

Advancement in Stimulation Technologies for Low Permeability Reservoirs
The 2005 International Seminar on Reservoir Stimulation Technologies

低渗透油气藏增产技术新进展

——2005年国际油气藏增产改造学术研讨会论文集

张士诚 主编



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

低渗透油气藏增产技术新进展

——2005年国际油气藏增产改造学术研讨会论文集

张士诚 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书根据2005年中国石油大学(北京)与石油学会联合主办的国际油气藏增产改造学术研讨会有关论文编写而成。内容包括:水力压裂工艺及配套技术、压裂酸化应用材料与工艺技术、酸化与酸压工艺及配套技术以及其他增产工艺及相关研究。

本书可供油气井增产技术相关技术人员、管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

低渗透油气藏增产技术新进展:2005年国际油气藏增产改造学术研讨会论文集/张士诚主编. —北京:石油工业出版社,2006.11

ISBN 7-5021-5754-9

I. 低…

II. 张…

III. 低渗透油层-采收率(油气开采),提高-国际学术会议-文集

IV. TE357-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第117016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.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

2006年11月第1版 2006年11月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:29.5

字数:450千字 印数:1—1000册

定价:78.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责退换)

版权所有,翻印必究

前 言

中国低渗透油气资源十分丰富,但是由于低渗透油气藏储集层物性差,非均质性严重,导致开发难度大,经济效益差。到目前为止,陆上已开发地质储量中低渗透油气储量仅占17.5%,在已探明未动用储量中低渗透储量占60.8%。近年来,新增的油气储量中,低渗透储量的比例更大,以中国石油天然气股份有限公司为例,2001年探明的油气储量中低渗、特低渗透占到69%。低渗透油气藏的开发主要改造目的有三种:(1)以提高单井产量为目的的压裂改造技术(开发压裂、重复压裂、大型压裂等);(2)以有效补充地层能量为目的的注水技术(超前注水、周期性注水、增注分注等);(3)以降低成本为目的的采油技术(小井眼技术、简易采油技术等)。近年来,中国在低渗透油气藏渗流机理研究、开采新工艺和新技术等方面都取得了很大的进展,但同时也存在一定的问题,为了给科研院所和油田企业技术人员建立一个学术和技术交流平台,2005年11月由中国石油学会和中国石油大学(北京)共同发起并组织了“2005年国际油气藏增产改造学术研讨会”。

本次研讨会共收到论文数篇,与会代表分别来自中国石油天然气股份有限公司(亦称中国石油)、中国石油化工股份有限公司(亦称中国石化)、中海石油(中国)有限公司、美国岩心有限公司等20多个油田单位和中国石油勘探开发科学研究院、廊坊分院和石油化工科学研究院,以及中国科技大学、中国石油大学(北京)、上海交通大学、西南石油大学、西安石油大学等10多家高等院校和研究单位。会上有7篇论文进行了大会交流,43篇论文进行分会交流,论文内容涵盖了当前压裂、酸化理论和机理、工作液体系与评价、优化设计方法、实验分析方法、施工监测和评价以及相关配套工艺技术等方面的最新研究和应用成果。经过专家评审筛选收集了其中60余篇论文出版成集,以期能给更多的研究人员提供更好的交流和学习材料。

论文集旨在展示研究人员在各自领域的最新研究成果,总结取得的经验,探讨解决制约低渗透油气藏开采的技术瓶颈问题。总结中国低渗透油气藏开采经验,在水力压裂工艺及配套技术方面,主要取得了以下六个方面的新进展:首先,在复杂岩性储集层压裂改造技术方面取得了长足的进步,复杂岩性储集层施工成功率和效果明显提高,逐步形成了以大庆和辽河油田为代表的火山岩储集层压裂技术、以海拉尔盆地和华北束鹿凹陷为代表的泥灰岩储集层压裂技术、以塔里木盆地为代表的高温高压深层碳酸盐岩储集层加砂压裂技术以及煤层气压裂等配套工艺技术;二是在特殊油气藏压裂方面,工艺技术日益成熟配套,逐步适应了裂缝性致密气藏压裂、凝析气藏压裂和稠油油藏压裂增产的需要;三是在特低渗油层压裂开发方面,形成了以地应力场研究、井网和裂缝参数优化、裂缝高度控制、强制闭合等技术为核心的矩形井网整体压裂开发技术,提出了适应复杂断块油藏的不规则井网优化新方法;四是在重复压裂机理

研究和实践中,提出了新的选井选层方法和裂缝转向机理分析方法,开展了堵老缝压新缝、定方位射孔控制裂缝延伸等技术试验;五是压裂液和支撑剂方面,以降低伤害、提高施工成功率和有效率为目标,研究应用了多种低伤害水基压裂液、乳化压裂液、清洁压裂液、酸性交联二氧化碳泡沫压裂液,还在长庆油田进行了纯二氧化碳压裂试验;为满足不同地层要求,研究了超高温压裂液(170℃)、超低温快速破胶压裂液(30℃)和超深井加重压裂液;以提高裂缝长期导流能力为目标,开展了支撑剂组合导流能力评价实验,应用了纤维压后防吐砂技术;六是在裂缝诊断与监测方面,广泛普及了小型压裂测试分析方法,应用井底压力计和套管压力监测裂缝延伸压力,在长庆、大庆等油田引进应用了地面倾斜仪、井下微地震监测、零污染示踪剂监测等最新监测方法。

在酸压、酸化技术方面,经过多年的发展,逐步建立了适合不同反应模式的酸岩反应动力学理论及数学模型,开发了各种酸液体系,形成了酸压酸化配套工艺技术。首先是酸岩反应机理研究,在灰岩、白云岩储集层的酸岩反应实验,高温酸岩、深度酸液体系、有机酸等酸岩反应动力学实验研究等方面有很大的进展。通过对多级注入闭合酸化裂缝导流能力实验研究表明,将酸压技术与闭合裂缝酸化技术进行有效组合,可大幅度提高闭合裂缝的有效导流能力。二是酸压工艺配套技术方面,形成了粘性指进前置液酸压、胶凝酸酸压、泡沫酸酸压、多级注入酸压等多种工艺技术。针对不同岩石物性发展形成了以闭合酸化工艺和平衡酸压工艺为代表的特殊酸化技术,以及以“多级注入酸深度酸压+闭合裂缝酸化”技术为代表的新型酸压、酸化技术。三是酸压酸化设计及实时监测评估,形成了多级注入闭合酸压设计、“两酸三矿物”砂岩基质酸化设计、基质酸化现场实施监测评估、基质酸化优化设计专家系统等多种二维及三维酸压设计软件,提高了设计的针对性和科学性。

当前,中国油气藏类型复杂多样,具有世界级开发难度的油气田很多,特别是“十五”以来,随着油气勘探开发的不断深入,压裂、酸化改造的油气藏越来越复杂,特低渗透储集层、高温超深储集层、复杂岩性储集层、缝洞和裂隙储集层、高含水老油田等复杂油气藏及水平井、大位移井等复杂结构井,酸化、压裂改造技术难度越来越大,压裂酸化理论和技术的发展与应用仍然存在许多需要攻克的理论和技术难题,主要表现如下:

在压裂技术方面:一是对于复杂岩性储集层裂缝的起裂和延伸机理的认识还不够深入,处理措施缺乏理论上定量评价和指导,应加强与岩性特点相关的室内破裂机理研究,建立理论模型,指导和完善复杂岩性储集层压裂技术;二是非达西渗流和复杂裂缝条件下的压裂开发理论和裂缝参数优化问题还没有解决;三是目前测试压裂和压裂施工过程中的压力分析已受到重视,但是压后的压力分析定量评价开展的不够深入,还需要加强这方面研究与应用;四是复杂结构井的完井和压裂工艺,还没有大的突破,需要加强水平井、分枝井完井和分段压裂改造技术研究力度;五是在重复压裂技术方面,尤其是气层重复压裂,还要不断深化认识,加大试验力度,加强现场监测,形成实用的重复压裂选井选层、设计和施工方法;六是在压裂材料方面,各

种低伤害压裂液的应用井数还较少,支撑剂的质量性能还不够稳定,需要扩大新型低伤害压裂液的应用力度,不断降低成本,开展清水压裂和低密度支撑剂的研究与应用。在酸压及酸化技术方面,一是目前的酸压设计软件大多数是建立在经典酸压理论的基础上,其适应性和应用程度还未达到水力压裂设计软件的水平,很多研究需要依靠分形几何学作为手段来实现质的飞跃,在目前经典酸岩反应理论及酸压优化设计软件的整体进展将较为困难,但局部的完善改进是能够实现的;二是对存在天然裂缝下的酸压裂缝扩展和滤失模型研究不够,要应用于实际现场还有很大差距,需要加大力度攻关;三是闭合裂缝酸化理论模型及设计软件还有待深入研究。

论文集对上述进展都有深入的阐述,同时也充分体现了“百花齐放、百家争鸣”的原则,收集了不同的学术观点和研究心得。

论文集的出版得到了我的恩师王鸿勋教授的悉心指导,在此向恩师表示衷心的感谢。在论文的编排和整理过程中得到了中国石油大学(北京)压裂研究室研究生赵晓、张帅仟、王雷、甘云雁、温庆志等同学的大力协助,在此一并表示感谢。

Handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '王', '鸿', '勋'.

2006年3月

目 录

王鸿勋教授在 2005 年国际油气藏增产改造学术研讨会上的发言 (1)

水力压裂工艺及配套技术

低渗透油气藏水力压裂中存在的若干问题及对策

..... 雷 群 丁云宏 汪永利 蒋廷学(7)

大庆火山岩储气层压裂诊断方法与控制技术 张永平 刘 合(23)

胜利油田难采低渗透储集层改造技术及应用

..... 唐汝众 卢建明 马 收 黄 侠 宋长久 马利成(35)

中国复杂油气藏压裂酸化改造的难点和技术对策 赵金洲(42)

大庆深部火山岩储集层压裂改造技术难点及对策

..... 张玉广 冯程滨 王贤君 张永平 谢朝阳 刘 斌(52)

重复压裂机理与技术 康红兵(59)

重复压裂裂缝转向实现机理研究进展 刘广峰 何顺利 田树宝 王建国(65)

重复压裂理论与应用 胡永全 赵金洲 唐海军 陶良军(71)

水力压裂技术在包 14 块的研究与应用 张子明(76)

薄层多层压裂的多裂缝模拟 罗天雨 赵金洲 郭建春(81)

考虑启动压力梯度的整体压裂数值模拟研究 温庆志 张士诚 马新仿 张玉广(89)

迪那异常高压深层气藏压裂破裂压力研究 邓 燕 郭建春 赵金洲 卢 聪(99)

裂缝井作用边界椭圆的确定

..... 甘云雁 张士诚 陈 利 苗 宏 范青玉 张帅仟(105)

含有水层的油井压裂出水可能性分析 赵 晓 李怀文 马洪芬(112)

辽河油田火山岩油藏压裂技术研究与应用 刘 伟 张子明(117)

降低压裂破裂压力措施分析

..... 赵金洲 胡永全 曾庆坤 石步乾 黄青松 陶良军(124)

气井重复压裂工艺技术研究与应用 刘 林 林 辉 林永茂(130)

实现快速排液的纤维增强压裂工艺现场应用研究

..... 张绍彬 谭明文 张朝举 王明贵(139)

特低渗透油藏矩形井网大规模压裂适应性研究

..... 王伯军 张士诚 李 莉 温玉焕(144)

新站油田重复压裂技术的研究与应用

..... 李 阳 于永波 姚 飞 丁云宏 翁定为 尹喜永(150)

运用现代数学理论和计算机智能技术优选压裂井层 吴建发 赵金洲 郭建春(157)

裂缝性特殊岩性储集层水力压裂技术研究与应用

..... 蒋廷学 汪永利 丁云宏 舒玉华 王 欣 才 博 周焕顺(163)

多裂缝测试压裂在火山岩储气层大型压裂施工中的应用	冯程滨	张永平(176)
具有微裂缝低渗透储集层重复压裂造缝机理分析	李培超 宋振云	吴增智(183)
大庆低渗透油层整体开发压裂技术	王文军 于英	张青条(193)
清洁压裂液压裂工艺在七个油田浅层系的应用	郭子义 杨春燕	张文斌(200)
碳酸盐岩储集层水力压裂技术初探	邢庆河	庄照锋(208)

压裂酸化应用材料及工艺技术

伤害压裂液技术研究及应用

.....	李曙光 王玉斌 张天翔 何园 马万正	祖帕尔(215)
VES—SL 压裂液研究	李爱山 马利成 杨彪 杨同玉	鞠玉芹(224)
CJ2-3 新型低分子可回收压裂液体系的开发	管保山 李静群 赵振峰 汪义发 何治武 杜彪	周焕顺(231)
不同类型支撑剂组合导流能力实验研究	王雷 张士诚	温庆志(239)
特低渗透储集层低浓度聚合物压裂液的研究与应用	裴晓晗 王贤君 肖丹凤 王兆跃 洪怡春	张志翔(245)
低残渣水基压裂液技术进展	庄照锋 张士诚 张廷福 葛海宗	陈光杰(253)
复杂岩性储集层酸蚀/加砂裂缝导流能力系统实验研究	付永强 赵金洲 郭建春	何进(259)
低压低渗透气藏新型压裂液研究	赖南君 叶仲斌 贾天泽 施雷庭 彭杨	杨建军(267)
考虑介质变形和长期导流能力的裂缝性气藏压裂产能模拟研究	李勇明 赵金洲 郭建春	(273)
凝胶泡沫压裂液的研制及评价	景艳 张士诚	(279)
强水敏含凝灰质储集层交联乳化压裂液研究与应用	谢朝阳 张浩 韩松 唐鹏飞	张凤娟(284)
深层致密气藏 170℃ 高温压裂液的研究与应用	王贤君 张玉广 韩松 张浩	张凤娟(288)
应用于煤储集层的新型氮气泡沫压裂液	孙晗森 冯三利 贺承祖	冯文光(293)
压裂气井支撑剂回流及临界产量的确定	郭建春 李天才 赵金洲	宋军正(299)
压裂水平井产能电模拟实验研究	曲占庆 张琪 赵梅 高海红	许霞(303)
新型自生热升压类泡沫压裂液研制	任山 王世泽 张绍彬	叶仲彬(309)
酸性交联剂的研制与开发	钟安武	杨晓鹏(317)

酸化、酸压工艺及配套技术

暂堵实现选择性堵水和酸化一体化技术研究与应用

.....	王雷 赵立强 林涛	刘平礼(325)
-------	-----------	----------

A Novel Deep Penetration Acid Fracturing Technique for High Temperature Carbonate Reservoirs	Liu Pingli	Zhao Liqiang	Liu Xiangdong	Tao Huitong	(331)				
多氢酸酸化技术在渤海湾油田的成功应用	郭文英	赵立强	刘平礼	刘义刚	(344)				
酸压中的酸液动态滤失实验方法研究	陈朝刚	郭建春	赵海洋	涂兴万	(350)				
塔里木油田轮古奥陶系碳酸盐储集层改造技术研究与应用	付道明	袁学芳	樊文生		(358)				
温控变粘酸体系研究与应用	何君	周福建	刘玉章	张福祥	彭建新	熊春明	杨贤友	钱春江	(373)
高含硫气藏酸化中的控硫控铁新方法	陈红军	郭建春	赵金洲	李勇明	(380)				
川东北地区罗家寨气田大斜度井水平井储集层改造技术探讨	曾汇川	余明清	乐宏		(387)				

其他增产技术及相关研究

塔河油田水锥探讨	蒋振	姜昊罡	康红兵	吴波	(393)				
HPMA 的绿色合成工艺及阻垢性能研究	杨晓鹏	钟安武			(403)				
疏松砂岩气藏防细粉砂技术研究与应用	周福建	宗贻平	刘玉章	杨贤友	熊春明	孙凌云	汪君臣	李江涛	(407)
低渗气藏伤害的微观机制研究	丛连铸	周焕顺	许敏	管保山	姬振宁	(413)			
铬凝胶深度调剖技术与应用	袁新强	陈金凤	刘小波		(420)				
东辛油田注水井解堵措施等级权衡综合评判技术	陈德春	张仲平	王庆		(425)				
中国能源经济阶段性失调的系统分析	丁运年				(430)				
聚合物驱的新措施	张劲	张国良	张士诚		(434)				
井眼周围平面应力场分析	张永平	张雄	陈学勇		(442)				
涩北气田新型防细粉砂技术研究	周福建	宗贻平	刘玉章	杨贤友	熊春明	孙凌云	汪君臣	李江涛	(448)
缝洞性碳酸盐岩储集层三重介质单相渗流模型的再认识	陈志海	马新仿	郎兆新		(454)				

王鸿勋教授在 2005 年国际油气藏增产 改造学术研讨会上的发言

几天之前开幕式时我曾说,从会议日程看,这次会将是一次高水平的会议,这几天听了与会代表的报告,使我更加确信我们国家的水力压裂技术不仅在多方面已经与国际水平齐头并进,并且在某些方面已经超过了国际先进水平。让我们做一个对比,从会议报告中可见,在火山岩、凝灰岩、泥灰岩以及华北油田的复杂岩层压裂中,我们都创造了很好的成绩。比如火山岩地层压裂,从现有文献看,在世界范围内,只有 20 世纪 90 年代末期日本在火山岩压裂开发气藏中取得了成功,而我们大庆油田的火山岩压裂,无论是压裂规模、气藏深度、增加的产量、储量,解决所遇到的问题等各个方面,都大大地超过了日本 20 世纪 90 年代末期所采用的技术,就这一点来说,我们压裂方面的工作已经具有相当高的水平。当然,这不是说我们的工作已经十全十美了,不断出现的新情况、新问题总在等待我们去解决。

我很高兴有机会参加这次会议,确实收获很大,使我了解了油田现场的许多实际情况,好像亲眼看到现场从事压裂工作的同志们付出了多大辛苦,发挥出了巨大的聪明才智,才换来今天的成功,对我们国家的石油工业增产做出了很大贡献。和前几次压裂会议相比,我们的进步很快,在许多方面表现出创新意识。作为老一代的压裂人,我非常高兴,我盼望并且确信下一届压裂工作会议能够出现更多、更好的压裂技术发展的报告。

压裂对增产非常重要,它是一项系统工程,不只是一要解决工艺问题,还要做好一系列的工作,才能保证压裂工作的成功。在这里我顺便说一下,最近美国 SPE 网站上发布了一个消息,2006 年将在中国澳门召开 SPE 压裂专题讨论会,讨论 2010 年水力压裂的各方面问题,现在是 2005 年,就是说这个会议要预测 5 年以后,水力压裂是什么情况。我们也应该考虑水力压裂在这 5 年内要往哪个方向发展,将会碰到些什么问题,主要的解决方法是什么。我希望咱们在座的,油田的或是分院的,有条件的话,争取去澳门参加会议,听一听水力压裂将来在我们开发低渗油气田里将起到多大的作用,这是第一个信息。第二个信息,美国能源部最近发布消息,他们最近要集中力量研究致密气藏的开发,致密气藏的定义就是渗透率小于 0.1mD 的储集层(例如含气页岩的渗透率是 $1 \times 10^{-5}\text{mD}$)。这说明什么呢?说明世界天然气能源已经从那些较好的储集层,从那些渗透率比较高的储集层逐渐降低到 0.1mD 以下了。我们国家的低渗透的标准是 50mD 以下。 50mD 在国外压裂来看,那是比较好的中、高渗透率地层,那就是说,将来我们水力压裂的目的层渗透率逐渐地还要往下降,要降到 0.1mD 以下,要开发渗透率 0.1mD 地层里的天然气,这说明我们需要清洁能源的急迫程度。从这两个信息看,水力压裂的重要性的发展前景就不言而喻了。都会体会到,将来开采层的渗透率越来越低,水力压裂越来越发挥重要作用。所以在座的年轻的同志们,很有机会在这个空间里发挥大家的才能,我希望能看到这一点。

下边我要讲一下大家希望我讲的东西。

我想讲几个问题。第一个问题就是关于裂缝形态。有很多文章都谈到这个问题,火山岩、泥灰岩、凝灰岩还有长庆的几个报告都反映了这个问题。第二个问题,也是在大家的发言里比较集中的、比较感兴趣的,有关重复压裂的问题。第三个问题我想讲一讲关于裂缝型油气田压

裂的问题,会上也有很多文章、报告谈到这个问题。然后再谈谈压裂液滤失问题,今天不能一个一个问题详细地展开探讨,只是提出一点看法,希望大家讨论,如有错请大家批评。

第一个问题,关于裂缝形态。裂缝形态是水力压裂的首要问题。因为不清楚裂缝形态,其他问题都很难解决,比如难以预测产能。美国2002年当年压20000口井,投资30亿美元,压裂结果真正符合压裂设计的只有1/3,其余2/3都不符合,原因是多方面的,其中一个很重要的问题就是裂缝形态不清楚,压裂设计没有基础。当然这个问题不是很容易解决的。也不是说压裂都会碰到这样的问题,只是在比较复杂的特殊情况下才会碰到这个问题。

第二个问题,关于重复压裂。重复压裂不仅要考虑裂缝转向,裂缝转向只是其中的一个重要方面,还有其他比较重要的方面,我提出几个意见。第一个意见,当选择某口井进行重复压裂时,首先要考虑这口井有没有增产的潜能,没有潜能,就不要考虑重复压裂。所以要先解决有无潜能问题,在这口井的很多油层供油范围之内,进行第二次重复压裂以前,先要确定它还有没有增产的可能,然后再考虑重复压裂措施,这个问题非常重要。不要一提重复压裂就去追求裂缝转向,那就会失去了很多机会。同井异层也属于重复压裂,不能把同井异层的情况排除在外。也就是说,我们在一次压裂的时候,无论是采用限流法、投球法,还是什么其他方法,有的油层并没有压开,或者没进去多少砂子,这样的油气层就是重复压裂的对象。也就是说,考虑重复压裂的时候不能把同井异层排除在外,因为这是利用现在的测试手段比较容易做到的事情,因为它涉及不到太多的力学问题。也就是说,它不用什么转向,因此这是当前比较现实的问题。进行水力压裂的第一目的是要拿油,能拿的油都要去拿。我们现在水力压裂的水平能够在比较薄的层中进行压裂,希望不要放弃第一次压裂没有产能、没有贡献的这些井层,它们不一定是坏的地层。而是当前我们重复压裂比较容易拿到手的一个对象。第二个对象,就是第一次压裂不是很成功或者有点失误,加砂不够或者是压裂液条件不太好,对于这样的同井同层也是重复压裂的对象。同井同层的已经压裂过的,一般就采取大排量。大排量的目的,就是让原来在裂缝里的砂子悬浮起来,在书本上的名词就是把缝里边的砂子流床化,大排量进去后把那些没有导流能力的填砂冲散,让它全部悬浮起来,让它流床化以后往里走,然后再按照正规的压裂设计,既然它是有增产的潜能,这种办法同样可以增加产量。第三个问题是转向问题。转向当然应该做,它可以将裂缝引领到一个新地区,但是转向要受到很多应力的制约,比如原来压开的裂缝产生的应力影响、孔隙压力的降低对应力的影响等。不是口口井都可转向,转向以前的应力分布不清楚,即使增产了也说不清楚。当然它也是一个很重要的重复压裂手段。我今天要强调的是,不要一提重复压裂就是转向,那就大大地缩小了我们增产的可能性,缩小了范围。我们的重复压裂,只要出油增产就可以,同井同层也可以,同井异层也可以,转向压裂也可以,这是我对重复压裂的一点看法。

第三个问题就是大会许多报告里都提到的天然裂缝问题。好像天然裂缝与我们的水力压裂有天然的不解之缘。只要是低渗透率地层基本上都有天然裂缝。有人说过这句话,致密油气藏没有不含天然裂缝的,只有裂缝程度上的差别,没有天然裂缝的致密油气藏就没有开采价值。为什么我们现在压裂得到比较高的产量,天然裂缝起到很大的作用,它是一个通道。但是天然裂缝又是一把双刃剑,一方面我们在采油的时候需要利用这些微裂缝,另一个方面,在压裂施工的时候,它又制造了很多麻烦,应该怎么办?我听了大庆对火山岩、凝灰岩所采取的办法,大部分都是采用小颗粒砂子、陶粒这些东西,也有液体的或者乳化的压裂液作为防滤失剂,很好。但是在压裂的时候不要忘记压裂后还要生产,生产的时候需要这些微裂隙。也就是压裂的时候可以暂堵,但是千万不要堵死,堵死了之后产能就大大地打了折扣。因为在主裂缝

往前扩展的时候,压力比较高,这时候和它相交的微裂隙开启,当生产的时候这些微裂隙还要闭合,如果加进去的砂子对微裂隙能够支撑得住,很好,这个微裂隙就是一个通道,但是如果微裂隙在闭合的时候,这些防滤失剂在里面卡死或堵塞那就不好了。所以如何选择防滤失剂(类型,大小,数量)是很重要的。就是注意我们将来还要生产,生产我们还得依靠这些微裂隙,增产是目的。

下面讨论的一些问题就是地层里面的微裂隙、节理、断层、应力差,我们给它们一个共同的名词,就是地质不连续。那么对地质上的不连续怎么考虑?水力裂缝在地层里可能遇到好多地质上的不连续,水力裂缝碰到地质上的不连续怎么办,它是前进、停止、还是拐弯?这是很值得研究的问题。碰到裂缝之后有几种可能情形,一种是穿过去,第二种顺着天然裂缝发展,第三种顺着天然裂缝走不到头又拐弯了,又从天然裂缝破缝而出,这几种情况可能都有。那么什么情况下它停止,什么情况它顺着天然裂缝发育,这就是地应力的分布问题。最重要的是水平应力中最大主应力和最小主应力的应力差,这是最重要的一个参数。第二个参数是水力裂缝与天然裂缝相交的切入角,它是垂直切入进去,还是从一个小角度切入进去,这个切入角很重要。第三个因素就是天然裂缝受正应力以及注入压力的大小,还有一个就是裂缝岩石韧性的问题。水力缝与天然缝或断层相遇后,它基本上受这几个主要参数控制。就是这五个因素在起作用。如果应力差比较大,天然裂缝对面的正应力比较小,切入角比较垂直,接近 90° ,再加上天然裂缝对面的岩石韧性比较脆,这个时候水力裂缝就穿过天然裂缝,好像它不存在一样。但是在相反的情况下,如果应力差比较小,切入角比较小,那么很可能它就进入到天然裂缝里去,使天然裂缝膨胀。膨胀的结果怎么样如果天然裂缝对面的岩石韧性比较低,它就顺着过去,如果天然裂缝中有一点弱点,这一点的岩石韧性差的话,它就出来,它就按照原来水力裂缝的方向过去,所以我们看,在有天然裂缝的地方,要十分注意天然裂缝所在地方的应力场,它本身所受的正应力的方向和正应力分解的剪切应力的方向,这些都左右着水力裂缝和天然裂缝的关系。在不利的情况下,水力裂缝碰到天然裂缝,条件不够它就停在那里,出现憋泵。憋泵不见得是早期砂堵,它力量不够。青海油田的同志说到这个情况,开泵之后不久就憋泵了,憋泵不一定是砂堵。那么在这里就提醒一件事情,就是我们碰到断层的时候,要很好地研究断层的性质,起码研究这个断层是正断层还是逆断层,把这两个不同性质的断层的应力变化情况弄清楚。例如越南河内附近有一个陆相沉积油田,这里面的断裂、断层较多,它是逆断层,是挤压断层,压裂之后发现,在逆断层的地方,油藏埋深2000多米,产生水平裂缝,这就是断层应力造成的。这里我想起一件事,就是我们对于断层包围的小断块的产生,不管是密闭的,还是开启的,首先要研究断层的性质。这个断层的存在肯定影响到周围的应力,它和别的地方的应力不一样。对断层附近的应力分布如果不清楚的话,无论布井、水力压裂都要受到影响,有些事情出乎意料。所以在地层不连续的储集层里,水力压裂碰到的问题很多,使我们要考虑的事情也很多。这里面首先是地应力问题,断层本身和两侧,它和远处就不一样,不能同日而语,不能作为同一个事情来对待,这是关于天然裂缝的问题。天然裂缝对于我们来说是双刃剑,它对开采石油有利的方面,但对水力压裂会带来麻烦。我们对这两个方面要很好的妥善地处理。尽可能发挥它的长处。这是我对会上谈到的很多关于天然裂缝问题的一点看法。

第四个问题,关于水力压裂碰到的压裂液滤失问题。很多报告里提到了这个情况。压裂过程中,压裂液从裂缝里面渗流出去是正常的现象。所有的报告里都用滤失系数来表示滤失的程度,这是对的,准确到多少乘以10的负四次方,这是很科学的。但是有一点我提醒大家注意,我们现在的滤失系数概念是卡特提出来的,叫做卡特滤失系数,卡特滤失系数有没有应用

范围呢？卡特滤失系数适用范围是有一定的，超过这个范围，它就不遵循这个规律了。卡特滤失系数在我们书本上叫一维滤失系数，一维滤失系数只有在裂缝的扩展速度比滤失速度大的情况下是正确的。但是在很多情况下，并不是这样，我们知道，裂缝的扩展一开始很快，后来越来越慢，从三维模型里面看得很清楚，前期很快，哗哗地就出去了，几十米出去了，再往后就慢了，好像缝高的扩展也是这样。也就是说，裂缝的长度扩展速度比滤失速度还大的时候，一维的滤失是准确的。但是在压裂过程里面，并不总是裂缝的扩展速度比滤失速度大。所以后来就产生了径向滤失系数。就是到了它俩不再匹配的时候，滤失是径向地流动，不再是线性流动，叫二维流动，我们称作二维滤失系数。二维滤失系数是在不符合一维滤失系数情况下，采用二维滤失系数的方法。这种方法也很多。但是在会议报告里，我看到的只有一篇文章提到了防砂问题，别的我都没有全部都听到。防砂一般都是高渗透率的，防砂计算中用二维滤失系数都不太适应，也就是说它的滤失太快了，比如裂缝性的，它滤失太快了，裂缝还没来得及扩展，就已经滤失得差不多了。在这种情况下，连二维滤失系数都不行，算出来都不准了，现在用什么办法呢？那就只好采取数值模拟方法，直接把参数代进去，看滤失多少算多少。当然这种情况是比较少一点。那么在裂缝性地层里是双重滤失，既有孔隙滤失，又有裂缝滤失，那又是一个很复杂的问题。因为我听到的很多报告里用的都是卡特滤失系数作为滤失程度，有些时候它是正确的，有些时候它是偏小的。这给我们一个什么印象，就是滤失与我们的裂缝的扩展有密切的关系。所以这都是我们在压裂实践中需要逐渐认识的一个事情，就知道问题产生在什么地方。用卡特一维滤失系数做的压裂设计，可能有时有些欠缺，因此，以后遇到的一些事情就不大好办。

这是我讲的第四个问题，就讲到这儿吧。谢谢大家！

2005年11月
安徽合肥

水力压裂工艺及配套技术

低渗透油气藏水力压裂中存在的若干问题及对策

雷 群¹ 丁云宏¹ 汪永利¹ 蒋廷学^{1,2}

(1. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院;2. 中国科学院渗流流体力学研究所)

摘 要:通过对大量相关文献资料的调研,高度概括了近三年来国内外水力压裂技术的最新发展成果。同时,针对国内水力压裂技术研究与应用中存在的若干典型问题进行了深度剖析,并从技术的前瞻性、针对性与现场可操作性等方面,提出了相应的技术发展思路 and 对策。对国内低渗透油气藏的压裂工作,具有十分重要的借鉴和指导作用。

关键词:低渗透 油气藏 水力压裂 现状 对策

石油与天然气是不可再生资源,随着世界经济的发展,各国对石油天然气的依赖程度加重。而在油气的勘探与开采中,水力压裂技术具有不可缺少的作用。从世界范围看,自水力压裂在 1947 年成为公认的技术开始,到目前为止,估计已累计进行了 160 万井次以上的压裂施工。近代完井总数的 35%~40% 都进行了水力压裂,而美国石油储量的 25%~30% 是通过水力压裂技术达到经济开采条件的。在北美通过水力压裂技术获得了 12.71m³ 的石油储量。

国内压裂技术的起步比国外稍晚些。从 1955 年玉门油田开始压裂,至 2000 年底,通过压裂动用低渗透石油储量 14×10⁸t 以上,累计压裂生产原油 1.6×10⁸t 以上。目前,国内年压裂措施量在 10000 井次以上,年压裂增油量在 560×10⁴t 以上,且每年的探井大部分都进行了水力压裂,在油气产量增长和储量增长方面,水力压裂技术功不可没。

众所周知,水力压裂技术牵涉多学科,如岩石力学、材料力学、化学、流体力学、渗流力学、固液多相流、机械学、电子学及人工智能等。目前,就世界范围来看,已在压裂的优化设计、实施及后评估方面,形成了成熟配套的技术体系,如压前储集层评价技术、选井选层技术、裂缝扩展模拟技术、压裂井油藏动态模拟技术、压裂现场实时监控技术、压裂后返排及投产的优化技术、压裂后配套油藏管理技术、裂缝诊断技术、压裂后效果评估分析技术等。

国内在紧跟国外压裂技术前沿的同时,也根据中国油气藏的特点,又有新的研究与拓展。如在压裂技术系统上,初步形成了油藏整体压裂技术、开发压裂技术、深井超深井压裂技术、大型压裂技术、分层压裂技术、重复压裂技术、CO₂ 泡沫压裂技术、探井低伤害压裂技术、特殊岩性(灰岩、泥灰岩及火山岩等)压裂技术、煤层气压裂技术等。此外,在压裂的单项技术上,也有许多技术创新,如压裂优化设计的新理论与新方法、系统的室内实验评价技术、利用常规资料 and 压裂施工资料对储集层的再认识、缝高的综合控制技术、滤失的综合控制技术、低伤害压裂液体系(如活性水压裂液、线性胶、低稠化剂浓度、低聚合物、缔合压裂液、低分子压裂液等)、压裂多级优化及施工技术(基于裂缝扩展规律和裂缝温度场,强调多变的各施工参数组合)、支撑剂段塞技术(包括携砂液阶段)、压降分析技术(包括强制排液条件下的压降分析)、裂缝诊断技术、支撑剖面优化技术等。

但是,随着国内压裂面临的对象越来越复杂,压裂技术对储集层的适应性需进一步加强研究。特别是近年来,特低渗储集层、裂缝性储集层、特殊岩性储集层(泥灰岩、火成岩、砂砾岩等)、中高含水的老油层以及低渗低气压藏等越来越多,影响了压裂的施工成功率和有效率。另外,复杂结构井,如大斜度井及水平井在低渗透储集层中的应用比例也逐渐增加,对压裂技

术提出了全新的研究课题。

鉴此,本文在国内外大量文献调研的基础上,针对国内油田压裂的实际情况,提出了存在的若干典型问题及解决对策,目的是使水力压裂技术能适应更大的应用领域,并发挥出最大限度的潜力。

一、国外水力压裂技术近期发展综述

通过近三年的文献追踪,目前国外在水力压裂技术上有很大进展。

1. 压裂材料技术

1) 压裂液技术

R. Hanes 研究了低分子压裂液在回收中的质量保证问题;M. samuel 等研制了粘弹性表面活性剂降滤失丸,可有效控制滤失,也并不会对地层造成伤害;Sudhakar 等研究了泡沫压裂液在不同排量下流变性的修正方法,瓜尔胶浓度分别为 $0.127\text{g}/\text{m}^3$ 、 $0.25\text{g}/\text{m}^3$ 、 $0.334\text{g}/\text{m}^3$,泡沫浓度从零增加到 80%;Mukui M sharm 等研究了活性水与其他低粘度压裂液混合使用,并在 Bossier 油田获得了成功的应用;R. Sullivan 等利用化学示踪剂来判断裂缝中每一段的破胶情况,并以此改进了破胶剂追加程序,以达到分段彻底破胶的目的;Matthew Balhoff 等认为,压裂液的非牛顿流体的流变性、粘滞指进和滤失造成的压裂液浓缩效应是压裂液残胶伤害裂缝导流能力的主要原因;Chih - Ying chen 等对裂缝内改变相渗压裂液的相对渗透率曲线进行了实验研究;Jeffrey C. Dawson 等研究了聚合物浓度降低至 $0.125 \sim 0.127\text{g}/\text{m}^3$ 的低稠化剂浓度压裂液的流变性,认为对压裂液的造缝和携砂没有任何不利影响;David D. Cramer 等也研究了低稠化剂浓度压裂液在低温井上的应用。

2) 支撑剂技术

Philip D. Nguyen 等应用树脂包裹支撑剂来防止高温高产井压后支撑剂的回流效应;Chris J. Stephenson 等也研究了低应力(LS)的可变形支撑剂与常规压裂砂混合,在低应力和低温油藏中控制支撑剂的回流效应;Allan R. Rickard 等研究了高强度的超低密度支撑剂(视密度仅 $1.25\text{g}/\text{cm}^3$,在 55.2MPa 闭合应力下渗透率可达 40D 以上)在水力压裂中的应用,此种支撑剂可配合活性水压裂液在适当的低排量下,实现部分单层铺置,研究证明此种铺置方式比多层铺置的导流能力更高,也能携带更远,从而在缝长和导流能力方面,都获得长足进步,缝高也能得到有效的控制,而加砂量也可节约很大的比例。可以说,这种支撑剂如能普及,压裂成本可大幅度降低,必将引起压裂技术的革命性变革;William D. Wood 及 Gary W. Schein 等也同样论证了超低密度支撑剂的优越性,并进行了现场应用。

2. 压前储集层评价技术

Said Benelkadi 等利用小型测试裂缝闭合期间的数据,求取了油藏的渗透率;T. A. Harting 等利用小型的注入试验,确定地层流动系数和地层压力;C. Perez - Rosales 等利用测井的总孔隙度和地层电阻率数据,研究了天然裂缝地层中次生孔隙度的计算方法;I. S. Nashawi 等利用非参数的优化变换技术求取地层的破裂压力;S. D. Mohaghegh 等利用测井资料确定就地应力剖面;R. Chatterjee 等用数值模拟方法研究了井筒周围的应力场。

3. 裂缝诊断技术

Freddy H. Escobar 等研究了封闭地层中有限导流裂缝井的压力特征;Zhengwen zeng 等在室内研究了非对称裂缝的起裂问题;Arnaud Lange 等用双介质离散裂缝网络模拟器研究了断