

江苏省优势学科建设工程项目

江苏高校品牌专业建设工程资助项目 (PPZY2015A046)

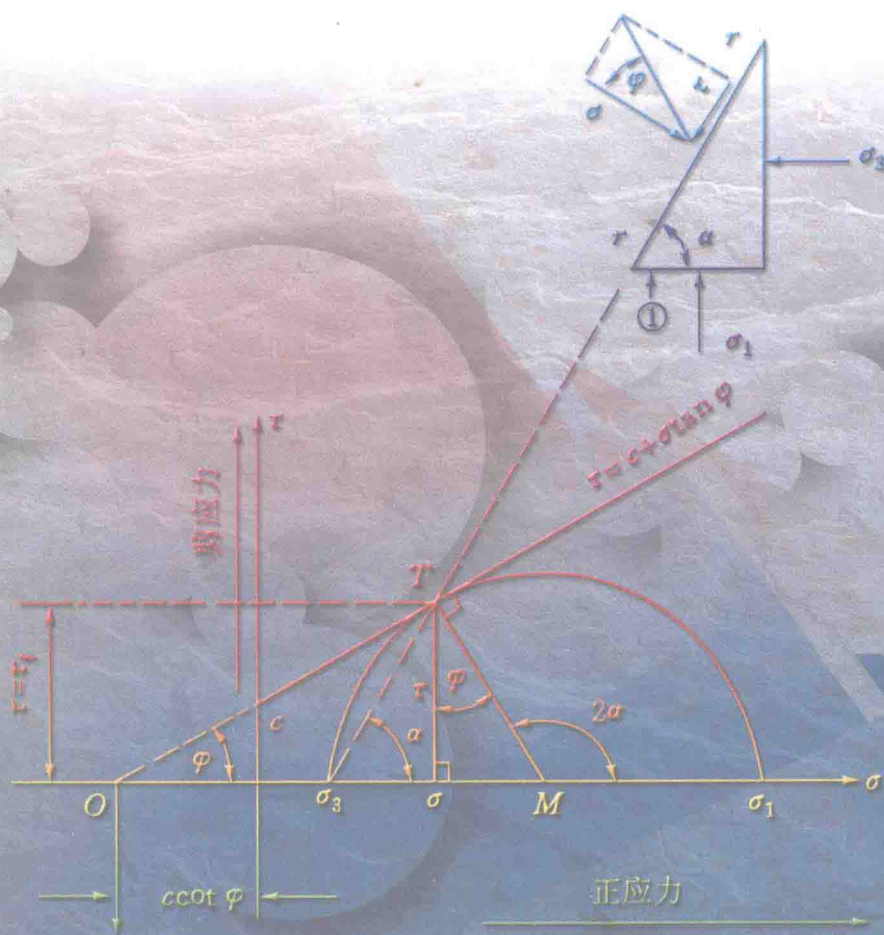
江苏省研究生教育教学改革研究与实践课题 (JGLX16\_111)

江苏省自然科学基金 (BK20130189)

卓越工程师教育培养计划教材

# 矿山岩体力学

谢耀社 季明 徐营 王作棠 编著



Kuangshan Yantili Xue

中国矿业大学出版社

江苏省优势学科建设工程项目

江苏高校品牌专业建设工程资助项目(PPZY2015A046)

江苏省研究生教育教学改革研究与实践课题(JGLX16\_111)

江苏省自然科学基金(BK20130189)

卓越工程师教育培养计划教材

# 矿山岩体力学

谢耀社 季明 徐营 王作棠 编著

中国矿业大学出版社

## 内 容 简 介

矿山岩体力学是采矿工程的基础理论之一,本书共7章,介绍了岩石力学的发展情况,弹性力学基本理论,岩石的物理力学性质,岩体的力学性质,原岩应力及其测量,矿山岩体力学工程和矿山岩体力学展望。

本书可作为高等院校开设的“岩石力学”、“矿山岩体力学”等课程的本科生、研究生的参考教材,也可供矿山企业、科研院所和设计部门等从事岩石力学研究的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

矿山岩体力学 / 谢耀社等编著. —徐州: 中国矿业大学出版社, 2016.10

ISBN 978-7-5646-3213-7

I. ①矿… II. ①谢… III. ①矿山—岩石力学—高等学校—教材 IV. ①TD31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 184011 号

书 名 矿山岩体力学  
编 著 谢耀社 季 明 徐 营 王作棠  
责任编辑 陈 慧  
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司  
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)  
营销热线 (0516)83885307 83884995  
出版服务 (0516)83885767 83884920  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com  
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司  
开 本 787×1092 1/16 印张 14 字数 349 千字  
版次印次 2016 年 10 月第 1 版 2016 年 10 月第 1 次印刷  
定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

## 前 言

矿山岩体力学是岩体力学的一个分支,众多的专家和学者投入到岩体力学的研究工作中。国内外的岩体力学教材、专著甚多,但是结合矿山井巷工程设计与施工、矿山压力与岩层控制的基础理论——矿山岩体力学的教材和专著较少,并且其深度、层次和适应面也各不相同。

本教材基于作者多年讲授矿山压力及其控制和矿山岩体力学的体会,在经过多年试用的原有讲义的基础上,结合矿山岩体力学近年来的科研成果编写而成。其基本思路和内容有如下:

1. 矿山岩石力学是采矿工程的基础理论之一。本书首先讲述了岩石力学的发展情况、研究对象、研究范围和研究方法等基础知识。

2. 矿山岩体力学的基础理论是弹性力学。本书根据采矿工程本科教学不设弹性力学课程的特点,介绍了弹性力学的基本理论与方法。

3. 矿山工程面对的是煤系地层的岩石和岩体。本书重点讲述沉积岩石的物理性质、强度理论、破坏准则和变形特性。

4. 从岩石学的角度考虑,岩石与岩体没有区别,而从岩体力学考虑,岩石与岩体是不可分的,又是有区别的,其主要区别在于岩石与岩体的结构构造。处于不同岩石类型和不同结构的岩体中的矿山岩体工程,又具有不同的力学特征。因此,本书讲述了岩体的基本概念、结构性质、变形特性、强度特性以及岩体质量评价与分类。

5. 讲述了采矿岩体工程中地应力测量的原理与技术,包括地应力的基本概念、基本分布规律,地应力的直接测量法和间接测量法,并介绍了山西潞安古城矿的地应力实测案例。

6. 结合采矿岩体工程特点,讲述了矿山岩体内应力的重新分布规律以及煤矿冲击地压分析的相关问题

7. 最后,本书对矿山岩体力学的深层次研究及发展方向进行了介绍。

本教材的编写得到了中国矿业大学矿业工程学院、煤炭资源与安全开采国家重点实验室有关专家的指导。

本书得到了江苏省优势学科建设工程项目、江苏高校品牌专业建设工程资助项目(PPZY2015A046)、江苏省研究生教育教学改革研究与实践课题(JGLX16\_111)、江苏省自然科学基金(BK20130189)、卓越工程师教育培养计划、中国矿业大学研究生教育教学改革研究与实践项目(YJSJG006)和中国矿业大学教育教学改革与建设项目(2015CG01, 2015YB01)资助。书中引用了许多国内外专家、学者的著述,在此一并表示衷心的感谢。

本书可作为高等院校开设的“岩石力学”、“矿山岩体力学”等课程的本科生、研究生的参考教材,也可供矿山企业、科研院所和设计部门等从事岩石力学研究的工程技术人员参考。

由于作者水平所限,书中难免存在错误和不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

2016年10月

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 岩石力学及其发展简史 .....	1
1.2 矿山岩体力学的基础知识 .....	4
1.3 岩石力学研究的复杂性 .....	7
1.4 岩石力学的基本研究内容和研究方法 .....	9
1.5 岩石力学研究展望.....	11
<b>第 2 章 弹性力学基本理论</b> .....	14
2.1 绪论.....	14
2.2 平面问题的基本理论.....	19
2.3 平面问题的直角坐标解答.....	40
2.4 平面问题的极坐标解答.....	50
<b>第 3 章 岩石的物理力学性质</b> .....	63
3.1 岩石的基本构成.....	64
3.2 岩石的物理性质.....	67
3.3 岩石的强度.....	72
3.4 岩石的破坏准则及测试方法.....	87
3.5 岩石的变形.....	98
<b>第 4 章 岩体的力学性质</b> .....	116
4.1 岩体的基本概念 .....	116
4.2 岩体结构 .....	117
4.3 岩体的变形特性 .....	129
4.4 岩体的强度特性 .....	132
4.5 岩体质量评价及其分类 .....	138
<b>第 5 章 原岩应力及其测量</b> .....	151
5.1 概论 .....	151
5.2 地应力测量 .....	158
5.3 地应力实测 .....	190

---

第 6 章 矿山岩体力学工程.....	202
6.1 巷道围岩应力分布 .....	202
6.2 煤矿冲击地压分析 .....	207
第 7 章 矿山岩体力学展望.....	212
7.1 矿山岩体力学研究方法 .....	212
7.2 矿山岩体力学的发展方向 .....	213
参考文献.....	215

# 第1章 绪 论

## 1.1 岩石力学及其发展简史

岩石力学是一门应用性与实践性很强的应用基础学科。最初产生于采矿工程,其服务对象也主要是采矿工程,但其研究方法和理论并非为采矿工程独有。它的应用范围涉及采矿、土木建筑、水利水电、交通、地质、地震、石油开采、地下工程、海洋工程、核废料存储等众多与岩体工程相关的工程领域。

岩石力学按其发展进程可划分成如下四个阶段。

### (1) 初始阶段(19世纪末~20世纪初)

这是岩石力学的萌芽发展时期,产生了初步理论以解决岩体开挖的力学计算问题。例如,1912年海姆(A. Heim)提出了静水压力理论。他认为地下岩石处于一种静水压力状态,作用在地下岩体工程上的垂直压力和水平压力相等,均等于单位面积上覆盖岩层的重量 $\gamma H$ 。

朗金(W. J. M. Rankine)和金尼克(A. Н. Динник)也提出了相似的理论,但他们认为只有垂直压力等于 $\gamma H$ ,而水平压力应为 $\gamma H$ 乘一个侧压系数,即 $\lambda \gamma H$ 。朗金根据松散理论认为 $\lambda = \arctan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$ ,而金尼克根据弹性理论的泊松效应认为 $\lambda = \frac{\mu}{1-\mu}$ 。其中, $\gamma$ 、 $\mu$ 、 $\varphi$ 分别为上覆岩层容重、泊松比和内摩擦角, $H$ 为地下岩体工程所在深度。由于当时地下岩体工程埋藏深度不大,因而人们曾一度认为这些理论是正确的。随着开挖深度的增加,越来越多的人认识到上述理论是不准确的。

### (2) 经验理论阶段(20世纪初~20世纪30年代)

该阶段出现了根据生产经验提出的地压理论,并开始用材料力学和结构力学的方法分析地下工程的支护问题。最有代表性的理论就是普罗托吉雅柯诺夫(M. М. ПротоДвяконов)提出的自然平衡拱学说,即普氏理论。该理论认为,围岩开挖后自然塌落成抛物线拱形,作用在支架上的压力等于冒落拱内岩石的重量,仅是上覆岩石重量的一部分。于是,确定支护结构上的荷载大小和分布方式成了地下岩体工程支护设计的前提条件。太沙基(K. Terzahi)也提出相同的理论,只是他认为塌落拱的形状是矩形,而不是抛物线形。普氏理论是在当时的支护形式和施工水平上发展起来的,由于当时的掘进和支护所需的时间较长,支护和围岩不能及时紧密相贴,致使围岩最终往往有一部分破坏、塌落。但事实上,围岩的塌落并不是形成围岩压力的唯一来源,也不是所有地下空间都存在塌落拱。进一步地说,围岩和支护之间并不完全是荷载和结构的关系问题,在很多情况下围岩和支护形成一个共同承载系统,而且维持岩体工程的稳定最根本的还是要发挥围岩的作用。因此,靠假定

的松散地层压力来进行支护设计是不符合实际的。尽管如此,上述理论在一定历史时期和条件下还是发挥了一定作用。

普氏提出以岩石坚固性系数  $f$  (普氏系数) 作为定量分类指标的岩体分类方法, 被广泛应用至今。

### (3) 经典理论阶段(20世纪30年代~20世纪60年代)

这是岩石力学学科形成的重要阶段, 弹性力学和塑性力学被引入岩石力学, 确立了一些经典计算公式, 形成围岩和支护共同作用的理论。结构面对岩石力学性质的影响受到重视, 岩石力学文献和专著的出版、实验方法的完善、岩体工程技术问题的解决, 这些都说明岩石力学发展到该阶段已经成为一门独立的学科。在经典理论发展阶段, 形成了“连续介质理论”和“地质力学理论”两大学派。

连续介质理论是以固体力学作为基础, 从材料的基本力学性质出发来认识岩体工程的稳定性问题, 这是认识方法上的重要进展, 抓住了岩体工程计算的本质性问题。早在20世纪30年代, 萨文(P. H. Chubb) 就用无限大平板孔附近应力集中的弹性解析解来计算分析岩体工程的围岩应力分布问题。20世纪50年代, 鲁滨涅特(K. B. Рулленит) 运用连续介质理论写出了求解岩石力学领域问题的系统著作。同期, 开始有人用弹塑性理论研究围岩的稳定问题, 导出著名的芬纳(R. Fenner)-塔罗勃(J. Talobre)公式和卡斯特纳(H. Kastner)公式。塞拉塔(S. Serata)用流变模型进行了隧道围岩的黏弹性分析。

但是, 上述连续介质理论的计算方法只适用于圆形巷道等个别情况, 而对普通的开挖空间却无能为力, 因为没有现成的弹性或弹塑性理论解析解可供应用。20世纪60年代运用早期的有限差分 and 有限元等数值分析方法, 出现了考虑实际开挖空间和岩体节理、裂隙的围岩和支护共同作用的弹性或弹塑性计算解, 使运用围岩和支护共同作用原理进行实际岩体工程的计算分析和设计变得普遍起来。同时认识到, 运用共同作用理论解决实际问题, 必须以地应力(即原岩应力)作为前提条件进行理论分析, 才能把围岩和支护的共同变形与支护的作用力、支护设置时间、支护刚度等关系正确地联系起来。否则, 使用假设的外荷载条件计算, 就失去它的真实性和实际应用价值。这一认识促进了早期的地应力测量工作的开展。

但是, 早期的连续介质理论忽视了对地应力作用的正确认识, 忽视了开挖的概念和施工因素的影响。正如一开始就指出的, 地应力是一种内应力, 由于开挖形成的“释放荷载”才是引起围岩变形和破坏的根本作用力。而传统连续介质理论采用固体力学或结构力学的外边界加载方式, 往往得出远离开挖体处的位移大, 而开挖体内边缘位移小的计算结果, 这显然与事实不符。多数的岩体工程不是一次开挖完成的, 而是多次开挖完成的。由于岩石材料的非线性, 其受力后的应力状态具有加载途径性, 因此前面的每次开挖都对后面的开挖产生影响。施工顺序不同、开挖步骤不同, 都有各自不同的最终力学效应, 也即不同的岩体工程稳定性状态。因此, 忽视工程施工过程的计算结果将很难用于指导工程实践。此外, 传统连续介质理论过分注重对岩石“材料”的研究, 追求准而又准的“本构关系”。但是, 由于岩体组成和结构的复杂性和多变性, 要想把岩体的材料性质和本构关系完全弄准确是不可能的。事实上, 在岩体工程的计算中存在大量不确定性因素, 如岩石的结构、性质、节理、裂隙分布、工程地质条件等, 所以传统连续介质理论作为一种确定性研究方法是不适合用于解决岩体工程问题的。

地质力学理论注重研究地层结构和力学性质与岩体工程稳定性的关系, 它是20世纪



20 年代由德国人克罗斯(H. Cloos)创立起来的。该理论反对把岩体当作连续介质简单地利用固体力学的原理进行岩石力学特性的分析;强调要重视对岩体节理、裂隙的研究,重视岩体结构面对岩体工程稳定性的影响和控制作用。1951 年 6 月,在奥地利成立了以斯梯尼(J. Sith)和米勒(L. Müller)为首的“地质力学研究组”,在萨尔茨堡举行了第一届地质力学讨论会,形成了“奥地利学派”。从此该理论迅速发展,并广泛应用于岩体工程,在全世界产生了广泛的影响。该理论对岩体工程的最重要贡献是提出了“研究工程围岩的稳定性必须了解原岩应力和开挖后岩体的力学强度变化”以及“节理裂隙对岩体工程稳定性的影响”等观点。该理论同时重视岩体工程施工过程中应力、位移和稳定性状态的监测,这是现代信息岩石力学的雏形。该学派重视支护与围岩的共同作用,特别重视利用围岩自身的强度维持岩体工程的稳定性。在岩体工程施工方面,提出了著名的“新奥法”,该方法特别符合现代岩石力学工程实际,至今仍被国内外广泛应用。1962 年 10 月,在第 13 届地质力学讨论会上成立了国际岩石力学学会,米勒担任第一任主席,这是岩石力学发展史上的重要事件。

该理论的缺陷是过分强调节理、裂隙的作用,过分依赖经验,而忽视理论的指导作用。该理论完全反对把岩体作为连续介质看待,也是不正确的和有害的。因为这种认识阻碍现代数学力学理论在岩体工程中的应用,譬如早期的有限元应用就受到这种理论的干扰。因为,虽然岩体中存在这样那样的节理、裂隙,但从大范围、大尺度看仍可将其作为连续介质对待,对节理、裂隙的作用,对连续性和不连续性的划分,均需由具体研究的工程和处理问题的方法而确定,没有绝对的统一模式和标准。

#### (4) 近代发展阶段(20 世纪 60 年代~现在)

此阶段是岩石力学理论和实践的新进展阶段,其主要特点是,用更为复杂的多种多样的力学模型来分析岩石力学问题,把力学、物理学、系统工程、现代数理科学、现代信息技术的最新成果引入岩石力学,而电子计算机的广泛应用为流变学、断裂力学、非连续介质力学、数值方法、灰色理论、人工智能、非线性理论等在岩石力学与工程中的应用提供了可能。

从总体上来讲,现代岩石力学理论认为:由于岩石和岩体结构及其赋存状态、赋存条件的复杂性和多变性,岩石力学既不能完全套用传统的连续介质理论,也不能完全依靠以节理、裂隙和结构面分析为特征的传统地质力学理论,而必须把岩体工程看成是一个“人-地”系统,用系统论的方法来进行岩石力学与工程的研究,用系统概念来表征“岩体”,这可使岩体的“复杂性”得到全面、科学的表述。从系统来讲,岩体的组成、结构、性能、赋存状态及边界条件构成其力学行为和工程功能的基础,岩石力学研究的目的是认识和控制岩石系统的力学行为和工程功能。

20 世纪 60 年代和 70 年代,原位岩体与岩块的巨大工程差异被揭示出来,岩体的地质结构和赋存状况受到重视,“不连续性”成为岩石力学研究的重点。从“材料”概念到“不连续介质”概念是岩石力学理论上的飞跃。随着计算机科学的进步,20 世纪 60 年代和 70 年代开始出现用于岩体工程稳定性计算的数值计算方法,主要是有限元法。20 世纪 80 年代数值计算方法发展很快,有限元、边界元及其混合模型得到广泛的应用,成为岩石力学分析计算的主要手段。20 世纪 90 年代数值分析终于在岩石力学和工程学科中扎根,岩石力学专家和数学家合作创造出一系列新的计算原理和方法。例如,损伤力学和离散元法的进步,DDA 法和流形元方法的发展,标志着岩石力学专家建立起自己独到的分析原理和计算方法。

现代计算机科学技术的进步也带动了现代信息技术的发展。20世纪80年代和90年代,岩石工程三维信息系统、人工智能、神经网络、专家系统、工程决策支持系统等迅速发展起来,并得到普遍的重视和应用。

20世纪90年代现代数理科学的渗透是非线性科学在岩石力学中的重要应用。本质上讲,非线性和线性是互为依存的,耗散结构论、协同论、分叉和混沌理论正在被试图用于认识和解释岩石力学的各种复杂过程。岩石力学和相邻的工程地质学都因受到研究对象的“复杂性”挑战,而对非线性理论倍加青睐。由于岩体结构及其赋存状态、赋存条件的复杂性和多变性,致使岩石力学和工程所研究的目标和对象存在着大量不确定性,因而有人在20世纪80年代末提出不确定性研究理论,目前已被越来越多的人所认识和接受,现代科学技术手段,如模糊数学、人工智能、灰色理论和非线性理论等为不确定性分析研究方法和理论体系的建立提供了必要的技术支持。

系统科学虽然早已受到岩石力学界的注意,但直到20世纪80年代和90年代才达成共识,并进入岩石力学理论和工程应用。时至今日,岩石工程力学问题已被当作一种系统工程来解决,系统论强调复杂事物的层次性、多因素性及相互关联和相互作用特征,并认为人类认识是多源的,是多源知识的综合集成;这些为岩石力学理论和岩石工程实践的结合提供了依据。可以说,从“材料”概念到“不连续介质概念”是现代岩石力学的第一步突破;进入计算力学阶段是第二步突破;而非线性理论、不确定性理论和系统科学理论进入实用阶段,则是岩石力学理论研究及工程应用的第三步,是意义更为重大的突破。

## 1.2 矿山岩体力学的基础知识

### 1.2.1 基本概念

矿山岩体力学是研究采矿工程所影响的那一部分地壳内岩石力学现象和这些力学现象所引起的有关规律的科学,具体探讨岩体在力场作用下所发生的变形、破坏和移动的规律,据此对井巷和采场的稳定性进行分析,为采矿工程设计和维护安全生产提供理论依据,以便有效地开采矿产资源。我们提到的采矿工程,一般指固体矿床开采,包括地下开采(亦称井工开采)和露天开采。采矿工程的分类见图1-1。

无论是地下开采还是露天开采,都可抽象为对原有地壳的一种人为破坏活动,或称是一种人为的有目的地在地壳岩体中的大规模开挖活动。这种开挖活动破坏了岩体内原有应力平衡状态,引起了岩体内部应力重新分布,其结果表现为开掘的井、巷、硐、工作面及露天矿采场边坡等的周围岩体变形、移动甚至破坏,直到岩体内部重新形成一个新的应力平衡状态为止。

严格来说,地压(即矿山压力)应包括井工开采和露天开采两方面,但按照传统观念和习惯来说,矿山压力通常指与地下开采有关的内容。

岩石是指由矿物组成的、构成地壳的主要物质。它可以是尺寸很小的矿物颗粒,也可以是相当大的岩块。广义地讲,土、沙粒都是特殊的岩石,只是为了与土力学相区别,岩石力学不将它们称为岩石。岩石从岩体中取出后,原岩应力得到解除,因此岩石中没有原岩应力。但是岩石声发射(AE)特征试验表明,某些岩石具有记忆其赋存环境原岩应力的特性(AE凯瑟效应)。尽管岩石中可能含有不贯通或微小的裂纹、空隙或胶结强度较高的层理,但是

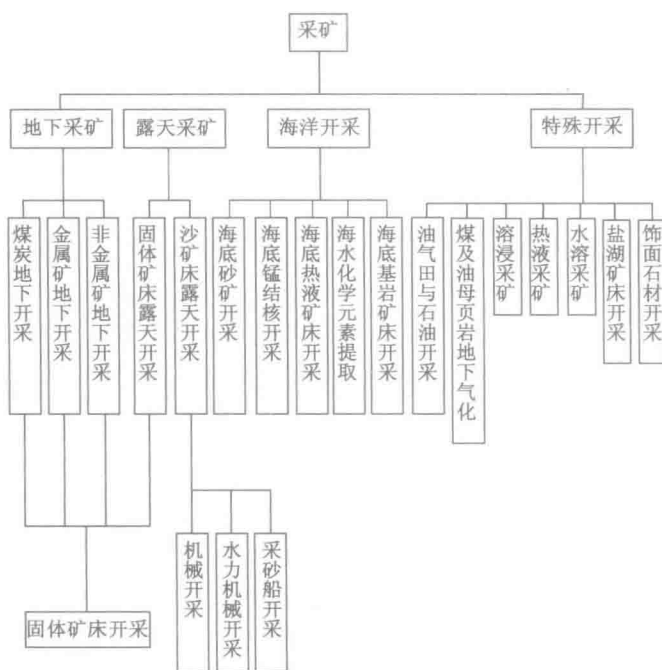


图 1-1 采矿工程分类

不包含弱面,是完整的岩块,故岩石的强度比岩体的强度大得多。

岩体是指赋存在一定地质环境(应力场、渗流场和地温场)中的经受过变形、遭受过破坏,由一定岩石成分组成,含有一定结构面的地质体。岩体要有足够大的体积,且受不确定的节理、裂隙、断层或层理等结构面(或称弱面,裂隙系统)削弱,因此,岩体是非均质、非连续的各向异性的不确定性的裂隙体。岩体内存在初始地应力,即原岩应力。一般以室内岩石试件的力学性质表示岩石力学性质,以现场原位试验的大型试块的力学性质表示岩体力学性质。

岩体力学中之所以分岩石和岩体,是为了将未受损伤的完整岩石和受弱面损伤的“岩石”(岩体)二者按在力学性质上的差异区别开来,并且要研究不同性质和分布的弱面对岩石强度的影响。岩石和岩体是既有区别又互相联系的两个概念。岩石是岩体的组成物质,岩体是岩石和结构面的统一体。工程中所设计的是岩体,在设计前必须取得一定数量的岩体力学性质指标,然而做大量现场原位试验等岩体力学性质试验是很不经济的。既然同种类的岩石与岩体的区别只是体积大小和有无弱面存在,那么它们之间必然存在一定内在联系。因此,目前采用的方法是以岩石的性质通过一定的折减规律找到岩体的力学性质,这样既节约费用又节省时间。

矿山压力(即矿压、地压、岩压)是指人类采掘活动引起岩体内部应力的重新分布,或者是指人类采掘活动在井巷、硐室及回采工作面围岩和其中的支护体上所引起的力。在矿山压力的作用下,开掘的井、巷、硐、工作面等岩体工程的围岩体或支护体发生变形、破坏的现象,通常称为矿山压力显现(即矿压显现、地压显现)。

矿山压力的产生是由于地下开采。地下开采常见的开挖有:① 井筒;② 硐室;③ 巷道;

#### ④ 采场。

针对其主要研究：

- (1) 巷道变形,断面缩小;
- (2) 巷道冒顶、破坏;
- (3) 采场冒顶;
- (4) 支架压坏、支护破坏;
- (5) 采场大面积来压;
- (6) 冲击矿压;
- (7) 突水。

常见的矿压显现有:顶板下沉、底鼓、帮鼓、片帮、冒顶、岩体大面积冒落、岩体突然抛出(金属矿山称为岩爆)、支护体变形或损坏、大面积岩层移动、地表开裂、地表塌陷、采场顶底板闭合、井筒开裂等等。

矿压显现可能影响采矿工作的正常进行,也可能引起采空区闭合、垮塌而释放地压,从而减小采矿工作面的集中应力。为了确保安全生产,必须采取各种工程技术措施把矿压显现控制在安全生产许可的范围内,合理利用有利于安全生产的地压显现。所有改变和利用矿压而采取的工程技术措施,均属于矿山压力控制。

矿山压力、矿山压力显现、矿山压力控制是矿山岩体力学研究的主要内容。随着大规模开采活动及矿压显现给工作面带来的严重危害,人们迫切需要一种理论来解释和研究有关的矿压现象,并用以指导工程设计和安全生产,这就在土力学、材料力学、工程力学、弹塑性力学、断裂损伤力学和工程地质的基础上形成了一门新的学科分支——矿山岩体力学。矿山岩体力学是研究自然和采动影响所造成的矿山应力场中,有关矿山岩体和工程结构的强度、变形和稳定性的科学。它既是固体力学的一个应用分支,也是采矿工程的理论基础。

#### 1.2.2 采矿工程的力学特点

采矿工程有 5 个力学特点:

(1) 采矿工程的移动特性。采矿空间移动,一般寿命为 3~5 年,最长不过 30~50 年,多种采动空间相互影响与叠加,因此,存在多次采动影响,且其计算精度、安全系数及加固要求均低于国防、水利工程。

(2) 采矿工程受矿床赋存条件的限制。采矿工程结构物的位置选择性不大,同时,由于采掘工作面不断变化,采矿工程岩石力学具有复杂性。

(3) 岩体工程的岩体结构本质。与地面工程不同,地下工程围岩既是载荷,也是一种承载结构,施载体系与承载体系之间没有明显的界限。

(4) 岩体工程中围岩的大变形和支护体的可缩特性。

(5) 岩体工程中的能量原理和动力现象。如冲击矿压、顶板大面积来压、煤与瓦斯突出是煤、岩体中聚集能量的突然、猛烈的释放。

因此,采矿工程设计与施工中更要注意发挥围岩的自承载能力,重视支护与围岩相互作用的研究及应用,重视施工因素对岩体工程稳定性的影响研究,充分考虑采矿工程的移动特性和受矿体赋存条件制约的特性。

#### 1.2.3 矿山岩体力学对采矿工程的作用

矿山岩体力学对采矿工程的作用表现在如下 5 个方面:

(1) 保护生态环境。地下水破坏、地表沉降、废石排放占地等,都将严重影响矿区生态环境。借助矿山岩体力学,研究保水开采措施,控制地表沉降,实施废石就地充填,将能较好地保护矿区生态环境。

(2) 保证安全和正常生产。掌握矿山压力活动的基本规律,用以指导采矿生产的设计和生组织,控制巷道稳定性和边坡稳定性等,保障设备正常运行,促进安全生产。

(3) 减少地下资源损失。通过研究和实测矿压活动规律,减少顶板等事故,选择合理的矿柱尺寸,甚至取消矿柱而实现无矿柱的连续开采,将最大限度地减少矿石资源的损失。

(4) 改进地下开采工艺和技术。地下开采工艺、技术的进步与对矿压显现规律的深刻认识和矿压控制手段的改善有密切关系。例如,自移式液压支架的使用促成了采煤综合机械化的实现,矿压规律的认识促成了露天高台阶开采和地下大分段及高中段开采;反之开采工艺、施工技术的变革,提高了地压控制技能,如开采深度增加使矿压显现更为剧烈,将带来一系列新的矿压控制问题,只有不断解决这些问题,才能使未来复杂条件下的开采工作得以顺利进行。

(5) 提高开采经济效果。为了维护巷道和管理顶板,每年都要消耗大量人力、物力和财力,购买坑木、金属支护材料、水泥及其他材料,实施巷道和顶板支护,甚至留下大量贵重矿柱支护顶板,或者充填采空区、人工砌筑矿柱而置换天然矿柱,这些都会增加开采成本。矿压显现预测、支护质量与顶板动态监测、信息反馈、确定优化的矿压控制措施与开采施工方案、工艺,将大幅度提高开采效益。

综上所述,掌握矿压显现规律,研究矿压控制的有效方法,对采矿安全生产、经济开采具有十分重要的意义。

## 1.3 岩石力学研究的复杂性

已经看出,岩石力学体现了与应用力学的整个领域有关的一系列原理、主要知识和各种分析方法。现在需要关注的问题是:地质介质力学提出了哪些主要问题足以说明有必要把它建成或看作是一门有条理的、专门的工程学科呢?这里将围绕着如下五个方面,简要评述岩石性质及内容,并说明专门研究成果的需求及其在采矿应用中的特殊作用。

### 1.3.1 岩石破裂

一般工程材料的破裂发生在拉应力区,这些材料介质破坏前后的性能已有完整的理论来阐明。岩石结构中作用的应力场普遍为压应力场,所以,已建立的理论并不能直接应用于岩石的破裂情况。受压岩石特有的复杂状态与破裂起始处各个微裂隙面之间产生的摩擦力有关。这使得岩石强度对侧限应力的变化非常敏感,从而在分析岩石强度和破坏后的变形性质时,人们会对诸如正交法则、关联流动以及塑性理论的概念产生怀疑。岩石的破裂具有局部化的现象是与此有关的一个问题,在岩石中,破裂表现为在岩石介质中产生集中的剪切变形带,它把未受明显改变的岩石材料分离开来。

### 1.3.2 尺寸效应

岩石对所加载荷的影响表现出明显的尺寸效应。这种效应与岩体的不连续性有部分关系。节理和其他由于地质成因生产的裂隙是岩体中普遍存在的特征,因此,岩体的强度和变

形特性受岩石材料的性质(即岩石连续介质单元)和各种地质结构面的影响。通过研究在采矿实践中各尺寸的承载岩体,可评价上述效应。岩石钻进过程主要依赖于钻具作用下岩石材料的破裂,所以钻进过程一般可以反映出完整岩石的强度特征。在含节理岩体中开挖巷道可以反映节理体系的性质。在这种情况下,巷道的最终断面将取决于节理层面。巷道围岩的性状可反映出是否存在分离的岩块,作用在其表面上的摩擦力和其他的力确定了岩块的稳定性。对于较大的尺寸,例如,对于一个矿柱,节理岩体可显示出准连续介质的特性。图 1-2 的示意图说明本节描述的尺寸效应。

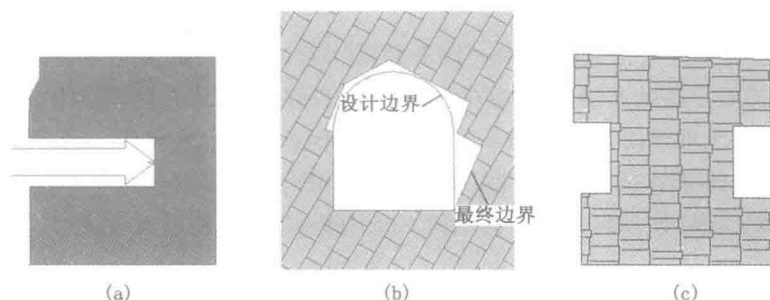


图 1-2 岩石尺寸效应对外加荷载的响应

(a) 钻进中岩石材料的破坏;(b) 控制最终巷道形状的不连续面;(c) 准连续介质的矿柱

上述研究表明若要详细说明岩体力学性质并不容易,特别是很难测试到令人满意的足以代表等效连续介质尺寸的节理岩样。这说明有必要提出一些方法,根据岩石组成单元的性质推出岩体的综合性质,进而对这些方法加以验证。

### 1.3.3 抗拉强度

岩石由于其抗拉强度低而不同于除混凝土以外的所有其他的常见工程材料。单轴拉伸试验测得岩石材料试件破坏时的应力比单轴压缩实验低一个数量级。由于岩石中的节理和其他裂纹只能抵抗极小的拉应力或根本不能抵抗拉应力,所以,可以假定岩体不存在抗拉强度。为此,习惯上把岩石描述为“不抗拉”材料,这意味着岩体中不可能产生或承受拉应力。对于岩体中的地下硐室设计来说,这一性质的含义是,分析得到的任何受拉区域实际上都需要解除应力,从而导致局部应力重新分布。应力解除会导致岩石局部失稳,表现为岩石单元与围岩逐段分离或渐进分离。

### 1.3.4 地下水影响

地下水可能以两种方式影响岩体力学性能。最为明显的是通过有效应力法则起作用。分隔岩块的节理中的承压水使岩石表面之间的法向有效应力减小,从而降低了由于摩擦而产生的潜在抗剪力。多孔岩石(如砂岩等)与颗粒土一样也服从有效应力法则。在这两种情况下,当与排水条件相比时,裂隙或孔隙中承压水的影响将降低岩体的最终强度。

地下水对岩石的力学性质更难以捉摸的影响来自于水对特种岩石和矿物的不利作用。例如,地下水存在时黏土层可能会软化,岩体强度降低、变形增加。页岩和泥质砂岩之类的泥质岩石的强度也会随着水的浸入而明显降低。

在采矿实践中,地下水对岩体强度的影响是值得重视的。由于岩石性状可通过其水文地质环境确定,在某些情况下严密监控矿区地下水的状况是十分重要的。其次,由于充填料

在许多采矿作业中是一个重要环节,所以,采场充填施工时必须认真考虑其岩性,出发点是岩体强度特性取决于不断变化着的地下水条件。

### 1.3.5 风化

风化可以定义为:岩石由于其表面受到大气和水的溶解作用而发生的化学或物理变化。这一过程类似于发生在普通材料上的腐蚀作用。由于风化对完整材料的力学性质及岩石表面摩擦系数有重要影响,所以,风化对工程有着利害关系。风化会引起岩石力学性质持续降低,表面摩擦系数逐步减小。

在露天采矿中,虽然热循环和曝晒等都是重要的物理过程,但地下风化过程却主要源于化学作用,其中包括溶解和离子交换现象、氧化和水化作用。有些风化作用是容易进行评价的,如地下水环境改变后石灰岩的溶解或因为硫酸盐流失而发生的泥灰岩软化等。对另外一些风化现象,如磁黄铁矿的氧化、某些矿物对快速化学腐蚀的敏感性等问题,还不甚了解。特别要注意含有橄榄石和辉石之类矿物的基性岩类的风化问题。水解作用的生成物是蒙脱土,它是一种力学行为特别难以评价的膨胀黏土。

上述讨论并未给出岩石力学中有待研究的全部特殊问题。但很明显,岩石力学学科超出了传统的应用力学范围,它必然包括其他工程学科尚未涉及的许多问题。

## 1.4 岩石力学的基本研究内容和研究方法

### 1.4.1 研究内容

岩石力学服务对象的广泛性和研究对象的复杂性,决定了岩石力学研究的内容也必须是广泛而复杂的,但对任何岩体工程领域来讲,下列的基本内容都是要首先进行研究的。

(1) 岩石、岩体的地质特征,内容包括:① 岩石的物质组成和结构特征;② 结构面特征及其对岩体力学性质的影响;③ 岩体结构及其力学特征;④ 岩体工程分类。

(2) 岩石的物理、水理与热力学性质。

(3) 岩石的基本力学性质,内容包括:① 岩块在各种力学作用下的变形和强度特征以及力学指标参数;② 影响岩体力学性质的主要因素,包括加载条件、温度、湿度等;③ 岩石的变形破坏机理及其破坏判据。

(4) 结构面力学性质,内容包括:① 结构面在法向压应力及剪应力作用下的变形特征及其参数确定;② 结构面剪切强度特征及其测试技术和方法。

(5) 岩体力学性质,内容包括:① 岩体变形与强度特征及其原位测试技术与方法;② 岩体力学参数的弱化处理与经验估计;③ 影响岩体力学性质的主要因素;④ 岩体中地下水的赋存、运移规律及岩体的水力学特征。

(6) 原岩应力(地应力)分布规律及其测量理论与方法。

(7) 工程岩体的稳定性,内容包括:① 各类工程岩体在开挖荷载作用下的应力、位移分布特征;② 各类工程岩体在开挖荷载作用下的变形破坏特征;③ 各类工程岩体的稳定性分析与评价等。

(8) 岩石工程稳定性维护技术,包括岩体性质的改善与加固技术等。

(9) 各种新技术、新方法与新理论在岩石力学中的应用。

(10) 工程岩体的模型、模拟试验及原位监测技术。模型模拟试验包括数值模型模拟、

物理模型模拟等,这是解决岩石力学理论和实际问题的一种重要手段。而原位监测既可以检验岩体变形与稳定性分析成果的正确与否,同时也可以及时地发现问题并采取合理的措施加以解决。

#### 1.4.2 研究方法

由于岩石力学是一门边缘交叉科学,研究的内容广泛,对象复杂,这就决定了岩石力学研究方法的多样性。根据所采用的研究手段或所依据的基础理论所属学科领域的不同,岩石力学的研究方法可大概归纳为以下四种。在进行研究方法论述的时候也涉及一些研究内容,可作为上述研究内容的补充。

(1) 工程地质研究方法。着重于研究与岩石和岩体的力学性质有关的岩石和岩体地质特征。如用岩矿鉴定方法,了解岩体的岩石类型、矿物组成及结构构造特征;用地层学方法、构造地质学方法及工程勘察方法等,了解岩体的成因、空间分布及岩体中各种结构面的发育情况等;用水文地质学方法了解赋存于岩体中地下水的形成与运移规律等等。

(2) 科学实验方法。科学实验是岩石力学发展的基础,它包括实验室岩石力学参数的测定,模型试验,现场岩体的原位试验及监测技术,地应力的测定和岩体构造的测定等。试验结果可为岩体变形和稳定性分析计算提供必要的物理力学参数。同时,还可以用某些试验结果(如模拟试验及原位应力、位移、声发射监测结果等)直接评价岩体的变形和稳定性,以及探讨某些岩石力学理论问题。随着岩石力学的不断发展,其涉及的实验范围也越来越宽,如地质构造的勘测、大地层的力学测定等,可为岩石力学提供必要的研究资料。另一方面,室内岩石的微观测定也是岩石力学研究的重要手段。近代发展起来的新的实验技术都已不断地应用于岩石力学领域,如遥感技术、激光散斑和切层扫描技术、三维地震勘测成像和三维地震 CT 成像技术、微震技术等等,都已逐渐为岩体工程服务。

(3) 数学力学分析方法。数学力学分析是岩石力学研究中的一个重要环节。它是通过建立工程岩体的力学模型和利用适当的分析方法,预测工程岩体在各种力场作用下的变形与稳定性,为岩体工程设计和施工提供定量依据,其中建立符合实际的力学模型和选择适当的分析方法是数学力学分析中的关键。目前常用的力学模型有:刚体力学模型、弹性及弹塑性力学模型、流变模型、断裂力学模型、损伤力学模型、渗透网络模型、拓扑模型等等。常用的分析方法有:① 数值分析方法,包括有限差分法、有限元法、边界元法、离散元法、无界元法、流形元法、不连续变形分析法、块体力学和反演分析法等;② 模糊聚类和概率分析,包括随机分析、可靠度分析、灵敏度分析、趋势分析、时间序列分析和灰色系统理论等;③ 模拟分析,包括光弹应力分析、相似材料模型试验、离心模型试验等,在边坡研究中,还普遍采用极限平衡的分析方法。

(4) 整体综合分析方法,是就整个工程进行多种方法并以系统工程为基础的综合分析方法。这是岩石力学与岩体工程研究中极其重要的一套工作方法。由于岩石力学与工程研究中每一环节都是多因素的,且信息量大,因此必须采用多种方法并考虑多种因素(包括工程的、地质的及施工的等)进行综合分析和综合评价,特别注重理论和经验相结合,才能得出符合实际情况的正确结论。就岩体工程而言,整体综合分析方法又必须以不确定性分析方法为指导,因为在岩体工程问题中,存在着工程的、地质的及施工的多方面的不确定性因素,只有采用不确定性研究方法,才能彻底摆脱传统的固体力学、结构力学的确定性分析方法的影响,使研究和分析的结果更符合实际,更可靠和实用。现代非线性科学理论、信息科学理



论、系统科学理论、模糊数学、人工智能、灰色理论和计算机科学技术的发展等,为不确定性分析方法奠定了必要的技术基础。

## 1.5 岩石力学研究展望

由于矿产资源勘探开发、能源开发、交通运输工程、城市建设和人类向地下空间发展的需要,工程的规模越来越大,所涉及的岩石力学问题也越来越复杂。例如,在水电建设中,岩石大坝高度可达300 m以上,如我国三峡工程大坝高度达到180 m,装机容量达1 768万kW,为当前世界上最大的岩石建设工程;水电站和其他军事或民用工程地下厂房、库房、储油库、储气库的高度和跨度均可达50~100 m,露天矿垂直边坡高度可达600~700 m,如我国太钢峨口铁矿最终边坡垂直高度达720 m,新西兰某露天矿边坡垂高达到1 000 m;澳大利亚大型露天矿的最终开采境界达到10~20 km<sup>2</sup>,矿石产量达到6 000~8 000万t/a;南非地下黄金矿山的开采深度已超过4 000 m,我国一些有色金属矿山、黄金矿山和煤矿的开采深度也已超过1 000 m;瑞典吉鲁纳地下铁矿的矿石生产能力达到3 000万t/a;已建成的英吉利海峡隧道长达50 km;日本青函跨海隧道长达53.85 km;欧非大陆海底隧道穿越直布罗陀海峡,全长250 km。这些都对岩石力学提出了更高的要求,使岩石力学面临许多前所未有的问题和挑战,急需发展和提高岩石力学理论和方法的研究水平,以适应工程实践的需要。

传统的岩石力学分析方法,不论是理论分析还是数值方法,都是一种正向思维或确定性思维,这是牛顿时代的思维模式,即从事物的必然性出发,根据试验建立模型,处理本构关系,在特定的有限的条件下求解。这反映在参数的研究上就是取样、设计试验、测定、结果分析;反映在模型的研究上就是根据已有的公理、定理或理论,再加上特定条件下的假定,通过推演得到结果。已经可以预见,这种传统的方法不可能将错综复杂的岩石力学与工程问题的研究提高到一个全新的高度。如同自然界的一切不确定系统一样,只有将岩体也视为一个不确定系统,用系统思维、反馈思维、全方位思维(包括逆向思维、非逻辑思维、发散思维甚至直觉思维)对工程岩体的行为进行研究,才能在复杂的岩石力学问题的解决、提高理论和数值分析结果的可靠性和实用性方面取得新的突破,思维方法的变革是岩石力学与工程研究取得突破的关键。

20世纪70年代中后期发展起来的、基于实测位移反演岩体力学参数和初始地应力的位移反分析法是逆向思维在岩石力学研究中的一次成功应用。由于反分析得到的参数作为在同一模型下正分析的输入参数而大大提高了分析结果的可靠性。但是,参数反演并没有解决如何辨识与确定合理模型的问题。应该说,到目前为止,对线性问题的反分析是成功的。而对于非线性岩体,由于其具有加载途径性,反分析的解往往不具有唯一性,这是今后反分析需要解决的关键问题。只有给定的模型能够更好地反映岩体的真实力学行为,才能使无论对参数反演的结果还是在参数反演的基础上作正演具有更好的效果。

从唯象的观点来看,岩体应归属于各向异性流变介质。许多大的岩石工程项目,其服务年限都在数十年甚至上百年,因此,现代岩石工程项目不仅要考虑施工期间的安全,而且要确保在日后运营中长时间内的安全,即在工程投入运营以后,是否会随着时间的增长而产生破裂与失稳,这便是岩体流变和黏性时效研究的任务。但如同岩石力学分支一样,为提高时