

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2018.06.007

## 注水井附加压降的研究与应用

卢轶宽,柴世超,何 滨,杨友国,李 想,阮新芳,邹德昊,吴 卓

(中海石油(中国)有限公司 天津分公司,天津 300459)

**摘要:**注水开发油田普遍存在注水井投注后注入压力上升,注水量下降的情况。甚至在最大井口注入压力下,注水量仍无法满足油藏配注需求,导致砂体注采失衡、油田自然递减率加大,最终影响油田开发效果。近年来,渤海 A 油田通过大量的“微压裂”矿场实验证实,附加压降是导致油田出现欠注问题的根本原因,而酸化解堵过高的措施费用和较短的措施有效期显然无法满足油田高效开发的需求。通过结合油藏工程原理和流体力学理论,对渤海 A 油田开展了附加压降的研究和定量表征工作,以此修正注水井合理井口注入压力,并成功指导油田经济有效地开展提压增注工作。

**关键词:**注水井;附加压降;提压注水

**中图分类号:**TE 341

**文献标志码:**A

**文章编号:**2095-0411(2018)06-0047-06

## Research and Application on Additional Pressure Drop in Water Injection Wells

LU Yikuan, CHAI Shichao, HE Bin, YANG Youguo, LI Xiang,  
RUAN Xinfang, ZOU Dehao, WU Zhuo

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

**Abstract:** In water injection development oilfields, injection pressure rises and water injection volume drops after betting with water injection wells, until the contradiction shows that under the injection pressure of the largest wellhead determined by the overall development plan, the water injection volume can not meet the demand for reservoir allocation. Unbalanced mining results in an increase in the natural decline rate of the oil field, ultimately affecting the development of the oil field. In the past, acidification measures were used to remove plugging and injections, but their operating costs were high and the measures were short-lived. The input-output ratio deviated from the concept of “cost reduction and efficiency increase”. Recently, Bohai A oilfield has confirmed through a large number of “micro-fracturing” mines, the additional pressure drop is the root cause of the problem of oil field’s inadequa-

**收稿日期:**2018-09-27。

**作者简介:**卢轶宽(1988—),男,广西贵港人,工程师。E-mail: luyk@cnooc.com.cn

**引用本文:**卢轶宽,柴世超,何滨,等.注水井附加压降的研究与应用[J].常州大学学报(自然科学版),2018,30(6): 47-52.

cy. It exists objectively and cannot be avoided. In order to economically and effectively solve the problem of oil field insufficiency, combined with reservoir engineering principle and fluid mechanics theory, the study and quantitative characterization of additional pressure drop have been carried out in Bohai A oilfield, so as to correct the reasonable wellhead injection pressure of water injection wells and successfully guide the oilfield to increase pressure of water injection.

**Key words:** injection well; additional pressure drop; increase pressure of water injection

注水开发油田普遍存在注水井投注后注入压力上升,注水量下降的情况。甚至在最大井口注入压力下,注水量仍无法满足油藏配注需求,导致砂体注采失衡、油田自然递减率加大,最终影响油田开发效果。酸化解堵虽能有效增注,但其过高的措施费用和较短的措施有效期<sup>[1-4]</sup>显然无法满足油田高效开发的需求。

2016—2017 年,渤海 A 油田针对其注水井注入压力高,实际注入量难以满足油藏配注需求的问题,摒弃传统酸化解堵思路,在充分落实地质溢油风险后,开展了矿场“微压裂”解堵试验。试验井均上提井口注入压力至 20 MPa,该值已远超总体开发方案<sup>[5]</sup>9 MPa 的最大井口注入压力推荐值。

矿场试验表明:注水井实际操作压力可以在超出总体开发方案推荐值的情况下安全运行,而导致上述问题出现的本质原因是由于注水井存在附加压降。

现阶段,国内对于注水井附加压降的定量描述并没有详细的计算方法,而其实算结果又已远超常规认知(渤海 A 油田理论计算均值已达 12.80 MPa),因此,对附加压降进行定量表征是非常必要的,其研究成果可以有效指导油田开展提压增注工作<sup>[6-7]</sup>。

## 1 附加压降的定量表征

附加压降定义为注水井实际注水压差与理论注水压差的差值,它是井筒清洁程度与注水井近井地带污染程度(图 1)的综合体现。

### 1.1 附加压降的计算方法

附加压降采用下述公式进行定量表征

$$P_{\text{附加}} = \Delta P_{\text{实际}} - \Delta P_{\text{理论}} \quad (1)$$

式中: $\Delta P_{\text{实际}}$  为实际注水压差,MPa; $\Delta P_{\text{理论}}$  为理论注水压差,MPa。

对于实际注水压差<sup>[8-9]</sup>,可用下述公式求取

$$\Delta P_{\text{实际}} = P_{\text{井口}} + P_{\text{水柱}} - P_{\text{管损}} - P_{\text{嘴损}} - P_{\text{静压}} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{井口}}$  为井口注入压力,MPa; $P_{\text{水柱}}$  为由吸水层位垂深折算的静水柱压力,MPa; $P_{\text{管损}}$  为某一注入流量下,由井口至吸水层位井段产生的沿程阻力损失,MPa; $P_{\text{嘴损}}$  为某一注入流量下,通过配水器水嘴所消耗的阻力损失,MPa; $P_{\text{静压}}$  为吸水层位的地层静压,MPa。

对于理论注水压差<sup>[8-9]</sup>,可用下述公式求取

$$\Delta P_{\text{理论}} = H \times \frac{Q}{J_{\text{wmR}}} \quad (3)$$

式中: $H$  为吸水层位射孔垂厚,m; $Q$  为吸水层位日吸水量, $\text{m}^3/\text{d}$ ; $J_{\text{wmR}}$  为比吸水指数, $\text{m}^3/(\text{MPa} \cdot \text{d} \cdot \text{m})$ 。

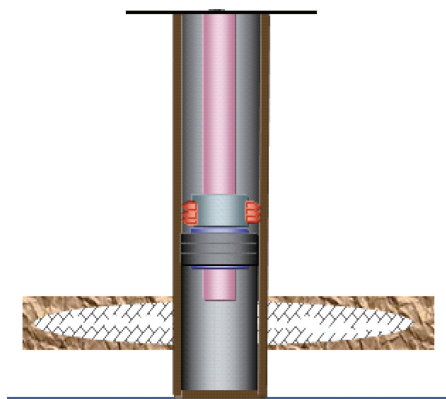


图 1 附加压降的综合表现形式

## 1.2 实际注水压差的计算方法

除已知参数  $P_{\text{井口}}$ 、 $P_{\text{水柱}}$  外,其余参数的求取需要借助3个力学模型,分别为管损模型、嘴损模型以及压降漏斗模型。对于管损模型和嘴损模型<sup>[8-9]</sup>,因其非常成熟并被广泛应用,简要描述如下。

对于油管内呈紊流形态的流动,用下式进行计算

$$P_{\text{管损}} = \lambda \times L \times \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

式中: $\lambda$  为摩阻系数,无量纲; $L$  为井口至吸水层位油管长度,m; $v$  为油管内流速,m/s。

对于水嘴处压力损失,由于其满足小孔泄流理论,用下式进行计算

$$\sqrt{P_{\text{嘴损}}} = KQ + b \quad (5)$$

式中: $K, b$  为与井下水嘴直径有关的系数,无量纲; $Q$  为日注水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

$$K = 0.1374d^{-1.8942} \quad (6)$$

$$b = 0.0008d - 0.0055 \quad (7)$$

式中  $d$  为水嘴直径,mm。

对于注水井近井地带的静压,考虑到注水井无井下压力监测装置,同时由于渤海A油田注采井距偏大(500~700 m)。因此,使用生产井测压数值来代替注水井井眼处的地层静压存在较大误差。

使用压降漏斗模型<sup>[10-12]</sup>(图2),利用生产井测压值反算注水井处地层静压,用下式进行计算

$$P(r, t) = P_i - \frac{Q\mu}{4\pi Kh} \left[ -Ei\left(-\frac{r^2}{4\eta t}\right) \right] \quad (8)$$

式中:  $\left[ -Ei\left(-\frac{r^2}{4\eta t}\right) \right]$  是一个幂积分函数,其在  $\frac{r^2}{4\eta t} < 0.01$  时,即生产井开井时间足够长时,公式可简化为

$$P(r, t) = P_{\text{wf}}(t) + \frac{Q\mu}{2\pi Kh} \ln \frac{r}{r_w} \quad (9)$$

式中: $P(r, t)$  为距离生产井  $r$  米处注水井的流压(静压),MPa; $P_{\text{wf}}(t)$  为生产井在  $t$  时刻时的流压(静压),MPa; $r_w$  为井眼半径,m。

## 1.3 理论注水压差的计算方法

比吸水指数是确定理论注水压差的关键,需结合相渗曲线<sup>[13-14]</sup>(图3)确定束缚水饱和度下的油相相对渗透率和残余油饱和度下的水相相对渗透率,带入下式进行计算

$$J_{\text{wmR}} = J_{\text{omR}} \frac{K_{\text{rw}}(S_{\text{or}})}{\mu_w} \frac{\mu_o}{K_{\text{ro}}(S_{\text{wc}})} \quad (10)$$

式中: $J_{\text{omR}}$  为与注水井同砂体生产井在无水采油期时的比采油指数,  $\text{m}^3/(\text{MPa} \cdot \text{d} \cdot \text{m})$ ; $K_{\text{rw}}(S_{\text{or}})$  为残余油饱和度下的水相相对渗透率,无量纲; $\mu_w$  为水相黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ; $\mu_o$  为油相黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ; $K_{\text{ro}}(S_{\text{wc}})$  为束缚水饱和度下的油相相对渗透率,无量纲。

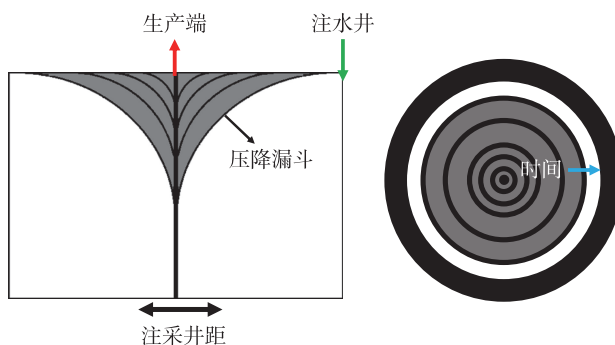


图2 注水井与生产井之间的压降漏斗

2 注水现状及存在问题分析

渤海 A 油田采用不规则井网进行注水开发, 总体开发方案以地层破裂压力为基础, 考虑沿程阻力损失和水嘴损失后, 推荐最大井口注入压力均值为 9 MPa, 并以此作为平台注水泵选型和注水井日产操作管理的理论依据。

油田上产的同时, 注水井的井口注入压力也持续上升, 注水量明显下降, 产注平衡的矛盾日益突出(图 4)。

受最大 9 MPa 井口注入压力均值的限制, 渤海 A 油田连续 5 年地层压力保持水平呈下降态势, 部分生产井严重脱气, 油田提压增注工作迫在眉睫。而提压工作的本质即突破总体开发方案对于注水井最大井口注入压力的限制, 因此, 需对注水井附加压降进行定量表征, 以此指导油田开展提压工作。

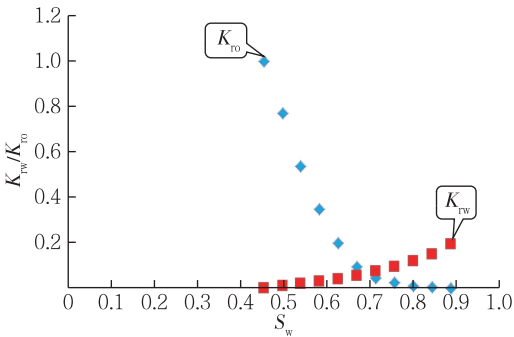


图 3 渤海 A 油田某岩心实测相渗曲线

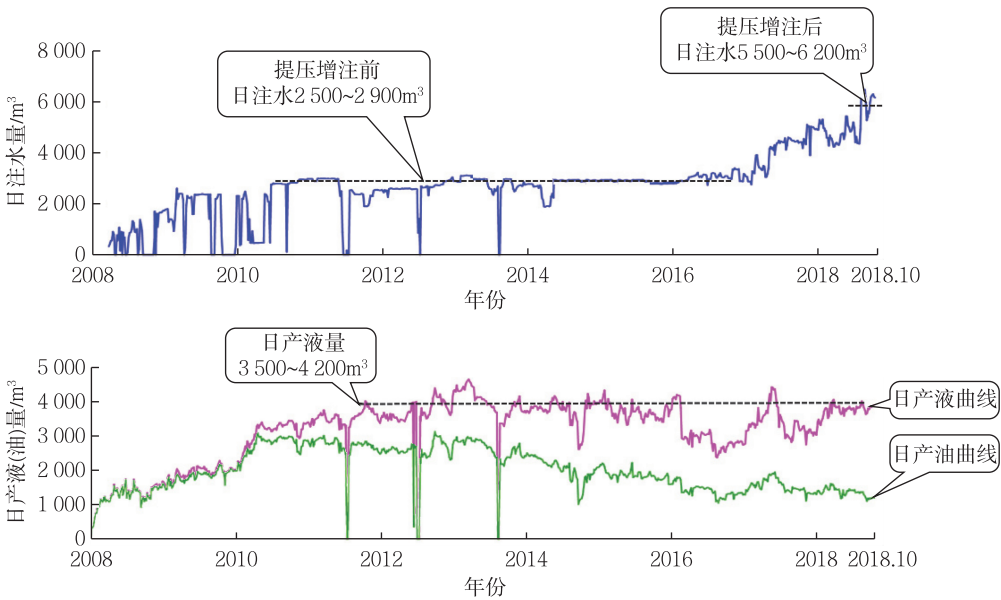


图 4 渤海 A 油田注采运行情况

3 计算结果及使用效果

3.1 计算结果

以渤海 A 油田注水井 F8 为例, 该井使用普通注水管柱, 注水层位为明化镇组 F8-1705 砂体(构造一岩性圈闭), 与生产井 F7H 形成 1 注 1 采井网(图 5), 注水层位垂深 1 711 m, 斜深 2 299 m。F8 井油管内径 7.59 cm, 在 10.4 MPa 井口注入压力下, 日注水量为 74 m³。

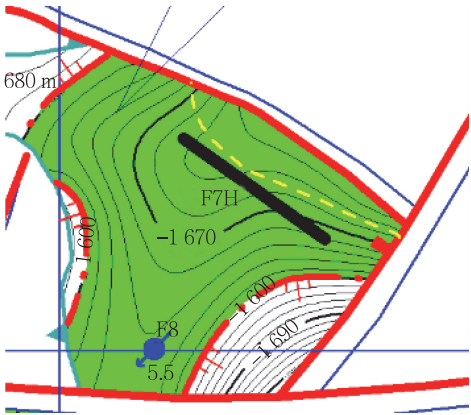


图 5 F8-1705 砂体注采井网

首先,对 F8 井在注水层位的实际注入压力进行求解,为 27.16 MPa。其次,使用压降漏斗模型借助 F7H 井静压测试数值反算 F8 井处静压,为 14.28 MPa。最后,由 F7H 井实测比采油指数  $11.81 \text{ m}^3/(\text{MPa} \cdot \text{d} \cdot \text{m})$ ,使用相渗曲线计算 F8 井在日注  $74 \text{ m}^3$  时的理论注水压差,为 0.14 MPa。由此可得,F8 井在 F8-1705 砂体的附加压降为 12.7 MPa。

3.2 结果验证

2016 年 7 月 22 日,现场对 F8 井实施压降试井,存储式压力计录取到了完整且合格的数据。

采用反褶积方法(图 6、图 7),F8 试井解释的渗透率在  $(20 \sim 40) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  (测井解释渗透率为  $(861.5 \sim 1\,218.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ),存在严重污染,表皮系数高达 30.6。由此可以明确,F8 井注水效率低的原因是由于过大的附加压降导致的。

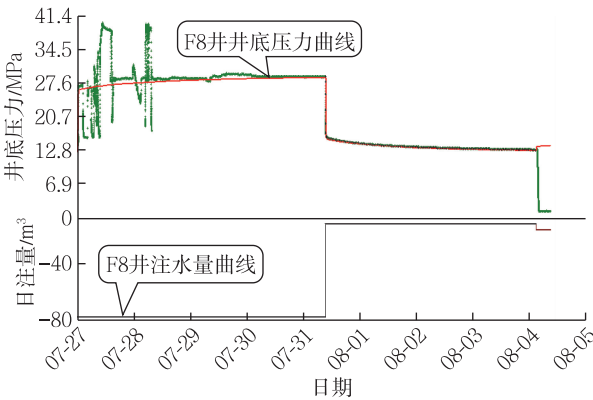


图 6 F8 井压降试井历史曲线拟合

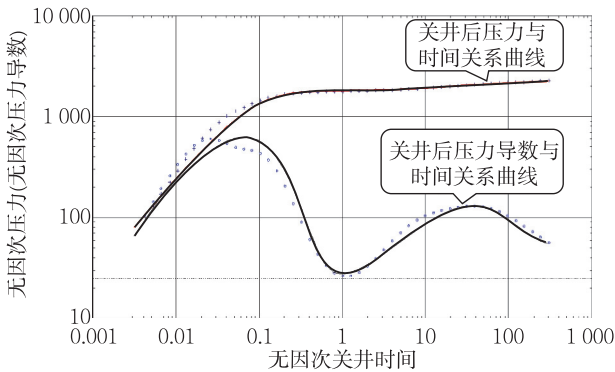


图 7 F8 井压降试井关井双对数曲线拟合图

3.3 全油田附加压降计算结果

由于 F8 井附加压降模型实算与生产试井结果匹配良好,渤海 A 油田率先开展了 CEPA 平台注水井附加压降定量表征工作,计算结果为:附加压降高值 16.60 MPa,低值 8.69 MPa,均值 12.80 MPa(图 8)。

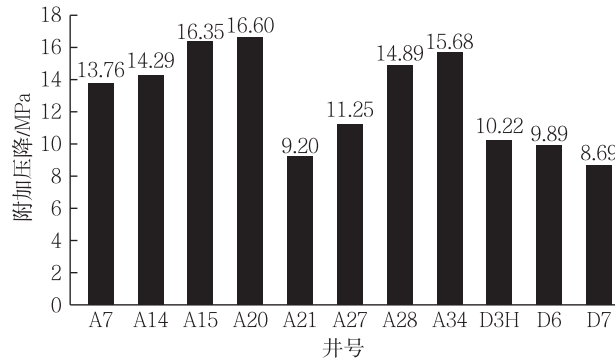


图 8 渤海 A 油田 CEPA 平台注水井附加压降计算结果

3.4 应用情况

借助上述研究结果,渤海 A 油田主体区全面开展提压增注工作,实施 11 井次(图 9),有效 11 井次,单井平均上提注入压力 2~4.6 MPa,提压后,注水井井口注入压力均已超出总体开发方案推荐的 9 MPa 最大井口注入压力均值,全区日增注  $1\,700 \text{ m}^3$ 。减少年均注水井酸化措施工作量 7 井次,节约油田直接操作成本 400 万/年。

4 结 论

1)附加压降是注水井井筒清洁程度和近井地带污染程度的综合体现。长期以来,由于缺少对该值进行定量表征的方式和方法,在注水井设计和注水设备选型时,附加压降项往往被忽略,直接导致油田因为限压问题欠注。附加压降概念的引入重新定义了注水井的合理井口注入压力设计方法,以此指导油田的注水设备选型和管柱能力校核。

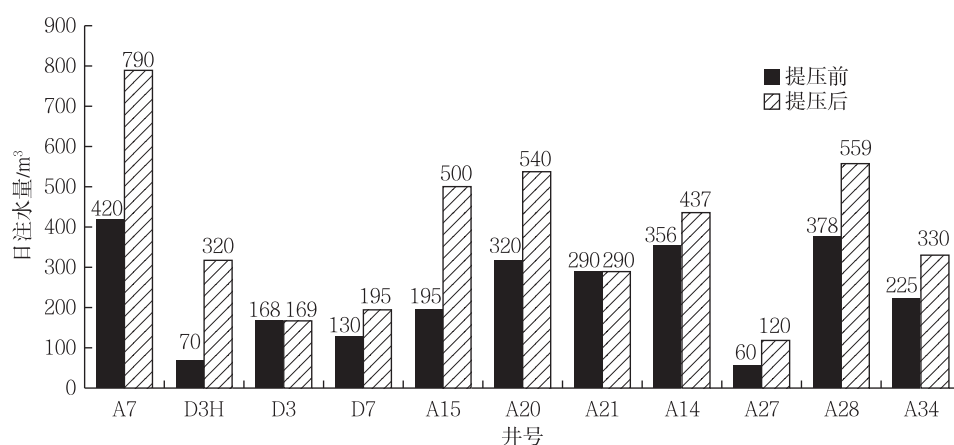


图9 渤中 A 油田主体区提压增注效果

2)渤海 A 油田注水井附加压降的构成占比中,井筒污染占比大约为 5%~10%,主要构成仍为近井表皮污染。而由表皮影响导致的注水井欠注问题,可以通过上提注入压力予以克服。附加压降的研究结果可以指导油田注水井提压幅度。

## 参考文献:

- [1]易飞,赵秀娟,刘文辉,等.渤海油田注水井解堵增注技术[J].石油钻采工艺,2004(5):53-55.
- [2]孙林,孟向丽,蒋林宏,等.渤海油田注水井酸化低效对策研究[J].特种油气藏,2016(3):144-147.
- [3]严云奎.川口油田长 6 油层注水解堵开采研究[J].中外能源,2006,11(6):53-56.
- [4]张雷.增产增注措施效果预测与规划方法研究[D].东营:中国石油大学,2008:25-40.
- [5]刘超.渤海 A 油田基础地质研究与开发方案设计[D].东营:中国石油大学,2009:20-50.
- [6]计勇.海上油田注水解堵工艺探索[J].中外能源,2016(11):58-60.
- [7]郑清远.大庆油田注水井增注技术现状与评价[J].油田化学,1995(2):181-184.
- [8]孙文策.工程流体力学[M].大连:大连理工大学出版社,2003:3-10.
- [9]周亨达.工程流体力学[M].北京:冶金工业出版社,1988:6-20.
- [10]张建国,雷光伦,张艳玉,等.油气层渗流力学[M].东营:中国石油大学出版社,2004:33-43.
- [11]姜汉桥.油藏工程原理与方法[M].东营:中国石油大学出版社,2000:87-99.
- [12]葛家理.现代油藏渗流力学原理[M].东营:石油工业出版社,2003:139-148.
- [13]何更生,唐海,孙良田,等.油层物理[M].2 版.北京:石油工业出版社,2011:304-307.
- [14]李炎波,安桂荣,邢雅,等.海上油田油井合理提液研究及实践[M].北京:石油工业出版社,2014:38-42.

(责任编辑:殷丽莉)