



TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

油水井增产增注技术

YOU SHUI JING ZENG CHAN ZENG ZHU JI SHU

王杰祥 主编

中国石油大学出版社

责任编辑：李 锋
封面设计：人和视觉



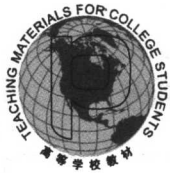
油 水 井 增 产 增 注 技 术

ISBN 7-5636-2198-9



9 787563 621989 >

定价：22.00 元



TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

油水井增产增注技术

王杰祥 主编

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

油水井增产增注技术/王杰祥主编. —东营: 中国石油大学出版社, 2006. 6

ISBN 7-5636-2198-9

I. 油... II. 王... III. 石油开采 - 技术 IV. TE355

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 051509 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名: 油水井增产增注技术

作 者: 王杰祥

责任编辑: 李 锋(电话 0546 - 8392791)

封面设计: 人和视觉

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@163.com

排 版 者: 中国石油大学出版社排版中心

印 刷 者: 泰安开发区成大印刷厂

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546 - 8392563, 8392791)

开 本: 180×235 印张: 16.125 字数: 324 千字

版 次: 2006 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 22.00 元

内 容 简 介

本书紧密联系生产实际,以油藏或井底为对象,综合了国内外大量文献资料和研究成果,求精取新,全面反映了油水井增产增注技术的基本原理、工艺的设计计算方法和应用。

本书可供具有油气田开发基本知识和生产实际经验的石油科技工作者参考,也可作为石油院校石油工程专业的教材及采油工程师培训的参考教材。

前 言

Foreword

目前,我国的油田开发已进入新的开采阶段。随着油田开采时间的增长,油井含水率不断上升,产油量递减趋势明显,原油开采难度增大。为了进一步保持石油开采速度和提高采收率,高效开发各种油藏尤其是复杂条件下的油藏,需要不断研究和应用油井增产和注水井增注的新技术。

随着科技的进步,许多新理论、新技术被引入油气田开发领域,经过多年的实践,逐步形成了大量油气藏增产增注的新技术。本书紧密联系生产实际,以油藏或井筒为对象,综合了国内外大量文献资料和研究成果,求精取新,全面反映了油水井增产增注技术的基本原理、工艺的设计计算方法和应用。它可供具有油气田开发基础知识和生产实际经验的石油科技工作者参考,也可作为石油院校石油工程专业的教材及采油工程师培训的参考教材。

全书共分八章,第一章介绍了水力压裂增产增注的基本原理,以及水力压裂的新理论、新技术的发展;第二章介绍了高渗油层水力压裂技术的发展、压裂机理;第三章介绍了酸化的新理论和新技术,以及油层解堵的非酸化技术等;第四章介绍了高能气体压裂技术的发展、压裂机理、应用及发展趋势;第五章介绍了利用水力方法进行油水井处理以达到油井增产、注水井增注的技术原理和应用;第六章介绍了超声波、人工地震与井下脉冲放电增产技术的原理和应用;第七章介绍了稠油开采的油藏技术和井筒技术;第八章介绍了微生物提高采收率技术的基本原理和应用。

在本书编写过程中,得到了张琪教授的精心指导,在此表示感谢。

由于时间及编者的水平和经验有限,疏漏、错误和选材不当之处在所难免,敬请使用本书的读者批评指正。

编 者

2006年2月



目 录

Contents

第一章 水力压裂理论与技术	1
§ 1-1 油井增产措施的基本原理	1
一、增产措施前的产能指数	1
二、油井增产措施的经济影响	2
§ 1-2 水力压裂技术	3
一、水力压裂基本概念	3
二、水力压裂过程及设备	3
三、压裂增产机理	4
§ 1-3 水力压裂设计的基本模型	8
一、压裂后的产能指数	8
二、裂缝导流能力优化	9
三、压裂力学:线弹性和裂缝力学	11
四、压裂流体力学	13
五、滤失和裂缝体积平衡	15
六、裂缝设计基本模型	19
七、裂缝设计	22
八、地应力对裂缝的影响	26
§ 1-4 压裂材料	27
一、压裂液	27
二、支撑剂	31
§ 1-5 压裂工艺设计及现场施工	35
一、压裂工艺设计	35
二、泵注程序设计	36
三、返排施工	39
四、压裂设备选择	40
五、微裂缝测试	41
六、小型压裂	41
七、分层压裂	44
§ 1-6 压裂施工分析	46
一、施工压力分析	46
二、油井测试	47



三、测井方法和示踪剂	48
§ 1-7 新的裂缝扩展模型	49
一、缝高控制	49
二、模拟器	50
§ 1-8 水力压裂新技术	52
一、端部脱砂压裂技术	52
二、重复压裂技术	52
三、复合压裂技术	54
四、泡沫压裂技术	54
五、水平井压裂技术	55
参考文献	57
第二章 高渗透油层压裂	61
§ 2-1 前言	61
§ 2-2 高渗透油层压裂的发展	63
一、砾石充填	63
二、防砂压裂	64
三、压裂充填	64
四、水平井的开发	65
§ 2-3 高渗透油层压裂中的关键技术	65
一、端部脱砂技术	65
二、净压力和流体滤失的考虑	67
三、高渗压裂滤失的基本模型	68
§ 2-4 处理方法设计和实施	70
一、射孔	71
二、机械设备	71
三、处理前诊断测试	72
四、端部脱砂设计	75
五、端部脱砂泵送处理	76
§ 2-5 裂缝导流能力与材料选择	77
一、裂缝参数优化	77
二、支撑剂选择	78
三、流体选择	79
四、质量控制	82
§ 2-6 高渗压裂处理评价:综合方法	83
一、生产结果	83



二、实时处理数据评价	83
三、处理后压力瞬变分析	84
§ 2-7 斜率分析	88
一、假设	89
二、限制延伸理论	90
三、斜率分析方法	91
§ 2-8 高渗压裂工艺	94
一、不用筛管和修井机的高渗压裂完井	94
二、复杂井压裂配置	94
三、技术要求及发展动向	95
参考文献	97
第三章 酸化技术	101
§ 3-1 酸处理方法	101
一、酸处理工艺简介	101
二、酸化增产的理论分析	103
§ 3-2 碳酸盐岩油藏的酸化	104
一、碳酸盐岩层的基质酸处理	105
二、酸蚀机理	105
§ 3-3 砂岩油藏的酸化	105
一、砂岩酸处理	105
二、酸蚀机理	106
§ 3-4 酸压技术	109
§ 3-5 水平井酸化	110
一、水平井酸化的决策技术	111
二、水平井酸化过程	114
§ 3-6 转向技术	116
§ 3-7 固体酸酸压新技术	117
§ 3-8 非酸液油层伤害处理技术	118
参考文献	119
第四章 高能气体压裂	120
§ 4-1 高能气体压裂机理	120
一、压裂方法对比	120
二、高能气体压裂作用	122
三、基本作用特征	124
四、高能气体压裂的特点	125



§ 4-2 火药压力发生器的结构	125
一、有壳火药压力发生器	125
二、无壳火药压力发生器	125
§ 4-3 推进剂	127
§ 4-4 高能气体压裂参数	129
一、裸眼井压裂参数的确定	129
二、套管射孔井高能气体压裂工艺参数	133
§ 4-5 高能气体压裂设计	136
一、高能气体压裂设计	136
二、压裂效果预测	139
§ 4-6 高能气体压裂测试与评价	140
一、高能气体压裂测试	140
二、高能气体压裂评价	142
§ 4-7 高能气体压裂适用范围及施工工艺	143
一、高能气体压裂适用范围	143
二、高能气体压裂施工工艺	144
§ 4-8 提高高能气体压裂效率的途径	148
§ 4-9 高能气体压裂存在的问题	151
参考文献	152
第五章 井底处理的水动力学方法	153
§ 5-1 波增产原理	153
一、波的有关特性	153
二、波的增产原理	154
三、波处理油层技术的应用前景	155
§ 5-2 水力振荡增产技术	156
一、水力振荡的增产原理	156
二、井下水力振荡设备、原理及施工工艺	157
§ 5-3 高压水射流油井解堵技术	162
一、结构与原理	162
二、井下水力参数的计算	164
三、油管伸长量的计算	166
四、自振空化射流理论与实验研究	168
五、高压旋转水射流旋转特性	175
六、高压水射流解堵工艺	178
参考文献	179



第六章 超声波、人工地震与井下脉冲放电增产技术	180
§ 6-1 井下超声波增产技术	180
一、井下超声波提高油气渗流能力的机理	180
二、超声波处理油层设备	183
§ 6-2 人工地震处理油层技术	185
一、人工地震采油机理	185
二、地面人工地震震源设备	189
三、其他人工地震技术	193
§ 6-3 井下脉冲放电增产技术	193
一、井下脉冲放电增产技术原理	194
二、脉冲发生器的结构及原理	196
三、井下脉冲增产技术的评价	200
参考文献	200
第七章 稠油增产技术	201
§ 7-1 稠油的特点	201
§ 7-2 稠油油藏开采方法	202
一、注蒸汽热采技术	202
二、火烧油层技术	203
三、水平井热采技术	206
四、稠油出砂冷采技术	208
五、注气开采技术	208
六、稠油井下改质开采技术	208
七、化学法开采技术	209
八、微生物开采技术	210
九、油藏电磁波加热技术	210
十、油藏微波加热技术	217
§ 7-3 稠油井筒举升技术	220
一、稠油井筒降粘技术	221
二、稠油井筒举升技术	223
参考文献	225
第八章 微生物采油技术	227
§ 8-1 油层微生物学	228
一、本源细菌	228
二、各种油层条件下细菌的生理学	230
三、接种细菌与本源细菌之间的相互影响	233



四、微生物菌株	233
§ 8-2 微生物采油原理及应用	235
一、井筒清洗	236
二、微生物封堵	236
三、微生物“吞吐”采油	237
四、微生物驱油	238
五、微生物采油应用条件	239
§ 8-3 微生物的培养与筛选	239
一、培养	239
二、筛选	241
三、实例	243
§ 8-4 微生物提高采收率方法及特点	246
参考文献	247



第一章 水力压裂理论与技术

§ 1-1 油井增产措施的基本原理

油井增产措施的基本目标是通过消除井筒附近的伤害或在地层中建立高导流能力的结构来提高油井的生产能力。常规增产技术措施包括：水力压裂、碳酸盐岩和砂岩基质酸化，以及在此基础上发展起来的压裂充填、压裂酸化。上述各项技术的目的都是提高生产指数，以增加产量或减小压降。减小压降可以防止油层出砂、发生水锥和近井地带的相平衡被破坏而向凝析转化。同理，用以上各项技术，也可达到注水井增注的目的。

一、增产措施前的产能指数

一口具体油井的产能，其油井产量 q 和生产压差 (Δp) 之间存在线性关系：

$$q = J \Delta p \quad (1-1)$$

比例系数 J 称为生产指数 (Production Index, 简称 PI)。在油井生产过程中，油井的流动条件会发生变化，两个最重要的理想化参数是定产量和定生产压差。

$$\Delta p = \frac{Bq\mu}{2\pi Kh} p_D \quad (1-2)$$

$$q = \frac{2\pi Kh \Delta p}{B\mu} q_D \quad (1-3)$$

式中， B 为流体体积系数， μ 为流体的粘度， K 为油层渗透率， h 为油层厚度。 p_D 和 q_D 是油层特性的函数，两者相互联系，从油井生产过程来看， $p_D \approx 1/q_D$ ，因此有

$$J = \frac{2\pi Kh}{B\mu} q_D \approx \frac{2\pi Kh}{B\mu p_D} \quad (1-4)$$

所以，对一口未伤害的垂直井，通过应用石油工程师皆知的关系式 (表 1-1) 就可以很容易地计算 J 。

表 1-1 未伤害垂直井的流动

流型	Δp	$p_D \approx 1/q_D$
瞬时压降	$p_i - p_{wi}$	$p_D = -\frac{1}{2} E_i \left(-\frac{1}{4t_D} \right)$ 其中 $t_D = \frac{Kt}{\phi \mu c_i r_w^2}$
稳态	$p_e - p_{wi}$	$p_D = \ln(r_e/r_w)$
拟稳态	$p - p_{wi}$	$p_D = \ln(0.472r_e/r_w)$

注： p_i 为油层原始压力， p_e 为油层供给边缘压力， p_{wi} 为流动压力， t_D 为无量纲时间， ϕ 为油层孔隙度， c_i 为综合压缩系数， r_e 为油层供给半径， r_w 为井半径。



即使钻井和完井技术再好,在大多数井中也存在某些伤害,即在钻井、完井、采油与修井作业以及增产处理中常会导致油层的伤害。通常可用表皮因子(S)或流动效率(FE)来衡量这种伤害程度的大小。而通过应用增产措施技术可减少表皮因子。负表皮因子的产生,不仅使增产措施能够解除伤害而且相对原始未伤害地层还会产生一些新的或更高导流能力的通道。已证实增产措施使油井的流场发生了变化。

图 1-1 表明了表皮因子的重要影响,表皮因子从 5 减小到 0 比从 25 减小到 20 对一口普通油井的产能影响更大,换句话说,表皮效应同油井质量之间存在一种“非线性”关系。通过不稳定试井可获得油井的总表皮因子 S ,该值可分解成污染表皮因子 $S_{污染}$ 、射孔表皮因子 $S_{射孔}$ 、井斜表皮因子 S_{θ} 、其他表皮因子 S' 等几项。在油井使用中,要不断地注意油气层的保护,当发现有伤害时,应尽早解除。

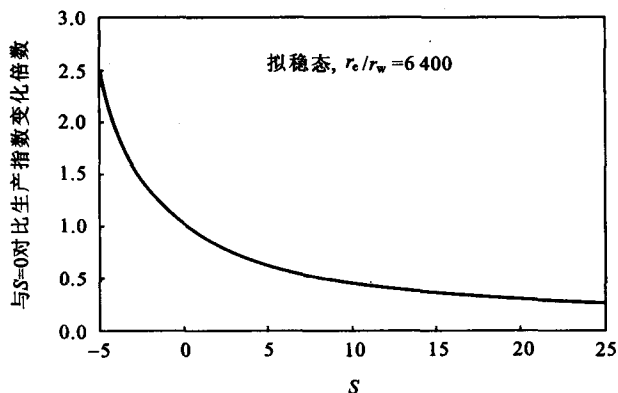


图 1-1 典型油井表皮因子与产能之间的关系

二、油井增产措施的经济影响

增产措施规模的优化选择取决于经济因素。最常用的衡量经济效益的指标是净现值(NPV),它是指增产措施产生的现在与未来的收支现值之差,未来的收支值可以通过贴现率以及考虑具体每年的情况转化为现值。另一衡量经济效益的指标是投资回收期,即多长时间可以用累计净现值来平衡措施费用支出。贴现率和所预测的未来石油价格对净现值的影响比较敏感。

与其他的工程措施一样,增产措施的施工费用随施工规模的增大而线性增加,达到一定临界点时,净收入增加很小,甚至有可能降低,因此存在一个最佳的施工规模以使净现值达到最大。在应用增产措施技术之前,必须准确掌握油藏地质、工程知识的内容,只有这样压裂时才能找到最佳的造缝方式。



§ 1-2 水力压裂技术

一、水力压裂基本概念

水力压裂是油气井增产、水井增注的一项重要技术措施。利用地面高压泵组,将高粘液体以大大超过地层吸收能力的排量注入井中,随即在井底附近造成高压。此压力超过井壁附近地应力及岩石的抗张强度后,在地层中形成裂缝。继续将带有支撑剂的压裂液注入缝中,此缝向前延伸,并在缝中填以支撑剂。这样,停泵后即可在地层中形成足够长度、一定宽度及高度的填砂裂缝。它具有很高的渗流能力,可大大地改善油气层的渗透性,使油气畅流入井,起到增产、增注的作用。

二、水力压裂过程及设备

水力压裂的基本过程如下:

- (1) 选井选层:根据油层特性、油井开采情况选择压裂的井层。
- (2) 压裂设计:根据油层的基本情况进行压裂参数设计,并结合井和地面设备等情况作出施工设计书。
- (3) 施工前准备:主要包括油井测试、井场的平整、压裂液的配制、井口设备的更换与安全保护等。
- (4) 压裂施工:包括将压裂施工设备按设计要求在井场摆放好,开始试压,打前置液、携砂液、顶替液,关井等施工。不同井有不同的设计要求。
- (5) 返排:返排是压裂的一项重要步骤,其主要目的是减少压裂液对油层的伤害。水力压裂施工工程项目大,需要投入资金多,应用设备多。其主要设备包括:
 - (1) 储罐:用来制备和储存压裂液。
 - (2) 压裂泵车:其作用是将压裂液升压并送入井中。
 - (3) 混砂车:其作用是将压裂液与支撑剂混合。
 - (4) 运砂车:其作用是将压裂施工所需的支撑剂运到井场。
 - (5) 管汇车:用于压裂作业时多台联机作业车辆之间的高压、低压管线连接,并可吊装运输各种配套的高压、低压管汇及连接管线,车上装有液压吊臂,吊装简单方便。
 - (6) 仪表车(压裂指挥车):它是压裂机组的指挥中心和数据采集、分析中心,可以同时操纵6~8台压裂车联机作业。该车数据采集、显示、记录、分析功能齐全,配有工控微机及专业压裂数据采集分析软件,接口与压裂车、混砂车等匹配,操作安全可靠,自动化程度高。
 - (7) 其他车辆:为了防止施工过程中出现意外,通常需要消防车、救护车;为了保证深井压裂的成功实施而不损坏油井,在采用油管压裂时井下装有封隔器,通常需要水泥



车以平衡油套环空的压力。

三、压裂增产机理

油井压裂增产有两种类型,一是未污染井压裂增产;二是污染井压裂增产。在室内,通常可采用电模型研究压裂井的增产机理问题。

1. 未污染井压裂增产机理研究

研究分为油井无裂缝和有裂缝两种情况。

油井无裂缝时,在模型供压边缘加上 1 V 电压,测量油井周围的电位分布,并绘制等位线和流线,得到如图 1-2 所示流型图,它反映了油井无裂缝时周围流体的流动特征及压力分布特征。图 1-3 是电位分布曲线图,它反映了油井周围的压力分布。由图可以看出,由于压裂前油井没有裂缝,因此流动是径向的。其流动特征是:断面变化、流速变化,压力损耗随流速增大而增大,有效驱动压力低,因此油井产量也较低。

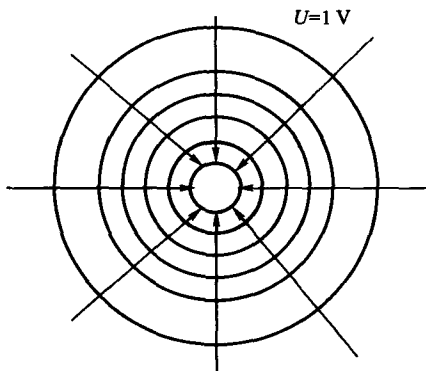


图 1-2 无缝井流型

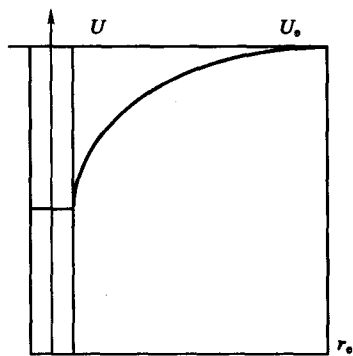


图 1-3 电位分布曲线图

测量有裂缝的油井周围的电位分布情况,并把电位相同的点连线,就得到一系列椭圆形等位线,再画出质点的流线,就可得到有裂缝的油井的流型图(图 1-4)。该图的特征为:① 等位线间隔较大,表示压降梯度小;② 间隔均匀,表示压力呈线性递减;③ 流线趋于平行,表示流动趋于单向流。如果增加裂缝宽度,或者增大裂缝渗透率,电位椭圆线则发生如下变化:① 电位椭圆变得十分扁平;② 电位线间隔变大,表示压降减小;③ 间隔更加均匀,表示压力呈线性降低;④ 流线更接近平行线,表示流动接近单向流。

地层流体向井的流动总是沿着阻力最小的通道。对均质未压裂地层,其模式为径向流,不同的等压线为大小不同的以井底为圆心的同心圆。油井压裂后(假设为双翼对称垂直缝),其流动模式发生改变,出现 3 个阶段:① 地层深部流体以拟径向或椭圆径向方式流入近裂缝地带;② 近裂缝地带的流体沿着垂直裂缝面的方向线性流入裂缝;③ 流体沿裂缝直线流入井底。①②合并,最后形成双线性流动模式。

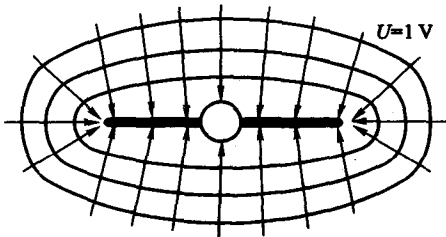


图 1-4 有裂缝油井的流型图

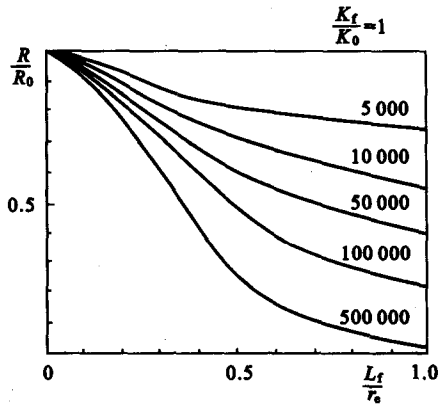


图 1-5 裂缝渗透率、缝长与油层阻力关系

以上研究表明,由于压裂之后油井周围存在较高渗透能力的裂缝,因此导致油层流动状态改变,由径向流动变成近似的向缝单向流动,这种流动断面恒定,流速恒定,阻力损耗小,提高了有效驱动压力,从而使得油井产量提高。另一方面,由于压裂后流动发生变化,液体质点改变了流动途径,原来流向井底,现在流向裂缝,这样就使得高阻力流动路径大大缩短,相当于“降低”了地层阻力。

改变裂缝渗透率和裂缝长度,测量地层模型的阻力变化(图 1-5)。从图中可以看出,裂缝渗透率越高、裂缝越长、地层等效阻力就越小。图中 R_0 是没有裂缝时模型的地层阻力; R 是有裂缝时模型的阻力; L_f 是裂缝长度; r_w 是供油半径; K_f 是裂缝渗透率; K_0 是地层渗透率。可以看出增加裂缝长度或者增大裂缝渗透率都会大大降低油层的等效阻力。

在电模型上,测量无裂缝井和有裂缝井的产量,并且测量改变裂缝长度和裂缝渗透率时油井的产量变化(图 1-6)。图中 q 为压裂后产量, q_0 为压裂前产量。可以看出,有裂缝的油井产量可以是无裂缝油井产量的几倍甚至十几倍。图 1-6 可以作为预测油井压裂后增产倍数的图版。图版是在裂缝宽度 $w_f=3\text{ mm}$ 条件下做出的。如果填砂裂缝宽度不是 3 mm ,则必须进行修正。实验证明,把裂缝宽度增大 1 倍和把裂缝渗透率增大 1 倍,对油井产量的影响是等效的。因此在实验中,把裂缝宽度、裂缝渗透率两个变量因素合在一起,成为一个因素($K_f w_f$)。为了方便,试验中采取只改变 K_f ,不改动裂缝宽度的办法。因此图版的横坐标是以 K_f/K_0 为变量的。

实验研究发现,油井压裂增产应注意以下问题:

(1) 改变地层渗透率,但保持渗透率比值 K_f/K_0 恒定,测量油井的增产能力可以得到图 1-7。图中 K_{01} 表示第一种油层渗透率, K_{02} 表示第二种油层渗透率,且 $K_{01}/K_{02}=37$,假定裂缝长度相同,这时两条产量曲线几乎重合。这说明渗透率较低或较高的渗透层,都具有一定的压裂前景,问题的关键在于设法提高裂缝渗透率,拉开裂缝渗透率与地层渗透率之间的差距,油井就会比压前有较大的增产。一般说来,由于中