

华东水利学院

水利出版社

岩石力学

*yanshi
lixue*

岩石力学

华东水利学院

水利出版社

内 容 提 要

本书为高等院校“水利水电工程地质”、“水工建筑力学”专业的教材,也可供从事岩石力学工作的水利水电、地下建筑、地质、矿山、冶金、交通以及国防等工程技术人员和高等院校其它有关专业师生参考。

书中共分十三章,分别论述了工程地质基础知识、岩石的物理力学性质、岩体现场试验、岩体渗流理论、岩体应力应变的某些计算方法、岩体天然应力与洞室围岩的应力分布、山岩压力、有压隧洞的岩石力学计算、岩基应力与稳定计算、岩坡稳定分析、有限单元法在岩石力学中的应用、模型试验在岩石力学中的应用以及岩石动力学基础。

书内附有大量插图,大多数章内附有例题。

岩 石 力 学

华东水利学院

*

水利出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 19 $\frac{1}{2}$ 印张 440千字

1981年1月第一版 1981年1月北京第一次印刷

印数 0001—5620册 定价 2.40元

书号 15047·4091

前 言

本书是根据一九七八年十一月由水利电力部组织制订的“水利水电工程地质”专业及“水工建筑力学”专业的《岩石力学》教材编写大纲写成的。为了兼顾两个专业以及其他有关专业的需要，同时便于工程技术人员参考，编写时在某些章节阐述的深度和广度上作了必要的提高。在教学时，可根据专业的需要适当取舍。

本书由华东水利学院徐志英编写绪论、第二章、第四章、第七章、第八章、第十章、第十一章、第十二章以及第十三章；芦盛松编写第五章、第六章以及第九章；吕庆安编写第一章、第三章，由徐志英主编。全书插图由赵崇善、刘忠文等描绘。

全书初稿完成后，承傅作新、沈家荫、周萍、费余绮、许荫椿、郭志平等校阅了部分章节，提出了许多意见，对提高本书质量帮助很大，在此一并致谢。

本书由华北水利水电学院王正宏主审。参加审稿的单位还有长江流域规划办公室长江水利水电科学研究所、成都科技大学、成都地质学院以及华东水利学院的力学教研室和地质教研室。审稿同志对本书提出了很多宝贵意见，谨此表示衷心的感谢。

我们恳切希望广大读者对书中的缺点、错误给以批评指正。

编 者

1980年7月

目 录

前言	
绪论	1
第一章 工程地质基础知识	3
第一节 岩石	3
第二节 岩体地质构造	6
第三节 岩体结构	11
第四节 岩石的工程分类	15
第二章 岩石的物理力学性质	22
第一节 岩石的物理性质	22
第二节 岩石的强度特征	25
第三节 岩石的强度理论	37
第四节 岩石的变形特性	48
第三章 岩体现场试验	62
第一节 岩体变形特性	62
第二节 岩体强度特性	67
第三节 岩石反力系数的确定	71
第四节 岩体试验的地球物理法	72
第四章 岩体渗流理论与渗流应力状态	77
第一节 概述	77
第二节 渗透系数	77
第三节 裂隙岩体内的稳定渗流	83
第四节 岩体中的有效应力	85
第五节 裂隙(孔隙)水压力引起的应力状态	88
第六节 大破碎岩体内的水流计算	91
第七节 岩体内水引起的力学和化学变化	93
第五章 岩体内应力应变的某些计算方法	95
第一节 常用的应力公式	95
第二节 半无限体内的应力和位移	96
第三节 裂隙岩体的平衡条件	99
第四节 裂隙岩体的米勒强度分析法	101
第五节 碎块体理论	103
第六章 岩体天然应力与洞室围岩的应力分布	110
第一节 概述	110
第二节 岩体的初始应力	110
第三节 岩体应力的现场量测	112

第四节	圆形洞室围岩应力重分布概念	117
第五节	水平洞室围岩的应力计算	118
第七章	山岩压力	127
第一节	概述	127
第二节	山岩压力的形成及其影响因素	128
第三节	坚硬岩体围岩应力验算	132
第四节	压力拱理论	133
第五节	太沙基理论	143
第六节	弹塑性理论	145
第七节	地质分析法计算山岩压力	154
第八节	喷锚支护原理和设计原则	157
第八章	有压隧洞的岩石力学计算	166
第一节	概述	166
第二节	围岩内附加应力的计算	166
第三节	有压隧洞围岩和衬砌的应力计算	170
第四节	有压隧洞围岩最小覆盖层厚度问题	175
第五节	有压隧洞围岩的其它计算	185
第九章	岩基的应力与稳定计算	189
第一节	岩基内应力分布的一般概念	189
第二节	岩基承载力	192
第三节	岩基抗滑稳定计算	196
第四节	拱坝坝基与坝肩的稳定计算	200
第十章	岩坡稳定分析	204
第一节	概述	204
第二节	影响岩坡稳定性的因素	206
第三节	临界边坡	207
第四节	圆弧法岩坡稳定分析	209
第五节	力多边形法岩坡稳定分析	210
第六节	力的代数迭加法岩坡稳定分析	212
第七节	毕肖普法和江布近似法岩坡稳定分析	213
第八节	各种地质条件下的岩坡稳定计算	215
第九节	岩坡加固	223
第十一章	有限单元法在岩石力学中的应用	227
第一节	概述	227
第二节	各向同性弹性体有限单元法简述	228
第三节	横观各向同性岩体的分析	234
第四节	岩体的无拉应力分析	240
第五节	断层、裂隙和软弱夹层的分析	247
第六节	岩体的弹塑性应力分析	254
第十二章	模型试验在岩石力学中的应用	258

第一节	概述	258
第二节	相似原理	258
第三节	相似材料、模拟和试验技术	263
第四节	用模型试验测定弹性应力	267
第五节	用模型试验测定抗滑安全系数	268
第六节	裂隙性各向异性岩基的应力与变形	271
第七节	大坝岩基应力和变形模型研究实例	273
第十三章	岩石动力学基础	278
第一节	概述	278
第二节	岩体中波的传播	278
第三节	波动引起的应力与应变	283
第四节	应力波的折射与反射	291
第五节	地下结构的抗爆设计与计算	296
附录	工程单位制和国际单位制对照表	302
参考文献		303

绪 论

岩石是一种储蓄很高能量的物质。几千年来，岩石在人类的自觉活动中起了很大的作用。原始人早就利用岩石做成简陋的工具和兵器。从新石器时代起，人类又开拓了广阔的地下采石坑。稍后，金属的生产要求在岩石中开挖巷道，以便开采矿石。各种建筑物的兴建也大都以岩石为建筑材料。古埃及的金字塔，我国著名的万里长城以及都江堰水利工程，都是用岩石做成的。在近代，随着生产的发展，地面建筑物越来越高，特别是各种类型的高坝、水电站厂房等的荷载愈来愈大。因此，人们不得不将它们的基础造在比土更坚硬的岩石上。目前，岩石的利用已获得了越来越广泛的发展。仅就工程建筑的领域而言，它的用途主要有：作为水工建筑物的地基，我们称之为岩基。例如，高坝、大型水电站厂房等都造在岩基上；作为地下建筑物和洞室的围岩。例如，地下电站、水工隧洞、交通隧道、采矿巷道、战备地道、地下飞机库、地下军舰停泊所、地下储气库等等的围岩；作为建筑材料，堆石坝就是一例。

因此，在兴建这类工程建筑物时，对岩石性能的研究是决不可少的。特别是随着生产的迅猛发展，造在岩石上和岩石内的建筑物将愈来愈多，规模也愈来愈大。目前，国外有的坝高已达300米，大型地下电站、隧道和矿山巷道的深度已超过3000米。这些都促使对岩石研究的要求愈来愈高。因此，详细地、系统地研究岩石在荷载作用下的性状（或岩石的受力效应）对于发展国民经济、加速现代化建设有着重要意义。

岩石力学就是研究岩石力学性能的理论和应用科学，是探讨岩石对其周围物理环境中力场反应的学科，它是固体力学的一个分支。具体而言，岩石力学是研究岩石在荷载作用下的应力、应变和破坏规律，在这个基础上，通过分析计算和科学实验（室内、现场的试验研究和原型观测）的途径，以解决因兴建工程建筑物在岩石内和岩石上所引起的力的效应（例如岩基、岩坡、地下工程围岩的受力分析、稳定验算及加固等问题）的科学。

尽管人类在生产实践中早就与岩石有密切关系，但是岩石力学却是一门新兴的学科。它是在本世纪50年代末才开始发展起来，它比土力学的发展约迟缓30年。发展迟缓的原因可能是由于岩石性质复杂，有时与连续体显著不同之故。就目前而言，岩石力学还未能形成一套完整的理论。

在国外，1957年在巴黎出版的塔洛布尔（J. Talobre）的专著“岩石力学”是这方面最早的一本较系统的著作。其后，有关刊物又发表了许多论文，并开始形成了不同的学派（如法国学派，偏重于从弹塑性理论方面来研究；奥地利学派，偏重于地质构造方面来研究）。第七次、第八次、第十次国际大坝会议，都把岩石力学问题列为专题讨论。1962年在奥地利萨尔茨堡正式成立了“国际岩石力学学会”。

在国内，随着社会主义建设事业的发展，国防、水利、交通、建筑、采矿等部门和中国科学院、某些高等院校以及许多省、自治区都已有了一支基本研究队伍，开展了大量工

作并取得了一批科研成果。我们深信，随着我国社会主义现代化建设，岩石力学在国内必然会受到应有的重视和发展。

为了不致混淆，本书对“岩块”、“岩体”和“岩石”这三个术语作如下规定：“岩块”是指从地壳岩层中切取的岩石小块。例如，由钻探获得的岩心，或者用爆破或其它方法获得的岩石碎块、岩样等等；“岩体”是指天然埋藏条件下的大范围分布的岩层；而“岩石”则是用来概括“岩块”与“岩体”的总称。

第一章 工程地质基础知识

对岩体的稳定性和变形状况进行分析之前，首先应当了解岩石的工程特性；其次是考虑应力的分布与大小；第三是估计地下水的渗透对岩体的稳定和变形所造成的影响。

岩石的工程特性问题，对于完整岩块来说，它和岩石的成因类型、岩石的结构与构造特征以及各种地质作用对岩石性状的改变程度有着密切的联系。但是对于岩体而言，除了岩石本身的性质之外，特别重要的是岩体中各种地质结构面的自然特性和结构面的排列组合方式。这类问题虽然是工程地质的基础知识，但是，对于岩石力学的初学者来说，却是必不可少的，所以本书专辟一章加以讲述。关于天然应力和地下水渗透影响的问题，在以后有关章节中介绍。

第一节 岩 石

一、一般概念

岩石是由矿物组成的。自然界中的矿物则是由自然元素或者是由它们的化合物所构成。由于矿物在生成过程中，受到了各种化学的或物理化学的作用，它们绝大多数呈结晶状，因此矿物就是一种具有一定的化学成分和物理性质的质体。矿物的种类很多，约在3000种以上，但是在岩石中常见的矿物只有几十种，这就是所谓的造岩矿物。最重要的造岩矿物有石英、长石、云母、角闪石、辉石、方解石等。

岩石是矿物的集合体。由一种矿物组成的岩石称为单矿岩。由两种或两种以上矿物组成的岩石称为复矿岩。岩石中的矿物成分及其组合特征是区分岩石的重要标志之一。

岩石是在一定的地质环境中生成的，它具有一定的结构和构造特征。所谓岩石的结构是指岩石中矿物的结晶程度、矿物或岩石碎屑颗粒的形状和大小以及它们之间相互联接的方式等；岩石的构造则是指岩石的外貌特征，岩石的外貌是通过岩石中的矿物或岩石碎屑颗粒在空间的排列方式和岩石中可能具有的空洞分布及其充填情况所表现出来的。所以岩石的结构和构造特征能够反映岩石生成时的地质环境。由于岩石的物理力学性质与岩石的结构构造关系密切，因此通常用它们来作为岩石分类的基本依据。

二、岩石的基本类型

根据岩石的成因类型可将岩石分为岩浆岩、沉积岩和变质岩三大类。

(一) 岩浆岩

就是由融熔的岩浆冷凝而成的岩石。岩浆侵入周围的岩石中形成的岩石叫做侵入岩。侵入岩按其生成部位的深浅又可分为深成侵入岩和浅成侵入岩。岩浆沿周围岩石中的裂隙和空隙上升，溢出地表形成的岩石则叫做喷出岩。

1. 岩浆岩中的矿物成分 它是由岩浆的化学成分决定的，如果用岩浆中含量最多的氧

化物 SiO_2 来划分, 则岩浆岩可分为: 酸性岩浆岩 ($\text{SiO}_2 > 65\%$), 其中含有比较多的石英、正长石和黑云母等矿物; 中性岩浆岩 ($\text{SiO}_2 = 65 - 52\%$), 是以正长石或斜长石和角闪石等矿物为主要成分; 基性岩浆岩 ($\text{SiO}_2 = 52 - 45\%$), 其中以斜长石、辉石一类的矿物占多数; 而在超基性岩浆岩 ($\text{SiO}_2 < 45\%$) 中, 则主要的矿物是橄榄石和辉石。

2. 岩浆岩的结构 大多数岩浆岩具有结晶质结构和半结晶质结构, 只是一些喷出岩和火山碎屑岩才具有非结晶质结构 (分别呈玻璃质结构和碎屑状结构)。结晶颗粒有大有小, 有粗粒、中粒及细粒的差别。当岩石中同类矿物大小相近时称为等粒结构, 否则就叫斑状结构。对于常见的花岗岩来说, 它是一种全晶质、等粒结构; 而安山岩则是半晶质、细粒、斑状结构。

3. 岩浆岩的构造 在深成岩浆岩中, 矿物颗粒的排列严密而又缺少规律, 通常称为致密块状构造。而在一些喷出岩的表面上, 往往可以看到由于岩石中矿物的定向排列所构成的细微纹理 (流纹), 或者是由于熔岩在冷却过程中, 气体的逸散所造成的气孔, 分别称它们为流纹状构造 (如流纹岩) 和气孔状构造 (如玄武岩)。绝大部分浅成侵入岩是属于致密块状构造 (如花岗斑岩), 有时也可以看到流纹状构造和气孔状构造。

4. 岩浆岩的工程地质性质 如上所述, 深成岩浆岩是结晶岩, 矿物颗粒与颗粒之间是靠分子力连接的, 因之结合强度很高, 孔隙率极小, 透水性差, 抗冻性较高, 其抗风化能力随着矿物成分的变化而变化, 一般是深色矿物 (如角闪石、辉石、黑云母) 的含量愈多就愈易风化, 由浅色矿物组成的岩石中, 长石的含量高的 (如正长岩、二长岩) 易于风化。浅成岩浆岩多属结晶岩, 不过多呈细粒结晶结构或粗粒斑状结构, 前者的强度高、透水性小、抗风化能力较高; 后者稍次。在喷出岩中, 属致密块状构造的岩石, 物理力学性质良好; 如果是具有气孔状构造和流纹状构造的岩石, 物理力学性质则有显著的降低, 透水性增大。总之, 致密块状构造的岩浆岩, 工程地质性质较好, 可以看作为各向同性的介质。带有气孔状或流纹状构造的岩石工程地质性质较差, 通常视为各向异性介质。

(二) 沉积岩

这种岩石是由先成岩经受各种形式的侵蚀、搬运、沉积和硬结成岩过程而形成的一种新的岩石。

自然界中有两类沉积岩, 即碎屑沉积岩和化学沉积岩:

1. 碎屑沉积岩 它是由先成岩的岩石碎屑胶结而成的。例如, 砾岩就是由粒径大于 2 毫米的岩石碎屑胶结而成的岩石。通常是根据碎屑颗粒的大小来划分碎屑沉积岩的结构和确定岩石名称的。具体划分如下:

(1) 砾状结构 粒径大于 2 毫米, 如砾岩。

(2) 砂质结构 粒径变化范围为 2~0.05 毫米, 如砂岩。

(3) 粉砂质结构 粒径变化范围为 0.05~0.005 毫米, 如粉砂岩、页岩等。

(4) 泥质 (粘土) 结构 粒径小于 0.005 毫米, 如泥岩、粘土岩等。

碎屑岩的胶结物成分有硅质、铁质、钙质和泥质四种, 一般认为硅质胶结的岩石, 颗粒间的联结力强; 铁质和钙质胶结的岩石, 联结力稍次; 泥质胶结的岩石联结力最差。

2. 化学沉积岩和生物化学岩 它是自然界中水的化学作用和生物化学作用的产物。这

一类沉积岩常具有结晶粒状结构、隐晶结构、鲕状结构和生物碎屑结构等特征。最常见的化学岩有石灰岩、白云岩、石膏等。

沉积岩的构造最普遍的是层理。所谓层理就是指沉积岩中，由于岩石在成分或结构上的变化所表现出的层次迭置现象，所以也叫做层状构造。层理是一种原生的不连续的地质界面，它对于岩体的均匀性和完整性有显著的影响。此外，在沉积岩中有时还可以见到古生物化石、结核、雨痕和泥裂等现象，这也是只有沉积岩才具有的构造。

3. 沉积岩的工程地质性质 一般较岩浆岩为差。由于层状构造的存在使沉积岩的物理力学性质表现出明显的各向异性，在垂直层理方向和平行于层理方向上的性质大不相同。常见碎屑岩的力学性质在很大程度上取决于胶结物的成分和胶结方式。粘土岩的性质同粘性土有些相近，浸水后强度会大大降低。同时由于含有粘土矿物，它们常常会在压力和湿度变化时发生膨胀和崩解，这类岩石的透水性很低，通常被视作不透水层。化学岩是一种可被水溶解的岩石，由于被水溶蚀往往会使岩石中原有的裂隙加宽或造成孔洞，这一现象叫作岩溶。它对工程产生不良的影响。但是，应当指出，某些化学岩例如硅质石灰岩、白云质石灰岩本身的强度和抗溶蚀能力还是相当高的。

（三）变质岩

变质岩是先成岩受变质作用后生成的新岩石。变质作用是由地壳构造运动或岩浆活动所引起的。高温、高压或新的化学成分的加入，会使原来岩石的性状和成分发生深刻的变化。例如，花岗岩能够变成花岗片麻岩，粘土岩变成千枚岩和板岩等。

1. 变质岩的矿物成分 大多数矿物是岩浆岩中可见到的，如石英、云母、角闪石等。但是，有一些矿物如石榴子石、绿泥石、绢云母等则是变质作用的新产物。这些矿物常作为鉴别变质岩的标志性矿物。

2. 变质岩的结构 大部分是粒状和片状结晶，其中有的结晶是变质作用的结果，叫做变晶结构（如绿泥石片岩具有鳞片状变晶结构）；有的结晶则是先成岩本来就具有的，叫变余结构（如片麻状的变余花岗岩结构）。

3. 变质岩的构造 常见的变质岩构造有下列各种：

（1）片状构造 片状、柱状矿物相互平行排列，形成薄片状。沿片理方向易于裂开，如云母片岩、绿泥石片岩等。

（2）片麻状构造 粒状与柱状矿物相间，作定向排列，在岩石的横截面上，可以看见黑白相间的条带，如花岗片麻岩、角闪片麻岩等。

（3）板状构造 结构致密，呈平整的板状。板状平面可能是先成岩的层理面，也可能是由于区域性的构造变动造成的劈理面。如炭质板岩、硅质板岩等。

（4）块状构造 矿物颗粒的排列没有一定的方向，大多是杂乱无章的，如大理岩、白云岩等。

4. 变质岩的工程地质性质 变质岩的性质与它的生成方式和结构构造特点有密切关系。大多数变质岩具有牢固的结晶联结，结构较致密，强度较高，孔隙较少，透水性差。但是，当变质岩的片理构造发育或含有较多的云母、绿泥石等片状矿物时，矿物颗粒间的联结就会有明显的降低，而且表现出各向异性。此外，一些由动力变质作用造成的岩石，

内部多存在隐蔽的细微裂隙，这种裂隙对于变质岩的强度产生不良的影响。至于石英岩和大理岩等致密块状构造的岩石，可视作均质的各向同性体。

三、岩石的风化

直接暴露在地表或靠近地表的岩石，通常在温度和压力不大的条件下，由于气温的迅速变化、气体和水的作用，使得岩石的成分、结构和构造在不同程度上受到改造，这一作用就是岩石的风化。风化岩和未风化岩在物理力学性质上是有差别的，有些情况下未经风化的花岗岩和全风化的花岗岩的抗压强度，可以相差几倍甚至十几倍。

不同岩石的抗风化能力是各不相同的。岩石的抗风化能力主要取决于它的矿物组成和岩石结构。在最常见的造岩矿物中，抵抗风化的能力可排列成如下顺序：石英和白云母最稳定；正长石、方解石和白云石次稳定；角闪石、辉石较差；黑云母、斜长石、橄榄石和黄铁矿最差。各种胶结物的抗风化能力按如下顺序：硅质胶结最稳定；钙质和铁质胶结稍次；泥质胶结最差。从岩石的结构上来看，致密结构比疏松结构的稳定性高，细粒结构比

粗粒结构要好，等粒结构比不等粒结构要稳定。

表 1-1 按 K_f 值对岩石风化程度的分级

岩石风化程度	风 化 系 数 K_f	岩石强度降低比率 (%)
新 鲜 岩 石 (包括微风化)	0.90~1.00	0~10
弱 风 化	0.75~0.90	10~25
半 风 化	0.40~0.75	25~60
强 风 化	0.20~0.40	60~80
全 风 化	≤ 0.20	> 80

关于岩石风化程度的判别，目前国内外有许多人趋向于用岩石的物理力学性质指标的变化值，来作为划分岩石风化程度的依据。例如，国内一些水利水电部门，建议用岩石的风化系数 K_f 值进行岩石风化程度评定。 K_f 就是风化岩的单轴抗压强度与未风化岩的单轴抗压强度的比值。其分级标准如表1-1所列。

第二节 岩 体 地 质 构 造

岩体的地质构造是指，由于地壳的构造变动所造成的岩体的变形和变位的现象。岩体的地质构造有两种基本类型，褶皱构造和断裂构造。

在讨论具体的地质构造之前，首先应搞清地层的层序和接触关系的概念。层序是指岩层的生成顺序。在一般情况下，先沉积的地层位于下面，后沉积的地层盖在上面。一旦岩层受到后期构造变动的改造，有可能呈现层序上、下倒置的情况。关于层状岩层的接触关系，它能够反映出岩层在沉积过程中，有无沉积间断的问题。因而，就可以作为判别有无构造变动的标志。如果沉积过程是连续的，则上、下地层之间的接触关系是整合的；如果在沉积过程中，因受地壳的构造变动而一度中断沉积，则中断后沉积的地层与以前沉积的岩层呈不整合的接触关系。

一、褶皱构造

层状岩层在构造应力作用下发生的连续弯曲变形叫褶皱。褶皱有两种主要构造型式，即背斜和向斜。所谓背斜褶皱，就是指岩层一般向上弯曲，在核心部位是老的地层，自内

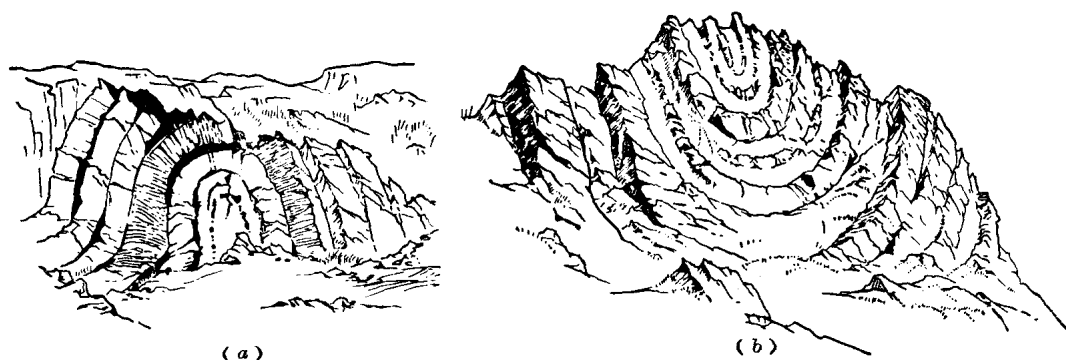


图 1-1 褶皱构造的类型
(a)背斜; (b)向斜

而外依次为比较新和新的地层,如图1-1(a)所示。向斜与背斜相反即岩层一般向下弯曲,核心是新的地层,两侧为老的地层。如图1-1(b)所示。褶皱构造各部分名称见图1-2所示。

背斜和向斜的几何形态是多种多样的,有尖脊的,也有圆顶的;有两翼岩层产状对称的,也有两翼岩层产状不对称的;有褶皱轴面是直立的,也有倾斜的甚至是平卧的(图1-3)。上述各种几何形态的产生,都是和地应力的作用方式、方向和持续时间有密切联系的。

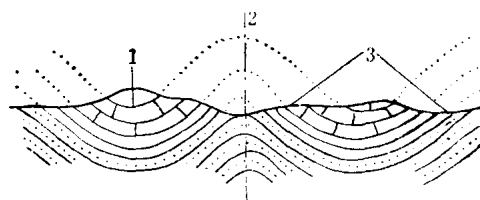


图 1-2 褶皱各部分名称
1—核部; 2—轴面; 3—翼部

应当指出,褶皱岩层的不同构造部位受力条件是不一样的。因而造成的岩体变形和破裂的性质也是不一样的。如图1-4所示,在岩层的最大弯曲部位,上层主要承受张拉,下层主要承受压缩。在层与层之间或同一层内与层理平行的方向上承受剪切。所以在褶皱岩层中可以观察到一系列小褶皱、张性裂隙和剪切裂隙等现象,它们的分布是有规律的。

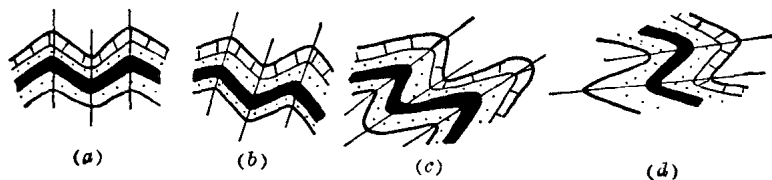


图 1-3 褶皱的几何形态
(a)直立; (b)倾斜; (c)倒转; (d)平卧

二、断裂构造

岩体受力作用后产生的破裂均可称作断裂。由于构造变动造成的断裂分布很广,而且对岩体的完整性影响最大。根据断裂的规模和断裂面两侧岩块之间位移量的大小,断裂构造可分为裂隙和断层两类,现分别叙述如下:

(一) 裂隙

就是指岩体中没有显著错开的断裂。也有人把成因相同、方向性明显、有一定组合规律的裂隙叫做节理。

1. 裂隙的种类 按照裂隙的成因可以分为张裂隙和剪裂隙两种，它们分别具有如下特征

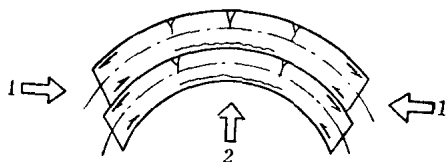


图 1-4 褶皱岩层各部分受力情况

1—挤压力；2—岩层向上弯曲

(1) 张裂隙 是由张(拉)应力引起的破裂面。裂隙面不平直，很粗糙或呈锯齿状；裂开宽度较大，但延长不远就变窄而消失。在砂岩和砾岩中，裂隙常绕过粗粒的砂砾而继续延长。在平面上看，张裂隙多是断断续续地错列或者是在破裂线的末端有分叉的现象。

(2) 剪裂隙 一般是岩石受剪应力作用产生的剪切破裂面，它都是成对出现，叫做共轭的‘X’节理。这种裂隙面平直光滑，当它在砂砾岩中发育时，能够切穿砾石而不致改变方向。裂隙一般是紧闭的或者是裂开宽度不大，但是疏密均匀。在剪裂隙的一侧或两侧，还会有许多小的张性裂隙或剪切裂隙，它们多半呈羽状排列。

按照裂隙的宽度可以分为晶体范围内的裂隙和岩体中的裂隙。属于晶体范围内的裂隙又可分为：细微裂隙，宽度小于1微米；细裂隙，宽度为0.1毫米~1微米；粗裂隙，宽度大于0.1毫米。属于岩体范围内的裂隙有：闭合裂隙，宽度小于0.2毫米；微张裂隙，宽度为0.2~1毫米；张开裂隙，宽度为1~5毫米；宽张裂隙，宽度大于5毫米。

2. 裂隙的研究方法 目前常常是把实测的关于裂隙的产状、间距、宽度和面积等资料，用数字或图表的方式加以表示，从而反映出裂隙的出现频率和裂隙间的组合关系，以此作为评价岩体质量的根据。

(1) 裂隙的统计密度

①裂隙频率(K): 是指岩体内单位长度直线上所穿过的裂隙条数(条/米)，用符号 K 表示。如果裂隙的平均间距用 $d = \frac{1}{K}$ 表示，则被裂隙系统切割而造成的最小单元体的体积，可以近似的看作立方体，并表示如下：

$$V_{ub} = d_a d_b d_c = \left(\frac{1}{K_a}\right) \times \left(\frac{1}{K_b}\right) \times \left(\frac{1}{K_c}\right)$$

式中 V_{ub} ——最小单元体的体积；

K_a 、 K_b 、 K_c ——分别代表三个不同产状的裂隙出现频率。

②裂隙度：有二向裂隙度和三向裂隙度两种，所谓二向裂隙度，就是岩体内一个平行于裂隙面的截面上，裂隙的面积与整个岩石的截面积的比值，用符号 K_2 表示(图1-5)。如用式子表示，即

$$K_2 = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots}{A} \quad (\text{米}^2/\text{米}^2)$$

式中 A ——总的岩石截面积；

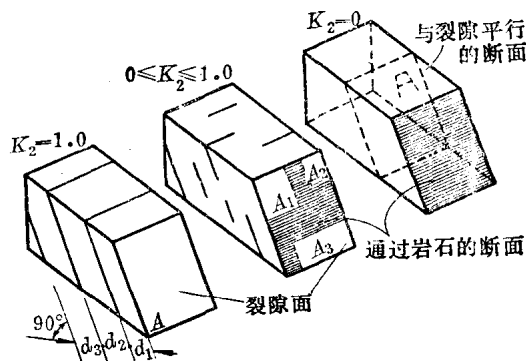


图 1-5 岩体的二向裂隙度

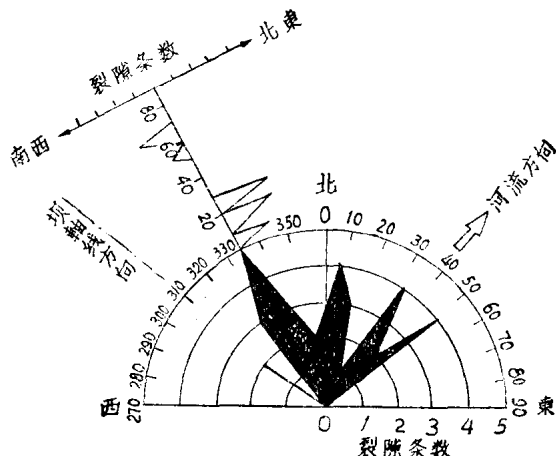


图 1-6 裂隙玫瑰图

$A_1, A_2, A_3, \dots$ ——分别表示裂隙的面积。

显然，当岩石截面上没有裂隙通过时，则 $K_2 = 0$ ；若岩石截面上布满裂隙面时，则 $K_2 = 1$ 。

三向裂隙度就是指某一组裂隙在岩体中所占据的总的裂隙面积与岩体的体积之比值，用 K_3 表示，即

$$K_3 = K K_2 \text{ (米}^2\text{/米}^3\text{)}$$

(2) 裂隙统计图 为了表示岩体内的裂隙情况，可以将测量得来的裂隙产状和频率，按照一定的作图方法进行整理、分析，目前统计作图的方法很多，这里仅介绍裂隙玫瑰图和极坐标裂隙统计图两种方法，其要点如下：

①裂隙玫瑰图：这种图的结构形式见图1-6。因为该图能够比较直观的反映出岩体在各个方向上裂隙出现的频率，所以在工程上它被广泛地采用。在半圆形的图中，线段的长度代表走向相近的裂隙面统计出的条数。因此，将各线段端点连结起来，就构成所谓玫瑰形。从图上可以看出，走向北西335°的一组裂隙最为发育，约有50条裂隙，其次是北东5、北东30和北东50三组裂隙，各有40条。为了反映第一组裂隙的倾向和倾角的大小，可以沿径向引出一条线段并分成九等分，用以表示倾斜角度。在引出线的端点作垂线，该垂线的方位表示倾向，线段长度表示条数。如图1-6左上方所示，倾向北东的三个锯齿状符号，分别表示倾角为5度（计有9条）、15度（有13条）和25度（有14条）。至于裂隙的开裂宽度、被充填情况和充填物的性质、裂隙与裂隙间的组合及交接方式等，在图上是无法反映的，只能通过文字说明或其它作图方法加以解决。

②极坐标裂隙统计图：在实际工作中，往往采用结晶学中常用的施密特极坐标网来表示裂隙的产状及分布规律。图1-7就是许多裂隙的极坐标投影图。它是把实测到的裂隙的倾向和倾角，投影在施密特坐标网上，网上的每一个点，即代表一个裂隙的产状。为了反映各种产状裂隙分布的疏密程度，可以用图右上方的面积去测量，得出图上某个范围内单位面积上分布的裂隙条数（即裂隙密度），将裂隙条数相等的点连接起来，就成了裂隙密度等值线图。从图上不难看出，裂隙在下列三个方向上最为发育，即

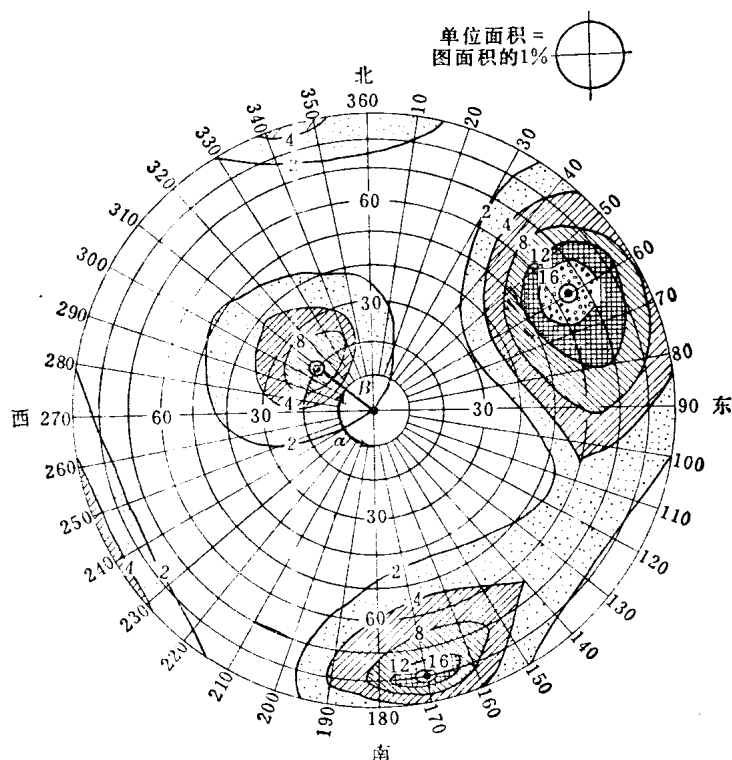


图 1-7 极坐标裂隙统计图

I—走向北西330°倾向北东倾角65°；

II—走向北东80°倾向南东倾角80°；

III—走向北东40°倾向南西倾角20°。

裂隙的极坐标投影图和裂隙玫瑰图一样，它只是表明裂隙在各个方向内出现的频率，却不能反映裂隙本身的性质和几组裂隙的组合关系。

(二) 断层

岩石受构造应力作用产生的断裂，当断裂面两侧的岩体有显著的相对位移时，这种断裂叫做断层。

1. 断层的结构要素 为了说明一个断层的性质、规模 and 空间分布的状况，常常应用一些断层结构要素的地质术语。图 1-8 上可以看出断层面就是岩体发生破裂并错动后的面，该面可以是平面也可以是曲面。断层面与地面的交线叫断层线。位于断层面两侧的岩体叫做断层的盘。在断层面上部的称为上盘，在断层面下部的称为下盘；在断层的上、下盘上，两个相当点位移的幅度叫做断距，如图中 $\overline{AA'}$ ，断距又可分为垂直断距（如 $\overline{EF}$ ）和水平断距（如 $\overline{FA'}$ ）。

2. 断层的主要类型 目前，国内常用划分断层类型的方法有两种，其中之一是根据断层两盘相对位移的方向来划分的，按该法可分为下列各类：