

刘希圣 主编

钻井工艺原理

上册

破岩原理

高等学校教学用书

石油工业出版社

学(北京)

24

4

高等学校教学用书

钻井工艺原理

上册

破岩原理

刘希圣 主编

石油工业出版社

(京)新登字082号

内 容 提 要

本教材主要讲述石油钻井过程的基本工艺原理及各主要钻井法的工艺技术。全书共十章，分上、中、下三册出版。上册：破岩原理。包括钻井岩石力学基础、钻头及钻柱三章。中册：钻进技术。包括喷射钻井、钻进参数优选、防斜及定向钻井等四章。下册：完井工程。包括压力控制固井及完井三章。

本书叙述简练，基本理论突出，并尽可能多地引入国内外钻井工艺新技术，是石油高校钻井专业学生的教学用书，并可供从事石油钻探工作的科技人员参考。

高等学校教学用书
钻 井 工 艺 原 理
上 册
破岩原理
刘希圣 主编

石油工业部教材编译室编辑（北京902信箱）

石油工业出版社出版

（北京安定门外安华里二区一号楼）

北京吴海印刷厂排版

北京市朝阳区北苑印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 8¹/₂印张 206千字 印8001—11000

1988年9月北京第1版 1994年1月北京第3次印刷

ISBN 7-5021-0112-8/TE·111

定价：3.95元

编者的话

《钻井工艺原理》教材,是培养石油钻井工程专业学生的主要专业课。初版是在1980年根据石油高等院校石油钻井专业教学计划的要求,由各高等石油院校部分教师集体编写而成的。在内容上基本包括了钻井工艺技术的主要理论,较多地引用了国内外当时的新理论、新技术,具有一定的先进性。自出版至今,已使用了五个年级,在石油高校钻井专业教学中发挥了重要作用,并对石油厂矿、科研单位和各种石油学校起了一定参考作用。

但是,由于该教材编写时各院校尚未制订教学大纲,因此在内容取舍上尚有不当之处,例如内容偏多,部分内容偏深;再者,近几年来,钻井工艺技术又有了新的发展,部分内容需要更新;基于以上原因,该教材有必要进行重新编写。

修改后的教材,是在原教材的基础上遵循以下原则编写的:

1. 本教材主要讲述石油钻井过程的基本工艺原理及各主要钻井法的工艺技术。对原教材的章节结构除海洋钻井一章另设选修课外,其它章节基本未做大的变动。考虑各院校教学计划安排的要求,新版教材全书共包括十章,分三个分册出版。即上册——破岩原理,包括钻井岩石力学基础,钻头及钻柱三章;中册——钻进技术,包括喷射钻井,钻进参数优选,防斜及定向钻井等四章;下册——完井工程,包括压力控制、固井及完井三章。

2. 少而精原则。下决心把篇幅压缩下来。从初版的95万余字(印刷版面)压缩到60万字左右,以便在100学时左右讲完。

3. 突出基本理论。本教材是大学本科的必修课教材,因此对尚未成熟的和过于深奥的理论,只作简要的介绍。对于较深较新的内容可另开选修课,以扩大和加深学生的专业理论和知识。

4. 削枝强干。尽可能不写或少写工艺操作和设备工具结构等内容,必要时也应以讲解原理为主。为了配合本课的学习,各院校应辅以直观教学和生产实习,为学习专业理论课打好基础。

本书除了作为高等石油院校石油钻井工程专业学生的主要教材外,还可供从事石油钻探工作的科技人员参考。

参加编写本书的有华东石油学院教授刘希圣(第六章)、教授胡湘炯(第五章)、教授黄荣樽(第一章)、教授陈庭根(第二章)、副教授韩志勇(第四章)、西南石油学院教授郝俊芳(第十章)、副教授高光昭(第九章)、江汉石油学院教授李自俊(第八章)、大庆石油学院副教授张建群(第三章)、副教授周大千(第七章),由刘希圣教授主编。

本书完稿后,由江汉石油学院教授郑基英、大庆石油学院教授黄匡道两同志进行了审查,西南石油学院教授张绍槐同志也提供了许多宝贵意见,特此一并致谢。

由于编者思想水平及业务水平有限,错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

第一章 钻井岩石力学基础	(1)
第一节 岩石的结构和组织特点	(1)
第二节 岩石的力学性质	(6)
第三节 影响岩石力学性质的因素	(23)
第四节 岩石的研磨性	(34)
第五节 岩石的可钻性	(39)
参考文献	(40)
第二章 钻头	(43)
第一节 刮刀钻头	(43)
第二节 牙轮钻头	(50)
第三节 金刚石钻头	(78)
参考文献	(92)
第三章 钻柱	(95)
第一节 钻柱的工作状态及受力分析	(95)
第二节 钻井过程中各种应力的计算	(99)
第三节 深井钻柱的设计	(110)
第四节 钻柱的疲劳破坏	(117)
第五节 氢脆破坏	(127)
第六节 厚壁钻杆和铝合金钻杆	(129)
参考文献	(132)

第一章 钻井岩石力学基础

组成地壳的各种岩石具有不同的机械物理性质。岩石力学的一个重要任务就是要研究这些性质。但是由于所研究的对象和目的的差异，研究的方法也有很大区别。例如，地球物理学家感兴趣的是岩石体积和形状改变的动力学方面（例如地震波）；地质力学则研究岩层变形断裂和构造形成的原因和历史；土壤力学的任务主要是研究地表土壤或岩石的性质以解决各种建筑物的基础设计问题；从事地下建筑或矿山开采的人则研究在不同深处组成岩体的岩石特性，尤其是它的强度及形变特性以解决地下岩石结构的稳固性和岩石边坡的稳定性问题，另外，也研究采用不同方法（如机械破碎、炸药爆破、水力破碎等）对岩石的破碎问题以设计合理的破岩工具、破碎方式、参数组合等问题。在石油钻井中也要解决类似的问题。不过它和其它矿山开采有所不同。石油井是个竖长的圆柱形小孔，其深度达到数千米。井眼的形成、岩石的破碎是借助于专门的工具来完成的，而人是无法到达井底工作面的。在钻井过程中，破碎的岩石体积很小，而且破碎工具下的岩体内部是处于多向应力状态。作用在井底岩石上的力，除了钻压以外，还有上覆地层的岩石压力、洗井液柱的静水压力以及地层的孔隙压力等。在深井及地温异常地区，岩层的温度也可达到足以改变岩石物理机械性质的程度。洗井液中的液体介质一般都倾向于降低岩石的强度，这一方面有助于提高岩石破碎效率，但另一方面却会减弱井壁岩层的稳定性，这对软弱夹层影响尤为显著。

本章的目的在于阐明岩石的基本物理机械性质和基本的破碎规律以及影响这些规律的与石油钻井有关的各种因素的作用，以便为设计和使用钻头，正确地掌握钻井工艺过程的主要原理等方面打下一些必要的基础。

第一节 岩石的结构和组织特点⁽¹⁾⁽²⁾

岩石的结构和组织特点在地质学中已有过详细的论述，本节着重简要地介绍与岩石的物理、力学以及破碎特性有关的一些内容。

一、岩石的微观结构

所有岩石都是矿物颗粒的集合体。石油钻井中遇到的多数是沉积岩，有时也碰到一些变质岩。这些岩石很少由一种矿物组成，多数是由两种以上矿物所组成。这些岩石按其结构特点可以区分为晶质岩石和碎屑岩石两类，前者多属于变质岩，而后者多为沉积岩。

矿物的性质，例如硬度、强度、解理、劈裂方向等，在某些条件下决定着岩石抵抗外力的能力。特别是当岩石中含有数量众多的较软的具有明显劈裂性质的矿物或含有硬的矿物（如石英）时就更为明显。一般说来（特别对于晶质岩石），由强度较高的矿物所组成的岩石，其强度也较高，尤其是当岩石只含有少数种类的矿物时更为明显。但是，对于某些岩石来说，会出现严重的矛盾，例如滑石或石膏所组成的纤维结构的岩石，虽然组成矿物的强度较低，但该种岩石却具有较高的强度。

虽然矿物的物理性质会对岩石的工程力学性质产生影响，但是实际上由于矿物颗粒是如此地微小，在岩石中颗粒的排列方向又无一定规律，矿物结晶结构特性的影响相对减小。因此，在一般情况下，组成矿物对岩石性质的单独影响是很小的。更主要的，岩石的基本力学性质将取决于组成矿物颗粒间的联结情况。这对于沉积岩石来说，更是如此。

普赖斯 (Price) 曾建立了某些钙质及泥质胶结的砂岩的强度 (单轴抗压强度) 与石英

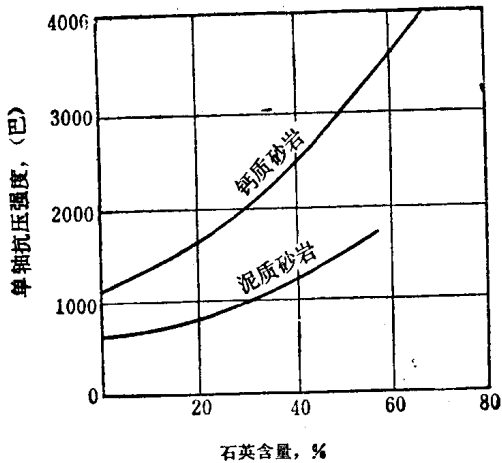


图 1-1 砂岩的强度与其石英含量及胶结的关系

颗粒含量之间的关系 (图 1-1)。可以明显地看出，随着石英含量的增加，砂岩的强度将增大。当然，同样是砂岩，但钙质胶结的强度要比泥质胶结的大，而硅质或铁质胶结的，又比钙质胶结的高。

因此，岩石的许多工程力学性质是取决于矿物颗粒在岩石中的结构及其联结 (或胶结) 的形式。

在图 1-2 中给出了四种具有代表性的岩石切片显微结构示意图 (放大 15 倍)。前两种为晶质岩石，后两种为碎屑岩。

玄武岩是一种火山岩，具有微细的结构，含有辉石和斜长石的微晶，靠紧密的机械联结使其组织非常致密。

花岗岩强度也是大的，但它的结构较粗并存在有较大的结晶正长石的颗粒，使它的强度比起其它细粒火山岩来要小些。花岗岩的强度在某程度上取决于其它使胎体变弱的矿物 (例如云母) 的存在。

砂岩是一种典型的沉积岩，它是由许多变圆了的石英颗粒被碳酸钙 (方解石)、粘土矿物铁质或硅质的胎体胶结而成的。其强度主要决定于胎体的强度以及其中所含有的空隙的类型和数量。硅质石英岩的强度很高，甚至比花岗岩大。粗粒的灰质砂岩胶结弱，不接触的空隙占有很高的比例，所以其强度很低。泥质胶结的砂岩的强度就更弱。石英颗粒的尺寸 (一般为 1~0.1 毫米) 也能影响到孔隙的数量及颗粒间的接触面积，因而也对岩石的强度起影响作用。

页岩 (泥岩) 是压实了的粘土，由微细的，一般具有微米级 (小于 0.01 毫米) 的高岭土、胶岭土、云母和石英的细颗粒所组成。页岩与粘土的区别在于其致密性。若给粘土矿物以一定的分子联结力，即使在湿化的条件下仍不会完全消失。而粘土在湿化时则丧失其全部强度，它的破坏完全取决于其密度 (比重) 及外荷的大小。页岩中的片状结构有助于它的湿化破坏。页岩中的高孔隙度，不够致密也是它强度较弱的一个主要原因。如施以高压，减小其孔隙能相应地增大其强度，最终将变成板岩；如其中含有高组分的细粒石英，则其强度还要增大。

一般说来，岩石中的矿物颗粒是由胎体胶结在一起，或在颗粒的界面处靠接触力而联结在一起。因此，岩石的强度将首先决定于胎体 (或胶结物) 的强度和颗粒间的接触面积。在其它因素不变的情况下，同类岩石的强度便与颗粒的接触面积成正比，而与颗粒的尺寸成反比。

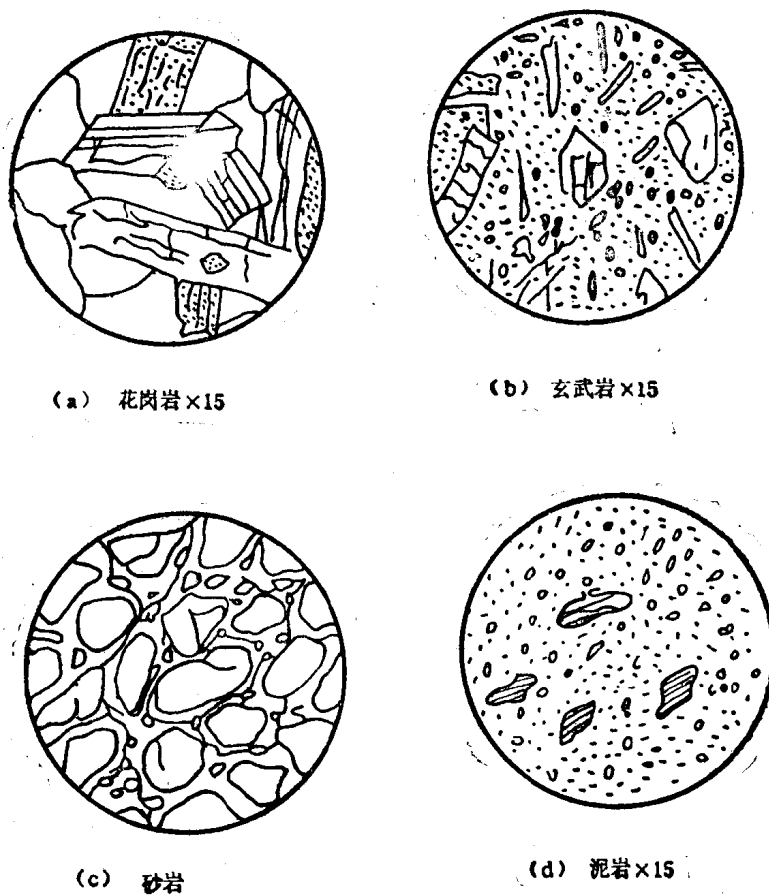


图 1-2 典型岩石结构的切片图

由于岩石微观结构上的特点使多数岩石具有内部的孔隙空间，其孔隙度随岩石的类型及其内部结构而异。岩石的孔隙空间，一般是由连续的不规则的由矿物颗粒所分开的毛细裂缝所构成。沉积岩的孔隙度在很大程度上取决于所含胶结物的数量，颗粒组成的粒度及其排列充填情况。

岩石的力学性质受其孔隙、裂隙、含有薄弱杂质点等的影响。

表 1-1 中给出了一些典型岩石的孔隙度值。

岩石中的孔隙在很大程度上影响岩石的密度。

岩石的密度和机械性质的关系是令人感兴趣的。岩石内部孔隙的存在影响岩石组分间的接触因而影响联结力，也就是影响岩石的强度。根据大量的资料可以绘制出如图 1-3 所示的岩石强度与其密度间的近似关系。

一般认为，岩石的孔隙度会随其埋藏深度的增加而减小，或岩石的密度会随埋深的增加而增大。这已由密度测井所证实。因此，一般地讲，岩石的强度将随其埋深的增加而增大。但是有时也会出现例外的情况，例如对于非正常压实的泥页岩地层，由于孔隙中的水分未被充分排出而显现密度异常，从而降低了它的强度。

有些泥页岩具有明显的层理，泥浆中的水分常沿这些层理面侵入而引起井壁坍塌；从地下取出这些岩层的岩芯也常由于地应力的解除和吸水，会沿层理面裂开而破碎。

表 7-1 岩石的密度和孔隙度

岩 石	密度, 克/厘米 ³	孔 隙 度, %
花岗岩	2.6~2.7	0.5~1.5
粗晶玄武岩	3.0~3.05	0.1~0.5
流纹岩	2.4~2.6	4~6
安山岩	2.2~2.3	10~15
辉长岩	3.0~3.1	0.1~0.2
玄武岩	2.8~2.9	0.1~1.0
砂岩	2.0~2.6	5~25
页岩	2.0~2.4	10~30
石灰岩	2.2~2.6	5~20
白云岩	2.5~2.6	1~5
片麻岩	2.9~3.0	0.5~1.5
大理岩	2.6~2.7	0.5~2
石英岩	2.65	0.1~0.5
板岩	2.6~2.7	0.1~0.5

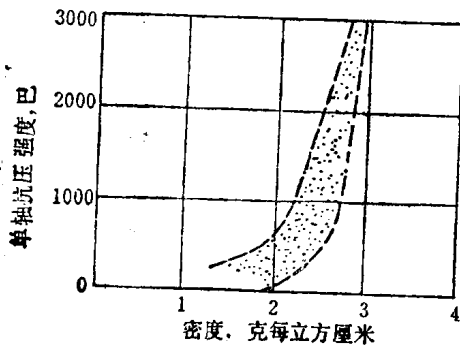


图 1-3 岩石的强度与其密度间的近似关系

二、岩石的宏观结构

上面讲的岩石的微观结构是以岩石内部结晶的不完全性(火成岩、变质岩)和颗粒间的胶结情况的不均匀性(沉积岩)为特点的。而岩石的宏观结构则是以岩石的断裂(即岩石的裂隙性)和层理等为特点的。

岩石的结构性是与其成因类型和形成条件以及它的存在的整个历史环境和条件密切相关的。

火成岩的宏观结构特征,对钻井过程中破碎岩石时岩石的机械性质没有显著的影响。而

沉积岩和变质岩的宏观结构却有着重要的意义。

沉积岩的主要外部结构特征是在沉积岩沉积过程中所形成的层理。

层理可定义为在垂直方向上岩石成分变化的情况。层理的形成主要决定于下列原因:成分相同时颗粒大小在垂直方向上的变化;不同成分颗粒的交替和某些矿物颗粒在一定方向上的指向等(图 1-4)。

在某些岩石中,特别是在化学沉积物中和在碳酸盐类岩石中,层理表现得很不明显。甚至在砂岩和层状岩石中,只有在很大块岩石中才可以区别出层理来。在钻井地质剖面上所表示的岩性变化、软硬夹层等就是层理变化的反映。

片理是岩石沿平行的平面分裂为薄片的能力。片理面常常不与层理面相一致。片理面常发生于单向地质构造压力作用的方向,而这种压力可以和层理面成不同的角度。除了片理外,有时还会产生两个裂隙系,在大多数情况下,这两个裂隙系成斜角相交,并垂直于片理面而分布着。

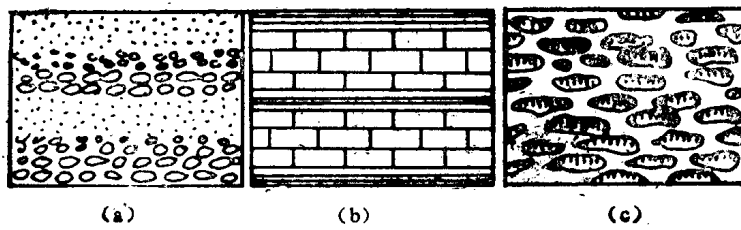


图 1-4 岩石的层理

(a) 组成颗粒大小在垂直方向上的变化

(b) 不同成分颗粒的交替

(c) 某些矿物颗粒的水平指向

由于岩石在结构上的特点使多数岩石的性质具有不均匀性和各向异性。

试验表明，即使不具有裂隙和明显层状的岩块试件，也可以带有各向异性的特点。这是岩石内部结构性（微观结构）的反映。岩石中的矿物定向排列，沉积过程中具有的微层理性，变质过程中所形成的片理以及在地壳构造力作用下所形成的劈理等等，都会使岩石的物理-力学性质带上各向异性的特征。

岩石的各向异性，表现在它的强度及变形特性等各方面。

表 1-2 给出了室内静力试验结果〔8〕。

这些数据说明，在平行于和垂直于层理面方向上岩石的物理-力学性质是具有明显差异的，亦即是各向异性的。

表 1-2 某些沉积岩的各向异性（室内静力试验结果）

岩石名称	弹性模量E, 10^6 牛每平方米		泊松比 μ		抗压强度 σ_c , 巴	
	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥
粗砂岩	1.93~4.19	1.73~4.54	0.10~0.45	0.12~0.36	1185~1575	1423~1760
中粒砂岩	2.87~4.19	2.63~3.37	0.12	0.10~0.22	1170~2160	1470~2060
细砂岩	2.83~4.95	2.90~4.60	0.10~0.22	0.15~0.36	1378~2410	1335~2205
粉砂岩	1.01~3.23	0.84~3.05	0.15~0.50	0.28~0.47	344~1045	554~1147
岩石名称	抗拉强度 σ_t , 巴		抗弯强度 σ_m , 巴		抗剪强度 τ_s , 巴	
	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥
粗砂岩	44.3	51.4~52.5	111~172	103	483	470
中粒砂岩	77.0	52.0	162~226	131~194	336~594	482~618
细砂岩	80.7~118	60~79.5	208.5~265.3	177.5	432~595	524~649
粉砂岩	—	—	22.7~166	43.0	48~113	129~198

注：表中∥和⊥符号，是表示平行于和垂直于层理面方向的试验条件。

第二节 岩石的力学性质

岩石（岩块）的力学性质的含义包括两个：岩石的变形特征和强度特征。岩石的变形特征是指岩石试件在各种荷载作用下的变形规律，其中包括岩石的弹性变形、塑性变形、粘性流动和破坏规律，它反映了岩石的力学属性。岩石强度是指岩石试件在荷载作用下开始破坏时的最大应力（强度极限）以及应力与破坏之间的关系，它反映了岩石抵抗破坏的能力和破坏规律。

岩石的变形特征和强度特征，由岩石试件在单轴或三轴试验机上所得到的应力-应变曲线来描述。由于试验条件不同（单轴的或三轴的，刚性的或非刚性的），所得到的试验结果也会各不相同的。

下面分别不同的条件介绍岩石的有关力学性质。

一、岩石的应力-应变曲线

研究岩石力学性质的最普通的方法是采用长度为其直径的 2~3 倍的圆柱形岩样进行轴向压缩试验（单轴压缩试验），如果将试验的应力和应变作图，就得到应力应变曲线。但是用一般的（非刚性的或称为柔性的）试验机所得到的试验结果，仅仅反映了岩石在破坏前期的应力应变关系，其特点是当应力达到极限强度时岩石产生猛烈地破坏之后，便失去了承载能力。这个现象是不真实的。这是由于一般的材料试验机的刚度小于岩样刚度的缘故。因此，在试验中，贮存于试验机中的弹性变形能很大。当试件发生破坏时，试验机内贮存的大量弹性能也立即释放，并对试件产生冲击作用，使试件产生猛烈破坏。实际上岩石从开始破坏到完全失去其承载能力的过程，是个渐近的过程，不是突如其来的过程。这种过程一直延缓到试件的变形能超过其裂隙的表面能为止。

采用刚性试验机，并应用伺服控制系统，控制加载速度以适应试件变形速度，就可以得到岩石的全应力-应变曲线。

典型的岩石全应力-应变曲线如图 1-5 所示。

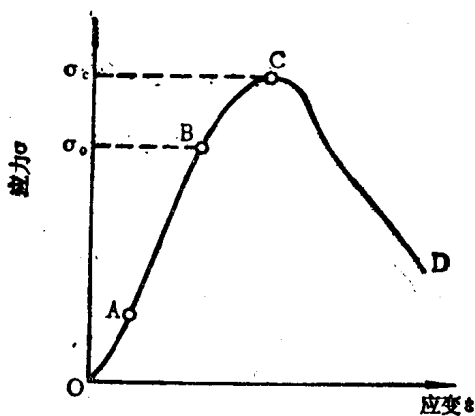


图 1-5 岩石的全应力-应变曲线

图中 OA 段曲线稍向上凹，这反映岩石试件内部裂隙逐渐被压密。随着岩石内裂隙被压密进入 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。这一段应力-应变曲线的斜率随着应力的增加逐渐地减小到零，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 σ_0 称为屈服应力。最高点 C 的应力称为强度极限 σ_c 。（如为单轴试验便称为单轴抗压强度）。CD 线段曲线下降，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 段以脆性状态为其特征。

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，基本无什么区别。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，但破坏是个渐近过程，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的承载能力。这对于我们研究岩石的破碎过程和井壁岩石的失稳破坏以及支护时是应该加以考虑的。

二、岩石的弹性常数

弹性材料的弹性常数包括有杨氏弹性模量 E 、泊松比 μ 、剪切弹性模量 G 和体积弹性模量 K 等。各模量之间存在有如下的关系：

$$G = E / 2(1 + \mu) \quad (1-1)$$

$$K = E / 3(1 - 2\mu) \quad (1-2)$$

因此，只要知道了其中的两个模量值，其余的弹性常数便可由式 (1-1) 和 (1-2) 推算出来。

虽然岩石与理想的弹性材料相比有很大差别，但仍可以测得有关的弹性常数以满足工程设计和施工上的要求。确定岩石弹性常数的实验方法很多，主要有静力法(静载压缩试验)和动力法(或即声波法，通过测定纵横波速进行计算)两大类。这里我们只讲通过静压试验来求岩石的弹性模量。

在分析岩石压缩试验的应力-应变曲线时已讲到，对于多数岩石存在有一直线段，它的斜率便代表了岩石的杨氏弹性模量。但是有一些岩石的应力-应变曲线是弧形，在其上几乎找不到明显的直线段(图 1-6)，这说明没有唯一的模量。在这种情况下，可以确定某一点 P 处的切线模量或割线模量作为该岩石的杨氏弹性模量。这个 P 点习惯上常取为应力等于一半强度极限值的点。此点的切线 PQ 的斜率 $d\sigma/de$ 称为切线模量，割线 OP 的斜率 σ/e 称为割线模量。

在表 1-3 中，归纳了许多学者的研究数据^{〔1〕〔2〕〔4〕}，列出了各种岩石的杨氏弹性模量 E 和泊松比 μ 的数值。

表中的泊松比值一般是在进行压缩试验时，同时测得试件的纵向和横向应变计算出来的。

岩石的弹性常数一般均随围压的增加而增大。华东石油学院钻井岩石力学实验室研究了我国东部一些油田地质剖面上各主要岩层的泊松比随压力的变化情况(见表 1-4)^{〔84〕}，发现岩石的泊松比值随压力成指数关系而增大。

三、简单应力条件下岩石的强度

岩石的强度也和它的弹性系数(模量)一样，与应变形式有很大的关系。只有在压缩情况下，岩石才呈现出很大的强度，而在其他形式的应变情况下，岩石的强度是不大的。这可以从表 1-2 中所列的数据看出来。

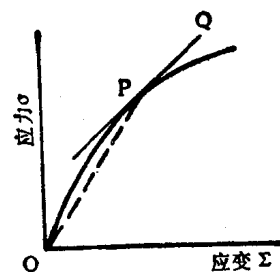


图 1-6 岩石的非线性弹性变形

表 1-3 岩石的弹性模量和泊松比

岩 石	E, 10 ⁶ 牛每平方米	μ	岩 石	E, 10 ⁶ 牛每平方米	μ
粘土	0.03	0.38~0.45	花岗岩	2.6~6.0	0.26~0.29
致密泥岩	—	0.25~0.35	玄武岩	6~10	0.25
页岩	1.5~2.5	0.10~0.20	石英岩	7.5~10	—
砂岩	3.3~7.8	0.30~0.35	正长岩	6.8	0.25
石灰岩	1.3~8.5	0.28~0.33	闪绿岩	7~10	0.25
大理岩	3.9~9.2	—	辉绿岩	7~11	0.25
白云岩	2.1~16.5	—	盐 岩	0.5~1.0	0.44

表 1-4 我国东部油田各主要地层的泊松比值随压力的变化〔24〕

地 层	岩 性 简 述	下列围压 (巴) 下的泊松比值				抗拉强度 (巴)	
		0	140	280	420		
东 营 组	D ₂	红色砂质泥岩 (1)	0.085	0.080	0.101	0.125	28.1
		红色泥质砂岩 (1)	0.085	0.100	0.152	0.247	20.0
		红色砂质泥岩 (2)	0.069	0.080	0.106	0.145	15.1
		红色泥质砂岩 (2)	0.039	0.084	0.116	0.143	18.7
		棕红色砂质泥岩	0.051	0.098	0.131	0.160	17.5
	D ₃	红色砂质泥岩 (1)	0.066	0.102	0.154	0.215	23.8
		红色泥质砂岩	0.042	0.066	0.098	0.135	6.5
		浅红色砂质泥岩	0.094	0.130	0.145	0.156	6.5
		红色砂质泥岩 (2)	0.075	0.128	0.154	0.174	16.7
	沙 一 段	S ₁	浅灰色白云质泥岩	0.034	0.071	0.088	0.118
浅灰色砂质泥岩			0.043	0.051	0.068	0.089	20.0
浅黄灰色泥灰岩			0.125	0.242	0.254	0.260	20.1
沙 二 段	S ₂	浅棕色砂岩	0.108	0.190			20.0
		紫红色砂质泥岩	0.085	0.127	0.140	0.175	30.1
		浅灰黄色油浸砂岩	0.175	0.212	0.250	0.271	10.0
		深灰黄色油浸粉砂岩	0.150	0.162	0.160	0.166	28.5
		浅绿灰色泥质粉砂岩	0.011	0.055	0.073	0.085	30.0
		紫红色灰色泥岩	0.035	0.089	0.136	0.137	20.0
		浅灰色泥质砂岩	0.098	0.148	0.165	0.172	20.0
		浅黄灰色油斑粉砂岩	0.023	0.061	0.109	0.110	41.5
灰色砂质泥岩	0.033	0.076	0.110	0.126	20.0		

续表

地 层	岩 性 简 述	下列围压 (巴) 下的泊松比值				抗拉强度 (巴)	
		0	140	280	420		
沙 三 段	S ₃ ¹	灰色砂质泥岩	0.217	0.144	0.148	0.159	20.0
		灰色泥岩	0.104	0.134	0.165	0.192	20.0
	S ₃ ²	灰色泥页岩	0.137	0.200	0.266	0.345	20.0
	S ₃ ³	浅黄灰白云质泥岩	0.112	0.157			20.0
		浅黄灰色泥质粉砂岩	0.066	0.126	0.155	0.153	15.0
		浅灰色粉砂岩	0.046	0.088	0.113	0.108	30.0
		浅灰色细砂岩	0.100	0.138	0.190	0.249	10.0
	S ₃ ⁴	灰白色粗晶盐岩	0.346	0.335	/	/	10.0
		浅灰色粉砂岩	0.056	0.107	0.153	0.197	30.0
		浅灰色细砂岩 (1)	0.050	0.108	0.152	0.142	30.0
浅灰色细砂岩 (2)		0.069	0.108	0.147	0.183	30.0	
沙 四 段	S ₄	灰色细砂岩	0.085	0.136	0.165	0.189	25.0
		浅灰色粉砂岩	0.051	0.164	0.250	0.328	25.0
		棕色细砂岩	0.098	0.156	0.211	0.265	25.0
		棕色细砂岩	0.073	0.121	0.190	0.270	25.0
奥 陶 系	O ₂	棕色细砂岩	0.076	0.116	0.140	0.160	25.0
		灰白色白云岩	0.154	0.183	0.204	0.209	40.0
		灰色石灰岩	0.215	0.232	0.238	0.237	45.8

单晶体和非晶体 (例如玻璃) 的抗拉强度比抗压强度只小 2/3~3/4, 而岩石的抗拉强度有时只有抗压强度的 2% 左右。

表 1-5 中列出一些岩石的单轴抗压强度 σ_c 、抗拉强度 σ_t 和抗剪强度 τ 的数值⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

由上列数据显然可以看出, 在一定形式的应变情况下, 拉伸应力的作用愈大, 则在这种应力状态下岩石的强度会愈小。因此, 岩石的抗剪强度大于抗弯强度, 更大于抗拉强度, 而岩石的抗压强度最大。

如果其余应变形式的强度都以抗压强度的分数来表示, 则有如表 1-6 中所示的近似关系⁽¹⁾。

在叙述岩石的组织结构特点时, 我们已经讲过, 不论岩石的微观或宏观的结构特征都会对岩石的强度发生影响。由于岩石结构的多变性, 使得我们不可能象对金属那样编制岩石的强度手册, 以便随时查找。文献资料中有关岩石强度方面的数据也仅供作为分析时的参考。为了实际的应用 (特别是在进行岩石结构强度的计算时), 必须对具体的岩石进行必要的强度试验, 以获得比较准确可靠的数据。

实验室试验对所需岩样的制备规定有一定的要求。

如果岩石的性质不受水的影响, 可以直接采用勘探获取的岩心或者间接用岩块经金刚石取心钻头在实验室内钻取试样。该钻头可夹紧在普通立式钻床上, 用水作润滑剂。有少数岩

表 1-5 岩石的抗压、抗拉和抗剪强度

岩 石	抗压强度 σ_c (巴)	抗拉强度 σ_t (巴)	抗剪强度 τ_s (巴)
粗粒砂岩	1420	51.4	—
中粒砂岩	1510	52.0	—
细粒砂岩	1850	79.5	—
页岩	140~610	17~80	—
泥岩	180	32	—
石膏	170	19	—
含膏石灰岩	420	24	—
安山岩	986	58	96
白云岩	1620	69	118
石灰岩	1380	91	145
花岗岩	1660	120	198
正长岩	2152	143	221
辉长岩	2300	135	244
石英岩	3050	144	316
辉绿岩	3430	134	347

表 1-6 岩石各种强度间的比例关系

岩 石	抗压强度	抗拉强度	抗弯强度	抗剪强度
花岗岩	1	0.02~0.04	0.03	0.09
砂 岩	1	0.02~0.05	0.06~0.20	0.10~0.12
石灰岩	1	0.04~0.10	0.08~0.10	0.15

石会严重地受水影响，应采用吸尘干钻或吹气冷却排屑的办法，这样虽费时较长并增加钻头的磨损，但为获取所需的试件仍是必要的。在钻取试件时应注意到岩石结构中的定向特点（例如颗粒方向、结构倾角、节理、片理……等），应尽量保持它在岩体中的天然相应位置，尤其应考虑试件轴线的位置以提高实验数据在实际应用时的可靠性。

岩样的长度视试验的类型而定。岩样端面应严格垂直于岩样轴线（不垂直度不应超过 0.001 弧度），并应十分平滑（不平度应小于 0.02 毫米）。用湿的金刚砂作为润滑剂把岩样放在旋转的磨片机盘上磨光可以得到满意的结果。岩样沿全长度的不直度要控制在 0.3 毫米的范围内。

岩样在试验时，或者以液体完全饱和，或者进行人工烘干（视试验的要求而定）。因为在室温下岩样的含水量会随着它的孔隙度、原始饱和度以及空气中的湿度而变化。

作拉伸、压缩试验时应控制加载速率，一般在 10~50 千牛/分（取决于岩石的强度），以限制动载效应。

下面简要介绍岩石在简单应力条件下的试验方法。

（一）单轴抗压强度试验 (Uniaxial compressive tests)

一般的单轴抗压强度试验，实际上就是把岩样放在压力机的压板之间，施加轴向载荷直到破坏，并记录其应力和应变的压缩试验。施力简图如图 1—7 所示。

岩样破坏时的应力值即为岩石的抗压强度

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (1-3)$$

式中 P——破坏时的轴向载荷；

A——岩样的横截面积；

σ_c ——岩石的抗压强度。

单轴抗压试验的方法简单，但是要取得比较精确的结果也很不容易。在试验时应注意以下几点：

(1) 施加压力的方向应平行于岩样的轴线，这在很大程度上取决于压力机加载压板的设计和制作水平，加载压板应严格地与加载方向相垂直，采用如图 1-7 所示的球座联接头是保证垂直的常用方法。

(2) 岩样的长度 L 应该适当。当 L/D 值很小时 (D 为岩样的直径)，试件中的应力分布趋于三轴应力状态，使岩样具有较高的强度值。当 L/D 值很大时，岩样将发生弹性不稳定而破坏。因此，L/D 值应适中，一般以 L/D=2.5~3.0 比较好。

(3) 应尽量减小端面效应，即设法降低试件端面与垫板间的摩擦。

有一些研究则指出〔6〕，试件中的应力分布不仅是长径比的函数，而且也是垫板形状的函数，并认为最好应采用与试件相同直径的垫板。

由于岩样端面与垫板间的摩擦和约束产生了岩石中应力分布的不均匀性，有些研究者试图用各种方法以减小摩擦的影响，在试件端面与垫板之间采用了石蜡或放置缓冲材料，诸如橡胶片、塑料、薄铜板或铝板、木质纤维板、皮革、吸墨纸、纸板等等。

(4) 试件的尺寸对抗压强度有一定的影响，原则上应尽量采用较大尺寸的试件。但是这受到试验机的加载能力，制备大试件的设备能力，从试块上可以钻取的试件数目等方面的限制。从理论上讲，试件的尺寸应取决于组成岩石的颗粒的尺寸，试件的直径与最大颗粒直径的比值至少应为 10:1。但在实际上，其它一些因素也起着重要的作用，例如裂纹、表面缺陷、加载方向与脆弱平面的关系等等。综合各种因素之后，建议采用 2.2~6.6 厘米直径的试件供作抗压强度试验之用，而一般用 5 厘米直径的较多。

(二) 单轴抗拉强度试验

岩石的单轴拉伸试验也有直接的和间接的两类方法。

直接的岩石拉伸试验基本上与一般的金属拉伸试验方法相同 (图 1-8)。

岩样拉断时的应力值即为岩石的抗拉强度

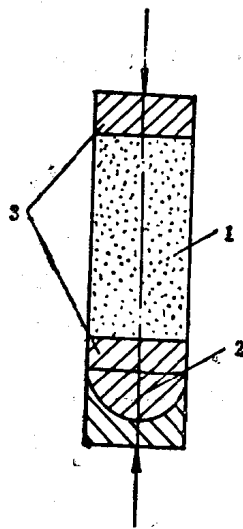


图 1-7 单轴抗压缩试验
1—岩样；2—球座；3—钢垫板