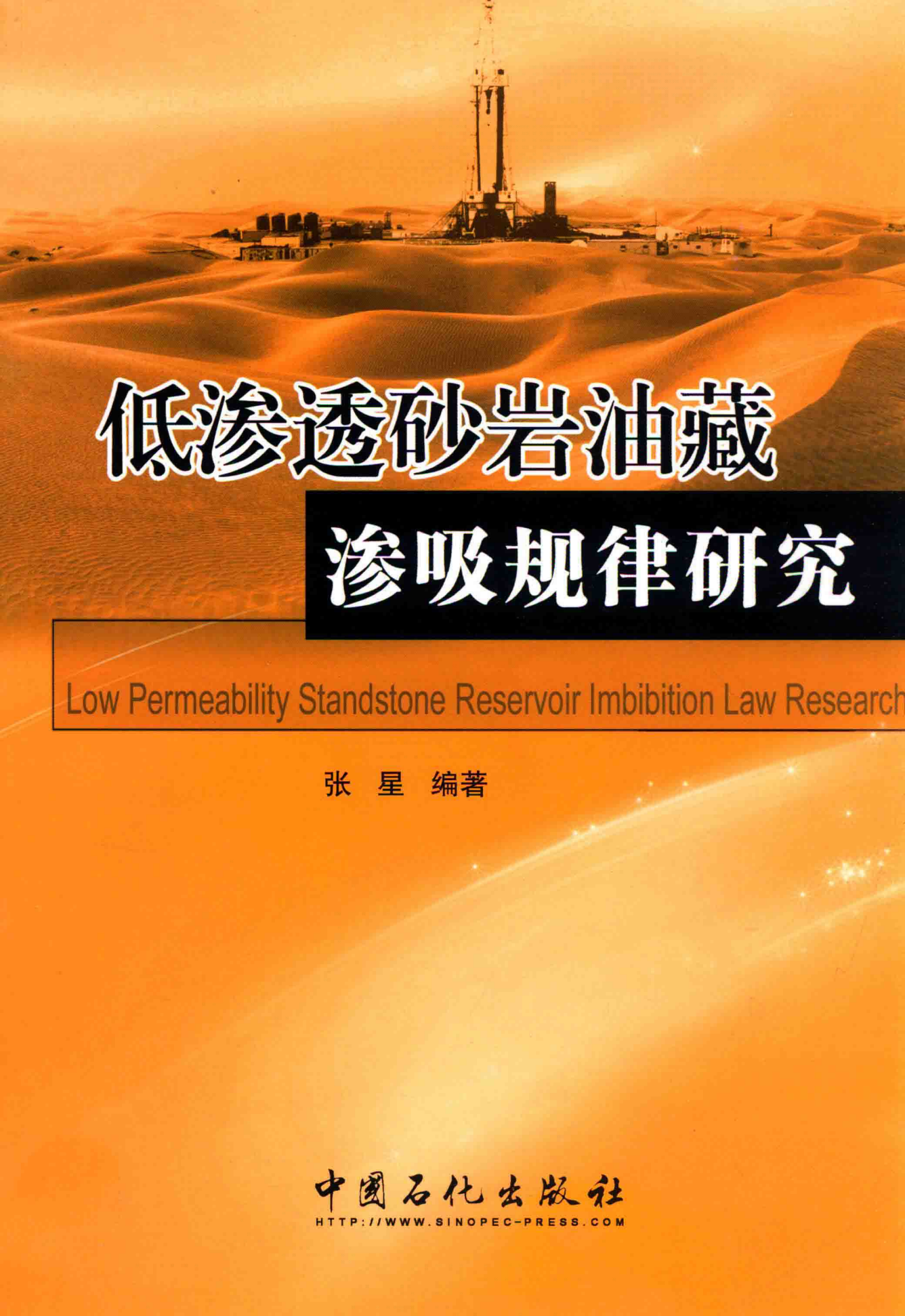




低渗透砂岩油藏

渗吸规律研究

Low Permeability Sandstone Reservoir Imbibition Law Research

张 星 编著

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

低渗透砂岩油藏渗吸规律研究

■ 张星 编著



中国石化出版社

内 容 提 要

本书以胜利油田低渗透砂岩油藏为研究目标,通过静态渗吸、动态渗吸实验与数值模拟结合,系统研究影响低渗透油藏渗吸的因素,揭示了影响渗吸的主要机理,完善了裂缝性低渗透油藏开发技术,对非常规致密油气藏研究 also 具有重要的参考价值。本书可供从事低渗透油藏开发、研究的工作人员使用,也可供高等院校相关研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

低渗透砂岩油藏渗吸规律研究/张星编著. —北京:
中国石化出版社,2013.4
ISBN 978-7-5114-2091-6

I. ①低… II. ①张… III. ①低渗透油气藏-砂岩油
气藏-研究 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 075350 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何
形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 8 印张 189 千字

2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷

定价:36.00 元

世界上低渗透油田资源十分丰富,分布范围广泛,各产油国基本上都有该类油田。随着勘探开发的不断深入和发展,我国低渗透油气藏所占的比例正不断加大,逐渐成为我国能源供给的重要领域,因此高效开发这类油气藏是石油工作者面临的一项重要任务。

目前低渗透油藏主要采取注水开发,低渗透油气藏普遍存在孔隙度小、孔隙压力低、储层渗透率低等特点,导致水驱过程中采收率低,特别是通过压裂形成了裂缝系统-基质系统共存的复杂地层,基质特性以及基质与裂缝间的渗流特性是影响开发的关键,对于致密的基质,其渗吸特性对渗流影响显著,已经引起人们越来越多的关注。因此,对低渗透油藏渗吸的特殊性作深入研究,加强低渗透油气藏的驱油机理研究,对认识低渗透油藏的驱油机理和提高其采收率都具有重要的理论及现实意义。

本书以胜利油田低渗透砂岩油藏为研究对象,对基质渗吸特性、基质与裂缝渗流进行了研究,在此基础上进行了数值模拟研究,得到致密砂岩油藏渗吸的规律,完善了渗吸理论,随着低渗透油藏在开发中占得的比例越来越大,渗吸理论在开发中的应用也将越来越广泛,特别是对超低渗透油藏开发具有重要的指导意义,为低渗透油藏压裂、注水等技术提供理论基础,将对提高低渗透裂缝油藏的采收率具有重要的指导意义。

本书由张星编著,编写过程中得到胜利油田毕义泉、汪庐山的指导和胜利油田采油院、中国石油大学(华东)、中国石油大学(北京)等单位的大力支持,在此表示衷心感谢。

本书可供从事低渗透油藏渗吸研究的高校师生、研究人员以及从事低渗透压裂与注水的现场工程技术人员参考使用。

低渗透油藏渗吸是一个系统复杂问题,涉及多种因素,对渗吸问题的研究需要在以后的实践中进一步认识、提高和完善,同时由于作者水平有限,如有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

第1章 概 述	(1)
1.1 低渗透油藏开发现状	(1)
1.2 国内外渗吸研究进展	(2)
第2章 低渗透砂岩毛管力实验研究	(11)
2.1 实验目的与原理	(11)
2.1.1 实验目的	(11)
2.1.2 实验原理	(11)
2.1.3 实验样品	(14)
2.2 实验设备与步骤	(14)
2.2.1 实验设备	(14)
2.2.2 实验步骤	(15)
2.3 实验分析方法与结果	(15)
2.3.1 毛管力与饱和度方程	(15)
2.3.2 毛管力曲线的分析方法	(16)
2.3.3 实验分析结果	(17)
2.4 结论	(34)
第3章 静态渗吸规律实验研究	(35)
3.1 实验样品	(36)
3.2 实验设备流程	(37)
3.3 实验步骤	(39)
3.4 干燥岩芯渗吸实验研究	(39)
3.4.1 渗吸速率与时间关系	(39)
3.4.2 渗透率对渗吸的影响	(43)
3.4.3 温度对渗吸的影响	(44)
3.4.4 长度对渗吸的影响	(45)
3.4.5 压力对渗吸的影响	(46)
3.5 饱和油后岩芯渗吸实验研究	(47)
3.5.1 长度对渗吸的影响	(47)
3.5.2 边界条件对渗吸的影响	(50)
3.5.3 温度对渗吸的影响	(56)

3.5.4	界面张力对渗吸的影响	(58)
3.5.5	束缚水饱和度对渗吸的影响	(59)
3.6	静态渗吸理论研究	(65)
3.6.1	渗吸分析	(65)
3.6.2	油藏渗吸条件	(66)
3.6.3	渗吸模型	(68)
3.7	结论	(71)
第4章	低渗透砂岩动态渗吸实验研究	(73)
4.1	实验目的	(73)
4.2	实验样品	(73)
4.3	实验设备与步骤	(75)
4.3.1	实验设备	(75)
4.3.2	实验步骤	(75)
4.3.3	实验结果分析	(76)
4.4	动态渗吸理论研究与分析	(82)
4.5	结论	(86)
第5章	低渗透裂缝性油藏渗吸数值模拟研究	(88)
5.1	渗吸数值模拟研究内容	(89)
5.1.1	基质岩块中的渗吸现象	(89)
5.1.2	渗吸数值模拟基础参数	(91)
5.1.3	双重介质模型网格划分	(91)
5.1.4	双重介质模型等效毛管力拟合	(92)
5.1.5	数值模拟设计	(94)
5.2	小尺寸岩芯渗吸规律	(94)
5.2.1	地质模型及流体模型	(94)
5.2.2	裂缝产状影响	(94)
5.2.3	毛管力影响	(95)
5.2.4	油水黏度比影响	(95)
5.2.5	基质渗透率影响	(95)
5.2.6	基岩初始含水饱和度影响	(95)
5.2.7	生产压差影响	(96)
5.2.8	小结	(96)
5.3	大尺寸基岩块渗吸规律	(96)
5.3.1	地质模型及流体模型	(96)
5.3.2	毛管力影响	(97)
5.3.3	油水黏度比影响	(97)
5.3.4	基质渗透率影响	(97)

5.3.5 基岩初始含水饱和度影响	(98)
5.3.6 小结	(98)
5.4 岩芯尺寸单条裂缝渗吸规律	(98)
5.4.1 地质模型及流体模型	(98)
5.4.2 毛管力影响	(98)
5.4.3 油水黏度比影响	(99)
5.4.4 基质渗透率影响	(99)
5.4.5 基岩初始含水饱和度影响	(99)
5.4.6 小结	(99)
5.5 注采井间单条裂缝渗吸规律	(100)
5.5.1 地质模型及流体模型	(100)
5.5.2 毛管力影响	(100)
5.6 小尺寸双重介质模型渗吸规律	(100)
5.6.1 地质模型及流体模型	(100)
5.6.2 毛管力影响	(100)
5.6.3 油水黏度比影响	(101)
5.6.4 基质渗透率影响	(101)
5.6.5 基岩初始含水饱和度影响	(101)
5.6.6 小结	(102)
5.7 典型双重介质模型渗吸规律	(102)
5.7.1 地质模型及流体模型	(102)
5.7.2 毛管力影响	(102)
5.7.3 形状因子影响	(102)
5.7.4 小结	(103)
5.8 低渗透裂缝性油藏渗吸规律分析	(103)
5.8.1 油水黏度比的影响	(103)
5.8.2 岩石润湿性的影响	(103)
5.8.3 油水界面张力的影响	(103)
5.8.4 初始含水饱和度的影响	(103)
5.8.5 温度的影响	(103)
5.8.6 注采速度的影响	(103)
5.8.7 裂缝发育程度和裂缝长度的影响	(103)
5.8.8 基质与裂缝渗透率之比的影响	(104)
5.8.9 基质毛管力的影响	(104)
5.8.10 重力的影响	(104)
5.8.11 界面张力影响	(104)
5.9 低渗透裂缝性油藏渗吸参数优化研究	(104)

5.9.1 多因素多水平正交试验	(104)
5.9.2 关键指标对比分析	(106)
5.9.3 模拟结果综合分析	(106)
5.9.4 模糊层次分析法	(107)
5.9.5 模糊层次分析法的应用	(108)
5.9.6 模糊层次分析法的数值检验	(109)
5.9.7 实例应用	(110)
5.9.8 分析与结论	(110)
5.9.9 小结	(111)
5.10 结论与建议	(112)
结论	(114)
参考文献	(116)

第1章 概述

1.1 低渗透油藏开发现状

世界上低渗透油田资源十分丰富,分布范围广泛,各产油国基本上都有该类油田。随着勘探开发的不断深入和发展,我国低渗油气藏所占的比例正不断加大,高效开发这类油气藏是石油工作者面临的一项重要任务。

低渗透油气藏普遍存在孔隙度小、孔隙压力低、储层渗透率低等特点,特别是低渗油田中往往存在较多的天然裂缝,而天然裂缝的随机分布及其造成的地层非均质对开发带来不利的影响。因此,低渗透油气藏的采收率相对较低,同时,由于其开采工艺复杂,开采成本较高,其经济效益亦较低。但是,低渗透油气藏由于其广泛的资源而具有重要的价值。因此,加强低渗油气藏的驱油机理研究,对提高该类油藏的开发水平具有积极的意义。

目前胜利油田探明石油地质储量49.5亿t,其中低渗透储量9.44亿t,占19.1%,主要为浊积岩、薄互层和砂砾岩三种类型。薄互层油藏是指纵向上储层(砂岩)与非储层(泥岩、页岩)相互交替出现且厚度均较小的一种沉积类型,主要为滩坝砂和部分浊积岩,是胜利油田低渗透油藏主要类型。预计“十二五”期间,胜利油田该类油藏可新增探明储量1.52亿t,新增控制储量1.23亿t,远景资源量为8.56亿t。同时国家对能源的需求为非常规油气大发展提供了机遇。根据发改委《页岩气发展规划(2011-2015年)》,到2015年,国内页岩气产量将达65亿 m^3 ,探明储量达到6000亿 m^3 ,可采储量达到2000亿 m^3 。中国石化致密油气资源非常丰富,未动用储量15亿 m^3 ,其中特低渗储量达到近10亿 m^3 ,因此低渗油田的有效开发将是当前及今后重要任务。

在低渗油气藏的开发中,开采的主要手段是压裂投产,将地层压开形成人工裂缝,以增加渗流面积和导流能力。由于低渗储层本身的复杂性,加上压裂裂缝的存在以及其他一些开采措施的影响,形成了裂缝系统-基质系统共存的复杂地层。油藏岩石(特别是砂岩)孔隙极小,流体在其中的流动空间是一些大小不等、彼此曲折相通的复杂小孔道,这些孔道可看成是变断面、表面粗糙的毛细管,因而储层岩石可看成相互连通的毛细管网络。通常把一种润湿相流体在多孔介质中只依靠毛管力作用去置换另一种非润湿相流体的过程称为渗吸。对于致密的多裂缝油藏不能使用传统的水驱技术,因为毛管力在油藏驱油中作用显著,毛管渗吸驱油作为裂缝性低渗油藏中采油的一个重要因素已经引起人们越来越多的关注,同时裂缝性低渗透油藏注水开发过程中发生的渗吸驱油作用对改善低渗透油田注水开发效果起重要作用。因此,研究毛管渗吸规律及其影响因素对认识低渗透油藏的驱油机理和提高其采收率都具有重要的理论及现实意义。

目前低渗油藏开发中存在的主要问题:

- ①注水井吸水能力低,注水压力高;
- ②自然产能低,一般需要进行储层改造;
- ③低渗主力开发单元见水后产量递减快;

④注水水质指标高、处理难度大、成本高。

注水井注入压力的高低直接影响水井的注水效率,加大地层配注系统的负荷,使注水能耗增加,水井欠注使储层产生应力敏感效应,降低了波及系数,导致低渗透油田采收率减小。

低渗透储层孔喉小、孔隙度低是导致注水压力高的主要原因,随着注水压力的不断提高,地层压力不断上升,导致含水上升快,使注入水由渗流变为窜流特征,降低了驱油效率。纵向裂缝的存在使隔层较薄的层系液体窜通,分层开采效果变差,另外高压注水诱发套管变形,对低渗透油田的开发造成了严重的危害。

因此,如何在油藏方案设计中结合渗吸规律,保持合理的注水速度,提高毛管渗吸驱油效果成为裂缝性低渗油藏中采油的一个关键因素,是低渗透油田注水开发需要深入研究的问题。

低渗透油藏常常伴有裂缝发育,储层改造使裂缝更加复杂。在基质岩块-裂缝系统中,基质起到储油作用,裂缝起导流作用。裂缝渗透率与基质岩块渗透率存在巨大差异,使得油藏常规注水过程中水窜、水淹严重,仍然有大量的剩余油富集在基质岩块中,导致基质中的原油难以开采,需要进一步研究渗吸规律,确定影响因素,改善渗吸效果,降低基质含油饱和度,提高采收率。

周期注水是20世纪60年代初在前苏联和美国实施的一种注水方法。“九五”期间,胜利油区针对低渗透油藏实施不稳定注水20个单元,覆盖储量 $3638 \times 10^4 \text{t}$,累计增油 $7.5 \times 10^4 \text{t}$,累计少产水 $31.2 \times 10^4 \text{m}^3$,累计少注水 $138 \times 10^4 \text{m}^3$,增加可采储量 $94.2 \times 10^4 \text{t}$,提高采收率2.6%。不稳定注水加强了基质岩块毛管力的渗吸作用,引起高低渗透层间的油水交换,增加了采油量,因此需要进一步深入研究渗吸规律提高周期注水开发效果。

对于低渗透油藏,虽然已做了大量的研究工作,但其开发仍存在很多矛盾,开发水平比较低。目前,全国低渗透油田平均采收率为23.3%,中国石油为24.2%,中国石化为21.2%,明显偏低。

胜利油区低渗透油藏有其特殊的地质特征:埋藏深、压实作用强、物性差、非均质严重、束缚水饱和度高,水驱开发效果相对较差。在裂缝性油藏中,有两个主要参数控制着采收率:

- ①裂缝渗透率的大小与非均质性;
- ②裂缝与基质之间的交换能力。

裂缝渗透率的大小决定了井的导流能力,非均质性决定了水的流量,裂缝与基质之间的交换能力是提高油藏采收率最主要的因素。

因此,研究裂缝与基质间的交换能力,分析影响交换能力的主要因素,为以毛管渗吸作用为基础的油藏开发方式提供了依据,对提高低渗透油田采收率具有重要意义。对低渗油藏渗吸的特殊性作深入研究,认识影响渗吸规律的主要因素、机理及数学描述,对改善裂缝性低渗透油藏渗吸的方法与技术形成理性认识,为提高低渗透油田注水开发效果提供理论依据,对油田的持续稳定发展具有重要意义,也为砂砾岩、非常规致密油藏的开发提供借鉴,为实现“油气硬稳定”提供强有力的技术支撑。

1.2 国内外渗吸研究进展

21世纪的经济的发展对我国及世界能源提出了新的需求,勘探与开发低渗透油气田已成

为今后一段时期内能源稳定供应的主要途径。创新低渗透油气田开发、开采技术，建立低渗透油气藏的开发模式，对于我国及世界石油工业的发展具有十分重要的意义。

我国及世界各国目前探明的低渗透储层广泛分布于各个产油区的不同埋藏深度和不同时代的地层中。在这些低渗透储层中，形成了不同规模、不同圈闭类型的油气藏。根据当前世界范围的能源和资源状况及经济技术发展的趋势分析，投入开发的低渗透油气田的比例将会越来越大，低渗透油气田的勘探、开发理论与技术对于我国油气储量和产量持续稳定增长、改善我国的能源和资源结构将起到积极、重要的作用。

在过去的40多年中，美国、俄罗斯等国对低渗透油气田开发理论与应用技术持续进行研究。美国石油工程师协会(SPE)自20世纪80年代起每年组织一次世界性的低渗透油气田开发学术研讨会，90年代后每年组织两次。他们形成的低渗透油气田储层改造技术、低渗透油气储层描述方法和低渗透油气储层渗流机理等成果解决了一些低渗透油气田开发的关键问题。俄罗斯从20世纪60年代初开始低渗透油气田开发理论研究，他们形成的注气(二氧化碳、氮气)开发低渗透油气田技术、水动力学方法开发低渗透油气田技术等代表了世界先进水平。

我国在“七五”~“九五”期间相继把低渗透油气田开发问题列入重点战略研究项目，并取得了一系列的突出成果，从现有的资料和文献调研表明，低渗透油气田开发技术问题主要包括：

- ①低渗透储层的物性标准和界限；
- ②低渗透油气层流体的非线性渗流机理；
- ③低渗透油气田的开发理论与应用技术；
- ④低渗透油气田开采工艺技术与方法；
- ⑤低渗透油气田提高采收率技术与方法；
- ⑥低渗透储层的保护技术；
- ⑦低渗透油气田开发管理与经营理论。

自20世纪70年代开始，我国对低渗透油气田开发技术和地层应力影响低渗透油气田开发效果的系统研究已有30多年了，研究方法涉及岩石力学、油层物理、渗流力学等理论。渗流力学主要研究了流固耦合理论建模、解析解或数值解等问题；岩石力学主要研究了弹性变形、塑性变形、变形界限等问题；油层物理主要研究了孔隙度、渗透率的状态方程，应用界限等问题。主要成果包括：低渗透油气田成藏理论和低渗透油气藏描述技术；低渗透储集层特征识别理论；低渗透油气田开发与开采技术；低渗透油气层改造技术和低渗透油气层保护技术等。在21世纪初，应用先进的钻井技术、保护油层和完井技术、整体优化压裂技术、强化注采工艺技术和各种提高原油采收率技术经济高效地开发低渗透油气藏。

利用注水保持地层压力进行开发，在俄罗斯、美国及其他一些国家和地区使用比较广泛。由于油田地质情况及所处的地理环境不同，采用的注水方法和注水工艺也千差万别，且随着油田开发的进行，注水工艺技术也在不断改进。在使用活塞泵、水力涡轮高速注水泵的同时，目前又出现了潜油电泵注水和垂直电泵注水。对于低孔、低渗或特低渗油层来说，由于其吸水能力差，其注水工艺比中、高渗透油层的难度更大，注水方式主要有以下几种：

(1)周期注水：不稳定注水又称为周期注水或脉冲注水、间歇注水，是20世纪50年代末、60年代初在前苏联和美国实施的一种注水方法。20世纪50年代末，前苏联的苏尔古切夫分析了苹果谷油田油藏暂时封闭停产后的开采情况，以及卡林诺夫油田新斯切潘诺夫开发

区主力油层由于技术和气候原因周期性注水开动态后,第一次提出对油藏进行不稳定注水是有方法。美国也于20世纪60年代初在斯普拉柏雷油田 Driver 区实施了不稳定注水,获得明显效果,并于1961年,在斯普拉柏雷裂缝性砂岩油田德里佛单元的早期开发区将不稳定注水作为一种新的工艺提出并实施。到了20世纪70年代、80年代,不稳定注水已经成为国内外一些注水开发油田改善开发效果的主要方法手段。它是周期性地改变油层中的注水量或注水压力在油层中形成不稳定的压力状态,这种注水方式对非均质亲水油层和裂缝性低渗透油层尤为有效。一个注水周期分为升压、稳压和降压阶段。升压阶段是注水阶段,稳压阶段是油层不同渗透率部位进行流体交换的阶段,稳压过后进入降压阶段,此时生产井生产,注水井停注,油层较低渗透部位的流体向较高渗透部位流动。根据周期注水矿场试验及工业应用的结果得出:①周期注水应尽早实施。矿场试验结果表明,周期注水实施越早,含水越低,周期注水效果越好,应在含水率低于70%以前进行;②在周期注水期间,总的注水量不应低于普通注水量的平均值,否则将会降低注水效果,比平均值低50%时往往会使周期注水效果大大降低或无效;③注水量的波动幅度应尽可能的大些,以便增大油层中压力不稳定性,有利于毛管渗吸作用和流体间的交换作用;④注水和停注的时间视储层特性加以确定,不易相差太大。为了保持周期注水较佳效果,周期时间应随周期的增加按抛物线规律依次延长;⑤应重视研究储层非均质性、小层间水动力连通情况,而且选择这类地区首先进行周期注水,以提高开发效果;⑥改进注水系统,使其在调节注水压力及注水量方面有较大调节余地,以便满足周期注水中注水量增大的要求。

(2)注热水:在储层渗流特性差、原油黏度比较高的不利条件下,注热水可以取得好的开发效果。在日尔诺夫油田实验室与现场试验结果表明,当注水温度从20℃提高到70℃时,驱油系数从0.67提高到0.78。现场试验证明可以扩大注热水的适用范围。即使在如此不利的条件(油藏的储集性能差,原油胶质含量高)下注热水也能获得好的效果。

(3)注磁化水技术:利用磁场作用,当注入水通过强磁器后,能降低水的表面张力,并吸附机械杂质等,可以净化水质。磁化水具有防止黏土膨胀、水井结垢、提高吸水能力和采收率并降低注水压力的作用,收到较好的效果。

(4)注活性水:活性水驱是以浓度小于CMC的表面活性剂水溶液作驱动介质的驱油方法。早在20世纪20年代,人们就提出了用活性水驱油来提高采收率的设想。大约在20世纪50年代以前,这项工作主要在实验室内进行,50年代以后美国和前苏联相继在矿场上进行试验。试验所使用的表面活性剂是以钠盐为主的阴离子型烷基磺酸盐。还用过烷基萘酸盐、各种羧酸盐、硫酸盐以及磷酸盐等。但效果不如阴离子型表面活性剂好。大量试验表明采用非离子型表面活性剂效果很好,因为它在岩石上的吸附量少,对地层水的高价阳离子(如钙、镁等)不敏感。把非离子型和阴离子型表面活性剂混合使用,发挥非离子型表面活性剂乳化作用和阴离子型表面活性剂润湿作用、分散作用好的特点,可以取得更好的效果。

渗吸采油作为裂缝性油藏的重要二次采油机理是在20世纪50年代初在美国德克萨斯州的斯普拉柏雷油田砂岩粉砂岩裂缝性油田被首次发现的。该油田初期原油产量很高,但是油井产量很快急剧下降,油田原油一次采油采收率很低。因此,油田工程师开始研究可行的低渗透裂缝油藏二次采油措施,就发展了采用渗吸驱替的采油方法。国内外油田开发实践证明,裂缝性油藏地层通常为水湿油层,充分发挥毛管力渗吸作用在一定条件下可成为一种开采这类油层的可能有效方式,对于水湿裂缝性储层,毛管力渗吸作用可以把原油从低渗透的基质岩块置换到高渗透裂缝中。

由于低渗透油藏的特殊性,在注水过程中渗吸现象是一个非常重要的现象,岩块的几何形态、岩块的物性特征(孔隙度、渗透率、润湿性和毛管力等及其局部变化)、流体的物性特性(密度、黏度、界面张力)、热动力条件、原始饱和度、边界条件、裂缝特性、注入速度等因素对渗吸驱油及原油采收率有显著的影响。

Brownscombe E, R 和 Dyes A, B 也是最早认识到渗吸作用的研究者之一。他们从 Moor, T. F 和 Slobod, R. L 的研究工作中发现,毛管力作用可以使接触油层的水吸入基质岩块从而驱替出原油。Briks 考虑一束垂直毛管,采用一个简单的相对渗透率模型描述了从基岩中驱替(水驱或气驱)原油的机理。

Graham 和 Richardorn 以及 Mattax 和 Kyte 基于一个单岩块渗吸驱替模型,Parsons, R, W 等人基于柱状岩块模型, Brezirov D 等人基于单岩块和多岩块模型进行了毛管渗吸和驱替测试。他们的结果表明,以达西定律为基础的宏观标准可应用到毛管的渗吸过程中。

从 20 世纪 50 年代以来, Aronofsky J. S 等人首先导出了渗吸驱油指数关系式方程, Aronofsky J. S. 等人认为,渗吸作用使一个单岩块的原油采收率随时间呈指数下降,人们通常称之为 Aronofsky 渗吸经验模型。Rapoport LA 提出渗吸驱油准则; Graham JW 等人和 Mannon W 等人先后用三角形和方块模型完成了渗吸实验研究; Mttax CC 等人和 Parsons RW 等人进行了底水上升渗吸实验获得了采收率与无因次时间的关系曲线; Parsons RW 和 Ifly R 等人用称重法和毛管法完成了淹没渗吸实验。Mannon 以恒定和变化速率进行了一些早期的渗吸实验室工作。Mattax 和 Kyte 首次对渗吸过程进行了一些实际的描述。他们报道了用固定的界面张力进行的试验结果,表明无因次渗吸时间取决于基质几何形状和流体的物性:为了获得改进的特征长度, Ma 等扩展了 Kazemi 等的工作,这个特征长度弥补了样品形状和边界条件的不足, Zhang 等核对了 Ma 等的比例方程。Snow 使用不同的流体特性扩展了 DeFour 的工作,他发现流动过程不能用现行的典型流体流动方程来描述,因为这些方程不能解释流动过程中的动态界面特性和非稳态。他的结果表明逆流、两相流动速度随黏度的降低和界面张力的升高而升高。然而,随黏度升高和界面张力减小,最终采收率会提高。

Cuiec 等人使用白垩样品对低渗透率多孔介质在不同界面张力值时对油的自然渗吸进行了大量试验研究。他们发现降低渗吸盐水相和油相间的界面张力减少了采油速度,符合 Mattay 和 Kyte 的理论,他们的试验结果表明随表面张力的降低,最终采收率升高。

Keijer 和 Vries 公布了用贝雷砂岩进行试验的结果。他们发现降低界面张力对最终采收率无影响,但对渗吸速度有一些影响。他们发现把界面张力降低 12 倍,表面活性剂溶液以 $1/2$ 水渗吸速度吸渗,把界面张力降低 3000 多倍,表面活性剂溶液以 $1/5$ 水渗吸速度被渗吸。这表明驱动力与界面张力不成一定的比例。在分析低界面张力流动时大多忽略了重力驱动流动的影响。DuPrey 试验了重力和毛管力之间的平衡。

Orr 等研究表明,当界面张力和 N_b^{-1} 适度低时,重力和毛管力都是重要的,并且在油/水/乙醇体系中,当 N_b^{-1} 被减小时存在一种从毛管力控制的流动到重力控制的流动的过渡。他们研究表明,对具有低渗透率($15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)且润湿相和非润湿相之间的界面张力高的试验,毛管作用启动对流渗吸并且从侧面产出油,在中等界面张力值时,发现油滴即从侧面、顶面排出岩芯。尽管发生渗吸更缓慢,最终采收率略高于高界面张力时的情形。在低界面张力值时,总产油量存在实质性提高,但完成渗吸需要比高或中等界面张力流体渗吸更长的时间。

Shabir Al - Lawati 等研究了由自然渗吸和重力分离所引起的减小的界面张力对采收率的

影响。由表面活性剂溶液渗吸过程控制的静态渗吸通过降低油和渗吸流体的表面力采出残余油,另一方面,通过降低界面张力,导致渗吸的毛管力减小。试验中基质岩块被渗吸流体所包围,静态渗吸实验结果表明,提高最终采收率需要最小的 Bond 数。然而,界面张力的减小可以提高或降低渗吸速度实质上取决于毛管力和重力的相对贡献。用四种不同的表面活性剂溶液(不同的界面张力)在三个渗透率范围内进行试验的结果表明,在三种不同的状态时发生吸渗:毛管力占支配地位、重力占支配地位、两种都影响渗吸过程。

在裂缝性多孔介质中,由于与基质相比较,裂缝网络的高传导性在裂缝网络中出现黏性驱替,同时在这两种介质中存在流体交换。由于这种运移现象,驱替过程不同于均匀多孔介质。如果基质是水湿的,且通过裂缝注入水,流体运移则是由于毛管渗吸。毛管吸渗与基质渗透率和裂缝中的流动速度密切相关。Kleppe 和 Morse 等研究了高渗透率基质单元注入速度对采收率的影响,且大多数证实了结果。后来,为了确定裂缝系统的拟相对渗透率曲线,T. Babadagli 和 I. Ershaghi 对更致密的基质单元进行了实验室研究。T. Babadagli 通过注入速率和裂缝结构对毛管渗吸行为和基质中饱和度分布的影响进行了试验研究,并提出了被称为裂缝毛管数的一组新的无因次组合。在裂缝系统中注入速度是一个关于毛管渗吸运移的主要参数,并且应该依靠基质特性进行调节以便获得一种有效的毛管渗吸运移。以实验和数值研究为基础,临界注入速度(当高于临界速度时发生无效毛管渗吸运移)是最大基质毛管力和基质渗透率的函数。

Jaehyoung Lee 等对具有变化孔径的裂缝中的对流渗吸采收率进行了试验研究,利用统计参数,例如平均数、变化系数、斜率和各项异性比率来描述裂缝的形态。结果表明,裂缝的形态与水注入速度一样对采收率有显著影响。当变化系数和斜率升高时,总的采油效率下降。各向异性比率与变化系数一样显著影响注入水的突破时间和总的采收率。在更低的各项异性比率例如小于 1 时,发现了早期突破和较低的采收率。当注入速度升高时,统计参数的影响是显著的。如果注入水的流动速度和基质特性是相同的,不管裂缝形态如何,渗吸速度是相同的。

Xian. min Zhou 等在 1993 年研究了原油的搁置时间和温度对水渗吸驱油及最终采收率的影响。发现随搁置时间和温度的增加,短期渗吸速率系统性地减小;在从实验原油的轻烃蒸发以后,原油改变最初水湿砂岩润湿性的能力有轻微提高;对弱水湿岩芯来说,可以观察到由长期自然渗吸而引起的高采收率。

鄢捷年等在 1998 年在尽可能消除其他影响因素的情况下,在前人工作的基础上,采用更为合理的实验条件,使用 Amott 方法定量地评价了贝雷砂岩的润湿性对注水过程中驱油效率的影响,进一步确认油藏岩石的润湿性与油井注水过程中驱油效率的关系。研究结果表明:贝雷砂岩原有的强亲水性随原油沥青质吸附量的增加而逐渐减弱;对于经原油沥青质吸附的弱水湿岩样,其最终驱油效率明显的高于强水湿岩样,当 Amott 润湿指数在 0.2 左右时,可获得最高的最终驱油效率。

傅秀娟等利用美国 SSI 公司的 COMP 模拟软件,研究了润湿性、基质渗透率、裂缝渗透率和注入速度对渗吸排油过程的影响。其结果表明,岩石的润湿程度和渗透率影响着基质排油的快慢,而注入速度和裂缝渗透率则影响着渗吸排油的效率;不同润湿程度的岩石,其渗吸排油能力也是不同的。对于亲水性较强的岩石,其渗吸排油能力较强、排油快,对这种岩石可以采用较大的采油速度进行开采;对于亲水性较弱的岩石,排油能力差,为使渗吸排油尽可能地充分,最好采用较小的采油速度开采;对于渗透率较低的岩石,由于其渗吸排油速

度低,应适当降低采油速度;对渗透率较高的岩石,可适当加大采油速度,这样既可以获得较高的采收率,又能缩短开采时间。但没有给出有关采油速度的临界值。

周娟等使用二维玻璃微模型研究了强水湿条件下裂缝油藏不同形态的裂缝、裂缝方向性等水驱油时油水运移的渗流机理,并且利用图像分析法定量研究了裂缝油藏微模型中不同的静水压力对水驱油效果的影响。研究发现裂缝的形态、方向和密度对水驱油渗流机理有显著的影响。

张红玲等对裂缝性油藏建立了以毛管自吸为主要采油机理的数学模型,并对影响裂缝性油藏采出程度的敏感参数进行研究。通过计算得出渗吸模型的输入参数对采出程度影响的敏感程度排序为:表面温度、裂缝密度、毛管力曲线指数、渗透率、原油黏度和相渗关系。对于等温渗流过程,裂缝密度是影响采出程度的主要因素,裂缝密度越大,基质岩块的体积越小,流体渗吸过流断面减小,渗吸速度增加,因此裂缝系统比较发育的碳酸盐岩油藏,采出程度较高。

李士奎等人对低渗透油藏自发渗吸驱油进行了实验研究,通过低渗透亲水岩芯自发渗吸实验,探讨了低渗透油藏不同界面张力体系的渗吸驱油过程。研究表明,注入水渗吸体系因毛管力较高、毛管力与重力比值较大,其渗吸过程为毛管力支配下的逆向渗吸。与注入水渗吸结果相比,化学剂溶液因降低油水界面张力,在孔隙介质中能使更多的原油参与渗流过程,使更多的剩余油变为可动油,提高了渗吸平衡时的原油采出程度,因而提高了低渗透油藏原油的采收率。

唐海、吕栋梁等人对川中大安寨裂缝性油藏渗吸注水实验研究,研究认为渗吸注水是低渗透裂缝性油藏注水开采的重要机理,合理的注水方式与注水参数对改善低渗透裂缝性油藏水驱开发效果具有指导意义。通过大量的室内实验研究,获得了大安寨油藏基质岩块自然渗吸动态规律和脉冲渗吸动态规律,为制定合理的油藏渗吸注水开发方式提供了理论依据。

华方奇、宫长路等人介绍了一种新的渗吸设备的基础上,利用其研究了低渗透岩芯反向渗吸规律。利用 $X - Ray$ 变化度检测仪,研究了岩芯长短对反向渗吸动态、最终渗吸采收率的影响,以及渗吸过程中不同阶段岩芯中含水变化度的变化过程。并得出如下结论:反向渗吸是裂缝性低渗透砂岩油藏的主要采油机理;由于低渗透油藏的特点,毛管力作用有效性受到限制,渗吸缓慢,渗吸采收率较低; $X - Ray$ 扫描结果揭示了渗吸初期渗吸速度快,渗吸前沿到达边界后渗吸速度变缓。

由于裂缝具有大的流动能力,水通过裂缝的流动对裂缝性油藏的总的采收率起显著的作用。水驱对于提高水湿裂缝性油藏的采收率是最普遍的方法之一。在裂缝性油藏中,毛管渗吸是一个重要的采油机理。为了精确模拟由于毛管力渗吸而产生的采收率,关键是要正确辨别裂缝和基质岩块之间的渗吸速度。影响毛管渗吸的参数是非常复杂的,其中裂缝的特性,包括裂缝的方位、密度、形态等对毛管渗吸的影响是不可忽视的。

油藏开采过程中能否保持较长时间的稳产,基质向裂缝系统中的供油能力、裂缝与基质岩块间油、气、水三相流体的驱替渗吸规律是关键因素。此外,在亲水的裂缝性油藏中,水的自吸排油作用是含油岩块的重要采油机理。国内外一些裂缝性油田,如华北碳酸盐岩油田、美国 Texas 的斯普拉伯雷裂缝性砂岩油田、伊拉克的基尔库克裂缝性灰岩油田,波斯弯卡达尔的杜汉油田以及北海的 Ekofish 油田等,都进行过渗吸注水采油开采。尤其是 80 年代中期投入开发的 Ekofish 油田采用吸渗采油取得显著的开发效果。因此,开展油藏裂缝与岩块渗吸驱替规律的室内实验研究,并在此基础上开展油藏工程及数值模拟研究及相应的配套

开采技术研究, 不仅对确定该类油藏的开发方式和最终采收率具有重要的意义, 而且对国内同类油藏的开发也具有重要的指导意义。

大庆油区头台油田开发实践表明, 水井转抽后井的含水率随时间呈不断下降趋势, 由于基质中原油在渗吸作用下不断流向裂缝, 使裂缝中含油饱和度不断上升, 含水饱和度不断下降, 从而使井中产出液的含水率不断下降; 同时产油量在渗吸作用下, 只要满足一定的液量, 由于含水率的下降, 产油量将随时间呈不断上升趋势。还有研究表明, 实际油藏条件下, 与常规注水相比, 渗吸法采油采收率提高值为 2.2%, 效果明显; 增大毛管力值或曲线斜率时, 采收率提高值由 2.2% 分别增加到 2.4% 和 2.6%。

在裂缝性油藏注水开发阶段, 由于裂缝系统和基质系统在渗流能力上的差异, 裂缝中的水会沿渗透率高的裂缝窜进, 使产油井含水快速上升, 甚至发生暴性水淹。同时, 注入裂缝中的水会在毛管力的作用下自发渗吸到基质系统中, 与基质中的原油发生油水交换, 增加基质中原油的采出程度。因此, 如何在防止油井水淹的同时有效地提高裂缝性油藏的渗吸采油量, 是保持该注水开发阶段油井产能, 是提高裂缝性油藏采收率的有效途径。

对于使用不同的流体系统和不同的渗吸方法已经进行了几个试验研究。Mannon 对以恒定和变化速率在线性和对流流动时进行了一些早期的实验室工作。

Mattax 和 Kyte 是首次对渗吸过程进行一些实际的描述。他们发表了用固定的界面张力进行的试验结果, 表明无因次渗吸时间 (T_{D1}) 取决于基质几何形状和流体的物性:

$$T_{D1} = t \sqrt{\frac{K}{\phi}} \left[\frac{\sigma}{\mu L^2} \right] \quad (1-1)$$

式中 t ——吸渗时间, min;

ϕ ——孔隙度;

K ——渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;

σ ——表面张力, mN/m;

L ——长度, cm。

这种呈比例关系的一个关键性假设是流动由毛管力控制且重力被忽略。

为了获得改进的特征长度 (L_c), Ma 等扩展了 Kazemi 等的工作, 这个特征长度弥补了样品形状和边界条件, Zhang 等核对了 Ma 等的比例方程。

Parsons 和 Chaney 提出了渗吸的另一种比例参数:

$$T_{D2} = t \frac{K}{\phi} \left[\frac{\Delta \rho g}{\mu L} \right] \quad (1-2)$$

式中 ρ ——密度, g/cm^3 ;

μ ——黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

Naar 等依据排出数据提出了渗吸模型。他们将模型与试验数据相比较, 发现拟合得很不理想。

Defour 对垂直逆流做了广泛的工作。他研究了油和水在油饱和的人造砂中的流动, 研究了油黏度、密度和界面张力对逆流的影响。从他的结果中, 他发现经典的多相技术不能精确描述流体饱和度分布, 因为逆流是一个不稳定过程。DeFour 提出了下面的无因次时间函数:

$$T_D = \frac{tK}{\mu L} \left[\Delta \rho g - 4.5 \sqrt{\frac{\phi}{K}} \left(\frac{\sigma}{L} \right) \right] \quad (1-3)$$

Snow 使用不同的流体特性扩展了 DeFour 的工作, 他发现流动过程不能用现行的典型流

体流动方程来描述,因为这些方程不能解释流动过程中的动态界面特性和非稳态。他的结果表明逆流,两相流动速度随黏度的降低和界面张力的升高而升高。然而,随黏度升高和减小界面张力,最终采收率会提高。他表示界面张力有一个临界值,超过这个值将不会采出额外的采收率。

在分析低界面张力流动时大多忽略了重力驱动流动的影响。DuPrey 试验了重力和毛管力之间的平衡。下面(由于表面张力的影响确定的一个无量纲量, $B = \rho g r^2 / \sigma$)给出了毛管力与重力的比率:

$$N_b^{-1} = C \frac{\sigma \sqrt{\frac{\varphi}{K}}}{\Delta \rho g H} \quad (1-4)$$

式中,对于毛管模型, $C=0.4$ 。

当 N_b^{-1} 大时,毛管力支配流动,当 N_b^{-1} 接近0时,重力支配流动, N_b^{-1} 的分子是毛管入口压力的测量值,分母是长度为 H 的重力压头。

在裂缝性多孔介质中,由于与基质相比较,裂缝网络的高传导性,在裂缝网络中出现黏性驱替,同时,在这两种介质中存在流体交换。由于这种运移现象,驱替过程不同于均匀多孔介质。如果基质是水湿的,且通过裂缝注入水,流体运移则是由于毛管渗吸。毛管渗吸与基质渗透率和裂缝中的流动速度密切相关。

Kleppe 和 Morse 等研究了高渗透率基质单元注入速度对采收率的影响,且大多数证实了结果。后来,为了确定裂缝系统的拟相对渗透率曲线, T. Babadagli 和 I. Ershaghi 对更致密的基质单元进行了实验室研究。

T. Babadagli 对注入速率和裂缝结构对毛管渗吸行为和基质中饱和度分布的影响进行了试验研究,并提出了被称为裂缝毛管数的一组新的无因此组合。为了模拟油水流动的裂缝系统中的拟相对渗透率曲线, T. Babadagli 和 I. Ershaghi 定义下面的无因次量:

$$\lambda = \frac{P_{C, \max} K_m}{v \mu_w \sqrt{K_f}} \quad (1-5)$$

λ 被称为渗吸指数,描述裂缝中毛管渗吸转换的强度。上式的倒数类似于作为黏滞力对毛管力的比率,被称为裂缝毛管力:

$$N_{f, ca} = \frac{1}{\lambda} = \frac{v \mu_w \sqrt{K_f}}{P_{C, \max} K_m} \quad (1-6)$$

毛管力新的表达形式是一种在裂缝中有效的黏滞力对在基质中有效毛管力的比率。上式还可以写成:

$$N_{f, ca} = \frac{v \mu_w \sqrt{K_f}}{1.127 \times 10^{-3} P_{C, \max} K_m} \quad (1-7)$$

式中 v ——裂缝中注入流体(润湿相)的速度, $v = q/A$;

q ——体积流量, stb/d;

A ——裂缝的横截面积, ft^2 ;

μ_w ——水的黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;

K_f ——裂缝渗透率, ft;

$P_{C, \max}$ ——最大的基质毛管力, psi;

K_m ——基质渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。