

SHAYAN CHUCENG CUANLIU TONGDAO SHIBIE YU ZHILI JISHU

砂岩储层窜流通道

识别与治理技术

王硕亮 主编

石油工业出版社

砂岩储层窜流通道 识别与治理技术

王硕亮 主编



石油工业出版社

内 容 提 要

本书重点针对疏松砂岩油藏窜流通道识别方法与治理技术开展论述,阐述了窜流通道的多种识别方法,介绍了窜流通道形成机理和窜流通道特征参数的计算方法,论述了调剖堵水过程中施工参数的优化方法和调剖堵水效果预测方法。对于现场作业具有重要指导意义。

本书可供石油科技工作者以及高等院校石油工程相关专业的师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

砂岩储层窜流通道识别与治理技术/王硕亮主编.

北京:石油工业出版社,2016.10

ISBN 978-7-5183-1428-7

I. 砂…

II. 王…

III. 砂岩储集层-窜流(油气开采)-研究

IV. ①P588.21 ②TE33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 190061 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址: www.petropub.com

编辑部: (010) 64523712

图书营销中心: (010) 64523633

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2016 年 10 月第 1 版 2016 年 10 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 11.75

字数: 298 千字

定价: 58.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

《砂岩储层窜流通道识别与治理技术》

编 委 会

主 编：王硕亮

副主编：付 强 于春磊

编 委：张 媛 于希南 赵 辉 王 娟 张 硕

前言

油田开发进入高含水期后,调剖堵水是一项常用的降水增油措施。但是在选井决策、调剖堵水时机选取、堵剂类型筛选、堵剂用量计算等方面,目前的理论方法还存在较多不足,在应用中暴露出很多问题。本书采用油藏工程、渗流力学、统计学、模拟计算相结合的研究方法,进行了以下的研究工作。

筛选出能够较准确反映水窜现象的单井动静态资料,针对目前油水井关联性计算模型的不足,综合利用渗流力学和最小二乘法,提出了一种新的油水井关联系数计算方法。为增强井间指标的敏感性,利用 KALMAN 滤波技术,提出了计算油水井关联系数变化速度计算模型,从绝对值和变化速度两个角度,反映油水井间的水窜规律。综合利用相空间重构技术和支持向量机技术,考虑了产油产水数据与压力数据之间的内在联系,建立了油田开发数据预测模型,在一定时间段内达到了较高的预测精度。

在指标体系选取与动态数据预测的基础上,将模糊聚类概念引入到调剖堵水领域,并建立了窜流通道识别与治理的流程,针对油田的不同资料完备程度,提出了三种窜流通道识别模型,不仅能够对目前生产井的窜流通道级别做出判断,而且能够预测一段时间后窜流通道级别的变化情况。

针对处于窜流严重级别的油水井,开展了储层物性与堵剂性能的匹配研究。通过实验分析,得到了冻胶体系堵剂的注入性能评价参数和封堵性能评价参数,结合油藏工程分析,提出了保证封堵效果的性能指标界限,从而得到了窜流通道具体参数与堵剂性能参数间的协调关系,可根据不同的储层条件,确定具体的堵剂性能参数。

针对筛选出的具体堵剂,考虑堵剂的阻力系数和残余阻力系数,分别研究了在线性驱动条件下和平面径向流条件下的堵剂纵向分配规律。并利用并联填砂管实验结果,对理论推导结果的准确性进行了验证。从而提出了堵剂分配比例从线性驱动向平面径向流的转化系数。综合考虑堵剂性能评价参数、设备实际承受能力和岩石破裂压力的综合限制,提出了堵剂注入速度和注入压力的优化方法。

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,希望读者提出批评并给予指正。

目 录

1 窜流通道识别指标选取与指标预测方法	(1)
1.1 窜流通道识别指标体系	(1)
1.2 窜流通道识别指标预测方法	(17)
2 窜流通道识别模型	(23)
2.1 识别模型适应性分析	(23)
2.2 支持向量机识别模型	(24)
2.3 聚类分析识别模型	(27)
2.4 模糊综合评判模型	(34)
3 窜流通道形成机理	(39)
3.1 窜流通道孔喉结构变化规律	(39)
3.2 孔喉结构变化对驱油效率的影响	(44)
3.3 孔隙结构变化对渗流场的变化规律	(59)
4 窜流通道参数计算方法	(63)
4.1 利用动态生成数据反算窜流通道参数	(63)
4.2 利用动态生成数据反算窜流通道参数	(65)
4.3 基于概率密度模型法计算窜流通道参数	(67)
5 堵剂类型筛选方法	(71)
5.1 调堵剂性能要求	(71)
5.2 堵剂类型	(71)
5.3 堵剂筛选方法	(75)
6 堵剂分布模式与堵剂用量优化方法	(89)
6.1 不同渗透率堵剂进入深度计算	(89)
6.2 不同渗流模式堵剂进入深度计算	(92)
6.3 并联填砂管试验	(92)
6.4 堵剂用量计算方法	(94)
7 堵剂施工参数优化方法	(96)
7.1 施工参数优化原则	(96)
7.2 实际注入能力曲线获取方法	(96)
7.3 施工参数优化方法	(98)

7.4	调剖调驱工艺技术现场分析	(98)
7.5	堵剂配方类型与应用效果现场分析	(122)
8	调剖堵水效果评价与效果预测方法	(130)
8.1	大港油田调驱见效特征及主控因素分析	(130)
8.2	高浅北区水平井调驱效果评价	(158)
8.3	聚合物微球调驱效果	(168)
8.4	聚合物凝胶调驱效果	(170)
	参考文献	(172)

1 窜流通道识别指标选取与指标预测方法

1.1 窜流通道识别指标体系

1.1.1 窜流通道识别指标体系选取原则

窜流通道识别指标体系的选取与计算方法,决定了调剖堵水选井决策的计算精度。因此,窜流通道识别指标体系的筛选与计算,就显得尤为重要。窜流通道识别指标应该具备如下要求。

(1) 数据量大。窜流通道识别都是基于统计理论和概率理论建立起来的识别模型,对具有一定数据规模和分布规律的数据有较好的识别效果。因此,要求指标体系的数据点尽量多,能够体现出一定的内在规律性。

(2) 时间跨度长。调剖堵水针对的是注入水优势窜流通道,中国东部老油田多是陆相沉积的砂岩油藏,在经过长期高强度的注水开发后,储层由于受到注入水的冲刷和侵蚀,孔隙结构发生了变化,出现了注入水窜流的大孔道,大孔道的形成过程需要一定的时间跨度,因此,要求指标体系能够体现一定时间长度的开发特征。

(3) 获取成本低。调剖堵水作为一项成熟的三次采油技术,各采油厂的人员储备和设备配置都已具备一定规模,相对于每次作业的成本并不高,因此,要求决策过程的费用低、周期短、不影响生产,一些需要停产、花费较高的测试手段,虽然能够取得相对直观测试结果,但实际实施时的可行性不高。

(4) 时效性好。窜流通道识别不仅是针对目前生产状态的决策判断,而且是对未来趋势的一种预测,因此,要求指标体系的时效性较好,能够较准确地反映目前的实际生产状态和较准确的变化趋势。

(5) 独立性强。窜流通道识别的基本要求就是各指标之间的关联性较弱,内涵上不要有交叉和重复,因此,要求窜流通道识别指标体系的指标各自表征的物理含义具有独立性。

根据以上窜流通道识别指标的选取原则,对大量的油田生产动态数据进行筛选。

1.1.2 单井指标

单井指标分为静态指标和动态指标,其中,静态指标指储层参数描述指标,油田储层经过沉积演化,形成的地质储层并不会因为油水的运移而产生较大的改变。所以静态指标反映了形成窜流通道的先决条件。

(1) 渗透率。

单井的渗透率越高,表明储层的孔喉半径越大,储层结构越不稳定,越容易受到注入水的冲击而发生改变。并且,渗透率越大,储层的层间动用难度差别越大,越容易形成层间矛盾。因此,渗透率越大的井,较渗透率较小的井,更容易发生水窜,越需要进行剖面调整。

(2) 有效厚度。

储层的有效厚度大，油水重力作用造成的水驱动用程度不均匀的现象就越容易发生，而高渗透率层一旦见水，低渗透层将很难再被动用。因此，有效厚度越大，也越容易形成注入水的窜流通道。

(3) 单层渗透率突进系数。

单层渗透率突进系数表征单层最高渗透率与平均渗透率的比值，数值越大，说明单层中高渗透层越容易发生指进现象，从而加剧层内或层间矛盾。因此，单层渗透率突进系数越大，越容易形成窜流通道。

(4) 渗透率变异系数。

渗透率变异系数反映了储层渗透率的整体分布情况，渗透率变异系数越大，说明储层渗透率分布越分散，渗透率变异系数也是一个非常好的评价油藏非均质性的指标。渗透率变异系数越大，越易形成窜流通道。

油水井的动态指标是地质因素与开发因素的综合反映，也是油田开发过程中最准确、最有说服力的指标。在此研究中，分为注水井动态指标和采油井动态指标两个方面进行阐述。对于注水井，选取日注水量变化率、注水油压变化率、视吸水指数和单位厚度累计注水量 4 项指标，分别描述如下。

(1) 日注水量变化率。

当窜流通道形成后，水井和油井间形成了注入水窜流的高渗流通道，且随着高渗透层原油的采出，逐渐由油水两相驱动转化为水相的单相驱动，因此，在相同的注入压力下，窜流通道形成后，日注水量也相应地增加。

(2) 注水油压变化率。

与日注水量变化率的指标选取原因类似，窜流通道形成后，水井的注入能力增加，由于现场往往通过控制注入量来控制注入速度，所以，窜流通道形成后，水井的油压也会有较明显的降低。

(3) 视吸水指数。

视吸水指数反映了水井的注入能力，由于窜流通道的形成，并且流动状态由两相变为单相，导致水井的注入能力得到提升。因此视吸水指数的变化，可以反映窜流通道的形成。

(4) 单位厚度累计注水量。

单位厚度的累计注水量，反映了地层接受注水冲刷的严重程度，因此，单位厚度的累计注水量越大，表明地下越容易形成注入水窜流的窜流通道。

对于采油井，选取理论曲线图板、日产液量、含水率、井底流压、单位厚度累计产液量、每米采液指数变化率 6 项动态指标进行低效循环采油井的判定。

(1) 理论曲线图板。

由于地层的非均质性，油藏平面和纵向渗透率差异较大。随着注水开发的进行，地层的微观孔隙结构会随着注入水的冲刷而发生不同程度的改变。注入水有沿着渗流阻力较小方向运动的趋向，因此，渗透率较高的区域受到注入水冲刷也较严重，使地层的非均质性进一步增强。

油藏非均质性的表述方法有很多种，常用的有平均值、级差、变异系数、突进系数、洛伦兹系数等。通过对中国大部分油田的渗透率分布进行研究，发现中国大部分油田渗透率分布大致符合对数正态分布。在此，选用洛伦兹系数作为衡量油藏渗透率非均质性强弱的指标。

理论曲线图板法正是基于上述基本原理，以油藏原始数据为基础，参考油田生产数据，

以理论曲线来表征油田理想状态下和不同洛伦兹系数下的开发效果。从而判断油藏现阶段所处的状态。

洛伦兹系数是由美国统计学家洛伦兹提出的，用于表征对象分布的不均匀性，如图 1.1 所示，其中横坐标表示占岩样总数，纵坐标表示渗透率贡献值。

十分明显，对于完全均质的油藏，该曲线是一条直线 AC。弧线与直线包络的面积 AECA 越大表示油藏非均质越严重。当包络面积等于 ADCA 时表示极端非均质。因此弧线与直线的包络面积 AECA 与三角形面积 ABCA 之比就表示油藏的非均质程度。

定义洛伦兹（Lorenz）系数为 AEC 曲线和 45° 直线段之间的面积：

$$L_c = 2 \cdot \left[\left(\int_0^1 F \cdot dc \right) - 0.5 \right] \tag{1.1}$$

式中 L_c ——洛伦兹系数；
 c ——岩样块数累计百分比；
 F ——曲线轨迹。

很显然，由于计算的 L_c 必然在 0~1，这样就很容易评价油藏的非均质程度。

理论曲线判断图板以采出程度为横坐标，以含水率为纵坐标。通过改变洛伦兹系数，来表征油藏非均质性的变化。以江苏油田陈 2-21 井组为例简述判断过程如下：

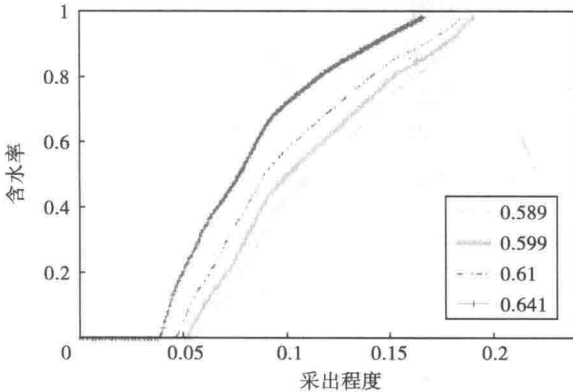


图 1.2 陈 2-21 井组注水有效性判断图板

根据以上两图可以看出，当洛伦兹系数处于 0.57~0.588 范围内时，变化趋势较缓，当洛伦兹系数处于 0.588~0.625 范围内时，随着洛伦兹系数的增加，积分值显著增加，表征开发效果明显向坏的方向发展，这一阶段表征窜流通道的形成阶段，随着开发的进行，注入水不断对地层进行冲刷，初步形成了注入水流动阻力较小的窜流通道。当洛伦兹变异系数大于 0.625 时，开发效果变化程度又趋于缓和，窜流通道形成后，注入水绝大部分都沿着窜流通道流动，严重影响了注入水波及体积的增加，井间剩余油没有得到有效驱动。根据以上分

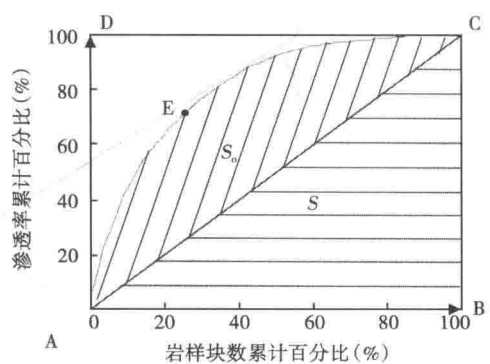


图 1.1 洛伦兹曲线

图 1.2 为陈 2 断块陈 2-21 井组的理论判断图板，从图中可以看出，随着洛伦兹系数的增大，含水上升明显变快，在此，以含水率与采出程度的积分值 $\int f_w dR$ （表示曲线包含的面积）来表示开发效果，积分值越小表示开发效果越好。以含水 98% 作为开发结束的标志，得到不同洛伦兹系数下的积分值，如图 1.3 所示。

对图 1.3 中的曲线取导数，得到图 1.4。

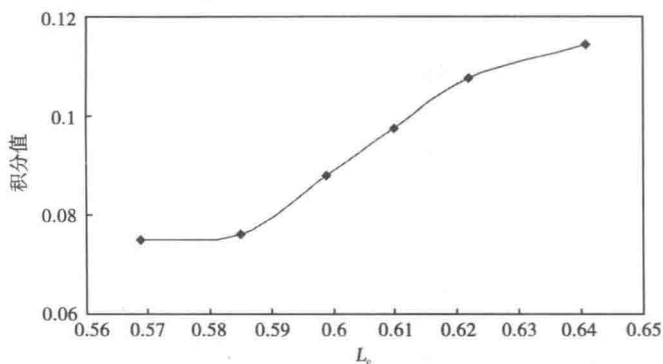


图 1.3 曲线积分

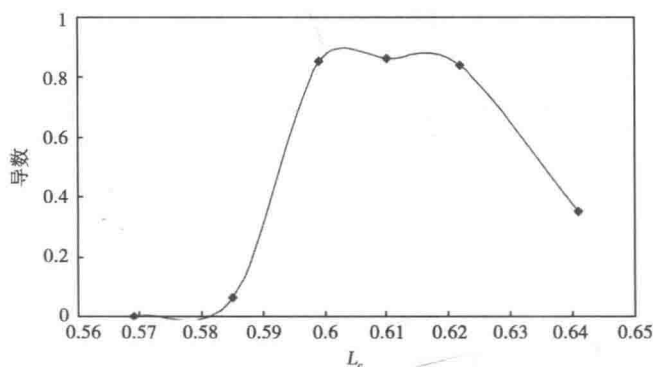


图 1.4 曲线导数

析，将陈 2-21 井组的存在窜流级别界限和窜流严重级别界限的临界点分别定为 0.588 和 0.625。即当渗透率的洛伦兹系数在 0.588~0.625 时，认为处于存在窜流级别阶段，需要现场密切关注此井的生产动态变化情况。当渗透率的洛伦兹系数大于 0.625 时，认为处于无效循环阶段，需要进行调剖堵水等增产作业。上述图板以含水率上升到 98% 为开发结束的终点，再分别作出以含水率为 90%，80%，70% 为判断标准点的判断图板如图 1.5 所示。

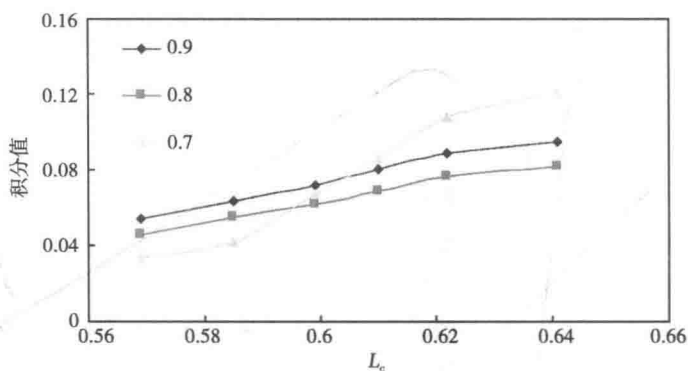


图 1.5 含水率为 0.7, 0.8, 0.9 时的曲线积分

对图 1.5 中的曲线求导数，得到图 1.6。

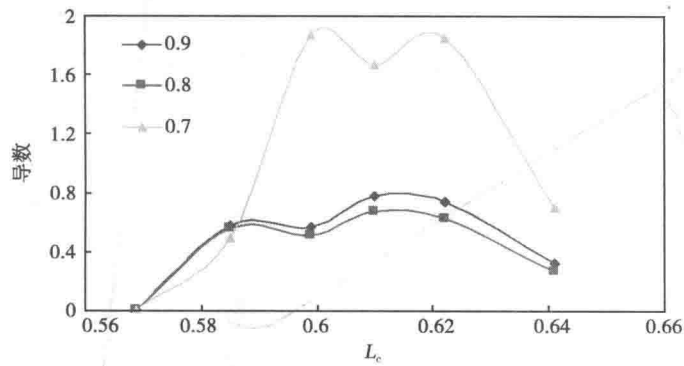


图 1.6 含水率为 0.7, 0.8, 0.9 时的曲线导数

从图中可以看出，以不同含水率为标准点，判断图板均有相同规律，积分值 $\int f_w dR$ 都会随渗透率洛伦兹系数的增加经历缓慢上升，迅速上升，再缓慢上升三个阶段。

考虑到陈 2-21 现阶段含水为 73% 左右，因此，以含水 73% 为标准，计算不同洛伦兹系数下的积分值，如图 1.7 所示。

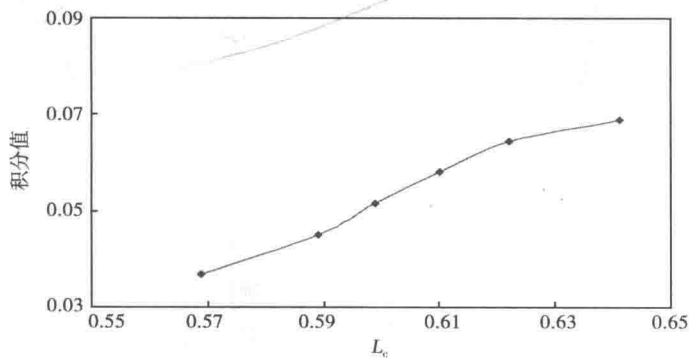


图 1.7 曲线积分

对图 1.7 曲线求导数，可得到图 1.8。

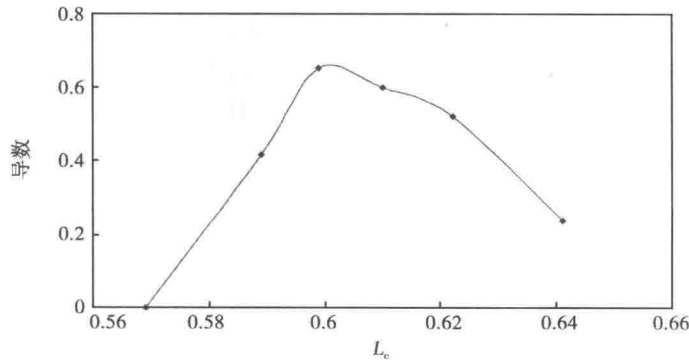


图 1.8 曲线导数

陈 2-21 井组实际数据的积分值 $\int f_w dR$ 为 0.056, 应用图板可近似看到, 积分值 $\int f_w dR$ 对应的渗透率洛伦兹系数处于 0.588~0.625 范围内, 属于存在窜流级别。

在模糊综合判断中, 为了便于计算, 由理论图板法判断出的结果, 可以判断窜流通道的严重程度, 其中, 正常生产级别界限为 0.25, 存在窜流级别界限为 0.5, 窜流严重级别界限为 0.75。

(2) 日产液量。

日产液量越大, 说明井底流动冲刷力越大, 越易形成窜流通道。

(3) 含水率。

含水率越高的井, 其经济效益越差, 投入产出比越低, 结合单井控制储量采出程度, 当单井控制储量采出程度较低, 且油井含水较高时, 越应该考虑进行调剖堵水措施。

(4) 井底流压。

当窜流通道形成后, 油水井井间建立了流体和压力的快速传播通道, 因此, 井底流压越接近地层压力的油井, 越应该考虑进行调剖堵水措施。

(5) 单位厚度累计产液量。

单位厚度累计产液量越大, 说明地层接受注入水冲刷越强, 越容易形成注入水的优势窜流通道。

(6) 每米采液指数变化率。

从渗流理论的角度出发, 采液指数有一个理论的变化率, 采液指数会先降低, 到后期有所提升。但是大孔道形成后, 单位生产压差下的采液量会猛增, 使得采液指数偏离理论曲线。在此, 采用目前采液指数与投产初期产液指数的比值反映采液指数的变化。若采液指数变化率较大, 则有可能大孔道已经形成。

对于注水井, 选取小层吸水(产液)量级差、每米吸水(产液)量突进系数、水井井口压降 PI 值等动态指标进行低效循环采油井的判定。

(1) 小层吸水(产液)量级差。

根据对油井水井做产吸剖面测试, 可以很好地检测油水井近井地带的地层渗流情况。产吸剖面越不均匀, 说明越有可能存在大孔道。小层吸水产液级差反映小层最大吸水量和最小吸水量的比值, 若此指标过大, 说明有可能存在大孔道。

(2) 每米吸水(产液)量突进系数。

吸水剖面是反映注水井在纵向上单层吸水量相对大小的一个参数, 吸水剖面资料能直接反映注水井单层吸水状况的差异。和渗透率一样, 单层吸水强度的不均匀反映了注水井纵向上的差异, 吸水强度大的层吸水量大, 反之则小。这种吸水强度差别越大, 那么注入水的不均匀推进越严重, 地下剩余油分布差异也就越大, 通过调剖堵水措施提高采收率的潜力也就越大。因此, 吸水剖面越不均匀的就越有必要实施调剖堵水措施。

用每米吸水剖面突进系数的概念来描述吸水剖面的非均质性, 每米吸水剖面突进系数的表达式为:

$$T = \frac{\frac{A_{\max}}{H}}{\sum_{i=1}^N \frac{A_i}{h_i}} \quad (1.2)$$

式中 T ——每米吸水剖面突进系数;

$A_{\max}$ ——吸水量最大的油层吸水百分数, %;

H ——吸水量最大的油层的油层厚度, m;

A_i ——第 i 层的吸水百分数, %;

h_i ——第 i 层的油层厚度, m;

N ——措施井吸水油层总数, 层。

根据式 (1.2), 可知每米吸水剖面突进系数是吸水量最大油层的每米吸水百分数与所有吸水油层平均每米吸水百分数的比。

(3) 水井井口压降 PI 值。

水井井口压降 PI 值是根据水井井口压降测试资料, 求得的压力随时间变化的导数, 反映的是水井的渗流能力。 PI 值越大, 说明水井近井地带的渗流能力越强。当同一区块内的某口井 PI 值超过其他井时, 说明这口井有可能存在大孔道, 需要进行调剖。

1.1.3 井间指标

井间指标分为油水井关联系数和油水井关联系数变化率两个指标。首先介绍油水井间关联性的计算方法, 常规砂岩油藏进入开发后期, 由于长时间的注水冲刷, 油水井间会逐渐形成注入水优势窜流通道 (水窜通道)。这使得注入水直接沿着水窜通道流动, 没有起到驱动原油的目的。解决水窜问题的常用措施 (水窜通道) 是调剖堵水, 然而在确定堵剂用量时, 对水窜方向的判断就显得至关重要, 水窜方向没有判断准确, 将直接导致堵剂无法达到设计位置, 不能达到最佳的调剖堵水效果。目前常用的判断水窜方向的做法有示踪剂测试、微地震测试、试井测试等, 然而这些测试手段存在测试周期长、影响油水井正常生产、测试成本高等缺点, 并且一旦遇到测试所得结果与实际生产情况不符的情况, 测试结果将很难被利用。

对于注水开发的油田, 注水井是保持地层能量、有效驱动原油的基础, 油田整体的采出程度、产量和含水率完全受到注水井的影响, 因此, 注水井是水驱油田能否高效开发的关键因素。由于油藏平面和纵向上的非均质性, 加之长期注水冲刷对地层孔隙结构的改变, 使得一口水井周围的多口油井受效情况存在差异, 如何准确认识油水井间的关联性对于水驱油田有着非常重要的意义。目前判断油水井间的关联性多采用产量曲线和压力曲线的对比, 主观性较强, 并且结论只能定性表述。本书提出了一种利用多元线性回归求解的电容模型, 无需增加任何生产成本, 综合运用日常生产液量压力数据, 通过求解可以较准确地得到油水井间的关联系数。通过与其他测试油水井间关联性的方法结果对比, 发现本方法结论真实可靠。

数学模型的建立:

在假定油藏压缩系数为定值的条件下, 可以得到:

$$C_t V_p \frac{dp}{dt} = i(t) - q(t) \quad (1.3)$$

式中 C_t ——综合压缩系数, MPa^{-1} ;

V_p ——泄油坑道内的孔隙体积, m^3 ;

$\bar{p}$ ——地层平均压力, MPa ;

$i(t)$ ——水井单位时间注入量, m^3/d ;

$q(t)$ ——油井单位时间产液量, m^3/d 。

数学模型的求解;

根据采油指数的定义,可以得到:

$$q = J(\bar{p} - p_{wf}) \quad (1.4)$$

式中 p_{wf} ——井底流压;

J ——采油指数。

将式 (1.4) 带入式 (1.3) 可得:

$$\frac{C_t V_p}{J} \frac{dq}{dt} + q(t) = i(t) - \frac{C_t V_p}{J} J \frac{dp_{wf}}{dt} \quad (1.5)$$

定义

$$\tau = \frac{C_t V_p}{J}$$

则式 (1.5) 可变形为:

$$\tau \frac{dq}{dt} + q(t) = i(t) - \tau J \frac{dp_{wf}}{dt} \quad (1.6)$$

解方程 (1.6) 得:

$$q(t) = q(t_0) e^{\frac{-(t-t_0)}{\tau}} + \frac{e^{-t/\tau}}{\tau} \int_{\xi=t_0}^{\xi=t} e^{\xi/\tau} i(\xi) d\xi + J \left[p_{wf}(t_0) e^{\frac{-(t-t_0)}{\tau}} - p_{wf}(t) + \frac{e^{-t/\tau}}{\tau} \int_{\xi=t_0}^{\xi=t} e^{\xi/\tau} p_{wf}(\xi) d\xi \right] \quad (1.7)$$

式中 t_0 ——初始时间。

通过式 (1.7) 可以看出, 产量 q 可以分成 3 个部分。第一部分 $q(t_0) e^{\frac{-(t-t_0)}{\tau}}$ 反映注水开发以前利用油藏弹性能量开发对产量的贡献。第二部分反映注水井注水量对对应油井产液量的贡献。最后一部分反映井底压力变化对产量的贡献。

当井底流压是定值时, 式 (1.7) 可以写成:

$$q(n) = q(n_0) e^{-(n-n_0)/\tau} + \sum_{m=n_0}^{m=n} \alpha_m i(m) \quad (1.8)$$

其中

$$\alpha_m = \frac{\Delta n}{\tau} e^{\frac{(m-n)}{\tau}}$$

当井底流压变化时, 由于实际油田的压力数据获取难度大, 精度也不高, 因此, 实际应用过程中, 可将数学模型简化为:

$$q_j(n) = q(n_0) e^{-(n-n_0)/\tau} + \sum_{m=n_0}^{m=n} \alpha_m i(m) + P \quad (1.9)$$

其中 P 为常数项。

实际油藏中会有很多注采井, 同时开始生产。一口生产井的产量, 会受到多口注水井的

影响。因此，电容模型必须继续推导变形，使电容模型可以用于描述一口采油井和多口注水井的情况。引入权重系数 λ_{ij} 用来表示注水井的注水量在多口油井间的分配情况。生产井 q 和注水井 i 的电容模型为：

$$C_{t_{ij}} V_{p_{ij}} \frac{d\bar{p}_{ij}}{dt} = \lambda_{ij} i_i(t) - q_{ij}(t) \quad (1.10)$$

整个区块内的电容模型为：

$$\sum_{i=1}^I C_{t_{ij}} V_{p_{ij}} \frac{d\bar{p}_{ij}}{dt} = \sum_{i=1}^I \lambda_{ij} i_i(t) - \sum_{i=1}^I q_{ij} \quad (1.11)$$

式中， $C_{t_{ij}}$ ， $V_{p_{ij}}$ ， $\bar{p}_{ij}$ 由生产井 j 和注水井 i 之间的泄油体积内油藏属性决定。 q_{ij} 是生产井 j 对应注水井 i 的产液量。

将式 (1.4) 带入式 (1.11) 消去 $\bar{p}$ 可得：

$$\sum_{i=1}^I \tau_{ij} \frac{dq_{ij}}{dt} + \sum_{i=1}^I q_{ij}(t) = \sum_{i=1}^I \lambda_{ij} i_i(t) - \frac{dp_{wfj}}{dt} \sum_{i=1}^I \tau_{ij} J_{ij} \quad (1.12)$$

其中

$$\tau_{ij} = \frac{C_{t_{ij}} V_{p_{ij}}}{J_{ij}}$$

对式 (1.12) 进行求解，并对井底压力进行简化后得：

$$q_j(t) = \lambda_p q_j(t_0) e^{\frac{-(t-t_0)}{\tau}} + \sum_{i=1}^I \lambda_{ij} \left[e^{-t/\tau_{ij}} \int_{\xi=t_0}^{\xi=t} e^{t'/\tau_{ij}} i_{ij}(\xi) d\xi \right] + P_{ij} \quad (1.13)$$

将式 (1.13) 变换成离散型变量可得：

$$q_j(n) = \lambda_p q(n_0) e^{\frac{-(n-n_0)}{\tau_p}} + \sum_{i=1}^I \lambda_{ij} i'_{ij}(n) + P_{ij} \quad (1.14)$$

其中

$$i'_{ij}(n) = \sum_{m=n_0}^{m=n} \frac{\Delta n}{\tau_{ij}} e^{\frac{-(m-n)}{\tau_{ij}}} i_{ij}(m)$$

P_{ij} = 常数

$$q_j(n) = \lambda_p q(n_0) e^{\frac{-(n-n_0)}{\tau_p}} + \sum_{i=1}^I \lambda_{ij} i'_{ij}(n) + P_{ij}$$

式中 λ_{ij} —— 油水井对 (ij) 的连通程度。

实际应用过程中，可以通过上述公式推导，可知式 (1.15) 可用于判断实际的油水井间关联性：

$$q_j(n) = \lambda_p q(n_0) e^{\frac{-(n-n_0)}{\tau_p}} + \sum_{i=1}^I \lambda_{ij} i'_{ij}(n) + P_{ij} \quad (1.15)$$

式 (1.15) 中，所有参数均可得到，仅 P_{ij} ， λ_p 和 λ_{ij} 为待定系数，利用最小二乘法，可以求解出 P_{ij} ， λ_p 和 λ_{ij} ，其中， λ_{ij} 即为所需求取的井间关联度。

式 (1.15) 在推导过程中的一个假设条件就是压力波传播速度无限大，在井距较小，稀油中高渗透油藏，压力传播较快，油水井的动态变化趋势基本一致；但在井距较大的稠油低渗透油藏，压力传播速度较慢，注水井的井底压力的变化经过一段时间传到采油井井底时，注水才开始见效。这段传播时间称为影响时间，相应的压力波的传播范围称为影响半径，通常，影响半径与影响时间的关系为：

$$R(t) = 0.12 \sqrt{\frac{Kt}{\phi_o \mu_o C_t}} \tag{1.16}$$

其中

$$C_t = C_o S_o + C_w S_w + C_f$$

将式 (1.16) 经变化得

$$t = 69.44 \frac{\phi_o \mu_o C_t}{K} R^2(t) \tag{1.17}$$

因此，应首先利用式 (1.17) 对油水井的动态数据做一个预处理，消除延迟时间的影响。为验证模型的准确性，选取胜利油田某井组的实际数据进行验证，某井组所处油藏为常规砂岩油藏，储层物性较好，平均孔隙度为 0.23，平均渗透率达到 189mD，经过长期注水冲刷，储层物性改变较大，平面非均质性加剧。该井组的生产动态曲线如图 1.9 至图 1.13 所示：

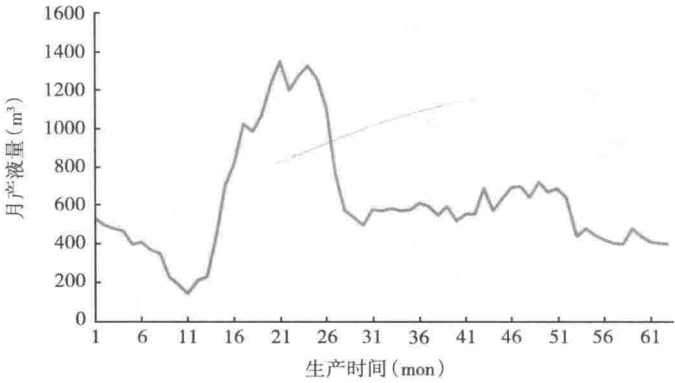


图 1.9 油井月产液量曲线

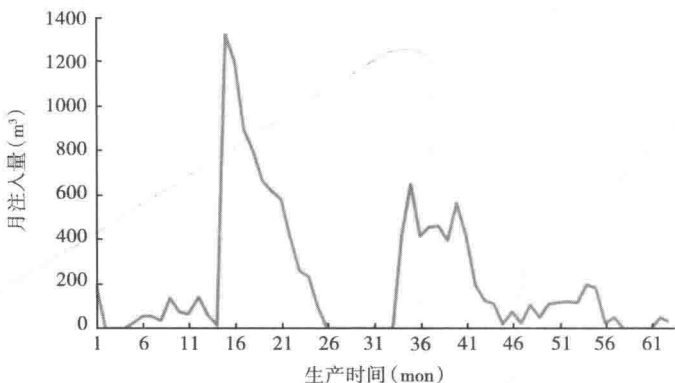


图 1.10 水井 1 月注水量曲线