

高等学校教学用书

井巷工程

中国矿业学院等编

煤炭工业出版社

高等学校教学用书

井巷工程

中国矿业学院等编

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书包括岩石力学、钻眼爆破、井巷设计与施工三方面内容。全书共分十二章。第一至三章,介绍岩石性质、井巷地压及钻眼爆破;第四至十章,介绍巷道设计与施工;第十一至十二章,介绍立井施工及井筒延深。

本书为煤炭高等院校采煤专业试用教材,亦可供有关工程技术人员参考。

本书由中国矿业学院主编,参加编写单位有:山东矿业学院、山西矿业学院、西安矿业学院、阜新矿业学院、焦作矿业学院及中国矿业学院。

参加本书编写人员有:丁克宽、马光弟、刘会文、杨铁春、和心顺、袁传国、高树棠。最后由刘会文、高树棠进行统编与总审校。

高等学校教学用书
井 巷 工 程
中国矿业学院等编

煤炭工业出版社 出版
(北京安定门外和平北路16号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行



开本787×1092¹/₁₆ 印张23³/₄ 插页2
字数569千字 印数1—9,000
1980年8月第1版 1980年8月第1次印刷
书号15035·2274 定价2.50元

绪 言

煤炭工业是国民经济中重要的采掘工业部门，它担负着许多重要工业部门的燃料和原料的供给，并且直接影响着它们的发展和城乡人民生活。因此，大力发展煤炭工业，对在本世纪内把我国建设成为四个现代化的社会主义强国，具有极为重要的意义。

采掘工业的生产过程，就其基本工序来说，是掘进、采矿、运输相结合的过程。为了能达到工作面进行采矿，就必须事先把一系列巷道开掘出来；同时也只有一系列的巷道工程作好了，才能把采出的矿物运输出来。所以，在采掘工业中，采矿是以掘进为条件的，掘进又是服务于采矿的。而且，采、掘这种相互依存关系，是贯穿于采掘的全过程的。对煤矿而言，为了采煤，首先就要从地表开始，作大量井巷工程到达煤层，这便是新井建设；移交生产后，随着采煤工作面和采区的不断推进，还要继续不断地及时准备好巷道，以保证工作面与采区的正常接续；在上一生产水平煤层采完之前，就要着手进行井筒延深和新水平的开拓，以保证水平的及时接替。实践已充分证明，只有不断地及时地作好井巷开拓与延深工作，才能保证矿井生产持续稳产、高产。从上述可知，从新井建设开始到投入生产后的全过程，都离不开井巷工程。因此，贯彻采掘并举、掘进先行的方针，是煤炭工作者必须遵循的准则。任何只顾生产，不顾掘进，或重采轻掘的思想和行动，都必将导致采掘比例失调，从而影响或破坏煤矿正常生产。

建国以来，煤炭工业矿井建设有了很大发展，恢复和改造老矿井，建设了几十个新矿区，为我国煤炭工业的合理布局和煤炭产量从三千多万吨猛增到几亿吨奠定了基础。与此同时，井巷掘进技术也得到了显著提高。首先是凿井技术突飞猛进，在穿过不稳定表土流砂层的井筒施工方面，近年来，冻结法、钻井法、沉井法、帷幕法等均相继取得重大突破和显著进展，顺利地建成了三百多个井筒，为今后开发深厚表土矿区积累了经验。据统计，用冻结法开凿了一百七十多个井筒，成井最大直径8米，最大冻结深度330米，从1969年到现在已用钻井法打了十多个井筒，最大钻井直径7.4米，最大钻深226米；沉井法是一种古老的施工法，近年来采用了触变泥浆淹水沉井技术，使这一施工法焕发了青春，到1979年8月止，最大沉井深度已达180米，成井最大直径5米，采用各种沉井法的井筒有一百多个；采用地面预注浆的井筒有二十多个，最大注浆深度458米，多数堵水效果在96%以上，另外还有工作面预注浆及注浆封堵井壁漏水的井筒三十多个，注浆材料的研制已取得了良好成果。在立井井筒基岩掘进方面，1974年以来，研制出一批大型稳车、大抓岩机、钻架、高扬程吊泵等凿井设备，为立井机械化配套施工创造了条件。在斜井井筒施工方面，已形成以大箕斗、大扒斗、深孔光爆、锚喷支护、激光指向为主要内容的机械化作业线，最高月进度705.3米，达到了世界先进水平。其次在井巷支护技术方面进行了重大改革，光面爆破、锚喷支护由重点试验到全面推广，取得了多快好省的效果，目前，全国统配煤矿已有二千公里巷道采用了锚喷支护，90%的岩巷使用了锚喷支护，在井筒、硐室、交岔点、松软地层、煤巷中也正在试验推广，有的已达到了预期效果。此外，在岩巷、煤巷、半煤巷的施工技术和施工机械化程度方面也有了不同程度的提高，岩巷最高月

进1037.2米（冶金系统达1403.6米的世界先进水平），煤巷最高月进度为3501米。目前存在的问题是施工机械化程度较低且不配套，平均月进度不高，掘进工效低，与国外先进水平相比差距较大。

在向四个现代化进军的新长征中，煤炭工业担负着光荣而艰巨的任务。为了适应国民经济发展的需要，煤炭工业的发展要实现高速度，要迅速实现机械化并继续向现代化前进。为此，必须积极开展煤炭科学技术及其基础理论的研究，大力培养煤炭科学技术人材，为赶超世界先进水平奠定基础。

为了适应当前形势发展的需要，满足煤炭高等院校教学的要求，根据煤炭工业部的安排，编写了本教材。

为了提高学生分析问题和解决问题的能力，使学生能较好地掌握课程的主要内容，本教材对井巷工程的基础知识，如岩石力学、钻眼爆破等比过去有适当的加强；考虑本教材主要是供采煤专业教学之用，根据采煤专业的实际需要，在教材内容上进行了主次不同的安排，如平巷、斜巷、立井三者中，是以平巷设计与施工为主进行叙述，其他内容上也都根据采煤专业的要求而分清主次予以介绍，力求重点突出，举一反三，而不面面俱到；对施工工艺注意综合、归纳而后予以概括的叙述，以避免内容过于庞大；教材中注意反映了国内外的先进技术，但以国内行之有效的先进经验为主进行介绍；在系统安排上，是分为井巷工程的基础知识（1~3章）、巷道设计与施工（4~10章）、立井施工与井筒延深（11~12章）三大部分进行编写的。

由于我们水平有限，加之时间仓促，错漏之处，在所难免，欢迎批评指正。

编者

目 录

绪言

第一章 岩石性质与分级	1
第一节 概述	1
第二节 岩石的物理性质	2
第三节 岩石的变形特性	4
第四节 岩石的强度特性	7
第五节 岩石的工程分级	16
第二章 井巷地压	20
第一节 概述	20
第二节 岩体的应力、变形与破坏	21
第三节 井巷地压近似计算	32
第四节 井巷地压测量	39
第三章 钻眼爆破	44
第一节 概述	44
第二节 钻眼机械	44
第三节 钻眼工具	62
第四节 冲击钻眼理论简介	69
第五节 炸药与爆炸概论	73
第六节 工业炸药及起爆材料	83
第七节 爆破作用原理与爆破技术	96
第八节 电爆网路及爆破事故的预防	102
第四章 巷道断面设计	111
第一节 巷道断面形状与断面尺寸	111
第二节 巷道断面内水沟和管线布置	124
第三节 巷道断面设计示例	126
第四节 锚喷支护巷道的断面设计	130
第五章 水平岩石巷道施工	132
第一节 巷道施工中的钻眼爆破法	132
第二节 掘进通风与综合防尘	148
第三节 岩石的装运工作	151
第四节 钻装机及联合掘进机	169
第六章 巷道支护	177
第一节 概述	177
第二节 支架材料	178
第三节 锚杆支护	191
第四节 喷射混凝土与喷浆支护	204
第五节 锚喷支护类型及选用	224

第六节	棚式支架	226
第七节	石材整体式支架	230
第七章	巷道施工组织与管理	235
第一节	一次成巷及其作业方式	235
第二节	一次成巷的施工组织	237
第三节	劳动组织和施工管理	242
第八章	采区巷道和采区煤仓施工	245
第一节	概述	245
第二节	采区巷道掘进时的定向方法	246
第三节	煤巷施工	249
第四节	半煤岩巷道施工	258
第五节	上下山施工	259
第六节	采区巷道地压特征及支护工作	265
第七节	采区巷道施工的技术安全措施	266
第八节	采区煤仓施工	266
第九章	特殊条件下的巷道施工	272
第一节	揭开煤与瓦斯突出煤层的施工方法	272
第二节	巷道通过松软破碎带的施工方法	282
第三节	巷道掘进时的防水措施	283
第十章	硐室及交岔点	287
第一节	概述	287
第二节	硐室施工方法	287
第三节	道岔的概念	291
第四节	交岔点的设计与施工	295
第五节	曲线巷道的施工特点	306
第十一章	立井施工	311
第一节	概述	311
第二节	井筒横断面设计	312
第三节	立井基岩施工	322
第四节	立井表土施工	339
第十二章	立井井筒延深	351
第一节	概述	351
第二节	利用辅助水平延深井筒	351
第三节	利用延深间延深井筒	358
第四节	利用反井延深法井筒	362
第五节	立井井筒延深的保护设施	371
第六节	立井延深施工方案的选择	373

第一章 岩石性质与分级

第一节 概 述

井巷掘进最基本的过程，就是把岩石破碎下来，形成如设计所要求的井筒、巷道及硐室等空间，并接着对这些空间进行必要的维护，以防止围岩的垮落。因此，破岩与维护就成为井巷工程的主要问题。但怎样破岩与维护才能最有效、合理与经济呢？要很好解决这个问题，首先就要对岩石的性质进行深入研究，并在此基础上制订出科学的岩石分级方法，以此作为选用破岩和维护方法的依据。

岩石是由一种或多种矿物组成的，或者说岩石是矿物的集合体。矿物是具有一定化学成分和物理性质的自然物体，它是由地壳中的化学元素在地质作用的影响下组合而成的。大多数矿物都是晶体，即具有规则的几何外形，并且以组成矿物的原子（或分子、离子）的有规律的排列为特征。

按照成因，岩石可分为岩浆岩、沉积岩和变质岩三大类。煤系地层多属沉积岩，如石灰岩、砂岩、砂质页岩、页岩等，只有局部地段才有岩浆岩的侵入。建井工作者常把上述这些固结性岩石，统称为基岩，而把覆盖在基岩上的松散性沉积物，如黄土、粘土、砂砾等，统称为表土。

井巷工程中的岩石性质问题，主要就是研究岩石的物理性质（与井巷有关的），以及在外荷载作用下岩石的变形、强度等力学性质。至于表示钻爆难易程度的指标，如硬度、可钻性及可爆性等，只是在特定条件下，上述力学性质的反映。

不同岩石或同一岩石在不同情况下，其力学性质往往变化很大，影响岩石力学性质的因素可分为两个大方面：岩石本身的与外部的。外部方面的因素是很多的，如温度、含水率、风化程度、应力状态（简单应力状态和复杂应力状态）、荷载的大小和性质（静荷载和动荷载）、加载速度、荷载历时等等，这些对岩石的力学性质是很有影响的。但主要的还是取决于岩石本身的结构。岩石的结构性从微观上看，也可以叫做岩石的内部结构，是以岩石内部结晶的不完全性（岩浆岩、变质岩）和颗粒间的胶结情况不均匀性（沉积岩）为特点；从宏观上来看，也可以叫做岩石的外部结构，是以岩石的断裂即岩石的裂隙性为特点的。对工程问题来说，岩石裂隙性（断裂系统）的影响作用往往比岩石的内部结构的影响作用来得大。

不言而喻，实验室作的小试块的岩石力学性质试验，是无法反映岩石外部结构的特征——岩石的裂隙性的。因此，就引进了“岩体”这样一个概念，岩体是指地下工程周围较大范围的岩石，它可由一种或几种岩石组成，并可能为岩脉或裂隙充填物所侵入，可以包括地质构造作用的明显影响，并为裂隙所切割。因此，岩体的力学性质显然与岩块的力学性质不会相同，如岩体的强度必然比岩块强度有所降低。

第二节 岩石的物理性质

岩石在天然产状下的物理性质，对工程建设有直接的影响。岩石物理性质是多方面的，这里就其最主要的且关系到井巷工程的问题予以介绍。

岩石最主要的基本物理特性是：岩石的非均质性；岩石的裂隙性。由于这些特性使岩石又具有各向异性，即在不同方向上具有不同的力学性质。

一、岩石的非均质性

由于组成岩石的矿物的结晶程度、颗粒大小、形状、分布排列以及胶结物质的性质不同，使岩石表现出非均质性。

拿岩浆岩来说，这类岩石是由各种矿物晶体组成的混合体，它们在三维空间的排列是不规则的，无秩序的，晶体之间联结有强有弱，并且具有这样或那样的缺陷。

沉积岩是由形状不定，颗粒大小不均匀的矿物和岩石碎屑胶结而成的。其颗粒之间的各种胶结物质，有的是胶结强度大的硅质和钙质物质；有的则是胶结强度弱的粘土质和泥质物质。另外它还具有孔隙性的特点。

至于岩体在其成岩运动中所形成的非均质性，则更明显。例如岩浆岩，由于多次岩浆侵入或岩浆分异，往往形成岩性复杂、夹有多种岩脉的天然岩体。喷出岩与下伏岩层的接触面胶结不良，不同时期喷出岩间常常产生古风化夹层。沉积岩生成时产生层理性，常有软弱夹层。变质岩形成片理的特征。在成岩运动过程中，还可以产生各种形态的原生裂隙。

因此，岩石无论从整体或局部来看，都不能认为它是均质的。现在，工程上常根据实际情况划分出不同的工程地质单元，每一工程地质单元的岩体被认为是均质的。事实上，这只是就其大体而言，岩性差异在一定的范围以内而已，而且只是为了工程的目的。我们必须注意，岩石的非均质性是绝对的，而具有均质的特点，则是有条件的，因而是相对的。

二、岩石的裂隙性

岩体的物理力学性质，例如岩体的强度、变形及各向异性等等，在很大程度上，是取决于岩体本身存在的断裂系统即裂隙性。岩石的裂隙，就其生成方面说来，可分为成岩裂隙、构造裂隙与次生裂隙三类。

(一) 成岩裂隙

成岩裂隙即岩体形成过程中生成的裂隙，也叫原生裂隙。

沉积岩中的原生裂隙情况，与岩石的岩性成分有关，例如，垂直于层理的裂隙是石灰岩和白云岩的特点，它们把这些岩石分裂成平行六面体状的节理。在砂岩中，除了垂直于层理的裂隙以外，还会遇到有代表性的与层理成不同角度的倾斜裂隙。裂隙面的情况也与岩性成分有关，例如，在粘土岩及泥灰岩中，裂隙面是光滑的；在砂岩及砾岩中，裂隙面粗糙且有凸出的砂粒及砾石。原生裂隙面，通常没有擦痕及位移形迹存在。这种裂隙不仅因岩层不同而方向不同，就是在同一岩层的不同部分里，也有走向不同的裂隙。

岩浆岩的原生裂隙是在岩体冷却时发生不均匀的体积收缩情况下发育起来的。体积收缩出现拉力，是形成裂隙的主要原因。由于冷却不均衡，熔岩往往分裂成它们特有的节理形状。最显著的是玄武岩的柱状节理，它们是垂直于冷却面而排列的。在熔岩中常见的球

状节理，主要发育于玄武岩、辉绿岩等岩石中。

(二) 构造裂隙

构造裂隙是由构造运动产生的。这种裂隙的特点是：无论是沿走向和沿倾向，其方位的稳定性都比较好，而在成份不同的岩体中沿着同一平面发育着。也就是说，形成了定向裂隙系统。从力学生成方面来说，它大体可分为张裂隙、剪裂隙和劈理。

岩石张裂隙的产生，是垂直于张裂面的拉应力作用的结果，也可以是平行于张裂面的压应力作用的结果。这种裂隙通常是张开的。裂隙面不平整、粗糙，没有任何的错动位移痕迹。张裂隙沿走向和沿倾向都尖灭得很快。但却常常排列成行，或者在一个裂隙尖灭的地方，可以找到新的沿同一方向延续的裂隙。张裂隙的稠密度是不均匀的。

剪裂隙通常呈紧密地挤压状态。剪裂面平坦而比较光滑，常常带有擦痕、滑动沟和磨光面的错动位移痕迹。剪裂隙沿走向和倾向的方向能保持不变，延伸很远，且稠密度比较均匀。

与剪裂隙产生的同时，还产生劈理。劈理是指岩石沿平行的或大致平行的面分成薄片的能力。劈理并没有完全破坏岩体的完整性，这是与前述张裂及剪裂现象的区别。劈理的生成是在岩体受到构造力作用下的变形过程中相当于塑性变形发展的最后阶段。劈理广泛分布在经过变形的岩体里，它是褶曲地层的特征。

(三) 次生裂隙

次生裂隙是指风化、地下水、卸载以及人工等次生作用而形成的裂隙。

风化裂隙：岩石在风化时出现分裂成碎块的裂隙网，最终分裂成大小不同的碎石堆或变成泥土状块体。风化裂隙主要是岩石原有裂隙的扩大并形成新的裂隙。风化裂隙的特点是方向变化不定，常有分支和曲折现象，并且随着深度而迅速减小。

减压裂隙：地壳中的岩体，总是受着自重压力的。因此，当岩体被卸除其上的压力时，就会向自由空间膨胀而产生减压裂隙。卸载作用可以是侵蚀、风化和剥蚀等。这种裂隙很密集而明显，随着深度加大，便逐渐变稀而消失了。

如果按照裂隙的形态来说，可将其分为张裂隙、闭裂隙和隐裂隙三类。张裂隙的特点是具有明显的空隙，其中通常包含有填充物；闭裂隙是用肉眼可以清楚看见的裂隙，但块体之间是闭合的，没有空隙；隐裂隙很细微，通常不易觉察，但当岩石受打击或染色时，这种裂隙便会显现出来。

从上述可知，天然岩体总是被这样或那样的裂隙分割成块体，这些块体之间处在既相联系又被分割的状态。因此，岩体既是断裂的，又是连续的，是断裂与连续的统一体。可以叫做裂隙介质或准连续介质。

三、岩石的各向异性

在天然岩体条件下，使岩体具有各向异性的基本原因，是由于岩石的层理、片理、夹层和定向裂隙系统的存在所致。

试验表明，即使不具有裂隙和明显层状的岩块试件，也可以带有各向异性的特点。这是岩石内部结构性的反映。因为，岩石通常是结晶的和半结晶的；有些岩石中的矿物有定向排列结构；有些岩石在沉积过程中具有微层理性，不易为肉眼所察觉，等等，这些都会使岩石的物理力学性质，带上各向异性的特征。

岩石的各向异性，表现在它的强度及变形特性等各方面。表 1-1 是以砂岩为例，说明

了成层岩石垂直于和平行于层理方向的物理力学性质的差别。

表 1-1 某些砂岩的室内静力试验

岩石名称	弹性模量 $E \times 10^5$ (公斤/厘米 ²)		波 桑 比 μ		抗压强度 (公斤/厘米 ²)	
	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥
粗 砂 岩	1.93~4.19	1.73~4.54	0.10~0.45	0.12~0.36	1185~1575	1423~1760
中粒砂岩	2.87~4.19	2.68~3.37	0.12	0.10~0.22	1170~2160	1470~2060
细 砂 岩	2.83~4.95	2.90~4.60	0.10~0.22	0.15~0.36	1378~2410	1335~2205
粉 砂 岩	1.01~3.23	0.84~3.05	0.15~0.50	0.28~0.47	344~1045	554~1147

岩石名称	抗拉强度 (公斤/厘米 ²)		抗弯强度 (公斤/厘米 ²)		抗剪强度 (公斤/厘米 ²)	
	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥
粗 砂 岩	44.3	51.4~52.5	111~172	103	483	470
中粒砂岩	77.0	52.0	162~226	131~194	336~594	482~618
细 砂 岩	80.7~118	60~79.5	208.5~265.3	177.5	432~595	524~649
粉 砂 岩	—	—	22.7~166	43.0	48~113	129~198

注：表中∥和⊥符号，是表示平行于和垂直于岩层方向的试验条件。

四、岩石的孔隙度与孔隙比

孔隙度或称孔隙率是指所测岩石中孔隙体积与岩石总体积之比，通常以 n 表示，用百分数计。

孔隙比是孔隙体积与岩石中矿物颗粒体积之比，通常以 e 表示。

设某岩石的总体积为 V ，重量为 G ，其中矿物颗粒体积（即不包括裂隙与孔隙的体积）为 V_1 。则

$$\text{岩石比重} \quad \delta = \frac{G}{V_1} \quad (1-1)$$

$$\text{岩石容重} \quad \gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

$$\text{孔隙率} \quad n = \frac{V - V_1}{V} = 1 - \frac{\gamma}{\delta} = \left(1 - \frac{\gamma}{\delta}\right) 100\% \quad (1-3)$$

$$\text{孔隙比} \quad e = \frac{V - V_1}{V_1} = \frac{\delta - \gamma}{\gamma} \quad (1-4)$$

岩石的孔隙比 e 值越大，岩石的可压缩性和透水性也越大，抗剪强度则越小。

第三节 岩石的变形特性

在荷载作用下岩石首先发生变形，随后，当作用的荷载不断增大，或者在荷载超过某一数值而保持恒定时，随着这个恒定荷载作用历时的增长，便会导致岩石的破坏。因此，岩石的变形和破坏，只不过是荷载作用下岩石性能的变化过程的两个不同阶段。在变形阶段中也包含有岩石破坏的因素，而破坏阶段的到来，也可以看作变形不断发展的结果。本节主要研究岩石的变形问题。

一、岩石的弹性和塑性

按照目前通常的理解，岩石的变形可以分弹性变形（可恢复变形）和塑性变形（不可

恢复变形)。且其两个分量对总变形的贡献，随变形的增大而

一般情况下，岩石不具有绝对的弹性变形，在弹性变形阶段就已伴随或多或少的塑性变形。甚至在刚刚开始出现弹性变形的时刻，便立即出现了塑性变形。因此，岩石是同时具有弹性又具有塑性的物质。岩石这种出现弹性变形的同时，随即出现塑性变形的特点，是与一般固体的情况不相同的。因此，一般只是把岩石在较小的应力范围内，视为弹性介质，其应力应变关系符合虎克定律。而这种实用意义上的弹性既不是完全可逆的，也不是完全线性的。但对大部分岩石而言，线性弹性还是可以应用的。

岩石在应力达到强度极限之前，除去外力，岩石仍保持有明显的残余变形。岩石弹-塑性变形的不可逆过程，使得在前一次卸载和随后一次加载之间，出现了回滞圈(图1-1)。应力应变曲线的卸载支线在开始一段的坡度比较陡，而在接近卸载完成时，其坡度比较平缓，甚至当 $\sigma = 0$ 时还有变形恢复，这就是弹性后效现象。因此，弹性变形又可分为当荷载卸除后立即恢复的变形——瞬时弹性变形，和需要一定时间才能恢复的变形——弹性后效。

根据图1-1所示，可得到岩石的弹性模量 E 及变形模量 E_0 ：

$$\left. \begin{aligned} E &= \frac{\sigma}{q} \\ \text{或} \quad E &= \frac{\sigma}{r+q} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

$$\text{及} \quad E_0 = \frac{\sigma}{p+r+q} \quad (1-6)$$

式中 σ ——应力；

q ——瞬时弹性变形；

r ——后效弹性变形；

p ——塑性变形。

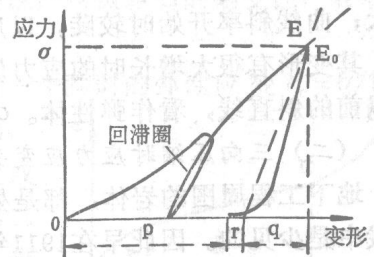


图 1-1 岩石的变形曲线

表示岩石变形特性的物理参数，还有波桑比，即岩石在纵向单向应力作用下所产生的横向正应变与纵向正应变之比。

二、岩石的应力应变关系

(一) 单向压缩时应力应变关系

根据实验，岩石单向压缩时的应力应变曲线可以简化为两类：

1. 脆性岩石的应力应变曲线(图1-2中的曲线1)。它的特点是岩石在破坏前，没有明显的塑性变形，总应变很小，仅千分之几。在应力达到岩石强度极限 R_a 时，岩石突然破坏，有时还发生巨大声响并使岩石碎块强烈弹出。这即一般认为的脆性破坏。

近年来岩石试验研究发现，岩石破坏的发展，不仅取决于岩石本身的性质，而且也取决于加载系统(如材料试验机)的特征(主要是刚度)。使用刚度很大的材料试验机，就可以使炸裂破坏性很强的岩石试块“平静”的破坏，没有声响和振动。同时，在试块应力达到破坏点(如图1-2的C点)后，压力逐步下降，变形逐步增大，最后应力减小到某一较小数值，此时岩石才算完全破坏，从而获得卸载曲线CD，亦即是得到了岩石应力应变全过程曲线。

如图1-2所示。当作用在试块上的压力从零开始逐渐增大时，首先出现向上弯的曲线OA段，这一段可以理解为岩石裂隙的压密阶段。此段内，岩石中的裂隙因受压而闭合，表现

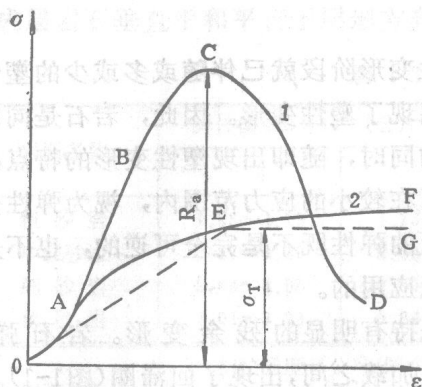


图 1-2 岩石的应力应变曲线

出较大的变形,因此变形模量较小而且不是一个常数。AB段可以近似称为线性弹性阶段,随着荷载增加,其变形基本上是按比例增加,弹性模量为常数。B点为弹性极限,以 σ_0 表示。曲线BC段可称为破裂发展段,达到这一阶段时,应力应变曲线发生由直线向曲线的转变,变形模量逐渐减小而趋于零。在此段内,自B点开始,岩石内部就有微破裂不断发生,到C点发生破坏。C点是最大应力点,称为强度极限,以 R_s 表示之。曲线CD段称为卸载应力应变曲线。这条曲线的存在,是在六十年代末期才为试验所证实。它说明岩石应力达到破坏点之后,并不是立即完全失去承载能力,到达D点才完全破坏。D点称为完全破坏点,而其保持的某一较小的应力值,称为残余强度。

2. 塑性岩石的应力应变曲线(图1-2中的曲线2)。它的特点是岩石破坏前总应变量大;曲线斜率开始时较陡,以后逐渐平缓。工程上把开始平缓的转折点(即应力增加很少,其变形有很大增长时的应力值)称为屈服极限 σ_T 。曲线0EF可简化为0EG折线。而 σ_T 以前的斜直线,看作弹性体。 σ_T 以后的平直线看作塑性体流动。

(二) 三向压缩时应力应变关系

地下工程周围的岩体,都是处于双向或三向应力状态之下,受单向应力的岩体在生产实践中是少见的。因此早在1911年就有人研制了一种三向加载设备。这种设备采用圆柱形试块。它可以使圆柱形岩石试块四周受到均匀的压应力,而轴向则用普通材料试验机加载。因此岩石试块内三个主应力为 $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ 。几十年来,参照这个基本精神,许多国家都试制了三向应力试验机。到目前这种类型的试验机因其简便还在被继续采用。我国1964年自己设计制造的长江-500型三向应力试验机就是这种类型的仪器。冶金部矿冶研究所把长江-500型三向应力试验机的逐点观测、人工记录的观测系统,改进为应力应变电测自动记录系统后,首次获得了岩石三向应力状态应力应变全过程(图1-3)。

从对岩石三向压缩试验及其获得的应力应变全图,我们可以认识到:

1. 由于卸载应力应变曲线的被证实(图1-3),它说明岩石应力达到破坏点之后,并不是立即完全丧失承载能力,即岩石在破坏以后,虽然结构发生了变化,但仍然保留一定的承载能力。过去认为岩石的应力达到破坏强度以后,岩石便解体而完全失去了承载能力

$\sigma_1 - \sigma_3$ (公斤/厘米²)

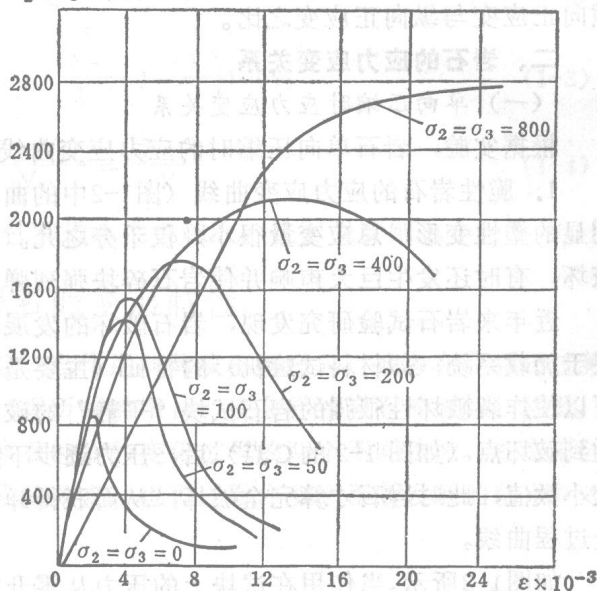


图 1-3 大理岩三向应力状态应力应变全图

的概念，看来是陈旧了。

在岩体已经开裂破坏而尚未垮落的情况下，如果能采取一种措施，制止或缓和岩体的变形，则岩体破坏就停止继续发展，而能保持相当大的承载能力。锚喷支护就是制止岩体变形的十分有效的措施。

2. 随着侧压力的增大，岩石表现出比较明显的塑性变形。如图1-3所示，在单向加载时呈现脆性破坏的大理岩（图中 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ 的曲线），当侧向应力达到 400 公斤/厘米² 以上时，则表现出明显的塑性。这说明岩石的脆性和塑性不是不可变的，是相对的。它不仅取决于岩石本身，而且也取决于岩石所处的应力状态。多数岩石单向应力或低压三向应力状态下表现为脆性，但在高压三向应力状态下，脆性岩石在破坏之前也表现出很大的塑性。

3. 随着侧向应力的增大，岩石破坏时的最大应变增大，即在大压力下，岩石可以发生较大的变形以后才破坏。例如，对大理岩而言，当侧向应力为 400 公斤/厘米² 时，最大应变达 12%（图1-3）。

三、岩石的蠕变性

在恒定荷载持续作用下，岩石变形随时间而增长的特性，叫做岩石的蠕变性，表示这一特性的变形时间曲线，便叫做蠕变曲线。

岩石的典型蠕变曲线如图 1-4 所示。在开始加载时有一个瞬时的弹性应变 $\epsilon_e = \sigma/E$ ，这一段所用时间极短，可看作与时间无关。在 A 和 B 之间，蠕变不断增加，但蠕变速度逐渐减慢，称为第一阶段蠕变或过渡蠕变。在 B 和 C 之间，蠕变以恒定速率增长，称为第二阶段蠕变或定常蠕变。在 C 点以后，蠕变加速增长，称为第三阶段蠕变或加速蠕变。当到达某一数值 D 时岩石便破坏。

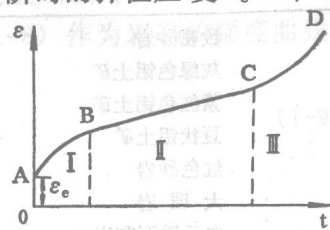


图 1-4 岩石的典型蠕变曲线

第四节 岩石的强度特性

一、岩石强度特征简述

岩石变形达到一定程度就要破坏。这时说明岩石强度小于所受应力，因而发生破坏。对一个巷道来说，如围岩强度小于所受应力，则围岩要破坏，可以发生冒顶、片帮和底鼓等现象；如围岩强度大于所受应力，则巷道可不支护而长期稳定。因此，对井巷工程来说，研究岩石强度是一个十分重要的问题。

从实验资料概括起来，岩石强度有如下特征：

1. 岩石强度与受力状态有关。岩石因受力状态不同，其强度不同，且相差悬殊，一般符合下列顺序。

三向等压抗压强度 > 三向不等压抗压强度 > 双向抗压强度 > 单向抗压强度 > 抗剪强度 > 抗弯强度 > 单向抗拉强度。

2. 岩石的单向抗压强度与试块尺寸有关。几种不同尺寸的立方体岩石试块的测定结果示于图1-5（根据冶金部矿冶研究所资料）。

由此图可知，岩石的单向抗压强度随试块尺寸增大而降低，岩石的变形模量也随试块尺寸增大而降低。试块尺寸增大至一定程度后，强度与变形模量都有大致保持不变的趋势。

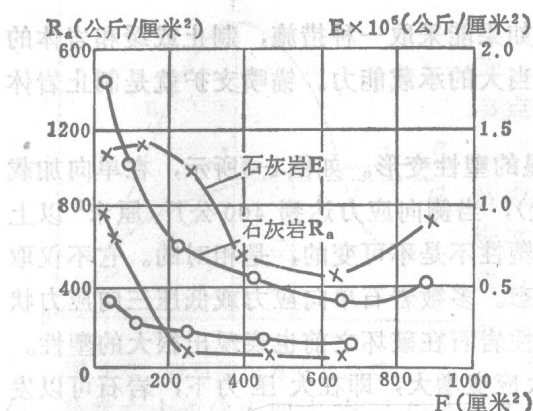


图 1-5 岩石单向抗压强度与试块尺寸关系

3. 在三向压力作用下, 岩石强度随侧压的增大而迅速提高。从试验资料可知, 岩石的三向抗压强度与侧向压力之间存在如 (1-7) 式所示之关系, 但对一些岩石来说, 仅适用于某一应力范围。

$$R_a''' = R_a + K\sigma_c \quad (1-7)$$

式中 R_a''' ——岩石的三向抗压强度, 公斤/厘米²;

R_a ——岩石的单向抗压强度, 公斤/厘米²;

σ_c ——试验时的侧向压力, 公斤/厘米²;

K ——与岩石种类有关的系数。

表 1-2 几种岩石的K与 σ_c 测值

岩石种类	K	σ_c (公斤/厘米²)
致密砂岩	6.20	≤600
灰绿色铝土矿	4.75	≤400
紫红色铝土矿	7.50	≤400
豆状铝土矿	2.75	≤800
红色砂岩	5.50	≤400
大理岩	3.75	≤400
白云质石灰岩	5.56	≤800

二、岩石的强度条件

强度条件是指材料出现危险状态的条件。

在目前, 一般认为, 摩尔强度理论能较好地反映出岩石的强度条件。因此, 这个理论在岩石力学中得到了广泛的应用。

(一) 应力圆

从材料力学中可知, 物体在二向应力状态时斜截面的应力有如下关系:

$$\left[\sigma - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \right]^2 + \tau^2 = \left[\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \right]^2 \quad (1-8)$$

式 (1-8) 是个圆的方程。这表明不同斜截面上的 σ 、 τ 要满足一个圆的关系。这个圆的圆心是在 σ 轴上, 其座标是 $\left[\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3); 0 \right]$, 而圆的半径为 $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$ 。圆周上任一点的座标值, 均代表通过该岩石点任一截面上的剪应力和正应力。通常称此圆为应力圆或摩尔圆 (图1-6)。实际上, 应力圆就是受力岩石某点的各个截面上应力的图象描述。

以上所述为双向应力状态的应力圆, 对于各种不同应力状态的应力圆, 可以用同样方法作出。

(二) 摩尔强度理论

摩尔强度理论认为材料的破坏, 主要是由于某一截面上的剪应力达到了一定限度, 同

时也与该面上的正应力有关。因为剪切的结果，会使材料内部面与面之间发生相对滑动，这样就在两面之间产生内摩擦力以阻止剪切滑动。而内摩擦力的大小又与面上的正应力有关。因此，材料的破坏决定于剪应力及同一面上的正应力。可以设想，在最大剪应力面上的正应力，有可能是较大的压应力，因而使剪切滑动较为困难。故材料的破坏就不一定发生在最大剪应力的作用面上，而发生在剪应力 τ 与正应力 σ 成一不利组合的面上。或者说，破坏面上的剪应力 τ° 与该面上正应力 σ° 成一特定的函数关系。即 $\tau^\circ = f(\sigma^\circ)$ 。这个函数在 σ - τ 座标图上是一条曲线，通常称其为强度曲线。

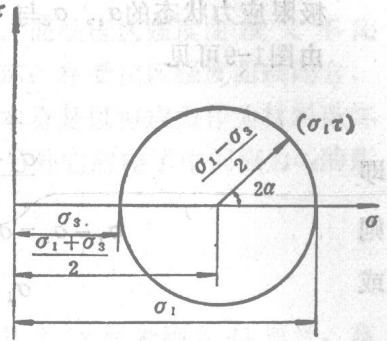


图 1-6 应力圆

摩尔认为可以不考虑 σ_2 的影响，当采用 σ_1 、 σ_3 的不同组合，通过一系列试验便得到一系列极限应力圆，作这些极限应力圆的包络线，则该包络线即为所求强度曲线 $\tau^\circ = f(\sigma^\circ)$ (图 1-7)。

(三) 岩石强度曲线

包络线的形式是由实验来确定的，对岩石来说一般常为斜直线或曲线。为了应用上的方便，以及考虑地下工程的特点，一般都近似的以斜直线 (图 1-8) 作为岩石的强度曲线。这样，岩石强度条件就具有了很简单形式：

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1-9)$$

式中 τ ——某一截面上的抗剪强度，公斤/厘米²；
 c ——岩石的粘结力，公斤/厘米²；
 σ ——正应力，公斤/厘米²；
 φ ——岩石的内摩擦角，度。

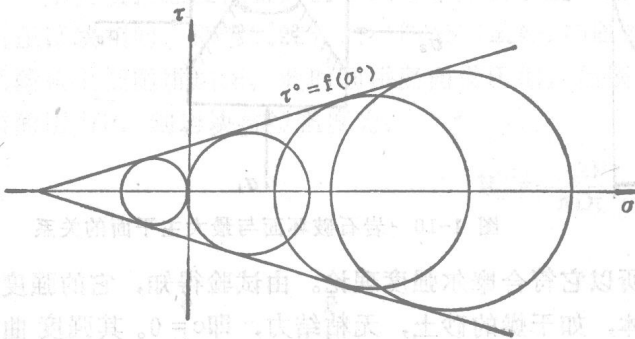


图 1-7 包络线绘制

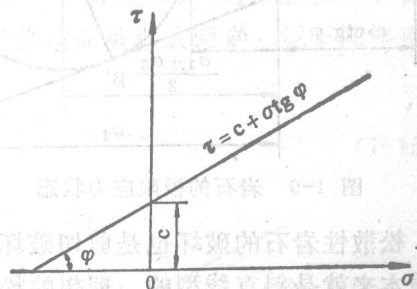


图 1-8 斜直线型岩石强度曲线

因此，岩石的强度条件是：对于受力体内任一点的应力状态所划出的应力圆，不能超出此斜直线。对于双向及三向应力状态 ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) 只要以 σ_1 与 σ_3 构成的最大应力圆判断就行了。这也就是说，受力体内一点的应力圆与斜直线的关系是：若应力圆不超出强度曲线，该点就不破坏；若应力圆与强度曲线相切，则处于极限状态；应力圆一旦与强度曲线相交，岩石便破坏，便移动，迫使应力转移，直到应力圆与强度曲线相切，又重新平衡。所以破坏的岩石如能平衡，则其应力都处于极限状态 (图 1-9)。

极限应力状态的 σ_1 、 σ_3 与 c 、 φ 之间的关系如下:

由图1-9可见

$$O'B = (OO' + OA)\sin\varphi$$

即
则
或

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} &= \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + c \operatorname{ctg} \varphi \right) \sin \varphi \\ \sigma_1 - \sigma_3 &= \sigma_1 \sin \varphi + \sigma_3 \sin \varphi + 2c \cos \varphi \\ \sigma_1 &= \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

(1-10) 式便是以 σ_1 与 σ_3 表示的岩石强度条件。

从图1-9中还可以决定破坏面的方向:

$$2\alpha = 90^\circ + \varphi$$

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \quad (1-11)$$

α 是破坏面与最大主平面的夹角(图1-10), 因强度曲线上下对称(图1-9), 故破坏面也是成对存在的, 两组破坏面之间的夹角为 $90^\circ - \varphi$, 也就是说破坏面与最大主应力方向夹角为 $45^\circ - \frac{\varphi}{2}$ 。

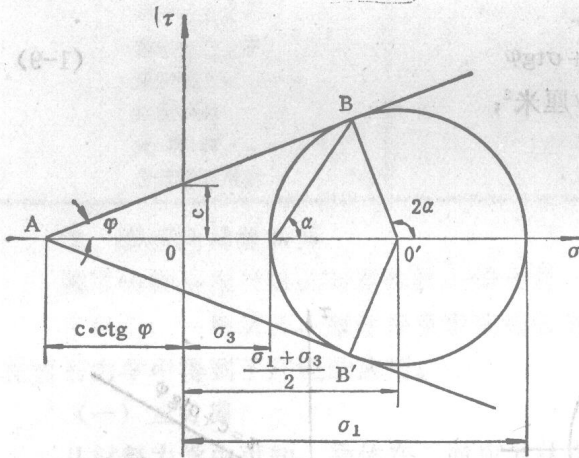


图 1-9 岩石的极限应力状态

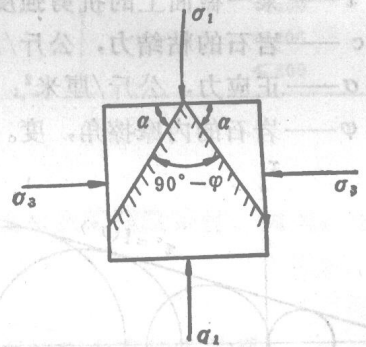


图 1-10 岩石破坏面与最大主平面的关系

松散性岩石的破坏也是剪切破坏, 所以它符合摩尔强度理论。由试验得知, 它的强度曲线本来就是斜直线型的。理想的松散体, 如干燥的砂土, 无粘结力, 即 $c=0$ 。其强度曲线是通过坐标原点的斜直线。其方程式为:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (1-12)$$

或

$$\sigma_3 = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \sigma_1 \quad (1-13)$$

(四) 摩尔强度理论的优缺点

摩尔强度理论的优点: 首先, 它用摩尔圆和 σ 、 τ 平面就能反应任何一种应力状态, 并和强度条件结合起来, 以检验岩石是否破坏及破坏后破坏面的方向。其次, 强度曲线倾斜向上, 且在受压区逐渐开放, 这说明抗压强度大于抗拉强度, 与岩石的性质相合; 这也