

能源开发多场耦合 理论及应用

论文集 | Symposium on Multi-field Coupling Theory and
Application of Energy Development

朱维耀 宋付权/编



科学出版社

能源开发多场耦合理论及应用

论文集

Symposium on Multi-field Coupling Theory and
Application of Energy Development

朱维耀 宋付权 编

科学出版社

北京

内 容 简 介

能源开发中的多场耦合问题是能源开发技术研究中的一个重要领域,国内外对此日渐重视。本论文集以 2016 年 10 月 28 日至 30 日在北京组织召开的第五届多场耦合理论及应用国际学术会议评出的优秀论文为基础,吸纳最新研究成果,整体内容既注重理论水平,又重视实用性;既突出多场耦合理论,又兼顾实验与测试方法及数值模拟等,并且也广泛涵盖了实际应用情况,对我国能源开发颇有实用价值。

本论文集适合能源工程技术人员、科学技术工作者、石油院校教师、大学生、研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

能源开发多场耦合理论及应用:论文集= Symposium on Multi-field Coupling Theory and Application of Energy Development / 朱维耀, 宋付权编. —北京:科学出版社, 2017

ISBN 978-7-03-051406-6

I. ①能… II. ①朱… ②宋… III. ①能源开发-耦合-文集
IV. ①TN751.1-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 312789 号

责任编辑:耿建业 刘翠娜 / 责任校对:桂伟利
责任印制:张 伟 / 封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京科印技术咨询服务公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017 年 2 月第一次印刷 印张:13

字数:300 000

定价:138.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 言

能源开发特别是流体能源的开发存在着多场耦合问题，随着世界非常规能源的大范围开发，多场耦合问题已引起广泛关注，并成为能源开发技术研究中的一个重要领域。虽然早期的耦合理论已初步在石油天然气开发、煤矿灾害防治、水电工程、环境保护等学科中应用，但理论的不完善使应用受到限制。为此，有必要加强投入力量发展多场耦合理论，推动多场耦合技术在能源技术领域的广泛应用。为配合能源各领域的多场理论研究和合理开发工作，由中国力学学会、中国岩石力学与工程学会、中国石油学会北京力学学会主办，北京科技大学、浙江海洋大学承办的“第五届岩土多场耦合理论及应用国际学术会议”于2016年10月28日至30日在北京科技大学举办。本论文集收录了本次学术会议中评选出的优秀论文27篇，研究课题广泛，内容丰富，包括能源多场耦合基础理论、实验与测试方法、多尺度耦合作用机理、油气田开发应用、水电工程应用、多场耦合数值模拟技术等。从中不仅能够看到从事相关专业工作的工程技术人员和科研人员在各自岗位上付出的辛勤劳动和取得的丰硕成果，也有助于从业人员相互之间更加广泛的交流。期望本论文集可以在一定程度上促进我国能源开发技术向更高水平发展。

朱维耀

2016年10月

目 录

序言

特低/超低渗油藏建立有效驱动实验研究·····	
····· 杨正明 张亚蒲 郑兴范 刘学伟 张英芝 (1)	
特低渗/致密砂岩油藏动态裂缝物理模拟及渗流规律研究·····	
····· 肖朴夫 王学武 杨正明 刘学伟 萧汉敏 (9)	
低渗透储层压敏效应对油水两相渗流特征的影响·····	黄小荷 龙运前 宋付权 (17)
疏松砂岩稠油油藏径向钻孔压裂后裂缝扩展规律实验研究·····	
····· 邹国栋 岳明 朱维耀 郝爱刚 张玉林 (25)	
长 6 低渗致密储层孔隙结构与应力敏感性·····	刘学伟 滕起 肖朴夫 (30)
不同润湿性油藏环境下自扩散剂驱油微观渗流实验研究·····	
····· 刘静文 朱维耀 宋智勇 (38)	
水溶液中甲烷气体的吸附作用·····	寇建龙 姚军 (44)
页岩饱和水前后力学性能变化特征·····	胡箫 宋付权 (49)
水对页岩微裂缝导流能力影响·····	周子恒 朱维耀 宋智勇 马东旭 (55)
龙马溪组页岩吸附特征实验研究·····	刘伟欣 宋洪庆 朱维耀 (61)
绥中县海水养殖场地下盐水开采方式分析·····	闫佰忠 (71)
辽宁普兰店安波温泉地热地质特征与成因模式·····	燕良东 宋庆春 谢文然 (78)
受限空间中页岩气的赋存状态及储量预测·····	张翔 胡箫 宋付权 (85)
页岩气藏流固耦合非线性问题的数学模型·····	于俊红 尚新春 (93)
交联聚合物微球分散体系水化特征研究·····	张晓静 朱维耀 (97)
稠油高温高压流变特性及其规律研究·····	范盼伟 宋智勇 朱维耀 (102)
凝析气藏注入气重力分异评价方法及影响因素研究·····	朱维耀 刘清芳 孙岩 (109)
微波加热低渗透煤层气的渗流规律数值模拟·····	张永利 崔余岩 苏畅 尚文龙 (117)
非牛顿聚合物颗粒流体低渗透油藏数值模拟·····	
····· 龙运前 宋付权 黄小荷 王永政 朱维耀 (127)	
深部开采条件下煤体温度、应力场分布模拟研究·····	王亚鹏 张永利 马凯 (136)
电场对饱和油水毛细管润湿性影响的数值模拟研究·····	韩文成 李爱芬 (144)
考虑范德华力作用的微尺度流动网络模型在不同分布模式下的驱油效果研究·····	
····· 陈震 朱维耀 (151)	
页岩气井非稳态非线性渗流的数值模拟·····	刘嘉璇 尚新春 朱维耀 (159)

应用多体融合技术识别解释低序级断层·····	郑灵芸 张继成 (164)
油藏多角度径向钻孔模拟方法研究···	刘昀枫 朱维耀 岳明 郝爱刚 张玉林 (177)
基于 ANSYS 的疏松砂岩水力压裂起裂模拟·····	····· 韩政臣 岳明 朱维耀 郝爱刚 张玉林 (184)
Lattice boltzmann simulation for mass transfer phenomena in proton exchange membrane fuel cell·····	Yousheng Xu Xinfu Zhou (191)

特低/超低渗油藏建立有效驱动实验研究

杨正明¹ 张亚蒲¹ 郑兴范² 刘学伟¹ 张英芝³

(1.中国石油勘探开发研究院廊坊分院渗流所, 廊坊, 065007; 2.中石油勘探与生产分公司油藏评价处, 北京, 100007; 3.庆新油田开发有限责任公司, 大庆, 151400)

摘要: 近十年来, 在中国石油探明储量和未动用储量中, 特低/超低渗透储量占了很大的比例, 投入开发的特低/超低渗透油田也越来越多。但特低/超低渗透油藏由于储层物性差, 渗流能力弱, 注水难以建立有效驱动压力系统。现有的井网优化方法也无法评价特低/超低渗透油藏是否建立注水有效驱动。本文利用高压物理大模型物理模拟实验技术, 分析了不同因素(渗透率、井网形式、井排距、压裂规模和生产压差等)对特低/超低渗透油藏有效驱动的影响。在此基础上, 提出了有效驱动综合评价系数, 并结合油田开发实际, 确定了有效驱动综合评价系数的界限, 形成了特低/超低渗透油藏有效驱动评价方法, 该方法成功应用于中石油两个试验区块。

关键词: 特低/超低渗透油藏; 物理模拟; 有效开发; 水驱; 系数

Experimental study of establishing the effective driving pressure system in ultra-low permeability reservoir

Yang Zhengming¹ Zhang Yapu¹ Zheng Xingfan² Liu Xuewei¹ Zhang Yingzhi³

(1.Petrochina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang Branch, Langfang, 065007; 2.Petrochina Exploration & Production Company, Beijing, 100007; 3. Qingxin Oilfield Development co., LTD, Daqing, 151400)

Abstract: In recent ten years, ultra-low permeability reserves occupy a very large proportion in the proved and undeveloped reserves in China. More and more ultra-low permeability reservoir have been put into develo-

基金项目: 国家油气重大专项(2011ZX05013-006)和中石油重点科技攻关项目(2011-13)。

作者简介: 杨正明, 男, 1969年1月生, 1991年毕业于石油大学(华东)开发系, 2004年获中国科学院博士学位, 现为廊坊分院渗流流体力学研究所副总工程师, 主要从事渗流理论、低渗透油气田开发和三次采油方面的研究工作, Email: yzmhxj@263.net。

pment. But due to bad reservoir property and weak weak percolating ability in the ultra-low permeability reservoirs, the water injection pressure increases continuously in water flooding. Water flooding is difficult to establish the effective driving pressure system. The present well pattern optimization method is unable to evaluate whether ultra-low permeability reservoirs have established effective driving water injection. In this paper, using the physical simulation experimental technology of high pressure large-scale outcrops model, the influence on effective driving of ultra-low permeability reservoirs under the different factors (such as permeability, well-patten type, distance between two rows, fracturing size, and production pressure difference, et. al) has been analyzed. On this basis, the effective driving comprehensive evaluation coefficient is put forward. Combining with actual ultra-low permeability oilfield development, this paper determine the limit of the effective driving comprehensive evaluation coefficient, form a ultra-low permeability reservoir effective driving evaluation method. This method has successfully applied to two block of Petro-China.

Key words: ultra-low permeability reservoir; physical simulation; effective development; water flooding; coefficient

截至 2012 年年底,低渗透油藏石油地质储量占中国石油地质储量的比例已经超过 40%,而这些低渗透石油储量是以渗透率小于 10mD 的特低/超低渗透油藏储量为主,这些油藏的有效开发对中国石油持续稳定发展具有重要意义^[1~3]。经过近十多年来的探索和研究,虽然中国大多数特低/超低渗透油藏进行了规模开发,但由于特低/超低渗透油藏储层物性差,渗流能力弱,注水难以建立有效驱动压力体系^[4,5],导致单井产量递减较快和油田采收程度较低的现象。因此,建立有效驱动压力体系是特低/超低渗透油藏有效开发的关键。目前,人们往往根据小岩心渗流实验测定的启动压力梯度数值来判断油田井网是否建立有效驱动^[6],该方法有其很大的局限性,这主要是因为缺乏有效驱动模拟的大尺度物理模拟实验装置。本论文以廊坊分院渗流流体力学研究所研发的特低/超低渗透大型露头低压物理模拟系统为基础^[7],分析不同因素对特低/超低渗透油藏有效驱动的影响,从而形成了特低/超低渗透油藏有效驱动的物理模拟评价方法,来指导特低/超低渗透油藏有效开发。

1 特低/超低渗透大型露头低压物理模拟实验系统和有效驱动评价方法

1.1 特低/超低渗透大型露头低压物理模拟实验系统

特低/超低渗透大型露头低压物理模拟实验系统可以用来模拟特低/超低渗透油藏流体在平面和剖面流动的渗流规律,模拟的大模型尺寸可以在 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.3\text{m}$ 范围内,在文献[7]与文献[8]中已经详细地叙述了特低/超低渗透大型露头低压物理模拟实验系统的组成即实验技术,这里不再作介绍。这里强调地指出:在做特低/超低渗透大型露头低压物理模拟实验时,选择的露头岩样在相似理论满足的基础上,必须与实际模拟地层要达到孔渗相近、微观孔隙结构特征相近、流体渗流规律相近和黏土矿物含量相近,否则

做出的实验结果不能真实反映实际储层的生产情况。本文选择的岩样为中石油某油区的露头岩样,与实际模拟储层相近。

1.2 特低/超低渗透油藏有效驱动的物理模拟评价方法

研究表明^[9],压力梯度场和单井产能是开展特低/超低渗透油藏有效驱动研究的主要手段和主要评价参数。极限井距法、有效动用系数法和油藏数值模拟方法都是从特低/超低渗透油藏渗流理论出发,通过求解压力梯度分布,来判断油藏是否建立有效驱动压力系统;产能预测方法将产能作为评价有效驱动的方法。结合大模型物理模拟实验,本论文提出了两个评价参数,分别为有效驱动系数和有效产能系数。

1) 有效驱动系数

对于特低/超低渗透油藏,由于流体存在启动压力梯度,在一定注采压差下流体渗流达到稳定状态时,并不是所有的区域都参与流动。将其中能够发生流动的面积与整个单元面积的比值称为有效驱动系数,如下式表示:

$$E_p = \frac{\text{整个单元面积} - \text{不流动单元面积}}{\text{整个单元面积}} \quad (1)$$

该系数反映的是井网平面波及状况以及压力系统的有效程度。有效压力系数越趋近于 0,此时说明非线性渗流区和拟线性渗流区越趋近于 0,整个模型基本上处于不流动区域;最大值为 1,说明整个模型均处于流动状态,没有不流动的区域。

2) 有效产能系数

将露头模型实测产量与拟线性产量(整个模型中的流体流动达到拟线性渗流场所对应的产量)的比值定义为有效产能系数,如下式所示:

$$E_q = \frac{Q_{\text{实测}}}{Q_{\text{拟线性}}} \quad (2)$$

该系数反映特低/超低渗透油藏非线性渗流对产量的影响程度,表征单井产量的相对大小。有效产能系数为 0,说明没有产能;有效产能系数为 1,说明整个模型流体流动基本处于拟线性渗流,此时非线性渗流影响可以忽略。

有效驱动系数和有效产能系数不仅能够体现非线性渗流对特低/超低渗透油藏有效开发的影响,而且储层裂缝发育程度、压裂规模和井网形式等因素都能够影响有效驱动系数和有效产能系数。因此,有效驱动系数和有效产能系数能够综合反映特低/超低渗透油藏的有效开发程度。

2 不同因素对特低/超低渗透油藏有效驱动影响研究

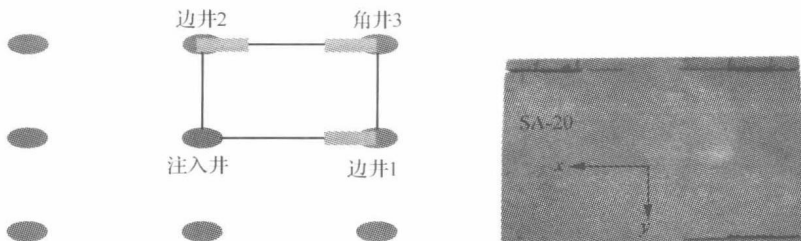
影响特低/超低渗透油藏有效驱动的因素有很多,大致可分为两类:第一类为储层因素,包括储层渗透率、有效厚度、地层压力和原油黏度等,这是建立有效驱动的物质基础;第二类为开发生产因素,包括井网形式、井排距、井型、压裂规模和生产压差等,

这是建立有效驱动的技术手段。下面主要以储层渗透率、生产压差和排距为例,说明不同因素对特低/超低渗透油藏有效驱动的影响。

2.1 储层渗透率和生产压差对特低/超低渗透油藏有效驱动的影响

以中国石油天然气集团公司(以下简称中石油)某典型油藏的正方形反九点井网为例,来说明储层渗透率和生产压差对特低/超低渗透油藏有效驱动的影响。选择的正方形反九点井网如图 1(a)所示,注水井为不压裂,采油井为压裂投产。选取 1/4 的正方形反九点井网单元(1 口注水井和 3 口采油井)作为物理模拟实验对象,用在露头岩样上先割开裂缝再填砂胶结的方法来模拟采油井的人工压裂裂缝,其导流能力是根据相似理论来确定石英砂粒径及交联剂比例,模型实物图如图 1(b)所示。

设计了 5 个不同的渗透率,分别为 0.3mD、0.5mD、0.8mD、1.5mD 和 2.0mD,6 个不同的驱替压差,分别为 0.02 MPa、0.03 MPa、0.04 MPa、0.05 MPa、0.06 MPa 和 0.10 MPa。实验结果如图 2 所示。



(a) 正方形反九点井网示意图

(b) 露头模型实物图

图 1 正方形反九点井网模型示意图与实物图

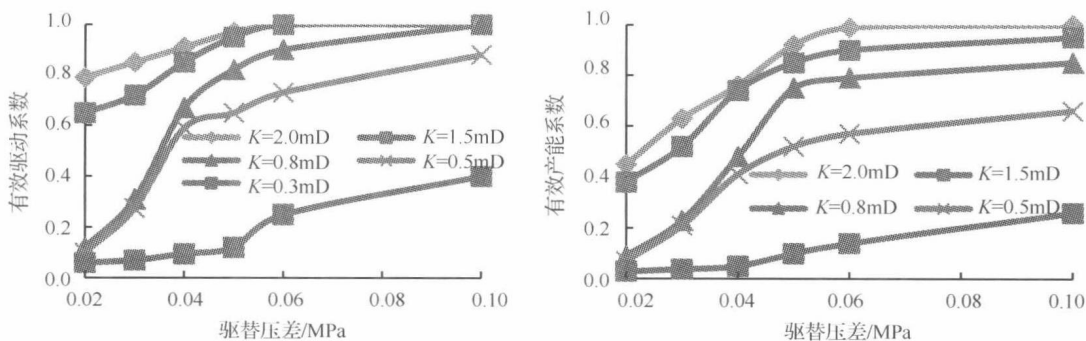


图 2 不同渗透率下有效驱动系数和有效产能系数与驱替压差的关系

从上面的图中可以看出:①在相同渗透率条件下,有效驱动系数和有效产能系数随驱替压差的增大而增大。当渗透率为 0.3mD 时,有效驱动系数和有效产能系数先随驱替压差的增大而变化幅度很小,只有当驱替压差达到一定值时,有效驱动系数和有效产能系数才随驱替压差的增大而增大。即当驱替压差从 0.02MPa 增加到 0.04MPa 时,有效驱动系数和有效产能系数分别从 0.06 和 0.03 增加到 0.09 和 0.05;当驱替压差从

0.04MPa 增加到 0.06MPa 时,有效驱动系数和有效产能系数分别从 0.09 和 0.05 增加到 0.25 和 0.14。当渗透率大于 0.3mD 时,有效驱动系数和有效产能系数先随驱替压差的增大而增大,只有当驱替压差达到一定值时,有效驱动系数和有效产能系数随驱替压差的增大而变化较小。以渗透率为 0.8mD 时,当驱替压差从 0.02MPa 增加到 0.04 MPa 时,有效驱动系数和有效产能系数分别从 0.12 和 0.09 增加到 0.67 和 0.48;当驱替压差从 0.04MPa 增加到 0.06MPa 时,有效驱动系数和有效产能系数分别从 0.67 和 0.48 增加到 0.90 和 0.79。②在相同驱替压差下,有效驱动系数和有效产能系数随渗透率的增大而增大,且渗透率小于 0.3mD 的有效驱动系数和有效产能系数随驱替压差的关系与渗透率大于 0.3mD 的有效驱动系数和有效产能系数随驱替压差的关系差别较大。这与其储层岩心的微观孔隙结构特征有关,如图 3 所示。图 3 为不同渗透率岩心的喉道半径分布规律。

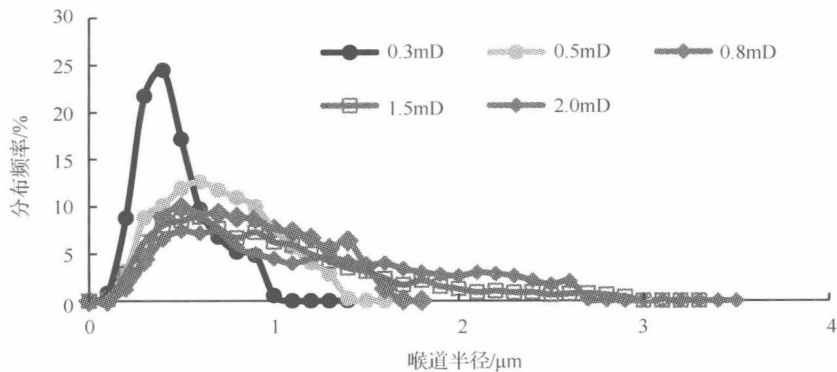


图 3 不同渗透率岩心的喉道半径分布规律

2.2 排距和生产压差对特低/超低渗透油藏有效驱动的影响

以渗透率为 2.0mD 储层矩形井网为例,来研究不同排距和生产压差对特低/超低渗透油藏有效驱动的影响。按照相似原理,用 3 块大模型露头岩样的排距 16cm、25cm 和 32cm 来分别模拟实际矩形井网的排距 80m、125m 和 170m,设计的 3 个不同的驱替压差,分别为 0.02MPa、0.04MPa 和 0.07MPa,实验结果如表 1 和图 4 所示。

表 1 不同排距和生产压差对特低/超低渗透油藏有效驱动的影响

压差/ MPa	80m		125m		170m	
	有效驱 动系数	有效产 能系数	有效驱 动系数	有效产 能系数	有效驱 动系数	有效产 能系数
0.02	0.89	0.61	0.79	0.57	0.43	0.53
0.04	0.97	0.81	0.91	0.75	0.76	0.69
0.07	1.00	0.97	0.98	0.93	0.84	0.84

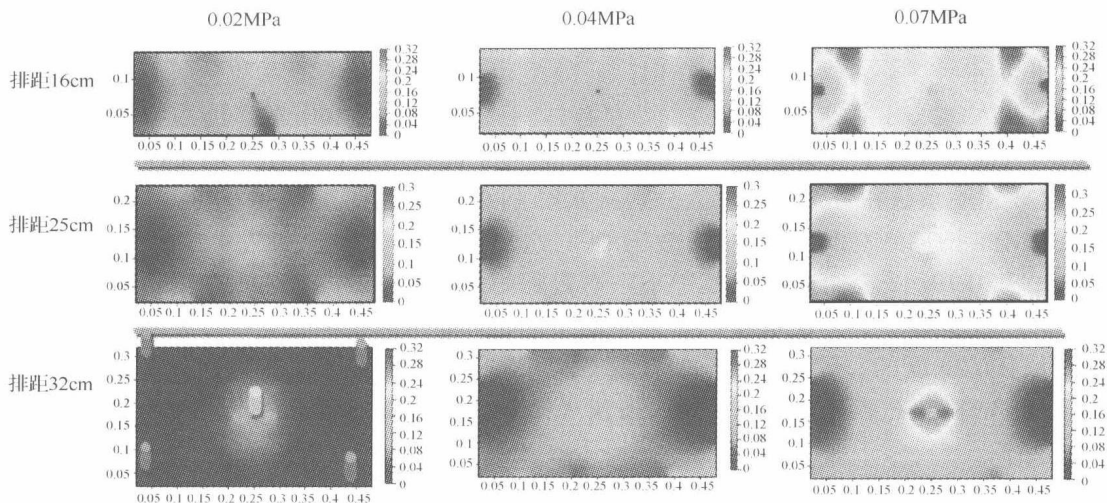


图4 不同排距和生产压差下矩形井网压力梯度分布

从表1和图4中可以看出：①有效驱动系数和有效产能系数随驱替压差的增大而增大，随排距的缩小而增大。以驱替压差为0.02MPa为例，排距为170m的有效驱动系数和有效产能系数分别为0.43和0.53；排距为125m的有效驱动系数和有效产能系数分别为0.79和0.57；排距为80m的有效驱动系数和有效产能系数分别为0.89和0.61。②根据笔者发表的文献，将特低/超低渗透油藏的渗流区域划分为死油区、非线性渗流区和拟线性渗流区。那么随着排距的缩小或者随着压差的增大，非线性渗流区和拟线性渗流区逐渐增大，而死油区逐渐缩小。

因此，可以通过增大储层渗透率(压裂改造)、增大生产压差和缩小排距等措施，来提高特低/超低渗透油藏的有效动用效果。

3 特低/超低渗透油藏有效驱动界限研究及应用

3.1 特低/超低渗透油藏有效驱动界限研究

根据所研究的特低/超低渗透油藏现场井网部署和油井生产情况，并结合油藏工程计算方法(表2为20MPa下不同渗透率条件下的极限井距)，根据相似理论换算到实验条件，确定出特低/超低渗透油藏有效驱动界限为

$$E = E_p \times E_q > 0.3 \quad (3)$$

式中， E 为特低/超低渗透油藏有效驱动综合系数。

即当特低/超低渗透油藏有效驱动综合系数大于0.3时，特低/超低渗透油藏才能有效动用。这个结论是对李道品^[10]关于低渗透油藏建立有效驱动体系含义标准的补充和细化。

表 2 20MPa 下不同渗透率条件下的极限排距

渗透率	20MPa 下的极限排距
0.5mD	100
0.8mD	125
1.5mD	167
2mD	250

3.2 应用

将上述研究成果应用于中石油两个区块(A 区和 B 区)都取得了很好的开发效果。A 区为老区,在原有井网条件下,计算的有效驱动综合系数为 0.25,水驱开发效果不好。经过给井网加密,加密的井网为 280m×200m,计算的有效驱动综合系数为 0.41,加密后单井产量提高 15%,井组日产油是加密前两倍,水驱控制程度提高 12%,实现了有效驱动。B 区为新区,设计的井网为 200m×200m,计算的有效驱动综合系数为 0.52,生产一年后,日产油稳中有升,能量补充初见成效。

4 结论

通过上面的研究和分析,可以得到以下结论:

(1) 基于特低/超低渗透大型露头低压物理模拟实验系统,提出了两个评价参数(有效驱动系数和有效产能系数)来综合反映特低/超低渗透油藏的有效开发程度。

(2) 分析了不同因素(渗透率、排距和生产压差等)对特低/超低渗透油藏有效驱动的影响,研究表明:在相同渗透率条件下,有效驱动系数和有效产能系数随驱替压差的增大或排距的缩小而增大。在相同驱替压差下,有效驱动系数和有效产能系数随渗透率的增大而增大,渗透率小于 0.3mD 的有效驱动系数和有效产能系数随驱替压差的关系与渗透率大于 0.3mD 的有效驱动系数和有效产能系数随驱替压差的关系差别较大。这与其储层岩心的微观孔隙结构特征有关。因此,可以通过增大储层渗透率(压裂改造)、增大生产压差和缩小排距等措施,来提高特低/超低渗透油藏的有效动用效果。

(3) 确定出特低/超低渗透油藏有效驱动界限,即当特低/超低渗透油藏有效驱动综合系数大于 0.3 时,特低/超低渗透油藏才能有效动用,研究成果成功地应用于中石油两个区块。

参 考 文 献

- [1] 许坤.中国油气勘探开发现状及未来发展方向.油(气)开采新技术、新工艺、新装备研讨会,成都,2013,04:11-13.
- [2] 国土资源部.2012 年全国油气矿产储量通报.北京:国土资源部,2013.
- [3] 胡文瑞.中国低渗透油气的现状与未来.中国石油企业,2009,(6):54-58.
- [4] 杨正明,于荣泽,苏致新,等.特低渗透油藏非线性渗流数值模拟.石油勘探与开发,2010,37(1):94-98.
- [5] 张仲宏,杨正明,刘先贵,等.低渗透油藏储层分级评价方法及应用.石油学报,2012,33(3):437-441.
- [6] 杨正明,郭和坤,刘学伟,等.特低-超低渗透油气藏特色实验技术.北京:石油工业出版社,2012.

- [7] 徐轩, 刘学伟, 杨正明, 等. 特低渗透砂岩大型露头模型单相渗流特征实验. 石油学报, 2012, 33(3):454-458.
- [8] 杨正明, 张仲宏, 刘学伟, 等. 低渗/致密油藏分段压裂水平井渗流特征的物理模拟及数值模拟. 石油学报, 2014, 35(1):85-92.
- [9] 杨正明, 刘先贵, 张仲宏, 等. 特低-超低渗透油藏储层分级评价和井网优化数值模拟技术. 北京: 石油工业出版社, 2012.
- [10] 李道品. 高效开发低渗透油藏的关键和核心//中国石油勘探开发研究院五十年理论技术文集(1958~2008). 北京: 石油工业出版社, 2008.

特低渗/致密砂岩油藏动态裂缝物理模拟及渗流规律研究

肖朴夫¹ 王学武² 杨正明² 刘学伟² 萧汉敏²

(1.中国科学院渗流流体力学研究所, 廊坊, 065007; 2.中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 廊坊, 065007)

摘要: 特低渗/致密储层压裂注水后, 当压力升高到一定值时, 微裂缝延伸导致动态裂缝开启。为了研究在注水过程中动态裂缝开启压力, 以及动态裂缝发育程度对渗流规律的影响, 以鄂尔多斯盆地长 8 储层岩心为例, 通过三轴应力系统进行岩心造缝, 结合现场资料开展物理模拟, 提出一种测定岩心动态裂缝开启压力的方法。进一步结合油水相对渗透率实验, 得到不同动态裂缝发育程度下的渗流变化规律, 并提出相应的动态裂缝开启压力范围。结果表明: 存在动态裂缝的岩心, 随着注入压力的增加, 渗透率曲线出现先保持稳定而后速度增加的趋势, 渗透率变化存在拐点; 而存在贯穿缝的岩心则表现为线性增加。随着动态裂缝开启程度的增加, 束缚水饱和度降低, 采出程度呈现先增加后减小的趋势。

关键词: 致密砂岩; 动态裂缝; 开启压力; 人工造缝; 渗流规律

Physical simulation and seepage flow of dynamic fractures in extra-low permeability / tight oil reservoirs

Xiao Pufu¹ Wang Xuewu² Yang Zhengming² Liu Xuwei² Xiao Hanmin²

(1.Institute of Seepage Flow Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang, 065007;
2.PetroChina Research Institute of Petroleum & Development, Langfang Branch, Langfang, 065007)

Abstract: After fracturing in extra-low permeability / tight oil reservoirs, when the injection pressure rises to a certain value, the micro fracture extension lead to developing dynamic fractures. In order to study dynamic fracture open pressure in the process of water injection, and the influence on seepage flow rule, with long 8 reservoir cores in ordos basin as an example, through the triaxial stress system, combined with field data to carry out the physical simulation experiment, put forward a method of measuring dynamic fractures open pressure. Further, with oil-water relative permeability experiments, get a different dynamic seepage flow

基金项目: 国家油气重大专项(2016ZX05013-001)和中国石油天然气集团公司重大基础攻关课题(2014B-1203)。

作者简介: 肖朴夫, 1987 年生, 男, 博士, 主要从事低渗/致密油藏储层特征及渗流机理的相关研究工作, Email:xiaolove99@qq.com。

variation rule of fracture development degree, and proposes the corresponding range of dynamic fractures open pressure. The results show that the dynamic fractured core, with the increase of injection pressure, permeability curve appear to remain stable and then speed increasing, permeability curve change appears a turning point, and penetration fracture core is characterized by linear increase. With the increase of dynamic fracture open degree, irreducible water saturation is reduced, the recovery shows a trend of decrease after the first increase.

Key words: tight oil reservoirs; dynamic fractures; fracture open pressure ; artificial fracture; seepage flow rule

引言

近年来,随着水平井开发、体积压裂、工厂化作业等技术的进一步完善,国内外致密油初期产量大幅攀升^[1~5],随后采油速度大幅下降、含水率上升较快,如何合理的开发特致密油藏越来越得到重视。鄂尔多斯盆地致密油储层具有典型的低孔、岩性致密和天然微裂缝普遍发育等特点,目前主要通过体积压裂技术,形成大规模缝网来进行开发,而其中有相当部分的次级裂缝和微裂缝没有进行有效利用。王友净等^[6]提出动态裂缝概念,即注水井在近井地带由于注入压力过大,岩层破裂产生的新裂缝以及重新激活的天然裂缝都称之为动态裂缝,认为这些裂缝对提高储层渗流能力和改善致密油藏开发效果具有“双重作用”^[7~10]:一方面,新生裂缝或天然裂缝的开启可以提高储层的渗流能力;另一方面,随着注入压力的不断增加,这些裂缝不断扩展、延伸、沟通而最终形成多方位裂缝,增大了油井暴性水淹的可能性,大大降低了水驱波及体积并且影响剩余油分布^[11]。前人主要通过预测计算、数模方法对动态裂缝做过相应研究,比如范天一等^[12]通过建立可以表征动态裂缝的数学模型,并对动态裂缝的演化规律进行模拟,而从实验方法测量动态裂缝开启压力方面的研究较少。因此,本文针对鄂尔多斯盆地长8段砂岩储层,开展物理模拟实验,研究注水过程中渗透率变化趋势,提出一种测定岩心动态裂缝开启压力的方法,得到动态裂缝开启所需压力范围;对比不同裂缝发育程度下的渗流规律,明确动态裂缝对残余油及采出程度的影响机理。

1 鄂尔多斯盆地动态裂缝物理模拟方法

1.1 实验岩心及流体

实验样品岩心选取自鄂尔多斯盆地长8储层致密砂岩岩心,具体岩心资料如表1所示,其气测渗透率范围在 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度范围为5.1%~16.9%,实验气测渗透率参照行业标准《覆压下岩石孔隙度和渗透率测定方法》。实验中所用流体为模拟地层水,模拟地层水按地层水矿化度配制,矿化度为80000mg/L。

表 1 岩心基础物理参数

岩心号	深度/m	长度/cm	直径/cm	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔隙度/%
B-1	2206.9	5.39	2.48	0.176	10.6
B-2	2354.8	5.44	2.48	0.316	13.7
B-3	2349.7	5.36	2.48	0.576	14.5
B-4	2345.7	5.37	2.48	0.766	15.8
B-5	2344.0	5.40	2.43	1.150	16.3
B-6	1479.2	5.49	2.49	0.155	5.1
B-7	1360.6	5.42	2.49	0.313	7.0
B-8	1371.3	5.43	2.49	0.555	7.6
B-9	1360.5	5.47	2.49	0.628	7.1
B-10	1444.2	5.37	2.49	1.410	5.7

1.2 三轴应力造缝实验

高帅等^[13]与吴吉元^[14]对鄂尔多斯盆地长 8 储层裂缝已经进行比较全面的统计和分析,研究表明在长 8 储层裂缝方向主要为近东西向,裂缝倾角分布范围以 $45^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 为主,说明发育的主要以高角度缝和垂直缝为主。实验以天然微裂缝发育的储层为对象,基于最小应力原理,即裂缝总是沿着强度最小、阻力最小的方向产生,岩石的破裂面垂直于最小应力方向^[15]。由于现场岩心取样很难取得带动态裂缝的岩心,所以先对天然岩心进行造缝实验。实验中通过将岩心置于三轴应力夹持器中,施加水平方向轴向应力,根据应力学原理,由于平行于岩心水平方向的受力最小,可产生高角度缝,这也与储层现场裂缝特征相符合。图 1 显示的是通过多次人工挤压造缝后得到两种不同形态的裂缝,分别模拟地层下动态裂缝和贯穿缝。实验过程中通过多次造缝试验发现,控制轴向应力使得渗透率增加 80%~120% 时,形成动态裂缝的几率较大,如果渗透率增加高于 200%,岩心非常容易破裂,形成贯穿缝。

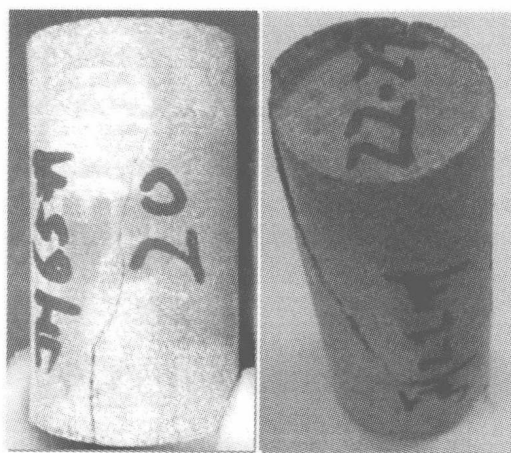


图 1 动态裂缝岩心(左)和贯穿缝岩心(右)