

中国石油勘探与生产公司专业技术系列培训教材

水平井压裂酸化改造技术

中国石油勘探与生产公司 编



石油工业出版社

水平井压裂酸化改造技术

中国石油勘探与生产公司 编



石油工业出版社

内 容 提 要

本书简要介绍了水平井增产改造技术需求、水平井增产改造技术发展历程、水平井分段压裂酸化改造技术展望,重点介绍水平井完井技术、水平井分段压裂优化设计方法、水平井双封单卡分段压裂技术、水平井封隔器滑套分段压裂技术、水平井水力喷砂分段压裂技术、水平井裸眼封隔器滑套分段压裂技术、水平井化学暂堵胶塞与快钻桥塞分段压裂技术、水平井均匀酸化酸压技术、水平井水力压裂裂缝监测技术等内容。

本书适合从事油气井压裂酸化改造的技术人员、科研人员、管理人员和院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水平井压裂酸化改造技术/中国石油勘探与生产公司编.
北京:石油工业出版社,2011. 10
ISBN 978 - 7 - 5021 - 8689 - 0

I. 水…

II. 中…

III. 水平井 - 油层酸化 - 酸化压裂 - 研究

IV. ①TE243 ②TE357. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 190375 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)64523562 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

2011 年 10 月第 1 版 2011 年 10 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本:1/16 印张:12

字数:293 千字

定价:80.00 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

近年来,中国石油每年新增储量中有 70% 以上属于低渗透储量,单井平均产量持续下降,多井低产问题日益严重,影响了公司效益和可持续发展。为了进一步转变发展方式,高效开采众多的低渗透储量,扭转多井低产严峻形势,借鉴国外水平井在低渗透油气藏特别是非常规油气藏成功应用的经验,水平井作为油气开发的革命性技术,可以成为提高低渗透油气藏单井产量的重要手段。但水平井分段压裂改造是世界级难题,也是制约水平井在众多低渗透油气藏规模应用的技术瓶颈。为了攻克水平井低渗透改造的关键技术,扩大水平井在低渗透储层应用规模,勘探与生产分公司组织中国石油勘探开发研究院、中国石油勘探开发研究院廊坊分院、大庆油田有限责任公司、长庆油田分公司、吉林油田分公司联合攻关,依托水平井规模推广应用工程,坚持集体攻关,实行定期检查,推进现场规模试验,取得了较大的技术突破,形成了包括水平井封隔器双封单压、水平井滑套分压、水平井水力喷砂分段压裂及水平井裸眼封隔器分段压裂等多项可推广应用的成熟技术,推进现场规模试验并见到了明显的增产改造效果。实践证明,水平井低渗透改造重大技术攻关是扭转低渗透油气藏多井低产、转变增长方式、实现少井高产的重要抓手。

储层改造技术特别是水平井分段压裂技术作为稳定和提高单井产量的关键技术,是油气开发的杀手铜技术,也是油公司核心竞争力的重要表现,是上游业务转变发展方式、落实稳定并提高单井产量“牛鼻子”工程的关键手段。“十二五”期间,勘探开发的对象仍然以低渗透油气藏为主,面临非常规油气藏勘探开发难题,尽管公司近年来储层改造技术取得了长足的进步,但是与国外先进水平相比仍有较大的差距,我们需要积极面对现实,转变观念,密切跟踪国外压裂技术的发展,持续攻关,以提高小层动用程度和体积改造为目标,全力推进储层改造技术上台阶,推动体积压裂技术在低渗透油气藏勘探开发中的规模应用,以进攻的姿态确保提高单井产量“牛鼻子”工程的全面实现,为上游业务持续增储上产,为建设

综合性国际能源公司作出更大的贡献!

本书立足于实用性和指导性,重点突出水平井分段改造的技术原理、工艺设计和典型实例。书中文字简练、叙述清楚、图片丰富、实例典型,为从事油气藏改造的工程技术人员提供了一本很好的工具书,必将为提高广大工程技术人员的技术业务水平起到积极的促进作用。

A handwritten signature in black ink, followed by the date '19/6-11'.

前 言

目前,中国石油新增探明储量中大部分为低渗透储量,动用难度大,开发效益差,多井低产形势严峻。面对多井低产的现实,中国石油天然气集团公司党组和中国石油天然气股份有限公司(简称股份公司)管理层提出了“转变发展方式”的战略,大力推动水平井的规模应用。为了攻克水平井在低渗透储层规模应用的瓶颈技术,股份公司于2006年设立了“水平井低渗透改造重大攻关项目”,组织中国石油勘探开发研究院、中国石油勘探开发研究院廊坊分院、大庆油田有限责任公司、长庆油田分公司、吉林油田分公司进行联合攻关,在水平井分段压裂酸化理论、分段压裂工艺、配套工具技术等方面开展了较为系统的攻关研究。通过4年多的持续攻关和现场规模试验,形成了包括水平井分段改造主体工艺技术、配套技术和优化设计方法的系列成果,申请专利74项,形成了中国石油水平井分段改造配套技术,在大庆油田、吉林油田、长庆油田等低渗透油气藏水平井分段改造现场规模推广应用近700口井,压后单井日产量为直井产量的3倍以上,获得显著经济效益和社会效益,有效推动了水平井在低渗透油气田的工业化应用。

在系统总结项目攻关成果基础上,勘探与生产公司组织项目攻关有关人员编写了本培训教材。本教材主要介绍了水平井完井技术、水平井分段压裂优化设计方法、水平井双封单卡分段压裂技术、水平井封隔器滑套分段压裂技术、水平井水力喷砂分段压裂技术、水平井裸眼封隔器滑套分段压裂技术、水平井化学暂堵胶塞与快钻桥塞分段压裂技术、水平井均匀酸化酸压技术和水平井水力压裂裂缝监测技术。第一章由王晓泉编写,第二章由云海涛、熊涛、毛庆波编写,第三章由王欣、鄢雪梅、翁定为、郑伟、刘宇编写,第四章由王凤山、王文军、李清忠、唐鹏飞、李琳、张洪涛、刘兆权编写,第五章由刘长宇、张应安、叶勤友、李边生、余国锋、林海霞、周学平编写,第六章由王振铎、赵振峰、杨振周、卜向前、郑伟、庞鹏、杨立君编写,第七章由赵振峰、赵文、杨立君、李红英、叶勤友编写,第八章由邱晓惠、赵振峰、崔明月、张燕明、崔伟香、刘崇江编写,第九章由杨贤友、杨立君、康燕、来轩昂、

许国文、石阳编写,第十章由杨振周、王振铎、郑伟、严玉忠编写。全书由王晓泉、王振铎、杨振周、郑伟统稿。

本书反映了目前国内水平井分段改造技术攻关的最新进展,限于编者水平有限,书中难免有疏漏与不足,敬请读者提出宝贵意见。

本书编写组

2011 年 6 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 水平井增产改造技术需求	(1)
第二节 水平井增产改造技术发展历程	(2)
第三节 水平井分段压裂酸化改造技术展望	(7)
第二章 水平井完井技术	(9)
第一节 水平井固井射孔完井技术	(9)
第二节 管外封隔器完井工艺	(14)
第三章 水平井分段压裂优化设计方法	(17)
第一节 水平井水力裂缝形态	(17)
第二节 水平井水力裂缝优化方法	(18)
第三节 弹性开采条件下水力裂缝优化	(21)
第四节 水平井注采井网条件下水力裂缝优化	(33)
第五节 水力压裂施工参数优化	(38)
第四章 水平井双封单卡分段压裂技术	(43)
第一节 双封单卡分段压裂技术原理与适应性	(43)
第二节 水平井双封单卡分段压裂工艺设计	(46)
第三节 应用实例	(48)
第五章 水平井封隔器滑套分段压裂技术	(57)
第一节 封隔器滑套分段压裂技术原理与适应性	(57)
第二节 封隔器滑套分段压裂工艺设计	(62)
第三节 应用实例	(65)
第六章 水平井水力喷砂分段压裂技术	(73)
第一节 水力喷砂分段压裂技术原理与适应性	(73)
第二节 水平井水力喷砂分段压裂工艺设计	(76)
第三节 应用实例	(84)
第七章 水平井裸眼封隔器滑套分段压裂技术	(91)
第一节 裸眼封隔器滑套分段压裂技术的原理与适应性	(91)
第二节 水平井裸眼封隔器滑套分段压裂工艺设计	(93)
第三节 应用实例	(97)
第八章 水平井化学暂堵胶塞与快钻桥塞分段压裂技术	(103)
第一节 化学暂堵胶塞分段压裂技术	(103)
第二节 水力泵入式快钻桥塞分段压裂技术	(111)
第九章 水平井均匀酸化酸压技术	(121)
第一节 机械封隔器分段酸化酸压技术	(121)

第二节 连续油管拖动酸化技术 (127)

第三节 化学转向酸化酸压技术 (132)

第十章 水平井水力压裂裂缝监测技术 (156)

第一节 水力裂缝测斜仪测试技术 (156)

第二节 井下微地震测试技术 (162)

第三节 其他测试技术 (166)

第四节 水力裂缝测试方法适应性 (170)

参考文献 (176)

第一章 绪 论

国内外低渗透油气藏开采实践表明,低渗透储层由于渗透率低、渗流阻力大、连通性差,不经过压裂酸化改造很难达到工业开采价值。但直井即使经过压裂酸化改造,单井产量依然很低,开发效益差。水平井具有泄油面积大、压降小、产能高的优势,不仅可以动用直井无法经济开发的油气藏,而且可以降低综合开发成本。随着钻井技术进步和钻井成本的不断降低,水平井技术得到了更广泛的应用,同时,水平井应用的油气藏类型越来越多,并逐步在低渗透油气藏得到规模应用,从而有利于转变多井低产的开发方式。

第一节 水平井增产改造技术需求

近 10 年来,中国石油平均单井日产量由 4.5t 降低到 2.5t 左右,油井总数由 7.5 万口增加到近 16 万口,新钻产能井总数逐年增多,单井平均产量持续下降,多井低产问题日益严重,影响公司效益和可持续发展。近年来,中国石油每年新增储量中有 70% 以上属于低渗透储量,以 2009 年为例,年动用低渗透储量占年度总动用储量的 70%,低渗透油气藏新投产油水井数占年度总油水井数的 70%,低渗透油气藏新建产能占年度总产能的 55%。特别是大庆外围、长庆和吉林三大油田为国内典型的低渗透油田,年钻直井数量达到 7000 口以上,且单井产量更低。国内低渗透储层开发特点是:新增探明储量中低渗透比例越来越高,开发钻井数持续增加,多井低产形势严峻。

为了进一步转变发展方式,经济有效开采众多的低渗透储量,扭转多井低产严峻形势,借鉴国外水平井在低渗透油气藏特别是非常规油气藏成功应用的经验,水平井作为油气开发的革命性技术,可以成为提高低渗透油气藏单井产量的重要手段,因此,必须推进水平井在低渗透油气藏的规模应用和效益开发,使其成为转变开发方式的有效手段。面对多井低产的现实,中国石油天然气集团公司(简称集团公司)党组和中国石油天然气股份有限公司(简称股份公司)管理层提出了转变发展方式的战略,大力推动水平井的规模应用。2006—2009 年中国石油累计新钻水平井 2800 多口,在数量上取得了较大的突破,开发的油藏类型主要是辽河、新疆、冀东等稠油和中高渗油气藏,低渗透油气藏水平井比例逐年提高,水平井技术为中国石油转变发展方式注入了新的活力。

低渗透油气藏的水平井,不经过压裂酸化改造产量很低或无自然产能,难以达到工业开采价值。水平井在国内用于开发低渗透油田早有尝试,但效果普遍不好,在低渗透储层难以推广,导致水平井数量很少,究其原因就是分段压裂的关键技术未获突破,因此,水平井分段压裂改造是提高水平井在低渗透储层应用效果的技术关键。但水平井分段改造技术以前没有系统研究过,技术发展相对滞后,存在问题多,研究难度大,是世界级难题,也是制约水平井在低渗透储层应用的技术瓶颈^[1~3]。突出表现在水平井储层改造理论研究相对薄弱,水平井压裂水力裂缝优化设计方法不系统,水平井分段压裂工艺技术和井下封隔工具的系列与配套方面与国外差距大,在一定程度上制约了水平井在低渗透储层中的应用效果。

第二节 水平井增产改造技术发展历程

一、国外水平井储层改造技术发展现状

水平井钻井的历史可以追溯到 19 世纪末期。据记载,第一口水平油井于 1929 年钻在得克萨斯州,另一口钻于 1944 年,在宾西法尼亚州 Venango 县 Franklin 油田,井深 500ft。20 世纪 50 年代以前,水平井基本上都是通过坑道钻成的,只有少部分井是在垂直井的基础上钻成的。20 世纪 70 年代后期,原油价格的上涨,驱使世界上许多石油公司非常关注水平井技术,使得在 20 世纪 80 年代水平井钻井技术进入一个新的发展时期,进入 20 世纪 90 年代以来,世界水平井钻井技术以更快的速度推广和普及,逐年呈上升趋势,水平井钻完井总数几乎呈指数增长,成为提高油田勘探开发综合效益的重要途径,水平井应用范围也不断扩大,且进入工业化应用阶段。到 1989 年,全世界共钻水平井仅 200 口,水平井还不是一项十分受欢迎的技术,石油工业界只是在别无选择的时候才会钻水平井;到 1990 年,水平井总数激增到 1200 口,其中大多数在美国,接近 1000 口;到 1996 年 6 月,全世界已钻水平井 15000 口;2000 年底的水平井数超过了 24000 口;2005 年底水平井突破了 40000 口;2008 年水平井突破了 50000 口;2010 年底,全世界水平井的总数突破了 60000 口。现在世界上已有 69 个国家在各种类型的油气藏中钻过水平井,主要分布在美国、加拿大、俄罗斯等 20 多个国家,其中美国和加拿大占 88% 左右^[4~8]。

1. 国外水平井改造技术发展

近年来,以美国为代表的水平井越来越多地应用于低渗透油气藏,特别是页岩气藏水平井的规模应用,核心技术就是水平井分段改造关键技术的突破和大规模应用。在美国的页岩气储层中,Barnett 页岩的开发历史最为悠久,产量占全美页岩气产量的 70% 以上,储层改造技术的研究与应用发展历程最具代表性。就水平井改造技术而言,国外 2002 年前采用多级封隔器、桥塞、限流、喷射等压裂方式进行试验,没有形成水平井开发的主体技术^[7~39,40~46]。2007 年以后针对页岩气、致密气等非常规天然气地质特点逐步发展形成了快钻桥塞分段压裂、裸眼封隔器分段压裂等水平井压裂主体技术。截至 2009 年^[47],Barnett 页岩气井总数量已达 13740 口,其中 2009 年新钻井 3694 口,水平井完井超过了 95%,水平井及水平井分段改造技术已经成为页岩气开发的关键技术。

美国 Barnett 页岩储层改造技术对寻找最佳的储层改造技术方式进行了长达 20 多年的探索,近 4 年基本成型。从 Barnett 页岩核心区完井方式的发展情况看,水平井大面积应用的时间为 2004—2006 年,水平井占绝对主导地位的时间从 2007 年开始。2007 年是美国水平井分段改造技术的快速发展及大面积应用的重要时间节点。其技术的突破与应用对其他区域的页岩气的快速发展起到了积极的推动作用,如 Marcellus、Woodford、Fayetteville、Haynesville 等区域的页岩气在大量借鉴 Barnett 页岩开发经验的基础上,一般经过 3 年探索就迅速地进入大面积应用阶段,Eagle ford 则在 2009 年以来的页岩气与致密油领域应用水平井改造技术取得显著效果,技术指标不断提升^[60]。2007—2009 年,以美国为典型代表的北美地区大力发展非常规天然气,特别是水平井开发页岩气技术日益普遍和成熟。2009 年美国针对页岩气钻井 8000 多口,其中水平井 7500 口,页岩气产量达到 $878 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2009 年底共有 35000 口井投产,其中水平井 14000 口,平均单井日产 13000 m^3 ;直井 21000 口,单井日产 2600 m^3 。美国非常规天

然气产量 $3089 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中页岩气 $878 \times 10^8 \text{ m}^3$, 致密气 $1672 \times 10^8 \text{ m}^3$, 煤层气 $517 \times 10^8 \text{ m}^3$, 非常规天然气的产量占到总产量的 52%, 也是在美国历史上第一次超过了常规天然气产量。系统总结美国 Barnett 页岩气的改造技术发展历程, 一般可以分为以下 4 个阶段^[47~50]。

(1) 第 1 阶段: 1997 年之前, 大多采用直井大规模水力压裂 (MHF) 技术。

1981 年, 国外某公司进行第一口氮气泡沫压裂, 1985 年进行 22 口直井常规压裂; 1986 年以来开始采用以氮气助排的大型压裂技术, 大多使用羟丙基瓜尔胶压裂液, 压裂液 1900 m^3 左右, 20/40 目支撑剂 44 ~ 680t, 施工排量大于 $6 \text{ m}^3/\text{min}$ 。1990 年以来, 所有 Barnett 页岩气井都采用大型压裂技术, 典型井产量 $(1.55 \sim 1.94) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; 1992 年进行第一口水平井压裂。

(2) 第 2 阶段: 1997—2001 年, 以大规模滑溜水压裂为主。

1997 年, 第一次水压裂, 用水大于 6000 m^3 , 支撑剂用量大于 100 m^3 , 施工成本降低 25%; 1998 年, 大规模采用水压裂和重复压裂, 滑溜水压裂比大型冻胶压裂效果好, 产量一般增加 25%, 达到 $3.54 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

(3) 第 3 阶段: 2002—2006 年, 水平井分段压裂技术开始试验。

2002 年以来, 开始尝试水平井压裂 (水平段长 450 ~ 1500m), 水平井产量一般是垂直井的 3 倍多。2004 年, 水平井分段改造和滑溜水压裂技术得到快速普及, 水平井多段滑溜水压裂获得的效果更好, 产量可达到 $6.37 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 2005 年, 开始试验两井同步压裂技术, 或者是交叉式压裂技术 (zipper fracturing, 又称拉链式压裂)^[51,52]。这种称为“工厂化”作业模式的压裂大大降低了作业成本, 推动了水平井分段压裂技术的大面积应用。

(4) 第 4 阶段: 2007 年以来, 水平井套管完井及分段压裂技术逐渐成为主体技术模式。

随着水平井分段压裂和“工厂化”作业见到显著效果, 2007 年成为水平井为主导大面积应用的起点。2008 年北美超过 80% 的水平井采用套管完井技术, 2009 年有超过 95% 的井采用水平井完井, 且水平井水平段长度越来越长, 分段数越来越多。

2. 国外水平井改造技术关键

国外针对低渗透水平井压裂改造关键技术主要包括水平井岩石力学特性与水力裂缝形态、水平井油藏工程、水平井分段压裂优化设计及实施工艺技术。于 20 世纪 80 年代开始攻关研究, 在水平井压裂改造基础及配套技术研究方面, 地应力状态 (三向应力大小关系、地应力方位与垂向剖面) 与水力裂缝形态的关系、水平井分段压裂多段裂缝分布模式和优化设计技术、水平井水力裂缝诊断技术等方面取得较大进展; 在分段压裂施工工艺技术方面, 比较成熟的技术有贝克休斯公司的 Frac - Point™ 封隔器系统和 PSI 系统 (多级封隔器), 菲利普斯公司的 MSAF 多级酸化压裂工具、液体胶塞 - 填砂压裂技术、连续油管 SSCD (永久性滑套环装置)、PPES (Packers Plus Energy Services, 多层压裂和完井服务技术), 斯伦贝谢公司的 Stage FRAC™ 增产系统, 哈里伯顿公司的水力喷射压裂技术等。在下述几个方面取得重要进展:

(1) 在水力裂缝的起裂、延伸方面, 认识到就地应力方位与水平井方位的位置关系、固井质量、射孔方案对水平井多裂缝起裂和延伸有较大影响;

(2) 在水平井压裂油藏工程与生产动态预测研究方面, 认识到地层的垂向渗透率与水平渗透率之比对于水平井的生产动态以及水平井增产改造的方式影响较大, 水平井改造应以分段改造为主, 并应优化水力裂缝的条数和裂缝几何尺寸;

(3) 形成水平井水平井分段压裂工艺技术与配套的井下工具 (水力喷射工具、机械桥塞、裸眼封隔器、复合桥塞) 等。

一般而言, 国外页岩气水平井分段压裂技术是水平井复合桥塞分段多簇压裂 + 大型滑溜

水+实时监测技术,排量一般在 $10\text{m}^3/\text{min}$ 以上,压裂液采用低摩阻滑溜水,每段液量一般在 $1000\sim 1500\text{m}^3$,每段支撑剂量一般 $100\sim 200\text{t}$,以40/70目支撑剂为主,平均砂比3%~5%。致密气开发有两种模式,除了采取直井多层压裂技术以尽可能动用所有目的层外,水平井多段压裂一般采用水平井裸眼封隔器滑套分段压裂技术和水平井水力喷射分段压裂技术。

二、国内水平井储层改造技术发展

我国是世界上第三个钻水平井的国家,1965年在四川用常规技术打出的国内第一口水平井——磨3井为我们赢得了荣誉。“八五”“九五”期间,中国石油在塔里木油田创造了塔中4、哈得4等水平井整体开发的成功范例,在新疆石西油田打的8口水平井与50口直井产量相当,取得了显著的经济效益。特别是近年来,水平井钻井技术日益受到重视,在多个油田得以迅速发展,水平井应用的油气藏类型多种多样,有低压低渗透砂岩油气藏、稠油油藏、碳酸盐岩油气藏、火山岩油气藏等多种类型,特别是水平井在低渗透油气藏应用比例逐步提高,“十五”期间水平井在低渗透油气藏应用累计不超过40口井,2006年股份公司专门设立“水平井低渗透改造重大攻关项目”后,由于水平井分段改造技术的突破,促进了水平井在低渗透油气藏的规模应用。“十一五”期间在低渗透油气藏累计应用水平井近700口,平均每年130口井以上,极大地促进了长庆、大庆外围、吉林和西南等低渗透油气田水平井开发的积极性,促进了股份公司低渗透储量的有效开发和规模建产。因此,国内水平井的较大面积应用的起始时间是2006年,2010年是国内水平井分段改造配套技术形成与完善的重要时间节点。国内水平井储层改造大体可以分为两个阶段。

1. 探索试验阶段:20世纪90年代至2005年

国内20世纪90年代初发展起来的填砂(胶塞)分段压裂技术,采用油管先压裂第一段,之后用液体胶塞和砂子隔离已压裂井段,重复上述工序依次压开所需改造的井段,施工结束后冲砂和冲胶塞合层排液求产。该方法使用的液体胶塞浓度高,对所隔离的层段伤害大,施工工序繁杂,作业周期长,综合成本高,没有得到进一步推广应用。

大庆油田将直井限流压裂技术移植于水平井压裂改造实践中,通过严格控制目的层的射孔数量和孔径大小,以尽可能高的排量进行施工,利用最先被压开层段吸收压裂液时产生出炮眼摩阻提高井底压力,迫使压裂液分流,从而连续压开破裂压力相近的其他层段,达到一次加砂同时处理几个以至十几个层段的目的。该技术方法需要清楚认识各水平段间的地应力差异,改造针对性相对较差,无法均匀改造整个水平段。

截至2005年底,国内进行了少数零星井的水平井解堵酸化和填砂分段压裂等试验,受技术条件和经济效益制约,没有得到规模应用和推广。国内水平井压裂基础理论既不系统也不深入,现场应用井数少,未形成主体技术体系,主要表现在以下几个方面。

(1)水平井应用基础理论研究相对薄弱。国内对多裂缝水平井的渗流机理、渗透率各向异性对产量的影响、水平井适用界限以及含水力裂缝的水平井网优化等未进行系统的研究。

(2)水平井水力裂缝优化设计方法不系统。水平井压裂后各裂缝的流态为线性流和径向流并存的复杂流态,裂缝条数的优化非常重要,它不仅影响水平井的产能,同时也影响压裂施工的安全性和最终经济效益,目前水力裂缝条数优化多借鉴国外经验。

(3)水平井分段改造手段缺乏。一方面是目前国内水平井多以筛管方式完井,分段压裂难度大,分段压裂手段缺乏。分段压裂机械封隔困难,水力喷砂分压技术无需封隔工具,施工安全性高,但水力喷砂工具受制于国外公司,施工经验少,国内缺乏该技术手段。另一方面,套

管完井对水平井分段压裂井下工具要求高,目前虽然在套管完井的水平井上试验了多种分段压裂措施,基本都存在不完善、不配套等问题,如液体胶塞+填砂分段压裂对使用的胶塞浓度及用量要求高,现场施工工序繁杂,操作难度大,作业周期长,破胶不彻底,综合伤害严重。

(4)工作液体系不能满足增产改造要求。水平井压裂:①滤失面积大,滤失系数高;②施工时间长,压裂液伤害大;③砂进孔眼方式发生改变,需要高携砂能力。鉴于此,需要研制低摩阻、高携砂能力、低伤害的工作液体系。

(5)诊断评估手段有限。小型测试压裂、压裂后压力恢复试井、井温测井等在直井上常用的诊断评估手段,难以在水平井中得到应用,使水平井压裂后裂缝形态评估难度大,需要研究或引进新的水力裂缝诊断技术。

2. 集中攻关突破阶段:2006—2010 年

2006 年以来,为了在占 70% 的低渗储层中推动水平井规模应用,大幅度减少直井的数量,水平井水平段改造是必须攻克的一大难题。然而,水平井水平段分段压裂改造是世界级难题,为了攻克水平井在低渗透储层应用的瓶颈技术,保证原油产量的持续增长,促进股份公司更好地开发众多的低渗透储量。股份公司在 2006 年专门设立了“水平井低渗透改造重大攻关项目”,部署用 3~5 年的时间研究攻关水平井低渗透改造重大技术,这是股份公司管理层正确判断和科学决策的体现,是解决低渗透储层开发的重大战略举措,意义深远。

勘探与生产分公司根据蒋洁敏总经理的批示和胡文瑞、赵政璋两任副总裁的精心部署,在计划、预算(财务)、科技等部门的大力支持下,精心组织“两院三公司”(勘探院、廊坊分院、大庆、长庆、吉林)联合攻关,依托水平井规模推广应用工程,针对制约水平井在低渗储层应用的技术瓶颈,研究水平井油藏工程以解决水平井布井难题,研究就地应力场以解决水力裂缝起裂及形态问题,研究水平段分段压裂优化设计以解决多段裂缝设置问题,研究分段压裂工艺和工具以解决水平井分段压裂的实施问题,研究裂缝监测以解决多段裂缝评估问题,上述五个环节密切相连,环环相扣^[40~46]。

项目自 2006 年 8 月启动以来,始终坚持集体攻关,实行定期检查,推进现场规模试验,通过 4 年多的持续攻关和现场规模试验,成功研发了水平井改造三大主体工艺技术(双封单卡分段压裂技术、封隔器滑套分段压裂技术和水力喷砂分段压裂技术)、四项配套技术(化学暂堵胶塞分段改造技术、碳酸盐岩储层自转向高效酸化/酸压技术、水力裂缝监测与评价技术、水平井修井作业技术)和一套优化设计方法(压裂裂缝与井网优化设计方法),申请专利 74 项,其中发明专利 29 项,实用新型专利 45 项,形成了中国石油水平井改造配套技术,有效推动了水平井在低渗油气田的工业化应用。

1) 自主研发形成了三套水平井分段改造主体技术

(1)水平井双封单压技术。创新研发的双封单卡分段压裂工艺管柱具有通过能力强、改造针对性强、施工效率高、安全可靠的特点,耐温、承压指标达到 100℃、80MPa,一趟管柱最多压裂 15 段,单趟管柱加砂规模突破 160m³,最大卡距达 112m,可满足大庆油田低渗透储层水平井增产改造的需要。

(2)水平井滑套分压技术。自主研发的滑套分压工艺管柱耐温 150℃,耐压差 70MPa,施工全过程液压动作,对各层段改造针对性强,不受卡距限制,一趟管柱可以实现套管内 3~5 段的分段压裂施工,能够满足浅、中、深水平井中短射孔段针对性压裂改造。

(3)水平井水力喷砂分压技术。在消化、吸收的基础上研发了水力喷砂分段压裂管柱及

配套工具。在理论与实验的基础上研究形成了油田水力喷砂与小直径封隔器联作拖动压裂工艺,实现了井控条件下多段压裂改造,一趟管柱拖动可分压3~4段;气井不动管柱多级滑套水力喷砂分段压裂工艺,一趟管柱不动可分压7~10段,缩短了施工周期,提高了施工效率。

2) 研究并完善了四项水平井改造配套技术

(1) 化学暂堵胶塞分段压裂技术。针对部分老井单段压裂需求,自主研发了20~100℃可控成胶、可控破胶的化学暂堵胶塞系列配方并形成了液体胶塞分段改造技术。

(2) 自转向高效酸化/酸压技术。针对碳酸盐岩储层,研发了适合40~150℃储层的系列自转向酸液体系,并形成了自转向高效酸化/酸压技术,作为分段改造的重要补充技术手段。

(3) 水力裂缝监测与评价技术。引进消化再创新建立了水力裂缝监测与解释的综合方法,为水平井分段压裂设计及工艺改进和压后效果评估提供了重要的方法与手段。

(4) 水平井修井作业技术。研发出水平井连续冲砂、解卡打捞、钻磨铣工具装置,形成了配套修井冲砂工艺,为解决水平井改造砂埋井筒、管柱卡阻、落鱼打捞等问题提供了技术手段。

3) 建立了一套水平井优化设计方法

水平井压裂裂缝及井网优化设计方法:通过深化低渗透油藏水平井开采及压裂基础理论深入研究,研制了产能评价和井网自动优化设计软件,提出了适合不同储层类型的井网、缝网形式,形成了水平井多段压裂裂缝优化设计方法和设计图版,改变了以往借用直井压裂设计方法来进行水平井压裂设计的迫不得已的办法,可以优化水平井压裂优化设计的关键参数,提升了水平井分段压裂优化设计的针对性,并成功应用于大庆、吉林和长庆等油田500多口水平井分段压裂设计,压裂后效果明显,目前水平井设计符合率可以达到90%以上。

4) 现场规模应用效果显著

上述技术4年来在大庆油田、吉林油田、长庆油田等低渗透油气藏水平井分段改造现场规模推广应用近600口井,其中双封单压、滑套分压、水力喷砂分压、裸眼封隔器分压等主体分段压裂工艺技术试验接近500口井,压裂后单井日产量为直井产量的3倍以上,增产效果显著。如大庆油田外围葡萄花薄互储层规模应用水平井分段压裂技术,平均单井增加动用储量 1.6×10^4 t,使直井开发无效和低效的近 2100×10^4 t低渗透难采储量得以有效动用。长庆苏里格气田规模应用水平井分段压裂技术,平均单井产量 7.8×10^4 m³/d,是周围直井的5倍以上,效益显著。据不完全统计,近几年通过规模应用水平井及分段改造技术,相当于少打直井8000多口,节省土地资源上万亩,有利于油田生产管理,提高了油气开发增产效益,有利于大庆油田外围、长庆油田、吉林油田、西南油气田等低渗透油气田应用水平井开发理念的转变,提高了油田应用水平井的积极性,有利于转变多井低产的开发方式。

5) 推广应用前景广阔

水平井分段改造技术系列成果突破了低渗透油气藏水平井储层改造的瓶颈技术,总体水平较高,达到国际先进水平,其中不动管柱多级滑套水力喷砂分段压裂技术属国际领先(2010年集团公司成果鉴定语)。如水力喷砂分压技术在油井上一趟管柱拖动可分压3~4段,在气井上一趟管柱不动可分压7~10段;双封单卡分压技术一趟管柱在一口井上最多实现了分压15段,一天实施了分压8段,而且国产工具成本只有国外技术集团整体引进价格的1/5,价格优势明显,适宜大规模工业化推广应用。例如将水平井双封单卡分段压裂技术推广到大庆油田、长庆油田、吉林油田、华北油田、吐哈油田、玉门油田等低渗透油藏规模应用,将水平井水力喷砂分段压裂技术推广到长庆油田、华北油田、吐哈油田、辽河油田等低渗透油气藏规模应用,

将裸眼封隔器分段压裂技术推广到长庆油田、西南油气田、新疆油田、塔里木油田等低渗透气藏规模应用,进一步提高低渗透油气藏单井产量和开发效益,确保提高单井产量“牛鼻子”工程的全面实现。

水平井分段改造技术的进一步完善及推广应用,不仅将促进水平井在低渗透储层中的规模应用,而且部分技术也可用于非常规油气藏的勘探开发,是扭转低渗透油气藏多井低产、转变发展方式、实现少井高产的重要抓手,必将有利于中国石油众多低渗透储量的规模应用和效益开发,对于保障国家能源安全具有重要战略意义。

第三节 水平井分段压裂酸化改造技术展望

中国石油在过去的十几年里,常规油气藏压裂酸化技术取得了长足的进步,与国外水平已比较接近;特别是近几年来集中攻关和现场试验,初步形成了直井分层压裂和水平井分段压裂的配套技术。但随着勘探开发对象越来越复杂,对提高单井产量技术要求更高,特别是近几年北美非常规气藏开发技术发展迅速,我国起步缓慢,我国与国外在非常规气藏开发领域的技术水平差距拉大,主要是设计理念、工具、工艺、装备差距较大,尤其是页岩气开发技术目前我国基本是空白。

美国非常规天然气成功开发的关键在于技术进步,长井段水平井大规模多段压裂技术的突破促进了美国非常规气的快速发展。综观国内外水平井储层增产改造技术,其发展的总趋势是水平井分段数越来越多,分压效率越来越高,千立方米支撑剂万立方米压裂液非常普遍,因此,水平井分段压裂改造及相应的配套技术突出表现在一个“多”字上,即水平井多段压裂技术将是今后发展的重点,主要发展趋势^[60~66]如下。

(1)设计理念注重“改造”油气藏。国外已经从简单的单井单层压裂逐步发展到多层多段“改造”油气藏,直井压裂立足多层全部动用,水平井采用长井段多段压裂,使裂缝最大化接触油气藏,以期获得最大泄油能力,从而尽可能提高单井产量。其基础是深刻认识油气藏特征,挑战了我们传统分段裂缝优化设计的理念,“分段多簇”射孔实施应力干扰是实现体积改造的重要手段。

(2)水平井分压段数越来越多。国外工具可分压10段以上,水平井裸眼封隔器加滑套分段压裂斯伦贝谢公司已成功实现18段分压;水平井复合桥塞分段压裂工具理论上没有级数限制,广泛应用于页岩气水平井大型分段压裂,加砂量已突破1000t,压裂液量突破20000m³。据文献介绍,Eagle ford页岩气改造技术一般是5½in套管完井,水平段一般是1372~2134m,大多分10~24段压裂,每段使用2067m³滑溜水,175t支撑剂,其单井施工规模和分压段数水平之高,难以想象。

(3)水平井分压效率越来越高。国外多专业合作、交叉作业是提高作业效率的通行做法,一个丛式井井场在不同井上进行起下管柱作业、压前准备、射孔作业、压裂施工等多工种同时作业,以节省作业等待时间,这需要空前规模的多专业合作。同时,国外现场特大规模压裂作业的必备装备是连续混配设备、连续输砂设备及连续油管作业机,为保证特大规模压裂作业连续、快速施工创造了条件。

(4)水平井分压实时监测实时优化。国外具备完整的水平井压裂水力裂缝实时监测、数据传输与远程控制系统,区块压裂初期一般都是采用井下微地震和测斜仪实时监测裂缝扩展,监测和解释多在现场同时进行,可以实时了解裂缝延伸状况,实时根据情况调整优化设计,及

时指导施工,并可实现远程控制。

(5) 低成本战略是体积改造实现有效开发的关键。北美地区页岩气开发技术进步和市场竞争促使钻井与储层改造费用逐年下降,目前开发成熟区的 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 产能建设投资约折合人民币 $(2.5 \sim 3) \times 10^8$ 元,美国 Barnett 页岩气开发水平井单井费用 $(250 \sim 350) \times 10^4$ 美元,其中钻井、压裂各占总建井费用的 40% 左右,两者占总成本的 80% 左右,也正是成本的有效控制,才保证了美国页岩气的有效开发。国外页岩气压裂由于规模大,对压裂液及滑溜水体系的性能要求也是立足低成本、低摩阻、高携砂能力、低伤害。

(6) “工厂化”作业为体积改造提供了高效运行模式。丛式井组、多井交叉作业,不仅有利于利用缝间干扰实施改变缝间应力状况,促使裂缝转向以产生复杂缝网,而且有利于减少设备动迁,大幅度提高了作业效率,降低了钻井和储层改造时间和费用。

因此,“十二五”期间,随着中国石油油气勘探进入新的储量增长高峰期,原油产量稳中有升,天然气产量快速增长,储层改造技术作为稳定和提高单井产量的关键技术,必将继续发挥重要作用。但中国石油勘探开发的对象仍然以低渗透油气藏为主,面临非常规油气藏勘探开发难题,储量有效动用及开发的难度不断加大,储层改造技术不断面临新的挑战。我们必须面对现实,积极实现理念创新,加速技术进步,持续努力攻关,跟上全球页岩气革命的步伐,尽快形成具有自主知识产权的工具系列,提高水平井分段压裂、直井多层压裂技术水平,全力推动低渗透油气藏压裂技术上台阶,尽快缩小和国外的差距,为不断开创油气勘探开发新局面,实现“低效”储量的有效动用,建设综合性国际能源公司作出新的、更大的贡献。