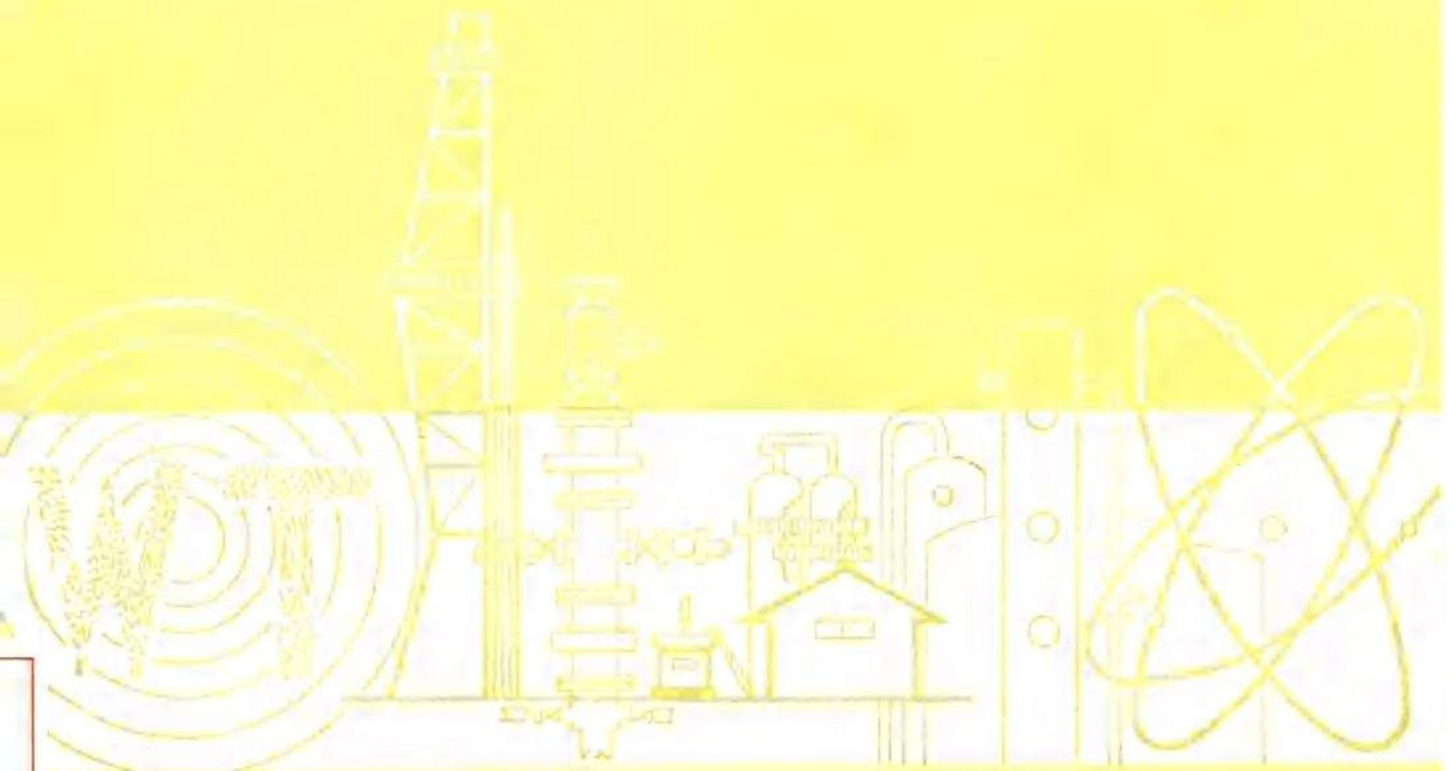




石油技工学校教材

钻井工程

四川石油管理局技工学校 何庆庞 主编



石油工业出版社

钻井工程

四川石油管理局技工学校 何庆庞 主编

石油工业出版社

制（包括泥浆参数、水力参数、地层压力预测、钻头使用及井眼轴线的自动控制等），从而使钻井工艺向着最优化及全盘计划的方向迈进。

国外旋转钻井的四个阶段揭示了钻井工艺发展的客观规律。我国自1977年全面开展喷射钻井以来，开始进入了科学钻井时期。我们钻井工作者了解国外钻井发展的规律，应为我国钻井工艺技术的现代化而努力创造条件。

钻井工艺过程主要包括：高效率的破碎岩石，控制井斜，维持地层—井眼系统的压力平衡，加固井壁与钻开油气层等工艺。钻井工程课的基本内容就是阐述解决这些问题的方法和原理。

前 言

本书是根据石油部劳资司 1984 年审定的石油技工学校石油钻井专业《钻井工程》教学大纲的要求，在 1983 年编写的试用教材的基础上修改而成。

全书共分十章，由四川、胜利、华北、贵州、江汉、新疆、河南技校钻井教研组合编。各章编写人：四川石油管理局技工学校何庆庞（第一章、第三章第三节），华北石油技工学校余希圣（第二章），四川石油管理局技工学校刘坚（第三章第一节）、胡显平（第三章第二节）、周厚荣（第四章）、邓扬武（第五章），新疆石油管理局克拉玛依技工学校宋大勋（第六章），胜利油田钻井技工学校蔡维纲（第七章），江汉石油技工学校漆继明（第八章），贵州石油技工学校王明仲（第九章），河南石油技校张厚昌（第十章）。由何庆庞主编，石油部钻井工程司副司长、总工程师李克向审阅。四川技校钻井教研组部分教师参加了稿件的清理、抄写及校对工作。江苏、渤海技校参加了试用一年后的修改讨论，并由何庆庞、蔡维纲根据集体讨论的修改意见对 1983 年试用本进行修改。在本书的编写过程中，西南石油学院、华东石油学院、重庆石油学校等单位有关同志提出过许多宝贵意见，在此一并表示感谢。

全书包括钻井工艺技术、固井、完井、井下事故的预防和处理、设备安装等部分，内容较为全面，编写时力求文字通俗易懂，适用于石油技校学生，并可供在职钻井工人中级技术培训选用。

由于我们业务水平不高，经验不足，虽经过试用一年后的集体修订，但由于近年来国内外石油钻井事业的迅速发展，书中难免存在一些过时的工艺等缺点与错误，希各兄弟技校师生和读者们原谅。

编者

1986 年 10 月

绪 论

我们伟大的祖国幅员辽阔，地大物博，蕴藏着极为丰富的矿产资源。石油及天然气，正是这些宝贵财富中一颗闪闪发亮的明珠。石油及天然气的用途十分广泛，是重要的能源。

钻井是勘探和开发油气田的主要手段。要直接了解地下的地质情况，要证实已探明的构造是否有油气及含油气的面积和储量，要把地下的石油和天然气开采出来，都需要通过钻井来完成。钻井质量的优劣，速度的高低，直接影响勘探与开发油气田的速度和水平。因此，我们必须不断提高钻井工艺技术水平，优质、高速地打井，才能适应石油工业飞速发展的需要，才能满足四化的要求。

我国是世界上发现和利用石油与天然气最早的国家，劳动人民通过钻井来开采石油与天然气有着悠久的历史，远在公元前十一世纪，古书“易经”中，就有“泽中有火”的记载，宋代科学家沈括（1031~1095）所著“梦溪笔谈”第一次给石油以科学命名，并沿用至今。根据历史记载，从两千多年前的战国秦代开始，就在四川凿井取卤熬盐了。古代钻井采用绳索式顿钻，除钻头外其它均用竹木制成，并以人或畜力作动力。公元前206年到公元220年，就能钻出深200多米的井了，1835年钻井深度已超过千米。而美国在1859年才钻成一口21.69米的井，苏联1863年才钻成一口20米的井。我国钻井虽有悠久的历史，但由于封建制度的长期束缚，特别是帝国主义的侵略和反动派的摧残，严重限制了生产技术的发展。从1907年到1948年只钻井169口（最深1402米），总进尺67025米，原油总产295多万吨。而1949年的原油年产量仅12.1万吨。

解放后，我国石油工业迅猛发展，1978年原油产量突破亿吨大关，跃居世界第八位。技术水平很快提高，不但能优质高速地钻成中深井，也能钻7000米以上的超深井。不但能在陆地钻直井、定向井、水平井及多底井，也能在海上进行钻井。钻井设备与工具，从过去靠进口到目前已能自行设计、制造并基本满足了国内需要。一支钻井科研队伍已初具规模……。当然，这和世界先进水平相比还有一定差距。我们要奋起直追，不断提高技术水平，一定能赶超上去。

根据资料介绍：国外（美国）钻井发展大体上经历了四个阶段。

1900~1920年，概念形成阶段（启蒙时期）。这一阶段的特征是：逐渐地形成了旋转钻井的概念；知道了使用泥浆；制出了刮刀及牙轮钻头；开始采用了下套管注水泥固井的工艺。同时，钻井速度有了提高（台年进尺可达数千米）。

1920~1948年，缓慢发展阶段（发展时期）。其特征是配备了较大马力的钻机，造出了较多种类的刮刀及牙轮钻头，泥浆工艺有了改善，改进了固井工作。钻机的台年进尺可达10770米。但由于忽视了钻井科研，使之延续了28年之久。

④ 1948~1968年，科学钻井阶段（科学化时期）。其特征是发展了喷射钻井及平衡钻井技术，研制出镶齿、密封、喷射式钻头，使用了低固相、无固相不分散体系的优质泥浆。由于大力开展了钻井科研，使钻机台年进尺可达2.5~3万米。

1968年至今，自动化阶段（时期）。其特征是造出了自动化钻机，钻井参数的全面控

目 录

绪论

第一章 钻头

- 第一节 岩石的机械性质 (1)
- 第二节 刮刀钻头 (10)
- 第三节 牙轮钻头 (15)
- 第四节 金刚石钻头 (46)

第二章 钻柱

- 第一节 钻柱的组成和规范 (58)
- 第二节 钻柱的受力分析 (73)
- 第三节 钻柱的损坏 (75)
- 第四节 钻具的检查、使用与管理 (78)
- 第五节 厚壁钻杆和铝合金钻杆 (82)

第三章 钻进技术

- 第一节 防斜打直井技术 (89)
- 第二节 喷射钻井 (114)
- 第三节 最优化钻井 (144)

第四章 井下动力钻井

- 第一节 涡轮钻井 (159)
- 第二节 螺杆钻具钻井 (170)

第五章 定向钻井

- 第一节 定向井的井身剖面 (177)
- 第二节 定向井造斜方法及原理 (182)
- 第三节 定向井的方位控制 (189)
- 第四节 造斜工具的定向方法及仪器 (193)
- 第五节 定向钻井的其它问题 (201)

第六章 取心

- 第一节 取心工具的组成 (204)
- 第二节 取心工具的类型 (207)
- 第三节 取心工艺 (213)

第七章 固井

- 第一节 井身结构 (218)
- 第二节 下套管 (220)
- 第三节 注水泥 (230)
- 第四节 深井尾管固井 (249)
- 第五节 固井质量的检查及安装井口装置 (252)

第八章 完井与试油

- 第一节 钻开生产层 (258)

第二节	完井方法	(260)
第三节	完井井口装置	(263)
第四节	试油	(268)
第五节	中途测试	(277)
第九章	钻井事故的预防和处理	
第一节	地层压力与破裂压力预报	(291)
第二节	井喷与压井	(297)
第三节	井漏	(317)
第四节	卡钻	(322)
第五节	钻具事故和落物事故	(338)
第十章	钻井设备的安装与开钻前的准备工作	
第一节	井场的选择与布置	(348)
第二节	钻井设备的安装	(350)
第三节	开钻前的准备工作	(363)
参考文献		(369)
非许用单位与法定计量单位换算表		(370)

第一章 钻 头

钻头是破碎岩石的主要工具。石油钻井用的钻头的类型、结构与所钻地层的岩石性质是否相适应。钻头质量的优劣，对提高钻速、降低成本、加快建井周期，起着重要作用。随着现代工业技术的迅速发展，在钻头的设计、制造与使用方面都有很大的改革。从而使钻头工作的技术经济指标成倍增长。为了适应现代石油钻井深度不断增加，井下情况复杂等特点，各类钻头的品种，使用范围都在不断扩大。以目前现场使用最广泛的三牙轮钻头为例，无论钻头的牙齿、轴承及洗井液水力能量的充分利用等方面，均有一系列的根本改革，从而提高了钻头工作寿命，增加了进尺。同时，刮刀钻头、金刚石钻头为满足钻井需要也有很大发展，并取得良好的工作指标。

钻头的发展是人们在实践中，逐步认识钻头与岩石破碎规律的相互关系，工业技术不断进步的结果。目前，国内外石油钻井用钻头种类繁多，可按其结构与工作原理进行以下分类。

按结构分：刮刀钻头，牙轮钻头，金刚石钻头三种。

按功用分：全面钻进用钻头（全径钻头），环状钻井用钻头（取心钻头）两种。

按破岩作用分：切削型，冲击型，复合作用型等。还可按洗井液水能量的利用，牙齿与轴承的不同类型作多种分类。

钻头破岩效率的高低，可用总进尺 H ，平均机械钻速 V_t （即钻速）这两个指标来衡量：

$$V_t = \frac{H}{t} \quad (1-1)$$

式中： V_t ——一只钻头的平均机械钻速，米/小时；

H ——一只钻头的总进尺，米；

t ——一只钻头的纯钻进时间，小时。

石油钻井中提高钻头的总进尺 H ，钻速 V_t 就能达到加快钻井速度，缩短建井周期的目的。一般认为：井的深度不大，换钻头起下钻行程时间较短，宜以提高钻速 V_t 为主；深井、超深井宜以提高钻头总进尺 H 为主。

地层岩石是钻头的工作对象，在本章里除对目前现场所用刮刀钻头、牙轮钻头、金刚石钻头进行讨论外，首先对岩石的机械性质作一简单介绍。

第一节 岩石的机械性质

地球表面的一层固态层圈叫地壳，它由岩石组成。岩石是由一种或多种矿物按一定规律组成的自然集合体，按成因可分岩浆岩、变质岩、沉积岩三大类。绝大多数的石油与天然气都储藏在沉积岩里。沉积岩按体积仅占地壳 5%，但在地表的分布却极为广泛，约占 75%。为了开发地下的石油与天然气，人们必须在地面使用专门的设备和工具，不断破碎岩石，钻

成井眼以建立油、气通道。为此，掌握岩石破碎的规律是确定钻井方式，选择破碎工具，规定技术措施所必须的，也是十分重要的工作。

油气井是一个垂直于地表的圆形小孔，其深度可达数千到一万多米，人们无法进入工作面。在这种特定条件下，为了采用最优钻井方式，选择最好的破岩工具以达到最高的破岩效率，需要我们去分析、掌握岩石在受力变形及破碎过程中所表现出来的性质。

一、岩石的结构

地球上大多数岩石均由两种以上矿物、胶结物组成。矿物是地壳中的化学元素在各种地质作用下，由一种或多种元素组成的天然单质或化合物。至今已发现的矿物约 3000 多种，常见的约 200 多种。组成岩石的矿物叫造岩矿物，99% 的地壳岩石是由 40 多种造岩矿物组成的。最常见的是占地壳 98.6% 的氧、硅、铝、铁、钙、钠、钾、镁八种元素与其它元素组成的 12 种矿物，即正长石、斜长石、石英、白云母、黑云母、角闪石、辉石、橄榄石、方解石、白云石、高岭土、氧化铁。

自然界的固体物质可分为晶体、非晶体两类，常见的晶体如食盐、明矾、砂糖……等。非晶体如松香、玻璃、沥青及蛋白石等矿物。晶体与非晶体在外形特征、物理性能等方面都有极大的差别。例如晶体有较为规则的外形，固定的熔点，在导电、导热、透光等物理性质上具有明显的方向性；非晶体则相反，其物理性质与方向无关。晶体与非晶体，二者性质上的差异决定于它们的内部结构。组成晶体内部的微粒（分子、离子或原子）按一定规律在空间排成整齐的行列，构成所谓“空间点阵”。

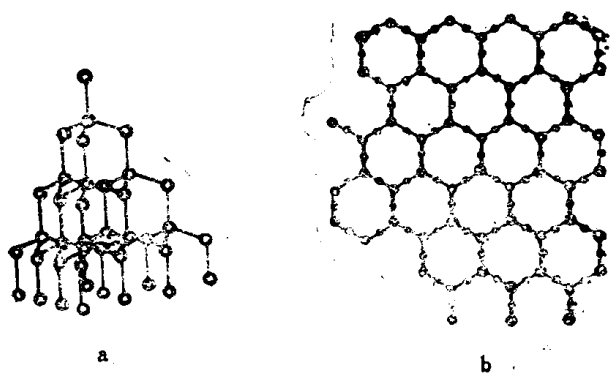


图 1-1 晶体结构示意图

a—金刚石的空间点阵；b—石英晶体的平面示意图

晶体物质的外部性质与微粒的性质、结构（空间点阵形态）密切相连。例如同为碳元素组成的石墨及金刚石，由于碳原子排列的队形不同及碳原子间作用力不完全一致，前者色黑而软，后者坚硬而透明。

矿物晶体的牢固性，决定于微粒间的化学键。金刚石晶体是共价键。结合力最强，从而具有极为坚硬的特性；纯净的金属矿床内部颗粒的结合为金属键，故具有一定的延展性、较低的熔点、硬度、优良的导电导热性能等特点。

自然界大多数矿物是离子键，故普遍具有性脆、硬度大、熔点高等离子晶体的特点。然而，矿物晶体的键型极少单一存在，而是在一种矿物中同时存在多种键型。矿物颗粒间靠晶面直接接触（岩浆岩、变质岩）或者通过胶结物在一定条件下结合成岩（沉积岩）。但多数胶结物仍是微晶结合体，它们与矿物颗粒间的连接仍靠晶面间的接触力。一般说来岩石中的矿物颗粒非常微小，它们对岩石性质的单独影响较小，岩石的基本性质主要决定于矿物颗粒间的连接情况。但是，若在岩石中含有极软或极硬等具有特殊性质的矿物时，便会对岩石性质产生明显的影响。

石油钻井常遇到沉积岩，就其成因及结构特点而言可分为碎屑岩与化学岩两类（这与地质分类法不同）。碎屑岩类是地表母岩经长期风化形成的矿物和岩石碎屑、胶结物组成。常见的胶结物有硅质（含 SiO_2 ）、铁质〔含 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}(\text{OH})_3$ 〕、钙质或泥质等。碎屑与胶结物的

成岩结合形式 可分为基底胶结、孔隙胶结、接触胶结三种。如图 1-2。基底胶结为碎屑颗粒孤立分散于胶结物中。如图 1-2 a。孔隙胶结是碎屑颗粒间紧密接触，其中充填胶结物如图 1-2 b。接触胶结是指只在碎屑颗粒接触处才有胶结物。碎屑间存在孔穴。接触充填胶结

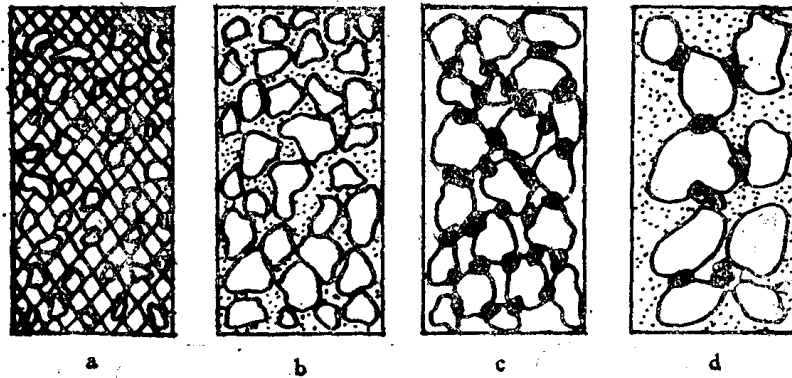


图 1-2 碎屑岩的胶结方式

a—基底胶结；b—孔隙胶结；c—接触胶结；d—接触充填胶结

为孔隙胶结的特例。石油钻井中常遇的碎屑岩如砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩等。化学岩是母岩风化后的溶解物质、生物遗体，经长期的一系列化学反应，在特定环境条件下沉积成岩。化学岩类具有较细的晶体颗粒，结构致密，但在长期的内动力地质作用下普遍存在孔隙及十分发育的各种裂缝。石油钻井中常遇的如石灰岩、白云岩、硅质岩等。在地表分布极为广泛的以粘土矿物为主的粘土岩，多为化学或胶体化学沉积所生成。由于粘土矿物晶体多为片状、针状结晶，故粘土岩易在构造动力作用下形成石油钻井常遇的泥板岩、页岩等。

沉积岩在其生成时，由于不同粒度的颗粒交替沉积使之普遍具有成层的特点。沉积岩沿岩层层面垂直方向上颗粒成份、粒度的交替变化叫层理，如图 1-3。对于颗粒大小与成份相近的岩石，由于矿物颗粒在结晶时具有趋向于某种固定形态的习性（地质上称为晶习），矿

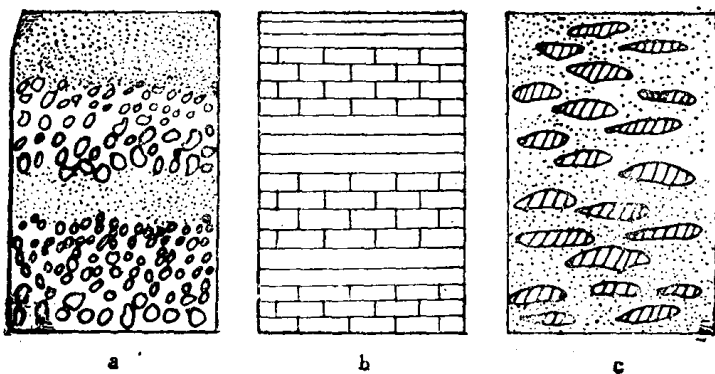


图 1-3 沉积岩的层理

a—不同粒度交替；b—颗粒成份变化；c—定向排列

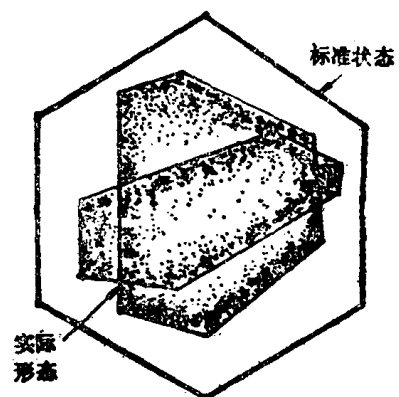


图 1-4 石英晶体横断面形态

物晶体在内部定向排列，仍使岩石性质具有方向性。在岩浆岩与变质岩中也普遍存在这种现象。

在自然界，造岩矿物与胶结物晶体形态极少具有理想的晶形，它们总是很不规则的。例如石英应是六方柱状体，而实际形状会出现很大差别，如图 1-4。由于晶形的差异必然导致相同条件下，同类岩石性质的不同。

地表的沉积岩，在原始形成时应是连续、完整与近似水平的层状体。由于在漫长的地质年代里，经多次地质构造运动的反复作用，当作用力超过岩石的连接强度时，其连续性便遭到破坏。剧烈的地质运动形成地表的凸起、凹陷、断裂、褶皱等现象。随着局部岩层上升下降的发生，在更大范围内造成了各种形式的、大量的裂缝。在岩石中广泛发育的，使岩石断开而无明显位移的裂缝叫节理。在岩石中节理成群成组出现，将岩石分割开来。大体沿岩层某个方向产生一系列平行的、密集的裂纹、微裂纹将岩石劈开成片状、板状的现象叫劈理。使已断开的岩层发生相对位移形成断层等。由于地质运动使地层中的岩石普遍存在裂缝及层微裂缝现象。

综上所述，占地表75%以上的沉积岩，由于内部结构的不均匀性及各向异性的特点，并在长期地质构造运动的反复作用下，形成大量的，不同方向的裂纹、微裂纹与孔隙，这就更加导致岩石机械性质的复杂变化。还需说明的是沉积岩在其沉积与成岩过程中不可避免的混入各种杂质，使岩石性质的变化更为复杂了。

二、岩石的机械性质

岩石在外力作用下，从变形到破碎过程中所表现出来的物理力学性质叫岩石的机械性质。根据钻井时岩石破碎的特点，与破岩效率有关的机械性质，如硬度、塑性与脆性、研磨性、可钻性等。

1. 岩石的抗压入强度——硬度

材料的强度就是材料抵抗破坏的能力。它决定于材料的性质与外力作用的性质。根据外力作用性质的不同有抗拉、抗压、抗剪、抗弯等各种强度。与其它固体材料相同，岩石的强度与岩石的物质成份、内部结构密切相连。由不同造岩矿物与胶结物组成的岩石其强度差别很大。例如：石膏的抗压强度为 170 公斤/厘米²；泥岩为 180 公斤/厘米²；各种不同粒度的砂岩为 1420~1850 公斤/厘米²；而辉绿岩则高达 3430 公斤/厘米²；为石膏的 20 多倍。就外力作用性质而言，岩石的抗压强度最大，抗拉最小，抗剪大于抗弯强度。几种岩石的不同强度比例见表 1-1。

表 1-1 岩石强度比例表

岩 石	抗 压	抗 拉	抗 剪	抗 弯
花岗岩	100	2~4	9	8
砂 岩	100	2~5	10~12	2~6
石灰岩	100	2~10	15	8~10

由于岩石结构的多变性及各方面因素的影响，同类岩石在不同条件下其强度也存在差异。因此，在实际应用时，尚需对具体的岩石进行试验才能取得可靠的强度数据。目前试验测定岩石的方法有两类：一类是在室内常压条件下，选取一定形状的岩石样品（多为圆柱或立方体）进行单轴受力试验，以取得所选岩样的各种强度极限数值。用这类试验方法所测定的岩石数据，多用于地面建筑工程及矿山开采。另一类方法是在能控制一定围压的、专门的试验设备上使岩样处于多向受压状态的条件所测定的强度数据，这类试验更接近于石油钻

井的实际情况。近年来，由于石油钻井的迅速发展，国内外开展这类模拟井下条件的室内试验较多，有关设备及试验技术要求较为复杂，在此不作介绍。

大量室内试验证实：岩石的强度随着围压的增加明显加大，例如：当围压从零增加到1650公斤/厘米²时，大理石的强度从1360公斤/厘米²增大到3900公斤/厘米²；当围压从零增至1550公斤/厘米²时，砂岩的强度是从690公斤/厘米²增大到3300公斤/厘米²。然而，随着围压的增加强度加大的幅度是不一致的。一般说来，围压对砂岩、花岗岩强度的影响比石灰岩、大理岩要大。此外，在开始增大围压时，岩石强度的增加比较明显，当继续增加围压，岩石强度的增量就会变得越来越小。

岩石具有最大的抗压强度以及岩石强度随着围压的增加而增大的原因在于：岩石内部矿物晶体颗粒间及其与胶结物颗粒间的连接力，随着拉力增大而减弱；反之，随着压力的增加使颗粒间甚至颗粒内部质点间的相互作用力增强，从而增大了对外力作用的阻抗。

钻井时各种破岩工具的作用过程是非常复杂的，岩石上的外载是多种作用的综合。但是，最基本、最重要的作用是钻头在轴向压力作用下，其工作刃吃入岩石，使其形成坑穴并不断扩大加深以钻成井眼。所以，压入的破岩作用是钻井过程中，各种工具破岩时共同的、最主要的作用。因此，岩石在不同条件下抵抗钻头工作刃（或压模）压入的能力是钻井工作者最为关心的重要性质。可以认为：当用压模压入岩石时，在岩石发生破碎的瞬间，作用在单位面积上的压力称为岩石的硬度（即抗压入强度），其单位为公斤/厘米²。

钻井时钻头下面的岩石处于多向压缩的应力状态下，岩石的硬度反映了多向应力状态下的抗压入强度。因此，我们不能把岩石的抗压强度与硬度这两个不同的概念混为一谈。例如：花岗岩的抗压强度为12~16公斤/毫米²，其硬度则为350~620公斤/毫米²。

根据我国目前石油钻井中常遇的岩石，按其硬度可分为六类十二级，如表1-2（这种分法仅是在室内的试验基础上大致的划分，主要用于建立不同地区或同一地区不同井段岩石硬度的对比依据）。

表 1-2 岩石按硬度的分类

类 别	软		中 软		中 硬		硬		坚 硬		极 硬	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
级 别	≤10	10~	25~	50	100~	150~	200~	300~	400~	500~	600~	>700
硬 度 公斤/毫米 ²		25	50	100	150	200	300	400	500	600	700	

石油钻井中常遇的泥岩多属于1~2级，泥板岩为3~4级，泥灰岩及石灰岩为4~6级，白云岩为5~7级，粉砂岩为3~5级，砂岩为4~8级。而石英砂岩及燧石等均在9级以上。

2. 岩石的塑性与脆性

物体具有在外力作用下发生变形，当外力取消后能恢复原来形状的性质叫弹性。虎克定律告诉我们，在弹性限度内，应力与应变成正比。通常的固体材料都具有弹性的性质，然而在自然界却不存在“完全弹性体”。试验证明：如金属、木材等工程材料，在弹性限度内可以看成是弹性体，反映这些材料性质的弹性系数是不变的常量。

多数造岩矿物都是较好的弹性体，但由于矿物晶体普遍具有各向异性的特点，其弹性系数在不同方向上存在差别，这与金属等材料的情况是不一致的。例如石英的弹性系数为

$(7.85 \sim 10) \times 10^5$ 公斤/厘米²，方解石为 $(5.8 \sim 9) \times 10^5$ 公斤/厘米²，石膏为 $(1.2 \sim 1.5) \times 10^5$ 公斤/厘米² 等等。对于岩石则在多数情况下受力与变形的关系不遵从虎克定律，这是因为岩石中普遍存在孔隙、裂纹与微裂纹所造成。如图 1-5 表示岩石的弹性系数随外力的性质、大小的不同而变化的关系。当作用力很小，其弹性系数可看成是常量，随着外力的增大不同性质的作用力使应力与应变的关系产生不同的变化。

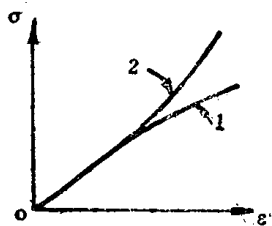


图 1-5 岩石的弹性系数
1—拉伸，2—压缩

材料在外力超过弹性限度后出现两种情况：一是立即破碎；一是产生变形，这种变形是永久性的。当外力消除后不能恢复原来的形状称为塑性变形。在单向应力状态下，大部份岩石与矿物都近于弹性脆性体，即在应力达到弹性极限，它们就开始破坏（特别是沉积岩），不会出现明显的永久变形。因此，可以认为：岩石在破碎前呈现永久变形的性质叫岩石的塑性，不呈现永久变形叫脆性。根据压入试验的变形特征，可将岩石分为脆性、塑脆性及塑性三大类。图 1-6 为用平底圆柱形压模压入岩石时的变形曲线，其纵座标为压模上所施加的载荷 P （公斤），横座标为压模的吃入深度 ϵ （毫米）。图 1-6a 是脆性岩石（例如石英岩、花岗岩等）的典型曲线，其受力与变形在 $O-D$ 段成直线关系，到 D 点即发生脆性破碎。图 1-6 b

为塑脆性岩石（例如大理岩等）的典型曲线，它包含了弹性及塑性变形的两个变形区， A 点相当于岩石由弹性到塑性的转变点，最后到 B 点也产生脆性破碎。图 C 为塑性岩石的变形曲线（例如塑性泥岩及多孔砂岩和灰岩等）没有明显的脆性破碎点，随着压力 P 的逐步加大其塑性变形不断加大。

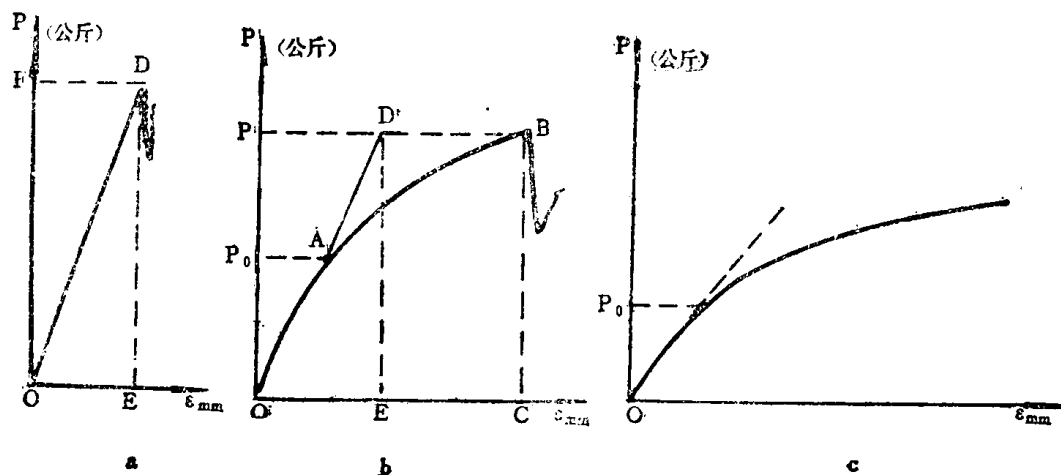


图 1-6 岩石的变形曲线

a—脆性岩石；b—塑脆性岩石；c—塑性岩石

为塑性岩石（例如塑性泥岩及多孔砂岩和灰岩等）没有明显的脆性破碎点，随着压力 P 的逐步加大其塑性变形不断加大。

岩石产生塑性变形的原因是由于岩石内部矿物颗粒及矿物与胶结物颗粒间的接触面在外力作用下发生相对滑移所致。当外力足够大时，还会导致颗粒内部晶体沿晶面产生滑移。岩石内部颗粒之间的滑移，与岩石的结构特点、应力状态等方面的因素有关。需要说明的是：岩石的塑性变形与金属材料的塑性变形有本质的区别，金属材料在任何应力状态下都能产生

塑性变形且变形量很大。例如软钢与青铜等，可在常温常压条件下碾压成薄板，其塑性变形量很大。这是因为金属材料的塑性变形主要发生在金属晶体的内部，颗粒间的滑移不起主要作用，而岩石产生塑性变形的原因正好相反。

衡量岩石塑性变形的大小，可用塑性系数 K 来表示。

$$K = \frac{\text{岩石破碎前耗费的总功}}{\text{弹性变形功}}$$

塑性系数 K ，是从破碎岩石时能量消耗的观点来衡量岩石破碎效率的、最合理的指标。通过对各种岩石的大量试验，按 K 值的大小可将石油钻井中常遇的岩石分为三类六级。如表 1-3。

表 1-3 岩石按塑性系数的分类

类别	脆性	塑脆性				塑性
		低塑性→高塑性				
级	1	2	3	4	5	6
塑性系数	1	1~2	2~3	3~4	4~6	6~∞

石油钻井常遇的岩石如粘土、泥岩、页岩等，其 K 值趋于无穷大。钙质砂岩等 $K = 1 \sim 3$ ，硅质及石英砂岩 $K = 1 \sim 2$ ，石灰岩 $K = 2 \sim 5$ 。

3. 岩石的研磨性

钻井中钻头在不断破碎岩石的同时，钻头工作刃便会被磨损。岩石磨损钻头的的能力称为岩石的研磨性。岩石的研磨性是一个相对的指标，它不仅决定于岩石的物理机械性质，并与破岩工具的材料、几何形状、破碎方式等因素有关。岩石的研磨性对于破碎工具的设计、选择与使用都有十分重要的意义。但是，由于涉及的问题很多，目前尚无一个统一的标准。

通常的固体平面总是凹凸不平的（目前最精密的研磨加工可达 10^{-4} 毫米的表面）。摩擦物体被磨损的实质是摩擦面上一些点接触（或嵌合），由于相对运动时在剪力作用下，造成表面颗粒的剥落所致。钻井时，钻头工作刃与岩石发生相对运动，造成岩石的破碎及工作刃表面微粒的不断剥落而被磨损。当岩石的硬度越大，表面颗粒便难以剥落，从而增大了相对运动的阻力使钻头工作刃的磨损加快。对于化学岩类，岩石的硬度是决定研磨性指标的主要因素，这就是说该类岩石硬度越大则岩石的研磨性就越高。对于碎屑岩类其研磨性决定于岩石中所含硬质矿物的多少以及硬质矿物具有的棱角。由于碎屑岩类的成岩物质基本颗粒的性质与大小十分复杂，使这类岩石具有较高的表面粗糙度。这一特点对钻头磨损起着很大的作用。当碎屑岩中含硬质矿物（主要指石英颗粒）越多，越粗（棱角多），即使整个岩石的硬度较小，也能表现出极高的研磨性。由于碎屑岩的硬度主要取决于胶结物的连接强度，当硬度较低的岩石与钻头工作刃摩擦时，硬质矿物颗粒易于从表面剥落而形成新的粗糙表面，这就使得钻头工作刃始终在粗糙表面上工作，必然加速了钻头的磨损。例如四川的川南地区在井深 600~1000 米左右的香溪统地层内有一层厚度不等的石英砂岩，其胶结疏松硬度仅为 150 公斤/厘米² 左右，但具有很高的研磨性。根据对该层 16 口井所用的各种类型的 7³/₄ 牙轮钻头 607 只统计，平均进尺仅 10.4 米/只，平均使用 4.8 小时，起出钻头牙齿与外径的磨损相当严重。

多年来，人们对岩石的研磨性作了大量的室内试验及研究，但由于试验方法与所测数据是多种多样的，目前尚未形成统一标准。为了在实际应用时建立岩石相对研磨性的对比分析，现列出表 1-4（表中级别越高研磨性越大）。

4. 岩石的可钻性

岩石的可钻性，可理解为岩石被破碎的难易程度。它表示岩石在一定条件下的综合强度

表 1-4 岩石的相对研磨性

级 别	岩 石 的 名 称 与 特 点
1	石 膏
2	石 灰 岩
3	白 云 岩
4	硅质岩类(燧石等)
5	含镁铁岩石及含石英 5% 的岩石
6	长 石 岩
7	含石英约 10% 的一类岩石
8	石英晶质岩
9	石英碎屑岩(硬度大于 350 公斤/毫米 ²)
10	石英碎屑岩(硬度 220~350 公斤/毫米 ²) 或含石英 20% 的岩石
11	石英碎屑岩(硬度 100~200 公斤/毫米 ²) 或含石英 30% 的岩石
12	石英碎屑岩(硬度小于 100 公斤/毫米 ² 的岩石)

与钻井工艺技术两方面的因素。石油钻井，无论采用何种方式，总是要不断破碎（钻掉）岩石才能逐渐形成井身。因此，岩石被破碎的难易性即可钻性的大小是确定钻井方式、选择破碎岩石的工具、制定技术经济指标，最实际、最重要的依据。

数十年来，国外一些学者在室内试验与现场统计基础上提出不同的分类方法，这些试验及分类方法可分为两种类型。

一类偏重于岩石的综合强度试验，较少联系实际的钻井工艺技术，这只能部份反应了岩石的某些性质。例如苏联史立涅尔等人，在室内进行了压入试验，并通过仪表测定破碎一定体积岩石所消耗的能量，用以确定岩石的可钻性。由于它只反应了压入破岩作用，对工具磨损、井底清洁程度等因素根本没有考虑，其结果必然是不全面的。近年来，华东石油学院用类似方法在室内测定了我国各主要油田岩石的机械性质，并进行了分类，这对于全国性的岩石分类，安排钻头生产计划等起了一定作用，但因未考虑不同钻井破岩方式的特点，仅能作为岩石机械性质的参考数据。

另一类方法则偏重于钻井工艺技术方面。例如美国学者怀特等人，在室内模拟现场条件，分别测定岩石的旋转、冲击、旋冲三种可钻性指标。他们采集了美国国内钻井常遇到的 98 种岩样，在能进行准确计数的“可钻性试验机”上，用特制的 3/4" 微型牙轮钻头作“钻进”试验。在规定的钻压、转速配合下，用每“钻进”一英尺所消耗的时间来定义这种岩石的可钻性。将不同破岩方式“钻进”所测时间（分钟），分别用 R（旋转）、P（冲击）、RP（旋冲）表示并列成表格以备用。此外，美国一些钻头公司，也采用类似方法进行试验。在推销钻头产品时，不仅给出钻头的适用地层、推荐参数，并同时给出该厂产品在某些地层中使用的钻速与工作寿命、总进尺数等技术指标，从而给用户带来方便。

岩石可钻性的试验、研究方法及其分类有多种，但都不能得出满意的结果。例如第二种方法，虽考虑了不同的破岩方式，但对于深井、超深井井下岩性与室内试验时的岩性显然有很大差别而未加以考虑。岩石可钻性的最终解决，尚有待于今后进一步开展深入的试验与研究。

三、影响岩石机械性质的因素

通过以上讨论，我们知道钻头破岩时，岩石的机械性质决定于岩石的内部结构与岩石存

在的具体条件等因素。在此，仅对影响沉积岩机械性质的主要因素简介如下：

(一) 内因的影响

前面提到过，碎屑岩的硬度决定于胶结物的连接强度，常见胶结物连接强度次序为：硅质大于铁质，铁质大于钙质，钙质大于泥质。其研磨性决定于岩石中所含硬质矿物的多少及粒度。碎屑岩类的塑性性质，与碎屑颗粒的大小及胶结物的大小密切相连。颗粒尺寸小，则同体积岩石颗粒间的接触面积增加了，从而也就增大了颗粒间产生相对滑移的机会，故其塑性比粗颗粒大。

化学岩的硬度及研磨性，决定于造岩矿物的性质，例如硅质岩类比碳酸盐岩类具有更大的硬度及研磨性。由于化学岩类具有较细微、较均匀的内部颗粒结构，从而钻这类岩石比碎屑岩类能产生较大的塑性变形。此外，化学岩类普遍存在各种裂纹、微裂纹，孔隙，这对于化学岩机械性质的影响较大。

沉积岩普遍具有层理的特征，故沉积岩的物理机械性质均具有各向异性的特点，这是由沉积岩的成因所决定的。某些沉积岩如化学岩类的层理可能并不十分明显，但岩石内部的矿物晶体由于晶习现象在内部作定向排列，这仍会使化学岩类的机械性质带有方向性的特点。

此外，前面谈到过，由于在沉积岩的沉积与成岩过程中不可避免的要混入各种杂质，加之矿物晶体存在缺陷等各方面因素的影响，造成岩石内部严重的不均匀性。

(二) 外因的影响

对于物质成份相同，内部结构近似的同类岩石，由于在地壳中存在的地质条件不同，其机械性质有很大差异。造成同类岩石性质变化的外界因素如压力、温度、液体介质等。

1. 压力的影响

地壳中处于一定空间位置的岩石，在上部覆盖岩层的重力作用下造成垂直方向上的压应力，使岩石的机械性质发生变化。压应力越大岩石的机械性质与地表常压条件下的差别也就越大。地壳深处的岩石，在很高的压应力作用的同时受到与之相连的周围岩石的挤压作用，在不同方向上也产生很大的压应力。这就是说：埋藏较深的岩石是处于多向压缩的应力状态，这与物体在液体内部的受力状态相近似。岩石在很高的各向压缩应力作用下，将会使岩石中的裂纹、微裂纹闭合，孔隙空间减小，进而增大了岩石的强度。

岩石在多向压缩的应力状态下，不仅强度加大了，而且岩石的塑性也随着压力的增加而增大。根据大量的室内试验证明：当围压低于 500 公斤/厘米²，多数岩石并不具有明显的塑性；当围压为 500~1000 公斤/厘米²，开始了脆性到塑性的转变；围压增加到 1000 公斤/厘米²以上，多数岩石呈现明显的塑性。一般认为：岩石破碎前的总应变量达到了 3~5% 可以说该岩石已经开始具有塑性的性质，或者说已实现了脆性到塑性的转变。岩石的塑性随各向压力的增加而加大的程度，取决于岩石的物质成份和结构特点，并有很大差别。例如：在 1000 公斤/厘米²的围压下砂岩的塑性变形为 2.9%，白云岩为 7.3%，石灰岩为 29.1%，但石英晶体在 2000 公斤/厘米²及 800℃ 的高温高压下仍是比较典型的脆性体。

2. 温度的影响

根据深部油气藏勘探与开发的需要，目前世界上超深井的钻探日益增加，世界最深的井

已达一万米以上。在地壳上部 15 公里以内的平均地温梯度约为 30 度/公里，有的地区还会出现地温梯度异常的情况。在超深井钻井过程中，井下温度升高的同时，岩石所受压力必然增大。因此，我们不应孤立的讨论温度对岩性的影响，应对随着井深的增加，温度与压力同时增大的实际情况进行分析。

试验表明：多数沉积岩在各向压应力作用下，随着温度的升高塑性增大，温度与压力对岩石强度影响差别很大。如硅质砂岩，在高温高压下强度最大，其次是白云岩。盐岩则正好相反，如在井深 10000 米的盐岩，比地面强度下降 7 倍。因而在深井、超深井钻遇盐岩层时，会因其强度下降发生塑性流动而造成井下复杂情况，甚至造成固井后盐岩挤坏套管的严重恶果。根据试验：在井深 10000 米以内，沉积岩强度从小到大的次序是：盐岩、石灰岩、白云岩。砂岩的强度取决于胶结物的胶结程度与特点。沉积岩的塑性大小，也可以从大到小排成以下序列：盐岩、泥页岩、石膏、白云岩、石英岩。

3. 液体介质的影响

在地壳上部沉积岩层中，普遍存在裂缝、微裂缝、各种孔隙空间。在这些孔隙裂缝中通常充满不同性质的液体介质。在接近地表松散沉积层的多孔岩石中所聚积的液体，近于饱和程度。这是由于地面水在重力作用下的渗透作用而造成。岩石孔隙裂缝的大小、多少，在地壳上部的空间位置及其连通状况，是液体介质在岩石中集存与运移的决定条件。例如：较疏松的砂岩、裂缝发育的石灰岩等，比致密的页岩、粘土岩更易于被各种液体所充满。

岩石孔隙中的液体，受到上部覆盖岩层的重力作用具有一定压力，叫做地层压力（又叫地层孔隙压力）。地壳中，一定深度岩层内液体压力可用地表到该层岩石的静液柱压力来计算（关于地层压力将在以后讨论）。地层里的液体在重力作用下产生不停地、缓慢地流动，从而使这些液体中富含各种化学物质。同时，地层液体具有比地表高的温度和压力，故而在流动过程中增大了对地层所含有的 CO_2 、 O_2 、 N_2 、 H_2S 等气体及 Na^+ 、 Ca^{++} 、 Mg^{++} 、 Fe^{++} ……离子的溶解度。这就产生了对石灰岩等化学岩类的一系列化学反应，造成对岩石的溶蚀，不仅引起岩石性质的变化，还会使岩层中产生大溶洞、大缝隙等特殊地形。

实践证明：地层内的液体会使岩石强度降低，同时地层压力还可抵消一部份岩石所承受的多向压缩应力，地层压力增大会使岩石塑性减小而变脆。如大理岩用清水浸泡后比干燥时的硬度降低 12%，若用 1% 浓度的油酸钠水溶液浸泡后，硬度降低 23%。根据试验，有的岩石在清水饱和后强度甚至降低 50~55%。

岩石孔隙充满液体时强度降低的原因是由于液体渗入裂纹、微裂纹，润湿了颗粒表面，从而减弱颗粒间的连接力所造成。液体对岩石强度的降低作用，取决于岩石的物质成份、内部结构及液体性质和它们的存在条件等因素，还要根据各方面的具体情况而定。有人对不同性质的液体对岩石强度的降低作用，进行了系统试验发现：含皂类的液体介质，对各种岩石硬度降低的作用最大。在坚硬的地层中钻井，为了提高破碎效率，在洗井液中加入一定的与该地层性质相适应的化学物质（被称为硬度减低剂），是能起到提高破岩效率的可取方法。

第二节 刮刀钻头

刮刀钻头在旋转钻井早期普遍使用，它具有结构简单、制造方便、成本低廉等特点。这