

GONGCHENG SHIYONG YANSHI LIXUE

工程实用岩石力学

张忠亭 景锋 杨和礼 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

工程实用岩石力学

张忠亭 景锋 杨和礼 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书介绍了岩石力学的基本理论及其在工程中的应用。全书共分 8 章, 分别阐述了岩石的物理力学特性、岩石力学的室内和现场测试技术, 以及岩体工程中有关的岩石力学问题及其解决方法。

本书供水利水电、矿山开采、铁路和公路交通、地下工程等涉及岩体工程方面的工程技术人员阅读, 也可作高等院校相关专业教材或作为相关专业教师和学生教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程实用岩石力学 / 张忠亭, 景锋, 杨和礼编著. —北京: 中国水利水电出版社, 2009
ISBN 978 - 7 - 5084 - 6272 - 1

I. 工… II. ①张…②景…③杨… III. 岩石力学 IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 016274 号

书 名	工程实用岩石力学
作 者	张忠亭 景锋 杨和礼 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 12.75 印张 302 千字
版 次	2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	38.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

岩石力学是一门发展迅速的学科，它涉及到固体力学、流体力学、工程地质学、数学和工程学等方面，广泛应用于水利水电工程、采矿工程、铁路和公路交通、地下工程等领域，由此形成了岩石力学发展的原动力。岩石力学也是一门实践性很强的学科，它的诞生与人们的实践活动有关，同时通过工程实践进一步丰富其研究的内容。岩石力学研究的目的，是利用它的原理和方法解决工程安全、岩体稳定、岩石变形等方面的问题。遵循这一想法我们编写了这本《工程实用岩石力学》。

本书共 8 章，第 1 章绪论，主要阐述了岩石及岩石力学的基本概念、岩石力学学科形成及其发展简况、工程建设与岩石力学的关系及岩石力学的研究内容和方法等；第 2 章～第 5 章介绍了岩石的物理力学性质及岩体初始应力，对岩石力学研究对象的物态认识是重要的一步。第 6 章介绍了岩体的工程分类及其应用，并以国内外最具广泛影响的几种岩体工程分类方法及其应用实例作了阐述和说明。第 7 章介绍了地下洞室、岩坡及岩基等工程中主要的岩石力学问题。第 8 章根据地下工程、岩坡工程和岩基工程各自特点分别介绍了一些适用的监测技术原理和方法，这是岩石力学研究所具有的特色之一，希望给予读者提供必要的知识。本书由武汉大学张忠亭教授、长江科学院景锋博士和武汉大学杨和礼教授编著。

由于作者水平有限，书中疏漏和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者

2009 年 1 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 岩石与岩石力学	1
第二节 岩石力学与工程建设	2
第三节 岩石力学研究的途径	3
第二章 岩石的物理性质	5
第一节 岩石的基本构成	5
第二节 岩石的不连续性、不均匀性和各向异性	9
第三节 岩石的物理性质指标	13
第三章 岩石的强度特性	24
第一节 概述	24
第二节 岩石的破坏机制及破坏类型	24
第三节 岩石的强度和室内强度试验	26
第四节 现场岩体强度试验	39
第五节 岩石的强度理论	48
第四章 岩石的变形特性	56
第一节 岩石变形特性室内试验研究	56
第二节 现场岩石变形试验	62
第三节 岩石的蠕变特性	72
第五章 岩体初始应力及其测量	82
第一节 概述	82
第二节 岩体初始应力的影响因素及初始应力分布规律	83
第三节 地应力测量	88
第四节 工程实例	99
第六章 岩石的工程分类及其应用	104
第一节 概述	104
第二节 岩块的工程分类	105
第三节 岩体的工程分类	109
第四节 工程实例	129

第七章 岩体工程与岩石力学问题	136
第一节 概述	136
第二节 地下洞室围岩稳定性	137
第三节 岩石边坡稳定性	158
第四节 岩基稳定性	167
第八章 岩石力学与工程的现场监测	177
第一节 概述	177
第二节 岩石地下工程的现场监测	177
第三节 岩坡稳定性监测	190
第四节 岩基稳定性现场监测	196
参考文献	198

第一章 绪 论

第一节 岩石与岩石力学

岩石力学是近代发展起来的一门新兴学科和交缘（边缘）学科，是一门应用性和实践性很强的应用基础学科。岩石力学不仅为工程建设服务，它也与地学领域如：地质力学、构造物理学、构造地质学、地震地质学等有密切的关系。它的应用范围涉及土木工程、水利水电工程、矿山、铁路公路、地质、地震、石油等众多和岩石力学与工程有关的领域，岩石力学研究岩石的基本物理力学性质和工程设计中与岩体有关的设计所需要的专门理论和方法。一方面，岩石力学是上述领域的理论基础；另一方面，正是这些领域的实践活动促使岩石力学的诞生和不断完善与发展。

1956年4月，在美国的科罗拉多矿业学院举行的岩石力学讨论会上，开始使用“岩石力学”这一名词。这次讨论会确定了这一学科的基本轮廓。本次讨论会论文集序言写道：它（岩石力学）是与过去作为一门学科发展起来的土壤力学，有着相似概念的一种学科，对这种有关岩石的力学方面的学科，现取名为岩石力学。美国地质协会岩石力学委员会对岩石力学作了如下定义：“岩石力学是研究岩石力学性态的一门理论和应用科学，是探讨岩石对其周围物理环境中力场反应的一门力学分支”。岩石力学是解决岩石工程（与岩石有关的工程）问题的理论基础。从这种意义上讲，通常将岩石力学具体定义为：岩石力学是研究岩石在荷载作用下的应力、变形和破坏规律及工程稳定性等问题的一门学科。它的定义指出了岩石作为一种天然材料与其赋存的地质环境、形成条件、存在历史、地壳运动及工程活动之间的联系。

岩石力学确立为一个专门学科而划出与之有着相似概念的“土力学”的领域，一个主要的理由是与土壤同为地质体的岩石的不连续性，在这方面对岩石力学有重大贡献的“奥地利学派”有较充分的阐述。

岩石是经过地质作用而天然形成的（一种或多种）矿物集合体，地壳的绝大部分都是由岩石构成。根据岩石的成因不同，可将岩石分成三类，即岩浆岩、沉积岩和变质岩。天然岩石既然是一种自然历史的产物，它就具有一定的自然特征，这些特征取决于其形成的方式和后来作用于其上的地质作用，同时它也一直处于运动变化过程中。所以形成天然岩石的基本特征，除了组成物质上的差异之外，最根本的还在于地壳岩石在其形成和存在的整个地质历史中，经受各种不均衡运动的结果。组成岩石的矿物成分，会对由该类矿物组成的岩石力学性质产生十分重要的影响。岩石的结构与构造，在力学上起着主要的甚至决定的作用。因此，在研究岩石的强度或工程岩体稳定性时，其着眼点除岩石的矿物成分外，更应注重的则是岩石的结构构造。

岩石这一术语，是工程界和地学领域包括岩石力学和工程地质学领域的一般用语。岩

石同时是岩石力学工作者和地质工作者的研究对象，只不过研究的内容和目的不同而已。岩石力学或工程地质工作者视岩石为工程建筑物的环境、基础和材料，因此，可以约定：把“岩石”作为一个泛指的名词，即作为地壳岩石的统称。它包括“岩块”和“岩体”。所谓“岩块”，是指脱离天然状态母岩的块体，如钻取的岩心、爆破得到的石块，人工凿取的石料等，而“岩体”是指一定范围的天然岩石（地壳岩石圈的自然状态）。就岩石的工程特性来说，其最明显的特征是岩石组构的颗粒及它的裂隙性。许多裂隙是肉眼可见的，而岩石的微裂隙常常发育于其组成颗粒之间，这些特征导致岩石试件在加载一开始就出现不可恢复的塑性变形，常伴有扩容和粒间摩擦，从而使经典固体力学如弹塑性理论在岩石力学中的应用存在一定局限性，这也是岩石力学有必要成为固体力学中独立分支的原因之一。

随着岩石力学理论研究和工程实践的不断深入和发展，人们发现，“岩石”并不能简单地看成一般固体力学中的一种“材料”，作为岩石力学研究对象的“岩石”，是一种天然地质体，它具有复杂的结构构造及生成历史与赋存条件，而且岩体中还存在地应力，而人类活动或工程建设使得以上问题更加复杂化。这些表明了“岩石力学”作为一门专门学科它有着丰富的内涵和重要意义。

第二节 岩石力学与工程建设

说岩石力学是一门应用性和实践性很强的学科，包含两方面的意思：一方面，岩石力学研究岩石的力学现象及其发生和发展的规律性，来为工程建设服务；另一方面工程实践活动所提出的问题，所积累起来的经验，反过来又不断丰富岩石力学研究内容并促进了岩石力学的发展。岩石力学与工程建设的密切关系，体现了它作为一门科学的特殊性。就岩石力学服务于工程建设而言，作为我们编写本书的主旨，我们把它的内容仅限于“工程实用岩石力学”这一范畴。

人类在生产实践中同岩石打交道已有悠久的历史，但岩石力学成了一门学科则是只到20世纪中叶的事情。20世纪中叶二战结束后，世界各国将注意力投向经济发展，各种工程大力兴建，比如水电开发、矿山开采、交通铁路建设等，特别是1959年法国马尔帕塞（Malpasset）坝坝基失稳导致整个拱坝冲毁；1963年9月意大利瓦依昂（Vajont）水库岸坡发生大规模滑坡等影响显著的工程岩体失稳问题，迫切要求人们有相应的理论去解释、去控制、去解决，这就形成了岩石力学的重要课题。再比如地下空间的开发利用，地下水电站，地下市政工程，城市地铁，越海隧道等地下工程的建设所提出的岩石力学问题，如古德曼（Goodman）在他的《岩石力学原理及其应用》一书开头所指出的，由于地下洞室一类的岩体结构有许多可能的破坏模式，其作用荷载往往比初应力重分布所引起的力还难于确定，而且材料“强度”的确定既要量测，也要判断。因而岩石力学在地下岩体工程建设中同样面临着一些紧迫的课题。

这里所说的岩体工程是在水利水电工程、采矿工程、土木建筑工程、石油工程及交通铁道工程等许多工程建设方面，都可能出现的地下开挖、岩质边坡、岩基工程等三大类岩体工程。在以下的工程中会涉及到一些与岩石力学有关的问题。

一、水利水电工程

- (1) 大型水工洞室，如水电站地下厂房等，设计施工运营。
- (2) 坝基岩体稳定；防渗加固。
- (3) 库岸边坡稳定性。
- (4) 高应力地区高水头下节理岩体渗流及岩石流变性。
- (5) 水库诱发地震。

二、公路和铁路交通工程

- (1) 线路边坡稳定性。
- (2) 隧洞工程设计施工及营运。
- (3) 高地应力区地下工程。
- (4) 水域环境中隧道工程的岩石力学问题。
- (5) 复杂地质条件下长大隧洞设计施工。

三、开采矿山工程

- (1) 矿山边坡的稳定性；露天矿边坡设计及加固。
- (2) 采空区处理及地面沉陷。
- (3) 采场稳定性及采场优化布局。
- (4) 矿区巷道围岩稳定及加固。
- (5) 岩石破碎。

四、其他工程

- (1) 石油工程。
- (2) 土木建筑工程中的岩溶地区建基。
- (3) 核电站及核废料处理。
- (4) 军事工程。

以上仅粗略提到某些工程实践中可能涉及的岩石力学问题，它既有利用现有岩石力学的理论原理和技术方法直接解决的问题，也有一些为岩石力学界提出的新课题，或者说它可能是岩石力学得到进一步充实所出现的新问题，因而作为岩石力学，所面临的任务是复杂而艰巨的。

第三节 岩石力学研究的途径

岩石力学是固体力学的分支，因而他有固体力学其他分支一样的研究内容和研究方法，但又由于他的研究对象——岩石的特殊性，因而岩石力学又有别于其他固体力学分支研究不同的内容和方法。

工程实用岩石力学，这里当然不全然讨论工程问题，但也不会离开工程而研究“纯力学”问题，何况岩石力学本身又是与工程的联系那么紧密呢？因此作者在这里的目的是将读者的兴趣吸引到工程实践为目的的岩石力学研究上来。

首先，岩石力学的基本原理，仍是本书的核心内容之一。它在岩石以受荷对象出现

时，它的基本力学性质，如应力、应变（变形）、强度和破坏等规律性的认识是极其必要的，在讨论这些的时候，是以工程实践为基础的，而不是“理论”的。也就是说，在岩石应力应变、强度特性和破坏规律的研究和分析中，是基于工程实践目的来实现的。

其二，考虑到岩石的地质特征的复杂性，而且加之岩体工程的多样性，使得岩体工程中所涉及的岩石力学问题的解决靠纯力学理论知识往往是难于行事的。因而试验的方法，现场监测的方法是岩石力学与工程中不可或缺的另一个核心内容。这些测试，既是为了研究岩石的力学特性，也是为了提供岩石力学的参数指标，同时也为检验理论分析研究结果的合理性，为工程安全问题提供某种保证。因此，岩石力学的发展历史中，岩石力学试验是自始至终起重要作用的。

工程岩石力学问题解决的一种重要手段，是 20 世纪 70 年代兴起而后得到迅速发展的数值计算方法在岩石力学中的应用，比如有限单元法、边界元法、离散元法、块体力学与反演分析法等，还有包括概率分析，可靠度分析神经网络法、灰色系统理论等。在这一方面，已在很多研究者的专著中有完整的论述，本书并未涉及。

第二章 岩石的物理性质

第一节 岩石的基本构成

岩石是一种自然历史的产物，是构成地壳（岩石圈）的基本材料。地球表层，即地壳是人类生存和活动的地方，是进行各种工程建设的场所。岩石这一术语是工程领域和地质学领域，包括岩石力学和工程地质学领域的一般用语，岩石同时是岩石力学工程者和地质工作者的研究对象。天然岩石既是一种自然历史的产物，同时也一直处于运动变化过程中，所以形成天然岩石的基本特性，除了组成物质的差异之外，最根本的还在于地壳岩石在其形成和存在的整个地质历史中，经受各种不均衡运动。岩石的基本构成是由组成岩石的物质成分和结构两个方面来决定的。

一、岩石的主要物质成分

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，它们绝大多数是结晶状，因此矿物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、橄榄石、白云石、高岭石、赤铁矿等。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成特征是区分岩石的重要标志之一，它们也决定了岩石的物理力学性质和抗风化的能力。

岩石中矿物成分的相对稳定性对于岩石抗风化能力有显著的影响，各种矿物的相对稳定性主要与其化学成分、结晶特征及形成条件有关。从化学元素活动性来看，Cl 和 SO_4 最易迁移，其次是 K, Na, Ca, Mg，再次是 SiO_2 ，最后是 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 ，至于低价铁则易氧化。

基性和超基性岩石主要是由易风化的橄榄石、辉石及基性斜长石组成，所以非常容易风化，酸性岩石主要由较难风化的石英、钾长石、酸性斜长石及少量暗色矿物（如黑云母）组成。故其抗风化能力比较起同样结构的基性岩更高，中性岩则居两者之间。变质岩的风化性状与岩浆岩类似。沉积岩主要由风化产物组成，大多数为原来岩石中较难风化的碎屑物或是在风化和沉积过程中新生成的化学沉积物。因此，它们在风化作用中的稳定性一般都较高，但是矿物成分并不是决定岩石风化性状的唯一因素，因为岩石的性状还取决于岩石的结构和构造特征，所以不能将矿物抗风化的稳定性与岩石的抗风化性等同起来。

通常可以将造岩矿物分为非常稳定的、稳定的、较稳定的和不稳定的四类，如表2-1所示。

表 2-1

主要造岩矿物抗风化相对稳定性

抗风化 稳定性	非常稳定的			稳定的		较稳定的				不稳定的			
矿物 名称	石英	锆长石	白云母	正长石	钠长石	酸性 斜长石	角闪石	辉石	黑云母	基性 斜长石	霞石	橄榄石	贵铁矿

新鲜岩石的力学性质主要取决于岩石的矿物成分和颗粒间的连接,对于具有结晶连接的岩石,其矿物成分的影响要大一些。应当指出,岩石中矿物的硬度和岩石的强度是两个既有联系而又不同的概念。例如,即使组成岩石的矿物都是坚硬的,岩石的强度也不见得一定是高的,因为矿物之间的连接可能是弱的,但就大部分岩石来说,两者之间还是有相应关系的。如在许多岩浆岩中,其强度常随暗色矿物(辉石,特别是橄榄石)的增加而增加。在沉积岩中,砂岩的强度常随石英的相对含量的增加而增大,石灰岩的强度常随硅质混合物含量的增加而增大,随粘土质含量的增大而降低。在变质岩中任何片状的硅酸盐类矿物如云母、绿泥石、滑石、蛇纹石等将使岩石强度降低,特别是当这些矿物呈平行排列时。

岩石中某些易溶物如粘土矿物、特殊矿物的存在,常使岩石物理力学性质复杂化,一些易溶矿物,如石膏、芒硝、岩盐、钾盐等在水的作用下易被溶蚀,从而使岩石的孔隙度加大、结构变松、强度降低。一些含芒硝的岩石,由于芒硝的物态变化(液态变固态,不含结晶水变含结晶水)能引起体积变化,因此在温度由 32.5°C 以上变成 32.5°C 以下时,或由干燥变渐湿时,会导致芒硝由液态变固态,由无水变含水,体积增大,引起岩石膨胀。含石膏的岩石,也由于石膏(CaSO_4)转变为水化石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)时体积增大而发生膨胀。

另外,粘土岩中的蒙脱石遇水膨胀且强度降低,凝灰岩中一些不稳定的物质极易分解成斑脱土,遇水也易膨胀和软化,还有某些玻璃质和次生矿物,如沸石等能促进岩石与碱之间的化学反应。

二、岩石的结构构造

岩石是在一定的地质环境中生成并存在的,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连接的方式等,岩石的构造则是指岩石的外貌特征,是指岩石中的矿物在空间中的排列、配置和充填方式所形成的特征。岩石的结构和构造特征能够反映岩石生成时的地质环境,岩石的物理力学性质与岩石的结构和构造关系密切。

1. 结晶连接

岩石中矿物颗粒通过结晶相互嵌合在一起。如岩浆岩,大部分变质岩及部分沉积岩的结构连接。通过连接使晶体颗粒之间紧密接触,故岩石强度一般较大,但随结构的不同而有一定差异,如岩浆岩和变质岩中等粒结晶结构一般比非等粒结晶结构的强度大,抗风化能力强。在等粒结构中,细粒结晶结构比粗粒结晶的强度高。在斑状结构中,细粒基质比玻璃质基质的强度高。总之,晶粒愈细、愈均匀、玻璃质愈少,则强度愈高,粗粒斑晶的酸性深层岩强度最低,细粒微晶而无玻璃质的基性喷出岩强度最高。如粗粒花岗岩抗压强

度一般只有 120MPa，而同一成分的细粒花岗岩则可达 260MPa。

具有结晶连接的一些变质岩，如石英岩、大理岩等情况与岩浆岩类似。

沉积岩中的化学沉积岩是以可溶的结晶连接为主，连接强度较大，一般以等粒细晶的岩石强度最高。如成分均一的致密细粒石灰岩其抗压强度可达 260MPa，但这种连接的缺点是抗水性差，能不同程度地溶于水中，对岩石的可溶性有一定的影响。

因粘土岩的连接有一部分是再结晶的结晶连接，其强度比其他坚硬岩石的要差得多。

2. 胶结连接

胶结连接是指颗粒与颗粒之间通过胶结物胶结在一起的连接，如沉积碎屑岩、部分粘土岩的结构连接，对于这种连接的岩石，其强度常常主要取决于胶结物及胶结类型。从胶结结构来看，硅质、铁质胶结的岩石强度较高，钙质胶结次之，而泥质胶结的强度最低。从胶结类型来看，有三种胶结类型，如图 2-1 所示：①基质胶结，颗粒彼此不直接接触，完全受胶结物包围，岩石强度基本取决于胶结物的性质；②接触胶结，只有颗粒接触处才有胶结物胶结，胶结一般不牢固，故岩石强度低，透水性较强；③孔隙胶结，碎屑颗粒紧密接触，胶结物充填于粒间孔隙中，这种胶结方式通常较牢固，岩石强度和透水性主要视胶结物性质和充填程度而定。

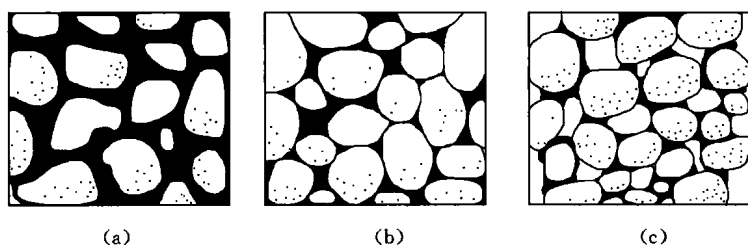


图 2-1 岩石颗粒的胶结连结类型
(a) 基质胶结；(b) 孔隙胶结；(c) 接触胶结

3. 岩石中的微结构面

岩石中的微结构面（或称缺陷），是指存在于矿物颗粒内部或矿物颗粒及矿物集合体之间微小的弱面及空隙，它包括矿物的解理、晶格缺陷、晶粒边界、粒间空隙、微裂隙等。岩石中的微结构面一般是很小的，通常需要在显微镜下观察才能见到，但是它们对岩石工程性质的影响却是很大的。

首先，微观结构面的存在将大大降低岩石（特别是脆性岩石）的强度，许多学者如霍克（Hock）、布雷斯（Brace）、沃尔什（Walsh）等，用试验论证了这一观点。根据格里菲斯（Griffith）强度理论的主要论点是：由于岩石中这些缺陷的存在，当其受力时，在微孔隙或微裂隙（缺陷）末端，易造成应力集中，使裂隙可能沿末端继续扩张，导致岩石在比完全无缺陷时所能承受的拉应力或压应力低得多的应力的作用下破坏。

其次，由于微结构面在岩石中常具有方向性，如节理等。因此它们的存在常导致岩石的各向异性。此外，缺陷能增大岩石的变形，在循环加荷时引起滞后现象，还能改变岩石的弹性波速、改变岩石的电阻率和热传导率等。但应指出，缺陷对岩石的影响在低围压时是明显的，而在岩石受高围压时，缺陷的影响相对减弱，这是因为在高围压下岩石微裂隙

等缺陷被压密闭合之故。

三、岩石的地质成因分类

自然界中有各种各样的岩石，不同的岩石具有不同的地质特征和工程特性。根据地质成因不同，可以把岩石分为三类，即岩浆岩、沉积岩和变质岩。

1. 岩浆岩

岩浆岩就是由熔融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称为侵入岩，侵入岩按其生成部位的深浅又可分为深层侵入岩和浅层侵入岩。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称为喷出岩。

岩浆岩中的矿物成分是由岩浆中的化学成分决定的，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（ $\text{SiO}_2 = 65\% \sim 52\%$ ），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（ $\text{SiO}_2 = 52\% \sim 45\%$ ），其中以斜长石、辉石一类矿物占多数，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。

大多数岩浆岩具有结晶结构和半结晶结构，只是一些喷出岩和火山碎屑岩才具有非晶质结构（分别呈玻璃质结构和碎屑状结构），结晶颗粒有大有小。当岩石中同类矿物颗粒大小相近时等为等粒结构，否则叫斑状结构。对于常见花岗岩来说，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。在深层岩浆岩中，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，分别称为它们流纹状构造（如流纹岩）和气孔状构造（如玄武岩）。绝大部分浅层侵入岩是属于致密块状构造（如花岗斑岩），有时也可看到流纹状构造和气孔状构造。

2. 沉积岩

沉积岩是在地壳表层常温常压条件下，由风化物、有机质和某些火山作用产生的物质，经搬运沉积和成岩等一系列地质作用而形成的层状岩石，自然界中有两类沉积岩，即碎屑沉积岩和化学沉积岩。沉积岩广泛分布于地表，占陆地面积的75%，组成沉积岩的常见矿物仅有20多种，按成因可分为：①碎屑矿物，也称原生矿物，是原岩风化破碎后残存下来的矿物，如石英、长石、白云母等一些耐磨损而抗风化性较强和较稳定的矿物；②粘土矿物，是原岩经风化分解后生成的次生矿物，如高岭石、蒙脱石、水云母等；③化学沉积矿物，如方解石、白云石、石膏、岩盐、铁和锰的氧化物或氢氧化物等；④有机质或生物残骸，是由生物残骸或经有机化学变化而形成的矿物，如贝壳、硅藻土、泥炭、石油等。在以上矿物中，石英、长石及白云母是岩浆岩中常见矿物，其他矿物则是地表条件下形成的特有矿物。岩浆岩中的橄榄石、辉石、角闪石、黑云母等暗色矿物由于易于风化，所以在沉积岩中极少见到。

沉积岩的结构主要有三种：①碎屑结构，即碎屑物质被胶结物粘结起来而形成的一种结构。根据碎屑物质粒径大小可分为砾状结构、砂质结构、粉砂质结构等，其胶结物常见有：硅质、铁质、钙质、泥质、石膏质等。碎屑结构胶结类型有基底胶结、孔

隙胶结和接触胶结三种，如图 2-1 所示；②泥质结构，几乎全部由粒径小于 0.005mm 的粘土颗粒组成，这种结构是粘土岩的主要特征，主要由粘土矿物组成，此外还有石英等；③结晶结构，是由岩石中的颗粒在水溶液中结晶（如方解石、白云石等）或呈胶体形态凝结沉淀（如燧石）而成的，可分为鲕状、结核状、纤维状、致密块状和晶粒结构等。

层理是沉积岩最重要的一种构造特征，它是沉积岩形成过程中由于沉积环境的改变所引起的沉积物的成分、颗粒大小形状或颜色在垂直方向上发生变化而形成的现象，层面构造则是沉积岩的另一种特征，它是岩层层面上的由于水流、风、生物活动作用留下的痕迹，此外还有结核、构造、生物成因构造等。

3. 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流动所引起的。高温高压或新的化学成分的加入，会使原来的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。

变质岩的矿物成分大多数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。

变质岩的结构，主要是粒状和片状结晶，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身就具有的，叫做变余结构（如片麻状的变余花岗结构）。

常见变质岩的构造有：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，粒状与片状矿物相间，作定向排列，在岩石横断面上，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运动造成的劈理面，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。

变质岩形成的地质环境，大多是地壳最活跃的部位，这使得变质岩类岩石组合特别复杂，岩石种类繁多。变质岩的性质与变质作用的特点及原岩性质有关，其力学性质差别很大，大多数常见变质岩都经过重结晶作用，具有一定的结晶连接，其结构一般较紧密、抗水性较强、孔隙较小、透水性较弱、强度较高，但也有相反的情况，如变质岩中的片理及片麻理，往往使岩石的连接减弱，力学性质呈各向异性、强度降低，另外某些矿物成分的影响也使得变质岩容易风化。

第二节 岩石的不连续性、不均匀性和各向异性

在大多数场合，固体力学研究对象都是连续、均匀和各向同性的材料。但是，岩石是一种自然历史的产物，在漫长的地质历史中，它经历过多次反复的地质作用，形成了自然状况极为复杂的岩石结构构造，使得岩石具有不连续性、不均匀性和各向异性的特征，同时也使得岩石力学的课题较之其他力学分支具有特别的复杂性。

一、岩石的不连续性

岩石的不连续性决定于岩石的地质结构、构造特征。

岩石中存在各种地质界面，它包括物质分异面和不连续面。它们实际上是地质历史上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、层和带的地质界面，如断层面、节理面、层理面等，这些不同成因、不同特性的地质界面，包括物质分异面和物质不连续面，统称为结构面。岩石中的结构面破坏了岩体的完整性，使得岩石的矿物分布及其物理力学性质上都具有不连续性特征，如图 2-2 所示。

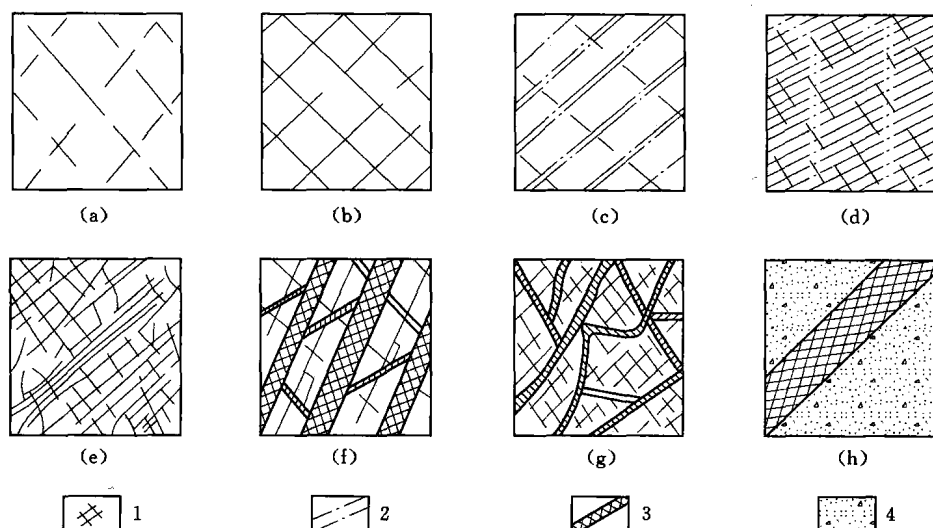


图 2-2 岩体结构型式示意图

(a) 整体结构；(b) 块状结构；(c) 层状结构；(d) 薄层状结构；(e) 镶嵌结构；(f) 层状破碎结构；(g) 碎裂结构；(h) 散粒结构
1—节理；2—层面；3—断层；4—断层破碎带

1. 结构面的成因类型

按照地质成因的不同，可将结构面划分为以下几类：

(1) 原生结构面。在成岩过程中所形成的结构面，如沉积结构面（物质分异面）、火成结构面及变质结构面等。

(2) 构造结构面。岩体受地壳运动的作用所形成的结构面，如断层、节理、劈理等。

(3) 次生结构面。岩体在外营力（如风化、卸荷、应力变化）等作用下而形成的结构面，它的发育多呈无序状、不平整、不连续的状态。

2. 结构面的空间分布

结构面在空间的分布主要是指结构面的产状及其变化、结构面的延展性、结构面密集的程度、结构面空间组合关系等。

(1) 结构面的产状及其变化是指结构面的走向与倾斜及其变化。

(2) 结构面的延展性是指结构面在某一方向上的连续性或结构面连续段长短的程度，它可分为非贯通的、半贯通的及贯通的。结构面延展性常用切割度 X_c 来表示。假设有一

平直的断面，它与考虑的结构面重叠而且完全地横贯所考虑的岩体，令其面积为 A ，如图 2-3 所示，则它与结构面的面积 a 之间的比率，即为切割度：

$$X_e = \frac{a}{A} \tag{2-1}$$

若在同一切割面上出现结构面的面积为 $a_1、a_2、a_3$ ，则：

$$X_e = \frac{a_1 + a_2 + a_3}{A} = \frac{\sum a_i}{A} \tag{2-2}$$

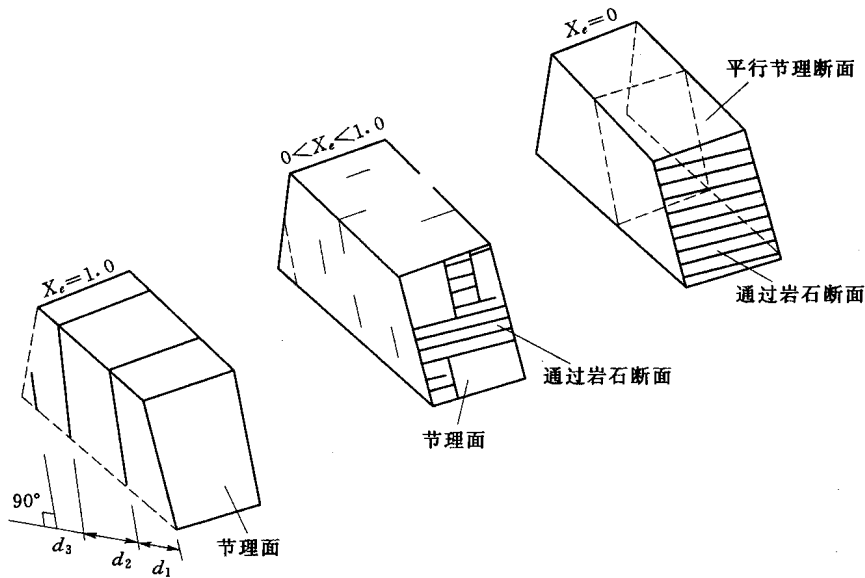


图 2-3 岩石结构面的二维分布

按切割度的大小，可将岩体分类，如表 2-2 所示。

表 2-2 岩体按切割度 X_e 分类

名 称	X_e (%)	名 称	X_e (%)
完整的	10~20	强节理化	60~80
弱节理化	20~40	完全节理化	80~100
中等节理化	40~60		

3. 结构面的密度

结构面的密度，是指岩体中结构面发育的程度，它可以用结构面的线密度、间距或体密度表示。

(1) 结构面的线密度 k 。结构面的线密度 k 是指同一组结构面沿着法线方向，单位长度上结构面的数目，如以 l 代表在法线量测的长度， n 为在长度 l 内出现的结构面数目，则：

$$k = \frac{n}{l} \tag{2-3}$$

实际测定结构面的线密度时，测线长度可在 20~50m 之间。如果岩体上有几组结构