

河南省教育厅创新人才基金资助出版

● 尤明庆 著

岩石的力学性质

YANSHI DE LIXUE XINGZHI

地质出版社

河南省教育厅创新人才基金资助出版

TU45/21

2007

岩石的力学性质

尤明庆 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

利用伺服试验机进行各种岩石试样单轴压缩、常规三轴压缩、巴西劈裂以及围压下直接拉伸试验,测试岩石超声波速度,并引用文献中试验结果,研究岩样的变形、屈服和破坏过程,力图从岩样宏观的载荷-变形曲线中理解岩石材料的力学性质。

在轴向压缩或降低围压使轴向应力达到其承载能力时,岩样屈服产生塑性变形。在此过程中岩样的材料强度降低,但承载能力变化却与岩石材料和应力状态等有关。在屈服弱化时破坏将局部化,产生的塑性变形较小;而屈服强化时破坏则较为均匀,产生的塑性变形较大。以此研究了应力路径、尺度效应和失稳破坏等问题。利用岩石的粘结摩擦特性解释了岩石试样的破坏形式、围压对杨氏模量的影响。书中还研究各种强度准则的特性,讨论了杨氏模量、泊松比系数等参数的确定方法。

本书可作为高等院校岩石力学课程的教学参考书,对科研部门和岩土工程技术人员也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

岩石的力学性质/尤明庆著. —北京:地质出版社,
2007.8

ISBN 978 - 7 - 116 - 05383 - 0

I. 岩… II. 尤… III. 岩石力学 IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 097097 号

责任编辑:宫月萱 郁秀荣

责任校对:王素荣

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010) 82324508(邮购部);(010) 82324557(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:787mm × 1092mm¹/₁₆

印 张:20.25

字 数:493 千字

印 数:1—1000 册

版 次:2007 年 8 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价:56.00 元

书 号:ISBN 978 - 7 - 116 - 05383 - 0

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

目 次

第 1 章 绪论	(1)
1.1 岩石力学性质的试验研究	(1)
1.2 岩石力学的发展现状	(4)
1.3 岩石结构的均质和非均质	(5)
1.4 岩石的力学性质和岩石试样的室内试验	(7)
1.5 岩石力学试验规程	(8)
1.6 岩石试样的离散性	(9)
1.7 试验机加载、控制和测量方式	(12)
1.8 其他影响试验结果的因素	(14)
1.9 本书的主要内容	(16)
参考文献	(17)
第 2 章 岩石试样单轴压缩过程和失稳破坏	(21)
2.1 岩样单轴压缩的应力 - 应变全程曲线	(21)
2.2 岩样单轴压缩的破坏形式	(22)
2.3 全程曲线的力学含义和单轴压缩的本构关系	(26)
2.4 岩样与试验机联合作用模型及失稳破坏准则	(30)
2.5 电液伺服试验机及Ⅱ类应力 - 应变全程曲线	(33)
2.6 矿柱岩爆与尺度的关系	(38)
2.7 岩样长度的影响及端部摩擦效应	(41)
2.8 岩石的非均质性与强度的尺寸效应	(46)
2.9 对变形局部化的说明	(53)
参考文献	(53)
第 3 章 岩石试样的强度与围压的关系	(57)
3.1 Coulomb 强度准则及回归公式	(57)
3.2 岩样的屈服过程和理想强度	(61)
3.3 岩样的材料强度及缺陷程度	(63)

3.4	具有沉积弱面试样的强度分析	(65)
3.5	不同煤块加工的试样强度的联合回归公式	(69)
3.6	单一试样确定大理岩和砂岩强度准则的方法	(72)
3.7	试验数据回归结果的评价方法	(76)
3.8	岩样长度对三轴压缩的影响	(80)
3.9	岩石的水压致裂及地应力测试	(82)
	参考文献	(88)
第4章	岩石试样的轴向变形和环向变形	(91)
4.1	杨氏模量的定义和确定方法	(91)
4.2	裂隙摩擦对岩石变形的影响	(95)
4.3	加载、卸载过程对杨氏模量的影响	(97)
4.4	杨氏模量与围压的关系	(102)
4.5	裂隙岩样的强度和变形	(109)
4.6	泊松比系数及测量方法	(112)
4.7	岩样的环向变形	(114)
4.8	岩样环向塑性变形	(118)
4.9	围压变动过程中的环向变形	(124)
	参考文献	(125)
第5章	岩石的三轴强度准则	(129)
5.1	主应力空间和 Coulomb 强度准则	(129)
5.2	Drucker-Prager 强度准则	(132)
5.3	Griffith 强度准则的 Murrell 三维推广	(135)
5.4	Mogi 强度准则	(139)
5.5	幂函数型强度准则	(150)
5.6	中间主应力对岩样强度影响的试验结果	(151)
5.7	中间主应力作用的分析及 Coulomb 准则的修正	(154)
5.8	双剪理论及一组真三轴试验结果的分析	(158)
5.9	对统计损伤强度理论的认识	(163)
	参考文献	(167)
第6章	岩样卸围压试验及应力路径的作用	(171)
6.1	岩样三轴卸围压试验	(171)
6.2	控制轴向应力的卸围压试验	(172)

6.3	保持轴向变形恒定的卸围压试验	(175)
6.4	卸围压法测量岩石材料的泊松比系数	(179)
6.5	卸围压试验确定岩石的摩擦强度	(182)
6.6	岩石试样的材料强度、承载能力及应力路径的影响	(184)
6.7	一组岩样复杂路径试验结果的说明	(193)
6.8	循环加载对岩样的强化作用	(197)
6.9	岩石试样破坏过程的能量分析	(202)
	参考文献	(205)
第7章	岩石的变形承载与粘结摩擦特征	(209)
7.1	不同岩石试样的常规三轴压缩曲线	(209)
7.2	岩样内不同倾角截面基于粘结摩擦的承载能力	(212)
7.3	岩样三轴压缩的破坏形式	(214)
7.4	两种晶粒大理岩的强度变形和破坏	(218)
7.5	大理岩高围压压缩卸载后的低围压压缩试验	(224)
7.6	大理岩试样不同围压压缩卸载后的单轴压缩试验	(228)
7.7	大理岩孔道试样的强度变形特性	(239)
7.8	岩石的脆延性转化和极限状态下强度和破坏	(243)
7.9	岩石的破坏准则是载荷还是变形	(244)
	参考文献	(245)
第8章	岩石试样的拉伸试验和拉伸强度	(249)
8.1	圆盘试样的巴西劈裂试验	(249)
8.2	平台圆盘的巴西劈裂试验方法	(252)
8.3	平台圆盘的劈裂强度及端部摩擦的影响	(257)
8.4	劈裂试验的空间效应	(262)
8.5	岩样单轴拉伸试验	(263)
8.6	狗骨试样的直接拉伸试验	(265)
8.7	围压下圆柱试样的直接拉伸试验	(267)
8.8	围压对岩样直接拉伸强度的影响	(269)
8.9	压拉应力作用下岩石的强度	(271)
	参考文献	(272)
第9章	岩石超声波测试和动态参数	(275)
9.1	概述	(275)

9.2	岩石超声波测试和动态参数	(276)
9.3	火成岩及其变质岩的超声波测试	(280)
9.4	大理岩的超声波测试	(282)
9.5	沉积岩及煤的超声波测试	(283)
9.6	角闪斜长片麻岩各向异性的研究	(285)
9.7	利用纵波探头测量横波速度的试验	(287)
9.8	利用超声波速度对岩体完整性的评价	(290)
9.9	实验室岩样和现场岩体超声波速度差异的原因	(292)
	参考文献	(295)
附 录		
	实现虹吸过程的条件	(299)
	最速降线求解和摩擦力影响的研究	(303)
	工程论证的单向终止性	(311)
	数据之间的协调与和谐	
	——以扬州市出租汽车的车费为例	(313)
后 记		(315)

第1章 绪论

力学以物理为基础、以数学为工具,研究物体的运动、变形和破坏与力之间的关系^①,具有科学和技术的双重特征,是独立于数学和物理的一级学科,是天文、地质、机械、建筑、水利等众多学科的基础。

理论力学以牛顿三定律和万有引力定律为基础,解决了物体的运动问题^[1]。但是了解定律不一定能够完全确知物体的行为。三体问题和刚体定点转动问题都只有在特定情形下才能得到数学上的封闭解,一般情形需要进行数值计算,而数值计算又牵涉到计算精度、解对初值的稳定性等一系列问题。

弹性力学在材料连续、均匀、各向同性、完全线弹性和小变形的假设下,解决了物体的变形问题^[2]。以弹性力学为基础的塑性力学和断裂力学仍需要材料满足连续、均匀、各向同性等假设。但是真实材料并不能满足或不能始终满足这些假设,其变形特性必须加以具体的研究,由此产生了各种力学学科。岩石力学就是其中之一。

1.1 岩石力学性质的试验研究

理论源于实践,并需要得到实践的检验。试验是一切科学研究的基础,岩石力学的研究也是从试验开始的,尽管古代有关的试验记录尚未发现,但数千年前埃及和希腊人在修建金字塔及寺庙时,已确实考虑到岩石的强度问题^[3]。秦昭王(公元前306~前251年)时李冰父子修建的都江堰,西汉楚襄王刘注(公元前128~前116年)的墓室——徐州龟山汉墓,隋开皇大业(公元581~618年)年间李春修建的赵州桥,1230年建成的英国 Wells 大教堂等,都是古代岩体工程的杰出代表,显示了古代人民对岩石力学性质的良好理解。时至今日,利用 Google 等搜索工具,不难在 INTERNET 上得到相关图片和文字介绍。当然,没有成功的古代工程也为数不少。正如文献[4]所说, All of the earlier activity was, of course, conducted without the benefit of modern knowledge. In some case the projects were successful, often dramatically so; but, in other case, we know that they were unsuccessful. Many cathedrals were not so fortunate as that at Wells and collapsed during or shortly after construction.

文艺复兴时期 Da Vinci 的“不同长度铁丝的强度试验”^[3],可能是目前已知最早的力学试验记录(大约公元1500年)。Galileo G 在1638年报告了空心梁和实心梁的直接拉伸强度和弯曲强度,在研究弯曲强度时采用了悬臂梁端头加载的方式^[5]。

① 《辞海》,上海辞书出版社,2000,570页,条目“力学 物理学的一个部门。研究宏观物体机械运动规律及其应用的学科”,似不够准确、全面。Wikipedia 的解释“Mechanics is the branch of physics concerned with the behaviour of physical bodies when subjected to forces or displacements, and the subsequent effect of the bodies on their environment”,似乎也不够明确。

有记载的第一台岩石力学试验机大约是 1770 年由 E. - M. Gauthey 制造的, 其目的是设计 Sainte Genevieve 教堂的立柱。该试验机利用杠杆系统加载, 得到了边长 5 cm 立方体岩石的压缩强度, 并注意到长柱体岩石的强度小于立方体岩石的强度。18 世纪后期至 19 世纪初, 由于桥梁 (石桥和铁桥) 的大量兴建, 激发了试验机的设计和制造; 而每一试验机的设计和制造都将当时的技术水平发挥到极限。19 世纪 80 年代的试验机已经能够自动记录试样的载荷 - 位移曲线。1865 年, 第一个商业实验室在伦敦开业, 拥有一台载荷 1000000 lb^① 的设备, 压缩试验的最大试样可以达到长 21.5 ft^②, 断面边长 32 in^③。1910 年, 在 Pittsburgh 的兵工厂 (Arsenal Ground), 后移至 Washington 的标准局 (Bureau of Standards), 安装了最大压缩载荷 10000000 lb 的试验机, 试样的最大长度也增大到 30 ft^[6]。

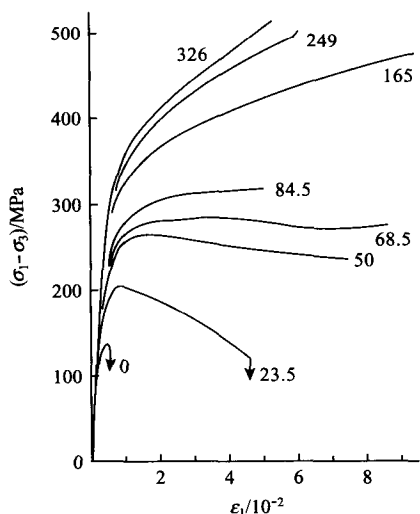


图 1-1 大理岩常规三轴压缩全程曲线
曲线上数字是围压, 单位 MPa

在试验机载荷不断增加的同时, 试验机的加载方式也在改进完善。由机械加载变为液压加载, 由单向加载变为准三向加载 (Pseudo-triaxial compression)。即将圆柱体岩样放置在液压腔中, 利用油压对岩样进行侧向加载, 在维持侧限压力 (也称围压 Confining pressure or ambient pressure) 的同时, 对岩样进行轴向压缩。Von Karman 于 1911 年发表的大理岩 (Carvala marble) 常规三轴压缩试验曲线是标志性的工作 (图 1-1), 最高围压达到 326 MPa^[7]。试验结果表明, 对大理岩而言, 脆性只是应力较低时的表现; 而在较高应力状态 (如地质条件) 下, 岩石完全可以产生很大的塑性变形而显示出延性。对某些粗晶大理岩围压达到 3 MPa 时, 即可显示延性变形特征^[8]。

茂木清夫设计了对长方柱体试样进行三向不等压加载的真三轴试验机, 从 1967 年开始发表了一系列文章^[9], 论述中间主应力对岩样强度、变形、脆性和延性的作用。图 1-2 是典型的一组试验结果。随着中间主应力的增加, 白云岩 (Dunham dolomite) 试样的强度有所增加, 而屈服过程的塑性变形减小, 岩石趋于脆性。脆性破坏消耗的能量小, 而延性破坏消耗的能量大。图 1-2 的试验结果表明, 在最小主应力一定时, 增加中间主应力对维持岩石的完好并没有多大作用。无疑实际岩体处于复杂的应力状态, 其破坏方式需要研究。

真三轴试验可以在三个方向利用固体承压板进行加载^[10], 为了减少加载板之间的干涉和摩擦的影响, 真三轴试验机后来多采用液压加载最小主应力^[11]。

文献 [12] 介绍了高温高压三轴加载试验机的发展过程、主要特征以及相应的岩石力学试验成果。Griggs 型装置, 以固体铅 (Pb) 或盐 (NaCl) 作为围压介质, 利用两个活塞分别产生围压和主应力差, 围压达到 3 GPa, 温度达到 1500℃, 可以进行长达数月的高

① 1 lb = 0.45359237 kg。
② 1 ft = 0.3048 m。
③ 1 in = 0.0254 m。

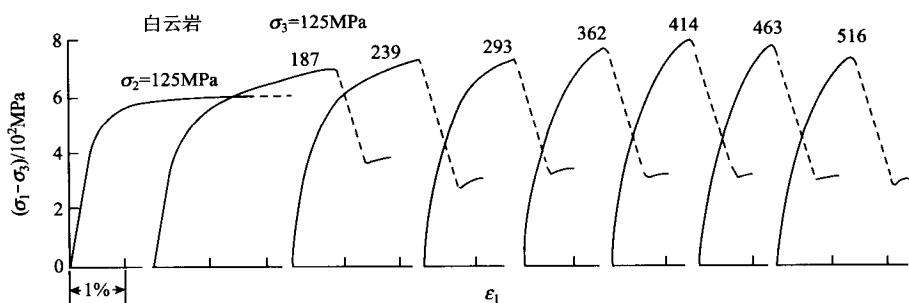


图 1-2 中间主应力对白云岩试样强度和变形的影响
最小主应力 $\sigma_3 = 125$ MPa, 曲线上数字是中间主应力 σ_2 , 单位: MPa

温蠕变试验^[13,14]。立方加压 (Cubic press) 系统, 利用 6 个液压缸在 3 个方向对立方体试样进行真三轴加载, 如文献 [15, 16] 利用 2MN (200 tons) 的立方加压系统对边长 42 mm 的岩样进行试验, 700℃ 的温度从压头传入岩样。如果将圆柱试样置入固体介质内, 也可以利用立方加压系统进行高围压、高温试验。文献 [17] 对直径 2.9 mm、长 8.5 ~ 9.5 mm 的石英试样进行围压 7 GPa、温度 2000℃ 的三轴压缩试验; 文献 [18] 的立方加压系统, 700 MPa 的工作压力可以使液压缸载荷达到 5 MN (500 tons), 可以对直径 8 mm、长 16 mm 的试样进行围压 3.7 GPa、主应力差 4 GPa、温度 1000℃ 的三轴压缩试验, 围压介质是叶蜡石 (pyrophyllite)。

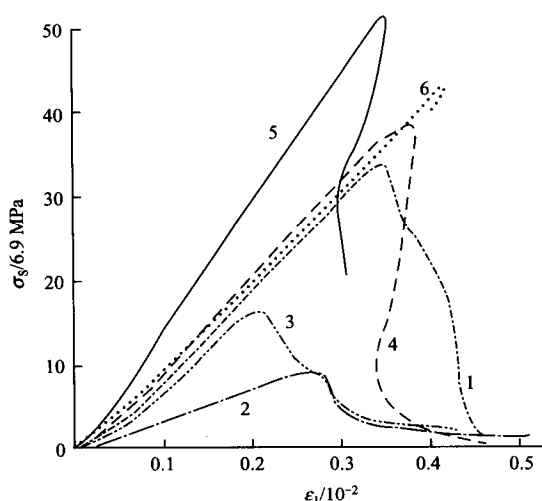


图 1-3 岩石试样单轴压缩的全程曲线^[20]
1—查尔考灰色花岗岩 I; 2—印第安纳石灰岩;
3—田纳西大理岩; 4—查尔考灰色花岗岩 II;
5—玄武岩; 6—佐伦霍芬石灰岩

1935 年, Spaceth W 提出刚性试验机的设想之后, 开始了对混凝土全程曲线的研究。此后的 30 余年, 为提高试验机刚度采取了各种措施, 主要有提高试验机支架刚度、与岩样并联安装附加刚性设施、减小加载油缸长度等, 最后甚至利用水银作为加载液压缸的工作介质。但直到 1966 年, Cook N G W 才在液压-热力混合加载的刚性试验机上, 得到岩石试样单轴压缩的全程曲线^[19]。全程曲线的获得表明, 岩石爆炸式的破坏是由试验机刚度不足引起的, 岩石达到强度之后仍然可以承载。标志性的工作是, 1968 年 Wawersik W R 对该试验机作了改进, 采取人工伺服控制的方法, 得到了一系列岩石试样单轴压缩的全程曲线 (图 1-3), 并指出, 根据岩样单轴压缩破坏的稳定与否, 可以将岩石分为 I 类和 II 类材料^[20]。这一观点至今仍存在争论。

近代力学试验机以加载控制和数据采集的计算机处理为主要特征。试验机的刚性支架

和反馈控制实现了脆性材料的可控破坏, 从而对岩石达到强度极限之后的破坏过程有所认识, 并研究岩石破坏过程中的承载、变形特性, 开创了岩石力学研究的新纪元。图 1-4a 是在伺服试验机 MTS 上得到的煤试样单轴压缩过程中的轴向应力、轴向应变和环向应变, 图 1-4b 对局部曲线作了 5:1 的放大。试验过程中以试样环向变形增加速率 4 mm/3600sec 控制轴向加载^[21], 试验机每秒采样一次, 共 3600 组数据。在加载过程中, 煤试样局部会产生脆性破坏, 使环向变形突然增大; 为维持环向变形的恒定速率, 试验机会伺服控制轴向卸载, 减小环向变形后再继续进行轴向加载。

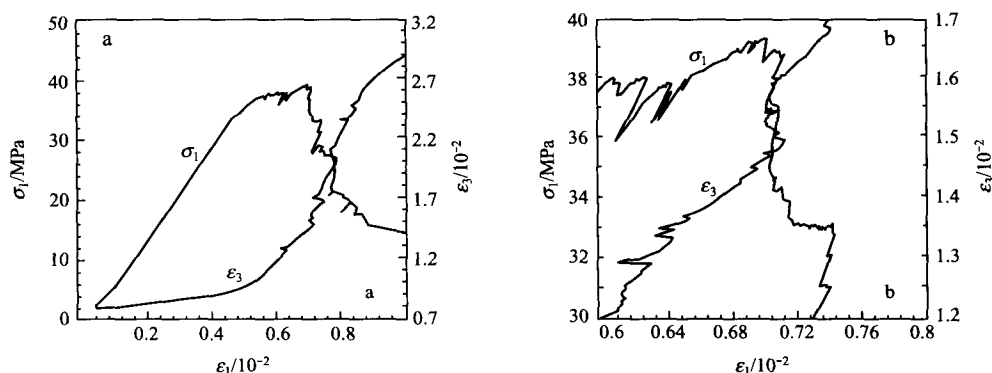


图 1-4 伺服试验机上得到的煤试样单轴压缩过程

a—试验的全过程; b—局部的放大图

现在, 岩石变形引起颗粒结构的细观变化, 已经利用电镜扫描、CT 技术等进行研究; 岩石破坏过程中声音、电磁现象也利用各种设备进行测试^[22~27]。

1.2 岩石力学的发展现状

岩石作为自然界的一种天然材料, 对其变形、强度和破坏特性的研究也是沿着材料力学、弹性力学、塑性力学、断裂力学和损伤力学逐步展开的。由于水库大坝、铁路隧道、跨江桥梁等重大工程项目的兴建, 以及地下采矿业和人防工程的巨大发展, 刺激了对岩石力学性质的研究, 岩石材料的天然复杂性也越来越为人们所认识。1956 年 4 月, 在美国 Colorado 矿业学院举办的岩石力学讨论会上, 提出了“岩石力学 (rock mechanics)”这个名称^[28], 从而成为一个独立于一般固体力学的新学科。公认的岩石力学定义是美国岩石力学学会 (The US National Committee on Rock Mechanics) 在 1964 年首先提出的, 随后于 1974 年修改为^[29]: 岩石力学是研究岩石和岩体力学性能的理论 and 应用的学科, 是探讨岩石和岩体对其周围物理环境力场的反应的力学分支。

40 年来, 人类活动领域的扩大、实验手段的提高、数学方法的发展, 使得岩石力学自身又迅速分化为许多学科: 岩土塑性力学、岩石断裂力学、岩石损伤力学、分形岩石力学、节理岩石力学、岩石流体力学、岩石流变学、岩石破碎学、矿山岩石力学、软岩力学……^[30~39]。如果以研究的手段和目标来看, 则可以将岩石力学研究的内容分成如下两类:

一是利用实验室的岩样参数, 结合原位试验和工程实际, 给出各种经验公式, 以利用

有限元等数值计算方法；数值分析结果通常还要经过适当的模型或现场试验来证实。这一方法具有很高的实用价值，但其结果具有局限性，只是在一定的范围内是准确的。与之相应的数值计算、反分析方法、智能预测方法等也得到了充分发展^[40~43]。

另一是从细观上研究岩石材料内部的破坏过程，以期确切地理解岩石变形破坏的物理特征，并寻求实验室岩样结果的验证。但这些理论工作赖以建立的基础与岩石材料的真实情况并不完全相符。最为重要的是，岩石在细观上或者说在微分角度上是不均匀的。

上述两个方面都牵涉到一个基本问题，即实验室有关试验结果只是具体岩样的宏观力学性质，它随岩样而变化，并不完全等同于岩石材料的力学性质。岩石的变形性质不具备尺度的相似性。这固然是众所周知的事实，但在讨论强度准则、失稳破坏等问题时，经常不能予以明确区分。仅举一例予以说明。

基于单个裂纹的扩展或多个裂纹的贯通得到的各种 Griffith 强度准则，可以用来讨论岩石的抗拉强度和抗压强度的比值，进而利用实际岩样的试验数据来评价、判断这些强度准则的合理性^[44~47]。这就隐含了一个假设：岩样受拉和受压达到极限应力时，标志着裂纹的扩展。

然而这样的假设无论如何是难以成立的。因而，不可能希望岩样的试验结果来证实基于分析局部材料变形特性得到的理论强度准则。就此而论，关于强度准则形式的若干讨论^[48~50]，如果不能明确其建立的基础和应用的范围或方式，是很难得到统一意见的。

1.3 岩石结构的均质和非均质

岩石是构成地壳和上地幔的固态物质，是地球地质作用的产物。它由矿物的天然集合体组成。岩石内部的主要成分是矿物颗粒和胶接物质。根据成因，可将其划分为岩浆岩（或火成岩）、沉积岩和变质岩三大类^[51~53]，它们的力学性质截然不同。

岩浆岩主要有侵入岩和喷出岩两种。地壳之下的地幔物质处于高温高压状态，并在一定条件下以熔融岩浆形式沿着地壳的薄弱环节往地面运动。若于地下冷凝成岩，则称为侵入岩，若溢出地表冷凝成岩，则称为喷出岩。岩浆岩结构的显著特点是，颗粒边界起伏很大，可以相互嵌入；颗粒之间不仅联结力很大，接触也很紧密，几乎没有空隙。通常完整的岩浆岩强度都很高，容易产生脆性破坏。花岗岩是典型的一种岩浆岩（粗粒深成岩），图 1-5 是其组构示意图。

沉积岩是指地壳上各种松散物质（机械或化学作用而破坏的岩石）以及溶解于水的化学物质，经过搬运、沉积和成岩作用而形成的层状岩石。砂岩是沉积岩的代表性岩石，其力学性质与颗粒和胶结物质有关。根据颗粒大小可分为粗砂岩、中砂岩、细砂岩和粉砂岩等，根据胶接物质又可分为泥质砂岩、石灰质砂岩、硅质砂岩等。图 1-6 是砂岩的组构示意图。

地壳中的沉积岩或火成岩岩石在外界条件发生变化时，如地壳运行、岩浆入侵，受到高温、高压的作用，其成分、结构等发生变化，形成新的岩石，称为变质岩。通常，变质岩会保存原始岩石的某些特征，但有其自身独特的性质。大理岩是一种变质岩，由石灰岩热变质之后，经重结晶作用而形成。图 1-7 是大理岩的组构示意图。

构成岩石的矿物颗粒具有多种形状和大小^[52]。通常而言，在以毫米为尺度观察时，

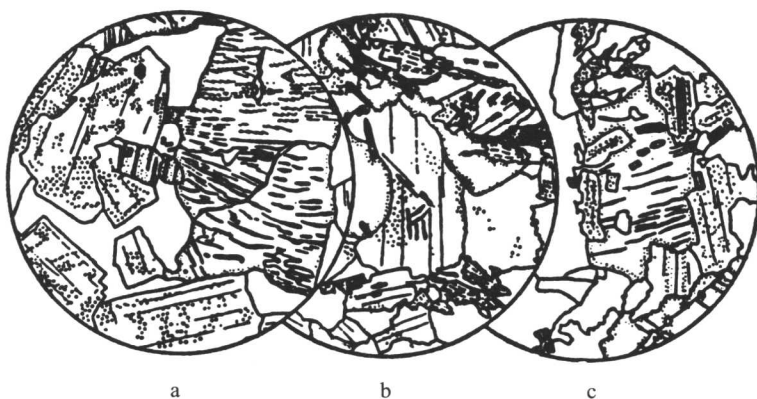


图 1-5 花岗岩的组构示意图

(据 W. W. Moorhouse, 1986)

a—斑状花岗岩；b—黑云母花岗岩；c—白云母黑云母花岗岩

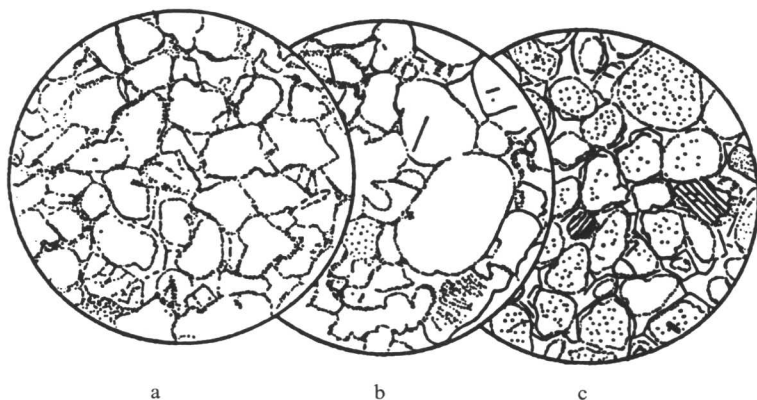


图 1-6 砂岩的组构示意图

(据 W. W. Moorhouse, 1986)

a—红色砂岩；b—石英砂岩；c—Penrith 砂岩

岩石是极端不均匀的；但若以厘米以上的尺度取样，则大致可以认为岩石材料是均匀的。这与四方连续的图案非常相似，即局部差异显著而整体均匀一致。因此，在进行岩石力学性质试验研究时，试样尺度在任何情况下不得小于最大矿物颗粒直径的 3 倍，通常要达到最大矿物颗粒直径的 10 倍。

另一方面，岩石的形成过程以及其后的地质作用可能使其内部存在夹层、裂隙等各种缺陷。若研究的尺度与这些缺陷分布相当，则必定要认为岩石是非均质材料。当然，在考虑范围较大、使用更大的尺度（如增大有限元网格直径）时，岩石又可以认为是具有均匀缺陷的材料。最为显著的事实是，岩样尺度越大，强度的离散程度越小。当然，所谓的均匀缺陷只是相对而言的一种理想状态，离散性是始终存在的。

由此说来，岩石材料结构的均匀与否同使用的研究尺度和所考察的范围有关。但是，从岩样得到的力学性质参数能否用于大尺度的岩石材料，是至关重要的问题。不可否认的

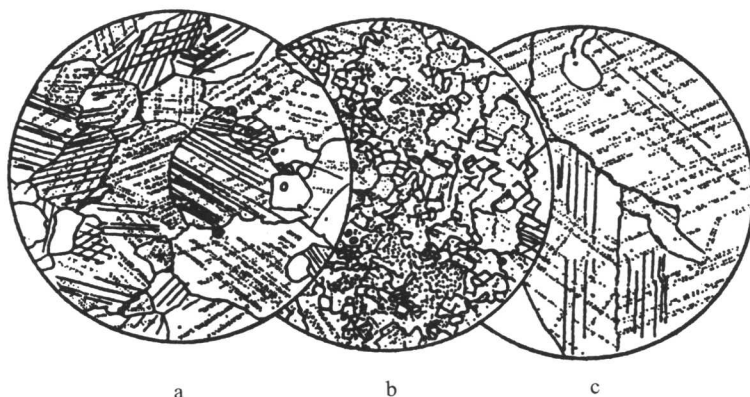


图 1-7 大理岩的组织示意图

(据 W. W. Moorhouse, 1986)

a—粉红色大理岩；b—白色大理岩；c—白云石大理岩

是，从工程地质的观点看，岩体的强度主要取决于内部断层和节理的力学性质，实验室完整岩样的试验结果与工程实际相距甚远。

岩石，尤其是沉积岩和变质岩，内部的层理、节理、裂隙和软弱夹层等具有明显的方向性，即力学性质的各向异性。这是岩石力学研究的又一重大问题^[54]。

1.4 岩石的力学性质和岩石试样的室内试验

为了确定岩石材料的力学性质，通常需要从现场岩体取回岩块或岩心，将其加工成一定形状的岩石试样 (rock specimen or sample)，简称岩样。利用各种力学试验机对岩样进行加载。在此过程中，测量、记录岩样所承受的载荷和产生的变形。有限于试验条件，仅测量岩样直至破坏过程中所承受的最大载荷，即通常所说的强度，主要包括轴向压缩强度、间接拉伸强度和抗剪强度等。

对柱状岩样的单向压缩试验，通常称为单轴压缩试验 (uniaxial compression test)，在试验原理和试验方法上最为简单。不过，由于试验机加载压头的摩擦作用，抑制了岩样端部的侧向膨胀，因而岩样内应力状态并不是均匀的单向压应力。此外，由于试样内倾角大于内摩擦角的裂隙，在无侧压时完全不能承载，更使岩样单轴压缩的破坏形式复杂，强度离散。

岩石材料的特殊性质，使得岩样的形状会影响其强度。例如具有相同截面面积的圆形、六边形、四边形、三角形试样的强度差别很大 (图 1-8)^[55]。随着岩样棱数减少，抗压强度降低，说明边缘的棱

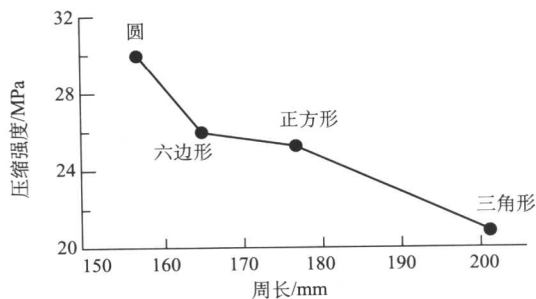


图 1-8 岩样横截面形状对单轴压缩强度的影响
(据堀部富男, 1952)

角容易损坏,不能用来作为有效的承载面积。然而如果进行严密仔细的试验,四边形和圆形柱体岩样的强度差异也并不明显^[56]。这从另一方面说明,由于岩石材料内部构造的特殊性,岩样的强度受到加工精度、试验条件和试样缺陷的强烈影响,某一具体试验结果未必就是岩石材料的真实力学性质。

双面剪和直接剪也是常用的试验方法,该方法用于确定岩石的剪切强度和摩擦系数(图1-9)。不过,在双面剪切试验中破裂面局部出现拉应力,并非单纯的剪切力;直接剪切试验中,由于水平力位置不同而产生弯矩,需要不均匀分布的正应力来平衡。这就是说,在剪切破裂面上不可能出现均匀的正应力和剪切应力,因而,相关试验结果与岩石的剪切摩擦特性并不完全一致。此外,由于岩石抗拉强度较低,实际上不可能实现正应力为零的纯剪切破坏(第3.1节予以具体说明)。

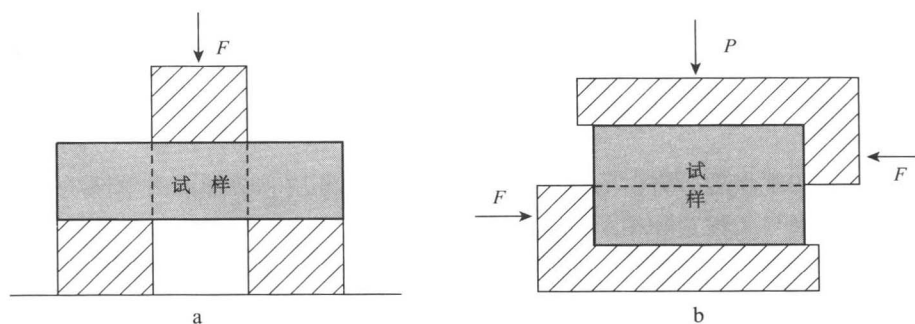


图1-9 双面剪和直接剪试验方法

a—双面剪切试验; b—直接剪切试验

1.5 岩石力学试验规程

为了能够比较不同试验中得到的结果,在进行岩石力学性质试验时,岩样的形状、尺寸及加工精度必须统一,试验过程和结果处理也必须一致。自1979年起,国际岩石力学学会实验室和现场试验标准化委员会(International Society for Rock Mechanics Commission on Standardization on Laboratory and Field Tests),就各种岩石力学试验方法提出了建议^[57]。多年来,我国的煤炭、地质和水利等部门均对岩石力学试验作出了详细规定^[58~63],如对压缩试验而言,最常用的试样有两种,一是边长为5 cm的立方体,主要用于单轴压缩;另一种是直径为50 mm或54 mm(与现场取得岩心的方法有关),长度为直径的2~3倍的圆柱体。对间接拉伸试验(Brazil test),则采用厚度为直径的1/2~1圆柱体。对岩样加工精度的一般要求是,端面不平整度误差最大不超过0.02 mm,侧面不平整度不超过0.3 mm等。不过,不同行业制订的规程也不尽相同,规程也不断进行修改^[57,64]。

从岩块钻孔得到的圆柱经圆盘锯切割之后,必须对端面进行磨削。笔者的磨床具有2个平行的旋转砂轮,试样作往复运动时同时加工2个端面,砂轮通过手动进给。利用百分表测量试样的端面,表针指数变化不超过0.05 mm,即不平整度小于0.05 mm。由于加工设备的限制,这一精度难以改变(如果加工不够仔细还会稍大一些)。不过,各个规程对

试样加工质量的要求不很相同。在研究岩样长度对单轴压缩强度的影响时,文献 [65] 比较了不同规程对岩样端面不平整度的要求。

《水利水电工程岩石试验规程》要求“试件两端面的不平整度允许偏差为 ± 0.05 mm”^[60],《煤与岩石物理力学性质测定方法》要求与此相同^[61],而《工程岩体试验方法标准》要求“试件两端面不平整度误差不得大于 0.05 mm”^[62],精度提高了一倍。《岩石物理力学性质试验规程》要求“(试件)两端面不平行度误差,最大不超过 0.05 mm;端面不平整度误差,最大不超过 0.02 mm”^[63]。这似乎更为准确,因为即使试样两端面不平行度较大,只要端面本身具有较好的平面度,那么试验机球头的调整可以使压头与试样端部均匀接触,而不平整度是不能利用球头来调整的。国际岩石力学学会(简称 ISRM)对单轴压缩试验建议方法草案称,“The ends of the specimen shall be flat to ± 0.01 mm”^[64](其中文译稿^[66]“试件两端必须加工至 ± 0.001 mm 的平整度”,其中数字印刷有误,相差 10 倍),这与《岩石物理力学性质试验规程》要求相当。不过,现在在机械形位公差中,对平面之间的关系有平行度,对表面质量有粗糙度、波纹度及平面度等概念,并不使用“平整度”或“不平整度”这样的名称。

这些都是对标准长度试样而言的。不过,试样长度较小时压缩变形量也减小,端面加工质量的影响相对增大。因而部分长径比小于 1 的试样初期非线性变形显著,平均模量偏低。这对强度也有一定的影响。此外,还应根据达到应力峰值时需要的变形量大小确定试样端面的加工质量,如单轴压缩强度 200 MPa 以上硬脆性的花岗岩,其试样加工质量显然应该高于强度 40 MPa 的风化砂岩。

为岩体工程提供岩性参数的试验固然要完全遵循相关行业的试验规程,而进行岩石力学性质的试验研究时,可以根据具体情况适当调整,但必须理解规程的各项要求。

1.6 岩石试样的离散性

由于岩石形成过程以及所经历变形的差异性,现场钻取的岩心内部,节理、裂纹、空隙等缺陷大量存在,肉眼可见;对于沉积岩而言,钻孔深度的不同,意味着岩石的沉积时间不同,强度离散性更大。此外,在强度较低的岩体(如某些煤系地层)中钻孔取心时,岩石在钻进方向逐步卸载,而钻孔会引起应力集中,最大地应力又通常在水平方向,因而即将成为岩心的材料会受到较大的双向压应力作用,在钻进反方向伸长,内部会具有大量的微裂隙和层面裂隙。由于被取岩心是逐步卸载的,裂隙也将从上向下逐步产生,具有沿长度分布的特征。裂隙的存在有时直接造成岩心的断裂,即不能取得完整的岩心。这也表明岩心与岩体的原始状态并不完全相同,有关试验结果应根据具体情况作出评价。如利用岩心的参数 E , ν , 计算原始地应力就可能出现较大的误差。

图 1-10 是 Matinenda 砂岩试样单轴压缩强度的直方图,岩样直径 54 mm,长径比为 2^[67]。图中完好岩样(Sound specimens)指岩样破坏面是新鲜的,总计 320 个;缺陷岩样(Defective specimens)是指岩样沿原裂隙面破裂,总计 100 个。前者强度整体上大于后者,但也不是所有完好岩样的强度都大于缺陷岩样。显然,岩样强度的分布并不完全符合正态分布。

从上图的试验结果可以看到,岩样强度的平均值与实际岩石材料强度的情况差异很

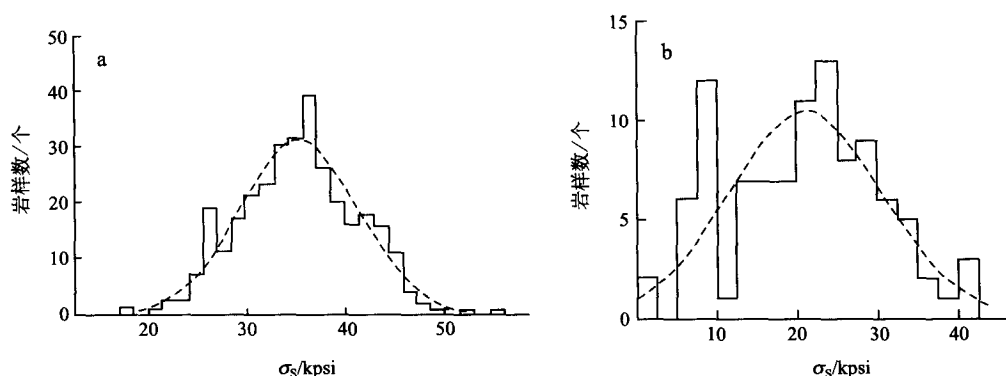


图 1-10 Matinenda 砂岩试样单轴压缩强度的直方图^[67]

(据 Kostak B, 1971)

a—完好岩样, 320 个岩样; b—缺陷岩样, 100 个岩样

大, 因此, 利用平均强度进行设计和计算也一定会造成相当的误差。

煤是一种特殊的岩石, 通常具有明显的层理和大量的裂隙, 单轴压缩试验结果离散性很大, 强度和杨氏模量的差别有时会达到一倍以上。如利用从山西晋城某煤矿同一煤层取回的 4 个煤块, 加工成直径为 49.5 mm、长度为 100 mm 左右的试样, 进行单轴和常规三轴压缩试验。在压缩试验之前对所有试样进行了超声波测试。该煤层具有明显的层理, 而不同煤块的层理方向不同, 所加工煤样的力学性质也具有明显的区别。此外煤样内还存在方向各异、数量不等的裂隙, 部分试样的外侧面也很不平整。强度和杨氏模量都有很大的离散性。单轴压缩的数据见表 1-1, 有关三轴压缩的试验结果将在第 3 章详细介绍。在这些离散的数据中仍有规律可循, 如不同煤块的力学特性存在整体的差异性, 煤块 A 的强度整体小于煤块 B; 在围压下压缩时杨氏模量增大且趋于一致, 不同的煤块具有相同的内摩擦系数, 等等^[68]。

岩石是矿物颗粒的集合体, 具有明显的非均质性。在力学性质上表现为, 即使取自同一岩块的若干试样, 形状和尺寸完全相同, 但强度各不相等, 离散程度极大。图 1-11 是日本稻田花岗岩试样的单轴压缩强度和间接拉伸强度的直方图。总计 274 个岩样均取自同一岩块 (40 cm × 40 cm × 120 cm), 没有肉眼可见的各种缺陷和结构的不均匀性^[69], 但强度仍差别很大。

单轴压缩的试样为直径 30 mm、长度为 60 mm 的圆柱体, 161 个岩样的强度平均值为 166.2 MPa, 标准方差为 31.1 MPa, 二者之比为 0.187。在试验组岩样数达到 20 个之后, 其强度平均值有 95% 以上的概率在 $166.2 \times (1 \pm 15\%)$ MPa 之间; 而岩样数为 10 个, 则强度平均值有 95% 的概率在 $166.2 \times (1 \pm 25\%)$ MPa 之间。若试验组岩样数为 5 个, 则强度平均值在 $166.2 \times (1 \pm 35\%)$ MPa 范围内概率小于 70%。这就是说, 用 5 个岩样的强度平均值来表示稻田花岗岩的强度是危险的。

实际计算表明, 要使试验组平均值与总平均值误差在 $\pm 15\%$ 之内, 需要 16 ~ 23 个岩样。因而单轴压缩实验至少要使用 10 个以上的岩样。不过这是对直径 30 mm 岩样而言的。对直径 54 mm 岩样, 国际岩石力学学会建议试验重复数不小于 5 次^[70]。