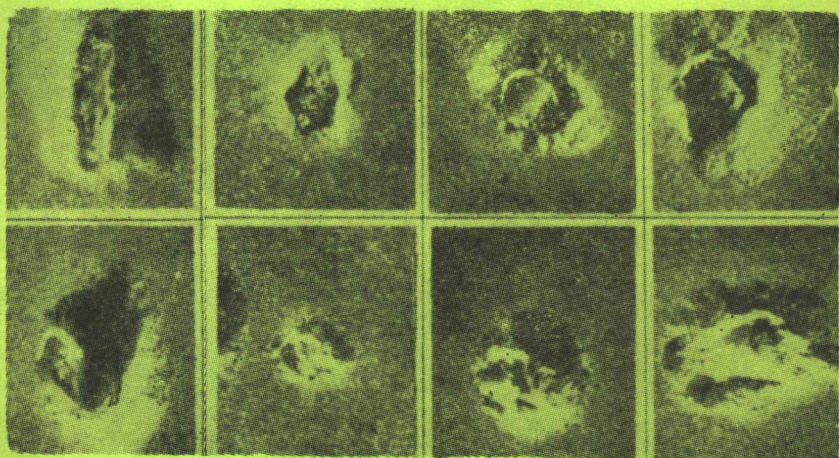


高等学校教学参考书

钻井岩石破碎学

〔苏〕A. И. 斯彼瓦克 A. H. 波波夫 著



一九八三年七月廿八日

地质出版社

高等学校教学参考书

钻井岩石破碎学

〔苏〕 A.И.斯彼瓦克 著
A.Н.波波夫

吴光琳 张祖培 译
李世忠 屠厚泽 校

地质出版社

А. И. СПИВАК
А. Н. ПОПОВ
РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД
ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН
ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ ПЕРЕРАБОТАННОЕ
И ДОПОЛНЕННОЕ
МОСКВА «НЕДРА» 1979

钻井岩石破碎学

〔苏〕 **А.И.斯彼瓦克** 著
А.Н.波波夫

吴光琳·张祖培 译

李世忠 屠厚泽 校

责任编辑：李源明

地质矿产部教材编辑室编辑

地质出版社出版

（北京西四）

地质出版社印刷厂印刷

（北京海淀区学院路29号）

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本：850×1168¹/₃₂·印张：7⁹/₁₆·字数：196,000
1983年4月北京第一版·1983年4月北京第一次印刷
印数1—2,677册·定价1.00元
统一书号：15038·教35

译 者 的 话

《钻井岩石破碎学》是苏联最近出版的一种专业基础理论课教材。它可供钻井和钻探专业师生教学之用，同时对采矿专业师生和从事钻井工作及钻头设计的科技人员也有参考价值。书中比较系统地介绍了苏联近年来钻井岩石破碎方面理论研究和生产实践的最新成果。该教材是在原来《岩石力学》和《石油及天然气钻井工艺》等课程教材的基础上提炼加工而成的。自从1974年出版以来已经作过三次修改和补充。

我国石油院校钻井专业、地质院校钻探专业和矿业院校采矿专业都相继开设了《岩石破碎力学基础》、《岩石破碎原理》和《岩石破碎学》等选修课程。因此，需要这方面的教材和教学参考书。

《钻井岩石破碎学》的翻译出版，将为钻采专业师生提供一本较好的教学参考书，同时也为钻井和钻探界科学研究和工程技术人员提供一本有益的参考文献。

本书译稿完成后，承蒙李世忠和屠厚泽两位教授在百忙中抽空校阅并提出了宝贵的指正意见。在此，译者对他们表示衷心的感谢。

译 者

1982年6月

前 言

Л. А. 史立涅尔教授的专著《岩石力学的物理基础》(国家燃料工业出版社, 1950)、B. C. 费多罗夫教授的专著《钻井规程科学原理》(国家燃料工业出版社, 1951)和E. Ф. 埃普什坦教授的专著《岩心钻探中硬质合金磨损》(国家燃料工业出版社, 1952), 是岩石力学和破碎岩石工具方面的首批重要著作。这些著作后来成了钻井岩石破碎力学的理论基础。

至今已经出版了大量论述岩石破碎力学和破碎岩石工具问题的书籍。但是, 提高钻井速度和加大钻井深度的任务, 给我们提出了很多需要继续研究的新问题。

1974年, 《钻井岩石破碎学》课程被列入高等石油院校《石油与天然气钻井》0211专业的教学计划。该课程包括了《岩石力学》课程的全部内容和《石油与天然气钻井工艺》课程中有关碎岩工具的结构、工作原理和磨损问题等某些章节。因此, 《钻井岩石破碎学》课程的教材是以《岩石力学》教材的第二版(矿产资源出版社, 1975)为基础、并引用了岩石力学方面的新成果进行编写的, 同时还增添了阐明上述问题的新章节。

在编写本书时, 援引了科研、教学和生产单位公开发表过的岩石力学和碎岩工具方面的研究资料。科研单位是: 全苏钻井技术科学研究所, 地质与地球物理勘探研究所, 阿塞拜疆石油机械研究所, 巴什基里亚石油加工研究所; 教学单位是: 莫斯科石油化学与天然气工业学院, 格罗兹内石油学院, 阿塞拜疆石油化工学院, 乌发石油学院; 生产单位是: 古比雪夫钻井机械联合企业和其它企业。

除第八章以外, 本书各章是由作者们共同编写的, 第八章由A. H. 波波夫单独写成。

作者对 Б. Н. 特鲁什金科学技术候补博士、С. В. 菲利波维奇科学技术候补博士以及本书的评阅人 Р. М. 埃格莱斯教授，B. E. 科佩洛夫教授和 В. Г. 阿巴图罗夫副教授表示深切的谢意，感谢他们对本书提出了具体的改进意见，在修改手稿时已采纳了这些意见。

目 录

绪 论	1
§ 1. «钻井岩石破碎学»课程的内容	1
§ 2. 课程的任务及其意义	1
§ 3. 固体物理的某些问题	2
§ 4. 岩石的基本知识	4
§ 5. 钻井, 破碎岩石方法和钻井方法	9
第一章 连续介质力学基础	11
§ 1. 基本概念和定义	11
§ 2. 固体弹性变形区的应力和应变	13
§ 3. 塑性变形区的应力和应变	17
§ 4. 强度理论	19
§ 5. 固体变形时流变性的表现	22
§ 6. 固体破碎(分散)能量定律	25
第二章 岩石力学性质指标及其确定方法	27
§ 1. 在简单试验形式下岩石力学性质指标的确定	27
§ 2. 矿物变形时表现的特性	31
§ 3. 简单试验形式下的岩石力学性质指标	33
§ 4. 各向压缩条件下岩石的试验	37
§ 5. 岩石均匀的各向压缩. 岩石的压缩性	39
§ 6. 岩石不均匀的各向压缩. 极限曲线的绘制	40
第三章 钻井周围岩石的应力状态和稳定性	43
§ 1. 在埋藏条件下岩石的应力状态	43
§ 2. 钻井周围岩石的应力状态	46
§ 3. 井壁稳定的条件	49
§ 4. 岩层的水力断裂	51
§ 5. 洗井液比重的选择	52
§ 6. 介质对井壁岩石变形和破坏的影响	53

§ 7. 钻井周围岩石的蠕变·····	55
第四章 压入时岩石破碎的基本规律和力学性质指标 ·····	56
§ 1. 钻头碎岩刀具与岩石作用的主要方式·····	56
§ 2. 压入时岩石的弹性应力状态·····	57
§ 3. 平底压头、球体和楔形工具压入时的岩石破碎机理·····	68
§ 4. 研究岩石动载变形和破碎的主要原理和方法·····	71
§ 5. 自由落锤破碎岩石的特殊性·····	72
§ 6. 硬度的概念。矿物的硬度·····	75
§ 7. 用压头静压入法确定岩石的力学性质指标·····	77
§ 8. 动载变形和破碎时岩石力学性质指标的确定·····	82
§ 9. 压入时岩石的疲劳破碎·····	86
§ 10. 岩石的分级·····	87
§ 11. 压入时各种因素对岩石变形和破碎的影响·····	89
§ 12. 压头静压入时确定的岩石力学性质指标的分析及其 在绘制岩石极限曲线时的应用·····	93
第五章 岩石的研磨性 ·····	99
§ 1. 金属磨损和岩石研磨性的基本概念·····	99
§ 2. 同岩石作用时金属磨损的研究方法·····	102
§ 3. 用旋转圆盘研究金属研磨性磨损的方法·····	104
§ 4. 同岩石摩擦时钢磨损的基本规律·····	106
§ 5. 淬火钢研磨性磨损的机理·····	110
§ 6. 介质对钢研磨性磨损的影响·····	114
§ 7. 硬质合金研磨性磨损的特点·····	118
§ 8. 岩屑对金属的磨损·····	119
§ 9. 岩石的研磨性指标。沉积岩研磨性分级·····	119
第六章 碎岩工具破碎岩石的概论·····	125
§ 1. 钻井时机械方式碎岩的基本原则·····	125
§ 2. 碎岩工具的分类·····	126
§ 3. 钻头的规程参数和工作指标·····	128
第七章 切削—剪切型和研磨一切削型钻头 ·····	130
§ 1. 切削—剪切型钻头的应用范围和结构特点·····	130
§ 2. 钻头翼片与岩石相互作用的运动学和能量学·····	131
§ 3. 刮刀钻头的运动学·····	133

§ 4. 刮刀钻头的冲洗系统.....	135
§ 5. 刮刀钻头的磨损.....	137
§ 6. 研磨一切削型钻头.....	139
§ 7. 曲线形和阶梯形切削棱钻头.....	141
§ 8. 单牙轮钻头.....	143
§ 9. 金刚石钻头和ICM型钻头	145
第八章 凿碎—剪切型钻头	151
§ 1. 凿碎—剪切型钻头概述.....	151
§ 2. 凿碎—剪切型钻头的碎岩刀具和它们按作用的分类.....	154
§ 3. 应用范围和钻头所需最小轴载的计算。类比公式.....	158
§ 4. 凿碎—剪切型钻头碎岩刀具与岩石相互作用的运动学.....	164
§ 5. 凿碎—剪切型钻头碎岩动力学.....	173
§ 6. 凿碎—剪切型钻头碎岩能量学.....	182
§ 7. 凿碎—剪切型钻头碎岩刀具的几何参数选择原则.....	187
§ 8. 牙轮钻头的支撑.....	189
§ 9. 凿碎—剪切型钻头的冲洗系统.....	192
§ 10. 钻头尺寸和标号 (按苏联国标20692—75).....	193
§ 11. 钻头零件的磨损和损坏.....	194
§ 12. 研磨磨损时牙轮钻头碎岩刀具寿命的计算方法.....	200
第九章 取心钻进时的岩石破碎、特殊用途的碎岩	
工具	204
§ 1. 取心钻进的目的和取心钻头的主要结构.....	204
§ 2. 钻头的工作特性和结构.....	208
§ 3. 岩心破坏的原因和提高取心率的措施.....	211
§ 4. 特殊用途的碎岩工具.....	212
第十章 岩石的可钻性	216
§ 1. 岩石可钻性概述.....	216
§ 2. 影响岩石可钻性的主要因素.....	218
§ 3. 矿床剖面划分为等可钻性层的原则.....	223
§ 4. 各种结构钻头效率的评价.....	226
参考文献	228

绪 论

§ 1 《钻井岩石破碎学》课程的内容

《钻井岩石破碎学》阐述的是钻井时岩石中的力学过程，碎岩工具的结构、工作原理和磨损问题。

研究岩石和金属中力学过程的理论基础，是固体物理和连续介质力学的基本原理。这些基本原理反映力学过程的实质并给出其近似的数学描述。连续介质力学讨论的不是真实物体，而是物体的近似模型。这种近似模型只包含被模型化物体的最实质的特征（性质）。研究碎岩工具结构和工作原理的理论基础是理论力学和机械零件。

岩石是特殊的固体，其数学模型较为复杂。因此，在研究岩石中的力学过程时广泛利用特解。关于简单模型可用性的假说是特解的基础。这种简单模型既能代表具体的岩石，又能满足力学过程物理模型试验的要求。

岩石的高度不均匀性，以及在对岩石中的力学过程和碎岩工具的工作原理作物理模型试验时预计不到的因素，使得试验得到的数据变化很大，整理这些试验数据要采用数理统计。

§ 2 课程的任务及其意义

苏共第二十五次代表大会给全苏石油工作者提出的任务是：到第十个五年计划末期完成石油开采量（包括气冷凝产品）62,000～64,000万吨，天然气开采量4,000～4,350亿立方米。为了完成这一任务必须不断增加开采和勘探钻井的工作量，并且主要依赖

于提高钻进速度。在解决这一问题时，钻进规程的最优化、完善和创造新型的高效率碎岩工具应该起着重大作用。

要成功地发展钻进技术和工艺，必须深刻了解钻井时岩石性能变化的规律性，碎岩工具破碎岩石的规律性，以及碎岩工具的结构、工作原理和磨损情况。

因此，本课程的主要任务是，研究钻井时、并且是用碎岩工具机械破碎时岩石中的力学过程，碎岩工具材料的磨损过程，以及描述和计算与钻井有关的这些过程的方法。

§ 3 固体物理的某些问题

岩石是固体。因此，在研究其性质之前，必须了解固体的一般结构和性质方面的问题。

如果固体中的原子、离子或分子按一定的次序排列，并且这种次序在三个向度上不断重复，这类固体称为结晶体，其中质点排列的一定次序称为晶体结构。

当固体物质从溶液或熔融物中析出时形成规则的多面体，其外形轮廓体现物质的晶体结构。这种多面体称为晶体。但是，在自然界让单个晶体自由生长的条件较少。物质的结晶作用基本上是在大量的点（结晶中心）同时开始的。生长着的晶体互相接触，并且在它们继续长大时，结晶物质就充填于晶体之间的空间，晶体变为晶粒或形状不规则的微晶。此时形成的固体是一种多晶体物质。然而，即使在这种情况下，在各晶粒界限内仍完全保留着物质的晶体结构。

固体中的联系力具有静电属性，并且决定着固体的强度。我们认为，强度是固体抵抗外力破坏的能力。在外力作用下联系被破坏，而物质的集合状态不变。

具有理想晶体结构的固体，其强度称为理论强度，并且可以计算。实际测定的晶体的真实强度（技术强度）比理论强度低数百至数千倍。物理学家们曾假设固体的结晶结构不完整。后来这

种假设为电子显微镜的观察所证实。晶体结构的不完整性包括热振动、点缺陷、线缺陷和面缺陷^[93]。

热振动 在常温下位于晶格节点上的质点作非简谐的振动，振幅小于原子间距的 5~10%。由此可见，质点具有动能，而在研究固体的理想结构时这种动能是未被考虑到的。温度愈高，则动能愈大，它对固体结构和性质的影响也愈大。动能永远是正值，当动能与作用于质点间的位能相叠加时，便导致质点间平衡距离的增大（物体热膨胀）。当动能达到一定的数值时就引起固体结构的破坏（物体熔化）。

点缺陷 与晶体结构点缺陷有关的现象有：空位（晶格节点未被质点占据），节间原子（离子）侵入和异种原子或离子进入晶格（图1）。在上述三种情况下都会发生晶体结构畸变和局部减弱。

线缺陷（位错）

最简单的线缺陷形式是：由破裂表面的边缘所形成的边缘位错（图2a）和由晶体的一部分相对于另一部分移动所形成的螺旋位错（图2

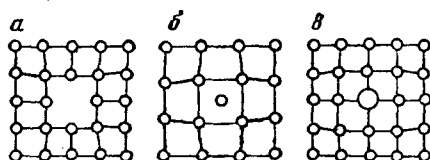


图 1 晶体结构的点缺陷

a—空位；b—节间侵入；c—异种原子（离子）替代

b)。在外载影响下位错很容易发展，线缺陷之间以及线缺陷与其它结构缺陷的相互作用非常显著。

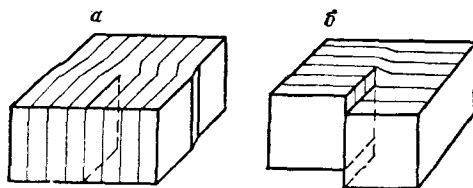


图 2 边缘位错(a)和螺旋位错(b)

面缺陷 固体的表面可以看成是晶体结构的一种缺陷，因为

物体表面的质点与物体内部的质点相比，处于另一种能量状态。物体表面质点相互间的联系能与物体内部质点间的联系能之差值即为表面能。

多晶体物质微晶（晶粒）之间的界面构成内表面，这种内表面也可视为晶体结构的两维缺陷。固体微晶之间的联系力也具有静电属性。但是，固体，特别是岩石晶粒界面上的联系力非常薄弱^[59]。对于由单一矿物组成的岩石来说，联系力减弱的程度决定于微晶表面的性质、微晶晶格错位的程度和微晶之间杂质的浓度。在由多种矿物组成的岩石中，除上述的原因以外，由于晶格参数的影响，在某些情况下是由于相互接触的微晶晶格联系形式不同，联系力的减弱更大。

外力使固体中产生应力。在应力影响下产生的位错势，可能积蓄在晶粒的界面上和其它结构缺陷附近，并引起局部应力集中和微裂隙。结果在外载下物体的强度随作用时间的延续而降低。这种现象称为材料的耐久性。在交变载荷下，上述过程进展得更快，而强度降低的幅度也更大。这种现象称为材料的疲劳。

受外力而变形的固体具有某些残余位能。该位能是位错和物体内部结构逐渐改组的动力来源。结构逐渐改组总是朝着位能降低的方面进行。从外表来看，这种结构改组表现了结晶固体的粘滞性。

近代固体物理的知识还不能定量地说明变形和破坏时固体中的力学过程，只能对此力学过程作定性的描绘。

在研究岩石破碎时，这种定性描绘对于了解下列现象的本质，诸如弹性和塑性变形、韧性表现、强度随时间的延续而降低（耐久性）、强度的疲劳减弱等，是极其重要的。

§ 4 岩石的基本知识

油、气田赋存在沉积岩中。本书将讨论钻进沉积岩时的力学过程。

沉积岩分为两大类：结晶岩和碎屑岩。虽然泥岩类占有特殊的地位，但也将它与碎屑岩一起讨论。在沉积岩中结晶岩占25%左右，碎屑岩占21%左右，而泥岩大约占54%。

从钻井的观点来看，岩石最重要的地质特性是矿物成分、结构和不均匀性。

目前已知矿物将近2000种，但是组成岩石的主要矿物仅只数十种。这些矿物称为造岩矿物。

由单一矿物组成的岩石称为单矿物岩石（例如白云岩，石灰岩，硬石膏），而由数种矿物组成的岩石则称为多矿物岩石（例如花岗岩，粘土，多矿物砂岩）。

岩石的组织以结构和构造两个主要特征来表示。

岩石的结构是由组成岩石的微晶或碎屑岩岩屑的粒度、形状和表面性质所决定的组织特征。

岩石的构造则是由微晶或碎屑岩碎屑的相互的空间分布情况所决定的组织特征。属于构造特征的现象有：层理、片理、孔隙度和节理。

结构和构造特征明显地影响着岩石的力学性质指标。

结晶沉积岩是矿物晶粒（微晶）的集合体。这种集合体是由于盐类物质从水溶液中沉淀、或者由于在地壳上发生的化学反应而形成的。生物岩也是结晶的沉积岩，它是生物活动的产物。最普遍的结晶沉积岩有：碳酸盐类岩石（石灰岩，白云岩，泥灰岩），硫酸盐类岩石（石膏，硬石膏），卤化物类岩石（岩盐）和硅质岩石（硅藻土，燧石）。

碎屑沉积岩是早先存在的岩石机械破坏和物理—化学破坏后的产物，被水或风搬运，在不发生溶解和再结晶的情况下沉积而成的。破坏后在原地形成的岩石也属于此类。按照碎屑尺寸的大小，碎屑沉积岩可以再分为四个亚类：

砾岩（碎屑尺寸大于2毫米） 主要由岩浆岩和变质岩的碎屑组成。碎屑之间的空隙由砂质的、粉砂的和泥质的岩石充填。砾岩在油、气田的地质剖面中分布不多。

砂质岩石（碎屑尺寸为0.1~2毫米）属于此类的有砂土（松散的）和砂岩（胶结的）。根据矿物颗粒成分的不同，砂质岩石又分为石英砂岩和多矿物砂岩。前者由石英颗粒组成，后者由不同的矿物颗粒（云母，角闪石，辉石，长石等）组成。

根据颗粒尺寸的不同，砂土和砂岩可分为：大粒的（2~1毫米），粗粒的（1~0.5毫米），中粒的（0.5~0.25毫米），细粒的（0.25~0.1毫米），等粒的（颗粒尺寸相同）和不等粒的（颗粒尺寸不一）数种。

细粒岩石（碎屑尺寸为0.01~0.1毫米）它是介于砂质岩石和泥质岩石之间的一类岩石。属于此类的主要是陆相沉积的岩石，如亚砂土、亚粘土和黄土。胶结了的岩石—粉砂岩分布很广。

泥岩（碎屑尺寸小于0.01毫米）包括粘土、泥质板岩和泥质页岩。通常由玉髓（ SiO_2 ）胶结的泥质板岩具有高的强度。如果泥质板岩容易沿片理面裂开，则称它为泥质页岩。

碎屑岩最显著的构造特征是层理和孔隙度。碎屑岩的孔隙呈粒状，并且孔隙度有很大的数值。

松软的岩石分为非粘结的和粘结的（泥质的）两种。充填孔隙的水对这些岩石的性质有很大影响。岩石是亲水的物体，它能很好地被水浸湿。岩石孔隙中和表面上的水可能是结合状态的或自由状态的。

岩石中含有的水量以湿度 W 的百分数来估算：

$$W = \frac{G_n - G_c}{G_c} \cdot 100,$$

此处 G_n ——湿岩石的质量；

G_c ——岩石骨架的质量。

在粘结的泥岩中，联系力具有物理—化学特性，并且决定于粘土矿物特殊的胶体状态。粘土颗粒相互作用的原理如图3所示。

泥岩是在水介质中形成的。在此条件下粘土颗粒仿佛处于电

离状态，因为它们把可交换的阳离子输给溶液。因此它们带有负电荷，从而形成牢固的水化膜。阳离子也被缔合的水分子所包围。由图 3 可见，结合水膜外表带有负电荷，而围绕阳离子的缔合水外层则带有正电荷。两种电荷的相互作用决定着粘土颗粒的粘结性。不难看出，相互作用力的大小主要依赖于水扩散层的厚度。自由

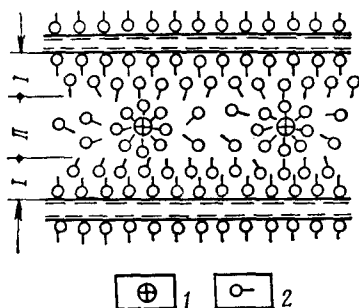


图 3 粘土颗粒相互作用示意图

1—阳离子；2—水分子（偶极子）；

I—结合水；II—扩散层

水扩散层厚度增加，将导致泥岩粘结性的丧失和具有流动性。随着扩散层厚度的减小相互作用力增大，因而泥岩的强度增加。扩散层的存在使粘土具有高的塑性。干燥时泥岩就变成坚硬状态。

由此可见，由于水的含量不同泥岩可能表现为坚硬的、塑性的或流动的状态。

胶结物按其成分可以是硅质的、碳酸盐的、硫酸盐的、铁质的、泥质的、沥青质的和其它成分的（以上按胶结物强度递减的顺序排列）。

根据组织结构情况，碎屑岩胶结物有以下四种胶结形式（图4）：

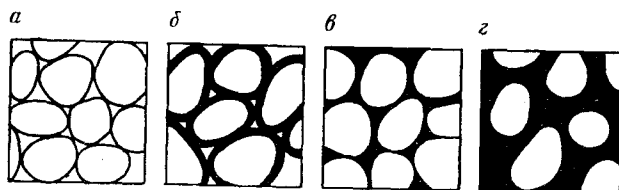


图 4 碎屑岩的胶结形式

a—接触胶结；b—围膜胶结；c—孔隙胶结；d—基底胶结

1) 接触胶结——胶结物沉积在碎屑接触处；

2) 围膜胶结——每一碎屑被胶结物的薄层所包围。如果胶结物有与碎屑相同的成分, 则它被称为再生或增生胶结物;

3) 孔隙胶结——胶结物充填着碎屑之间的空隙;

4) 基底胶结——岩石碎屑好似沉浸在胶结物中, 并且相互不接触。

在泥岩压实的过程中自由水被挤出。石膏、方解石、铁盐沉淀在颗粒接触处, 胶结着泥岩。联系力逐渐具有结晶性质。当粘土压碎或盐沉积物溶解时, 粘土重新具有塑性。

泥岩更大的变化与其脱水作用、被硅质胶结物胶结及部分再结晶现象有联系。结果形成坚硬的、致密的、在水中不泡胀的泥板岩。

岩石中矿物颗粒、碎屑、孔洞和裂隙的尺寸分配和方向排列情况都具有偶然性。这就决定了岩石的高度不均匀性。不均匀性显著地影响着岩石在钻井过程中的表现。

岩石的不均匀性和各向异性, 使得选择通用模型和获得基本反映力学过程的解析答案发生困难。为了简化模型, 岩石力学性质指标用不同方法来确定。试验方法的选择决定于需要讨论的过程的本质特征。

从钻井的角度来看, 岩石的重要特征是其比重和容重。

单位体积岩石骨架的重量称为岩石的比重。

单位体积自然条件下岩石的重量称为岩石的容重。

容重 γ_0 与孔隙完全被液体饱和的岩石比重 γ 之间的关系可用下式表示:

$$\gamma_0 = \gamma - m(\gamma - \gamma_x),$$

此处 m ——岩石的孔隙度, %;

γ_x ——孔隙中液体的比重。

单位体积岩石的质量称为岩石的密度。某些岩石的密度数值列于表1。

岩石比重和密度的关系用下式表示

$$\gamma = g \cdot \rho,$$