

# 基于阶梯式流量测试评价方法的注水井破裂压力预测

万禧煌,汪本武,张绍广,任大明,郑中亮

中海石油(中国)有限公司天津分公司 天津 300452

通讯作者:Email:1610881082@qq.com

引用:万禧煌,汪本武,张绍广,等. 基于阶梯式流量测试评价方法的注水井破裂压力预测[J]. 油气井测试,2020,29(6):68-72.

Cite: WAN Xihuang, WANG Benwu, ZHANG Shaoguang, et al. Fracture pressure prediction of water injection well based on stepped flow rate test evaluation method [J]. Well Testing, 2020, 29(6): 68-72.

**摘要** 为保障注水井合理安全注水,单井注水管理过程中需要对实际破裂压力进行预测,以确定注水井口限压。根据海上油田单井注水储层特征及控制条件,建立一种阶梯式流量测试评价方法,并确定其选井原则及施工注意事项。通过在井口注水过程中的记录,获取连续稳定的多级流量和压力数据,分析注入速率与井底压力两者曲线的变化关系,推算出不同目标井的地层破裂压力值。现场应用表明,该测试方法所预测的破裂压力与目标井理论剪切破裂压力值较为吻合,能简便快速实现单井实际注水破裂压力的推算,并针对性地设计小于破裂压力的合理注水压力。阶梯式流量测试评价方法对现场调整单井提压注水具有良好的指导作用。

**关键词** 注水井;选井原则;阶梯式流量测试法(SRT);破裂压力;井底压力;评价方法

**中图分类号**:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.06.012

## Fracture pressure prediction of water injection well based on stepped flow rate test evaluation method

WAN Xihuang, WANG Benwu, ZHANG Shaoguang, REN Daming, ZHENG Zhongliang

Tianjin Branch, CNOOC (China) Co., Tianjin 300452, China

**Abstract:** To ensure the reasonable and safe injection of water injection wells, it is necessary to predict the actual fracture pressure in the process of single well water injection management, so as to determine the wellhead pressure limit of injectors. According to the reservoir characteristics and control conditions of single well injection in offshore oilfield, a stepped flow rate test evaluation method is established, and the well selection principle and construction precautions are determined. The continuous and stable multi-stage flow rate and pressure data are obtained by recording the process of water injection at the wellhead. The relationship between the curves of injection rate and bottom hole pressure is analyzed, and the formation fracture pressure values of different target wells are calculated. The field application shows that the fracture pressure predicted by the test method is in good agreement with the theoretical shear fracture pressure of the target well, which can easily and quickly calculate the actual injection fracture pressure of a single well, and design a reasonable water injection pressure less than the fracture pressure. The stepped flow test and evaluation method has a good guiding role in adjusting pressure and water injection of the single well.

**Keywords:** water injection well; well selection principle; step flow rate test method (SRT); fracture pressure; bottom hole pressure; evaluation method

注水开发是大多数砂岩油田保证长期稳产和高产所应用的较为广泛和行之有效的一种开发方式<sup>[1-3]</sup>。注水的目的是发挥注水驱油和补充地层能量,促使油井产出更多的原油,油藏注水开发时井口注水压力的降低直接与单井注入能力密切相关<sup>[4]</sup>。耿艳宏<sup>[5]</sup>针对海上部分油田注水后存在吸水能力下降、地层压力保持水平低等问题,评价了注水开发效果,研究了海上油田的合理油水井数

比、合理的存水率及井组内注水的有效利用等问题。王硕亮等<sup>[6]</sup>将 Kalman 滤波技术引入到注水效果判断中,推导出了油水井关联系数的具体函数形式,计算出油水井关联系数随时间的变化曲线。孙文涛等<sup>[7]</sup>分别对注水砂岩油藏的水驱难易程度、水驱均匀程度,以及水驱开发采收率给出了具体的评价指标。在注水开发过程中,通过注水保持地层压力是油田开发的基本措施,也是保持油田长期稳产

的重要手段。若井下注水压力超过地层破裂压力,则会造成地层出现裂缝,影响注水作业安全。张凤辉等<sup>[8]</sup>在总结分析分层注水压力影响因素的基础上,确定了井口安全注水压力计算方法。薛世峰<sup>[9]</sup>建立“套管-水泥环-地层”的三维分层有限元数值模型,分析了螺旋射孔各参数对地层破裂压力的影响。因此,注水开发的一个关键问题就是对地层破裂压力合理性进行预测。地层破裂压力与岩石的矿物组成、结构特征、天然裂缝发育状况,以及地应力等有关,对破裂压力的理论预测国内外学者已经进行了广泛的研究,到现在已经有很多的破裂压力预测模型。地层破裂压力与岩石的矿物组成、结构特征、天然裂缝发育状况以及地应力等有关<sup>[9-10]</sup>,对破裂压力的理论预测国内外学者已经进行了广泛的研究,到现在已经有很多的破裂压力预测模型,如 Hubbert-Willis 模型、Eaton 模型、李传亮修正模型<sup>[11-13]</sup>及 Haimson-Faishurst 模型、Stephen 模型、黄荣樽模型<sup>[14-16]</sup>等系列经典模型,其分别在弹性力学基础上进行了深入分析与修正,在石油工程中发挥着十分重要的指导作用和意义。然而,这些破裂压力的计算模型大多是针对钻井或压裂过程中的计算模型,针对实际生产过程中注水井井口究竟应该限压多少才合理却探讨很少。因此,能简便的实现注水井井口限压的预测分析,对有效提高单井注水量来满足油田配注要求,实现油田高效注水开发,提高驱油效率,对实现油田的高产稳产有着十分重要的意义。

## 1 阶梯流量测试(SRT)技术方法

油藏注水开发时的驱油效率及井口注水压力的高低直接与单井注入能力密切相关<sup>[17]</sup>。因此,在注水过程中,一个核心问题就是如何在保障井筒完整性条件下,对地层破裂压力进行合理的预测,从而确定最大井口限压提高注水能力。SRT(Step Rate Testing)阶梯状流体测试是一种向井底目标层位阶梯式注水,注入速率呈阶梯式逐级递增,每一级维持固定时间,获取记录连续几级的压力和流量数据<sup>[18]</sup>,推断地层破裂压力情况。

### 1.1 技术特点

在注水井进行注水过程中,由于 SRT 测试注入速率阶梯式逐级递增,会导致井底压力随注入速率也呈阶梯式递增,在达到地层破裂压力后持续阶梯式注入,得到注入速率与井底压力曲线从而推断出破

裂压力的矿场试验,可测得压裂裂缝的产生以及原生裂缝的扩大。该测试方法具有明显的优势特点,主要体现在:一方面注入井无需关井测试,可灵活开展;另一方面获取的数据结果无需利用试井软件即可分析两者关系表征曲线,具有简便快捷的优势,便于现场操作。

### 1.2 压力控制方程

SRT 主要是利用现场对注水井进行地面注测试来获取的井口注入压力数据和注入量,而地层破裂压力与井底压力大小有直接关系,井底压力与井口压力的关系模型为

$$p_{\text{流压}} = p_{\text{井口}} + p_{\text{静水}} - p_{\text{管损}} - p_{\text{水嘴}}$$

其中

$$p_{\text{管损}} = \lambda \frac{\rho LV^2}{2000D}$$

$$p_{\text{水嘴}} = \frac{Q^2}{20(\beta Ag)^2}$$

$$p_{\text{静水}} = \rho gH$$

式中: $p_{\text{流压}}$ 为井底流压,MPa; $p_{\text{井口}}$ 为井口注入压力,MPa; $p_{\text{静水}}$ 为静液柱压力,MPa; $p_{\text{管损}}$ 为油管摩擦阻损失,MPa; $p_{\text{水嘴}}$ 为水嘴压力损失,MPa; $\lambda$ 为水力摩擦系数(是流速的函数); $\rho$ 为水密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;L为油管长度,m; $D$ 为油管内径,m; $V$ 为流速, $\text{m}/\text{s}$ ;Q为流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ; $\beta$ 为流量系数(实际流量与理想流量之比,取值为0.3445);A为水嘴等效面积, $\text{m}^2$ ;g为重力加速度(值为9.8), $\text{m}/\text{s}^2$ ;H为储层中部深度,m。

### 1.3 选井原则

大量油田注水实践表明,当井底注入压力长期超过储层破裂压力时,将引发如降低油藏波及系数、注入水窜入泥页岩层导致套管损坏、注水突破断层、套管管外窜流等诸多问题<sup>[19-20]</sup>。因此,在选井过程中,需综合考虑目标油藏的断层分布、连通性、储层能量及实际注入情况,同时,应注意井筒完整性的相关情况。为了能保障 SRT 施工的效果及安全性,一般在选择上需遵守三个原则:(1)所选择的目标井需注采关系明确、储层连通性好,且距离断层 100 m 以上;(2)所选择的目标井的井筒完整性较好,层间无串槽,固井质量优等条件;(3)所选择的目标井在地面采油树及其附件配套上须能满足最大施工压力等安全级别。

## 2 施工步骤及注意事项

SRT 施工主要利用地面注水通过连接管线至井口采油树,然后逐级提高注入量,每一级维持相同

时间,记录连续几级的压力和流量数据。通过把所获取的每一级流量终点注入压力与相应注入量在直角坐标图上进行绘制,分析两者呈现的关系。通常可依次选择7个注入速率点,在破裂前需要至少3个速率点,破裂后至少有3个速率。每一个速率下需要保持匀速恒定流动,并使得井底压力需最终稳定或者接近稳定才能进行下一个阶梯速率的测试。在进行SRT施工计划及实施过程中,需做好以下工作:

(1)在进行SRT测试前需要对原地应力有一定的了解,这样在进行SRT设计的时候能保证在达到破裂压力前或者原生裂缝开启前有足够的数据点;

(2)测试前应检查并校准所有压力表和流量计,并能承受设计预期最大的压力和流量;

(3)所有测试统一时间步长,有利于后期分析和计算;

(4)施工注入过程中每一步步长要持续观察稳定一段时间,以确保施工半径足够大。

### 3 现场应用

为了进一步研究STR测试方法预测注水井破裂压力的可行性,组织开展了相关现场矿场试验。下面以渤海某油田两口井为例。

A井为一口转注井,完井方式为套管射孔,177.8 cm 优质筛管防砂,井下为分层注水方式,下入智能测调分注管柱,主要吸水层位为东营组下段Iu+Id+II组,目前该井注水压力已无法满足配注要求,本次SRT测试为全层位笼统测试,为后续提压注水提供基础;

B井为一口定向开发注水井,完井方式为套管射孔,177.8 cm 优质筛管防砂,投注后为笼统注水方式,下入空心集成管柱,单注NmIV层位。该井随着投注时间延长,注水压力持续上涨,多次解堵后效果不佳,目前注入压力已达ODP上限,本次计划通过SRT测试,为后续提压注水奠定基础。A/B两口井基础数据见表1。

表1 A、B井基础数据表

Table 1 Basic data of Well A and B

井号	斜深/ m	垂深/ m	井斜/ (°)	温度/°C		油管外径/ mm
				地层	井口	
A	1 471	1 427.7	13.36	63	20	76
B	2 229	1 710.0	34.62	71	23	76

现场根据SRT施工步骤开展了目标测试,对应的压力与排量数据见表2、表3。

表2 A井SRT测试数据表

Table 2 SRT data of Well A

工况	排量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	井口压力/ MPa	工况	排量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	井口压力/ MPa
1	864	18.0	6	1 310	28.5
2	965	20.7	7	1 353	29.1
3	1 051	22.6	8	1 396	29.3
4	1 137	25.1	9	1 469	28.8
5	1 224	27.1	10	1 555	28.7

表3 B井SRT测试数据表

Table 3 SRT date of Well B

工况	排量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	井口压力/ MPa	工况	排量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	井口压力/ MPa
1	182	17.95	5	365	24.19
2	194	20.57	6	430	23.78
3	218	22.94	7	479	24.01
4	267	24.31	-	-	-

根据目标区现场SRT施工数据和上述井底压力计算方法,在A井垂深1 427.7 m,静压14.01 MPa,B井垂深1 710 m,静压17.00 MPa状态下,可以获得A井、B井井底压力与注入量数据,其结果见表4、表5。由此,可分析SRT井底压力与注入量之间的变化关系。

表4 A井井底压力计算结果

Table 4 Calculation results of bottom hole pressure of Well A

井筒摩阻/ MPa	排量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	井口泵压/ MPa	井底压力/ MPa
0.81	864	18.0	31.2
1.00	965	20.7	33.7
1.18	1 051	22.6	35.4
1.37	1 137	25.1	37.7
1.58	1 224	27.1	39.5
1.79	1 310	28.5	40.7
1.91	1 353	29.1	41.2
2.03	1 396	29.3	41.2
2.23	1 469	28.8	40.6
2.49	1 555	28.7	40.3

表5 B井井底压力计算结果

Table 5 Calculation results of bottom hole pressure of Well B

井筒摩阻/ MPa	排量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	井口泵压/ MPa	井底压力/ MPa
0.35	182	17.95	34.6
0.37	194	20.57	37.2
0.44	218	22.94	39.5
0.51	267	24.31	40.8
0.59	365	24.19	40.6
0.68	430	23.78	40.1
0.71	479	24.01	40.3

通过上述SRT井底压力与注入量数据进行直角坐标图分析(图1、图2),显然图中两条直线有交点,且在交点后压力速率曲线上出现了负斜率,说

明地层出现了明显破裂特征,负斜率为压裂后情况。因此,可判断 A、B 两井的交点处压力即分别为该井破裂压力 41.2 MPa 及 39.5 MPa,与两口井理论剪切破裂压力值 41.8 MPa 及 40.01 MPa 较近。A 井所对应井口压力和流量为 29.1 MPa 和 1 353 m<sup>3</sup>/d、B 井所对应井口压力和流量为 22.94 MPa 和 218 m<sup>3</sup>/d。

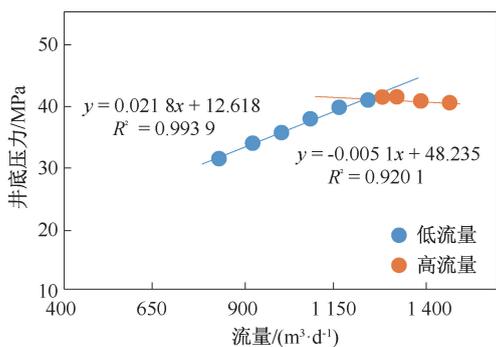


图 1 A 井注入量与井底压力对应关系

Fig. 1 Corresponding relationship between injection rate and bottom hole pressure of Well A

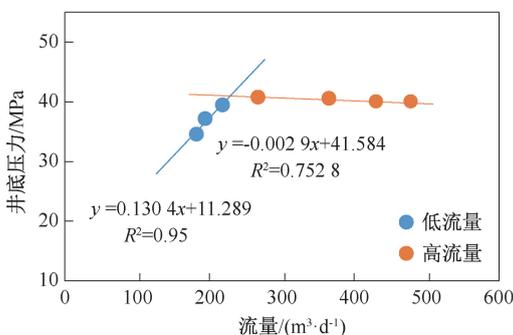


图 2 B 井注入量与井底压力对应关系

Fig. 2 Corresponding relationship between injection rate and bottom hole pressure of Well B

按照 SRT 测试要求和测试步骤,先后在渤海油田现场完成了 9 口井 SRT 测试工作(表 6)。

表 6 渤海油田 9 口井 SRT 测试与理论剪切破裂压力对比  
Table 6 Comparison of SRT test and theoretical shear fracture pressure of 9 wells in Bohai Oilfield

井号	剪切破裂压力/ MPa	SRT 测试破裂压力/ MPa	两者相差/ MPa
1#	34.80	33.63	1.17
2#	32.10	31.50	0.60
3#	34.90	34.20	0.70
4#	41.80	41.20	0.60
5#	31.40	28.50	2.90
6#	31.00	31.69	-0.69
7#	31.83	30.61	1.22
8#	33.98	32.09	1.89
9#	40.01	39.50	0.51

根据测试数据统计分析可以看出,STR 测试破裂压力与理论剪切破裂压力均具有一定吻合性,说明 STR 测试方法适于目标区块的破裂压力预测。

## 4 结论

(1) 利用 STR 方法测试注水井连续多级的流量与对应井底压力数据,并分析两者线性变化关系,得到的两条直线交点将为 STR 测试评价的关键点,视为 SRT 测试的破裂压力值。

(2) 现场矿场试验表明,STR 测试破裂压力与理论剪切破裂压力基本吻合,为进一步丰富注水井破裂压力预测评价的系统方法提供基础。

(3) STR 测试操作方法简单直观,通过注水井的单一注入即可进行破裂压力值的预测,能为现场及时评价单井提压注水潜力和可行性方案提供有效指导作用,具有良好的现场应用前景。

致谢:感谢中海油有限天津分公司、中海油服油田生产事业部增产中心等相关项目负责人及现场平台同志们的关心和大力支持。

## 参考文献

[1] 陈元千,吕恒宇,傅礼兵,等. 注水开发油田加密调整效果的评价方法[J]. 油气地质与采收率,2017,24(6):60-64.  
CHEN Yuanqian, LYU Hengyu, FU Libing, et al. Evaluation method of infilling adjustment effect for waterflooding development oilfields [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017,24(6):60-64.

[2] 徐兴安,张凤辉,杨万有,等. 渤海油田分层注水测试新技术[J]. 油气井测试,2019,28(4):51-56.  
XU Xing'an, ZHANG Fenghui, YANG Wanyou, et al. New testing technology of layered water injection in Bohai Oilfield [J]. Well Testing, 2019,28(4):51-56.

[3] 方凌云,万新德. 砂岩油藏注水开发动态分析[M]. 北京:石油工业出版社,1998:112-128.

[4] 张锐. 油田注水开发效果评价方法研究[M]. 北京:石油工业出版社,2010:2-49.

[5] 耿艳宏. 海上油田注水开发效果评价[J]. 石油地质与工程,2018,32(4):83-86,91.  
GENG Yanhong. Evaluation of waterflooding development effect in offshore oilfield [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2018,32(4):83-86,91.

[6] 王硕亮,姜汉桥,张媛. 利用动态数据判断注水开发效果[J]. 油气井测试,2013,22(2):35-37.  
WANG Shouliang, JIANG Hanqiao, ZHANG Yuan. The use of dynamic data to determine the effect of water injection development [J]. Well Testing, 2013,22(2):35-37.

[7] 孙文涛,黄炳光,唐海,等. 注水开发油藏水驱效果初期潜力评价方法[J]. 西南石油大学学报,2007,29(6):79-81.

- SUN Wentao, HUANG Binguang, TANG Hai, et al. The Initial potential evaluation method of water flooding effect in water-injection development reservoirs [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(6): 79-81.
- [8] 张凤辉, 徐兴安, 薛德栋, 等. 海上油田井口安全注水压力研究[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(6): 83-85.
- ZHANG Fenghui, XU Xing'an, XUE Dedong, et al. Research on safe water injection pressure at wellhead on offshore oilfield [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(6): 83-85.
- [9] 薛世峰, 孙春海, 于海彬, 等. 螺旋射孔参数对地层破裂压力的影响[J]. 油气井测试, 2015, 24(6): 11-13.
- XUE Shifeng, SUN Chunhai, YU Haibin, et al. Effect of Spiral Perforation Parameters on Formation Fracture Pressure [J]. Well Testing, 2015, 24(6): 11-13.
- [10] 李勇明, 杜成良, 毛虎, 等. 基于测井资料的压裂井地层应力分析技术[J]. 油气井测试, 2010, 19(3): 5-7.
- LI Yongming, Du Chenliang, MAO Hu, et al. Reservoir stress analysis technology for a well to be fractured based on its logging data [J]. Well Testing, 2010, 19(3): 5-7.
- [11] 周拿云, 杨兆中. 地层破裂压力预测技术综述[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2011, 13(01): 36-39.
- ZHOU Nayun, YANG Zhaozhong. Overview on Pressure Prediction of Formation Fracture [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2011, 13(01): 36-39.
- [12] 邓金根, 刘杨, 蔚宝华, 等. 高温高压地层破裂压力预测方法[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(5): 43-46.
- DENG Jinggen, LIU Yang, WEI Baohua, et al. Formation fracture pressure prediction method in high temperature and high pressure formations [J]. Petroleum drilling techniques, 2009, 37(5): 43-46.
- [13] 时贤, 程远方, 袁征, 等. 定向井破裂压力预测方法及计算参数敏感性分析[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(31): 8205-8209.
- SHI Xian, CHEN Yuanfang, YUAN Zheng, et al. The prediction of fracture pressure for the deviated wells and the analysis of relating parameters [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(31): 8205-8209.
- [14] 陈庭根, 管志川. 钻井工程理论及技术[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000.
- [15] 刘化普, 张快乐. 深水浅部非均匀受力地层破裂压力预测模型[J]. 中外能源, 2017, 22(1): 46-52.
- LIU Huapu, ZHANG Kuaile. Prediction models for fracture pressure of deep sea shallow formation under non-uniform stress [J]. Sino-Global Energy, 2017, 22(1): 46-52.
- [16] 崔杰, 李忠慧. 碳酸盐岩地层破裂压力预测新模型及其应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(2): 71-73.
- CUI Jie, LI Zhonghui. A new prediction model of fracture pressure of marine carbonate formation and its application [J]. Journal of China university of petroleum (edition of natural science), 2010, 34(2): 71-73.
- [17] 邹存友, 常毓文, 王国辉, 等. 水驱开发油田合理油水井数比的计算[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(2): 213-217.
- ZOU Cunyou, CHANG Yuwen, WANG Guohui, et al. Calculation on a reasonable production-injection well ratio in waterflooding oilfields [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(2): 213-217.
- [18] 高东升, 万小迅, 孟宪伟, 等. 阶梯式流量测试法用于油田注水管理[J]. 油气田地面工程, 2013, 32(5): 89-90.
- GAO Dongsheng, WAN Xiaoxun, MENG Xianwei, et al. Application of stepped flow test method in oilfield water injection management [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2013, 32(5): 89-90.
- [19] 胡琼, 万禧煌, 黄祥峰. 高压注水下套管蠕变损坏的机理研究[J]. 天然气与石油, 2013, 31(2): 51-54.
- HU Qiong, WAN Xihuang, HUANG Xiangfeng. Analysis on mechanism of casing failure induced by creep deformation after high pressure water flooding and its precautions [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(2): 51-54.
- [20] 姚如钢, 何世明, 龙平, 等. 破碎性地层坍塌压力计算模型[J]. 钻采工艺, 2012, 35(1): 21-23.
- YAO Ruguang, HE Shiming, LONG Ping. A mathematical model of calculating collapse pressure for fracture formation [J]. Drilling & Production Technology, 2012, 35(1): 21-23.

编辑 穆立婷

第一作者简介: 万禧煌, 男, 1986年出生, 工程师, 2009年毕业于长江大学石油工程专业, 现从事油气田生产作业等相关技术管理工作。电话: 022-66501375, 18002041327; Email: 1610881082@qq.com。通信地址: 天津市滨海新区海川路2121号渤海石油管理局大厦A座, 邮政编码: 300450。