

中等专业学校教学用书

# 矿山岩体力学

冶金工业出版社

TD31  
11

中等专业学校教学用书

# 矿山岩体力学

包头钢铁学院 雷化南 主编

冶金工业出版社



**B** 017301

中等专业学校教学用书

**矿山岩体力学**

包头钢铁学院 雷化南 主编

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 15 3/4 字数 376 千字

1983年4月第一版 1983年4月第一次印刷

印数00,001~5,000册

统一书号: 15062·3972 定价1.30元

## 前 言

《矿山岩体力学》是根据冶金工业部中等专业学校金属矿床开采专业教学计划和矿山岩体力学教学大纲编写的。本书主要阐述矿山岩体力学方面的基本知识，它包括应力、应变与原岩应力、岩石和岩体的力学性质、井巷地压、采场地压、露天矿边坡稳定、地压观测与模拟方法等内容。本书兼顾了矿床露天开采和地下开采两个专业的需要，在文字叙述上力求作到深入浅出，通俗易懂，便于自学。本书不仅可以作为中等专业学校采矿专业的教材，而且也可作为具有中等以上文化程度的采矿科技人员的自学读本。

本书在编写过程中，除参考了一些有关的专著及文献外，还采纳了有关院校编写的教材的内容，以及许多单位或个人的技术资料。

在岩体力学中，目前国内外所使用的术语、符号以及单位都很不一致，在国家未作统一规定之前，编者力求得统一，对某些习惯用法则未强求统一，希读者予以注意。

本书由包头钢铁学院雷化南同志主编（第一、二、三、四、七章），马骏良同志参加编写（第五、六章）。全书初稿完成后，承昆明冶金工业学校陈中经同志审校并部分修改了第五章，并承北京钢铁学院陈新万同志和丁延棣同志、沈阳黄金专科学校季卫东同志分别审阅了全书各个章节，提出了许多宝贵意见，在此一并致谢。

由于编写时间仓促，编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

1982年5月

---

# 目 录

前言	
第一章 绪论	1
第一节 岩石和岩体的基本概念	1
第二节 矿山岩体力学的研究任务、内容和方法	2
第三节 岩体的地质构造	6
第四节 岩体结构	10
第五节 岩石和岩体的工程分类	15
第二章 应力、应变和原岩应力	21
第一节 岩体内一点的应力状态	25
第二节 单向应力状态的分析	30
第三节 二向应力状态的分析——应力圆	32
第四节 三向(空间)应力状态简介	41
第五节 应力应变关系	43
第六节 二向应变状态的分析	49
第七节 平面应变测量(应变花)及主应力计算	53
第八节 原岩应力	57
第三章 岩石及岩体的物理力学性质	65
第一节 岩石的物理性质与水理性质	65
第二节 岩石的变形特性	67
第三节 岩石的力学介质模型	75
第四节 岩石的强度特征及强度理论	77
第五节 岩石力学性质的室内试验	87
第六节 岩体的变形特征	95
第七节 岩体抗剪强度	100
第四章 井巷地压	108
第一节 地压的一般概念	108
第二节 平巷围岩应力分布	111
第三节 平巷地压	116
第四节 竖井地压	129
第五节 喷锚支护	135
第五章 采场地压	139
第一节 概述	139
第二节 采场地压假说	139
第三节 矩形断面开采空间围岩次生应力场	146
第四节 开采空间极限跨度计算	149
第五节 矿柱强度计算	155
第六节 充填体的力学作用及其计算	161
第七节 开采顺序与采场地压	165

第六章	地压观测与模拟方法 .....	169
第一节	地压现场调查 .....	169
第二节	围岩和支架压力测量 .....	172
第三节	声测法 .....	178
第四节	光测弹性法 .....	185
第五节	相似材料模拟 .....	192
第六节	应力解除法 .....	194
第七章	露天矿边坡稳定 .....	201
第一节	概述 .....	201
第二节	露天矿边坡破坏类型 .....	202
第三节	影响边坡稳定的主要因素 .....	204
第四节	边坡工程地质调查 .....	209
第五节	边坡稳定性的分析与计算 .....	213
第六节	滑坡防治 .....	232
第七节	滑坡监测 .....	241
参考文献	.....	246

---

# 第一章 绪 论

## 第一节 岩石和岩体的基本概念

岩石和岩体是岩体力学的直接研究对象。要学习和研究岩体力学，首先要建立岩石（岩块）和岩体的基本概念。什么是岩石？岩石是组成地壳的基本物质，它是由矿物或岩屑在地质作用下按一定的规律聚集而形成的自然体，例如我们通常所见到的花岗岩、石灰岩、片麻岩等。这些都是指一定成因类型的具有一定矿物成分及结构构造的岩石。岩石可由单种矿物所组成（例如纯洁的大理岩由方解石所组成），而多数的岩石则是由两种以上的矿物所组成，例如花岗岩主要由石英、长石、云母三种矿物所组成。按照成因，岩石可分为三大类：岩浆岩、沉积岩和变质岩。

岩浆岩是岩浆冷凝而形成的岩石。绝大多数的岩浆岩是由结晶矿物组成，由非结晶矿物组成的岩石是很少的。由于组成岩浆岩的各种矿物的化学成分和物理性质较为稳定，它们之间的联结是牢固的，因此岩浆岩通常具有较高的力学强度。

沉积岩是由母岩（岩浆岩、变质岩和早已形成的沉积岩）在地表经风化剥蚀而产生的物质，通过搬运，沉积和硬结成岩作用而形成的岩石。组成沉积岩的主要物质成分为颗粒和胶结物。颗粒包括各种不同形状及大小的岩屑及某些矿物。胶结物常见的成分为钙质、硅质、铁质及泥质等。沉积岩的物理力学特性不仅与矿物和岩屑的成分有关，而且与胶结物的性质有很大的关系。例如硅质、钙质胶结的沉积岩胶结强度较大，而泥质胶结的沉积岩和一些粘土岩强度就较小。另外，由于沉积环境的影响，沉积岩具有层理构造，这就使得沉积岩在不同方向表现出不同的力学性能。

变质岩是由岩浆岩、沉积岩甚至变质岩在地壳中受到高温高压及化学活性流体的影响下发生变质而形成的岩石。它在矿物成分、结构构造上具有变质过程中所产生的特征，也常常残留有原岩的某些特点。因此，它们的物理力学性能不仅与原岩的性质有关，而且与变质作用的性质及变质程度有关。

岩石的物理力学性能指标是在试验室内用一定规格的试件进行试验而测定的。这种岩石试件是由钻孔中获取的岩芯或是在工程范围内用爆破以及其他方法所获得的岩石碎块经加工而制成的。这种采集的标本或岩芯仅仅是自然地质体中间的岩石小块，一般称为岩块。因而，岩块就成了相应岩石的代表。我们平时所称的岩石，在一定程度上都是指的岩块，于是对这两个概念也就不严格加以区分了。因为岩块是不包含有显著弱面的较均质的岩石块体，所以，通常把它作为连续介质及均质体看待。

什么是岩体呢？我们所指的岩体是在一定工程范围内的自然地质体，它经历了漫长的自然历史过程，经受了各种地质作用，并在地应力的长期作用下，在其内部保留了各种永久变形的形象和各式各样的地质构造形迹，例如假整合、不整合、褶皱断层、层理、节理、劈理、微裂隙等，所以都把岩体称之为多裂隙体。由此可见，岩体是受到各种性质的弱面切割而形成的综合体。由于弱面的存在，岩体的强度要远低于岩石的强度。因而对于设置在岩体上或岩体中的各种工程所关心的岩体稳定问题来说，起决定作用的是岩体强

度，而不是岩石强度。例如，在以往的围岩压力研究中，曾有人错误地认为硐室的稳定是取决于围岩应力与岩石强度之间的矛盾，但许多工程实践表明，在某些岩石强度很高的围岩中，仍然会产生大规模的变形和破坏。分析其原因则是由于围岩的整体强度不够，即由于岩体中存在着弱面而造成的强度不足。由此使人们逐渐认识到，影响硐室稳定的矛盾，不是岩石强度与围岩应力之间的矛盾，而是岩体强度与围岩应力之间的矛盾。所以，岩体与岩石（岩块）是既有联系，又有区别的两个概念；岩块是没有包含显著弱面的岩石块体，是组成岩体的基本单元，而岩体则是指天然埋藏条件下，系由岩块组成的通常包含有一种以上弱面的复杂地质体。我们不仅要深入研究岩石的物理力学性能，而且要研究岩体的物理力学性能。

在国内，有的人把岩块称为结构体。在国外有许多学者把岩块称为岩石材料（the rock material）或完整岩石（intact rock）或单元岩块（unite rock block），还有少数学者把岩块称为岩石物质（rock substance）或岩样（rock specimen）。虽然名称很多，但不同学者对岩块所下的定义，基本上都是相近似的。

岩体（rock mass）总是包含有显著的弱面（planes of weakness），岩体的物理力学性能在大多数情况下，主要受这些弱面的控制。国内外，也有许多学者把这种弱面称之为结构面（structural plane）或不连续面（discontinuities or geological discontinuity）。

岩石和土，岩体和土体是有区别的。从岩体力学的观点来看，岩石是天然形成的、固结成固体的、具有强连结力的矿物集合体，而土则是未固结、无连接力或连接力微弱的矿物集合体。但是，岩石和土之间，在一定条件下又是可以相互转化的。土在一定的温度和压力下，经过压密脱水、胶结、重结晶等成岩作用，可以转变为岩石；而处于地表附近的岩石，经过风化作用，又可以转变为土。因此，在自然界的岩石和土之间，还存在着一系列过渡类型。岩体也不同于土体。构成土体的土粒，不仅尺寸小，而且土粒形状多以球形或类球形体为主，相邻颗粒之间的约束力很小，所以土体的运动具有较大的自由度。岩体则相反。构成岩体的岩块，不仅尺寸大，而且岩块多为不规则形状，相邻岩块接触部位各自的表面相互平行，且以直平面为主，所以岩块之间的约束力较大，岩体运动的自由度相对较低，特别是在岩块紧密接触或镶嵌在一起的时候，更是如此。此外，由于岩体中存在着软弱面，以及岩块的孔隙度甚小的缘故，致使岩体和土体在渗透性方面，产生了巨大的差别。同一种岩性岩体的渗透性，普遍存在着各向异性，而同一种岩性土体渗透性的方向性，则不大明显。同一种岩性岩体中裂隙水压力，往往具有各向异性效应，而土体的孔隙水压力，一般都是各向同性的。

## 第二节 矿山岩体力学的研究任务、内容和方法

### 一、矿山岩体力学的研究任务

矿山岩体力学是以采矿工程为主要服务领域和服务对象的岩体力学。岩体力学是力学的一个分支，它是专门研究岩体在各种力场作用下变形、破坏的理论及其实际应用的一门学科。这门学科带有边缘学科的性质，它既具有基础性研究的内容，又具有很强的实践性特点。岩体力学从其服务领域和对象来看，除了采矿工程以外，还有水利电力工程、道路工程、国防工程以及地质、地震等许多领域。

矿山岩体力学专门研究人类从事采矿活动所影响的那一部分地壳内与采掘工程有关的



力学现象及力学效应。研究的目的是任务，运用地质学和力学的观点、方法对具有一定结构的岩体在外力作用下产生变形和破坏的规律进行分析，并结合生产实践中控制矿山压力的经验，认识矿山压力现象的规律性，准确预测矿山工程结构周围岩体的稳定性和行为 (Behaviour)，从而采取措施消除危害，或利用它们为采掘工程服务，最终达到安全、经济、高效率采掘矿石的要求。从目前来看，矿山岩体力学所涉及的空间范围，在平面上为数公里乃至数十公里，也就是一个矿区的大小，在深度上为地表以下数千米，也就是矿床的开采深度；矿山岩体力学所涉及的时间为几十年乃至几百年，也就是一个矿区的服务年限。更大范围和更长时间的岩体力学问题应属于地质力学的研究范畴。

人类从事采矿活动已有几千年的历史，在采矿活动中人们摸索到许多有益的经验 and 规律，积累了大量的矿山岩体力学知识。采矿工程与矿山岩体力学关系密切。

大家知道，要开采矿石，就必然要在岩体中开挖井巷和采场，在露天矿形成边坡，总之，要在岩体中建设一些地下工程和露天矿场。岩体在未经开挖或采动以前，在原始的岩体应力场作用之下，处于一种相对的稳定状态，即通常所说的岩体的自然平衡状态。当岩体受到开挖或采动之后，由于在岩体内造成空区，使空区周围的岩体部分或全部失去支撑，即解除了空区周边岩体上的部分作用力，从而改变了岩体原始应力场的分布状态。岩体受到扰动后新出现的应力场称为次生应力场。岩体在新出现的不平衡的力场作用下，就要发生变形，甚至破坏和移动，直到新的平衡出现时为止。通常，我们把岩体由次生应力场引起的变形、破坏和移动的全过程称为矿山压力（简称地压）的显现，而把地压显现的某一阶段的具体结果称为地压现象。所谓地压，一般是泛指岩体中存在的力。地压的显现，从采矿工程开挖的开始就出现了，并且总是贯穿于开采的全过程，因此，地压的控制问题也必然贯穿于矿山生产的全过程。由此可见，只要采矿，就要开挖地下空区，从而就必然有地压现象。问题是当地压表现不够明显时，人们往往不予注意，等到大面积地压到来时又会感到很突然，措手不及，甚至造成对生产的重大危害。

规模较大的地压活动往往造成严重后果。不仅使矿石造成损失，而且还会造成井巷冒顶与错动，露天矿边坡滑移，矿山运输、通风、供电、供水等生产工艺系统破坏。某钨矿一次地压活动埋掉了价值近二百万元的生产设备，某铁矿一次滑坡滑落的岩石量达几十万米<sup>3</sup>，堵塞了运输咽喉地带，对生产带来了严重影响。地压活动还会对矿山工人的人身安全造成严重威胁，也能导致地表大面积下沉和变形，危害地表工业及民用建筑的安全。

由此不难看出，有效地克服地压灾害对于发展采矿工业的意义是何等重大。矿山岩体力学就是在与地压危害作斗争的过程中产生和发展起来的；同时，矿山实际生产中的许多问题也需要利用岩体力学的知识去解决。但遗憾的是，直到目前为止，在采矿工程中，一些人还程度不同地轻视或忽视岩体力学理论的指导作用，仅仅借助于凭经验而得的简单规律去处理问题。

事实证明，忽视正确的岩体力学原理的指导作用，凭借某些片面的、甚至错误的经验或理论行事，会导致严重的不良后果。如果应用现代岩体力学的理论和方法来处理 and 解决采矿工程问题，定会获得良好的经济和安全效果。湖南某矿山在七年中先后发生过三次大面积岩体破坏，致使295个采场冒落，四千多米巷道遭到不同程度的破坏，地表大面积下沉。只是由于矿山重视安全，事前有准备，才减少了损失，未发生人身事故。我国一些科研设计单位对某矿区的工程地质条件和岩体的原岩应力作了调查研究，经过分析，提出了

避开不良工程地质地段，从布局、结构型式和施工方法等几方面考虑工程设计，采用合理的断面型式和适当的支护类型等措施，使施工中的片帮冒顶、巷道变形以及矿仓破坏等现象得到限制和改善。有的单位把喷锚支护技术推广使用在大断面硐室支护，以及不良地质条件下的巷道支护和维修中，减少了巷道岩石开挖量，节省了大量木材和其它原料，施工管理简单，作业安全，加快了矿山建设速度。

因此，矿山工程技术人员学习并掌握现代岩体力学知识，是非常必要的。

正如前述，岩体力学不仅与采矿工程有关，而且与水利、交通、建筑、铁道、国防等工程都有关系。但是，应用于采矿工程的矿山岩体力学有它自己的特点：

(1) 大多数情况下，采矿是在一定深度下的岩体中进行，而其他部门的岩体工程大都处在距地表几十米范围之内。我国地下矿山一般都在地表以下三、四百米的范围内开采，而且已有一部份矿山进入深部开采（超过700米，乃至1000米以上的深度）。深部岩体的动态与地表附近相比大不相同。地表附近的岩体一般是脆性断裂破坏，而较深处通常则是粘塑性破坏。地表附近的原岩垂直应力与水平应力之差可能很显著，而在深处其差值则不甚明显。这些情况使得矿山岩体力学所采用的测试技术和计算方法都有其独特之处。

(2) 由于矿山地下结构物（如井巷、硐室等），只要求在开采期间不致破坏，以及在开采后能维持其平衡状态而不致影响地表安全即可，所以在计算精度、安全系数以及对岩体加固方面的要求，一般均低于水利、国防等方面的标准。

(3) 由于矿山工程地质条件复杂，又受矿床条件的限制，故采矿工程位置的选择性不大。而且，矿山一般施工速度快，工作面不断变化，经常使用凿岩爆破技术，这些都使得矿山岩体力学具有它自身的特点。

## 二、矿山岩体力学的研究内容

采矿生产实践中的许多重大问题，都应归属于矿山岩体力学的研究范畴，例如：

(1) 研究井巷围岩的应力及变形，确定是否需要支护和采用何种支护，以及解决特别困难条件下的井巷地压及支护问题。

(2) 研究合理的开采顺序、采矿方法及其构成要素，确定合理的矿柱尺寸和布置方案，选择合适的采场支护方法，使回采工作适应岩体应力的特征和规律。

(3) 研究采空区处理与大面积地压控制。

(4) 研究各种建筑物、河流水体、铁路公路下部的矿床开采问题，各种保安矿柱（竖井、平巷、地面建筑物的保安矿柱）的开采问题，以及与这些问题有关的地下开采所引起的地表移动和变形、岩体内部的移动和变形等问题。

(5) 研究地下开采引起的山坡滑坡、滚石危害、爆破震动以及环境破坏（如地下水位降低、田地倾斜等）等问题。

(6) 研究充填采矿法中各种充填体的作用和性能，以及胶结充填体的合理标号及合理尺寸。

(7) 研究露天矿边坡稳定问题，其中包括合理经济的边坡角的确定、边坡岩体移动的观测、边坡滑坡的预报以及危险边坡的加固等问题。

矿山生产实践中所提出的岩体力学问题是很多的，上面仅列举了其中的一部分。但是，要想圆满解决这些问题，又必须进行某些基本的岩体力学理论与技术的研究，譬如：

(1) 岩体的物理状态（裂隙性、风化性、透水性等）的研究；

- (2) 岩体结构分析及探测;
- (3) 静载荷下岩石变形规律及其机理的研究;
- (4) 岩石的强度理论及其机理的研究;
- (5) 岩体变形、破坏和移动规律, 以及岩体稳定性的研究;
- (6) 岩体中应力状态, 围岩与支架的相互作用的研究;
- (7) 岩体动态力学的研究与测试;
- (8) 地下水渗流与渗压, 以及它们对岩体稳定性影响的研究;
- (9) 高温高压下岩石特性研究;
- (10) 室内岩石试验技术、试验仪器及装置, 以及模型试验理论的研究;
- (11) 岩体加固的工程措施与处理技术的研究;
- (12) 岩体分类的研究;
- (13) 岩体力学作为地震、地质力学与地球物理基础的研究。

### 三、矿山岩体力学的研究方法

岩体力学的研究方法与一般应用科学的研究方法原则上没有什么不同, 但要成功地应用这些方法却困难得多。因为岩体力学研究具有某些特殊性, 比如:

- (1) 岩体是一种特殊的力学介质, 通常是非均质的和各向异性的;
- (2) 岩体的物理力学参数具有多变性和分散性, 不容易用公式表示, 且难于精确地确定;
- (3) 表征岩体的力学介质模型及理论都相当复杂, 涉及的数学问题也常常很难处理;
- (4) 岩体现场试验一般难于布置, 很费时间, 而且费用很高。

岩体力学的研究方法是实验观测和理论分析相结合, 并以前者为基础。岩体力学中的实验观测, 可以分为两类。一类是我们通常所说的岩石室内及现场试验工作。这一类试验的特点在于试验是在人们所控制的一定条件下进行的; 特别是室内试验, 有时为了突出某些因素的影响和作用, 甚至人为地排除那些次要因素。另一类是原型观测, 它与前者不同之处在于它的工作对象是原型实物, 因此工作条件要比前一类科学实验复杂得多。原型观测目前还开展得很不够。

岩体力学中实验观测的目的, 归纳起来有三个:

- (1) 确定岩石的物理力学参数;
- (2) 发展新的研究工具或新的实验技术;
- (3) 为岩体力学理论的形成和发展提供坚实的物质基础。

关于岩体力学的理论研究, 目前有两点要特别强调:

(1) 理论分析的研究必须进一步加强。因为目前岩体力学还较年青, 正处于从定性分析向定量计算转化的阶段, 许多问题现在还没有普遍性的理论, 只能凭实践中的具体经验去处理。例如, 在现场作岩体试验时, 多是在平硐中进行, 那末, 平硐的试验条件如开掘平硐的爆破作用、裂隙效应等对试验结果有何影响? 又如, 采矿中经常用到的“地压”理论, 有些概念不够明确, 加之理论本身还有某些错误, 给实际生产带来一些不良后果。解决这些问题都需要发展和加强理论研究。没有理论研究, 矿山生产中提出的许多实际问题就无法解决。

(2) 对岩体力学中已有的一些理论必须注意它们的适用范围。由于岩体是一种非常复杂的介质, 岩体力学中的每一种理论几乎都是对它作了一系列的假定为根据的, 这种假定就决定了该理论的适用范围。我们不能忽视这种假定的局限性, 而去滥用理论和推广结果, 否则将会导致工程事故或巨大的浪费。例如, 普氏塌落拱理论是以松散体理论为基础的, 它假设被裂隙切割的岩体是具有一定粘结力的散粒体, 并假设岩体的压力与地层厚度无关, 因此适用于岩体较破碎以及埋深较大的硐室(例如计算支架上的垂直压力)。但在过去相当长的时间内, 这种理论也被普氏及其他一些人推广应用于完整性较好的坚固岩层, 从而使计算结果有时过于保守, 有时又不安全。

此外, 我们在进行理论分析时, 绝不能机械地搬用材料力学、土力学以及弹塑性力学中的结论及公式, 一定要记住推导出这些结论及公式的假定条件, 看它们是否与岩体力学中的情况吻合, 否则将带来严重错误。

研究应用科学的一般程序同样也适用于岩体力学的研究:

(1) 对矿山发生的岩体力学现象进行长时间的观测, 并尽力去取得定量的观测结果。

(2) 提出一种概念、模型或理论去解释所观测到的现象。

(3) 通过室内和现场试验, 进一步检验、修正和发展这种理论。

(4) 再将这种修正和发展了的理论, 运用到类似的环境或条件有些变化的环境中去, 研究其实用性或有效性。

(5) 再通过适量的试验和观测, 以保证理论在实际应用中准确可靠, 或保证其误差在一定的允许范围内并可以计算。

(6) 必要时再通过深入研究修改理论和实践。

以上这个研究过程不断循环, 直至能够用数学公式表示更为普遍的客观规律和确实有效地解决实际问题。

### 第三节 岩体的地质构造

岩体地质构造是指由于地壳构造变动所造成的岩体的变形和变位现象。岩体地质构造有两种基本类型——褶皱和断裂。

在讨论具体的地质构造之前, 首先要搞清地层的层序和接触关系的概念。层序是指岩石的生成顺序。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运动的改造, 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, 因而就可以将它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, 则中断后沉积的岩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(图1-1)。背斜是岩层向上凸起的弯曲, 其中心部分的岩层较两侧的岩层时代老。通常背斜两侧岩层的倾向是相背的。向斜是岩层向下凹陷的弯曲, 其中心部分的岩层较两侧的岩层时代新。通常向斜两侧岩层的倾向是相向的。

褶皱具有下列几何要素 (图1-2):

核——褶皱的中心部分 ( $c$ )。

翼和翼角——翼是褶皱核部两侧的岩层 ( $Ae$ 及 $Af$ )，翼角是两翼岩层的倾角 ( $\alpha$ )。

轴面——是通过褶皱中心将褶皱大致平分的一个理想面 ( $abcd$ )。褶皱轴面是压性结构面，它与压应力相垂直。

轴——轴面与水平面的交线 ( $cd$ )。

脊线——褶曲顶点的连线 ( $AB$ )。

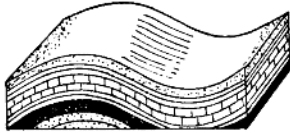


图 1-1 背斜及向斜

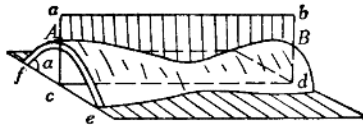


图 1-2 褶皱的几何要素

褶皱按轴面空间位置和翼的倾斜可以分为四个类型，如图1-3所示：

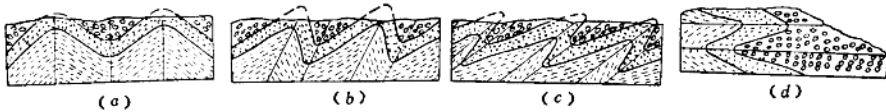


图 1-3 褶皱的四个类型

(a) 直立褶皱；(b) 斜歪褶皱；(c) 倒转褶皱；(d) 平卧褶皱

- (1) 直立褶皱：轴面直立，两翼倾角相等且向不同方向倾斜。
- (2) 斜歪褶皱：轴面倾斜，两翼倾角不等且向不同方向倾斜。
- (3) 倒转褶皱：轴面倾斜，一翼在另一翼上面，两翼的岩层向相同的方向倾斜。
- (4) 平卧褶皱：轴面呈水平或近于水平位置。

由此可见，褶皱的几何形态是多种多样的，它和地应力的作用方式、方向和持续时间有着密切的联系。

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。

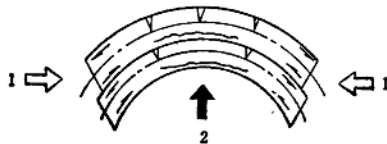


图 1-4 褶皱岩层各部分受力情况

1—挤压力；2—岩层向上弯曲

在褶皱的轴部地区，由于岩层遭受的构造变动较大，裂隙发育，如果地下工程沿褶皱轴线开挖，就有可能造成大量的岩石崩落，尤其是向斜轴部，由于裂隙间的岩块处于倒插状态，更容易出现这种情况。向斜构造有利于地下水的聚集，地下水往往较多，压力较高，如果矿山地下井巷沿向斜轴线开挖，还可能出现大量涌水事故。因此，地下坑硐不应设在褶皱（尤其是向斜）轴部地区。如果无法避开褶皱轴部，坑硐轴线应与褶皱轴线垂直或成大角度（不小于 $40^\circ$ 的锐角）相交。

## 二、断裂构造

岩体受力作用后产生的破裂和错动均可称作断裂。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。断裂构造有裂隙（节理）、劈理和断层，其中裂隙和断层比较重要。

1. 裂隙 裂隙就是指岩体中没有显著错动的断裂。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。

岩石中的裂隙不仅有疏密和长短大小之分，而且表面的形式是多样的。如有的平直延伸，有的弯曲转折，有的张开（开口），有的闭合，有的平整或有擦痕，有的粗糙不平或呈锯齿状等等。

裂隙可分为以下几类。

（1）按成因可把裂隙分为构造裂隙和非构造裂隙。构造裂隙是由构造运动产生的，如褶曲裂隙、断层裂隙等。这些裂隙多沿一定方向作有规则的分布，能穿越不同时代和不同性质的岩层。非构造裂隙包括岩浆冷凝及沉积岩形成时的原生节理，岩石风化形成的风化裂隙，滑坡、陷落产生的裂隙以及岩石因失去负荷而产生的卸荷裂隙等。这类裂隙常局限于某种岩石内，多无共同的方向，分布的范围不大，裂隙的延伸不长，深度也较浅。

（2）按形成时的应力不同，裂隙可分为张（力）裂隙和剪（力）裂隙。张裂隙大都延伸不远，多具有较大的裂口，裂隙面比较粗糙。剪（或扭）裂隙一般延伸长且稳定，多是闭合的，裂隙面平滑且有擦痕，它往往是两组呈“X”状分布，如果裂隙穿过砾岩，常切割砾石。

裂隙破坏了岩体的整体性，同时大气和水容易沿裂隙渗入而加速岩体的风化和破坏，因此，如果主要裂隙面的方向与边坡的倾斜方向一致且两者走向的夹角小于 $45^\circ$ 时，常会造成边坡的滑动或崩塌。

对于地下岩体工程，裂隙是影响坑硐稳定性的重要因素之一。裂隙发育，特别是不同方向的几个裂隙组的存在，对坑硐的稳定有很大的威胁，硐顶、硐壁的垮塌往往是这些裂隙组引起的；同时在这种情况下施工也非常困难。因此，选择硐址时应尽量避开裂隙发育的地段。

2. 劈理 劈理是岩石沿着一定方向、平行或大致平行的能劈开成薄板或薄片的构造。它是岩石受强烈构造变形而产生的密集的小型构造。劈理一般在变质岩中较发育，在受强烈构造变形地带的沉积岩或岩浆岩中也有分布。

按成因有以下三种类型：

（1）流劈理。流劈理是岩石在强烈构造应力作用下发生塑性流动，岩石中的板状、片状和长条状矿物沿垂直于压应力的方向平行排列而成。流劈理面为压性结构面。劈理面的间距较小，往往使岩石裂成板状的薄片，例如变质岩中板岩的板劈理和片岩的片理都属流

劈理。流劈理的发育情况常与岩石的性质有关，在泥质类的软弱岩石中要比砂岩类的强韧岩石中更发育。

(2) 破劈理。破劈理是岩石沿最大剪应力方向形成的一组密集的剪裂。破劈理面为扭性结构面，它与岩石中的矿物定向排列无关。劈理面的间距一般为几毫米到几厘米，如果间距超过几厘米，就应称剪裂隙。破劈理一般在脆性岩石中或在强韧岩石之间的软弱岩层中发育。

(3) 滑劈理。滑劈理是沿劈理面有微小（几毫米）的位移，在滑劈理面附近的矿物颗粒有平行于劈理面的定向排列。有人认为这种劈理是剪裂隙，也有人认为它是流劈理和破劈理的过渡类型。滑劈理多见于细粒层状泥岩中，一般都与褶曲轴面平行。

劈理能损害岩石的整体性，加速岩石的风化和破坏，特别是在变质岩地区，劈理常造成边坡的坍塌和滑动。在地下工程中，劈理容易造成坑硐岩体坍塌。因此，在变质岩区和强烈构造变动的地区，不应忽视劈理对岩体工程所造成的危害。

3. 断层 岩石受结构应力作用产生断裂，当其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。

断层有下列几何要素（图1-5）：

(1) 断层面。岩石发生相对位移的断裂面叫做断层面，通常它是不规则的面。由于岩石的相对移动，所以在断层面上岩石常有擦痕。

(2) 断层线。断层面与地面的交线叫做断层线。

(3) 上盘与下盘。断层面将岩石分成两个断块，当断层面是倾斜或水平时，位于断层面以上的断块称为上盘，位于断层面以下的断块称为下盘。

(4) 断层带。一般它是指介于两断层面之间的破碎带。

(5) 断距。断层上下盘沿断层面发生相对位移的实际距离称为总断距；在垂直方向上的相对位移称为垂直断距；在水平方向上的相对位移称为水平断距。

断层的主要类型有：

(1) 正断层。上盘相对下降或下盘相对上升的断层称为正断层（图1-6）。正断层主要是地壳受水平张应力和重力作用形成的，故属于张性断层。断层面的斜角一般较陡（ $>45^\circ$ ），断层线较平直。

(2) 逆断层。上盘相对上升或下盘相对下降的断层称为逆断层（1-7）。逆断层主要是岩层受水平挤压而压缩形成的，断层的两盘多闭合，故属于压性断层。根据断层面倾角的大小，逆断层可以分为：

1) 冲断层。断层面的倾角大于 $45^\circ$ 。

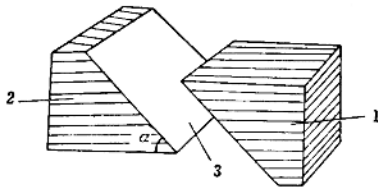


图 1-5 断层的几何要素  
1—上盘，2—下盘，3—断层面

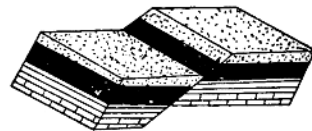


图 1-6 正断层

2) 逆掩断层。断层面倾角在 $45^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 之间, 往往是由倒转褶曲发展形成。

3) 辗转断层。断层面倾角小于 $25^{\circ}$ , 断层面呈波状弯曲, 断层规模巨大, 上盘推掩的距离也较大。

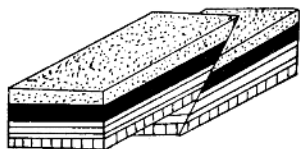


图1-7 逆断层

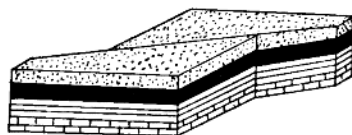


图 1-8 平移断层

(3) 平移断层(平推断层或平错断层或擦断层)。两盘产生相对水平位移的断层称为平移断层(图1-8)。平移断层主要是水平剪切运动(水平扭动)形成的, 故属于扭性断层。断层面的倾角近于直立, 断层面上常有近水平的擦痕。

断层对地下工程非常不利。它常造成以下不良地质条件:

(1) 断层是软弱结构面, 它使岩石零乱破碎, 裂隙增多, 岩石的整体性被破坏, 岩石的强度和承载能力显著降低。

(2) 断层陡壁的岩石多处于不稳定状态, 有崩塌、滑动的可能。

(3) 断层上、下盘的岩石性质不同, 如岩体工程跨越两盘, 可能产生不均匀沉降。

(4) 断层带是水的通道, 也可能形成自流水盆地。施工中遇到这种地下水, 会发生涌水事故。

(5) 在新构造运动强烈的地区, 有的断层可能发生移动(活动性断层), 其中有的断层还能引起强烈地震(发震断层)。

这些不良地质条件能严重地影响到岩体的稳定性, 因此, 在选择岩体工程场地时, 最好避开断层地带。

地下工程如穿越断层会出现坍塌和大量涌水事故。选择坑洞位置时应尽量避开断层, 尤其是应避开宽达数米或几十米的破碎带、断层交会带和断层密集的破碎带。如岩体工程实在无法避开断层带时, 一般应垂直通过断层带。

## 第四节 岩体结构

### 一、概述

岩体结构概念的产生, 缘起于对客观现象的解释和对岩体的认识过程。我们所研究的对象——岩体, 是有其内在的结构。岩体是由各种各样的岩石所组成, 后者不仅受了不同时期、不同规模和不同性质的构造运动的改造再改造, 同时还经受了外营力次生作用的表生演化。所以在岩体内存在着不同成因、不同特性的地质界面, 它包括物质分异面和不连续面, 如层面、片理、断层、节理等, 这些面如前所述, 统称为结构面。这一系列结构面依自己的产状, 彼此组合将岩体切割成形态不一、大小不等以及成分各异的岩块, 这些由结构面所包围的岩块统称为结构体。无论是从实际存在出发, 还是从形态来概括, 岩体就是由结构面、结构体两个基本单元所组成的。

所谓结构面实际上是地质发展历史中, 在岩体内形成的具有一定方向、一定规模、一



定形态和特性的面、缝、层、带状的地质界面。面是指岩块间刚性接触，无任何充填的劈理、节理、层面、片理等；缝是指有充填物，而且具有一定厚度的裂缝；层是指岩层中相对的软弱夹层，不仅是由不同物质所组成，而且明显存在上、下两个层面，当然其厚度亦是相对的；带是指具有一定厚度（有的称宽度）的构造破碎带、接触破碎带等。实际上所谓结构面并非几何学上的面，而往往是具有一定厚度的，或者说有上、下两个面所限制的且常含有充填物质的缝、层、带。但是，这个厚度与相邻的块的厚度相比是极小的，所以从客观整体来看可视为面。因此我们可以说岩体是由结构面及其所包围的结构体共同组成的。

由于各个地区岩体形成的历史不同，所经历的构造变动就有差异；即使在同一构造变动过程中由于所处的部位不同、组成物质成分的差异，其褶皱、断裂的发展也会不一致。或者说不同地区、不同地段岩体的生成、发展和演化的历史都有所差别。所以，结构面的特性和空间组合以及结构体的性质和形态不同，岩体的结构特性就迥然不同。这就需要对于岩体中两个基本组成单元及其排列组合做深入研究。

## 二、结构面的类型与自然特性

一般来说，结构面是影响岩体力学问题的一个控制性因素。但是，由于结构面发育的情况不同，它对不同岩体的具体影响，存在着显著的差别。例如，岩性完全一样的两个岩体，由于结构面的类型和自然特性不同，在相同的外力作用下，这两个岩体将会呈现完全不同的力学效应。由此可见，受力岩体中的结构面，在其变形、破坏过程中所起的作用大小，不仅与受力条件有关，而且在很大程度上取决于结构面的类型与自然特性，因为它们直接影响着岩体的物理力学性质。而结构面的自然特性与它的生成和发展过程密切相关。所以，要正确认识结构面的力学效应，首先要对结构面的成因及其自然特性进行研究。

1. 结构面的类型 岩体内的结构面由于成因不同，它对岩体稳定性的影响也不一样。按成因可分为：

(1) 沉积结构面。沉积结构面是沉积岩层在成岩过程中形成的结构面，如层理、不整合面、软弱夹层或古风化夹层等。

(2) 变质结构面。变质结构面是受变质作用而形成的结构面，如片理和各种片状岩石的夹层（滑石片岩、云母片岩、绿泥片岩等）。岩体中的片理对岩体强度起控制作用。

(3) 火成结构面。火成结构面是指岩浆侵入活动及冷凝过程中形成的原生结构面，如火成岩与围岩的接触面。当接触面因高温混熔而很致密时，对岩体稳定没有多大影响；当接触面很破碎时，则属软弱结构面。巷道处在岩脉与矿脉交界处容易出现地压就是证明。

(4) 次生结构面。岩体受卸荷、风化、地下水等次生作用所形成的结构面称为次生结构面。如卸荷裂隙、风化夹层、泥化夹层。所谓卸荷裂隙是指掘进和采矿过程中岩体临空面附近因构造应力释放及调整所形成的破裂。风化结构面易出现在地表露头，也往往因巷道围岩长期暴露而产生在围岩表层。

(5) 构造结构面。这是因受构造应力作用而在岩体中所产生的破裂面或破碎带，如断层、节理及层间错动等。构造结构面对岩体的稳定性影响很大。所以研究构造结构面尤其重要。

结构面的类型与特征列入表1-1中。