

明教 子 山

TD31
L-757

高等学校教学用书

岩石力学简明教程

李世平 编

中国矿业学院出版社

内 容 简 介

本书的特色是以综合研究方法为主导思想,突出地下工程特点,反映国内外最新动态,叙述简明扼要。

第一章岩石力学性质,讲述岩块、节理与岩体的组构特征、本构关系与强度准则,较系统地介绍了流变模型理论的基本知识。第二章原岩应力,介绍最新的麦克库钦理论,三孔汇交法及单孔实测三维原岩应力的计算方法。第三章地下工程稳定性,以综合研究为主线,讲述地下工程围岩应力、位移、破坏范围及支护压力等稳定性基本内容。第四章井巷维护,侧重讲述煤矿井巷维护原则、方法、支护分类和支护设计的基本知识,扼要介绍软岩支护、新奥法及深部井巷维护特点。

本书是煤炭高等学校矿井建设专业(岩石力学)课程的通用教材,也可供其他大专院校地下工程类专业师生及工程技术人员参考。

本书经煤炭部高校采矿工程教材编审委员会委员冯豫副教授主持审定。

责任编辑:莫国震

高等学校教学用书 岩石力学简明教程

李世平 编

*

中国矿业学院出版社 出版
社 部:江苏省徐州市中国矿业学院内
编辑部:北京市学院路13号
中国矿业学院印刷厂 印刷

*

开本787×1092 1/16 印张14.5
字数348千字 印数1—8150
1986年6月第1版 1986年6月第1次印刷
统一书号15443·004 定价2.65元



目 录

绪 论	(1)
第一章 岩石力学性质	(4)
第一节 岩石组构特征	(4)
第二节 岩块变形性质	(5)
第三节 岩块强度	(19)
第四节 岩块的时间效应与流变性质	(38)
第五节 弱面(节理)变形与强度	(57)
第六节 岩体变形与强度	(66)
第二章 原岩应力	(75)
第一节 概况	(75)
第二节 原岩应力实测方法	(85)
第三章 地下工程(井巷)稳定性	(97)
第一节 概述	(97)
第二节 井巷围岩的弹性应力状态	(98)
第三节 井巷围岩的弹性与粘弹性位移	(113)
第四节 井巷围岩的弹塑性应力与位移	(115)
第五节 数值计算方法	(125)
第六节 井巷地压	(135)
第七节 实测与模拟方法	(165)
第四章 井巷维护	(185)
第一节 井巷维护原则	(185)
第二节 锚喷支护	(189)
第三节 普通支护	(200)
第四节 软岩巷道支护与新奥法	(211)
第五节 深部巷道维护简介	(219)
参考文献	(221)

绪 论

到2000年,我国的煤产量计划翻一番,从六亿吨增加到十二亿吨。这就需要建设数百对新矿井,开掘数百万米井巷。金属矿山、铁路公路、水利水电、军事和人防工程等,也需要开掘大量井巷、隧道和各种峒库。

这些统称地下工程。开掘地下空间的过程,是人为施加爆炸力或机械切削力将岩石破碎、运出。掘出的空间,在围岩自重及构造应力作用下,可能向空间变形、破碎,需用人为方法维护使之稳定。破碎与稳定,是岩石力学的两个主要方面的内容。

岩石力学(Rock Mechanics)的定义颇多,迄今不统一。这里推荐一种较广义、较严格的定义,即1964年5月美国地质学会岩石力学委员会所下的定义[1、2]:

“岩石力学是研究岩石的力学性状(behaviour)的一门理论科学,同时也是应用科学;它是力学的一个分支,研究岩石对于各种物理环境的力场所产生的效应。”

这个定义,概括了破碎与稳定两方面主题,也概括了岩石受到一切力场作用所引起的各种力学效应。

除了研究地下工程的破碎与稳定力学问题以外,天然边坡和人工边坡工程(slope engineering)、坝基工程(dam foundation)、岩体中的渗流(permeability)问题、泥石流(mud-rock flow)问题、以至地震(earthquake)工程等,也都属于岩石力学研究范畴,而且也都是对我国“四化”建设极有意义的研究范畴。

岩石力学的研究历史不长。早期多为零星的研究,且多数借用土力学理论,发展缓慢。第一部出版的以《岩石力学》命名的专著,是1934年苏联秦巴列维奇(П.М.Цимбаревич)写的《Механика горных пород》[3]。

本世纪五十年代以后,由于世界采矿工程的发展,尤其是受到大型水电工程和军事工程的推动,岩石力学无论是在实验手段上还是在理论上,都有了比较显著的进步。例如,在实验手段方面: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一个新水平;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;各种电、声、光、热、磁及机械式传感器的应用,使对岩土工程中的应力、位移、破裂发展等能够进行有效的监控。在理论方面,由于弹塑性理论及流变学的进展,有限元法和边界元法等数值计算方法的应用,已使岩石力学从过去只能分析均质、各向同性、线弹性以及简单断面形状的工程课题,发展到目前已经能分析某些不均质、非线性、各向异性、弹塑性、粘弹性、粘弹塑性,以及上述多种因素组合的、断面形状比较复杂的工程课题。不过,从总的状况看,岩石力学还存在许多问题有待进一步深入研究解决,距成熟阶段相差尚远,故仍可说是一门“发展中学科”。

今天,岩石力学是国内外研究的热门之一。有各种国际性组织,如国际岩石力学学会(International Society for Rock Mechanics,简称ISRM),世界采矿大会国际岩石力学局(International Bureau of Rock Mechanics,简称IBRM)等。有定期的国际会议,如从1954年起,美国一些大学轮流主持每一、两年召开一次岩石力学讨论会,迄今已达24届;1972年起,欧洲岩石力学局每一、两年举行一次岩石力学学术报告会;1979年6月开完第六届;1966年起,国际岩石力学学会每四年举行一次世界岩石力学

大会, 1983年4月在澳大利亚墨尔本召开第五届, 我国首次有十几篇论文参加大会, 此外, 加拿大也每一、两年举行一次岩石力学讨论会。以上各种大会都出有会刊。此外, 还有一些国际岩石力学期刊, 主要有以下三种:

1. 在英国伦敦出版的《国际岩石力学与采矿科学杂志附岩土力学文摘》(International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts), 1963年创刊, 每年4~6期。

2. 在奥地利出版的《岩石力学》(Rock Mechanics), 1968年创刊, 月刊。

3. 在英国出版的《国际岩土力学数值及分析方法杂志》(International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics), 1976年创刊, 季刊。

我国设有国际岩石力学学会中国小组。各专业学会下设有岩石力学委员会。跨部门的岩石力学学会正在酝酿成立。中国煤炭学会下设的岩石力学专业委员会, 1978年举行了第一届岩石力学学术报告会。我国出版的岩石力学期刊, 主要有: 1976年创刊的中国科技情报所重庆分所主办的《地下工程》, 1979年创刊南京出版的《岩土工程学报》, 1982年底创刊的国际岩石力学学会中国小组主办的《岩石力学与工程学报》等。

本教程偏重讲述矿山地下工程稳定方面的内容。共分四章: 第一章——岩石力学性质; 第二章——原岩应力; 第三章——井巷稳定性; 第四章——井巷维护。按授课60~70学时编写。计划学时较少时, 可酌情删减书中用小号字排印的内容。

地下工程事故中, 约三分之一到二分之一是由于支护不当或不及时所造成。井巷工程成本中, 支护及维修费用约占40~60%。研究岩石力学的目的, 在于科学、合理、安全地维护井巷的稳定性, 保证安全生产, 降低维护成本。节省每米巷道维护成本, 积少成多, 总量十分可观。

这本简明教程的编著思想之一, 是想适应时代要求, 在学时和学生水平容许的条件下, 尽量把比较现代化的岩石力学的最基本的内容教给学生。这就必须介绍近二、三十年来岩石力学在理论和实验方面比较重要的进展。这些进展包括:

1. 刚性试验机和伺服试验机;
2. 全应力应变曲线与本构方程;
3. 流变模型理论;
4. 节理(弱面)性质研究;
5. 岩体性质研究、各向异性性质研究;
6. ISRM关于岩体试验建议方法;
7. 原岩应力实测成果;
8. 麦克库钦原岩自重应力场新理论;
9. 单孔实测三维原岩应力, 水裂法实测原岩应力;
10. 用复变函数解巷道弹性平面问题;
11. 井巷围岩的弹性及弹塑性(极限平衡)分析;
12. 岩体应力、位移、松动圈、井巷地压的实测和模拟研究方法;
13. 围岩——支护共同作用分析;
14. 有限元与边界元数值计算方法;
15. 采动影响规律;

16. 锚喷理论与实践;
17. 软岩支护与新奥法;
18. 深部地压与巷道维护, 等。

其中, 有限元法和边界元法在岩石力学中的应用, 是近二、三十年来岩石力学的突破性进展。这些数值计算方法, 原则上已能处理许多不能用解析方法解决的重要岩石力学问题。这些数值计算方法本身仍在不断发展完善, 同时, 它们对岩石力学性质、原岩应力实测、岩体应力与位移实测研究等方面, 提出了更高的要求, 并且对这些方面的进一步发展起推动作用。

本教程遵循的编写原则是:

1. 理论与实践并重。既重视试验结果, 同时交待试验方法。既重视较严格的理论分析与数值分析, 又重视便于工程实用的计算方法与公式(如普氏、太沙基公式等)。

2. “综合研究方法”是解决岩石力学问题的唯一正确途径。不片面推崇“理论至上”, 也不主张“实测第一”。赞成从理论分析、数值计算、实测、模拟, 以及数理统计等多种途径, 共同综合解决同一岩土工程问题。各种方法不应对立, 而应相辅相成。

3. 概念与推导兼顾, 但偏重概念。概念力求交待清楚, 一般只给出主要推导步骤。在概念上, 注意突出地下工程的特点。地下工程在力学上和结构上的主要特点有:

1) 岩石在组构与力学性质上与其它材料的不同点, 如具有节理和塑性段的扩容(剪胀)现象等;

2) 地下工程是先受(原岩应)力, 后(开巷)挖洞;

3) 深埋巷道属于无限域问题, 影响圈内自重可以忽略;

4) 大部分较长巷道可作为平面应变问题处理;

5) 围岩与支护二者共同决定着围岩的变形破裂过程与支护所受荷载与位移; 支架特性反过来又能影响自身所受荷载;

6) 地下工程结构容许超负荷时具有可缩性;

7) 地下工程结构在一定条件下出现围岩抗力;

8) 几何不稳定结构在地下可以是稳定的。

4. 注意介绍较新的成就, 但又客观指出存在问题和未解决的难题。

5. 为巩固所学知识, 各章后附必要的习题。

限于水平及时间, 错误遗漏之处, 定所难免。热诚欢迎对本这简明教程存在的一切问题给予批评指正。

在本书编写校订过程中, 得到冯豫、李先炜、陈子荫、朱效嘉、范广勤、高桐、庞俊勇、洪赓武、吴振业、徐梓炘等同志的热情帮助, 在此表示衷心感谢。

第一章 岩石力学性质

岩石力学是固体力学的一个分支。固体力学的基本方程中，平衡方程和几何方程，都与材料性质无关，而本构方程（物理方程、物性方程）和强度准则，则因材料而异。

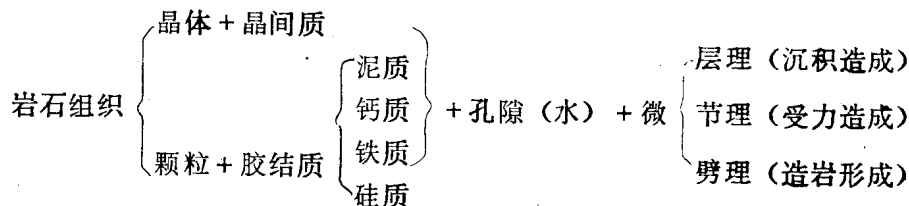
研究岩石变形性质的目的，是建立岩石自身特有的本构关系或本构方程（constitutive law or equation）并确定有关参数。研究岩石强度性质的目的，是建立适应岩石特点的强度准则并确定有关参数。此外，岩石力学性质是岩石分类的重要依据之一，而岩石分类对于生产技术管理，以及支护和施工设备选型有密切关系。由此可见，岩石力学性质的研究，是整个岩石力学研究的前提和重要的基础。

第一节 岩石组构特征

岩石是大自然产物，其组成成份、结构、致密程度等，差异很大。

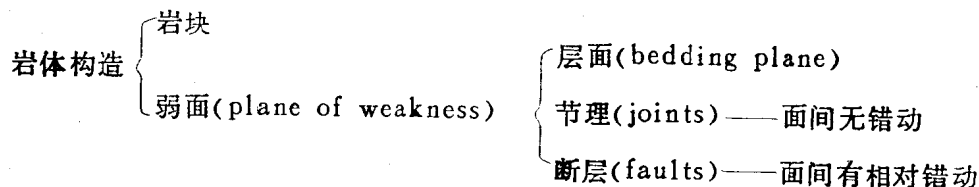
岩石组构(fabric)，通常指其组织和构造。

从小范围的岩块(rock element)看岩石组织(texture)：



岩石单晶体具有很高的强度，但孔隙及微节理使其削弱。所以强度序次为：晶体 > 颗粒 > 岩块。

从较大范围看岩体(rock mass)构造(structure)：



由于弱面存在，岩体强度通常小于岩块强度。

以下约定：岩石为不分“岩体”和“岩块”时的统称；岩体 = 岩块 + 弱面；岩体中由弱面分割包围的即是岩块。

岩石中有孔隙，但这不是岩石独有的性质。因为致密的岩石与一些人工材料的致密程度不相上下，另一些人工材料也多孔隙。但任何人工材料不容许其中存在裂隙。所以，岩石中含有或多或少的弱面或节理，乃是其组构上最独特的特征。岩石可说是一种“有（或多或少）弱面（节理）的天然材料”。

岩石中节理常成组出现。通常一组是主要的，其它组是次要的。常见一、两组节理与层面大体正交，这两组节理本身又正交或斜交。另一组节理与层面大致平行。有的成组节理为X状节理。

节理大小不等。小的人眼难辨。大的延展数米至十几米。微小节理很难逐一考虑，其影响通常由试验结果反映在统一指标之中。大的节理、断层等，则由地质调查确定方位、

产状, 其影响常需单独加以考虑。

节理极端发育时, 无法计及每一节理, 只能当做“松散”岩体处理。

岩石分类方法较多。不同部门或学科, 侧重点不同。本课程重视稳定性。表 1-1 是煤炭工业常用的按稳定性为主要依据的岩石分类表。

岩石分类对地下工程施工与维护方法的选择, 以及工程经济管理等, 有重要指导意义。今后还将在第四章引用有关井巷维护的一些分类方法。

由于岩石成因多样, 并含有弱面、节理, 使得岩性的变化范围很大:

由连续至不连续;

由均质至不均质;

由各向同性至各向异性 (横观同性、正交异性、斜交异性、极端各向异性);

由线性至非线性;

由非流变性至流变性, 等。

所以, 对于具体岩石的属性, 应该具体分析。笼统地、过分地强调哪个极端, 都不恰当。

第二节 岩块变形性质

岩块的应力应变关系只能靠试验来建立。岩石的应力应变关系, 即本构关系, 是岩石力学最基本的关系或方程之一, 其重要地位相当于弹性力学中的虎克定律。

本书以后约定: 以压应力为正应力。

一、试验设备与仪器

1. 普通材料试验机

普通的压力或万能试验机, 是由加载架、液压加载系统和量测系统三部分组成。主要规格有 100、300、600、1000、2000、3000kN (相当于 10、30、60、100、200、300tf) 几种。

长期以来, 岩块的变形与强度性质主要靠普通材料试验机进行研究。但在实践中发现, 进行岩石单轴抗压试验时, 在达到岩石强度极限 (峰值) 的瞬间, 往往产生试件“爆裂”现象, 以致很难测得接近及达到峰值时的应力应变关系, 更无法获得峰值后的任何信息。

试件爆裂的原因, 主要是机器的刚度相对较小。

刚度(stiffness) K 的定义如下式所示:

$$K = \frac{P}{\Delta l} \quad (1-1)$$

式中 Δl 为沿受力 P 方向的位移, 所以刚度即是引起单位位移所需之力。

由虎克定律及应力、应变定义: $\epsilon = \sigma/E$, $\sigma = P/F$, $\epsilon = \Delta l/l$, 式 (1-1) 可改写为

$$K = \frac{EF}{l} \quad (1-2)$$

式中 E ——弹模;

F ——截面积;

l ——长度。

表 1-1 煤 炭 部 石 分 类 表

围岩分类		岩性描述	巷道开掘后的稳定状态 (3~4 m 跨度)	岩种举例
类别	名称			
1	稳定岩层	1. 完整、坚硬岩层, 饱和抗压强度 $R_b > 60 \text{MPa}$ (600kgf/cm^2), 不易风化 2. 层状岩层, 层间胶结好, 无软弱夹层	围岩稳定, 长期不支护, 无碎块掉落现象	完整的玄武岩、石英质砂岩、奥陶纪灰岩、茅口灰岩、大二台厚层灰岩
2	稳定性较好岩层	1. 完整、比较坚硬岩层, $R_b = 40 \sim 60 \text{MPa}$ ($400 \sim 600 \text{kgf/cm}^2$) / 层 2. 状岩层, 胶结较好 3. 坚硬块状岩层, 裂隙面闭合, 无泥质充填物, $R_b > 60 \text{MPa}$ (600kgf/cm^2)	围岩基本稳定, 较长时间不支护, 会出现小块掉落	胶结好的砂岩、砾岩、大二台薄层灰岩
3	中等稳定岩层	1. 完整的中厚岩层, $R_b = 20 \sim 40 \text{MPa}$ ($200 \sim 400 \text{kgf/cm}^2$) 2. 层状岩层, 以坚硬岩层为主, 夹有少数软岩层 3. 比较坚硬的块状岩层, $R_b = 40 \sim 60 \text{MPa}$ ($400 \sim 600 \text{kgf/cm}^2$)	能维持一个月以上稳定, 局部会产生岩块掉落	砂岩、砂质页岩、石灰岩、硬质凝灰岩
4	稳定性较差岩层	1. 较软的完整岩层, $R_b > 20 \text{MPa}$ (200kgf/cm^2) 2. 中硬的层状岩层 3. 中硬的块状岩层, $R_b = 20 \sim 40 \text{MPa}$ ($200 \sim 400 \text{kgf/cm}^2$)	围岩稳定时间仅有几天	页岩、胶结不好的砂石岩、硬煤
5	不稳定岩层	1. 易风化溶解剥离的松软岩层 2 各类破碎岩	围岩很容易产生冒顶、片帮及底鼓	炭质泥岩、花斑泥岩、软质凝灰岩、煤、破碎的各类岩石
说明		1. 岩层描述将岩层分为完整的、层状的、块状的和破碎的四种。(1)完整岩层: 层理和节理、裂隙的间距 $>1.5\text{m}$; (2)层状岩层: 层与层的间距 $>1.5\text{m}$; (3)块状岩层: 节理、裂隙间距小于 1.5m , 大于 0.3m ; (4)破碎岩层: 节理、裂隙间距 $<0.3\text{m}$ 2. 当地下水影响围岩的稳定性时, 应考虑适当降低类别		

试验机的刚度 $K_m = E_m F_m / l_m$ (E_m 、 F_m 、 l_m 都为机器的折算等效值), 通常只有 0.18 MN/mm; 而岩石试件的刚度 $K_r = E_r F_r / l_r$, 一般达到 0.7 MN/mm, 即通常有 $K_r > K_m$ 。

下面通过讨论试验过程中机器和岩石试件的压力位移关系及应变能的变化, 来分析试件爆裂与不爆裂条件。

加载时 (图 1-1), 机器和试件都积蓄应变能。

$$\text{机器应变能 } E_m = \frac{1}{2} P u_m = \frac{1}{2} P \cdot \frac{P}{K_m} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P^2}{K_m} \quad (1-3)$$

$$\text{岩石试件应变能 } E_r = \frac{1}{2} \cdot \frac{P^2}{K_r} \quad (1-4)$$

破裂的瞬间, E_r 大部分转化为裂缝扩展、声响、震动等而消耗掉。 E_m 也要按一定方式释放。

图 1-2 为试件破裂后继续变形、机器释放能量、以及试件与机器两者刚度之间的关系。

由图 1-2 看出: 峰值后段岩石的刚度 (即其斜率) 为负值, 即

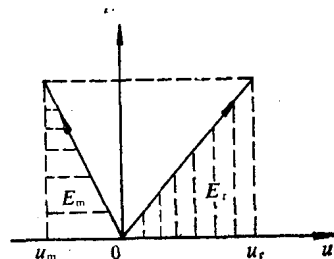


图1-1 加载时岩石和机器的压力位移曲线与应变能

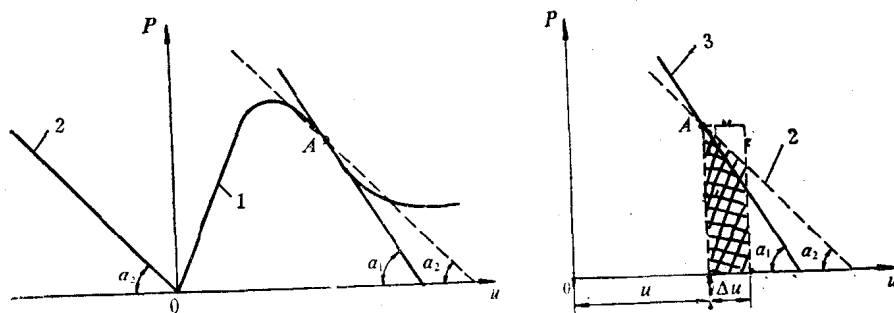


图1-2 峰后区岩石与试验机的刚度分析比较

1—岩石压力—位移曲线; 2—试验机压力—位移曲线; 3—岩石曲线在A点的切线

$$\frac{dP}{du} = \operatorname{tg}(180^\circ - \alpha_1) = -\operatorname{tg}\alpha_1, \quad \left| \frac{dP}{du} \right| = \operatorname{tg}\alpha_1; \text{ 而机器的刚度不变, 为 } K_m = \operatorname{tg}(180^\circ - \alpha_2) = -\operatorname{tg}\alpha_2, \quad |K_m| = \operatorname{tg}\alpha_2.$$

若在A点有一位移增量 Δu , 则

机器释放能量为

$$\Delta E_m = P \cdot \Delta u - \frac{1}{2} \Delta u \cdot \operatorname{tg}\alpha_2 \cdot \Delta u = P \cdot \Delta u - \frac{1}{2} \Delta u^2 |K_m| \quad (1-5)$$

使岩石试件继续平静地 (不爆裂) 位移所需的能量为

$$\Delta E_r = P \cdot \Delta u - \frac{1}{2} \cdot \Delta u \cdot \operatorname{tg}\alpha_1 \cdot \Delta u = P \cdot \Delta u - \frac{1}{2} \Delta u^2 \left| \frac{dP}{du} \right| \quad (1-6)$$

显然, 如果 $\Delta E_m < \Delta E_r$, 则岩石试件除吸收机器释放的能量以外, 尚需添加其它能量才能继续位移, 故试件不可能爆裂。此时, $\operatorname{tg}\alpha_2 > \operatorname{tg}\alpha_1$, $\alpha_2 > \alpha_1$, 或得

$$|K_m| > \left| \frac{dP}{du} \right| \quad \text{试验机刚度大于岩石试件刚度} \quad (1-7)$$

反之, 如果 $\Delta E_m > \Delta E_r$, 则试件必爆裂。此时, $\operatorname{tg} \alpha_2 < \operatorname{tg} \alpha_1$, $\alpha_2 < \alpha_1$, 或得

$$\left| K_m \right| < \left| \frac{dP}{du} \right| \quad (1-8)$$

可见, 当峰后区机器刚度的绝对值小于岩石试件压力位移曲线斜率的绝对值, 岩石试件即产生爆裂现象。反之, 则不会产生。

据鲁梅尔(F. Rummel)研究[4], 试验机刚度并不影响峰值的大小(即裂纹的出现)只影响峰后区试件是否爆裂。证明如下:

设试件中原有裂纹刚度为 K_c , 岩石截面刚度为 $K_r = \text{const}$, 则应变能*

$$E = \frac{P^2}{2(K_c + K_r)} \quad (1-9)$$

应变能增量

$$dE = \frac{P \cdot dP}{(K_c + K_r)} - \frac{P^2}{2} \cdot d\left(\frac{1}{K_c + K_r}\right) \quad (1-10)$$

当达到峰值的瞬间:

1) 对于柔性试验机

因试件破裂, 载荷增加不上去, 而 $P = \text{const}$, $dP = 0$, 式(1-10)变成

$$dE = -\frac{P^2}{2} d\left(\frac{1}{K_c + K_r}\right)$$

压板或试件端面位移所做的功

$$dW = -Pdu$$

而 $u = \frac{P}{K_c + K_r}$, $du = -\frac{Pd(K_c)}{(K_c + K_r)^2}$

$$dW = \frac{P^2 d(K_c)}{(K_c + K_r)^2} \quad (1-11)$$

$$\text{总能量变化 } \Delta U = \Delta W \text{ (外力功)} + \Delta E \text{ (应变能)} + \Delta S \text{ (表面应变能)} \quad (1-12)$$

$$\Delta U = \frac{P^2 d(K_c)}{(K_c + K_r)^2} - \frac{P^2}{2} d\left(\frac{1}{K_c + K_r}\right) + \Delta S \quad (1-13)$$

2) 对于刚性试验机

设其刚度 $K_m = \infty$, 则 $du = 0$, $dW = 0$ ($P \neq 0$),

因 $du = \frac{dP}{K_c + K_r} - \frac{Pd(K_c)}{(K_c + K_r)^2} = 0$

即 $\frac{dP}{K_c + K_r} = \frac{Pd(K_c)}{(K_c + K_r)^2} \quad (1-14)$

由式(1-10)、(1-14)

$$dE = \frac{P^2 d(K_c)}{(K_c + K_r)^2} - \frac{P^2}{2} d\left(\frac{1}{K_c + K_r}\right)$$

再由式(1-12) 即得

* 文献[4]中应变能公式写为 $E = \frac{1}{2}(K_c + K_r)P^2$, 其中刚度项 $(K_c + K_r)$ 位在分子上, 似不合一般刚度定义。现按一般刚度定义, 将该项置于分母, 重新推导其余的公式, 同样得以证明——编者注。

$$\Delta U = \frac{P^2 d(K_s)}{(K_s + K_r)^2} - \frac{P^2}{2} d\left(\frac{1}{K_s + K_r}\right) + \Delta S \quad (1-15)$$

式 (1-13) 与 (1-15) 完全相同, 故证明机器刚度不影响裂纹出现或峰值大小, 只影响峰后是否爆裂。

从上面对爆裂条件的分析, 可找到为克服爆裂现象的

改进途径为: $\left\{ \begin{array}{l} \text{提高试验机刚度;} \\ \text{改变峰值前后的加载方式;} \\ \text{伺服控制试件位移。} \end{array} \right.$

与此相应而出现三类新型岩石力学试验机, 即“刚性试验机”③

“复式加载试验机”④与“电液伺服试验机”⑤

2. 刚性试验机(stiff testing system)

实现办法有二:

1) 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, 使整机系统达到满足的刚度;

2) 在普通材料试验机上、下压板之间, 临时附加一金属圆筒或一组刚性组件(图1-3), 使它与岩石试件共同受力协同变形。圆筒或刚性组件的高度与试件相同或稍大, 具有较高的刚度, 且其刚度折算归于试验机系统, 从而使试验机刚度超过岩石试件的刚度。

第二种方法简便易行, 国内外获得广泛采用, 库克(N.G.W. Cook, 1965)采用钢圆筒, 使试验机刚度从0.28MN/mm提高到1.37MN/mm; 宾尼奥斯基(Z.T. Bieniawski, 1966)采用刚性组件, 使试验机刚度从0.11MN/mm提高到1.81MN/mm [5]。

3. 复式加载刚性试验机

1966年, 库克和霍杰姆(J.P.M. Hojem)首次研制成以复式加载原理为基础的刚性试验机[5]。1979至1980年, 我国武汉岩土力学研究所与阜新矿业学院也研制成复式加载刚性试验机[6、7]。前者的试验机刚度达到1.96MN/mm, 比普通材料试验机的刚度提高8至10倍。

岩土力学研究所研制的GYJ-30-1型刚性压力机的结构如图1-4所示。该机器的操作要领, 是先使用预压千斤顶加压至峰值的50%以上, 用锁紧楔块将位置固定, 然后开动铝柱电热器, 靠铝柱热胀伸长位移使试件受力破坏, 并直到试件只留下残余强度。

4. 伺服(控制)试验机(servo controlled testing system)

伺服试验机是用电脑控制的最现代化岩石力学试验机, 结构比较复杂, 价格较贵。

图1-5为这种试验机的简单原理图。当试件反馈的位移速率信号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, 从而保证试件不爆裂。

目前, 我国已有武汉岩土力学研究所等四、五个单位, 引进了美国MTS公司的4.5MN(450tf)岩石力学伺服试验机。每套价格35万美元左右。

我国长春试验机厂和济南试验机厂, 也已少量生产伺服试验机, 但吨位只有100~500kN(10~50tf), 远不够岩石试验应用。

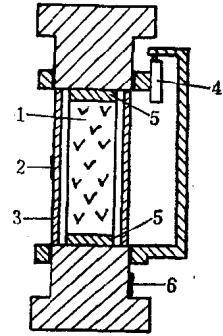


图1-3 普通试验机附加刚性组件的试验装置[5]

1—岩石试件; 2、6—电阻应变片; 3—金属圆筒(或其它型式的刚性组件); 4—线性电位计; 5—钢垫块。

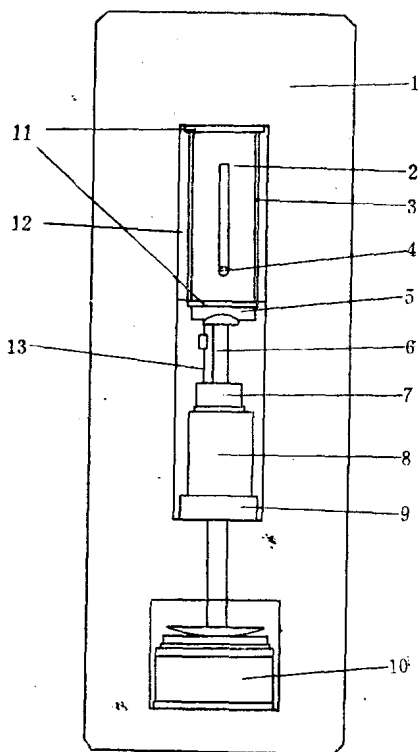


图1-4 GYJ-30-1 型复式加载刚性压力试验机

1—钢框架；2—铝柱；3—电热丝；4—冷水管；5—球铰；6—岩石试件；7—荷载传感器；8—传力柱；9—锁紧楔块；10—预压千斤顶；11—隔热垫片；12—隔热罩；13—位移传感器

1) 电阻应变片与粘结剂

电阻应变片是一种把机械位移转化为电量变化的传感器，其构造如图1—6所示。

电阻应变片分绕线式和箔式两种。绕线式又有纸基和胶基之分。应变片的“宽×基距”的常用规格（单位：mm）如下：

绕线式：	2 × 2	2 × 3	2 × 5	2 × 10
	3 × 4	3 × 15	3 × 17	3 × 20
	5 × 40	5 × 100	5 × 150	

箔式：	1 × 1	2 × 1.5	2 × 3	3 × 5	5 × 8	10 × 12
-----	-------	---------	-------	-------	-------	---------

均质材料，宜选用基距较小的应变片；不均质材料，宜选用基距较大的应变片。

应变片粘贴于物体上。物体受拉时，电阻丝跟着伸长，使其截面缩小，电阻值增加，反之，当物体受压时，电阻丝跟着缩短，截面增加，电阻值减小。

实验证明，应变片电阻值 R 的变化量 ΔR 与物体的应变 ϵ 成正比，即

$$\frac{\Delta R}{R} = k\epsilon$$

(1-16)

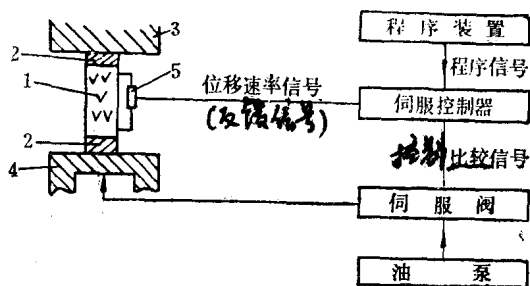


图1-5 伺服试验机原理示意图

1—岩石试件；2—垫块；3—上压板；4—下压板；5—位移传感器

上述刚性试验机、复式加载试验机与伺服试验机，从广义上，都可以称为刚性试验机。与此相应，普通材料试验机，可以称为柔性试验机。但当岩石试件的刚度小于普通试验机的刚度时，普通试验机也可起到刚性试验机的效用。所以，所谓的刚性或柔性试验机，不是绝对的。

5. 应变测量传感器与仪器

岩石力学试验最常用到的应变测量传感器与仪器，有百分表、千分表、线性位移传感器、电阻应变片、静态电阻应变仪、动态电阻应变仪、压力传感器、光线示波器和X-Y函数记录仪等。

下面只对最基本、最通用的电阻应变片和静态电阻应变仪作简单介绍。

式中的比例系数 k ，称为应变片的灵敏系数。通常应变片的初始电阻值 $R = 120\Omega$ ， $k = 2.0$ 。

粘贴应变片的粘结剂，有以下三种：

502胶——涂敷后抬手即干。需保存于 $< 5^\circ\text{C}$ 环境下，温度较高时容易失效。

914快速粘结剂——这种粘结剂有A（环氧树脂）、B（固化剂）两组份，平时分装。使用时按体积比5:1或重量比6:1，搅拌均匀，在 25°C 下固化3小时， 20°C 下固化5小时，可达到最高强度。

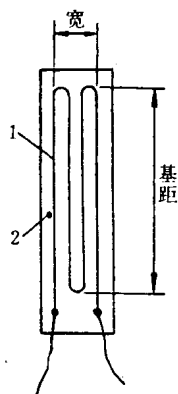


图1-6 绕线式电阻应变片

1—康铜丝 $\phi 0.012 \sim 0.05\text{mm}$ ；2—纸基（厚 0.05mm ）和胶基（厚 0.25mm ）

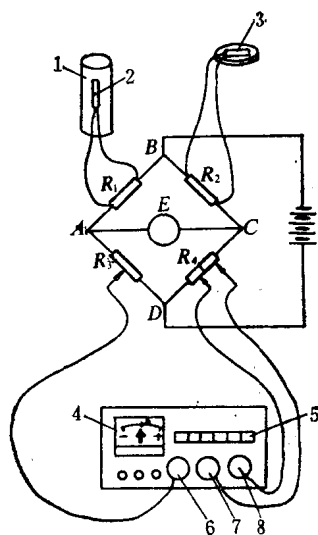


图1-7 静态电阻应变仪原理示意图

1—试件；2—工作片；3—温度补偿片；4—检流计；5—琴键；6、7、8—大、中、微调旋钮

环氧树脂粘结剂（现配方）：

634号或6010环氧树脂

（邻）苯甲酸二丁脂

乙二胺

瓷粉（可不加）

100g

20g

6~7g

50g

在常温下固化24小时，用红外线烘干时，2~3小时即可固化完全。

直径为 0.025mm ，长度 10mm 的电阻丝，其表面积为截面积的一千倍，故用恰当的粘结剂可以极牢固地粘附在待测物体上。

2) 静态电阻应变仪

其简单构造原理如图1-7所示。

由四个电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 组成惠斯登电桥。

当 $\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}$ 时，电桥平衡，检流计指零。

R_1 改换应变片，受力后， $\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_3} \neq \frac{R_2}{R_4}$ 电桥不平衡，检流计指针偏转。

若温度变化，引起 R_1 变化 ΔR_1 ，电桥也不平衡，检流计指针也会偏转。

但取 $R_1 = R_2$ ，温度变化时， R_1 、 R_2 有同样微量变化 ΔR_1 ，则

$$\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_3} \approx \frac{R_2 + \Delta R_2}{R_4}$$

电桥平衡仍可保持, 温度影响可自动消除。故当 R_1 改换应变片量测受力引起的应变时, R_2 也应换为同样的应变片, 并贴在和在工作物体材料相同, 环境也相同, 但不受力的另一物体上。前者称为工作片, 后者称为温度补偿片。

工作片受力应变的测读: 当 R_1 因受力有一增量 ΔR_1 。如果把 R_3 、 R_4 改换为可调电阻, 则总可调到

$$\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_3 + \Delta R_3} = \frac{R_2}{R_4 + \Delta R_4} \quad (1-17)$$

电桥又达到平衡。此时从 R_3 、 R_4 可调旋钮指示的刻度, 即可直接读出工作片应变的大小。

实际仪器内还专门设有读数电桥。也是惠斯登电桥, 其中的三个桥臂, 分别设置大、中、微调旋钮, 可使读数更精确。此时仪器外部的工作电桥, 只利用二个桥臂进行量测时, 称为半桥测量; 四个桥臂都连接应变片时, 称为全桥测量。

通常工作片受力后, 引起的电压变化很微弱。仪器内有多级放大装置, 将信号放大数万倍后输出。

为鉴别应变符号, 仪器内还有相敏装置。

二、岩块单轴压缩全应力应变曲线

反映单轴压缩岩石试件在破裂前后全过程的应力应变关系的曲线, 称为全应力应变曲线 (complete stress-strain curve) 或全程曲线。该曲线通常只有用刚性试验机才能得出。

六十年代以来, 刚性试验机日渐增多, 已对岩块单轴压缩全过程进行过较多试验。下面分加载、卸载、横向变形与体积变化四方面, 对岩块单轴压缩的全应力应变曲线进行分析。

1. 加载

图 1-8 为某页岩的单轴压缩全应力应变曲线 [7] 和软钢拉伸应力应变曲线的比较。页

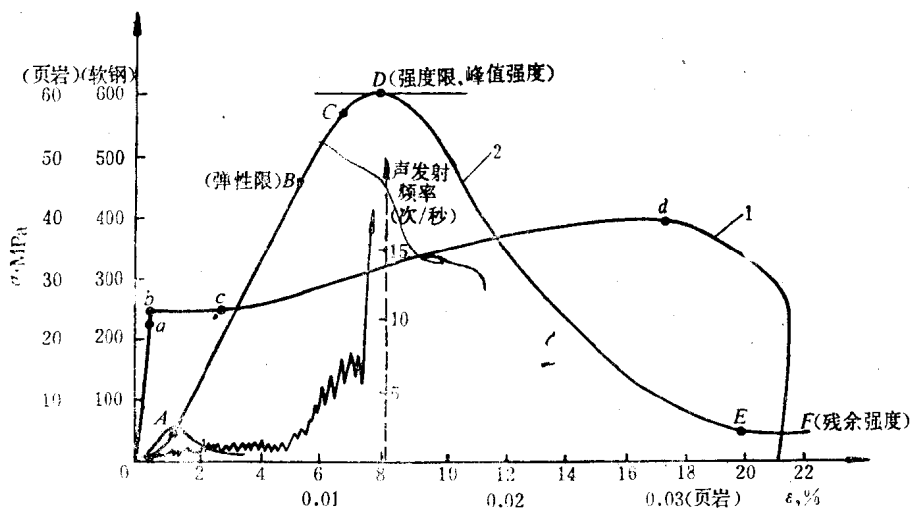


图1-8 页岩全应力应变曲线与软钢应力应变曲线

1—软钢应力-应变曲线; 2—页岩全应力-应变曲线(试件 $d=55\text{mm}$, $h=51\text{mm}$)

软钢: a—比例极限; b—屈服限(弹性限); bc—屈服平台; c—屈服平台终端; d—强度限

表 1-2

岩石全应力应变曲线特征

特征 \ 区段	OA	AB	BC	CD	DE	EF
斜 率	渐 增	不 变	渐 减	速 减	变 号	变 为 零
裂隙状况	原始裂隙闭合, 试件与压板间隙调整	微量新裂隙产生	应力达 $0.6\sigma_p$ 以上时, 新裂隙产生渐多 (σ_p —峰值)	应力达 $0.95\sigma_p$ 以上时, 新裂隙急增并互相贯穿	贯穿裂隙继续发展。	裂隙停止发展
声 发 射	微 量	少 量	明显增多	急 增	继续变化	停止变化
残余应变	有... (无)	无	有	有	有	有

注 • 有的试验在卸载后切开试件可见, 微裂隙长约 $300\mu\text{m}$, 宽约 $3\mu\text{m}$, 微裂隙体积占总体积的 $16\sim 19\%$ [1];
 • 有人认为开始加载就有残余应变 [1]。可能不确。因为实际试件受加工精度所限, 开始加载时, 总不免有试件与压板间隙调整的过程。此过程也可表现为曲线斜率渐增现象。

岩石全应力应变曲线各区段的特征如表 1-2 所示。

与软钢比较, 岩石全应力应变曲线的特点, 也即岩块变形性质的特点, 有以下几点:

1) 达到应力峰值 (强度极限) 时的应变值, 页岩只有 0.013 , 而软钢达 0.17 , 比页岩高十几倍;

2) 弹性段的斜率 (即弹模), 软钢要比岩石高一个量级 (10倍) 左右;

3) 软钢有明显的屈服平台, 单轴压缩下的岩石没有屈服平台;

4) 在各自的弹性段, 岩石和软钢一样, 都可以假设为线弹性; 但在塑性段, 软钢可以假设为理想塑性, 岩石则只能假设为线性强化或非线性强化 (强化或称硬化, 即欲增加变形, 需增加外力)。

5) 岩石以应力峰值为界, 其左右分别称为峰前区和峰后区; 软钢通常没有必要作此区分;

6) 岩石在峰后区, 最终变为残余强度阶段; 该阶段应力不会增加, 而变形无限增长。

2. 卸载

弹性段卸载, 应力应变一般总能回到原点, 没有残余应变。但不同的岩石, 又分三种情况 (图1-9) [1]:

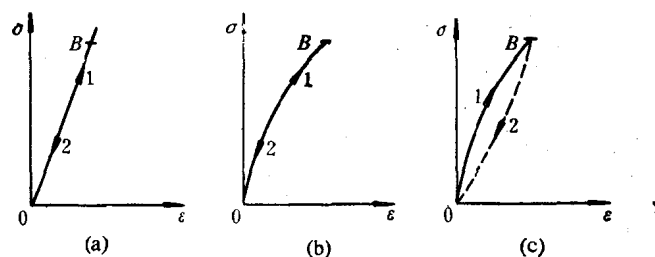


图1-9 岩石弹性种类

a—线弹性; b—完全弹性 (非线性弹性); c—滞弹性