



当代  
杰出青年  
科学文库

# 岩石力学

谢和平 陈忠辉 著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

当代杰出青年科学文库

# 岩石力学

谢和平 陈忠辉 著

国家自然科学基金创新群体项目(50221402)

国家 973 项目(2002CB412707)

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统地阐述了岩石的基本力学性能、岩石的力学性质、强度理论、破坏机理、动力学行为、流变力学行为,而且着重对新兴学科与岩石力学交叉形成的岩石损伤力学、岩石断裂力学、岩石水力学、岩石力学中的分形行为、岩石块体力学进行了较详细的论述。此外又专门介绍了岩石力学几种流行数值模拟(有限元、边界元、离散元、有限差分法、流形元)的基本原理和方法,对岩石力学性质和原岩应力测试的一些新方法也进行了论述。在岩石力学工程应用方面,主要涉及地下工程、边坡的稳定性和几个国内外典型的岩石工程。

本书既介绍岩石力学传统的理论和方法,又阐述了国内外最新理论成果,可供地质、土木、采矿、交通、水利及国防等专业的高校师生和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

岩石力学/谢和平,陈忠辉著. —北京:科学出版社,2004

(当代杰出青年科学文库)

ISBN 7-03-013237-8

I. 岩… II. ①谢…②陈… III. 岩石力学 IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 027323 号

责任编辑:林 鹏 胡 凯 彭 斌 姚 晖/责任校对:包志虹

排版制作:科学出版社编务公司/责任印制:钱玉芬

封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2004 年 5 月 第 一 版 开本: B5(720×1000)

2004 年 5 月 第一次印刷 印张: 23 1/4

印数: 1—2 500 字数: 440 000

定价: 54.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

## 序

岩石力学是研究岩石及其工程岩体在力(包括外力及所处环境变化产生的内力)的作用下,产生变形和破坏规律的科学。它的发展是以研究岩石和岩体自身的结构和力学特征为基础,围绕着工程围岩稳定和破坏条件分析的实用目标,最大限度地应用了固体(材料)力学、流体力学以及现代科学的发展成就。因此,岩石力学可以归属于应用基础科学的范畴。

岩石力学研究的发展,影响到人类的资源开发、交通运输、道路和港口建设、城镇建设等众多岩土结构工程质量、效益和安全状况。可以说是影响人类生存和发展的重大课题。因此半个多世纪以来备受重视,得到长足的发展。最近 20 年,伴随着重大工程建设的需要,以及相关学科特别是材料、信息、应用数学和力学等近代学科发展成果的应用,取得了一系列重要的成就。这些成就为本书的出版奠定了基础。

天然岩石和岩体是大自然的产物,非均质(成分和结构复杂)和存在构造运动破坏的残迹等非连续性特征等,使岩石力学的有关研究,包括岩石(岩体)成分和结构的分析和描述、岩石和岩体强度、破坏前后的变形特征以及应力应变本构模型的建立和诸多因素的界定等等,都要比一般固体材料研究复杂和困难得多。至于工程围岩稳定和破坏条件的研究,由于工程结构模型建立和安全可靠性要求的差异,工程环境、工程开挖程序以及支护方法的千差万别,要想建立安全统一的理论和应用模式还有相当一段路要走。这些客观情况决定了本书作者的写作意图——尽可能从解决工程实际问题需要出发,构筑起学科发展的新的理论框架,并尽可能地反映基于现代数学、力学、材料和信息(包括计算机)学科发展成就基础上的最新研究成果。其中作者在引入损伤力学解决岩石和岩体强度特征的分析研究,以及创造性地应用分形理论,系统地解决岩石和岩体细观结构分析和描述问题、研究和解决岩体结构面破坏理论和强度问题、分析研究岩石和描述破坏前后岩石(岩体)的变形和结构变化全过程等理论和实践成果,都可以说是岩石力学学科发展的新贡献,有重要的参考价值。

本书有以下三个特点:①系统性,本书全面阐述了岩石静力学、动力学、流变学及水力学基本内容和研究前景,并把损伤力学、断裂力学、块体力学的基本原理和研究方法引入到岩石力学中,构建了岩石力学的基本理论框架。②前瞻性,本书系统论述了分形理论、块体理论、流形单元法等典型新理论和新方法在岩石力学研究中的应用。③实用性,注意了与工程的结合和实际应用。本书在阐

述岩石力学每个研究领域的同时，都详细介绍其研究背景和工程应用，并特别介绍了国内外几个具有代表性的大型岩石工程。

谢和平和陈忠辉编著的《岩石力学》，既概述了岩石力学研究的前沿和热点问题，又阐述了岩石力学的基本原理和方法，对于从事岩石力学与工程的科技工作者和高校师生而言，不失为一本很好的参考书。

中国科学院院士 宋振骥

2003年5月22日

# 前 言

岩石力学是伴随人类生产活动逐渐发展起来的一门应用性基础学科。其实早在石器时代,人类就利用岩石作为工具和武器进行基本的生存活动。18世纪,随着采掘业的兴起,人类不自觉地应用一些岩石力学的基本原理进行采矿作业。直到20世纪50年代,全球大规模岩石工程建设的开展,为岩石力学产生和发展提供了物质条件。目前岩石力学与工程正向纵深发展,大坝高度超过300m,地下矿井的开采深度超过3000m,地下厂房的跨度超过了50m,岩石的钻孔深度达12 000m。以至于有人预言:21世纪是地下岩石工程的世纪。这些均充分体现了岩石力学研究的重要性和广泛性。

岩石是一种天然材料,由于岩石组构的差异,岩性变化范围很大,非均匀性、各向异性、非线性和非连续性是岩石力学性质复杂性的主要标志。岩石的稳定和破坏是岩石力学研究的两大主题,一方面绝大多数岩石工程是在稳定状态下工作,岩石边坡、地下巷道和峒室、岩石隧道等无不需几十年甚至上万年的稳定,这就需要研究岩石的强度和稳定性。另一方面,开采矿产资源时不得不破碎矿岩,而且经常遇到滑坡、岩爆及地震等地质灾害,岩石破坏判据和破坏过程成为研究的主要内容。本书第1~5章阐述了岩石基本力学性能和测试方法,主要包括岩石静力学、动力学、流变力学和水力学性能及测试方法。第6~8章讲述了岩石力学和损伤力学、断裂力学、块体力学等新学科相交叉形成的岩石损伤力学、岩石断裂力学和岩石块体力学。第9章主要介绍了非线性科学——分形理论在岩石力学中的应用。第10章介绍几种流行的数值方法(有限元、边界元、离散元、有限差分 and 流形元)在岩石力学中的应用。最后第11章介绍了岩石工程的特点和几个国内外典型的岩石工程。

需要特别指出的是,中国科学院院士宋振骥教授在百忙之中拨冗为本书作序,并就本书的章节结构提出了宝贵的意见。清华大学徐秉业教授、中国岩石力学与工程学会傅冰俊教授等专家对本书提出了很珍贵的编写建议和修改意见,在此特致谢意。

本书内容主要取材于国内外有关文献和专著,一部分系作者本人的研究成果。由于岩石力学包含的内容很多,而且正在不断发展之中,因此本书很难概括岩石力学与工程的全部内容和最新进展。由于编者的水平所限,书中难免有许多缺点和错误,恳请读者批评指正。

作 者

2003年5月14日

于北京

# 目 录

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 序                     |     |
| 前言                    |     |
| 绪论                    | 1   |
| 第1章 岩石物理力学性质及测试方法     | 5   |
| 1.1 岩石组构特征            | 5   |
| 1.2 岩石物理力学性质          | 6   |
| 1.3 不连续岩体力学性质         | 15  |
| 1.4 岩体强度              | 22  |
| 1.5 岩石力学性质的测试         | 24  |
| 1.6 原岩应力的实测方法         | 36  |
| 1.7 3S 监测在岩石工程中的应用    | 43  |
| 第2章 岩石的本构模型与强度理论      | 45  |
| 2.1 岩石的本构理论           | 45  |
| 2.2 岩石的强度理论           | 52  |
| 2.3 岩石的破坏机理           | 59  |
| 第3章 岩石流变力学行为          | 64  |
| 3.1 岩石的流变特性           | 64  |
| 3.2 岩石的流变模型与本构方程      | 66  |
| 3.3 岩石的流变试验与模拟        | 81  |
| 3.4 软岩的流变特性和工程特点      | 86  |
| 3.5 圆形巷道围岩的流变力学分析     | 91  |
| 第4章 岩石动力学行为           | 96  |
| 4.1 岩石动态断裂强度及力学特性     | 96  |
| 4.2 岩石动态破碎的尺度分布与预测    | 105 |
| 4.3 应力波在岩体中的传播        | 111 |
| 4.4 岩爆的动力学机理与防治       | 120 |
| 4.5 爆炸震动作用下的巷道围岩变形和破坏 | 126 |
| 第5章 岩石水力学             | 132 |
| 5.1 裂隙岩体的渗流特性         | 132 |
| 5.2 流固两相介质的耦合作用       | 137 |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 5.3 水对岩石软化及破坏作用 .....       | 144        |
| 5.4 研究展望 .....              | 145        |
| <b>第6章 岩石块体力学</b> .....     | <b>147</b> |
| 6.1 赤平投影的原理和方法 .....        | 148        |
| 6.2 关键块体理论 .....            | 151        |
| 6.3 块体系统的不连续变形分析 .....      | 162        |
| <b>第7章 岩石断裂力学</b> .....     | <b>176</b> |
| 7.1 断裂力学基础 .....            | 176        |
| 7.2 岩石的断裂破坏机理和特征 .....      | 183        |
| 7.3 岩石的断裂力学描述和分析 .....      | 187        |
| 7.4 岩石断裂力学的工程应用 .....       | 190        |
| <b>第8章 岩石损伤力学</b> .....     | <b>199</b> |
| 8.1 损伤力学基础 .....            | 200        |
| 8.2 岩石的损伤机理和特征 .....        | 208        |
| 8.3 岩石损伤力学模型 .....          | 211        |
| 8.4 岩石的连续损伤力学描述 .....       | 217        |
| 8.5 节理岩体的损伤力学分析 .....       | 221        |
| <b>第9章 岩石力学中的分形研究</b> ..... | <b>230</b> |
| 9.1 分形几何简介 .....            | 231        |
| 9.2 孔隙岩体的分形模型和分形行为 .....    | 238        |
| 9.3 岩石损伤过程中的分形描述 .....      | 246        |
| 9.4 岩石断裂过程的分形行为和分形效应 .....  | 251        |
| 9.5 岩石分形破碎和能量耗散 .....       | 259        |
| 9.6 岩爆的分形特征和机理 .....        | 262        |
| 9.7 岩石分形节理的力学行为 .....       | 267        |
| <b>第10章 岩石力学的数值模拟</b> ..... | <b>277</b> |
| 10.1 岩石力学的有限元分析 .....       | 277        |
| 10.2 岩石力学的边界元分析 .....       | 286        |
| 10.3 岩石力学有限差分方法(FLAC) ..... | 293        |
| 10.4 岩石力学的离散元分析 .....       | 298        |
| 10.5 岩石力学的流形元分析 .....       | 302        |
| <b>第11章 岩石力学与岩石工程</b> ..... | <b>312</b> |
| 11.1 岩石和岩体的工程特性 .....       | 312        |
| 11.2 工程岩体的稳定性 .....         | 317        |
| 11.3 巷道稳定性与围岩支护 .....       | 322        |



---

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 11.4 岩石边坡工程的稳定性.....   | 329 |
| 11.5 国内外几个典型的岩石工程..... | 338 |
| 展望.....                | 346 |
| 参考文献.....              | 351 |

## 绪 论

岩石力学的研究历史已有半个多世纪。早期多为零星的研究,1934年苏联秦巴列维奇(Л. М. Цимбарёвич)出版了第一部岩石力学专著<sup>[1]</sup>。20世纪50年代以后,由于世界采矿工程大发展,尤其是受到大型水电工程、土木工程以及军事工程的推动,岩石力学无论是在实验手段还是在理论上,都有了较大的发展。1952年成立了国际岩石力学学会(International Society for Rock Mechanics, ISRM)以及相应的世界采矿大会国际岩石力学局(International Bureau of Rock Mechanics, I-BRM)。1957年法国J. Talobre将地质和力学结合出版了《岩石力学》专著。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,1963年在英国伦敦创刊了《岩石力学与采矿科学与岩土力学文摘国际杂志》(International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts),1962年《地质与土木工程》杂志改名为《岩石力学与岩石工程》杂志(Rock Mechanics and Rock Engineering)。相继各地区和许多国家也相应成立了岩石力学学会和相应的岩石力学杂志。我国1985年正式成立了全国性跨部门的中国岩石力学与工程学会,全国性的岩石力学专门杂志有《岩土工程学报》、《岩石力学与工程学报》和《岩土力学》。目前国内外已出版了大量不同类型、各具特色的岩石力学的教材和专著<sup>[1~20]</sup>。

岩石力学研究是伴随着对岩石物理力学性质认识的逐渐深入而不断发展的,所有理论及方法都始终围绕着如何正确反映和预测岩石力学性质和行为。岩石力学是解决岩石相关工程问题的基础学科。岩石力学的基础研究成就促进了岩石工程建设技术的进步与方法的变革。因此岩石力学的发展与工程是密不可分的,从这个意义上讲,岩石力学更是一门工程技术学科。

岩石力学探讨岩石在其周围物理和工程环境中变形、强度和破坏的力学性质和力学效应。岩石力学的理论基础涉及弹塑性理论、固体物理、流变学、流体力学、强度理论、工程地质、地球物理学、矿物学等学科。岩石力学的工程应用涉及采矿、交通、土木、水利、石油、工民建、地震、国防工程和核废料处理等岩土工程领域。近年来,断裂力学、损伤力学、分形几何、分岔、混沌、突变理论、协同论等非线性学科分支和研究方法相继渗入,推动了岩石力学的不断发展<sup>[21~26]</sup>。

岩石是自然界的产物,是由多种矿物晶粒、孔隙和胶结物组成的混杂体。经过亿万年的地质演变和多期复杂的构造运动,使岩石含有不同阶次随机分布的微观孔隙和裂纹。在宏观尺度上天然岩体又为多种地质构造面(节理、断层和弱面

等)所切割。这些重要特征表征岩石是一种很特殊很复杂的材料,它不是离散介质(因为它是结晶材料),也不是连续介质,因存在着宏、细、微观的不连续性。岩石材料实质上是似连续又非完全连续,似破断又非完全破断的介质。所以岩石材料是极其复杂的非连续和非均质体,它的力学属性具有非线性、各向异性及随时间变化的流变特性。岩石的变形和破坏特性不但和岩石的复杂结构相关,而且还受温度、围压、孔隙水等环境因素的影响。

岩石力学研究对岩石变形破坏特性的描述,是在广义胡克定律基础上,不断深入到岩石的非弹性变形、体积膨胀、各向异性、硬化及软化、流变大变形。由于岩石是一种结构非常复杂的地质材料,其本构理论的许多基本问题目前尚未认识清楚。首先,岩石的非线性体积变化使传统固体力学中有关材料体积线性变化的假设不再成立,传统的变形全量理论与单一性曲线假设不适于岩石。其次,岩石非正交塑性流动法则对现代塑性力学的基础——Drucker公设提出了挑战,引起了广泛的争论<sup>[27]</sup>。因此,如何在本构理论中描述岩石非正交特性成为力学和岩石力学研究的一个热点。第三,岩石破坏后的应变软化特性以及变形失稳过程不仅是岩石力学非线性本构研究的难点,也是传统固体力学中的研究核心课题。根据经典塑性理论的 Drucker 公设应变软化区的材料是不稳定的,不存在惟一的解答。但许多岩石力学实验证明事实并非完全如此。在一定条件下,一些岩石在软化区是稳定的,而另一些岩石在软化区是不稳定的。即使同种岩石,在不同条件下,其软化区的稳定性也不相同。因此,传统的唯象学本构理论在岩石应变软化区的应用遇到了极大的困难,而且本构模型中实验参数的确定具有随机性和不确定性,使得这些本构模型的应用也存在极大的困难。

岩石材料具有多种内部缺陷是造成岩石非弹性变形的主要原因。为描述岩石的状态,岩石损伤力学引入内变量来刻画岩石内部微细观结构的变化,有多种定义下的损伤变量和损伤演化规律。目前,很多学者试图用岩石细观结构的裂隙变形量结合断裂力学分析,探索岩石宏观破坏的力学准则。岩石应变软化的发生通常伴随着岩石损伤、断裂、破坏以及变形局部化的结果,岩石试样将由均匀变形向局部变形,无序破坏向有序破坏、由细观均质向宏观非均质转化<sup>[28,29]</sup>。岩石内部原有的缺陷和裂纹、边界约束条件、围压条件、岩石的几何尺寸都对应变软化特性有重要影响。因此如何准确描述岩石的应变软化特性和岩石非线性本质是岩石力学研究的难题。这需要运用先进和新的测量技术和方法,如声发射、CT 扫描、SEM(扫描电镜)、TV 扫描、光纤技术及计算机图像数据处理进行详细、系统的细宏观力学实验研究,并将分形理论、非局部理论应用于岩石力学分析,建立基于分形的岩石内部结构状态的定量方法,确定可测量的能描述岩石组构的微结构参数,进行结构演化的细观力学分析,确定岩石损伤演化与岩石宏观变形和破坏之间的力学关系,认识岩石不规则裂纹尖端的应力场奇异性以及裂纹的分形性

质,考虑孔隙水、温度等环境因素有关的岩石裂纹扩展问题。

在距地表十几公里内的地层,特别是涉及工程范围内的岩体,受地质构造运动的影响,存在大量的断层、节理和地质弱面。这些地质结构面的存在,破坏了岩层的整体性。它们的性质和空间分布极大地影响着岩体的变形、强度和气液通导特性。节理岩体的变形和强度在很大程度上取决于岩块系统的构成、结构面(非连续面)的力学特性以及岩块间的相对平衡和运动。我们要发展非连续岩体力学、非均匀岩体力学,其内容包括节理岩体的地质描述、节理面力学性质研究、块体静态与动力学分析等。

岩体中的孔隙和裂缝网络是液气体的自然通道。从不同工程背景出发,岩石力学一方面研究渗流对裂隙岩体力学性质的影响(如由水库裂隙水诱发的岩土边坡滑坡和地震),提出岩体稳定性力学准则和加固方案,如对三峡坝基与边坡、铁路交通桥梁基础与隧道等不同稳定性问题的预测和研究;另一方面要研究液气体在不同外应力场作用和裂隙分布的岩体中流动规律,必要时采用人工方法制造岩体裂缝以改变原始应力场及提高渗透率,如油气田开采、煤矿瓦斯抽放、地热开发、煤的地下气化等。

岩石力学基础研究的成就已大大促进了岩石工程的发展。20世纪60年代,岩石弹塑性理论在岩石地下工程稳定性分析中的应用,使人们认识到地下工程围岩是一种承载结构。提出了以新奥法为代表的新的岩石支护与施工方法,革新了传统支护的观念 and 思想,充分发挥了围岩的自承能力,产生了巨大的经济效益。70年代,岩石黏弹、黏弹塑性理论研究使岩石流变学取得了巨大的进展,为预测岩土工程的长期稳定性、核废料的长期埋藏提供了理论基础。岩石刚性压力伺服实验机使得岩石应力、应变全过程得到准确测定,为研究岩石超过最大荷载后力学行为,为采场矿压分析、矿柱设计、岩石失稳研究、岩爆与地震机理研究提供了实验基础。近20年来,岩石断裂力学与破碎的研究,大大地改进了岩煤切割工艺、爆破技术和矿石粉碎工艺,以及石油钻井技术与压裂增产石油工艺。多孔介质力学理论为研究油藏工艺、煤矿瓦斯抽放技术、地下水渗流问题奠定了基础。岩石中的应力波理论促进了岩石声发射技术、超声波测试技术的发展,为岩石破坏与失稳的无损监测提供了强有力的手段。现代计算机技术的迅速发展使岩石力学由传统简单理论分析、经验类比转向更复杂、更符合实际的理论分析和岩石工程的大规模数值模拟。随着社会的进步和能源工业持续发展,我们会面临越来越复杂的岩石力学问题及恶劣环境下的岩石工程技术,如岩爆力学的研究,矿井深部开采和高地应力引起的冲击地压、瓦斯突出和矿井灾害的预测与预报,膨胀岩(软岩)中巷道变形与维护,建筑物、铁路、河流下采矿引起的地表移动、破坏和地面生态环境的保护。承压水体上采矿引起的突水及岩层控制,以及海洋下石油和矿物开采与煤炭地下气化、液化的岩石力学问题。

通过上面的论述,我们应从两个方面体会岩石力学这门学科。第一,我们应体会到岩石力学的基础理论研究促进了岩石工程的建设和发展,岩石工程的建设给岩石力学研究提出了许多挑战性的课题。同时也给岩石力学学科的发展带来了数不清的机遇。相邻基础学科的最新成就为岩石力学注入了新的生机,促进岩石力学理论研究水平的不断提高和完善。第二,我们应看到,由于岩石力学研究对象是天然岩体,使得岩石力学本身还存在许多问题有待于深入探索和研究,距成熟阶段相差尚远。同时,新的复杂和特殊环境下的岩石工程需要新的岩石力学方法和技术去解决。因此,岩石力学无论从基础学科还是从工程技术学科看将是一门“年轻的学科”和“发展中学科”。

我们必须体会和掌握岩石力学现有的研究成果和基本理论,继承和发展现有解决岩石工程技术问题中经验和方法。探索和研究岩石力学和岩石工程中不断提出的新课题,引进和吸收相关学科的新理论、新技术和新方法来不断地完善、发展岩石力学,这是我们岩石力学工作者永恒的主题<sup>[30~33]</sup>。

# 第 1 章 岩石物理力学性质及测试方法

## 1.1 岩石组构特征

岩石是自然界经历漫长地质年代而形成的产物，是组成地壳的主要物质。根据岩石的成因一般将岩石分为三大类：岩浆岩、沉积岩、变质岩。各类岩石在地壳中分布极不均匀。在地壳表面约有 75% 为沉积岩覆盖，而变质岩和岩浆岩只占大约 25% 的面积，但从地表到深达 16 公里的区域却是岩浆岩占主要地位。

岩石组构是岩石组织和构造的统称，是影响岩石力学性质的根本因素。所谓组织是指岩石的结晶程度、矿物颗粒大小、形状以及颗粒之间的连接特征。按照结晶程度岩石可分为全结晶型和非全结晶型。

全结晶岩石的特点是组成岩石的所有矿物具有完全的结晶作用。非全晶质岩石一部分有结晶颗粒组成，另一部分由非晶质玻璃胶结体组成。非全晶质岩石性质与胶结特征和胶结物成分有很大关系。如图 1-1，岩石的主要胶结类型有以下几类：

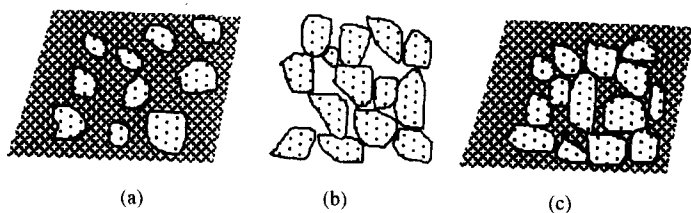


图 1-1 岩石的主要胶结类型<sup>[34]</sup>

(a) 基底型 (b) 接触型 (c) 间隙型

**基底型：**彼此不发生接触的矿物颗粒埋在玻璃体中，这种情况下胶结程度很高，岩石强度与胶结物有关。

**接触型：**仅仅在颗粒的接触点处存在胶结物，这样胶结程度较低，岩石强度也不大。

**间隙型：**矿物颗粒彼此直接接触，而颗粒之间的孔隙被胶结物充填。

**溶蚀型：**胶结物不仅充填在矿物颗粒之间，而且进入到矿物颗粒本身中，胶结强度很高。

胶结物成分可以是各种各样的，有硅质的、铁质的、石灰质的、泥质的、泥灰

质的，石膏质的等等。强度最高的是硅质和铁质胶结的岩石，而强度最低的是石膏质和泥质胶结的岩石。

从岩石的组织 and 构成的成分来看，岩石种类繁多，结构各异，因而形成的力学性质千差万别。从广义上讲，岩石材料是一种天然的复合材料。几种不同成分的材料通过胶结和变质作用合成一种岩石。在复合材料成为研究热点的今天，岩石材料其实已经研究了几十年。

岩石的构造是岩石材料的又一大特征。构造是指岩石组成成分在空间上相互排列及所占的位置。岩石的构造可以有规则的，也可以是不规则的。如图 1-2，岩石构造可以分为以下几类：

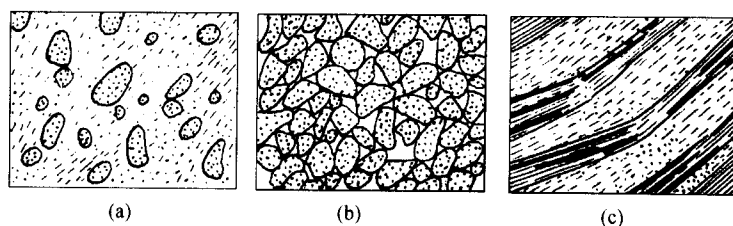


图 1-2 岩石的几种典型构造类型<sup>[34]</sup>

(a) 整体结构 (b) 多孔状结构 (c) 层状结构

整体结构：岩石颗粒相互紧密地贴在一起，其方向是任意的。

多孔状结构：岩石颗粒彼此相接但并不紧密，颗粒之间有许多孔隙。

层状结构：岩石颗粒相互交替，形成分层和层理。

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。由于岩石成因多样性，同时含有弱面、节理，使得岩石的离散性很大，其岩性和力学性质在很大范围内波动。

## 1.2 岩石物理力学性质

岩石物理力学性质是岩石力学研究的基础，它不仅是岩石力学分析的重要依据，而且可以提供岩石工程设计施工和岩石数值计算的基本参数。由于岩石中常含有节理和裂隙，因此岩石的物理力学性质分为岩块和岩体两个部分。岩块是指从岩体中取出、尺寸不大的岩石，由一种或几种矿物构成，不含有明显的节理和裂隙，因此具有相对的均匀性。岩体是相对于岩块而言的，是指地面或地下工程中范围较大的岩石。它由岩块和结构面构成。

### 1.2.1 试验机与岩块变形力学性质

岩块变形力学性质的研究是伴随着试验机的发展而逐步完善的。在岩石力学研究的初期,岩块的力学性质主要依靠普通材料试验机加载获得。但在进行岩石单轴抗压试验时发现,当荷载增加到岩石峰值强度后某一瞬间,往往会发生岩石试件失稳破裂现象。致使实验中很难测到岩石峰值附近和峰后的任何力学性质。因而在一段相当长的时间里,人们都把岩石试件在普通试验机加载条件下的失稳破裂看成岩石材料的固有属性,只强调研究岩石的强度特性。1935年 Speath 从铸铁塑性变形中发现试验机的刚度对试件破坏有重要影响。从此研究者开始注意试验机和试件共同作用的原理。

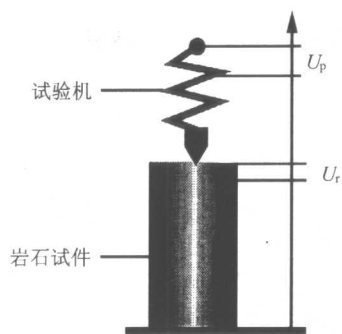


图 1-3 试验机和试件的共同作用模型<sup>[35]</sup>

图 1-3 是试验机和试件共同作用系统,弹簧代表弹性试验机系统。其相互作用的力学关系为

$$F_m = K_m U_m \quad (1.1)$$

$$F_r = f(U_r) \quad (1.2)$$

式中,  $F_m$ ,  $K_m$ ,  $U_m$  分别是试验机的荷载、加载刚度和变形。 $F_r$ ,  $U_r$  是岩石试件所受的荷载和变形,  $F_r = f(U_r)$  表示在准静态条件下岩石试件的本构关系, 假设试验系统处于平衡状态, 则有

$$K_m U_m = f(U_r) \quad (1.3)$$

假设弹簧端部(相当于试验机活塞端部)位移为  $U_p$ , 那么试验机的变形为  $U_m = U_p - U_r$ , 则



$$K_m(U_r - U_p) + f(U_r) = 0 \quad (1.4)$$

上式对时间求导可得

$$\dot{U}_r = \frac{K_m}{K_m + f'(U_r)} \dot{U}_p \quad (1.5)$$

式中,  $f'(U_r)$  为试件荷载-位移曲线在  $U_r$  点处的切线斜率。 $\dot{U}_p$  是试验机活塞端部位移速率。在普通试验机加载条件下, 当荷载增加到试件峰值荷载附近时, 由于人工控制加载速率反应速度较试件变形加速度慢得多。因此可以认为活塞端部位移速率基本不变。这样如果  $K_m + f'(U_r) = 0$ , 那么  $\dot{U}_r$  就趋近于无穷大, 如图 1-4 所示, 也就是试件变形速率急剧增大(失稳破裂)。由于一般测试系统的响应频率跟不上岩石失稳破裂时瞬间变化, 也就无法得到岩石失稳破裂时的变形性质。

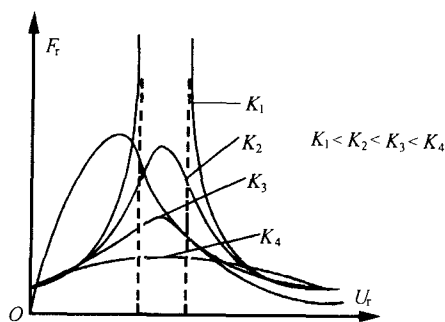


图 1-4 试验机刚度对变形速率的影响<sup>[35]</sup>

当试验机刚度小于或等于岩石试件荷载-位移曲线斜率的绝对值时, 岩石试件就会发生失稳破裂, 反之, 当试验机刚度大于岩石试件荷载-位移曲线斜率的绝对值时, 岩石试件一般稳定破裂, 不会发生岩石试件的爆裂现象, 这就是经典的岩石破裂刚度准则。图 1-4 是不同刚度试验机加载下岩石试件变形速率的变化情况。

从式(1.5)可知: 克服岩石试件失稳破裂的途径有两条: ①适当提高试验机刚度。②改变加载方式。于是刚性试验机和伺服控制试验机就应运而生了。

1965 年 N.G.W. Cook 在普通试验机上增加一根钢圆管, 使试验机的刚度从  $0.28\text{MN/mm}$  提高到  $1.73\text{MN/mm}$ <sup>[36]</sup>, 有效地减轻了试件破坏时的猛烈程度, 第一次获得了田纳西大理岩和圣克乐德花岗岩的应力-应变全过程曲线, 使人们认识到岩石峰后力学性质, 刚性试验机的成功研制开辟了岩石力学研究的新篇章。

随着电子控制技术的发展, 变人工控制加载速率为信号反馈自动控制, 实现