

低丰度低渗透低产 油田增效开采技术

王岩楼 张传绪 于俊波 杨春宇 主编

石油工业出版社

低丰度低渗透低产 油田增效开采技术

王岩楼 张传绪 于俊波 杨春宇 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书根据“十五”期间大庆西部外围地区低丰度低渗透低产油田增效开采技术思路与实践,总结了射孔完井工艺技术、分层注水工艺技术、人工举升工艺技术、增产增注技术等方面的内容,其中的认识和方法,对同类油田增效开采可起到借鉴作用。本书可作为从事采油工程的科技人员及院校师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

低丰度低渗透低产油田增效开采技术/王岩楼等主编.
北京:石油工业出版社,2010.5
ISBN 978-7-5021-7636-5

I. 低…

II. 王…

III. 低渗透油层-石油开采

IV. TE348

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 019444 号

出版发行:石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)
网 址: www.petropub.cn
发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2010 年 5 月第 1 版 2010 年 5 月第 1 次印刷

850×1168 毫米 开本:1/32 印张:3.875

字数:102 千字

定价:22.00 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

前 言

大庆长垣西部外围地区，区域构造上位于松辽盆地北部大庆长垣以西，主要勘探开发目的层为黑帝庙、萨尔图、葡萄花、高台子、扶杨油层。已初步探明油气藏 20 个，油气资源比较丰富，但具有油田分布零散、油藏规模小、埋藏深、类型复杂、储层物性差的特点，制约了油田的高效开发。因此，如何探索外围油田经济有效开发的新路子已成为油田开发面临的挑战。针对低渗透油田的具体特点，研究发展了实用的采油工艺增效开采技术，在完井、人工举升、细分注水、措施改造工艺等方面形成了一套适合低渗透油田开发的采油工艺技术。

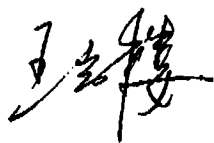
成果应用后在降低油田开发投资、油田生产成本以及提高单井产量方面见到了较好的效果。

本书主要从完井、人工举升、细分注水、措施改造等几个方面总结了比较成熟的部分技术以及应用情况，旨在对“三低”油田的开采有一定的借鉴作用。

本书由王岩楼、张传绪、于俊波、杨春宇主编，编写作者分工如下：第一章第一节由于永波编写，第二节由刘丽华编写，第三节由段致睿编写，第四节由高艳秋编写，第五节由周巍、王润涛编写；第二章第一节由刘遵权、吴建成编写，第二节由孙先杰、苗小明编写，第三章第一节由高永莲、苗国晶、陈伟杰编写，第二节由王殿庆、韩增军、陈永明编写，第三节由高嵩、姚华梅、李佳芳编写，第四节由宋胜刚、张志勇编写；第四章第一节由赵艳波、邓素玉编写，第二节由刘岩编写，第三节由孙成岩、孙连柱编写，第四节由刘志梅、巩道伟编写，第

五节由赵丽娟编写。

由于编者水平有限，对本书中存在的_{不当和失误之处}，恳请读者提出批评指正。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '王志强' (Wang Zhiqiang), written in a cursive style.

2009 年 10 月

目 录

第一章 射孔完井工艺技术	1
第一节 复合射孔技术	1
第二节 内盲孔复合射孔技术	3
第三节 135°相位角射孔技术	4
第四节 负压射孔技术	5
第五节 定方位射孔技术	7
第二章 分层注水工艺技术	10
第一节 可洗井分层注水管柱技术	10
第二节 多层段细分注水技术	17
第三章 人工举升工艺技术	21
第一节 抽油机举升	21
第二节 低产井提捞采油技术	42
第三节 稠油螺杆泵举升采油技术	51
第四节 低能耗软拖动抽油技术	53
第四章 增产增注技术	57
第一节 压裂工艺技术	57
第二节 堵水工艺技术	87
第三节 酸化解堵技术	96
第四节 物理法解堵采油技术	100
第五节 气动力复合解堵技术	105
参考文献	109

第一章 射孔完井工艺技术

为提高油水井完善程度，在油田开发过程中加大了射孔完井工艺优化力度。在滚动开发区块，优选了深穿透射孔、高能复合射孔等工艺，既能充分发挥油井产能，又节省了投资；在特低渗透非均质油藏，开展了 135° 相位角射孔试验，提高了射孔孔道对准最大主应力方向的概率，为压裂投产和后期改造奠定基础；对于自然产能低、油层薄、断层发育、地层压力系数高、测井曲线显示含气较多的油田，采取二次增效射孔、高能复合射孔技术，提高射孔投产井完善程度，减少水力压裂井数，实现部分井不压裂投产。

第一节 复合射孔技术

复合射孔工艺技术是一项集射孔完井与高能气体压裂于一体的高效完井技术。它通过一次施工完成两道工序。在射孔的同时，进行高能气体压裂。火药燃烧产生的高温、高压气体通过射孔孔眼对地层压裂，形成多条裂缝，部分解除钻井、固井、射孔等作业过程对地层所造成的污染，改善近井地带渗透性能，从而提高油气井完善程度，达到射孔完井和增产、增注的目的。

一、技术原理

复合射孔压裂弹由聚能射孔弹和固体推进剂两部分组成，利用两者的燃速差来实现射孔后压裂工作。作业时，射孔弹首先穿透枪身、目的层套管、水泥环，在油气层部位形成射孔孔眼。然后，固体推进剂进行二次爆燃，瞬时燃烧形成高温高压

气楔，在高压气体的膨胀挤压和尖劈作用下，在井筒周围地层中压开多条不受地层最小主应力控制的裂缝，裂缝延伸方向的剪切应力分量使裂缝产生微错动，裂缝不能完全闭合。火药燃烧完毕，井筒内压力下降，压入地层中的气体和液体会返流回井筒内，同时携带出一些岩石碎屑等堵塞物，从而达到清洗裂缝和射孔孔道的作用。

二、技术优点

(1) 增加射孔深度，突破射孔压实带的影响，提高射孔效果；

(2) 在井筒周围产层产生多条裂缝，从而改善地层导流能力，提高地层渗透性能。

三、适用范围

(1) 射开厚度较薄、储层物性较差的井层；

(2) 储层具有一定的产能，受污染较严重的井层；

(3) 探井的预压裂，以观察储层情况，确定是否需要水力压裂；

(4) 需水力压裂的井，在复合射孔后的井直接进行水力压裂，可提高水力压裂效果，降低破裂压力。

四、复合射孔工艺改进

(一) 推进剂药量

为了保证复合射孔效果，对复合射孔药量进行优化。90°相角射孔推进剂药量由原来的 25g/发，增加到 30g/发。

经地面动态模拟实验 $p-T$ 曲线峰值压力由 50MPa 提高到 60MPa，30MPa 以上压力平台时间由 8ms 提高到 9ms。现场铜柱压力测试，井下压力峰值为 50~75MPa。F102-16DP38A 复合射孔器地面动态测试环空压力 $p-T$ 曲线见图 1-1。

(二) 复合射孔布弹方式改进

对厚度小于 1m 油层的复合射孔压裂弹布弹方式进行了改进，确保复合射孔效果。复合射孔压裂弹布弹方式改进情况见表 1-1。

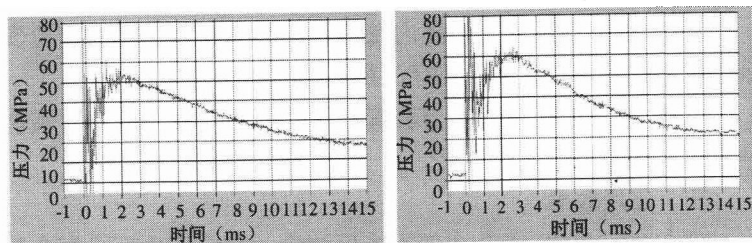


图 1-1 F102-16DP38A 复合射孔器地面动态测试环空压力 $p-T$ 曲线

表 1-1 复合射孔压裂弹布弹方式改进情况

连续油层 厚度 (m)	原布弹方式			改进后布弹方式		
	上部不装 药量 (盒)	下部不装 药量 (盒)	不装药长度 (cm)	上部不装药 量 (盒)	下部不装药 量 (盒)	不装药长度 (cm)
<1	3	2	35	全装	全装	0

五、应用效果

统计 2003—2005 年, 9 个油田区块投产新井中, 共应用复合射孔 458 口, 平均单井日产液 2.2t, 日产油 1.4t, 采液强度 0.65t/(d·m), 采油强度 0.40t/(d·m)。

第二节 内盲孔复合射孔技术

射孔深度是评价射孔效果的一个重要指标, 影响射孔深度因素很多。一般来说, 一定型号的射孔弹实际射孔形成的孔径等于 3 倍射孔弹开口直径时, 射孔弹能够达到较为理想的射孔深度。

一、技术原理

内盲孔复合射孔技术是通过在射孔枪体上加工台阶通孔, 外部采用堵盖粘接、垫片焊接的形式扩大枪体内部空间实现内盲孔, 以减少射孔时射孔枪对射孔弹的阻力。

二、技术优点

将外盲孔设计改为内盲孔设计, 具有以下优点:

(1) 增加射孔弹与射孔内壁的距离, 提高射孔弹的装枪实际射孔形成的孔径, 使射孔穿深提高 15% 以上;

(2) 减少射孔枪外壁与套管的间隙, 降低并筒液体对聚能射流的干扰, 提高射孔效果。

三、应用效果

在 2007—2008 年 8 个新投产区块中, 共应用内盲孔复合射孔 780 口井, 采液强度提高 10%。

第三节 135°相位角射孔技术

水力压裂产生的人工裂缝的形态取决于地应力的大小和方向, 与地层的垂向应力和水平应力的大小有关。研究表明, 对于人工裂缝的起裂方位有重要影响的射孔参数是射孔方位角。理想的射孔方向是与地层的最大主应力方向平行, 即两者夹角为零。

一、技术原理

通常使用射孔器的相位为 90° , 孔道偏离最大主应力方向 45° ; 相位为 60° 的射孔器, 孔道偏离最大主应力方向 30° ; 相位为 135° 多相位射孔器, 孔道偏离最大主应力方向 22.5° , 能够使孔道更准确地对准最大主应力方向, 降低两者夹角, 减小裂缝弯曲半径, 降低裂缝扭曲摩阻, 提高铺砂浓度, 进而提高裂缝导流能力, 为油层进行水力压裂提供良好的条件。

二、技术优点

(1) 降低储层非均质性对射孔的影响, 提高非均质性油层产率比;

(2) 提高孔道对准最大主应力方向的概率, 降低破裂压力, 提高施工成功率;

(3) 降低了裂缝扭曲程度, 减少砂堵风险, 提高裂缝内支撑剂铺置浓度和裂缝导流能力, 提高压裂效果。

三、适用范围

- (1) 渗透率较低的压裂投产井;
- (2) 储层非均质性较强的压裂投产井。

四、应用效果

在 2007—2008 年 7 个新投产区块中, 共应用 135°相位角射孔技术 415 口井, 与 90°相位角射孔相比, 破裂压力降低 1.8MPa, 采液强度增加 0.41t/(d·m), 采油强度增加 0.13t/(d·m)。

第四节 负压射孔技术

一、技术原理

负压射孔是在井筒液柱压力低于储层压力条件下进行的射孔。在负压射孔的瞬间, 由于负压差的存在, 避免了压井液对地层的伤害, 同时地层流体可向井筒产生回流, 冲洗射孔孔道、解除固相堵塞, 并可缓解压实作用, 从而提高射孔效果, 达到保护油气层的目的。

二、合理负压值的确定

负压值过大会引起地层出砂并损害套管, 负压值过低又不能确保孔眼的清洁。因此必须对射孔负压值进行合理的设计。

目前国内外公认的确定最小有效负压值的方法有以下几种:
美国岩心公司计算公式:

$$\ln \Delta p = 5.471 - 0.3668 \ln K \quad (1-1)$$

美国 Conoco 公司计算公式:

若储层无出砂史, 则

$$\Delta p_{\text{rec}} = 0.2\Delta p_{\text{min}} + 0.8\Delta p_{\text{max}} \quad (1-2)$$

若储层有出砂史, 则

$$\Delta p_{\text{rec}} = 0.8\Delta p_{\text{min}} + 0.2\Delta p_{\text{max}} \quad (1-3)$$

$\Delta p_{\min}$ 由地层渗透率确定最小有效负压差:

$$\Delta p_{\min}(\text{气井}) = \frac{17240}{K} \quad (K < 1\text{mD}) \quad (1-4)$$

$$\Delta p_{\min}(\text{气井}) = \frac{17240}{K^{0.18}} \quad (K > 1\text{mD}) \quad (1-5)$$

$$\Delta p_{\min}(\text{油井}) = \frac{17240}{K^{0.3}} \quad (1-6)$$

$\Delta p_{\max}$ 由邻近泥岩声波时差 $DTax$ 确定:

若 $DTas > 30\text{ms/m}$, 则

$$\Delta p_{\max}(\text{气井}) = 33095 - 52.426(DTas) \quad (1-7)$$

$$\Delta p_{\max}(\text{油井}) = 24132 - 39.929(DTas) \quad (1-8)$$

式中 Δp ——负压差值, kg/cm^2 ;

K ——油层渗透率, mD ;

$\Delta p_{\min}$ ——最小有效负压差, kPa ;

$\Delta p_{\max}$ ——最大允许负压差, kPa ;

Δp_{rec} ——合理负压差, kPa 。

根据以上公式计算出 $\Delta p_{\min}$ 和 $\Delta p_{\max}$ 后还可进行以下判断:

若 $\Delta p_{\min} > \Delta p_{\max}$, 则可根据具体情况给出一个在 $\Delta p_{\min}$ 与 $\Delta p_{\max}$ 之间的合理负压值;

若 $\Delta p_{\min} < \Delta p_{\max}$, 无法实现安全有效的负压射孔, 应免去负压射孔工作。

三、技术优点

(1) 避免了压井液对地层的伤害;

(2) 冲洗射孔孔道, 缓解压实作用, 提高射孔效果。

四、适用条件

(1) 地层条件相对较好 (渗透率 $> 30\text{mD}$);

(2) 井深小于 1500m 。

五、应用效果

新站油田负压射孔 45 口井，采液强度为 $0.31\text{t}/(\text{d}\cdot\text{m})$ ，正压射孔井采液强度为 $0.34\text{t}/(\text{d}\cdot\text{m})$ ，射孔效果基本相同。分析主要原因是渗透率较低，一般负压值难以形成足够的负压回流，达不到负压清洗目的。

第五节 定方位射孔技术

由于常规射孔的孔眼方位是随机的，为了满足水力压裂、防砂、背向断层射孔、垂直天然裂缝发育地层射孔井的特殊需求，应用了定方位射孔技术。

一、技术原理

定方位射孔技术在常规的油管输送式射孔管柱的起爆器与深度定位短接之间接入一方位短接，该定方位短接有一与射孔弹穿孔方位相同的定方位键，该键即是陀螺仪所要测定的方位；射孔枪与射孔枪之间定向连接，保持每柱射孔枪的射孔弹方位与设计方位一致。射孔定深后，用电缆将陀螺定方位仪下入油管中坐键后，进行方位测量，若测量的方位与目标方位不一致，则需要井口转动管柱调整方位，直到测量方位与目标方位相同或误差在允许范围内，然后起出仪器进行射孔点火。

二、技术优点

- (1) 实现定向射孔，使裂缝方向最大限度平行于最大主应力方向，提高流体的流动效率；
- (2) 可实现背向或避开断层射孔；
- (3) 对存在天然裂缝的储层中，要求射孔孔眼垂直于裂缝发育方向，尽可能与天然裂缝沟通。

三、适用范围

- (1) 存在天然裂缝的储层；
- (2) 断层附近油井。

四、射孔参数与裂缝的关系

2004 年调研了射孔参数对裂缝起裂方向的影响,利用定方位射孔技术,达到控制裂缝转向,使得在油层中压开多条裂缝成为可能。因为水力压裂产生的裂缝方向总是垂直于最小水平地应力方向,若射孔孔眼方向垂直于最小水平地应力方向,水力压裂可以达到比较好的效果,而常规射孔孔眼的方向垂直于最小水平地应力方向的概率极小;如果井眼周围有断层存在,采用常规射孔工艺后,水力压裂极易与断层连通,导致水力压裂无效,背向断层定向射孔之后就可以达到预期的效果;如果储层中存在天然裂缝,控制射孔孔眼的方向,使射孔孔道与天然裂缝沟通,能够更有效地提高油井产能。

五、应用效果

2005 年现场试验了 6 口井,应用 XMAC 测井解释结果确定水平最大主应力方向,与水平最小主应力方向成一定角度对称射孔,采用限流法压裂,压裂时采用地面微地震进行裂缝形态监测。施工参数见表 1-2。

表 1-2 定向射孔压裂井基本参数表

序号	井号	压裂层位	水平最大主应力方向(°)	水平应力差值(MPa)	射孔与水平最小应力方向夹角(°)	相位角(°)	射孔孔眼数(个)	施工排量(m ³ /min)
1	X105-72	PI11	NE45	2.3	0	90	8	4
2	Y51-12-9	F4-F5	NE45	2.1	45	90	12	3.5
3	Y51-15-4	GVI10	NE80	2.1	30	60、120	8	3
4	G149-78	PI3	NE80	2.3	30	60、120	8	4.5
		PI4	NE80	2.3	30	60、120	8	2.4~4.0
5	G155-80	PI3	NE80	2.3	30	60、120	8	2.5~4.5
		PI7	NE80	3.0	20	40、140	8	2.0~4.0
6	G159-86	PI1-2	NE75	2.3	30	60、120	8	2.5~4.5
		PI7	NE80	3.0	20	40、140	8	4

根据实际地层参数和压裂施工参数，模拟的裂缝形态与地面微地震监测的震点分布情况如图 1-2，图 1-3。

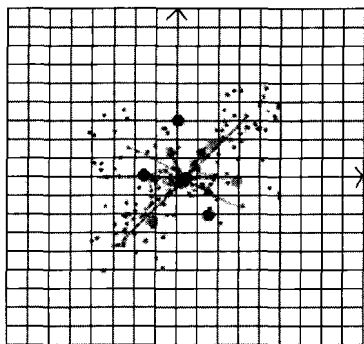


图 1-2 X105-72 井

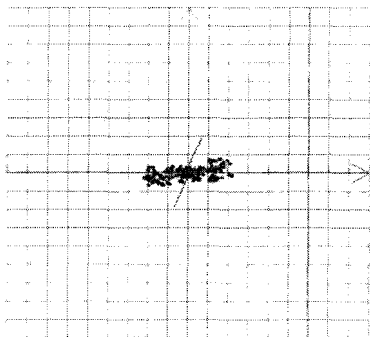


图 1-3 Y51-12-9 井

第二章 分层注水工艺技术

大庆西部外围油田油层埋藏深，岩性致密、渗透率低、井底温度高，注水压力高、注水量低，对分层注水管柱的密封性、耐压和耐温要求较高。油田注水初期使用的压缩式可洗井封隔器存在着耐压低、洗井通道不密封、洗井排量小等问题，满足不了外围油田分层注水的需要。而后研制的压缩式不可洗井高压封隔器，虽然有效地提高了注水管柱的密封率，管柱检修期得到有效的延长，但 1999 年污水回注后，由于井内污物而出现掉、卡仪器、不能调试，以及吸水能力变差等问题，致使管柱检修期徘徊不前。为此，2000 年以来，开展了可洗井管柱的研究、试验与推广，并不断加以完善，相继开发了压差密闭式可洗井封隔器，解决了封隔器阀芯寿命短和洗井压力高、不易解封的问题；研制了偏封一体可洗井封隔器，实现了小卡距细分管柱洗井的问题；不断提高胶筒性能，提高封隔器的耐用程度，形成了耐压高、耐温高、洗井排量大、密封性能好、洗井后密封率高的可洗井分层注水管柱技术，满足了低渗透油田注水开发的需要。

第一节 可洗井分层注水管柱技术

可洗井分层注水管柱主要由压差密闭式可洗井封隔器、偏心配水器、防溢单流阀组成，如图 2-1 所示。

一、压差密闭式可洗井封隔器

（一）结构及工作原理

该封隔器采用扩张式胶筒，坐封阀和解封阀完全分开，坐封和解封互不干扰的双体阀结构，具有压差坐封、密闭密封、反洗

解封的特点。如图 2-2 所示。注水时，高压水通过坐封阀的单流阀进入胶筒密闭压力腔，只进不出，使胶筒膨胀坐封。反洗井时，从油套环空加压，当套压达到一定值后，泄压杆打开密闭压力腔，封隔器解封，进而在封隔器外部形成洗井通道。

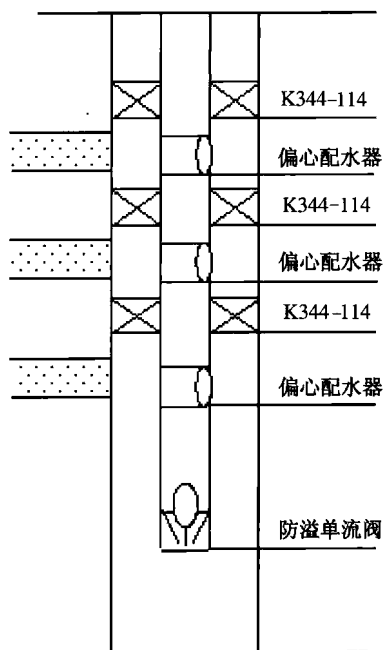


图 2-1 可洗井分层注水管柱

(二) 隔离式解封阀

针对解封压力和洗井压力过高的问题，采用隔离式解封阀，结构如图 2-3、图 2-4 所示，阀杆的下端面与胶筒内腔压力隔离，使胶筒内腔压力作用于阀杆的径向方向，消除胶筒内腔压力对解封压力的影响，使解封压力恒定（2.8MPa），并控制在规定范围内，解决了解封压力和洗井压力过高的问题，如图 2-5 所示。