

TUOSHA YALIE JISHU

# 脱砂压裂技术

© 谢桂学 著

中国石油大学出版社

TUOSHA YALIE JISHU

# 脱砂压裂技术

常州大学图书馆  
藏 谢桂书 章

中国石油大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

脱砂压裂技术/谢桂学著. —东营:中国石油大学出版社, 2011. 4

ISBN 978-7-5636-3469-9

I. ①脱… II. ①谢… III. ①脱砂 ②压裂 IV. ①TE357.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 064345 号

书 名: 脱砂压裂技术

作 者: 谢桂学

---

责任编辑: 高 颖 穆丽娜(电话 0532—86981531)

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: [shiyoujiaoyu@126.com](mailto:shiyoujiaoyu@126.com)

印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532, 0546—8392563)

开 本: 180×235 印张: 10.25 字数: 150 千字

版 次: 2011 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 48.00 元

# 前言 ··· PREFACE

作为开发低渗透油气田的一项主要技术措施,水力压裂已经在现场得到了广泛应用,发挥了巨大的作用。水力压裂所依赖的相关理论和技术方法虽然在某些方面还不够成熟,但至少已经形成了相应的理论和技术体系。

与此相对应的是,针对中高渗透油田发展起来的脱砂压裂技术虽然也在现场应用了多年,但这种与常规压裂技术有着很大差别的技术措施一直没有形成其独特的理论和技术体系,甚至有一些基础的理论或技术问题都还没有明确答案。例如,为什么要实施脱砂压裂?如何实现脱砂压裂?怎样保证脱砂带的连续和稳定?脱砂带对裂缝的控制作用机理是什么?脱砂之后的裂缝扩展规律是什么?满足脱砂压裂要求的工程设计方法有何特别之处?在施工现场如何监测并有效地控制脱砂压裂过程?等等。所有这些问题在常规压裂理论中并未涉及,其中只有少数问题是在部分文献中简单提到的,如脱砂之后的裂缝一维扩展规律和脱砂压裂过程的现场监测方法等。

一项工程技术已经在现场应用多年却一直没有比较系统的理论体系,这种现象听起来似乎有些荒谬。但是,在石油开发技术领域,类似的现象不仅不荒谬,甚至还不是个别现象。像石油开发这类矿业开发行业,其开发理论和其中所应用的某些技术本身并不是某一独立学科,而是多学科的交叉复合体或者多学科的联合应用。例如,水力压裂只是石油工程技术体系中的一项专门技术,但它至少涉及地质学、岩石力学、渗流力学、流体力学、传热学和高分子化学等多个学科,不仅研究对象复杂特殊,而且在某些关键环节上缺乏必要的室内研究手段(例如压裂过程的物理模拟)和矿场验证技术手段(例如对实际裂缝状况的直接测试)。所以,在

## 脱砂压裂技术

这个领域,有些技术问题已经在矿场试验了甚至推广应用了,但在教科书或技术文献中找不到相关的理论内容,或者没有总结升华成为一套较为完整的理论和技术体系。“脱砂压裂”这一压裂技术分支目前就处于这样的一种状态。

理论来源于实践,理论只有得到总结、提炼、升华之后才能更好地用于指导实践。

作者多年来从事脱砂压裂技术的研究和实践,对上述问题做过一些初步的模拟计算、实验研究和理论分析工作。在此基础上,作者试图做一些理论和技术归纳工作,提出一些初步认识供大家研究参考,希望可以起到“抛砖引玉”的作用。由于作者水平所限,加之书中许多章节的内容为首次探讨,因此有些内容的研究分析深度还比较肤浅,认识也可能是片面的,敬请读者批评指正。

作 者

2011年1月

## 内容提要

脱砂压裂是有别于常规加砂压裂的一种特殊压裂工艺方法,它可以在一定程度上改变裂缝的正常尺寸比例,实现充填“短宽裂缝”的特殊目的,以满足某些中高渗透油藏压裂改造的特殊需要。

全书分为七章。第1章简要概述了压裂技术体系的主要研究领域和脱砂压裂的特殊研究要求。第2章简要介绍了脱砂压裂技术的产生和发展历程,并从压裂地层流体流动模式研究入手,分析了中高渗透地层实施脱砂压裂的必要性。第3章论述了裂缝周边脱砂微观机理和脱砂技术条件。第4章探讨了裂缝周边脱砂带对裂缝扩展的控制作用机理。第5章论述了脱砂前的裂缝三维扩展规律和脱砂后的裂缝一维变化特征。第6章总结了脱砂压裂设计方法,包括脱砂时刻的设计和脱砂时间的限定,以及液量分配设计方法等。第7章是现场应用技术部分,介绍了脱砂压裂过程的监测控制方法、脱砂压裂技术的适用领域及部分试验井例。

# 目 录 ..... CONTENTS

<b>第 1 章 压裂概述</b> .....	1
1.1 压裂体系的构成 .....	1
1.2 水力加砂压裂的理论体系及主要研究领域 .....	4
1.3 水力加砂压裂的技术体系及主要研究领域 .....	16
1.4 脱砂压裂技术的特殊研究领域 .....	46
1.5 小结 .....	47
<b>第 2 章 脱砂压裂技术的理论基础</b> .....	48
2.1 脱砂压裂技术的产生与发展 .....	48
2.2 脱砂压裂的概念 .....	50
2.3 脱砂压裂的理论基础——压后地层流体流动模式研究 .....	54
2.4 小结 .....	62
<b>第 3 章 裂缝周边脱砂机理及脱砂条件</b> .....	63
3.1 基本假设 .....	63
3.2 裂缝周边脱砂过程描述 .....	63
3.3 裂缝周边脱砂机理分析研究 .....	64
3.4 裂缝周边脱砂技术条件 .....	76
3.5 小结 .....	77
<b>第 4 章 脱砂带对裂缝扩展的控制作用原理</b> .....	78
4.1 基本假设 .....	78
4.2 砂桥对裂缝扩展的控制作用——脱砂带质量分析 .....	79
4.3 关于强化脱砂带质量的工程方法的讨论 .....	84
4.4 小结 .....	85

## 脱砂压裂技术

<b>第5章 脱砂压裂裂缝扩展规律研究</b> .....	87
5.1 压裂过程中井筒及裂缝温度场计算 .....	87
5.2 脱砂前的裂缝三维扩展规律研究 .....	95
5.3 脱砂后的裂缝一维变化特征研究 .....	102
5.4 小结 .....	105
<b>第6章 脱砂压裂工程设计方法</b> .....	107
6.1 压裂液的实验评价及数模优选 .....	107
6.2 支撑剂的选择原则 .....	115
6.3 脱砂时刻的设计和脱砂后施工时间的限定 .....	118
6.4 压裂液的液量分配优化设计 .....	120
6.5 小结 .....	121
<b>第7章 现场应用技术研究</b> .....	123
7.1 脱砂过程的现场监测方法 .....	123
7.2 脱砂压裂技术的适用领域分析 .....	136
7.3 小结 .....	143
<b>参考文献</b> .....	144



# 第 1 章 压裂概述

压裂作为一项非常重要的油层改造技术措施,已经经历了几十年的发展,其理论和技术体系也在研究和实践的过程中逐渐得以丰富和发展。但是,压裂作为一项涉及多个学科的矿场综合应用技术,其部分理论环节和技术环节至今还不够成熟,个别环节甚至还相当薄弱。

本书后面几章将要重点介绍的脱砂压裂属于水力加砂压裂的技术范畴,它与常规加砂压裂相比既有共同之处又有其特殊之处。为了全书章节内容的系统性和完整性,也为了便于读者宏观地了解压裂理论和技术的基本状况,特别添加了本章。笔者按照自己的理解和认识对相关方面进行了简单的归纳梳理和评述,仅供读者参考。

为了突出本书的主体——脱砂压裂部分,在本章内容中,凡是一般压裂书籍中涉及的内容都只做简单提示和评述,不做详细论述。

## 1.1 压裂体系的构成

### 1.1.1 压裂的分类

对任何技术体系而言,从不同的角度就会有不同的分类方法,压裂技术的分类也不例外。通常习惯于按照技术的关键特征,或者针对技术的应用对象进行分类。

到目前为止,已经有三大类压裂技术:爆炸压裂、高能气体压裂(或爆燃压裂)、水力压裂。其中,水力压裂是相对最成熟、效果最好和最常用的一种压裂技术。

水力压裂又可以细分为加砂压裂和不加砂压裂,其中,加砂压裂是水力压裂中最常用的一种压裂技术。不加砂压裂包括酸压裂和只用于录取技术资料的小型压裂(Mini-Frac 或 Data-Frac)。加砂压裂还可细分为针

## 脱砂压裂技术

对低渗透地层的常规压裂和针对中高渗透地层的脱砂压裂。相比之下，常规加砂压裂技术较为成熟，应用较多。

以上分类结果可以用图 1-1 表示。不同压裂压力特征示意图如图 1-2 所示。

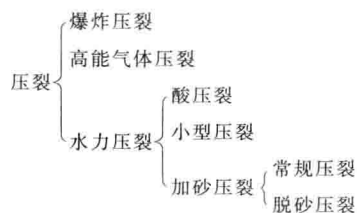


图 1-1 压裂技术分类示意图

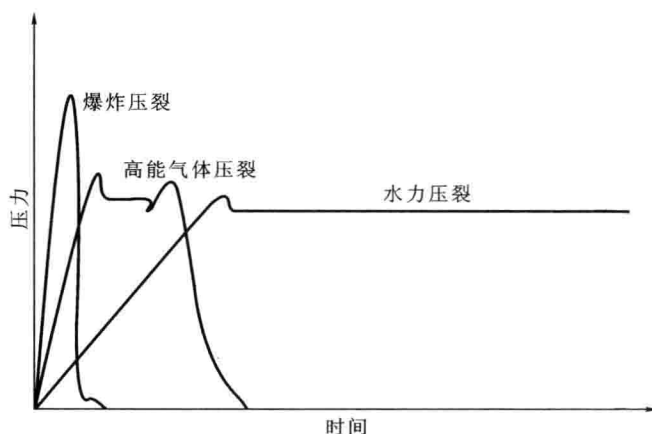


图 1-2 不同压裂压力特征示意图

爆炸压裂依靠瞬间压力冲击波“炸裂”近井地层，形成放射状不规则微细裂缝，但由于其升压时间极短( $\mu\text{s}$ 级)，可控性很差，容易对井筒造成破坏甚至导致施工危险事故，所以一直没有被推广应用。

高能气体压裂(HEGF—High Energy Gas Fracturing)又称爆燃压裂，是通过高温高压气体在井底附近地层形成放射状不规则微细裂缝的，其升压时间为 ms 级(一般应控制在 100 ms 以内)，有一定的可控性，如果设计和施工操作正确，一般不会对井筒造成破坏。为了保护套管和保证压裂效果，一般应将峰值压力控制在 100 MPa 以内，相应的升压时间控制在 3~5 ms 以上。该项技术在 20 世纪 90 年代中期曾经形成过一小波矿场试验高潮，但终因总体效果不佳而消退。如果对其核心技术环节——弹

药选型和设计控制技术加以改进,并制定严格的选井选层和设计施工标准,应该还会有一定的应用价值。但对它的技术定位永远是辅助性油层改造措施(近井解堵措施),始终不可能替代或超越水力加砂压裂技术作为油层改造主导措施的地位。

酸压裂是特别针对灰岩地层或者灰质含量很高的地层所采取的油层改造措施。它和加砂压裂的造缝机理是一致的,所不同的是压裂过程中伴随着酸-岩反应过程,井底和地层近裂缝区域的温度场模拟计算更为复杂,不需要充填支撑剂。总体来说,该技术是相对比较成熟的,但因该类地层较少,应用井次、规模和应用领域受到限制,在压裂体系中只能是从属地位。

小型压裂(Mini-Frac)按照其功用有时也叫取资料压裂(Data-Frac),不加砂,可以按照不同设计目的变化泵注排量,液量规模很小,以确保压开地层为标准。该压裂的主要作用是落实地层破裂压力、压裂液综合滤失系数和压裂液造缝效率等重要参数,以便修正后续的加砂压裂。因此,这种压裂措施一般不单独实施,而是作为正式加砂压裂的前奏或一个辅助性措施。因为延长了施工周期、增加了总体压裂成本,该项措施在现场应用得不多,一般只在很重要的区块和资料不落实、施工难度较大的井上应用。

综上所述,在各种压裂技术措施中,水力加砂压裂是技术上相对较为成熟、现场应用最多和应用效果最好的一种压裂技术。

### 1.1.2 水力加砂压裂的细分

以上从大类上对几种主要的压裂方式进行了归类、简述和评价,下面将论述重点集中到水力加砂压裂上面。就水力加砂压裂而言,如果从不同的角度和侧重点来划分,又可以细分为多种技术分支,其中重点的、有特色的几种压裂工艺方法将在1.3小节中进行简要介绍。

从井筒形态的角度,水力加砂压裂可以分为直井(斜井)压裂和水平井压裂。其中前者是绝对主体,后者发展较快,近几年在国内开始了现场试验应用,取得了初步的试验效果。

从压裂地层形态的角度,水力加砂压裂可以细分为单层压裂、多层笼统压裂、多层投球暂堵压裂、机械分层压裂和限流压裂等。从应用井次来

讲,前面两种压裂方式因工艺简单而最常用,后面三种压裂方式针对性较强、技术特色鲜明。

从压裂液的角度,水力加砂压裂可以分为水基压裂液压裂、油基压裂液压裂和泡沫压裂液压裂,分别简称水基压裂、油基压裂和泡沫压裂。其中前者是绝对主体,后两种是辅助措施。油基压裂和泡沫压裂对保护油层、改善压裂增产效果具有特殊优势(特别是对强水敏地层或高漏失地层),现场试验效果较好,但因压裂成本高或工艺较复杂等原因一直未能得到广泛应用。

如果从地层渗透性条件和压裂改造的主要目的来划分,低渗透地层所需要的是以增产为目的,以长裂缝为特征的常规加砂压裂方式,而中高渗透地层所需要的是以防砂稳产为目的,以短宽裂缝为特征的脱砂压裂方式。前者应用广泛,理论和工艺技术相对较成熟;后者是近 20 年来将压裂应用领域拓展延伸而发展起来的新技术,它在脱砂之前的压裂阶段是常规加砂压裂,但在脱砂之后的压裂阶段有一些特殊的环节完全不同于常规加砂压裂,需要做进一步的研究分析和探讨,是本书将要重点论述的内容。

## 1.2 水力加砂压裂的理论体系及主要研究领域

### 1.2.1 岩石破裂机理及裂缝形态

当岩石内部孔隙压力达到最小主应力和岩石破裂抗张强度之和时,就会产生人工压裂裂缝。这个压力就是井底破裂压力,通常可以用压裂中途或结束时的瞬时停泵地面压力加上井筒液柱压力求得,或者用井底破裂压力反算地层的最小主应力。

$$p_f = \sigma_{\min} + \sigma_t \quad (1-1)$$

$$p_f = ISIP + p_h \quad (1-2)$$

式中  $p_f$ ——井底破裂压力,MPa;

$\sigma_{\min}$ ——最小主应力,MPa;

$\sigma_t$ ——岩石破裂抗张强度,MPa,一般致密砂岩为 2~3 MPa;

ISIP——压裂瞬时停泵地面压力,MPa;

$p_h$ ——井筒液柱压力,MPa。

根据岩石所处的三维压应力状态,裂缝面一定是垂直于三维压应力中的最小主应力的方向。当垂向主应力为最小主应力时,裂缝形态为水平裂缝。但这种情况在国内还十分罕见,仅在大庆等个别油田的浅层压裂时遇到过。

通常情况下,水平两向主应力中一个为最大主应力,另一个为最小主应力,垂向主应力介于两者之间,即  $\sigma_{\max} > \sigma_v > \sigma_{\min}$ ,裂缝形态为垂向裂缝,裂缝走向顺应最大主应力方向,垂直于最小主应力方向。这是国内矿场发现最多的情形。

有两个方面的现场测试结果能够支持上述观点:一是缝高测试结果;二是裂缝方向检测结果。能够明确测试出上述任意一种结果,肯定就是垂向裂缝。这两个方面的测试原理和方法将会在后面介绍,这里暂且列出部分井的测试结果,见表 1-1 和图 1-3。

表 1-1 胜利油田部分井缝高测试结果

井号	井段/m	层厚/层数	井温法测定缝高/m	同位素法测定缝高/m
Y11-33	3 099~3 104.4	5.4 m/1	15.3	13.6
Y11-X42	3 342~3 359	9.6 m/3	21.8	
Y11-20	3 060~3 150	4.8 m/1	16.1	15.7
Y3-7-11	3 336~3 346	10 m/1	25.6	22.5
Y3-6-19	3 394~3 346	14.8 m/1	22.8	
Y5-0-3	3 252.5~3 266	13.5 m/1	28.5	
Y37-11	3 320~3 330	10 m/1	14.7	14.2
L8-7-11	2 850~2 868	14.3 m/3	30.9	
L8-6-7	3 019~3 032	12.6 m/1	26.4	
L8-3-5	2 946~2 960	14 m/2	18.0	
N20-12	3 032.6~3 047.6	12.7 m/2	22.1	21.6

该部分内容属于岩石力学范畴,而且可以进行岩石破裂室内实验研究和部分现场测试分析,因此可以说是比较成熟的部分。

### 1.2.2 垂直裂缝扩展规律

垂直裂缝的扩展规律是指裂缝在缝长、缝宽和缝高等三维方向上的发展变化规律。为了便于描述和研究,通常需要将其归结为某一类型的

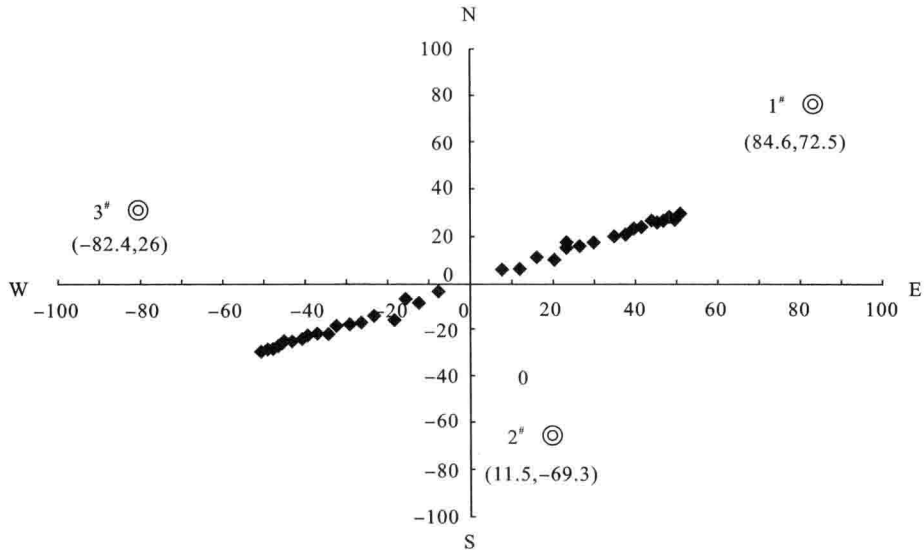


图 1-3 G17-15 井裂缝方向检测结果(压裂震源法,单位为 m)

裂缝模型。随着认识的提高和计算机等技术手段的进步,垂直裂缝扩展模型先后经历了二维模型、拟三维模型和全三维模型等不同阶段。

二维裂缝扩展模型(2D)假定缝内液体在缝长方向作一维流动,裂缝在长度和宽度方向作二维扩展,缝高恒定不变。最典型的二维裂缝扩展模型是 PKN 模型。该模型由 Perkins 和 Kern 于 1961 年提出,后经过 Nordgren(1972 年)和 Nolte(1979 年)发展改进而成,是当时较为常用的模型之一。受当时认识水平、计算手段和压裂水平(单井压裂规模普遍较小)等方面的限制,期望压裂裂缝可能会受油层上下的泥岩隔层所阻挡而只在压裂目标层段内发展延伸,因而假定缝高恒定。但越来越多的缝高测试结果表明,二维模型的计算误差太大,缝高恒定的假设前提逐渐被否定,从而逐渐发展形成了三维模型。

拟三维裂缝模型(P3D)假定缝长、缝高、缝宽三维裂缝尺寸同时扩展,但缝长远远大于缝高和缝宽,液体在缝内仅在缝长方向进行一维流动。这样的假定既能使计算结果基本接近实际情况,又能大幅度降低数学处理难度和运算量,因而从 20 世纪 80 年代中期至今仍被广泛接受和采用。

全三维模型(3D,也称真三维模型或三维模型)假定缝长、缝宽、缝高三维尺寸同时扩展延伸,裂缝内液体在缝长和缝高方向同时流动,忽略

液体在缝宽方向的流动。该类模型的理论假设更接近实际情况,但数学模型的复杂程度也大大增加。目前 3D 模型和 P3D 模型均有应用。

压裂裂缝的数学模型从早期的二维模型(2D)逐渐发展到拟三维模型(P3D)和全三维模型(3D),模型越来越先进和复杂。但无论哪种数学模型,都必须做出一些相对理想化的基本假设和简化处理,因为实际地层条件和裂缝扩展过程千差万别。裂缝的扩展过程至今无法开展真正的室内模拟实验,矿场上也没有什么可靠的测试技术手段能够监测裂缝在地层内部的实际状况(如裂缝面的实际形状和缝宽的变化情况等),这就给裂缝扩展规律的理论研究和数学模型的改进、完善造成了很大的技术障碍——理论研究得不到可靠的检验,这也是科研领域最可怕的事情。不仅如此,对裂缝扩展过程的研究还涉及地质学、岩石力学、传热学、压裂液流变学和渗流力学等多个学科的内容,研究难度大、验证手段少,可以说是压裂理论研究和发展的主要瓶颈之一,也是今后要努力寻求突破的主要方向之一。

### 1.2.3 支撑剂的输送和充填理论

对加砂压裂来说,压开地层形成裂缝只是前提和手段。按照预先设计期望的状态将高强度、高渗透性的颗粒支撑剂充填进裂缝使之保持“张开”状态,发挥其导流作用才是压裂的目的。所以,支撑剂的输送和充填环节也很重要。

在井筒的管流输送阶段,一般都认定砂浆呈段塞状整体推进,即支撑剂颗粒和压裂液之间没有相对运动,而是同步前进的。主要基于两个方面的分析:一是在井筒的管流输送阶段,压裂液受流动剪切和温度升高的影响较小,压裂液冻胶黏度高、悬砂性能好;二是管流速度快、携带能力强。上述假定和分析同时可以得到室内实验和现场施工资料的验证:室内可以做静态和动态颗粒沉降实验(见第3章),压后探冲砂作业可以验证压裂过程中支撑剂在井底的沉降情况。总体来说,这个环节情况比较简单,认识基本到位。

砂浆进入裂缝后的运移输送过程要相对复杂一些。地层温度和裂缝剪切都会对压裂液的性能产生重要影响,而且这些影响在整个压裂过程中都在不断变化。另外,砂岩裂缝粗糙的壁面会对砂粒的运移产生一定

的阻碍作用,但这方面的作用有多大还没有见到相关的研究评价结论。关于压裂液的冻胶状态和流变性能的分析研究,在后面的相关章节中有专门的论述。

在 20 世纪 80 年代中期以前,压裂支撑剂在裂缝内的输送模式通常被认定为“沉降冲积模式”,即认为压裂液经过射孔孔眼和裂缝的剪切降解后已经不能悬浮密度较大的支撑剂颗粒,砂浆进入裂缝后一边向裂缝底部沉降积聚,一边被后续的流动液体冲刷携带向前移动,有些像河流三角洲的沉积模式。这在早期压裂液性能较差的情况下(比如,清水、KCl 防膨液、原油和未经化学改性处理的普通植物胶等都曾被用作压裂液)应该还是比较符合实际的。在这种情况下,裂缝充填较短,裂缝下部充填较好、上部充填差或者没有充填支撑。

随着优质压裂液的研发和不断更新换代,其耐温和抗剪切性能越来越好,砂浆在裂缝内以完全悬浮、层序状运移的所谓“全悬浮模式”被逐渐接受和广泛采用。这也是本书后面将要重点介绍的脱砂压裂的理论前提之一。

### 1.2.4 压裂液的流变特性

压裂液的性能好坏是关系到压裂施工成败和效果好坏的关键因素之一。评价压裂液的性能,最主要的就是研究评价其流变特性和滤失特性,其中前者是基础。

流体的流变特性其实就是指流体在流动剪切状态下的黏度变化特征。按照这一要素对流体进行分类,可以分为牛顿流体和非牛顿流体两大类。非牛顿流体又可以分为黏塑性流体、黏时性流体和黏弹性流体三类,其中黏塑性流体又细分为假塑性流体、胀塑性流体和宾汉型流体。现在使用的绝大多数交联冻胶压裂液属于假塑性流体这一类型。

#### 1) 牛顿流体

在给定温度和层流条件下,流体的黏度不随剪切条件而变化,而是恒定不变的。从流体力学的角度来讲,剪切应力和剪切速率是通过零点的线性关系,其斜率就是牛顿流体的黏度。

$$\tau = \mu D \quad (1-3)$$

式中  $\tau$ ——剪切应力,Pa 或 mPa;



$D$ ——剪切速率,  $s^{-1}$ ;

$\mu$ ——黏度,  $Pa \cdot s$  或  $mPa \cdot s$ 。

## 2) 非牛顿流体

在给定温度条件下,流体的黏度随剪切速率和剪切时间等剪切条件的变化而变化。

### (1) 黏塑性流体。

流体的黏度随剪切速率而变化。黏塑性流体又细分为以下三种。

#### ① 假塑性流体。

黏度随剪切速率的增大而减小。剪切应力和剪切速率是通过零点的非线性关系。

$$\tau = KD^n \quad (1-4)$$

$$\mu = \tau/D = KD^{n-1} \quad (1-5)$$

式中  $\tau$ ——剪切应力,  $Pa$  或  $mPa$ ;

$D$ ——剪切速率,  $s^{-1}$ ;

$K$ ——稠度系数,  $Pa \cdot s^n$  或  $mPa \cdot s^n$ ;

$n$ ——流动行为指数, 无因次, 对该类流体,  $0 < n < 1$ ;

$\mu$ ——黏度,  $Pa \cdot s$  或  $mPa \cdot s$ 。

#### ② 胀塑性流体。

流体的黏度随剪切速率的增大而减小。剪切应力和剪切速率是通过零点的非线性关系。

公式同式(1-4)和(1-5), 所不同的是, 其流动行为指数  $n > 1$ 。

#### ③ 宾汉型流体。

具有屈服应力的一种黏塑性流体。剪切应力和剪切速率是通过零点的线性关系。

$$\tau = \tau_y + \eta D \quad (1-6)$$

$$\mu = \frac{\tau}{D} = \frac{\tau_y}{D} + \eta \quad (1-7)$$

式中  $\tau$ ——剪切应力,  $Pa$  或  $mPa$ ;

$D$ ——剪切速率,  $s^{-1}$ ;

$\tau_y$ ——屈服应力,  $Pa$  或  $mPa$ , 固定值;

$\eta$ ——极限最小黏度,  $Pa \cdot s$  或  $mPa \cdot s$ ;