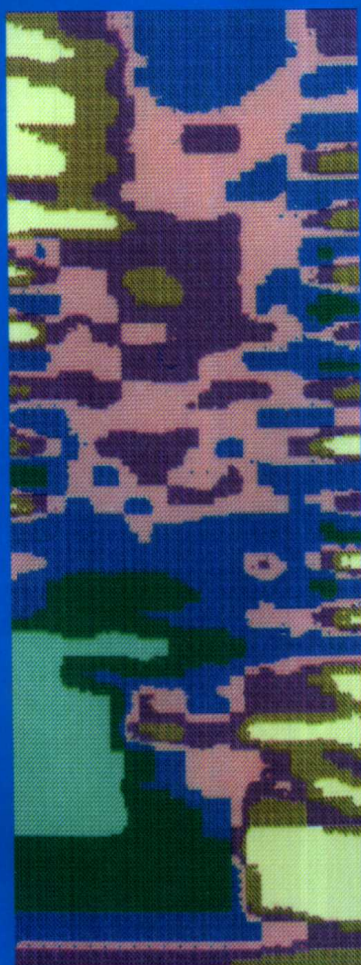


岩体测试与探测



程久龙 于师建 编著
王渭明 朱 鲁

地震出版社

山东省自然科学基金资助项目
煤炭科学基金资助项目

岩体测试与探测

程久龙 于师建 编著
王渭明 朱 鲁



地震出版社

2000

内 容 提 要

本书比较系统全面地介绍了当前岩体工程中主要的岩体测试和探测技术方法, 内容包括: 岩石力学性质测试、原岩应力测量方法、电阻应变测试技术、采矿工程围岩移动破坏探测、岩体弹性波(声波、瑞雷波)探测技术、电阻率法及电磁波法探测技术。

本书可作为高等院校岩土工程、采矿工程、安全技术与工程、应用地球物理、水文与工程地质、岩石力学等相关专业教学参考书, 亦可供科研及现场工程技术人员参考。

岩体测试与探测

程久龙 于师建 编著
王渭明 朱 鲁

责任编辑: 吴 冰

责任校对: 耿 艳

*

地 震 出 版 社 出版发行

北京民族学院南路9号 邮码 100081

山东科技大学印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 10.75印张 275千字
2000年5月第一版 2000年5月第一次印刷
印数 0001-1000

ISBN 7-5028-1743-3/P·1042

(2241)定价: 22.00元

前 言

岩体测试与探测学科是用实验测试方法和现场测量方法测定、分析和研究围岩由于动、静荷载的作用和赋存条件的改变所引起的移动和变形以及各种物理场参量的一门应用学科。它主要研究岩体应力和变形,物理场参数的信息采集、检测、分析处理的原理和技术。它是建立在信息学、电子学、计算数学、地球物理学、岩体力学、计算机以及仪器仪表的基础之上的。

岩体测试与探测是岩石力学的重要研究内容之一。岩石力学的发展离不开测试技术,而且岩体测试与探测技术的发展可以促进岩体力学科学研究水平的提高。

岩体测试与探测的内容广泛,技术方法很多,要解决的具体问题范围广,适应面宽。因此,不可能把所有的测试方法和探测方法都写入本书,而只能将当前应用面广、适用性强、效果好的技术方法加以介绍,其中包括作者近年来的研究成果(煤炭科学基金项目(92D105092)和山东省自然科学基金项目(99E08)资助)。本书的主要内容分为两部分,共6章。第1~3章主要介绍岩石力学性质测试、原岩应力测试、电阻应变测试技术等,偏重于岩体测试方法,所介绍的方法主要为国际岩石力学学会有关机构推荐使用的方法,剪表性强,适用面广;第4~6章主要介绍采矿工程围岩移动破坏探测、弹性波(声波、瑞雷波)探测、电阻率法探测、电磁波法探测等地球物理探测技术方法及其具体应用,偏重于岩体探测技术。

本书由程久龙(绪论、第4章部分、第5章、第6章)、王渭明(第1章、第2章)、于师建(绪论部分、第3章、第4章部分)、朱鲁(第6章第2节)分别编著,全书由程久龙、于师建统一审核和定稿。

孙振鹏教授、刘宗才教授、于红副教授对本书编写提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不妥或错误之处,敬请读者予以指正。

编著者

2000年3月于泰山

目 录

绪论	(1)
第1章 岩石力学性质测试	(3)
§ 1.1 岩块变形性质测试	(3)
1.1.1 岩块试验的样品制备	(3)
1.1.2 岩块在单轴压缩下的变形试验	(4)
1.1.3 岩块的全程变形测试	(7)
1.1.4 岩块在三向压缩下的变形测试	(11)
§ 1.2 岩块强度测试	(13)
1.2.1 单轴抗压强度测试	(13)
1.2.2 三轴抗压强度测试	(14)
1.2.3 岩块抗拉强度测试	(14)
1.2.4 岩块抗剪强度测试	(17)
1.2.5 不规则试件的强度测试	(21)
§ 1.3 岩体力学性质测试	(23)
1.3.1 岩体的变形测试	(23)
1.3.2 岩体抗剪强度测试	(35)
1.3.3 岩体抗压强度测试	(42)
第2章 原岩应力测量	(45)
§ 2.1 钻孔应力解除法	(47)
2.1.1 应力解除法的基本原理与类型	(47)
2.1.2 孔底应力解除法	(50)
2.1.3 孔径变形法	(54)
2.1.4 确定原岩空间应力的三孔汇交法	(56)
2.1.5 孔壁应变法	(61)
§ 2.2 水力压裂法	(66)
§ 2.3 应力恢复法	(69)
第3章 电阻应变测试技术	(72)
§ 3.1 电阻应变片	(72)
3.1.1 电阻应变片的结构、工作原理及分类	(73)
3.1.2 电阻应变片的工作特性及参数	(75)
§ 3.2 电阻应变仪	(79)
3.2.1 应变仪的结构原理及类型	(79)
3.2.2 应变电桥的工作原理	(80)
§ 3.3 电阻应变测量	(83)

3.3.1 应变片的粘贴与防护	(83)
3.3.2 应变片的接桥方式	(84)
3.3.3 电阻应变测量	(86)
第4章 采矿工程围岩移动破坏探测	(89)
§ 4.1 围岩移动破坏规律	(89)
4.1.1 巷道围岩的移动破坏规律	(89)
4.1.2 采场覆岩移动破坏规律	(90)
4.1.3 采场底板岩层移动破坏规律	(91)
§ 4.2 围岩移动破坏探测技术	(92)
4.2.1 水文地质钻孔探测法	(92)
4.2.2 钻孔分段注水法	(95)
4.2.3 岩层移动钻孔探测法	(97)
4.2.4 钻孔超声成像探测法	(98)
4.2.5 孔间无线电波透视法	(100)
第5章 岩体声波探测技术	(104)
§ 5.1 声波探测原理	(104)
5.1.1 声波在岩体中的传播特性	(104)
5.1.2 声波探测应用的参量	(109)
5.1.3 声速与岩体力学性质及结构状态的关系	(109)
5.1.4 声波振幅特征与岩体特性的关系	(111)
§ 5.2 声波探测仪器	(112)
5.2.1 声波激发方式	(112)
5.2.2 声波换能器	(112)
5.2.3 岩体声波探测仪器	(114)
5.2.4 声波参数的测量	(115)
§ 5.3 声波探测方法	(117)
5.3.1 换能器与被测岩体(石)的耦合	(117)
5.3.2 现场岩体声波探测方法	(117)
5.3.3 室内岩石试件测试	(119)
§ 5.4 声波探测的应用	(120)
5.4.1 岩体力学参数测定	(120)
5.4.2 岩体工程地质分类	(121)
5.4.3 围岩松动圈的探测	(122)
5.4.4 采场底板破坏深度探测	(122)
5.4.5 在冻结法凿井中的应用	(124)
5.4.6 注浆充填效果检测	(125)
5.4.7 声波测井	(126)
§ 5.5 声发射与微震技术	(127)
5.5.1 基本原理	(127)

5.5.2 监测方法及仪器	(127)
5.5.3 应用实例	(128)
第6章 岩体综合地球物理探测技术	(130)
§ 6.1 岩体电阻率法探测技术	(130)
6.1.1 电阻率法的理论基础	(130)
6.1.2 形变电阻率法	(134)
6.1.3 高密度电阻率法	(135)
6.1.4 应用实例	(137)
§ 6.2 岩体电磁波探测技术	(140)
6.2.1 矿井电磁波透视法	(141)
6.2.2 地质雷达	(151)
§ 6.3 瑞雷波探测技术	(157)
6.3.1 探测原理	(157)
6.3.2 工作方法	(158)
6.3.3 资料处理和解释	(158)
6.3.4 应用实例	(160)
参考文献	(163)

绪 论

地下岩体在天然条件下处于原始应力平衡状态。由于地下开挖（如矿物开采、水坝建设、地下工程建设等），被挖走的岩石或矿物原来所承受的应力必然转移到周围岩体中去，原始应力场随之产生扰动，这一过程随着开挖空间的不断扩大，一直向外扩展，使周围岩体产生移动、变形和破坏，其结果又使岩体内应力场建立新的平衡。地下采矿活动中出现的一系列灾害（如巷道失稳、顶板冒落、地表沉陷、顶底板突水等）直接地或间接地造成围岩移动、变形和破坏等。岩体移动、变形和破坏的程度与岩体的原始应力状态、力学性质、地质条件、开采条件等因素有着密切关系。在岩体应力场变化的同时，岩体的地球物理场（电流场、电磁场、弹性波场等）也相应地发生变化，因此，进行与岩体工程有关的力学参数和物理场参数的测量，可以为地下工程的合理设计和安全施工提供可靠的技术保障。

一、关于岩体测试与探测

本书中岩体测试与岩体探测的含义有所不同。岩体测试是建立在实验测量基础之上，是指对岩体内部或表面某一点处的表征岩体性质状态的力学参数进行的测量，如应变片测量，由于应变片的面积相对研究对象的尺寸小得多，可近似看作一点。岩石力学性质、原始应力场测试即属此类。

岩体测试方法经过几十年的实践与发展，各种方法都比较成熟，本书介绍的方法主要是国际岩石力学学会有关机构推荐使用的方法，代表了岩体测试的发展方向。

岩体探测是建立在岩体地球物理场测量基础之上，指在较大的范围内对反映岩体结构状态的物理场参量进行的测量，如电阻率、弹性波速度、电磁波衰减系数等。它所取得的物理量值是岩体某一体积的综合量值。

岩体探测是近十几年才逐渐发展起来的一门现场实验测量学科，是地球物理技术在岩体工程中的具体应用。本书所介绍的地球物理探测技术是近几年对围岩移动和破坏探测研究中具有明显效果的一些方法，其中包括作者近年来的科研成果。目前，新的探测技术和数据处理技术的进一步开发与应用，使探测精度大幅度提高。可以预言随着科学技术的发展与完善，岩体探测技术在岩体工程中将会发挥越来越重要的作用。

20 世纪中叶以来，由于世界采矿工程、水电工程和军事工程的推动，岩体测试与探测技术得到了比较显著的发展。例如，刚性试验机和伺服试验机的应用，将岩石力学性质的研究提高到了一个新的水平；节理的试验研究，使对岩体性质的认识日渐深入；各种应力解除方法及水裂法的应用，使各地区及不同深度岩体的原始应力，都能进行试验测定；综合地球物理方法及机械式传感器的应用，使对岩体工程中的变形、破坏等能够进行更有效的监控。

二、研究内容

为了满足岩体工程的科学研究、设计和安全生产的需要，岩体测试与探测的主要内容可归纳如下：

（1）岩石力学性质测试；

- (2) 岩体原始应力场测试;
- (3) 在岩体中进行开掘工作后, 围岩应力的重新分布测试;
- (4) 岩体和地下结构在动荷载作用下, 各种动力学和运动学参数的测量;
- (5) 岩体破坏探测;
- (6) 岩体工程施工质量及岩体加固效果的测试;
- (7) 岩体含水性探测;
- (8) 岩体中异常地质体探测。

三、研究方法

目前岩体测试与探测的方法和具体应用列于表 1。

表 1 岩体测试与探测方法

测试与探测方法		应 用
静力加载法		岩石力学性质测量
电阻应变测试法		岩体原始应力测量, 岩体应力重新分布测量
超声波探测法		岩体应力重新分布测量, 岩体破坏状况探测
水文地质探测法		岩体破坏状况探测, 水文地质勘查
综合 地球 物理 方法	形变电阻率法 高密度电阻率法 超声成像法 电磁波法 瑞雷波法	岩体破坏状况探测, 水文地质、工程地质探测

随着科学技术的飞速发展, 岩体测试和探测的新技术、新方法不断涌现, 信息处理方法更加先进, 探测准确度得到了大幅度提高。为了适应时代要求, 在本书编写过程中尽量把比较先进的技术, 特别是最近 10 年来在岩体探测方面比较重要的进展写入书中。这些进展包括:

- (1) 刚性试验机和伺服试验机;
- (2) 全应力应变曲线测试技术;
- (3) 单孔实测三维原岩应力, 水裂法实测原岩应力;
- (4) 高密度电阻率法;
- (5) 工程 CT 技术方法;
- (6) 电磁波探测法;
- (7) 瑞雷波探测法;
- (8) 全方位钻孔分段测漏技术。

随着岩体工程对岩体探测要求的提高和计算机控制及电子技术的发展, 岩体测试和探测技术在探测效率、探测精度等方面必将取得更快更大的发展。

第1章 岩石力学性质测试

岩石力学的科学实验是岩石力学研究工作的基础，进行岩石的物理力学参数测定、各项现场和室内的模型和原型测试，是建立岩石力学概念和理论的物质基础。岩石力学性质测试是岩石力学的科学实验的重要组成部分，它包括岩石的变形性质测试和岩石强度性质测试。岩石的变形性质测试与研究的目的，是建立岩石自身特有的应力-应变关系（又称本构关系）并确定有关参数；岩石强度性质的测试与研究的目的，是建立适应岩石特点的强度准则并确定有关参数；另外，岩石力学性质是岩石分类的重要依据之一，而岩石分类对生产技术管理以及支护和施工设备选型有着密切的关系。

岩石是岩块和岩体的统称。岩块是从岩体中取出的实体部分，它由一种（如石英岩、大理岩等）或几种（如花岗岩、玄武岩等）矿物组成，具有相对的均匀性，理想岩块应不含任何地质结构面。岩体是指地下工程周围较大范围内的岩石，由一种或几种岩类组成，并可能为岩脉或裂隙充填物所侵入，包括地质构造作用的明显影响，并为结构面（层面、节理、裂隙等）所切割。概括说来，岩体=岩块+结构面。可见岩体的力学性质与岩块力学性质、结构面的力学性质及其展布规律密切相关。因此，岩石力学性质测试分为岩块力学性质测试与岩体力学性质测试，前者一般在室内进行，后者一般在野外进行。

§ 1.1 岩块变形性质测试

为了研究岩块在外力作用下的变形规律，研究岩块变形和对岩块施加压力的函数关系，就应通过试验，把随着外力的增长而相应产生的变形情况记录下来。把应力与应变数值在坐标系统中用图表示，这样就获得了岩块的应力-应变曲线。

在对岩块进行室内试验研究中，有三种简单应力状态的基本试验：单向拉伸、单向压缩和扭转（纯剪）。由于测试技术的困难，目前所得到的单向拉伸和扭转的试验资料很少，多数岩块的应力-应变曲线和对应的力学参数都是由单向压缩试验获取的。

普通材料力学试验机上只能做出岩块达到峰点强度之前的应力-应变曲线，而峰点强度后的应力-应变规律的研究对岩体工程有重要意义，峰点强度后的岩块应力-应变曲线和峰点强度前的应力-应变曲线，合称岩块的全应力-应变曲线。岩块的全应力-应变曲线要利用特殊的加载手段（复式加载）或特殊的试验机（刚性试验机）进行试验才能获得。另外为了真实地反映岩块在工程岩体中或地层中的变形规律，还必须进行岩块的三轴压缩试验。

1.1.1 岩块试验的样品制备

1. 取样

为使岩样保持原有的物理力学性质，在采样的过程中，应使其原有的状态尽可能不受破坏，最好是打钻取样，取样时最好垂直于层面，偏斜不大于 5° 。遇到困难不能达到上述要求时，应注明偏斜角度。如只能用爆破法时，应当降低炮眼内的装药量，以减少爆破对岩样

的影响。

取样的位置和密度。取样的位置应根据岩石的岩性变化情况，分别在几个具有代表性的地点取样；当沿岩层厚度的岩性变化较大时，应分别在上、中、下不同部位取样。取样密度的原则是：工程的主要部位；地质条件复杂、岩性变化大的地点等，均应密一些。

同一种岩石各种物理力学性质之间都有一定的相互关系，同一组岩样所提供的各种物理力学参数，必须属于同一采样点，不允许在不同地点和不同部位取样后合并为同一组岩样。钻孔取样时，如果由于岩层太薄或岩心采取率达不到要求，可在邻近的巷道或钻孔中选择与原指定采样点同一岩层（岩性必须相同）采取补充试样，并在试验委托书中予以说明。

岩样取好后，立即用纸包好，纸上注明编号，升井或运到室内后立即浸腊整体封固。对松软、易吸水风化的煤和岩石最好能在井下立即包装封固。

2. 岩样的保存

岩样的保存不要超过 30 天，这样以便尽可能地保持天然水含量，直到试件的加工。切割后试件的处理，应根据试验的要求和试件的具体情况，用下述方法进行^[1,2]。

(1) 天然试件。为了保持岩样的天然含水量，试件加工应快速进行，试件制备后应立即试验，否则应将试件放在密封的玻璃缸内或用腊封起来。在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的温度和 $50\% \pm 5\%$ 的湿度环境下，试件在试验之前可保存 5~6 天。

(2) 干燥试件。可将制成的试件放在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 烘箱内干燥至恒重；对于不适合用烘箱干燥的试件，可在室内烘干，烘干时间根据温度、湿度等条件决定，但应在 4 天以上。

(3) 水饱和试件。将试件在水中浸泡 4 天或用真空排气法进行水饱和。

3. 试件描述

对试件在试验前后的基本状况进行描述是岩石力学试验中的基本而又重要的工作，其目的是为试验结果分析提供参考。其主要内容有：

(1) 岩性描述。记录岩样名称、颜色、主要矿物成分、结构构造、风化程度、裂隙发育等情况，对沉积岩类还应描述胶结物的性质（如泥质、铁质、硅质等）和胶结程度。

(2) 试件规格描述。测量试件尺寸是否在允许偏差范围内，并检查、观察试件是否平整、边线是否平行以及有无缺角、掉棱现象。

(3) 记录试验过程中的特殊情况。如试件破裂面未按预定面破裂、加荷速度过快等，并对破坏后的试件进行素描或摄影记录。

4. 试件的加工

按照各种试验对试件的规格和精度的要求，提出试件加工制作清单。根据清单的要求，在金刚石切石机、磨石机、钻石机和其它加工设备（如车床）上加工好试件。

以上 4 点对于岩样的各种试验均适用。

1.1.2 岩块在单轴压缩下的变形试验

1. 主要仪器设备

(1) 压力机是给试件施加轴向荷载并能进行压力测量的设备，应满足下列要求：

①能连续加载且没有冲击，并且有足够的吨位，使压力机能在总吨位的 10%~90% 之间进行试验；

②压力机的承压板，必须具有足够的刚度，其中之一须具有球形座，板面须平整光滑；

③承压板的直径应不小于试件直径，且不宜大于试件直径的两倍，如压力机承压板尺寸大于试件尺寸两倍以上时，需在试件上、下两端加辅助承压板，辅助承压板的刚度和平整度应满足压力机承压板的要求；

④压力机的校正与检验，应符合国家计量标准的规定。

(2) 电阻应变片、防潮材料及贴片设备。具体要求参见第3章有关内容。

(3) 电阻应变仪（或杠杆式、镜式引伸仪、机械式仪器等）。使用的电阻应变仪应符合仪器说明书的规定，详见第3章有关内容。除电阻应变仪外，也可使用精度能达到0.1%和量距能满足变形测定需要的其它仪表。

2. 试件要求

(1) 外型尺寸。多数岩块力学性质试验的试件为圆柱体，国际岩石力学学会实验室和现场试验标准化委员会（以下称 ISRM）建议：试件直径为 54mm，试件的高与直径之比（下称高径比）为 2.5~3.0，试件直径与岩石内最大颗粒尺寸的比值至少为 10:1。我国煤炭、水利、地质等部门多数规定试验应用直径为 50mm、高径比为 2:1 的圆柱体试件；也可采用 50mm×50mm×110mm 的立方体（长度×宽度×高度）试件。

(2) 规格要求和数量要求。关于试件的规格精度要求，可参考 ISRM 建议要求精度，即^[2]：

①试件的端面平坦，误差小于0.02 mm；

②试件的端面应垂直于试件轴，误差小于0.001rad(3.5′)；

③试件的每侧面应是光滑的，凹凸不平自由度和试件在整个范围内应平直到0.3 mm 以内。

④试件直径的量测应在试件高度的上部、中部和下部分别测量两个相互垂直的直径。其直径误差应小于0.1 mm，用直径平均值来计算横截面积。试件高度的测定精度为1.00 mm。

⑤每种岩样不应少于 5 块。此外，还应考虑到变异系数大于 15% 时，岩样数量要适当增加；为加工损耗等，制备足够试验数量的岩样。

3. 试验程序

(1) 电阻片的粘贴和防潮处理。具体要求参见第3章有关内容。

(2) 试件端面处理。当岩块在试验机承压板之间压缩时，会导致侧向膨胀，而压力机的承压板与岩块端面之间的摩擦力限制着侧向膨胀，就相当于起了侧向压缩的作用，这种侧向压缩作用在靠近两端面为最大，向试件中部渐渐变小，我们把这种现象称之为“端部效应”。为了较真实地反映岩块单轴压缩下的力学性质就必须消除或减小“端部效应”的影响，其措施除加长试件外（这就是要统一规定试件的高径比的原因），传统的做法是润滑试件端面；在试件端面与压板之间垫云母片或木板等便于减小侧向压缩的材料。ISRM 建议，在试件两端放置洛氏硬度不低于 HRC58 的圆盘钢垫块，垫块的直径等于试件直径 D 或 $D + 2\text{mm}$ ，垫块的厚度至少为 15mm。垫块表面应该磨光，其平整度应优于 0.005mm。

(3) 试件安装。将试件和端面垫块置于试验机压板之间，施加接触载荷，调整试件位置或球形支座，使其对中，防止偏心受压；同时还应检查应变测量系统的工作状态。

(4) 加载。加载速率对岩块的强度和应力-应变曲线有明显的影响。为了便于相互交流试验结果，一般都遵循 ISRM 建议的如下规定：对试件加载时，应保持恒定的应力速率，使得破坏发生在加载的 5~10min 以内。亦即应力速率在 0.5~1.0MPa/s 范围之内。如果不能

连续记录，就要在试验期间分阶段记录好荷载和对应的应变。在试验荷载范围内应至少记录 10 个读数，以便做出轴向和径向应力-应变曲线。

4. 测试数据整理

试验的目的是用来测定规则岩块试件在单轴压缩下的应力-应变曲线、弹性模量和泊松比。

1) 应力-应变曲线

在试验期间通过列表或做图记录施加载荷值、应变（包括纵向和横向应变）值。应变值可由电阻应变仪直接测出，应力等于施加载荷值除试件的原始横截面积。根据应力、应变的列表值，取 3 片电阻片测出的纵向应变和横向应变的平均值，在 σ - ϵ 坐标系下描点做出应力应变 σ - ϵ 曲线。注意，压应力和压缩应变为正。

图 1.1.1 为轴向应力与轴向应变和切向（横向）应变的关系曲线的典型图形， σ_c 为岩块的极限强度。多数情况下，只研究岩块轴向应力-应变曲线性质，在特定统一的试验条件下，该性质主要取决于岩石的矿物组成和结构、构造情况。根据对各种岩块进行综合系统试验的结果，岩块的应力-应变曲线大致可归纳为 4 种类型（图 1.1.2）：直线型（弹脆性）、下凹曲线型（弹塑性）、上凹型（塑弹性）、S 型（塑弹塑性）^[3,4]。

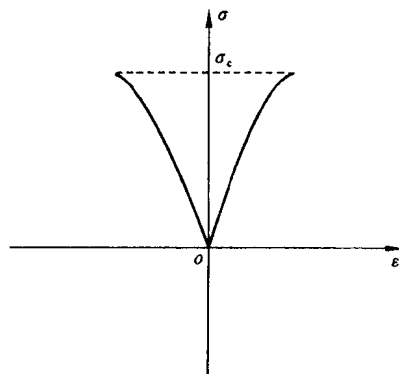


图 1.1.1 纵向应力与纵向应变和横向应变曲线图

2) 弹性模量

岩块试件的弹性模量可以用 ISRM 建议的 3 种方法之一来计算，参照图 1.1.3，即：

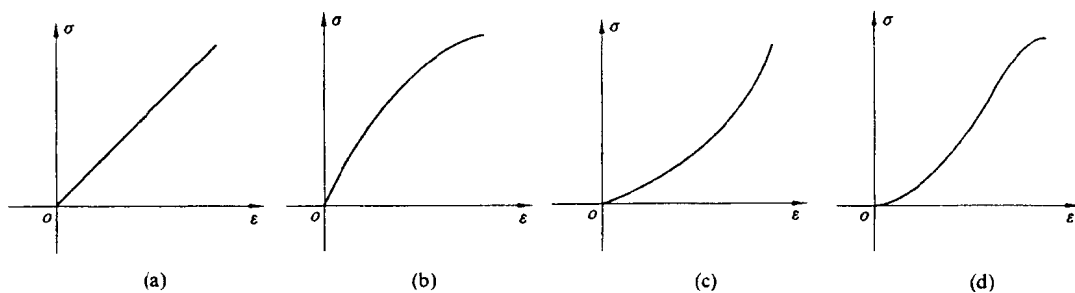


图 1.1.2 单轴压缩下岩块应力-应变曲线类型

(a) 直线型（弹脆性）；(b) 下凹型（弹塑性）；(c) 上凹型（塑弹性）；(d) S 型（塑弹塑性）

(1) 切线弹性模量 E_t 由 σ - ϵ 曲线上 $\sigma = \frac{1}{2} \sigma_c$ (σ_c 为岩块的极限抗压强度) 点的切线斜率测定，即：

$$E_t = \left(\frac{d\sigma}{d\epsilon} \right)_{\sigma = \frac{1}{2} \sigma_c} \quad (1.1.1)$$

(2) 平均弹性模量 E_{av} 由 σ - ϵ 曲线中近似直线区段的平均斜率确定。

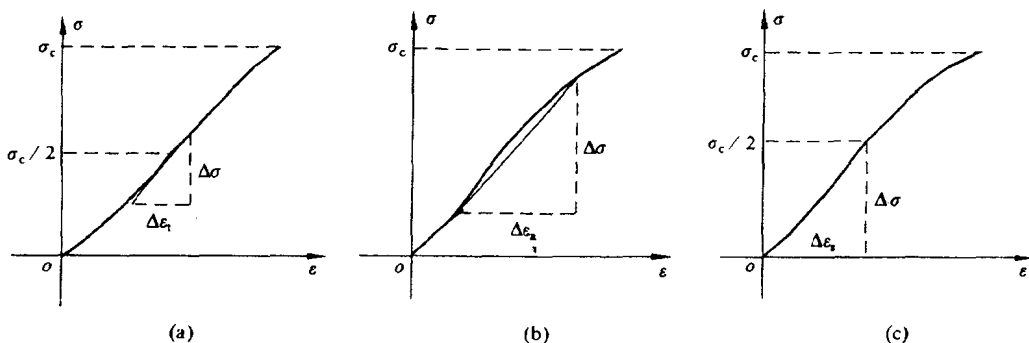


图1.1.3 由轴向应力 σ -应变 ϵ 曲线计算弹性模量

(a) 切线模量; (b) 平均模量; (c) 割线模量

(3) 割线弹性模量 E_s 。由 $\sigma=0$ 点和 $\sigma=\frac{1}{2}\sigma_c$ 两点确定的 σ - ϵ 曲线中的割线斜率确定。

即:

$$E_s = \left(\frac{\sigma}{\epsilon} \right)_{\sigma = \frac{\sigma_c}{2}} \quad (1.1.2)$$

试件的弹性模量和泊松比, 至少有 3 个有效数据, 并取其平均值。

3) 泊松比 μ

μ 可由下式计算:

$$\mu = - \frac{\text{纵向 } \sigma - \epsilon_1 \text{ 曲线的斜率}}{\text{横向 } \sigma - \epsilon_2 \text{ 曲线的斜率}} \quad (1.1.3)$$

式中, 纵向 σ - ϵ_1 和横向 σ - ϵ_2 曲线的斜率均可按 ISRM 建议的 3 种方法之一来确定。我国水利部门使用的计算公式为^[1]:

$$\mu = \epsilon_{d50} / \epsilon_{l50} \quad (1.1.4)$$

式中, ϵ_{d50} 和 ϵ_{l50} 分别是应力为岩块单轴抗压极限强度 50% 时的横向应变值和纵向应变值。

4) 体积应变

岩块的体积应变可由下式计算:

$$\epsilon_v = \epsilon_l - 2\epsilon_d \quad (1.1.5)$$

式中, ϵ_v 为某应力水平下的体积应变; ϵ_l 、 ϵ_d 为同应力水平下的纵向应变和横向应变。

1.1.3 岩块的全程变形测试

在普通材料试验机上进行岩块的压缩试验时, 在达到岩石强度极限 (峰值) 的瞬间, 往往会产生试件“爆裂”现象, 试验既告终止。而岩石工程中遇到的多数岩石在达到强度极限后, 仍存在着承载能力, 例如许多巷道围岩出现破裂, 甚至局部冒落、片帮后, 仍具有一定的强度, 承受地压, 保持巷道整体稳定; 又如矿柱 (煤柱) 出现了裂隙、劈裂、片落等现象时, 只是部分地降低承载能力, 并不是丧失承载能力。从宏观的范围讲, 岩体在生成之后, 经受过多次地壳内应力的作用, 每次都遭到不同程度的破坏, 它们均有裂隙并承受着荷载, 许多原位岩体也是处于极限强度后承载的。可见, 研究岩石极限强度后的变形性质比极限强度前的变形性质具有更大的实用意义和理论价值。

1. 岩块全程变形测试的基本原理

在普通材料试验机上进行岩块的压缩试验时, 随着压力的增加, 岩块试件产生了相应的

形变，储蓄了一定的形变能；与此同时，由于普通材料试验机的刚度往往小于岩块试件的刚度，岩块到达极限强度之前，试验机产生的变形和储蓄的形变能均比岩块大，当应力超过岩块的极限强度时，随着试件破裂的迅速发展，岩块抵抗载荷的能力降低，这样，试验机的变形能迅速地释放到岩块上，使试件爆裂，试验告终止。所以普通试验机只能测出岩块到达极限强度之前的荷载 P -位移 u 曲线（或应力-应变曲线）。

下面将从理论上说明，测出岩块荷载 P -位移 u 全程曲线的试验条件^[5]。如图1.1.4所示，设 OCN 为岩块的荷载（压力）-位移全程曲线， Cm 为试验机的压力-位移直线。岩块被压缩的 OC 阶段，岩块和试验机都储蓄着一定的变形能，到达 C 点的瞬间，岩块内的大部分变形能化为裂隙扩展、声响、震动等而消耗掉；试验机的变形能也要按一定的方式释放。岩块到达极限强度 C 点后，岩块的承载能力虽然逐渐下降，但要继续变形还需要消耗一定的能量。若试验机在 C 点后释放的能量比岩块继续变形所需要消耗的能量小，那么岩块就不会生产爆裂，将可测出压力-位移全程曲线。

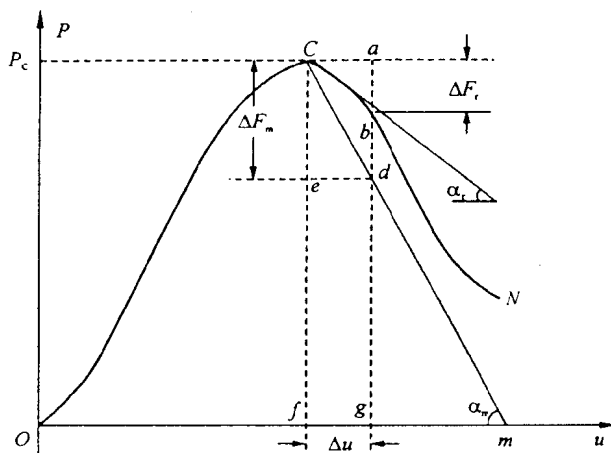


图1.1.4 测出岩块荷载-位移全程曲线的试验条件分析图

设岩石极限强度点 C 后有一位移增量 Δu ，则试验机释放的能量如图1.1.4中 $Cfgd$ 所围成的面积，即：

$$\Delta E_m = P_c \cdot \Delta u - \frac{1}{2} \Delta u \cdot |\tan \alpha_m| \cdot \Delta u = P_c \Delta u - \frac{1}{2} k_m (\Delta u)^2 \quad (1.1.6)$$

式中， $|\tan \alpha_m|$ 为试验机的刚度，令 $k_m = |\tan \alpha_m|$ 。

试件继续平静地位移所需要的能量可用图1.1.4中 $fCbg$ 所围成的面积表示，即：

$$\Delta E_r = P_c \cdot \Delta u - \frac{1}{2} \Delta u \cdot \tan \alpha_r \cdot \Delta u = P_c \cdot \Delta u - \frac{1}{2} k_r (\Delta u)^2 \quad (1.1.7)$$

式中， $k_r = \tan \alpha_r$ ，为试件压力-位移曲线上 C 点后位移为 Δu 的对应点 b 的切线斜率，该斜率称为试件的刚度。

试件不产生爆裂的条件为： $\Delta E_r > \Delta E_m$ ，将式(1.1.7)和式(1.1.6)代入上述不等式得：

$$k_m > k_r \quad (1.1.8)$$

这就是说，只有当试验机的刚度大于试件的刚度时，试件才不产生爆裂而测出试件的压力-

位移全过程曲线。

试验机的刚度又可定义为 $k_m = E_m \cdot F_m / L_m$ (E_m 、 F_m 、 L_m 分别为试验机的折算弹性模量、加载面积、加载架高度), 普通试验机的 k_m 只有 0.18 MN/mm 左右; 而岩块试件的刚度 $k_r = E_r F_r / L_r$ (E_r 、 F_r 、 L_r 分别为试件的弹性模量、断面积、长度), 一般达到 0.7 MN/mm 。可见, 普通试验机不能满足式 (1.1.8), 显得刚度不够大, 有的文献称之为柔性试验机; 相应的, 能满足式 (1.1.8) 的试验机称为刚性试验机。

2. 刚性试验机的种类

从以上讨论得知, 只有加大试验机的刚度, 才能防止试件爆裂, 测出试件压力-位移全过程曲线。

1) 提高机械刚度的试验机

可以从两方面考虑: 一是, 设计专门的试验机, 采用较粗的加载架立柱, 直径较粗、高度较矮的油缸, 使整机系统达到足够的刚度; 二是, 改造普通试验机的加载系统, 其中一种简便易行的方法是, 在普通试验机上、下压板之间, 附加一金属圆筒 (图1.1.5) 或刚性组件 (图1.1.6), 使它与岩块试件共同受力协同变形。试验中在压力超过岩石的极限强度以后, 由于附加刚性组件具有较大的刚度和强度, 限制着试验机压板的迅速位移, 使试验机的变形能不致于迅速地释放, 起到了提高试验机刚度的效果。因此有可能继续观测岩块试件的变形与破坏过程, 测出岩块的全程压力-位移曲线。

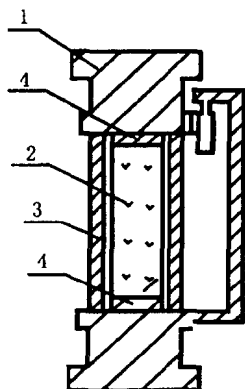


图1.1.5 普通试验机附加刚性圆筒

1. 试验机加压端头; 2. 试件;
3. 金属圆筒; 4. 钢垫块

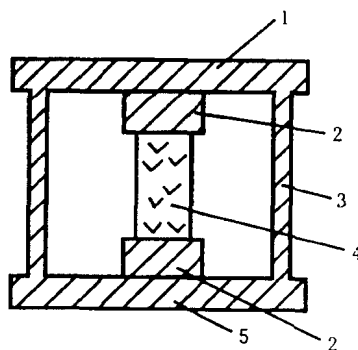


图1.1.6 普通试验机附加刚性组件

1、5. 上、下压板; 2. 钢垫块; 3. 刚性柱; 4. 试件

2) 复式加载刚性试验机

复式加载刚性试验机是根据变形相容原理, 试验机的位移应等于试件的位移。如果试验机的刚度小于试件刚度, 则试件超过极限强度后, 试验机要求复位的位移就会大于试件的位移, 形成机器给试件一个附加位移, 导致试件爆裂性的破坏。用液压与热力复式加压, 可以控制试验机的位移, 使其与试件位移协调, 让试件稳定地破坏。

图1.1.7 是中国科学院岩土力学研究所研制的 GYJ-30-I 型刚性压力机的结构示意图。该机器的操作要领, 是先使用液压千斤顶加压, 至岩石极限强度的 50% 以上, 用锁紧装置将液压加载工作平台的位置固定, 然后开动铝柱电热器, 靠铝柱热胀伸长位移使试件受力而平稳地破坏, 从而测出试件的全程应力-应变曲线。

3) 伺服控制刚性试验机

伺服控制刚性试验机，结构比较复杂，价格较贵，目前我国只有少数研究单位和高校有这样的试验机。试验时，压板的位移及其位移速率，加载的大小和加载的速率都能由电脑根据试件位移的反馈信息加以控制。当反馈的试件位移速率信息和预定的程序信号不一致时，伺服控制器产生相应的比较信号，推动伺服阀动作，加大或减少加载装置的液体供给量，使试件位移速度始终控制在适当范围内，从而使得试件平稳破坏，完成岩块的应力-应变全过程的测试。如图1.1.8所示。

3. 结果分析

试验的目的是测出岩块试件的全程压应力-应变曲线。该曲线的形状及其有关性质与岩石种类和岩石性质密切相关。通过一系列的试验结果分析对比可知，峰值强度前的曲线有相似的特性，但峰值强度后的曲线特征却有显著差别。岩石峰值强度后的特性可分为两类（图1.1.9）。

第一类称为稳定断裂传播型（简称稳定型）。它的特点是外力超过了试件承载力峰值后，试件所储蓄的变形能并不能使破裂继续扩展，只有再增加外力才能使试件进一步破损，但试件的承载能力会渐渐降低。也就是说，当外力超过了岩石的极限强度以后，岩石仍保持部分强度。

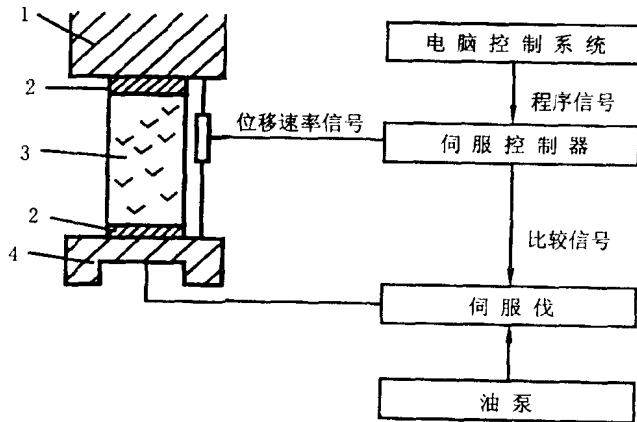


图1.1.8 伺服控制刚性试验机原理示意图

1、4. 上、下压板；2. 垫块；3. 试件；5. 位移传感器

第二类称为非稳定断裂传播型（简称非稳定型）。它的特点是外力超过峰值后，尽管试验机不再对试件做功，但试件中所储蓄的能量能使断裂继续扩展，导致整个试件破坏，即，当外力一旦超过峰值，岩块中的变形能够使其进一步破裂，直到破坏，并迅速地失去承载能

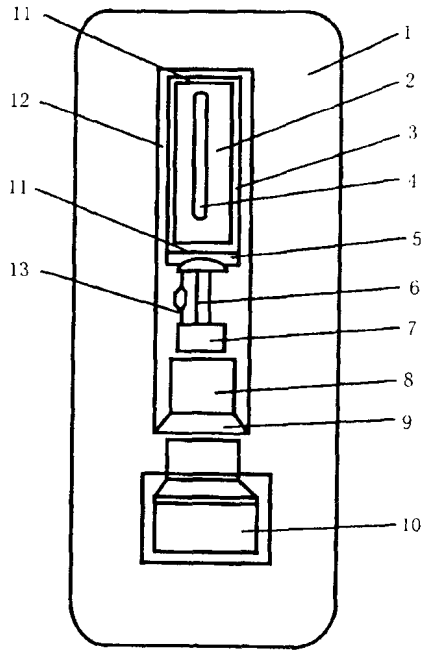


图1.1.7 GYJ-30-I型复式加载刚性试验机结构示意图

1. 钢框架；2. 铝柱；3. 电热丝；4. 冷水管；
5. 球铰；6. 岩块试件；7. 荷载传感器；
8. 传力柱；9. 锁紧楔块；10. 液力千斤顶；
11. 隔垫；12. 隔热罩；13. 位移传感器

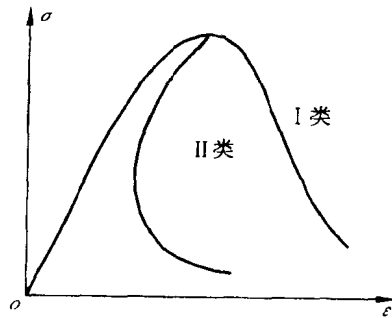


图1.1.9 岩石全应力-应变曲线的两大类型

I类:稳定型；II类:非稳定型