

渗流力学与工程的创新与实践

——第十一届全国渗流力学学术大会论文集

SHENLIU LIXUE YU GONGCHENG DE CHUANGXIN YU SHIJIAN

——DISHIYIJIE QUANGUO SHENLIU LIXUE XUESHU DAHUI LUNWENJI



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

渗流力学与工程的创新与实践

——第十一届全国渗流力学学术大会论文集

主办单位

中国力学学会 中国石油学会
中国煤炭学会 中国岩石力学与工程学会

承办单位

重庆大学

协办单位

中国科学院武汉岩土力学研究所
西南石油大学(油气藏地质及开发工程国家重点实验室)
重庆交通大学
重庆科技学院

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书汇集了第十一届全国渗流力学学术大会论文 99 篇,反映了近两年来渗流力学与工程领域理论与应用研究的最新成果。其内容涉及石油、天然气、煤层气、地下水、地热、核能、水利、水电、生物渗流、环境渗流、物理化学渗流力学等领域,是渗流力学及应用方面最新的重要参考资料。

本书可供从事渗流力学与工程领域中科研、教学、工程技术人员及大专院校师生阅读与参考。

图书在版编目(CIP)数据

渗流力学与工程的创新与实践:第十一届全国渗流力学学术大会论文集. —重庆:重庆大学出版社, 2011.4

ISBN 978-7-5624-6108-1

I. ①渗… II. ①渗流力学—学术会议—文集 III. ①O357.3-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 058736 号

渗流力学与工程的创新与实践

——第十一届全国渗流力学学术大会论文集

策划编辑:彭 宁

责任编辑:李定群 陈 力等 版式设计:彭 宁

责任校对:邹 忌 责任印制:张 策

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝正街 174 号重庆大学(A 区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (营销中心)

全国新华书店经销

POD:重庆书源排校有限公司

*

开本:787×1092 1/16 印张:33.25 字数:1077 千

2011 年 4 月第 1 版 2011 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5624-6108-1 定价:55.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换
版权所有,请勿擅自翻印和用本书
制作各类出版物及配套用书,违者必究

第十一届全国渗流力学学术大会论文集

(重庆 2011 年 4 月 28 日—4 月 30 日)

主办单位

中国力学学会
中国石油学会
中国煤炭学会
中国岩石力学与工程学会

承办单位

重庆大学

协办单位

中国科学院武汉岩土力学研究所
西南石油大学(油气藏地质及开发工程国家重点实验室)
重庆交通大学
重庆科技学院

学术委员会

荣誉主任:郭尚平

主 任:韩大匡

副 主 任:王德民 鲜学福 王思敬 李晓红 葛家理 孔祥言 刘先贵 井如兰 Michel
Hood Nakayama Akira David A. Summers 杜志敏 周创兵 缪协兴

委 员:陈军斌 程林松 段祥宝 雷 群 李克文 李治平 梁 冰 刘建军 刘曰武
卢德唐 Paul Lever 蒲春生 单文文 王 媛 许友生 薛 强 杨春和 姚 军
尹光志 郁伯铭 赵阳升 朱维耀

组织委员会

主 任:李晓红

副 主 任:许 江 刘清友 陈洪凯 李文华

委 员:黄 滚 姜德义 姜永东 康 勇 刘保县 刘占芳 刘 莉 李 林 李 倩
李银平 税国洪 王 熙 夏彬伟 张仕进 赵 瑜 周军平

秘 书 长:卢义玉

项目资助

- 国家重点基础研究发展计划(973 计划). 能源储备地下库群灾变机理与防护理论研究. 编号: 2009CB724600
- 国家自然科学基金专项基金创新群体基金. 高压水射流破岩理论及其在地下工程中的应用基础研究. 编号:50921063
- 国家杰出青年基金项目. 化石能源储存与输送. 编号: 50725414
- 科技部国家基础研究规划项目(973 计划). 预防煤矿瓦斯动力灾害的基础研究——含瓦斯煤失稳破坏规律及准则(子课题 2). 编号: 2005CB221502

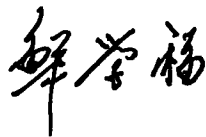
序

4月的重庆,春暖花开,来自国内外渗流力学与工程界的专家、学者及工程技术人员欢聚一堂,研讨近两年来渗流力学与工程领域取得的最新成果与实践,展望渗流力学发展的前景与现状。

经专家评审,本次学术大会共录用99篇论文,其中有20篇论文评为优秀论文,被重庆大学学报自然科学版录用,其余的被论文集录用。其内容涵盖了石油工程、天然气与煤层气工程、环境和岩土工程、生物与物理化学渗流等方面的科研成果与工程技术进展,包括实验室与现场试验研究,理论研究、数值模拟等研究方法,体现了国内外渗流力学发展的动态。撰写论文的不仅有一批学术造诣深厚的老专家,也有一大批从事渗流力学与工程领域的年轻学者与工程技术人员,可喜可贺。

渗流力学是研究流体在多孔介质中运动规律的科学,自法国工程师达西提出线性渗流定律以来,渗流力学不断地向前发展,并与其他学科交叉而形成许多新兴的边缘学科。其应用范围涉及石油、天然气、煤层气、地下水、地热、核能、水利、水电、生物渗流、环境渗流、物理化学渗流力学等领域。渗流力学作为流体力学与地学的交叉学科,在岩土体力学性质、多孔介质描述、裂缝型介质渗流、多场多相多组分渗流、物理化学渗流、非线性渗流、非饱和渗流、微观渗流、渗流模拟等理论及相关方法和测试技术等方面取得了许多新的创新性成果,不断推动了该学科的发展。

随着能矿资源不断向深部开采、大量重大基础设施的建设,涉及的渗流力学问题更加复杂,因此,该学科的发展任重道远,祝愿国内外从事渗流力学研究的科技工作者作出更大的贡献。



2011年4月

目 录

石油工程

大尺度缝洞型油藏弹性开采特征实验研究	常宝华,熊伟,高树生等(3)
非均质油藏砂体厚度变化对渗流规律的影响	屈亚光,刘月田,马翠玉等(8)
基于指数式非达西渗流模型的解析解	傅礼兵,姚约东(12)
多孔介质中纳微米聚合物水溶液油两相流动规律研究	朱维耀,赵玉武,王国锋等(17)
考虑轻油组分的 SAGD 过程热采稠油数值研究	唐明云,施安峰,贾江涛等(21)
稠油热采定量化研究之一:热-流耦合数学模型	张保良(24)
稠油热采定量化研究之二:热-流耦合模型应用及数值模拟	杨文哲,宋永臣,刘瑜等(31)
稠油油藏水平井热采井筒离散模型	罗艳艳,程林松,丁祖鹏(40)
超低渗油藏注水井达西-非达西耦合试井模型及分析方法	黄亮,程时清,廖恒杰等(43)
水平井调流控水筛管流体流动耦合模型研究	王庆,刘慧卿,张红玲等(48)
油页岩原位开采水力压裂裂纹动态规律研究	孙可明,谈健,吴迪(54)
致密砂岩储层裂缝面结构模型及应力敏感性研究	陈金辉,康毅力,李大奇等(60)
低渗透砂岩油藏渗吸规律研究	张星,毕义泉,汪庐山等(66)
低渗油藏毛细渗吸的分形研究	蔡建超,赵春明,谭吕等(73)
底水油藏多分支井水脊突破规律研究	段永刚,陈伟,李冬梅等(77)
多孔介质孔隙模型建立方法及应用研究进展	杜新龙,康毅力,游利军(81)
多分枝裂缝井试井曲线特征	刘洪,王新海,杨锋等(87)
非均匀油藏蒸汽辅助重力驱油数值模拟中网格渗透率粗化方法的研究	施安峰,王晓宏,吴斌等(90)
分支水平井产能公式研究进展	梁峰,孟维龙,刘晓辉(94)
黄岛大型水封地下石油洞库渗流场分析	蒋中明,张新敏(99)
基于低渗透砂岩储层渗流机理的钻井完井液动态损害评价	王铭伟,康毅力,游利军等(103)
基于流线与常规数模 EnKF 方法的对比分析	闫霞,张凯,姚军等(111)
计算稠油混合油黏度的新模型	李克文,高媛萍,黄云(117)
聚合物驱微观渗流机理的三维孔隙网络模拟	孙传宗,姜汉桥,侯健(123)
交替条件期望变换确定油气最小混相压力	张可,李实,郑希谭等(128)
综合损害指数——评价缝洞型储层损害的一个新指标	李一岚,康毅力,李大奇等(135)
利用核磁共振研究特低渗透油藏微观剩余油分布	王学武,杨正明,齐亚东等(141)
砾岩油藏水驱采油机理研究	胡志明,祝志敏,高树生等(146)
裂缝性油藏水驱油三维定量物理模拟相似准则	丁祖鹏,刘月田,屈亚光等(151)
气驱油微观渗流模拟及相渗曲线升级技术	王晨晨,姚军,杨永飞等(156)
水平井井网渗流场分析及井间距的确定	郑伟,姜汉桥,陈民锋等(159)
水浸对低渗储层供气能力影响实验研究	胡勇(163)
水相毛管自吸调控——裂缝性致密气藏经济开发的关键	游利军,谢婷,康毅力等(167)
碳酸盐岩地层漏失压力模型研究	李大奇,康毅力,曾义金等(173)
特低渗透储层注水开发时机的优选	林光荣,刘秋兰,刘学刚等(179)
特低渗透油藏非线性渗流下油井注水见效时间研究	何英,熊生春,杨正明(184)
特低渗透油藏渗流特征及复合增注技术研究	董学让,冯茜,宋志东等(188)
特低渗油藏二氧化碳非混相驱油特征研究	吴春新,苏玉亮(192)

线性复合油气藏试井解释模型及典型曲线分析	罗建新,张烈辉,赵玉龙等(196)
油藏数值模拟大模型并行运算优化技术研究	于金彪,吴胜和,王杰等(202)
钻井液微观结构对水合物分解传热传质特性的影响探讨	张凌,蒋国盛,宁伏龙等(206)
致密砂岩储层水相圈闭损害防治实验研究	刘雪芬,康毅力,游利军等(212)
注水开发油田开发层系划分与组合的定量原则	李留仁,袁士义,胡永乐(216)
注蒸汽热采稠油自适应网格法及其计算软件	王晓宏,贾江涛,施安峰等(223)
井钻遇溶洞油藏试井解释方法	杨锋,王新海,刘洪(229)
矩形五点井网稳定注采压力系统的建立	刘华林,熊伟,高树生(234)
卫星油田储层启动压力梯度分析	石磊(239)
低渗透油藏改变渗流场与提高采收率技术研究	李忠兴,余光明,高春宁等(243)
中低渗透非均质岩心复合驱效果实验研究	崔茂蕾,杨正明,吴文祥等(250)
压裂水平井不稳定渗流特征研究	雷征东,李彬,康浩(255)
数值试井若干关键技术研究	李道伦,杨景海,查文舒(260)
特低渗透油藏改善水驱效果技术探讨与方向	冉新权,李忠兴,高春宁等(267)

天然气与煤层气工程

三重介质气藏水平井压力响应分析	闪从新,李晓平,王道成等(275)
重庆地区煤体孔和裂隙特征与特低渗透的关系	毛飞,唐建新,赵宁德等(279)
高煤阶与低煤阶煤岩气藏气体传质行为研究	李相臣,康毅力(285)
含水对火山岩气藏供排气过程影响的实验研究	晏军,杨正明,刘超等(289)
考虑吸附变形的煤层气流固热耦合数学模型及数值模拟	张丽萍(293)
复杂地质条件煤层气藏井间干扰对井网布置的影响	梁冰,陈天宇,孙维吉(301)
南海北部神狐海域天然气水合物系统及其成藏演化数值模拟研究	苏正,陈志豪,吴能友等(308)
页岩气藏水平井压力动态特征	李建秋,段永刚(317)
稳定渗流理论在气井产能预测中的研究与进展	唐洪俊,梅志宏,牟洪陶(323)
海底地层内 CO ₂ 渗流与水合耦合现象初步研究——热-流-固耦合数学模型	雷晓,邓建强, Jiquan Shi(328)
水驱气藏气井试井曲线特征及典型实例分析	孙贺东(335)
致密砂岩气藏多尺度传质行为研究进展	方俊伟,康毅力,游利军等(341)

环境和岩土工程渗流

深覆盖层上坝区防渗系统优化	沈振中,甘磊,苗喆(351)
碱溶液与地层黏土矿物反应碱耗分析	熊生春,何英,刘卫东等(356)
考虑孔洞沟通性的碳酸盐岩储层应力敏感性实验研究	李松,康毅力,李大奇等(361)
考虑渗流应力耦合作用的裂隙岩体渗透特性研究	刘先珊,朱德武(368)
昌马水库大坝渗流安全监测分析	赵寿刚,张俊霞,董纪全等(373)
地下管道泄漏过程地表温度场红外检测实验	吴国忠,邢畅,王玉石等(379)
电渗析技术修复铬污染土壤的实验研究	聂杨,李东,熊振等(385)
卫生填埋场水分运动规律动态模拟试验	黄川,李家祥,王里奥等(390)
基于流固耦合的岩石细观破坏分析	赵吉坤(396)
垃圾填埋场中热效应和渗流机理的数值模拟	苏卫卫,刘扬,许友生(401)

浑水入渗对尾矿坝孔隙压力分布的影响分析	梁冰, 金佳旭, 张春梅(406)
降雨条件下急倾斜煤层群采动裂隙渗流规律研究	鲁秀生, 梁冰, 刘蓟南等(411)
流固耦合作用下水平井变质量流动规律分析	张旭, 孙可明, 李凯(416)
土坝黄土含薄砂层单薄山梁坝肩绕坝渗流规律分析	黄梅琼, 柴军瑞, 吴江江(420)
温度和应力耦合条件下岩石渗透规律实验研究	高红梅, 兰永伟, 赵继涛等(425)
我国尾矿库防渗技术发展综述	沈楼燕, 罗嗣海, 曾宪坤等(430)
一个可用于全耦合固结分析的低阶稳定新单元	李根, 唐春安, 李连崇(435)
罚函数无单元法求解复杂土坝渗流场	沈振中, 王志, 甘磊等(441)

生物、物理化学渗流

材料试验机载荷-位移关系的测定	陆丽丰, 许江, 杨红伟等(447)
二维分形多孔介质中分形维数对流线迂曲度的影响	罗良, 郁伯铭(452)
关于一个分形渗透率模型的讨论	郁伯铭, 徐鹏(455)
Characteristics of Liquid Flows Affected by the Surface Wettability of Solid in Nano-Scales	Song Fuquan(458)
The Discharge Characteristics of Zinc-air Batteries by Laying Styles of Air Electrodes	Song Fuquan(463)
Forchheimer 型非达西渗流系统的数值模拟	邵九姑, 许友生(468)
各向异性多孔介质中径向渗流的分形分析	邱淑霞, 徐鹏, 郁伯铭(472)
二维有限饱和多孔介质因点汇诱发流动变形解析解	李培超, 何越磊, 潘海泽(478)
三元复合体系在二类油层中的色谱分离作用效果研究	朱维耀, 隋新光, 龙运前等(481)
颗粒堆积型多孔介质内孔喉模型的研究	吴金随, 尹尚先(486)
测定与计算聚合物驱相对渗透率的新方法	孙文杰, 陈欢, 余彦敏等(490)
新型气润湿反转剂的分子模拟与合成	李克文, 周明辉(496)
整合素亚单位对肝癌细胞与层粘连蛋白趋化迁移运动的影响	傅遍红, 吴泽志, 秦建(501)
质子交换膜燃料电池多孔电极内复杂渗流机理分析及其应用研究	何慧, 孙鹏涛, 许友生(505)
Cr^{3+} 调剖剂对二元、三元复合体系渗流特性的影响	刘进祥, 卢祥国, 王荣键等(509)
NaCl 对 Cr^{3+} 聚合物凝胶和聚表剂溶液渗流特性影响及其作用机理	卢祥国, 王树霞, 王洪关等(514)
裂缝型介质等效连续模型流动模拟方法研究	李亚军, 姚军(520)

石油工程

大尺度缝洞型油藏弹性开采特征实验研究

常宝华¹, 熊伟^{1,2}, 高树生^{1,2}, 刘华勋¹, 张静楠¹

(1 中国科学院渗流流体力学研究所;

2 中国石油勘探开发研究院廊坊分院 河北廊坊 065007)

摘要:缝洞型碳酸盐岩油藏具有复杂的储层特征,导致该类油藏的开采难度大、采收率较低。本文以弹性理论为基础,将实际油藏中复杂的缝洞单元简化为简单缝洞组合模式,从最简单的缝洞单元着手,扩展到较为复杂的缝洞单元形式,建立了两种缝洞单元的室内物理模型,利用实验模拟研究方法,进行了孤立溶洞内不同油水体积时的弹性开采实验和多洞缝型缝洞单元不同裂缝渗流能力和不同生产压差下的弹性开采实验。实验结果表明:弹性开采条件下,两种缝洞单元产量递减规律不同,累积产量与累积压降关系曲线变化规律也不同;对于两洞的多洞缝型缝洞单元,洞间裂缝的渗流能力和生产压差对洞间压差曲线与累积产量和累积压降关系曲线的影响规律明显。

关键词:缝洞型油藏;碳酸盐岩;孤立溶洞;多洞缝;弹性开采

中图分类号: TE342; TE344

文献标识码: A

Experimental Study of Large-scale Fracture-vuggy Reservoir Flexible Production Characteristics

Chang Baohua¹, Xiong Wei^{1,2}, Gao Shusheng^{1,2}, Liu Huaxun¹, Zhang Jingnan¹

(1. Institute of Porous Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, China;

2. Langfang Branch, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang 065007, China)

Abstract: With complex reservoir characteristics, fracture-vuggy carbonate reservoir is difficult to exploit and has low oil recovery. In this paper, based on elastic theory, complex fractured-cavity element in the actual fractured-cavity carbonate reservoir is reduced to a simple mix of fractured-vuggy. Starting with the simplest fractured-cavity units, extending to more complex fractured-cavity units, two physical models of fractured-cavity unit are set up. Using the experimental simulation method, elastic exploration experiments of different oil and water volume in isolated cave and different type fracture flow capacity and production pressure in multi-hole fractured-cavity unit. The results show that: in the condition of flexible mining, production decline pattern and cumulative production and cumulative variation of pressure drop curves of two different fractured-cavity units are different; for fractured-cavity units of more than two holes, the fracture flow capacity and the production pressure have a regular pattern with the pressure curve and the cumulative production and cumulative pressure drop curve.

Keywords: fractured-cavity; carbonate rocks; isolated cave; multi-cave-fracture; flexible mining

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目“碳酸盐岩缝洞型油藏开发基础研究”(2006CB202404)。

作者简介:常宝华(1986—),男,2008年毕业于中国石油大学(北京)石油工程专业,现就读于中国科学院渗流流体力学研究所,研究方向为油气藏开发及渗流理论。地址:河北省廊坊市44#信箱渗流所,邮政编码:065007。电话:010-69213449;E-mail:shidabaohua@126.com.cn。

前言

缝洞型碳酸盐岩油藏是非常复杂的一种油藏,其洞、缝、孔分布极不规则,储集空间类型多样且分布不连续等特征,造成了该类油藏开采难度大,采收率低的现状^[1-3]。目前,该类型的油藏主要依靠弹性能量开采为主,塔河油田的部分区块进行了注水开发的实践^[4-5]。本文从最简单的缝洞单元即孤立溶洞型缝洞单元着手,进而扩展到两洞的多缝洞型缝洞单元,采用物理实验的手段来模拟两种缝洞单元的弹性开采情况,分析其开采特征,为制定缝洞型油藏开发政策提供依据,对于矿场生产具有一定的指导意义。

1 物理模型简介

缝洞型碳酸盐岩油藏的储集空间类型复杂多样,横向上呈片状分布,纵向上呈不连续分布,缝洞组合类型繁多,研究相对较困难。孤立溶洞是较为简单的缝洞单元,是研究复杂缝洞组合的基础,如图1所示,单井钻遇大尺度溶洞的顶部,溶洞内呈油水共存状态。多洞缝型缝洞单元是相对于孤立溶洞较为复杂的一种缝洞组合形式,如图2所示,单井钻遇大尺度溶洞的顶部(定名为主洞),通过具有一定渗透能力的裂隙与另一溶洞(定名为辅洞)相连通,主洞内为纯油,辅洞内为纯水。油井产量为 $q(t)$,井底压力为 $P_w(t)$,在忽略基质供给能力和岩石压缩系数的前提下,对以上两种缝洞单元进行弹性开采物理模拟实验研究,分析压力和产量的变化规律。

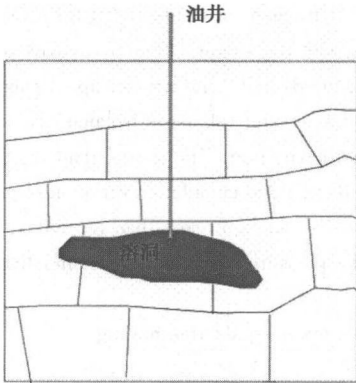


图1 孤立溶洞型缝洞单元示意图

Fig. 1 Isolated vuggy fractured-cavity unit diagram

依据相似理论,物理模型和实际油藏必须满足以下几个相似条件^[6]:

几何相似: $k_l = l_m / l_p$

运动相似: $k_v = \frac{l_m / t_m}{l_p / t_p} = \frac{k_l}{k_t}$

动力相似: $Re = \rho v l / \mu$ (选取 Reynolds 相似准数)

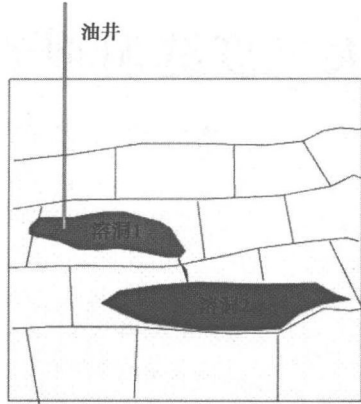


图2 多洞缝型缝洞单元示意图

Fig. 2 Multi-hole fractured-cavity unit diagram

根据上述相似准则,实验模型与实际生产的相似系数对比如表1所示。

表1 物理模型与实际流动相关参数与相似系数

Tab. 1 Physical model and the actual flow parameters and similarity coefficients

相似性	油田现场	实验模型	相似系数
几何相似	油管内径 76 mm	实验管径 3 mm	$k_{l1} = 25.33$
	溶洞直径 100 m	容器内径 8 cm	$k_{l2} = 12.50$
运动相似	日产量 5 ~ 500 t/d	实验流量 0.001 ~ 1 mL/s	$k_v = 2.60$
动力相似	地下原油、地层水	模拟油、蒸馏水	$k_{Re} = 1.01$

2 实验流程及实验方法

实验流程如图3和图4所示,实验采用高压ISCO泵提供动力,采用体积为1 000 mL的高压容器模拟未充填溶洞,采用具有贯穿裂缝的岩心模拟洞间裂缝,通过电子天平和巡检仪自动记录出口质量和溶洞内压力变化。

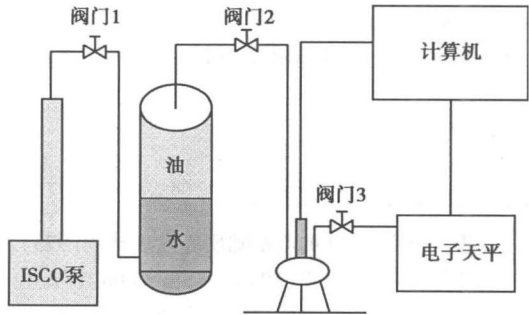


图3 实验流程图

Fig. 3 Experimental flow chart

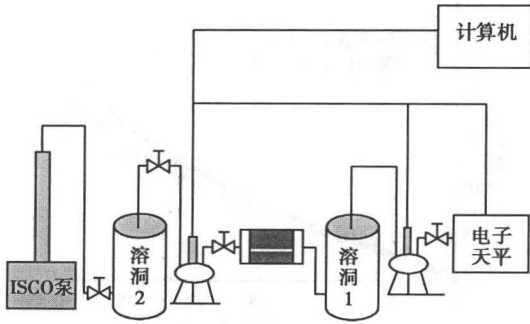


图4 实验流程图

Fig.4 Experimental flow chart

孤立溶洞模型分别以溶洞内油水比例 7:3,5:5,3:7 进行弹性开采实验,多洞缝模型洞间裂缝渗透率分别为 $0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.78 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 进行弹性开采实验和生产压差分别为 20 MPa,30 MPa 时的弹性开采实验。实验选用蒸馏水模拟地层水,实验室测得压缩系数为 $0.000475 \text{ MPa}^{-1}$;实验选用模拟油模拟地层原油,实验室测得压缩系数为 $0.000628 \text{ MPa}^{-1}$,黏度为 $27.6 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。

3 实验结果分析

3.1 孤立溶洞型缝洞单元开采特征

如图 5 和图 6 所示为孤立无充填溶洞弹性开采实验结果,分析了溶洞内不同油水比例时的开采特征研究,图 5 表明该类型缝洞单元弹性开采时产量呈单指数关系递减,累积产量曲线在开采后期趋于平缓;图 6 为累积产量与累积压降关系曲线,曲线呈一条直线,溶洞内油水比例不同时,直线的斜率不同,随油的含量越高,直线斜率越大;分析原因可知,溶洞内流体的压缩系数的大小控制弹性能量的强弱,与水的压缩系数相比,模拟油的压缩系数较大,所以当其比例较高时,溶洞内流体表现出较大的弹性能量。

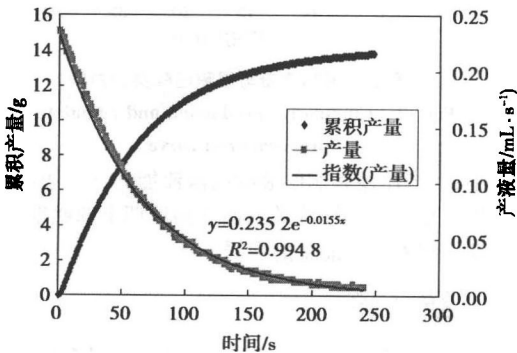


图5 产量与累积产量随时间变化曲线(油水比 5:5)

Fig.5 production and cumulative production curve

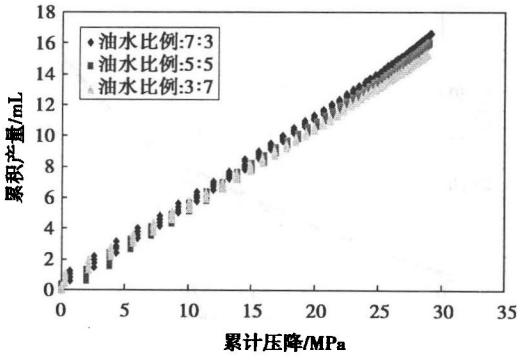


图6 累积产量与累积压降关系曲线

Fig.6 Cumulative production and cumulative pressure drop curve

在实际缝洞型油藏中,由于溶解气的存在,使得地层油水的压缩系数较大,在考虑岩石的压缩系数,部分缝洞单元表现出较强的弹性能量,如塔河油田的 S48 缝洞单元为典型的大尺度缝洞单元,与之连通的井表现出较高的累积产量;在不同的生产制度下,可根据生产曲线获得累积产量与累积压降关系曲线,根据斜率变化估算溶洞内的剩余油量^[7-8]。

3.2 多洞缝型缝洞单元开采特征

如图 7 和图 8 所示为多缝洞型缝洞单元弹性开采实验结果,图 7 表明两洞的多洞缝型缝洞单元弹性开采时产量表现出双指数关系递减特征,与孤立溶洞型缝洞单元不同,累积产量曲线在开采后期趋于平缓;图 8 表明该类油藏的累积产量与累积压降关系曲线具有前期呈直线,后期逐渐上翘的特征;分析原因可知,前期累积产量与累积压降的直线与孤立溶洞型缝洞单元一致,随主洞的压力下降,辅洞逐渐通过裂缝向主洞窜流供液,部分地补充了主洞的能量,以致后期压力降落速度较孤立溶洞型缝洞单元慢,曲线出现上翘段。

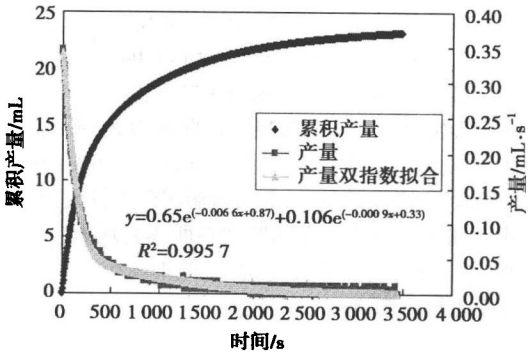


图7 产量与累积产量随时间变化曲线

Fig.7 production and cumulative production curve

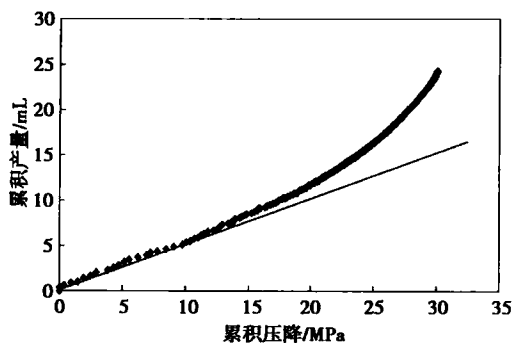


图8 累积产量与累积压降关系曲线

Fig. 8 Cumulative production and cumulative pressure drop curve

如图9和图10所示为洞间裂缝的渗流能力不同时的特征曲线。如图9所示,洞间压差曲线表现出前期重合、中期分叉、后期又重合的特征,裂缝渗透率越高,分叉后洞间压差越小,主要是由于前期以主洞内流体的弹性能量为主,随着主洞压力下降,辅洞开始通过裂缝向主洞窜流供液,不同的裂缝渗透能力,影响辅洞向主洞的供给能力;如图10所示,累积产量与累积压降关系曲线表现为洞间裂缝渗透率越高时出现上翘段越早。如果当溶洞间裂缝渗透能力足够大时,又表现出孤立溶洞型缝洞单元的特征。

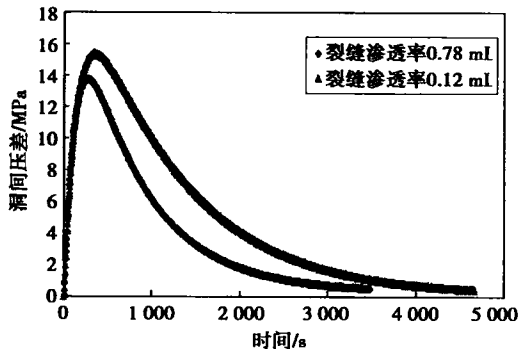


图9 洞间压差变化曲线

Fig. 9 Pressure curve between the caves

如图11和图12所示为生产压差不同时的特征曲线。如图11所示,洞间压差曲线也表现出前期重合、中期分叉、后期又重合的特征,洞间裂缝渗流能力相同时,生产压差越大,分叉后洞间压差越大;如图12所示,累积产量与累积压降关系曲线表现为生产压差越小,上翘段的上翘幅度越大,但不同生产压差时上翘段的起始点相同。

由此可知,在溶洞体积一定的条件下,洞间裂缝的渗流能力大小是影响累积产量与累积压降关系曲线的前期直线段长短的主要因素,裂缝渗透率越大,前期直线段越短,而直线段的长短体现着主洞体积的

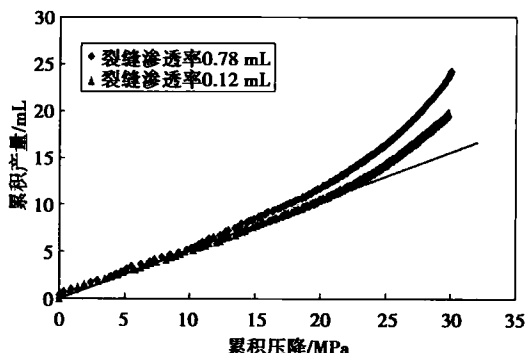


图10 累积产量与累积压降关系曲线

Fig. 10 Cumulative production and cumulative pressure drop curve

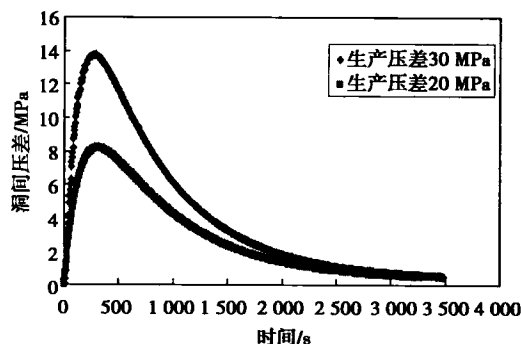


图11 洞间压差变化曲线

Fig. 11 pressure curve between the caves

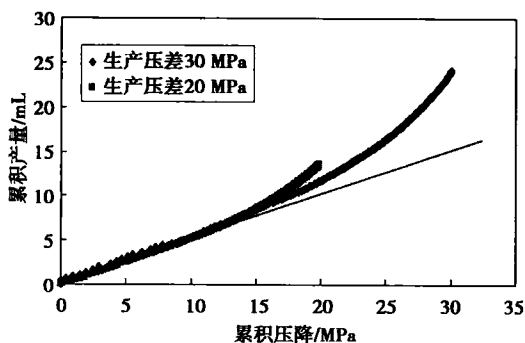


图12 累积产量与累积压降关系曲线

Fig. 12 Cumulative production and cumulative pressure drop curve

大小;生产压差和洞间裂缝的渗流能力的大小都影响累积产量与累积压降关系曲线的后期上翘幅度,上翘幅度体现着供给能量的强弱。

4 结 论

(1)孤立溶洞型缝洞单元弹性开采时产量表现为单指数关系递减的特征,累积产量与累积压降关系曲线呈一条直线,溶洞内油水体积不同时对应累积产量

与累积压降关系曲线的斜率不同,体现出溶洞内油水体积不同。

(2)两洞的多洞缝型缝洞单元弹性开采时产量表现出双指数关系递减特征,累积产量与累积压降关系曲线前期呈直线,后期逐渐上翘,上翘幅度体现辅助供给能量的大小。

(3)对于两洞的多洞缝型缝洞单元,洞间裂缝的渗流能力和生产压差不同时,洞间压差曲线都表现为前期重合、中期分叉、后期又重合的特征;洞间裂缝的渗流能力大小主要影响累积产量与累积压降关系曲线的前期直线段的长短,生产压差和洞间裂缝的渗流能力的大小都对累积产量与累积压降关系曲线的后期上翘幅度有影响。

参考文献

- [1] 柏松章. 碳酸盐岩潜山油田开发[M]. 北京:石油工业出版社,1996.
Bo Songzhang. Development of carbonate buried hill reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [2] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1999.
Kong Xiangyan. Advanced mechanics of fluids in porous media[M]. Hefei:University of Science and Technology of China Press,1999.
- [3] 张希明,杨坚,杨秋来,等. 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏描述及储量评估技术[J]. 石油学报,2004, 25(1):13-19.
Zhang Ximing, Yang Jian, Yang Qiulai, et al. Reservoir description and reserves estimation technique for fracture-cave type carbonate reservoir in Tahe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(1): 13-19.
- [4] 张希明. 新疆塔河油田下奥陶统碳酸盐岩缝洞型油气藏特征[J]. 石油勘探与开发,2001,28(5): 17-22.
Zhang Ximing. The characteristics of Lower Ordovician fissure-vug carbonate oil and gas pools in Tahe oil field, Xinjiang[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(5):17-22.
- [5] 陈志海,戴勇,郎兆新. 缝洞性碳酸盐岩油藏储渗模式及其开采特征[J]. 石油勘探与开发,2005, 32(3): 101-105.
Chen Zhihai, Dai Yong, Lang Zhaoxin. Storage-percolation modes and production performance of the karst reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(3):101-105.
- [6] 刘中春,李江龙,吕成远,等. 缝洞型油藏储集空间类型对油井含水率影响的实验研究[J]. 石油学报,2009,32(2):271-274.
Liu Zhongchun, Li Jianglong, Lv Chengyuan, et al. Experimental study on effect of reservoir space types on water cut of wells in karstic-fractured carbonate reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 32(2): 271-274.
- [7] 程倩,熊伟,高树生,等. 单缝洞系统弹性开采的试验研究[J]. 石油钻探技术,2009, 37(3): 88-90.
Cheng Qian, Xiong Wei, Gao Shusheng, et al. Experimental Study of Elastic Producing Single Cavity/Fracture System [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(3):88-90.
- [8] 修乃岭,熊伟,班凡生,等. 缝洞型油藏裂缝-溶洞中流体运动特征研究[J]. 重庆科技学院学报:自然科学版,2007,9(2):14-16.
Xiu Nailing, Xiong Wei, Ban Fansheng, et al. The Study of Flowing Characteristics from Fracture to Cave in Fractured-vuggy Reservoir[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2007, 9(2):14-16.

非均质油藏砂体厚度变化对渗流规律的影响

屈亚光,刘月田,马翠玉,钱川川,杨海宁

(中国石油大学石油工程教育部重点实验室 北京 102249)

摘要:陆相油藏沉积环境变化快,储层的平面非均质性强,直接影响油气渗流和驱替过程。储层砂体厚度变化是储层非均质性的表现之一,在不同驱替方式下,油藏的水驱开发效果存在较大差异。本文首先得出反映砂体厚度变化平面非均质理想模型,依据不同驱替方向分别建立了两相和单相条件下的渗流数学方程,并利用数值方法进行差分离散求解,可得出渗流介质厚度变化对单相渗流影响不大,而对两相渗流影响较明显,同时得出了薄注厚采条件下累积出油量高于薄采厚注。然后通过油藏数值模拟方法进一步分析注采井网条件下薄注厚注和薄注厚采两种开发方式下的水驱开发效果,得出注采井网在薄注厚采定压生产条件下,注入水在砂体厚度变化处流动阻力比薄采厚注小,压力传播速度快,全地层泄油效果好,累积采油量较高,为矿场应用提供了理论依据。

关键词:砂体厚度;平面非均质;驱替方式;水驱

中图分类号: TE 312

文献标识码: A

The Impact of Sandstone's Thickness on Fluid Seepage Law in Heterogeneous Reservoir

Qu Yaguang, Liu Yuetian, Ma Cuiyu, Qian Chuanchuan, Yang Haining

(MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, Petroleum University of China, Beijing 102249, P. R. China)

Abstract: Plane heterogeneity is serious because of great changes of depositional environment in continental reservoirs, which affect the fluid seepage law and drive of petroleum. The change of sandstone's thickness is an expression of reservoir heterogeneity. The effectiveness of water flooding is different at the condition of different drive mode. Firstly, the single phase and two-phase flow mathematic model of idealized model which revealed the characteristic of heterogeneous reservoir were built. The result obtained by discrete differential method demonstrated that the effect of thickness variation on fluid flow is obvious in oil water two-phase flow and the outlet accumulative oil production is higher as the inlet end is thin and outlet end is thick. Secondly, the rate of production and injection, recovery percent and formation pressure of reservoir unit were figured out by adopting numerical simulation method. The result showed that the formation pressure around injection well was lower and the production and injection rate was higher during thin-thickness location injection and thick production, which provided theoretical basis to improve waterflooding effectiveness for heterogeneous reservoir.

Keywords: sandstone's thickness; plane heterogeneity; drive mode; waterflooding

在油田开发初期,多为天然能量开采,储层非均质性对油田开发的影响表现不明显。但在注水开发后,出现了开发中的层内、平面和层间矛盾。储层非均质性是油气地质和开发工程中经常需要解决的问题,因为它在某种程度上决定了油气田内各井的油气产能^[1]。对于一般陆相沉积油藏,含油层系多,油

藏宏观非均质性强,导致水驱开发效果差别很大^[2-5]。平面上储层的厚度、油层的几何形态、油层的渗透率和孔隙度等参数等分布不均匀,制约着油藏水驱开发效果。目前对于油藏渗透率非均质性对注水开发效果影响的实验研究相关文献较多^[6-8],为提高非均质油田的开发水平提供了有力指导,但是对于油藏砂体

作者简介:屈亚光(1984—),男,在读博士研究生,主要从事油气田开发和油藏渗流力学研究。联系电话:010-89734597;E-mail:quyaguang521@yahoo.com.cn。