



SHIYOU

中等专业学校教学用书

钻井工程

郝瑞 主编

石油工业出版社

TE2
8-2
3

钻 井 工 程

郝 瑞 主 编

6722/27

石 油 工 业 出 版 社

B 655256

内 容 提 要

本书为石油中等专业学校钻井专业的教学用书。书中系统地阐明石油钻井工艺及原理,如钻头与钻柱力学,喷射钻井,优选参数钻井,防斜及定向钻井,取心钻井技术,地层压力检测,压力控制和平衡钻井技术,固井和完井技术,钻井事故的预防及处理方法。

本书可供现场钻井技术人员和技工学校钻井专业师生参考。

钻 井 工 程

郝 瑞 主 编

中国石油天然气总公司教材编译室编辑 (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)

北京妙峰山 印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米16开本 32¹/₄ 印张 793 千字 印1—5,000

1989年12月北京第1版 1989年12月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0328-7/TE·321(课)

定价: 5.70 元

前 言

《钻井工程》是根据中国石油天然气总公司人事教育部（原石油工业部教育司）1986年11月制订的中等专业学校钻井专业“钻井工程教学大纲”编写的教材。

参加本书编写的有：大庆石油学校谢南屏编写第一章，辽河石油学校蒋震亚编写第四章，胜利石油学校王应同编写第二、三章，赵留运编写第五、六章，徐遵连编写第七、十二章，重庆石油学校郝瑞编写绪论、第八、十、十一章，周本立编写第九章。全书共十二章，由郝瑞主编，胜利石油学校孟宪金主审。

全书初稿完成后，于1987年4月在重庆石油学校召开了审稿会议，对初稿进行了讨论和审查。参加会议的有郝瑞、徐遵连、蒋震亚、谢南屏，并请重庆石油学校的肖义昭、王西安、冯天河、周本立参加了讨论。他们提供了宝贵意见，在此表示感谢。编者根据会议提出的意见进行了修改。

由于编者水平所限，编写时间仓促，书中缺点和错误一定很多，殷切希望读者提出宝贵意见，以供再版时进行修改。

编者 1987年10月于重庆

目 录

绪论.....	1
第一章 钻头.....	3
第一节 岩石的机械性质.....	3
第二节 刮刀钻头.....	14
第三节 牙轮钻头.....	24
第四节 金刚石钻头.....	62
第二章 钻柱.....	78
第一节 钻柱的组成和规范.....	78
第二节 钻柱的工作状态及受力分析.....	90
第三节 钻柱可下深度的计算.....	93
第四节 钻柱的疲劳破坏与腐蚀.....	99
第五节 钻柱的检查与使用.....	103
第六节 厚壁钻杆与铝合金钻杆.....	107
第三章 喷射钻井.....	110
第一节 概述.....	110
第二节 喷射钻井的工作原理.....	110
第三节 水力功率的传递原理.....	125
第四节 喷射钻井的工作方式.....	133
第五节 喷射钻井水力参数设计.....	140
第四章 优选参数钻进.....	145
第一节 钻进过程的基本规律.....	145
第二节 钻进参数的优选.....	162
第三节 其他钻进参数的优选.....	187
第四节 优选参数钻进中的数据处理.....	190
第五章 井斜及其控制.....	209
第一节 概述.....	209
第二节 井斜的原因及其规律.....	211
第三节 井斜的控制.....	217
第六章 定向钻井.....	234
第一节 定向井的基本概念.....	235
第二节 造斜方法及其原理.....	237
第三节 井身方位的控制.....	245
第四节 定向井井身剖面设计.....	258
第五节 定向方法.....	280
第七章 取心钻井.....	284
第一节 取心工具的组成.....	284
第二节 取心工具的类型.....	288

第三节	取心工艺	295
第八章	地层压力检测与平衡钻井	300
第一节	地下各种应力的概念	300
第二节	异常高压的形成	303
第三节	地层压力检测	307
第四节	地层破裂压力	330
第五节	平衡钻井	334
第九章	固井	345
第一节	井身结构设计	345
第二节	套管柱设计	350
第三节	下套管与注水泥施工	371
第四节	油井水泥	382
第五节	提高注水泥质量的措施	389
第六节	其它固井技术	395
第十章	井控技术	400
第一节	溢流发生的原因	401
第二节	溢流的发现及关井	403
第三节	天然气溢流的特点	406
第四节	压井	415
第十一章	油井完成	444
第一节	钻开生产层	444
第二节	完井方法	450
第三节	完井井口装置	457
第四节	中途测试	461
第十二章	钻井事故的预防和处理	472
第一节	井漏	472
第二节	卡钻	476
第三节	钻具事故及落物事故	499

绪 论

石油钻井是勘探和开发油、气田的重要手段。要直接了解地下的地质情况,要证实已探明的构造含油、气情况及其储量,要把地下的油、气开采出来,都要通过钻井工作来实现。钻井技术水平的高低,钻井工作量的大小,不仅影响油、气田勘探和开发的速度,而且影响石油工业的发展速度。只有不断地发展钻井科学技术,提高钻井速度和质量,才能保证石油工业的高速度发展。

随着现代科学技术的发展,钻井工艺技术也得到迅速发展。现代钻井工艺技术的特点是:从经验钻井发展到了科学化钻井;从钻浅井、中深井发展到钻深井和超深井;从钻直井和一般斜井发展到钻大斜度井、水平井和丛式井;从陆地钻井发展到近海和深海钻井;从地面条件好的地区钻井发展到条件恶劣的沙漠、沼泽和寒冷地区钻井。

美国钻井科学工作者,把钻井技术的发展分为四个时期。即

(1)概念时期(1900~1920年)

这个时期开始把钻井和洗井两个过程结合在一起,并使用了牙轮钻头钻进和用水泥封固套管。

(2)发展时期(1920~1948年)

在这个时期内,牙轮钻头,固井工艺、钻井液进一步得到了发展。同时出现了大功率钻机。

(3)科学化钻井时期(1948~1968年)

这个时期大力开展了科学研究工作,钻井工艺技术有了迅速发展。其主要技术成就有:喷射钻井技术,镶齿、滑动密封轴承钻头、低固相、无固相不分散体系泥浆和固控技术;地层压力检测技术,井控技术,并提出了平衡钻井技术。

(4)自动化钻井时期(1968~现在)

在此时期内发展了自动化钻机,井口自动化工具,钻井参数自动测量,计算机在钻井中广泛应用,最优化钻井。目前,钻井人员把钻井技术发展的(1)、(2)时期称为经验钻井阶段,把(3)、(4)时期称为科学化钻井阶段。

我国是世界上最早发现和利用石油、天然气的国家。在石油钻井方面有着悠久的历史。历史资料证明,我国的石油钻井开始是走在世界其他国家的前面,但由于种种历史原因未能使钻井技术得到持续发展。解放以来,我国的石油钻井技术有了较快的发展,取得了很大成就。特别是1978年以来,推广和发展了喷射钻井技术、低固相优质泥浆、四合一牙轮钻头、地层压力检测、井控技术、平衡钻井、优选参数钻井以及计算机在钻井中的应用等先进技术,把我国的钻井技术提高到了一个新的水平,使我国的钻井技术进入了科学化钻井阶段。同时钻井领域也有了大的发展,钻井区域发展到了海洋和沙漠,钻井深度发展到了钻7000米以上的超深井,定向井发展到了钻大斜度井和丛式井。

近十年来,我国的钻井技术虽然取得了显著的成就,但与世界先进钻井技术相比仍然存在有一定的差距。因此,我们必须大力发展钻井队伍,加强钻井科学研究,迅速提高钻

井工艺技术水平，为高速度发展我国的石油工业，为我国实现工业、农业、国防和科学技术现代化而努力奋斗。

我们钻井工作者的任务，就是要以最快的钻井速度，最低的钻井成本，钻出高质量的各种类型的井。以满足勘探和开采的要求。随着钻井领域不断扩大，钻井深度不断增加，钻井过程中遇到的地层变化大，复杂情况多，对钻井工艺技术的要求越来越高。为此，必须掌握先进的钻井工艺技术，进一步提高钻井技术水平，才能保证钻井任务的完成。

钻成一口井的工艺，主要包括有：选用高效率的钻头和最优钻进技术参数获得理想的钻进速度，有效地控制井眼倾斜和方位，合理控制地层压力实现压力平衡钻井，加固井壁和保护好油、气层，造成油、气流的通道等工艺。《钻井工程》课的任务就是阐述解决这些问题的方法和原理。

第一章 钻 头

在旋转钻井中，钻头是破碎岩石的主要工具。钻头质量的好坏和与岩性是否相适应，对提高钻井速度和降低钻井成本起着重要作用。

目前在国内外石油钻井中有各种类型的钻头，可按其结构、功用及工作原理进行分类：

按结构分：刮刀钻头，牙轮钻头，金刚石钻头，金刚石复合片钻头等；

按功用分：全面钻进用钻头（全径钻头）。环状钻进用钻头（取心钻头），特殊用途钻头等；

按工作原理分：切削型，冲击-剪切型，研磨-切削型，冲击型等。

每种类型的钻头，依其所钻岩石机械性质的不同，其结构又可分为许多型式。

衡量钻头的主要指标是钻头总进尺和平均机械钻速。平均机械钻速是指单位时间内的进尺，而钻头总进尺则是钻头在井底全部工作时间内所取得的进尺。可用下式来表达它们之间的关系

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

式中 V_m ——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。

提高钻头总进尺，就可以减少起下钻次数，缩短总的钻井时间。提高平均机械钻速，可直接加快钻进速度，缩短钻进时间。因此，这两个指标对钻进速度起着重要作用。一般认为，当井深不大，换钻头起下钻所需时间较短，宜以提高平均机械钻速为主；而深井、超深井则以提高钻头总进尺为主。

为了提高破碎岩石效率，加快钻进速度，降低钻井成本，必须掌握钻头的结构、工作原理及其合理使用。这也是本章学习的目的。

钻头工作的对象是岩石，为了提高钻头破碎岩石的效率，必须对岩石的机械性质有所了解。

第一节 岩石的机械性质

岩石按其成因可分为岩浆岩、变质岩、沉积岩三大类。石油及天然气大都储藏在沉积岩中，本节主要讨论沉积岩的机械性质。

沉积岩就其成因和结构特点而言，可分为碎屑岩与化学岩两类。碎屑岩是由地表母岩经长期机械风化形成的矿物和岩石碎屑及胶结物组成。常见的胶结物有硅质胶结物（含 SiO_2 ）、铁质胶结物〔含 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}(\text{OH})_3$ 〕、钙质胶结物和泥质胶结物。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，经过

长期的一系列化学反应，在特定的环境下沉积成岩。化学岩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，普遍存在孔隙和十分发育的各种裂缝。钻井中常遇的化学岩如石灰岩、白云岩、硅质岩等。

一、岩石的机械性质

岩石在外力作用下，从变形到破坏所表现的物理力学性质，叫岩石的机械性质。根据钻头破碎岩石的特点，与破岩效率有关的机械性质有岩石的强度、硬度、塑性、脆性等。

1. 岩石的强度

(1) 岩石强度的概念

岩石的强度是指其抵抗外力破坏的能力。根据外力性质的不同，可以有抗压、抗拉、抗剪和抗弯强度等。

目前，岩石强度测试大体上有两类；第一类是实验室测试。第二类是原处测试、直接测定岩石在原处条件下的力学性质。对于石油钻井来说，岩石埋藏很深，无法进行原处测试，因此目前对岩石的强度测试都在实验室进行。

(2) 简单应力条件下岩石的强度

岩石在单向应力作用下测定的抗压、抗拉、抗剪等强度，称为简单应力条件下岩石的强度。虽然在这种情况下应力简单，并且和钻井时岩石应力状态并不相同，但对研究岩石的变形和破坏的一些有关因素，仍有一定的指导意义。

测试证明，相同的岩石其抗压、抗拉、抗剪、抗弯强度有很大差别。

在简单应力状态下，岩石的抗压强度最大，抗拉强度最小。其关系如表1-1所示。

表 1-1 岩石的相对强度

岩 石	相 对 强 度，%			
	抗 压	抗 剪	抗 弯	抗 拉
花 岗 岩	100	9	6	2~4
砂 岩	100	10~12	2~6	2~5
石 灰 岩	100	15	8~10	4~10

由表1-1可知，岩石的抗拉强度仅为其抗压强度的10%以下。一般情况下，岩石的强度有下面的顺序

抗拉<抗弯<抗剪<抗压。

强度大小之所以有这样大的差别，是由于拉伸情况下晶粒间的分子力要随载荷的增长而减小，而在压缩情况下则随载荷的增加而增大。在拉伸情况下，随着载荷的增加相互作用力也要减小，这样就会使弹性模量逐渐地减小，使抗拉强度也相应地减小，在压缩情况下，弹性模量会增加，抗压强度相应地也会增大。

(3) 复杂应力条件下岩石的强度

在实际钻井条件下，岩石处于复杂的而不是单一的应力状态。因此研究复杂的多向应

力作用下岩石的机械性质有着重要的实际意义。

岩石在地层深处处于各向受压的状态，通过模拟这种压力条件的三轴应力试验，可以了解到岩石在压力条件下的强度特点。三轴应力试验中，最常用的是常规三轴试验。它是将圆柱形的岩样置于一个高压容器中，首先用液压 p 使其四周处于三向均匀压缩的应力状态下，然后保持此压力不变，对岩样进行纵向加载，直到使其破坏。试验的过程应记录下纵向的应力和应变的曲线关系。可以进行三轴压缩和拉伸试验，前者的施力方案是 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = p$ ；后者是 $\sigma_3 < \sigma_1 = \sigma_2 = p$ ，如图1-1所示。

试验证明，岩石的强度随着围压的增加而明显地增大，如图1-2所示。当围压由0增加到160兆帕时，大理石的强度从130增大到480兆帕（增大了350兆帕）；当围压从0增大到150兆帕时，砂岩的强度从68增大到320兆帕（增大了252兆帕）。从图1-2中可以看出，在室温条件下，对于所有的岩石，当围压增加时其强度均增大，但增大的倍数对于不同类型的岩石是不一样的，砂岩增大的倍数最多（当围压从0增至196兆帕，强度增大12倍），盐岩增大的倍数最少（当围压从0增至196兆帕时，强度只增大1倍）。对于其余岩石均在上述压力范围内，强度约增大4~10倍。从图1-2中还可以看出，压力对强度的影响程度不是在所有压力范围内都是一样的，在开始增大围压时，岩石的强度增加比较明显，继续增加围压时，相应的强度增量就变得越来越小；最后当围压很高时，有些岩石（例如石灰岩）的强度便趋于常数。

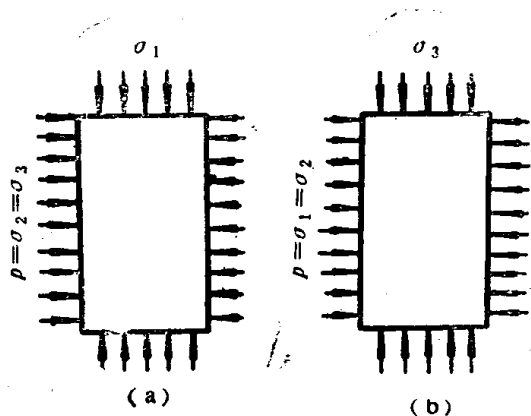


图 1-1 常规三轴试验
(a) 压缩试验；(b) 拉伸试验

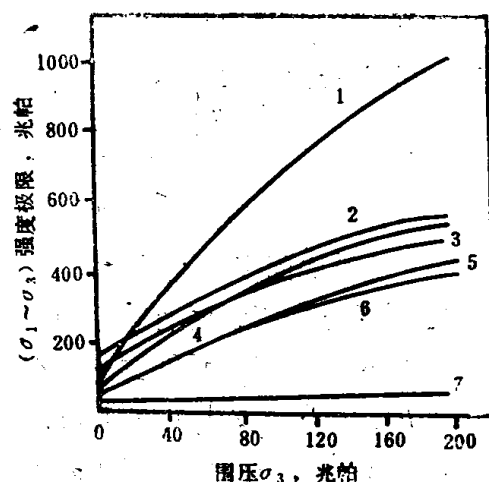


图 1-2 围压对岩石强度的影响（室温24°C）
1—Oil Creek石英砂岩；2—Hasmark白云岩；3—Blain硬石膏；4—Yule大理石；5—Barnes砂灰及Marianne石灰岩（曲线重合）；6—Muddy页岩；7—盐岩

由于岩石的围压增大，各向压缩增强，岩石的体积产生压缩，使颗粒间的距离缩短，甚至使矿物颗粒内部体积减小，其结果使颗粒之间甚至颗粒内部质点之间的相互作用力增强，从而表现为对外载的抗力增大，因而岩石的强度随围压增加而增大。然而当质点间的距离已经缩短到一定程度后再继续使其接近就需要非常大的压力，因而在围压很高时，岩石的强度就不是那么容易再增大了。

(4) 影响岩石强度的因素

由硬度较高的矿物所组成的岩石，其强度也较高。碎屑岩的强度还取决于胶结物的矿物成份和所占的百分数。岩石中胶结物所占的比例愈大，则胶结物对岩石强度影响愈大。

被胶结矿物对岩石强度影响愈小。

成岩石的矿物颗粒的大小，也影响岩石的强度。通常细粒岩石的强度大于同一矿物组成的粗粒岩石，而且颗粒愈细这种影响愈大。

岩石孔隙度增加，其强度降低。随着埋藏深度的增加，岩石孔隙度减小，因而岩石的强度亦随其埋藏深度的增加而增加。例如埋藏于地下深处的粘土其强度要比靠近地面处的粘土的强度要大。

岩石的层理使岩石各方向的强度不同。垂直于层理的抗压强度最大，平行于层理的抗压强度最小，与层理方向成某个角度时的抗压强度介于二者之间。其原因是层理面之间的连结力是薄弱的，在沿平行于层理方向加压时，岩石首先从层理面裂开。实验证明，泥质页岩垂直于层理的强度比平行于层理的强度大1.05~2.00倍，砂岩大1.03~1.20倍。

岩石结构构造上的一些缺陷，如微小的孔隙和裂缝等，同样也影响其强度。

2. 岩石的硬度

(1) 岩石的硬度

钻进过程中，钻头破碎岩石的作用是很复杂的，但压入破碎在各种类型钻头破碎岩石过程中起主要作用。所以衡量钻井时岩石强度的大小，必须采用抗压入强度，即硬度这个概念。

岩石抗压入的极限强度称为硬度。由于压入时岩石的破碎特点对钻进时岩石破碎过程具有一定的代表性，所以常用圆柱压入法来测定岩石的硬度。故硬度 p_r 也可定义为岩石发生脆性破碎的瞬时作用在单位面积上的力，单位是兆帕。

$$p_r = \frac{P}{S} \quad \text{兆帕} \quad (1-2)$$

式中 P ——产生脆性破碎时压模上的压力，千牛；

S ——压模底面积，毫米²。

岩石的硬度与抗压强度有联系但又有很大的区别，是两个不同的概念。抗压强度是岩石整体破坏时的应力值，而硬度是压模对岩石局部压入时的抗压入强度。当压模压入岩石时，在压强 p 作用下，发生纵向压缩和横向膨胀，但这两个方向上的变形都要受到周围岩石的阻力，压模下岩石处于多向压缩的应力状态。所以岩石硬度实际上是反映了岩石在多向应力状态下的抗压入能力。因而不能把岩石单向应力状态下的抗压强度与多向应力状态下的硬度混为一谈。试验证明，硬度和抗压强度之比约为5~20倍。如花岗岩抗压强度为117~225兆帕，而其硬度则为3430~6076兆帕。

通过大量试验，参照我国石油钻井使用的钻头类型，按岩石硬度的大小，可将岩石分为六类十二级（这种分法仅是在室内试验基础上大致划分的，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），如表1-2。

石油钻井中常遇到的泥岩多属于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，石英及燧石等均在9级以上。

(2) 影响岩石硬度的因素

影响岩石硬度的因素和影响强度的因素相类似，即造岩矿物的成份、颗粒度、孔隙度、胶结物的性质等都影响岩石的硬度。如砂岩的硬度随胶结物的强度增大而增大。一般规律是硅质胶结物硬度大于铁质胶结物，铁质胶结物大于钙质胶结物，钙质胶结物大

表 1-2 岩石按硬度分类

类别	软		中 软		中 硬		硬		坚 硬		极 硬	
级别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
硬度 兆帕	≤98	98~245	245~588	588~980	980~ 1470	1470~ 1960	1960~ 2940	2940~ 3920	3920~ 4900	4900~ 5880	5880~ 6860	>6860

于泥质胶结物。

需要指出的是，层理对硬度的影响与强度相反，垂直层理方向的硬度值最小，而平行层理方向的硬度值最大。其原因主要是沿层理方向颗粒定向排列而使硬度升高。故钻井时在垂直于层理方向上钻进，岩石比较容易破碎。这一点对于掌握井斜规律和定向钻井中利用地层规律造斜有重要意义。

3. 岩石的塑性和脆性

(1) 岩石的塑性和脆性

物体具有在外力作用下发生变形的能力，当外力取消后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。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后，它们就开始破坏。我们把岩石在外力作用下破碎前所表现的永久变形的性质叫岩石的塑性；而不呈现永久变形的叫脆性。

通过压入法对岩石进行试验，根据变形曲线的形态，所有岩石可以分为三种典型形态，如图1-3所示。

变形曲线纵坐标为压模上所加载荷 p (牛)，横坐标为压模压入深度 e (毫米)。

图1-3(a)是脆性岩石典型曲线形态。这类岩石只有弹性变形没有塑性变形。载荷和压模压入深度成直线变化，压力加到一定值 D 点即产生破碎。如花岗岩、石英岩等。根据压入试验，这类岩石的变形和破碎特点是变形深度(即压模压入深度) e 很小，而破碎坑深度 h 远大于变形深度，破碎面积 S_0 也远大于压模面积 S 。

图1-3(b)是塑脆性岩石的典型变形曲线。其变形和破碎特点是先产生弹性变形，再产生塑性变形，最后发生脆性破碎。图中 OA 为弹性变形区，应力超过屈服点 A 即转入塑性变形区，塑性变形达 B 点时产生脆性破碎。如大理岩等。塑脆性岩石可以有一个或二个塑性区，其区别只是斜率不同。这类岩石在压入试验时的表现是在破碎前变形深度 e 较大，但破碎深度 h 仍大于变形深度，破碎面积 S_0 大于压模面积 S 。

图1-3(c)为塑性岩石及多孔岩石的变形曲线。该类岩石受压后发生很大的塑性变形而不产生脆性破碎。如塑性泥岩及多孔砂岩和灰岩。在压入试验时，其变形和破坏的特点是压入深度随压力的增加而逐渐增加，不存在脆性破坏点， $h = e$ ， $S = S_0$ 。

衡量岩石塑性的大小可以用破碎前耗费的总功 A_F 与弹性变形功 A_E 的比值来表示，这个比值称为塑性系数 K 。

$$K = \frac{A_F}{A_E} \quad (1-3)$$

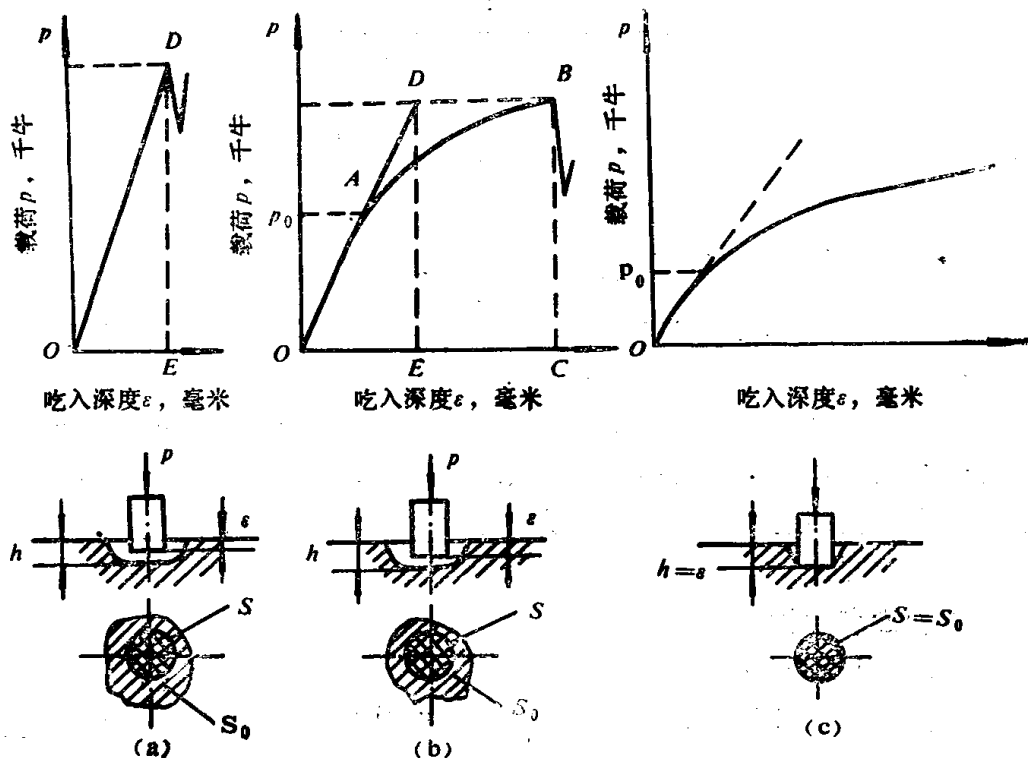


图 1-3 平底圆柱压模压入岩石时的变形曲线
(a) 脆性岩石; (b) 塑脆性岩石; (c) 塑性岩石及
多孔岩石

脆性岩石破碎前所耗费的总功 A_F 相当于图1-3(a)的 ODE 面积, 弹性变形功亦为面积 ODE , 故其塑性系数 $K=1$; 塑脆性岩石破碎前所耗费的总功 A_F 相当于图1-3(b)中的面积 $OABC$, 弹性变形功 A_E 相当于面积 ODE (在这里弹性变形功不仅包括了纯弹性区的变形功, 同时也包括了在塑性变形区里所消耗的那部分弹性变形功, 因为在塑性变形区由于吸收了弹性能而出现了硬化现象), 因此其塑性系数

$$K = \frac{A_F}{A_E} = \frac{\text{面积} OABC}{\text{面积} ODE} > 1$$

塑性或多孔的岩石由于不存在脆性破坏点, 根据岩石的硬度及塑性系数定义, 无法求得其数值, 所以只好用屈服极限来衡量岩石的硬度, 并认为这类岩石的塑性系数为无限大 (∞)。试验表明, 致密的非多孔岩石的塑性系数一般都不超过6, 所以可以认为 $K>6$ 的岩石已属于塑性岩石。但是这一类岩石中包括了多孔岩石。对于多孔岩石, 压模压入深度的变化已不是单纯的塑性变形的结果, 而且包括了孔隙的压实过程, 对于其中的一部份岩石, 当压实到一定程度后, 也能产生脆性破坏。

按岩石的塑性系数大小, 可将岩石分为三类六级, 如表1-3。

(2) 影响岩石塑性的因素

岩石的塑性不仅与组成岩石的矿物塑性有关, 而且更重要的是取决于岩石内部的结构、颗粒的大小及形状、岩石晶粒间相互作用力的性质及胶结的组成等。

由于大部份造岩矿物的塑性都不很大, 有的基本上无塑性, 所以岩石的塑性变形主要是由于颗粒间的相对滑移引起的。因此, 细粒岩石由于其颗粒间界面积大, 所以比粗粒岩

表 1-3 按塑性系数岩石的分类

类 别	脆 性	塑 脆 性				塑 性
		塑 性 增 大 →				
级 别	1	2	3	4	5	6
塑性系数K	1	>1~2	2~3	3~4	4~6	>6~∞

石塑性大。

岩石按其自然属性是不具有塑性的，它只是在三轴压缩的应力状态下才呈现塑性。实验证明，随着围压的增加，岩石表现出从脆性到塑性的转变，并且围压越大，岩石破坏前所呈现的塑性也越大。这是因为对于大部份沉积岩来说，主要是由于矿物颗粒间沿界面产生滑动所引起的。在初始的三向压缩时，岩石颗粒间开始沿着接触面产生滑移，继续加大压力时，个别颗粒之间的挤压越来越剧烈，从而也越来越阻碍它们之间的相对移动，当压力达到足够大时，颗粒界面间的滑移几乎已无可能，此时塑性变形便主要转到颗粒内部的晶格面间滑移或出现孪晶。

在三轴应力下岩石塑性增大的另一个原因是三向压缩使早期存在于岩石中的微裂纹闭合并使已经发展起来的裂隙受到抑制，从而促进了塑性变形的过程。

对于深井钻井来说，研究岩石从脆性到塑性的转变，具有重要的实际意义，因为脆性破碎和塑性破碎是两种不相同的破碎，在这两种状态下的岩石需要分别应用不同类型的钻头，采用不同的破碎方式及不同的钻进参数，以求加快钻进速度。

4. 岩石的表面破碎和体积破碎

钻进中，随着岩石硬度和钻头工作刃上单位面积的载荷——比载荷的不同，岩石破碎效率不同，破碎方式也不一样。根据机械钻速的变化，可以把机械钻速与比载荷的关系曲线分成三个阶段，即三个破碎方式不同的区域，如图1-4所示。

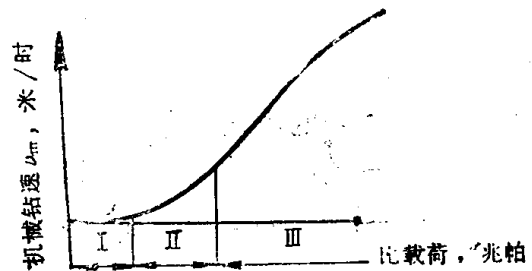


图 1-4 岩石的破碎速度与比载荷的关系曲线

在 I 区内比载荷远小于岩石的硬度。此时岩石的破碎是由摩擦力引起的表面磨损（研磨）所造成。在岩石与钻头工作刃接触的表面没有可见的破碎现象，只是通过研磨方式在岩石表面磨削去很薄的一层，破碎的过程只具有表面的性质，这个区称为表面破碎区。表面破碎区破碎速度很低。

在 III 区内比载荷达到或超过岩石的硬度。钻头工作刃吃入岩石使其四周岩石崩离，体积破碎成为破碎的主要方式。这个区域内岩石破碎效率高，速度快。随着比载荷的增加，岩石破碎速度很快增加，钻速与比载荷的变化呈直线关系。在 III 区末尾，由于钻头工作刃达到全部吃入的深度，机械钻速增长速度降低。这一区域称为体积破碎区。

由表面破碎区到体积破碎区之间有一个过渡区，即 II 区。这时比载荷仍小于岩石的硬度。只有当比载荷比硬度低很多时，岩石的破碎才具有表面研磨性质，比载荷增加到仍然低于岩石硬度的某一数值后，钻头工作刃对岩石多次重复作用，使岩石表面疲劳、产生裂纹，与研磨一起作用的结果，从表面上剥落下较大体积的岩石，具有疲劳破碎的性质，II

称疲劳破碎区。

显然，体积破碎区是岩石破碎效率最高的区域，其次是疲劳破碎区，破碎效率最低的是表面破碎区。在钻进时所采取的钻进参数应力争达到体积破碎而避免低效率的表面破碎。在疲劳破碎区内虽然也会发生体积破碎，但效率仍较低。实际上在钻进中，特别在硬岩石中，往往只在开始一段时间内能保持高效率的体积破碎，随后由于钻头磨钝比载荷下降，破碎方式很快就离开这个区域。

二、影响岩石机械性质的因素

影响岩石破碎的因素是多方面的，为了掌握钻井时岩石的破碎特点，需要了解在钻井条件下影响岩石机械性质的因素。

1. 液柱压力和孔隙压力的影响

钻井中井底岩石如属不渗透、无孔隙液时，则增大泥浆液柱压力如增大围压一样，将使岩石的硬度增加、塑性增大，岩石的破碎随泥浆液柱压力的增加逐步由脆性向塑性转变。故随着井的加深或泥浆比重的增大，钻速下降不仅是由于岩石硬度的增大，而且也由于其塑性的增加。因此泥浆液柱压力对钻速有明显的影响，液柱压力增大降低了岩石破碎体积，增大了破岩能量的消耗，降低了钻进速度，而且岩石越软这个影响越显著。因此钻井时，应采用低比重、低固相的泥浆，使井底压差达到最小。

若岩石孔隙中含有液体并且有一定的孔隙压力，则孔隙压力降低了岩石的强度和塑性。增大孔隙压力将使岩石由塑性破碎转变为脆性破碎。当外压一定时，只需要稍微减小孔隙压力，岩石的强度便可大幅度提高。在钻井工作中，孔隙压力有助于岩石的破碎从而提高钻进速度。故当压差接近于零，即接近平衡钻井条件时，才有可能获得高的钻进速度。

2. 液体介质的影响

钻井时岩石的破碎过程是在液体介质——泥浆中进行的。液体介质对岩石强度的影响，主要是由于岩石与周围介质之间所发生的物理化学现象——润湿与吸附作用引起的。介质影响的程度，取决于介质中活性物质的吸附活性，也就是介质与固体性质的接近程度。

几乎所有的矿物和岩石都是亲水的固体。液体中含有的电介质和表面活性物质可以被吸附在岩石表面形成吸附层，而且被吸附的物质会顺着联结力弱的地方——主要是沿着界面、孔隙或沿着极细微的裂缝侵入到井底岩石的深部，产生强大的楔压力，使岩石在变形过程中保持或扩展其细裂缝降低其强度。

必须指出，液体介质对岩石性质的影响，在很大程度上决定于岩石中孔隙和原始裂缝的存在。孔隙和裂缝给液体介质深入岩石创造了条件，只有在这种条件下，岩石的强度才会受到显著的影响。

三、岩石的研磨性

1. 岩石研磨性的概念

钻进过程中，岩石被钻头破碎的同时，也对钻头产生磨损，岩石对钻头的磨损能力称为岩石的研磨性。

我们在这儿讨论的研磨性仅限于表面磨损，即研磨性磨损。它是由钻头工作刃与岩石相摩擦的过程中产生微切削、刻划、擦痕等所造成的。这种研磨性磨损除了与摩擦副材料的性质有关外，还取决于摩擦的类型和特点，摩擦表面的形状和尺寸（例如表面的粗糙度），摩擦面的温度，摩擦的速度，摩擦体间的接触压力，磨损产物的性质和形状及其清除情况，参与摩擦的介质等因素。因此，研磨性磨损是十分复杂的问题，是个研究得十分不够的领域。然而研究岩石的研磨性对于正确地设计和使用钻头，延长其工作面的寿命，提高钻头进尺，提高钻进速度，是有重要意义的。

钻头工作刃的磨损一般是表面的研磨性磨损。但在有些情况下也可能出现疲劳磨损（如牙轮钻头牙齿）。至于刮刀钻头硬质合金工作刃或人造金刚石聚晶块的脱落折断，则不属于正常磨损。

2. 岩石研磨性的测定方法及其分类

测定岩石研磨性有各种不同的方法，但迄今尚未有一个统一的标准方法。圆盘磨损法在几种研磨性的具体测定方法中相对近似地模拟同岩石发生周期性作用的牙轮钻头钢齿的磨损情况。该法的实质是测定圆盘状金属试样对岩石作滑动摩擦时的磨损，圆盘的旋转保证了金属与岩石作用的周期性，如图1-5所示。

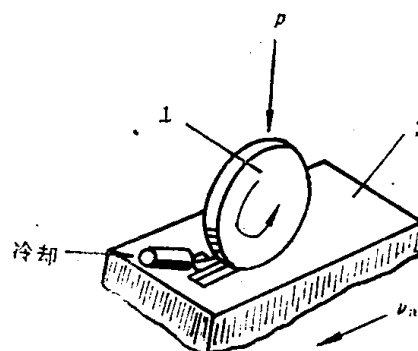


图 1-5 圆盘磨损法

1—金属圆盘；2—岩样； p —加在圆盘上的载荷； v_r —岩样给进速度

试验证明，对于大部份矿物和岩石，金属盘的单位摩擦路程（1米摩擦路程）的磨损不取决于圆盘的旋转速度，而只与载荷 p 成正比，

$$\text{即} \quad \Delta v_s = \omega \cdot p \quad (1-4)$$

式中 Δv_s ——圆盘的单位摩擦路程磨损量，厘米³/米；

ω ——研磨系数；

p ——摩擦面上的接触压力，牛。

Δv_s 可通过称重量获得，它等于金属圆盘磨损后的失重除以该金属的密度再除以摩擦总路程。研磨系数 ω 的物理意义实际上是在9.8牛的垂直载荷作用下与岩石产生单位路程的摩擦时金属圆盘的磨损体积。

因为金属磨损不仅与摩擦的路程有关，同时与它所磨掉的矿物或岩石的数量有关，因此需要一个既考虑金属磨损的体积、同时也考虑磨掉的岩石体积的指标，这个指标就是在单位摩擦路程中钢的磨损体积 Δv_s 与岩石磨损体积 Δv_r 的比值，称为相对磨损量 ω_0 。即

$$\omega_0 = \frac{\Delta v_s}{\Delta v_r} \quad (1-5)$$

经过大量试验，把各种岩石按研磨性系数大小分为12级，如表1-4所示。

3. 影响岩石研磨性的因素

(1) 化学岩的研磨性

化学岩的研磨性主要是决定于组成化学岩的矿物硬度，它与组成岩石的矿物硬度成正比。在这类岩石中，研磨性由小到大的顺序为硫酸盐类岩石（石膏、重晶石）、碳酸盐岩（石灰岩和白云岩）、硅质岩石（玉髓和燧石）、铁-镁长石岩、石英岩。