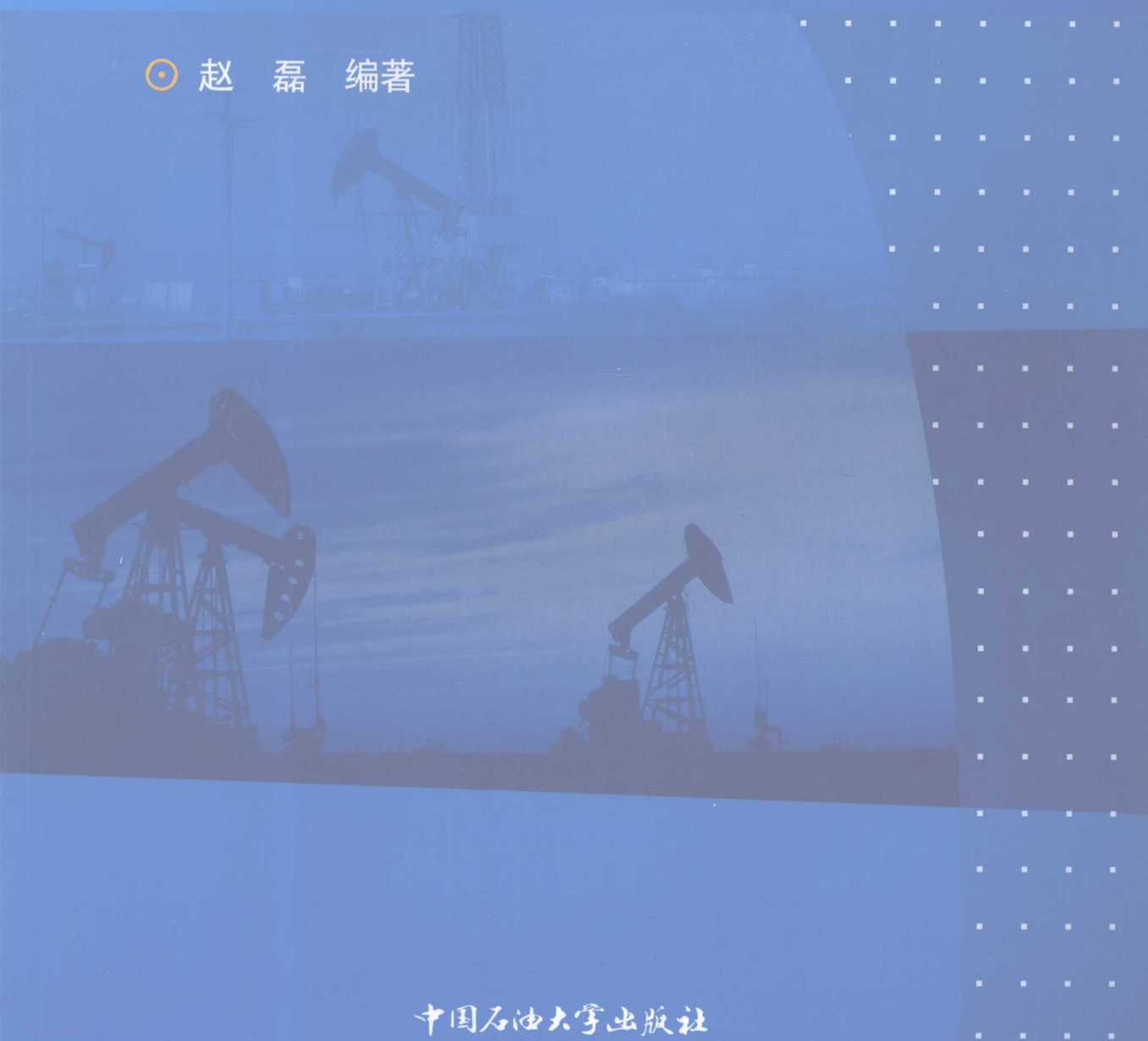


CHONGFU

YALIE JISHU

# 重复压裂技术

◎ 赵磊 编著



中国石油大学出版社

# 重复压裂技术

CHONGFU YALIE JISHU

◎ 赵磊 编著

中国石油大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

重复压裂技术/赵磊编著. —东营:中国石油大学出版社,2008.7

ISBN 978-7-5636-2617-5

I. 重… II. 赵… III. 油层—分层压裂 IV. TE357.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 085236 号

书 名: 重复压裂技术  
编 著: 赵 磊

---

责任编辑: 郜云飞(电话 0546—8391935)

封面设计: 九天设计

---

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>

排 版 者: 中国石油大学出版社排版中心

印 刷 者: 沂南县汇丰印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546—8391809)

开 本: 185×260 印张: 14.25 字数: 360 千字

版 次: 2008 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

印 数: 1—1100 册

定 价: 26.80 元

# 前 言

近年来,在我国新增的原油储量中,低渗透和特低渗透储量所占比例已经超过60%,为了获得工业油气流,每年都有大批油气井需要进行水力压裂作业。压裂后的油气井在生产一段时间后,由于各种因素的影响,油气产量会逐渐减小,于是重复压裂成了油气井增产的重要手段。重复压裂也是老井挖潜的重要措施之一,该项技术可以恢复或增加油气井的产量,提高油气采收率。重复压裂技术的应用前景被许多石油专家所看好,国外多年前就已经开始了重复压裂的室内研究和现场试验,国内的采油技术人员在这方面也做了大量的研究工作,并取得了一些重要成果。

本书从重复压裂机理出发,介绍了国内外重复压裂技术新进展,从理论上讲述了重复压裂诊断技术;在分析压裂井失效原因的基础上,介绍了选井选层的一般原则,阐述了重复压裂选井选层的基本方法;从地应力场出发,研究了裂缝的转向机理,阐述了地应力的大小、方位,以及地应力场对重复压裂的影响;应用数值模拟的方法,研究了重复压裂产能的预测方法;介绍了重复压裂设计方法、施工材料的优选方法以及经济评价方法。

本书在编写过程中得到了中国石油大学(华东)张琪教授和李兆敏教授的指导和帮助,全书由张琪教授审核,在此向两位老师表示衷心的感谢。中国石

油大学(华东)曲占庆教授、温庆志老师对本书的编写提出了宝贵意见,在此表示感谢。同时还要感谢中国石油大学(北京)张士诚教授。中国石油大学、西南石油大学等高校以及大庆油田、胜利油田、中原油田、江苏油田、中石化华北局等兄弟单位都为本书提供了大量的技术资料,在此一并表示感谢。

本书可供从事水力压裂技术的决策人员、技术人员、管理人员以及相关的科研人员参考。

由于作者的水平有限,书中难免存在不足之处,敬请广大读者提出批评和修改意见。

编 者  
2008年5月

# 目 录

第一章 重复压裂技术研究进展 .....	1
1.1 重复压裂技术概述 .....	2
1.1.1 重复压裂的发展历史 .....	2
1.1.2 重复压裂的分类 .....	4
1.1.3 重复压裂工艺的特点 .....	4
1.1.4 重复压裂工艺技术发展方向 .....	5
1.2 重复压裂选井选层研究进展 .....	5
1.2.1 有关压裂选井选层的研究进展 .....	5
1.2.2 重复压裂选井选层国内外研究进展 .....	7
1.2.3 重复压裂选井选层综述 .....	7
1.3 重复压裂压新缝力学研究进展 .....	8
1.3.1 重复压裂前地应力重定向机理研究概况 .....	8
1.3.2 重复压裂新裂缝重定向机理研究概况 .....	9
1.4 重复压裂产量预测研究进展 .....	10
1.4.1 国内外油气田产量预测研究现状 .....	10
1.4.2 整体重复压裂产量预测研究进展 .....	12
1.4.3 重复压裂产量预测综述 .....	12
1.5 重复压裂诊断分析技术研究进展 .....	13

1.5.1	压裂后压力降落分析技术的研究现状 .....	13
1.5.2	垂直裂缝井试井分析技术的研究现状 .....	15
	参考文献 .....	19
<b>第二章</b>	<b>重复压裂诊断分析技术 .....</b>	<b>22</b>
2.1	垂直裂缝井不稳定试井分析 .....	22
2.1.1	均匀流率垂直裂缝井数学模型 .....	22
2.1.2	有限导流垂直裂缝井数学模型 .....	23
2.1.3	垂直裂缝井不稳态压力动态特征 .....	24
2.1.4	垂直裂缝井参数估计方法 .....	25
2.1.5	应用实例 .....	26
2.2	考虑应力敏感的试井分析解释模型 .....	32
2.2.1	应力敏感均质油藏模型 .....	32
2.2.2	应力敏感裂缝性油藏模型 .....	34
2.3	裂缝二维延伸压力降落曲线解释方法 .....	37
2.3.1	理论基础 .....	37
2.3.2	解释压裂裂缝参数 .....	38
2.4	裂缝三维延伸压力降落曲线解释方法 .....	40
2.4.1	裂缝宽度模型 .....	40
2.4.2	停泵后裂缝延伸模型 .....	41
2.4.3	关井期间裂缝延伸停止后的压降方程 .....	41
2.4.4	裂缝延伸准则 .....	42
2.4.5	裂缝参数求解 .....	42
2.4.6	数学优化拟合压力 .....	42
	参考文献 .....	43
<b>第三章</b>	<b>重复压裂选井选层 .....</b>	<b>45</b>
3.1	压裂井失效原因 .....	45
3.2	重复压裂选井选层原则 .....	46
3.3	重复压裂选井选层方法 .....	47
3.3.1	基于遗传算法—神经网络的基本理论 .....	48
3.3.2	神经网络的基本理论 .....	51
3.3.3	遗传算法和BP网络的组合模型(GA—ANN) .....	54
3.3.4	重复压裂选井选层决策研究 .....	56
	参考文献 .....	58

<b>第四章 重复压裂地应力场及裂缝转向机理</b> .....	60
4.1 地应力分析 .....	60
4.2 地应力确定方法 .....	61
4.2.1 地应力大小 .....	61
4.2.2 地应力方位 .....	62
4.3 裂缝诱导应力 .....	63
4.4 地层孔隙压力诱导应力场 .....	68
4.4.1 基本方程和力学模型 .....	68
4.4.2 耦合模型求解 .....	70
4.5 重复压裂方式 .....	71
4.6 重复压裂裂缝转向机理研究 .....	72
4.6.1 射孔方位对人工裂缝形态影响的物理模拟试验 .....	72
4.6.2 压裂液参数对人工裂缝形态影响的物理模拟试验 .....	74
4.6.3 堵旧缝、压新缝的物理模拟试验 .....	75
4.6.4 应力重新定向对产生新裂缝的影响 .....	75
4.6.5 转向极限应力差值试验 .....	76
4.7 初次压裂后地应力场的变化趋势 .....	76
4.7.1 影响复压前应力场变化的参数 .....	76
4.7.2 一次压裂后储层地应力的变化规律 .....	77
4.7.3 井网条件下应力场与渗流场模型 .....	79
4.8 重复压裂裂缝转向数学模型的建立 .....	84
4.8.1 压裂裂缝转向的理论模型 .....	84
4.8.2 压裂裂缝转向理论模型的数值解法 .....	86
<b>参考文献</b> .....	89
<b>第五章 重复压裂数值模拟模型的建立及应用</b> .....	91
5.1 重复压裂模型的建立 .....	91
5.1.1 数值模型的建立 .....	91
5.1.2 边界条件 .....	93
5.1.3 初始条件 .....	94
5.1.4 计算单元的选取 .....	94
5.2 重复压裂裂缝参数优化设计应用实例 .....	98
5.2.1 油藏参数 .....	98
5.2.2 五点井网重复压裂 .....	99
5.2.3 优化结果 .....	109



参考文献 .....	109
<b>第六章 重复压裂设计方法 .....</b>	<b>111</b>
6.1 温度场计算 .....	111
6.1.1 井筒温度场的数值计算 .....	111
6.1.2 井筒温度场计算实例 .....	116
6.1.3 裂缝中的温度场模型 .....	124
6.1.4 裂缝温度场计算实例 .....	126
6.1.5 温度对压裂液性能的影响 .....	134
6.2 裂缝三维延伸模拟的数学模型 .....	134
6.2.1 缝中流体流动的连续性方程 .....	134
6.2.2 缝中流体流动的压降方程 .....	135
6.2.3 裂缝宽度方程 .....	135
6.2.4 裂缝高度方程 .....	139
6.2.5 模型的求解方法 .....	140
6.3 支撑剂在三维裂缝中运移分布 .....	141
6.3.1 支撑剂颗粒的沉降速度 .....	141
6.3.2 支撑剂在裂缝中的运移分布模型 .....	143
6.4 重复压裂生产动态预测 .....	150
6.5 重复压裂产量递减模式 .....	153
6.6 施工参数设计 .....	154
6.6.1 施工排量 .....	154
6.6.2 井口施工压力 .....	154
6.6.3 水力裂缝设计计算 .....	154
参考文献 .....	155
<b>第七章 压裂液、支撑剂、裂缝堵剂优选 .....</b>	<b>157</b>
7.1 压裂液优选 .....	157
7.1.1 压裂引起的伤害 .....	158
7.1.2 稠化剂 .....	160
7.1.3 交联剂 .....	162
7.1.4 助排剂 .....	162
7.1.5 破胶剂 .....	162
7.1.6 粘土稳定剂、pH调节剂及其他添加剂 .....	162
7.2 支撑剂优选 .....	163
7.2.1 支撑剂的分类、组成及性质 .....	163

7.2.2 几种常用支撑剂的物理性能 .....	165
7.2.3 支撑剂选择原则 .....	165
7.2.4 浅井支撑剂长期导流能力实验 .....	166
7.2.5 深井支撑剂长期导流能力实验 .....	170
7.2.6 支撑剂嵌入实验 .....	172
7.3 压裂裂缝堵剂优选 .....	174
7.3.1 裂缝堵剂性能要求 .....	175
7.3.2 XNPG-S1 体系 .....	175
7.3.3 XNPG-S2 体系 .....	178
<b>参考文献</b> .....	180
<b>第八章 水力压裂经济评价方法</b> .....	183
8.1 经济评价概述 .....	183
8.2 评价方法 .....	185
8.3 现金流量的计算 .....	187
8.4 压裂费用的计算 .....	189
8.5 优化与决策 .....	191
<b>参考文献</b> .....	193
<b>第九章 重复压裂实践</b> .....	194
9.1 史深 100 概况 .....	194
9.2 史深 100 重复压裂压前评价 .....	195
9.3 重复压裂方式及压裂材料优选 .....	200
9.4 现场应用 .....	200
9.4.1 重复压裂改造思路 .....	201
9.4.2 现场优化实施 .....	201
<b>附录 重复压裂设计书</b> .....	203
<b>参考文献</b> .....	218

## 第一章

## 重复压裂技术研究进展

自 1947 年开始,水力压裂技术不断发展并成为油气井增产的一种主要措施。特别是进入 20 世纪 80 年代中后期以来,水力压裂在模型、监测和解释等软件方面以及材料和设备等硬件方面的显著进步,使压裂技术产生了一些新的突破,如重复压裂技术、高渗透地层压裂技术、压裂-填充防砂技术,以及水平井压裂技术等,形成了所谓“现代水力压裂技术”,使水力压裂技术得到更加广泛的成功的应用。

美国目前 35%~40% 的井都进行过水力压裂,有近 30% 的原油产量是通过压裂获得的。水力压裂技术是有效开发低渗透油气藏必不可少的主要技术措施,我国和国外通过水力压裂改造获得的产量都在逐年增加。但是经过压裂的井,在生产过程中由于种种原因,会导致裂缝逐渐失效;另外,有些井由于认识或作业方面的原因压裂后也未能增产。这时,重复压裂就成为提高产量和经济效益的一种主要技术措施。

重复压裂是指对那些已经采取过一次或一次以上压裂措施的井层再实施压裂改造。由于重复压裂裂缝穿越了井筒附近的污染带,通过高压重新建立了井筒与储层及高孔隙压力区之间良好的渗流通道,形成了高的导流能力,因此重复压裂措施可以使产能很低的油气井恢复原始产率,甚至更高,从而提高采收率。

全世界每年钻新井约 70 000 口,而这只占总生产井数的 7%~8%。因此,从先前投入使用的 830 000 口生产井取得更多的产量对于油田发展更为重要,即使是在老井中的部分井取得中等量的产能增加,也可以使总的产量取得显著的增加,从而获得巨大的经济效益。重复压裂就是老井挖潜的重要方式之一:在特定的情况下,这种方法可以恢复甚至增加油井的生产率,提高油气的采收率。重复压裂的潜在效益引起油气管理者的莫大兴趣已经有 50 多年了。早在 20 世纪五六十年代,国外就开始进行重复压裂的室内研究和现场试验。但由于重复压裂开展的理论研究工作远远落后于现场要求,使重复压裂缺乏必要的、科学的、系

统的理论指导,导致大量的重复压裂作业没有取得理想的效果。到 20 世纪 80 年代中后期,随着油气价格的变化和现代水力压裂技术的发展,国外(主要是美国)又将重复压裂作为一项重要的技术研究课题,从重复压裂机制、油藏数值模拟、压裂材料、压裂设计、施工等方面进行研究攻关,使重复压裂技术有了长足的进步。当时,美国和加拿大的几个区块采用重复压裂工艺技术对油田进行改造,获得了大幅的产能提高,取得了显著的经济效益,见表 1-1。

表 1-1 重复压裂技术改造所取得的经济效益

时 间	油田名称	重复压裂次数	重复压裂效益
1974~1991 年	美国 Rangely 油田	施工 1 700 多次	重复压裂成功率达到 70%~80%,产量提高了 3 倍
1989 年	Westrook 油田	32 口井进行了施工	产量增加了 2 倍
1990 年	加州中部 Lost Hill 油田	5 口井进行了施工	产量增加了 3 倍
1997 年	得克萨斯北部气田(Barnes 页岩)	进行了 100 多次施工	产量比压裂前增长了 7 倍

我国许多油田在投入开发初期,油井普遍进行了压裂改造,获得了很好的开发效果。目前多数主力油田都已进入中高含水期开发阶段,重复压裂技术作为老油田增油控水的综合治理措施,如何发挥更大的作用是摆在我们面前的重大课题。对中高含水井成功地进行重复压裂,解决好中高含水油田的重复压裂挖潜问题,具有重要的现实意义。

近年来,国外在重复压裂技术研究和现场应用方面进展很快,我国在玉门、吉林、胜利、华北、大庆、长庆等油田也进行了积极的探索和实施,为增产稳产、老井挖潜和综合治理提供了一种可行的大有前途的方法。

## 1.1 重复压裂技术概述

重复压裂效果影响因素是多方面的,涉及的知识面也非常广。油藏知识:在初次压裂增产措施后,经过一段时间的生产、注水等作业,对油气水分布、孔渗饱变化、剩余油分布、地层孔隙压力的变化规律都需要作进一步研究;具体的井次:初次人工裂缝在恶劣的地层开采条件下的导流能力如何变化,如何进行更准确的矿场评价,如何诊断初次人工裂缝的状态;重复压裂选井选层综合评判方法的研究:考虑非线性的多因素影响,建立起一种量化、通用性较强的综合评判方法;重复压裂裂缝的起裂及延伸机理:生产过程中岩石力学性质及地应力的变化规律,裂缝在层内复杂应力条件下的扩展和延伸,重复压裂造新缝延伸到高压未动用区的条件、重复压裂的时机及工艺要求;重复压裂工艺技术:高砂比的实现、强制闭合技术和端部脱砂压裂技术的研究,以及更新的压裂液体系、更好的支撑剂、控制支撑剂回流的技术等。因此,重复压裂技术实际上也体现了目前世界上油藏增产领域最先进的技术之一。

### 1.1.1 重复压裂的发展历史

#### (1) 20 世纪 50~70 年代

受当时技术与认识水平的限制,一般认为,重复压裂是原有水力裂缝的进一步延伸或重新张开已经闭合的水力裂缝,重复压裂是无效的。施工规模必须大于第一次压裂作业的

2~4倍,才能获得与前次持平的产量;否则,重复压裂也是无效的。在这一时期,重复压裂只是简单地增加施工规模,并未从机理方面进行深入的研究,而且开展得也不多。

#### (2) 20世纪80年代

随着油气价格的变化和现代水力压裂技术的发展,国外(主要是美国)又将重复压裂作为一项重要的技术研究课题,从重复压裂机理、油藏数值模拟、压裂材料、压裂设计、压裂施工等方面进行研究攻关,获得的主要认识有:① 重复压裂的水力裂缝方位可能与第一次形成的裂缝方位有所不同,即重复压裂可能产生出新的水力裂缝。② 重复压裂应重新优选压裂材料。③ 对于致密油气藏,重复压裂设计的原则是增加裂缝长度;对于高渗透性油气藏,则应提高裂缝的导流能力。

#### (3) 20世纪90年代前期

首先,重复压裂裂缝方位发生转向的认识在现场得到了验证:Chevron石油技术公司在美国Lost Hill油田,利用倾斜仪测量重复压裂裂缝方位,然后与第一次压裂裂缝方位相比较,结果167井次的重复压裂平均裂缝方位为 $N25^{\circ}E$ ,而100多井次的初次压裂裂缝方位为 $N55^{\circ}E$ ,二者相差 $30^{\circ}$ ,由此说明重复压裂形成的裂缝方位不同于初次压裂形成的裂缝方位;重复压裂裂缝转向的机理也得到了进一步发展,人们逐渐认识到随着储层中液体的产出降低了储层的孔隙压力,最终会改变储层的应力状态。由于储层压力衰减程度不均衡,在低渗透率储层中,纵向人工裂缝形成一个椭圆形衰减区,其纵向裂缝轴比垂向裂缝轴要长得多,因此,平行于人工裂缝的水平总应力的下降就比垂直(最小)应力分量要大,这是应力重定向的关键。如果产生的应力变化足够大,足以抵消初始水平偏应力的影响,那么最小水平应力的方向就会局部旋转 $90^{\circ}$ ,在这种情形下,重复压裂裂缝应该垂直于原始裂缝生长,但重复压裂重定向取决于许多因素,包括原始偏应力、原生裂缝长度、储层的渗透率以及产量变化情况,所以实际的裂缝重定向不一定垂直于原裂缝生长。

#### (4) 20世纪90年代后期

到20世纪90年代后期,因为人们认识到转向重复压裂会接触到储层的剩余油区或未衰竭区而极大地提高产量和可采储量,这就更加激发了各国学者对转向重复压裂的研究。因为重复压裂裂缝延伸方式依然取决于储层应力状态,不以人的主观意志为转移而受客观应力条件控制,因此最先发展起来的是重复压裂前储层就地应力场变化的预测技术,这一时期国外研制出可预测在多井(包括油井和水井)和变产量条件下就地应力场的变化模型。研究表明,就地应力场的变化主要取决于距油水井的距离、整个油气田投入开发的时间、注采井别、原始水平主应力差、渗透率的各向异性和产注量等。距井的距离越小、投产投注的时间越长、原始水平主应力差越小、渗透率各向异性程度越小、产注量越大,则越容易发生就地应力方位的变化。而最佳重复压裂时机,即是就地应力方向发生变化的时机,且变化越大,时机越好,可提高波及系数或减少死油区。认识清楚就地应力场的变化之后,接着就发展起来了一系列的重复压裂选井选层技术,人们期望综合应用专家经验、人工神经网络技术和模糊逻辑等技术,开发出重复压裂选井选层的模型,以找出那些有可能转向的油层来实施重复压裂。

#### (5) 21世纪初至今

进入21世纪,转向重复压裂技术进一步发展,有人提出了一种迫使裂缝转向的新技术,

即堵老裂缝压新裂缝重复压裂技术。也就是说,研究一种高强度的裂缝堵剂封堵原有裂缝,当堵剂泵入井内后能够有选择性地进入并封堵原有裂缝,同时在井筒周围有效地封堵射孔孔眼,但不能渗入地层孔隙而堵塞岩石孔隙;然后采用定向射孔技术重新射孔以保证在不同于原有裂缝的方位(最佳方位是垂直于原有裂缝的方位)重新定向射孔,以保证重复压裂时使裂缝转向,即形成新的裂缝,从而采出最小主应力方向或接近最小主应力方向泄油面积的油气,实现控水增油。

### 1.1.2 重复压裂的分类

基于对重复压裂方式的不同理解,目前国内外实施的重复压裂可分为以下几种方式:

(1) 重新张开原压开的裂缝。前次压裂的裂缝,压裂后注水跟不上,地层压力下降,使闭合压力大幅度上升,裂缝闭合,导致压裂失败。重复压裂时加强压裂对应层的注水,补充能量,将会有效地张开原压开的裂缝。

(2) 层内压出新裂缝。由于厚油层在纵向上的非均质性,油层内见效程度不同,层内矛盾突出而影响开发效果。可以通过补射非主力油层或对非均质厚油层重复压裂,或者压裂同井新层等措施改善出油剖面,从而取得很好的效果。实质上,这是对重复压裂的早期认识,严格地讲应当属于分层压裂的技术范畴。目前,国内主要基于这种认识开展理论和实践探索。

(3) 延伸原有裂缝。油田开发过程中,由于压力、温度等环境条件发生改变,引起原有压裂裂缝失效。例如,由于物理条件改变产生结蜡、结垢而堵塞原有裂缝,或者由于压力改变和支撑剂失效引起原有裂缝闭合。这类井需要加砂重新撑开原有裂缝,穿透堵塞带就可以获得不同程度的效果。另外,压裂改造规模不够,或者支撑裂缝短,或者裂缝导流能力低,这类井必须加大压裂规模以继续延伸原有裂缝,或是提高砂量以增加裂缝导流能力。这是目前最通常的重复压裂概念,为了获得较长的增产有效期,必须优化设计重复压裂规模(液量、砂量)。

(4) 改向重复压裂。油田的低渗透层已处于高含水期,原有裂缝控制的原油储量已接近全部采出,裂缝成了水的主要通道,但某些井在现有采出条件下尚控制有一定的剩余可采储量。这时如果采取延伸原有裂缝的常规重复压裂,肯定不会有好的效果。最好的办法是将原有裂缝堵死,重新压裂,在与原有裂缝呈一定角度方向上造新缝,这样既可堵水,又可增加产油量。

(5) 冲洗裂缝面。在原压开的裂缝面上,由于被压裂液的不溶物(残渣)堵塞或压裂液形成的滤饼太厚太结实,影响裂缝面渗流,这时就应该对裂缝面进行有效的清洗,并将堵塞物返排出油井。因为目前压裂用压裂液均有一定的残渣,冲洗裂缝面机理及其措施的研究尚处于探索阶段,对此还需进一步深入研究。

### 1.1.3 重复压裂工艺的特点

根据渗流力学的观点,重复压裂所产生的裂缝必须满足两个条件方可有效:一个是重复压裂裂缝较初次压裂裂缝要长,另一个是导流能力较初次压裂的要高。

重复压裂面临的对象是改造过的地层,具有以下特点:

(1) 伴随着开发的延续,近井地带地层的流体压力下降,使产层的地应力发生变化,一方面使地应力方向发生变化,有可能产生新的裂缝;另一方面使产层与上下隔层的应力差增

大,有助于裂缝向地层深部延伸。

(2) 由于地层压力降低,地层滤失较初次压裂严重,对重复压裂的液体的质量要求较高,施工难度较大。因此,油井重复压裂的费用要比第一次压裂的高,这就要求必须做好选井工作。

#### 1.1.4 重复压裂工艺技术发展方向

##### (1) 裂缝侧向井注水引效

裂缝侧向井注水见效程度低,油井相对普遍低产,这是重复压裂所要攻克的技术难题。裂缝侧向井复压有效率低或复压后油井见效缓慢,提高此类低产井产能的有效方法是通过重复压裂产生与老裂缝不属同一方位的新裂缝,为此,应加强重复压裂产生新缝机理研究。

##### (2) 解堵重复压裂

这种技术主要适用于因近井地带物理堵塞而低产的油井。实施小规模重复压裂具有投资少、见效明显的特点。当油井堵塞的类型无法确定是物理堵塞、有机堵塞,还是双重堵塞时,可在水力压裂的同时,向地层挤入相关有机溶剂或对压裂液配方进行改进,以达到双重解堵的目的。

##### (3) 加大重复压裂规模

对于投产压裂规模小而改造不彻底的井层,加大压裂规模进行重复压裂,可取得较好的增产效果。

##### (4) 堵老缝压新缝

由于裂缝渗透率远远高于基质渗透率,当老油田的低渗透层已处于高含水期,老裂缝控制的原油已接近全部采出,裂缝成了主要出水通道,但某些井在现有开采条件下尚控制有一定的剩余可采储量。为了控水增油,充分发挥油井的生产潜能,采取延伸老裂缝的常规重复压裂措施肯定不会有好的效果。为此,必须实施改向重复压裂新技术。其实质是,采用一种高强度的裂缝堵剂有选择性地进入并有效封堵原有压裂裂缝和射孔孔眼,但不能进入地层孔隙而堵塞岩石孔隙;然后采用定向射孔技术重新射孔以保证重复压裂时使裂缝改向,在不同于老裂缝的方位形成新的裂缝;最后再在产层射孔,从而采出最小主应力方向或接近最小主应力方向泄油面积的原油,实现控水增油。实施这种重复压裂要求堵剂强度至少要高于产层破裂压力,这是保证形成新裂缝的关键之一。

## 1.2 重复压裂选井选层研究进展

### 1.2.1 有关压裂选井选层的研究进展

选井选层一直是水力压裂设计人员关心的首要问题,选井选层的成功与否直接关系到压裂施工效果的好坏。事实上,影响选井选层的因素很多,影响关系又极其复杂,而且不能用规则的公式或方程来描述。

20世纪50年代,水力压裂技术已成为重要的油气开采措施。但当时水力压裂设计没有专门考虑选井评层问题,主要是靠设计人员的经验来确定,带有很大的主观性和盲目性,因此成功率很低。到20世纪末,油田上使用了欧氏贴近度、模糊灰元、模糊物元、多层次模

糊聚类、等模糊识别法来优选井层,这些方法存在两个共同的缺点:① 影响因素之间不独立;② 井层的相对排序不唯一,在判断井层是否可压时,首先选择一个评价指标,然后进行相对优劣排序,最终认为排序在前的可压,排序在后的不可压,且评价指标的选择带有主观性。

人工神经网络方法是解决复杂的非线性映射问题的有效方法,表现出了极大的灵活性和自适应性。采用人工神经网络方法可以减少或克服前人使用的选井选层方法的不足。在水力压裂选井评层中,运用人工神经网络方法,能够根据目标区块已有的水力压裂数据建立压裂效果各类预测模型。运用这些模型实现对目标区块目的层的优选和压裂效果的定量预测,克服了现在油田上常用的“模糊评判”规则中人的主观性、因素的不独立性及井层相对优劣排序法的不足,从而达到优选施工井层的目的。

#### (1) 国外发展情况

20世纪90年代末期,Robert F. Shelley利用人工神经网络对Red Oak油田二次增产进行选井,预测了Red Oak油田二次完井后的产量变化,平均绝对误差小于5%。在训练网络时,将一些井的可得资料作为输入,如地理位置、地面高程、原始油藏压力和目前的油藏压力、射孔位置、原始完井程序等。采用BP网络,它的训练和遗传算法可以决定合适的拓扑结构,决策者能在实行更详细的工程分析前筛选井,它在油井的评估过程中是经济的、便利的,完成人工神经网络程序所需的工时最小。

1998年,美国天然气研究院(GRI)结合智能技术,成功地开发出了一种可信、高效的方法,选择具有高潜力的二次增产井。这项技术的实施包括:第一,在井的产量上,精密的统计方法既可以识别显而易见的差别,又可以识别微妙的差别,并对有潜力的井提供原始的记录。第二,智能技术被用来对井的产量识别模式,可依次用作选择高潜力的二次增产的井,识别可能存在的井的低产原因,开始施工选井工作。第三,施工方式通过提供相关油藏数据、完井效率和二次增产潜力,被用作高潜力二次增产选井。最后,根据机械完整性、油藏压力和其他重要的历史数据,对高潜力的二次增产选井逐个进行筛选。

Reese讨论了经济的重复压裂候选井特征:对渗透层重复压裂应考虑增加裂缝导流能力,低渗层重复压裂应考虑增加裂缝长度,衰竭的低渗层重复压裂可能会不经济。Reese主要针对延伸原有人工裂缝的重复压裂方式提出了选井(层)原则。

#### (2) 国内发展情况

1996年,西南石油学院肖芳淳和李宾元在灰色理论的基础上,结合模糊和物元概念,提出了模糊灰元分析方法。对于影响选井选层的许多因素,以往的许多方法未作全面的综合考虑,有的因素带有模糊性,有的因素带有灰色性,而模糊灰元分析方法解决了这些问题,取得了令人满意的结果。

1998年,重庆石油高等专科学校范学平等采用神经网络专家系统选井选层,克服了模糊评判方法实际问题中隶属度和权重分配不易正确确定的缺点,对于现场实际的选井选层的运用具有现实的指导意义。

同年,石油勘探开发研究院廊坊分院蒋廷学等人将模糊数学的有关原理,系统地应用于压裂设计的选井选层、部分关键设计参数的研究和确认以及最终压裂方案的优化决策中。该方法综合考虑了多种影响因素并将其量化,因此较以往的单因素分析法更为合理。此外,



在权重的确定上,尝试应用了灰色理论中的灰色关联度法,将模糊数学与灰色理论有机地结合起来,得出的权重结果基本符合经验判断。

传统数学方法在处理压裂的选井选层时有很大的局限性,且精度很差。2001年,石油大学吴亚红和李秀生等人采用人工神经网络方法,建立了一套压裂选井选层人工智能系统,解决了压裂效果与各影响因素之间的高度复杂的、多参数的非线性问题,并在现场应用中取得了良好的效果。

2002年,西南石油局张国东和林辉等人利用灰色系统理论进行灰色建模,采用灰色关联分析和GM(1,N)灰色模型对气藏拟压裂井的拟压裂层段进行定量分析,确定该层段压裂后可能具有的开采潜力以及潜在的压裂效益,为压裂井评井选层提供了一种新的思路。因为影响储层含气性参数与储层含气性之间存在着非线性关系,故在一般的评井选层研究中都只能采用定性方式进行评价,很难采用定量方式进行分析,这给压裂评井选层和压裂决策带来了某些不确定性。因此,他们在评井选层研究中利用灰色模型GM(1,N)来求解这种非线性问题的尝试,取得了较好的效果。

同年,华北石油局潘金明、耿福兰和张志勇采用油气井试井资料,研究了压裂选层的定性选层、半定量选层技术等,总结出压裂井试井压恢曲线形态与压裂效果有较好的相关性,在选层时可利用试井资料,判断压裂井层的油气层信息,预测压裂效果。该方法科学有效,可以减少压裂选井的盲目性,提高压裂的成功率。

1997年,蒋廷学等人分析了影响重复压裂效果的因素,针对阿南、二连等油田重复压裂实践,提出了评价剩余储量的GM(1,1)模型,解决了重复压裂有效性的物质基础。刘洪首先探讨了支持向量机技术在重复压裂选井选层中的应用。

2004年,西南石油学院吴建发、郭建春和赵金洲等人将模糊数学和系统工程层次分析原理结合起来,考虑到影响选井选层因素的复杂性和不均衡性,将各因素按其不同层次上对事物的影响程度分类,然后确定各因素最终的权重,形成一种压裂酸化选井选层的模糊综合评判方法。该方法计算结果正确,符合现场施工实际;计算过程简单、方便,具有一定的现场实用价值。

### 1.2.2 重复压裂选井选层国内外研究进展

国内外选井选层方面已开展了大量的研究工作,并随着计算机以及现代石油工业的发展,重复压裂选井选层技术也取得了一些实际成效,许多高新技术已经用于重复压裂选井选层。

1997年,蒋廷学将模糊识别方法用于重复压裂选井选层,并将该项技术用于阿南油田,通过矿场实践证明,该方法准确有效。

2003年,Christian Oberwinkler将数据挖掘技术应用用于重复压裂选井选层。该项技术采用自组织图和神经网络等方法挖掘大量数据中所隐藏的重要信息,并能够避免可疑数据的干扰,使选井选层技术更加准确和快捷。

同年,中原油田杜卫平将遗传算法与人工神经网络理论相结合,建立了重复压裂选井选层方法,提高了重复压裂决策模型的精度与适应性。

### 1.2.3 重复压裂选井选层综述

重复压裂要获得较好的压裂效果,选井选层是关键。国内外在重复压裂的选井选层方