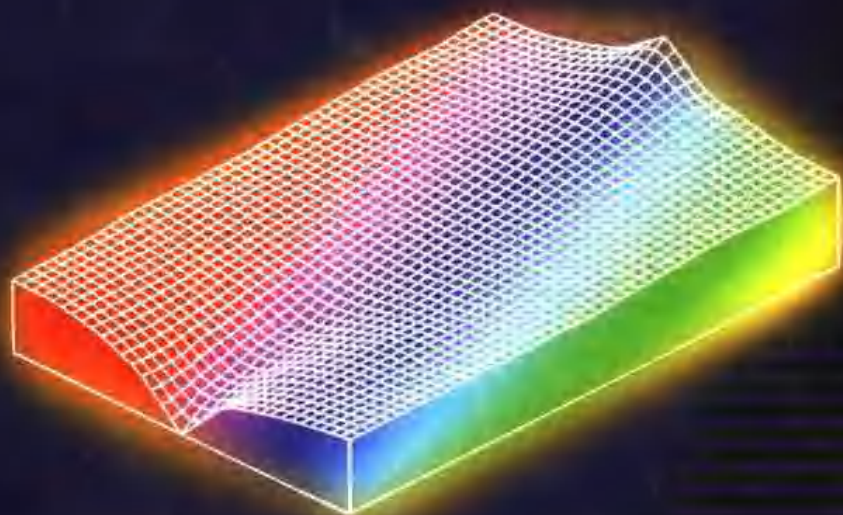


疏松砂岩油藏大孔道 形成机理及渗流规律研究

曾流芳 著



石油大学出版社

Study on the Mechanism of Big Channel Formation and Porous
Flow Theory in Unconsolidated Sandstone Reservoir

疏松砂岩油藏大孔道 形成机理及渗流规律研究

曾流芳 著

石油工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

疏松砂岩油藏大孔道形成机理及渗流规律研究/曾流芳著.
—东营:石油大学出版社,2002.10
ISBN 7-5636-1704-3

I. 疏... II. 曾... III. 砂岩油气田—油气藏—形成—研究 IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 082115 号

疏松砂岩油藏大孔道形成机理及渗流规律研究

曾流芳 著

责任编辑:郗云飞 (0546—8391935)

封面设计:孟卫东

出版者:石油大学出版社(山东东营,邮编 257061)

网 址: <http://sunon.hdpu.edu.cn/~upcpres>

电子信箱: upcpres@mail.hdpu.edu.cn

印刷者:石油大学印刷厂印刷

发 行 者:石油大学出版社(电话 0546—8391797)

开 本: 850×1168 1/32 印张:4.75 字数:123 千字

版 次:2002 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:10.00 元

前言

疏松稠油油藏开发伴随着大量出砂,导致储层物性参数改变,对油田的生产影响很大。由于不同油藏物性及构造的差异,人们对出砂的认识不一样。加拿大的一些油田一般诱导稠油油藏出砂,连砂带油一起开采,即所谓的冷采。国内除南阳、吉林一些油田在进行冷采实验外,基本上都采取注水或热采。注水开采过程伴随着大量的泥沙,在储层中形成高渗透条带,引起采液指数和吸水指数大幅度增加,水驱效率较低。

著者在广泛调研的基础上,展开了对疏松砂岩油藏出砂的研究,结合实验室的物理模拟实验、数理建模、利用灰色理论诊断大孔道等手段,对疏松砂岩稠油油藏的开发进行了理论性的研究,同时结合数据库和网络把对大孔道的诊断实时化,使之更具有适用性。

渤海湾盆地济阳凹陷中的孤东油田,石油地质储量2亿多吨。本书以该油田七区西为例,通过对储层沉积特点、矿物组分、胶结程度、油藏流体特征等多种因素进行研究,利用实验室物理建模手段,模拟研究了疏松砂岩在开发过程中出砂的机理及影响因素,给出了用出砂临界速度描述出砂的影响因素的模型。

本书还研究了井底附近射孔孔眼在生产过程中的扩展规律,推出了不同形状孔眼的稳定准数,用控制体积有限元方法模拟了井眼附近区域渗流的稳定性及扩展规律。考虑储层渗流与地应力场的耦合作用,根据渗流力学、岩土力学和流体力学的知识,考虑

储层流固耦合渗流与大孔道流体管流之间的耦合作用,建立模拟大孔道出砂的数学模型,并根据有限元法和有限差分原理,给出了渗流与管流耦合模型的数值解法,利用 Fortran 语言编制了模拟大孔道出砂的计算程序,对一注一采情况下油藏渗流压力和地应力变化情况、油井附近大孔道开采过程中的出砂情况进行了数值模拟,根据模拟结果探讨了油藏出砂的影响因素,并提出了相应的防治措施;鉴于油气储层孔隙结构、岩石强度、渗透率分布的随机性,根据随机理论,并利用储层流固耦合渗流原理,建立了模拟油藏出砂的随机数学模型,利用 Monte-Carlo 方法对油藏出砂问题进行了随机数值模拟,通过对计算结果的分析得到了一些有意义的结论,为疏松砂岩油藏大孔道出砂的综合治理、堵水调剖、三次采油等提供了重要的理论依据。

利用灰色理论,结合油藏工程方法,建立了诊断大孔道的方法,编制了相应的软件。利用该软件对孤东油田七区西断块进行了诊断,发现存在大量的大孔道。同时在该断块 6^{3+4} 层进行注示踪剂进行验证,证明该诊断方法是可行的,具有很高的社会效益和经济效益。

由于著者水平有限,疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

著 者
2002 年 7 月

Forward

The development of unconsolidated sandstone reservoir is accompanied by much sand production, which changes the parameter of the formation, and brings great effects on the ensuring production. Different understanding is caused by differences in the physical property and structure of the oilfield. The sand production is allured while the heavy oil is recovered, which is called cold production in Canada. Almost all the unconsolidated heavy oil reservoirs are developed by water injection or thermal recovery except Nanyang and Jilin oilfields. The heavy oil is produced with much sand during water injection, which causes high permeability belt. The production index and water absorption index increase greatly and the water flooding efficiency is much lower.

The sand production of unconsolidated sandstone reservoir is carried out on the basis of the broad investigation by the author. The unconsolidated sandstone reservoir development theory is studied combining physical modeling, math modeling and gray theory. The method to diagnose the wormhole is set up by the data base and network technology which make it more useful for the development.

As a case, this book deals with the reservoir in Gudong oilfield, Jiyang Depression in Bohaiwan Basin. Through the research on the sedimentary character, the component of sandstone, cement index

and reservoir fluid character, the factor model is worked out to describe the critical velocity for sand production by experiment modeling.

Forward

In this book, the research on sand production mechanism and influence factors is carried out by experiment, based on the characteristic geology of unconsolidated sand reservoir. The perforation cavities growth rule near the well bottom is studied, and the expression of stability number for cavities of different shapes is derived, and the stability and growth of the perforation cavities are simulated by control-volume finite-element method. The coupling math model of porous flow in formation and pipe flow in high permeability channel is derived for the first time. In this model, not only is the flow of oil and water in porous medium concerned, but also the strain rule of the sand stone, i. e. the math equation describing the sand deformation is introduced. And the reservoir fluid-sand grain multiphase flow is introduced into the math model. That is that two couples are considered at the same time: one is seepage field and sand deformation coupling, and the other fluid and solid coupling. The finite difference and finite element methods are applied for seepage field and sand deformation field respectively. Based on the coupling models and using Fortran language, the author compiles computer programs for simulated sand production in big channels. Computing example of simulated sand production in big channels is given. Analyzing the simulated results, influence factors and preventing sand production methods are developed. On the basis of forecast mathematic model, using Monte-Carlo random method, sand production is simulated in the end. The simulation results show that sand production is related not only to production pressure difference, but also to heterogeneous degree of reservoir. The content in this thesis provides theoretical

basis for comprehensive control of sand production, water shut off, and tertiary oil recovery in unconsolidated sandstone oil reservoir.

The diagnosing method of the wormhole is set up and the program is made based on gray theory and reservoir engineering. The wormhole is found when the program is applied. Tracer is injected in 6^{3,4} layer to check the validity of this method. The result indicates that this method is effective and economical.

Due to the limited learning of the author, there are bound to oversights and omissions. Criticism and revision are cordially requested from the readers.

The author
2002.7

目 录

第一章 绪论	(1)
一、国内外研究现状	(2)
二、主要研究方法和技术	(8)
三、结论	(8)
四、展望	(9)
第二章 疏松砂岩油藏的地质特征	(11)
一、疏松砂岩岩石成分特征	(11)
二、疏松砂岩油藏的物性	(14)
第三章 疏松砂岩大孔道形成机理及影响因素	(19)
一、力学环境模拟	(19)
二、沉积特征及岩石、流体物性对大孔道形成和发展的影响	(23)
三、开发过程对大孔道形成和发展的影响	(26)
四、大孔道形成过程研究	(29)
第四章 孔眼的稳定性研究	(33)
一、孔眼的稳定性及稳定准数	(33)
二、井眼附近区域渗流的数值模拟	(37)
第五章 模拟大孔道出砂的渗流与管流耦合数学模型	(46)
一、疏松砂岩油层出砂的流固耦合渗流数学模型	(46)
二、大孔道中油藏流体-砂粒多相运移方程的建立	(64)

三、大孔道中液固两相流动与油藏流体渗流之间的耦合

..... (70)

第六章 渗流与管流耦合模型的数值解法 (71)

目
录

一、油藏流固耦合渗流模型的数值解法 (71)

二、大孔道液固两相流模型的数值解法 (87)

三、渗流与管流耦合计算的程序编制 (93)

第七章 疏松砂岩油藏出砂模拟算例 (99)

一、疏松砂岩油藏出砂的渗流与管流耦合模拟实例

..... (99)

二、疏松砂岩油层出砂的随机模拟 (108)

三、生产压差对出砂的影响 (112)

四、储层非均质性对出砂的影响 (113)

第八章 大孔道诊断方法研究 (115)

一、实验室内大孔道渗流特征及矿场大孔道存在的

具体表现 (116)

二、大孔道存在的矿场特征 (116)

三、大孔道诊断方法 (119)

四、大孔道诊断应用实例 (123)

参考文献 (130)

Contents

Chapter 1 Introduction	(1)
1.1 Overview of unconsolidated oil reservoir development	(2)
1.2 Main study method and technology	(8)
1.3 Conclusion	(8)
1.4 Prospect	(9)
Chapter 2 Geological character of unconsolidated sandstone reservoir	(11)
2.1 the component of unconsolidated sandstone reservoir	(11)
2.2 the character of unconsolidated sandstone reservoir	(14)
Chapter 3 Mechanism for the formation of wormhole and the affecting factor	(19)
3.1 Dynamic modeling	(19)
3.2 The affection of sedimentary character, sandstone and fluid on wormhole	(23)
3.3 The affection of development procedure on the formation and development of wormhole	(26)
3.4 Studies on the process of wormhole	(29)

Chapter 4	Stability of the perforation hole	(33)
4.1	The stability of the perforation hole and stability index	(33)
4.2	Simulation on the area close to the well bore	(37)
Chapter 5	Coupling math models on porous flow and pipe flow	(46)
5.1	Math model on fluid and solid coupling flow for sand production reservoir	(46)
5.2	The establishment of math equation for fluid and solid phase	(64)
5.3	Coupling on solid-fluid two phase flow in wormhole and fluid flow in reservoir	(70)
Chapter 6	Numerical method for coupling flow between porous flow and pipe line flow	(71)
6.1	Numerical method for fluid-solid coupling flow	(71)
6.2	Numerical method for fluid-solid coupling flow in wormhole	(87)
6.3	Simulation program for coupling flow between porous flow and pipe flow	(93)
Chapter 7	Examples of unconsolidated reservoir's sand production	(99)
7.1	Case of coupling flow between porous flow and pipe flow	(99)
7.2	Simulation of sand production for unconsolidated reservoir	(108)
7.3	The affection of producing pressure difference on sand production	(112)

7.4	The affection of heterogeneity of reservoir on sand production	(113)
Chapter 8	Studies on diagnosing method for wormhole	(115)
8.1	The characteristic of wormhole in experiment and reservoir development	(116)
8.2	The symbol of wormhole by sand production ...	(116)
8.3	Studies on the diagnose method for wormhole	(119)
8.4	Application of diagnose method	(123)
Reference		(130)

第一章

绪 论

我国东部油区地质储量为 5.6×10^4 万吨,含油气系统为第三系陆相河流、三角洲沉积体系。其中,疏松砂岩油藏储量为 2.2×10^4 万吨,占 39.14%,以馆陶组、东营组、沙河街组沉积为主,如孤东、孤岛、大港以馆陶组为主,胜坨油田以沙河街组为主,储层具有高孔高渗特征,平均空气渗透率为 $1 \sim 10 \mu\text{m}^2$,平均孔隙度为 25%~35%,油层非均质严重,注水开发过程中水线推进快,油层水淹快。

孤东油田是我国 20 世纪 80 年代中期投入开发的大型整装披覆构造油气田,属于陆相河流沉积体系,以馆陶组正韵律、复合韵律沉积为主,油层埋藏浅,胶结疏松,油层平均渗透率 $1.568 \mu\text{m}^2$,平均孔隙度 33.30%,渗透率平面非均质系数 0.56~0.72,层间层内非均质相当严重,开发中易出砂。

孤东油田 1986 年投入开发,历经 17 年,可采储量采出程度达到 83.1%,综合含水达 94.4%,进入了特高含水开发后期阶段。孤东油田开发的主要特点是:

(1) 原油性质差,油水粘度比高,开发过程中含水上升快,约有 2/3 的可采储量在特高含水阶段采出。

(2) 油层疏松出砂,高渗透,密井网,采油速度大,注采强度高,储层物性变化大,大孔道水窜严重。可采储量平均采油速度达到 6%,注采强度分别达到 $18 \text{ t}/(\text{d} \cdot \text{m})$ 和 $10 \text{ t}/(\text{d} \cdot \text{m})$ 以上,注水 4.5~6 年开始出现大孔道,目前孔道发育程度约 30%。从取心井资料看,渗透率平均增大了 2.3 倍,最大可达 5~10 倍。

(3) 油田驱油效率低,平面波及程度高,纵向波及程度低。

孤东油田的地质特点决定了它要经历一段较长的特高含水开发时间,提高采收率的主要手段是三次采油化学驱,但从目前的三次采油实践来看,大孔道严重降低了注入聚合物的利用效率,三次采油效果受到影响。因此,如何认识大孔道,如何针对孤东的密井网整装油田的特点进行大孔道的识别研究,为综合治理、堵水调剖、三次采油提供依据,已经成为一个亟待解决的课题。

一、国内外研究现状

油层大孔道的研究描述技术已经有多年的历史,最初使用的井间示踪测试法仅被用来定性了解地下流体运动状况。20世纪70年代末,D. Yuen, W. E. Brisham 和 M. Abbaszadeh 先后在 Brigham 和 Smith 提出的五点井网中示踪剂流动特性预测方法基础上,提出了用井间示踪资料解释油藏非均质特性的方法,使井间示踪资料的解释向定量化发展。

(一) 矿场直接分析法

1. 利用取心井定性分析大孔道

岩心取出后,观察其岩性、颜色、含油性,大孔道高渗层往往呈白色,冲洗得比较干净,如果结合岩心面的韵律性,则可基本准确地判断出大孔道的分布位置及厚度。

2. 利用测井资料定性分析大孔道

大孔道在测井资料上的反映,主要是微电阻测井的离差小、自然电位基线偏移、电感曲线明显偏低,结合数字解释,可以判断大孔道的位置、厚度及大孔道的平均渗透率。这种方法基本上也是定性的,因为测井解释以常规油水渗流方程为基础。

3. 利用试井资料解释大孔道

(1) 通过不稳定试井方法进行测试

对测试得到的压力资料利用常规分析方法或现代试井分析方法可求出油层的渗透率,但该方法往往是地下渗透性的综合反映,不稳定试井只能确定地下平均渗透率,而不能确定方向。

(2) 通过多井下扰试井方法进行测试

使激动井产生压力波动,在其周围的观测井观测压力的变化并测取压力资料,对压力资料进行解释可以确定渗透率的方向。

4. 利用生产资料进行判断

主要是大孔道形成后,通过注入压力、吸水指数、对应油井的采液指数、流压、含水等来定性判断是否形成大孔道。

(二) 示踪剂方法

1. 示踪剂测试方法

示踪剂测试是从注入井注入示踪剂段塞,然后监测其产出情况,并绘出示踪剂产出曲线,通过对示踪剂产出曲线进行分析来判断地层参数。这一技术是近年来发展起来的对油藏进行精细描述的一个重要手段,不仅可定性地判断地层中高渗透条带的存在与否,而且可定量地求出高渗透条带的有关地层参数,如高渗层的厚度、渗透率、含油饱和度,也可以求出孔道半径,为调剖堵水中堵剂类型的选择及堵剂用量的计算提供依据。

示踪剂的选择主要考虑以下几方面的因素:① 示踪剂性质与地层岩石及流体配伍;② 经济上可行;③ 环境污染小;④ 可监测性强,灵敏度高。

根据示踪剂类型,示踪剂方法分为化学示踪剂法和放射性示踪剂法。根据示踪剂测试方式,示踪剂方法又可分单井测试和井间测试两种。

(1) 单井示踪剂测试方法

示踪剂从一口井注入,再从另一口井采出以了解有关油藏的某些情况。根据非分配性示踪剂突破时间与分配性示踪剂的突破时间的差别求得残余油饱和度的程序如下:

① 实验室试验,确定示踪剂的分配系数。

② 现场试验,绘出示踪剂的浓度曲线,其中包括注入浓度曲线和产出浓度曲线。

③ 解释试验结果。

(2) 井间示踪剂测试方法

井间示踪剂测试与解释是一种确定井间地层渗透率、饱和度参数(包括单井、单井组、多井组,单层、多层、层内)分布较为先进的技术,近年来在世界范围内得到了较为广泛的应用,其主要缺陷为解释软件尚不配套。

Brigham 和 Smith(1964)为预测示踪剂在水驱五点井网中的突破时间和峰值浓度,介绍了一种半解析模型。后来,Brigham 和 Abbaszadeh 又改进了这一模型(1984),Abbaszadeh 还提供了流管中有径向弥散的流动方程的解析解(1982)。Pope 等编制了三维三相多组分化学驱模拟器 UTCHEM(1987)。

2. 示踪剂解释方法

(1) 数值方法

基本原理是利用多相组分模型处理示踪剂的注入、运移、产出过程,然后通过差分处理形成数值模型,最终形成计算机模型。地质模型建立、差分处理、解法选取、步长处理等是否合理,直接决定解释的合理性与精度的高低。

(2) 解析方法的局限性

① 由于产出浓度计算是建立在均质等厚五点井网注采平衡的基础上,而实际油田开发中,这是不可能的,或者是非常少见的。

② 一般考虑单层单相或者简单的叠加,与实际地层的非均质相差较大,因此解释结果一般不可信。

③ 一个峰值对应一个高渗层的拟合方法难以解决平面非均质造成的影响。

(3) 半解析方法

利用流线方法可以把数值方法与解析方法联系起来。由于数