

矿山岩石力学

李通林 谭学术 刘传伟 编

重庆大学出版社

TD31
22
3

矿山岩石力学

李通林 譚学术 刘传伟 編

18
重庆大学出版社

前 言

矿山岩石力学是矿业科学的理论基础，是研究岩体的力学性能、力学现象及其规律的一门科学。本书较全面、系统地介绍了本学科的基本知识、基本理论和基本技能，主要目的在于使学生掌握现代岩石力学的基础知识，加强对采矿工程技术人员的基本训练，掌握矿山岩石力学的基本技能，并为进一步深造奠定基础。

本书由谭学术编写第一章、第三章和第九章，刘传伟编写第四章、第五章和第八章，李通林编写绪论、第二章，第六章，第七章和第十章。全书由李通林统稿。

由于编者水平有限，书中的缺点、错误敬请读者批评指正。

编 者

1990年1月

目 录

绪 论

第一章 岩石的物理力学性质	(6)
第一节 概述.....	(6)
第二节 岩石的物理性质.....	(6)
第三节 岩石的力学性质.....	(10)
第四节 岩石的扩容.....	(27)
第五节 岩石的流变性质.....	(30)
第六节 岩石的各向异性.....	(40)
第七节 岩石的强度理论.....	(47)
思考题与习题.....	(60)
第二章 结构面的力学性质	(62)
第一节 结构面类型及其特征.....	(62)
第二节 结构面的变形特征.....	(67)
第三节 结构面的抗剪强度.....	(71)
第四节 结构面的力学效应.....	(78)
思考题与习题.....	(83)
第三章 岩体力学性质及其分类	(84)
第一节 岩体的强度.....	(84)
第二节 岩体的变形.....	(91)
第三节 岩体的分类.....	(95)
思考题与习题.....	(104)
第四章 原岩应力及其测量	(106)
第一节 概述.....	(106)
第二节 重力应力.....	(107)
第三节 构造应力.....	(108)
第四节 地壳浅部原岩应力的变化规律.....	(110)
第五节 影响原岩应力分布的因素.....	(113)
第六节 原岩应力测量.....	(114)
思考题与习题.....	(130)
第五章 巷道围岩应力分布及其稳定性分析	(131)
第一节 巷道围岩弹性区的次生应力.....	(132)
第二节 塑性区次生应力.....	(141)
第三节 巷道围岩位移.....	(147)
思考题与习题.....	(152)

第六章 井巷地压	(153)
第一节 地压的概念.....	(153)
第二节 变形地压计算.....	(159)
第三节 水平巷道松动地压计算.....	(165)
第四节 竖井地压.....	(177)
思考题与习题.....	(183)
第七章 井巷维护原则与喷锚支护设计	(185)
第一节 井巷维护原则.....	(185)
第二节 喷锚支护原理.....	(187)
第三节 锚杆设计与计算.....	(190)
第四节 喷射混凝土设计与计算.....	(192)
第五节 喷锚支护.....	(195)
第六节 喷锚支护类型的选择.....	(202)
思考题与习题.....	(206)
第八章 采场地压	(208)
第一节 概述.....	(208)
第二节 空场法地压.....	(214)
第三节 充填法地压.....	(231)
第四节 崩落法地压.....	(235)
第五节 覆盖岩层的破坏与移动规律.....	(242)
第六节 采场地压控制方法.....	(248)
第七节 冲击地压及其控制.....	(251)
思考题与习题.....	(256)
第九章 地压模拟研究	(258)
第一节 概述.....	(258)
第二节 相似材料模拟法.....	(258)
第三节 光弹性模拟法.....	(264)
思考题与习题.....	(272)
第十章 地压现场观测	(273)
第一节 概述.....	(273)
第二节 围岩位移测量.....	(274)
第三节 支架载荷测量.....	(277)
第四节 声测法.....	(281)
第五节 弹性波测试.....	(286)
第六节 视电阻率法.....	(290)
第七节 光弹性应力计和应变计.....	(293)
思考题与习题.....	(300)
参考文献	(301)

绪 论

一、矿山岩石力学的研究对象

矿山岩石力学是研究采矿工程所影响的那一部分地壳内岩体力学现象和这些力学现象所引起的有关规律的科学。具体探讨岩体在力场作用下所发生的变形、破坏和移动的规律，据此对井巷和采场的稳定性进行分析，为采矿工程设计和维护安全生产提供理论依据，以便有效地开采矿产资源。

岩体是矿山岩石力学的主要研究对象，学习矿山岩石力学首先必须对岩体有一个明确的认识，这样才便于研究它。

岩体是地质体，它的形成延续了漫长的地质年代。在岩体形成和存在的整个地质历史中，由于受各种地质作用的影响和各种构造力的作用，使岩体遭到不同程度的地质破坏。因此，它不同于其它力学所研究的材料。岩体具有多种多样复杂的特性，即使是由相同物质组成的岩体，也会存在很大的差异，这就是岩体性质非常复杂的根本原因。

从岩石力学观点上，如何看待所研究的对象——岩体？

1. 岩体是非均质各向异性体 一定范围内的岩体均由许多不同种类的岩石构成，每种岩石所包含的矿物成分又各不相同，矿物颗粒的形状与大小及其空间排列方式也有很大差异，所以其物理力学性质相差甚远。于是构成了岩体组成的非均质和物理力学性质的各向异性。

2. 岩体内存在着初始应力场（原岩应力场） 岩体在形成过程中和形成以后，由于受各种地质构造作用的影响，在岩体内存在有构造应力。又因岩体本身受地心吸引而形成重力。构造应力和重力是岩体产生力学现象的原动力。

构造应力场以水平应力为主。地球自转角速度的变化而产生地壳水平方向的运动是造成构造应力以水平应力为主的重要原因。

重力应力场以铅垂应力为主，这是由于岩体自重受地心吸引作用的结果。

因而，原岩应力场的存在将直接影响岩体的应力状态和地压显现的规律。

3. 岩体内存在着裂隙系统 由于岩体在形成时期和形成以后受各种构造应力的作用，所以在岩体中产生了一系列层理节理、裂隙和断层。这些弱面将岩体切割成岩块，使岩体的完整性和均匀性遭受破坏。同时，由于弱面本身的种类和成因不同，其力学性质也不一样，因此，岩体是非常复杂的非均质各向异性体。所以，岩体既是断裂的，又是连续的，是断裂与连续的统一体，可称为裂隙介质或准连续介质。

从上述特点可知，岩体既不是理想的弹性体，又不是典型的塑性体，既不是连续介质，又不是松散介质，而是一种特殊的、复杂的地质体，这就造成了研究它的困难性和复杂性。因此，若只用一般的固体力学理论尚不能完善地解决岩体工程中的所有问题。

二、岩石力学的发展

岩石力学最早起源于采矿工程，是为满足采矿工程的需要而产生的。天然岩体（原岩）

本来处于自然平衡状态，由于开采矿床，必须在岩体中开挖各式各样的空间（如巷道、采场），这就破坏了岩体的自然平衡状态。未受开挖和采动影响的岩体，在原始应力场作用下处于相对稳定状态，即自然平衡状态。当岩体被开挖和采动后，由于采掘空间对岩体应力场的扰动，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。岩体在此新出现的不平衡力场作用下，就要发生变形、甚至破坏和移动，一直达到新的平衡为止。

通常把次生应力场引起的岩体变形、破坏和移动的全过程称为矿山压力（简称地压）的显现，把地压显现中某一阶段的具体表现称为地压现象。地压显现从采矿工程开始开挖就出现并贯穿于开采工程的全过程。随着采矿工业的发展，人们对地压的认识逐渐深化并寻求其显现规律，用这些规律指导生产实践就出现了岩石力学的雏型。作为一门科学，岩石力学的发展大致可分为以下三个阶段：

二十世纪以前，岩石力学处于萌芽阶段。在这个阶段，由于生产规模较小，开采深度近于地表，开采空间不大，岩石力学主要研究的问题是巷道顶板冒落和地下开采所引起的岩石移动。我国明末科学家宋应星在1637年编著的《天工开物》是我国古代科学技术的名著，其中记有大量开采问题。1864年英国工程师古德恩维提出地表移动范围主要取决于采矿方法、岩石性质、矿床倾角和开采深度，这一论断在岩石移动的研究中至今仍起着重要作用。此外，在西欧最主要的煤层开采中，开始使用仪器观测地表变形，并提出保安煤柱和地表移动范围的实用规范。在这个时期内，研究人员注意的问题基本上是岩体外部的力学现象，所提出的关系式带有很大程度上的经验性，没有反映地压与岩体力学性质参数之间的关系。

20世纪50年代以前为岩石力学发展的第二阶段。在这个阶段，松散介质学派占主导地位，他们借助土力学理论解决岩石力学问题，提出巷道地压计算原理和采场地压假说。如M. M. 普洛托基雅可诺夫提出计算巷道地压的自然平衡拱理论和K. 太沙基提出由于地层应力传递所引起的巷道地压的计算方法。在地压研究方法方面，开始应用模拟法研究巷道和采场围岩的应力分布、变形和破坏过程。光弹模拟和相似材料模拟相继出现，从而利用模型研究所得的结果推断现场可能出现的地压现象。在研究设备上，本世纪初试制成功的卡曼型三轴（假三轴）试验机，为研究岩石力学性质提供了良好条件。在矿柱设计方面，应用面积承压理论来计算矿柱的尺寸。“三下”（河流下、铁路及公路下、建筑物下）开采也取得了较大的进展。

总之，这个阶段，更加深入地研究了岩石破坏的机理，将岩体作为松散介质或弹性介质，用连续介质力学或弹性理论研究岩体的应力、变形和位移。应当指出，在这个时期无论哪种地压计算方法均只考虑岩体重力，并未计入构造应力的影响。

从本世纪50年代到现在是岩石力学发展的第三阶段，也就是岩石力学发展的现代阶段。50年代初期，岩石力学以弹塑性理论为基础，将岩体视为弹塑性介质，应用弹塑性力学方法来研究岩体的应力、变形和位移。目前又在弹塑性分析的基础上引入流变理论，将某些岩体视为带粘性的介质，从而考虑了时间因素对岩体应力、变形及位移的影响。

随着电子计算技术的发展，用有限元解算岩石力学问题得以实现。目前，这种计算方法既能解算线性问题，又能解算非线性问题。单元的划分可计入岩体结构特征和节理的影响，处理节理单元。但因矿山压力的影响因素复杂，有限元法仍未能从定量的角度解决工程实际问题。它往往只能作为解析法的参考，对岩体应力状态作定性分析。近年来出现的边界元

法、离散元法是建立在严密的数学基础上,对单一介质简单边界问题的处理比有限元法速度快、误差小。

岩石力学从70年代起发展比较迅速,有关国际岩石力学会议相继召开,先后发表了大量论文,此后,岩体力学测试技术也逐渐完善,应力解除法及水压致裂法均可测出较深处的岩体应力。刚性试验机的出现,岩石应力-应变全过程曲线的测得,不仅更深刻地揭示了岩石的力学特性,同时对工程实践有更大的指导作用和重要的理论意义。在新奥法施工中,岩体位移测量技术取得了新的成就。

综上所述,岩石力学发展到现阶段,已逐渐形成完整的科学体系,作为力学的一个分支,成为一门独立的力学学科,服务于各种矿山工程。

三、岩石力学对矿山生产的指导作用

矿床开采工程中,地压控制是有效生产的重要工艺。地压显现往往给采矿工作带来巨大灾难,它不仅危害生产安全,而且会使矿山局部停产,甚至毁灭整个矿山,类似这样的事例在国内外并不罕见。

在露天开采方面,武钢大冶铁矿东、西露天矿从1967年至1979年间曾发生25次规模不同的滑坡,总滑落量达120万 m^3 ,其中1973年1月6日狮子山北帮西口,上从156水平下至84水平,发生了一次长117m、高72m的六个台阶的大滑坡,滑落量达36460 m^3 ,影响了它下部四个台阶的正常推进,滑坡清理达两年之久,清理量达59万 m^3 。美国亥俄明州的一个高岭土矿发生滑坡,滑落了大约3800万 m^3 的岩土,填塞了矿山附近的一个河谷,使上游形成了一个60m长的湖泊,导致整个矿山报废。捷克东摩拉维亚的一个粘土矿,由于全坡面失稳发生整体滑坡,淹没了附近一个村庄,死亡2000多人。

在地下开采方面,在一个时期里,由于人们对采场地压显现规律缺乏认识,再加上采矿生产只重视开采,忽视采空区处理,结果因地压活动失控而酿成灾害。这是值得引起注意的教训。山西大同马脊梁煤矿,顶板是厚50m以上的硬砂岩,不易冒落,采空区距地表56~106m,1975年9月18日当采空区面积达15万 m^2 时顶板突然冒落,由于空气突然压缩,井口喷出300m高的烟尘,地面建筑物摇晃,地表塌陷约7万 m^2 ,地震台记录到3.2级地震。

湖南锡矿山南矿用房柱法开采缓倾斜($10^\circ\sim 25^\circ$)中厚矿层,由于多年开采留下大片空区未处理,结果在1965~1971年间曾发生三次大规模地压活动,最大一次冒落面积达34000 m^2 。冒落区相邻采场的顶板、矿柱、巷道被压裂、破坏,坑内生产系统(通风、排水、运输、动力系统)严重破坏。地表下沉1m多,塌陷坑面积达96000 m^2 ,主井井架偏斜,冶炼厂烟囱弯曲变形。后来,其深部开采改用尾砂及胶结充填,未再出现大规模地压活动。

江西盘古山钨矿用留矿法开采急倾斜薄矿脉群,遗留空区长期未处理,当数条平行矿脉开采走向长达千米以上而几个中段的大片空区连成片时,导致大规模地压活动。当上、下平行矿脉采空后遗留的夹壁墙暴露面积为 $(120\sim 150)\times 150\text{m}^2$ 时,夹壁常从薄弱处折断倒塌,然后导致大冒落。1967年9月24日爆发了大规模毁灭性的地压显现,在3~4h内,有上万名巷道下沉,四个中段655个采场有373个倒塌。在地表,海拔1100m山脊拦腰断裂,裂缝最宽处达0.8m,地面塌陷面积达10万 m^2 ,形成一个从山顶到下部690m,中段垂高424m,南北宽225m,东西走向500m的塌陷漏斗。事故发生后致使该矿用了两年时间才恢复正常生产。

矿山岩石力学的任务,不仅在于防止这些毁灭事故的发生,而且要为更合理的采矿工艺

建立可靠的理论基础,摆脱采矿工程只凭经验管理的落后状态。诚然,经验是可贵的,尤其在矿山岩石力学还不十分成熟的时候,经验在指导生产中仍起着重要作用。但是,单凭经验会导致片面性,造成盲目的错误,甚至带来不能容忍的损失。

另外,由于地压理论的发展,更新了某些传统的地压旧概念,纠正了过去对地压认识上的片面性。例如,人们利用支架支承地压就存在片面性,认为支架越坚固、强度越高,就越能保证井巷的安全,其实作用在支架上的压力并非常量,而是随支架本身的性能及支架的架设时间等而变化,在许多情况下,采用承载能力较低的可缩性支架,更能保证井巷的安全。又如,以往常常视井巷围岩为载荷,只单纯地利用人工支护结构去支承围岩压力。实际上,围岩本身也具有较大的承载能力,充分利用围岩的承载能力,可以节省大量的支架材料。

虽然岩石力学最早起源于采矿工程,但迄今为止,在采矿工程中,人们还程度不同地忽视岩石力学的指导作用,往往只凭经验办事。如某矿在一条主要巷道的施工中,由于地压的作用,厚500mm的混凝土支架被压裂,施工人员根据传统经验认为厚度不够,又在表层套了一层500mm的混凝土支架,结果仍然无济于事,新套的混凝土层又出现了很大的裂缝。其实,地压的大小是由很多因素决定的,其中主要因素之一是支架的刚度。对于变形地压,支架刚度越大,支架上所受的壓力也越大,如果采用较薄的柔性支架,支架上所受的壓力反而会减小。武钢金山店铁矿正是使用了200mm的喷射混凝土支护,使一条巷道通过了原来500mm厚的钢筋混凝土支架都无法通过的大断层。因此,矿山工程技术人员掌握岩石力学知识,对采矿工业的发展将会起很大的促进作用。

四、采矿工程中岩石力学的特点

岩石力学是一门新兴的科学,属于地质学和力学之间的边缘科学,是力学的一个重要分支。它广泛应用于采矿、石油探采、交通、水电、建筑和国防工程。矿山岩石力学重点研究采矿工程中所涉及的岩石力学问题。在采矿工程方面,岩石力学有其独特之处。与其它工程相比,它的特点是:

1. 采矿工程结构物多处于地下较深部位,其它部门的地下工程多在地表或距地表几十米的范围内。目前,我国虽然多数矿山尚属浅部开采(通常700m以上的矿井为深部矿井,超过1000m的矿井为超深矿井),但一般也多在距地表三四百米的范围内,且已有部分矿井进入深部开采。深部岩体动态与地表附近大不相同,地表附近岩体的破坏形式一般为脆性断裂,而较深处岩体则属粘塑性破坏,也就是说,地表附近岩体是由于丧失凝聚力而破坏,破坏形式往往是裂隙的扩张,是突发性的,而深部岩体的破坏,则是某种程度的流动变形。其次,岩体的应力状态也不相同,浅部岩体垂直应力与水平应力之差一般很明显,深部岩体却相差不甚显著。上述情况使得矿山岩石力学所采用的地压计算方法和测试技术与其它工程相比有所不同。

2. 对矿山的地下结构物,只要求其在开采期间不致破坏或适时破坏,在开采后能维持平衡状态不危害地面安全即可。所以,在计算精度、安全系数及岩体加固等方面的要求一般均低于水利水电、交通、建筑和国防等部门的标准。

3. 由于矿山地质条件复杂,矿床赋存条件多样,故采矿工程结构物的位置受多种因素的制约,其选择性不大。同时,采掘工作面的随时变化,又增加了支护工作的困难,这就造成矿山岩石力学具有复杂性的特点。

以上特点表明，对矿山岩石力学的研究必须给以足够的重视，要结合工程实践，加强矿山岩石力学基础理论的研究。

五、采矿实践中的岩石力学问题

目前，在采矿生产实践中提出的一系列重大问题，需要从矿山岩石力学中寻求答案。因此，这些问题是岩石力学必须研究解决的重要课题，如：

1. 在特别困难条件下，井巷地压的控制方法。
2. 为了保证生产安全和最大限度地回收矿产资源，寻求适应岩体应力特征和地压显现规律的合理开采顺序、采矿方法及其结构要素以及采场维护方式。
3. 采空区的处理问题。
4. 防止地下开采所引起的滑坡。
5. 地下开采对地表建筑物的影响以及“三下”的安全开采问题。
6. 露天矿合理边坡角的确定及不稳定边坡的加固。
7. 岩爆问题。

从上述问题可以看出，矿山岩石力学在采矿工程中占有十分重要的地位，是采矿工程的基础。矿山岩石力学的发展水平是衡量一个国家采矿工业水平的重要标志，它反映采矿工业从单凭经验到有理论指导的完善程度。

六、矿山岩石力学的研究方法

矿山岩石力学的研究目的，主要在于总结生产实践中矿山压力显现的客观规律和控制方法，提出防止和消除地压危害的措施，研究利用地压落矿的方法，并以矿山岩石力学的理论为指导进行矿山设计、施工和生产，以便在安全、经济、高强度、高指标的原则下最大限度地开采地下资源。

矿山岩石力学的研究方法是科学实验和理论分析相结合，二者互相联系，互相促进。科学实验是理论分析的基础，理论是指导实践的根据。例如，确定岩体的物理力学参数是岩石试验中大量而普遍的工作，这项工作的直接目的是为工程服务的，同时，这些实验资料的积累又是发展理论研究的基础。

科学实验（包括实验室与现场实验，模拟研究与现场原位测量）是岩石力学理论形成和发展的坚实基础。一方面，岩石力学中概念和理论的产生以生产实践和科学实验为根据，另一方面，其概念与理论的发展需要生产实践和科学实验的检验和证实。

岩石力学是一门技术科学，它要求研究人员除掌握岩石力学的基础理论和有关知识外，还必须通晓其所服务部门的有关工程知识。只有这样才能取得理论与实践相结合的研究成果，解决工程实际问题。

第一章 岩石的物理力学性质

第一节 概 述

岩石是具有一定化学成分和一定结构、构造特征的矿物集合体，是构成地壳的主要物质。它可以是尺寸很小的矿物颗粒，也可以是相当大的岩体。岩体力学中，将岩石分成岩块和岩体。岩块是指从地壳岩层中切取出来的、无显著软弱面的岩石块体，例如，由钻探获得的岩芯，用爆破或其它方式获得的岩石碎块、岩样等。岩体经受过各种不同构造运动的改造和外营力次生作用的表生演化，所以，在岩体中存在着各种不同的地质界面，这种地质界面称为结构面，如层理面、节理面、裂隙和断层等。由这些结构面所切割或包围的岩体称为结构体。因此，岩体是指天然埋藏条件下大范围分布的、由结构面和结构体组成的地质体。总之，广义的岩石乃是岩块和岩体的泛称，而狭义的岩石则专指岩石块体（或称岩石材料）。

岩石力学中所以将天然岩体分成岩块和岩体，其目的是为了将未受损伤的完整岩石和受各种结构面切割而强度削弱的岩体二者在力学性质上的差异区别开来，同时，为了研究不同性质和分布的弱面对岩石强度的影响。由于岩块是不含弱面的完整岩石，所以岩石的强度比岩体的强度大得多。一般是以室内岩石试件实验所得的力学指标表示岩石的力学性质，而以现场大型试块实验所得的力学指标来表示岩体的力学性质。

工程中所涉及的是岩体，在设计前必须取得一定数量的岩体力学性质指标，然而，做大量岩体的力学性质试验是很不经济的。既然同种类的岩石与岩体的区别是体积大小和有无弱面存在，那么它们之间必然有一定的内在联系，因此，目前还是多以岩块的性质通过一定的转换关系找出岩体的力学性质，这样，既节约费用又节省时间。与岩体工程有关的岩石性质有物理性质和力学性质，表征这些性质的参数和指标是岩石力学计算中不可缺少的重要数据。因此，岩体工程中总要做大量的岩石物理力学性质的测量工作。当然，测试方法是否科学，所得的结果是否反映岩石客观存在的性质是很重要的。随着岩石力学理论和测试技术的发展，测试方法将不断更新，测得的有关指标将会更接近岩石实际状况。

第二节 岩石的物理性质

在岩石力学中，常用某种数据来描述岩石的某种物理性质，这些数据就是岩石的物理性指标，在岩体工程中，常用的物理性质有以下几种：

一、岩石的容重

单位体积内岩石（包括孔隙体积）的重量称为岩石的容重，其表达式为

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad \text{kN/m}^3 \quad (1-1)$$

式中 W ——被测定岩石试件的重量；

V ——被测定岩石试件的体积。

岩石的容重又可分为天然容重 (γ)、干容重 (γ_d) 和饱和容重 (γ_w)。它们的区别在于各种状态下试件重量的不同而造成数值上的差异, 即

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V}$$

$$\gamma_d = \frac{W_d}{V}$$

式中 W ——天然状态下岩石试件的重量;

W_w ——岩石试件在水饱和状态下的重量;

W_d ——岩石试件在105℃条件下烘至恒重的干重。

岩石容重的大小在一定程度上反映出岩石力学性质的优劣。通常, 岩石容重越大, 其力学性质越好。

二、岩石的比重(Δ)

岩石的比重就是岩石的干重量除以岩石的实体体积 (不包括孔隙体积), 再与4℃时水的容重之比, 即

$$\Delta = W_d / (V_0 \Delta_w) \quad (1-2)$$

式中 V_0 ——岩石试件的实体体积;

Δ_w ——4℃时水的容重。

岩石比重的大小取决于组成岩石矿物的比重。显然, 矿物的比重越大, 则岩石的比重也越大, 反之, 越小。因此, 含有矿物比重较大的基性和超基性岩石, 一般具有较大的比重, 而含有矿物比重较轻的酸性岩石, 则具有较小的比重。

三、岩石的孔隙度

岩石的孔隙度是指岩石中裂隙和孔隙的发育程度, 其衡量指标为孔隙率 (n) 或孔隙比 (e)。

1. 孔隙率 岩石内孔隙体积占原体积 (包括孔隙体积) 的百分比, 其值可按下列式计算:

$$n = \frac{V - V_0}{V} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中符号同前。

孔隙率直接反映出岩石中孔隙和裂隙所占体积的百分比, 所以, 孔隙率也是衡量岩石工程质量的重要指标之一。显然, 孔隙率越大, 岩石中空隙和细微裂隙也就越多, 岩石的力学性能也就越差。

2. 孔隙比 岩石中各种孔隙体积与原体积内固体矿物颗粒的体积之比, 即

$$e = \frac{V - V_0}{V_0} = \frac{n}{1 - n} \quad (1-4)$$

四、岩石的水理性

岩石遇水作用后,会引起某些物理、化学和力学等性质的改变,水对岩石的这种作用特性称为岩石的水理性。

1. 吸水性 岩石吸收水分的性能称为岩石的吸水性,其吸水量的大小取决于岩石孔隙体积的大小及其敞开或封闭程度等。岩石吸水性指标有吸水率、饱水率和饱水系数。

(1) 岩石的吸水率(V_1) 标准大气压力下,岩石吸入水的重量 W_1 与岩石干重量 W_d 之比,即

$$V_1 = \frac{W_1}{W_d} \times 100\% \quad (1-5)$$

(2) 岩石的饱水率(V_2) 高压(150个大气压)或真空条件下,岩石吸入水的重量 W_2 与岩石干重量之比,即

$$V_2 = \frac{W_2}{W_d} \times 100\% \quad (1-6)$$

(3) 岩石的饱水系数(K_s) 岩石吸水率与饱水率之比,即

$$K_s = \frac{V_1}{V_2} \quad (1-7)$$

吸水性较大的岩石当吸水后往往产生膨胀,它会给井巷支护造成很大的压力。

2. 抗冻性 岩石的抗冻性是指岩石抵抗冻融破坏的性能,它是评价岩石抗风化稳定性的重要指标。

岩石经过反复冻结与融解,会使强度降低,甚至引起破坏。其主要原因是由于岩石中所含各种矿物的膨胀系数不同,当温度发生变化时,岩石膨胀不均而导致岩石结构破坏,另一原因是因岩石中水分冻结所形成的膨胀压力所致。

岩石的抗冻性用抗冻系数 C_f 表示,它是指岩石试件在 $\pm 25^\circ\text{C}$ 的温度区间内,反复降温、冻结、融解、升温,然后测量其抗压强度的下降值($\sigma_c - \sigma_{c,f}$),以此强度下降值与冻融试验前的抗压强度 σ_c 之比的百分率作为抗冻系数 C_f ,即

$$C_f = \frac{\sigma_c - \sigma_{c,f}}{\sigma_c} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中 σ_c ——冻融试验前岩石试件的抗压强度;

$\sigma_{c,f}$ ——冻融试验后岩石试件的抗压强度。

3. 软化系数 岩石中含水量的大小也会影响岩石的强度。含水越多,岩石的强度越低,通常以软化系数 η 反映这种关系。所谓软化系数,是指岩石试件在饱水状态下的抗压强度 σ_c 与在干燥状态下的抗压强度 σ'_c 的比值,即

$$\eta = \frac{\sigma_c}{\sigma'_c} \quad (1-9)$$

各类岩石的软化系数约在0.45~0.9之间(见表1-1)。

五、岩石的透水性

在一定的压力作用下,地下水可以透过岩石的性能称为岩石的透水性。岩石透水性的大小不仅与孔隙度有关,还与孔隙大小和贯通程度有关。衡量岩石透水性的指标为渗透率(或

某些岩石的软化系数 η_c 的试验值

表1-1

岩石种类	η_c	岩石种类	η_c
花岗岩	0.80~0.98	砂岩	0.60~0.97
闪长岩	0.70~0.90	泥岩	0.10~0.50
辉长岩	0.65~0.92	页岩	0.55~0.70
辉绿岩	0.92	片麻岩	0.70~0.96
玄武岩	0.70~0.95	片岩	0.50~0.95
凝灰岩	0.65~0.88	石英岩	0.80~0.98
白云岩	0.83	板岩	0.68~0.85
石灰岩	0.68~0.94	千枚岩	0.76~0.95

称渗透系数) K 。

保留在岩石孔隙中的水, 如果孔隙两端出现压力差, 水即可从孔隙中流出, 如图1-1所示。通常假定水沿着孔隙或裂隙流动时服从达尔西定律, 即水流速度与水力梯度降成正比, 其表达式为:

$$v = -K \frac{h_2 - h_1}{\Delta l} = -K \frac{dh}{dl}$$

所以 $K = -\frac{v \Delta l}{h_2 - h_1} = -\frac{v dl}{dh} \quad (1-10)$

式中 v ——渗透速度, $v = \frac{dQ}{dA}$,

A ——渗透方向上的截面积;

Q ——通过的流量;

h_2 ——高压水头;

h_1 ——低压水头。

式中负号表示水的流向沿着水头减小的方向。总水头 h (孔隙水位上升的高度) 可以用孔隙端部的压力 p 和参考基准面以上的高度 z 表示, 即

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + z$$

式中 γ_w ——水的容重。

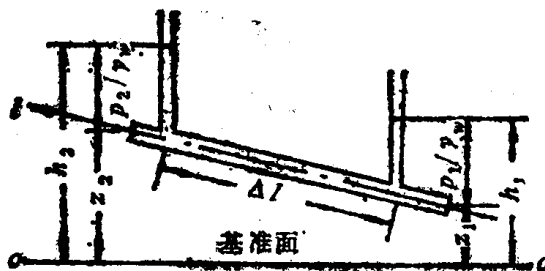


图1-1 水的渗透速度

六、岩石的碎胀性

岩石破碎后其体积比原体积增大的性能称为岩石的碎胀性, 通常用碎胀系数 ξ 表示。如果以 V 表示原岩的体积, V_p 表示碎胀后的岩石体积, 那么 V_p 与 V 之比称为岩石的碎胀系数, 即

$$\xi = \frac{V_p}{V} > 1 \quad (1-11)$$

碎胀系数是岩石物理性质的重要参数之一，是采矿工程中经常用的数据。例如，掘进工作面装车量的计算；充填法中充填量的计算；全部陷落法顶板崩落高度的决定等，都需要碎胀系数参与计算。但岩石破碎后在其自重作用下又逐渐压实，因此，岩石的碎胀系数不是一个固定值，是随时间而变化的。不能再压密时的碎胀系数称为永久碎胀系数。永久碎胀系数最小，也称剩余碎胀系数。

第三节 岩石的力学性质

岩石的力学性质是指岩石在受力后所表现出来的某种力学特性，它主要包括岩石的变形特性和岩石的强度特性。

一、岩石的变形特性

岩石在载荷的作用下，首先发生的物理现象就是变形，随后，当作用的载荷不断增加，或者当载荷超过某一数值并保持不变时，随着载荷作用时间的增长，会导致岩石的破坏。

岩石在载荷作用下的变形可表现为弹性变形、塑性变形和流变变形。然而，岩石的变形性质并非岩石的绝对属性，它与受力状态、所处的环境有关。同一种岩石在不同的受力状态下可以有完全不同的变形特征。

通过岩石的变形试验，可对岩石的变形特性进行全面深入的了解。由变形试验绘制的应力-应变曲线，即可对岩石的变形特性进行分析研究。岩石变形试验有单轴试验和三轴试验，现分述于下：

1. 岩石在单轴压缩状态下的应力-应变曲线 米勒（Miller）根据 28 种岩石的大量单轴试验资料，将岩石的应力-应变关系曲线划分成六种类型，如图 1-2 所示。

类型 I 应力与应变关系是一直线或者近似直线，直到试件发生突然破坏为止。具有这种变形类型的岩石有玄武岩、石英岩、白云岩以及极坚固的石灰岩。由于塑性阶段不明显，这些材料具有弹性性质。

类型 II 应力较低时，应力-应变曲线近似于直线，当应力增加到一定数值后，应力-应变曲线向下弯曲，随着应力逐渐增加而曲线斜率也就越变越小，直至破坏。具有这种变形性质的岩石有较弱的石灰岩、泥岩以及凝灰岩等，这些材料具有弹-塑性性质。

类型 III 在应力较低时，应力-应变曲线略向上弯曲。当应力增加到一定数值后，应力-应变曲线逐渐变为直线，直至发生破坏。具有这种变形性质的代表岩石有砂岩、花岗岩、片理平行于压力方向的片岩以及某些辉绿岩等。从力学属性来看，这种变形性质属于塑-弹性性质。

类型 IV 应力较低时，应力-应变曲线向上弯曲，当压力增加到一定值后，变形曲线成为直线，最后，曲线向下弯曲，曲线似 S 型。具有这种变形特性的岩石大多数为变质岩，如大理岩、片麻岩等。这种材料具有塑-弹-塑性性质。

类型 V 基本上与 IV 相同，也呈 S 型，不过曲线斜率较平缓。一般发生在压缩性较高的岩石中。应力垂直于片理的片岩具有这种性质。

类型 VI 应力-应变曲线是岩盐的特征曲线。开始先有很小一段直线部分，然后有非弹性的曲线部分，并继续不断地蠕变。某些软弱岩石也具有类似特性。这种材料具有弹-塑-蠕

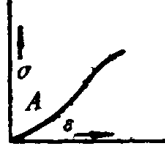
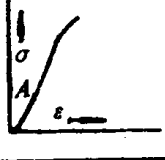
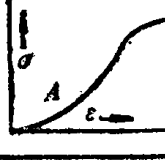
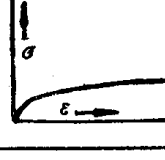
曲线类型	所属岩石例举	曲线类型	所属岩石例举
I型—弹性变形 	石英岩 玄武岩 白云岩	II型—弹塑性变形 	凝灰岩 软弱灰岩 泥岩
III型—塑弹性变形 	花岗岩 片岩 砂岩	IV型—塑、弹、塑变形 	变质岩居多, 如: 片麻岩 大理岩
-V型—塑、弹、塑变形 	高压缩性岩石居多 如: 荷载垂直于片理的 片岩	VI型—弹、塑、蠕变变形 	盐岩 某些具有蠕变特性的 软弱岩石

图1-2 岩石应力-应变曲线典型类别图

变性质。

以上这些应力-应变关系曲线中，向下弯的曲线（类型II）和S形曲线在高应力时出现的下弯段，是由于在高应力作用下岩石内部形成细微裂隙和局部破坏的缘故；而向上弯曲的曲线（类型III）以及S形曲线在低压时出现的向上弯曲段，是由于岩石在压力作用下其张开裂隙或微裂隙闭合的结果。由于张开裂隙或微裂隙闭合而引起的岩石变形是不可恢复的，属于塑性变形的性质。此外，在裂隙两侧面一般并不光滑平整，而总是有高低不平的凸突部分，裂隙闭合过程中，裂隙面上的凸突部分先接触，并产生弹性变形。随着载荷的增加，这些凸突部分总的接触面积增大，而应变减小，这就决定着应力-应变曲线的非线性性质（非线性弹性）。这一部分曲线的长度依岩石裂隙性的状态和性质而定。在无裂隙的完整岩石中，一般情况下不会出现这种性质。

2. 单轴压缩状态下反复加载与卸载时的岩石变形特性 对于线弹性岩石，加载曲线与卸载曲线完全重合，多次反复加载、卸载时，岩石的应力-应变曲线都沿同一直线往返。

对于完全弹性的岩石，其加载、卸载曲线也完全重合，但应力-应变关系是曲线，不是直线。反复多次加载与卸载，其应力-应变路径仍服从此曲线关系。对于弹性岩石，虽然加载曲线与卸载曲线不重合，但是，反复加载与卸载时，应力-应变曲线总是服从此环路的规律。

对于弹塑性岩石，反复加载与卸载时，其应力-应变关系则不服从上述规律，而是按一

种新的曲线变化。其应力-应变曲线具有以下特点：

(1) 卸载应力水平一定时，每次循环中的塑性应变则逐渐减小。可以设想，加、卸载循环次数足够多后，塑性应变增量将趋于零。由此可知，加载、卸载循环次数越多，岩石越接近弹性变形，如图1-3所示；

(2) 当卸载应力水平一定，加载、卸载循环次数足够多时，卸载曲线与其后一次再加载曲线之间所形成的滞回环的面积将越变越小，且彼此越靠越近，并趋于平行，如图1-3(a)所示。

(3) 当卸载起点的应力水平逐步提高，即后一卸载起点的应力总是高于前一卸载起点的应力时，各次卸载起点的联线，其形状与连续单调加载情况下的应力-应变曲线的形状基本吻合，如图1-4中的OPHC曲线。

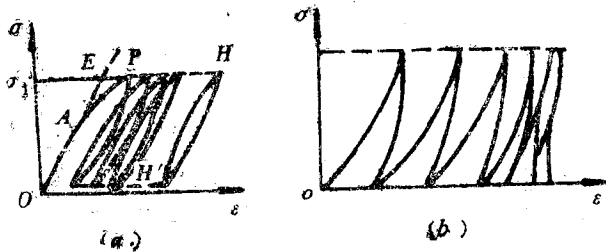


图1-3 弹塑性岩石在常应力水平下加、卸载循环时的应力-应变曲线

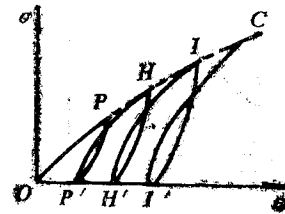


图1-4 弹塑性岩石在变应力水平下加、卸载循环时的应力-应变曲线

3. 岩石应力-应变的全过程曲线 上面所讨论的变形是岩石试件在普通材料试验机上的试验结果，岩石试件的破坏形式是突发的，在岩石破坏的一瞬间，岩石发生崩裂，碎块向四面飞射，并伴有很大的声响，其原因是材料试验机的刚度不足造成的，即岩石试件的刚度大，试验机的刚度小。材料试验机在岩石试件受载变形的同时也发生变形，并积蓄了相当的变形能，当岩石试件受载到达破裂的瞬间，试件的承载能力下降，它对试验机失去支撑的能力，试验机在试验过程中所积存的应变能就在这一瞬间迅速释放，致使试验机冲击岩样，使它炸裂成碎块，于是岩样破裂，试验机自动卸载，岩样破坏的全过程就不能继续观测。由这种非刚性试验机试验所得的结果，仅仅反映了岩石在破坏前期的应力-应变关系，如图1-2所示的六种典型的应力-应变曲线。为了观测岩样破坏的全过程，必须采用刚性很大的材料试验机，即刚性材料试验机。由于其刚性大于岩样的刚性，试验过程中，试验机积蓄的应变能很小，岩样破坏时不受很大应变能的冲击，而是表现为缓慢破坏。利用配有伺服系统的刚性试验机作岩石的应力-应变试验，即可绘制出岩石的应力-应变全过程曲线，如图1-5所示。它不仅反映了岩石破坏前期的本构关系，也反映了岩石破坏后期的本构关系，为进一步研究岩石的变形特性和强度特性提供了必要的资料。

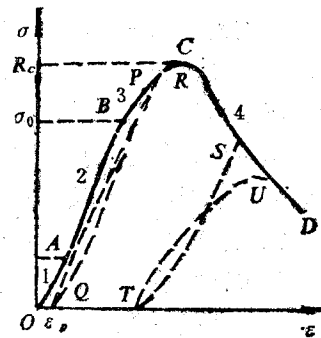


图1-5 全应力-应变曲线

从图1-5中可以看出，典型的岩石应力-应变全过程曲线可分成四个特征区域，即