

文章编号: 1001-4888(2008)06-0511-09

注水井地层吸水规律实验研究

林春阳¹, 郭冀义², 马水龙², 卢德唐^{1*}

(1. 中国科学技术大学 近代力学系, 安徽合肥 230027; 2. 大庆油田有限责任公司 测试技术服务分公司, 黑龙江 163412)

摘要: 注水开发是油田开发的第一选择。本文通过试验着重分析了指示曲线方法在注水开发过程中的失效原因, 总结出水嘴总压损失随流量变化规律。同时, 考虑真实油藏下任意井网排布, 推导了注水层井底压力与流量随时间变化的关系, 提出了瞬时指示曲线分析方法指导流量调配, 既满足了油田注水的基本要求又把注水成本控制在合理的范围内。现场试验结果表明, 该方法准确、简单、可靠, 很好地满足了工程实际的需要, 减轻了调配人员的工作强度和工作时间。

关键词: 注水井; 瞬时指示曲线; 分层流量调配; 水嘴优化; 水嘴压力损失

中图分类号: O347

文献标识码: A

0 引言

油田开发是通过地层中弹性能量的释放驱动流体, 随着石油的采出, 地层平均压力不断下降, 必须通过向地层中注入流体保持合理的地层压力, 从经济和回收利用角度, 注水开采是最合适也是最普遍的开采方式。因此如何注好水, 注够水, 快注水对于油藏开发具有重要意义, 也一直是国内外研究的热点和重点^[1-5]。

在这些不同的注水工艺中, 应用最为广泛的则是 Hall Plot^[1]方法。该方法假设油藏流动为稳态径向流, 由此得到井底流压的表达式^[6]:

$$p_{wf} = p_e + \frac{1}{WI}Q \quad (1)$$

其中, p_{wf} 和 p_e 为井底压力和地层压力; WI 为油藏的吸水指数; Q 为注入流量。

方程(1)表明, 井底压力与注入量呈线性关系, 由于将吸水指数 WI 视作常数, 可以通过改变井口压力, 并记录不同井口压力下的注入量来计算吸水指数。但在油田实际应用中, 按此规律调配的水嘴多数情况下不能满足地层配注要求, 因此调配任务仍然只能依靠调配人员的经验, 由试凑法来完成, 仪器投捞次数多, 需反复测调。

由于注水井数量庞大(仅大庆就有 3 万多口, 每年注入 6 亿吨水), 试凑法测调耗费大量的人力物力, 因此准确地获取吸水规律成为解决问题的关键。而注水井又涉及到井筒中垂直管流、流入水嘴时节流及地层渗流等不同流动特性, 长期注水导致油管锈蚀、变形及地层污染等, 不同区块地质条件亦相差较大, 很难应用数值计算直接模拟。

本文在充分研究调配水工艺的基础上, 着重分析了指示曲线工艺在现场操作失效的原因。通过测量层段管柱压力随流量变化曲线, 发现在大多数注水井中管柱压力与流量并非呈线性关系。结合测量得到的水嘴损失曲线, 我们认为忽略流体在水嘴上的总压损失是导致指数曲线失效的重要原因, 为此开

* 收稿日期: 2008-08-17; 修订日期: 2008-10-19

基金项目: 国家 973(2006CB705805); 国家自然科学基金(10672159、10702069)联合资助

通讯作者: 卢德唐(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为渗流力学及工程科学软件。

展井筒内的相关试验研究。同时,考虑任意井网下注入井和生产井对调配井的干扰,推导出压力变化不仅与流量有关,还与注入时间相关。利用新的压力公式在油田中不同区块共进行 20 井次调配试验,证明了该方法准确、简单、有效。多数井只需一次测调即可满足各层段的流量配注要求,称为瞬时指示曲线方法。

1 试验仪器

为证实流体流经水嘴造成的压差损失是导致指示曲线非线性的重要原因,我们首先设计了验证性试验。采用桥式注水管柱和分层静压测试组合仪来确定水嘴总压损失的大小。桥式注水管柱的优点是有桥式过流管道,能够进行细分注水。当对特定注水层进行测试时,不影响其他层段的注水,排除了其他层段对测试层的影响。分层静压测试组合仪则由绳帽、电动智能开关、嘴前嘴后压力计、水嘴、流量计、密封段组成,如图 1。

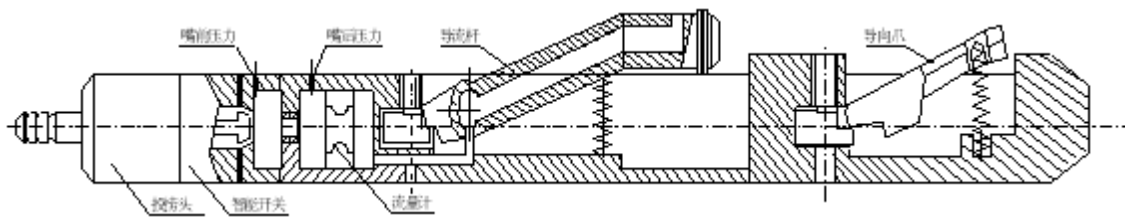


图 1 分层静压测试组合仪结构图

Fig. 1 Structure of total pressure instrument

试验时,把正常注水的水嘴拔出,装入测试仪器中,投入到目的层段,使层段正常注水。通过测试仪中的压力计同时测量嘴前嘴后压力,它们分别代表了正常注水条件下的管柱压力和地层压力。在水嘴下游,流量计记录流量,注水稳定后电动智能开关关闭,关井测量压力后,将分层静压测试组合仪打捞出井筒。

仪器下井之前,对压力计和流量计进行了地面标定,智能电动开关在地面进行了试验,证明测试仪器完好。同时,对测试井进行了验封操作,保证了封隔器密封,然后按操作规程,将仪器投入目的层测试。

2 试验原理

为验证仪器的可靠性,对某层段进行了重复测试,设定二次开关操作。第一次正常注水,流量稳定后关井,1 小时后开井注水,流量稳定后再次关井(如图 2)。从图 2 可以看到,流量与压力台阶平稳,也得到了不同注入量下的水嘴总压损失。初次测试的嘴损为 0.29MPa,随着流量增大,嘴损增至 0.54MPa。说明当流体进入水嘴时流量越大,嘴损越大。关井后,由于流量为零,嘴前嘴后压力相等。因此,忽略水嘴的压力损失应是导致指示曲线失效的重要原因。通过对试验数据分析,井底压力可表示成:

$$p_{wf} = p_e + \frac{1}{WI}Q + H_w(Q) + \gamma \quad (2)$$

其中, H_w 为水嘴造成的压力损失,为流量 Q 的函数; γ 为水井其他部分对压力造成的影响。

使用分层静压测试组合仪,对不同规格的水嘴进行试验,绘制流量与压损的平方根曲线(如图 3),通过线性拟合,得出压损与流量呈二次关系,即:

$$H_w = kQ^2 \quad (3)$$

其中, H_w 为压力损失; k 为水嘴损失系数; Q 为流量。

本次试验中,桥式配水管柱和分层测试组合仪只用于得到嘴损曲线。油田中,注水井仍采用普通配水管柱及常规配水器(实物如图 4 所示),同时为验证水嘴损失导致指示曲线失效具有普遍性,在普通配水管柱中测量不同流量下的井底压力,开展吸水规律试验研究。在这一过程中,无法使用组合测试仪,则测量压力为井底压力。测试前对封隔器进行验封,证明井况良好。在测试过程中,除测试层段外,其

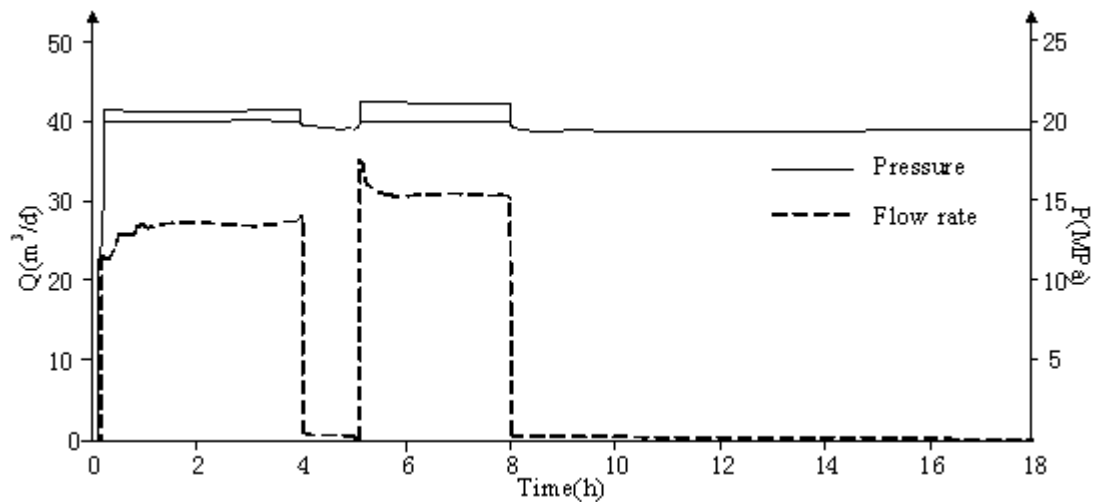


图 2 某层段压力测试图
Fig. 2 Pressure test in one stratum

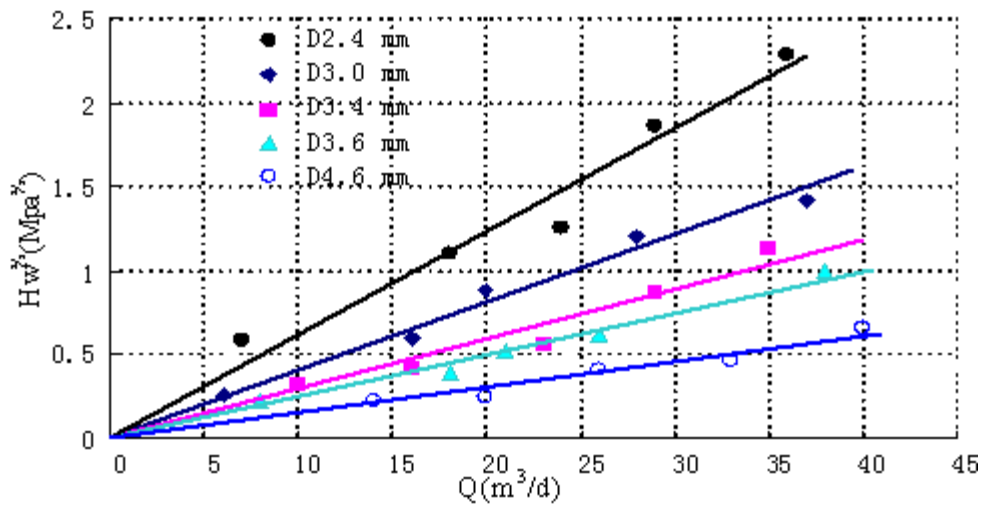


图 3 不同水嘴下流量与压损试验数据及拟合曲线
Fig. 3 Data and curve fit of pressure loss and flow under various Nozzles



图 4 配水器实物图
Fig. 4 Real object picture of water injector

他层段进行关井操作,保证测试过程不受干扰。采用调配中最常用的直径 2.0~4.0mm 段中的 3.0mm,3.4mm,3.6mm 水嘴,在不同层段进行测试。其中 3.0mm 水嘴在不同井位不同层段测量二次,其压力流量拟合如图 5 所示。将拟合曲线的二次项系数与水嘴损失系数对比,也证明了水嘴损失是导致指示曲线失效的主要原因(如图 5 及表 1、表 2)。

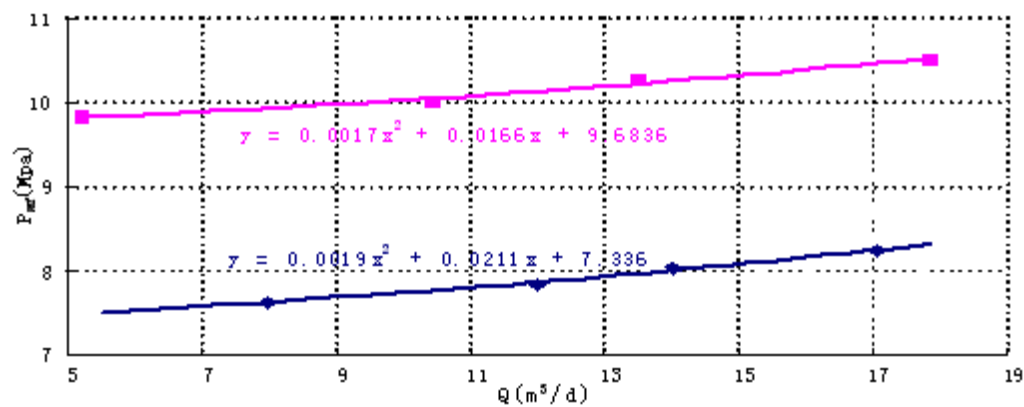


图 5 注入压力与流量拟合图(水嘴直径为 3.0mm)
Fig. 5 Data and curve fit of water injection pressure and flow (Nozzle diameter is 3.0mm)

表 1 3.0mm 水嘴测量数据
Tab.1 Measurement of nozzle 3.0mm

水嘴直径:3.0 mm 两次测量			
测试压力	测试流量	测试压力	测试流量
8.233	17.0	10.5	17.83
8.03	14.0	10.3	13.53
7.832	12.0	10.0	10.46
7.63	8.0	9.8	5.23
拟合曲线: $p_{wf}=0.0019Q^2+0.0211Q+7.336$		拟合曲线: $p_{wf}=0.0017Q^2+0.0166Q+9.6836$	
嘴损系数 $k=0.00163$		嘴损系数 $k=0.00163$	
占拟合曲线二次项系数百分比:88%		占拟合曲线二次项系数百分比:96%	

表 2 3.4mm,3.6mm 水嘴测量数据
Tab.2 Measurement of nozzle 3.4mm and 3.6mm

水嘴直径:3.4 mm		水嘴直径:3.6 mm	
测试压力	测试流量	测试压力	测试流量
14	23	14.4	29
13.3	17	13.7	21
12.8	8	13.1	9
12.3	3	12.7	3
拟合曲线: $p_{wf}=0.0009Q^2+0.0566Q+12.176$		拟合曲线: $p_{wf}=0.0008Q^2+0.0388Q+12.615$	
嘴损系数 $k=0.00088$		嘴损系数 $k=0.00063$	
占拟合曲线二次项系数百分比:97%		占拟合曲线二次项系数百分比:79%	

由图 5 和表 1 可以看出,在两次测量中使用同样大小的水嘴(3.0mm)时,拟合二次项系数相差不大,分别为 0.0019 和 0.0017。进一步对比 3.0mm 水嘴的嘴损系数,发现流体流经水嘴造成的压力损失占二次项损失的绝大部分。测试不同水嘴(3.4mm,3.6mm)亦得到相同结果(表 2)。若层段以流量 10m³/d 注入,则流量的二次项损失与一次项损失至少相当,随着流量增大,二次项损失逐渐占主要作用。因此,不考虑水嘴压力损失是指示曲线失效的主要原因。

3 地层渗流规律

由以上试验可以看出,嘴损系数近似等于拟合曲线中的二次项系数。在调配过程中,可用嘴损系数来代替其中的二次项系数。而拟合曲线中的一次项系数则代表地层的吸水指数。由于不同区块的地质条件千差万别,同时流体的注入亦会导致地层情况发生缓慢的变化,因此调配前对各层位进行指示曲线绘制是一种行之有效的方法。然而,目前油田井网密度较大,周边生产井亦会对调配井产生影响。为真实反映调配井的吸水指数,我们考虑油水井的任意井网排布,推导出地层压力随时间、流量变化规律。将其用来指导流量调配,即为瞬时指示曲线方法。

油田区块中,油水井的分布都按井网布置,如五点井网,七点井网等。不失一般性,假定井网中除调配井外,有 N 口注入井,距调配井的距离分别为 $L_{in1}, L_{in2}, L_{in3}, \dots, L_{inN}$, 注入量分别为 $q_{in1}, q_{in2}, q_{in3}, \dots, q_{inN}$; 同时有 M 口生产井,距调配井的距离分别为 $L_{out1}, L_{out2}, L_{out3}, \dots, L_{outM}$, 产液量分别为 $q_{out1}, q_{out2}, q_{out3}, \dots, q_{outM}$ 。保证区块注采平衡,总注入量 Q_{in} 等于总采出量 Q_{out} 。应用叠加原理,调配井的井底压力 p_{wf} 可写成^[7-8]:

$$p_{wf}(t) = p_i + \frac{qB\mu}{2\alpha_c\pi kh} p_{uD}(t_D, C_D, S) + \sum_{i=1}^N \frac{q_{mi}B\mu}{2\alpha_c\pi kh} Ei\left(-\frac{L_{mi}^2}{t_D}\right) - \sum_{j=1}^M \frac{q_{outj}B\mu}{2\alpha_c\pi kh} Ei\left(-\frac{L_{outj}^2}{t_D}\right) \quad (4)$$

其中:

$$p_{uD}(t_D, C_D, S) = \frac{4}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{[1 - \exp(-u^2 t_D)] du}{u^3 \{ [C_D u J_0(u) - (1 - C_D u^2 S) J_1(u)]^2 + [C_D u Y_0(u) - (1 - C_D u^2 S) Y_1(u)]^2 \}}$$

$J_0(u)$ 和 $J_1(u)$ 为零阶和一阶第一类 Bessel 函数; $Y_0(u)$ 和 $Y_1(u)$ 分别为零阶和一阶第二类 Bessel 函数。 $Ei(-x)$ 为指数积分函数; α_c 为单位转换系数。

当时间 t 较大时,调配井的井底压力 p_{wf} 可写成:

$$p_{wf}(t) = p_i + \frac{qB\mu}{2\alpha_c\pi kh} (\gamma - \ln(4t_D) - 2S) + \sum_{i=1}^N \frac{q_{mi}B\mu}{2\alpha_c\pi kh} (\gamma + \ln L_{mi}^2 - \ln t_D) - \sum_{j=1}^M \frac{q_{outj}B\mu}{2\alpha_c\pi kh} (\gamma + \ln L_{outj}^2 - \ln t_D) \quad (5)$$

$\gamma=0.572216$ 为欧拉常数。

流量调配中,一般采用两次测量法: $0 \leq t \leq t_1$ 时,水井以流量 q_1 注入,井底压力为 $p_1(t)$; $t > t_1$ 时,注入量为 q_2 ,井底压力为 $p_2(t)$,此时,调配井的内边界条件为:

$$C_D \frac{dp_{uD}}{dt_D} - r_D \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \bigg|_{r_D=1} = \alpha \quad (\alpha = q_2/q_1) \quad (6)$$

其他注入井和油井仍然以原产量注入及产出,其内边界条件保持不变:

$$C_D \frac{dp_{uD}}{dt_D} - r_D \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \bigg|_{r_D=1} = \pm 1 \quad (\text{注入为正,产出为负}) \quad (7)$$

在满足边界条件(6)和(7)下,注水井井底压力变化可用如下方程表示:

$$p_2 - p_1 = \frac{\alpha q_1 B\mu}{2\alpha_c\pi kh} [p_{uD}(t_D + \Delta t_D, C_D, S) - p_{uD}(t_D, C_D, S)] + \sum_{i=1}^N \frac{q_{mi}B\mu}{2\alpha_c\pi kh} \left[Ei\left(-\frac{L_{mi}^2}{t_D + \Delta t_D}\right) - Ei\left(-\frac{L_{mi}^2}{t_D}\right) \right] - \sum_{j=1}^M \frac{q_{outj}B\mu}{2\alpha_c\pi kh} \left[Ei\left(-\frac{L_{outj}^2}{t_D + \Delta t_D}\right) - Ei\left(-\frac{L_{outj}^2}{t_D}\right) \right] \quad (8)$$

式中: Δt_D 为水井以流量 q_2 注入后的无量纲时间。 t_D 足够大时,采用公式(4)的渐近解,泰勒展开并省略 Δt_D 的二阶小量,方程(8)可简化成:

$$\frac{\mu B}{2\alpha_c\pi kh} = \frac{(p_2 - p_1)}{(\alpha - 1)q_1} \frac{t_D}{\Delta t_D} = \frac{(p_2 - p_1)}{(\alpha - 1)q_1} \frac{t}{\Delta t_1} \quad (9)$$

方程(9)表明:可通过水井产量变化过程中测得的压力流量数据求取地层吸水指数。将吸水指数代入方

程(8),配注量 q_{lar} 下井底压力 p_{lar} 表示为:

$$p_{lar} = p_1 + \frac{(p_2 - p_1)(q_{lar} - q_1)t_1}{(q_2 - q_1)\Delta t} [p_{wd}(t_D + t'_D, C_D, S) - p_{wd}(t_D, C_D, S)] \quad (10)$$

式中: $\Delta t'_D$ 为注入量符合配注要求后的无量纲注入时间。

4 管流和渗流耦合后的吸水规律

实际注水时,注入压力与井底压力满足伯努力方程^[9-10]:

$$p_m = p_{wf} + h_w \quad (11)$$

式中: p_m 和 p_{wf} 为当前层的注入压力及井底压力; h_w 为当前流量下配水器上的压力损失。

改变注入压力,在同一位置测量两组注入量和压力(q_{m1} , p_{m1}), (q_{m2} , p_{m2}) 数据,代入公式(10)得到配注量下的井底压力 p_{lar} 。最后求解符合各层配注量要求的井口压力及水嘴组合,控制方程为:

$$\frac{p_0}{\rho g} + H = \frac{p_{lar}}{\rho g} + h_w \quad (12)$$

式中: p_0 是井口压力; H 是仪器测量深度; ρ 是注入液体密度。联合方程(3)、方程(10)和方程(12),得到井口压力 p_0 及水嘴半径组合 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ 的方程组。为使方程组完备,采用如下限制条件:

$$\min(p_0(e_1, e_2, e_3, \dots, e_n)) \text{ 且 } |e_i| \leq 0.2, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (13)$$

式中: e 为计算流量相对配注量的误差。方程(12)表示在各层注入流量都满足配注量要求(各层误差不大于 20%)的情况下,计算结果选择使井口压力最小的水嘴组合,降低注水成本。

5 现场试验验证

为验证方法的正确性,在大庆油田进行了现场试验。井 A 共四个层段需要配注,将流量计和压力计下入井底,分别在 1584m, 1544m, 1070m 及 1030m 处停靠。测量压力流量数据,两次测量结果如图 6、图 7 所示,表 3 给出两次测量的压力流量数据。根据水嘴优化理论,计算出 4 个水嘴(如表 4),水嘴更换 18 个小时后,测量井 A 的压力流量数据,如图 8 所示。

从图 8 及表 4 可以看出:本文的计算结果与现场实测数据有较高的吻合度,除井 A 第 4 层调配误差略大(-13.3%)外,其余各层调配误差均小于 10%。根据计算结果更换水嘴,很好地满足了流量调配的精度要求(工程精度为 20%),无需反复试凑。同时由于只测量两次压力流量数据,操作简单,耗时间少,满足油田上流量调配的时间要求。在大庆油田不同区块的 20 井次试验表明:该方法不受特定油田区块地质条件限制,可在油田中被广泛使用,井次合格率为 90%,层次合格率为 87.8%。

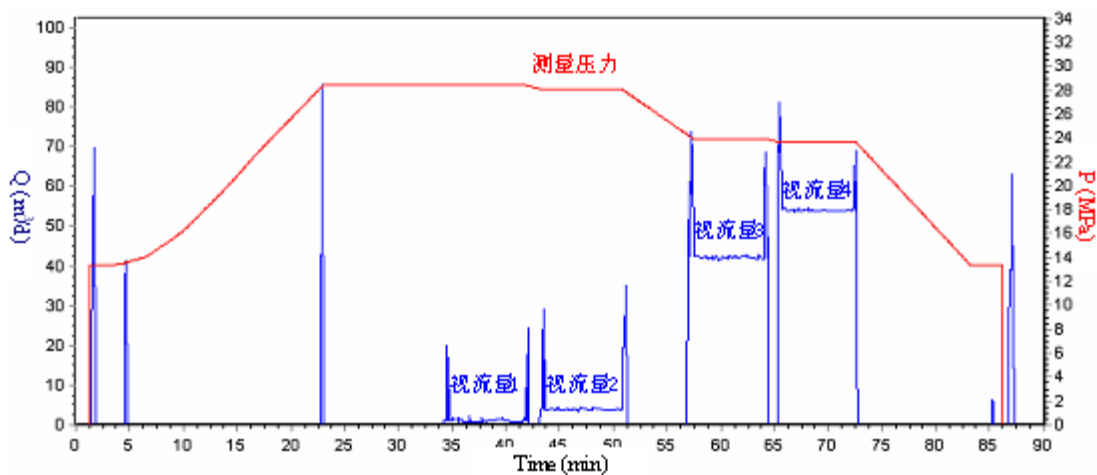


图 6 第一次测量井 A 各层注入压力与流量数据

Fig. 6 Well A: Injection pressure and flow rate data in the first time

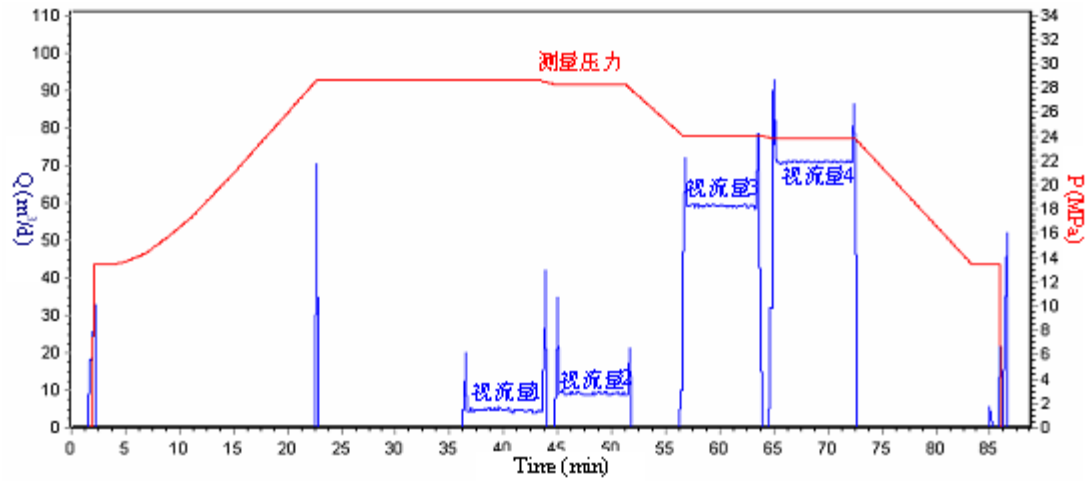


图 7 第二次测量井 A 各层注入压力与流量数据
Fig. 7 Well A: Injection pressure and flow rate data in the second time

表 3 井 A 调配参数
Tab. 3 Well A: Adjustment parameters

配注量 (m^3/d)	原嘴径 (mm)	第一次测量		第二次测量	
		压力(MPa)	流量(m^3/d)	压力(MPa)	流量(m^3/d)
10	12.0	23.63	11.77	23.77	12.0
10	12.0	23.95	37.58	24.11	49.91
15	12.0	28.05	3.17	28.23	4.60
15	12.0	28.40	1.17	28.60	3.55

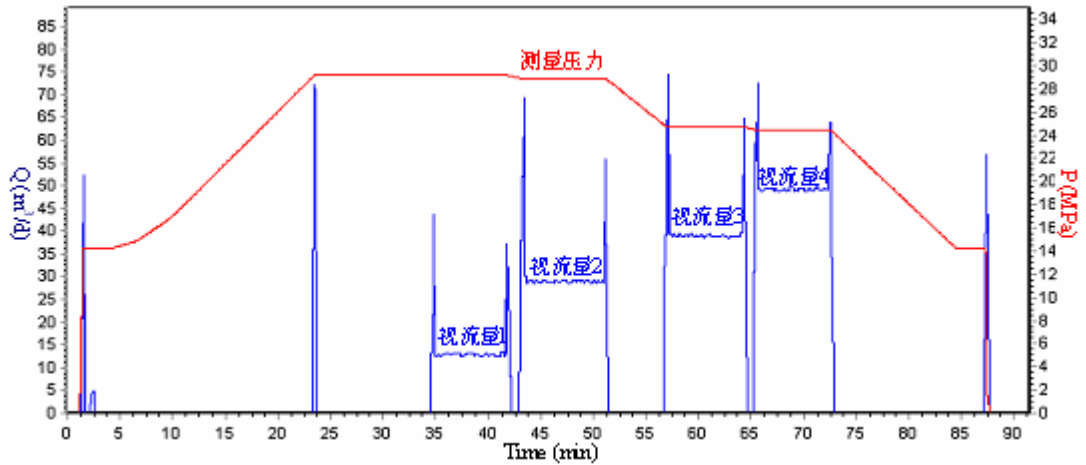


图 8 井 A：优化水嘴组合后的压力流量数据
Fig. 8 Well A: Pressure and flow rate data after optimization of nozzle group

表 4 井 A 调配结果

Tab. 4 Adjustment result

计算流量 (m^3/d)	调后水嘴 (mm)	测量结果		
		压力(MPa)	流量(m^3/d)	调配误差(%)
9.78	1.6	24.4	10.0	0
9.45	1.8	24.8	10.5	5.0
17.25	12.0	28.9	16.0	6.7
14.24	12.0	29.2	13.0	-13.3

6 结论

注水井流量调配工作大都依靠调配人员的经验,劳动强度大,工作时间长。本文通过分析传统指示曲线的失效原因,同时通过任意井网排布下的压力随时间、流量变化关系总结出了瞬时指示曲线流量调配方法,并得到如下结论:

- 1) 忽略水嘴压损对指示曲线的影响是指示曲线方法失效的主要原因;
- 2) 通过试验得到水嘴损失曲线,可有效指导油田流量调配;
- 3) 考虑任意井网排布,两次测量井底压力及流量,可以有效地估算调配井各层的地层吸水指数。在某油田应用表明,该方法准确有效,简单省时,可减少 1~3 个工作日,提高了配注效率。

参考文献:

- [1] Hall H N. How to Analyze Waterflood Injection Well Performance[J]. World Oil, 1963: 128—130.
- [2] Silin D B, Holtzman R, Patzek T W, Brink J L. Monitoring Waterflood Operations: Hall's Method Revisited[C]. Paper SPE 93879 presented at the SPE Western Regional Meeting, Irvine, CA, U. S. A, 30 March—1 April, 2005.
- [3] Silin D B, Patzek T W. Control Model of Water Injection into a Layered Formation[C]. SPE 71751 revised for publication from paper SPE 59300, first presented at the 2000 SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, 3-5 April. Revised manuscript published September 2001.
- [4] 邓刚, 王琦, 高哲. 桥式偏心分层注水及测试新技术[J]. 油气井测试, 2002, 11(3): 45—48 (Deng Gang, Wang Qi, Gao Zhe. New Techniques of Bridge-Eccentric Separate Flooding and Testing. Well Testing, 2002, 11(3): 45—48(in Chinese))
- [5] 邹艳华, 李远, 那贺忠. 注水井分层流量调配方法研究[J]. 油气井测试, 2003, 12(3): 4—6 (Zou Yanhua, Li Yuan, Na Hezhong. Study for the Adjustment of Respective Layer Flow Rate in Injection Well. Well Testing, 2003 12 (3): 4—6(in Chinese))
- [6] Muskat M. The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media[M]. Ann Arbor, MI: J. W. Edwards, Inc, 1946.
- [7] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 安徽合肥: 中国科学技术大学出版社, 1998: 236—237 (Kong Xiangyan. Advanced Mechanics of Fluid in Porous Media. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1998: 236—237 (in Chinese))
- [8] 卢德唐, 郭冀义, 郑心权. 试井分析理论及方法[M]. 石油工业出版社, 1998: 119—121 (Lu Detang, Guo Jiyi, Zheng Xinquan. Theory and Method for Well Test Analysis. Petroleum Industry Press, 1998: 119—121 (in Chinese))
- [9] 徐文娟, 韩建勇. 工程流体力学[M]. 哈尔滨工程大学出版社: 2002: 67—74 (Xu Wenjuan, Han Zhiyong. Engineering Fluid Mechanics. Harbin Engineering University Press, 2002: 67—74(in Chinese))
- [10] [苏]Б·Т·叶姆采夫. 工程流体力学[M]. 高等教育出版社, 1990: 176—183 (Б·Т·Emtsev. Engineering Fluid Mechanic. Higher Education Press, 1990: 176—183(in Chinese))

Experimental Study of Reservoir Water Injection Regulation

LIN Chun-yang¹, GUO Ji-yi², MA Shui-long², LU De-tang¹

(1. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China;

2. Daqing Logging & Testing Services Company, Heilongjiang 163412, China)

Abstract: Water injection is the most widely used option in oil field exploitation. In this paper, via experiments, the slop analysis used in water injection operation was analyzed to find the reason of slop analysis invalidation. In addition, the regulation of nozzle pressure loss related to water flux was also acquired in experiments. On the basis of these studies, considering arbitrary well network model, the relation between downhole pressure of injection layer and flux was deduced. As a result, a new method called transient slope analysis was proposed, which aimed to meet the requirement of water recovery and had a reasonable cost on water injection. This method is proved to be accurate, simple and reliable via experiments. By applying this method, the intensity of flow adjustment is relieved and the working time is shortened.

Keywords: injection well; transient slope analysis; flow adjustment; nozzle optimization; pressure loss of nozzle