

超低渗透油藏勘探开发技术新进展

超低渗透油藏

压裂改造技术

FRACTURING TECHNOLOGY FOR ULTRA-LOW
PERMEABILITY RESERVOIRS

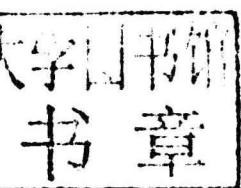
朱天寿 徐永高◆著

石油工业出版社

超低渗透油藏勘探开发技术新进展

超低渗透油藏压裂改造技术

朱天寿 徐永高 著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书立足于长庆超低渗透油田开发的实际需要,结合大量的室内研究与矿场试验结果,系统介绍超低渗透油藏压裂岩石力学、压裂材料、压裂优化设计、压裂工艺与工具、压裂配套技术,同时对超低渗透油田压裂技术的发展方向进行了展望。并从提高单井产量目标出发,以提高压裂技术应用效果为视角,明确了需要把握的技术重点、关键参数以及有效方法。对同类油藏的改造具有指导意义和实用参考价值。

本书可供从事压裂酸化研究与应用的工程技术人员借鉴,也可作为石油院校的辅助教材。

图书在版编目(CIP)数据

超低渗透油藏压裂改造技术/朱天寿 徐永高著.

北京:石油工业出版社,2012.2

(超低渗透油藏勘探开发技术新进展)

ISBN 978-7-5021-8769-9

I. 超…

II. ①朱…②徐…

III. 低渗透油气藏-油田开发-压裂-技术改造

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 222210 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 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523583 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2012 年 2 月第 1 版 2012 年 2 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:19.5

字数:500 千字

定价:120.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序 一

超低渗透油藏属于非常规油藏,受技术条件和开采成本制约,长期以来没有得到规模有效开发。近年来随着石油勘探和资源供需形势的巨大变化,超低渗透油藏越来越受到国际石油界的重视,国外致密油气(tight oil)的划分范围比较宽泛,国内与之对应的划分标准则涵盖了特低渗透、超低渗透和非储层三种类型。我国超低渗透油气资源分布广、储量大,在油气资源勘探和开发中占据着十分重要的地位。鄂尔多斯盆地是我国规模最大的低渗透油气资源富集区,经过几十年的潜心研究,超低渗透油藏勘探开发理论与技术取得了重大进展,并实现了工业规模开发,为国内外超低渗透油藏勘探、开发和现代油田管理提供了成功范例。鄂尔多斯盆地超低渗透油藏勘探与开发经验证明,油藏勘探开发理论研究和勘探开发新技术的应用,是指导油田勘探和开发方案部署的基础,是超低渗透油藏勘探开发成功的关键所在;观念创新、方法创新和标准化、数字化管理实践,是超低渗透油田实现低成本发展与生产方式转变的基石。由冉新权教授主持撰写的《超低渗透油藏勘探开发技术新进展》丛书,就是在大量理论研究和实践基础上,对超低渗透油藏勘探开发理论与技术的全面论述和系统总结,不但丰富和发展了传统的油藏形成机理,开拓了油藏勘探开发新领域,创新了现代油藏管理模式,而且对我国乃至世界其他地区超低渗透油藏勘探开发具有重要的指导意义。

本套丛书共四册,包括《超低渗透油藏勘探理论与技术》《超低渗透油藏开发理论与技术》《超低渗透油藏压裂改造技术》《超低渗透油藏地面工程技术》。系统介绍了超低渗透油藏勘探、开发、数字化管理技术和方法,包括地震勘探技术、测井技术、井网优化技术、多级加砂和多缝压裂技术、数字化关键技术、地面集输关键设备研发等,结合长庆油田超低渗透油藏具有的“三低”特点,对上述技术的内容和应用效果进行了详细论述。其中黄土塬复杂地形和地表条件下地震勘探和地球化学勘探技术、低阻油层测井识别技术的应用达到国际先进水平;根据启动压力梯度、最小可流动喉道半径确定生产压差,进行高效合理注水,结合储层物性关系、确定临界注采静压差,建立有效驱替压力系统的评价方法,精细调控注采压力系统,是地层压力保持合理水平的有益尝试;数字化增压橇、智能注水橇和远程控制电磁阀等数字化关键设备的成功研发,使集油站无人值守成为现实,使油田组织管理方式和发展方式发生根本转变。

我赞同本丛书的观点,即超低渗透油藏成功的勘探开发得益于科学管理和技术创新,思维方式的转变、管理理念的创新,催生了以标准化体系为核心的超低渗透油藏全新管理模式。如勘探开发一体化就是适合于鄂尔多斯盆地自然条件和地质条件的油藏评价创新举措,一体化的管理模式改变了以往传统的做法,加快了地质认识的步伐,缩短了建设周期,提高了勘探开发的整体效益;具有自主知识产权的多级压裂工艺和先进适用技术的集成与应用,助推了低成本发展的步伐,其产生的技术经济效益是显而易见的。

总之,本套丛书是生产和科研相结合的成果,集中反映了我国近年来在超低渗透油藏勘探开发方面的最新进展,代表了超低渗透油藏勘探开发、地面集输系统标准化设计与油田数字化建设的先进水平,也是一套国际上少有的针对性和实用性非常强的系列专著,值得我们学习和研究。我相信,这套书的出版,不仅对发展超低渗透油藏勘探、开发理论研究和技術具有重要的启发作用,更重要的是对我国目前和今后油气勘探开发具有重要的指导意义。为此,在本套书出版之际,我谨向作者和致力于超低渗透油藏勘探开发的有识之士致以衷心的祝贺。希望你们继续努力,为鄂尔多斯盆地能源化工基地建设和我国经济社会发展做出更大的贡献。

沈忠厚

(中国工程院院士)

2011年9月

序 二

进入 21 世纪,低渗透油气藏已成为勘探开发最重要的领域之一,据资料表明,低渗透油藏已占到当年油气探明储量的 25% 以上。美国、加拿大、俄罗斯、澳大利亚等为数不多的几个开发低渗透油气藏的国家,目前开发的低渗透储层的渗透率下限基本在 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。中国低渗透油藏开发走过了 100 年的历程,从 1907 年延长钻成第一口油井起,到目前中国现已探明的低渗透油气田有 285 个,广泛分布在全国各含油气盆地的 21 个油区。

国内外的实践经验表明,“水力压裂是现阶段开采低渗油藏无可取代的技术”,是低渗透油气田经济有效开发的关键技术,是提高单井产量的杀手锏,压裂技术的进步,为增加储量和提高产量提供了强有力的技术支撑。长庆油田压裂改造技术的不断发展,成功实现了安塞、靖安、西峰、姬塬多个特低渗透油田的经济高效开发,目前正致力于华庆超低渗油田的开发实践。

开发实践经验表明,压裂技术作为核心技术之一支撑着油田的快速发展,长庆油田数十年来通过开展压裂新工艺、新技术攻关与试验,大幅度地提高了单井产量,压裂技术的进步已经成为长庆油田不同发展阶段的鲜明特征。在压裂技术研究方面,建立了“压前地质评价—室内理论研究—压裂液、支撑剂优选—压裂优化设计—裂缝实时监测—压后评估”的完备技术路线;在压裂理念上,实现了从单井压裂到整体压裂、从单级压裂到多级压裂、从面积压裂到体积压裂、从线型到网状缝的发展;在压裂工艺体系上,形成了以开发压裂为主体、不同油层类型特色技术为辅助的多个配套技术系列。

本书立足超低渗透油田开发的实际,结合大量的室内研究和矿场试验结果,通过总结超低渗透油藏压裂改造新技术,较为全面地阐述了超低渗透油藏压裂改造理论成果和成功经验。全书共分九章,系统介绍了国内外低渗透油藏水力压裂技术的现状、低渗透油藏岩石力学与地应力、压裂优化设计、压裂材料的优选、压裂配套技术、压裂设备与工具,同时对致密储层压裂改造技术的发展方向进行了展望。在编写方式上,力求反映近年来在超低渗透储层改造方面所取得的新理论、新进展、新技术和新方法。

书中所阐述的近年来超低渗透油藏储层改造理论认识和工程实践经验,在编写过程中吸收了众多专家的智慧与心血,得到了油田资深专家的热忱帮助,使之顺利付梓。

中国石油大学张士诚、陈勉及刘兴慧等对书稿进行了认真修改和充实,谨向诸位学者表示诚挚的谢意!

向从事超低渗透油藏工程技术研究的同志们表示敬意!

向关心和支持长庆油田实现年产油气当量 4000 万吨的热心读者表示感谢!

冉新权

2011 年 10 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 低渗透油藏地质特点	(2)
第二节 水力压裂工艺增产机理综述	(6)
第三节 水力压裂技术发展综述	(16)
第四节 国内外致密油藏开发现状	(18)
第五节 超低渗油藏实现规模开发	(23)
第二章 岩石力学与地应力	(26)
第一节 地应力对水力压裂的影响	(26)
第二节 岩石力学参数及测试方法	(34)
第三节 地应力及测试方法	(42)
第四节 超前注水动态地应力场研究	(51)
第三章 压裂优化设计	(56)
第一节 超低渗透油田压裂优化设计思路	(56)
第二节 整体开发压裂优化设计	(64)
第三节 单井优化设计	(85)
第四章 压裂液	(101)
第一节 超低渗透油田对压裂液性能的要求	(101)
第二节 低渗致密储层压裂液伤害机理研究	(105)
第三节 压裂液综合性能及评价方法	(114)
第四节 低伤害压裂液体系	(122)
第五章 支撑剂	(144)
第一节 超低渗透油藏对支撑剂性能的要求	(144)
第二节 支撑剂物理性能及评价方法	(154)
第三节 支撑剂导流能力及评价方法	(159)

第四节 支撑剂现场试验	(163)
第六章 特色技术	(170)
第一节 多级加砂压裂工艺技术	(170)
第二节 前置酸加砂压裂技术	(177)
第三节 定向射孔压裂技术	(182)
第四节 控缝高压裂技术	(196)
第五节 水平井水力喷砂压裂技术	(204)
第七章 压裂装备及工具	(215)
第一节 压裂装备	(216)
第二节 压裂井口及防喷设备	(230)
第三节 常用压裂管柱	(235)
第四节 关键压裂工具	(240)
第八章 裂缝测试技术	(244)
第一节 裂缝测试方法概述	(244)
第二节 井下微地震裂缝监测技术	(247)
第三节 示踪剂裂缝监测技术	(261)
第四节 测井技术在压裂中的应用	(264)
第九章 致密油气藏储层改造新技术展望	(269)
第一节 体积压裂	(269)
第二节 水平井多段压裂技术	(276)
第三节 直井多层连续分压技术	(285)
第四节 压裂液新技术	(291)
第五节 致密油藏开发前景展望	(296)
参考文献	(300)

第一章 绪 论

低渗透油气藏一般是指储层孔隙度低、渗透性差、单井产能低、勘探开发难度大的一类油气藏。随着勘探开发程度的不断深入和工程技术的飞速发展,从世界范围看,低渗透油气田已成为勘探开发最重要的领域之一。低渗透油气资源十分丰富,分布范围非常广泛,在北美、中亚、东亚和东南亚、北非、北欧等地区都有广泛的分布(图 1-1)。据资料表明,中国低渗透油气藏已占到当年油气探明储量的 25% 以上,美国、加拿大、俄罗斯、澳大利亚等是除中国以外世界上为数不多的几个开发低渗透油气藏的国家,目前这些国家开发的低渗透储层的渗透率下限为 1.0mD。

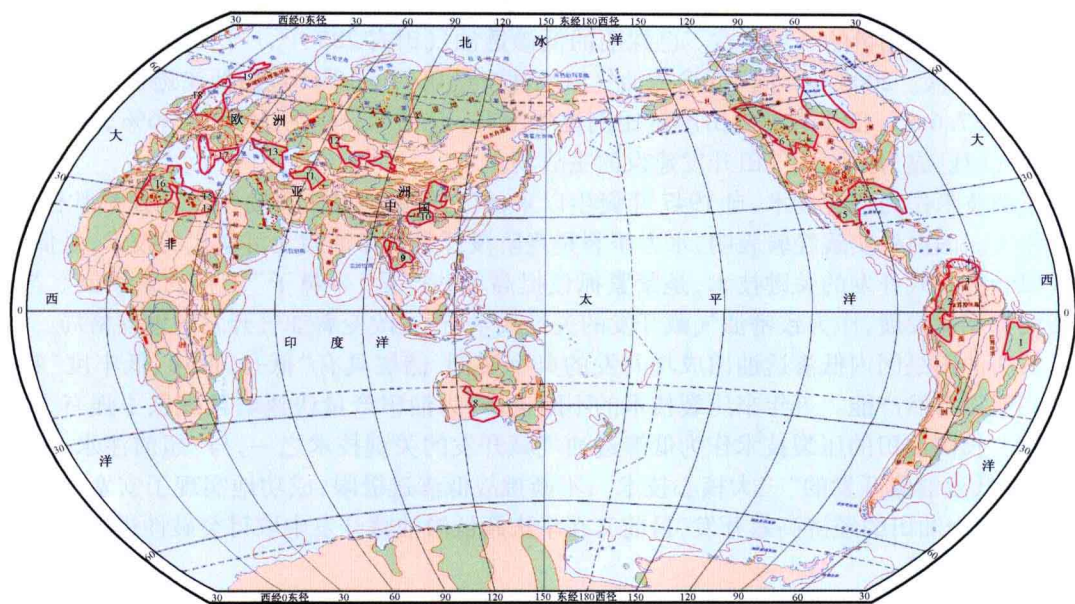


图 1-1 世界低渗透油藏分布图

根据新版低渗透油层上限和下限的分类标准,结合实际生产特征,按照油层平均渗透率把低渗透油田分为下列三类。

第一类为一般低渗透油田,油层平均渗透率为 1.0 ~ 10mD。这类油层接近正常油层,油井能够达到工业油流标准。但产量太低,需采取压裂措施提高生产能力,才能取得较好的开发效果和经济效益。

第二类为特低渗透油田,油层平均渗透率为 1.0 ~ 0.5mD。这类油层与正常油层差别比较明显,一般束缚水饱和度增高,测井电阻率降低,正常测试达不到工业油流标准,必须采取较大型的压裂改造和其他相应措施,才能有效地投入工业开发。例如,长庆安塞油田、大庆榆林油田、吉林新民油田等。

第三类为超低渗透油田,油层平均渗透率小于 0.5mD。这类油层非常致密,束缚水饱和

度很高,基本没有自然产能,一般不具备工业开采价值。但如果其他方面条件具备,如油层较厚、埋藏较浅、原油性质比较好等,同时采取既能提高油井产能,又能减少投资、降低成本的集成技术和有力措施,可以进行工业开采,并取得规模经济效益,如长庆华庆超低渗透油田,这也是本书研究的重点对象。

中国低渗透开发经历了 100 年的漫长历程,从 1907 年延长油矿钻第一口井就开始开发低渗透油层。1997 年鄂尔多斯盆地建成中国第一个百万吨安塞特低渗透油田,到 2008 年产量 $300 \times 10^4 \text{t}$,成为国内外低渗透油田成功开发的典型范例。自 20 世纪 80 年代以来,国内油气勘探陆续在鄂尔多斯、松辽、四川、准噶尔、塔里木等盆地发现了一大批地质储量超亿吨当量的低渗透油气田。根据中国 2004 年开展的第三次油气资源评价结果,低渗透油气资源广泛分布在各大盆地,低渗透远景资源量分别为 $537 \times 10^8 \text{t}$ 和 $24 \times 10^{12} \text{m}^3$,分别占全国油气远景资源总量的 49% 和 42.8%。当前中国随着石油勘探和开发程度的延伸,低渗透原油储量的比例越来越高,探明低渗透地质储量占中国探明油气资源地质储量 1/3 以上,占“九五”以来新增储量和投入开发的地质储量的 3/4 左右。已探明的低渗透油气田有 285 个,广泛分布在各含油气盆地的 21 个油区。2008 年,中国低渗透油气田原油产量 $0.71 \times 10^8 \text{t}$ (包括低渗透稠油),占全国总产量的 37.6%。低渗透油气田产量比例逐年上升,近三年分别为 34.8%、36%、37.6%,低渗透油气田已成为中国油气田开发建设的主战场。

压裂技术作为增产技术,自 1947 年诞生以来,就与低渗透油气田勘探开发历程密不可分,血脉相连。国内外实践经验表明,水力压裂是现阶段开采低渗油藏无可取代的技术,是低渗透油气田经济有效开发的关键技术,是紧紧抓住提高单井产量“牛鼻子”工程的杀手锏。当前,压裂技术飞速发展,作为致密油气藏开发的关键技术,正在改变着油气开发的世界格局。

长庆油田是国内低渗透油田成功开发的典型实例,储层具有“低孔、低渗、低丰度”特征,单井一般无自然产能。近年来压裂技术的不断进步,为油田产量快速增长提供了强有力的技术支撑。长庆油田的压裂技术作为低渗透油气藏开发的关键技术之一,与“超前注水、井网优化”构成低渗油藏开发的“三大核心技术”,不断挑战低渗透极限,成功地实现了安塞、靖安、西峰、姬塬多个油田的经济高效开发,目前又在华庆超低渗油藏开发中取得突破性进展。

第一节 低渗透油藏地质特点

储层作为压裂改造的对象,认真认识低渗透油藏地质特点,研究低渗透油藏微观特征与规律,在差异性研究基础上认真剖析压裂改造的难点与重点,是研究与应用压裂技术的出发点和落脚点。多年来的研究实践表明,在充分认识低渗透油藏技术难点的同时,更应关注低渗透油藏的开发优势和提高单井产量的潜力所在。压前地质评价是压裂技术研究与应用的基础。需重点研究以下几个方面。

一、沉积特征与油藏类型

低渗透油藏类型较多,有岩性砂岩油藏、海相碳酸盐岩油藏等。对于岩性油藏,沉积类型大多为河流相沉积,砂体平面分布广,延伸距离远,储量规模大,勘探开发潜力巨大。近年来,长庆、吉林、大庆、新疆等油田相继成功地开发了多个储量亿吨级规模油田。从长庆油田开发

低渗透油藏的实践看,在压裂技术研究方法上,需立足油藏整体与油藏工程相结合,树立整体压裂、开发压裂理念,重视压裂技术政策研究与落实;在增产目标设置上,更加重视区块整体单井产量的提高和长期稳产效果,而不仅仅是以一口单井的产量高低来评判效果的好坏。

二、储层普遍具有低孔、低渗特点,储层微观特征复杂

长庆鄂尔多斯盆地主要开发的主力层系为三叠系延长组油层,孔隙度一般为 8% ~ 14% (图 1-2),渗透率为 0.1 ~ 2.0mD (图 1-3)。

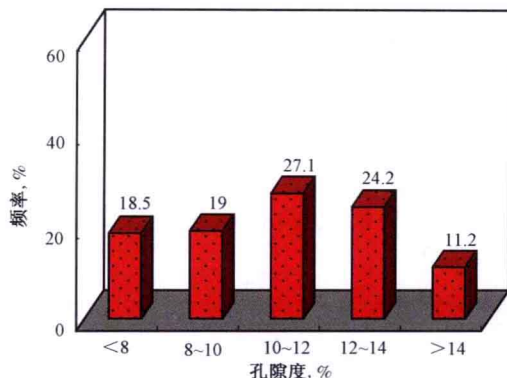


图 1-2 长庆鄂尔多斯盆地主力层系孔隙度分布

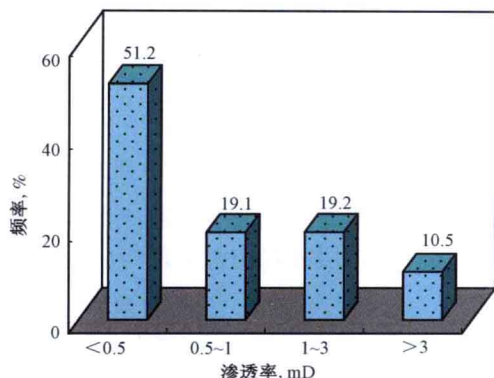


图 1-3 长庆鄂尔多斯盆地主力层系渗透率分布

储层微观特征渗流规律(图 1-4)研究表明,孔喉半径小,非达西流特征明显,随着渗透率降低,启动压力增大(图 1-5)。

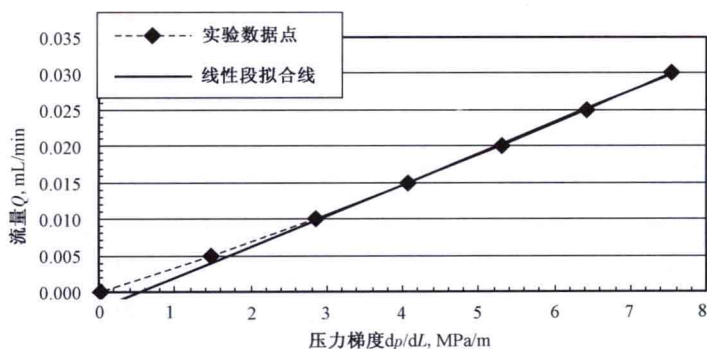


图 1-4 启动压力测试曲线

因此压裂应立足于大幅度增加改造半径、扩大泄流面积,有利于建立有效压力驱替系统,提高单井产量和稳产水平。同时要评估压裂液进入地层能否返排和对油气流动产生的负面影响。

三、岩矿成分复杂,黏土含量高,压裂液对伤害性能要求相对高

多个油田岩矿成分分析资料表明,填隙物中一般含有高岭石、伊利石、云母、绿泥石等多种敏感性矿物,参见表 1-1。黏土膨胀、颗粒运移、水锁伤害是压裂液伤害重要因素。对于低渗

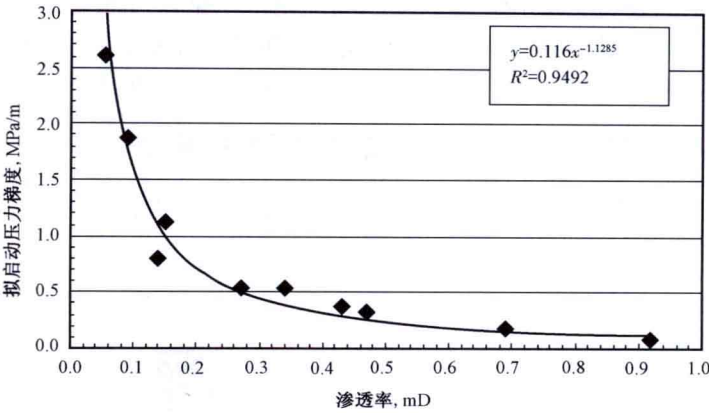


图 1-5 启动压力与渗透率关系

透油藏,压裂液滤液在地层内造成的伤害相比裂缝内伤害更加重要,在加强敏感性实验基础上,需加强对储层微观伤害机理与压裂液伤害性能的评价。

表 1-1 典型区块岩矿分析数据

区块	岩性	碎屑,%				填隙物,%							
		石英	长石	岩屑	其他	高岭石	水云母	绿泥石	方解石	硅质	白云母	浊沸石	其他
1	细—中粒长石岩屑砂岩	32.6	28.9	26.8	2.8	0.5	0.2	1.9	0.5	1.9			
2	粉—细岩屑砂岩	39.5	24.3	18.4	3.9	0	6.4	3.2	0.1	0.5	0	0	3.7
3	长石砂岩	37.0	45.8	7.2	4.6	0.8	2.3	2.7	3.4	0.1	0.6	0.2	
4	极细—细粒长石砂岩	23.4	39.8	10.5	11.6	0	0.2	4.8	3.1	1.5			5.4

四、产量初期递减大,但稳产周期长

根据对低渗油藏单井生产特征的研究表明,新井投产后呈现出初期递减大,但稳产能力强、生产周期长的规律,能够在 5% 递减率保持较少时间稳产,累计产油较高,经济效益好(图 1-6)。进行压裂优化设计时,在考虑尽量提高初始单井产量的同时,应一并考虑保持长期稳产的原则(图 1-7)。

五、油气藏压力系数普遍偏低,一般为 0.62 ~ 0.9

一方面需要优化超前注水政策;另一方面从压裂角度出发,在考虑储层保护的前提下,需要认真评价压裂后液体返排能力,优化层内助排的快速返排技术,同时需要优化压裂时机,最大程度地减少压裂液伤害造成油井低产。

六、天然微裂缝存在与发育程度

天然微裂缝存在与发育程度对于低渗透油藏开发具有重要影响,需要重点研究储层微裂

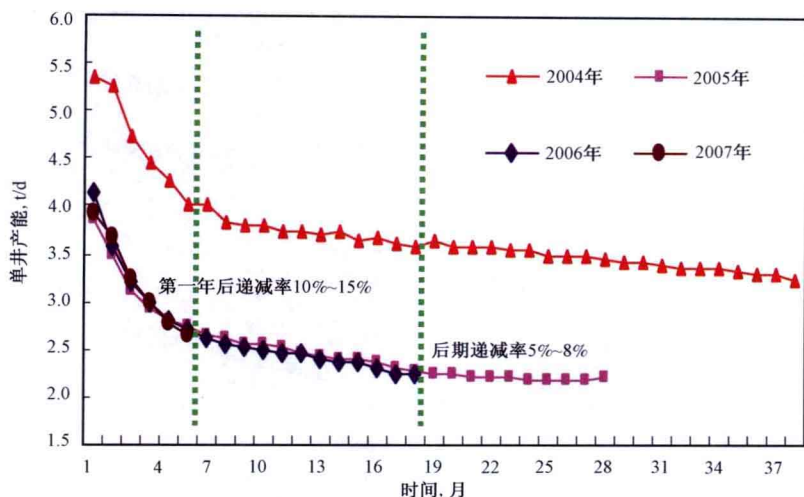


图 1-6 低渗透生产特征变化趋势

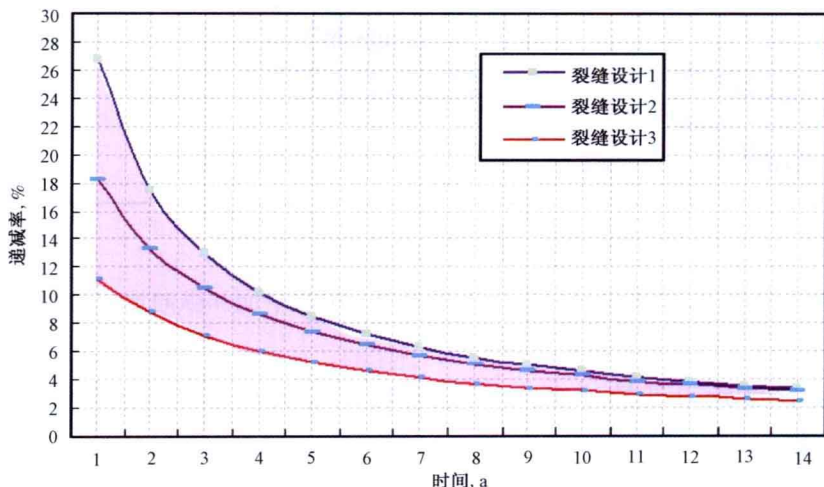


图 1-7 低渗透油藏典型递减规律

缝发育对油气渗流能力和吸水能力的影响,储层孔隙与微裂缝的搭配关系,天然裂缝与人工裂缝的耦合配置关系。

经过对安塞油田等长期生产动态的研究表明,受储层非均质性与裂缝两方面双重控制,压力分布及见水呈明显方向性(图 1-8),裂缝系统与井网系统能否实现合理配置,对于低渗透油田整体开发效果和采收率有关键影响。

七、储隔层特征是压裂基础研究的关键因素

一般条件下,研究储层纵向非均质性,对于优化射孔位置、射开程度十分重要;其次储隔层应力特征控制了人工裂缝空间扩展形态,通过岩石力学参数研究,确定纵向地应力分布规律;

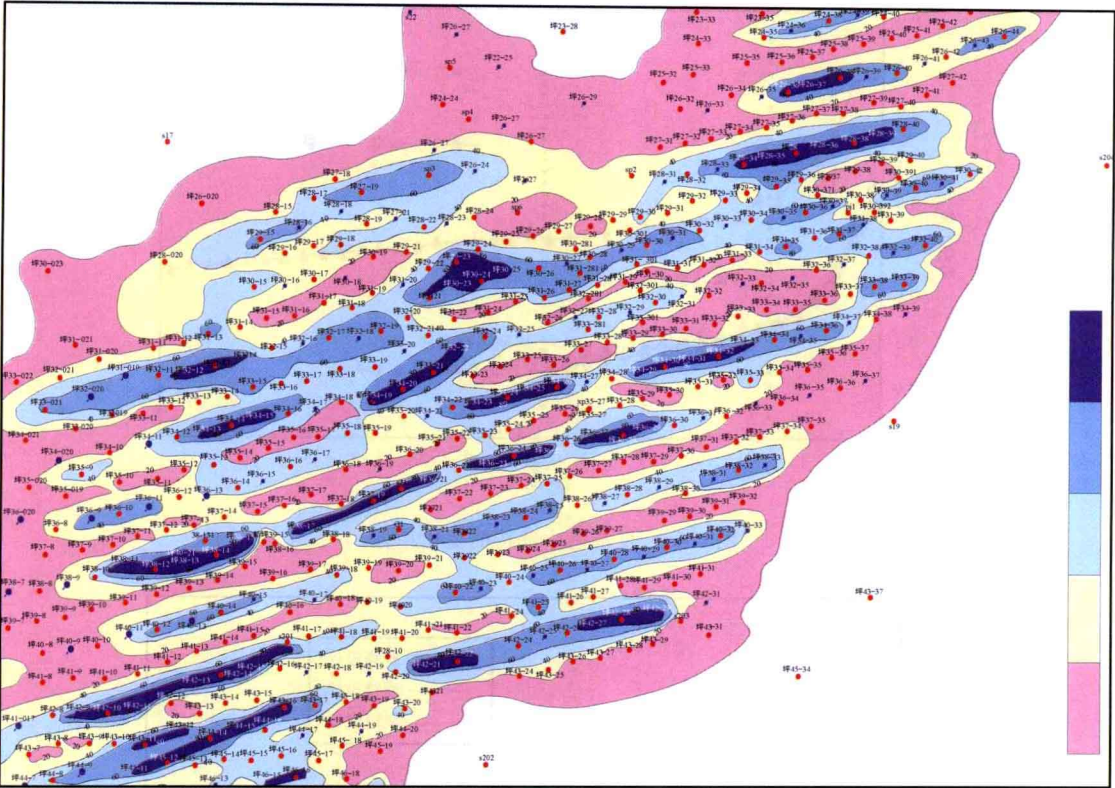


图 1-8 典型油田开发生产压力分布图

同时对于注水开发油田,超前注水和生产压力变化会引起平面和纵向地应力变化,动态地应力场变化规律的研究与认识就显得越来越重要。

八、单井产能水平低的现实,对于压裂技术攻关与应用,技术经济性与技术先进性同样重要

压裂新技术、新工艺的不断创新与探索,对于助推长庆低渗透油气田快速发展发挥的重要作用毋庸置疑。经多年实践经验总结表明,大力开展新技术攻关寻求突破后,以钻采工程方案为载体,实现技术研发—技术集成—快速应用的快节奏、高效率,是低渗透油田开发一条成功的经验。

第二节 水力压裂工艺增产机理综述

水力压裂作为低渗透油气田提高单井产量的主要技术手段,其增产机理及增产潜力评价非常重要,无论对于压裂技术工作者还是油藏工程学者,一直是重点关注并长期研究的重要课题。伴随压裂技术理论和油藏工程相关学科的创新,对于压裂增产机理的认识随之加深并取得实质性的突破。通过对相关代表性理论的简述,加深对水力压裂增产机理的理解,对于提高低渗透油藏压裂技术水平有重要指导意义。

一、井筒有效半径的扩大

油井经压裂后实现了有效井筒半径的增大,Prats(1961)通过研究稳态径向流条件下井底流入动态,提出了无量纲有效井筒半径 r'_{wD} 和相对流动能力 a 参数,并给出了如图 1-9 所示的两者关系曲线。

$$q = \frac{Kh\Delta p}{141.2B\mu\left(\ln\frac{r_e}{r_w} + S_f\right)} \quad (1-1)$$

$$r'_{wD} = \frac{r'_w}{X_f} = \frac{r_w e^{-S_f}}{X_f} \quad (1-2)$$

$$a = \frac{\pi KX_f}{2K_f W} \quad (1-3)$$

式中 K ——油层渗透率;

X_f ——裂缝半长;

K_f ——缝内渗透率;

W ——裂缝宽度。

1981 年,Cinco - Ley 与 V. Samaniego 对拟径向流条件进行了改进,引入无量纲导流能力 ($C_{ID} = \pi/2a$),并给出了如图 1-10 所示的关系曲线。通过当量表皮系数 S_f 来反映压裂井增产能力,当量表皮系数压裂一般为负值,其量值越大表示压裂效果越好。

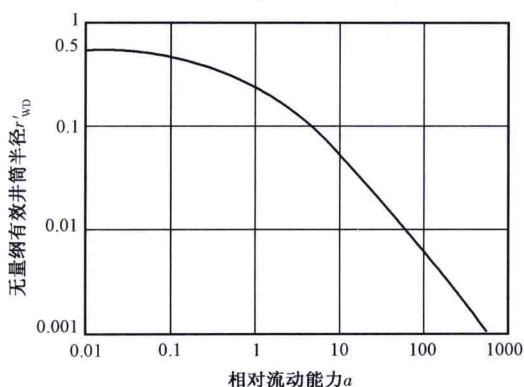


图 1-9 压裂井有效井筒半径

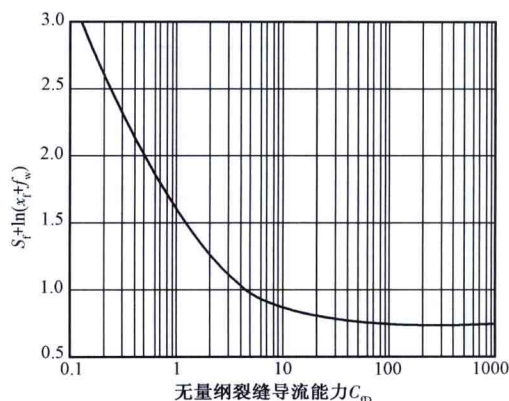


图 1-10 表皮系数与导流能力关系

二、利用试井方法进行压后评价

采用压力不稳定试井和生产历史拟合方法,可以评价压裂井生产特性及后裂效果。早在 1937 年 Muskat 就提出稳态流条件下垂直压裂井的压力不稳定解析模型,Dyes(1958)、Prats(1962)、Russell 及 Truitt(1964)研究并给出垂直裂缝井在非稳态流动情况下压力不稳定模型,

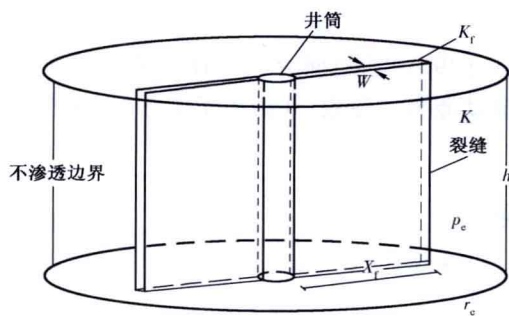


图 1-11 垂直裂缝井理想模型

而后 Gringarten 和 Ramey (1973, 1974) 得出无限导流能力垂直裂缝稳定流和水平裂缝非稳定流解析模型, 直到 1978 年, Cinco - Ley 等人得出有限导流垂直裂缝的压力不稳定解析解, 为垂直裂缝井压后评估提供了理论基础。图 1-11 为理想垂直裂缝井几何模型。

尔后 Cinco - Ley 与 Samaniego V. 进一步提出压裂井生产后可能存在四种流动形态: 裂缝线性流、双线性流、地层线性流和拟径向流, 参见图 1-12。其提出的分析方法已作为工业标准应用。

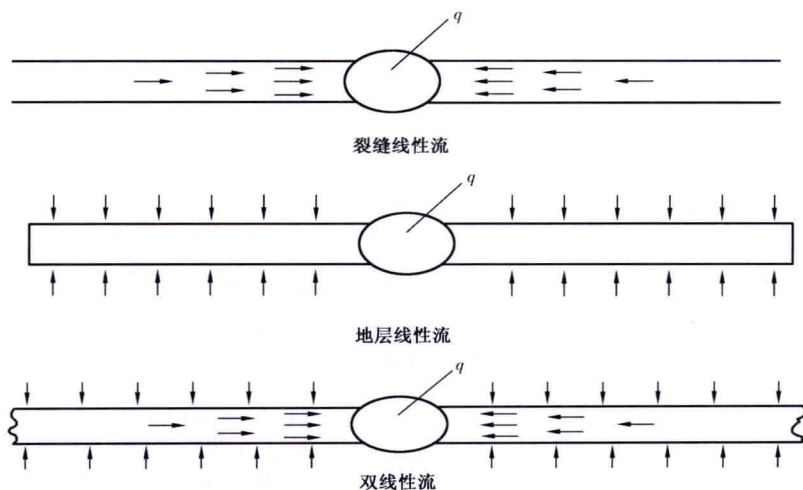


图 1-12 有限导流垂直裂缝三种流动方式

在均质储层、流体微可压缩、流动符合达西定律条件下, 定义无量纲时间 t_D 和无量纲压力 p_{wD} 为:

$$t_D = \frac{0.000264 K t}{\phi \mu C_t X_f^2} \quad (1-4)$$

$$p_{wD} = \frac{K h (p_i - p_{wfs})}{141.2 q \mu B} \quad (1-5)$$

式中 h ——产层净厚度, ft;

q ——流量, bbl/d;

B ——流体压缩系数;

p_i ——原始地层压力;

p_{wfs} ——井底流压。

并定义无量纲裂缝渗透率 K_{fD} 、缝宽 b_{fD} 、 h_{fD} 水力扩散系数 η_{fD} 和导流能力 C_{fD} :

$$K_{\text{D}} = \frac{K_f}{K} \quad (1-6)$$

$$b_{\text{D}} = \frac{W}{X_f} \quad (1-7)$$

$$h_{\text{D}} = \frac{h_f}{h} \quad (1-8)$$

$$\eta_{\text{D}} = \frac{K_f \phi C_i}{K \phi_f C_{\text{if}}} \quad (1-9)$$

$$C_{\text{D}} = K_{\text{D}} b_{\text{D}} = \frac{K_f W}{K X_f} \quad (1-10)$$

考虑流动全过程,可划分为六个流动阶段进行分析。

(一) 井筒储存现象

井筒储存效应的时间,主要取决于井筒内流体积压缩性和井筒体积,可用压力和压力导数的双对数曲线单位斜率来表征,常采用井底关井方法测试来减小井筒效应的影响。

(二) 裂缝线性流

裂缝线性流通常持续时间很短,可用压力变化 Δp 与时间变化 Δt 双对数曲线时间半幅度斜率来表征,其间无量纲压力 p_{wD} 是无量纲导流能力、扩散系数、高度和时间的函数:

$$p_{\text{wD}} = \frac{2}{C_{\text{D}} h_{\text{D}}} \sqrt{\pi \eta_{\text{D}} t_{\text{D}}} \quad (1-11)$$

该阶段终止无量纲时间和 t_{Dfl} 是无量纲裂缝参数的函数:

$$t_{\text{Dfl}} = \frac{0.01 (C_{\text{D}} h_{\text{D}})^2}{\eta_{\text{D}}} \quad (1-12)$$

(三) 裂缝双线性流

双线性流阶段,压力不稳定特性可用下式表达:

$$p_{\text{wD}} = \frac{2.45083 t_{\text{D}}^{1/4}}{\sqrt{C_{\text{D}} h_{\text{D}}}} \quad (1-13)$$

由于该阶段流动主要受裂缝导流能力控制,可用 Δp 相对于时间 4 次方根关系曲线斜率判断裂缝导流能力,如图 1-13 所示,若 Δp 截距不为零,正负值分别代表导流能力伤害和过强;当 C_{D} 大于 1.6 时,曲线尾部上翘,反之则向下弯曲,以此

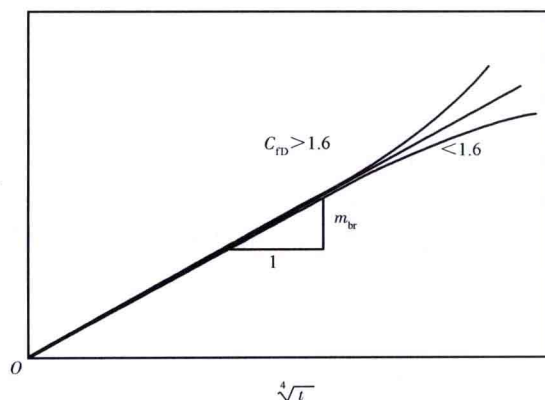


图 1-13 双线性流动 Δp 与 $\sqrt[4]{t}$ 关系