



普通高等教育“十五”国家级规划教材

kuangshan yali yu yanceng kongzhi

# 矿山压力与岩层控制

钱鸣高 石平五 主编

中国矿业大学出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 矿山压力与岩层控制

主 编 钱鸣高 石平五  
副主编 邹喜正 许家林

中国矿业大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

矿山压力与岩层控制/钱鸣高,石平五主编. —徐州:  
中国矿业大学出版社, 2003. 11  
普通高等教育“十五”国家级规划教材  
ISBN 7 - 81070 - 813 - 9

I. 矿... I. ①钱...②石... III. ①煤矿开采—矿  
山压力—高等学校—教材②煤矿开采—岩层移动—控制  
—高等学校—教材 IV. ①TD31②TD325

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 098909 号

书 名 矿山压力与岩层控制  
主 编 钱鸣高 石平五  
责任编辑 朱明华 姜 华  
责任校对 崔永春  
出版发行 中国矿业大学出版社  
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: [cumtpvip@cumtp.com](mailto:cumtpvip@cumtp.com)  
排 版 中国矿业大学出版社排版中心  
印 刷 徐州新华印刷厂  
经 销 新华书店  
开 本 787×1092 1/16 印张 24 字数 600 千字  
版次印次 2003 年 11 月第 1 版 2003 年 11 月第 1 次印刷  
定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



# 前 言

近十余年来,矿山压力与岩层控制的研究取得了重大进展。为了在本科教学中体现最新的研究成果,在原教材《矿山压力及其控制》的基础上,进行了重新编写。本教材在原来系统阐述煤矿上覆岩层老顶活动规律及其控制的基础上,阐述了更为全面的上覆岩层关键层活动规律,同时也进一步阐述了回采工作面与巷道矿山压力及其控制的基本概念和理论,全面反映了我国研究矿山压力与岩层控制方面所取得的科研成果和生产实践经验。本教材也介绍了可供借鉴的国外技术和经验。由此,扩充及开辟了适合当前煤炭工业需要的新研究领域。同时,本教材力求做到系统性与深入浅出。

本书编写提纲是通过有关院校一起多次反复研讨后确定的。在编写初稿完成后,特邀中国矿业大学李鸿昌教授、山东科技大学姜福兴教授、太原理工大学康立勋教授进行了全面评审,提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

由于编写人员水平及时间限制,缺点和错误在所难免,恳切希望读者批评指正。

本书为普通高等教育“十五”国家级规划教材,由中国矿业大学、西安科技大学、安徽理工大学、焦作工学院、河北建筑科技学院联合编写。由钱鸣高、石平五任主编,邹喜正、许家林任副主编。各章编写分工及人员名单如下:

- 绪 论 钱鸣高
- 第一章 李树刚
- 第二章 谢广祥、邹喜正
- 第三章 钱鸣高、许家林
- 第四章 钱鸣高、许家林
- 第五章 钱鸣高、刘长友、曹胜根
- 第六章 许家林
- 第七章 邹喜正
- 第八章 邹喜正、勾攀峰、杨本生
- 第九章 王家臣
- 第十章 石平五、黄庆享
- 第十一章 窦林名
- 第十二章 王家臣
- 第十三章 石平五

编 者  
2003年10月

## 符号说明

各种符号都在其出现时加以定义,各种符号的单位在定义后标注,以下列出本书中常用的符号。

$A$ ——截面面积,支护强度。

$B$ ——距离,煤柱宽度,孔周边的间距。

$C$ ——内聚力,型钢搭接长度。

$D$ ——直径,距离,岩体完整性指数,岩体强度指标。

$E$ ——弹性模量,敏感度。

$F$ ——面积,力,变形能。

$H$ ——深度,高度,厚度。

$I$ ——水力坡度。

$J$ ——断面惯性矩。

$K$ ——曲率,厚度比,体积模量,系数刚度,冲击能量指数。

$L$ ——长度,距离,顶板来压步距,断裂步距。

$M$ ——弯矩,厚度,震级。

$N$ ——正压力,夹紧力;煤帮的支撑能力,直接顶充填系数。

$P$ ——载荷,支护力,集中力。

$Q$ ——剪力,重量,载荷,流量,直接顶岩重,放出煤量。

$R$ ——岩石强度,反力,裂纹扩展阻力,有效支撑能力,曲率半径。

$s$ ——距离,移动量,下沉量,均方差。

$T$ ——水平力,剪切力。

$U$ ——弹性势能。

$V$ ——体积。

$W$ ——载荷,抗弯截面模量,冲击矿压指数综合指数。

$X$ ——距离,煤柱宽度,宽度影响指标。

$Z$ ——支撑力,深度。

$a$ ——椭圆长轴,边长,巷道宽度,矿柱宽度,排距,接顶距离。

$b$ ——厚度,裂纹长度,基础宽度,椭圆短轴,隶属度,切槽深度,椭球短半轴,柱距,梁端距。

$d$ ——直径。

$e$ ——孔隙比。

$f$ ——摩擦因数,岩石坚固性系数。

$h$ ——厚度,高度。  
 $i$ ——倾斜度。  
 $l$ ——支架顶梁长度。  
 $m$ ——煤层厚度,震级,椭圆长短轴轴比,质量。  
 $n$ ——孔隙率。  
 $p$ ——支护强度,原岩应力。  
 $q$ ——均布载荷,阻力,容许比压。  
 $r$ ——半径,相关系数。  
 $s$ ——锚杆间、排距。  
 $t$ ——时间,厚度。  
 $u$ ——水平位移量。  
 $v$ ——速度。  
 $y$ ——距离。  
 $\alpha$ ——相似比,冒落角,边坡角,圆心角。  
 $\beta$ ——受力比,立柱偏角,岩层移动角,结构面倾角,容许穿透度。  
 $\gamma$ ——体积力,剪应变。  
 $\varepsilon$ ——应变,体积应变。  
 $\eta$ ——软化系数,粘性系数。  
 $\theta$ ——角度。  
 $\lambda$ ——侧压系数。  
 $\mu$ ——泊松比,相对移近率。  
 $\rho$ ——密度。  
 $\sigma$ ——正应力,软化临界荷载。  
 $\tau$ ——剪应力。  
 $\varphi$ ——孔洞直径,内摩擦角。  
 $\omega$ ——吸水率。

# 目 录

前言.....	1
绪论.....	1
<b>第一章 矿山岩石和岩体的基本性质.....</b>	<b>7</b>
第一节 岩石的基本物理性质.....	7
第二节 岩石的强度和变形特性 .....	11
第三节 岩石的破坏机理和强度理论 .....	22
第四节 岩体的基本特征和类型 .....	28
第五节 岩体的基本力学性能与分级标准 .....	32
习题 .....	38
<b>第二章 矿山岩体的原岩应力及其重新分布 .....</b>	<b>40</b>
第一节 岩体中的原岩应力 .....	40
第二节 岩体中的弹性变形能 .....	45
第三节 “孔”周围的应力分布 .....	47
第四节 围岩的极限平衡与支承压力分布 .....	58
第五节 支承压力在底板岩层中的传播 .....	60
习题 .....	63
<b>第三章 采场顶板活动规律 .....</b>	<b>65</b>
第一节 概述 .....	65
第二节 有关采场上覆岩层活动规律的假说 .....	66
第三节 直接顶的垮落 .....	70
第四节 老顶的断裂形式 .....	73
第五节 老顶的初次断裂步距 .....	76
第六节 老顶断裂后的“砌体梁”结构及其稳定性分析 .....	84
第七节 老顶断裂时在岩体内引起的扰动 .....	91
习题 .....	97

<b>第四章 采场矿山压力显现基本规律</b> .....	98
第一节 概述 .....	98
第二节 老顶的初次来压 .....	99
第三节 老顶的周期来压 .....	101
第四节 顶板压力的估算 .....	104
第五节 回采工作面前后支承压力的分布 .....	107
第六节 影响采场矿山压力显现的主要因素 .....	109
习题 .....	116
<b>第五章 采场顶板支护方法</b> .....	118
第一节 顶板分类与底板特征 .....	118
第二节 采场支架类型与支架力学特性 .....	124
第三节 采场支架与围岩相互作用原理 .....	145
第四节 综合机械化采煤工作面顶板控制设计 .....	151
第五节 单体液压支柱工作面顶板控制原则 .....	157
第六节 采场来压预报与支护质量监测 .....	163
习题 .....	171
<b>第六章 采场岩层移动与控制</b> .....	173
第一节 岩层移动引起的采动损害概述 .....	173
第二节 岩层控制的关键层理论 .....	174
第三节 采场上覆岩层移动规律 .....	177
第四节 采场底板破坏与突水 .....	185
第五节 采场上覆岩层移动控制技术 .....	188
习题 .....	193
<b>第七章 巷道矿压显现规律</b> .....	194
第一节 巷道围岩应力及变形规律 .....	194
第二节 受采动影响巷道矿压显现规律 .....	202
第三节 巷道围岩控制原理 .....	212
习题 .....	216
<b>第八章 巷道维护原理和支护技术</b> .....	218
第一节 无煤柱护巷 .....	218
第二节 巷道围岩卸压 .....	227
第三节 巷道金属支架 .....	233
第四节 巷道锚杆支护 .....	241
第五节 软岩巷道围岩变形规律及其支护技术 .....	256
第六节 锚杆支护质量监测 .....	265



习题.....	266
<b>第九章 厚煤层综放开采岩层控制.....</b>	<b>268</b>
第一节 顶煤破碎机理与运移规律.....	268
第二节 放顶煤开采矿山压力显现的基本规律.....	274
习题.....	278
<b>第十章 浅埋煤层开采岩层控制.....</b>	<b>280</b>
第一节 浅部煤层长壁工作面上覆岩层活动特点.....	280
第二节 浅埋煤层长壁开采顶板砌体梁结构及其稳定性.....	284
第三节 浅埋煤层采场支护.....	289
习题.....	293
<b>第十一章 煤矿动压现象及其控制.....</b>	<b>294</b>
第一节 冲击矿压现象形成特点及分类.....	294
第二节 冲击矿压发生机理.....	296
第三节 冲击矿压的预测预报及危险性评定.....	304
第四节 冲击矿压的防治.....	318
第五节 顶板大面积来压.....	324
习题.....	330
<b>第十二章 非煤矿山岩层控制与边坡稳定.....</b>	<b>331</b>
第一节 金属矿的采场矿压.....	331
第二节 边坡稳定分析与控制.....	339
习题.....	350
<b>第十三章 矿山岩层控制研究方法.....</b>	<b>351</b>
第一节 长壁工作面矿压观测.....	351
第二节 矿山压力数值分析方法概述.....	360
第三节 相似材料模拟实验研究方法.....	366
习题.....	369
<b>参考文献.....</b>	<b>371</b>

# 绪 论

## 一、矿山压力与岩层控制的概念

矿山压力与岩层控制是采矿工业的基础学科,矿山压力与岩层控制以矿山岩石力学为基础,与矿山工程、采矿工艺理论和实践密切结合,是具有一定特色的岩层控制理论和工程实践体系的基础理论学科与工程技术学科互相交叉互相渗透的独立的分支学科。

地下岩体在受到开挖以前,原岩应力处于平衡状态。开掘巷道或进行回采工作时,破坏了原始的应力平衡状态,引起岩体内部的应力重新分布,直至形成新的平衡状态。这种由于矿山开采活动的影响,在巷洞周围岩体中形成的和作用在巷洞支护物上的力定义为矿山压力,在相关学科中也称为二次应力或工程扰动力。在矿山压力作用下,会引起各种力学现象,如岩体的变形、破坏、塌落,支护物的变形、破坏、折损,以及在岩体中产生的动力现象。这些由于矿山压力作用使巷洞周围岩体和支护物产生的种种力学现象,统称为矿山压力显现。在大多数情况下,矿压显现会对采矿工程造成不同程度的危害。为使矿压显现不致影响采矿工作正常进行和保障安全生产,必须采取各种技术措施把矿山压力显现控制在一定范围内。对于有利于采矿生产的矿山压力显现,也应当合理地利用。所有减轻、调节、改变和利用矿山压力作用的各种方法,均叫做矿山压力控制。

上述三个基本概念既反映矿山压力与岩层控制课程的体系,也涵盖了矿山压力与岩层控制课程的主要内容。

## 二、采矿工业要求发展矿山压力及岩层控制

矿山压力与岩层控制课程是20世纪50年代发轫而逐步建立起来的,矿山压力与岩层控制的理论研究与工程实践的发展,使我国采矿工业形成具有坚实理论基础和先进技术手段的国民经济部门。矿山压力与岩层控制课程已成为我国采矿工业各历史阶段技术变革的重要保障,主要表现在以下几方面。

### 1. 生态环境保护

矿床开采直接影响到地下水分布,引发地表沉陷,带来煤矸石和瓦斯排放等与生态环境保护密切相关的问题,采场上覆岩层的移动是产生上述现象的根本原因。岩层控制理论为实现保水采煤,完善条带开采和充填技术,进行井下矸石处理和有效抽放瓦斯奠定了理论基础。

### 2. 保证安全和正常生产

井工开采中顶板岩层塌落、露天开采边坡失稳问题,一直是令人关注的重要问题。巷道的维护状况直接影响到井下正常运输、通风和行人。岩层控制理论和技术为大幅度降低顶板事故做出了突出贡献。边坡稳定性研究使边坡设计既能达到经济上可采纳的陡度,又足以维持安全的缓度。巷道围岩控制理论和技术使合理支护各种巷道成为可能。

### 3. 减少资源损失

在开采矿物过程中,为了保护巷道和管理采场顶板,常常留设各类矿柱。这些矿柱是造成地下资源损失的主要根源。通过对开采引起的围岩应力重新分布规律的研究,推广无煤柱护巷和跨越巷道开采等技术措施,不仅可显著减少资源损失,还有利于消除因矿柱存在而引起的灾害和对采矿工作的不利影响。

### 4. 改善开采技术

对采场、巷道支架—围岩相互作用关系的深刻认识和围岩支护手段的进步促进了开采技术的发展。自移式液压支架的应用实现了采煤综合机械化。巷道可缩性金属支架和锚喷支护的应用改变了刚性、被动支护巷道的局面。同时,采场、巷道围岩稳定性分类为合理选择支护形式、支护参数提供了科学依据。

### 5. 提高经济效益

在分析研究采场各种类型直接顶、老顶,巷道及矿山边坡各类围岩活动规律以及各种控制技术的基础上,较完整地提出从围岩结构稳定性分类、稳定性识别、矿压显现预测、支护设计、支护质量与顶板动态监测、信息反馈直至确定最佳设计的一整套理论、方法与技术。由此创造了采矿工业的良好的社会效益和经济效益。

## 三、矿山压力与岩层控制属性与特色

矿业科学是从古老的采矿业发展起来的。采矿活动在上部地壳的岩体内进行,这个环境受构造应力场、地下水、地温等很多条件的交叉混合影响,岩体本身具有的非均质性、各向异性;加之采矿工程本身特点,使地下开采过程处在一个环境恶劣、条件多变、技术措施复杂的状况。因此,需要更符合矿业本身特色的理论、方法和技术。矿山压力及岩层控制是矿业工程的基础学科,学科特色表现在以下几方面。

### 1. 采矿工程岩体结构的本质

与地面工程结构不同,地下工程围岩既是一种载荷,也是一种结构,施载体系和承载体系之间没有明显界限。采场上覆岩层形成结构,结构的形态及稳定性不仅直接影响到采场,也将影响到开采后上覆岩层运动的形态及地表塌陷形状。与传统的被动支护的观念与思想截然不同。

### 2. 采矿工程的移动特性

其它地下工程中硐室或隧道基本是固定的永久性的,采矿工程中采场是不断移动的,采场本身是一个依据矿物埋藏规律而不断运动的空间。因此,要求采场支架具有较好的移动性能。同时,出现采空区处理问题,在某些情况下,迫使采空区顶板有序冒落甚至与采场内支护顶板同等重要。移动的采掘空间形成移动的矿山压力场,采矿过程中必须注重各开采空间相对位置的变化,使得采矿工程的条件更加复杂。

### 3. 采矿工程中围岩的大变形和支护体的可缩特征

采矿工程过程中由于采场空间较大,作业地点常在地下几百米至几千米深处,在矿山压力作用下,巷硐围岩处于破坏状态。采矿过程中架设的人工支护着眼于利用围岩的残余强度,促进已破坏的围岩形成自稳结构。软岩矿井中,巷道围岩不可避免地进入塑性状态,巷道支护允许巷道围岩出现稳定的塑性区,严格控制非稳定塑性区的扩展。因此,格外关注支架—围岩相互作用关系的研究。要求采矿过程中支架具备良好的支撑性能,也必须具备一定的可缩性能。岩石粘弹、粘弹塑性理论研究和岩石应力、应变全过程的准确测定,为支护设计提

供了理论和实验基础。

#### 4. 采矿工程中的能量原理和动力现象

冲击矿压、顶板大面积来压、煤与瓦斯突出以及矿震等都是采矿工程中的动力现象,其中冲击矿压、顶板大面积来压属于矿山压力及其控制课程的研究范畴。冲击地压是岩体突然破坏的动力现象,冲击矿压发生机理极为复杂。在对冲击矿压的研究中,人们逐渐认识到冲击矿压是裂纹扩展及变形局部化导致的失稳现象。冲击矿压、顶板大面积来压是矿山压力的一种特殊显现形式。

### 四、矿山压力与岩层控制的基本内容和发展阶段

#### 1. 早期认识、研究阶段

采矿工业是基础工业,我国是世界上采矿最早的国家之一。明代末年出版的《天工开物》一书中,已记述了矿山压力的危害性,欧洲国家对矿山压力的认识开始于15世纪。19世纪后期到20世纪,开始利用比较简单的力学原理解释出现的一些矿山压力现象,有代表性的是提出“压力拱假说”和岩石坚固性系数 $f$ 。20世纪30年代至50年代,使用弹性理论研究矿山压力问题,典型的例子是计算圆形巷道周围的应力分布,还进一步研究了岩体层理性的影响。矿山压力控制手段也取得一些突破,出现U形钢拱形可缩性金属支架、摩擦式金属支柱、锚杆支架、自移式液压支架。

#### 2. 近代发展阶段

自20世纪50年代矿山压力与岩层控制课程建立以来,理论与工程实践两方面都取得了长足进展,岩层控制系统包括采场围岩控制和巷道围岩控制。

##### (1) 采场围岩控制理论与实践的发展

###### ① 采场上覆岩层“砌体梁”结构力学模型及“关键层理论”

采场上覆岩层形成结构的特点及其形态一直为采矿工作者所重视,研究分三个过程。20世纪60年代初至70年代末,正式提出上覆岩层开采后呈“砌体梁”式平衡的结构力学模型,为采场给出了具体的边界条件,也为论证采场矿山压力控制参数奠定了基础。在此基础上,提出岩层断裂前后的弹性基础梁力学模型及各种不同支撑条件下板的力学模型,为老顶来压预报提供理论依据。对坚硬岩层承受载荷及变形规律的分析,导致“关键层”理论的研究,由此可进一步修正采场来压规律,判断上覆岩层内部裂隙分布、离层区位置和识别对地表破坏起主导作用的岩层。

###### ② “砌体梁”平衡的关键块研究及“S—R”稳定

“砌体梁”力学模型是一个大结构,其中主要影响采场顶板控制的是离层区附近的几个岩块即关键块体。因此,在研究“砌体梁”结构的前提下,重点分析关键块的平衡关系,由此主要提出“砌体梁”关键块的滑落与转动变形失稳条件即“S—R”稳定条件。“砌体梁”关键块的分析为采场直接顶的上部提供了边界条件,为分析直接顶稳定性奠定了基础。

###### ③ 采场支架—围岩关系研究及整体力学模型的建立

“支架—围岩”关系的研究体现在单体支柱工作面顶板事故的防治,液压自移支架的架型、合理支护阻力,防治液压自移支架端面顶板的冒落。在中厚煤层开采的采高条件下,一直视直接顶为“似刚体”,影响支护参数选择的主要观点是“ $P-\Delta L$ ”类双曲线关系,即支架工作阻力与顶板下沉量的关系曲线。放顶煤开采时,直接顶不再是似刚体,进一步研究提出“松脱体压力”与“回转变形压力”概念,论证了由于直接顶的变形致使“砌体梁”对直接顶的回转变

形载荷有可能被破碎了的直接顶所吸收,从而影响在该情况下的“ $P-\Delta L$ ”类双曲线关系,最终建立采场整体力学模型。

#### ④ 采场矿山压力与支护质量监测

采矿工程环境恶劣,地质条件复杂多变,及时地进行监测是采场进行安全生产的根本保证。我国自 20 世纪 80 年代开始大规模进行采场顶板与支护质量监测,使采场顶板事故大幅度减少,取得了良好的社会、经济效益。目前已研制出一系列的监测仪表并开发出了支护质量监控软件。

### (2) 巷道围岩控制理论与实践的发展

#### ① 巷道布置改革及无煤柱护巷技术

我国对巷道受采动影响期间的围岩分布及矿压显现规律进行了深入研究,查明了地质及生产技术因素对巷道矿压显现的影响,掌握了巷道从开始掘进到开采工作结束巷道被废弃的全过程中,巷道围岩变形随时间、空间的变化规律。在采准巷道矿压理论指导下,形成了完善的巷道合理布置系统。在分析开采引起的围岩应力重新分布规律的基础上,研究沿空巷道一侧煤柱边缘带的应力重新分布和支架与围岩关系,掌握无煤柱护巷机理,推进无煤柱护巷技术。同时,发展整体浇注式巷旁充填技术,为扩大应用沿空留巷开辟了广阔前景。

#### ② 研究巷道支架与围岩关系采用先进支护技术

在以变形压力为主的巷道围岩中,为了适应巷道复杂的围岩压力和变形特征,研究巷道支架的合理性能和结构形式,既能有效地抑制围岩变形,又能与围岩变形相互协调,减少支架损坏和改善巷道维护。为此,研制了适用于不同条件的 U 形钢、工字钢结构可缩性支架,完善了辅助配套设施,发展了支架壁后充填。锚杆支护与传统的支护观念不同,是在围岩内部对围岩加固,形成一个整体承载结构,利用围岩的自撑能力的一种支护手段。在原有的树脂锚杆基础上,重视应用小直径锚杆,发展可拉伸锚杆、桁架锚杆、预应力锚索,推广“锚—梁—网”组合锚杆、“锚杆—棚子”联合支护、锚注支护。

#### ③ 软岩巷道围岩控制理论与实践的发展

自 20 世纪 70 年代以来,矿压研究工作者有计划地开展了软岩巷道支护技术科技攻关,对软岩巷道围岩控制的基础理论、软岩的岩性分析及工程地质条件、围岩变形力学机制、巷道支护设计、施工工艺及监测进行全面系统研究。依照软岩的定义,软岩可分为膨胀性软岩、高应力软岩和节理化软岩。软岩具有软化临界载荷和软化临界深度两个基本力学属性。软岩巷道变形力学机制可分为三大类,即物化膨胀类、应力扩容类和结构变形类。软岩巷道支护必须允许围岩进入塑性状态,并以达到最大塑性承载力为最佳;同时,其巨大的塑性能必须以某种形式释放出来。最佳支护时间的力学含意是最大限度地发挥围岩稳定塑性区的承载能力而又不出现松动破坏时的时刻。针对软岩的类别和变形力学机制,发展了锚喷网支护技术、U 形钢支护壁后充填技术、防治底鼓封闭支护技术、围岩爆破卸压和注浆加固技术。

#### ④ 巷道围岩控制设计决策及支护质量与顶板动态监测

依据巷道围岩稳定性分类及巷道支护形式与合理支护参数选择专家系数,预测巷道围岩稳定性类别、预计围岩移近量、选择支护形式、确定支护参数。实行巷道支护质量与顶板动态全过程监测,通过施工过程中的现场监测、信息反馈,不断修正支护设计和调整支护参数。使巷道围岩控制逐步由经验判断和定性评估向定量分析和科学管理转化。

## 五、矿山压力与岩层控制的研究方法

矿山压力与岩层控制采用了理论分析、实验室试验、现场观测等性质不同的研究方法。这三者各有侧重,在研究问题时往往将三种方法配合使用,相辅相成得出全面、准确的结论。

### 1. 理论研究

首先是岩体结构分析,根据地质信息和采矿工程条件抽象出力学模型;一般可分为结构模型、模糊模型和混合模型三种类型。然后是数学力学分析,计算应力、应变分布及破坏条件;主要的数学工具有:经典数学理论、模糊数学理论、随机数学理论和近代数学理论。主要研究方法:

#### (1) 解析分析方法

通过力学模型,利用平衡条件、本构方程、变形条件、破坏判据和边界条件求解其应力、变形和破坏条件。

#### (2) 数值分析方法

包括有限元法、差分法、边界元法、结构单元法等,这类分析主要给出应力和应变分布,以及应力、位移、速度等特征值。

#### (3) 模糊分析、概率分析、随机分析、灵敏度分析、趋势分析等方法

这类分析方法往往更符合矿业科学目前的研究现状。

#### (4) 近代数学、力学和计算机科学方法

近年来,许多学科如断裂力学、损伤力学、分形几何、分叉、混沌、突变理论等,渗透到矿业科学领域,推动了矿山压力与岩层控制学科的发展。

### 2. 实验室试验

实验室试验研究目前主要是以下三方面内容。

(1) 岩石物理力学性质研究,包括岩石抗压、抗拉、抗剪变形性质试验;岩石流变试验、三轴试验和利用刚性压力机进行岩石变形破坏全过程的试验。

(2) 利用相似材料模型进行模拟研究,在平面模拟实验装置基础上,进一步发展立体模拟实验台。也可利用光弹性模型进行模拟研究。

(3) 在实验室条件下研究支架的整体性能和有关参数,建成具有先进水平的大型自移式液压支架试验装置,卧式和立式、单架及多框架多功能巷道支架试验台。

### 3. 现场监测

采场主要监测顶底板移近量、支架阻力、活柱下缩量 and 顶板破碎度;巷道主要监测顶底板移近量、支架变形、围岩应力分布和岩层内部移动规律。微震仪、地质雷达、电磁辐射监测仪、可弯曲光导纤维岩层窥视仪、红外线钻孔探测摄影仪等观测仪表,已取代过去单一的机械式仪表,先进的红外遥感、遥控和自动监测、计算机数据处理逐步取代现场人工操作。

## 六、矿山压力与岩层控制的研究和发展方向

当今世界自然科学与技术以前所未闻的速度发展。依赖于数学、力学理论的新进展,矿山岩石力学逐步形成为一门新兴的学科分支;现代的采矿设备、先进的测控仪器、计算机信息处理管理以及新的采矿技术和工艺层出不穷。使得矿山压力与岩层控制课程既与岩石力学前沿接轨,又在采矿工程实践中有广阔的应用领域。为适应采矿工业的发展,矿山压力及岩层控制课程不断开创新的研究领域:

(1) 采场矿压理论与控制体系,包括岩层控制的关键层理论、放顶煤高产高效开采技术

和高产高效开采故障诊断技术与保障系统等；

(2) 巷道矿压理论与控制技术,包括采动影响巷道矿压理论、煤巷锚杆支护技术、围岩注浆加固及充填技术和巷道底鼓控制技术等；

(3) 开采新方法、新工艺和新技术,包括煤炭地下气化、“三下”环保开采、地热的开发利用等；

(4) 矿井深部开采和高地应力引起的冲击矿压的预测和预报。

矿山压力及岩层控制课程有自己专门研究的课题,有自己专门的技术和方法,有自己的理论,已经形成为矿业科学中一门独立的分支学科。矿山压力与岩层控制课程将紧密结合煤炭工业可持续发展中所面临的重大科学技术问题,形成矿井高产高效开采综合监测与保障系统、矿山开采新理论与新方法以及在深井、高应力等复杂地质条件下的矿山开采和围岩控制理论与技术新体系,以确保实现矿井持续高产高效开采和安全生产以及煤矿的绿色开采,为逐步形成完整的适合我国采矿工业实际情况的矿业科学体系做出贡献。

# 第一章 矿山岩石和岩体的基本性质

## 第一节 岩石的基本物理性质

### 一、岩石的基本概念

岩石是组成地壳的基本物质,由各种造岩矿物或岩屑在地质作用下按一定规律组合而成。为与自然状态下的岩体有所区别,多数岩石力学文献中,岩石是指从岩体中取出的、尺寸不大的块体物质,有时又称岩块。

岩石按不同的标准可分为不同类型,常见的分类有:

(1) 按岩石成因可分为岩浆岩、沉积岩和变质岩三大类。煤田是地质历史上沉积运动形成的,煤矿绝大多数遇到的是沉积岩。

(2) 按岩石固体矿物颗粒间的结合特征,可分为固结性、粘结性、散粒状和流动性岩石四大类。煤矿中多遇到固结性岩石,即造岩矿物的固体颗粒间为刚性连接,破碎后仍可保持一定形状的岩石,常见的有砂岩、砂质泥岩、砂质页岩、石灰岩、泥岩等。

(3) 按岩石力学强度和坚实性,可分为坚硬岩石和松软岩石。

### 二、岩石的质量指标

#### 1. 岩石的密度和体积力

岩石的密度  $\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 是指单位体积 ( $\text{m}^3$ ) 岩石 (包括空隙体积) 的质量 ( $\text{kg}$ )。

岩石的密度与组成岩石矿物密度、空隙和吸水有关。根据岩石试样含水状态不同,可分为天然密度、饱和密度和干密度三种,前两种称为岩石的湿密度。天然密度是指岩石在天然含水状态下的密度;饱和密度 ( $\rho_s$ ) 指岩石在吸水饱和状态下的密度;干密度 ( $\rho_d$ ) 是在  $105^\circ\text{C} \sim 110^\circ\text{C}$  下干燥 24 h 后的密度。

当岩石中能进水的空隙不多时,岩石的三种密度间差值很小。实验室测试一般只提供干密度指标,且通常所说的岩石密度即指干密度。但对于遇水易膨胀的软岩,其干密度和湿密度的值有很大不同,应严加区分。煤矿中常见的岩石密度见表 1-1。

表 1-1 煤矿中常见岩石的相对密度、密度、孔隙率以及孔隙比

岩石种类	砂 岩	页 岩	石 灰 岩	板 岩	煤
相对密度 $\Delta$	2.60~2.75	2.57~2.77	2.48~2.85	—	—
密度 $\rho_d/10^3\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2~2.6	2~2.4	2.2~2.6	—	1.2~1.4
孔隙率 $n/\%$	3~30	10~35	5~20	0.1~1.0	—
孔隙比 $e$	0.031~0.429	0.111~0.538	0.053~0.25	0.001~0.0101	—



岩石的体积力  $\gamma$  ( $\text{kN}/\text{m}^3$ ) 是指单位体积 (包括空隙体积) 内岩石的质量所受的重力 ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )。为便于计算, 工程实践中, 可根据岩石的密度  $\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 换算出岩石的体积力。

## 2. 岩石的相对密度

岩石的相对密度  $\Delta$  是指岩石固体部分实体积  $V_c$  (不包括空隙体积) 的重量与相同体积的  $4^\circ\text{C}$  水的重量之比。其表达式为

$$\Delta = \frac{G_d}{V_c \cdot \gamma_w} \quad (1-1)$$

式中  $G_d$ ——绝对干燥时岩石固体实体积的重量,  $\text{kN}$ ;

$V_c$ ——岩石固体部分实体积,  $\text{m}^3$ ;

$\gamma_w$ ——水的体积力,  $4^\circ\text{C}$  时等于  $10 \text{ kN}/\text{m}^3$ 。

岩石相对密度取决于组成岩石的矿物相对密度, 与岩石的空隙和吸水多少无关, 且随岩石中重矿物含量的增多而增大。煤矿中常见的岩石相对密度见表 1-1。

## 三、岩石的体积指标

### 1. 岩石的孔隙性

岩石的孔隙性是岩石中孔洞和裂隙发育程度的指标, 常用孔隙度表示, 有时也用孔隙比来表示。

岩石的孔隙度是指岩石中各种孔洞和裂隙体积总和与岩石总体积之比, 也称孔隙率, 表达式为

$$n = \frac{V_0}{V} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中  $n$ ——岩石的孔隙率, %;

$V_0$ ——岩石中孔隙的总体积,  $\text{m}^3$ ;

$V$ ——岩石的总体积,  $\text{m}^3$ 。

岩石的孔隙比  $e$  指岩石中各种孔洞和裂隙体积总和  $V_0$  与岩石内固体部分实体积  $V_c$  之比。煤矿中常见岩石的孔隙率和孔隙比见表 1-1。

### 2. 岩石的碎胀性和压实性

岩石的碎胀性是指岩石破碎后的体积比破碎前的体积增大的性质。常用岩石的碎胀系数  $K_\rho$  来表示, 即岩石破碎后处于松散状态下的体积与岩石破碎前处于整体状态下的体积之比。

岩石的碎胀系数对矿压控制, 尤其对回采工作面的顶板管理有非常重要的意义, 煤矿中常见的岩石的碎胀系数见表 1-2。

表 1-2 煤矿中常见岩石的碎胀系数和残余碎胀系数

岩石种类	碎胀系数 $K_\rho$	残余碎胀系数 $K'_\rho$
砂	1.06~1.15	1.01~1.03
粘土	<1.2	1.03~1.07
碎煤	<1.2	1.05
粘土页岩	1.4	1.10
砂质页岩	1.6~1.8	1.1~1.15
硬砂岩	1.5~1.8	—