservoirs: taking the fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tahe Oilfield as an example [J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(6): 686-690.
- [20] 王藏, 宋伟, 李庆文. L2井测试资料的认识[J]. *油气井测试*, 2004, 13(5): 24-25.  
WANG Wei, SONG Wei, LI Qingwen. Acknowledge for well testing data of L2 Well [J]. *Well Testing*, 2004, 13(5): 24-25.
- [21] 魏聪, 陈宝新, 刘敏, 等. 基于反褶积技术的气井不稳定试井解释[J]. *油气井测试*, 2018, 27(1): 73-78.  
WEI Cong, CHEN Baoxin, LIU Min, et al. Interpretation of pressure transient well testing data of S Gas Well based on deconvolution technique [J]. *Well Testing*, 2018, 27(1): 73-78.

编辑 刘振庆

**第一作者简介:**张宏友,男,1980年出生,硕士,高级工程师,2005年毕业于中国石油大学(北京)油气田开发工程专业,主要从事油气田开发工程相关研究工作。电话:022-65501100,13821358191;Email:zhanghy8@cnoc.com.cn。通信地址:天津市滨海新区海川路渤海石油管理局B座中海石油(中国)有限公司天津分公司,邮政编码:300459。