

渤海潜山复杂碳酸盐岩储层试井曲线特征

闫建丽, 张宏友, 何芬, 孙广义, 王鹏

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: yanjl2@ cnooc. com. cn

项目支持: 中海石油(中国)有限公司重大科技项目“海上低渗及潜山油气田有效开发技术”(KJGG2022-0700)

引用: 闫建丽, 张宏友, 何芬, 等. 渤海潜山复杂碳酸盐岩储层试井曲线特征[J]. 油气井测试, 2022, 31(6): 65-69.

Cite: YAN Jianli, ZHANG Hongyou, HE Fen, et al. Pressure transient characteristics and reservoir identification of carbonate reservoir in Bohai oilfield [J]. Well Testing, 2022, 31(6): 65-69.

摘要 针对渤海 L 油田碳酸盐岩储层类型复杂、开发规律认识不清等难题, 剖析碳酸盐岩储层试井响应特征, 将渤海 L 油田试井曲线特征分为 5 类, 并找出了试井曲线特征、生产动态与碳酸盐岩储层特征的对应关系; 利用动静态资料, 评价了各井不同的储层特征, 将渤海 L 油田碳酸盐岩储层划分为孔隙-裂缝型和裂缝-孔隙型两种类型; 建立了 L 油田碳酸盐岩储层特征识别模板, 实现了储层复杂渗流特征的精细刻画。该技术对区域的勘探开发一体化实践具有一定的指导意义, 也为类似复杂碳酸盐岩油气藏储层研究提供了技术借鉴。

关键词 渤海 L 油田; 碳酸盐岩; 试井分析; 双重孔隙介质; 储层类型; 潜山油藏; 开发规律; 边底水

中图分类号: TE345 **文献标识码:** B **DOI:** 10. 19680/j. cnki. 1004-4388. 2022. 06. 013

Pressure transient characteristics and reservoir identification of carbonate reservoir in Bohai oilfield

YAN Jianli, ZHANG Hongyou, HE Fen, SUN Guangyi, WANG Peng

Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC Limited, Tianjin 300459, China

Abstract: The carbonate reservoirs types are complex in Bohai L oilfield, it is difficult to understand the development performance, thus well test characteristics were analyzed, there were five types of pressures transient characteristics and correspondence to different carbonate reservoirs types and production performance. Combined static and dynamic data, reservoir characteristics were estimated and carbonate reservoirs types were divided into two types: pore-fracture and fracture-pore. The curves reflect the reservoir physical property and reservoir types in Bohai L Oilfield, getting a better understanding of reservoir characteristic and realizing the fine description of dynamic flow, which has a certain guiding significance for exploitation and development of this field, and provides a reference for similar complex carbonate reservoirs.

Keywords: Bohai L oilfield; Carbonate reservoir; well test analysis; dual-porosity; reservoir types; buried hill reservoir; development performance; edge and bottom water

潜山碳酸盐岩储层埋藏深, 受多期构造运动改造, 油气储集空间类型多、成因机制复杂, 给传统的储层特征认识带来了很大困难^[1]。近年来, 国内外很多学者对碳酸盐岩储层进行了深入的研究, 尤其围绕西部奥陶系缝洞型碳酸盐岩储层, 李苗等^[2]、杨敏等^[3]、程飞^[4]、郑函庆等^[5]运用现代试井解释方法, 通过对双对数曲线的特征流动段分析, 在一定程度上识别了碳酸盐岩储层特征, 而针对渤海的古潜山复杂碳酸盐岩油藏的试井分析及生产动态的资料较少。

渤海 L 油田位于东西展布的渤海南部潜山带中部, 属古潜山油田碳酸盐岩油气藏, 储层岩石主要以白云岩、灰岩为主, 白云岩具有良好的储集特性, 而石灰岩多数储集性较差, 仅局部含油气^[6]。大量岩心观察及薄片鉴定结果证实, 油田的储集空间主要为成岩后生作用、断裂作用和淋滤溶蚀作用形成的次生孔隙, 包括晶间孔、构造缝和溶蚀孔隙。

目前油田已经历了 20 年的天然能量衰竭开发, 单井产量差异大, 部分井有气窜、水锥等问题, 生产

特征复杂。本文通过加强对渤海 L 油田油井试井曲线研究,结合动静态资料,总结了各井试井压力响应特征,识别储层复杂渗流特征,评价了各井不同储层的特征,建立储层特征识别模板,从而为进一步合理开发碳酸盐岩油气藏提供了重要依据。

1 试井曲线特征及生产动态

渤海 L 油田储集空间类型复杂,裂缝发育程度差异大,再加上油、气、水关系复杂,导致油藏压力恢复曲线特征复杂,类型多样。通过对油田试井资料分析和归纳,渤海 L 油田古潜山碳酸盐岩油藏试井曲线特征主要分为五类,并找出了试井曲线特征、生产动态与储层特征的对应关系。

1.1 双重孔隙介质特征

N5 井试油阶段第一次压力恢复及其导数双对数拟合图见图 1,其表现出双重介质油藏典型流动特征,基质向裂缝窜流段明显,导数曲线下凹越深,反映弹性储容比越小,基质存储流体所占比例越大,说明基质向裂缝的供液能力越强^[7]。

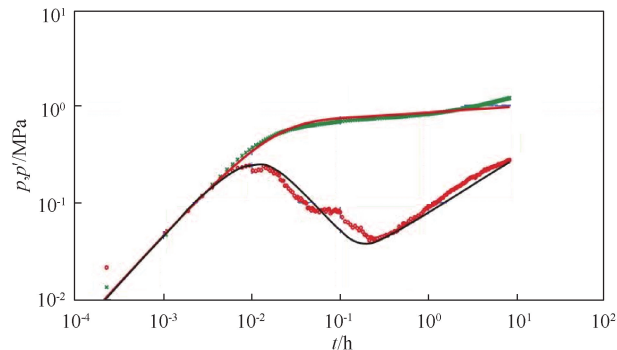


图 1 N5 井第一次压力恢复双对数曲线
Fig. 1 First pressure build-up double derivative logarithmic curve for well N5

该井试井解释弹性储容比为 5.0×10^{-4} ,反映了储层裂缝较为发育;窜流系数 5.63×10^{-6} ,反映了储层基质较致密,基质中的原油不容易流入裂缝系统。但储层有效渗透率较好为 245 mD,表明储层渗流能力好。

1.2 裂缝型特征

N5 井试油阶段第二次压力及其导数双对数拟合图见图 2a,其早期表现出双重介质油藏渗流典型特征,后期曲线快速上升,呈线性流特征,表明地层中裂缝相对发育,储层渗流能力好^[8]。该井初期产能高达 $380 \text{ m}^3/\text{d}$,但由于远端裂缝发育规模较小,很快出现供液不足现象,半年后油压和产量持续下降,经过多次酸化处理,也未能恢复正常生产,该井

累计产油 $13.85 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图 2b)。

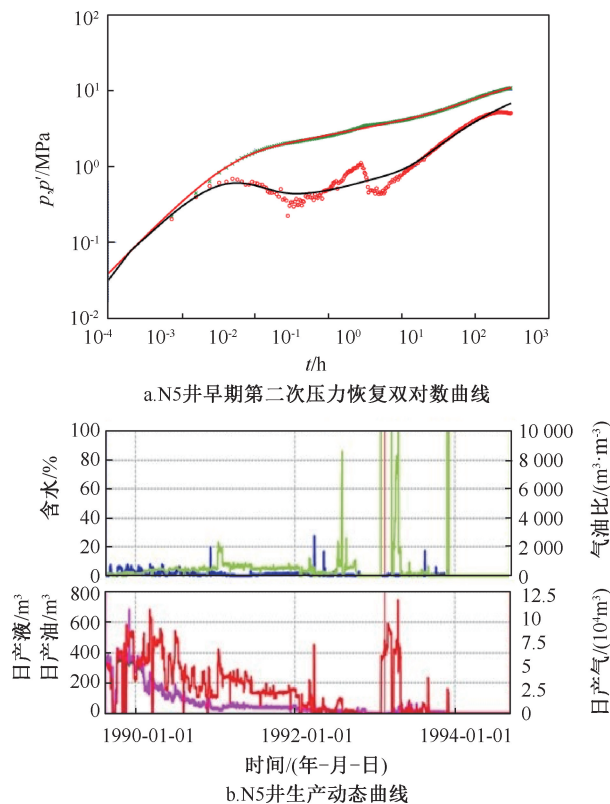


图 2 N5 井第二次压力恢复双对数曲线及生产动态曲线
Fig. 2 Second pressure build-up double derivative logarithmic curve and production curve for well N5

1.3 复合型储层

N3 井投产前试油阶段压力恢复双对数曲线见图 3a,导数曲线呈现较长的水平直线段,即径向流动段,该曲线特征表现为视均质特征响应,反应出近井油藏储层发育比较均匀,采用均质油藏模型试井分析,解释储层有效渗透率 9.52 mD。该井初期用 14 mm 油嘴自喷投产,初期产能高,地层压力、产量下降较快,随后油田关井,关井前日产油 62 m^3 ,地层压力下降 5.70 MPa,累计产油量 $32.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

关井 10 年后,油田于 2004 年重启,该井地层压力恢复至原始地层压力的 98%。重新开井后 2010 年压力恢复双对数曲线见图 3b,导数曲线出现两个“凹子”,表明该井压力传导过程中,出现 2 个不同的介质区域,压力导数后期呈上翘趋势,表明该井远端储层物性变差。根据曲线特征,选择两区的双重介质复合油藏模型进行压力及其导数双对数曲线的拟合分析^[9],解释结果:内区渗透率为 4.67 mD,内区储能比为 0.3,内区窜流系数为 3.7×10^{-5} ,内区半径为 380 m;外区渗透率为 0.93 mD,外区储能比为 0.1,外区窜流系数为 4.6×10^{-5} ,表皮系数为 0.45。

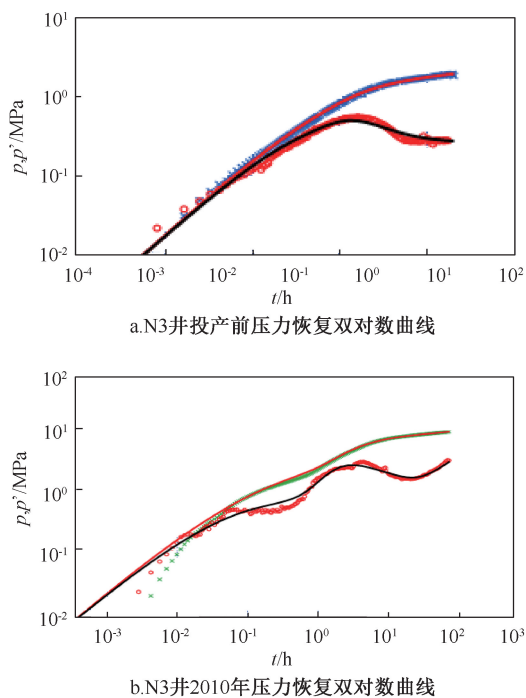


图3 N3井压力恢复双对数曲线

Fig. 3 Pressure build-up double derivative logarithmic curve for well N3

N3井两次试井曲线发生很大变化,可能是由于地层压力变化致使储层裂缝开启,流动边界不断向外扩展,连通了远端较差储层^[10]。压降-累计产液量曲线呈两段式见图4a,两段的斜率均较小且较为接近,说明内外两区储集体规模均较大^[11]。该井一直处于无水采油期,累产油达 $61.35 \times 10^4 \text{ m}^3$,具有储量规模较大、供液较足的特征(图4b)。

1.4 差储层

S2井压力及双对数曲线见图5,导数曲线没有出现径向流,导数曲线持续上翘,反映了储层渗流能力很差^[12]。

S2井处于古地貌相对较低的沟谷,分析认为不利于白云岩储层发育。从录井和测井解释结果分析,该井储层发育灰岩储层,灰岩岩性较致密,无有效晶间孔,基本不具备储油能力。试油资料表明,酸化后生产压差19.7 MPa,日产油 44.6 m^3 ,反映该井产能很低,储层物性差。该井自投入开发以来,由于产能低未能正常生产。

1.5 顶气、边底水的影响

N4井、8D井早期压力恢复曲线见图6,导数曲线均呈现下掉情况,曲线特征为下反“厂”字型。该类型特征说明该井周围存在定压边界,气顶或者边底水能量充足^[18]。N4井储层顶部发育气顶,避气

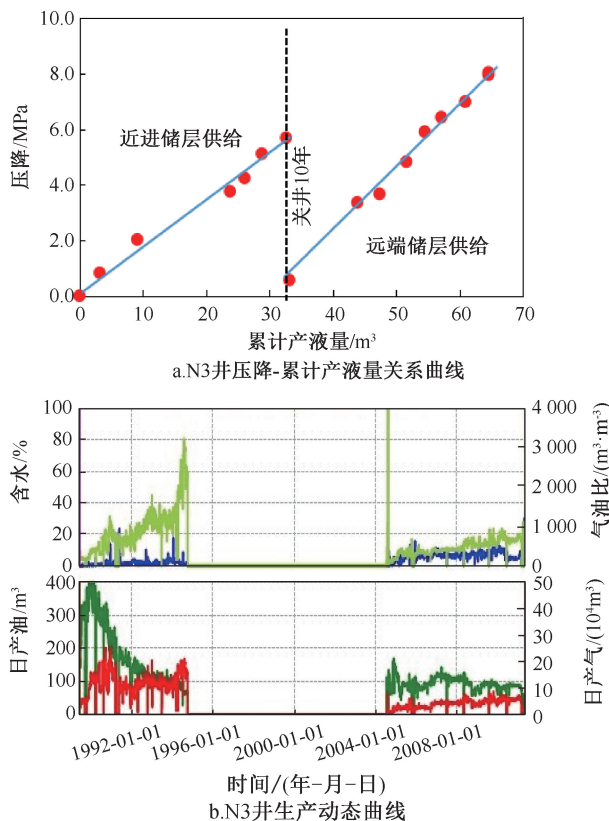


图4 N3井压降-累计产液量关系及生产动态曲线

Fig. 4 Production cure and pressure drop vs. cumulative production for well N3

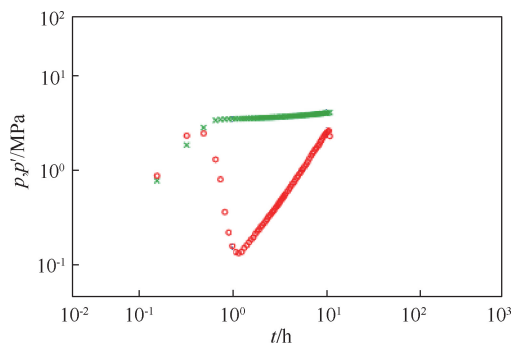


图5 S2井压力恢复双对数曲线

Fig. 5 Pressure build-up double derivative logarithmic curve for well S2

高度48 m,投产初期产油量达到 $400 \text{ m}^3/\text{d}$,但很快发生气窜,油井产量急剧下降,生产气油比明显上升,投产三年后被迫关井,累产油仅为 $1.61 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。8D井储层顶部发育气层,且储层边部存在边水。该井投产后初期日产油达 170 m^3 ,为了防止气窜、水锥,该井生产压差控制在 $0.1 \sim 0.9 \text{ MPa}$ 之间,日产油 60 m^3 ,长期保持平稳生产,后期含水台阶式上升,2014年因水淹严重而关井上返气层,累产原油 $23.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

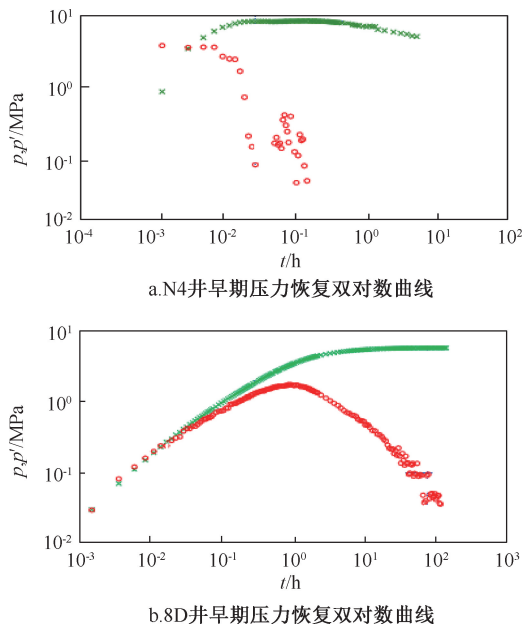


图6 渤海L油田受顶气、边底水影响的油井压力恢复双对数曲线

Fig. 6 Pressure build-up double derivative logarithmic curve for Bohai L oil field wells influenced by gas cap and edge-bottom water

通过以上压力恢复试井解释和生产动态分析,确定了油田不同储层、不同渗流区域的渗流特征,深化了油田复杂碳酸盐岩储层特征的认识,而且对区域的勘探开发及生产管理具有一定的指导意义。

2 试井曲线特征的应用

为了进一步扩大潜山储量规模,渤海L油田于2021年9月钻探了评价井A井,该井位于油田北部构造高部位,钻井期间发生漏失,并进行了裸眼测试,日产油 83 m^3 ,日产水 195 m^3 ,含水70%,测试过程中氯根含量由 $28\,000 \text{ mg/L}$ 降至 $6\,800 \text{ mg/L}$,低于钻完井液氯根范围($18\,000 \sim 100\,000 \text{ mg/L}$),综合判断该井产出水为泥浆滤液与地层水。综合测井、气测录井及地化录井等资料,显示测试段为纯油层,储层类型为孔隙-裂缝型,但存在测试段出水认识不清、油水界面不确定的问题。

产能测试中该井进行了三次压力恢复测试,压力数据见图7a所示。三次压力恢复试井双对数曲线见图7b,曲线初期均存在较长时间的变井储现象,可能由于关井后井筒内油水两相重力分异过程所致。

试井解释初步分析选用第三次压力恢复数据,采用变井储和径向复合模型试井解释,井储 C_i 为 $0.75 \text{ m}^3/\text{MPa}$, C_r 为 $25.0 \text{ m}^3/\text{MPa}$,等效渗透率为215

mD,表皮为67。但考虑到试井本身的多解性,需要充分借鉴油田碳酸盐岩油藏试井曲线特征。通过油田试井曲线特征认识和对测试井动静态资料、试井曲线分析,认为A井的第一次、第二次试井曲线特征与受顶气、边水的影响的油井的试井曲线特征相近,虽然该井未直接钻遇水层,但判断该井距离边水较近,所以试井曲线表现为下反“厂”字型,第三次压力恢复试井初步解释结果不可靠。考虑到A井区存在边底水水淹风险,在A井区储层顶部的优质储层充分考虑避水,成功部署了2口水平井和1口定向井,增加潜山储量动用,提高了油田开发效果。

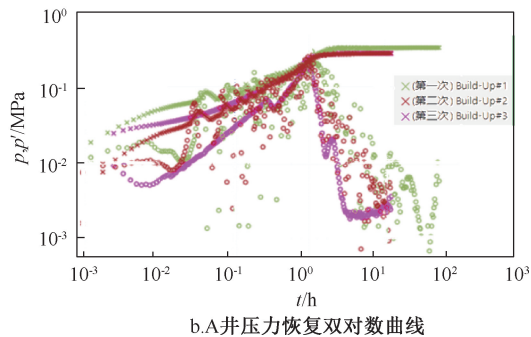
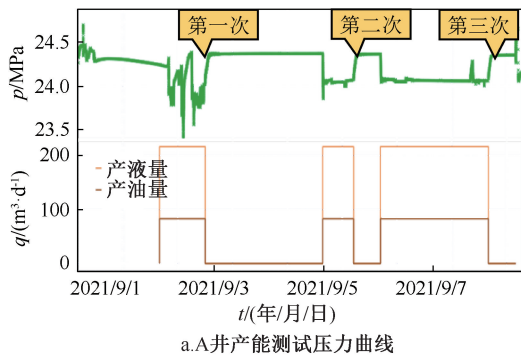


图7 渤海L油田评价井A井产能测试及压力分析
Fig. 7 Production test cure and pressure build-up double derivative logarithmic curve for well A

3 结论

(1)通过利用试井曲线分析,动静结合,实现了渤海L油田复杂碳酸盐岩油藏储层特征的深入认识,试井曲线特征主要分为五类,储层类型主要为孔隙-裂缝型和裂缝-孔隙型两种类型。同时建立了不同储层特征识别模板,达到了储层类型和特征的准确识别,对区域的勘探、开发部署及生产管理具有一定的指导意义。

(2)渤海L油田孔隙-裂缝型储层生产初期产能较高,但地层压力和产量递减快。对于顶部发育气层或周边存在边底水的储层,要注意顶气和边底

水侵入,防止气窜和暴性水淹。

(3)渤海L油田裂缝-孔隙型储层早期压力恢复曲线表现为均质油藏的特征,但随着油井地层压力变化和生产范围的不断扩大,压力恢复导数曲线特征发生变化,其不仅反映储层物性的变化,还能反映储层复杂渗流特征的变化。

致谢:感谢中海石油(中国)有限公司天津分公司李其正、刘英宪等在论文编写期间给予的指导和帮助。

参考文献

- [1] 李阳,康志江,薛兆杰,等.中国碳酸盐岩油气藏开发理论与实践[J].石油勘探与开发,2018,45(4):669-678.
LI Yang,KANG Zhijiang,XUE Zhaojie,et al.Theories and practices of carbonate reservoirs development in China[J].Petroleum Exploration and Development,2018,45(4):669-678.
- [2] 李苗,张涛,艾合买提江·阿布都热合曼.裂缝型碳酸盐岩油藏试井解释中特殊现象分析[J].断块油气田,2015,22(6):65-68.
LI Miao,ZHANG Tao,AHMATJIAN Abudurahman.Special phenomena in well test interpretation for fractured carbonate reservoirs[J].Fault-Block Oil & Gas Field,2015,22(6):65-68.
- [3] 杨敏,龙喜彬,潜欢欢,等.塔河缝洞型油藏试井曲线特征及储集体识别[J].油气井测试,2020,29(3):64-70.
YANG Min, LONG Xibin, QIAN Huanhuan, et al. Well test curve characteristics and reservoir identification of fractured carbonate reservoir in Tahe oilfield [J]. Well Testing, 2020, 29(3): 64-70.
- [4] 程飞.缝洞型碳酸盐岩油藏储层类型动静态识别方法——以塔里木盆地奥陶系为例[J].岩性油气藏,2017,29(3):76-82.
CHENG Fei. Integrated dynamic and static identification method of fractured-vuggy carbonate reservoirs: a case from the Ordovician in Tarim basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(3): 76-82.
- [5] 郑函庆,丁心鲁,刘学清,等.塔里木盆地碳酸盐岩缝洞型储层试井资料特征及KT1井储层缝洞组合关系认识[J].石油地质与工程,2021,35(4):26-29.
ZHENG Hanqing, DING Xinlu, LIU Xueqing, et al. Well test data characteristics of fracture-cave reservoir in carbonate rocks of Tarim Basin and understanding of fracture-cave association of KT1 well [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2021, 35(4): 26-29.
- [6] 达丽亚,张新涛,徐春强,等.渤海海域奥陶系碳酸盐岩岩溶储层特征及主控因素——以石白坨凸起427构造带为例[J].中国海上油气,2019,31(4):36-45.
DA Liya, ZHANG Xintao, XU Chunqiang, et al. Characteristics and controlling factors of Ordovician Karst reservoirs in Bohai sea: A case study of 427 tectonic belt in Shijiutuo uplift [J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(4): 36-45.
- [7] 杨磊,凌涛,胥猛生,等.英买2缝洞型碳酸盐岩油藏试井曲线特征分析[J].油气井测试,2012,21(6):15-17.
YANG Lei, LING Tao, XU Mengsheng, et al. Well test curve analysis of YM2 fracture-cave carbonate reservoir [J]. Well Testing, 2012, 21(6): 15-17.
- [8] 杨勇,谢日彬,闫正和,等.双重介质复合数值试井技术在裂缝性礁灰岩底水油藏中的应用[J].特种油气藏,2020,27(5):100-105.
YANG Yong, XIE Ribin, YAN Zhenghe, et al. Application of dual-media compound numerical well test technology in fractured reef limestone reservoirs with bottom water [J]. Special Oil and Gas Reservoirs. 2020, 27(5): 100-105.
- [9] 许峰,于伟强,李伦.基于双重介质复合气藏模型的潜山储层试井解释方法[J].油气井测试,2019,28(3):7-13.
XU Feng, YU Weiqiang, LI Lun. Well test interpretation method for buried hill reservoir based on dual medium composite gas reservoir model [J]. Well Testing, 2019, 28(3): 7-13.
- [10] 代飞旭,朱柏宇,邓伯龙,等.动静态资料在碳酸盐岩储集层类型识别中的应用——以塔里木盆地哈拉哈塘油田金跃区块奥陶系为例[J].新疆石油地质,2017,38(6):746-753.
DAI Feixu, ZHU Baiyu, DENG Bolong, et al. Application of static and dynamic data in identification of carbonate reservoir type: a case study from Ordovician Strata in Jinyue block of Halahatang oilfield, Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(6): 746-753.
- [11] 蔡明金,王守峰,尹国君,等.缝洞型碳酸盐岩储层储集类型判别方法[J].油气井测试,2018,27(4):7-14.
CAI Mingjin, WANG Shoufeng, YIN Guojun, et al. Reservoir type identification method for fractured-vuggy carbonate reservoirs [J]. Well Testing, 2018, 27(4): 7-14.
- [12] 刘应飞,刘建春,韩杰,等.溶洞型碳酸盐岩油藏试井曲线特征及储层评价[J].科学技术与工程,2014,14(6):121-126.
LIU Yingfei, LIU Jianchun, HAN Jie, et al. Well test curve characteristic and reservoir evaluation for vuggy carbonate reservoirs [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(6): 121-126.

编辑 穆立婷

第一作者简介:闫建丽,女,1981年3月出生,高级工程师,硕士,2013年毕业于中国石油勘探开发研究院油气田开发工程专业,长期从事油气藏开发工作。电话:022-66500842,18822381992;E-mail:yanjl2@cnooc.com.cn。通信地址:天津市滨海新区海川路2121号海洋石油大厦B座,邮政编码:300459。