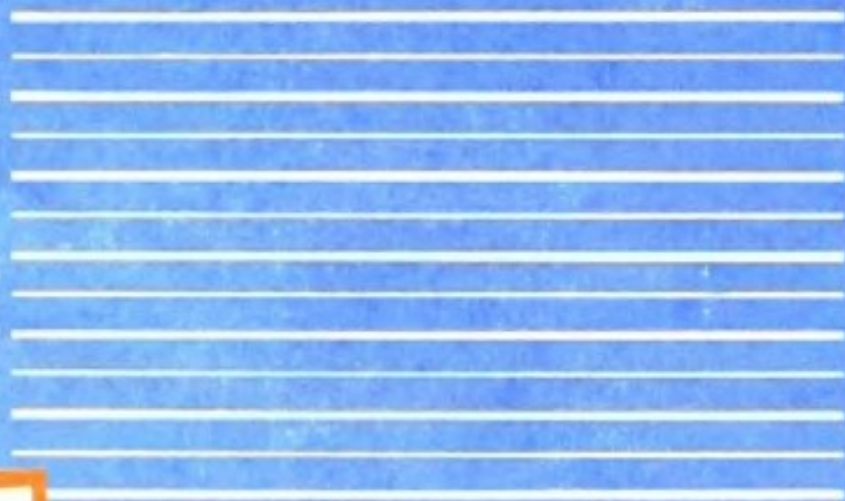


• 高等学校教学用书 •

矿山岩体力学

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

TD31
18
3

高等学校教学用书

矿山岩体力学

东北工学院 郑永学 主编

157x08/21

冶金工业出版社

521285



B

高等学校教学用书

矿山岩体力学

东北工学院 郑永学 主编

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街美术馆北巷39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 19 字数 449 千字

1988年10月第一版 1988年10月第一次印刷

印数00,001~2,400册

ISBN 7-5024-0299-3

TD·51 (课) 定价3.75元

前 言

本书是根据1982年冶金高等学校教材编写、出版规划，在东北工学院使用的讲义基础上编写的。在编写过程中考虑到各学校教学时数及课程设置的不同，着重于基本理论的阐述，同时也注意介绍应用基本理论解决生产问题的应用部分。本书尽力做到理论联系实际，反映近年来国内外取得的新成果。

书中采用的很多图表资料数值，均系接近似值由公制单位换算成国际单位的，故有一定误差。

尽管本书做为讲义用过多次，但由于编者水平所限难免存在错误或不妥之处，望读者指正。

编写过程中原东北工学院岩石力学教研室主任张家连教授给予了很大支持，修改过程中教研室讲授矿山岩体力学课的老师提供了资料和宝贵意见，在此表示衷心感谢！

编写分工如下：

郑永学编写第一、二、三、五、十、十一章；

林韵梅编写第七、八、九、十二、十三章；

卢世宗编写第四、六章。

全书最后由郑永学统一审定。

编 者

1988年元旦

目 录

前 言	I
绪 论	1
第一章 岩石的力学性质	4
第一节 岩石的成分及结构与其力学性质的关系	4
第二节 影响岩石力学性质的物理特性	6
第三节 岩石的变形特征	10
第四节 岩石的流变性	17
第五节 岩石各种强度测定	24
第二章 岩石破坏机制及强度理论	32
第一节 岩石破坏机制	32
第二节 岩石拉伸破坏的强度条件	34
第三节 岩石剪切破坏的强度条件	39
第四节 强度理论评述	45
第三章 岩体结构及岩体力学性质	47
第一节 岩石、岩体与岩体结构	47
第二节 结构面类型	48
第三节 结构面的连续性及密度	51
第四节 岩体结构分类	52
第五节 岩体变形特征	55
第六节 岩体强度测定	57
第七节 结构面力学性质	60
第八节 重剪切破坏条件	66
第四章 赤平极射投影	69
第一节 赤平极射投影原理及投影网	69
第二节 赤平投影的读图和基本作图方法	75
第三节 用赤平投影方法确定优势结构面	79
第五章 岩体中初始应力场	82
第一节 初始应力场概念	82
第二节 岩体自重应力场	83
第三节 构造应力场	85
第四节 岩体初始应力	89
第五节 初始应力场分布状态	90
第六章 露天矿边坡	94
第一节 概述	94
第二节 影响露天矿边坡稳定的主要因素和边坡破坏形式	95
第三节 边坡稳定性分析和计算	100
第四节 露天矿边坡的治理	116

第七章 巷道地压	118
第一节 与地压有关的概念	118
第二节 巷道地压显现的基本原理	119
第三节 巷道周围的应力场	120
第四节 巷道围岩的弹性位移	128
第五节 塑性区的应力与位移	130
第六节 巷道围岩稳定性的判断	138
第七节 破坏区的应力与位移	144
第八节 弹粘性围岩的应力与位移	148
第九节 围岩与支架的力学模型	151
第十节 变形地压的计算	155
第十一节 松脱地压的计算	158
第八章 竖井地压	169
第一节 应力分析与稳定性判别	169
第二节 表土地压类型及其成因分析	171
第三节 散体地压的计算	173
第四节 变形地压的计算	180
第五节 动土(水)压力	183
第六节 基岩地压的特点	183
第七节 井巷维护原则	185
第九章 喷锚支护	188
第一节 喷射混凝土支护计算	188
第二节 锚杆支护计算	191
第三节 喷锚支护(喷锚网联合支护)计算	198
第十章 采场地压及其控制	203
第一节 采场地压活动机制	203
第二节 开采水平矿床时地压活动	205
第三节 倾斜、急倾斜矿体开采的地压活动	211
第四节 崩落采矿法地压活动	215
第五节 充填体与围岩的相互作用	225
第六节 影响地压活动因素的分析	230
第七节 矿床开采顺序对次生应力场影响	231
第八节 采场顶板跨度极限尺寸的确定	233
第九节 矿柱尺寸计算	235
第十节 间柱尺寸计算	239
第十一节 地压控制方法	241
第十二节 岩爆及其预防	243
第十一章 地压活动监测	251
第一节 地压活动规律	251
第二节 岩体变形的监测	251
第三节 岩体中初始应力测定	256
第四节 恢复应变测量及应力计算	257

第五节	钻孔孔底上的应力和围岩内应力的关系	259
第六节	利用深孔应力解除法的应力计算	259
第七节	围岩、矿柱和支架的压力测定	261
第十二章	物理模型	264
第一节	相似第一定律	264
第二节	相似第二定律 (Π 定律)	269
第三节	相似第三定律 (相似存在定律)	270
第四节	相似材料模型法	270
第十三章	应力分析模型——光弹模型法	281
第一节	光弹性模型	281
第二节	光测弹性仪	281
第三节	光弹性实验的基本原理	283
第四节	光弹性材料	288
第五节	冻结法及其解释	289
第六节	光弹性应力计	290
参考文献	294

绪 论

人类从事地下资源开采的结果，必然在地下形成一系列的巷道、峒室以及采场(包括采空区或已采的崩落区)。在开掘这些巷道的过程中自然会在岩体内引起一系列的物理过程和力学现象。这些力学现象表现为人们预测不到的地层变形与破坏，在很多方面造成十分不利的后果；而巷道或采场的崩塌经常是矿山伤亡事故的主要原因，同时矿山发生大面积地压活动还会造成资源及经济的巨大损失。如江西盘古山钨矿于1966年及1967年曾先后发生两次大规模地压活动，特别是后一次地压活动导致696m中段以上六个中段直到地表出现程度不同的岩石移动，使7个生产系统遭到破坏，为国内冶金矿山罕见，井下损失巨大。类似这样的事例还有鞍钢弓长岭铁矿1956年发生的地压活动，导致一开拓竖井破坏，井下生产被迫中止两年。

随生产不断发展，矿山开采深度日趋增大，出现地压活动现象的矿山也增多起来。此外，为满足社会主义经济建设发展对各种金属的需要，有一些埋深大、地质条件复杂的新矿山逐步投入生产。这些矿山投产后便面临地压活动对生产的威胁，如金山店、张家洼、玉石洼等铁矿。

多年来采矿工作者一直在考虑这些问题，过去曾根据生产经验归纳出一些经验法则(或规律)。但经生产验证，大家普遍认识到，这些经验法则都有一定的局限性；只有更好地掌握有关变量的范围和限度，才能更可靠地控制地压活动。这就需要说明地压活动的原因及采用合理的地压控制方法，为此，必需学习矿山岩体力学课程。

矿山岩体力学是近一、二十年来国内外许多专家学者在这一领域中的研究成果，也是人们在采矿生产实践中愈来愈认识到采矿科学的发展愈来愈离不开矿山岩体力学理论的结果。为适应生产的需要，从70年代才正式把矿山岩体力学做为是一门独立的课程列入采矿专业、矿井建设专业的教学计划中。

为有利于读者学习和掌握本书内容，下面就有关矿山岩体力学的几个问题做一简单介绍。

一、岩体力学、矿山岩体力学及其区别

岩体力学是固体力学的一个分枝，它研究岩体在力场作用下变形与破坏，以及与其相关的岩体稳定性问题。矿山岩体力学主要研究采掘活动所影响的那部分岩体以及在采动影响下于其内所发生的一切物理过程及力学现象，即研究在地壳的部分岩体中进行采掘活动后，所形成的矿山工程(巷道、峒室、采场)周围岩体的变形、破坏，以及如何控制其变形发展等问题。虽然矿山工程与土木工程(包括地下工程)相应问题(如隧道、地下厂房、贮存库房等)没有什么本质区别，但解决问题时所要考虑的许多因素都有很多不同之处。因为：

(1) 土木工程(包括地下工程)施工地点往往是可选择的，而矿山工程施工地点是由矿床赋存地点确定的，因而施工地点条件无选择余地；

(2) 大多数土木工程和地下工程以永久性工程居多，如坝、地下厂房等。矿山工程(巷道、峒室、采场)则为“临时性”工程，如阶段巷道、采准巷道等存在年限有限，一

般不超过10年，服务于采场的采切巷道从施工到报废一般为1~2年；仅开拓巷道（井筒、主平峒）存在年限与矿山存在年限一致，时间较长，为20~50年。因此在考虑维护措施时就不应持解决地下工程此类问题的观点采取相同措施；

（3）土木工程（包括地下工程）建成后，在一般条件下围岩中应力不会再发生变化，而矿山工程则相反，随采矿工作进展，回采空间的形状与规模、数量都是在变化（在时间上、空间上均在变化）的。因而矿山工程可视为一种“可变性工程”，围岩中应力同样是处在不断变化之中，并互相影响。

矿山岩体力学是一门涉及许多学科的课程，可认为是介于固体力学、地质学、工程地质学、地质力学、土力学、采矿学之间的一门边缘学科。

二、矿山岩体力学发展

人们认识到上述关系是经历了相当长的历史阶段，因为矿业发展是与人类文化发展密切相关的，在矿业发展初期就碰到与矿山岩体力学有关的问题，如评价回采空间稳定性，以及采取必要的加固措施、评价有用矿物的“可采掘性”等。在初期主要是凭借肉眼观察与直观感觉为依据获得经验解决问题。但随着采掘活动范围的扩大，凭经验已不能很好解决生产中不断出现的问题，迫切需要研究采矿工作形成的空间周围岩体的变形与破坏的过程，确定这些过程在空间与时间上的变化规律。随科学技术发展，在20世纪30年代起有人把当时已成熟的弹性理论方法应用到解决矿山岩石力学问题上。随着矿床开采提出的有关岩石力学问题日益增多，研究日益深入与范围扩大，于是于50年代逐渐形成一个新的学科——岩石力学。

在岩石力学学科形成初期，主要把所研究的客体看做是理想弹性体，忽视岩体在建造后历经沧海桑田的地质运动过程，使一个连续介质变成为不连续的碎裂介质。因而应用弹性理论方法研究得出的结论与实际出入较大，影响了岩石力学发展及人们对它的信任。从事本学科的研究人员为克服现实与计算不符的矛盾，深入现场进行研究，认识到地质因素的影响，通过测试了解到岩体变形与强度特性都有别于块状岩石，因此岩石力学逐步发展成为岩体力学。

我国矿山岩体力学的发展是伴随着社会主义经济建设的发展而发展起来的。在党的十一届三中全会之后，迎来了科学的春天，矿山岩体力学的研究工作受到党和有关部门重视，得到了前所未有的长足发展。从70年代开始，许多单位系统深入研究了各种类型矿体开采的地压活动规律及地压控制方法以及矿山岩体力学基本理论。随着计算技术发展和不断应用，数值计算技术在解决和评价矿山工程岩体稳定问题上也取得了很大成绩。这些工作不仅推进了矿山岩体力学的发展，而且也培养锻炼了一大批具有一定专业素质的人才，建立了一支专业队伍。

三、研究的问题

当前我国冶金矿山面临所要解决的问题，大致可归纳成下列几方面问题：

- （1）在复杂地质条件下，井巷维护方法和新型支架；
- （2）地压活动机制及地压控制方法；
- （3）最大限度安全地回收地下资源，正确确定回采顺序、采矿方法结构参数；
- （4）寻求经济合理的空区处理方法。目前许多应用空场法的矿山都存在空区处理问题。为保证开采经济效益，必须寻求技术经济合理的空区处理方法。

为解决前述问题必须研究：

(1) 岩石、岩体的物理力学性质，着重研究具有不同结构类型岩体强度、变形特征、时依效应。此外，还应深入研究岩石的物理性质，因为岩石的物理性质随应力状态的变化而变化，可以把它做为反映应力状态的客观参数。

可做为反映岩体应力状态的物理性质有：岩石电学性质、声学性质、放射性等。

(2) 岩石、岩体在不同应力状态下破坏机制，建立岩体强度准则，以便合理解决采矿、掘进支护参数问题。

(3) 岩体应力状态的研究，因为岩体中初始应力是确定井巷工程，采矿方法结构参数的主要数据。

(4) 研究在不同地质条件下井巷地压机制，寻求合理的井巷维护方法、新型支架等。

(5) 研究不同地质条件下采用不同采矿方法的地压活动特点、不同结构形式采矿方法的构成要素的合理确定方法、合理的回采顺序。

(6) 研究充填体与围岩的相互作用，以解决对充填功能的认识。

(7) 研究采空区周围应力分布对稳定性影响，合理解决深埋空区处理方法，以消除处理空区上的盲目性。

四、研究方法

为了能对上述问题深入研究，必须采用合理的研究方法，因为任何问题研究的成败，都与所采用的研究方法有直接关系。目前研究矿山岩体力学问题时，广泛采用综合研究方法。可采用下列方法互相配合：

(1) 分析法。应用连续介质力学方法，但在应用此种方法时，很难列出能正确反映岩体应力应变关系的本构方程。此外，由于结构面的存在状态对岩体结构类型影响较大，因此分析法使用受到很大限制。

(2) 模拟法。

1) 数值模拟法，如有限元法、差分法、边界元法、离散元法（因为数值计算方法已在相应课程中讲授，本书未列入）。

2) 光弹模拟。光弹模型主要用于研究弹性阶段应力状态（平面、空间问题）。目前应用于平面问题较少与数值模拟比可直观给出模型内各点应力分布，这是其优点。因为在矿山岩体力学中稳定性分析比应力分析更重要，而光弹分析不能用于岩体破坏阶段。

3) 相似材料模拟。适于试验室研究地压活动规律及探索巷道与采场周围岩体变形和破坏情况。从目前试验技术看，此法不失为一种良好的方法，但同样面临一个难于解决的问题，即力的相似问题。目前仅能做到模型与原型的几何相似，而还不能做到作用力的相似。因为要用材料本身自重来模拟重力场作用，势必改变材料（模型）表征原型材料性质，影响试验结果。

(3) 现场观测。对研究如此复杂的客体——岩体，应当广泛采用此种研究方法才能收集到为解决实际生产问题所必须的第一手材料。因此应在研究中以此种方法为主。

第一章 岩石的力学性质

在解决采矿工程问题，对岩体稳定性做出评价时，必须了解岩体或岩石的力学性质。岩石的力学性质主要指：在各种类型载荷作用下，它们的变形特征，出现塑性流动和发生破坏的条件。表征岩石力学性质的参数如下。

变形特性参数：岩石的变形模量、弹性模量、切变模量、泊松比和流变性等。

强度特性参数：岩石抗拉、抗弯、抗剪、抗压等强度极限。

第一节 岩石的成分及结构与其力学性质的关系

岩石是多种矿物颗粒的集合体。从地质学我们知道岩石一般由下列十余种即长石(正长石、斜长石)、石英、云母(黑云母、白云母)、角闪石、辉石、橄榄石、方解石、白云石、高岭土、赤铁矿等称为造岩矿物的矿物构成。它们在岩石中所占份量，依岩石成因而异。

岩石按其成因分为：岩浆岩——系由岩浆在地壳内不同深度冷凝而成；沉积岩——是由已有岩体经风化崩溃搬运再胶结或化学作用而形成；变质岩——则由已有岩石在高温高压条件下经过改变而形成的。岩石依其成因不同，组成岩石的矿物颗粒间的结合方式则不同，从而使岩石具有不同的结构与构造。岩石结构是指：岩石的矿物颗粒的大小、形状、表面特征、颗粒相互关系、胶结类型特征等。岩石构造则指：岩石组成部分在空间排列的情况，如岩石的层面构造、层理构造等。

构成矿物的各种化学元素的原子(离子)在空间按一定规律重复排列，使其具有规则的几何形状的固体称为晶体。晶体结构是岩浆岩和变质岩的最大特征，也是很多沉积岩的特征。根据生成条件冷凝速度不同，结晶颗粒的大小则有所不同，可分为：等粒状结构(颗粒大小近于相等)、不等粒状结构和斑状结构(图1-1)。结晶颗粒小且具有等粒状结构的岩石，抵抗外载荷能力大，即强度高。这是因为构成岩石的矿物晶体的力学性质，取决于将原子结构结合到一起的力的大小。而原子间结合或是由带相反电荷的离子之间的静电引力(离子结合)(图1-2)，或是由于原子间共用电子(共价结合)的结果。从岩石学知，构成岩石的结晶颗粒大多数为离子晶体。从图1-2看出，带相反电荷的离子间的静电吸引力随离子间距离的减小而增大。由于非晶体原子间的距离较大，非晶体的键的强度则

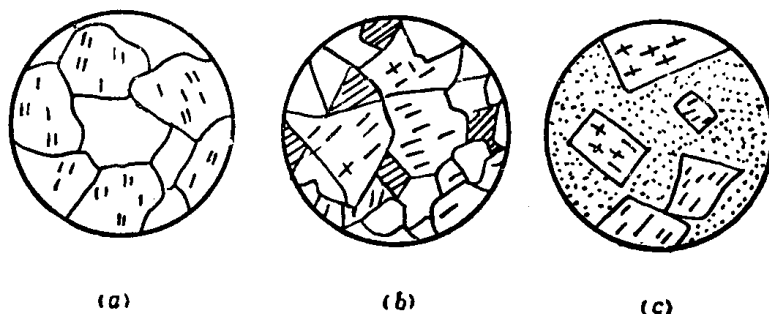


图 1-1 晶体结构类型
(a) 等粒结构； (b) 不等粒结构； (c) 斑状结构

较小。

结晶颗粒大如斑状结构的岩石，由于晶体内部或晶体间含有较多的缺陷（如解理、位错、双晶、裂隙等），其强度降低。

对沉积岩而言，岩石碎屑之间则凭借胶结物连结在一起，形成固结岩石。因而其抵抗外力作用的能力，需视其胶结物及胶结类型而定。从胶结物看，由硅质或铁质物质胶结的岩石强度较高。钙质次之，而由泥质胶结形成的岩石其强度最低(图1-3)。从胶结类型看，沉积岩可具基质胶结、接触胶结、孔隙胶结(图1-4)结构。基质胶结的岩石碎屑(颗粒)为胶结物包围，其强度由胶结物决定。接触胶结只是在颗粒接触处有胶结物存在，因此一般胶结不牢，强度较低透水性较强。孔隙胶结，胶结物完全地或部分地充填于颗粒孔隙之间，一般胶结较牢固，所以岩石强度及透水性主要由胶结物性质及充填程度决定。

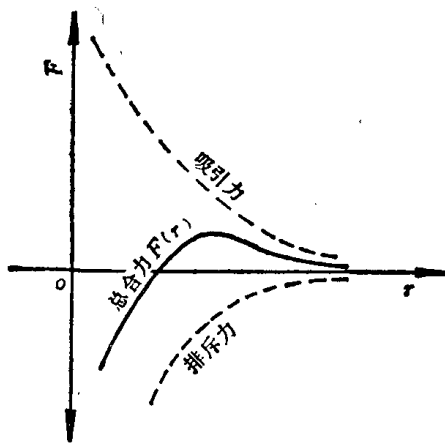


图 1-2 离子间吸引力、排斥力与距离间关系
F—力；r—距离

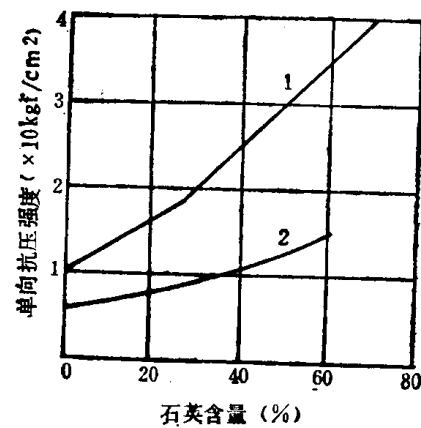


图 1-3 石英含量及胶结物质对强度影响
1—钙质胶结砂岩；2—泥质胶结粉砂岩

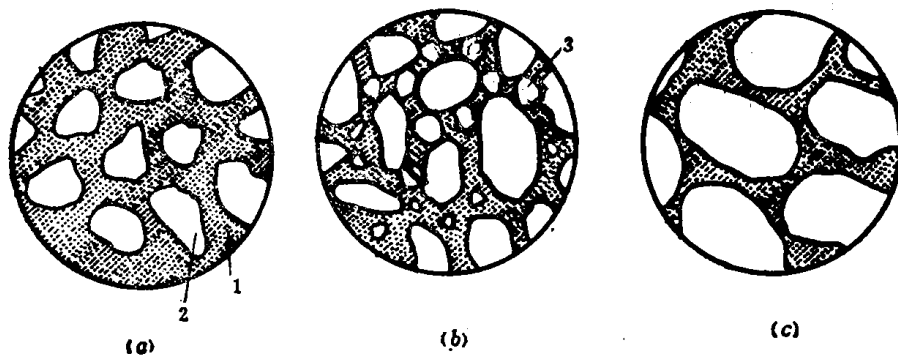


图 1-4 胶结类型
(a) 基质胶结；(b) 接触胶结；(c) 孔隙胶结
1—胶结物质；2—颗粒；3—未被充填的孔隙

除构成岩石的矿物颗粒大小、结合方式对其力学性质表现出影响外，矿物颗粒排列方式(构造)及沉积顺序亦表现出影响。如云母片岩、片麻岩、页岩等，则表现出力学性质的各向异性。

第二节 影响岩石力学性质的物理特性

影响岩石力学性质的物理、水理性性质包括内容较多,但与采矿工程密切相关的有:岩石的容重、比重、孔隙性、渗透性、软化性、膨胀性等。

一、岩石的容重与比重

1. 容重 单位体积岩石重量称为岩石的容重。根据岩石中是否含水,又可分为干容重与湿容重,以及饱和容重。在一般条件下,三者数值相差不大。

岩石容重可用下式确定:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (1-1)$$

式中 γ ——容重;

W ——岩石试件重量;

V ——岩石试件体积。

岩石容重与岩性及其成因有关。深成而古老岩石孔隙少质密,其容重较大。基性岩石、超基性岩石含铁、锰等比重大的深色矿物,因此较含硅多的酸性岩石容重大。基性岩浆岩的干容重变化于 $2.5 \sim 3.2 \text{g/cm}^3$,酸性岩浆岩则变化于 $2.0 \sim 3.0 \text{g/cm}^3$,而沉积岩多变化于 $2.1 \sim 2.8 \text{g/cm}^3$ 之间。

根据岩性可用直接法或蜡封法测定岩石试件的容重。直接法须将岩石试件制成圆柱形、棱柱形或立方体形。用卡尺量测其尺寸,在天平上称其重量。按式1-1计算岩石试件容重。对遇水崩解或溶解的岩石则应采用蜡封法测其容重。

2. 比重 岩石比重为岩石试件干重量与岩石排除空隙体积的实体体积之比,再与 4°C 水的容重之比即:

$$\Delta_R = \frac{W_d}{V \gamma_w} \quad (1-2)$$

式中 Δ_R ——岩石比重;

W_d ——岩石试件在烘箱中烘至 105°C 保持恒温、恒重时,岩石固体重量;

V ——岩石试件固体部分体积;

γ_w —— 4°C 时水的容重。

岩石比重是在试验室中用比重瓶法测定的。

二、岩石的孔隙度

岩石依其生成原因和生成条件不同,可能含有形状、体积不同的孔隙和裂隙。如岩浆岩按其生成深度、岩浆凝固条件以及所含气体的排逸条件,含有不同体积的三度空间孔隙。对沉积岩则取决于结构特征。此外在岩石中还存在着各种原生的、构造的、卸荷的、风化的规模不等的面状裂隙。把岩石所具有的孔隙和裂隙特性,统称为岩石的孔隙性。岩石孔隙性通常用孔隙度大小表示。岩石孔隙度为岩石试件中孔隙体积与岩石试件体积之比,即:

$$n = \frac{W_s - W_d}{\Delta_L V} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中 W_s ——为水饱和的岩石试件重量(如某种岩石与水有化学反应时,应改用与岩石

无化学反应的液体);

W_d ——干燥岩石试件的重量;

V ——岩石试件体积;

Δ_l ——液体的密度。

几种岩石的容重、比重、孔隙度列于表1-1中。

从试验室对花岗岩和片麻岩进行单向和三向压缩强度测定可以看出,随孔隙度增大岩石强度降低(图1-5)。

表 1-1 几种岩石的容重、比重、孔隙度

岩石名称	容重 (g/cm ³)	比重	孔隙度 n (%)
花岗岩	2.6~2.7	2.5~2.84	0.5~1.5
粗玄岩	3.0~3.05		0.1~0.5
流纹岩	2.4~2.6		4.0~6.0
安山岩	2.2~2.3	2.4~2.8	10.0~15.0
辉长岩	3.0~3.1	2.7~3.2	0.1~0.2
玄武岩	2.8~2.9	2.6~3.3	0.1~1.0
砂岩	2.0~2.6	2.6~2.75	5.0~25.0
页岩	2.0~2.4	2.57~2.77	10.0~30.0
石灰岩	2.2~2.6	2.48~2.85	5.0~20.0
片麻岩	2.9~3.0	2.63~3.07	0.5~1.5
大理岩	2.6~2.7	2.6~2.8	0.5~2.0
石英岩	2.65	2.53~2.84	0.1~0.5
板岩	2.6~2.7	2.68~2.76	0.1~0.5

三、岩石的水理性质

从生产实践和室内试验都可看到,水能瞬息地或逐渐地改变岩石状态,使其强度及变形特性发生变化。岩石在水溶液作用下所表现出的力学的、物理的、化学的作用性质,称为岩石的水理性质。由于岩石在水作用下表现出的性质是多方面的,但就评价矿山工程岩体稳定性影响突出的有渗透性、溶蚀性、软化性、膨胀性等。

1. 渗透性 地下水在水力坡度(压力差)作用下,岩石能被水透过的性能称为岩石的透水性。用渗透系数来表征岩石透水性能的大小。岩石渗透系数大小取决于岩石中孔隙的大小、数量、相互贯通情况。渗透系数 K 用下式表示:

$$v = -Ki \quad (1-4)$$

式中 v ——地下水渗透速度;

i ——水力坡度(压力差),见图1-6。

几种岩石的渗透系数列于表1-2。

2. 溶蚀性 由于水的化学作用把岩石中某些组成物质带走的现象,称为水对岩石的溶蚀。溶蚀作用使岩石致密程度降低,孔隙度增大,导致岩石强度降低。这种溶蚀现象在某些围岩为石灰岩的矿山可看到,如贵州某矿。在该矿坑道中可看到形似钟乳或石笋的溶蚀沉积物。

3. 软化性 岩石受水浸湿后,由于水分子的加入会改变岩石的物理状态,改变岩石

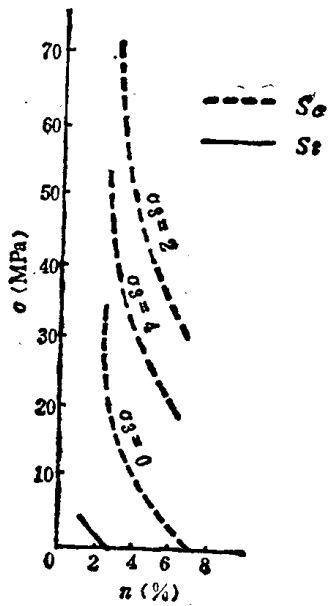


图 1-5 岩石强度与孔隙度关系
 S_c —抗压强度； S_t —抗拉强度

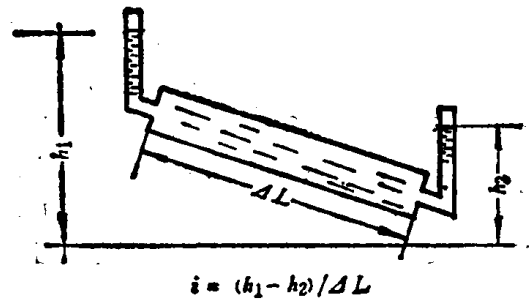


图 1-6 水力坡度图

表 1-2 几种岩石渗透系数表

岩石名称	孔隙情况	渗透系数 K (cm/s)
花岗岩	软致密、微裂隙 含微裂隙 微裂隙及一些粗裂隙	$1.1 \times 10^{-12} \sim 9.5 \times 10^{-11}$ $(1.1 \sim 2.5) \times 10^{-11}$ $2.8 \times 10^{-9} \sim 7 \times 10^{-8}$
辉绿岩	致密	$< 10^{-13}$
流纹斑岩	致密	$< 10^{-13}$
玄武岩	致密	$< 10^{-13}$
安山玢岩	微裂隙	8×10^{-11}
砂岩	较致密	$10^{-16} \sim 2.5 \times 10^{-18}$
砂岩	孔隙较发育	5.5×10^{-6}
石灰岩	致密 微裂隙、孔隙 裂隙、孔隙较发育	$3 \times 10^{-12} \sim 6 \times 10^{-10}$ $2 \times 10^{-9} \sim 3 \times 10^{-8}$ $9 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-4}$
页岩	微裂隙发育	$2 \times 10^{-10} \sim 8 \times 10^{-9}$
片岩	微裂隙发育	$10^{-9} \sim 5 \times 10^{-8}$
片麻岩	致密 微裂隙 微裂隙发育	$< 10^{-13}$ $9 \times 10^{-8} \sim 4 \times 10^{-7}$ $2 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-5}$
石英岩	微裂隙	$(1.2 \sim 1.8) \times 10^{-10}$

内部颗粒间的表面能，同时由于水化会使构成矿物的离子半径改变，使岩石力学性质受到影响，强度降低，塑性变形成分增加。根据试验得知，凝灰岩随含水率增加强度降低。强

度与含水率之间存在下列关系:

$$S_c = S_0 \exp(-AW) \quad (1-5)$$

式中 S_c ——岩石在某一含水率时的单向抗压强度 (MPa);

S_0 ——含水率为零时的单向抗压强度 (MPa);

W ——岩石中含水率 (%);

A ——构成试件岩石矿物对水的活性度, 以常数表示。

岩石内聚力 C 亦表现随含水率增加呈指数关系降低(图1-7)。这是由于间隙水层的扩大在 Vanderwoals 力作用下引起粒子间结合力降低造成的。

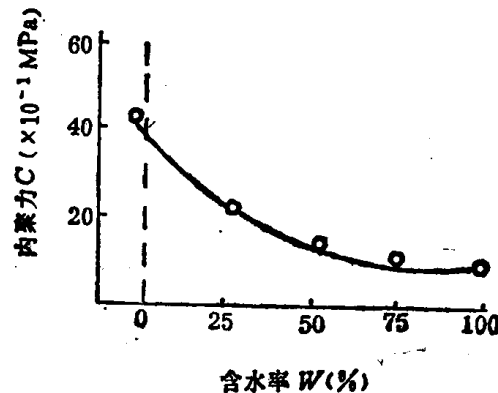


图 1-7 内聚力与岩石中含水率关系

从式1-5还看出, 岩石含水导致强度降低, 决定于构成岩石的矿物成分的亲水性和水分多少、水的物理化学性质和温度。表1-3给出几种岩石在水作用下强度变化范围。

表 1-3 某些岩石在水作用下强度变化

岩石名称	抗压强度 (MPa)		折减系数
	干燥	浸水	
花岗岩	40~220	25~205	0.03~0.25
闪长岩	97.7~232	68.8~159.7	0.24~0.40
辉长岩	118.1~272.5	58~245.8	0.10~0.56
玄武岩	102.7~290.5	102~192.4	0.08~0.29
石灰岩	13.4~250.8	7.8~189.2	0.06~0.42
砂岩	17.5~250.8	5.7~245.5	0.03~0.56
粘土岩	20.7~59	2.4~31.8	0.13~0.92
页岩	57~136	13.7~75.1	0.45~0.76
板岩	123~199.6	72~149.6	0.18~0.48
千枚岩	30.1~49.4	28.1~33.3	0.04~0.31
片岩	59.6~218.9	29.5~171.4	0.20~0.51
石英岩	145.1~200	50~171.4	0.04~0.20

4. 膨胀性 某些由粘土质矿物构成的岩石, 当水分子加入后发生水楔作用。即当两个矿物颗粒相靠很近, 水分子补充到矿物表面时, 由于矿物颗粒表面吸着力作用把水分子吸附到它的周围。在两个矿物颗粒接触处, 由于吸着力作用, 水分子向两个矿物颗粒之间的缝隙内挤入。当岩石所受外部压力大于吸着力时, 水分子就由接触处挤出。反之如压力

减小到低于吸着力，水分子就又挤入两矿物颗粒之间，使颗粒间距加大，岩石体积膨胀产生膨胀应变和膨胀压力。一般垂直层面方向的膨胀应变值较平行层面方向的膨胀应变值大（图1-8），可高达2倍。由于岩石吸湿性能表现各向异性，因而膨胀程度不同，引起岩石内部应力不均现象。

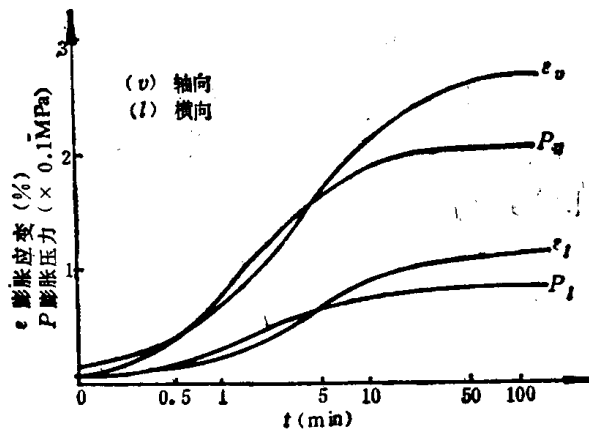


图 1-8 泥岩的膨胀应变、膨胀压力与时间关系

第三节 岩石的变形特征

岩石在载荷作用下，首先发生的物理现象是变形，根据构成岩石的矿物成分及矿物颗粒的结合方式，可表现为弹性或塑性变形。随着载荷的不断增大，或在恒定载荷作用下，随时间其变形将逐渐增大，最终导致岩石破坏。井下巷道或采场周围岩体所表现出的地压现象，就是巷道或采场周围岩石变形与破坏的结果。因此，研究岩石的变形特征对评价地压活动类型有着重要意义。

从材料试验得知，不同工程材料力学性质试验获得的应力应变曲线表明，有的材料在断裂前不发生明显的流动现象，有的则出现明显的流动现象。一般称前者为脆性材料，它具有以突然形式破坏的特点；而后者被称为延性材料，破坏平缓表现出流动特点。这种区分主要是指材料的破坏特征，而不是指材料属性。因为材料的变形特征与应力状态，作用时间有关。在不同的应力状态下，同一材料可表现为不同的变形特征。

脆性材料一般具弹性，其抗拉强度远小于抗压强度，破坏突然。一般以脆性度 n 表示材料的脆性程度， $n = S_c / S_t$ (S_c ——抗压强度， S_t ——抗拉强度)。

一、岩石单向受压应力应变关系

为了获得岩石在单向压缩条件下应力应变关系，可采用圆柱形或方柱形试件（其规格 $h = 2d$ ）。在普通材料试验机上，采用一次连续加载，并借助贴于试件上两组互相垂直的应变片量测不同应力条件下，试件轴向及横向应变值；或采用轴向及横向位移传感器测轴向及横向位移值 Δl 、 Δl_0 。将所测得数据绘于 $\sigma - \varepsilon$ 坐标图上，便得出如图1-9所示应力应变曲线。图中 ε_0 、 ε_l 两条曲线分别表示试件横向及轴向应力应变关系。同时根据弹性理论线应变和与体应变相等 ($\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \varepsilon_v$)，可得出在单向压缩条件下线应变与体应变关系为：

$$\varepsilon_x - 2\varepsilon_x = \varepsilon_v$$

按上述关系可绘出岩石单向压缩时试件体积应力应变曲线 ε_v （图1-9）。从图1-9所示试件轴向 (ε_x)、体积 (ε_v) 应力应变曲线可看出，试件受载后直到破坏历经以下四个阶段：