

高等学校规划教材

岩石力学简明教程

李世平 吴振业 贺永年 李 晓 编著

煤炭工业出版社

高等学校规划教材

岩石力学简明教程

李世平 吴振业 贺永年 李 晓 编著

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书根据“以岩性为基础、以原岩应力为力源、以分析次生应力场力学现象和参量为重点、以合理维护为目标”原则编写而成,突出地下工程特点,反映国内外最新理论成果,叙述简明扼要。

全书共分为四篇,第一篇岩石力学性质,第二篇原岩应力,第三篇地下工程稳定性,第四篇井巷维护。

本书是煤炭高等院校建井、采矿等专业岩石力学课程的通用教材,亦可供冶金、化工、水利、建材、军工等部门相关人员参考。

高等学校规划教材 岩石力学简明教程

李世平 吴振业 贺永年 李晓 编著

责任编辑:张乃新

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

北京密云春雷印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 $787 \times 1092 \text{mm}^{1/16}$ 印张 $15\frac{3}{4}$

字数 367 千字 印数 1—2,525

1996年11月第1版 1996年11月第1次印刷

ISBN 7—5020—1310—5/P 58

书号 4078 A0347 定价 12.20 元

前言

到 2000 年,我国的煤炭产量将比 15 年前翻一番,达到 14 亿 t。21 世纪对能源的需求必然会持续增长。这就需要不断建设千百对新的矿井,开掘数十万公里计的井筒和巷道。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、隧道和各种硐库。这些统称地下工程。

开掘地下工程的过程,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专业委员会所下的定义^[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 (slop 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。

岩石力学研究历史的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 年前苏联秦巴列维奇 (П. М. Цимбаревич) 写的《Механика горных пород》^[3]。

本世纪 50 年代以后,由于世界采矿工程的发展,尤其是受到大型水利水电工程、跨海跨江隧道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,都有了长足的进步。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、边界元和离散元法等数值计算方法、以及现代分形岩石力学方法、损伤力学方法、缺陷体力学方法和块体力学方法的应用,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问题,发展到目前已经能分析某些不均质、非线性、各向异性,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“发展中的学科”。

近 30 年来,岩石力学一直是国内外研究的热门之一。最近国际上还盛行一种说法:“19 世纪——桥的世纪;20 世纪——高层建筑的世纪;21 世纪——地下工程的世纪”。可见

地下工程越来越受到重视，其发展前景非常广阔。

近几十年来，出现了各种国际岩石力学组织，如1952年成立的国际岩石力学学会 (International Society for Rock Mechanics, 简称 ISRM)，及相继成立的世界采矿大会国际岩石力学局 (International Buearu 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办每一、两年召开一次岩石力学学术讨论会，迄今已达35届；第36届岩石力学讨论会将于1997年6月在美国纽约哥伦比亚大学举行。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；1966年起，国际岩石力学学会每四年举行一次国际岩石力学大会，1983年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；1995年在日本东京召开了第8届国际岩石力学大会；第9届国际岩石力学大会将于1999年在法国巴黎举行。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。并且，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及岩土力学文摘》(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)，1969年创刊，月刊。

3) 在英国出版的《国际岩土力学数值及解析方法杂志》(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。1982年成立了全国性跨部门的中国岩石力学与工程学会，并分别于1989年、1992年、1994年举行了第一、二、三届全国岩石力学与工程学术讨论会，第四届全国岩石力学与工程学术大会即将于1996年10月在甘肃金川举行。以后又陆续成立了各省的岩石力学与工程学会，经常举行各省的岩石力学学术活动。此外，许多专业学会下还设有岩石力学专业委员会。这些都对我国岩石力学事业的发展，起着积极推动作用。

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年创刊由中国水利学会、中国土木工程学会、中国力学学会、中国建筑学会、中国水力发电工程学会和中国振动工程学会联合主办在南京出版的《岩土工程学报》；1979年创刊由中国科学院武汉岩土力学研究所主办的《岩土力学》；以及1982年创刊由中国岩石力学与工程学会主办的《岩石力学与工程学报》等。

地下工程事故中，约三分之一至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。

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。这就必须介绍近三四十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) 分形几何学的基本概念与在岩石力学中的应用。
- 8) 损伤力学和缺陷体力学的基本概念与在岩石力学中的应用。
- 9) 原岩应力实测成果。
- 10) 麦克库钦原岩自重应力场新理论。
- 11) 单孔实测三维原岩应力、水裂法实测原岩应力。
- 12) 用复变函数解巷道弹性平面问题。
- 13) 井巷围岩的弹性及弹塑性(极限平衡)分析。
- 14) 岩体应力、位移、松动圈、井巷地压的实测和模拟研究方法。
- 15) 围岩-支护共同作用分析。
- 16) 现代块体力学的基本概念与应用。
- 17) 有限元与边界元数值计算方法。
- 18) 采动影响规律。
- 19) 锚喷理论与实践。
- 20) 软岩支护与新奥法。
- 21) 深部地压与巷道维护等。

其中,各种数值计算方法、损伤力学方法、分形岩石力学方法以及现代块体力学方法在岩石力学中的应用,是近三四十年来岩石力学的重大进展。这些现代数学力学方法,原则上已能处理许多过去不能用解析方法解决的重要岩石力学问题。这些现代数学力学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(膨胀)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,各篇后附必要的习题。

本书由李世平主编。吴振业编写第五、六章,贺永年编写第二章第三节、第六节及第四章第四节,李晓编写第八章。其余由李世平编写。

本书难免有不当之处,热诚欢迎读者对所发现的一切问题批评指正。

编者

1996. 7. 26

本书在编写过程中,参考了有关文献,并得到了许多同志的帮助,在此表示衷心的感谢。本书在编写过程中,参考了有关文献,并得到了许多同志的帮助,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中,参考了有关文献,并得到了许多同志的帮助,在此表示衷心的感谢。本书在编写过程中,参考了有关文献,并得到了许多同志的帮助,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中,参考了有关文献,并得到了许多同志的帮助,在此表示衷心的感谢。本书在编写过程中,参考了有关文献,并得到了许多同志的帮助,在此表示衷心的感谢。

目 录

第一篇 岩石力学性质

第一章 岩块变形与强度	3
第一节 岩块变形试验	3
第二节 岩块单轴压缩全应力应变曲线	7
第三节 岩块三轴压缩变形性质	11
第四节 岩块变形特征综合分析	13
第五节 岩土力学模型和本构方程	21
第六节 岩块强度	22
第七节 岩石强度准则	27
第二章 岩石的时间效应与流变性质	37
第一节 时间效应	37
第二节 流变模型理论	39
第三节 积分方程方法	52
第四节 经验方程	54
第五节 长时强度	54
第六节 内时论方法简介	56
第三章 弱面变形与强度	59
第一节 弱面的力学处理	59
第二节 弱面变形性质	59
第三节 弱面强度	64
第四章 岩体变形与强度	69
第一节 岩体力学试验	69
第二节 岩体变形与本构方程	71
第三节 岩体强度	72
第四节 损伤力学方法与岩石分形	75
第一篇习题	80

第二篇 原 岩 应 力

第五章 理论与实验研究概况	82
第一节 自重应力与构造应力	82
第二节 古典假说	84
第三节 麦克库钦理论	85
第四节 全球地应力实测成果	87
第五节 原岩应力场的一般规律	89
第六章 原岩应力的实测方法	90

第一节 实测方法基础	90
第二节 三孔汇交实测方法	91
第三节 单孔实测三维应力的方法	93
第四节 水压致裂法	96
第五节 应力测量误差分析	97
第六节 原岩应力场反分析	100
第二篇习题	102

第三篇 地下工程稳定性

第七章 解析方法	105
第一节 峰前区弹性与粘弹性力学分析方法	105
第二节 峰前区弹塑性力学分析方法	120
第三节 峰后区块体力学与实验力学分析方法	128
第四节 峰后区共同作用原理	130
第五节 古典和现代地压学说	135
第六节 采动影响与岩爆	147
第八章 数值方法	151
第一节 数值方法的地位	151
第二节 有限元法概况	152
第三节 节理岩体损伤力学的有限元法	157
第四节 岩土力学非线性有限元分析软件包	161
第五节 边界元法与离散元法简介	163
第九章 实验方法	173
第一节 实测方法	173
第二节 模拟方法	184
第十章 岩石分类与工程类比	188
第一节 煤炭工业部岩石分类	188
第二节 中国煤矿回采巷道围岩稳定性分类与合理支护技术	189
第三节 中国铁路隧道围岩分类	190
第四节 美国 RQD 岩石分类	191
第五节 前苏联按巷道稳定性指数岩石分类	192
第三篇习题	193

第四篇 井巷维护

第十一章 维护原则	195
第一节 自稳与人工稳定	195
第二节 维护原则及分析	195
第三节 支护选材选型与分类	198
第十二章 锚喷支护	200
第一节 锚杆	200
第二节 喷(射)砼	208
第三节 锚喷、锚喷网、锚喷网架(锚)联合支护	209

第四节	锚喷的工程类比数据	209
第十三章	普通支护	212
第一节	刚性支护	212
第二节	可缩性支护	218
第十四章	软岩巷道支护与新奥法	224
第一节	软岩特点	224
第二节	我国软岩巷道支护情况	225
第三节	新奥法要点	230
第十五章	深部巷道维护	232
第一节	深部原岩应力与地压特点	232
第二节	深部巷道维护原则	232
第四篇习题		233
参考文献		234

第一篇 岩石力学性质

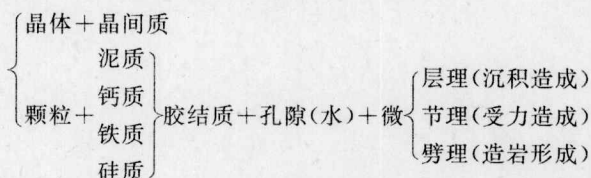
岩石力学是固体力学的一个分支。固体力学的基本方程中,平衡方程和几何方程,都与材料性质无关,而本构方程(物理方程、物性方程)和强度准则,则因材料而异。

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(consitutive 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、支护设计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最重要的基础。

岩石是经历漫长地质史的大自然产物,种类很多,且其组成成份、结构、致密程度等,差异很大。

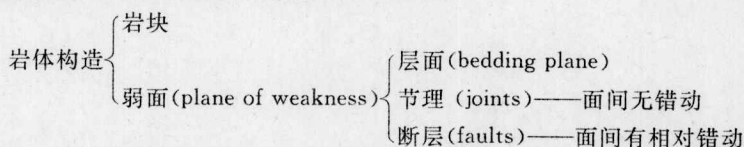
岩石组构(fabric),通常指其组织和构造。

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):



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。岩石可以说是一种“有(或多或少)弱面(节理)的天然材料”。由于弱面的存在,岩体强度通常小于岩块强度。

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,只能当作“松散”岩体处理。

在一定的环境下,岩石的孔隙或裂隙中还含有承受一定压力、在隙缝间静储或流动的水和气体(瓦斯)。

岩石的组构特征是影响岩石力学性质的重要因素,也是岩石分类的重要依据。

由于岩石成因多样,并含有弱面、节理,使得岩性在很大的范围内变化:

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。

第一章 岩块变形与强度

第一节 岩块变形试验

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。

本书约定:以压应力符号为正。

一、试验设备与仪器

(一) 普通材料试验机

普通的压力或万能材料试验机,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、1 000、2 000、3 000 kN 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,主要是机器的刚度比岩石试件的刚度相对较小所引起的^[1,5]。

刚度(stiffness) K 的定义如下式所示:

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

式中 Δl ——沿力 P 方向的位移。

可见刚度即是引起单位位移所需之力。对于单一部件,由虎克定律及应力应变定义,式(1-1)可改写为

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

式中 E ——部件材料弹模;

F 、 l ——分别为部件的截面积和长度。

试验机的刚度 K_m 主要取决于机器受力部件的刚度、部件间的配合情况、油液的压缩性能等因素,可写成 $K_m = \frac{E_m F_m}{l_m}$ (E_m, F_m, l_m 都为机器的折算等效值)。它通常只有 0.15~0.2 MN/mm 左右。而岩石试件的刚度 $K_r = \frac{E_r F_r}{l_r}$, 一般达到 0.5 MN/mm 以上。即通常有 $K_r > K_m$ 。

下面通过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^[1]。

加载时(图 1-1),机器和试件都积蓄应变能。

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

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

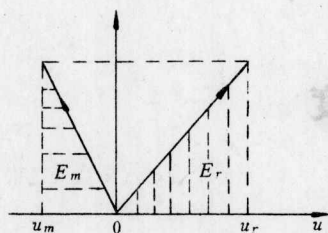


图 1-1 加载时岩石和机器的压力位移曲线与应变能

破裂的瞬时, E_r 大部分转化为裂缝扩展、声响、震动、热等而消耗掉。 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: 峰后区岩石的刚度(斜率)为负值, 即

$$\frac{dP}{du} = \tan(180^\circ - \alpha_1) = -\tan\alpha_1, \quad \left| \frac{dP}{du} \right| = \tan\alpha_1; \text{ 而机器的}$$

刚度不变, 为 $K_m = \tan(180^\circ - \alpha_2) = -\tan\alpha_2, |K_m| = \tan\alpha_2$ 。

若在 A 点有一位移增量 Δu , 则

机器释放能量为

$$\Delta E_m = P \cdot \Delta u - \frac{1}{2} \Delta u \cdot \tan\alpha_2 \cdot \Delta u$$

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

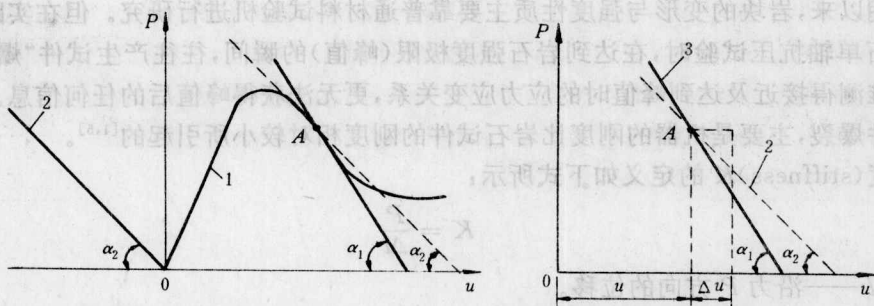


图 1-2 峰后区岩石与试验机的刚度分析比较

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

使岩石试件继续平静地(不爆裂)位移所需的能量为

$$\begin{aligned} \Delta E_r &= P \cdot \Delta u - \frac{1}{2} \Delta u \cdot \tan\alpha_1 \cdot \Delta u \\ &= P \cdot \Delta u - \frac{1}{2} \Delta u^2 \left| \frac{dP}{du} \right| \end{aligned} \quad (1-6)$$

显然, 如果 $\Delta E_m < \Delta E_r$, 则岩石试件除了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, $\tan\alpha_2 > \tan\alpha_1, \alpha_2 > \alpha_1$, 或得

$$|K_m| > \left| \frac{dP}{du} \right| \quad (1-7)$$

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

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

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。

从上面对爆裂条件的分析,可找到为

克服爆裂现象的途径为

- 提高试验机刚度;
- 改变峰值前后的加载方式;
- 伺服控制试件位移。

与此相应而出现三类新型岩石力学试验机,即刚性试验机、复式加载试验机和电液伺服试验机。

(二) 刚性试验机 (stiff testing system)

实现办法有两种:

1) 设计专门的试验机,采用较粗的加载架立柱和直径较粗、高度较矮的油缸,使整机系统达到满足的刚度。

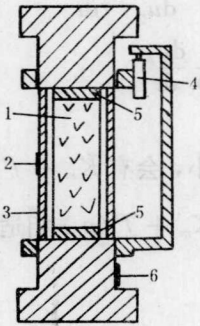


图 1-3 普通试验机附加刚性组件的
试验装置图

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

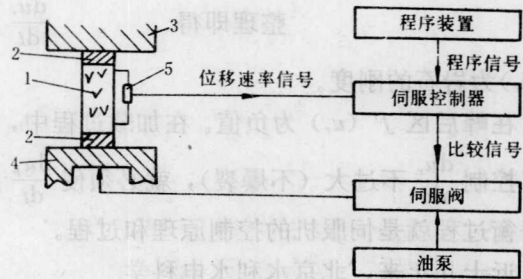


图 1-4 伺服机原理示意图

1—岩石试件; 2—垫块; 3—上压板; 4—下压板; 5—位移传感器

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,且其刚度折算归入试验机系统,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,库克 (N. G. W. Cook, 1965) 采用钢圆筒,使试验机刚度从 0.28 MN/mm 提高到 1.73 MN/mm; 宾尼奥斯基 (Z. T. Bieniawski, 1966) 采用刚性组件,使试验机刚度从 0.11 MN/mm 提高到 1.81 MN/mm^[5]。

(三) 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]。1979~1980 年,中国科学院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^[6~8]。前一种试验机的刚度达到 1.96 MN/mm,比普通材料试验机的刚度提高 8~10 倍。

(四) 伺服控制试验机 (servo controlled testing system)

伺服试验机是试验全过程和数据采集都用电脑控制的最现代化岩石力学试验机,性能先进,功能强大,但结构复杂,价格昂贵。

图 1-4 为这种试验机的闭环控制 (closed loop) 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油液供给量, 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。

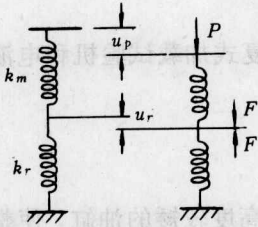


图 1-5 试验机-试件系统的力学模型图

设试验机活塞的行程为 u_p , 岩石试件变形为 u_r , 机器弹性变形为 u_m (图 1-5), 则

$$u_p = u_r + u_m$$

取对时间的导数

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{du_r}{dt} + \frac{du_m}{dt} \quad (1-9)$$

岩石试件的压力-位移曲线为 $P = f(u_r)$, 试验时机器的位移为

$$u_m = \frac{f(u_r)}{K_m}, \quad K_m \text{ 为试验机刚度, 代入式 (1-9)}$$

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{du_r}{dt} + \frac{1}{K_m} \frac{df(u_r)}{du_r} \frac{du_r}{dt}$$

整理即得

$$\frac{du_r}{dt} = \frac{K_m}{K_m + f'(u_r)} \frac{du_p}{dt} \quad (1-10)$$

$f'(u_r)$ 为岩石的刚度。

在峰后区 $f'(u_r)$ 为负值。在加载过程中, 如机器刚度偏小, 会有 $K_m + f'(u_r) \ll K_m$, 为了控制 $\frac{du_r}{dt}$ 不过大 (不爆裂), 就必须使 $\frac{du_p}{dt}$ 足够小, 即和 $K_m + f'(u_r)$ 相适应。这个动力平衡过程就是伺服机的控制原理和过程。

近十几年来, 北京水利水电科学研究院、中国科学院武汉岩土力学研究所、中国矿业大学、西南交通大学、西南铁道科学研究所、长沙矿山研究院、成都地质大学等单位, 先后引进了美国 MTS 公司的电液伺服岩石力学试验系统。中国矿业大学在 1988 年引进的 MTS 公司 815.02S 型电液伺服岩石力学试验系统 (图 1-6), 功能比较完备^[9], 除了能进行一般的单轴和三轴试验以外, 还能完成孔隙水压和水 (油) 渗透性试验。我国上海试验机厂、长春试验机厂和济南试验机厂, 都已开始少量生产伺服试验机。

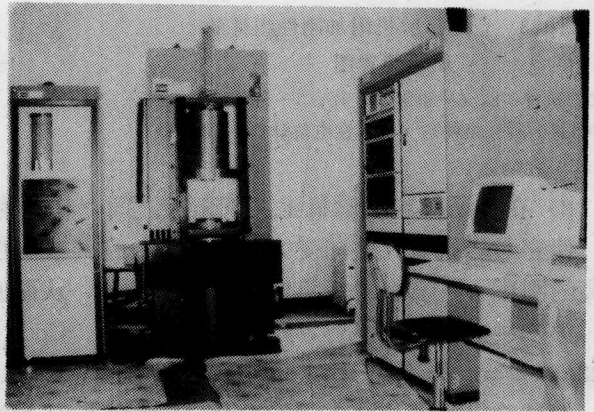


图 1-6 照片: MTS815.02S 型电液伺服岩石力学试验系统图

1994 年, 中国科学院武汉岩土力学研究所研制成功 RMT-64 型岩石力学试验系统^[10]。该系统在峰值前后具备“自适应”性能, 可以做出比较光滑的峰后试验曲线。

上述刚性试验机、复式加载试验机与伺服试验机, 广义上都可以称为刚性试验机。与此相应, 普通材料试验机称为柔性试验机。但当一些软岩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。

第二节 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或伺服试验机才能做得出。

60年代以来，刚性试验机及伺服试验机的应用日渐增多，已对岩块单轴压缩全过程进行过众多试验。下面分加载、卸载、横向变形与体积变化四个方面，对岩块单轴压缩的全应力应变曲线进行分析。

一、加载

图 1-7 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。页岩全应力应变曲线各区段的特征如表 1-1 所示。

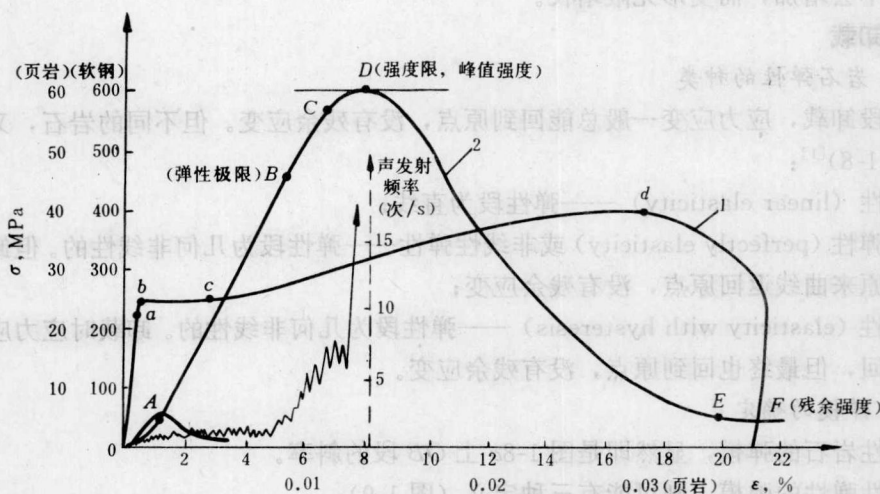


图 1-7 页岩全应力应变曲线与软钢应力应变曲线图

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 1-1 岩石全应力应变曲线特征表

区段 特征	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 $0.5\sigma_p$ 以上时，新裂隙产生渐多（ σ_p ：峰值应力）	应力达 $0.65\sigma_p$ 以上时，新裂隙急增并互相贯穿	贯穿裂隙继续发展 ^①	裂隙停止发育
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	无 ^②	无	有	有	有	有

① 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]；

② 有人认为开始加载就有残余应变，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。