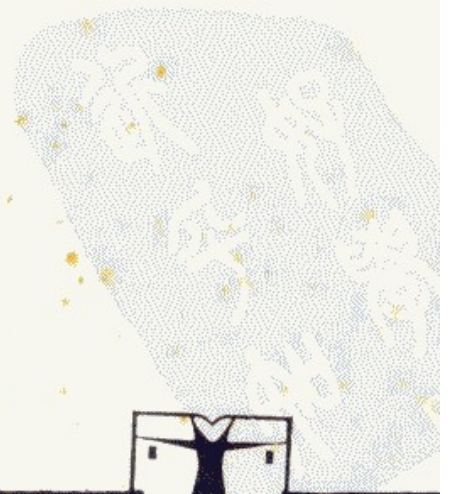
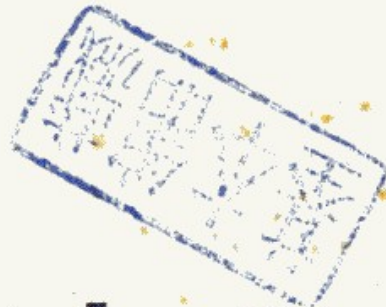




高等学校教材

高等岩石力学

清华大学 周维垣 主编



高等学校教材



高等岩石力学

清华大学 周维垣 主编

水利电力出版社

高等学校教材
高等岩石力学
清华大学 周维垣 主编

*

水利电力出版社出版
(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售
水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 27.75印张·630千字
1990年6月第一版 1990年6月北京第一次印刷

印数0001—1410册

ISBN 7-120-01042-5/TV·347

定价5.40元

内 容 提 要

全书共14章。论述了岩石的力学特性；岩石的弹塑性本构模型；地应力分析；有限元法在岩石力学中的应用；边界元法在岩石力学中的应用；岩石流变力学；岩石动力学；岩体工程反分析法；岩体中的渗流；岩体工程随机分析及可靠度设计；不连续岩体力学；断裂力学及损伤力学在岩体分析中的应用；模型试验，岩爆分析等。本书在于学习并掌握近代发展的岩石力学的理论与技术，以便在岩土工程学科的前沿阵地开展工作。

本书可为水利水电、地下建筑、地质矿山、冶金、交通以及国防等专业的研究生做教材，亦可为高校师生和工程技术人员参考。

前 言

1985年中国岩石力学与工程学会在京成立，学会的教育工作委员会发起组织出版适合各行业人员学习和应用的岩石力学用书。在中国岩石力学与工程学会教育工作委员会于学馥教授等人的主持下，于1986年决定出版“高等岩石力学”一书，作为国内岩土力学与工程类专业研究生使用的教材，并供有关的专业教师和工程技术人员的参考阅读。考虑到近年来国内外岩石力学方面的内容有了很大的发展，应用于岩石力学的学科领域也越来越宽，但目前系统阐述这些新学科和新技术的合适的教材与参考用书则十分缺乏。本书旨在力图使读者在已有岩石力学知识与技能的基础上能掌握更深一步的岩石力学的新理论和新方法。本书从岩石的基本力学性能着手，侧重介绍了地应力，流变、断裂损伤，渗流以及不连续岩体与岩石动力学的基本内容；并系统阐述了当前实践上已得到采用的分析理论和实验方法，如本构模型、有限元法、边界元法、离散元法、反分析法、随机分析与可靠度以及模型实验等等。此外，对有关岩石力学的一些专门问题，如地下洞室、边坡和基岩的稳定性、岩爆及其在工程中的应用等，因限于篇幅只以简例作扼要的说明。本书的体系不同于一般的岩石力学教材，选入本书的材料都是当前工程中已得到应用的方法。对于过去岩石力学书中介绍的属于定性研究或经验性的方法，本书未予列入。

本书的编写是岩石力学教育委员会成员的集体创作。1987年11月曾集会仔细研讨了本书的章节和选材；1988年8月就初稿进行了讨论和修改，并拟订了各章的写作要求；1989年2月进行了修改稿的审定，并于1989年3月底完成终审。

参加本书编写的有：清华大学周维垣（绪论，第一、三章初稿，第四章第八节，第九章第四、六节，第十、十二、十三章），同济大学孙钧（第一章第十、十一节，第六、七章），北京大学殷有泉（第二章），西安矿业学院刘怀恒（第四、五、八章），武汉水利电力学院陶振宇（第九章），北方交通大学张清（第十一章），水利部水利水电科学研究院陆家佑（第十四章），清华大学杨若琼（第一、三章），北京科学技术大学方祖烈（审校了绪论、第三、十四章），清华大学罗光福（第十三章部分）。本书由周维垣主编，刘怀恒副主编，孙钧主审。

作者衷心感谢中国岩石力学与工程学会陈宗基教授、牛锡倬教授的指导。衷心感谢原水电部教育司对本书出版的指导与支持。清华大学水电系杨延毅、刘公瑞、沈大力、邹淑仪等均对本书出版做了工作，在此一并致谢。并恳切希望广大读者对本书给予批评指正。

编者

1989年3月

目 录

前 言	1
绪论	1
第一章 岩石的力学特性	7
第一节 室内岩石力学性质试验	7
第二节 岩石的应力应变关系	9
第三节 岩石在三轴荷载下的变形	11
第四节 岩石破坏的类型及微观破坏机制	13
第五节 岩石的强度准则	14
第六节 Griffith理论的推导	20
第七节 各向异性对强度的影响	26
第八节 不连续岩体的力学性质	29
第九节 裂隙岩体的力学特性	35
第十节 软岩	37
第十一节 膨胀岩	43
第二章 岩石的弹塑性本构模型	46
第一节 非线性弹性理论	46
第二节 应力空间表述的弹塑性本构理论	51
第三节 应变空间表述的弹塑性本构理论	63
第四节 塑性的内蕴时间理论	75
第三章 地应力	87
第一节 概述	87
第二节 地应力分布的若干规律	87
第三节 高地应力区的若干特征	90
第四节 地应力测量方法	92
第四章 岩石力学问题有限元法	100
第一节 概论	100
第二节 施工建造过程的模拟	106
第三节 节理及不连续面的模拟	110
第四节 多节理岩体的模拟	116
第五节 无限域单元及其应用	119
第六节 岩体工程中的弹塑性问题	125
第七节 无拉力分析及节理非线性分析	133
第八节 岩土工程三维非线性有限元程序系列 (TFINE)	136
第五章 岩石力学问题边界单元法	141

第一节	概论	141
第二节	边界元法的基本概念	142
第三节	位势问题边界元法	145
第四节	弹性力学问题的边界元法及应用	149
第五节	岩体工程中的应用	158
第六节	边界元法与其他数值方法的结合	164
第七节	弹塑性问题	167
第六章	岩石流变力学	173
第一节	岩石工程中的流变问题	173
第二节	岩石流变的力学属性	174
第三节	岩石蠕变的本构模型	177
第四节	模型识别与参数选定岩石的长期强度	188
第五节	粘弹性问题的解析解	193
第六节	粘弹性问题的有限元法解析	200
第七节	弹-粘塑性体的本构方程及有限元法解析	203
第八节	非线性弹性-粘塑性问题的有限元法解析	207
第九节	粘弹、粘塑性问题的边界元法解析	209
第十节	岩石流变力学的工程应用	212
第七章	岩石动力学	216
第一节	岩石工程中的动力学问题	216
第二节	动力荷载下岩石的物理力学特性	216
第三节	应力波在岩石地层中的传播	222
第四节	岩石隧洞的动力性态	231
第五节	岩石边坡和岩基的动力稳定性	237
第六节	动力问题有限元法的若干问题	243
第八章	岩体工程中的反分析方法	250
第一节	概论	250
第二节	位移反分析的基本原理	251
第三节	粘弹性位移反分析	256
第四节	若干应用问题	262
第五节	岩体工程的预测	264
第六节	灰色预测及其在岩体工程中的应用	266
第七节	非均匀初始地应力场的回归分析	269
第九章	天然岩体中的渗流	272
第一节	概论	272
第二节	裂隙岩体的渗流特性	272
第三节	裂隙岩体的渗流模型	276
第四节	裂隙岩体的水力学参数的确定	282
第五节	固-液两相介质的耦合分析	288
第六节	渗流有限元计算	290

第七节	裂隙岩体水流分析	291
第十章	岩体工程随机分析及可靠度设计	296
第一节	岩体工程的安全系数及可靠度	296
第二节	岩体设计参数的概率分析和相关性	304
第三节	岩体抗剪强度分析实例	307
第四节	岩体工程系统可靠度设计	310
第五节	随机有限元法	314
第六节	边坡渐近破坏概率分析实例	316
第十一章	不连续岩体力学	322
第一节	不连续岩体	322
第二节	离散元法	326
第三节	块体理论	338
第四节	刚块-弹簧法	345
第五节	块体力学的反分析方法	354
第十二章	断裂力学和损伤力学在岩体工程中的应用	362
第一节	线弹性断裂力学的基本方法	362
第二节	断裂判据	364
第三节	岩石断裂试验	366
第四节	岩体的断裂力学分析	370
第五节	节理岩体的损伤模型	377
第六节	损伤力学的有限元方法	383
第七节	岩体的细观断裂损伤力学模型研究	386
第八节	节理岩体各向异性损伤体的简化本构关系	391
第九节	岩体的脆塑性模型	395
第十节	损伤力学模型应用举例	400
第十三章	模型试验	404
第一节	模型的相似关系	404
第二节	岩体模拟	408
第三节	模型材料	412
第四节	模型量测	413
第五节	模型试验研究实例	415
第十四章	岩爆分析	422
第一节	概论	422
第二节	岩爆的成因	422
第三节	岩石脆性破坏	423
第四节	岩爆机制	425
第五节	岩爆烈度	427
第六节	岩爆的预测及治理	428
第七节	岩爆数值分析实例	430
参考文献	433

绪 论

岩石力学是近代发展起来的一门新兴学科，是一门应用性的基础学科。它的理论基础相当广泛，涉及固体力学、流体力学、计算数学、结构力学、弹塑性理论、工程地质和地球物理学等学科。因此，多学科的合作、协同研究是加速岩石力学发展的途径。

一、岩石力学与工程实践

过去，工程中遇到的岩石工程问题，多凭经验解决。但工程实践表明，单凭经验越来越难以适应日益发展的工程规模及工程的复杂性。如采深近400m的大型露天矿边坡角增减 1° 将影响投资变化可达数千万乃至亿美元，而且一旦边坡出现失稳将造成难以估量的经济和资源损失。在水电建设中，大型电站的坝高可达300m，地下厂房边墙高达50m，跨度达25m，常遇到复杂的地基、软弱夹层、地下水发育、大的喀斯特溶洞和高地应力等问题，这些都对岩石力学提出了许多新的课题。此外，各类地下工程的设计和施工中，要求对群硐围岩稳定深入分析研究；在能源建设中如天然气和石油的开发，核电站和核工业建设中的核废料处理等等，也都是难度极大的科研问题。对这些工程的设计和施工都要求系统地研究岩石的变形性状、破坏机制以及力学模型，从而在工程设计中预测岩石工程的可靠性和稳定性，并使工程具有尽可能的经济性。这些巨大的工程建设问题，为岩石力学提出了日益繁重复杂的任务，从而大大促进了岩石力学的发展。

岩石力学是研究岩石的力学性能的理论 and 应用的科学，是探讨岩石对其周围物理环境中力场的反应的力学分支，这个定义指出了岩石作为一种天然材料与其赋存的地质环境、形成历史、地壳运动以及工程因素之间的联系。

1959年12月法国Malpassat坝的破坏以及1960年10月意大利Vajont坝的大滑坡造成水库失效，都使生命财产遭到巨大损失。这两处大坝的失事，都不是坝本身出现问题，而是坝基及水库山体滑动的岩石力学问题。这些事故使人们认识到高坝岩基强度和稳定问题十分重要。岩石力学与工程专业国际组织开始出现，1966年在里斯本召开了第一届国际岩石力学会议，使岩石力学作为一个独立的学科开始了新的阶段。

二、岩石力学的研究方法

岩石力学是一门边缘学科，为了能用力学观点对自然存在的岩体进行性质测定和理论计算，为工程建设服务，岩石力学的研究方法包括科学实验，理论分析及工程验证等几个环节，三者是紧密结合并且相互促进的。

应当看到科学实验是岩石力学发展的基础，它包括实验室岩石力学参数的测定，模型试验，现场岩体的原位试验及监测技术，地应力的测定和岩体构造的测定等。由于岩石力学问题的广泛性，其涉及到的试验范围也越来越宽。如地质构造的勘测，大地层的力学测

定, 可为岩石力学提供必要的研究资料。另一方面, 室内岩石的微观测定也是岩石力学研究的重要手段。近代发展起来的新的试验技术都已不断地应用于岩石力学领域, 如遥感技术、激光散斑和切层扫描技术 (Tomograph) 等等, 都已逐渐为岩石工程服务。基于应用电子计算机技术而发展的近代计算力学的方法, 如有限元, 边界元, 离散元, 块体力学和反演分析等多种方法也已应用于岩石力学。在经典弹性和塑性理论的基础上, 流变力学、粘弹塑性理论、断裂力学和损伤力学等, 也在岩石力学中得到应用和发展。为了探讨岩体的渗流, 以及近年发展的岩体的处理及粉碎技术方面也已分别将流体力学和高速射流技术引入到了岩石力学。

岩石力学是一门应用性很强的工程学科, 因此在应用岩石力学知识解决具体工程问题的时候, 必须与工程设计与施工保持密切联系、互相配合。最近得到飞速发展的收敛量测、信息监控以及反馈设计施工的方法, 就是一个典型的例子。

按学科的区域区分岩石力学的研究方法可以有以下四个方面。

1. 地质研究方法

着重于研究与岩石的力学性质和力学行为有关的岩体, 如:

(1) 岩石岩相、岩层特征的研究 如软弱成份, 可溶盐类, 含水蚀变矿物, 不抗风化成份以及原生结构。

(2) 岩体结构研究 软弱结构面, 软弱面的起伏度, 结构面的充填物等等。

(3) 环境因素研究 如地应力成因和展布地下水性态, 水平地质条件等等。

2. 物理测试方法

(1) 结构探测 采用地球物理方法和技术来探查各种结构面的力学行为。

(2) 环境物理量测 如地应力机制, 渗透水系量测等等。

(3) 岩石物理、力学性质测试 如室内岩块的物理性质, 力学性质, 原位岩体的力学性质, 钻孔测试, 变形监测以及位移反分析确定岩体和岩性参数等等。

3. 力学分析方法

(1) 力学模型研究 包括弹塑性模型, 流变模型、断裂模型、损伤力学模型、渗透网络模型、拓扑模型等等。

(2) 数值分析方法 如有限元法, 边界元法, 离散元法, 系统分析法和设计施工风险决策的人工智能专家系统等等。

(3) 模糊聚类和概率分析 如随机分析, 灵敏度分析, 趋势分析, 时间序列分析和灰箱问题等等。

(4) 模拟分析 如光弹应力分析, 相似材料模型试验, 离心模型试验等等。

4. 整体综合分析方法

就整个工程进行多种方法并以系统工程为基线的综合分析。

三、岩石工程的主要研究问题

目前岩石工程建设中的主要问题有以下几方面。

(1) 水利水电建设:

- ①坝基及坝肩稳定性，防渗加固理论和技术；
- ②有压和无压引水隧道设计、施工及加固理论技术；
- ③大跨度高边墙地下厂房的围岩稳定及加固技术；
- ④高速水流冲刷的岩石力学问题；
- ⑤水库诱发地震的预报问题；
- ⑥库岸稳定及加固方法。

(2) 采矿工程：

- ①露天采矿边坡设计及稳定加固技术；
- ②井下开采中巷道和采场围岩稳定性问题，特别是软岩巷道和深部开采技术问题；
- ③矿柱稳定性及采场结构优化设计问题；
- ④矿井突水预测、预报及预处理理论和技术；
- ⑤煤与瓦斯突出预测及处理理论和技术；
- ⑥岩爆、岩爆预报及预处理理论和技术；
- ⑦采空区处理及地面沉降问题；
- ⑧岩石破碎问题。

(3) 铁道建设工程：

- ①线路边坡稳定性分析；
- ②隧道设计和施工技术；
- ③隧道施工中的地质超前预报及处理；
- ④高地应力的岩爆理论及处理；
- ⑤隧道入口施工技术及洞脸边坡角确定和加固措施。

(4) 核电站建设中核废料处理技术。

(5) 石油开采中井损防治及采空区地面变形问题。

(6) 山城及高层建筑的地基问题。

(7) 地层热能资源开发技术问题。

(8) 地震预报中的岩石力学问题。

以上只是些主要方面，随着建设的发展，还会有新问题不断地提出。

四、岩石力学发展简况和前景瞻望

岩石力学与经济建设很多部门有关，因而各个国家都投入了一定的人力物力进行广泛的研究。在欧洲首先值得介绍的是奥地利岩石力学学派，或称之为Salzburg学派。新奥法隧道施工，就是这个学派取得的成就之一。过去进行岩石工程的设计施工需要考虑工程地质条件。工程地质人员所做的地质描述，只能给工程设计人员提供定性的概念，很少能提供用于实际计算的数据。工程地质有从定性描述向定量方向发展的迫切要求。奥地利J. Stini是一位工程地质学家。他一再强调，应该对岩体的结构面，如断层、节理和裂隙等进行观测和考察，研究它们的作用及其对岩石力学性质的影响，要做定性的研究，更要提出定量的数据。1951年他和L. Müller等人一起联合有关学科的学者和工程师，在奥地利

Salzburg发起和举行了以岩石力学为主题的第一次国际岩石力学讨论会，为把工程地质与力学相结合，建立岩石力学这个边缘学科跨出了重要的一步。从那时起直到1975年，共举行了21次讨论会，并创办了“地质与土木工程”杂志发表他们的研究成果，形成了Salzburg学派。他们反对把岩石当做连续介质，简单地利用固体力学的原理进行岩石力学特性的分析，而是强调必须考虑节理、裂隙、断层等地质结构构造来进行研究，地下水的作用也必须同时考虑。1962年世界各国包括各种不同学派观点的学者和这个组织一起发起成立世界性的组织—国际岩石力学学会。“地质与土木工程”杂志也改名为“岩石力学”继续出版。Stini逝世后，Müller领导联邦德国Karlsruhe大学的土力学岩石力学研究所，继续坚持他们的研究方向。

在联邦德国除了Karlsruhe大学外，象Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen大学和Ruhr—Universität, Bochum的有关研究所，都是岩石力学研究的重要基地。

英国的岩石力学研究工作是与矿业发展密切联系的。结合地下采矿对围岩的维护和露天开采对边坡稳定的研究，学者们对岩石力学的发展做出过成绩。如帝国理工学院的著名学者E. Hoek和J.W. Bray等。另外，以Wales大学O.C. Zienkiewicz教授为首的小组，对岩石力学数值方法的发展，作出了重要贡献。

苏联早在50年代就从事与矿山有关的岩石力学的研究工作。他们早期的工作多借用连续介质力学的理论。苏联的地质界并不重视研究岩石力学。因此工程地质与力学相结合的工作进程迟缓。一直到近年来才开始注意裂隙岩体。以苏联著名岩石力学家K.B. Руппеч-нер为例，1950年他所著的《岩石力学导论》系利用弹性力学求解岩石力学问题，1964年发表了利用概率解决岩石强度和变形问题，直到1975年发表裂隙岩体的变形的专著。这是由连续介质理论发展到裂隙岩体理论的过程。苏联除各大学专门设有岩石力学与矿岩物理研究所外，其它各加盟共和国的研究院和有关产业部门也非常重视岩石力学研究工作。另一些国家如波兰和南斯拉夫，在岩石力学方面都进行了大量的研究工作。南斯拉夫的Zavodprivreda Jaroslav Cerni研究所早在60年代就进行了大量岩石的量测试验工作。此外在瑞典和挪威都在进行岩石力学研究工作。例如挪威的地学研究院也在岩石力学研究工作中作出过重要贡献。挪威设于奥斯陆的挪威国家岩土力学与工程研究所以及北部TRonholm城的挪威工业技术大学也是以岩石力学实验为中心的研究基地。现任该大学岩石力学教授E. Broch为现任国际隧道协会主席。

葡萄牙是研究岩石力学较早的国家之一。代表这个国家研究水平的即其国家土木工程研究所。第一届国际岩石力学学会主席M. Rocha即是这个机构的创始人。他们在拱基，地下工程，特别是试验技术方面的成就，在国际上具有很高声誉。意大利也是研究岩石力学较多的国家。如其结构模型试验研究所的岩土力学模型试验具有很高技术水平。

美国早期的岩石力学的研究工作都是结合采矿工作进行的。如美国的矿业局，他们的研究目的是企图解决地下开采和露天开挖中的一系列技术问题。其中象L. Obert和W.I. Durrall根据弹性理论对地下坑道的受力分析，一直是50~60年代地下坑道设计规范的依据。1965年由美国地球物理联合会，矿冶研究所，土木学会，材料学会，地质学会，矿业学会

等单位联合组成岩石力学学会委员会，后改称联邦岩石力学委员会，把岩石力学在各个领域中取得的成果进行交流推广，进一步推动了岩石力学的发展。他们从1956年在Colorado矿业学院举行了第一次全美岩石力学学术会议，至今基本上每年举行一次，始终没有间断。美国研究岩石力学的机构据1966年统计就有34所之多，研究单位多集中在高等学校。美国研究岩石力学的学术观点是各式各样的，即有类似于奥地利学派，重视节理、裂隙作用从整个岩体出发的依利诺斯大学教授D.Deere和加州大学（伯克莱）教授R.E.Goodman，又有从所谓异质体力学（Mechanics of heterogentous media）角度进行岩石力学性质研究的观点，形成百花齐放的局面，大大促进了岩石力学的发展。

在加拿大以及澳大利亚都比较重视岩石力学的研究。加拿大成立有国家岩石力学委员会，自1962年开始举行自己的岩石力学讨论会，到1988年就举行了14次。澳大利亚大学在澳大利亚科学院院士 M.S.Paterson 领导下，对于岩石脆性破坏和高温高压下的岩石力学性能等方面做出很大贡献。

此外，在南非由于矿业发达，对岩石力学的研究也很重视，他们的科学与工业研究会组织了大量的岩石力学研究工作。

日本也很重视岩石力学的研究。1964年由日本的土木学会，矿业学会，土质工学会和材料学会等四个学会中的岩石力学工作者们共同组成一个岩石力学研究会，同年召集了第一次学术会议。1979年改组为岩石力学联合会。日本学者在研究岩石的流变性能方面做出很多成绩。

印度也进行了不少岩石力学研究工作。它成立有国际岩石力学学会印度国家小组结合水工筑坝等工程进行工作。

在我国，建国后随着国民经济建设的发展，陆续建立了一些研究岩石力学的研究机构。如中国科学院岩土力学研究所，地质研究所工程地质室等。一些产业和高校部门的研究院也设立了相应的研究机构，如长江水电科学院的岩基室，冶金部矿冶研究所压力室，煤炭科学院岩石力学研究室和不少大学的岩石力学实验室等等。特别是随着长江各级水利枢纽的开发，成立了全国岩基组，集中全国有关的许多单位的科技专家系统地开展了包括坝基、地下结构、岩质边坡、岩石动力学特性和灌浆处理等方面的试验研究工作，使我国岩石力学的发展进入了新阶段，并获得一系列重大成果。陈宗基教授把流变学引入岩石力学并推广到各向异性岩体，提出了围岩应力场随时间而变化 and 由于岩体流变与回弹，隧洞衬砌所受压力将随时间增加等概念。后来他又提出岩石扩容和长期强度的本构方程，进一步发展了岩石流变扩容理论。谷德振教授提出了“工程地质力学”观点，认为岩体与一般岩石的差别在于它是受结构面纵横切割的多裂隙体，岩体内结构面控制着岩体变形，破坏机制及力学法则，因此必须重视结构面力学效应的研究；在研究结构面力学特性时，必须以地质成因为基础对结构面自然特性做细致的研究，掌握结构面的地质特点来指导岩石力学的研究工作是岩体基本力学特性研究的基础。在此基础上提出岩体分为块裂结构，完整结构，碎裂结构和散体结构，按照岩体结构不同类型分别研究其力学特性。1966年以前只有少数产业部门比较重视岩石力学的研究工作，例如水电、煤炭和冶金等，随着工程实践所取得的经验和教训，使得更多部门（如建筑，铁道，国防，人防等）的有关技术人员认

识到，必须充分了解岩石的力学性质，才能解决好岩石工程的技术问题。因而比较多的部门和单位开始重视了这方面的工作。特别是1976年以后，许多学术团体恢复活动并新建了一些有关岩石力学的学术组织。1981年成立了中国岩石力学与工程学会筹备组，随后成立国际岩石力学中国小组。这些都说明我国岩石力学的研究工作进入了一个新时期。1974年国际岩石力学第4次会议在瑞士 Montreux 召开，我国首次派出代表团参加了会议。1985年我国正式成立了中国岩石力学与工程学会。随着国内岩石力学科学技术的发展，我国在世界岩石力学界的地位正在逐步提高。

第一章 岩石的力学特性

第一节 室内岩石力学性质试验

岩石试验是岩石力学的基础，室内试验是研究岩石力学的重要手段，岩石力学试验包括强度和变形特性的测试。本节主要叙述岩石的刚性压力机及其单轴压力试验。

一、单轴压力试验

以往绝大多数材料试验都是在普通试验机上做的，由于这种压力机的刚度不够大，可能掩盖材料的某些力学特征。如岩石或混凝土等脆性材料的试样经常在压力机试验时当荷载到达或刚好通过应力应变曲线的峰值之后，就迅猛地几乎是爆炸性地崩解而终止。只有用刚性压力机试验才能得到岩石类材料破坏过程的全应力应变曲线。

现定义结构的刚度为

$$K = P / \delta_x \quad (1-1)$$

式中， δ_x 为 P 力作用下沿 P 作用方向发生的位移。

此时贮存于结构中的弹性应变能为

$$S = P^2 / 2K$$

对压力机系统，如图1-1(a)所示，在压力试验作用下贮存的弹性能为

$$S = \frac{P^2}{2} (1/K_R + 1/K_m) \quad (1-2)$$

式中， K_R 、 K_m 分别为岩石和压力机的刚度。

取 $K_R = 3 \times 10^4 \text{ MPa} \cdot \text{cm}$ ， $K_m = 0.7 \times 10^4 \text{ MPa} \cdot \text{cm}$ ，看出压力机贮存的能量相当于试样的4倍。这样，当试件破坏时，压力机和试件都要将式(1-2)的能量释放出来，而压力机释放的能量就会影响试样的破坏，以致于影响了试件的变形，软化部分表现不出来。在图1-1(b)中可以看到，柔性压力机的刚度用平线 K_1 表示，而刚性压力机的刚度用陡线 K_2 表示，试验的真正应力应变曲线介于两者之间。当卸载使试件发生 Δx 的压缩量时，这

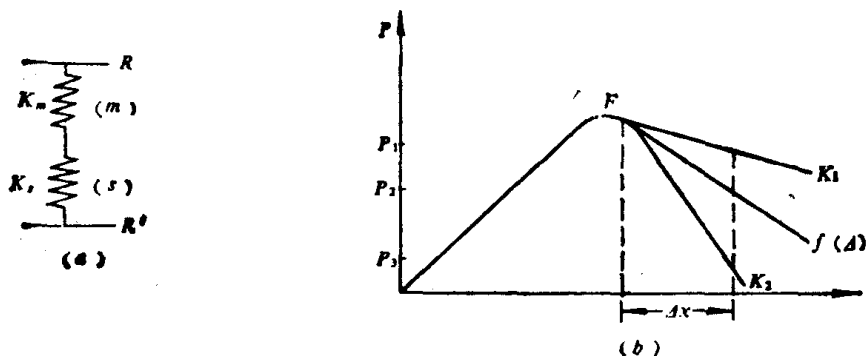


图 1-1