

国外完井技术丛书

7

WAN JING

PING JIA

完井评价

石油工业出版社

26716

15257  
006

国外完井技术丛书 7

# 完井评价

K.H.赖布 等著

凌开元 等译



00280938

5962104



200396286

石油工业出版社

## 内 容 提 要

完井评价对于获得准确的资料、优化油井设计方案和完井程序以及油田开发方案，从而获得最大的经济效益是很有意义的。

本书收集了11篇有关完井评价方面的文章，论述了各种因素（地层流体侵入、射孔问题等）对油井生产能力的影响。介绍了分析生产油层、确定最佳开采方案的方法。本书的评价方法有经济上的也有技术上的，有理论上的也有实践上的，比较全面。

本书可供油田技术人员、管理人员以及研究人员使用，也可供有关院校师生参考使用。

国外完井技术丛书 7

## 完 井 评 价

K.H.赖布 等著

凌开元 等译

\*

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东里四甲38号)

煤炭出版社印刷厂排版

河北涿县范阳印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

\*

787×1092毫米 32开本6<sup>3</sup>/<sub>4</sub>，印张145千字印1—1,200

1986年11月北京第1版 1986年11月北京第1次印刷

书号：15037·2633 定价：1.25元

## 出 版 说 明

美国石油工程师学会根据其历届会议所发表的论文按照内容收集成册，出版了一套专论丛书，其中完井技术方面有三本（*SPE REPRINT SERIES WELL COMPLETION*, No. 5.5a—I、5a—II）。结合我国石油工业的需要，为了方便读者，我们根据这三本书的内容，分册翻译出版了这套《国外完井技术丛书》，其中包括：

1. 完井液
2. 固井
3. 防砂
4. 完井酸化压裂
5. 射孔
6. 完井设备
7. 完井评价

## 目 录

水锁油井的生产特性·····	1
趋肤效应及其对油井生产能力的影响·····	16
限制地层流体流入井内对油井生产能力的影响·····	36
井眼周围具有变蚀层及有限孔道时油井的假稳定状 态流动生产能力·····	45
射孔问题包括部分完井和生产层污染引起油井生产 能力下降的评价·····	68
生产测井是使油(气)井生产特性最优化的关键·····	85
用中子寿命测井法分析生产油层·····	108
多层系气田开发方案的最优化·····	127
全面而又简单的修井经济评价·····	143
优选油层酸化处理的经济效益·····	158
根据续流控制的压力恢复数据求得井筒的流动系数··	178
附录 单位换算系数表·····	207

## 水锁油井的生产特性

K.H.Ribe 著 凌开元 译

钱振禾 校

### 引 言

在修井作业中，水可能从井筒进入油层。当油井恢复生产时，原油必须通过水侵区。(这个水侵区能造成油井生产能力和采油速度的下降，并且油井在最初生产的一段时间里，原油含水率高。这种情况就叫做水锁。)水进入油层有可能造成一些其他影响，这些影响也会导致油井生产能力的下降，这些影响通常也包括在水锁这个广义术语之中。例如：常常有可能因地层中的粘土与淡水接触而引起膨胀，也会造成地层中的原油乳化。如果推测到有这些特殊的影响的话，通常采取的补救处理办法是注入含有化学剂的原油。由于水的侵入，即使对地层或原油没有化学作用，也会引起暂时的水锁，这种情况也可能被误认为油井发生了更严重的问题。估计地层水锁程度和持续时间是很重要的。引起这些问题的原因纯粹是由于井筒附近原油的相对渗透率下降所致。估算注入原油对水锁井生产能力的影晌也是有益的。如果这种不利的情况持续一段时间，有可能导致修井作业失败或使具有产能的油层过早地报废。

本文通过解出Buckley-Leverett方程的径向式，对水侵后相对渗透率改变而造成的对原油生产能力的影响作了大

量的估算，计算了井筒周围水侵后饱和水的分布，还进行了恢复生产期水饱和分布的模拟计算。在清除侵入水的任何阶段，如果了解水饱和分布情况就能计算出水侵引起的原油生产能力的损失量。

相对渗透率关系的影响同样可通过两个假设情况计算来进行评价。还有，油水粘度比的影响可以用同样的相对渗透率对几组等比和优比的油水粘度进行重复计算而确定。最后，得出的结果表明，油井排出侵入水和恢复生产所需的时间取决于该井受水侵时间的长短。

## 理论阐述

### 微分方程

假设水进入一个原生水饱和的不含气体的原油生产层，并且油和水都认为是不可压缩的，且该生产层厚度小到可以忽略，由于重力所引起的油水接触前沿的滑移，假设这种流动是径向的，因此只有一个量纲。忽略毛细管效应，再假设侵入水与地层物质没有化学反应，所有的流动，无论是进还是排，都认为是由作用在井筒半径 $r_w$ 与排泄半径 $r_e$ 之间砂粒上的压差所引起的。这个压差在离开井筒足够远的地方消除，那里水饱和度不受水的侵入而改变。在这些条件下，Buckley-Leverett方程才能推导成径向座标。

$$\left(\frac{\partial f}{\partial r}\right)_t = \frac{df}{ds} \left(\frac{\partial S}{\partial r}\right)_t = \frac{-2\pi r \phi h}{q} \left(\frac{\partial S}{\partial t}\right)_t \quad (1)$$

式中  $S$ ——水饱和度；  
 $\phi$ ——孔隙度；  
 $f$ ——液流中含水的分数（只是 $S$ 的函数）；  
 $q$ ——总流量（不受半径 $r$ 的影响，以流出井筒为

正值)；

$h$ ——油层厚度 (是常数)。

因为方程 (1) 的解必定具有  $F(S, r, t) = 0$  的形式, 因此也遵循下式:

$$\left(\frac{\partial S}{\partial r}\right)_t \left(\frac{\partial r}{\partial t}\right)_s \left(\frac{\partial t}{\partial S}\right)_r = -1 \quad (2)$$

于是, 若  $f' = \frac{df}{dS}$ ,

$$\text{则 } \frac{qf'}{\pi\phi h} = 2r \left(\frac{\partial r}{\partial t}\right)_s = \left(\frac{\partial r^2}{\partial t}\right)_s \quad (3)$$

这是方程的半径表达式。在方程 (3) 中  $q$  不需要与时间无关。实际上, 本文采用的条件是  $P_{wb} - P_c$  定义为  $\Delta P$ , 是个常数,  $q$  与  $\Delta P$  的关系如下:

$$q = -2\pi kh r \left(\frac{\partial P}{\partial r}\right)_t \left[ \frac{k_{rw}}{\mu_w} + \frac{k_{ro}}{\mu_o} \right] = \frac{2\pi kh \Delta P}{\mu_o I} \quad (4)$$

式中  $k_{rw}$  和  $k_{ro}$  是水和油的相对渗透率,  $\mu_w$  和  $\mu_o$  分别是水和油的粘度,  $I = \int_{r_w}^r \frac{f}{k_{rw} r} dr$ 。

### 差分方程

方程 (3) 在  $q$  为常数时可以用文献 [1] 和 [2] 中任何一个方法进行直接积分。这个积分过程大体上包括把  $\left(\frac{\partial r^2}{\partial t}\right)$  解释为速度的度量, 以这个速度, 饱和度  $S$  从井筒向外扩展。利用给定的初始饱和度分布  $S(r, 0)$ , 就可以作出如下的假设: 如果发生了水侵, 高于井筒四周现存饱和度的任何饱和度都将自由地从井筒向外围扩展, 当时间为  $t$  时, 可以通过把每个饱和度  $S(r, 0)$  转化为一个相应的位置  $r_s(t) =$



$\sqrt{\frac{qf(s)t}{\pi\phi h} + r_{wb}^2}$ ，而得到 $S(r, t)$ 。在水侵过程中，置换特征是前沿移动，这个前沿截止饱和度为 $S_F$ ，并满足下列关系式：

$$f_F' = \frac{f_F}{S_F - S_c} \quad (5)$$

式中 $S_c$ 为原始水饱和度。

对于这个过程， $\Delta P$ （不是 $q$ ）是常数，在任何时候，体积流量计算必须由一系列常数流量计算来决定。在计算中， $q$ 值可从方程（4）右边的式子求得，方程（4）是对使用给定的 $\Delta p$ 来求 $I$ 值的近似数学求积式。这个 $q$ 值在一个时间间隔内被认为是常数，在这个时间间隔的终点，便可计算出相应的新的饱和度分布。按步骤应用这个程序，可以用给定的 $\Delta P$ 值、总的和相对的渗透率值、液体粘度值及排泄半径和井筒半径值求出 $S(r, t)$ 和 $q(t)$ 两个数值。

#### 程序的步骤组成

水的注入情况 应用程序考虑了 $S$ 轴，此轴从 $S_c$ 延伸到 $S_r$ ，并分成 $N$ 个 $\Delta S$ 等分。 $S_i$ 是相应的残油饱和度， $S_i$ 这个符号代表 $S$ 之值。当时间为 $t_n$ 时， $S_i = i\Delta S + S_c$ 而 $t_n = \sum_{m=1}^n \Delta t_m$ 。

当时间为0时，所有的 $S_i$ 所对应的半径 $r_i$ 都可认为是井筒半径 $r_{wb}$ 。最初 $q$ 值是假定时间间隔为 $t_1$ ， $q$ 则由 $q_1$ 来表示，从方程（4）计算出来的。方程（4）中的 $I$ 就变成了 $I = \frac{\mu_o}{\mu_w k_{r,oo}} \ln \frac{r_s}{r_{wb}}$ 而 $k_{r,oo}$ 是与原生水饱和度相应的数值。取时间间隔 $\Delta t$ ，每个饱和度在半径方向上的运动由下式来计算：对于 $n=0$ 的情况，为

$$r_{i,n+1} = \sqrt{r_{i,n}^2 + \frac{q_{n+1} f'_{i,n} \Delta t_{n+1}}{\pi \phi h}}, \quad i=0, 1, \dots, N \quad (6)$$

式中  $r_{i,n+1}$  是半径, 对于这个半径, 在时间为  $t_{n+1}$  时, 相应于  $S_i$  的饱和度已经转换完成。方程 (6) 为方程 (3) 的近似方程。

前沿运动和饱和度  $S_F$  可以用一个相似数学方程 (5) 来求出, 对于  $n=1$  时的情况, 可写成:

$$f'_{j_n} = \frac{j_{j_n}}{S_{j_n} - S_c} + \varepsilon_n \quad (7)$$

式中  $j_n$  是一组  $i$  中的一项, 可减小  $|\varepsilon_n|$  的误差值, 这是因为在数值不连续的  $S_i$  项中, 前沿值  $S_{F_n} \approx S_{j_n}$  的缘故。通过应用方程 (6) 和 (7), 当  $n=1$ , 从方程 (4) 中求出  $q_1$ , 一组新的  $r_i$  数值就可以求出。同样, 前沿饱和度  $S_{F_n} \approx S_{j_n}$  也可求出, 此饱和度可以决定截止半径  $r_{j_n}$ 。对于  $r > r_{j_n}$  的情况, 地层不受干扰, 饱和度为  $S_c$ 。

现在有必要获得另一个  $q$  的近似值  $q_2$ 。这必须由相似方程 (4) 来决定。对  $n=1$  时, 可近似得出  $I$  的积分,

$$I_{n+1} = \sum_{i=j_n}^N \frac{f_{i,n}}{k_{rw,i,n}} \ln \frac{r_{i+1,n}}{r_{i,n}} + \frac{\mu_0}{\mu_w k_{r00}} \ln \frac{r_0}{r_{j_n}} \quad (8)$$

$q_{n+1}$  的值由方程 (4) 求出为

$$q_{n+1} = \frac{2\pi k h \Delta P}{\mu_w I_{n+1}} \quad (9)$$

从方程 (9) 求出的  $q_2$  之值现在可以代入方程 (6) 来计算一组新的  $r$  值。那末方程 (7) 就能再次用来决定新的截止值。方程 (6)、(7) 和 (9) 的连续应用将形成对水侵过程中发生变化的完整描述。

在水侵期结束之后, 也就是说, 当时间为  $t_b$  时, 反向流

动便形成。在 $n=k$ 时，就可以知道 $r_{i,k}$ 和截止值 $S_{j,k}$ 和 $r_{j,k}$ 。在形成反向流动时，由于 $\Delta P$ 改变了符号，根据方程(9)， $q_{k,n}$ 的符号也要作相反的改变，而且 $r_i$ 便要向井筒回缩。方程(6)的关系式应继续描述饱和度的变化。然而，方程(7)的前沿运动计算必须加以修正。

在此，考虑图1中曲线的问题是有帮助的。图中 $S$ 对 $r^2$ 的曲线表明在时间为 $t_k$ 时的水侵过程中形成了对应于上曲线的饱和度分布。这个分布以前沿为终止点，在此点， $S$ 值突然变为 $S_c (= S_0)$ 。从时间 $t_{k+1}$ 开始应用方程(6)，得到一组 $r_{i,k+1}$ 数值，形成包络线，如图1中的下曲线所示。很清楚，在这个封闭区的回盖部分，三个饱和度对应着一个 $r$ 值。这是与这个水侵问题有关的前沿运动引起的。前沿的位置和数

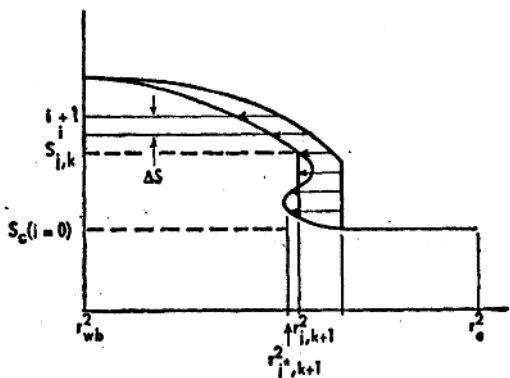


图1 半径离开井筒中心线的距离的平方 $r^2$

值可以通过综合分析推导出的关系式来求得。这个关系式便是方程(5)。对于在三值区的一个 $r$ 值称为 $r_F$ ，在时间为

$t_{k+1}$ 时所示的前沿位置，这个关系式必须对由 $S_F$ 和 $S_F^*$ 所给定的 $S$ 极值保持这种关系

$$f'_F = \frac{f_F - f_F^*}{S_F - S_F^*} \quad (10)$$

式中 $f^* = f(S^*)$ ，对应于方程(7)，方程(10)的相似形式为

$$f'_{j_n} = \frac{f_{j_n} - f_{j_n}^*}{S_{j_n} - S_{j_n}^*} + e_n \quad (10a)$$

式中 $j_n^*$ 定义为 $i$ 值，对应于这个 $i$ 值， $|r_{j_n} - r_{j_n}^*|$ 是最小值，并且 $j_n$ 是一组 $i$ 值的一项，对于这组 $i$ ， $|e_n|$ 为最小值。求解 $r_{i, k+1}$ 便变成在 $i = 0, 1, \dots, j_{k+1}^*$ ， $r_i = r_{j_{k+1}}$ 以及 $i = j_{k+1}^* + 1, j_{k+1}^* + 2, \dots, j_{k+1}$ ，还有 $i = j_{k+1} + 1, j_{k+1} + 2, \dots, N$ 时，由方程(6)给出的解。

当 $n > k$ 时，由 $t_n$ 时的分布来计算 $q_{n+1}$ 值必须要对 $I_{n+1}$ 的数学近似值稍加变化。对于 $n > k$ 的条件，可以将 $j_n$ 代入方程(8)得到

$$I_{n+1} = \sum_{i=1}^N \frac{f_{i,n}}{k_{rwi,n}} \ln \frac{r_{i+1,n}}{r_{i,n}} + \frac{\mu_o}{\mu_w k_{r00}} \ln \frac{r_e}{r_{j_n}}, \quad n > k \quad (11)$$

对于 $j_n^*$ 到 $j_n$ 的间隔，总分布为0。

使用方程(11)来计算方程(9)中的 $I_{n+1}$ ，重复应用方程(6)，(10a)和(9)，便可以预计一个完整的水侵过程。在下面的几个实例中将应用这种方法。油的注入情况如果有大量的水进入地层，经过时间 $t_w$ 后开始注油直至时间 $t_k$ ，计算过程必须再次修改。在 $r_{wo}$ 点，对于 $t > t_w$ 的情况，则 $S$ 回定为 $S_r$ ，方程便可再次用来计算饱和度的运动。在此，两个前沿运动是可能的，水侵继续前进，紧接着油注入地层，要计算这两个前沿运动必须分别写出方程(10)的相似

式，也有可能发生前沿相重叠的现象。这种情况的方程可以省去，因为这两个方程是基本程序的逻辑推导。

### 情况讨论

为了确定相对渗透率的影响，对两个假设的相对渗透率函数进行了计算，这个计算分别表示在图 2 和图 3 的情况 A 和情况 B 中。为了讨论粘度比的影响，用情况 A 的相对渗透性对几组不同的等比和优比的粘度比  $\mu_o/\mu_w$  进行了计算。

为了进行这些计算，假设从水进入地层时开始就有一个压差  $\Delta P$  存在于  $r_{wo}$  (0.25 英尺) 与  $r_e$  (660 英尺) 之间，这个压差保持等值时间为  $t_k$ 。这样便得到一个水侵淹井的近似条件。在时间  $t_k$ ， $\Delta P$  的符号相反变化，因而假设在与水侵引起

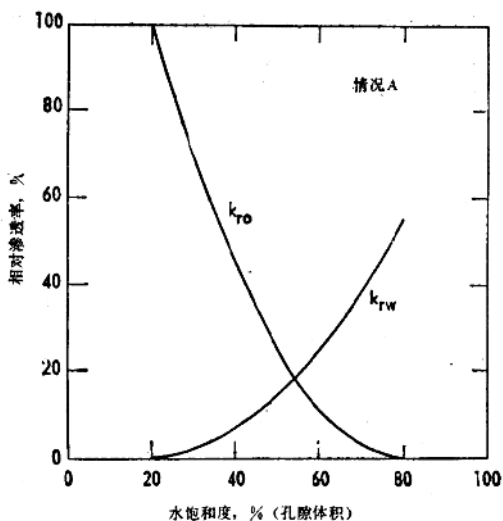


图 2 相对渗透率关系

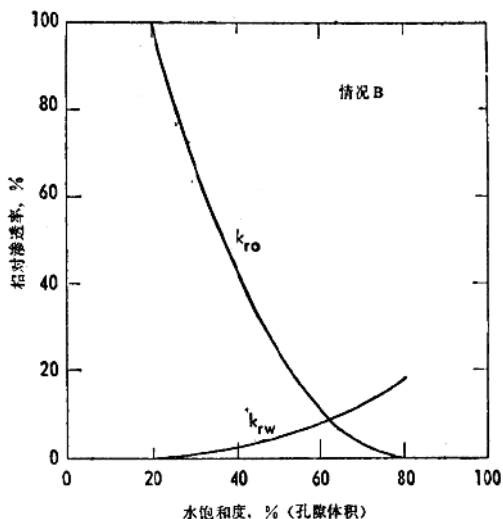


图 3 相对渗透率关系

的 $\Delta P$ 数值相同的压差下，形成向井筒的回流。这种情况近似于从井筒向外泵水，使液面降至某一特定高度。如果结果是以总流量为考虑基础，那末假设 $\Delta P$ 为常数是没有什么意义的。

大多数情况都选择水侵地层，直到前沿半径大约为井筒半径的80倍（也就是20英尺）为止。有一个砂层，它的孔隙率为0.25，水侵后在前沿之后平均饱和度变化为0.5，这个数值相当于每英尺地层6桶水。对于没有注油的情况，可从起始条件出发直接进行计算。油井的生产特性对于注油的情况，在计算此油井的生产特征之前，向地层注入了三倍于侵入水体积的油。最后，为了评价注入油的影响，还是使用情

况A的相对渗透性，根据几组粘度比进行了一些附加的计算，在这些计算中，注入液的总体积是不同的。

### 结果解释

饱和度分布和生产率 上面已把所介绍过的程序应用于所有的情况来计算饱和度曲线，如图4所示。这些曲线是注入水回流、恢复生产的几个阶段，假设的条件是情况A的相对渗透率和粘度比为1。图示曲线是刚好在恢复生产前的饱和度分布，就在这个时间，原油流进井筒，最终达到侵入水清除。水的清除程度用 $Q_{wb}$ 的分数来表示， $Q_{wb}$ 是侵入水的总体积。

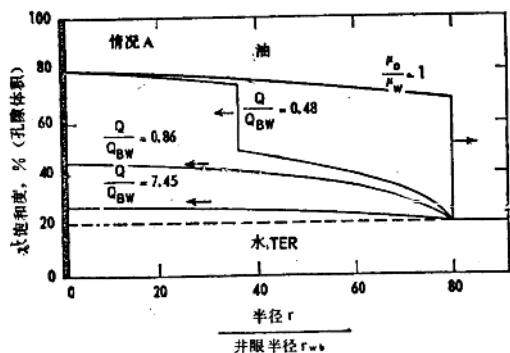


图4 清除前和清除过程中侵入水的分布

这种情况产量下降表示于图5中，下降用生产过程中计算出来的流量比来表示，这种流量比应在只有原生水存在的情况下，根据相同的压力降而获得。此流量比用百分数来表示，在图中这个百分数与累积排出水与侵入水体积之比值成对应的关系。图6和图7中类似的曲线表明了情况B的相对

渗透率（粘度比也是等于1）和情况A的相对渗透率（粘度比为10）的产量比。图5、6、7的重要特点如下：

1. 在采油前必须清除大量的水。
2. 在粘度比为1前提下，相对渗透率函数图形对结果的影响不大。
3. 必须产出相当于侵入水体积许多倍的井液之后，油井才能达到最高产量。
4. 在产出总量比低粘度比的井少得多的情况下，高粘度比的油井才能完全恢复生产。

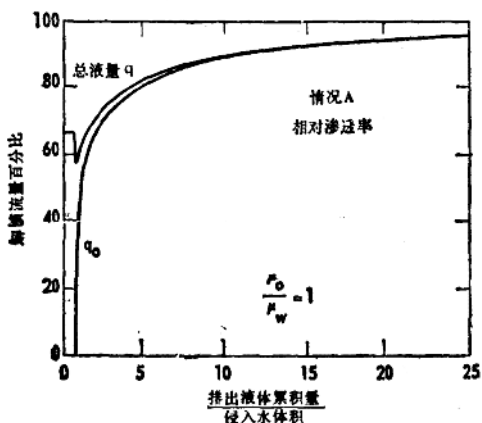


图 5 水锁油井的流量

图 8 表示了注油处理影响原油生产的相似曲线。对于情况 A 相对渗透率和粘度比为 1 的油井，这个曲线表示了注油处理和非注油处理两种情况下原油产量降低的比较。这个比较的一个相当惊奇的特点是，注油处理之后，开始产量相当高，但是却迅速下降，直到低于没有进行注油处理的油井的。



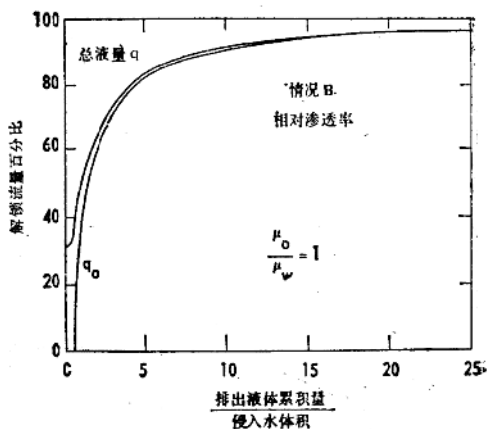


图 6 水锁油井的流量

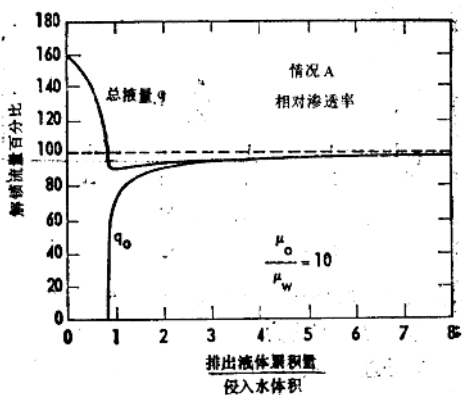


图 7 水锁油井的流量