

煤岩 流体力学

章梦涛 潘一山 梁冰 王来贵 编著

科学出版社

煤 岩 流 体 力 学

章梦涛 潘一山 编著
梁 冰 王来贵

学 出 版 社
1995

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书阐述了岩体力学和渗流力学中有关煤岩体变形和煤岩体内流体流动的基本概念、定理、实验及计算方法。具体叙述了两类固流耦合作用的数学模型以及利用有限元法求解的具体步骤,并有工程应用实例。

本书是一本为大学采矿及工程力学等专业的本科生、研究生而编写的教材。也可供采矿、水工地质等专业的工程技术人员、研究人员和高等院校教师参考。

煤岩流体力学

章梦涛 潘一山 编著
梁 冰 王来贵

责任编辑 李成香

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

北京朝阳大地印刷厂印刷

北京蓝地公司激光照排

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1995年8月第 一 版	开本:850×1168 1/32
1995年8月第一次印刷	印张:8
印数:1—700	字数:207 000

ISBN 7-03-004645-5/O · 797

定价:24.00元

前 言

岩体作为自然界地质体一部分,其中有许多没有被固体颗粒占据的空间,称为空隙空间,包括孔隙、空隙和裂隙。空隙空间含有液体(主要为水)和(或)气体(瓦斯、二氧化碳和空气等),通称流体。流体只能在煤岩体内连通的空隙中流动。当受到采矿活动影响,煤岩体变形破裂,进而空隙空间发生变化,引起流体流动状况的改变。在流体对煤岩的力学、物理和化学等作用下,又引起煤岩物理力学性质的变化,使煤岩变形随之发生变化。如此相互作用、相互影响(称为固流耦合),达到一种新的平衡状态。这样的现象和问题在煤炭生产过程中是很多的。如矿井中煤与瓦斯突出、岩石与二氧化碳突出、底板突水、雨季滑坡、煤岩体压力注水,以及瓦斯抽放、煤层疏干等。岩石流体力学就是研究这种固流耦合作用下岩体变形和流体流动问题的一门科学。

岩石流体力学是近几年岩石力学与渗流力学相互交叉、相互渗透而逐渐形成和发展起来的一门新兴边缘学科,目前还没有专门的岩石流体力学的著作,只有散见在各种学科和工程技术杂志上发表的论文。为了给采矿专业本科生在未来研究和解决煤炭开采中的固流耦合问题有一个比较系统的理论基础,曾编写了一本讲义。由于其中专门叙述了不少的煤与其中流体的固流耦合作用的现象和问题,故名“煤岩流体力学”,并开设了此门课程,讲授 60 学时。之后,以此讲义为主要参考书,又为采矿、建井、矿山工程力学专业的研究生讲授了这门课程,讲授 40 学时。这次出版的书就是在此讲义的基础上进行了重大的修改和补充后完成的。

煤岩流体力学牵涉的力学和数学的基础很广泛,超出了一般工科学生所学范围,而学时有限,难以在讲授本课程中予以弥补。本书只是为研究和解决煤岩流体力学问题提供比较系统的理论基

础, 尽量避免应用超出工科学子所学范围的数学, 如无法避免, 仅简单地给予叙述。对于建立的数学模型, 实际煤岩流体力学问题一般都不能采用解析法求解, 因此只讲少数可以采用直接积分的典型问题, 对于采用复变函数论等求解的问题没有涉及。目前数值解法已有许多的专门著作, 本书只介绍有限元法的基本原理及其在煤岩流体力学研究中的应用。如将来工作有此需要时, 完全可以在此基础上通过专门文献的学习予以掌握。

本书第二、第三章讲授岩体力学中的岩石力学性质及破坏判据, 应力变形分析的基本原理和方法。第四、第五章以孔隙介质渗流力学为主, 阐明了渗流力学基本原理和分析方法。第六章阐明岩体变形对流体流动影响和流体流动对岩体变形的影响, 在此基础上提出了固流耦合作用的数学模型及分析的原理。第七章介绍了运移过程的原理和分析方法。第八章介绍了几种物理模拟方法。第九章是根据我们的工作介绍了煤岩流体力学的几个应用实例。限于水平和能力, 必定存在许多缺点和不当之处, 希读者予以指正。

原讲义由徐曾和、梁栋、王继仁、刘成丹、潘一山、王来贵、梁冰集体讨论、分头编写。本书改写由潘一山主持, 经过讨论重新制订了编写大纲, 王来贵负责第二、第三章, 潘一山负责第四、第五章, 梁冰负责第六及第九章, 第七章由王来贵、潘一山负责, 第八章由刘成丹负责。

本书部分内容系国家自然科学基金资助项目“冲击地压和突出统一理论”、“冲击地压失稳理论”和“瓦斯突出的工程分析与控制”的成果。

章梦涛

1993年1月于阜新矿业学院

目 录

前言	v
第一章 绪论	1
1.1 煤岩流体力学的建立和任务	1
1.2 煤岩流体力学的研究方法	4
第二章 煤岩的力学特性	7
2.1 概述	7
2.2 煤岩室内力学性质试验	8
2.3 煤岩体应力-应变曲线	12
2.4 影响煤岩力学性质的主要因素	15
2.5 煤岩的破坏及其准则	18
2.6 不连续面的基本力学特性	24
2.7 煤岩的流变力学特性	27
2.8 煤岩试件系统破坏稳定性分析	32
第三章 煤岩的应力和变形	39
3.1 煤岩应力和变形的研究方法	39
3.2 煤岩体线弹性的分析原理	40
3.3 平面问题	46
3.4 平面问题的应力分析法	51
3.5 弹塑性分析的概念	56
3.6 煤岩体的失稳理论	63
3.7 应力与应变的数值分析方法	65
第四章 煤岩体内流体的流动	72
4.1 引言	72

4.2	流体和多孔骨架的性质	74
4.3	煤岩流体力学的连续介质方法	79
4.4	水头、水力梯度、渗流速度	81
4.5	承压和非承压流动	84
4.6	达西(Darcy)定律——煤岩体中流体流动的本构关系	89
4.7	渗透系数及其室内测定方法	93
4.8	裂隙岩体的渗流	98
第五章 煤岩渗流的基本方程		102
5.1	基本的渗流连续性方程	102
5.2	承压流动的连续性方程	105
5.3	煤层中瓦斯流动的基本方程	107
5.4	潜水流动的基本方程	110
5.5	边界条件和初始条件	112
5.6	简单问题的解析分析	117
5.7	渗流问题的有限元数值分析	123
5.8	迹线、流线和流网	131
第六章 煤岩变形与其中流体流动的固流耦合作用		138
6.1	概论	138
6.2	有效应力	139
6.3	煤岩中孔隙流体对煤岩力学特性的影响	142
6.4	煤岩变形对流体渗流的影响	150
6.5	煤岩流体力学中的两类不同问题	155
6.6	固流耦合作用问题的分析	158
第七章 煤岩体内流体的动力弥散		167
7.1	概述	167
7.2	两种流体在多孔介质内的流动	167
7.3	流体动力弥散	169
7.4	流体动力弥散方程的建立	172
7.5	流体动力弥散系数	176
7.6	流体动力弥散方程在常用坐标系中的形式	180

7.7	流体动力弥散方程的定解条件·····	182
7.8	流体动力弥散问题的解法·····	186
第八章	模型和模拟·····	192
8.1	概述·····	192
8.2	相似条件的选取及确定·····	194
8.3	量纲分析·····	197
8.4	相似比的确定·····	200
8.5	砂槽模型·····	202
8.6	连续型电模拟·····	204
8.7	离散型电模拟·····	210
第九章	煤岩流体力学在采矿工程中的应用·····	215
9.1	注水过程中水在煤层中流动规律的研究·····	215
9.2	采场风流流动和瓦斯运移规律的研究·····	222
9.3	采动影响下煤层内瓦斯流动规律的研究·····	224
9.4	固流耦合作用下瓦斯突出的数值分析·····	228
附录 1	平面弹性有限元程序(三角形单元)·····	234
附录 2	平面非稳定煤岩体渗流问题有限元程序(三角形单元) ·····	240
主要参考文献	·····	245

第一章 绪 论

1.1 煤岩流体力学的建立和任务

煤岩流体力学是研究煤岩体变形与其中流体流动互相影响、互相作用规律的科学。它是岩石力学和渗流力学互相渗透、互相交叉,在岩石力学、水力学的基础上逐步扩展而形成的一门新的边缘学科,也是采矿科学的一个基础分支。

煤、岩体是天然地质体的一部分。在煤、岩体中固体颗粒没有占据的空间称为空隙空间,简称空隙,包括孔隙、裂隙和孔洞,其大小可以从巨大的溶洞到微小的毛细孔洞。在空隙内部含有气体或液体,统称流体。煤岩体内流体流动系指游离状态的自由流体在所连成的空隙空间通道中的流动。煤、岩体内一般还有一部分流体呈分子状态,煤岩体固体颗粒吸附在其表面,称为吸附状态的流体。游离状态和吸附状态的流体在一定压力和温度下,维持动平衡状态。研究煤岩体内流体的流动,是多孔介质流体力学或渗流力学的任务,即在煤岩固体不发生变形的假设下,研究其中流体的流动。1940年雅可比(Jacob)首先研究了岩层只发生竖直向弹性变形时的地下水流动问题。在研究中,定义了一个贮水系数,以表示承压含水层的贮水实质是由于含水层介质和水具有弹性变形性质造成的。他考虑了岩层竖直向弹性变形对承压地下水流动的影响,建立了承压水流动的基本方程。虽然所采取的处理方法很不严密,但在工程实用上已足够精确,至今仍在广泛应用。1965年维于特(Verruljt)考虑了三维岩体变形时的流体在岩体中流动情况。流体流动的基本方程中除孔隙压力外,还含有与体积变形有关的膨胀系数。由煤岩体的弹性变形方程,得出在此情况下液体在煤岩体内流动规律。由于在一定边界条件下对所提出的方程求解数学上困

难很大,未见到以后应用。

煤岩体变形规律一开始是从土力学中的固结问题引过来的。为考虑煤岩体中的流体流动对岩体变形的影响,引入了有效应力的概念,即把孔隙压力作为体积力施加于岩体上。孔隙压力通过渗流力学中有关的渗流基本运动方程求出。同样由于对所建立的数学模型求解困难,只在很简单情况得到了解析解。并且,由于土壤力学和岩石力学在所研究介质的性质上有重要差别,1960年斯肯普顿(Skempton)提出,对许多岩石来说,在有效应力中应引入一个系数以对孔隙压力进行修正,此系数取决于岩石的性质,最大值等于1。

60年代中期,随着生产力发展需要和科学技术进步,首先在地下水研究中考虑地下水的流动和岩体变形相互影响、相互作用问题。同时有限单元法的提出与发展解决了数学模型求解的困难。在渗流力学和岩石力学的互相渗透下,经过20余年,至80年代中期,一门新兴的分支学科——岩石水力学终于形成。

岩石水力学避免了渗流力学研究岩体中流体流动不考虑介质变形的缺陷,也克服了岩石力学在研究其中有流体流动的岩体工程问题时,只简单地把水的孔隙压力作为体积力考虑的缺陷,将岩体和地下水固液两相介质耦合起来,研究岩体变形与地下水流动问题。这种岩体变形与流体流动互相影响、互相作用称为固流耦合作用,因而这类问题也称固流耦合作用问题。岩石水力学主要就是研究地下水与岩体的固流耦合作用问题,采用数值方法进行固、液两相介质的耦合分析。其基本方法原理是,地下水的孔隙压力变化改变岩体的应力状态,因而使岩体变形状态发生变化。岩体变形改变了岩体原来空隙的形状、尺寸、数量及分布状态,使岩体对地下水渗透系数发生变化,因而使地下水的流动状态改变,其孔隙压力随之变化,如此反复直至形成动态平衡而稳定。由于在流体流动的煤岩体中,变形受有效应力支配,因此可通过试验得到渗透系数与有效应力的函数关系式,以及有效应力与流体孔隙压力的关系式,这些就是进行耦合分析的基本方程。在一定边界条件和初始条件

下通过数值分析反复迭代,对渗流场方程和岩体应力场方程联立求解,即可得到地下水渗流孔隙压力分布规律和岩体应力分布规律。通过考虑渗流定律以及岩体本构方程,可得到岩体变形分布情况和地下水渗流速度的分布情况,还可以通过实测结果反求参数,并进行输入,使得到结果更趋于实际。

岩石水力学的特点是将地下水视为不可压缩流体,因而岩石水力学耦合分析原理基本上适用于不可压缩流体与岩体耦合作用的问题。而煤层中瓦斯与煤体相互作用相互影响,如瓦斯突出以及采动影响下煤层内瓦斯流动,是气体和煤体耦合作用下煤体破坏和气体流动的问题。由于气体可压缩性大,因而对于瓦斯与煤体耦合作用的问题,应用岩石水力学研究就感到困难,这是一个包括液体、气体在内的岩石流体力学问题。目前,在煤炭开采中提出的岩石流体力学问题类型较多,不仅有可视为不可压缩的地下水与岩体、煤体的固流耦合作用问题,而且有可压缩的瓦斯与煤岩体的固流耦合作用问题,如瓦斯、二氧化碳突出等,这些都是当前世界范围内还不能完全控制的矿井中的严重灾害,急待解决。此外,合理利用资源,防止和减轻瓦斯灾害而进行的瓦斯抽放,也需要了解采动影响下煤层瓦斯流动问题。煤体不仅对瓦斯吸附量大,解析速度大,而且在固体细微颗粒表面上存在着大量吸附状态瓦斯,在一定压力和温度下与在空隙中的游离状态瓦斯成动平衡状态。压力、温度及其他条件变化时,原有平衡状态破坏,形成新的平衡。煤矿矿井中不少岩体含亲水性矿物质,也存在吸附状态和游离状态的水。吸附状态流体对煤岩力学性能产生很大影响,如吸附作用使得煤强度降低,呈塑性破坏,体积膨胀等。水对非亲水性矿物质的岩体及煤的影响也有类似情况,如在煤矿中,有时采用向煤体、岩体中注水,改变其力学性质来防治冲击地压等危害。但这种性质也给煤矿井生产带来了不少困难,如巷道底臃等。

在煤矿中煤岩与其中流体耦合作用的问题还很多,其中如水突出、瓦斯突出是当前急需研究解决的矿井中严重的灾害,因此,煤岩流体力学的研究将为研究解决煤矿中的这类问题提供理论指

导和科学依据。对其他部门的类似问题,如天然气开采等,也有同样的作用。因此,煤岩流体力学的研究对于煤炭生产以及国家经济建设具有重要意义。

1.2 煤岩流体力学的研究方法

煤岩流体力学基本研究对象是自然界的煤体和岩体。在长期的地质年代中,煤岩体经历了许多次多种地质作用,经受过变形,遭受过破坏,具有不同成分和构造。而且,赋存于不同地质环境中的煤岩体,是由不同相物质组成的介质,其中的流相(包括液相和气相)物质又分别以吸附和游离状态赋存于煤岩体之中,其物理力学性质甚为复杂。由于经受了复杂的地质运动,煤岩体内不仅具有初始应力和初始应变,而且形成了特殊的构造。这些特殊的煤岩体构造,在宏观上控制着煤岩体变形破坏和煤岩体内流体的流动,因此在研究煤岩流体力学问题时,首先必须了解研究范围内煤岩体的地质特征。由于煤岩体是赋存于一定的地质环境之中,所研究范围内煤岩体的固流耦合作用问题就是在这种具体的地质环境下发生的,因此,搞清楚其赋存的地质环境是十分必要的。具体来说,在一般情况下,应该像解决岩体力学问题一样,摸清所处环境的地应力及地下流体流动的情况。

综上所述,煤岩流体力学问题的研究方法,最基本的是现场观测,即从事现场的试验研究。因为不进行现场观测,就无法搞清研究范围内的煤岩体基本特征和地质环境,也就难于对煤岩流体力学问题进行研究。同时只有通过现场观测,才能查明所研究过程的主要决定因素,为理论分析研究和模拟研究提出正确资料。反过来,现场观测也是对理论分析和模拟试验所得到结果的最好验证。特别在煤岩流体力学理论还处于正在形成的阶段,这点就显得更加重要。煤岩流体力学是岩体力学和渗流力学相互渗透所形成的学科,目前的现场观测方法和使用仪器,很自然地是这两门学科中有关的现场观测方法、使用仪器的综合。

试验室研究仍然是煤岩流体力学常用的研究方法。实际上现场观测方法就是真实条件下的试验研究方法,只是在以自然界岩体介质作为研究对象时,很难通过试验室完全模拟其复杂的力学物理环境和地质环境,因而强调现场试验研究的重要并将其作为单独的研究方法。但是现场试验只能在有了现场才能进行。而且在现场条件下,改变参数是很困难的。现场研究是各种因素综合影响的结果,只能保证在进行试验的具体地质条件下有正确性。因此,只靠现场试验研究是不够的。试验室模拟试验研究方法可事先通过模拟试验在设计阶段进行工程预测,与现场试验研究相比较,它较容易改变某些参数及研究某个因素所起的作用。由于煤岩流体力学所研究的介质复杂,特别在目前理论还不完善的情况下,采用传统的分析方法难以解决。另外现场条件下研究工作量、费用高及周期长,此时采用模拟研究是合适的。煤岩流体力学的模型模拟,目前也分别来自于岩体力学和渗流力学,适用于煤岩流体力学的模型模拟方法还需要进一步完善。

除现场观测和试验室研究外,理论分析也是煤岩流体力学的重要手段。它是通过现场观测和试验室试验,对所要解决的复杂现象加以提炼,明确主要物理原因,建立起煤岩流体力学的物理模型及数学模型,然后采用解析或数值方法得到定量的分析。由于问题的复杂性,对煤岩流体力学的数学模型一般难以得到解析解,只能采用数值方法求解。但是采用数值分析方法,对于煤岩流体力学来说,最困难的问题是难以通过试验室试验或现场试验得到可以信赖的数学模型中的各项参数。这样就使得对通过一次数值计算得到的结果的准确程度难以判别,产生了在岩体工程上对数值计算“声誉甚高、信誉甚低”的局面。近年来虽然采用了控制论中“参数识别”校正数学模型的方法及根据实测值反求参数的方法来解决数值计算中参数难以确定的问题,但这也受到实测值的限制。因而数值计算方法借鉴模型模拟的研究方法,将数值计算发展成为数值模拟。但在所有物理模拟中,选取的模型都无法做到完全与实际相似,所以,模型模拟已经不追求用相似准则换算绝对数值,而是

从不同试验结果的相对变化中寻求规律。数值模拟方法就是将一次数值计算看成为一个数值试验,不追求绝对值的精确,而注意通过参数变化研究数值计算结果的变化规律,从而得到定量化的分析或预测。理论分析方法不需要其他专门的设备仪器,耗资少,省时省力,而且获得的信息量大,是在煤岩流体力学中最有发展前途的方法。

煤岩流体力学研究范围广泛,既要研究煤岩体变形和煤岩体内流体的流动,还要研究这两者的相互作用和相互影响。由于两者分别是岩石力学和渗流力学的研究内容,因而煤岩流体力学研究的核心是两者的相互作用和相互影响,也即是固流耦合作用。具体来说是要研究建立固体、流体的耦合本构关系,和渗流力学与岩体力学参数之间的关系,前者是研究岩体受流体流动影响变形破坏的基础,而后者是为了预测受煤岩体变形影响,岩体-流体力学特性变化。目前对这方面的研究还很不够,对于岩石力学参数和岩体-流体力学参数,在地下水方面研究较多。近年来开始对瓦斯有所研究,但都只限于岩体弹性阶段,对于固流耦合本构关系研究还有待深入。目前只是研究了岩体力学参数与岩体-流体孔隙压力之间的关系,但可以相信,随着生产建设的发展,大量岩体-流体力学问题的出现和科学技术的进步,煤岩流体力学一定会得到进一步发展和完善。

第二章 煤岩的力学特性

2.1 概 述

煤岩流体力学是研究煤岩体变形与其中流体流动相互影响、相互作用下变形和流体流动规律的科学,因而煤岩力学特性是煤岩流体力学的研究基础。煤岩力学特性主要是探讨煤岩在各种荷载和各种环境因素影响下的变形和破裂过程,包括变形破坏的力学特性和其中流体流动的特性。本章首先介绍煤岩变形力学特性,煤岩中流体流体力学特性将在以后有关章节中进行叙述。

岩石与金属的物理力学性质有很多相似的地方,它们同属于结晶固体,因而其基本变形机理是相似或相同的。然而,由于二者在组成和使用时所处的条件不同,所侧重的力学性质也有较大差别,如岩石的组成远比金属材料不均匀、尺寸效应明显,加之岩土工程服务年限长,力学性质中的时间因素变得很突出,故还要考虑其时间效应。

由于野外试验费用高,条件限制大,一般采用选取试样在实验室进行试验研究的办法。国际岩石力学与工程学会实验室与现场试验标准委员会 1979 年提出了测定岩石物理力学性质的建议方法,我国有关部门也制订了有关规程,关于试验设备、测试手段以及试验方法都有了明确的规定。因此,本章着重介绍煤岩试件力学性质,变形破坏机理,影响煤岩体力学特性的主要因素。适当介绍室内常用的试验方法。

将试验结果应用到工程实际,有两个方面需要外推。一是时间尺度上的外推,另一是空间尺度上的外推。地质构造运动以百万年计,地震的重复间隔从几百年到几千年,其应变速率为 10^{-14} — $10^{-16}/s$ 。采矿工作面的顶板下沉、地表移动在几个月到几年完成,

其应变率达 10^{-10} — 10^{-12} /s。而实验室只能做到 10^{-6} — 10^{-8} /s,需要外推好几个数量级。要正确地做到时间尺度上的外推,就要对岩石变形破坏机理了解清楚。

实验室中通常将完整的煤岩块加工制作成试件进行试验,要正确地做到在空间上的外推,就要对煤岩赋存的条件有所了解。煤岩体是指含有层理、断层、节理等构造特征总体的原位地壳的一部分,与岩块、煤块概念不仅是尺度上的不同,其性质也不同。在了解煤岩试件力学性质的同时,还要了解煤岩体的力学性质,这是本章的另一内容。

随着载荷增加,岩石、煤块将发生破坏,破坏可能是稳定的,也可能是非稳定的。在工程实践中将岩石不能再承受其上作用力的状态或不起工程作用时的状态称为破坏。试件的破坏,岩石力学中一般指到达峰值或在峰值强度时的状态。峰值强度是指在一定条件下(如围压、温度等)岩石或煤试件所能承受的最大应力。条件不同,其峰值强度或简称强度是不同的,难以通过试验确定。因此,在岩石力学中提出了描述预测复杂条件下煤岩破坏的假说,称为强度理论或破坏理论,本章中将介绍几个常用的强度理论;对非稳定破坏,本章介绍了试件系统失稳的概念及判据。

2.2 煤岩室内力学性质试验

2.2.1 采样要求

在室内进行试验测定中,对采样的要求一般为:

(1) 在选择采样方法和采样操作过程中,应使试样原有的结构和状态尽可能不受破坏,以便最大限度地保持煤岩体的原有的物理力学性质。

(2) 采样地点应符合研究目的的要求,并要注意岩样具有代表性,要分别在几个具有代表性的采样点采样。对岩性变化很大的岩层,禁止将不同地点和不同部位采取的煤岩体编为一组。

(3) 尽量不采用爆破方法取样,以防产生大量人为的裂隙,采

下的试样要编组、编号。

(4) 每组煤样或岩样的数量,应满足设备的需要,按要求测定的项目确定。采样时一般至少要采标准数目的两倍。

(5) 煤岩样采好后,迅速用纸包好,写上编号。运到井上立即封蜡保存,对松软易吸水风化岩石,最好在井下立即包装封蜡。

2.2.2 常见室内试验

岩石力学特性室内试验很多,主要如下:

(1) 单轴压缩试验

这是实验室中最常用的测定煤岩体试件单轴抗压强度、弹性模量、泊松比的试验方法。按要求加工好试样,放置于压力试验机上,缓慢地加载即可测定。图 2.1 曲线 *a* 是在普通压力试验机上所得到的大多数煤岩应力-应变曲线。由于试验机刚度不足,其应力-应变曲线在到达 *F* 点时,试样发生突然的破坏而终结。图 2.1 曲线 *b* 是刚性试验机上或液压伺服控制试验机上所得到的应力-应变曲线。

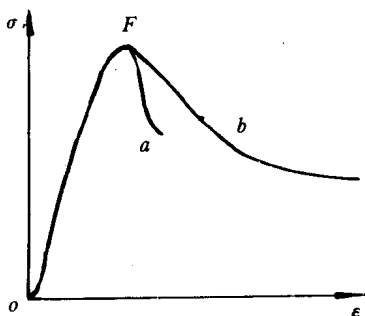


图 2.1 应力-应变曲线

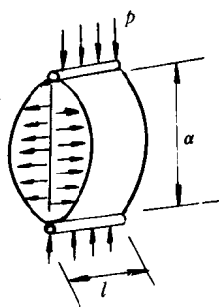


图 2.2 劈裂法示意图

在普通压力试验机上,试件破坏时的应力即为岩石的单轴抗压强度。

(2) 岩石的单向抗拉强度试验