

6757

56575

油气田开发进修丛书

水力压裂原理

王 鸿 勋 编著



石油工业出版社



油气田开发进修丛书

水力压裂原理

王鸿勋 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书综合了国内外的经验,比较系统地从理论上介绍了油层水力压裂的造缝机理,以及各种类型的压裂液和支撑剂的作用原理和对其性能的要求,并且对压裂设计和不稳定试井在压裂中的应用作了较实际的介绍和分析。这对油田水力压裂的研究工作和现场的施工都有指导意义。

本书可供从事油层压裂研究工作的科研人员和油田矿场工程师学习参考。

油气田开发进修丛书
水 力 压 裂 原 理
王鸿勋 编著

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

顺义燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 12¹/₂印张 302千字 印1—1,500

1987年3月北京第1版 1987年3月北京第1次印刷

书号: 15037·2635 定价: 2.50元

进修丛书出版前言

当前世界科学技术发展日新月异，每年发表的科技论文在二千万篇以上，而文献的数量几乎是以每十年翻一番的速度递增；涉及多学科的油气田开发的技术进展及文献积累也不例外。因而从七十年代开始，各主要石油国家都越来越重视知识更新；重视在职继续教育，注意改善和提高技术素质；重视信息资源的开发，以促进油气田开发的现代化。例如国际著名的石油工程师协会(SPE)持续出版了评述型的石油技术专论丛书；美国石油地质家协会(AAPG)发行了该会讲师团在世界各地巡回进行继续教育的专题讲座系列；法国石油研究院(IFP)出版了一系列的提高型油田开发技术专著；荷兰及英国壳牌国际石油公司(Shell)也将历年培训教材以石油科学进展丛书的名义陆续出版；西德也出版了一套便携式入门型石油地质及工程基础丛书。这些具有不同特色、水平、范围的丛书竞芳争艳，反映了国际石油界对智力投资和人才开发的重视。

我国因十年动乱造成石油教育的青黄不接，专业图书供应缺乏，脱产进修、技术讯息交流都存在不少困难；党的十一届三中全会以后，在北京和各油田都曾举办了各种型的培训机构，但还远不能适应生产发展和技术进展的需要以及技术人员的自修要求。

中国石油学会石油工程学会根据上述情况，并根据北京油气田开发技术培训中心数年来的教学实践，决定邀请有关人员成立“油气田开发进修丛书”编委会，聘请学有专长和实践经验丰富的专家教授，撰写若干专题性著作，并将陆续出版为广大油气田开发技术队伍服务。第一批的选题包括：砂岩油藏的沉积学基础，气藏开发工程基础，油气田开发测井基础，油藏物理基础，渗流力学基础，试井分析理论基础，油藏工程分析方法，油藏数值模拟基础，自喷采油基础，机械采油基础，酸化压裂原理，分层注采工艺，油田化学基础以及提高油藏采收率方法等。今后还将按技术进展和生产及培训需要，继续增加选题，邀请更多人士参预丛书的编撰和审查。

丛书的读者对象是大专毕业和从事油气田开发实践的工程技术人员。它着眼于巩固专题基础，加强知识反馈，促进技术更新。它不同于高等学校教材，也不同于一般专著。丛书的各个专题将分系统、科学地介绍基本概念，基本理论与基本方法。力求理论联系生产实际，反映技术进展动向，阐明技术问题，同时将综合反映出油气田开发技术的多个侧面及其内在联系。

考虑到有关专业术语、符号、量制尚待统一制定，因此丛书的专业符号尽量采用国际比较通用的石油工程师协会(SPE)、测井分析家协会(SPWLA)的标准符号；量制则按国家颁布的标准以求一致；关于专业术语将尽量协调一致，避免一义数名、一名多义。

由于我们的工作经验不足，在编辑过程中可能会出现一些缺点和问题，请广大读者看后提出宝贵意见。

中国石油学会石油工程学会

一九八三年七月

绪 言

水力压裂是油气井增产，水井增注的一项重要技术措施。当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，在井底附近憋起超过井壁附近地应力及岩石抗张强度的压力后，即在地层中形成裂缝。随着带有支撑剂的液体注入缝中，裂缝逐渐向前延伸。这样在地层中形成了足够长度、一定宽度及高度的填砂裂缝。由于它具有很高的渗透能力，使油气能够畅流入井，起到增产增注的作用。

五十年代水力压裂多做为单独一口井的增产增注措施来使用。近若干年来由于它在一定条件下，能起到调整油气层开采中三大矛盾、提高注水效果、加快油气田开发速度的作用，所以它在油气田的开发与开采中的意义，已远远超过一口井增产增注的作用，而成为油气田开发的有力手段。

近年来，国外在开发极低渗透率气田中大量使用水力压裂，使本来没有工业价值的气田成为有相当工业储量及相当规模的大气田。从这个意义上来说，水力压裂不仅在油气井增产、油气田开发方面起作用，而且在油气资源的勘探上也起着巨大作用。

由于上述情况，水力压裂在理论、设备、工艺各方面都发展得很快。

我国的压裂工作始于五十年代初期，三十年来为高速发展我国的石油工业，在油气田勘探，开发开采中起了日益重要的作用。

压裂在油气田勘探、开发与开采中成为有效的技术措施，是因为它从下述几方面提高了低渗透率油气层的生产能力。

1. 沟通油气储集区

由于地质上的非均质性，地层中有产能的地区并不一定与井底相连通。例如碳酸盐岩地层中的裂缝带、砂层中的透镜体、三角洲沉积的砂体等不一定都被井所钻穿。通过压裂所形成的人造裂缝，可以将它们与井底沟通起来，就增加了新的供油区。大型压裂压出的较长裂缝，甚至可将几个透镜体压穿。沟通油气储集区是压裂增产的重要原因。

2. 改变流型

在压裂前，地层中的流体是径向地流向井底，压裂后由于地层中形成了一条高导流能力的填砂裂缝，从井底延伸到地层深处。所以流体就先单向地进入裂缝中，然后单向地流入井底。由原来的径向流改变为单向流，就节省了大量能量。

高导流能力，裂缝的增产能力取决于裂缝的导流能力与地层系数的比值。有较好的向裂缝供油气能力，再加上高的裂缝导流能力，增产倍数相当可观。

3. 克服井底附近地层的污染

压裂后的裂缝可以解除井底污染所造成的低产后果。为此目的所进行的压裂可以是小规模，缝长只要穿过堵塞区的深度即可，但是对缝的导流能力却要求很高，因为井底附近裂缝的渗透率在油气生产中是个关键。

解除井底附近的堵塞并不是压裂措施的主要任务，但是在压裂过程中必然会产生这种作用。

虽然水力压裂已在开采低渗油气层中取得了很好的效果，若是不注意有效地使用此项技术，压裂后不增产的例子也是很多的。

进行压裂所使用的地面设备要具备足够的压力、排量及混砂的能力。在采用机械分层压裂技术时，井下管柱及工具也十分重要。但是地面上顺利施工只能为压裂后油气井增产提供必要的前提，并不一定能保证增产。因为压裂后增产与否主要取决于地层条件及所采用的压裂液与支撑剂，以及施工中的压裂工艺参数是否得当。

为了在地层中造成有增产效果的裂缝，需要了解与造缝有关的地应力大小及其分布，和地层破裂时的压力。这些因素不仅控制着裂缝的几何尺寸，并且与正确地选择地面与井下的设备有关。压裂液的性能和数量与裂缝的几何尺寸、砂子在裂缝中的分布等密切相关。但是也要注意压裂液进入地层后与地层岩石中的矿物和其中的流体可能起不利于渗流的反应。这就需要选用那些有造缝能力又有携砂能力的压裂液，以避免或尽量减少其对地层的伤害。

压裂用的支撑剂的粒径、数量及泵入顺序，不但要适应地层的闭合压力及嵌入压力的要求，并且要满足填砂浓度及填砂缝长的要求。因为只有满足了这些要求，才能具备增产的可能性。

由上可见，进行有成效的压裂，必须使地面工作与地下情况相结合，首先应立足于地下。否则，施工就会带有某种程度的盲目性，很难取得满意的效果。

本书从水力压裂作业应立足于地下的思想出发，力图使读者对水力压裂的工艺原理有比较系统的了解，并初步掌握根据地下情况进行压裂设计的方法。所以把重点放在压裂液的性能、支撑剂在缝中的分布及造缝几何尺寸的各种计算方法等内容上。从原理出发着重于正确地应用。

为适应在压裂设计中使用计算机的需要，本书还介绍了关于裂缝几何尺寸及支撑剂分布的数值解法。

近年来在评价水力压裂效果方法方面有了较大的进展，主要是：

1. 将室内研究与现场施工资料结合起来进行评价。利用施工过程中或停泵后的井口压力变化，了解地下所发生的情况。例如压后裂缝的几何尺寸、压裂液的利用效率及滤失系数等。这些参数是难以从理论计算或实验室中准确取得的。本书“施工压力的分析与应用”一章专门讨论了这个问题。希望对读者在了解这些参数方面能够有所帮助。

2. 开始使用不稳定试井方法和利用生产中压力不稳定过程，来评价水力压裂在地层中造成裂缝长度及导流能力的大小。关于这部分内容在第七章中讨论。

3. 井温测试是传统的认识裂缝位置及高度的评价方法，本书也在第八章中介绍了井温曲线的解释及它的一些进展。

分层压裂是多油层油田增产的有效工艺措施。本书在最后一章中介绍了这方面的技术和计算方法。

限于作者的水平，在本书的内容取舍和编写层次等各方面肯定会存在欠妥甚至错误之处，欢迎读者指正，以便于再版时予以改正。

目 录

绪言

第一章 造缝机理	1
第1节 造缝	1
一、地应力及其分布	1
二、地质构造力对地应力的影响	2
三、井壁上的应力	3
四、造缝条件	5
第2节 破裂梯度(破裂压梯度)	7
一、破裂梯度的计算方法	7
二、破裂梯度的统计方法	8
第3节 裂缝的延伸	9
一、延伸压力	10
二、闭合压力	10
三、天然微隙张开的应力条件	11
第4节 裂缝的方位	12
一、声波测定	12
二、地电测定	12
三、水动力学试井	12
四、测量井径的变化	12
五、岩心测井	12
第二章 压裂液	14
第1节 压裂液的类型	15
一、水基压裂液	15
二、泡沫压裂液	18
三、油基压裂液	19
四、其他压裂液	19
第2节 压裂液的滤失性	19
一、压裂液的滤失系数	19
二、利用分压降求滤失系数	25
三、有限厚度地层水平缝滤失速度的计算方法	28
四、防滤失添加剂	30
第3节 压裂液的流动性质	31
一、各类压裂液的流变曲线	31
二、非牛顿液体流变性质的测定	32

三、不同流动条件下、稠度系数的相互关系	39
四、摩阻计算	42
第4节 压裂液对地层渗透性的伤害	43
一、压裂液与地层岩石及其中流体的配伍性	44
二、压裂液在孔隙中的滞留	44
三、残渣及其他的堵塞作用	44
附录 I、管壁上的剪切速率与流动特征值的关系	45
附录 II、裂缝中流动方程	46
附录 III、评价压裂液标准程序的推荐作法 (摘编)	47
第三章 支撑剂、导流能力及支撑剂的沉降	52
第1节 支撑剂	52
一、支撑剂的类型	52
二、支撑剂的要求	53
第2节 填砂裂缝的导流能力 (导流率)	57
一、导流能力的测定	57
二、影响导流能力的因素	59
第3节 支撑剂类型、粒径及浓度的选择	65
一、确定导流能力	65
二、选择支撑剂	66
第4节 支撑剂的沉降	67
一、单颗粒的自由沉降	68
二、影响砂粒沉降的因素	71
三、砂粒在幂律液体中的沉降	72
四、砂粒在冻胶中的动沉降实验	74
第四章 支撑剂在裂缝中的分布	76
第1节 垂直缝高粘压裂液	76
一、计算方法	76
二、计算步骤	78
三、方法的评述	79
第2节 垂直缝低粘压裂液	80
一、支撑剂在缝高度上的分布	80
二、平衡流速	80
三、砂堤的堆起速度	82
四、平衡时间	83
五、支撑剂在垂直缝中的实际分布	84
第3节 综合加砂方法	85
一、计算方法	85
二、计算结果	85
第4节 水平裂缝中砂的分布	88

一、三个流域	88
二、砂浓度在三个流域中的分布	90
第五章 压裂设计	94
第1节 裂缝几何尺寸的确定与效果预测	95
一、缝长(卡特模式)	95
二、缝宽(珀金斯模式)	97
三、缝高	98
四、其他计算模式	99
五、缝中液体界面的计算方法	102
六、压裂效果的估算方法	105
七、压裂设计的基本步骤	107
第2节 裂缝几何尺寸及缝中砂分布的数值解法	109
一、体积平衡等式	109
二、缝长与缝宽	111
三、砂浓度分布与沉砂剖面	112
第3节 泡沫压裂的计算与设计	112
一、泡沫干度与氮气用量的计算	113
二、泡沫液流动的几种性质(稳定泡沫液的性质)	113
三、泡沫液体的滤失	115
四、泡沫压裂设计	115
五、泡沫压裂的优缺点	117
第4节 前置液酸压设计	117
一、酸压的裂缝几何尺寸的计算	117
二、酸液的滤失速度	117
三、裂缝导流能力	118
四、酸压设计	119
五、影响酸压效果的几个因素	121
第5节 温度对压裂设计的影响	121
一、压裂过程中的井温分布	121
二、压裂液在缝中的温度变化	124
三、考虑温度变化的压裂液程序	125
附录 I、卡特裂缝面积公式的求解	126
附录 II、X值的补差函数表(计算裂缝面积用)	128
附录 III、使用低粘压裂液时的卡特面积计算公式	129
第六章 施工压力的分析及应用	131
第1节 小型压裂测试	131
一、确定裂缝的延伸压力	132
二、确定裂缝的闭合压力	132
三、测井温以确定裂缝高度	132

第 2 节	压裂过程中的压力分析	133
一、	压力曲线的四种类型	133
二、	压力曲线的分析	134
第 3 节	利用压降曲线确定压裂参数	135
一、	图板曲线的绘制	136
二、	曲线拟合方法与步骤	139
第七章	不稳定试井在压裂中的应用	144
第 1 节	表皮系数	144
一、	确定油井表皮系数的方法	144
二、	确定气井表皮系数的方法	150
第 2 节	确定裂缝长度及填砂裂缝导流能力	154
一、	单向流	154
二、	双单向流	156
三、	地层中的单向流	157
四、	假径向流	158
第 3 节	曲线拟合法在气井垂直缝压裂生产预测中的应用	159
一、	有限导流率(条件)下的生产过程	159
二、	图板曲线的应用	160
第八章	压裂工艺技术	168
第 1 节	分层压裂	168
一、	堵球法分层压裂	168
二、	限流法分层压裂	176
三、	封隔器分层压裂	179
四、	选择性压裂	179
第 2 节	用人造阻挡层控制裂缝高度	180
一、	浮力式导向剂的性能要求	181
二、	人造阻挡层的施工	181
第 3 节	井温曲线解释	181
一、	井温曲线的利用	182
二、	热鼻现象的分析	183
参考文献		184
本书使用的非许用单位与法制单位换算表		188

第一章 造缝机理

在这一章里要介绍在地层中形成裂缝的机理，裂缝的延伸，破裂压力的预测及裂缝方位的估计。根据岩石破碎力学的原理，说明在地下形成水平裂缝及垂直裂缝的条件。破裂压力的预测，对一个新区的水力压裂工作是有意义的。

第1节 造 缝

在水力压裂中，了解裂缝的形成条件，裂缝形态、方向对有效的发挥压裂在增产、增注中的作用都是极为重要的。但是由于地下情况的复杂性，对这些问题虽然作了很多工作，仍未得到很好的解决，这里介绍的是裸眼井的造缝理论，虽然与实际情况有不少出入，但仍然是一个值得了解的理论基础。

在地层中造缝，形成裂缝的条件与地应力及其分布，岩石的力学性质，压裂液的性质及注入方式等有密切关系。图 1.1 是压裂施工过程中，井底压力随时间变化的典型曲线。图中 P_F 是破裂压力， P_E 是延伸压力， P_S 是地层压力。

在致密岩石的地层里，向井内注入压裂液，井底压力达到 P_F 值后，地层破裂（图 1.1 中的 a）然后在较低的延伸压力 P_E 下，裂缝向地层深处延伸。在地层渗透率较高或存在微裂缝的情况下（图 1.1 中的 b），地层破裂时的井底压力并不比延伸压力有明显的升高。

这些现象反映了井底附近地层中，地应力的分布不同以及岩石在力学性质上的差异。

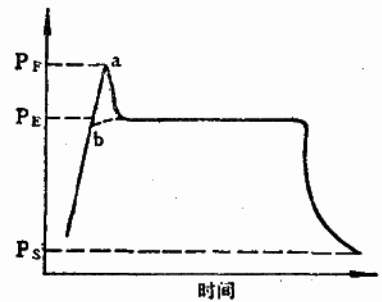


图 1.1 井底压力曲线
a—致密岩石；b—微缝高渗透岩石

一、地应力及其分布

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 ，及水平主应力 σ_x, σ_y 。

作用在单元体上的垂向应力来自上覆岩层的重量。一般可这样来估计此应力的大小：

$$\sigma_z = 0.23H \quad (1.1.1)$$

式中：H——地层深度，米；

σ_z ——垂向主应力，大气压或公斤/厘米²。

式 (1.1.1) 是考虑岩石的平均比重为 2.3 时导出的。这只是一个近似的估算值。从各个油气田统计得出的垂向应力变化范围为：

$$\sigma_z = (0.21 \sim 0.25)H \quad (1.1.2)$$

由于油气层中均有一定的孔隙压力（地层压力）部分上覆岩层的压力被多孔介质中的流体压力（孔隙压力） P_s 所支持，故有效垂向应力 $\overline{\sigma_z}$ 可表示为：

$$\bar{\sigma}_z = 0.23H - P_s \quad (1.1.3)$$

如果岩石处于弹性状态，岩石的水平主应力与垂向主应力的关系，可根据广义虎克定律求出，在 $\bar{\sigma}_x$ 的作用下，单元体在x轴方向上的应变为：

$$\epsilon_{x_1} = \frac{1}{E} \bar{\sigma}_x$$

同样， $\bar{\sigma}_y$ 及 $\bar{\sigma}_z$ 在x轴方向上的应变 ϵ_{x_2} 及 ϵ_{x_3} 分别为：

$$\epsilon_{x_2} = -\nu \frac{\bar{\sigma}_y}{E}, \quad \epsilon_{x_3} = -\nu \frac{\bar{\sigma}_z}{E}$$

式中：E——岩石弹性模量，公斤/厘米²；

ν ——岩石的波松比，无因次。

在X轴方向上的总应变为

$$\epsilon = \epsilon_{x_1} + \epsilon_{x_2} + \epsilon_{x_3} = \frac{1}{E} [\bar{\sigma}_x - \nu(\bar{\sigma}_y + \bar{\sigma}_z)]$$

因存在侧向应力的限制，侧向应变应为零，整理后得到：

$$\bar{\sigma}_x = \frac{\nu}{1-\nu} \bar{\sigma}_z \quad (1.1.4)$$

或表示为

$$\bar{\sigma}_x = \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_z - P_s) \quad (1.1.5)$$

式中： $\frac{\nu}{1-\nu}$ ——侧压系数。

实验室测到的岩石波松比，随岩石类型的不同而有差异，大约在0.15到0.30之间见表1.1。

砂岩是脆性材料，其强度极限与弹性极限比较接近。砂岩的波松比在0.15~0.27之间，那么：

$$\bar{\sigma}_x = (0.18 \sim 0.37) \bar{\sigma}_z \quad (1.1.6)$$

波松比 ν 愈大，水平应力愈接近于垂向应力。

二、地质构造力对地应力的影响

上述应力之间的关系受构造影响发生很大的变化。不仅是垂向应力与水平应力主要受构造力的控制并且水平应力中 σ_H 的两个应力 $\sigma_x \sigma_y$ 也彼此不一定相等。例如在逆断层或褶皱

表 1.1 各类岩石的波松比弹性模量值

岩 石	波 松 比	弹 性 模 量 公 斤 / 厘 米 ²
硬 砂 岩	0.15	4.4×10^5
中 硬 砂 岩	0.17	2.1×10^5
软 砂 岩	0.20	3.0×10^4
硬 灰 岩	0.25	7.4×10^5
中 硬 灰 岩	0.27	—
软 灰 岩	0.30	8.0×10^4

地带 (图1.2a) 水平应力要比垂向应力大得多, 甚至可大到3倍。在正断层地带, 水平应力 σ_H 可能只有垂向应力的1/3。

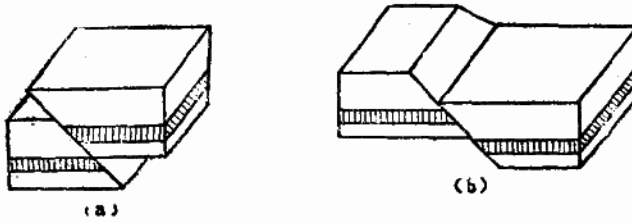


图 1.2 构造对应力的影响
(a) 一逆断层区域 $\sigma_H = 3\sigma_z$; (b) 一正断层区域 $\sigma_z = 3\sigma_H$ (图中 σ_H 是水平应力)

如果地质构造力以 σ_T 表示, 则可叠加在水平应力上的构造力, 可能介于两个应力之间,

$$0 \leq \sigma_T \leq 3\bar{\sigma}_z - \bar{\sigma}_z \left(\frac{\nu}{1-\nu} \right) \quad (1.1.7)$$

上式中的 $\bar{\sigma}_z$ 是上复岩柱重减去孔隙压力, 在不同深度的油层上是可以知道的。如果本地区存在可迭加在水平应力上的构造应力, 一定也是随深度而增加的。那么可假设 $(\sigma_T/\bar{\sigma}_z)$ 的比值为一常数, 构造应力 σ_T 的值可从处理压裂资料中得到。

如果岩石单元体是均质的各向同性材料, 当已知地层中各应力的大小, 岩石破裂时裂缝总是垂直于最小主应力轴, 因此裂缝的形态 (垂直或水平缝) 即可被确定 (图1.3)。

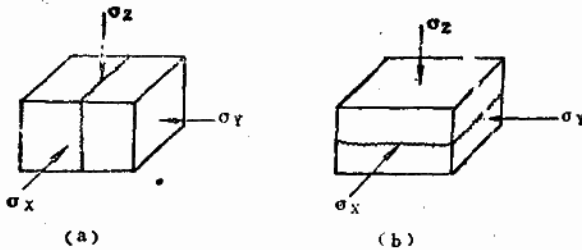


图 1.3 裂缝面垂直于最小主应力方向
(a) 一垂直裂缝 $\sigma_z > \sigma_x > \sigma_y$; (b) 一水平裂缝 $\sigma_y > \sigma_x > \sigma_z$

压裂后在地层中出现何种类型的裂缝, 取决于地应力中垂直主应力与水平主应力的相对大小。当 $\sigma_z > \sigma_H$ 时, 则出现垂直裂缝。此垂直缝的方位又决定于两个水平应力 σ_x, σ_y 的值, 如果 $\sigma_x > \sigma_y$, 则裂缝垂直于最小主应力 σ_y 、平行于 σ_x 的方位。否则当 $\sigma_y > \sigma_x$, 则裂缝垂直于 σ_x , 这种法则就是前面曾经讲到的, 裂缝总是垂直于最小主应力。从力学的观点上看, 裂缝总是产生于强度最弱、抗力最小的地方, 在地层中裂缝的出现也是如此。

三、井壁上的应力

1. 井筒对地应力及其分布的影响

钻井以后, 井底处的应力分布受井筒的影响, 这种影响在各向同性及均质岩层中, 可用弹性力学中无限大平板上钻一孔眼的理论, 加以说明。

图1.4 表示一无限大平板, 在x, y方向上分布着压应力 σ_x 与 σ_y , 并假设 $\sigma_x > \sigma_y$ 。此时在

孔眼壁上的周向应力 σ_θ 为:

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (1.1.8)$$

式中: r ——距孔眼中心线的距离,

a ——孔眼半径,

θ ——任意径向与 x 轴的夹角。

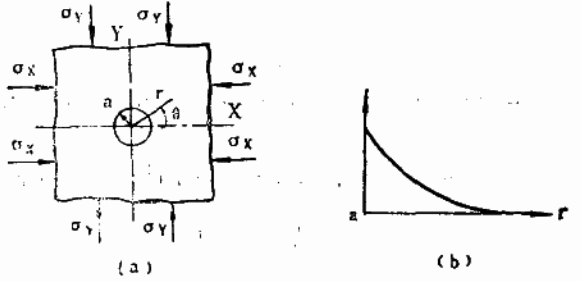


图 1.4 孔眼周围的应力分布

$$\text{当 } r=a, \theta=0^\circ \text{ 及 } 108^\circ \text{ 时,} \quad \sigma_{\theta, \min} = 3\sigma_x - \sigma_y \quad (1.1.9)$$

$$\text{当 } r=a, \theta=90^\circ \text{ 及 } 270^\circ \text{ 时} \quad \sigma_{\theta, \max} = 3\sigma_x - \sigma_y \quad (1.1.10)$$

说明最小周向应力发生在 x 轴上, 而最大周向应力却在 y 轴上。

而当 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_H$ 时, 周向应力 $\sigma_\theta = 2\sigma_x = 2\sigma_y = 2\sigma_H$, 说明孔眼壁上各点的周向应力相等, 参考式 (1.1.4)

$$\sigma_\theta = 2\sigma_x = \frac{2\nu}{1-\nu} \sigma_z \quad (1.1.11)$$

随着 r 的增加, 周向应力迅速的降低, 如图 1.4(b)所示。大约在几个井径之外即降低为原地应力值。这种应力分布指出, 由于孔眼的存在, 产生了应力集中。孔眼壁上的应力比远处的大得多。这是地层破裂压力大于延伸压力的一个重要原因。

2. 注入压力所引起的井壁应力

压裂过程中向井内注入高压液体使井底压力迅速提高, 井底压力必然产生井壁上的周向应力。如果把井筒周围的岩石看作是一个具有无限壁厚的厚壁圆筒, 根据弹性力学中的拉梅公式 (拉应力为负值)

$$\sigma_\theta = \frac{P_e r_c^2 - P_i r_s^2}{r_c^2 - r_s^2} + \frac{(P_e - P_i) r_s^2 r_c^2}{r^2 (r_c^2 - r_s^2)} \quad (1.1.12)$$

式中: P_e ——厚壁筒外边界压力, ($P_e=0$);

r_c ——厚壁筒外边界半径, ($r_c=\infty$);

r_s ——厚壁筒半径;

P_i ——注入时井底压力;

r ——距井轴半径。

在 $r_c \rightarrow \infty$ 时, $P_e=0$ 及 $r=r_s$ 时, 井壁上的周向应力为:

$$\sigma_\theta = -P_i \quad (1.1.13)$$

即由于井内的注入压力使井壁所产生的周向应力，与注入压力(井底)相等，但符号相反。

3. 形成滤失应力区

压裂液径向地渗入井底附近地层中，形成滤失应力区，此应力增大了井壁上的周向应力。

$$\sigma_{\theta} = (P_i - P_s) \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu} \quad (1.1.14)$$

式中： $\alpha = 1 - \frac{C_r}{C_b}$

C_r = 岩石骨架压缩系数；

C_b = 岩石体积压缩系数。

4. 井壁上的总应力

在地层破裂前，井壁上的应力应为由于井眼的存在，两个水平应力的差别而形成的应力、井内注入压力及压裂液渗透所引起的周向应力之和，

$$\sigma_{\theta} = (3\sigma_y - \sigma_x) - P_i + (P_i - P_s) \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu} \quad (1.1.15)$$

四、造缝条件

为使地层破裂，必须使井底压力高于周向应力及岩石的抗张强度。现在分述在不同条件下的破裂压力的计算。

1. 形成垂直裂缝

又分为压裂液滤失到井底附近地层中与非滤失两种情况。

(1) 存在滤失时 如果地层的破裂属于纯张应力破坏，那么当井内的注入压力 P_i 不断的增加，不但平衡掉原存在井壁上的周向应力，并且还稍大于岩石水平方向的抗张强度 σ_t^h 时，岩石将发生破裂。此时将满足下列条件，即

$$\bar{\sigma}_{\theta} = -\sigma_t^h$$

将上式代入 (1.1.15)、并将式 (1.1.15) 中的各种应力代之以有效应力， $\bar{\sigma}_y = \sigma_y - P_s$ ， $\bar{\sigma}_x = \sigma_x - P_s$ ， $\bar{\sigma}_{\theta} = \sigma_{\theta} - P_i$ 。此时的有效周向应力为周向应力减去发生滤失后的井壁上多孔隙介质的孔隙压力 P_i ，而不是地层压力 P_s 。经过整理后，得到

$$P_F = \frac{3\bar{\sigma}_y - \bar{\sigma}_x + \sigma_t^h}{2 - \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu}} + P_s \quad (1.1.16)$$

这里的破裂压力 P_F 即为破裂时的注入压力 P_i ，式中的 $\alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu}$ 的值为，

$$0 < \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu} < 1$$

在孔隙压力为零的岩样上得到的实验结果如式 (1.1.16)，但在分母的第二项上乘以系数 0.9。

(2) 无液体渗透时 由于没有压力较高的液体渗透出井壁，故此时井壁上的孔隙压力仍为 P_s ，有效周向应力 $\bar{\sigma}_{\theta}$ 为，

$$\bar{\sigma}_{\theta} = \sigma_{\theta} - P_s$$