

中国石油学会
压裂技术
论文集
(2014)

沈琛 主编 ■

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

中国石油学会压裂技术 论文集(2014)

沈 琛 主编

中国石化出版社

图书在版编目(CIP)数据

中国石油学会压裂技术论文集. 2014 / 沈琛主编.
—北京: 中国石化出版社, 2014. 12
ISBN 978-7-5114-3143-1

I. ①中… II. ①沈… III. ①压裂-文集 IV. ①TE357.1-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 309338 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 18 印张 406 千字

2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷

定价: 88.00 元

《中国石油学会压裂技术 论文集(2014)》

编 委 会

主 任：沈 琛

副主任：吴 奇 阎洪涛

成 员：薄启炜 杨能宇 徐文江 廖成锐

曾庆坤 赵崇镇 刘 合 王 林

王 峰 刘光成 柯吕雄 乐 钻

主 编：沈 琛

副主编：吴 奇 阎洪涛

前 言

伴随世界能源工业的快速发展和能源需求的日益增长，越来越多的油气藏投入开发利用，低渗致密砂岩气和页岩气等非常规油气资源也日益成为关注的热点，这些油气藏普遍存在自然产能低、产量递减快、稳产难度大等特点，大多需要进行储层改造，以提高单井产量和稳产有效期，储层改造技术在这类油气藏开发中发挥越来越重要的作用，已成为该类油气藏增储上产和经济有效开发的关键技术之一。

压裂改造技术作为油气田开发的主要手段之一，在“十一五”期间及“十二五”前期，我国三大油公司紧密围绕油气藏压裂改造技术发展需求，在应用基础研究、技术理论创新、新产品研发和现场实施应用等多方面加强了科技攻关和投入力度，取得了一批创新性成果。然而，目前我国低渗油气藏、特殊岩性油气藏、非常规油气藏(煤层气及页岩气等)以及复杂井筒结构井(斜井和水平井)的开发比例逐渐增多，使压裂改造技术面临的储层对象和条件都发生了根本性变化，迫切需要其在机理、工艺设计方法及材料等方面的进一步发展与创新，才能使压裂改造技术不断适应储层条件的变化，并发挥出更大的增储上产作用。但由于我国各油田的主要油气藏类型不同，压裂改造技术研究及应用各有侧重，迫切需要通过相互交流与学习，实现技术和成果的共享，降低重复交叉研究和不必要的人力、物力重复投入。

中国石油学会根据行业需求于2014年5月在成都组织召开了压裂技术研讨会，为国内从事压裂改造技术工作的专家们提供交流和探索的平台。本次会议极大地促进了各油田之间的相互交流，推动了压裂改造技术的进步。为更好地反映近年来国内压裂技术最新研究成果和学术发展动态，将会议收录的43篇技术论文结集出版。该书是一本以理论为基础，紧密结合生产实际，对生产实际具有指导价值的学术文集，可供从事压裂改造技术管理的同志参考。

在本书的编辑出版过程中，得到了中国石油学会石油工程专业委员会采油工作部各位委员的大力支持和指导，得到了中国石油天然气股份有限公司、中国海洋石油总公司等单位的大力支持，中国石化出版社的相关工作人员也为本书的出版付出了艰辛的劳动，在此一并表示感谢。

本书由于时间很紧，水平有限，疏漏和错误之处在所难免，敬请各位专家和读者给予批评指正。

目 录

非放射性示踪陶粒支撑剂的研制及应用	卢云霄 翟恒立 卢书彤(1)
分层压裂改造返排速度的优化	陈培胜(7)
裂缝监测技术在水平井多级分段压裂中的应用	王 磊 郑彬涛 徐 涛 于法珍 李 勇 刘江涛(11)
裸眼水平井多级分段压裂技术在义 123-1 块的研究及应用	李 明(22)
胜利油田致密油压裂完井工具研究进展及下步攻关方向	张 峰 李玉宝 董建国 吕 玮 李 明(30)
水力喷射+封隔器分段压裂在砂砾岩中的应用	赵丹星 于 永 杨 峰 赵会议 郑英杰(35)
水平井管内分段压裂技术研究与应用 ...	吕 玮 张 峰 董建国 刘永顺 卢雅兰(42)
胜利油田新型压裂液体系的研究与应用	陈 凯 仲岩磊 陈 磊 姜阿娜 杨 彪 吕永利(49)
高导流低伤害压裂技术在深层低渗稠油油藏的应用	王丽萍 马 收 张军峰(57)
裸眼水平井水力裂缝起裂-扩展规律研究	马 收(63)
埕岛海上油田东营组油藏压裂工艺技术研究与应用	施明华 杨 松 胡培霞 寸锡宏(70)
压裂模糊诊断技术在川西深层气藏的应用	王兴文 赵崇镇 谭玮(76)
井下微地震裂缝监测技术在塔河碳酸盐岩油藏的应用	米强波 耿宇迪 房好青 胡雅洁 赵 兵(82)
江苏油田低伤害压裂液的研究与应用	张华丽 杲 春(90)
水力喷射分段压裂工艺的研究与应用	沈 飞 虞建业 杲 春 卢敏晖(96)
江汉油田低伤害压裂液研究及现场应用	高 婷 唐 芳(101)
江汉油田水平井分段压裂管柱技术	王大江 赵崇镇(112)
新沟水平井分段压裂优化设计研究	刘 俊 肖 艳 李之帆(119)
水平井泵送复合桥塞分段压裂技术攻关与实践	张国锋(123)
3300HP 长冲程高连杆负荷压裂泵的研制与应用	李 蓉 王庆群 吴汉川(132)
彰武中浅层油藏整体压裂改造技术研究	刘清华 宋宪实 张 冲 张振兴 夏富国(140)
苏家屯地区压裂液体系研究与应用	王娟娟(144)
煤层气井压裂技术	赵崇镇 孙良田 申 强 黄志文(152)
CYS-2 耐高温植物胶压裂液交联剂研制	张大年 赵梦云 张锁兵 刘 松 苏长明(158)
羟丙基瓜胶压裂液替代技术研究进展	赵崇镇 赵梦云 苏建政 张汝生 龙秋莲 张锁兵(163)

一种耐高温弱酸性聚合物压裂液的研制	高媛萍	林蔚然	龙秋莲	张汝生	伊 卓	(167)
液化石油气压裂技术	张汝生	李凤霞	柴国兴	刘长印		(174)
浅层油藏压裂堵水措施影响因素优化研究	杨科峰	马新仿	贺甲元	刘天宇		(178)
一种低伤害合成高分子压裂液体系性能研究	张锁兵	赵梦云	张大年	郑承纲	苏长明	(183)
pH 响应型变黏酸液体系的性能实验研究	林 鑫	张士诚	张汝生	李 萍		(189)
水平井多级脉冲爆炸压裂裂缝延伸及产能评价 ...	孙志宇	刘长印	黄志文	李凤霞		(196)
油页岩原位开采技术现状及展望	孟祥龙	王益维	汪友平	龙秋莲	高媛萍	(201)
“井工厂”开发流程与关键技术	贺甲元	李宗田	杨科峰	杨 鹏		(208)
低伤害聚合物压裂液在高温深层砂砾岩油藏的应用	王宝峰	封卫强	蒋廷学	赵崇镇		(212)
加重醇基压裂液研制及在低渗透油气藏压裂中的应用	曾 毅					(218)
元坝长兴组气藏水平井暂堵转向酸压技术研究与应用	杨廷玉	王兴文	丁 咚	黄禹忠	钟 森	(225)
大庆长垣特高含水期水驱精细压裂挖潜技术的研究与应用	刘 鹏	金显鹏	范立华	周新宇		(230)
新型聚合物压裂液室内研究与现场应用	李玉印					(237)
TAP Lite 压裂工艺在高泥质含量储层改造中的应用 ...	李 凝	余东合	车 航	刘国华		(241)
低渗透油藏老井混合水压裂技术	卜向前	达引朋	庞 鹏	岑学文	雷九龙	(247)
水平井双封单卡重复压裂管柱优化与现场试验	齐 银	常 笃	庞 鹏	达引朋	白晓虎	(256)
煤层气井压裂裂缝导流能力对产能的影响研究	段玉超	计 勇	于继飞	陈 欢		(262)
页岩气井压裂参数对产量递减典型曲线参数影响分析	白玉湖	陈桂华	冯汝勇	徐兵祥	丁芊芊	(272)

化镧、氧化锆等)将其溶于无机酸中,形成无机盐的水溶液。

1.2 示踪剂加入比例优化

(1) 根据测井要求,在 1cm³ 示踪陶粒中含 0.025mg 示踪元素,即可用中子测井或伽马能谱检测到。

(2) 示踪元素的含量在 0.03% 以上才可用室内化学分析法检测出来。

(3) 通过借鉴学习美国岩心公司、卡博公司示踪陶粒产品专利分析发现,示踪剂质量浓度超过 0.15%,特别是超过 0.2% 后,会显著劣化陶粒物理性能。

综合以上三点,优选示踪剂质量浓度为 0.03%~0.15%。

1.3 示踪陶粒支撑剂性能评价

选用 69MPa 铝矾土原料,加入不同量的示踪剂,用马福炉烧制示踪陶粒砂小样,进行实验评价。

1.3.1 理化性能

分别改变氧化铈、氧化镧、氧化锆的加入量,对示踪陶粒物理性能进行测试,结果见表 1。

表 1 三种示踪剂不同加入量对陶粒物理性能的影响

	加入量/%	烧结温度/℃	体积密度/(g/cm ³)	破碎率(69MPa)/%
氧化铈	0	1330	1.75	5.8
	0.03		1.75	5.6
	0.10		1.74	5.7
	0.15		1.74	6.3
氧化镧	0	1330	1.73	5.6
	0.03		1.73	5.4
	0.10		1.72	5.7
	0.15		1.73	6.1
氧化锆	0	1330	1.74	6.1
	0.03		1.76	5.8
	0.10		1.74	6.3
	0.15		1.75	6.6

通过实验发现,三种示踪剂在 0~0.15% 的浓度范围内,没有劣化陶粒物理性能。

1.3.2 安全性能

所采用的示踪剂是经过提纯的氧化铈或氧化锆等(纯度≥99%),只要按一般化学药品的安全标准操作,在生产、运输过程都不存在对人体、环境安全的威胁。

依据 GB6566—2010《建筑材料放射性核素限量》对示踪陶粒进行放射性检测,检测其天然放射性核素镭-226、钍-232、钾-40 的放射性比活度,外照射指数为 1.7(满足指标要求≤2.8)。生产运输、储藏、使用过程中以及压裂返排出来的压裂液,对环境 and 人体健康均无放射性伤害。

1.3.3 示踪性能

1) 试验方法

采用地面模拟压裂裂缝的方法,试验采用了模拟地层试验箱一个,模拟垂直缝模板两

个, 模拟地层石英砂 15m^3 , $0.425\sim 0.85\text{mm}$ 示踪陶粒 1m^3 。测量设备是测井绞车地面系统一套以及中子寿命测井仪器一套。

2) 试验步骤及结果

(1) 第一次测量, 用中子寿命测量实验箱石英砂的长短计数、伽马俘获界面。

(2) 第二次测量, 在箱子中间放入砂层厚 1cm 的示踪陶粒, 模拟地层缝宽为 1cm 的垂直缝, 其他条件保持不变。试验结果见表 2。

表 2 2 次测量的数据对比——示踪陶粒与石英砂的差异

测量项目名称	示踪陶粒	石英砂	二者的差异	相对变化/%
中子寿命近计数	150cps	225cps	-75	-33.3
中子寿命远计数	200cps	310cps	-110	-35.4
中子寿命近俘获截面	9.15u	7.5u	+1.65u	+22
中子寿命远俘获截面	8.55u	7u	+1.55u	+22

3) 试验结论

地层含示踪陶粒时计数率减少并且俘获截面增大, 证实了通过示踪陶粒进行压裂效果检测的可行性。

2 非放射性示踪陶粒支撑剂测井及解释方法

采集完测井数据后, 对测量数据进行处理。通过采用不同的处理程序, 可以计算出所需要的不同参数, 如: τ , Σ 值等, 这些值被输出到不同的物理输出通道。使用这些参数, 可以定性或定量地解释测量结果。

2.1 现场数据采集

(1) 地面设备。包括: 仪器交换处理面板和地面采集控制计算机, 如图 1 所示。

(2) 井下仪器 (43mm , 150°C , 105MPa)。包括: 磁定位短节 (CCL & TempOut)、GR (自然伽马)、热中子探测器、中子发生器 (测速: $2\text{m}/\text{min}$), 如图 2 所示。

2.2 采用 HWPxx 软件来解释所采集数据

数据处理解释分以下七步:

(1) 现场采集数据后期处理, 包括: 输入原始数据、数据滤波、参数显示与确定、输出数据计算。

(2) Sigma 成像显示。包括: 后期热能影响区域、井眼影响区域、地层反应带、统计影响区域。

(3) Sigma 矩阵数据库创建。

(4) 成像显示。

(5) 去除井眼影响因素。

(6) 计算关键参数。包括: 孔隙度 (Φ)、泥质含量 (V_{sh})、地层水矿化度 (Σw)、油气的性质 (Σh)、泥质性质 (Σsh)、岩石骨架 (Σma)

(7) 最终解释效果图。



图 1 地面设备

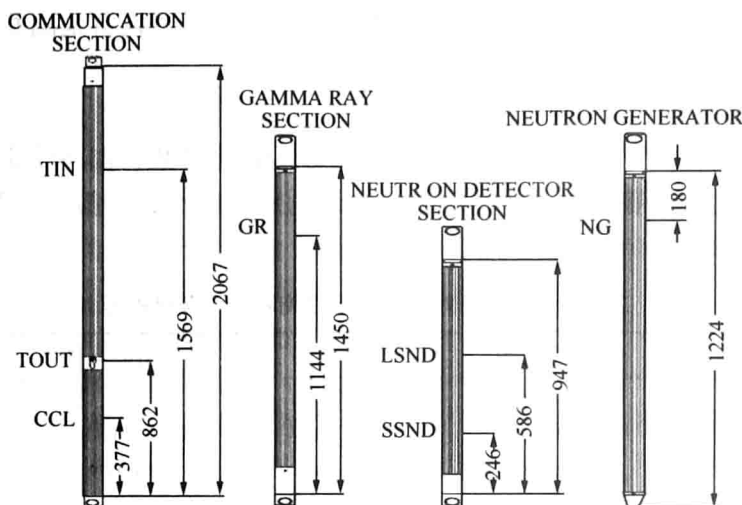


图2 井下仪器

3 现场应用

2012年4~10月,示踪陶粒分别在胜利油田T38-201井和L96井施工试验成功,有效测出了压裂裂缝的支撑高度,并合理分析出了压裂作业情况,优化了压裂设计方案,达到了预期效果。

3.1 T38-201井测井解释及效果(图3)

该井为T38块新投直井,因储层物性差、油稠,拟采取分层压裂防砂工艺,提高近井地带渗透率,提高热采效果。

(1) 压裂设计:对井段762.0~770.0m、775.0~777.2m射孔、压裂。加石英砂 40m^3 ,示踪陶粒 15m^3 。

(2) 微地震模拟缝高:27m。

(3) 测井情况:测井井段:710.0~800.0m。分别进行压前测井和压后测井。

(4) 示踪陶粒测量解释结果:762.0~780.0m井段四条曲线都发生的显著的变化,解释压裂缝高为18m。

3.2 L96井测井解释及效果

(1) 构造位置:东营凹陷郑南斜坡带利96砂砾岩体东南部。本井沙四段钻遇地层厚度559.50m,储集层主要为浊积的砂砾岩体。

(2) 压裂设计:对井段2937.4~2954.4m及2968~2986.9m同时压裂。设计使用普通组合陶粒 83m^3 ,示踪陶粒 21m^3 。

(3) 测井情况:测量井段2880~3050m。分别进行压前测井和压后测井。

(4) 模拟裂缝高度:51m。

(5) 测井解释结果:根据压裂前后解释分析,裂缝高度57m(图4、图5)。

(6) L96井现场施工情况。顶替过程泵压持续上升至限压(75MPa),实际顶替量 12m^3 ,欠顶 3.8m^3 。

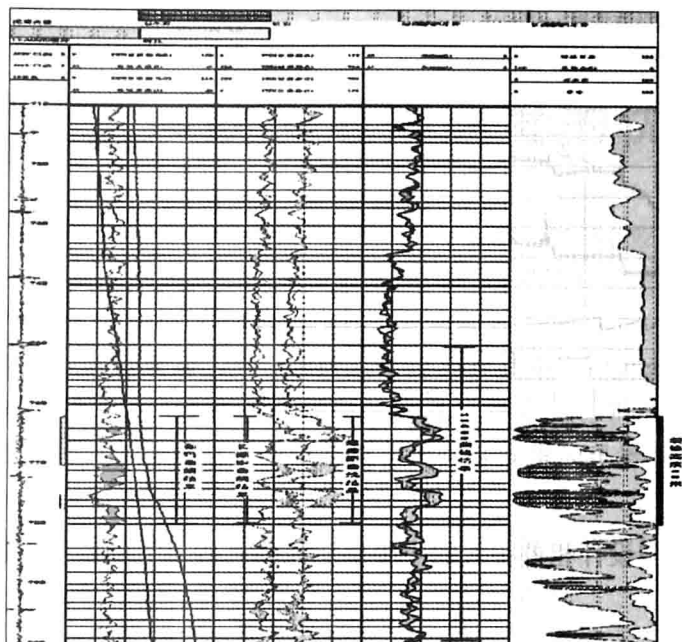


图3 T38-201井示踪陶粒缝高测井解释图

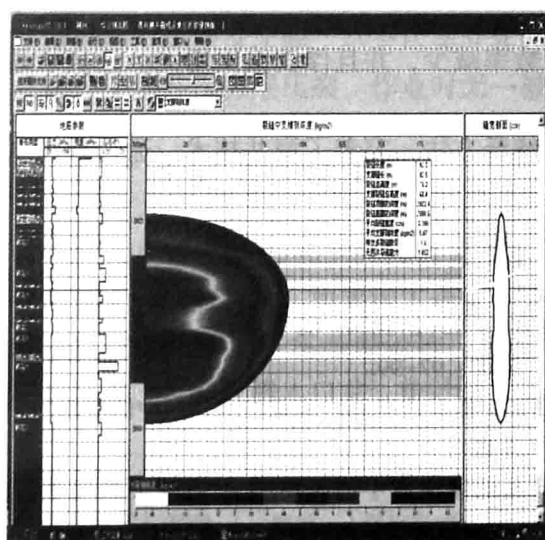


图4 L96井模拟缝高

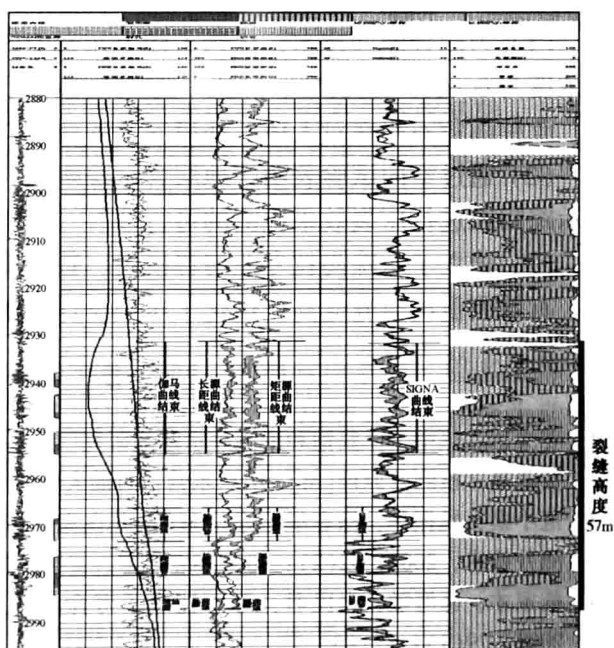


图5 示踪陶粒缝高检测解释图

(7) 压后分析。

本次施工在低砂比段，尤其是 0.425~0.85mm 支撑剂进入地层后，泵压即呈持续上升趋势，显示了造缝不充分或缝宽窄的特征。

在排除了压裂液性能差影响造缝性能的因素后，就本井而言，引起造缝不充分的原因有三个：①地层滤失大；②裂缝延伸形态复杂；③缝高延伸大。

结合测井及施工资料(图6)综合分析，射开层同时起裂造成缝高延伸大、施工排量相对

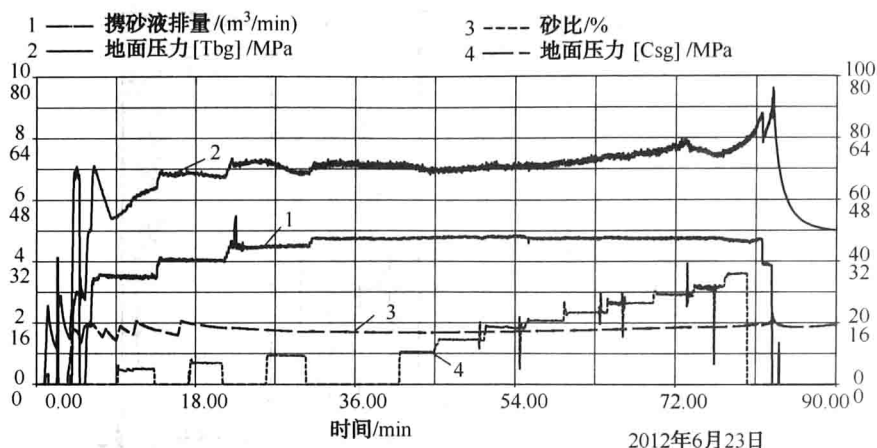


图6 L96井现场压裂施工曲线

偏低是造成本次施工与设计相差很大的主要地层原因；砂砾岩储层裂缝延伸形态相对复杂是次要原因。

4 结论

(1) 为配合测井技术, 优选了稀土元素中的镧、铈系元素做为示踪元素。优选示踪剂质量浓度为0.03%~0.15%。加入示踪剂后陶粒仍维持所需强度、密度, 没有劣化其物理性能。此种陶粒不存在对人体、环境安全的威胁。

(2) 通过室内试验表明, 地层含示踪陶粒时计数率减少, 并且俘获截面增大。证实了通过示踪陶粒进行压裂效果检测的可行性。

(3) 建立了示踪陶粒专业解释模块、数据库及解释方法, 完善了测井技术。通过现场试验, 有效测量出裂缝缝高, 优化了压裂设计方案。

参 考 文 献

- [1] 姜文达. 热中子俘获饱和度测井示踪剂研究[J], 石油学报, 25(2)2004: 80-83.
- [2] 黄隆基. 核测井原理[M]. 山东东营: 石油大学出版社. 2000: 97-99.
- [3] 范小秦, 姚振华, 徐春华, 等. RMT测井在克拉玛依油田中低渗透率砾岩油藏注水开发中的应用[J]. 测井技术, 2008, 32(2): 180-185.
- [4] 戴家才, 郭海敏, 秦民君, 等. 钆中子寿命测井在低孔低渗油藏中的应用[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(1): 81-83.
- [5] 陈业亭, 杨旭东. DSC脉冲中子氧活化测井仪在大庆油田的应用[J]. 石油仪器, 2008, 22(4): 19-20.
- [6] 高印军. 利用并温资料解释裂缝高度[J]. 油气井测试, 2004, 13(4): 45-48.
- [7] 罗宁. 同位素测井在四川油气田的应用[J]. 天然气勘探与开发, 2007, 30(3): 50-53.
- [8] 马兵, 宋汉华, 李转红, 等. 零污染压裂示踪诊断技术在长庆低渗透油田的应用[J], 石油地质与工程, 25(3): 128-130.

分层压裂改造返排速度的优化

陈培胜

(中国石化胜利油田采油工艺研究院)

摘要：在分层压裂结束后，常会出现由于返排速度不合理，返排吐砂引起封隔器“砂卡”导致大修的事故。本文根据调研的情况，结合支撑剂的沉降速度实验和压裂井实际情况，给出了分层压裂井返排速度的计算方法和现场操作方式，取得了较好的效果。

关键词：分层压裂 砂卡 返排速度 优化

前言

分层压裂工艺，由于其一趟管柱多层改造的优点，在低渗透油气田压裂中的应用越来越广泛。但在实际施工中，常会出现作业时砂卡管柱导致大修的事故。针对这一情况，本文分析了近 15 口井的砂卡情况，发现砂卡几率与返排速度的大小有正相关。在此基础上，根据支撑剂的沉降速度实验，结合压裂井实际情况，提出了分层压裂井返排速度计算方法，并以此设计了多井次分层压裂，作业时无一被卡，证明了返排速度计算的有效性。

1 “砂卡”井统计分析

滨 649 和盐 22 块沙三沙四段深度在 2800~3200m 之间，常温常压系统，层多层薄，物性差异大。压裂改造一般采用不动管柱分层压裂，所用封隔器均为压缩式，压裂液为常规胍胶压裂液，压后关井 2h 放喷返排。目前共施工了 43 个井次的两层和三层压裂，有 15 口井解封困难，最终大修 4 口井。统计情况见表 1。

表 1 分层压裂管柱统计

分层	井次	砂量	液量	返排率/%	返排速度/ (m ³ /h)	解封情况	处 理 结 果	大修
两层	6	15~40	150~450	0	0	正常解封		
	14			≤10	≤3	正常解封		
	8			10~40	≥5	正常解封		
	10					砂卡	经活动管柱、反洗井等 8 口解封	2 井次
三层	1	20~70	210~800	≤5	≥8	正常解封		
	4			5~10	≥6	砂卡	经活动管柱、反洗井等 2 口解封	2 井次

注：15 口砂卡井中，有 4 口井经检查确认为：套管变形 1 井次，管柱变形 1 井次，封隔器胶皮损坏 2 井次。

从上表统计处有如下特点:

- (1) 三层砂卡几率远大于三层压裂;
- (2) 返排速度大于 $5\text{m}^3/\text{h}$ 时, 砂卡几率明显增高;
- (3) 层多时, 关井期间易出现层间窜。

2 支撑剂沉降实验

裂缝内支撑剂的运动, 在垂直方向做自由沉降运动, 在水平方向由于受压裂液的滞带作用而运动, 因此可视为沉降作用与压裂液的滞带的合成。不考虑砂浓度和裂缝壁面的影响, 单粒支撑剂在水平方向的速度最终应和压裂液的水平流速一样。垂直方向的沉降速度可以根据公式计算。但公式涉及的参数较多, 计算复杂。针对胜利油田目前施工使用的支撑剂, 主要是 20/40 目支撑剂, 据此做了压裂液不同黏度下的支撑剂沉降实验(表 2、表 3)。

表 2 支撑剂指标

粒径规格/ mm	闭合压力/ MPa	破碎率/ %	体积密度/ (g/cm^3)	球度	圆度	粒径规格内支撑剂 质量所占比例/%	备注
0.425~0.85	69	≤ 7	1.88	≥ 0.8	≥ 0.8	≥ 90	20/40 目

表 3 支撑剂沉降实验

黏度/ $\text{mPa} \cdot \text{s}$	10	8	6	3	1
沉降速度/(cm/s)	0.4	1	4	12	17

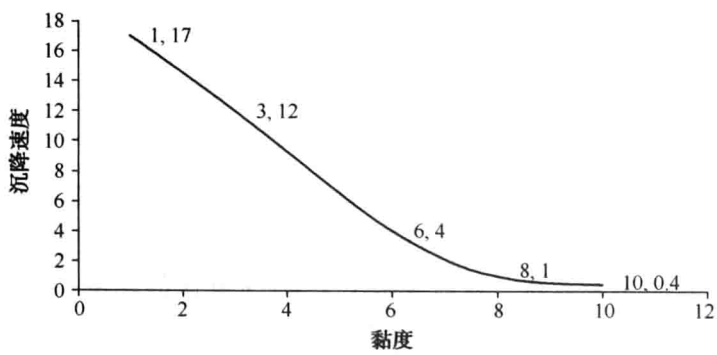


图 1 支撑剂沉降实验

由图 1 看出, 压裂液破胶越彻底, 支撑剂沉降就越快, 返排时受的拖曳力就越小, 地层吐砂的可能性就越小。目前压后关井 2h, 返排液黏度一般分布在 3~8 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

3 沉降与返排速度优化

3.1 模型简化

支撑剂回流涉及到裂缝形态和支撑剂在裂缝中的沉降规律。裂缝形态一般简化为: 裂缝为垂直缝(图 2), GDK 或 PKN 模型, 支撑剂在裂缝内均匀分布等; 支撑剂由于粒径小, 受裂缝壁面

和支撑剂之间相互影响，在裂缝中的沉降视为小雷诺数运动(图 3)，可以通过公式计算出来。

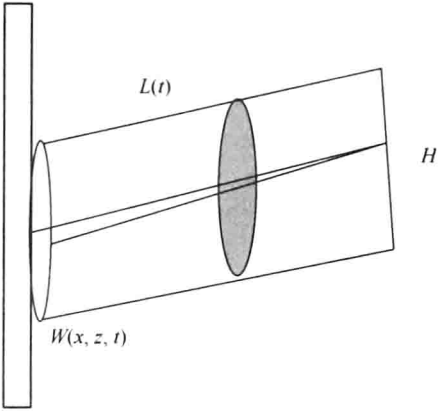


图 2 裂缝模型

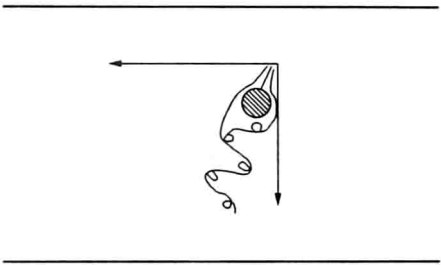


图 3 支撑剂运动模型

上述模型在计算支撑剂返排沉降过程中，公式较复杂。为简化计算，对裂缝模型和支撑剂沉降模型进一步简化如图 4 所示。

简化的裂缝模型认为，压裂液在喷出射孔孔眼时，会冲蚀扩大孔眼，裂缝在射孔孔眼端部启裂。因此，压裂液返排期间的支撑剂的运动，可以简化为在孔眼内的运动。

3.2 孔眼简化

返排液可能从每一个孔眼流出，假设孔眼的作用都一样，这样可以把所有的孔眼进一步简化成一个大的孔眼，如图 5 所示。

假设所有的返排液、支撑剂都从此孔眼中流出，忽略孔壁和支撑剂相互之间的影响，那么支撑剂在此简化孔眼中的流动可简化为返排液的拖曳运动和自身的沉降运动，如图 6 所示。

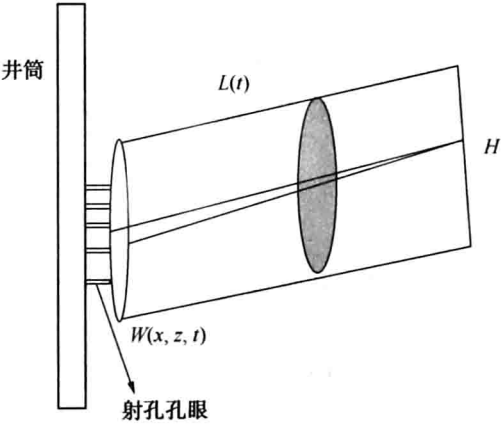


图 4 简化裂缝模型

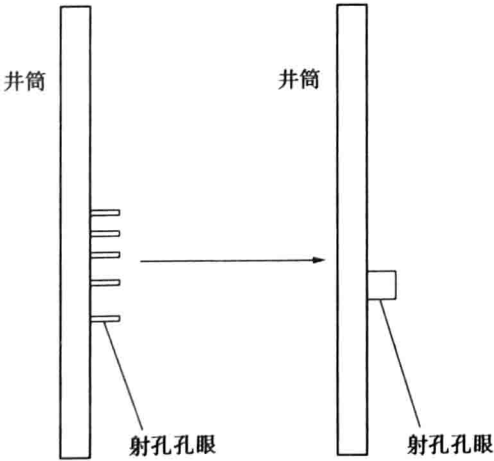


图 5 简化孔眼

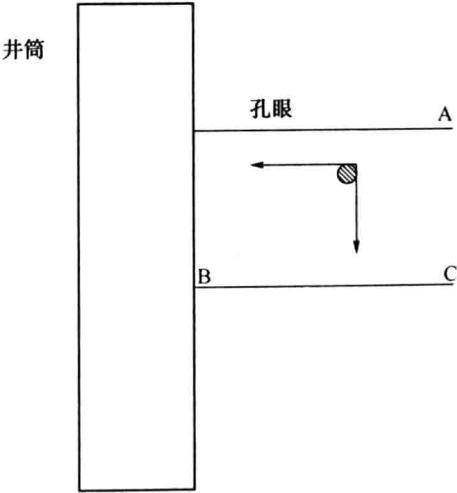


图 6 支撑剂运动