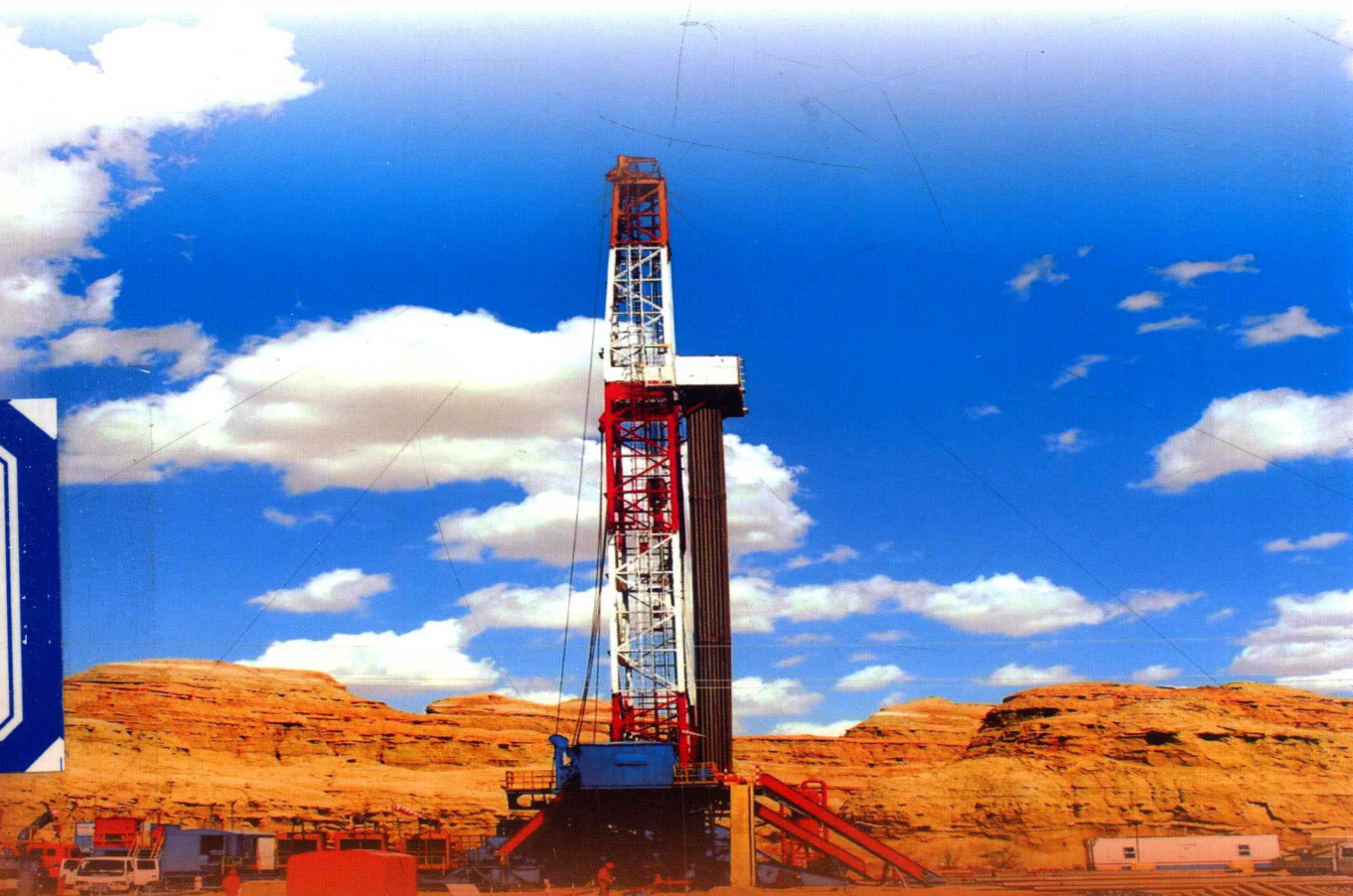




石油高等院校特色规划教材

# 钻井与完井工程概论

金业权 刘 刚 编



石油工业出版社  
Petroleum Industry Press

石油教材出版基金资助项目

内容

石油高等院校特色规划教材

# 钻井与完井工程概论

金业权 刘刚 编

常州大学图书馆  
藏书章

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书系统讲述了油气井钻井与完井工程的基本理论和工艺技术。全书共八章,包括岩石的工程力学性质、石油钻机及钻井工具、地层压力与井身结构、钻进工艺技术、油气井压力控制、固井技术、完井技术和油气层保护技术。

本书可以作为普通高等院校非石油工程专业的教学用书,也可作为油气井钻探工程技术人员参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

钻井与完井工程概论/金业权,刘刚编.

北京:石油工业出版社,2015.9

(石油高等院校特色规划教材)

ISBN 978-7-5183-0476-9

I. 钻…

II. ①金…②刘…

III. ①油气钻井—高等学校—教材

②完井—高等学校—教材

IV. TE2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 254699 号

---

出版发行:石油工业出版社

(北京朝阳区安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com

编辑部:(010)64523579 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

排 版:北京苏冀博达科技有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

---

2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:13

字数:330 千字

---

定价:26.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

# 前 言

《钻井与完井工程概论》作为普通高等院校非石油工程专业学生学习钻井与完井的教学用书,用于指导学生学习 and 了解钻井与完井理论,认识油气井的钻井和完井工艺方法。

全书本着理论与实际相结合,少而精,覆盖面广,尽量反映钻井与完井基本理论和技术的原则,从岩石的工程力学性质、石油钻机及钻井工具、地层压力与井身结构、钻进工艺技术、油气井压力控制、固井技术、完井技术和油气层保护技术等方面系统地讲述了钻井与完井工程所涉及的基本理论、基本计算、基本设计和现代主要钻井与完井技术的基本工艺过程。本教材在内容编排上基本符合循序渐进的原则,有利于课堂讲解和学生自学,教材内容适合 40 学时左右的课堂讲授,也可根据具体情况选择讲授。

本书第一章至第四章由刘刚编写,第五章至第八章由金业权编写。

本教材在编写过程中参考了石油院校正在使用的钻井和完井工程等方面的教材,以及钻井与完井工程相关专业书籍,在此对引用的文献编著者表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,本书难免有不当和错误之处,恳请读者批评指正。

编 者  
2015 年 2 月

# 目 录

绪 论	1
第一章 岩石的工程力学性质	3
第一节 岩石的强度性质	3
第二节 岩石的变形性质	9
第三节 岩石的其他性质	14
思考题	17
第二章 石油钻机及钻井工具	18
第一节 石油钻机	18
第二节 钻头	32
第三节 钻柱	48
思考题	59
第三章 地层压力与井身结构	60
第一节 地层异常压力的成因	60
第二节 地层孔隙压力的预测与监测	63
第三节 地层破裂压力预测及试验方法	68
第四节 井身结构	71
思考题	75
第四章 钻进工艺技术	76
第一节 钻井液技术	76
第二节 影响钻进速度的因素	88
第三节 喷射钻井技术	91
第四节 防斜打直技术	101
第五节 定向钻井技术	108
第六节 其他钻井技术	122
思考题	133
第五章 油气井压力控制	135
第一节 概述	135
第二节 井筒压力系统平衡关系	137
第三节 溢流	139

第四节	关井	143
第五节	井控设备	146
第六节	压井工艺技术	148
	思考题	151
<b>第六章</b>	<b>固井技术</b>	<b>152</b>
第一节	套管柱受力分析	152
第二节	油井水泥	160
第三节	注水泥	165
	思考题	169
<b>第七章</b>	<b>完井技术</b>	<b>171</b>
第一节	常用的完井方法	171
第二节	射孔工艺技术	179
	思考题	185
<b>第八章</b>	<b>油气层保护技术</b>	<b>186</b>
第一节	钻井过程中的储层保护技术	186
第二节	完井过程中的储层保护技术	195
	思考题	200
	<b>参考文献</b>	<b>201</b>
20		
80		
17		
23		
25		
27		
28		
31		
101		
108		
131		
132		
133		
134		
135		
137		
138		
139		

# 绪 论

## 一、钻井与完井工程的地位

钻井是石油勘探开发的一个非常重要的环节和手段,一个国家在钻井技术上的进步程度,往往反映了这个国家石油工业的发展状况。因此,许多国家竞相宣布本国钻了世界上各类第一口油井,以显示他们在世界石油工业发展史曾经做出的贡献和所处的地位。

石油勘探有多种方法,但钻井是最重要也是最终判断地下是否有油的手段。当一个地质圈闭经钻探并获得了有工业开采价值的油气流后就算找到了一个油田。下一步的工作就是进一步搞清楚这个油田的具体范围和出油能力。因此,在钻探过程中发现油气后,就应立即查清油层的层数、深度、厚度,并要搞清油层的岩性和其他物理性质,还要对油层进行油气生产能力的测试和原油性质的分析。然后再扩大钻探,进一步探明圈闭含油气情况,算出地下的油气储藏量有多少。这样,对一个油田来说,它的初步勘探工作才算结束。通过地质勘探,发现有工业价值的油田以后,就可以着手准备开发油田的工作了。

在石油勘探、开发各个阶段的共同特点是都要钻井。如在地质普查阶段,为了研究地层剖面,寻找储油构造,要钻地质井、基准井、制图井、构造井等。在区域详探阶段,为了寻找油气藏,并详细研究其储量、性质,要钻预探井、详探井、边探井等。在油田开发阶段,为了把石油、天然气开采出来,更需要钻井,如生产井、注水井、观察井等。石油钻井类型按性质和用途一般分为:

**地质探井(基准参数井):**在很少了解的盆地和凹陷中,为了了解地层的沉积年代、岩性、厚度、生储盖层组合,并为地球物理解释提供各种参数所钻的井。

**预探井:**在 seismic 详查和地质综合研究基础上所确定的有利圈闭范围内,为了发现油气藏所钻的井;在已知油气田范围内,以发现未知新油气藏为目的所钻的井。

**详探井(评价井):**在已发现的油气圈闭上,以探明含油气边界和储量,了解油气层结构变化和产能为目的所钻的探井。

**地质浅井:**为配合地面地质和地球物理工作,以了解区域地质构造,地层剖面 and 局部构造为目的,一般使用轻便钻机所钻的井,例如剖面探井、制图井、构造井等。

**检查资料井:**在已开发油气田内,为了研究开发过程中地下情况变化所钻的井。

**生产井:**开发油气田所钻的采油井、采气井。

**注水井:**为合理开发油气田,保持油气田压力所钻的、用于注水的井。

地质探井、预探井、详探井和地质浅井总称探井。检查资料井、生产井、注水井总称开发井。

## 二、钻井与完井施工工序

钻井是一项复杂的系统工程,是勘探和开发油气田的主要手段。其主要施工工序一般包括:定井位、道路勘测、基础施工、安装井架、安装设备、开钻、钻进、接单根、起钻、换钻头、下钻、完井测试、固井、井队搬迁等。

钻井建井过程如图 0-1 所示。

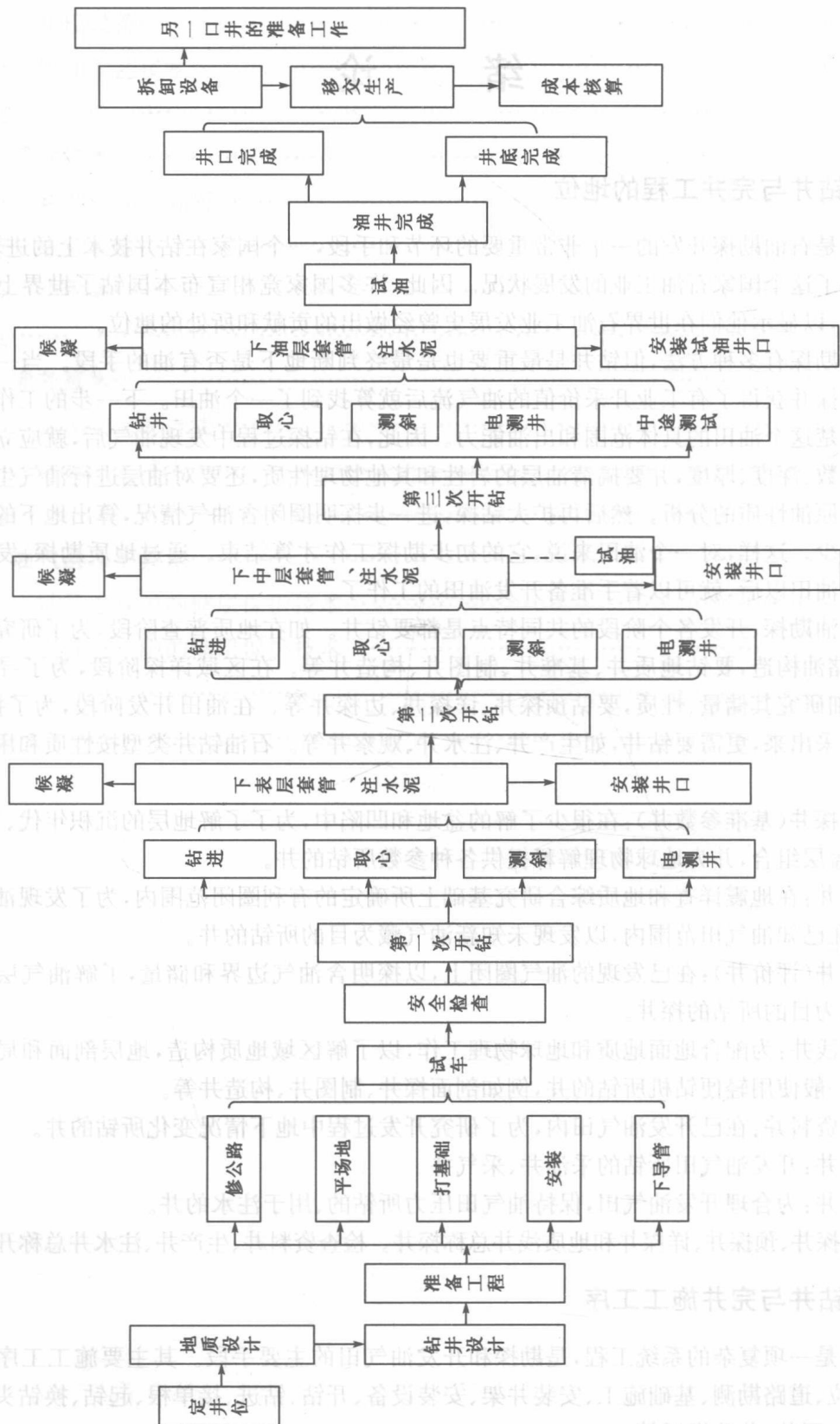


图0-1 钻井建井过程



# 第一章 岩石的工程力学性质

钻井是利用专用设备和工具,采用一定的措施和方法,不断破碎地下岩石形成井眼的过程。它是石油、天然气勘探开发的主要手段。由于石油、天然气大都埋藏在地下不同深度的岩层中,地层岩石是钻井工作者的工作对象,因此了解一定的岩石工程力学性质是非常必要的。

了解岩石工程力学性质,是为选用合适的钻头和确定最优的钻进参数提供依据。井眼的形成使地层裸露于井壁上,这又涉及井眼与地层之间的压力平衡问题,对此问题处理不当则会发生井涌、井喷或压裂地层等复杂情况或事故,使钻进难以进行,甚至使井眼报废。所以,在一个地区钻井之前,充分认识和了解该地区的工程地质资料是进行钻井设计的重要基础。

## 第一节 岩石的强度性质

岩石在各种荷载作用下达到破坏时所能承受的最大应力称为岩石的强度。例如,在单轴压缩荷载作用下所能承受的最大压应力称为单轴抗压强度或非限制性抗压强度;在单轴拉伸荷载作用下所能承受的最大拉应力称为单轴抗拉强度;在纯剪力作用下所能承受的最大剪应力称为非限制性剪切强度。

为了保证不同的岩石强度试验所获得的岩石强度指标具有可比性,国际岩石力学学会(ISRM)对岩石强度试验所使用的试件的形状、尺寸、加载速率和湿度等先后制定了标准,对不符合标准试件和标准试验条件所获得的强度指标值,必须根据国际标准作相应的修正。

### 一、岩石的应力—应变曲线

研究岩石力学性质最普遍的方法,是在试验机上对长度为直径2~3倍的圆柱形岩样进行轴向压缩试验,称为单轴压缩试验。将试验测得的应力和应变作图,就得到应力—应变曲线。在刚性试验机上得到的典型的岩石全应力—应变曲线如图1-1所示。

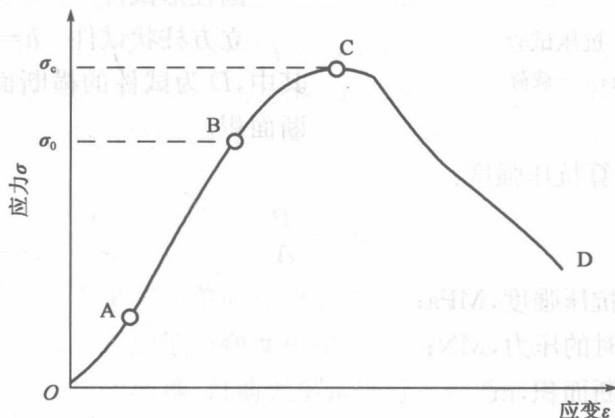


图 1-1 典型的岩石全应力—应变曲线

$\sigma_c$ —岩石的单轴抗压强度

OA段,曲线稍向上凹,这反映岩石试件内部裂隙逐渐被压密,随着岩石内部裂隙被压密进入AB段。

AB段,它的斜率为常数或接近于常数。其斜率定义为岩石的杨氏弹性模量 $E$ 。随着荷载的继续增大,变形和荷载呈非线性关系,裂隙进入不稳定发展状态,这是破坏的先行阶段,即BC段。

BC段,应力—应变曲线的斜率随着应力的增加逐渐减小到零,曲线向下凹,在岩石中引起不可逆变化。发生弹性到延性行为过渡的点B通常称为屈服点,而相应的应力称为屈服应力。最高点C的应力称为强度极限。

CD段,曲线下降,是由于裂隙发生了不稳定传播,新的裂隙分叉发展,使岩石开始解体。CD段以脆性性态为其特征。C点以前的阶段,可以称为破坏前阶段。这一段的力学表现大体来说,由一般试验机和刚性试验机试验所得到的结果,基本没有区别。但一般试验机得不出CD段过程,所以认为岩石在C点发生了破坏。实际岩石是有后破坏特征的。虽然此时裂隙大量发展,但破坏是个渐进过程,不是突如其来的过程,并且在应力超过峰值以后仍然具有一定助承载能力,研究岩石的破碎过程和井壁岩石的失稳破坏以及支护时应该加以考虑。

## 二、简单应力条件下岩石的强度

### (一)岩石的抗压强度

岩石的抗压强度就是岩石试件在单轴压力下达到破坏的极限值,它在数值上等于破坏时的最大压应力。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。

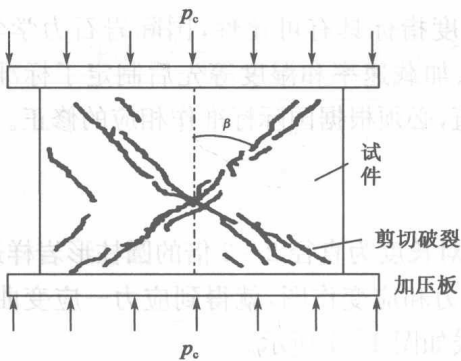


图1-2 抗压试验  
 $\beta$ —破坏角; $p_c$ —载荷

试件通常用圆柱形(钻探岩心)或立方柱状(用岩块加工)。试件的断面尺寸,圆柱形试件采用直径5cm,也有采用7cm的;立方柱状试件采用5cm×5cm或7cm×7cm。试件的高度 $h$ 应当满足下列条件:

$$\text{圆柱形试件} \quad h=(2\sim 2.5)D$$

$$\text{立方柱状试件} \quad h=(2\sim 2.5)A^{0.5}$$

其中, $D$ 为试件的横断面直径, $A$ 为试件的横断面面积。

试验结果按下式计算抗压强度:

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

式中  $\sigma_c$ ——岩石单轴抗压强度,MPa;

$P$ ——试件破坏时的压力,MN;

$A$ ——试件的横断面面积, $m^2$ 。

图1-3表示岩石试件在轴向压力作用下的破坏情况。表1-1列出一些岩石的单轴抗压、抗拉、抗剪强度值。

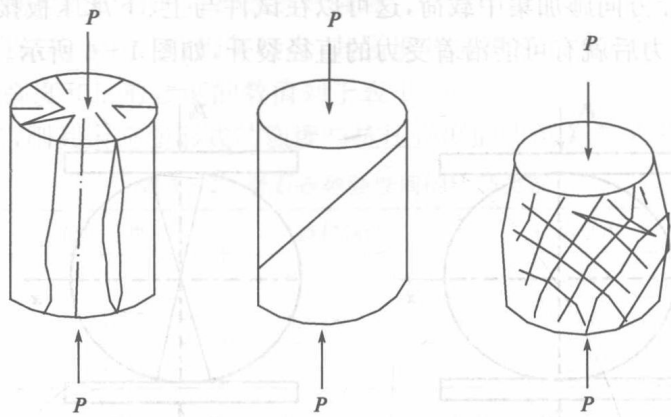


图 1-3 岩石试件在压力  $P$  轴向压缩时的破坏情况

表 1-1 岩石的单轴抗压、抗拉、抗剪强度

单位: MPa

岩石	抗压强度	抗拉强度	抗剪强度
粗粒砂岩	142	5.1	—
中粒砂岩	151	5.20	—
细粒砂岩	185	7.95	—
页岩	14~61	1.7~8	—
泥岩	18	3.2	—
石膏	17	1.9	—
含膏灰岩	42	2.4	—
安山岩	98.6	5.8	9.6
白云岩	162	6.9	11.8
石灰岩	138	9.1	14.5
花岗岩	166	12	19.8
正长岩	215.2	14.3	22.1
辉长岩	230	13.5	24.4
石英岩	305	14.4	31.6
辉绿岩	343	13.4	34.7

大量试验证明,影响岩石抗压强度的因素很多,这些因素可分为两方面:一方面是岩石本身,如颗粒大小、矿物成分、颗粒联结及胶结情况、块体密度、层理和裂隙的特性和方向、风化程度和含水情况等;另一方面是试验方法,如试件大小、尺寸相对比例、形状、试件加工情况和加荷速率等。

## (二)岩石的抗拉强度

岩石的抗拉强度是指岩石试件在单向拉伸条件下试件达到破坏的极限值,它在数值上等于破坏时的最大拉应力。和岩石的抗压强度相比,对抗拉强度的研究要少得多。这可能是因为直接进行抗拉强度的试验比较困难,目前大多是进行各种各样的间接试验,再通过理论公式算出抗拉强度。岩石的抗拉强度一般小于或等于抗压强度的  $1/10$ 。

目前常用劈裂法测定岩石的抗拉强度。试件的形状用得最多的是圆柱体和立方体。试验

时,沿着圆柱体的直径方向施加集中载荷,这可以在试件与上、下承压板接触处各放一根钢丝来实现。这样试件受力后就有可能沿着受力的直径裂开,如图 1-4 所示。

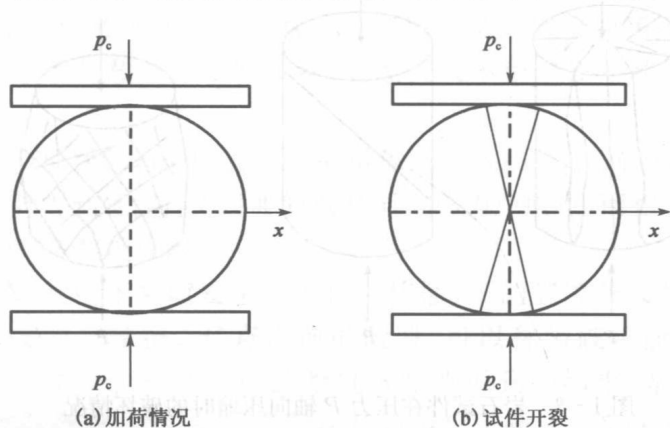


图 1-4 岩石劈裂试验

$P_c$ —载荷

试验资料的整理可按弹性力学的解答来进行。根据弹性力学公式,这时沿着垂直向直径产生几乎均匀的水平向的拉应力,这些应力的平均值  $\bar{\sigma}$  为:

$$\bar{\sigma} = \frac{2P}{\pi D l} \quad (1-2)$$

式中  $P$ ——作用力, N;

$D$ ——圆柱形试样的直径, m;

$l$ ——圆柱形试样的长度, m。

如果试样为立方体,则抗拉强度  $\sigma_t$  按式(1-3)计算:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi a^2} \quad (1-3)$$

式中  $a$ ——立方体试样的边长。

这个方法的优点是简便易行,不需特殊设备,只要有普通的压力机就可进行试验,因此该法在生产实践中已经获得了广泛的应用。

表 1-1 给出了某些岩石的抗拉强度,一般而言,岩石的抗拉强度  $\sigma_t$  与抗压强度  $\sigma_c$  之间一般存在着线性关系,可以近似地表示为:

$$\sigma_c = C_m \sigma_t \quad (1-4)$$

式中,  $C_m$  在 4~10 范围内变化,依据岩石的类型而定。

### (三) 岩石的其他强度

#### 1. 抗剪强度

抗剪强度是指在剪切力的作用下岩石破坏时的应力。较为直观的测定方法是:将方块长条岩样固定在支架上,支架在岩样下方形成一个支点,与岩样上方的切刀合在一起构成一对剪切力,当剪切力足够大时,岩样被剪断,此时岩样单位面积上的剪应力即岩石的抗剪强度。

#### 2. 抗弯强度

抗弯强度是指在弯曲力矩作用下岩石发生破坏时的应力。可用简支梁法测定,将长方条形岩样下方支在两支点上,在上方位于两下支点中央处通过支点向下加压力,岩样受弯曲力

矩,当岩样被压到折断时的应力即岩石的抗弯强度。

岩石由于其本身结构、组成、成因等特点,其强度与应变形式有很大的关系。一些岩石的单轴抗压强度、抗拉强度和抗剪强度的数值列于表 1-1。

若抗压强度为 1,则其余应变形式的强度与抗压强度的比例关系见表 1-2。

表 1-2 岩石各种强度间的比例关系

单位:MPa

岩石	抗压强度	抗拉强度	抗剪强度	抗弯强度
花岗岩	1	0.02~0.04	0.09	0.03
砂岩	1	0.02~0.05	0.10~0.12	0.06~0.20
石灰岩	1	0.04~0.10	0.15	0.06~0.10

沉积岩的层理对强度的影响非常大,表 1-3 是几种沉积岩在平行于层理方向(用“//”表示)和垂直于层理方向(用“⊥”表示)测出的强度。

表 1-3 几种沉积岩的各向异性(不同方向的强度)

单位:MPa

岩石	抗压强度		抗拉强度		抗剪强度		抗弯强度	
	//	⊥	//	⊥	//	⊥	//	⊥
粗砂岩	118.5~157.5	142.3~176.0	4.43	5.14~5.25	48.3	47.0	11.1~17.2	10.3
中砂岩	117.0~216.0	147.0~206.0	7.70	5.20	33.6~59.4	48.2~61.8	16.2~22.6	13.1~19.4
细砂岩	137.8~241.0	133.5~220.5	8.07~11.8	6.0~7.95	43.2~59.5	52.4~64.9	20.85~26.53	17.75
粉砂岩	34.4~104.5	55.4~114.7	—	—	4.8~11.3	12.9~19.8	2.27~16.6	4.30

### 三、三轴压缩试验与围压条件下岩石强度的特点

上面讨论的岩石单轴强度问题,钻井中所遇到的岩石是处于一定的压力、温度条件下,岩石中还充满各种介质,显然这些条件会对岩石机械性质带来影响。

岩石在地层深处处于各方受压的状态,通过模拟这种压力条件的三轴试验,可以了解到岩石在压力条件下的强度特点。

#### (一)三轴压缩试验

岩石在三向压缩荷载作用下,达到破坏时所能承受的最大压应力称为岩石的三轴抗压强度。与单轴压缩试验相比,试件除受轴向压力外,还受侧向压力。侧向压力限制试件的横向变形,因而三轴试验是限制性抗压强度试验。

三轴压缩试验的加载方式有两种:一种是真三轴加载,试件为立方体,加载方式如图 1-5(a)所示;另一种是常规的三轴试验,也称伪三轴试验,试件为圆柱体,试件直径为 25~150mm,长度与直径之比为 2:1 或 3:1,加载方式如图 1-5(b)所示,轴向压力  $\sigma_1$  的加载方式与单轴压缩试验时相同。但由于有了侧向压力,其加载时的端部效应比单轴加载时要轻微得多。侧向压力( $\sigma_2 = \sigma_3$ )由圆柱形液压油缸施加。由于试件侧表面已被加压油缸的橡皮套包住,液压油不会在试件表面造成摩擦力,因而侧向压力可以均匀施加到试件中。在上述两种试验条件下,三轴抗压强度均为试件达到破坏时所能承受的最大  $\sigma_1$  值。

这种试验就是利用三轴压缩试验的成果来求出剪切面上的  $\sigma$  与  $\tau$  的关系,试验的装置如图 1-6 所示。

在进行三轴试验时,先将试件施加侧压力,然后逐渐增加垂直压力,直至破坏。

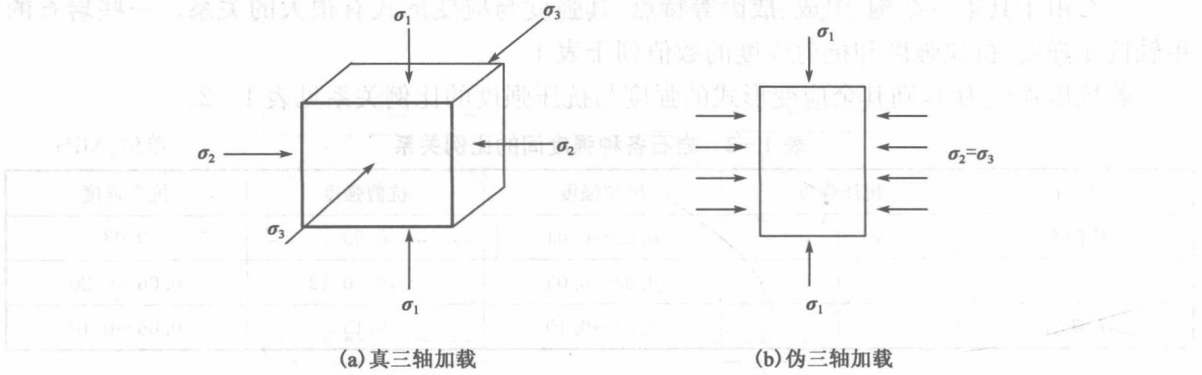


图 1-5 三轴压缩试验加载示意图

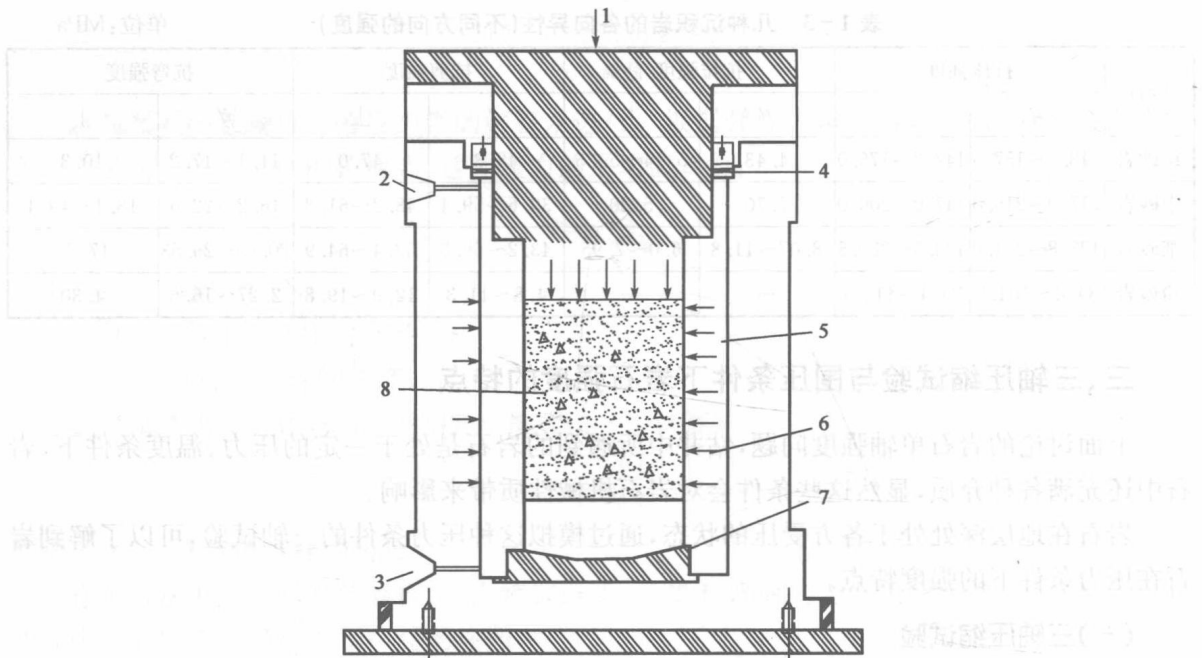


图 1-6 三轴压缩试验装置示意图

1—施加垂直压力；2—侧压力液体出口；3—侧压力液体进口；4—密封设备；5—压力室；  
6—侧压力；7—球状底座；8—试件

由于岩石中有细微裂隙和层理等软弱面，它的强度就表现出明显的各向异性。需要指出的是，岩石的抗拉强度、抗压强度以及三轴试验强度都与岩石的孔隙指数有关。显然，随着岩石孔隙指数的增大，岩石的三种强度迅速降低。

## (二) 围压条件下岩石强度的特点

### 1. 岩石强度增加

根据试验资料，当大理岩的围压从 0 增加到 165MPa 时，其强度从 136MPa 增大到 390MPa，增加了 254MPa；当砂岩的围压从 0 增大到 155MPa 时，其强度从 69MPa 增大到 330MPa。根据另一试验资料可知，岩石不同，受围压的影响也不同。如当砂岩试样围压从 0 增大到 200MPa 时，其抗压强度增大 12 倍左右；而盐岩的抗压强度仅增大 1 倍左右。其余岩

石如白云岩、硬石膏、大理岩、石灰岩、页岩试样的抗压强度,在此条件下约增大4~10倍。

## 2. 岩石的塑性变形增大

岩石在围压影响下变形的试验资料见表1-4。一般认为,岩石的总变形量达到3%~5%,就开始具有塑性性质,或已实现了从脆性到塑性的转变。表1-4中,除石英砂岩仍然保持脆性破坏之外,其余岩石均已具有明显的塑性性质。岩性不同,岩石从脆性转变为塑性的围压也不同。

表 1-4 岩石围压下的塑性变形

岩 石	在下列围压下破坏的变形量, %	
	围压 100MPa	围压 200MPa
石英砂岩	2.9	3.8
白云岩	7.3	13.0
硬石膏	7.0	22.3
大理岩	22.0	28.8
砂岩	25.8	25.9
石灰岩	29.1	27.2
页岩	15.0	25.0
盐岩	28.8	27.5

## 第二节 岩石的变形性质

### 一、岩石的变形特征

#### (一) 岩石应力—应变的一般关系

对于大多数的岩石来说,应力—应变曲线具有近似直线的形式,如图1-7(a)所示,在直线的末端F点处发生突然破坏,这种应力—应变关系可用式(1-5)表示:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1-5)$$

式中  $E$ ——弹性模量,即OF线的斜率。

如果岩石严格地遵循式(1-5)的关系,那么这种岩石就是线性弹性的。

如果岩石的应力—应变关系是曲线,如图1-7(b)所示,但应力与应变之间有着唯一的关 系,即:

$$\sigma = f(\varepsilon) \quad (1-6)$$

则这种材料称为完全弹性的,当荷载逐渐施加到任何点P,得加载曲线OP。如果在P点将荷载逐渐卸去,则卸载曲线仍沿OP曲线的路线退到原点O,即仍按上式相同的路线进行。由于应力—应变是曲线关系,所以这里没有唯一的模量,但对于相应于P点的任何的 $\sigma$ 值,都有一个切线模量和割线模量。切线模量就是P点在曲线上的切线PQ斜率,而割线模量就是割线OP的斜率,它等于 $\sigma/\varepsilon$ 。

如果逐渐加载至某点P,然后再逐渐卸载至零,应变也退至零,但卸荷曲线不走加载曲线

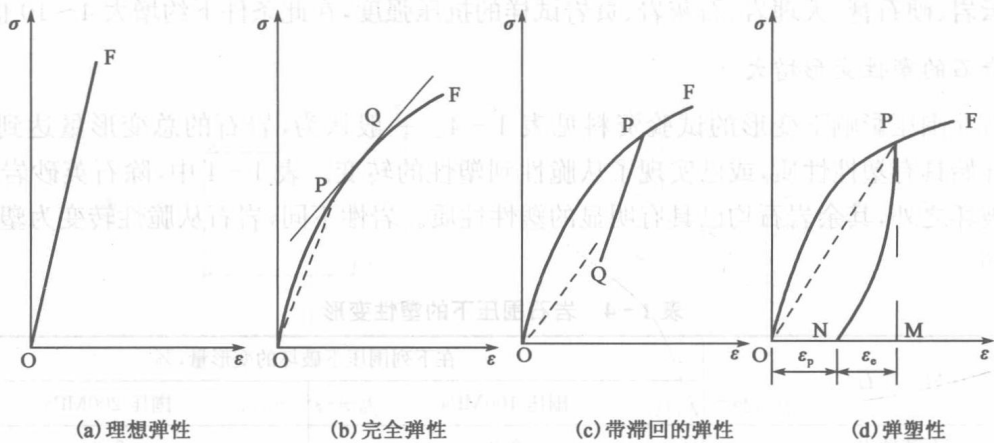


图 1-7 几种典型的岩石的应力—应变曲线

OP 的路线,如图 1-7(c)中虚线所示,则这种材料称为弹性的,这是产生了所谓滞回效应。在这种情况下,加载时在物体上做的功大于卸载时的功,因此,在加载与卸载的循环中,能量在物体中消散。卸载曲线上 P 点的切线 PQ 的斜率就是相应于该应力的卸载模量。

如果逐渐加荷至某点 P,得加载曲线 OP,然后再逐渐卸载至零,不仅卸载曲线不走加载曲线的路线,而且应变也恢复不到零(原点),如图 1-7(d)所示的 N 点,则这种材料称为弹塑性的,能够恢复的变形称为弹性变形,以  $\epsilon_e$  表示(MN 段),而不可恢复的变形称为塑性变形或残余变形、永久变形,以  $\epsilon_p$  表示。加载曲线与卸载曲线所组成的环,称为塑性滞回环。弹性模量 E 就是加载曲线直线段的斜率,而加载曲线直线段大致与卸载曲线的割线相平行。

## (二)应力—应变曲线类型

米勒(Miller)根据岩石的应力—应变曲线随着岩石的性质有各种不同形式的特点,采用 28 种岩石进行了大量的单轴试验后,将岩石的应力—应变曲线分成 6 种类型,如图 1-8 所示。

类型 I:弹性,应力与应变的关系是一直线或者近似直线,直到试样发生突然破坏为止。具有这种变形类型的岩石有玄武岩、石英岩、白云岩以及极坚固的石灰岩。

类型 II:弹—塑性,在应力较低时,应力与应变的关系近似于直线。当应力增加到一定数值后,应力—应变曲线向下弯曲变化,且随着应力逐渐增加,曲线斜率也越来越小,直至破坏。具有这种变形性质的典型岩石有较软弱的石灰岩、泥岩以及凝灰岩等。

类型 III:塑—弹性,在应力较低时,应力—应变曲线略向上弯曲。当应力增加到一定数值后,应力—应变曲线就逐渐变为直线,直至试样发生破坏。具有这种变形性质的代表性岩石有花岗岩、片理平行于压力方向的片岩以及某些辉绿岩等。

类型 IV:塑—弹—塑性,在压力较低时,曲线向上弯曲。当压力增加到一定值后,变形曲线就成为直线。最后,曲线向下弯曲,曲线似 S 形。这种变形类型的岩石大多数是变质岩,如大理岩、片麻岩等。

类型 V:基本上与 IV 类型相同,也呈 S 形,不过曲线的斜率较平缓,一般发生在压缩性较高的岩石中,压力垂直于片理的片岩具有这种性质。

类型 VI:弹—塑—蠕变性,应力—应变曲线是盐岩的特征,开始先有很小一段直线部分,然后有非弹性的曲线部分,并不断地蠕变。某些软弱岩石也具有类似特性。



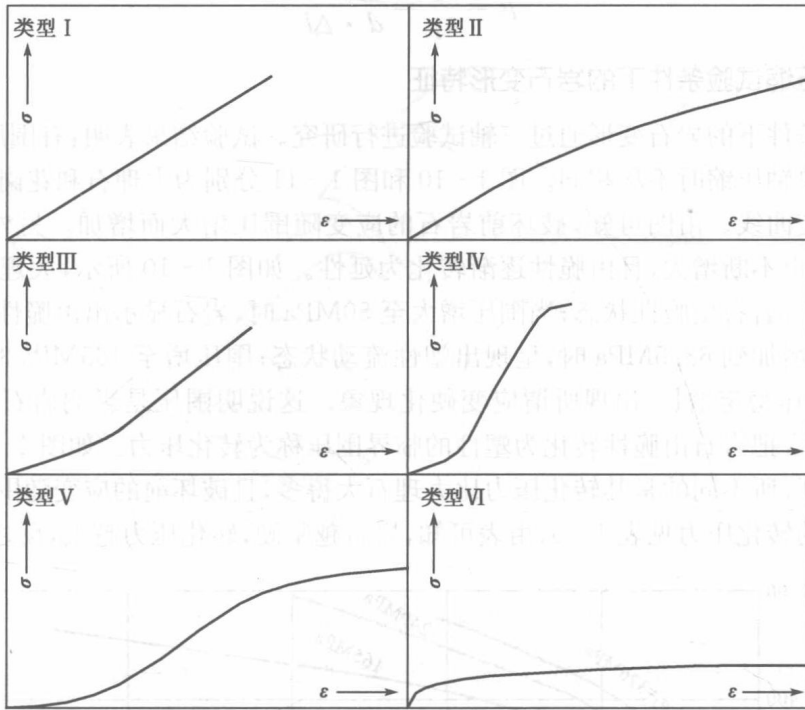


图 1-8 典型岩石的应力—应变曲线类型

## 二、岩石变形性质的室内测定

岩石变形指标以及应力—应变关系,可以在实验室内测定,也可在现场测定。目前用得较多的方法是实验室的单轴压缩试验、实验室或现场的波速测定法、室内三轴试验等,有时候还可以作弯曲试验、现场水压试验等。

### (一)单轴压缩试验

在单轴压缩试验时,试样大多采用圆柱形,一般要求试样的直径为 5cm,高度为 10cm,两端磨平光滑。按照实验要求,在侧面粘贴电阻丝片,以便观测变形,然后用压力机对试样加压,如图 1-9 所示。在任何轴向压力下,都测量试样的轴向应变和侧向应变。设试样的长度为  $l$ ,直径为  $d$ ,试样在荷载  $P$  作用下,轴向缩短  $\Delta l$ ,侧向膨胀  $\Delta d$ ,则试样的轴向应变为  $\epsilon_y = \frac{\Delta l}{l}$ ,侧向应变为  $\epsilon_x = \frac{\Delta d}{d}$ 。

假如,岩石服从胡克定律(线性弹性材料),则压缩时的弹性模量  $E$  由式(1-7)给出:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{P/A}{\Delta l/l} = \frac{P \cdot l}{\Delta l \cdot A} \quad (1-7)$$

泊松比  $\mu$  为:

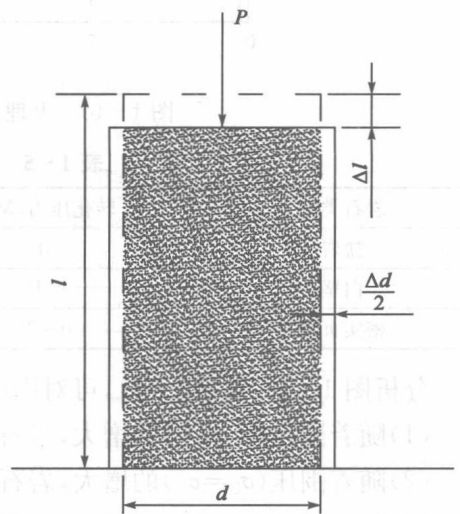


图 1-9 岩石单轴压缩试验