

# 稠油油藏试油测试资料分析

姚磊

中国石油大庆油田有限责任公司试油试采分公司 黑龙江大庆 163412

通讯作者:Email:12669273@qq.com

项目支持:中国石油大庆油田有限责任公司科研项目“二类油层化学驱配套射孔技术现场试验”(dqp-2019-cs-xcsy-001)

引用:姚磊. 稠油油藏试油测试资料分析[J]. 油气井测试,2022,31(4):68-73.

Cite: YAO Lei. Analysis on oil testing data for heavy oil reservoirs[J]. Well Testing,2022,31(4):68-73.

**摘要** 为增强稠油流动性,提高稠油井采收率,有效开发稠油油藏储层,通过射孔测试联作工艺技术,对压力数据及温度数据进行分析比对,得出不同黏度下井底压力恢复情况和不同温度下井内稠油流动情况。经过对稠油油藏试井评价分析发现,稠油油藏独有的压力恢复曲线表现为台阶式恢复方式、试井双对数曲线表现为交叉现象,引起这种现象的主要原因与原油黏度有关。通过优化射孔工艺参数,采用高穿深射孔弹、多相位角,以及高孔密大孔径射孔枪,有效改善稠油井产能,增加探测半径,改善井筒附近稠油流动形态。只有将原油黏度降到可以流动状态,才能取得成功的测试资料。优化后的射孔工艺参数能够有效提高稠油流动性,为稠油油藏有效开发提供一定技术支持。

**关键词** 稠油油藏;试油;测试;试井评价;射孔工艺;探测半径;原油黏度

**中图分类号**:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.04.012

## Analysis on oil testing data for heavy oil reservoirs

YAO Lei

Oil Testing and Production Branch of PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjia 163412, China

**Abstract:** In order to effectively develop heavy oil reservoirs by enhancing the fluidity of heavy oil for a higher recovery, the pressure and temperature data were comparatively analyzed using the perforating + testing technology, and the recovery of bottomhole pressure under different oil viscosities and the flow of heavy oil at different temperatures were obtained. After analyzing the results of well testing in heavy oil reservoir, it is found that the unique pressure recovery curve of heavy oil reservoirs represents a stepped pattern, and the log-log well testing curve represents a cross phenomenon, which are presumably related to the viscosity of crude oil. By optimizing the perforating parameters, choosing deep-penetration perforating charges and multiple phase angles, and adopting perforating guns with dense and large perforations, the productivity of heavy oil wells can be effectively improved, the detection radius can be increased, and the flow pattern of heavy oil near the wellbore can be improved. Successful testing data can only be obtained by reducing the viscosity of crude oil to a flowable state. The optimized perforating parameters can effectively improve the fluidity of heavy oil, which will provide certain technical support for the effective development of heavy oil reservoirs.

**Keywords:** heavy oil reservoir; oil testing; testing; well testing evaluation; perforating process; detection radius; crude oil viscosity

稠油也称为冷原油,稠油油藏试油工作方法是射孔后求取地层原始产能<sup>[1]</sup>,由于稠油黏度高,流动性差,含砂量高,抽汲求产过程中容易导致求产管柱堵塞<sup>[2-4]</sup>,射孔测试求产联作失败,所以只能采取射孔后,在短时间内快速抽汲求产<sup>[5]</sup>。由于稠油本身的性质,短时间内的求产只能获得一个产能参数<sup>[6]</sup>,在各大油田中稠油油藏试油工艺及资料分析一直在摸索、改进,取得效果均不理想<sup>[7-9]</sup>。目前求产中为使稠油黏度降低、产生流动的工序只有射孔工艺,射孔能降低表皮系数,解除

井眼附近污染,形成流动通道<sup>[10]</sup>。成功的射孔测试联作工艺获得的稠油测试压力、温度、产量等资料<sup>[11]</sup>,经分析后对稠油油藏压力传导,温度扩散方式等地层信息有一定认识,应用试井解释后可以计算出流动半径、内环渗透率等参数,找出对储层更有效的开发方式<sup>[12-15]</sup>。

## 1 测试联作工艺的应用

受稠油黏度高、流动性差、含砂量高等原因,稠油井射孔测试联作工艺应用的成功率不高,不能完

整的求取地层资料,本文统计测试联作工艺成功的测试资料3井次,失败的1井次。测试成功的井压力恢复存在一个突变点,关井所测温度呈阶梯状降低。地层温度低于 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。不成功测试井的黏度大于 $500\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,流体缺乏流动。

### 1.1 压力资料分析

由图1得到油黏度大于 $100\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 左右的井,射孔方式采用YD-102枪装DP44RDX-5型弹,相位角 $60^{\circ}$ ,孔密16孔/m,共1炮48弹,一关井与二关井压力曲线压差变化大,开井抽汲最多2 d时间,井底压力降低2 MPa左右,二关井压力恢复曲线形态有变化,压力开始恢复较慢,出现一个拐点后压力逐步恢复,关井5 d也恢复不到稳定值,压力传导慢,压差2 MPa上下。

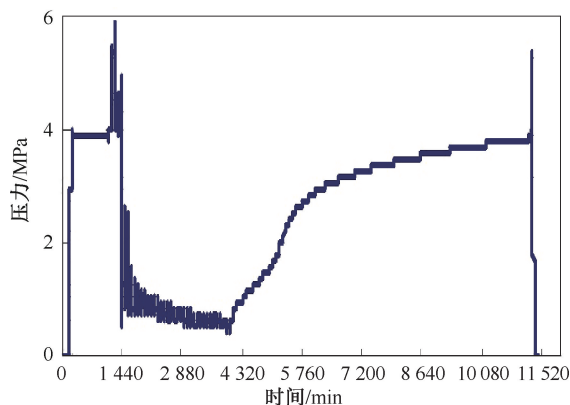


图1 稠油井测试联作压力资料(1)

Fig. 1 Pressure data of heavy oil well in perforating-testing operation (1)

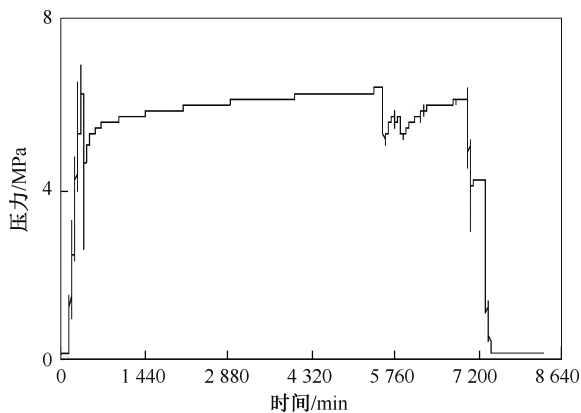


图2 稠油井测试联作压力资料(2)

Fig. 2 Pressure data of heavy oil well in perforating-testing operation (2)

由图2得到油黏度大于 $200\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 的稠油井,射孔方式采用YD-102枪装DP44RDX-5型弹,相位角 $60^{\circ}$ ,孔密16孔/m,共2炮58弹,一关井压力曲线恢复台阶多,关井4 d未恢复到稳定值。由于黏度太高抽汲抽不动,不能进行二开井求产工艺。

由图1~图2分析得到,不同的构造区块稠油油藏原油运动黏度差异大,原油黏度低测试联作工艺成功率就高。黏度太大会导致测试失败,原油黏度速度降的快能取得完整测试资料,根据这个原理需做出以下改进:(1)改进射孔弹弹型。射孔后熵能极大的转变为高热能,使井筒附近原油运动黏度很快降到可流动值。(2)优化管柱结构。因稠油中含有较多杂质(砂)、冬季施工井口压力低等因素,抽汲管柱可以采用防砂管、加热油管等组合。(3)改进测试工具。使工具能够针对这种特殊油藏试油的成功率,缩短试油周期,减少返工率。

### 1.2 温度资料分析

图3采用一开一关制度,关井温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,求产温度 $26.22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图4采用二开二关制度,关井温度 $23.6\text{ }^{\circ}\text{C}/23.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,求产温度 $24.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,对测试联作工艺取得的温度资料进行统计,发现地层流动温度大于射孔后关井温度,关井后没有流体由储层流动到井筒。

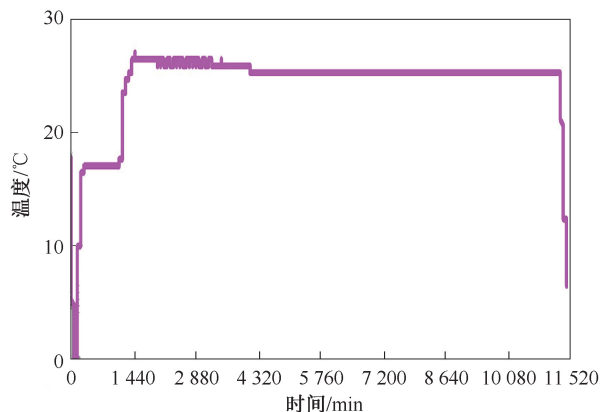


图3 稠油测试温度资料(1)

Fig. 3 Heavy oil test temperature data (1)

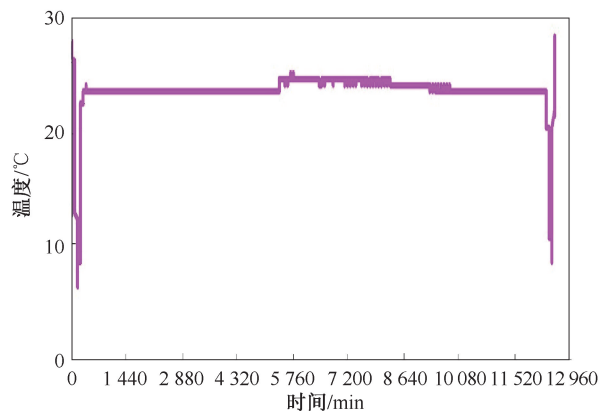


图4 稠油测试温度资料(2)

Fig. 4 Heavy oil test temperature data (2)

稠油测试温度曲线分析结果显示,如果使稠油黏度降到 $100\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 以内,提供热能温度得达到 $60\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。如果试油目的只是根据油样做黏温分

析,利用射孔就可以达到目的。如果目的是一定探测半径内的流动参数,必须降低原油黏度。

图5为射孔后关井温度曲线,温度呈跳跃性变化,总体变化不大。统计单井的温度变化:射孔后温度 $23.6^{\circ}\text{C}$ ,一开井 $10\text{ min}$ 温度上升到 $23.9^{\circ}\text{C}$ ,说明有流体流动;一关井 $4\text{ d}$ ,关井温度稳定在 $23.6^{\circ}\text{C}$ 。图6为求产 $2\text{ d}$ 后关井温度曲线放大效果,流体停止流动后温度呈阶梯状下降。

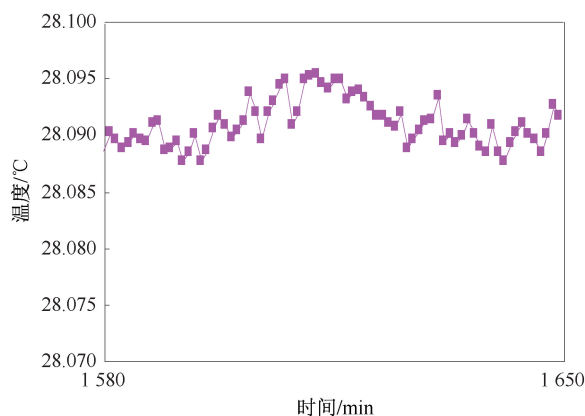


图5 一关井温度曲线

Fig. 5 Temperature for the first shut-in

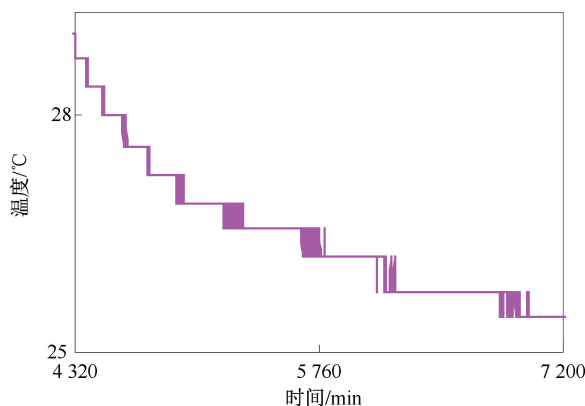


图6 二关井温度曲线

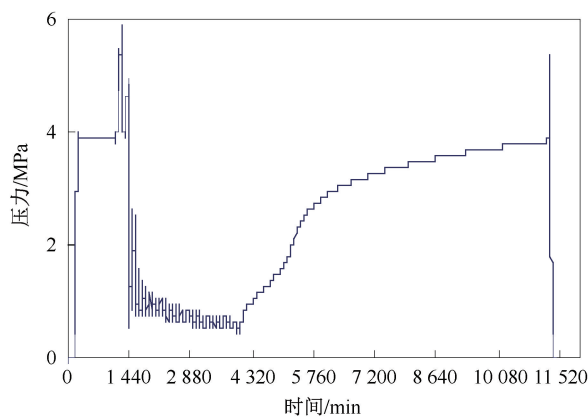
Fig. 6 Temperature for the second shut-in

## 2 稠油油藏地质资料评价

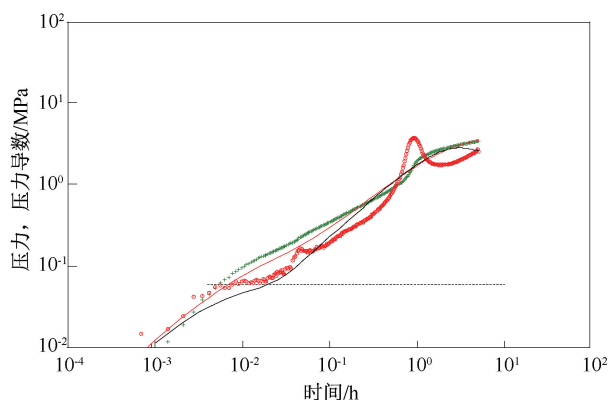
稠油油藏地质资料评价主要包括试井曲线形态分析和射孔受效区油藏参数计算两部分。

### 2.1 试井曲线形态分析

稠油井试油测试关井的资料少,现统计江桥鼻状构造上部分井的关井压力资料(见图7、图8)。该部分井位于松辽盆地西部斜坡区泰康隆起带江桥鼻状构造,江桥三维区所在位置构造上总体为一个向西超覆的平缓斜坡,东南发育江桥、阿拉新、二站3个北东向鼻状构造,断裂相对比较发育,大断裂控制构造发育,其余一般为小断裂。



a. 压力历史曲线



b. 压力及其导数双对数曲线

图7 一开一关井压力资料

Fig. 7 Shut-in pressure for the first opening and first shut-in

综合包含一开一关和二开二关工作制度。对关井压力曲线做双对数分析,产生不同曲线形态。射孔后产生的温度不足以使稠油达到流动状态,但能抽出流体,说明射孔产生了裂缝。裂缝长、宽与流体黏度、孔隙度等储层物性参数有关。

稠油双对数曲线相交的敏感因素与加热半径、注入温度有关,试油过程中的注入温度由射孔后产生的热能大小决定。图9是加热半径为敏感参数的稠油双对数理论图版。随着加热半径 $R$ 的增加,曲线交叉前凹形变大,交叉时间推迟。

因为射孔对油藏的温度影响不大,但产生的裂缝是有变化的。射孔参数对地层破裂压力影响的数值模拟研究表明,射孔密度和射孔方位是影响地层破裂压力的主要因素;射孔长度对地层破裂压力影响很小;射孔直径几乎对破裂压力没有影响;随着孔密增加,地层破裂压力减小;方位角小于 $45^{\circ}$ 时,地层破裂压力随射孔方位角的增大而增大。如果增加射孔弹的穿深、射孔弹的排列方式,就会增加裂缝的长度。

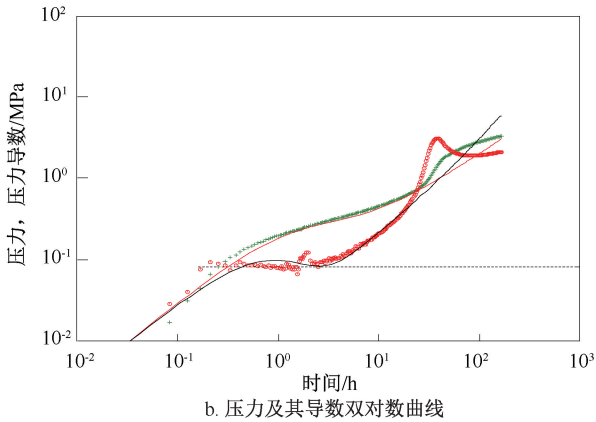
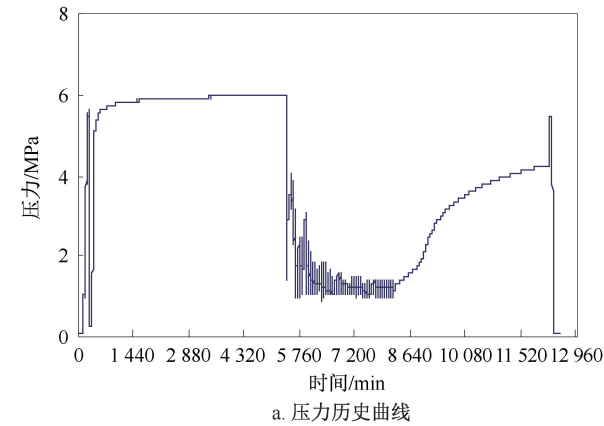


图 8 二开二关井压力资料  
Fig. 8 Shut-in pressure for the second opening and second shut-in

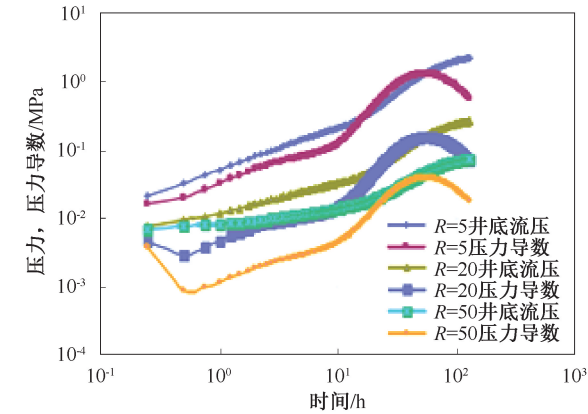


Fig. 9 Theoretical log-log type curve of pressure for heavy oil reservoir

2.2 射孔受效区油藏参数计算

射孔后稠油压力恢复解释采用裂缝模型解释,通过试井解释认识到表皮负值很大,相当于砂岩油藏压裂的表皮,不同的双对数曲线形态反应的内容不同,产生相交的双对数曲线能解释出裂缝半长值,表皮,探测半径等,解释的渗透率值为裂缝内流体的动态参数值。没有相交的双对数曲线只能解

释出关井时间内所测到的裂缝信息及探测半径。流体在裂缝内流动并非线性流,而是一种复杂的流动形态,需进一步研究。如果关井时间短,对黏度低的稠油测不到径向流段,只能解释出所测到的探测范围内裂缝参数。

3 射孔参数的优化

射孔使井筒与储层间建立起良好的流动通道,合理选择射孔参数孔密、相位角、孔径等,完善射孔表皮系数,能改善井的产能,提高油井射孔完井产率比。即能够提高相同生产压差下,射孔完井产量与理想裸眼井产量的比值。由图 10、图 11 实验数据表明,射孔穿深越大,表皮系数越小,产率比越高;射孔孔密越大,表皮系数越小,产率比越高;图 12、图 13 实验数据表明,射孔孔径越大,表皮系数越小,产率比越高;选择合理射孔相位角得到较小的皮系数,高的产率比,90°、60°、45°相位角产率比高,0°、180°相位角产率比低。

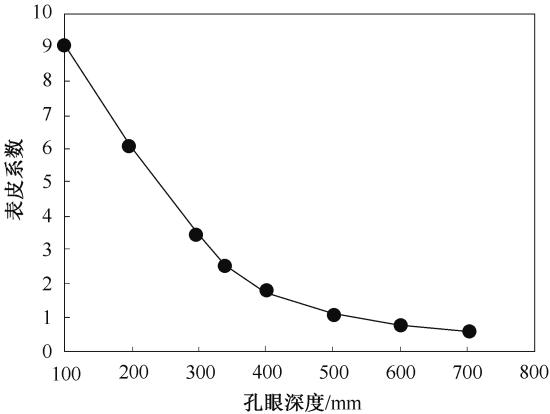


Fig. 10 Relationship between perforation depth and skin factor

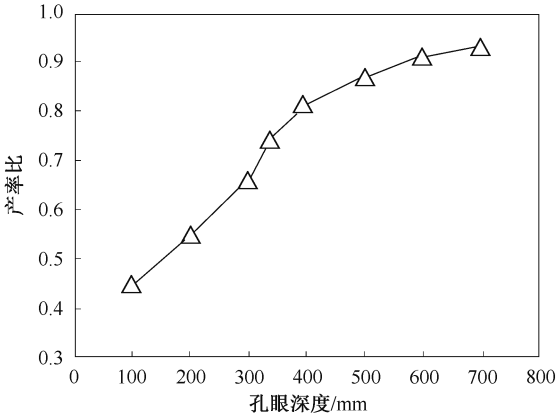


Fig. 11 Relationship between perforation depth and production ratio

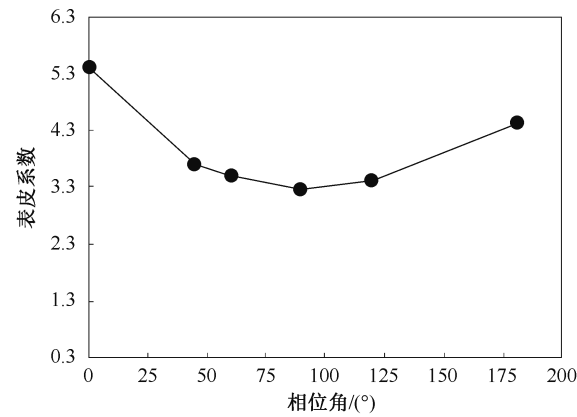


图 12 射孔孔眼直径与表皮系数关系图  
Fig. 12 Relationship between perforation diameter and skin factor

射孔参数对稠油井产能的影响不可忽略。高穿深是影响稠油井产能的关键因素，高孔密和大孔径等射孔参数组合能提高稠油井产能，同时也能增加探测半径及井筒附近稠油的流动形态。

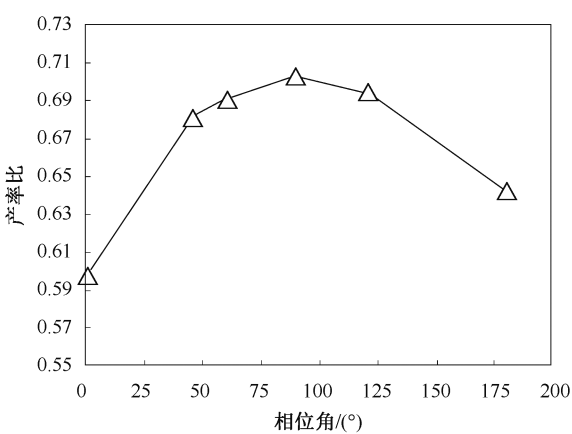


图 13 射孔孔眼直径与产率比关系图  
Fig. 13 Relationship between perforation diameter and production ratio

4 射孔参数对试油产能的影响

统计某稠油区块试油井，主要射孔参数及试油产能如表 1。

表 1 射孔方式及试油产量对比统计表  
Table 1 Perforating modes and oil testing production

井号	试油日期 /(年月)	打开方法	顶界 深度/ m	厚度/ m	日产量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	每米日 产量/ [( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )]	平均每米 日产量/ [( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ) $\text{m}^{-1}$ ]
J37	1985 年 11 月	清水半压井，液面 360 m，67-1 型弹射 90 孔	593.00	9.00	0.500	0.056	1.239
J62	1986 年 3 月	清水半压井，液面 492 m，67-1 型弹射 64 孔	604.00	6.40	0.099	0.015	
L65	1987 年 4 月	清水半压井，48-200 型弹射 24 孔	662.40	2.00	0.230	0.115	
J72	2006 年 5 月		630.60	1.80	0.072	0.040	
J83	2011 年 12 月	102 枪装 DP41RDX-1 弹，16 孔/m，相位角 60°	549.00	3.20	0.960	0.300	4.045
J67	2012 年 1 月	(平均孔径 11.2 mm，平均穿深 622 mm)	661.00	3.00	22.320	7.440	
J80	2012 年 5 月		622.00	4.80	8.700	1.813	
J92	2016 年 6 月		659.20	2.80	0.240	0.086	
J99	2018 年 6 月	102 枪装 DP44RDX-5 弹，16 孔/m，相位角 60°	594.40	5.00	10.416	2.083	1.333
J12	2019 年 1 月	(平均孔径 12.2 mm，平均穿深 956 mm)	601.80	3.60	28.230	7.842	
JX94	2021 年 3 月		729.00	5.80	52.767	9.098	
J17	2022 年 1 月		624.80	5.00	16.872	3.374	
J86	2022 年 2 月	102 枪装 SDP45HMX-1 弹，16 孔/m，60°相位角	743.60	3.60	2.888	0.802	1.333
J127	2022 年 3 月	(平均孔径 11.8 mm，平均穿深 685 mm)	758.00	5.00	9.689	1.938	
J131	2022 年 4 月		670.40	4.80	0.572	0.119	

由表 1 实际试油数据表明：射孔穿深越大、射孔孔径越大，试油产率越高，验证了实验数据。

5 结论

(1)通过射孔测试联作工艺技术，对压力数据及温度数据进行分析比对，得出不同黏度下井底压力恢复情况和不同温度下井内稠油的流动情况。

(2)通过对稠油油藏试井评价分析，发现稠油油藏独有的压力恢复曲线形态和试井解释曲线：压

力恢复曲线表现为台阶式恢复方式、试井双对数曲线表现为交叉现象，引起这种现象的主要原因与原油黏度有关，只有原油黏度降到可以流动状态，才能取得成功的测试资料。

(3)通过优化射孔工艺参数，采用高穿深射孔弹以及大孔径的射孔枪，可有效提高稠油井产能。

(4)其它射孔工艺参数，如多相位角(90°、60°和 45°)、高孔密等射孔工艺，对稠油井的效果还需要进一步现场验证。

致谢：感谢试油试采分公司同意本文公开发表；感谢施工队



伍在本文现场试验数据统计分析中给予的大力支持;感谢试油试采分公司技术发展部给予的相关指导。

## 参考文献

- [1] 第五鹏翔. 稠油油藏多元热流体试井解释技术研究[D]. 北京:地质大学(北京),2015.  
DIWU Pengxiang. Research on complex thermal fluid stimulation well test technology for heavy oil [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- [2] 王星,魏裕森,张自印,等. 半潜式平台稠油油藏测试关键技术[J]. 沉积学报,2021,30(2):19-24.  
WANG Xing,WEI Yusen,ZHANG Ziyin,et al. Key technologies of heavy oil reservoir testing for semi-submersible platform [J]. Well Testing,2021,30(2):19-24.
- [3] 李卓林. 渤海块状底水稠油油藏蒸汽吞吐参数设计[J]. 油气井测试,2020,29(3):11-18.  
LI Zhuolin. Design of steam huff and puff parameters for Bohai Sea heavy oil reservoirs with massive bottom water[J]. Well Testing,2020,29(3):11-18.
- [4] 周宝锁,谭忠健,卢中原,等. 渤海油田稠油精准测试技术[J]. 油气井测试,2019,28(4):14-19.  
ZHOU Baosuo,TAN Zhongjian,LU Zhongyuan,et al. Precision testing technology of heavy oil in Bohai Oilfield [J]. Well Testing,2019,28(4):14-19.
- [5] 李军贤. 地层出砂井测试工艺优化[J]. 油气井测试,2018,27(2):47-52.  
LI Junxian. Optimization of testing techniques for wells with formation sand production [J]. Well Testing,2018,27(2):47-52.
- [6] 田向东,康露,杨志,等. 海上油气井快速诱喷测试技术[J]. 油气井测试,2018,27(2):41-46.  
TIAN Xiangdong,KANG Lu,YANG Zhi,et al. Fast testing of induced flows in offshore oil/gas wells [J]. Well Testing,2018,27(2):41-46.
- [7] 孙云鹏,罗淮东,曲兆峰,等. 乍得潜山油藏裸眼试油技术[J]. 油气井测试,2019,28(2):27-32.  
SUN Yunpeng,LUO Huaidong,QU Zhaofeng,et al. Oil testing technology for open hole in buried hill reservoir, Chad [J]. Well Testing,2019,28(2):27-32.
- [8] 王雪飞,谭忠健,张金煌,等. 稠油测试中油气分离与产量计量方法[J]. 油气井测试,2019,28(2):33-39.  
WANG Xuefei,TAN Zhongjian,ZHANG Jinhuan,et al. Method for oil and gas separation and production measurement in heavy oil testing [J]. Well Testing,2019,28(2):33-39.
- [9] 高科超,高飞,杨子,等. 渤海油田普通稠油冷采测试工艺[J]. 油气井测试,2019,28(1):38-45.  
GAO Kechao,GAO Fei,YANG Zi,et al. Cold production

testing technology for heavy oil well in Bohai Oilfield [J]. Well Testing,2019,28(1):38-45.

- [10] 文宏武,王靖淇,刘萍,等. 双空心抽油杆螺杆泵热采试油技术[J]. 油气井测试,2018,27(5):24-30.  
WEN Hongwu,WANG Jingqi,LIU Ping,et al. Screw pump thermal recovery test technology driven by double hollow sucker rod [J]. Well Testing,2018,27(5):24-30.
- [11] 张广清,殷有泉,陈勉,等. 射孔对地层破裂压力的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(1):40-44.  
ZHANG Guangqing,YIN Youquan,CHEN Mian,et al. Study on influence of perforation on formation fracturing pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2003,22(1):40-44.
- [12] 岳宝林,刘斌,石洪福,等. 海上边际油田延长测试技术[J]. 油气井测试,2021,30(2):74-78.  
YUE Baolin,LIU Bin,SHI Hongfu,et al. Extended testing technology for offshore marginal oilfield [J]. Well Testing,2021,30(2):74-78.
- [13] 褚春波,郭权,黄小云等. 有限元分析径向水力压裂裂缝扩展影响因素[J]. 油气井测试,2018,27(2):58-66.  
CHU Chunbo,GUO Quan,HUANG Xiaoyun,et al. Finite-element analysis on influencing factors for propagation of fractures induced in radial jet hydraulic fracturing [J]. Well Testing,2018,27(2):58-66.
- [14] 周小林,高志华,张冲. 龙凤山气田大通径免钻桥塞分段压裂先导试验[J]. 油气井测试,2018,27(1):62-67.  
ZHOU Xiaolin,GAO Zhihua,ZHANG Chong. Pilot tests of staged fracturing involving large-diameter drill-free bridge plugs in the Longfengshan gas field [J]. Well Testing,2018,27(1):62-67.
- [15] 魏聪,陈宝新,刘敏,等. 基于反褶积技术的S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 穆立婷

**第一作者简介:**姚磊,男,1985年出生,工程师,2007年毕业于哈尔滨理工大学测控技术与仪器专业,现主要从事试油(气)勘探研究和管理工 作。电话:0459-5369828,13945939606;Email:12669273@qq.com。通信地址:黑龙江省大庆市乘南十八街18号试油试采分公司,邮政编码:163412。