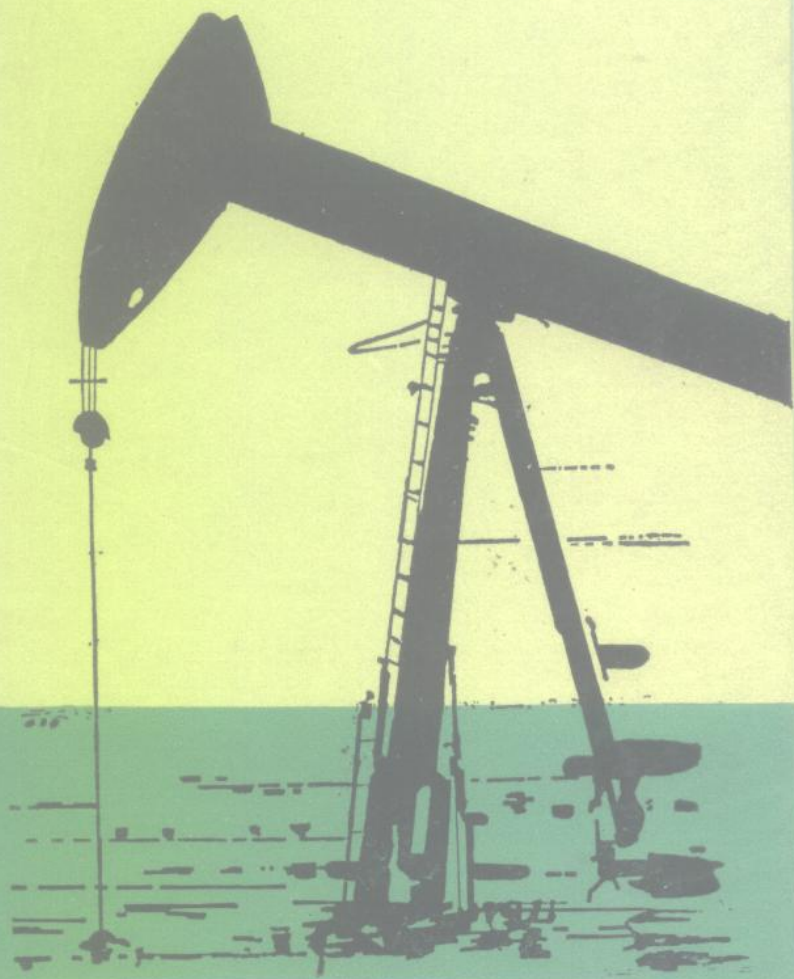


采油技术手册 (修订本)

第九分册

压裂酸化工艺技术



石油工业出版社

采油技术手册

(修订本)

第九分册 压裂酸化工艺技术

万仁溥 罗英俊 主编

俞绍诚 向世琪 唐瑞林 李联奎 编



石油0121256

石油工业出版社

内 容 提 要

本分册较详细地讲述了油藏增产措施中, 压裂设计参数的采集方法、裂缝模型、压裂设计计算及压裂设计的优化方法、压裂液、支撑剂和压裂工艺技术等实用技术, 并介绍了酸化增产措施的有关技术内容。

本手册内容实用, 适合油气田从事压裂、酸化和作业工作的科研、设计和施工工程技术人员及大专院校师生工作和学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

压裂酸化工艺技术/俞绍诚等编. —修订本.

北京: 石油工业出版社, 1998.1

(采油技术手册; 第九分册/万仁溥, 罗英俊主编)

ISBN 7-5021-1970-1

I. 压…

II. 俞…

III. 油层酸化-技术

IV. TE 357.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 06419 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 24 印张 635 千字 印 1-5000

1998 年 1 月北京第 1 版 1998 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-1970-1/TE·1657

定价: 50.00 元

修订版说明

原《采油技术手册》是采油专业的一部重要工具书，它的出版发行已在采油技术工作中起了重要的作用。但由于该手册出版于70年代初期，内容已显得陈旧，部分章节单薄不全，特别是近十年来在采油技术工作中又发展了一批新工艺、新技术、新工具，这些工艺、技术和工具有待于更多的技术人员掌握应用，以转化成更大的生产力。为此，经中国石油天然气总公司开发生产局同石油工业出版社商定，对原《采油技术手册》进行修订，重新编写。

新的《采油技术手册》由中国石油天然气总公司开发生产局和石油工业出版社共同组织编写，由万仁溥、罗英俊负责主编。

考虑到修订后的《手册》内容广泛、牵涉面广、篇幅长和工作量大的特点，以及从便于应用出发，新的《手册》将以分册的形式来完成。

新的《采油技术手册》暂定为十个分册，各分册的名称如下：

- 第一分册 自喷采油技术
- 第二分册 注水技术
- 第三分册 生产测井技术
- 第四分册 机械采油技术
- 第五分册 修井工具与技术
- 第六分册 增产措施设备技术
- 第七分册 防砂技术
- 第八分册 稠油热采工程技术
- 第九分册 压裂酸化工艺技术
- 第十分册 堵水技术

手册的各分册都既是独立的工具书，又是《采油技术手册》的一个组成部分，采油部门的各专业可根据需要选用其中的分册。

前 言

我国陆上油气田的一个突出特点是低渗透油气田比例比较大，特别是“八五”和“九五”以来，新增的油气储量中，低渗透油气储量的比例呈逐年上升的趋势，约占四分之一以上。要开发利用好这批低渗透储量，并得到较好的经济效益，其根本的出路在于提高采油（气）指数，从而实现较高的单井产量。要达此目的，最有效的方法就是应用水力压裂技术和酸化技术改造油气层，提高采油（气）指数，从而提高单井产量。

水力压裂技术和酸化技术从 70 年代初开始在中国陆上油气田广泛应用，在实践中不断提高水平，特别是通过引进技术和装备，使我国的水力压裂技术水平大幅度提高。目前水力压裂和酸化技术已成为陆上油气田一项重要的增产措施，并使一批低渗透油气田得到了有效的开发。目前压裂和酸化的年施工能力已达到 5000 井次以上，年增产油量已超过 1000 万吨（含跨年有效井的增产量），为老油田的稳产和低渗透新油田的开发，起着不可替代的重要作用。

本手册重点总结了已趋成熟并广泛应用的压裂酸化技术，突出应用。从原理、设计方法和施工工艺到原材料分析，从单井技术到整体压裂，从现有技术到再发展和展望，都作了较详尽的归纳。本手册是一本具有实用性和指导性（特别是对水力压裂技术）的工具书，不仅可作为各油气田应用的依据，也可作为科研部门和大专院校的参考书。

本书第一、二和四章由俞绍诚编写，第三章由向世琪编写，第五章由唐瑞林编写，第六章由李联奎编写，朱兆明指导了全书的编写工作。由于编者水平所限，书中错误难免，恳请读者指正。

编者

1997 年 5 月

目 录

第一章 压裂设计参数的采集与裂缝模型	(1)
一、压裂设计的基本任务	(1)
二、压裂设计参数	(2)
(一) 设计参数的分类	(2)
(二) 有效渗透率	(4)
(三) 有效厚度	(8)
(四) 地层温度	(8)
(五) 地层压力	(9)
(六) 地层流体密度、粘度和压缩系数	(12)
(七) 岩石力学性质、泊松比和弹性模量	(19)
(八) 地应力及其垂向分布	(35)
(九) 地层破裂压力和破裂压力梯度	(54)
(十) 裂缝延伸压力	(66)
(十一) 裂缝闭合压力	(71)
(十二) 盖、底层性质	(74)
(十三) 油管	(75)
(十四) 套管	(76)
(十五) 井口装置	(77)
(十六) 封隔器	(77)
(十七) 射孔状况	(79)
三、压裂模型与裂缝几何尺寸	(89)
(一) 压裂模型的基本内容和基本方程	(89)
(二) 裂缝模型的发展概况	(96)
(三) PKN 模型	(104)
(四) KGD 模型	(109)
(五) PKN 模型和 KGD 模型比较	(111)
(六) 选择二维压裂模型的一般原则	(117)
第二章 压裂设计计算与设计的优化	(127)
一、压裂设计计算	(127)
(一) BJ-HUGHES 公司压裂程序 (FRAC11) 软件	(127)

(二) 西方石油公司 ENGLIR 程序软件	(134)
(三) 拟三维压裂设计软件	(140)
(四) 全三维压裂设计软件	(148)
(五) 裂缝几何尺寸的简单计算	(156)
(六) 压裂设计的简单计算	(161)
二、压裂设计的优化	(180)
(一) 优化压裂设计的概念	(180)
(二) 压裂井的产量预测	(181)
(三) 压裂设计的优化过程	(202)
(四) 压裂井的经济分析	(219)
(五) 压裂设计优化的步骤	(229)
(六) 设计参数对压裂设计最优化的敏感性分析	(242)
三、水力裂缝对注水开发油藏面积波及系数的影响	(266)
(一) 术语	(267)
(二) 流度比与裂缝方位	(269)
(三) 压裂井别	(272)
(四) 裂缝长度	(275)
(五) 无因次导流能力	(280)
第三章 压裂液	(281)
一、压裂液类型	(281)
(一) 按压裂液配制材料和液体性状分类	(281)
(二) 按压裂作业中不同工艺作用分类	(282)
二、水基压裂液	(283)
(一) 水基压裂液基本类型及特点	(283)
(二) 水基压裂液的主要添加剂	(285)
(三) 水基压裂液的典型配方	(384)
(四) 水基冻胶压裂液配制工艺技术	(409)
三、油基压裂液	(414)
(一) 油基压裂液基本类型及特点	(414)
(二) 油基压裂液的主要添加剂	(416)
(三) 油基压裂液的典型配方	(423)
四、乳状压裂液	(430)
(一) 乳状压裂液基本类型及特点	(430)

(二) 乳状压裂液的基本材料及添加剂	(432)
(三) 乳状压裂液的典型配方	(440)
五、泡沫压裂液	(443)
(一) 泡沫压裂液基本类型及特点	(443)
(二) 泡沫压裂液的基本材料及添加剂	(444)
(三) 泡沫压裂液的典型配方	(450)
六、酸基压裂液	(452)
(一) 酸基压裂液基本类型及特点	(452)
(二) 酸基压裂液的基本材料及添加剂	(453)
(三) 酸基压裂液的典型配方	(456)
七、醇基压裂液	(460)
(一) 醇基压裂液基本类型及特点	(460)
(二) 醇基压裂液配方	(460)
八、压裂液性能评价	(462)
(一) 压裂液的滤失性	(463)
(二) 压裂液对基岩渗透率的伤害	(466)
(三) 压裂液的流变特性	(468)
(四) 泡沫压裂液特性	(485)
(五) 压裂液的溶解性	(488)
第四章 支撑剂	(490)
一、支撑剂的类型	(490)
(一) 石英砂	(491)
(二) 人造陶粒支撑剂	(494)
(三) 树脂包层砂	(497)
二、支撑剂的物理性质及其评价方法	(499)
(一) 理想支撑剂的性质	(499)
(二) 支撑剂样品的取样方法	(500)
(三) 支撑剂的筛选分析	(503)
(四) 支撑剂的圆度和球度	(507)
(五) 支撑剂的表面光滑度	(508)
(六) 支撑剂的浊度	(509)
(七) 支撑剂的酸溶解度	(512)
(八) 支撑剂的密度	(513)

(九) 支撑剂的抗压强度	(517)
(十) 我国支撑剂物理性质的评价结果	(522)
三、充填支撑剂的裂缝导流能力及其影响因素	(528)
(一) 裂缝的导流能力	(528)
(二) 影响裂缝导流能力的因素	(538)
四、支撑剂的选择	(566)
(一) 支撑剂的选择原则	(566)
(二) 麦克奎尔曲线及辛科准数	(566)
(三) 使用典型曲线确定恒定缝长条件下的支撑剂最优化选择	(571)
(四) 恒定缝长条件下改变裂缝导流能力以获得最优化的无因次导流能力值来选择支撑剂	(578)
(五) 使用典型曲线进行经济分析来选择支撑剂	(583)
第五章 压裂工艺技术	(589)
一、分层及选择性压裂技术	(589)
(一) 封隔器分层压裂	(589)
(二) 堵塞球选择性压裂	(594)
(三) 限流法分层压裂	(606)
(四) 蜡球选择性压裂	(610)
二、测试压裂技术	(612)
(一) 测试压裂井下和地面装置示意图	(612)
(二) 裂缝延伸压力测试	(613)
(三) 裂缝闭合压力测试	(613)
(四) 利用小型测试压裂求取裂缝几何尺寸和压裂液参数	(614)
三、裂缝高度控制技术	(619)
(一) 常规裂缝高度控制技术	(619)
(二) 人工隔层控制裂缝高度技术	(620)
(三) 冷水水力压裂控制裂缝高度技术	(623)
四、泡沫压裂工艺技术	(623)
(一) 泡沫压裂的优点	(624)
(二) 泡沫压裂液的组成	(624)
(三) 泡沫压裂液的性质及参数计算	(626)
(四) 泡沫压裂工艺	(631)

(五) 泡沫压裂的适用范围·····	(635)
五、高能气体压裂技术·····	(635)
(一) 高能气体压裂的基本原理和特点·····	(636)
(二) 高能气体压裂的适用范围·····	(636)
(三) 高能气体压裂主要技术参数选择·····	(637)
(四) 高能气体压裂工艺·····	(640)
(五) 高能气体压裂保护套管技术措施·····	(646)
第六章 酸化 ·····	(649)
一、酸液与地层岩石的化学反应·····	(651)
(一) 碳酸盐沉积岩的化学组成·····	(651)
(二) 碎屑岩的矿物成分·····	(651)
(三) 酸液与碳酸盐岩的化学反应·····	(653)
(四) 砂岩矿物的化学反应·····	(657)
(五) 酸—岩反应的基本理论·····	(659)
二、酸化试验·····	(662)
(一) 酸液性能评价试验·····	(662)
(二) 酸液与储层的相容性评定试验·····	(665)
三、酸化施工设计·····	(667)
(一) 酸化施工设计任务书的内容·····	(667)
(二) 基质酸化施工设计计算方法·····	(669)
(三) 基质酸处理的设计程序·····	(675)
(四) 酸压裂设计方法·····	(679)
四、酸液及添加剂·····	(690)
(一) 酸液·····	(690)
(二) 用酸指南·····	(691)
(三) 常用的盐酸体系·····	(694)
(四) 碎屑岩储层常用酸液体系·····	(699)
(五) 主要的酸液添加剂·····	(701)
五、施工工艺和质量控制·····	(708)
(一) 施工准备·····	(708)
(二) 施工过程的质量控制要点·····	(713)
(三) 后期管理质量要点·····	(714)
(四) 施工资料录取要求·····	(715)

附录	(717)
一、油管、套管强度性能	(717)
二、油管、套管和其环形空间容积	(717)
三、盐酸酸化缓蚀剂性能的实验方法及评价指标 (SY 5405—91)	(746)
四、本书使用的非法定计量单位换算关系表	(754)

第一章 压裂设计参数的采集与裂缝模型

压裂设计是单井压裂施工的指导性技术文件，它能在给定的油气层、注采井网、压裂材料（压裂液、支撑剂）与泵注设备等条件下优选出经济有效的增产方案，并作为检验施工质量、增产效果和经济效益的重要依据。

一个优化的压裂设计程序，首先应采集准确可靠的设计参数，在此基础上使用水力压裂模型进行设计计算，取得不同参数组合下的裂缝几何尺寸和裂缝导流能力；然后通过油藏模型与经济模型对上述不同几何尺寸和导流能力的水力压裂裂缝进行压后产量预测及经济评价，最终获得一个优化的压裂设计方案。本章将介绍压裂设计的基本任务、设计参数及其采集方法与裂缝模型，以便对这一内容有所了解和掌握。

一、压裂设计的基本任务

为了保证压裂设计对施工的指导作用，一个优化的压裂设计必须完成如下基本任务：

1) 在给定的储层与注采井网条件下，根据不同裂缝长度和裂缝导流能力预测并在压后的生产动态。

2) 根据储层条件选择压裂液、支撑剂等压裂材料的类型；并确定达到不同裂缝长度和导流能力所需要的压裂液与支撑剂的用量。

3) 根据井下管柱与井口装置的压力极限，确定泵注方式、泵注排量、所需设备的功率与地面泵压。

4) 确定压裂施工时压裂液与支撑剂的泵注程序。

5) 对上述各项结果进行经济评价，并使之最优化。即产生

一个少投入、多产出的设计方案。

6) 对这一优化设计进行检验。该设计应满足：

- ①开发与增产的需要；
- ②现有的压裂材料与设备具有完成施工作业的能力；
- ③保证安全施工的要求。

为了保证压后取得预期的裂缝几何尺寸与增产效果，只有不断深化对储层的认识，不断改进压裂液、支撑剂等压裂材料的性能，不断积累现场施工经验以及掌握地面、井下工具、设备的功能，才能提高压裂设计的质量，使之充分起到对压裂施工的指导与检验作用。

二、压裂设计参数

(一) 设计参数的分类

为了充分评价储层的供给能力并确定与压裂施工有关的设计参数，一个完整、优化的设计程序需要一套齐全准确的数据。如按控制程度分类，可将这些数据分为不可控制参数与可控制参数两大范畴。前者是指那些不能人为改变的储层特征参数，包括有效渗透率、孔隙度、有效厚度、地应力、地层温度、地层压力、流体性质、遮挡层厚度及其地应力状态等；后者则是那些可以人为加以调整，来进行优化施工的完井特征参数，如井筒套管、油管及井口、井下工具、射孔位置、射孔数、压裂液、支撑剂、泵注排量与泵注程序等。这些特征参数可归纳成油气井参数、油气层参数、压裂参数与经济参数等四类 27 项。每类参数列举如下：

1. 油气井参数

设计中的油气井参数决定了压裂井的施工条件。它们是：

- 1) 井的类别与井网密度；
- 2) 井径、井下管柱（套管、油管）与井口装置的规范、尺寸及压力定额；
- 3) 压裂层段的固井质量；

4) 射孔井段的位置、长度、射孔弹型号、射孔孔数与孔眼尺寸；

5) 井下工具的名称、规范、尺寸、压力定额、承受温度与位置。

2. 油气层参数

油气层参数决定了井在压裂前后的生产反应。这些参数是：

1) 储层有效渗透率、孔隙度与含油饱和度以及这些参数的垂向分布；

2) 储层有效厚度及其在平面上的延伸；

3) 储层压力梯度与静压力；

4) 储层静态温度；

5) 储层流体性质，包括密度、粘度与压缩系数等；

6) 储层岩石力学性质，如泊松比、杨氏模量、抗压强度与岩石布氏硬度等；

7) 储层地应力的垂向分布及最小水平主应力的方位；

8) 遮挡层的岩性、厚度与地应力值。

3. 压裂参数

压裂参数决定了产生裂缝的几何尺寸与裂缝导流能力。包括：

1) 使用二维设计模型时压裂施工所形成的裂缝高度或使用拟三维、全三维模型时，储层与上、下遮挡层的地应力差；

2) 裂缝延伸压力和裂缝闭合压力；

3) 压裂液视粘度、流态指数和稠度系数；

4) 压裂液初滤失和综合滤失系数；

5) 压裂液流经井下管柱与射孔孔眼的摩阻损失；

6) 压裂液纯滤失高度的垂向分布；

7) 支撑剂类型、粒径范围、颗粒密度、体积密度；

8) 作为裂缝闭合压力函数的支撑剂导流能力与水力裂缝中支撑剂层的渗透率；

9) 压裂液总的泵注排量；

10) 动用的设备功率及其压力极限。

4. 经济参数

设计中的经济参数决定了投入与产出的关系，即最优化压裂设计方案的产生。这些参数是：

- 1) 压裂的施工规模，包括总用量与支撑剂量；
- 2) 压裂的施工费用，包括压裂材料（压裂液、支撑剂）的价格、设备及其它辅助费用；
- 3) 油、气产量及产品的价格；
- 4) 计算净收益的时间以及净贴现值。

上述参数在设计中起着重要作用。下面，着重介绍其中某些关键参数在压裂设计中的作用及其采集方法。

(二) 有效渗透率

1. 定义

在多孔介质中如有两种以上的流体流动，则该介质对某一相的渗透率称之为有效渗透率（或相渗透率）。

岩石被 100% 的空气所饱和，测试空气的视渗透率，然后经 Klinkenberg 法校正得到的渗透率称之为绝对渗透率。

有效渗透率与绝对渗透率的比值称之为相对渗透率。

在压裂设计中必须使用有效渗透率。单位以 μm^2 或 $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 表示。

2. 作用

1) 有效渗透率是检验井在压前生产状况，预测压后产量及评价压裂效果的重要参数。

2) 有效渗透率是储层定性评价标准之一，也是划分增产措施类别的主要依据。表 1—1 给出了国内利用有效渗透率对储层的定性评价界限；表 1—2 则列出了国外一些服务公司依据有效渗透率建议采取增产措施的类别及对气层应达到的裂缝半长的标准。

3) 依据由压力恢复确定的渗透率 K_{BU} ，与采油指数试验确定的渗透率 K_{PI} 的比值 C_R （渗滤比值， $C_R = K_{BU}/K_{PI}$ ），判断近

井地带渗透率的变化，确定压裂作业的性质（解堵或改造）。

表 1—1 渗透率的定性评价

渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$	定性评价
0.01~0.1	特致密
0.1~1	致密
1~10	较致密
10~100	好
100~1000	很好
>1000	极好

表 1—2 国外依据渗透率划分增产措施类别
及要求裂缝半长的标准

油 层						气 层		
Hulliburton 公司			Dowell 公司			Elkins 提出的划分标准		
渗透率 $10^{-3}\mu\text{m}^2$	定性 评价	建议 的措施	渗透率 $10^{-3}\mu\text{m}^2$	定性 评价	建议 的措施	渗透率 $10^{-3}\mu\text{m}^2$	定性 评价	要求的裂 缝半长, m
0.1~1	低渗	压裂	<0.1	低渗	压裂	0.0001 ~0.001	极致密	1220~915
5~10	中渗	压裂 或酸化	10~20	中渗	压裂 或酸化	0.001 ~0.005	很致密	915~763
90~150	高渗	酸化	>20	高渗	酸化	0.005 ~0.1	致密	763~305
						0.1~1	接近 致密	305~153
						1~100	常规	153~61

4) 有效渗透率与压裂液综合滤失系数的二次方成正比，即压裂液的滤失量随有效渗透率的增加而增大，而滤失系数与裂缝长度成反比。因此，在优化压裂设计中，最佳裂缝缝长（可获得最大净现值时的裂缝长度）将随有效渗透率的增加而变短。

5) 有效渗透率是选择压裂支撑剂类型、尺寸与铺置浓度（确定施工砂液比）的主要依据。