



普通高等教育“十三五”规划教材

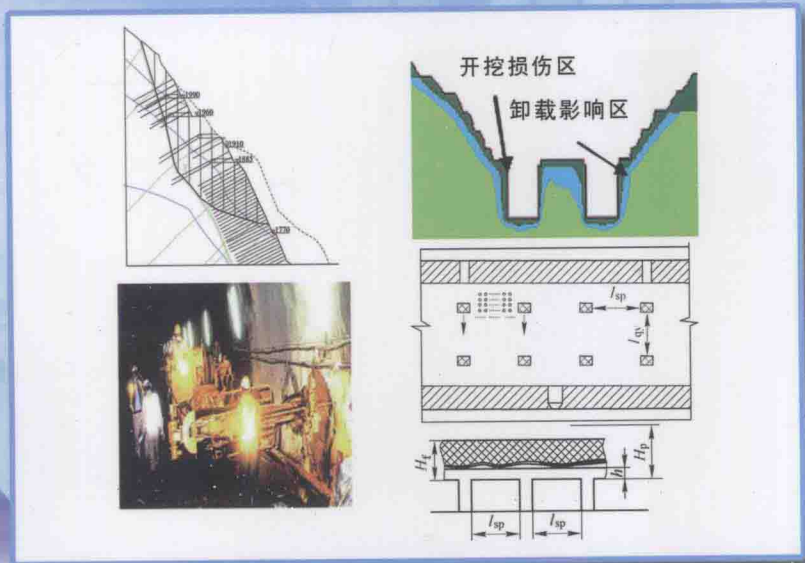
PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

矿山岩石力学

(第2版)

李俊平 主编

周创兵 主审



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

矿山岩石力学

(第2版)

主 编 李俊平
副主编 陈江川 关士良 柳财旺
王天雄 刘建党 李旭东
主 审 周创兵

冶金工业出版社

2017

内 容 提 要

本书主要论述岩石及岩体的力学特性、围岩应力和变形规律及稳定性分析方法等从事采矿工程(含金属、非金属和煤炭开采)设计、施工和研究的工程技术人员必须掌握的基础知识。书中还结合采矿工程实例阐述了地压控制理论及方法,凸显深部开采时硬岩与煤矿软岩的变形等地压显现规律趋同化等特点。书中各章均附有习题,便于读者学习。

本书为采矿工程专业本科生或研究生的教材,前5章也可用于岩土工程类专业本科生的专业基础课教学,还可供采矿工程、岩土工程专业技术人员参考,便于实现采矿、采煤双专业的拓展教育。

图书在版编目(CIP)数据

矿山岩石力学/李俊平主编. —2版. —北京:冶金工业出版社, 2017.1

普通高等教育“十三五”规划教材

* ISBN 978-7-5024-7225-2

I. ①矿… II. ①李… 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135877号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 张耀辉 宋 良 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7225-2

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2011年9月第1版,2017年1月第2版,2017年1月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;27.25印张;662千字;422页

58.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgcb.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

第2版前言

“矿山岩石力学”是采矿工程学科露天开采、地下开采（含煤炭开采）的理论基础。本书涵盖“矿山岩石力学”和“矿山应用岩石力学”两门课程的教学内容，前6章为“矿山岩石力学”，是采矿（采煤）专业的必修专业基础课程，建议学时数为56（含8学时实验）；后3章为“矿山应用岩石力学”，是采矿（采煤）专业的选修专业课程，建议学时数为24。

本书第1版自2011年9月由冶金工业出版社出版后，得到各高校相关专业师生及企业技术人员的认可，不少高校师生、企业技术人员纷纷来函来电，索要教学课件及习题答案，编者对各方的支持与鼓励深表感谢。为了更好地适应学科发展，突出教学特点，紧密结合工程实践，修正教学过程及读者使用中发现的问题，特邀请矿山、地质等现场工作经验丰富的博士、高级工程师担任副主编，全面修订本教材。

本次修订，除了更正第1版的错误和不完善之处外，特别增加了“自然崩落法的地压变化规律”、“有限差分法计算简介及岩质边坡稳定性分析的新特点”、“岩石、岩体参数转化经验”等内容。通过增补，明确了自然崩落法的地压控制规律，突现了露天矿山岩质边坡稳定性分析不同于一般土质边坡的特点，明确了岩体参数转化的有关特点。

为了便于教学和读者自学，本书特意配备了教学课件及前5章的习题答案，有需求者可通过冶金工业出版社网站下载。

本书由李俊平担任主编，周创兵担任主审，陈江川、关士良、柳财旺、王天雄、刘建党、李旭东担任副主编。第1章由李俊平负责修订；第2章由李旭东（2.1~2.2节）、李俊平（2.3~2.5节及习题）、柳财旺（2.6~2.7节）负责修订；第3章由李俊平（3.1~3.2节及习题）、关士良（3.3~3.5节）、王天雄（3.6~3.7节）负责修订；第4章由李俊平（4.1、4.6节及习题）、陈江川（4.2~4.3节）、刘建党（4.4~4.5节）负责修订；第5章由李俊平（5.1~5.2、5.7节及习题）、刘建党（5.3~5.4节）、陈江川（5.5~5.6节）

负责修订；第6章由李俊平（6.1~6.3节）、柳财旺（6.4节及习题）负责修订；第7章由李俊平（7.1~7.2、7.5节）、关士良（7.3节及习题）、陈江川（7.4节）负责修订；第8章由王天雄（8.1节）、李俊平（8.2~8.3节及习题）、李旭东（8.4节）负责修订；第9章由柳财旺（9.1、9.5节）、关士良（9.2~9.3节）、李俊平（9.4节及习题）负责修订。全书由李俊平负责PPT制作、解答基础部分习题及统稿，周创兵负责审稿。全书吸收了编者尤其是主编近20年在矿山岩石力学领域的创新性成果。

在修订过程中，参阅了相关文献，在此特向文献作者表示感谢。

感谢西安建筑科技大学教材建设资金对本书编写、出版工作的资助。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，诚请读者批评指正。

编者

2016年6月15日于西安

第1版前言

岩石力学的研究历史已近一个世纪，但早期多为零星研究。1934年，苏联秦巴列维奇（П. М. Цимбаревич）出版了第一部以岩石力学命名的专著。1956年，美国科罗拉多矿业学院（Colorado School of Mines）首次为采矿专业本科生讲授岩石力学课程，标志着“矿山岩石力学”课程的诞生。

“矿山岩石力学”是采矿工程露天开采、地下开采（含煤炭开采）的理论基础，是矿物资源工程专业的必修技术基础课程，是一门应用性、实践性很强的应用基础学科。它要求应用、研究人员除了掌握岩石力学的基础理论和方法外，还必须通晓采矿工程和工程地质知识。

20世纪末期，随着能源和原材料工业的振兴，采矿业迎来了科学的春天。各高校都相继恢复了采矿专业招生，或者重建、新建采矿、采煤专业，大量扩招本、专科生。为了拓宽学生就业能力，许多高校都开设了采矿、采煤双专业或实施这两个专业的拓展教育。

随着国民经济发展对金属矿产资源需求的不断加大，大规模深部金属矿产资源开发已成为我国采矿工业发展的必然趋势。在今后10~20年内，我国金属矿山几乎都将进入1000~2000m的深部开采。另外，我国铁矿等金属矿产资源的探矿深度将达到2000~4000m，目前已标明的金属储量仅为其预测资源总量的1/4~1/5，埋深大于1000m的未查明的非煤矿产远景资源有1000亿吨以上。可以预见，在不远的将来，我国金属矿山资源的开采深度将远超过1000m，成为世界上开采深度最大的少数国家之一。深部工程涉及深部岩石力学特殊问题。试验研究表明，岩石在不同围压条件下表现出不同的峰后特性，由此，最终破坏时应变值也不相同。在浅部低围压开采中，岩石破坏以脆性为主，通常没有或仅有少量的永久变形或塑性变形；而进入深部开采以后，岩石表现出的实际就是它的峰后强度特性，在高围压作用下，岩石可能转化为延性，破坏时其永久变形量通常较大。因此，随着开采深度的增加，岩石已由浅部的脆性力学响应转化为深部潜在的延性力学响应行为，届时金属矿山等硬岩的变形特征也可能与煤矿软岩趋同而出现大变形、难支护现象，出现分区破裂化效应等。

采(非煤)矿和采煤除了有无瓦斯外,其他几乎无差异。总之,防治深部工程灾害将成为采矿工程建设的重大需求。

为了适应上述培养需求及专业特征的转化,本书特以岩石的基本物理力学性质、岩石的强度理论、结构面的力学性质、岩体的力学性质及岩体分类、岩体的初始应力及其测量、地下硐室围岩稳定性分析与控制、矿山地压显现规律、岩石力学试验方法等为基础知识,并增加采场地压与控制、露天开采边坡稳定性分析与控制和现场地压观测与分析等应用性知识。本书主要指导思想和定位是:强调理论与实践相结合,着重基本理论、基本知识和基本方法(三基)的教育,构建学生终身学习的学科基础知识,培养创新思维能力、实践动手能力和工程分析素养。

本书的教学目的旨在使学生熟练掌握岩石的基本物理力学性质,岩石的强度理论;掌握结构面的力学特性和岩体的力学性质;掌握竖井、巷道、采场等采矿工程围岩地压分布规律和稳定性分析方法,岩石力学试验方法等基本知识;理解原岩应力分布规律,了解其测定方法;了解现场地压观测和控制方法,熟悉其应用;具有利用岩石力学知识建立矿山岩体工程问题的力学模型,分析和解决矿山岩体工程实际问题的能力。

本书既可作为高等院校固体矿床开采(含金属、非金属、煤炭开采)专业本(专)科生、研究生的教科书,也可作为岩土工程专业本科生的专业基础课教科书,还可供采矿工程(含金属、非金属和煤炭开采)、岩土工程领域工程技术人员参考。各学校可以根据培养需求,选择应用性知识进行教学。针对专科生教学,可以删减理论推导、略去岩石的扩容、岩石的流变性、岩石的各向异性;根据教学学时安排,选择性地教授岩石物理力学性质测定方法、岩体力学性质测定方法、地应力测试方法和地压现场观测方法。针对研究生教学,可以在本书的基础上,适当强调有关理论、方法的新进展和可能的发展趋势。为了便于教学和学生自学未教学部分,本书特意配有教学课件(除第9章外)。

本书可以分为《矿山岩石力学基础》(前6章,必修)和《应用矿山岩石力学》(后3章,选修)两门课程教学。通过本书的教学,学生应达到如下要求:(1)了解岩石和岩体的区别与联系,理解不同类型的岩体或处于不同地质构造环境的岩体,其力学行为是不相同的;(2)掌握岩石的基本物理力学性质及其测试方法,掌握岩体力学特性;(3)熟练掌握岩石的强度理论,正确分析

岩石的变形和破坏,正确运用强度理论进行工程岩体稳定性分析;(4)深入理解结构面的力学效应,掌握结构面对岩体强度和变形的影响;(5)能正确进行岩体结构分类和岩体工程分类;(6)了解岩体的流变、扩容特性,岩体的各向异性;(7)理解原岩应力分布规律,了解其测定方法;(8)掌握竖井、巷道、采场等采矿工程围岩应力分布规律和稳定性分析方法;(9)掌握露天开采边坡稳定性分析与控制方法;(10)了解现场地压观测和控制方法,熟悉其应用。

学习本书的先修课程为“材料力学”或“工程力学”、“弹性力学”、“工程地质学”、“采矿方法”或“采煤方法”。教学方法应以课堂讲授为主,建议采用 PowerPoint 演示文稿做成多媒体课件,使教学过程更生动高效。

评价本书的学习效果,采用结构评分制,期末书面笔试占 60%,实验占 20%,平时成绩(课堂听课效果和作业完成情况)占 20%。书面笔试,重点部分占 70%~80%,其他占 20%~30%。

全书由李俊平、连民杰主编,范才兵、武宏岐、肖光富、郭进平、陈益峰副主编;周创兵主审。第1章由李俊平独立编写;第2章由连民杰、范才兵(2.1节、2.3节)、李俊平(2.2节)负责编写;第3章由李俊平、陈益峰(3.4节、3.5节)、范才兵(3.7节)负责编写;第4章由郭进平负责编写,李占科、李俊平、武宏岐、范才兵、肖光富编写扁千斤顶法、水压致裂法、声发射法、孔底应力解除法、孔径变形法、孔壁应变法和空心包体应变法;第5章由李俊平、陈益峰(5.2节~5.4节)负责编写;第6章由连民杰、肖光富(6.3节)、李俊平(6.4节)负责编写,武宏岐、范才兵参与了地压规律的总结;第7章由李俊平、肖光富(7.3节)、连民杰(7.4节)负责编写;第8章由范才兵、李俊平(8.3节)、李占科(8.4节)负责编写;第9章由武宏岐、郭进平(9.2节)、连民杰(9.3节)、李俊平(9.4节)、肖光富(9.5节)负责编写。全书由李俊平、李占科负责 PPT 制作,李俊平负责统稿,连民杰负责审校。全书吸收了编者尤其是第一主编近 20 年在矿山岩石力学领域的创新成果。

由于编者水平有限,书中的错误和不妥在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2011年5月15日于西安

目 录

1 绪论	1
1.1 岩石力学的发展简史	2
1.1.1 初始阶段 (19 世纪末 ~20 世纪初)	2
1.1.2 经验理论阶段 (20 世纪初 ~20 世纪 30 年代)	2
1.1.3 经典理论阶段 (20 世纪 30 年代 ~20 世纪 60 年代)	2
1.1.4 近代发展阶段 (20 世纪 60 年代至今)	4
1.2 矿山岩石力学的基础知识	6
1.2.1 基本概念	6
1.2.2 采矿工程的力学特点	10
1.2.3 矿山岩石力学对采矿工程的作用	10
1.3 矿山岩石力学的研究内容与方法	11
1.3.1 岩石力学的研究领域及问题	11
1.3.2 矿山岩石力学的研究内容	12
1.3.3 矿山岩石力学的研究方法	13
1.3.4 矿山岩石力学的教学目的与学习方法	14
习题	15
参考文献	15
2 岩石的基本物理力学性质	17
2.1 岩石的物理性质	18
2.1.1 密度与容重	18
2.1.2 岩石的孔隙性	19
2.1.3 岩石的水理性	20
2.1.4 岩石的其他特性	23
2.2 岩石的力学性质	24
2.2.1 岩石的强度	24
2.2.2 岩石的变形性质	38
2.3 岩石的扩容	48
2.4 岩石的流变	50
2.4.1 概述	50
2.4.2 三种基本元件的力学模型	53
2.4.3 组合模型	55

2.4.4	岩石的长期强度	65
2.5	岩石的各向异性	67
2.5.1	极端各向异性体的应力-应变关系	67
2.5.2	正交各向异性体的应力-应变关系	68
2.5.3	横观各向同性体的应力-应变关系	69
2.5.4	各向同性体	70
2.6	影响岩石力学性质的主要因素	70
2.6.1	矿物成分对岩石力学性质的影响	70
2.6.2	岩石的结构构造对岩石力学性质的影响	70
2.6.3	水对岩石力学性质的影响	70
2.6.4	温度对岩石力学性质的影响	71
2.6.5	加载速度对岩石力学性质的影响	72
2.6.6	受力状态对岩石力学性能的影响	72
2.6.7	风化对岩石力学性质的影响	72
2.7	岩石的强度理论	73
2.7.1	最大伸长线应变理论	74
2.7.2	库仑准则 (Coulomb)	74
2.7.3	莫尔强度准则	77
2.7.4	格里菲斯强度理论	79
2.7.5	德鲁克-普拉格准则 (Drucker-Prager)	80
	习题	80
	参考文献	82
3	岩体的力学性质及其分类	84
3.1	概述	84
3.2	岩体结构	87
3.2.1	岩体分类	87
3.2.2	岩体力学机制分析方法简介	89
3.3	结构面	91
3.3.1	结构面的分级	91
3.3.2	结构面的状态	93
3.3.3	结构面的力学性质	95
3.4	岩体的强度特性	105
3.4.1	岩体强度的测定	106
3.4.2	岩体强度的估算	109
3.4.3	岩体破坏机理及破坏判据	112
3.5	岩体的变形特性	113
3.5.1	岩体的单轴和三轴压缩变形特征	113
3.5.2	岩体的剪切变形特征	115

3.5.3 岩体各向异性变形特征	115
3.5.4 原位岩体变形参数测定	116
3.6 岩体的水力学性质概述	121
3.6.1 岩体与土体渗流的区别	121
3.6.2 岩体空隙的结构类型	121
3.6.3 岩体的渗流问题	122
3.6.4 地下水渗流对岩体性质的影响	124
3.7 岩体质量评价及其分类	126
3.7.1 按岩石(芯)质量指标(RQD)分类	126
3.7.2 按岩体结构类型分类	127
3.7.3 岩体质量分级	128
3.7.4 岩体地质力学(CSIR)分类	130
3.7.5 巴顿岩体质量(Q)分类	132
习题	135
参考文献	137
4 原岩应力及其测量	139
4.1 概述	139
4.1.1 认识地应力的工程意义	139
4.1.2 地应力的成因	141
4.2 重力应力场	142
4.3 构造应力场	144
4.4 地应力分布的一般规律	146
4.5 影响原岩应力分布的因素	150
4.6 地应力测量	151
4.6.1 直接测量法	152
4.6.2 间接测量法	159
习题	170
参考文献	171
5 地下硐室围岩稳定性分析与控制	172
5.1 概述	172
5.2 弹性理论计算巷道围岩与衬砌应力	173
5.2.1 无内压巷道围岩应力分布	174
5.2.2 有内压巷道围岩与衬砌的应力计算	183
5.3 巷道围岩应力分布的弹塑性力学分析法	186
5.3.1 围岩的破坏方式	186
5.3.2 巷道围岩应力的弹塑性力学分析	188
5.4 巷道围岩位移	192

5.4.1	无支反力作用下圆形巷道围岩弹性位移	192
5.4.2	轴对称条件下有支反力作用的圆形巷道周边弹性位移	194
5.4.3	轴对称条件下塑性区位移	194
5.5	围岩压力计算	195
5.5.1	支架与围岩共同作用原理	196
5.5.2	围岩变形压力的弹塑性理论计算	198
5.5.3	围岩压力的块体极限平衡理论计算	202
5.5.4	围岩压力的压力拱理论计算	204
5.5.5	太沙基理论计算围岩压力	207
5.5.6	竖井地压分析	210
5.6	软岩工程与深部开采特性	218
5.6.1	软岩工程特性	219
5.6.2	地下工程围岩的分区变形破裂特征	224
5.7	岩体地下工程维护原则及支护设计原理	227
5.7.1	岩体地下工程维护的基本原则	227
5.7.2	支护分类与围岩加固	230
	习题	240
	参考文献	242
6	矿山地压显现规律	244
6.1	圆形巷道围岩应力分布规律	245
6.1.1	双向不等压圆形巷道围岩的弹性应力状态	245
6.1.2	相邻圆形巷道围岩的弹性应力状态	246
6.1.3	围岩的支承压力分布	248
6.2	采准巷道矿压显现规律	251
6.2.1	水平巷道矿压显现规律	251
6.2.2	倾斜巷道矿压显现规律	253
6.3	采矿工作面矿压显现规律	255
6.3.1	概述	255
6.3.2	回采工作面支承压力分布	259
6.3.3	顶板应力分区与覆岩变形和破坏规律	262
6.3.4	影响采矿工作面矿压显现的因素	270
6.3.5	分层开采时的矿压显现特点	271
6.4	冲击地压及其控制	272
6.4.1	冲击地压	272
6.4.2	顶板冲击地压	276
	习题	281
	参考文献	281

7 采场地压与控制	283
7.1 采矿方法简介	283
7.1.1 崩落采矿法	283
7.1.2 充填采矿法	284
7.1.3 空场采矿法	285
7.2 空场法的地压控制与评价	285
7.2.1 缓倾斜顶板应力分析与矿柱设计	286
7.2.2 倾斜及急倾斜厚矿体围岩稳定性分析及矿柱计算	307
7.2.3 急倾斜薄矿脉群地压显现与夹壁稳定性	310
7.2.4 采空区的安全评价方法	312
7.3 充填法的地压	320
7.3.1 充填体类型	320
7.3.2 充填体对控制地压的作用	321
7.3.3 充填体的稳定性分析	322
7.4 崩落法的地压	323
7.4.1 无底柱崩落采矿法回采进路的地压控制	323
7.4.2 有底柱崩落采矿法的地压控制	327
7.4.3 自然崩落法的可崩性控制	332
7.5 长壁式开采的地压问题	335
7.5.1 采场地压假说	335
7.5.2 老顶岩层的稳定性	338
7.5.3 回采工作面顶板控制	340
习题	349
参考文献	350
8 露天开采边坡稳定性分析与控制	352
8.1 概述	352
8.1.1 露天矿边坡的概念和特点	352
8.1.2 边坡工程对国民经济建设的影响	353
8.1.3 露天矿边坡变形和破坏	355
8.2 影响露天矿边坡稳定性的主要因素	358
8.3 边坡稳定性分析	362
8.3.1 平面滑动计算	364
8.3.2 楔体滑动计算	367
8.3.3 圆弧形滑动	369
8.3.4 有限差分法计算简介	376
8.4 滑坡的防治	377
8.4.1 滑坡防治方法分类及防治原则	377

8.4.2	滑坡的监测	379
8.4.3	滑坡的预测与监测预报	383
	习题	386
	参考文献	388
9	现场地压观测与分析	389
9.1	围岩位移与变形观测	390
9.1.1	围岩表面位移测量	390
9.1.2	围岩内部位移测量	395
9.2	支架荷载测量	403
9.2.1	锚杆测力计与拉拔试验	403
9.2.2	岩柱与支架压力监测	403
9.2.3	矿压遥测仪	411
9.3	围岩应力测量	413
9.3.1	光弹应力计	413
9.3.2	光弹应变计	414
9.4	岩体声发射监测预报技术	415
9.4.1	概述	415
9.4.2	声发射测试	417
9.5	光电技术在地下工程监测中的应用	419
9.5.1	光纤传感的特点	420
9.5.2	光纤传感技术原理	420
9.5.3	光纤传感技术在岩体地下工程监测中的应用	420
	习题	421
	参考文献	422

【本章基本知识点（重点▼，难点◆）】：岩石、岩体、矿压、矿压显现、矿压控制、矿山岩石力学基本概念；岩石与岩体的界定◆；矿山岩石力学的研究任务与内容▼；岩石力学的研究方法▼；岩石力学在其他学科中的地位；岩石力学的发展简史。

岩石力学是近代发展起来的一门新兴学科和边缘学科，是一门应用性和实践性很强的应用基础学科。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、核废料储存等众多与岩体工程相关的工程领域。

我国是世界上采矿最早的国家之一，有文字可考的采矿历史始于商代，而实际的采矿活动还要早很多。春秋至南北朝时期（公元前 770 年～公元前 200 年），我国采矿技术已具一定水准。采矿业的发展与人类社会的进步密切相关。随着采矿规模日益扩大，经常出现矿井内顶板冒落、巷道堵塞或地表塌陷等问题，迫使人们重视和研究矿山地压问题，在此基础上产生了一个新的学科分支——矿山岩石力学。

岩石力学最初产生于采矿工程，其主要服务对象也是采矿工程，但其研究方法和理论并非为采矿工程所独有。尤其是二战后，各国水电、交通、建筑、国防等工程的大规模开发和建设，促进了岩石力学的形成和发展。1950 年，苏联的里涅耐特编写了《岩石力学导论》，书中利用弹性理论求解岩体工程问题。1952 年，成立了世界采矿大会国际岩石力学局。1956 年，美国科罗拉多矿业学院（Colorado School of Mines）首次为采矿专业本科生开设了岩石力学课程，历经五十年完成了岩石力学作为一门独立学科的创立过程。法国塔罗布尔（J. Talobre）将地质学和力学结合，1957 年、1958 年先后编著出版《岩石力学》和《岩石力学在土木工程中应用》，较系统地介绍了岩石力学研究的理论、方法和重要意义。1962 年 10 月在奥地利的萨尔茨堡（Salzburg）举行的第十三届地质力学讨论会上，成立了“国际岩石力学学会”（International Society of Rock Mechanics, ISRM），米勒（L. Müller）当选为第一任国际岩石力学学会主席。1966 年在里斯本举行了第一次国际岩石力学大会，以后每四年一届。从此，岩石力学学科进入了迅速发展时期，形成了很多学术观点甚至学派，如以重视节理裂隙为主的奥地利学派和注重理论分析的法国学派等。

2005 年 5 月 17 日，我国首次获得国际岩石力学大会承办权。2009 年 5 月，我国学者冯夏庭教授首次当选国际岩石力学学会主席。2011 年 10 月 18～21 日，在中国北京举办了第十二届国际岩石力学大会，会议期间宣布冯夏庭教授就任第十二届（2011～2015）国际岩石力学学会主席。

1.1 岩石力学的发展简史

岩石力学按其发展进程可划分如下四个阶段。

1.1.1 初始阶段 (19 世纪末 ~ 20 世纪初)

这是岩石力学的萌芽时期,产生了初步理论以解决岩体开挖的力学计算问题。例如,海姆(A. Heim) 1912 年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岩层的重力 γH 。

朗金(W. J. M. Rankine)和金尼克(A. H. Динник)也提出了相似的理论。但他们认为只有垂直压力等于 γH ,而水平压力应为 γH 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, γ 、 μ 、 φ 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。但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。

1.1.2 经验理论阶段 (20 世纪初 ~ 20 世纪 30 年代)

在经验理论阶段,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. M. Протоджяконов)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力,仅是上覆岩石重力的一部分。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,致使围岩往往有一部分最终会破坏、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,而且要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进行支护设计是不合实际的。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的作用。

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。

1.1.3 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。结构面对岩体力学性质的影响受到重视,岩石力学文献的出版发表,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。

1.1.3.1 连续介质理论

连续介质理论以固体力学学作为基础,从材料的基本力学性质出发,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. Chhbh)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,有人开始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。

早期连续介质理论忽视了原岩应力和开挖因素对岩体稳定性的影响。1966年,美国科学院岩石力学委员会对岩石力学给予以下定义:“岩石力学是研究岩石的力学性状的一门理论和应用科学,它是力学的一个分支,是探讨岩石对其周围物理环境中力场的反应。”这一定义是从“材料”的概念出发的,带有材料力学或固体力学深深的烙印。随着岩石力学理论研究和工程实践的不断深入和发展,人们对“岩石”的认识有了突破。首先,不能把“岩石”看成固体力学中的一种材料,所有岩体工程中的“岩石”是一种天然地质体,或者称为岩体,它具有复杂的地质结构和赋存条件,是一种典型的“不连续介质”。其次,岩体中存在地应力,是由于地质构造和重力作用等形成的内应力。由于岩体工程的开挖引起地应力以变形能的形式释放,正是这种“释放荷载”引起了岩体工程变形和破坏的作用力。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会对后面的开挖产生影响。开挖顺序不同、步骤不同,都有各自不同的最终力学效应,亦即不同的岩体工程稳定性状态。因此,忽视施工过程的计算结果,将很难用于指导工程实践。

20世纪60年代,运用早期的有限差分和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。同时人们还认识到,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,就失去了岩体工程的真实性和计算的实际应用价值。这一认识促进了早期的地应力测量工作的开展。

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”。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、工程地质条件等均存在大量的不确定性,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于解决岩体工程问题的。

在进行理论研究的同时,研究矿压的实验手段也获得了发展,其中较为有用的是利用