

压裂酸化新技术 与污染控制

▣ 温庆志 罗明良 编著

中国石油大学出版社

责任编辑：郜云飞

封面设计：赵志勇

压裂酸化新技术 与污染控制

ISBN 978-7-5636-2328-0



9 787563 623280 >

定价：36.00元

压裂酸化新技术 与污染控制

温庆志 罗明良 编著

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

压裂酸化新技术与污染控制/温庆志,罗明良编著.东营:
中国石油大学出版社,2009.10

ISBN 978-7-5636-2328-0

I. 压… II. ①温…②罗… III. ①油层酸化—酸化压裂—
研究 ②油田开发—污染控制—研究 IV. TE357.2 X741

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 172716 号

书 名:压裂酸化新技术与污染控制
编 著:温庆志 罗明良

责任编辑:郇云飞(电话 0546—8391935)

封面设计:赵志勇

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>

电子信箱: suzhijiaoyu1935@163.com

印 刷 者:东营市新华印刷厂

发 行 者:中国石油大学出版社(电话 0546—8391809)

开 本:185×260 印张:13 字数:320 千字

版 次:2009 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:36.00 元

前言

压裂酸化改造技术距今已有近 60 年的发展历史。据统计,从 1955 年到 2006 年底,中国石油压裂酸化作业达到 24 万井次,共增油 1.27 亿吨以上,平均单井增油 530 吨左右;近 10 年来,压裂酸化作业每年达到 8 900 井次左右,年增油量 595 万吨。可见,压裂酸化改造技术为中国石油持续、有效、健康发展做出了巨大贡献。

近年来,中国能源供需矛盾愈加突出。中国原油进口量从 2000 年的 0.7 亿吨增加到 2007 年的 1.63 亿吨,年递增率超过 13%。而国内近年来每年新增探明储量中约三分之二为低/特低渗透油气藏。实现低渗透油气藏的有效开发,不仅关系到中国石油的可持续发展,更关系到国家的能源战略安全及国民经济的持续、健康、快速发展;同时也将是中国石油今后需要高度重视和长期关注的工作焦点,是石油工程界的重要使命。

压裂酸化改造技术作为低渗透油气田开发的重要手段之一,为中国低渗透油气藏的开发做出了重要贡献。“十五”期间以及“十一五”前两年,中国石油紧密围绕低渗透油气藏压裂酸化技术发展需求,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,取得了一批重大创新性成果,为保持中国低渗透油气藏油气产量的持续稳定发挥了非常重要的作用。然而,随着中国低/特低渗透油气藏储量所占比重逐年增多,低/特低渗透砂岩油气藏、火山岩油气藏、酸性油气藏以及复杂结构井的开发比例越来越大,研究适合不同复杂类型低渗透油气藏的大幅度提高单井产量技术,以及如何提高增产改造有效期,成为目前压裂酸化技术研究发展的核心技术难题,迫切需要在压裂酸化机理、工艺技术及新材料等方面有所发展和创新,使其在增储上产方面发挥更大的作用。

目前该技术体系已形成了低渗透油藏整体压裂技术、开发压裂技术、重复压裂技术、深井/超深井压裂酸化技术、复杂岩性酸压技术、碳酸盐岩储层酸压及加砂压裂技术、砂岩基质酸化技术、加重压裂和加重酸压技术、控水锁低伤害



压裂技术和泡沫压裂技术等 16 项具有特色的压裂酸化工艺技术与不同储层的工作液体系;并在水力压裂油藏工程、压裂力学、压裂酸化材料学、酸岩反应机理、砂岩酸化二次伤害机理、裂缝监测和长期导流能力、岩石力学性质与储气库稳定性、重复压裂前地应力场预测、水平井井网与人工裂缝优化匹配及产量预测、考虑启动压力和长期导流能力影响的油气藏数值模拟、压裂液对储层伤害机理及储层应力敏感性等机理性研究方面取得了重大突破,从而不断推动油气藏改造技术的发展。

近年来,环境保护越来越受到重视。因此,在压裂、酸化等井下施工过程中,不仅要注意对储层环境的保护,提高油气采收率,而且要重视对自然环境的保护。因此,论著除了作者近 10 年来在压裂、酸化及污染控制方面的研究成果外,还及时追踪国外压裂酸化技术最新发展方向及储层污染控制与环境保护新技术,可为国内压裂、酸化同行及研究生、本科生提供参考。同时也希望借此著作为我国压裂、酸化绿色新技术的推广应用搭建信息交流的平台,进而加快压裂酸化技术更新的步伐,进一步提高压裂酸化技术的适应性、针对性、前瞻性和现场可操作性。

本书在编写过程中始终得到中国石油大学(华东)曲占庆教授、蒲春生教授、王杰祥教授和陈德春教授的指导和帮助,得到石油工程院系领导和同事们的帮助和支持,研究生刘佳林、刘洪见、贾自龙、徐延涛等对本书做了大量的文字校对与编排工作,在此一并表示感谢。本书在编写过程中,参考和引用了部分国内外文献,对这些文献的作者表示感谢。另外,在本书的编写与出版过程中,得到了国家自然科学基金(50904076)和山东省自然科学基金(Q2007B01)的资助,在此也表示衷心的感谢。

本书第 1~6 章由温庆志博士撰写,第 7~11 章由罗明良副教授撰写。受我们的学术水平和实际经验的限制,书中难免存在疏漏、不足,甚至不当之处,敬请专家学者与读者指正。

编 者

2009 年 7 月



目 录



第 1 章 压裂、酸化基本原理	1
1.1 水力压裂技术	1
1.1.1 增产原理	1
1.1.2 造缝机理	2
1.1.3 压裂液	3
1.1.4 支撑剂	5
1.1.5 压裂设计	8
1.2 酸处理技术	13
1.2.1 酸液及添加剂	14
1.2.2 碳酸盐岩地层的盐酸处理	17
1.2.3 砂岩油气层的土酸处理	19
1.2.4 酸化压裂技术	23
1.2.5 酸处理工艺	23
第 2 章 水平井压裂裂缝参数优化技术	26
2.1 三维油水两相流数值模拟	26
2.1.1 物理模型的建立	26
2.1.2 数学模型的建立	27
2.1.3 压裂水平井生产动态数值模拟软件编制	29
2.2 裂缝参数优化设计	31
2.2.1 基本参数	31
2.2.2 优化设计	33
2.3 影响水平井压后产能的多因素分析	44
2.3.1 正交试验设计	44
2.3.2 正交试验的特点	44
2.3.3 正交试验设计及结果分析	44



第 3 章 重复压裂井地应力分析技术	47
3.1 人工水力裂缝诱导应力	47
3.2 垂直压裂井生产引起的应力变化	49
3.2.1 基本方程和力学模型	50
3.2.2 耦合模型求解	54
3.3 邻井对重复压裂井应力场分布的影响	54
3.3.1 邻井人工裂缝对重复压裂井应力场分布的影响	55
3.3.2 邻井生产对重复压裂井应力场分布的影响	55
3.3.3 注水井注入诱导应力分布	56
3.4 重复压裂井总应力场分布	61
3.4.1 重复压裂井应力大小	62
3.4.2 井眼处的应力变化	63
3.4.3 初次裂缝缝长方向上的应力变化	63
3.4.4 垂直初次裂缝缝长方向上的应力变化	64
3.5 重复压裂井应力场模型计算	64
3.5.1 基本参数	64
3.5.2 初次人工裂缝诱导应力变化	65
3.5.3 油井生产引起的应力变化	65
3.5.4 邻井诱导应力变化	66
3.5.5 重复压裂井总应力场大小	68
3.5.6 重复压裂的最佳时机	69
第 4 章 非达西渗流整体压裂优化技术	70
4.1 引言	70
4.2 启动压力梯度对矩形井网生产动态的影响	70
4.2.1 对日产油量和累计产油量的影响	71
4.2.2 对含水率的影响	71
4.2.3 对采出程度的影响	72
4.2.4 对油井见水时间的影响	72
4.2.5 对地层压力分布的影响	73
4.2.6 对含水饱和度分布的影响	74
4.3 各向异性矩形井网井排距比优化	74
4.3.1 方案设计	74
4.3.2 各向异性合理井排距比研究	76
4.3.3 不同启动压力梯度下合理井排距比理论图版	83
4.4 矩形井网裂缝参数优化	85
4.4.1 注水井缝长比优化	85
4.4.2 采油井缝长比优化	86
4.4.3 裂缝导流能力优化	88



第 5 章 小井眼压裂技术	90
5.1 小井眼技术发展现状	90
5.1.1 小井眼压裂技术的发展现状	90
5.1.2 小井眼压裂面临的技术难题	91
5.2 小井眼压裂工艺技术	92
5.2.1 水力压裂方式介绍	92
5.2.2 小井眼压裂工艺的特点	93
5.2.3 小井眼压裂工艺的要求	94
5.2.4 小井眼压裂方式的选择	94
5.3 小井眼压裂管柱及井下工具	95
5.3.1 小井眼单层压裂管柱	95
5.3.2 小井眼多层压裂管柱	98
5.4 小井眼压裂施工参数	103
5.4.1 压裂设计优选标准	103
5.4.2 小井眼压裂参数优选	104
5.4.3 现场应用	106
第 6 章 压裂液助排技术	108
6.1 液氮助排机理研究	108
6.1.1 氮气的基本性质	108
6.1.2 液氮助排机理研究	109
6.1.3 主要影响因素	110
6.2 二氧化碳助排机理研究	111
6.2.1 二氧化碳的基本性质	111
6.2.2 二氧化碳助排机理分析	112
6.2.3 二氧化碳泡沫压裂的特点	113
6.3 气体伴注模型的建立	113
6.3.1 液氮伴注数学模型	113
6.3.2 二氧化碳伴注数学模型	118
6.4 液氮助排应用实例	120
6.4.1 气井液氮伴注模拟计算	120
6.4.2 油田现场施工参数推荐	121
第 7 章 酸化新技术	122
7.1 多氢酸酸化技术	122
7.1.1 引言	122
7.1.2 多氢酸酸化原理	122
7.1.3 多氢酸酸化工艺	124
7.1.4 多氢酸酸化技术现场应用	128



7.2 清洁自转向酸化技术	128
7.2.1 引言	128
7.2.2 清洁自转向酸体系	130
7.2.3 现场应用	131
7.3 水平井酸化技术	132
7.3.1 引言	132
7.3.2 水平井酸化工艺的特殊性	133
7.3.3 水平井的伤害特征	133
7.3.4 水平井酸液体系	134
7.3.5 水平井布酸工艺	134
7.3.6 水平井酸化工艺	134
7.3.7 不同完井方式的布酸工艺适应性	137
第8章 压裂酸化措施作业安全	138
8.1 施工设计的安全要求	138
8.2 施工作业前的安全要求	138
8.2.1 施工作业设备、设施的安全要求	138
8.2.2 施工作业现场的安全要求	139
8.2.3 施工作业人员的安全要求	139
8.3 施工作业中的安全要求	139
8.4 施工作业后的安全要求	140
8.5 施工过程中复杂情况的安全处理	140
8.5.1 高低压管汇或井口漏失的处理	140
8.5.2 压不开地层的处理	140
8.5.3 施工过程中泵压升高的处理方法	141
8.5.4 井口放喷的安全技术要求	141
8.5.5 防止砂卡压裂管柱的措施	141
第9章 压裂酸化中储层伤害诊断与评价	142
9.1 压裂酸化作业中储层伤害机理	142
9.1.1 酸化作业中的储集层伤害	142
9.1.2 压裂作业中造成的储集层伤害	147
9.2 压裂酸化作业中储层伤害诊断与评价	150
9.2.1 储层伤害室内试验评价	150
9.2.2 储层污染损害的试井分析评价方法	150
9.2.3 储层伤害诊断与评价技术	154
9.2.4 现场应用实例	163



第 10 章 压裂酸化作业中储层伤害控制技术	167
10.1 保护储集层的酸化技术	167
10.1.1 保护储集层的碳酸盐岩酸化投产技术	167
10.1.2 保护储集层的砂岩酸化技术	169
10.2 保护储集层的压裂技术	171
10.2.1 选择压裂液	171
10.2.2 选择支撑剂	171
10.2.3 选择添加剂	171
10.2.4 选择适当的压裂工艺	171
10.2.5 施工中的质量控制	172
第 11 章 压裂酸化作业中环境污染与控制技术	174
11.1 压裂酸化作业污染源、污染物及其对环境的影响	174
11.1.1 压裂酸化施工过程中污染环节及主要污染物	174
11.1.2 压裂酸化作业污染物对环境的影响	175
11.2 压裂酸化作业中环境污染控制措施	176
11.2.1 废水水质控制和污泥处理方法	176
11.2.2 压裂酸化施工中废液控制基本方法	179
参考文献	194



第 1 章 压裂、酸化基本原理

水力压裂是油气井增产、注水井增注的一项重要技术措施,广泛用于低渗透油气藏的增产改造。近年来,在中、高渗油气藏的增产改造中也取得了很好的效果。酸化是油气井解除污染、增加产量的另一项重要技术措施,在砂岩地层和碳酸盐岩地层改造中发挥着重要的作用。

1.1 水力压裂技术

1.1.1 增产原理

水力压裂是指利用地面高压泵组,将高粘液体以大大超过地层吸收能力的排量注入井中,在井底憋起高压,当此压力大于井壁附近的地应力和地层岩石抗张强度时,在井底附近地层产生裂缝。继续注入带有支撑剂的携砂液,裂缝向前延伸并填以支撑剂,关井后裂缝闭合在支撑剂上,从而在井底附近地层内形成具有一定几何尺寸和导流能力的填砂裂缝,使井达到增产增注目的的工艺措施。

导流能力是指形成的填砂裂缝宽度与缝中渗透率的乘积 $W_f K_f$,代表填砂裂缝让流体通过的能力。

如图 1-1 所示,水力压裂增产的原理为:

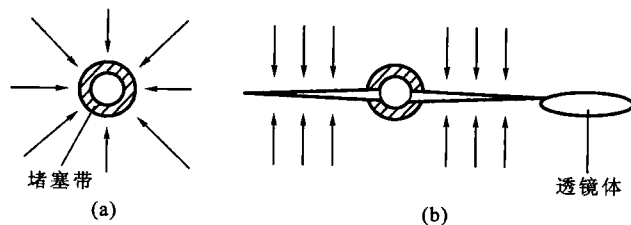


图 1-1 压裂增产原理示意图

(1) 形成的填砂裂缝的导流能力比原地层系数大得多,可大几倍到几十倍,大大增加了地层到井筒的连通能力;



(2) 由原来渗流阻力大的径向流渗流方式转变为双线性渗流方式,增大了渗流截面,减小了渗流阻力;

(3) 可能沟通独立的透镜体或天然裂缝系统,增加新的油源;

(4) 裂缝穿透井底附近地层的污染堵塞带,解除堵塞,因而可以显著增加产量。

1.1.2 造缝机理

在水力压裂中,了解造缝的形成条件、裂缝的形态(垂直或水平)、方位等,对有效地发挥压裂在增产、增注中的作用都是很重要的。在区块整体压裂改造和单井压裂设计中,了解裂缝的方位对确定合理的井网方向和裂缝几何参数尤为重要,这是因为有利的裂缝方位和几何参数不仅可以提高开采速度,而且可以提高最终采收率;相反,则可能会出现生产井过早水窜,降低最终采收率。

1.1.2.1 裂缝起裂和延伸

造缝条件及裂缝的形态、方位等与井底附近地层的地应力及其分布、岩石的力学性质、压裂液的渗滤性质及注入方式具有密切关系。图 1-2 是压裂施工过程中井底压力随时间的变化曲线。 p_F 是地层破裂压力, p_E 是裂缝延伸压力, p_s 是地层压力。

地层开始形成裂缝时的井底注入压力称为地层的破裂压力 p_F 。破裂压力与地层深度的比值称为破裂压力梯度。

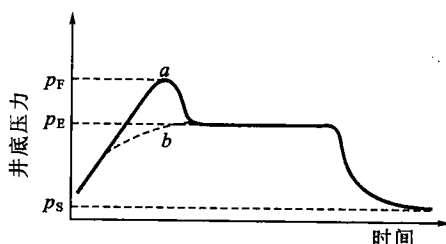


图 1-2 压裂过程中井底压力变化曲线

a—致密岩石; b—微缝高渗岩石

在致密地层内,当井底压力达到破裂压力 p_F 后,地层发生破裂(图 1-2 中的 a 线),然后在较低的延伸压力 p_E 下,裂缝向前延伸。对高渗或微裂缝发育地层,压裂过程中无明显的破裂显示,破裂压力与延伸压力相近(图 1-2 中的 b 线)。

1.1.2.2 裂缝形态

一般情况下,地层中的岩石处于压应力状态,作用在地下岩石某单元体上的应力为垂向主应力 σ_z 和水平主应力 σ_H (σ_H 又可分为两个相互垂直的主应力 σ_x, σ_y)。

作用在单元体上的垂向主应力来自上覆层的岩石重量,它的大小可以根据密度测井资料计算,一般为:

$$\sigma_z = \int_0^H \rho_s g dz \quad (1-1)$$

式中: σ_z ——垂向主应力,Pa;

H ——地层垂深,m;

g ——重力加速度,9.81 m/s²;

ρ_s ——上覆层岩石密度,kg/m³。



由于油气层中有一定的孔隙压力 p_s (又称油藏压力或流体压力), 故有效垂向应力可表示为:

$$\bar{\sigma}_z = \sigma_z - p_s \quad (1-2)$$

如果岩石处于弹性状态, 考虑到构造应力等因素的影响, 可以得到最大、最小水平主应力:

$$\begin{cases} \sigma_{H\max} = \frac{1}{2} \left[\frac{\xi_1 E}{1-\nu} - \frac{2\nu(\sigma_z - \alpha p_s)}{1-\nu} + \frac{\xi_2 E}{1+\nu} \right] + \alpha p_s \\ \sigma_{H\min} = \frac{1}{2} \left[\frac{\xi_1 E}{1-\nu} - \frac{2\nu(\sigma_z - \alpha p_s)}{1-\nu} - \frac{\xi_2 E}{1+\nu} \right] + \alpha p_s \end{cases} \quad (1-3)$$

式中: $\sigma_{H\max}, \sigma_{H\min}$ ——最大、最小水平主应力, Pa;

ξ_1, ξ_2 ——水平应力构造系数, 可由室内测试试验结果推算, 无因次;

ν ——泊松比, 无因次;

E ——岩石弹性模量, Pa;

α ——毕奥特 (Biot) 常数, 无因次。

在天然裂缝不发育的地层, 裂缝形态 (垂直缝或水平缝) 取决于其三向应力状态。根据最小主应力原理, 裂缝总是产生于强度最弱、阻力最小的方向, 即岩石破裂而垂直于最小主应力轴方向。当 σ_z 最小时, 形成水平裂缝; 当 σ_z 最大时, 形成垂直裂缝。若 $\sigma_z > \sigma_x > \sigma_y$, 则裂缝面垂直于 σ_y 方向; 若 $\sigma_z > \sigma_y > \sigma_x$, 则裂缝面垂直于 σ_x 方向, 如图 1-3 所示。

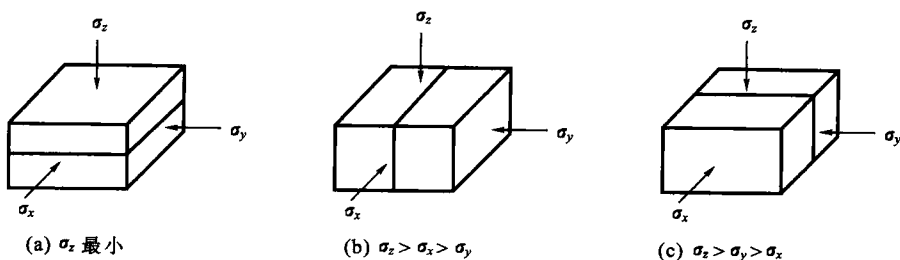


图 1-3 裂缝形态示意图

1.1.3 压裂液

影响压裂施工成败的诸因素中, 压裂液性能的好坏是其中的主要因素之一。

1.1.3.1 压裂液的性能

(1) 压裂液的组成

压裂液是一个总称, 根据压裂过程中注入井内的压裂液在不同施工阶段的任务可分为以下几种:

① 前置液。它的作用是破裂地层并造成一定几何尺寸的裂缝以备后面的携砂液进入。在温度较高的地层里, 它还可起一定的降温作用。有时为了提高前置液的工作效率, 在前置液中还加入一定量的细砂 (粒径 100~140 目, 砂比 10% 左右) 以堵塞地层中的微隙, 减少液体的滤失。前置液一般用未交联的溶胶。

② 携砂液。它的作用是将支撑剂带入裂缝中并将支撑剂填在裂缝内预定位置上。在压裂液的总量中, 这部分比例很大。携砂液和其他压裂液一样, 有造缝及冷却地层的作用。



携砂液由于需要携带比重很高的支撑剂,必须使用交联的压裂液(如冻胶等)。

③ 顶替液。中间顶替液用来将携砂液送到预定位置,并有预防砂卡的作用;注完携砂液后要用顶替液将井筒中全部携砂液替入裂缝中,以提高携砂液效率和防止井筒沉砂。

(2) 压裂液的性能要求

根据压裂不同阶段对液体性能的要求,压裂液在一次施工中可能使用一种以上性能不同的液体,其中还加有不同使用目的的添加剂。对于占总液量绝大多数的前置液及携砂液,应该具备一定的造缝能力并使裂缝壁面及填砂裂缝具有足够的导流能力。所以,为了获得好的水力压裂效果,对压裂液的性能提出以下要求:

① 滤失少。这是造长缝、宽缝的重要条件。

② 悬砂能力强。压裂液的悬砂能力主要取决于粘度。较高的粘度对支撑剂在缝中的分布是非常有利的。

③ 摩阻低。压裂液在管道中的摩阻愈小,则在设备功率一定的条件下,用于造缝的有效功率就愈大。摩阻过高会导致井口施工压力过高,从而降低排量甚至限制压裂施工。

④ 稳定性。压裂液应具备热稳定性,不能由于温度的升高而使粘度有较大的降低。液体还应有抗机械剪切的稳定性,不能因流速的增加而发生大幅度的降解。

⑤ 配伍性。压裂液进入油层后与各种岩石矿物及流体相接触,不应产生不利于油气渗流的物理-化学反应。

⑥ 低残渣。要尽量降低压裂液中水不溶物(残渣)的数量,以免降低油气层和填砂裂缝的渗透率。

⑦ 易返排。施工结束后大部分注入液体应能返排出井外,以减少压裂液的损害,排液愈完全,增产效果愈好。

⑧ 货源广,便于配制,价钱便宜。随着大型压裂的发展,压裂液的需用量很大,是压裂施工费用的主要组成部分。

1.1.3.2 压裂液类型

目前常用的压裂液有水基压裂液、酸基压裂液、油基压裂液、乳状压裂液及泡沫压裂液等。近年来发展了以降低对地层和裂缝伤害为目标的清洁压裂液。

(1) 水基压裂液

水基压裂液是用水溶胀性聚合物(称为成胶剂)经交链剂交链后形成的冻胶。常用的成胶剂有植物胶(瓜胶、田菁、皂仁等)、纤维素衍生物(羟乙基纤维素、羧甲基羟乙基纤维素等)以及合成聚合物(聚丙烯酰胺、聚乙烯醇等);交链剂(交联剂)有硼酸盐、钛、锆等有机金属盐等。在施工结束后,为了使冻胶破胶还需要加入破胶剂,常用的破胶剂有过硫酸铵、高锰酸钾和酶等。

(2) 油基压裂液

对水敏性地层,使用水基压裂液会导致地层粘土膨胀而影响压裂效果,对此,常使用油基压裂液。矿场原油或炼厂粘性成品油均可作油基压裂液,但其悬砂能力差,性能达不到要求。目前多用稠化油,基液为原油、汽油、柴油、煤油或凝析油,稠化剂为脂肪酸皂(如脂肪酸铝皂、磷酸酯铝盐等),矿场最高砂比可达30%(体积比)。稠化油压裂液遇地层水后自动破胶,所以无需加入破胶剂。

油基压裂液虽然适用于水敏性地层,但存在价格昂贵、施工困难和易燃等问题,应用受



到一定限制。

(3) 泡沫压裂液

泡沫压裂液是近几年内发展起来的,用于低压低渗油气层改造的新型压裂液。其最大特点是易于返排、滤失少以及摩阻低等。基液多用淡水、盐水、聚合物水溶液;气相为二氧化碳、氮气、天然气;发泡剂用非离子型活性剂。泡沫干度为 65%~85%,低于 65%则粘度太低,超过 92%则不稳定。

泡沫压裂液也具有不利因素:

① 由于井筒气-液柱的压降较低,压裂过程中需要较高的注入压力,因而对深度大于 2 000 m 以上的油气层,实施泡沫压裂是困难的。

② 使用泡沫压裂液的砂比不能过高,在需要注入高砂比情况下,可先用泡沫压裂液将低砂比的支撑剂带入,然后再泵入可携带高砂比支撑剂的常规压裂液。

(4) 清洁压裂液

近年来发展起来的表面活性剂压裂液,也称之为清洁压裂液,是一种新型的压裂液体系,它不含任何聚合物,解决了压裂液对地层的污染,因此,也叫无伤害(零污染)压裂液。这种表面活性剂压裂液不需要破胶剂、破乳剂、防腐剂等化学添加剂。目前使用的常规压裂液的增稠剂均为高分子,相对分子质量均在 1 000 万以上,而表面活性剂压裂液的相对分子质量只有几百,和其他的聚合物、植物胶相比,表面活性剂压裂液的增稠剂属于小分子范畴。表面活性剂压裂液由于是小分子,且在水中完全溶解,不含有固相成分,在裂缝中难以形成滤饼,不会对地层的渗透率和裂缝导流能力造成伤害。

其他应用的压裂液还有聚合物乳状液、酸基压裂液和醇基压裂液等,它们都有各自的适用条件和特点,但在矿场上应用很少。

1.1.4 支撑剂

水力压裂的目标是在油气层内形成足够长度的高导流能力填砂裂缝,所以,水力压裂工程中的各个环节都是围绕这一目标,并以此选择支撑剂类型、粒径和携砂液性能,以及施工工序等。

1.1.4.1 支撑剂的要求

(1) 粒径均匀,密度小。一般来说,水力压裂用支撑剂的粒径并不是单一的,而是有一定的变化范围,如果支撑剂分选程度差,在生产过程中,细砂会运移到大粒径砂所形成的孔隙中,堵塞渗流通道,影响填砂裂缝导流能力,所以对支撑剂的粒径大小和分选程度是有一定要求的。以国内矿场常用的 20/40 目支撑剂为例,最少有 90%的砂子经过筛析后位于 20~40 目之间,同时要求大于第一个筛号的砂重小于 0.1%,而小于最后一个筛子的量不能大于 1%。

比较理想的支撑剂要求密度小,最好小于 $2\,000\text{ kg/m}^3$,以便于携砂液携带至裂缝中。

(2) 强度大,破碎率小。支撑剂的强度是其性能的重要指标。由于支撑剂的组成和生制作法不同,其强度的差异也很大,如石英砂的强度为 21.0~35.0 MPa,陶粒的强度可达 105.0 MPa。水力压裂结束后,裂缝的闭合压力作用于裂缝中的支撑剂上,当支撑剂强度比缝壁面地层岩石的强度大时,支撑剂有可能嵌入地层里;缝壁面地层岩石比支撑剂强度大,且闭合压力大于支撑剂强度时,支撑剂易被压碎,这两种情况都会导致裂缝闭合或渗透率很低。所以为了保证填砂裂缝的导流能力,在不同闭合压力下,对各种目数的支撑剂的强



度和破碎率均有一定的要求。

(3) 圆球度高。支撑剂的圆度表示颗粒棱角的相对锐度,球度是指砂粒与球形相近的程度。圆度和球度常用目测法确定,一般在10到20倍的显微镜下或采用显微照相技术拍照,然后再与标准的圆球度图版对比,确定砂粒的圆球度。圆球度不好的支撑剂,其填砂裂缝的渗透率差且棱角易破碎,粉碎形成的小颗粒会堵塞孔隙,降低其渗透性。

(4) 杂质含量少。支撑剂中的杂质对裂缝的导流能力是有害的。天然石英砂,其杂质主要是碳酸盐、长石、铁的氧化物及粘土等矿物质。一般用水洗、酸洗(盐酸、土酸)消除杂质,处理后的石英砂强度和导流能力都会提高。

(5) 来源广,价廉。

1.1.4.2 支撑剂的类型

支撑剂按其力学性质分为两大类:一类是脆性支撑剂,如石英砂、玻璃球等;特点是硬度大,变形小,在高闭合压力下易破碎。另一类是韧性支撑剂,如核桃壳、铝球等;特点是变形大,承压面积随之加大,在高闭合压力下不易破碎。目前矿场上常用的支撑剂有两种:一是天然砂和陶粒;二是人造支撑剂。此外,在压裂中曾经使用过核桃壳、铝球、玻璃珠等支撑剂,由于强度、货源和价格等方便的原因,现多已淘汰。

(1) 天然砂。自从世界上第一口压裂井并使用支撑剂以来,天然砂已广泛使用于浅层或中深层的压裂(1500 m),而且都有很高的成功率。高质量的石英砂往往都是古代的风成砂丘,在风力的搬运和筛选下沉砂而成,因此石英含量高,粒径均匀,圆球度也好;另外石英砂资源很丰富,价格也便宜。世界上有多处开采质量较高石英砂,如美国的 Ottwa 砂,北部白砂,我国的兰州砂、通辽砂等。

天然砂的主要矿物成分是粗晶石英,没有晶体解理,但在高闭合压力下会破碎成小碎片,虽然仍能保持一定的导流能力,但效果已大大下降,所以在深井中应慎重使用。石英砂的最高使用应力为 21.0~35.0 MPa。

(2) 人造支撑剂(陶粒)。最常用的人造支撑剂是烧结铝矾土,即陶粒。它的矿物成分是氧化铝、硅酸盐和铁-钛氧化物;形状不规则,圆度为 0.65,密度为 3 800 kg/m³,强度很高,在 70.0 MPa 的闭合压力下,陶粒所提供的导流能力约比天然砂的高一个数量级,因此它能适用深井高闭合压力的油气层压裂。对一些中深井,为了提高裂缝导流能力,也常用陶粒作尾随支撑剂。

国内矿场应用较多的有宜兴陶粒和成都陶粒,强度上也有低、中、高之分,低强度适用的闭合压力为 56.0 MPa,中强度约为 70.0~84.0 MPa,高强度达 105.0 MPa,已基本形成了比较完整和配套的支撑剂体系。

陶粒的强度虽然很大,但密度也很高,给压裂施工带来一定的困难,特别在深井条件下由于高温和剪切作用,对压裂液性能的要求很高。为此,近年来研制了一种具有空心或多孔的陶粒,其空心体积约为 30%,视密度接近于砂粒。试验表明:这种多孔或空心陶粒的强度与实心陶粒相当,因而实现了低密度、高强度的要求。但由于空心陶粒的制作比较困难,目前现场还没有广泛使用。

(3) 树脂包层支撑剂。树脂包层支撑剂是中等强度低密度或高密度,能承受 56.0~70.0 MPa 的闭合压力,适用于低强度天然砂和高强度陶粒之间强度要求的支撑剂。其密度小,便于携砂与铺砂。它的制作方法是用水树脂把砂粒包裹起来,树脂薄膜的厚度约为