

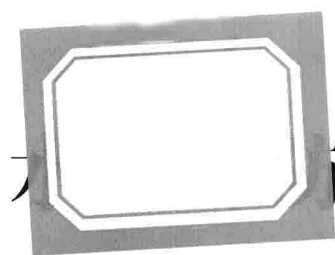


水平井防砂完井 理论与技术

董长银 编著

.....
SHUIPINGJING FANGSHAWANJING
LILUN YU JISHU

中国石化出版社
[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)



大港油田砂完井理论与技术

董长银 编著



中国石化出版社

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

内容提要

本书针对疏松砂岩油气藏水平井(包括大斜度井)的出砂与防砂完井问题,全面阐述了水平井系统出砂预测及防砂完井方案决策技术,重点介绍了相应的基础理论与方法。主要内容包括疏松砂岩地层岩石力学参数获取及其动态变化规律、水平井近井地应力预测、水平井系统出砂预测、水平井防砂完井方式及其评价与优选、水平井防砂完井基本工艺参数设计、水平井管内及管外砾石充填模拟与设计、水平井防砂完井产能预测与评价、水平井防砂措施效果评价、水平井防砂完井施工工艺技术等。本书可供从事油气田开发的工程技术人员、管理人员、科研人员以及石油院校教师、本科生、研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

水平井防砂完井理论与技术 / 董长银编著. — 北京: 中国石化出版社, 2012. 11
ISBN 978-7-5114-1831-9

I. ①水… II. ①董… III. ①水平井完井—油井防砂 IV. ①TE257②TE358

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第259305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

河北天普润印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092毫米 16开本 14.5印张 339千字

2013年1月第1版 2013年1月第1次印刷

定价: 48.00元

水平井作为石油工业一项革命性的技术出现在19世纪20年代，之后随着钻井工艺及其他新技术的研究和发展，以及一些特殊油气藏用常规垂直井的开采方法难以奏效，水平井技术开始受到人们的关注，成为新油田开发、老油田挖潜、提高采收率的重要手段。特别是80年代以来，水平井技术更是蓬勃发展，在世界20多个产油国形成了用水平井开采油田的较大工业规模。

世界上疏松砂岩油气藏广泛分布，其储量占绝对主要地位。疏松砂岩油气藏由于地层岩石胶结疏松，岩石强度较低，在油气开采过程中容易出砂。因此，出砂与防砂是目前及未来疏松砂岩油气藏水平井开发面临的主要问题之一。对疏松砂岩油气藏水平井的早期或先期防砂，其实质已转变为具有防砂功能的完井工艺。早期防砂完井及后期防砂工艺已经成为水平开发的主导工艺技术之一。

近些年来，水平井防砂完井工艺技术取得了长足的发展，主要体现在科学的室内决策及系统完备的现场硬件设备及实施技术，为易出砂油气藏水平井的开采提供了多种技术手段。然而任何有效的防砂完井措施都与储层岩石、流体性质及水平井生产方式息息相关。如何根据储层岩石和流体性质选择合适的水平井防砂完井方式，进行科学的施工参数设计以及客观准确的后期评估是有效地发挥各种水平井防砂完井技术潜力，获得良好的技术经济效益的前提，其实质是水平井防砂完井工艺的综合决策问题。

本书综合了国内外近年来关于水平井防砂完井的大量文献资料和研究成果，力求新颖性和系统性，全面展示水平井出砂与防砂完井理论与技术体系。本书作者及其团队长期以来围绕疏松砂岩油气藏的出砂与防砂问题，在水平井出砂与防砂完井方面开展了大量的研究工作，并取得了一些成果。这些成果经系统梳理后编排在本书中，构成了本书的基本框架和主要内容。本书的特点是：（1）内容系统全面，涉及疏松砂岩油气藏水平井防砂完井领域的各个方面内容，包括岩石力学基础、地应力及系统出砂预测、防砂完井工艺原理、防砂完井工艺优选、防砂完井工艺参数设计、管内管外砾石充填模拟、近井渗流规律及防砂产能评价、施工工艺技术等；（2）国内首套系统

阐述水平井出砂与防砂的书籍，力求内容新颖，大量最新研究成果被收录到本书中；

(3) 紧密联系生产实际，内容涵盖了油气田现场水平井防砂完井工作的各个环节。

本书在编写过程中，得到了中国石油大学(华东)石油工程学院的张琪教授、李明忠教授的热情指导；张琪教授审阅了书稿并提出了宝贵意见。研究生张晓斌、隆佳佳等在书稿编排及校对方面付出了辛勤的劳动；中国石化出版社对本书的出版提供了便利，在此一并表示衷心的感谢。由于编著者的学识水平及掌握的信息有限，书中出现疏漏甚至错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

第1章 储层岩石力学参数获取及其动态变化规律/1

- 1.1 储层岩石力学参数及其基本关系/1
- 1.2 通过试验获取岩石力学参数的方法/4
- 1.3 根据测井资料计算岩石力学参数/12
- 1.4 砂岩岩石强度随出砂及生产时间的衰减规律/18
- 1.5 砂岩岩石强度随地层出水的衰减规律/21

第2章 水平井系统出砂预测技术/27

- 2.1 水平井出砂原因及出砂机理/27
- 2.2 储层原始地应力计算/30
- 2.3 水平井近井地应力分布计算/32
- 2.4 裸眼水平井井壁稳定分析/39
- 2.5 水平井定性经验出砂预测/42
- 2.6 水平井出砂临界压差预测/45
- 2.7 水平井塑性出砂半径预测/54

第3章 水平井防砂完井方式及其评价与优选/62

- 3.1 水平井基本完井方式/62
- 3.2 水平井机械筛管防砂完井工艺/64
- 3.3 水平井砾石充填防砂完井工艺/72
- 3.4 水平井防砂完井方式优选/77

第4章 水平井防砂完井基本工艺参数设计/86

- 4.1 地层砂粒度分析方法/86
- 4.2 水平井砾石充填砾石尺寸设计方法/92
- 4.3 机械筛管缝宽及挡砂精度设计/105
- 4.4 砾石充填施工泵注井筒压耗及砂液用量计算/108
- 4.5 水平井射孔参数优化及变密度射孔设计/112

第5章 水平井及大斜度井管内砾石充填模拟与设计/117

- 5.1 水平井与大斜度井砾石充填机理/117
- 5.2 基于平衡流速的 α 波砂床平衡高度预测计算/122
- 5.3 α 波砂床平衡高度预测的随机概率模型及算法/126
- 5.4 水平井与大斜度井砾石充填实验模拟/132
- 5.5 水平井与大斜度井砾石充填过程可视化模拟/136
- 5.6 水平井及大斜度井砾石充填施工参数设计/150

第6章 水平井管外挤压砾石充填模拟/154

- 6.1 水平井管外挤压砾石充填过程/154
- 6.2 高压挤注条件下水平井管外地层破坏模式及其判别方法/155
- 6.3 水平井管外地层塑性挤压充填模拟/161
- 6.4 水平井管外塑性挤压砾石充填模拟结果及分析/168
- 6.5 挤压充填条件下的管内全悬浮临界条件/172

第7章 水平井防砂完井产能预测与评价/176

- 7.1 防砂水平井井底渗流区域特征分析/176
- 7.2 砾石充填防砂水平井砾石层特性分析/177
- 7.3 防砂水平井机械筛管堵塞规律及其渗透率预测/184
- 7.4 油井水平井防砂完井产能比预测方法/192
- 7.5 气井水平井防砂完井产能比预测方法/199
- 7.6 油井水平井油气水三相流入动态/207

第8章 水平井防砂措施效果评价方法/209

- 8.1 水平井防砂措施评价原则及评价要点/209
- 8.2 水平井防砂措施效果评价指标体系/210
- 8.3 单项效果评价指标及其计算方法/211
- 8.4 水平井防砂措施综合评价/216

第9章 水平井防砂完井施工工艺技术/219

- 9.1 水平井机械筛管防砂完井管柱/219
- 9.2 水平井管内砾石充填防砂完井施工工艺技术/220
- 9.3 水平井分段砾石充填防砂施工工艺/221
- 9.4 水平井砾石充填井下工具/222

主要参考文献/225

第1章 储层岩石力学参数获取 及其动态变化规律

疏松砂岩油气藏地层岩石力学参数是水平井出砂机理分析及系统出砂预测的基础和依据，同时也是水平井防砂完井工艺参数设计及施工过程模拟时所需要的基础数据。对于水平井，由于其特殊的井身结构，地层岩石力学参数分布不均匀且与其井身轨迹有关。对于疏松砂岩油气藏，随着开采时间的延续及开采过程中的出砂与出水，近井岩石强度参数是逐步变化的。本章主要阐述地层岩石力学参数基本概念以及通过室内试验和测井资料获取地层岩石力学参数的方法，及疏松砂岩地层岩石基于开采时间和出砂速度以及含水变化的强度参数衰减规律。

1.1 储层岩石力学参数及其基本关系

1.1.1 岩石力学参数及其基本概念

1. 岩石密度

岩石密度分为颗粒密度和体积密度。颗粒密度即岩石固体材料的真实密度，即岩石质量与实际固相体积之比。体积密度即岩石的表观密度，也就是单位体积岩石的质量。根据岩样的含水不同，进一步分为干密度、天然密度和饱和密度。

2. 体胀系数与线胀系数

岩石的体胀系数是指温度上升 1°C 所引起的体积增量与初始体积之比，单位为 $1/^{\circ}\text{C}$ ；岩石的线胀系数是指温度上升 1°C 所引起的长度增量与初始长度之比，单位为 $1/^{\circ}\text{C}$ 。一般认为岩石的体胀系数为线胀系数的3倍左右。部分岩石的线胀系数见表1-1。

表1-1 部分岩石的线胀系数

岩石名称	线胀系数/ $10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1}$	岩石名称	线胀系数/ $10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1}$
砂岩	1.0~2.0	粗粒花岗岩	0~6.0
白云岩	1.0~2.0	细粒花岗岩	1.0
灰岩	0.6~3.0	辉长岩	0.5~1.0
页岩	1.5~1.9	辉绿岩	1.0~2.0
大理岩	1.2~3.3	片麻岩	0.8~3.0

3. 抗压强度

岩石抗压强度是指岩石在单轴压缩条件下达到破坏时的极限强度，数值上等于破坏时的最大压应力。

4. 抗拉强度

岩石抗拉强度是指岩石在单轴拉伸条件下达到破坏时的极限强度，数值上等于破坏时的最大拉应力。一般岩石的抗拉强度要比其抗压强度小得多，其值约为抗压强度的1/10~1/5。

5. 抗剪切强度

岩石抗剪切强度用来表征岩石抗剪切（滑动）破坏的能力，数值上等于岩石剪切破坏时的剪切应力。岩石的抗剪切强度不是一个常数，而是与岩石剪切面上所受的正应力有关。获取岩石的抗剪切强度实际是获取抗剪强度与正应力之间关系的具体表达式。岩石抗剪切强度与正应力之间的关系为线性关系，这个线性关系表达式中的特征参数就是岩石内聚力与内摩擦角，如式（1-1）所示。

$$\tau_f = C_0 + \sigma_n \cdot \tan \phi_f \quad (1-1)$$

式中 τ_f ——岩石抗剪强度，MPa；

σ_n ——施加的正应力，MPa；

C_0 ——岩石内聚力，MPa；

ϕ_f ——岩石内摩擦角，rad。

也就是说，岩石的抗剪强度用内聚力和内摩擦角表示。在油气开发领域，研究岩石的抗剪强度比研究抗拉、抗压强度更具有实际意义。

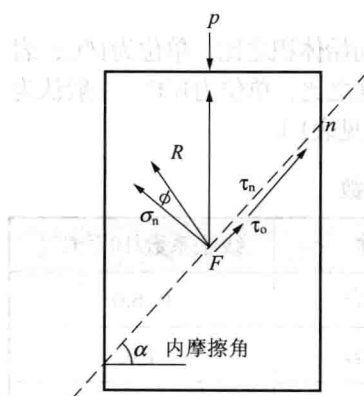


图1-1 岩石剪切破坏内摩擦角示意图

6. 内聚力

内聚力是岩石中相同组成的各部分倾向于聚合在一起的力，又称内聚强度，表征岩石强度大小。内聚力是表征岩石剪切强度与正应力之间关系的一个重要参数，也是主要的岩石力学强度参数之一。

7. 内摩擦角

内摩擦角是岩石破坏时极限平衡剪切面上的正应力和内摩擦力形成的合力，与该正应力之间的夹角，如图1-1所示。内摩擦角是表征岩石剪切强度与正应力之间关系的一个重要参数，是主要的岩石力学强度参数之一。

一般岩石内摩擦角越小，强度越差。常见岩石的内聚力、内摩擦角如表1-2所示。

表1-2 部分岩石的内聚力、内摩擦角

岩石名称	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
花岗岩	14~50	45~60
玄武岩	20~60	50~55
石灰岩	10~50	35~50
砂岩	8~40	35~50
页岩	3~30	20~35

8. 岩石弹性形变

固体在外力作用下都会发生形变。如果外力作用停止时,形变随之消失,这种形变称为弹性形变。表征岩石弹性形变特征的参数包括杨氏模量、切变模量、体积模量和泊松比等。

9. 泊松比

泊松比又称横向压缩系数,是指岩石在单轴压缩条件下的横向应变与轴向(纵向)应变之比。岩石泊松比随轴向应力的增加而增加,常取应力-应变曲线中的直线段部分作为计算依据。对于大多数地层,岩石泊松比在0.15~0.3之间。

10. 杨氏弹性模量

杨氏弹性模量是岩石纵向张应力与张应变的比值。杨氏模量与岩石尺寸无关,是标志岩石弹性强弱的重要参数。

各种砂岩岩石的弹性模量与泊松比数据如表1-3所示。

表1-3 各种岩石的泊松比和弹性模量

岩石类型	泊松比	弹性模量/MPa
硬砂岩	0.15	4.4×10^4
中硬砂岩	0.17	2.1×10^4
软砂岩	0.20	0.3×10^4
硬灰岩	0.25	7.4×10^4
中硬灰岩	0.27	—
软灰岩	0.30	0.8×10^4

11. 切变弹性模量

切变弹性模量是指剪切应力与剪切应变之比。岩石的剪切模量越大,岩石越难发生剪切变形和破坏。当切变弹性模量无穷大时,岩石变成刚体。

12. 体积弹性模量

体积弹性模量是指在各向均匀压缩条件下,平均应力与体积应变(单位岩石体积的体积变化量,或体积相对变化率)的比值。岩石体积弹性模量可用于度量岩石的抗压能力。

13. 岩石的静态与动态弹性参数

岩石的弹性参数（如泊松比和弹性模量）有动态和静态之分。岩石静态弹性参数是指根据岩样在施加载荷条件下的应力-应变曲线得到的弹性参数，即通过岩石力学试验得到的特性参数为静态参数。静态弹性参数反映岩石对低频大载荷的力学响应特性。

岩石动态弹性参数是指利用弹性波在岩石中的传播关系，由测量的弹性波速度和体积密度计算得到的岩石特性参数。根据测井资料得到的岩石力学参数称为动态参数，其反映的是岩石对高频低应力脉冲波的力学响应特性。

1.1.2 岩石弹性参数之间的基本关系

地层岩石的泊松比、弹性模量、体积弹性模量、切变弹性模量等基本特性参数之间有一定的关系，通过这些关系可以进行相互计算，如下列公式所示：

$$\mu = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)} = \frac{\lambda}{2(\lambda + G)} = \frac{\lambda}{3K - \lambda} = \frac{3K - E}{6K} \quad (1-2)$$

$$E = \frac{9K \cdot G}{3K + G} = \frac{3\lambda + 2G}{3 + G} \cdot G = 3K(1 - 2\mu) = \frac{9K(K - \lambda)}{3K - \lambda} = \frac{\lambda(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{\mu} \quad (1-3)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} = \lambda + \frac{2}{3}G = \frac{\lambda(1 + \mu)}{3\mu} \quad (1-4)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} = \frac{3K(1 - 2\mu)}{2(1 + \mu)} = \frac{3}{2}(K - \lambda) = \frac{3K \cdot E}{9K - E} = \frac{\lambda(1 - 2\mu)}{2\mu} \quad (1-5)$$

式中 G ——切变弹性模量，MPa；

K ——体积弹性模量，MPa；

λ ——拉梅常数，MPa；

E ——岩石杨氏弹性模量，MPa；

μ ——岩石泊松比，无量纲。

1.2 通过试验获取岩石力学参数的方法

目前室内岩石力学试验是获取地层岩石力学特性参数的主要途径之一。通过室内岩石力学试验可测量岩石的强度参数和弹性形变参数，进而根据岩石力学参数之间的基本关系获取其他一系列参数。本节主要介绍常见的岩石力学试验以及根据试验数据获取岩石力学参数的基本方法。

1.2.1 单轴抗压强度的试验测定

岩石的抗压强度就是岩石试件在单轴压力下达达到破坏时所受的最大压应力。岩石的抗压强度一般在实验室内用压力机进行加压试验测定，如图1-2所示。一般要求圆柱形岩样直径大于54mm，高径比为2.5~3.0。

试验证明，破裂面与载荷轴线的夹角近似为 $\pi/4 - \phi_f/2$ （ ϕ_f 为岩石内摩擦角）。试验条件对测试结果有较大影响，主要表现在形状效应和尺寸效应。形状效应是指由于

在棱角上发生应力集中,圆柱状试件测量得到的抗压强度要高于棱柱状试件。尺寸效应是指试件尺寸越大,则测量得到的抗压强度越低;反之,抗压强度越高。另外,施加载荷的速率对测量结果也有明显的影响。载荷施加的速率越快,则测量得到的抗压强度越大。基于上述原因,在进行单轴抗压强度试验时,应严格按照相关标准进行。

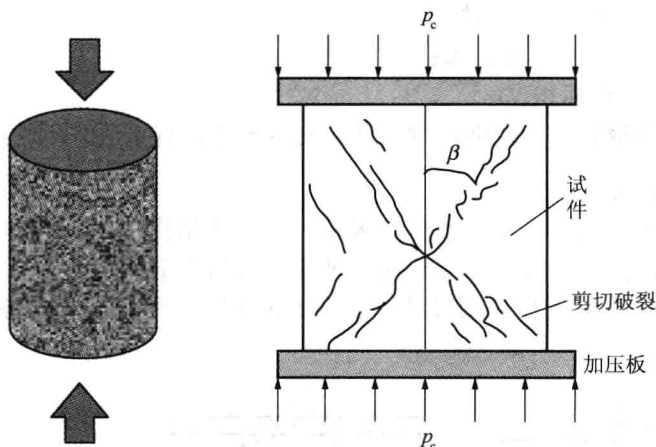


图1-2 岩石抗压强度测定试验示意图

根据试验数据可计算岩石单轴抗压强度:

$$\sigma_c = \frac{P_c}{A} \quad (1-6)$$

式中 P_c ——岩样破坏时承受的压力, N;

A ——岩样的横截面积, m^2 ;

σ_c ——岩样的单轴抗压强度, Pa。

1.2.2 抗拉强度的试验测定

岩石的抗拉强度是指岩石试件在单向拉伸条件下达到破坏时所受的最大拉应力。岩石的抗拉强度相对抗压强度要小得多,一般为抗压强度的1/10~1/5。由于夹持破坏原因,通过试验方法测量岩石的抗拉强度要比测量抗压强度困难许多。通过试验测量岩石抗拉强度的方法主要有直接法、间接法和近似法三种。

1. 直接法

实验室获取岩石抗拉强度的直接方法就是将岩样两端直接固定,施加轴向拉力直至岩样破坏,如图1-3所示。试验时的最大困难是岩石试件的夹持问题,不仅要使拉应力均匀分布,而且还要将岩样安装在夹持器中而不损伤岩样表面,并且保证

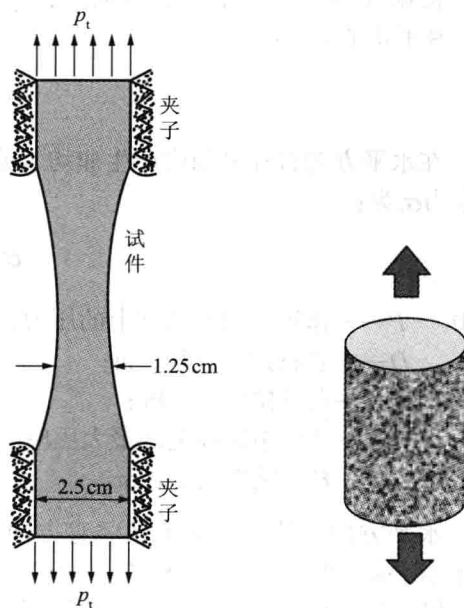


图1-3 直接法岩石抗拉强度测定试验示意图

拉力与轴向平行。

根据上述试验数据可计算岩石抗拉强度：

$$\sigma_t = \frac{P_t}{A} \quad (1-7)$$

式中 P_t ——岩样破坏时承受的拉力，N；

σ_t ——岩样的抗拉强度，Pa；

A ——岩样横截面积， m^2 。

由于直接法测量岩石抗拉强度时试件的夹持困难，直接法并不常用。

2. 劈裂法（间接法）

通常采用劈裂法间接测定岩石抗拉强度。劈裂法是指采用圆柱体（或立方体）试件，沿着圆柱体直径方向施加压力载荷，试件受力后会沿着受力的直径方向裂开，如图1-4所示。根据破坏时的压力间接计算岩石抗拉强度。劈裂法又称间接法、巴西法或巴西试验。

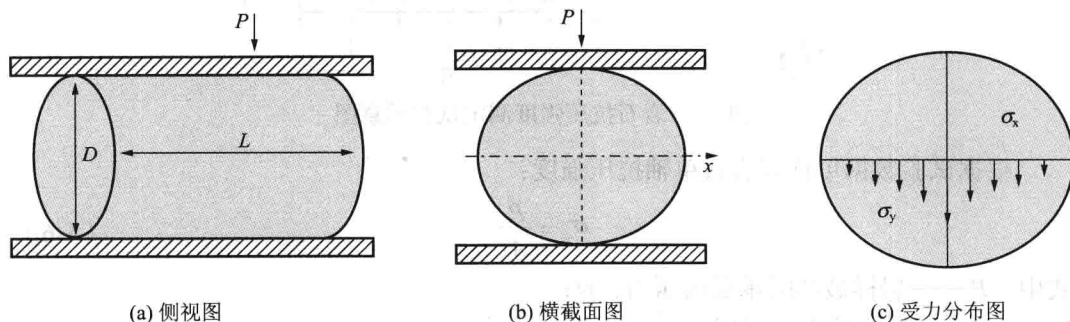


图1-4 巴西试验

根据弹性力学理论，沿施加集中力 P 的直径方向产生近似均匀分布的水平拉应力，其平均值 σ_x 为：

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi DL} \quad (1-8)$$

在水平方向直径平面内产生非均匀分布的竖向压应力，其在试件中轴线上的最大压应力 σ_y 为：

$$\sigma_y = \frac{6P}{\pi DL} \quad (1-9)$$

式中 P ——作用于岩石试件上的压力，N；

D ——岩石试件直径，m；

σ_x ——水平拉应力，Pa；

σ_y ——试件中轴线上的最大压应力，Pa；

L ——岩石试件长度，m。

水平方向平均拉应力 σ_x 及竖直方向上的最大压应力 σ_y 在试件中的分布情况如图1-4(c)所示。由式(1-8)和式(1-9)可知，圆柱状试件的压应力 σ_y 为拉应力 σ_x 的3倍，但是岩石抗压强度往往是抗拉强度的5~10倍左右。所以，在这种试验条件下试件

依然表现为受拉破坏。因此,可用劈裂法试验结果计算得到岩石抗拉强度。只需用试件破坏时的最大压力 $P_{\max}$ 代替式(1-8)中的 P 即可得到岩石的抗拉强度,即:

$$\sigma_t = \frac{2P_{\max}}{\pi DL} \quad (1-10)$$

式中 $P_{\max}$ ——岩样破坏时的最大压力载荷, N。

劈裂法测量岩石抗拉强度的优点是简便易行,无需特殊的设备,只要用普通的压力机即可。因此,劈裂法在工程上得到广泛应用。但是,采用劈裂法时,试件内应力分布较为复杂,这样得到的岩石抗拉强度与直接拉伸试验求得的岩石抗拉强度有一定的差别。

3. 近似法

近似法测量岩样抗拉强度是指将接近于球状的岩样放在压力机上施压直至破坏,进而测量岩石抗拉强度。近似法计算岩石抗拉强度的公式为:

$$\sigma_t = \frac{P_{\max}}{V^{2/3}} \quad (1-11)$$

式中 V ——岩样的体积, m^3 。

统计结果表明,岩石的抗拉强度与抗压强度之间存在如下关系:

$$\sigma_c = \alpha \cdot \sigma_t \quad (1-12)$$

式中 α ——岩石类型系数,随岩石的类型变化,一般在5~10之间。

1.2.3 岩石抗剪切强度的试验测定

岩石的抗剪切强度试验实际是测量岩石的抗剪切强度随正应力的变化关系,最终测量得到岩石的内聚力和内摩擦角。通常可采用直接剪切试验、楔形剪切试验和三轴试验三种试验方法测定。

1. 直接剪切试验

直接剪切试验采用直接剪切仪来进行。如图1-5所示,立方体岩样各侧面面积均为 A ,固定上匣,首先施加垂向载荷 N ,然后在水平方向逐步施加水平剪切力 T ,直到岩样剪切破坏,记录破坏时的最大值剪切力 $T_{\max}$ 。

剪切面上的正应力和剪应力分别为:

$$\sigma_n = \frac{N}{A}, \tau = \frac{T}{A} \quad (1-13)$$

式中 N ——作用在试件剪切面上的法向总压力, N;

T ——作用在试件上的剪切力, N;

A ——立方体试样侧面积, m^2 ;

σ_n ——剪切面正应力, Pa;

τ ——剪切应力, Pa。

岩样破坏时的最大剪切力 $T_{\max}$ 对应的剪切应力 $\tau_{\max}$ 即为该正应力 σ_n 条件下的岩石抗

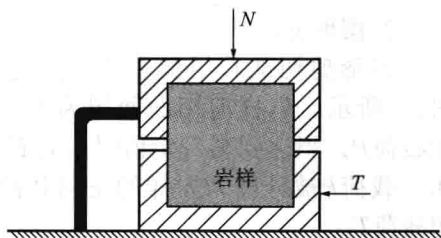


图1-5 直接剪切试验示意图

剪强度 τ_f 。

直接剪切仪测量岩石抗剪切强度的试验过程为：

(1) 给定一垂向载荷 N ，施加逐步增加的剪切力 T 。每变化一次 T ，记录并计算剪切应力 τ 及下匣试样的水平位移 δ_h 和垂直位移 δ_v ，直至岩样剪切破坏。

(2) 记录岩样破坏时的垂向载荷 N 、正应力 σ_n 以及对应的岩石抗剪强度 τ_f 。

(3) 使用相同的岩样，改变不同的垂向载荷（即垂向正应力） N ，重复上述试验，得到一系列对应于正应力 $\sigma_{n(i)}$ 条件下的岩石抗剪强度 $\tau_{f(i)}$ 。

(4) 绘制抗剪强度与正应力的关系，即 $\tau_{f(i)} \sim \sigma_{n(i)}$ 关系曲线，并进行线性拟合，如图1-6所示。拟合得到的直线截距即为岩石内聚力，直线与横轴的夹角即为岩石内摩擦角。

图1-6 直接剪切试验结果处理示意图

虽然抗剪强度与正应力关系曲线并不是严格的直线关系，但大量试验结果表明，当正应力不大（ $<10\text{MPa}$ ）时，可近似看作直线。将试验数据点回归成直线关系，得到如下方程：

$$\tau_f = C_0 + \sigma_n \cdot \tan \phi_f \quad (1-14)$$

式中 τ_f ——岩石抗剪强度，Pa；

σ_n ——施加的正应力，Pa；

C_0 ——岩石内聚力，Pa；

ϕ_f ——岩石内摩擦角，rad。

方程（1-14）即为著名的库仑方程，式中内聚力和内摩擦角可通过直线截距和斜率计算得到。

2. 楔形剪切试验

楔形剪切试验用楔形剪切仪进行。如图1-7所示，岩样剪切面面积为 A ，上部施加载荷 P ，当达到某一定值时，岩石剪切破坏。载荷 P 被分解为岩样的正向载荷 N 和剪切载荷 T 。

根据受力平衡条件，有如下平衡方程：

$$N - P \cdot \cos \alpha - P \cdot f \cdot \sin \alpha = 0 \quad (1-15)$$

$$Q + P \cdot f \cdot \cos \alpha - P \cdot \sin \alpha = 0 \quad (1-16)$$

相应的正应力和剪切应力为：

$$\sigma_n = \frac{P}{A} (\cos \alpha + f \cdot \sin \alpha) \quad (1-17)$$

$$\tau = \frac{P}{A} (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha) \quad (1-18)$$

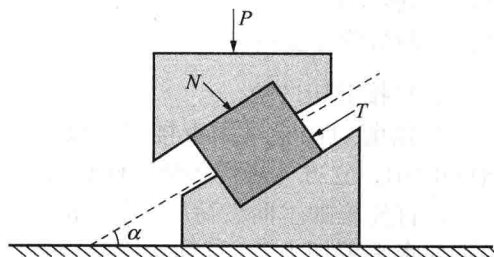


图1-7 楔形剪切试验示意图

式中 A ——剪切面面积, m^2 ;
 P ——压力机施加的总垂向力, N ;
 N ——作用在试件剪切面上的法向总压力, N ;
 Q ——作用在试件剪切面上切向总剪切力, N ;
 f ——压力机垫板下面的滚珠的摩擦系数, 可由摩擦校正试验确定, 无量纲;
 α ——剪切面与水平面所成的角度, rad ;
 σ_n ——作用在试件剪切面上的正应力, Pa ;
 τ ——作用在试件剪切面上的剪切应力, Pa 。

楔形剪切试验测量岩石抗剪切强度的过程为:

- (1) 使用多个岩样试件, 分别以不同的角度试验;
- (2) 对于每个试件, 逐步施加载荷 P , 直到岩样破坏, 记录并计算破坏时的正应力和剪切应力;
- (3) 不同试件使用不同剪切角进行试验, 得到一系列破坏时的正应力和剪切应力;
- (4) 绘制破坏时的正应力和剪应力关系图, 如图1-8所示;
- (5) 将正应力和剪应力数据点按照方程 (1-14) 进行线性拟合, 得到岩石的内聚力和内摩擦角。

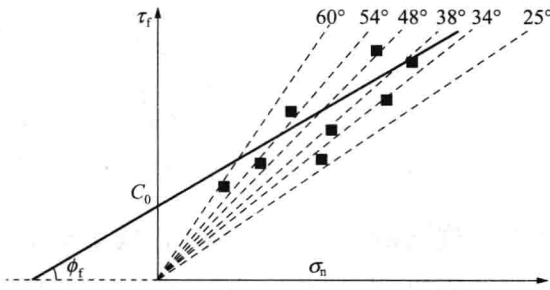
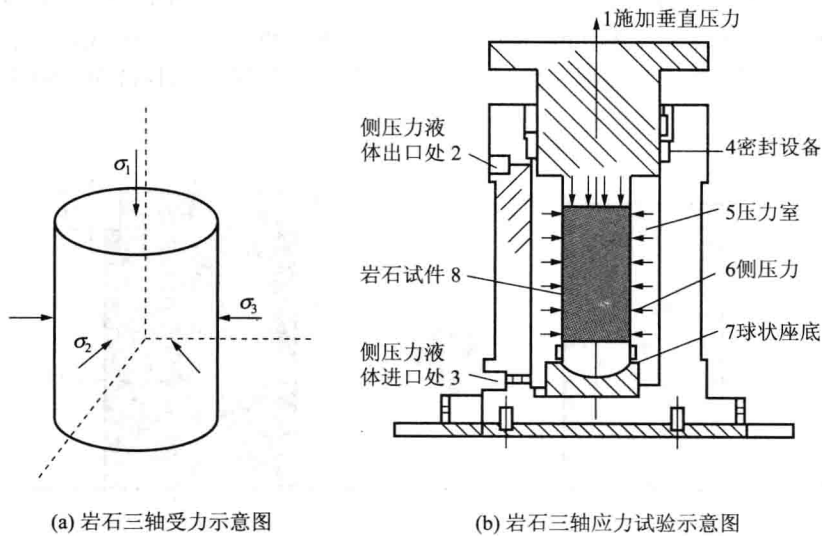


图1-8 楔形剪切试验结果处理示意图

3. 岩石三轴应力试验

岩石三轴应力试验使用三轴压力仪进行, 是获得岩石力学参数最准确的方法, 如图1-9所示。



(a) 岩石三轴受力示意图 (b) 岩石三轴应力试验示意图

图1-9 岩石三轴应力试验

使用三轴应力仪测量岩石抗剪切强度的过程如下:

- (1) 先将圆柱形岩样施加侧向围压，即最小主应力 σ_3 ；
- (2) 逐步增加垂向应力，即最大主应力 σ_1 ，直至岩样破坏，记录此时的最大主应力 σ_1 ；
- (3) 更换同样的岩样，改变围压 σ_3 ，重复上述试验，得到对应的破坏最大主应力 σ_1 ；
- (4) 使用多个岩样重复上述试验。以每次试验得到的 $\sigma_3 \sim \sigma_1$ 之间的线段为直径作圆，绘制应力圆曲线，如图1-10所示；
- (5) 绘制上述一系列应力圆的包络线，即岩石抗剪强度曲线。该曲线可近似为一条直线，其在纵轴上的截距为岩石内聚力 C_0 ，直线与横轴的夹角即为内摩擦角 ϕ_f 。

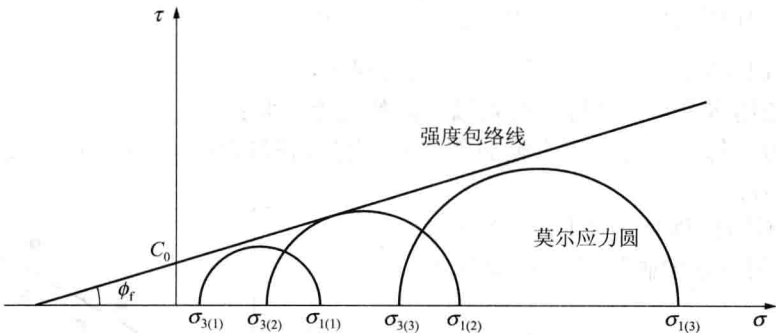


图1-10 岩石三轴试验破坏时的应力圆

1.2.4 岩石的变形特性即弹性模量与泊松比的测量

岩石的变形特性常用弹性模量 E 和泊松比 μ 两个常数来表示，通过岩石力学试验可测量上述两个参数。

1. 单轴压缩试验测量岩石变形特性

研究岩石力学性质最普遍的方法是使用单轴压缩试验，即在试验机上对长度为直径的2~3倍的圆柱形岩样进行轴向压缩试验。在单轴压缩试验时，试件大多采用圆柱形，一般要求试件的直径为5cm，高度为10cm，两端磨平光滑。按试验要求，在侧面粘贴电阻丝片，以便观测变形，然后用压力机对试件加压。图1-11为单轴压缩试验示意图。

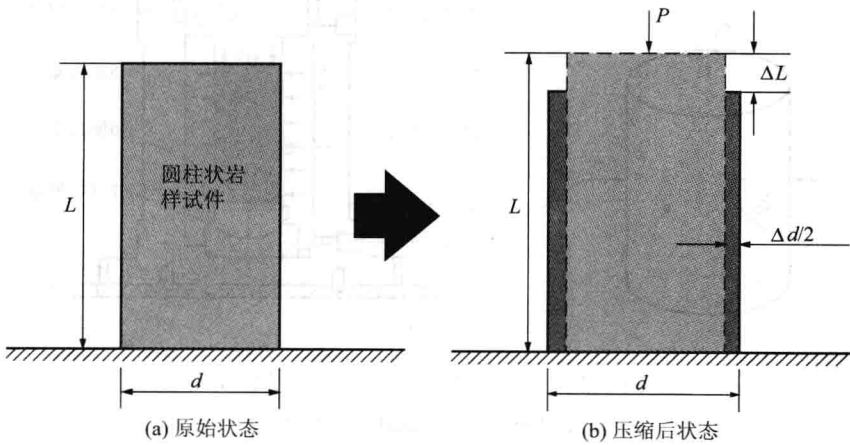


图1-11 单轴压缩试验示意图