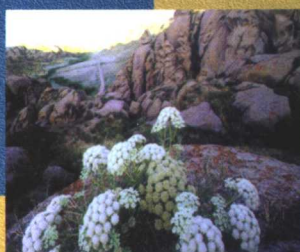


SHAYANYOUTIANSHUIJIKUAKAIFAYANGJIJUMENJ

砂岩油田水驱开发研究文集



主 编
李士奎 朱 焱

石油工业出版社

砂岩油田水驱开发研究文集

李士奎 朱 焱 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书收录了刊载在《大庆石油地质与开发》上的 55 篇有关多层非均质砂岩油田水驱开发研究的论文,其主要涉及产量递减规律、水淹特征、开发指标预测、动态分析方法、合理压力界限、剩余油分布、注采系统调整、井网加密及经济极限井网密度等研究内容,既是应用性文章,也不乏在基础理论方面的研究。

本书可供从事油气田开发专业技术人员及大专院校师生阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

砂岩油田水驱开发研究文集/李士奎等主编.

北京:石油工业出版社,2004.7

ISBN 7-5021-4691-1

I. 砂…

II. 李…

III. 砂岩油气田-水压驱动-油田开发-文集

IV. TE343-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 053322 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

总 机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京华正印刷厂印刷

2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 18.25

字数: 490 千字 印数: 1-1000 册

书号: ISBN 7-5021-4691-1/TE·3271

定价: 40.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

约翰·巴罗在《不论科学的极限与极限的科学》一书中这样写道：“科学成就来自对表面上复杂的自然进行细微的观测和优雅的简化，从而揭示其内在的简单性。而我们所犯的错误却又常常是因为对现实的过度简化，接着发现它远比我们所认识的要复杂。”

油田开发的前提是必须详尽地了解储油层的结构、性质与空间分布，必须清楚原油性质及其在储集层中的分布和渗滤特征。自 1859 年人类开始钻井开发油田以来，至今上述问题仍未取得令人满意的解决。俄罗斯学者 M. Л. 苏尔古切夫认为：“油藏结构的复杂性难以想象”，看来，这种看法是很有道理的。原油不均匀地浸透在致密的多孔砂岩之中，含油气层中不规则地分布着厚度不同的非渗透的透镜体、薄层和夹层……。而评价原油储量计算和进行开发设计所需要的地质模型又是在数量有限的一些井中获得的少量资料基础上建立起来的，也就是说，专家们并没有完全掌握油层的定性特性和储量的准确性，致使油田开发效果和水平出现了千差万别。特别是在油藏的采油过程不能以直接方法得到直接监控，因而，人们对各种因素对油田开发效果的影响程度、油田开发的最佳条件和合理开发方式有着不同的认识和解释。

砂岩油田注水开发始于 19 世纪 40 年代，其对油层的作用机理和实施条件而言，虽然较为简单，但在注水后残余油的空间分布状况及其影响因素等方面仍存在许多有争论的问题，鉴于此，在中国科学院长沙大地构造研究所攻读博士期间，我们将刊载在《大庆石油地质与开发》上的有关砂岩油田水驱研究的论文选编成册，其内容几乎涉及到了水驱过程中所遇到的各种问题。论文中所阐述的理论与观点，无论您认为正确的还是存有问题的，相信，对于您深入了解某类问题的研究历史与现状或在此基础上做进一步研究都是有益的。

限于水平，选编中难免挂一漏万，敬请批评指正。

编 者
2004 年 3 月

目 录

油田产量递减规律的研究	王俊魁 (1)
低渗透率夹层对厚油层水淹特征的影响	李保树 (10)
大庆油田开发动态分析方法	陈元千 (20)
多层压力恢复曲线理论研究及其在矿场中的应用	齐与峰 史久浩 孙长明 (29)
油田自喷井的井底流压计算方法	陈家琅 韩洪升 王学孔 (40)
钻加密井产量下降预测方法	王家宏 (50)
高含水期分层调整中的几个问题	金毓荪 袁庆峰 陈永生 (55)
高含水期井网加密调整问题的研究	田宝成 张宝胜 (70)
关于非均质油层吸水能力影响因素的研究	宋 永 (75)
大庆油田注水开发矿场试验研究	张景存 马志元 王 逊等 (81)
抽油井合理压力界限的确定	董富林 王俊魁 (85)
油井转抽后的开发效果	刘春发 袁铁燕 (91)
试论陆相砂岩大油田的开发模式	金毓荪 袁庆峰 罗昌燕等 (98)
大庆油田高含水期注采及压力系统优化方法	彭鹏商 张宝胜 王者琴等 (108)
喇嘛甸油田萨尔图油层剩余油分布特征	于洪文 勾燕生 刘富余等 (116)
流动压力低于饱和压力油井的生产能力变化规律及其应用	石成方 任玉林 徐彦龙 (123)
累积概率分布曲线的一个应用	赵永胜 高泽礼 陆惠民 (131)
喇、萨、杏油田加密调整的经济极限井网密度研究	杨玉哲 (134)
喇、萨、杏油田注采系统调整的研究和探讨	周学民 隋新光 刘端奇等 (141)
油田储采比合理界限与产量递减趋势的预测	王俊魁 (147)
喇、萨、杏油田高含水期稳产条件分析	任玉林 陈鲁含 (153)
对大庆油田高含水后期开发工作的几点认识	巢华庆 (159)
用于累积量预测的加性噪声指数模型	张四平 赵永胜 黄伏生等 (165)
大庆长垣南部油田周期注水的做法及效果	李忠荣 邵宪志 (171)
高含水后期油井堵水原则界限研究	周学民 刘端奇 张同玉 (175)
三种常用面积注水井网的比较与选择	王俊魁 王书礼 (179)
喇、萨、杏油田隔层应用条件研究	刘春林 宋 永 薛海燕等 (183)
注采动态连通关系的确定方法	沈长志 李和全 杨俊华 (187)
对萨北套损区更新加密调整试验的认识	曹鸿梅 杨树宝 任继荣等 (191)
分层含水和压力预测的劈分解析法	钱德富 宋考平 章成识 (195)
不稳定流条件下油井地层压力与分层压力关系的一个差分模型	李和全 姜淑卿 (200)
油水两相径向稳定渗流条件下的压力分布及其产量变化特征	计秉玉 (204)
注水开发油田稳产界限研究	刘春林 杨玉哲 张永庆等 (207)

低渗透油田水平井产能预测方法研究	郑俊德	魏兆胜	陈家琅	(210)
密闭取心检查井岩心水淹判断方法研究	魏国章	张宝胜		(215)
喇、萨、杏油田高含水后期二次加密调整的实践与认识	李士奎	程保庆	朱丽红	(221)
水驱砂岩油田可采储量的一种预测模型	朱 焱	张四平	刘文钰	(226)
油井脱气后脱气半径、地层压力分布及平均地层压力的求法	田晓东	计秉玉	吴晓慧	(230)
喇、萨、杏油田生产气油比的变化规律	赵永胜	张善严	朱 楠	(233)
油、水同层产水率计算方法	林景晔	黎 文	周宏敏	(238)
萨尔图、喇嘛甸油田分层注水强度分布规律研究		王家宏		(241)
高含水期砂岩油田细分注水最佳分级模拟研究	黄伏生	朱 焱	李士奎	(246)
油田老井压裂潜力确定方法研究	周学民	华方奇	孔祥亭等	(249)
油田开发指标预测方法综述		计秉玉		(252)
采油井合理井底压力界限的确定方法	王俊魁	王春瑞	方 亮	(257)
喇、萨、杏油田表外储集层动用状况及动用途径	林 影	麻成斗	郭玮琪	(260)
特低渗透油藏可动油的测量及应用	孙庆和	何 玺	林 海等	(264)
喇嘛甸油田葡 I 1—2 油层粘土调剖试验	孙晓军	段生发	刘文岭	(268)
油田加密调整经济合理井网密度的确定	钱深华	李永伏	袁成章	(273)
多层砂岩油田水驱开发的合理注水压力	赵永胜	陆蔚刚	兰玉波	(278)
喇、萨、杏油田表外储集层动用机制分析	朱 焱	兰玉波	李 强	(283)

油田产量递减规律的研究

王俊魁

(大庆油田科学研究设计院)

摘 要 从产量递减率微分方程出发,严格推导了产量递减的3种基本规律,即指数递减、调和递减和双曲线递减。从理论上证明了产生调和递减的条件以及影响初始递减率的因素,并用图版法简便地确定了计算公式中的常数项,使本方法更便于在矿场中推广应用。文中还用大量的实际资料检验了应用产量递减曲线预测油田开发动态指标的准确性,并对油田已出现综合递减的区块进行了预测。

1 产量递减规律的数学分析

在油田开发过程中,随着地下可采储量的减少,产量总是要下降的,在油田高产稳产期结束后,产量将以一定的规律开始递减,通常用递减率表示产量的递减速度。递减率是指在单位时间内产量递减的百分数。根据矿场实际资料的统计分析,可以把递减率表示成下述的形式

$$D = - \frac{dq}{qdt} = Kq^n \quad (1)$$

式中 D ——产量递减率(小数);

q ——产量或采油速度;

n ——递减指数 ($0 \leq n \leq 1$);

K ——比例常数;

式中的负号表示随开发时间的增长产量是下降的。

现在由式(1)出发来分析产量递减的基本规律。

1.1 产量随时间的变化关系

将式(1)分离变量,并代入边界条件

$$- \int_{q_i}^{q_t} q^{-(n+1)} dq = K \int_0^t dt$$

对上式两端进行积分则得

$$\frac{1}{n} \left[\left(\frac{q_t}{q_i} \right)^n - 1 \right] = K q_i^n t \quad (2)$$

由式(1)知,

$$K q_i^n = D_i$$

将上式代入式(2)得

$$\frac{1}{n} \left[\left(\frac{q_t}{q_i} \right)^n - 1 \right] = D_i t \quad (3)$$

式中 q_i ——递减初始产量;
 q_t ——递减后 t 时刻产量;
 D_i ——初始递减率。

当递减指数 $n=0$ 时, 由式 (1) 得

$$-\int_{q_i}^{q_t} d(\ln q) = K \int_0^t dt$$

两端积分后得

$$\ln = \frac{q_i}{q_t} = Kt$$

由式 (1) 知, 当递减指数 $n=0$ 时, $K=D_i$, 将 K 代入上式得

$$\ln = \left(\frac{q_i}{q_t}\right) = D_i t \quad (4)$$

当递减指数 $n=1$ 时, 由式 (1) 得

$$-\int_{q_i}^{q_t} \frac{dq}{q^2} = K \int_0^t dt$$

两端积分后得

$$\frac{q_i}{q_t} - 1 = Kq_i t$$

由式 (1), 当 $n=1$ 时, $Kq_i=D_i$, 将其代入上式得

$$\frac{q_i}{q_t} - 1 = D_i t \quad (5)$$

解式 (3)、式 (4)、式 (5), 分别得到

$$q_i = q_i(1 + nD_i t)^{-\frac{1}{n}} \quad (6)$$

$$q_i = q_i e^{-D_i t} \quad (7)$$

$$q_t = q_i(1 + D_i t)^{-1} \quad (8)$$

式 (6)、式 (7)、式 (8) 为产量随时间的变化关系式, 分别称其为双曲线递减、指数递减和调和递减。

应用上述公式可预测递减后任一时刻的产量或采油速度。

1.2 累积产量 (或采出程度) 随时间的变化关系

产量递减后, 在时间 t 内的累积产量为

$$Q_i = \int_0^t q_i dt \quad (9)$$

将式 (6) 代入式 (9) 得

$$Q_t = \int_0^t q_i(1 + nD_i t)^{-\frac{1}{n}} dt$$

对上式积分得

$$Q_t = \frac{q_i}{(n-1)D_i} \left[(1 + nD_i t)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (10)$$

同理, 将式 (7) 代入式 (9), 并积分得

$$Q_t = \frac{q_i}{D_i}(1 - e^{-D_i t}) \quad (11)$$

将式 (8) 代入式 (9), 并积分得

$$Q_t = \frac{q_i}{D_i} \ln(1 + D_i t) \quad (12)$$

式 (10)、式 (11)、式 (12) 分别为产量在双曲线递减、指数递减、调和递减时的累积产量 (或采出程度) 与时间的关系式。应用上述公式可预测任一开发时间的累积产量或采出程度。

1.3 累积产量与瞬时产量之间的关系

由式 (6) 解出

$$t = \frac{1}{nD_i} \left[\left(\frac{q_i}{q_t} \right)^n - 1 \right] \quad (13)$$

将式 (13) 代入式 (10) 得

$$Q_t = \frac{q_i^n}{(1-n)D_i} (q_i^{1-n} - q_t^{1-n}) \quad (14)$$

同理, 由式 (7) 解出

$$t = \frac{1}{D_i} \ln\left(\frac{q_i}{q_t}\right) \quad (15)$$

将式 (15) 代入式 (11) 得

$$Q_t = \frac{1}{D_i} (q_i - q_t) \quad (16)$$

由式 (8) 解得

$$t = \frac{1}{D_i} \left(\frac{q_i}{q_t} - 1 \right) \quad (17)$$

将式 (17) 代入式 (12) 得

$$Q_t = \frac{q_i}{D_i} \ln \frac{q_i}{q_t} \quad (18)$$

上述式 (14)、式 (16)、式 (18) 分别为双曲线递减、指数递减与调和递减时的累积产量与产量的关系式。根据上述 3 个关系式可以初步判断油田所属的递减类型。

1.4 3 种递减规律的比较

由式 (1), 当 $t = t_0 + dt$ 时, 得到初始递减率

$$D_i = - \frac{dq_i}{q_i dt} = Kq_i^n \quad (19)$$

而 t 时刻的产量递减率为

$$D_t = - \frac{dq_t}{q_t dt} = Kq_t^n \quad (20)$$

将式 (20) 除以式 (19) 得

$$D_t = D_i \left(\frac{q_t}{q_i} \right)^n \quad (21)$$

由式 (21) 来讨论 3 种递减规律的特点:

(1) 当 $n=0$ 时, 由式 (21) 得

$$D_t = D_i \quad (22)$$

就是说, 指数递减时的递减率为常数, 或称为常百分数递减。

(2) 当 $n=1$ 时, 由式 (21) 得

$$D_t = D_i \frac{q_t}{q_i} \quad (23)$$

可见, 调和递减时的递减率随着产量的下降而减小, 即随着开发时间的推移, 递减速度逐渐减缓。

(3) 当 $0 < n < 1$ 时, 由式 (21) 得

$$D_t = D_i \left(\frac{q_t}{q_i} \right)^n \quad (24)$$

即双曲线递减时的递减率亦随着产量的下降而减小。

由于 $\frac{q_t}{q_i} < 1$, $0 < n < 1$, 因此得

$$\left(\frac{q_t}{q_i} \right)^n > \frac{q_t}{q_i}$$

对比式 (23) 与式 (24) 可以看出, 双曲线递减时的递减率要比调和递减时的递减率大。

由此可得出结论: 产量递减速度主要决定于递减指数 n 与初始递减率 D_i , 在初始递减率相同时, 指数递减时其递减最快, 双曲线递减时次之, 调和递减时较慢。在递减类型一定时, 初始递减率越大, 产量递减越快。

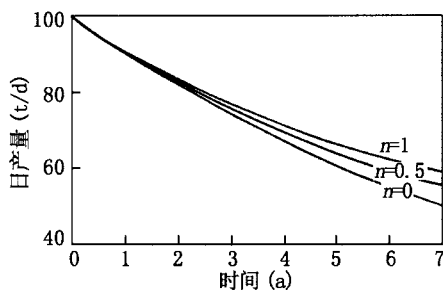


图1 典型递减规律比较曲线

为直观起见, 将3种递减类型的典型曲线示于图1。

在递减初期, 产量 (以下简称初始产量) 为 100t/d , 初始递减率 $D_i = 0.1$, 开发到第7年, 调和递减时的产量降为 58.8t/d , 双曲线递减 ($n = 0.5$) 时的产量降为 54.9t/d , 指数递减时的产量降为 49.7t/d 。说明, 在初产量与初始递减率相同的情况下, 3种递减类型的递减速度是不同的。

(4) 上述各公式是在 $0 \leq n \leq 1$ 的条件下推导出的, 但在递减指数 $n < 0$ 与 $n > 1$ 时, 亦可应用上述公式进行外推计算, 但外推时间不宜过长, 应用时需要注意。实际上, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 存在一种极限情况, 在这种情况下, 由式 (1) 的通解式 (6) 取极限。

$$q_t = \lim_{n \rightarrow \infty} [q_i (1 + nD_i t)^{-\frac{1}{n}}]$$

得到

$$q_t = q_i$$

说明, 油田开发处于稳产阶段, 产量并未递减。

(5) 由累积产量与产量的关系式可以看出, 当产量随时间以指数形式递减时, 累积产量与产量在直角坐标中成直线关系, 其关系式为

$$q_t = q_i - D_i Q_t \quad (25)$$

直线段的截距为初始产量 q_i , 斜率为初始递减率 D_i , 据此, 我们可以判断产量是否以

指数形式递减, 并确定其初始递减率的大小。

当产量随时间以调和形式递减时, 累积产量与产量在半对数坐标中成直线关系, 其关系式为

$$\ln q_t = \ln q_i - \frac{D_i}{q_i} Q_t \quad (26)$$

直线的截距为初始产量的对数值, 斜率为初始递减与初始产量之比。据此, 可以判断产量是否以调和形式递减, 并确定其初始递减率的大小。

当产量随时间以双曲线形式递减时, 累积产量与产量之间的关系为

$$q_t = \left[q_i^{1-n} - \frac{(1-n)D_i}{q_i^n} Q_t \right]^{\frac{1}{1-n}} \quad (27)$$

可以看出, 两者之间的关系较为复杂。下面将用图解法来确定上述 3 种递减类型与初始递减率。

1.5 递减指数与初始递减率的初步探讨

由前述分析知道, 影响产量递减规律的主要因素是递减指数与初始递减率, 对于具体油田或油井来说, 这两个参数一经确定, 产量递减规律也就确定了。

由两相稳定流的达西公式可以推导出

$$V_o = \frac{V_L}{1 + e^{\frac{1}{B}(R_o - A)}} \quad (28)$$

式中 V_o 、 V_L ——采油速度与采液速度, %;

R_o ——采出程度, %;

A 、 B ——与岩石流体性质有关的常数, 可通过水驱特征曲线直线段的截距和斜率得到。

对式 (28) 两端取对数, 并考虑到 $V_L = V_o + V_w$, 经整理后得到

$$\ln V_o = \ln V_w + \frac{A}{B} - \frac{1}{B} R_o \quad (29)$$

式 (29) 表明, 当采水速度相对稳定时, 采出程度与采油速度在半对数坐标中成直线关系, 与式 (26) 的结论完全一致。这一点已为油田开发实践所证实。例如小井距试验区 501 井葡 I 1-2 层, 在注水开发试验过程中, 油嘴由 4mm 逐渐放大到 12mm, 放大油嘴后的产量与采出程度基本属于上述关系 (图 2)。同时, 由图 3 可以看出, 当产量与采出程度在半对数坐标中呈直线关系时, 采水量随采出程度的变化基本上是稳定的, 这种情况说明, 调和递减 ($n=1$) 只有在采水速度相对稳定的条件下才会出现, 因此, 在注水开发的油田上一般是不常见的。

将式 (29) 与式 (26) 进行对比, 在采水速度稳定的条件下将会得到

$$D_i = \frac{1}{B} q_i \quad (30)$$

式中 B ——水驱特征曲线直线段的斜率。

由此我们可以看出:

(1) 初始递减率主要决定于稳产期末采油速度 (q_i) 的大小。稳产期末采油速度愈高, 递减阶段的递减速度就愈快, 反之亦然。

(2) 水驱特征曲线直线段的斜率 B 越大, 即含水率上升越慢, 油田水驱开发效果越好,

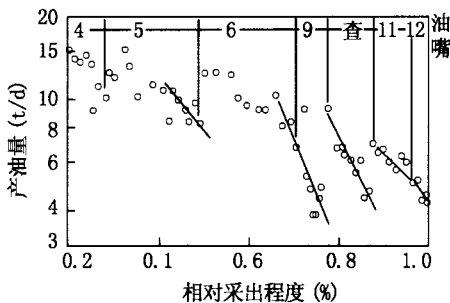


图2 小井距试验区 501 井葡 I 1-2 层
产油量与采出程度关系曲线

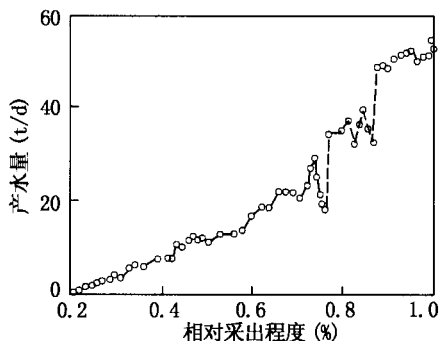


图3 小井距试验区 501 井葡 I 1-2 层
产水量与采出程度关系曲线

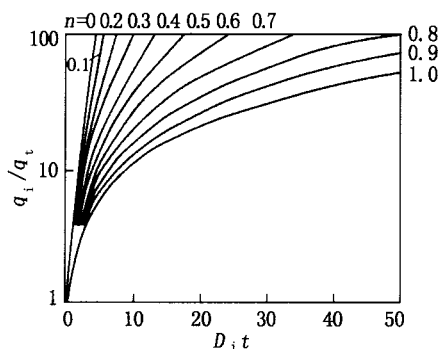


图4 瞬时产量与时间的关系曲线

初始递减率越小，产量递减越慢。

不难看出，初始递减率除了决定于稳产期末的采油速度外，还与油层与原油物性以及开发过程中的综合调整等因素有关。

2 递减类型的判别与初始递减率的确定

在应用上述各公式预测油田开发动态指标时，关键是确定油田的递减是属于哪种递减类型，即确定递减指数 n ，同时确定其初始递减率 D_i 值。

由式 (3)、式 (4) 与式 (5)，以无因次量 $D_i t$ 为横坐标，以 q_i/q_t 为纵坐标，作计算图版 (图 4)。

其次，由式 (14) 及式 (3) 得到另一无因次量

$$\frac{Q_t}{q_t t} = \frac{1 - \left(\frac{q_i}{q_t}\right)^{n-1}}{\left(\frac{q_i}{q_t}\right)^n - 1} \cdot \frac{n}{1-n} \quad (31)$$

由式 (16) 及式 (4) 得到

$$\frac{Q_t}{q_t t} = \frac{1 - \left(\frac{q_i}{q_t}\right)^{-1}}{\ln\left(\frac{q_i}{q_t}\right)} \quad (32)$$

由式 (18) 及式 (5) 得

$$\frac{Q_t}{q_t t} = \frac{\ln\left(\frac{q_i}{q_t}\right)}{\frac{q_i}{q_t} - 1} \quad (33)$$

同样，以无因次量 $Q_t/(q_i t)$ 为横坐标，以 q_i/q_t 为纵坐标，作计算图版 (图 5)。应用上述两张计算图版便可很容易地确定出递减指数与初始递减率。

确定方法如下：

(1) 根据油田产量递减历史, 在普通坐标纸上, 绘出已知的产量递减曲线, 即 $q_t = f(t)$ 关系曲线, 从曲线上确定出下列参数: ① q_i 为初始产量; ② q_t 为递减到 t 时刻的产量; ③ t 为从 q_i 到 q_t 的生产时间 (年、季或月); ④ Q_t 为在 t 时间内的累积产量。

(2) 计算 $Q_t/q_i t$ 与 q_i/q_t 。

(3) 在图版纵坐标上找到 q_i/q_t 值, 在横坐标上查到 $Q_t/q_i t$ 值, 再找到两值的交点, 用内插法确定递减指数 n 值。

(4) 在纵坐标上查出 q_i/q_t 值, 做横坐标的平行线与 n 值相交, 然后由交点做垂线与横坐标轴相交, 得到 Q_t 值。

(5) 已知 t 值, 可求出 D_i 值。

只要做出了计算图版, 应用上述方法确定递减指数与初始递减率, 方法简便, 很容易推广使用。

3 应用产量递减曲线预测油田开发动态指标

当用上述方法确定了油田或油井的递减指数与初始递减率之后, 便可用上面所推导出的公式来预测油田开发动态指标。

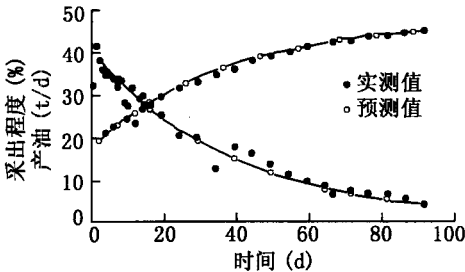


图6 小井距试验区 501 井萨Ⅱ7+8 层
产量递减曲线

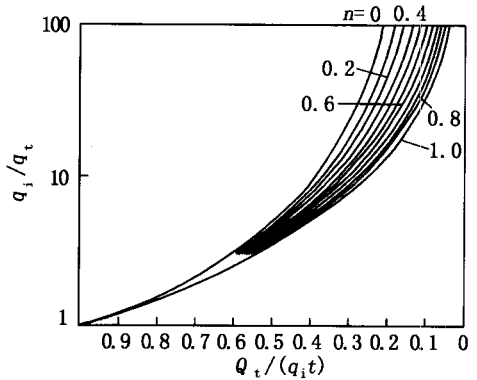


图5 瞬时产量与累积产量的关系曲线

实例1 小井距试验区 501 井萨Ⅱ7+8 层于 1970 年 9 月至 1971 年 5 月进行提高采油速度试验。1970 年 12 月 25 日, 日产油量达到高峰, 以后产量逐渐下降, 其日产量和采出程度变化曲线如图 6 所示。

根据上述方法, 求得 $n=0.3$, $D_i=0.034$ 。

日产量及采出程度计算公式

$$q_t = 41.28 (1 + 0.0102t)^{-3.33}$$

$$Q_t = 51.4355 - 33.5355 (1 + 0.0102t)^{-2.33}$$

将上述公式预测结果与油井实际开发指标进行对比, 可以看出预测值与实际值符合得很好。由于累积量受随机因素影响较小, 其符合程度就更高。例如到 1971 年 3 月 27 日, 油井实际日产油 3.9t, 采出程度 45%, 预测日产油 4.7t, 采出程度 44.2%。

公式所预测的最终采收率为 48.28%, 由试验结果知道, 该层于 1971 年 5 月 19 日试验结束, 油井含水率 98.5%, 累积采油 2503t, 采出程度 48.4%, 预测采出程度与实际采出程度十分接近。

实例2 厚油层开发试验区位于萨尔图油田北三区, 有油井 9 口, 注水井 4 口, 试验于 1975 年 3 月开始, 至 1978 年 6 月结束, 1975 年 10 月产量达到高峰, 此后开始下降。产量递减曲线如图 7 所示。其为双曲线型递减, 递减指数 $n=0.5$, 初始递减率 $Q_i=0.1194$ 。

月产量及累积产量计算公式如下

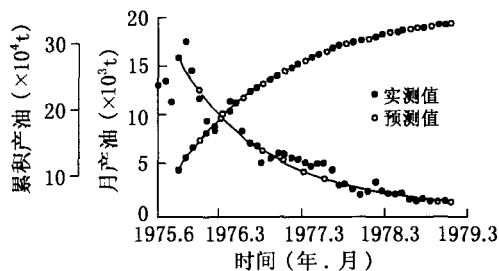


图7 厚油层试验区产量递减曲线

月产量及累积产量计算公式如下

$$q_t = 2369 (1 + 0.07t)^{-2.1739}$$

$$Q_t = 4.1649 - 2.8832 (1 + 0.07t)^{-1.1729}$$

公式计算结果与油田开发实际指标均绘在同一坐标图中, 两者亦符合得很好。

在上述3个实例中, 用实际资料对预测结果进行的检验说明, 用产量递减曲线进行动态预测是行之有效的。它无论是对单层、多层、单井还是对开发区均是实用的, 只要产量出现递减后, 便可用计算公式来描述产量的递减规律。

为了进一步说明产量递减曲线在开发实际中的应用, 下面再举几个实际外推的例子。

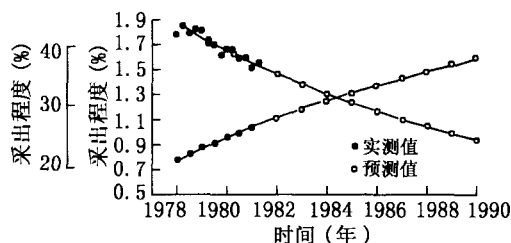


图9 中区东部产量递减曲线

根据上述递减规律对其开采历史进行了很好的拟合, 外推结果表明, 萨尔图油田中区东部按照目前状况开发, 到2000年, 采油速度下降到0.57%, 采出程度达到44.89%, 预测开发区最终采收率为55.98%, 而用水驱特征曲线预测的最终采收率为50.56%, 两者较为接近。

实例5 萨尔图油田南2-5-28井于1977年5月月产量达到高峰, 月产油4602t, 到1981年2月降为2467t, 产量递减曲线如图10所示。递减指数 $n = 0$, 初始递减率 $D_i = 0.01385$ 。

月产量及累积产量变化规律如下

$$q_t = 1.7319 (1 + 0.0597t)^{-2}$$

$$Q_t = 41.89 - 29.01 (1 + 0.0597t)^{-1}$$

由递减曲线亦可看出, 预测值与实际值符合得很好。

实例3 厚油层开发试验区344井于1975年6月月产量达到高峰, 月产油2369t, 1978年9月以后, 进行提高采收率试验, 到1979年9月, 月产油降为87t, 产量递减曲线如图8所示。其为双曲线型递减, 递减指数 $n = 0.466$, 初始递减率 $D_i = 0.1522$ 。

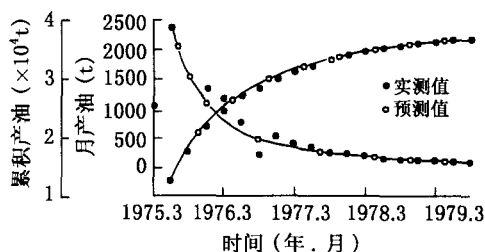


图8 厚油层试验区344井产量递减曲线

实例4 萨尔图油田中区东部在1978年5月至1981年5月的3年时间里, 采油速度由1.85%下降到1.55%, 采油速度递减曲线如图9所示。用图解法确定的递减指数 $n = 0.2$, 初始递减率 $D_i = 0.062$ 。

采油速度与采出程度计算公式如下

$$q_t = 1.85 (1 + 0.0124t)^{-5}$$

$$Q_t = 59.378 - 37.298 (1 + 0.0124t)^{-4}$$

$$q_t = 4602e^{-0.01738t}$$

$$Q_t = 69.12 - 33.23e^{-0.01738t}$$

按照上述递减规律进行预测，该井极限可采储量为 $69.12 \times 10^4 \text{t}$ 。1981 年 5 月累积产量已达 $52.34 \times 10^4 \text{t}$ 。因此，到开发结束，尚能采出 $16.78 \times 10^4 \text{t}$ 的油量。

上述实例说明，稳产期结束后，产量将按照一定的规律进行递减。应用产量递减曲线可以较好地预测油田开发动态指标，其中包括采油速度、采出程度、开发年限及最终采收率。

根据已知的开采历史，用上述方法对全油田出现综合递减的 15 个区块开发动态指标进行了预测，预测结果说明，应用产量递减曲线拟合开采历史和预测动态指标的结果是令人满意的。

鉴于出现递减区块的递减历史较短以及将来采取重大调整措施可能改变目前的递减规律，因此，应在油田的开发过程中不断补充新的资料，修正计算公式中的常数项，以求使预测结果更符合油田开发的实际。

影响产量递减规律的因素较为复杂，除了油藏及流体物性外，还与开发过程中的各种调整措施有关。本文只对调和递减规律出现的条件进行了探讨，对其他类型的递减规律产生的机理还缺乏深入的研究，今后尚需积累更多的实际资料去进行深入研究。

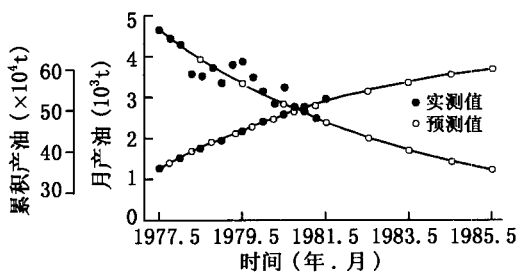


图 10 南 2-5-28 井产量递减曲线

低渗透率夹层对厚油层水淹特征的影响

李保树

(大庆油田科学研究设计院流体力学研究室)

摘 要 文中用数值模拟方法研究了在油层纵剖面内水驱油的运动,重点分析了夹层对厚层水淹特征的影响,给出了一个描述夹层作用的无因次数,最后研究了水淹厚度的变化特征。

1 数学模型简介

计算厚油层内油水运动规律的数学模型是一个专门设计的两维两相模型,用来研究从水井排到油井排的纵剖面内的油水运动。模型中假定油、水和油层岩石都是不可压缩的,同时考虑驱动力、重力和毛管力的作用,油层渗透率在剖面内是任意非均匀分布的。

描述两维剖面内水驱油运动的基本方程式为

$$\left. \begin{aligned} \nabla(-C_w \nabla \phi_w) &= -\phi \frac{\partial w}{\partial t} \\ \nabla(-C_o \nabla \phi_o) &= -\phi \frac{\partial S_o}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$
$$\phi_w = p_w + \rho_w g y, \phi_o = p_o + \rho_o g y$$
$$C_w = \frac{KK_{rw}}{\mu_w}, C_o = \frac{KK_{ro}}{\mu_o}$$

且有

$$S_w + S_o = 1, p_w - p_o = p_c(S_w)$$

式中 p ——压力;

p_o ——毛管压力;

K ——绝对渗透率;

K_r ——相对渗透率;

S ——饱和度;

μ ——粘度;

ρ ——密度;

g ——重力加速度;

ϕ ——孔隙度;

下角标符号“w”和“o”分别表示水和油。

初始条件为

$$\left. \begin{aligned} \phi_w &= \phi_o = \text{常数} \\ S_w &= 0.166 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

边界条件:油层顶和底两面为封闭面,即

$$U_{wy} = U_{oy} = 0 \quad (\text{在顶和底上}) \quad (3)$$

在入口处只有水流入，则全井注水量 Q_w 满足

$$\left. \begin{aligned} Q_w &= - \int_0^{L_y} \left(\frac{KK_{rw}}{\mu_w} \frac{\partial \phi_w}{\partial x} \right) dy \\ S_w &= 0.718, p_c = p_c(0.718) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

在出口端产液量应等于注入量，即

$$Q_w = - \int_0^{L_y} \left(\frac{KK_{rw}}{\mu_w} \frac{\partial \phi_w}{\partial x} + \frac{KK_{ro}}{\mu_o} \frac{\partial \phi_o}{\partial x} \right) dy \quad (5)$$

在出口端有末端效应，所以有

$$\left. \begin{aligned} p_c(S_w) &= p_w(S_w) - p_o(S_w) = 0 \\ \text{当 } x &= L_x \text{ 时} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

对方程 (1) 采用五点差格式，线松弛迭代差分法求解，因为流动系数取早一时间阶段计算值，所以，对井点流量补充一个条件，即在纵向上各节点的流率是按流动系数分配的。

由于忽略了油层倾角，为了处理初始水饱和度的分布，提出了纯油区束缚水饱和度和重力无关的假设，这个假设不仅符合了油田实际，而且给数学模型求解带来方便。用经验系数来考虑垂向渗透率和水平渗透率的差异。

为了检验数学模型，将小井距试验区 and 厚层试验区的资料进行了比较 (图 1、图 2)。比较结果说明，所建立的数学模型完全可以用来研究厚层内的油水运动规律。文中引用算例编号详见表 1。

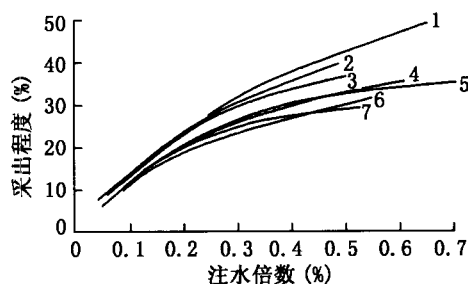


图 1 采出程度与注水倍数关系

1—511 井葡 I 4-7; 2—501 井葡 I 1-2; 3—0.8 均匀模型; 4—501 井萨 II 7+8; 5—厚层试验区; 6—511 井萨 II 7+8; 7—正韵律模型

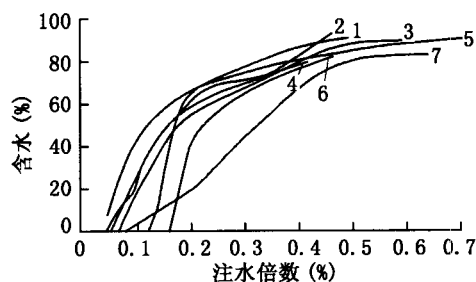


图 2 含水与采出程度关系

1—正韵律模型; 2—501 井葡 I 1-2; 3—501 井萨 II 7+8; 4—511 井萨 II 7+8; 5—厚层试验区; 6—0.8 均匀模型; 7—511 井葡 II 4-7

2 低渗透夹层对厚油层油水运动的影响

开发实践证明，正韵律型厚油层水淹厚度较小，还有大量剩余储量没有动用。研究表明，对具有薄夹层的厚层（一般指复合韵律层）配上适当的开采条件是可以提高水淹厚度的。

2.1 夹层渗透率较低时可能起隔层作用

为了研究夹层渗透率的影响，设计了一组方案（见表 1 中方案 1、7、9、10、11、12）。