

岩石试样的强度及 变形破坏过程

● 尤明庆 著



地质出版社

TU45
Y-528

焦作工学院重点学科建设基金资助出版

岩石试样的强度及变形破坏过程

尤明庆 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

利用伺服试验机对几种岩石试样进行了常规三轴试验,并引用了文献中的试验结果,研究了不同应力路径下岩样的变形、屈服和破坏的过程,力图从岩样宏观的载荷-变形曲线中了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,但承载能力的变化却与岩石材料和应力状态等因素有关。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,则较为均匀,产生的塑性变形较大。当岩样某一断面材料全部屈服,产生整体弱化时,其材料的强度降低与塑性变形量成正比,比例系数与应力路径和岩样长度无关。据此,研究了应力路径、尺度效应和失稳破坏等问题。

书中还研究了岩石的强度缺陷、强度准则及泊松比参数等岩石力学的基本问题;利用一个简单的剪切模型解释了岩石力学性质复杂多变的原因。

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会有所帮助。

图书在版编目(CIP)数据

岩石试样的强度及变形破坏过程/尤明庆著.-北京:地质出版社,2000.9

ISBN 7-116-03170-7

I. 岩… II. 尤… III. 岩石力学试验-研究 IV. TU45

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第41741号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路29号)

责任编辑:肖叶 邵秀荣

责任校对:李 玫

*

北京印刷学院实习工厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092¹/₁₆ 印张:10.25 字数:250000

2000年9月北京第一版·2000年9月北京第一次印刷

印数:1—700册 定册:25.00元

ISBN 7-116-03170-7

T·72



(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

序

岩体是自然界较典型的非均质材料，其力学性质复杂多变。多年来国内外的相关研究一直没有间断。尤明庆博士的专著《岩石试样的强度及变形破坏过程》，是该领域又一富有成果的探索。书中着重研究了不同直径、不同长度的岩样在各种应力路径下的变形、屈服及其破坏过程，并从岩样宏观的载荷-变形曲线中发现了岩样的弱化规律，确定了岩样的理想强度和缺陷程度，提出了统一处理不同应力路径下岩样屈服过程的方法。这些成果都具有很高的理论意义和应用前景。

区分岩样的宏观力学特性和材料的局部力学性质是本书的特色。例如，即使中间主应力对局部岩石材料的剪切屈服没有影响，也可以通过应力各向异性与材料各向异性的共同作用，来解释中间主应力对岩样强度影响的试验结果；书中对岩样强度、变形的尺度效应等也做出了更为准确的说明。区分岩石材料的强度降低与岩样的承载能力变化是本书的另一特色。通过分析岩样峰值承载能力和破坏后承载能力随围压的变化关系，对不同岩石材料的屈服强化、弱化和变形延性、脆性等作了一定的展开阐述，还对岩样环向变形的全程曲线进行了研究。这些研究对构造岩石的本构关系具有相当的指导价值。

书中还对岩样常规三轴压缩强度的回归方式、含有中间主应力的强度准则形式、岩石杨氏模量和泊松比参数的确定方法等进行了有益的探讨，值得大家探讨、参考和使用。

作者本科毕业于复旦大学数学系，后在中国矿业大学机械系获硕士学位。他在流体机械方面的教学、研究工作已取得了一定的成就，并晋升为机械学科的副教授。1994年后，在华安增教授指导下，他开始岩石力学的学习和研究，并取得了工学博士学位。这样的经历使他工作更加认真、踏实，思路也较为开阔，在数年之间就完成这样的专著，实在是难能可贵。现应华安增教授之邀，在对该书粗阅一遍之后，写述了上面的一点文字。我乐于向读者推荐本书，请读者教正。

孙 钧 于 2000 年暮春

中国科学院院士、同济大学教授
中国岩石力学与工程学会名誉理事长

目 录

序	
引 言	(1)
第 1 章 绪论	(2)
1.1 岩石力学性质的试验研究	(2)
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 岩石试样和实验室试验	(7)
1.5 本书的主要内容	(9)
第 2 章 岩石试样单轴压缩过程	(11)
2.1 岩样单轴压缩的应力-应变全程曲线	(11)
2.2 岩样单轴压缩过程中的破坏形式	(13)
2.3 岩样产生张拉破坏的原因	(14)
2.4 决定岩样承载能力降低的因素	(15)
2.5 全程曲线的力学含义和单轴压缩的本构关系	(17)
2.6 变形、弱化本构关系的力学特性	(19)
第 3 章 岩样失稳破坏和试验机加载特性	(26)
3.1 岩样应力峰值之后的变形特性	(26)
3.2 岩样与试验机联合作用模型及失稳破坏准则	(27)
3.3 试验机的刚度重建	(28)
3.4 电液伺服试验机及获取全程曲线的方法	(29)
3.5 第Ⅰ类应力-应变全程曲线	(32)
3.6 矿柱承载性能与尺度的关系	(34)
3.7 矿柱岩爆与岩样失稳破坏	(35)
第 4 章 岩石试样的理想强度和缺陷程度	(37)
4.1 岩样强度的离散性	(37)
4.2 岩样的理想强度	(40)
4.3 岩样强度与围压的关系	(43)
4.4 岩样强度的缺陷程度	(44)
4.5 有关强度尺度效应的研究	(45)
4.6 强度尺度效应产生的根源	(48)
4.7 单轴拉伸强度的尺度效应	(49)
第 5 章 岩石的三轴强度准则	(52)
5.1 主应力空间和 π 平面	(52)
5.2 Coulomb 强度准则	(53)

5.3	Drucker-Prager 强度准则	(55)
5.4	Griffith 强度准则的 Murrell 三维推广	(58)
5.5	幂函数型强度准则	(62)
5.6	中间主应力对岩样强度影响的试验结果	(63)
5.7	中间主应力作用分析	(66)
5.8	Coulomb 强度准则的一个修正公式	(66)
第 6 章	岩样三轴应力状态下的卸围压过程	(70)
6.1	岩样三轴卸围压试验	(70)
6.2	保持轴向应力恒定的卸围压试验	(71)
6.3	轴向应力增加过程中的卸围压试验	(72)
6.4	保持轴向变形恒定的卸围压试验	(74)
6.5	卸围压过程中岩样的破坏机理	(75)
6.6	卸围压过程中轴向应力全程曲线和岩样强度	(75)
6.7	岩样卸围压的屈服破坏过程	(77)
6.8	卸围压法测量岩石材料的泊松比	(80)
6.9	卸围压试验确定岩石的摩擦强度	(83)
第 7 章	应力路径对岩样强度和变形的影响	(86)
7.1	岩石试样的材料强度和承载能力	(86)
7.2	应力路径对岩样强度影响的定义	(87)
7.3	应力路径对岩样强度的影响情况	(88)
7.4	卸围压路径对岩样变形特性的影响	(93)
7.5	有关应力路径作用的讨论	(96)
7.6	真三轴应力状态的变化对岩样强度和变形的影响	(97)
第 8 章	岩样的变形特性与承载能力的关系	(100)
8.1	围压对岩样常规三轴压缩的影响	(100)
8.2	峰值承载能力和残余强度与围压的关系	(103)
8.3	岩样屈服过程中的内摩擦力	(107)
8.4	岩样变形特性与承载能力之间的关系	(109)
8.5	中间主应力对岩样变形特性的影响	(110)
第 9 章	岩样三轴应力状态的环向变形	(112)
9.1	岩样的环向变形和泊松比的确定	(112)
9.2	岩样环向塑性变形	(117)
9.3	缺陷岩样的环向变形特征	(122)
9.4	岩样长度对环向变形的影响	(123)
9.5	循环加载过程中的环向变形	(125)
第 10 章	粘接、摩擦模型的力学性质	(128)
10.1	粘接、摩擦模型	(128)
10.2	屈服过程的强化和弱化	(129)
10.3	屈服破坏的分布和集中	(130)

10.4 正应力降低过程中的屈服破坏..... (133)

10.5 应力路径对变形特性的影响..... (135)

第 11 章 渐进屈服破坏的剪切模型 (136)

11.1 力学模型和基本方程..... (136)

11.2 初始弹性变形状态..... (137)

11.3 材料的脆性和延性屈服..... (138)

11.4 剪切加载过程中的屈服破坏..... (139)

11.5 剪切卸载和重复加载..... (144)

11.6 正压力降低造成的屈服破坏..... (147)

11.7 小结..... (148)

结束语..... (149)

参考文献..... (151)

后记..... (156)

引 言

菜食何味最胜？

春初早韭，秋末晚菘。

——南齐书·周顒传

覆盖地球表面的岩石，是人类生存和发展的立足之地。人们对岩石从各个方面进行了深入而持久的研究。有关学科数不胜数，难以尽述。

岩石力学研究岩石材料在受力作用下的变形特性。实验手段的突飞猛进，使得人们对岩石性质的认识不断深入；数学方法的日新月异，又使得岩石力学的理论如百花争艳，层出不穷。研究文献浩如烟海，专著、教材汗牛充栋。毫无疑问，所有的理论都得到了实验的足够支持；但是，所有的理论都不能充分解释现有的实验现象。时至今日，圆柱形岩样的单轴压缩破坏过程仍在被研究之中，就是岩石材料（并非岩样）的强度，也缺乏确切的定义。

有鉴于此，本书力求用简单的数学方法，分析岩样在各种加载过程中力与变形之间的关系，以实现如下目的：

对岩石材料的变形、破坏和承载有一个更清晰的理解。

第1章 绪 论

学而时习之，不亦说乎？

——论语·学而篇

力学是研究物体受力作用下的运动和变形的学科。在材料均匀、各向同性、完全线弹性、小变形等假设下，弹性力学解决了物体的变形问题^[1]。但是，真实材料并不能满足或不能始终满足这些假设，对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和寺庙时，确实就已经考虑到了岩石的强度问题。文艺复兴时期 Da Vinci 的“不同长度铁丝的强度试验”^[2]，可能是目前已知的最早的力学试验记录（大约公元 1500 年）。1638 年 G. Galileo 报告了空心梁和实心梁的直接拉伸强度和弯曲强度的试验结果，并在研究弯曲强度时采用了悬臂梁端头加载的方式^[3]。

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，得到了边长为 5 cm 的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，拥有一台载荷为 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为 10000000 lb 的试验机，试样的最大长度也增大到 30 ft^[4]。

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；由单向加载变为三向加载，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）的同时，对岩样进行轴向压缩。1911 年，Von Karman 发表的大理岩（Carvala marble）常规三轴压缩试验曲线是标志

① 1 lb = 0.45359237 kg。

② 1 ft = 0.3048 m。

③ 1 in = 0.0254 m。

性的成果（图 1.1），最高围压达到 326 MPa^[5]。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，显示出延性。

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，并从 1967 年开始发表了一系列文章^[6]，论述了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不起作用。无

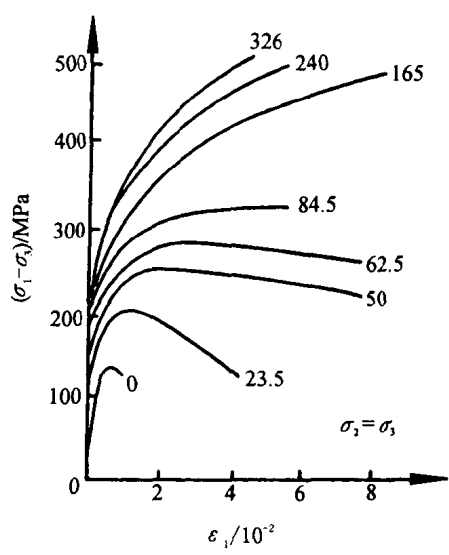


图 1.1 大理岩常规三轴压缩全程曲线
曲线上数字是围压，单位：MPa

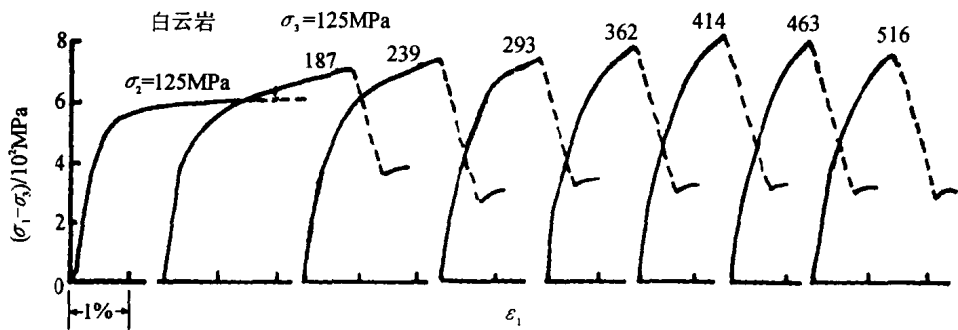


图 1.2 中间主应力对白云岩试样强度和变形的影响
最小主应力 $\sigma_3=125$ MPa；曲线上的数字是中间主应力 σ_2 ，单位：MPa

疑，实际岩体处于复杂的应力状态，其破坏方式需要研究。

1935 年，W. Spaceth 在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。此后的三十余年，为提高试验机的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及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，N. G. W. Cook 才利用液压-热力混合加载的刚性试验机，得到了岩石试样单轴压缩的全程曲线^[7]。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，岩石达到强度极限之后，仍然可以承载。标志性的工作是，1968 年 W. R. Wawersik 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^[8]。这一观点至今仍存在争论。

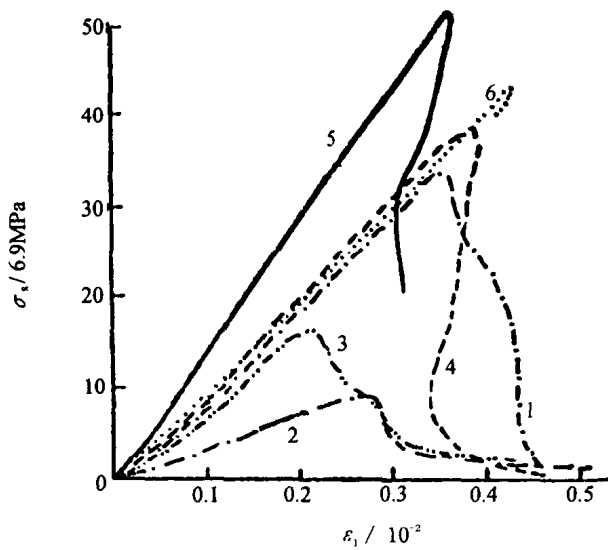


图 1.3 岩石试样单轴压缩的全程曲线

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

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，并研究了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和环向应变。图 1.4b 对局部曲线作了 5 : 1 的放大。在试验过程中，以试样环向变形增加速率为 4 mm/h 控制轴向加载^[9]，试验机每秒采样一次，共采 3600 个样。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，试验机伺服控

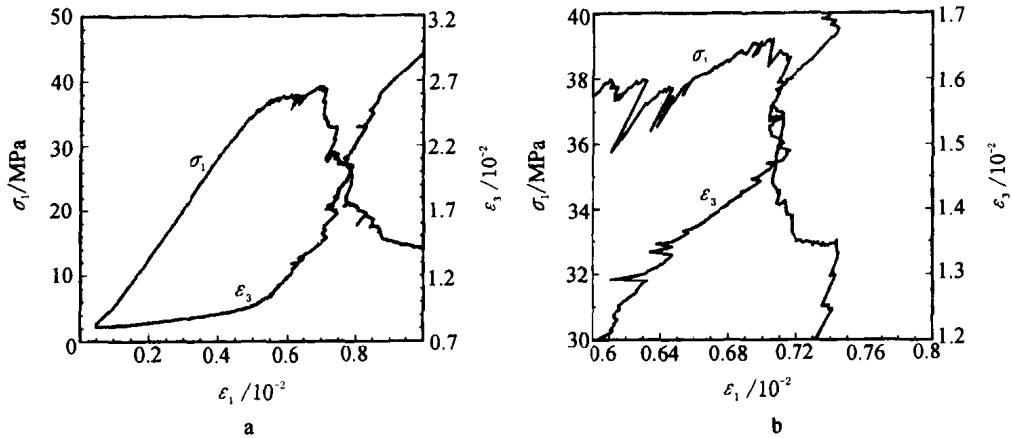


图 1.4 用伺服试验机得到的煤试样单轴压缩过程

a. 试验全过程；b. 局部放大图

制轴向卸载，待减小环向变形后，再继续进行轴向加载。

现在，对岩石变形引起的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；在岩石破坏过程中，对声音、电磁现象也利用各种设备进行测试^[10,11]。

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，对其变形特性的研究，最初也是沿着一般材料力学、弹性力学、塑性力学的过程而逐步展开的。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^[12],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^[13]: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,如岩土塑性力学、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……^[14~22]。如果从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,以便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。

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观角度上是不均匀的。

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^[22~26]。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。因此,不可能用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^[27~29],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结物质。根据成因,可将岩石划分为岩浆岩(或火成岩)、沉积岩和变质岩三大类^[30~32],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。

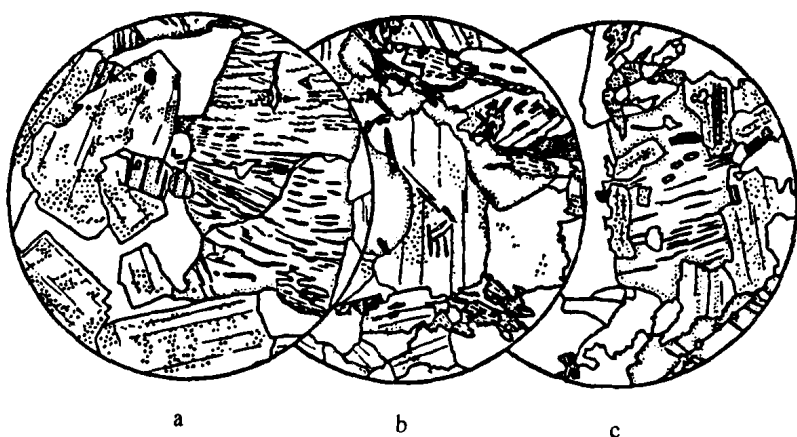


图 1.5 花岗岩组构示意图

(据 W. W. Moorhouse, 1986)

a. 斑状花岗岩; b. 黑云母花岗岩; c. 二云母花岗岩

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；根据胶结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。

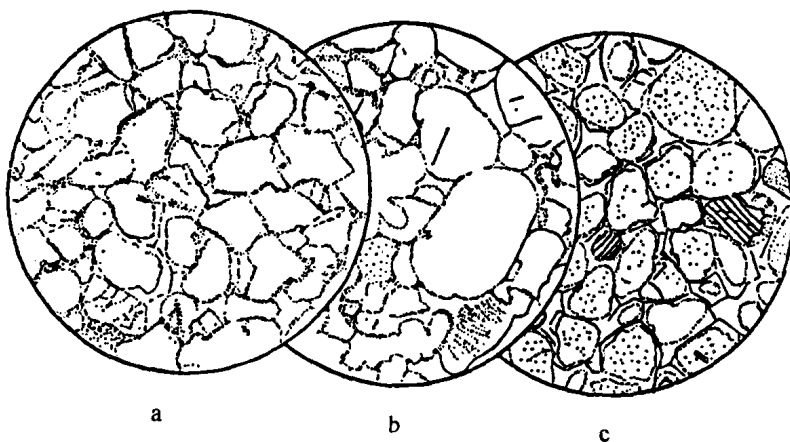


图 1.6 砂岩组构示意图

(据 W. W. Moorhouse, 1986)

a. 红色砂岩; b. 石英砂岩; c. Penrith 砂岩

地壳中的沉积岩或岩浆岩岩石，在外界条件发生变化时，如地壳运动、岩浆入侵，受到高温、高压的作用，其成分、结构等均会发生变化，形成新的岩石，称其为变质岩。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，由石灰岩受热变质之后，经重结晶作用形成。图 1.7 是大理岩的组构示意图。

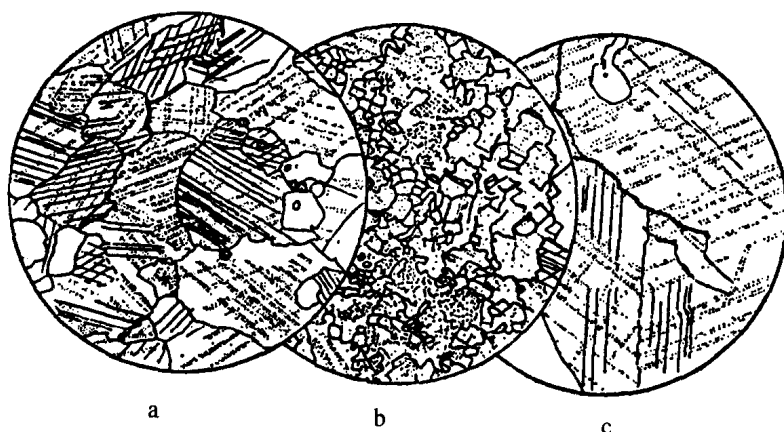


图 1.7 大理岩组构示意图

(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

构成岩石的矿物颗粒具有多种形状和大小^[31]。通常而言,在以毫米为尺度进行观察时,岩石是极不均匀的;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,岩石试样的尺度,在任何情况下都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。

另外,岩石的形成过程以及其后的地质作用会使其内部存在夹层、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的。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,岩石又可以被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实际相距甚远。

岩石,尤其是沉积岩和变质岩,其内部的层理、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课题^[33]。

1.4 岩石试样和实验室试验

为了确定岩石材料的力学性质,通常需要从现场岩体上取回岩块,将其加工成一定形状的岩石试样 (rock specimen or sample),简称岩样。试验时,利用各种不同的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。有时,限于试验条件,仅测量岩样破坏时所承受的最大载荷,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 testing),

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，因而岩样内部的应力状态并不是均匀的单向压应力。更由于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，其强度差别就很大（图 1.8）^[34]。随着岩样棱数减少，抗压强度降低；说明边缘的棱角容易损坏，不能用来作为有效的承载面积。

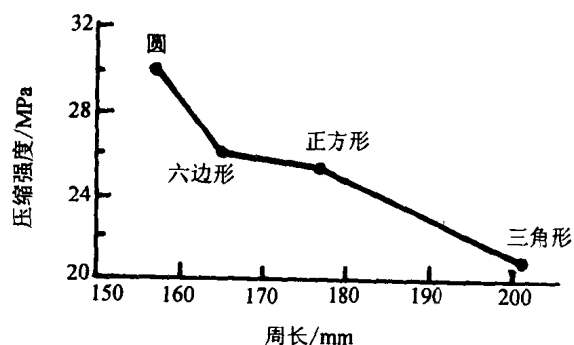


图 1.8 岩样横截面形状对单轴压缩强度的影响
(据堀部富男, 1952)

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太明显^[35]。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、试验条件和样品缺陷的强烈影响。因此，某一具体试验结果未必能代表岩石材料的真实力学性质。

为了能够比较不同试验得到的结果，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，文献[36]就是对单轴压缩试验的建议。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^[37,38]。例如，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（主要用于单轴压缩试验）；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 testing），则采用厚度为直径的 1/2 的圆柱体。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。

由于岩石固有的非均质性，用肉眼就可以看到各种裂纹、孔隙、节理等，所以岩样之间存在差异；现场钻孔得到的岩心，由于深度的不同，这种差异将更为明显。图 1.9 是砂岩（Matinena sandstone）单轴压缩强度的直方图。岩样直径为 54 mm，长径比为 2^[39]。总计 420 个岩样的试验结果表明，岩样强度的分布并不完全符合正态分布。

岩样之间的差异是不可控制的试验参数。因此，为了确定岩石的强度准则，通常要进行不同围压下的三轴压缩试验。有时，围压的作用可能完全被岩样的差异所掩盖。例如，东庞矿粉砂岩，其许多岩样的三轴压缩强度，在围压为 5 MPa、10 MPa、15 MPa 时，并非随围压增大而增大^[40]。如果利用图 1.9 中的岩样进行不同围压的试验，则同样会出现这种情况。二三个岩样强度的算术平均不能消除岩样之间的离散性。由于现场钻取的岩样数量有限，大量重复试验通常是不可能的。因此，在研究岩石力学性质时，必须设法消除岩样之间差异所造成的影响。

在进行岩石力学性质的试验研究时，必须始终明确岩石材料的非均质性，试验结果的差异并不完全是由围压、加载速度、应力路径等可控参数引起的，岩样也是试验过程中的一个变化参数。

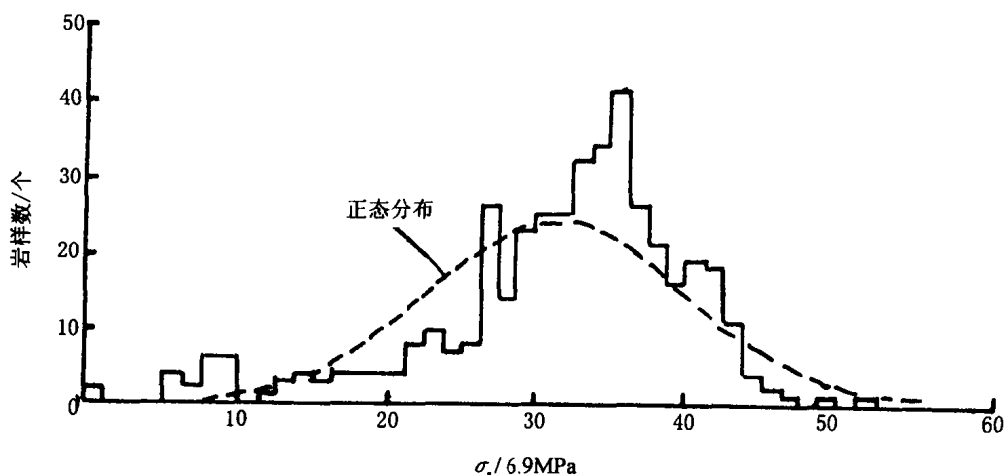


图 1.9 砂岩单轴压缩强度的直方图

1.5 本书的主要内容

岩石在达到承载极限之后，其材料强度的丧失是逐步发生的。因为岩石内部各处的强度不等，所以不会同时达到承载极限、同步屈服破坏。因此，本书试图说明这种非均匀变形破坏所造成的影响。为此，利用中国矿业大学的 MTS 伺服试验机对几种岩石进行了常规三轴试验，并引用了许多文献中的试验结果，研究了不同应力路径下岩样的变形、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。

不同长度、不同直径岩样的单轴压缩应力-应变全程曲线是不同的。因此，必须确定岩样峰值应力之后的变形与岩样形状之间的关系，研究岩样与试验机的联合作用、岩样失稳破坏和Ⅱ类全程曲线等问题，并讨论伺服试验机的加载方法和矿柱岩爆的产生原因。

由于岩石材料的非均质性，相同试验条件下不同岩样的峰值强度存在显著的差异。这种差异甚至会影响到研究的定性结论。然而，应力-应变全程曲线提供了岩样内部材料更多的强度信息，从中可以确定岩样的缺陷程度和理想强度。利用岩样没有缺陷时的理想强度，就可以在消除岩样之间差异的基础上，讨论围压的作用和应力路径的作用等问题，从而得出比较准确的结论。

岩石的强度准则是判断工程岩体的应力状态是否安全的判据或条件。通常，用主应力或者由它们组合得到的不变量来表示。但是，岩石破坏的各种三向应力状态在实验室难以模拟，一些常用的强度准则也没有得到真正的、全面的试验证明。Drucker-Prager 强度准则和幂函数强度准则等，尽管包含中间主应力，并且得到了常规三轴压缩试验的检验，但不能正确反映中间主应力对岩石强度的影响，而且都是极端偏于不安全的。在定性分析中，中间主应力对岩石破坏影响的基础上，本书提出了一个 Coulomb 强度准则的修正公式。

岩体不仅是一种材料，而且是一个复杂的应力、应变环境。工程开挖实际上就是岩体在某一方向卸载。岩体的破坏是在卸载过程中发生的。因此，在保持岩样轴向应力不变和轴向载荷不变这两种条件下，进行了降低围压引起岩样破坏的试验，即通常所说的卸载破坏试验或卸围压试验。利用卸围压试验，同样可以确定岩石的峰值强度、残余强度，并且

可以通过应力之间的关系确定泊松比系数。对岩样轴向压缩破坏和卸围压破坏的异同，本书也进行了讨论。

岩石在破坏之前经历的应力过程是不确定的，而实验室的岩样破坏试验是在特定应力路径下进行的。因此，研究应力路径的作用事关重大。本书明确了不同应力路径下岩样的强度定义，讨论了应力路径对岩样强度和变形的影响；利用一些文献的实验结果，定性说明了中间主应力的变化对岩样强度和变形的影响。

在实验室常规三轴应力状态下，岩样的变形特性与其屈服过程中轴向承载能力的变化有关。若承载能力在屈服过程中降低，即屈服弱化，则强度较高的材料因实际应力的降低而不再屈服，岩石的屈服破坏将局部化，产生的塑性变形较小；而屈服强化时，实际应力的增加将使岩样内的材料依强度从低到高逐步屈服，从而屈服破坏在岩样轴向趋于均匀，产生的塑性变形较大。通过比较峰值强度和残余强度与围压的关系，可以理解屈服过程中承载能力以及内摩擦力的变化情况。

岩样的环向变形从另一方面反映了岩石的力学性质。利用不同围压下的轴向压缩及比例加载的岩样环向变形全程曲线，讨论了确定泊松比参数的方法，研究了岩样环向塑性变形与轴向塑性变形之间的关系，从而对岩样的全程曲线作出了更明确的解释。

就微观而言，岩石材料的承载能力由粘聚力和内摩擦力共同构成，两者在屈服过程中并不是常数：粘聚力随塑性变形降低，而内摩擦力系数随塑性变形增加。利用这一模型研究了岩石屈服破坏过程，力图解释强度的尺度效应、屈服的延性和脆性、卸载破坏及应力路径等问题。具体计算表明，粘聚力、内摩擦力与塑性变形之间的变化关系，决定了岩石的力学性质。