

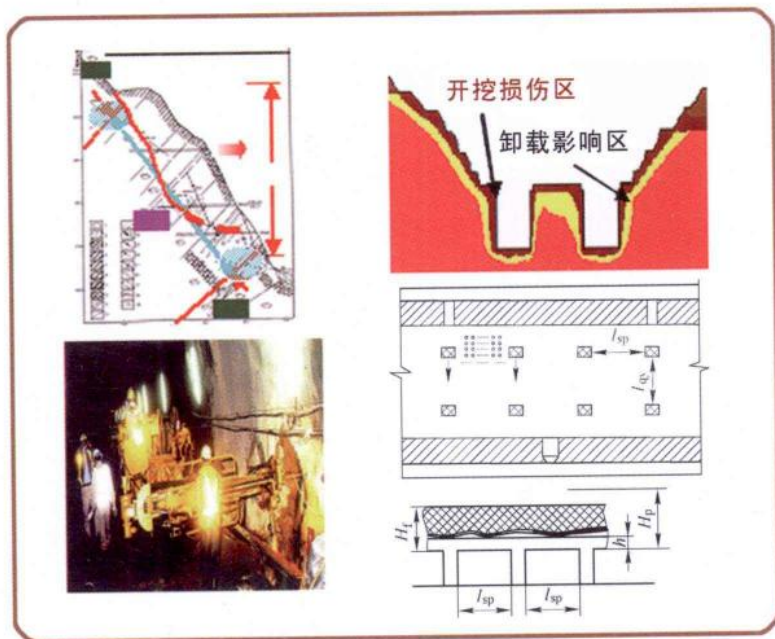



普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

矿山岩石力学

李俊平 连民杰 主编
周创兵 主审



 冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

矿山岩石力学

主 编 李俊平 连民杰
副主编 范才兵 武宏岐 肖光富
 郭进平 陈益峰
主 审 周创兵

北 京
冶金工业出版社
2011

内 容 提 要

本书主要介绍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。

本书适宜作为采矿工程专业本科生和研究生的教材,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,连民杰主编. —北京:冶金工业出版社, 2011. 9

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-5661-0

I. ①矿… II. ①李… ②连… 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(2011)第171032号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 宋良 王雪涛 美术编辑 李新 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5661-0

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2011年9月第1版,2011年9月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 27.25印张; 659千字; 422页

49.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

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

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

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，也可作为岩土工程类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（除第九章外）。

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、2.3 节)、孙锋刚(2.2 节)负责编写;第 3 章由李俊平、陈益峰(3.4、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、于文远、李俊平、王军民、武宏岐、范才兵、肖光富分别编写扁千斤顶法、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(5.2~5.4 节)、王军民(5.7 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、王军民、于文远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)、于文远(9.4 节)、肖光富(9.5 节)负责编写。全书由张雯、王军民、于文远、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 | 1 |
| 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 ~现在) | 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 | 171 |
| 参考文献 | 172 |
| 5 地下硐室围岩稳定性分析与控制 | 173 |
| 5.1 概述 | 173 |
| 5.2 弹性理论计算巷道围岩与衬砌应力 | 174 |
| 5.2.1 无内压巷道围岩应力分布 | 175 |
| 5.2.2 有内压巷道围岩与衬砌的应力计算 | 184 |
| 5.3 巷道围岩应力分布的弹塑性力学分析法 | 187 |
| 5.3.1 围岩的破坏方式 | 187 |
| 5.3.2 巷道围岩应力的弹塑性力学分析 | 189 |
| 5.4 巷道围岩位移 | 193 |

| | | |
|----------|-------------------------------|------------|
| 5.4.1 | 无支反力作用下圆形巷道围岩弹性位移 | 193 |
| 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 | 195 |
| 5.4.3 | 轴对称条件下塑性区位移 | 195 |
| 5.5 | 围岩压力计算 | 196 |
| 5.5.1 | 支架与围岩共同作用原理 | 197 |
| 5.5.2 | 围岩变形压力的弹塑性理论计算 | 199 |
| 5.5.3 | 围岩压力的块体极限平衡理论计算 | 203 |
| 5.5.4 | 围岩压力的压力拱理论计算 | 205 |
| 5.5.5 | 太沙基理论计算围岩压力 | 208 |
| 5.5.6 | 竖井地压分析 | 211 |
| 5.6 | 软岩工程与深部开采特性 | 219 |
| 5.6.1 | 软岩工程特性 | 220 |
| 5.6.2 | 地下工程围岩的分区变形破裂特征 | 225 |
| 5.7 | 岩体地下工程维护原则及支护设计原理 | 228 |
| 5.7.1 | 岩体地下工程维护的基本原则 | 228 |
| 5.7.2 | 支护分类与围岩加固 | 231 |
| | 习题 | 241 |
| | 参考文献 | 243 |
| 6 | 矿山地压显现规律 | 245 |
| 6.1 | 圆形巷道围岩应力分布规律 | 246 |
| 6.1.1 | 双向不等压圆形巷道围岩的弹性应力状态 | 246 |
| 6.1.2 | 相邻圆形巷道围岩的弹性应力状态 | 247 |
| 6.1.3 | 围岩的支承压力分布 | 249 |
| 6.2 | 采准巷道矿压显现规律 | 252 |
| 6.2.1 | 水平巷道矿压显现规律 | 252 |
| 6.2.2 | 倾斜巷道矿压显现规律 | 254 |
| 6.3 | 采矿工作面矿压显现规律 | 256 |
| 6.3.1 | 概述 | 256 |
| 6.3.2 | 回采工作面支承压力分布 | 260 |
| 6.3.3 | 顶板应力分区与覆岩变形和破坏规律 | 263 |
| 6.3.4 | 影响采矿工作面矿压显现的因素 | 271 |
| 6.3.5 | 分层开采时的矿压显现特点 | 272 |
| 6.4 | 冲击地压及其控制 | 273 |
| 6.4.1 | 冲击地压 | 273 |
| 6.4.2 | 顶板冲击地压 | 277 |
| | 习题 | 282 |
| | 参考文献 | 282 |

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 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 | 334 |
| 7.5.1 采场地压假说 | 336 |
| 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 |
| 8.4 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 | 382 |
| 习题 | 386 |
| 参考文献 | 387 |
| 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 |

1 绪 论

【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。中国采矿有文字可考的历史始于商代，但实际的采矿活动还要早很多。春秋至南北朝（公元前770年~公元前200年），我国采矿技术已有全面发展。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，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年先后编著的《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，岩石力学进入了迅速发展时期，至今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，将于2011年10月18~21日在北京举办第十二届国际岩石力学大会。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，冯夏庭教授将任第十二届（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,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岩层的重量 γH 。

朗金 (W. J. M. Rankine) 和金尼克 (А. Н. 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 (М. М. Протоджконов) 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质量,仅是上覆岩石质量的一部分。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。

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。

1.1.3.1 连续介质理论

连续介质理论以固体力学作为基础,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. 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的深深烙印。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, 或者叫做岩体, 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, 它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, 也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 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用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相似材料进行的相似模型研究方法和利用光敏感材料进行的光弹性模拟方法。

1.1.3.2 地质力学理论

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做连续介质简单地

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（Salzburg）举行了第一届地质力学讨论会，形成了重视节理、裂隙为主的“奥地利学派”。

“奥地利学派”的代表人物是米勒（L. Müller），其主要观点有三个：（1）就大多数工程问题而言，岩体工程性质取决于岩体内部地质断裂系统的强度要比取决于岩石本身强度的可能性大得多，所以岩石力学是一种不连续体力学，即裂隙介质力学；（2）岩体强度是一种残余强度，其受到岩体中所含弱面强度的制约；（3）岩体的变形和它的各向异性主要由弱面位移所产生。上述这三个观点为岩石力学的发展起到了引导和促进作用，尤其在工程地质、水电、冶金等岩石力学研究中受到格外重视，而煤炭行业因煤田成因及研究的特殊性，没有充分重视和发展上述观点。我国埋深超过1000米的煤炭资源为2.95亿吨，占煤炭资源总量的53%。随着煤炭逐步进入千米以上的深部开采，必将重视上述岩石力学研究的一般准则。

该理论对岩体工程的最重要贡献，就是提出了“岩石力学是一种不连续体力学，即裂隙介质力学”、“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（岩体强度是一种残余强度）”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。“奥地利学派”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。他们在岩体工程施工方面提出的“新奥法”，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。

该理论的缺陷是过分强调整理、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。

1.1.4 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。电子计算机的广泛应用使流变学、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成为可能。

从总体上来讲，近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研究。因为，虽然岩体中存在各种各样的节理、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，均需视具体工程问题和要求而定。例如，当今水利工程设计、分析中选取岩体力学参数时，引入岩体表征单元体积 REV（representative elementary volume） $\geq \frac{N}{J_v} \left[\frac{C_v}{\varepsilon} U_{\alpha/2} \right]^2$ ，充分考虑了岩体的尺寸效应。

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”成为岩石力学的重点。从“材料”概念到“不连续介质”概念,是岩石力学在理论上的飞跃。

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。如损伤力学和离散元法的进步,DDA法和流形元方法的发展,非线性大变形问题的三维有限差分法FLAC(fast lagrangian analysis of continue)等的成功应用,标志着岩石力学专家建立了自己独到的分析原理和计算方法。

由于岩体结构及赋存状态和条件的复杂性和多变性,致使岩石力学所研究的目标和对象都存在着大量不确定性,因而有人在20世纪80年代提出不确定性理论。随着现代计算机科学技术的进步,带动了现代信息技术的发展,目前,不确定性理论已经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、神经网络、专家系统、工程决策支持系统等,为不确定性分析方法和理论体系的建立提供了必要的技术支持。

20世纪90年代,现代数理科学的渗透使得非线性科学在岩石力学中得到了广泛应用。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体力学的各种复杂过程。岩石力学和相邻的工程地质学都因为受到研究对象的“复杂性”挑战,而对非线性理论倍加青睐。

系统科学虽然早已受到岩石力学界注意,但直到20世纪80~90年代才达成共识,并进入岩石力学理论和工程应用。用系统概念来表征“岩体”,可使岩体的“复杂性”得到全面的、科学的表述。从系统论来讲,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。系统论强调复杂事物的层次性、多因素性、相互关联性和相互作用性特征,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体工程实践的结合提供了依据。时至今日,岩体工程力学问题才被当作一种系统工程来解决。

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突破,获得了意义更为重大的突破。

随着理论研究的进展,地压控制技术、测试技术也得到了飞速发展。刚性压力机的出现为测试岩石应力-应变全过程曲线提供了保障。目前,应力解除法可测试深部岩体应力。热-水-力三场耦合真三轴伺服岩石试验机、大型模拟试验台、先进的多点数据采集仪器的出现为,更深刻地揭示岩石的力学特性奠定了坚实基础。随着计算机技术和井下钻孔电视的应用,岩体工程三维信息系统也得到了重视和普遍应用。大断面、大缩量和高支撑力的可缩性金属支架、锚杆和锚索网支护得到广泛应用,注浆加固不稳定围岩,回采工作面使用自移式液压支架及其架型增多、适用范围扩大等,进一步改善了支护技术。发明了切槽放顶法、切顶与矿柱崩落法等,有效控制了采空区顶板大面积冒落和采场地压显现。声发射、红外、电磁等监测预报技术进入到地压监测的实用阶段。