

全国成人高等教育规划教材

# 矿山压力及其控制

■ 宋卫华 主编

非外借

 煤炭工业出版社

全国成人高等教育规划教材

# 矿山压力及其控制

主编 宋卫华

煤炭工业出版社

---

### 图书在版编目 (CIP) 数据

矿山压力及其控制/宋卫华主编. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2016

全国成人高等教育规划教材

ISBN 978 - 7 - 5020 - 5009 - 2

I. ①矿… II. ①宋… III. ①矿山压力—控制—成人高等教育—教材 IV. ①TD3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 253686 号

### 矿山压力及其控制(全国成人高等教育规划教材)

---

主 编 宋卫华  
责任编辑 张成籍 磊  
责任校对 姜惠萍  
封面设计 王滨

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)  
电 话 010 - 84657898 (总编室)  
010 - 64018321 (发行部) 010 - 84657880 (读者服务部)

电子信箱 cciph612@126.com  
网 址 www.cciph.com.cn  
印 刷 北京建宏印刷有限公司  
经 销 全国新华书店

开 本 787mm × 1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 14<sup>1</sup>/<sub>4</sub> 字数 345 千字  
版 次 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷  
社内编号 7855 定价 28.00 元

---

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换,电话:010 - 84657880

## 内 容 提 要

本书在简述矿山岩体的原岩应力及其重新分布、采煤工作面上覆岩层活动规律及矿山压力显现基本规律、巷道矿压显现规律的基础上，详细讲述了采煤工作面顶板控制原理与方法、巷道维护原理及支护技术、冲击地压监测及其防治技术、矿压监测技术基础等方面的内容。

本书可作为煤炭高校采矿工程专业成人高等教育、专升本教育及技术培训的教材，也可供广大采矿工程技术人员参考。

# 前 言

《矿山压力及其控制》是采矿工程专业的一门主干课程，是矿井开拓部署、矿山工程设计与施工、开采方法与工艺设计、采煤工作面岩层控制及支护设计、巷道围岩控制与支护设计、矿山压力监测的基础，对于确保矿井安全高效生产等方面具有十分重要的作用。我国在矿山压力及其控制领域的研究取得了丰硕的成果，学科理论与技术得到了快速发展，已经形成了比较完整的理论体系及成套的控制技术，推进了采矿技术的发展。

我国煤田地质条件复杂，采用的采煤方法多样，不同地质与开采技术条件的矿山压力规律有其相应的特点。本书教材编写尽量反映了最具代表性的基本理论、普遍规律、控制技术及监测方法。

本书压缩了理论部分内容，加强了基本规律、控制技术、监测技术基础的有关内容，突出了成人高等教育和高等职业教育的特点，重在培养实际应用能力。

本书由宋卫华、李忠辉编写。第一章、第二章、第三章、第四章、第五章、第六章、第七章、第九章由宋卫华编写，第八章由李忠辉编写。全书由宋卫华统稿。

由于时间仓促和水平有限，书中可能存在不当之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2016年8月

## 目 次

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第一章 绪论               | 1   |
| 第二章 矿山岩体的原岩应力及其重新分布  | 6   |
| 第一节 岩体中的原岩应力         | 6   |
| 第二节 孔周围的应力分布         | 10  |
| 第三节 弹塑性围岩应力分布        | 18  |
| 第四节 支承压力在底板岩层中的传播    | 20  |
| 第三章 采煤工作面上覆岩层活动规律    | 23  |
| 第一节 影响采煤工作面矿压显现的岩层组成 | 23  |
| 第二节 直接顶垮落厚度          | 25  |
| 第三节 基本顶的初次断裂与断裂步距    | 28  |
| 第四章 采煤工作面矿山压力显现基本规律  | 35  |
| 第一节 矿山压力显现指标         | 35  |
| 第二节 基本顶的初次来压与周期来压    | 36  |
| 第三节 采煤工作面顶板大面积来压     | 39  |
| 第四节 顶板压力的估算          | 44  |
| 第五节 影响工作面矿山压力显现的主要因素 | 47  |
| 第五章 采场顶板支护方法         | 52  |
| 第一节 顶板分类与底板特征        | 52  |
| 第二节 采场支架类型与支架力学特性    | 58  |
| 第三节 采场支架与围岩相互作用原理    | 74  |
| 第四节 综合机械化采煤工作面顶板控制设计 | 80  |
| 第五节 单体液压支柱工作面顶板控制原则  | 85  |
| 第六章 巷道矿压显现规律         | 92  |
| 第一节 巷道变形破坏           | 92  |
| 第二节 受采动影响巷道矿压显现规律    | 101 |
| 第三节 巷道围岩控制原理和理论      | 111 |

---

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 第七章 巷道维护原理和支护技术·····       | 117 |
| 第一节 护巷方式·····              | 117 |
| 第二节 巷道围岩卸压·····            | 127 |
| 第三节 巷道支护形式·····            | 133 |
| 第四节 巷道锚杆支护原理与方法·····       | 141 |
| 第五节 软岩巷道围岩支护技术·····        | 156 |
| 第八章 冲击地压监测及其防治·····        | 166 |
| 第一节 冲击地压及其分类·····          | 166 |
| 第二节 冲击地压的机理·····           | 167 |
| 第三节 冲击地压发生的影响因素·····       | 170 |
| 第四节 冲击地压的监测方法·····         | 175 |
| 第五节 冲击地压的防治·····           | 179 |
| 第九章 矿山压力监测技术基础·····        | 182 |
| 第一节 采煤工作面矿山压力监测的常用仪器·····  | 182 |
| 第二节 单体液压支柱工作面矿山压力监测技术····· | 186 |
| 第三节 综采工作面矿山压力监测技术·····     | 196 |
| 第四节 巷道矿山压力观测技术·····        | 202 |
| 参考文献·····                  | 221 |

# 第一章 绪 论

## 学习目标

了解当前与矿山压力有关的安全事故以及明确矿山压力及其控制的基本概念。

### 一、矿山压力及其控制的基本概念和学习本课程的意义

煤矿重大事故的发生及其有效控制，几乎都同时与岩层运动和应力场应力的分布条件有机地联系在一起。其中与顶板运动破坏直接关联的冒顶事故、顶板透水事故，以及与其相关的岩层运动破坏的范围都与采动后应力场重新分布联系在一起。与应力条件直接相关的事故包括瓦斯突出、冲击地压和底板突水等，其应力条件的实现都是在一定采动条件下岩层运动和破坏的结果（图1-1）。

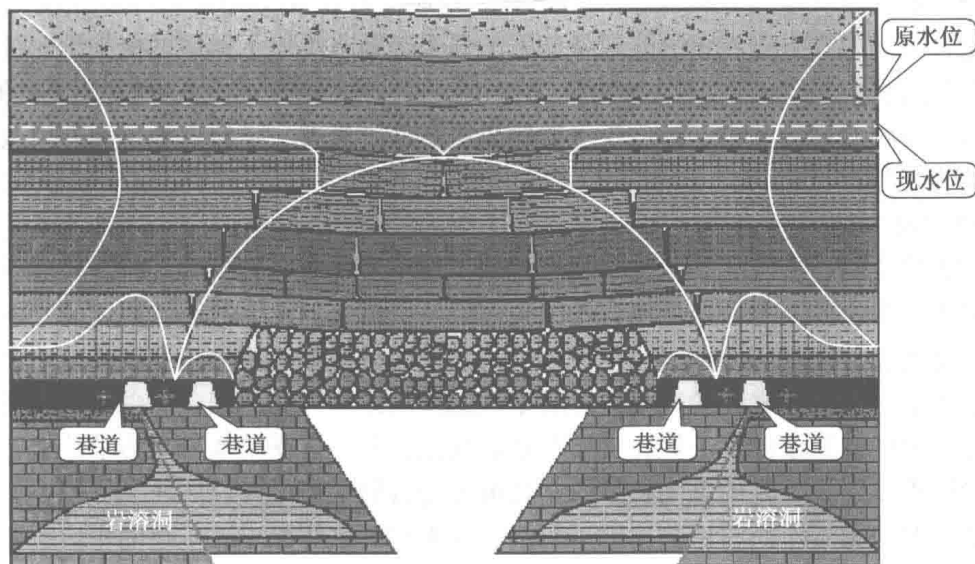


图1-1 与岩层运动相关的事

地下岩体在受到开挖以前，原岩应力处于平衡状态，当开掘巷道或进行回采工作时，破坏了原来的应力平衡状态，就会引起岩体内部的应力重新分布。它表现为巷道周围煤、岩体产生移动、变形甚至破坏，直到煤、岩体内部重新形成一个新的应力平衡状态为止。在此过程中，巷道本身或安设在其中的支护物会受到各种力的作用。这种由于在地下煤岩



中进行采掘活动而在井巷、硐室及回采工作面周围煤岩体中和其中的支护物上所引起的力，称为矿山压力。

在矿山压力作用下，会引起各种力学现象，如顶板下沉，底板鼓起，巷道变形后断面缩小，岩体破坏散离甚至大面积冒落，煤被压松产生片帮或突然抛出，支架严重变形或损坏，充填物受压缩，以及大量岩层移动地表发生塌陷等等。这些由于矿山压力作用使围岩、煤体和各种人工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，矿压显现会给地下开采工作造成不同程度的危害。为使矿压显现不影响正常开采工作和保证生产安全，必须采取各种技术措施加以控制，包括对巷道及回采工作空间进行支护，对软弱或破碎的煤岩进行加固，用各种方法使巷道或回采工作空间得到卸压，对采空区进行充填，或用人力的方法使采空区顶板按预定要求冒落等等。此外，人们对矿压的控制不仅在于消除和减轻矿压对开采工作造成的危害，还包括有效地利用矿压的自然能量为开采工作服务。例如，依靠矿压的作用压松煤体以减轻落煤工作，借助采空区上覆岩层压力去压实已垮落的矸石以形成自然再生顶板等。所有这些人力的调节，改变和利用矿山压力作用的各种措施，称作矿山压力控制。

掌握矿压显现规律，研究矿压控制的有效方法，对煤矿生产具有十分重要的意义。因此，《矿山压力及其控制》这门课程在地下采煤学术领域中占有很重要的位置。

## 二、矿山压力及其控制研究的回顾

很早以前，人们已经发现在煤和岩层中开出的巷道，支架上承受的压力远远小于采动空间上覆岩层的自然重量。因此，人们很自然地联想到已采空间是在某种结构的掩护之下。于是，人们根据自己在不同煤层条件下的开采经验，提出了相应的掩护结构模型，用以解释开采过程中出现的矿山压力现象，设计和选择采掘空间的支护形式及所需的反力，从而形成了各种假说。其中，适应于一般的煤层条件，具有一定历史地位和有代表性的大致可归纳为5类。

### 1. 掩护拱假说

掩护拱假说的基本观点是：①采动形成的工作空间是在一种拱的结构掩护之下；②拱结构承担上覆岩层的重量，通过拱脚传递到煤层及岩体上的压力及由此在煤及岩体中形成的应力，是煤及岩层破坏的原因，也是拱结构本身向外扩展的条件；③回采工作面空间的支护仅承受拱内已破坏岩层的岩重，支架是在由拱的结构尺寸所圈定的破碎岩石荷重下工作，即在一定的载荷条件下工作，支架上显现的压力大小与支架本身的力学特性无关。根据对拱的性质及形成条件的不同解释，其又可分为自然平衡拱假说和压力拱假说。

此假说对回采工作面前后的支承压力和回采工作面空间处于减压范围作出了经典的解释，而对于拱的特性、岩层变形、移动和破坏的发展过程以及支架与围岩的相互作用，没有做任何分析。

### 2. 掩护梁假说

与拱的假说相比，梁的假说在解释回采工作面支架上压力显现的规律方面（包括压力来源、压力大小、支架的力学特性及围岩运动间关系等）有了重要的发展。下面引述几种有代表性的掩护梁假说。

#### 1) 悬臂梁假说

该假说认为回采工作面是在一系列梁的掩护之下，这些梁中的一部分是采空区的一端已经垮落，另一端嵌固在煤层上的悬臂梁，其余为一端由煤壁支撑，另一端由已垮岩石支撑的连续梁。正是这些梁随回采工作面推进有规律的垮落或折断，才导致回采工作面来压的现象。由于梁的垮落和折断是有规律的，因此回采工作面来压也是有规律的。有关学者认为悬臂梁每次垮落或折断的尺寸可以用连续介质力学的方法来确定。

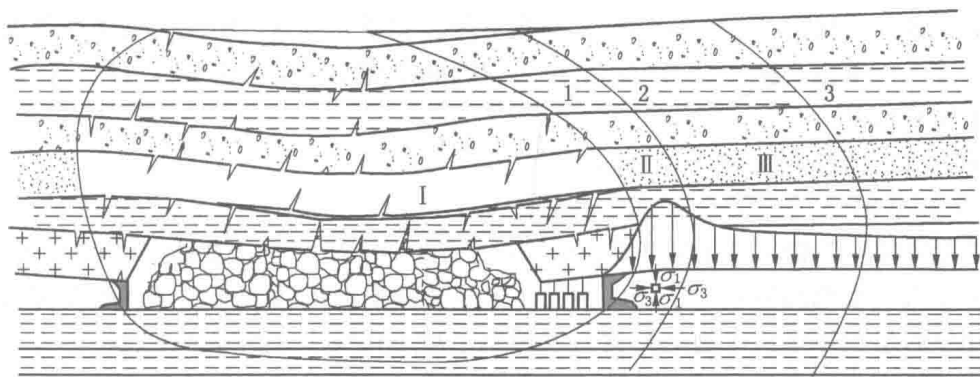
此假说可以解释工作面近煤壁处顶板下沉量小，支架载荷也小，而距煤壁越远则两者均大的现象。同时也可以解释工作面前方出现的支承压力及工作面出现的周期来压现象。

悬臂梁假说从提出开始，一直没有发展到用于回采工作面矿压控制定量计算方面的主要原因是：①未能进一步研究回采工作面上覆岩层自下而上的运动发展规律，特别是悬臂梁的岩层组合条件；②没有明确回采工作面矿压控制需要考虑的悬臂梁范围，没有从理论上和方法上解决生产现场找到这个范围的办法。

## 2) 预生裂隙梁假说

预生裂隙梁假说是比利时学者 A·拉巴斯在 1947 年提出的。该假说认为回采工作面是在一系列预生裂隙梁（或假塑性梁）的覆盖之下，如图 1-2 所示。这些梁中的裂隙是有关岩层在煤壁前方强大的支承压力作用下预先形成的。它们自身的抗拉能力已基本消失，主要靠水平挤压力产生的摩擦力来抵抗弯曲和维持平衡。因此，当水平方向挤压一旦消失，岩梁就会失稳垮落。该假说认为，回采工作面支架上显现的压力是裂隙梁沉降或平衡遭到破坏的结果。

预生裂隙假说的重大贡献是：揭示了煤层及邻近回采工作面的部分岩层在支承压力作用下超前于煤壁破坏的可能性，正确指出其破坏的原因是岩层中两个方面的应力差超过岩石强度极限所致。该假说把受采动影响的应力场范围分为 3 个区间，即低应力区、高应力区和假塑性变形区，如图 1-2 所示。



I—低应力区；II—高应力区；III—假塑性变形区；

1—已破坏岩石覆盖面；2、3—极限影响边界

图 1-2 预生裂隙梁假说模型

如悬臂梁假说一样，拉巴斯的假说同样没能够正确地回答回采工作面支架需要控制的岩层范围问题。虽然假说建立了由新生裂隙轨迹连线所决定的覆盖面的概念，划定了预生裂隙梁的范围。但是这个界限实际上无法确定，加之假说没有进一步研究回采工作面支架

反力与对各个预生裂隙控制间的力学关系，因此同样无法直接用于回采工作面矿压控制的定量计算。

### 3. 铰接岩块假说

铰接岩块假说是苏联学者 T. H. 在实验室进行采煤工作面上覆岩层运动规律研究的基础上提出来的。该假说认为，用垮落法控制顶板的采煤工作面，支架上的压力显现是由已垮落的岩层和呈铰接状态的岩层两部分岩层的运动所决定，如图 1-3 所示。

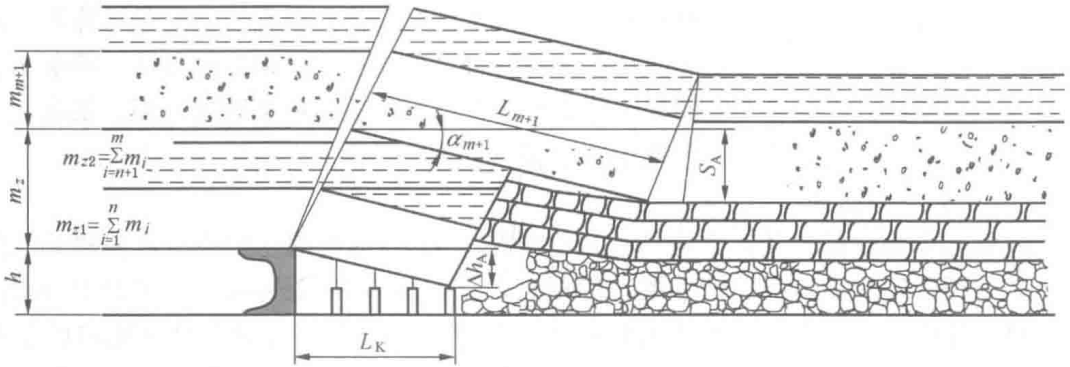


图 1-3 铰接岩块假说模型

铰接岩块假说比较深入地揭示了回采工作面上覆岩层的发展状况，特别是岩层垮落实现的条件；正确地提出了采煤工作面支架有可能在“给定载荷”和“给定变形”两种状态下工作的概念；相当深入地研究和揭示了回采工作面支架与围岩间的部分关系。这一成果从理论上为回采工作面顶板控制设计提供了重要依据。

该假说存在的问题是：未能确定出呈铰接状态的基本顶形成的条件和具体的范围；未能更全面地研究和揭示支架与这部分岩梁运动间的关系；没有说明回采工作面顶板下沉量在很大程度上能够由支架的阻力控制的事实，因而未能将回采工作面顶板控制设计提高到科学定量的程度。

### 4. 砌体梁结构力学模型与关键层理论

#### 1) 砌体梁模型

关于砌体梁理论的主要研究工作始于 20 世纪 60 年代初期，直到 20 世纪 70 年代末，以中国矿业大学钱鸣高院士为代表，借助于大屯孔庄矿开采后岩层内部移动观测资料，上覆岩层开采后呈砌体梁式平衡的结构力学模型才被正式提出来。砌体梁假说认为，在基本顶岩梁达到断裂步距之后，随着工作面的继续推进，岩梁将会折断，但断裂后的岩块由于排列整齐，在相互回转时能形成挤压，由于岩块间的水平力以及相互间形成的摩擦力的作用，在一定条件下能够形成外表似梁实则为半拱的结构。这种平衡结构形如砌体，故称之为砌体梁。

采动后岩体内形成的砌体梁力学模型是一个大结构，而此大结构中影响回采工作面顶板控制的主要是岩层移动中形成的离层区附近的几个岩块。显然，关键块平衡与否直接影响回采工作面顶板的稳定性和支架受力大小。因此，在砌体梁结构研究的前提下应重点分析其中关键块的平衡关系。在这项研究中主要提出了砌体梁关键块的滑落和回转变形稳定

条件,即“S-R”稳定条件。

## 2) 关键层理论

20 世纪末,钱鸣高院士、缪协兴教授等在砌体梁理论研究的基础上提出了关键层理论。关键层的定义可作如下表述:在回采工作面上覆岩层中存在多个岩层时,对岩体活动全部或局部起控制作用的岩层称为关键层。关键层判别的主要依据是其变形和破断特征,在关键层破断时,其上部全部岩层或局部岩层的下沉变形是相互协调一致的,前者称为岩层活动的主关键层,后者称为亚关键层。也就是说,关键层的断裂将导致全部或相当部分的上覆岩层产生整体运动。显然,关键层的断裂步距即为上部岩体部分或全部岩层的断裂步距,从而引起明显的岩层运动和矿压显现。关键层由其岩层厚度、强度和载荷大小而定。

一般来说,关键层即为主承载层,在破断前可以板结构的形式承受上部岩层的部分重量,断裂后则可形成砌体梁结构,其结构形态即是岩层移动的形态。而各亚关键层之间或主关键层和亚关键层之间形成了岩体内部的离层。

## 5. 以岩层运动为中心的矿山压力理论

山东科技大学宋振骐院士等建立了以上覆岩层运动为中心的矿山压力理论,即传递岩梁理论。核心要点如下:

(1) 强调矿山压力及矿山压力显现两个基本概念间的差别和联系。认为矿山压力(即采动后促使围岩运动的力)的存在是绝对的,在任何已采空间的周围岩体中都存在着。但是矿山压力的显现(包括围岩变形、位移和破坏,以及支架受力、下缩和折损等)则是相对的、有条件的,因而也是可以控制的。进行矿山压力研究的目的,就是要创造条件,把矿山压力的显现控制在安全上可靠、技术上可能和经济上合理化的范围内。

(2) 和其他工程不同,煤矿的回采工作面始终是处在不断推进和发展的过程中。因此,无论是存在于围岩中的矿山压力,还是由矿山压力作用而引起的矿山压力显现都不是静止的。相反,它们都随回采工作面推进而处于不断地发展和变化过程中。造成这一发展变化的根本原因就是上覆岩层的运动。

(3) 影响回采工作面矿山压力显现的岩层范围是有限的、可知的和可以变化的。实践证明,对回采工作面矿山压力显现有明显影响的岩层范围仅是上覆岩层中很小的一部分,包括直接顶和基本顶两个部分。直接顶是指在采空区已经垮落的岩层的总和。由于它们在推进方向上不能始终保持传递力的联系,因此一旦运动,其作用力将由支架全部承担。基本顶则是由运动对回采工作面矿山压力显现有明显影响的传递岩梁(简称岩梁)组成,对于基本顶中每一岩梁由于始终能保持向煤壁前方和采空区矸石上传递力的联系,因此,当其运动时,其作用力无须由支架全部承担。支架承担岩梁作用力的大小,由对岩梁位态的控制情况决定。

(4) 研究基本顶来压时刻的支架—围岩关系,包括支架对直接顶的控制方式和对基本顶岩梁的控制方式等两个部分。其中,为了控制直接顶板,只能采取“给定载荷”的工作方式,即必须考虑直接顶的作用力全部由支架承担。研究证明,这个作用力可以被看作是一个与基本顶位态控制无关的常数。

## 第二章 矿山岩体的原岩应力及其重新分布

### 学习目标

掌握岩体内部的应力及其分布规律、不同形状孔周围的应力分布、压力传播规律等内容。

### 第一节 岩体中的原岩应力

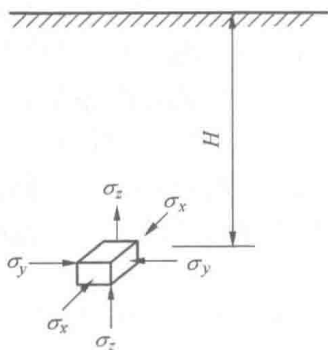


图 2-1 岩体单元体所在位置及其应力状态

#### 一、自重应力

假定岩体为均匀连续介质，应用连续介质力学原理计算岩体自重应力。设岩体为半无限体，地面为水平面，在距地表深度为  $H$  处任意取一单元体（图 2-1），其上作用的应力为  $\sigma_z$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_x$ ，形成岩体单元的自重应力状态。

单元体上所受的铅直应力  $\sigma_z$  等于单元体上覆岩层的重量，即

$$\sigma_z = \gamma H \quad (2-1)$$

式中  $\gamma$ ——上覆岩层的平均体积力， $\text{kN}/\text{m}^3$ ；

$H$ ——单元体距离地表的深度， $\text{m}$ 。

在均匀岩体内，岩体的自重应力状态为

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \gamma H \\ \sigma_y &= \sigma_x = \lambda \sigma_z \\ \tau_{xy} &= 0 \end{aligned} \quad (2-2)$$

式中  $\lambda$ ——侧压系数。

在岩体自重应力场内，铅直应力  $\sigma_z$  和水平应力  $\sigma_y$ 、 $\sigma_x$  都是主应力。

假设岩体为各向同性的弹性体，由于单元体在水平方向受到相邻岩体的位移约束，不可能产生横向变形。根据广义胡克定律，单元体各方向的应变为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \\ \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

由于  $\varepsilon_x = 0$ ,  $\varepsilon_y = 0$ ,  $\varepsilon_x = \varepsilon_y$ ,  $\sigma_z$  与  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  之间的关系为

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_z = \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H \quad (2-4)$$

因此 
$$\lambda = \frac{\mu}{1-\mu} \quad (2-5)$$

岩石的泊松比一般为 0.2 ~ 0.3, 侧压系数等于 0.25 ~ 0.43, 岩体自重应力场内水平应力等于铅直应力的 25% ~ 40%。

如果岩体由多层不同体积力的岩层组成。各岩层的厚度和体积力分别为  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $\dots$ 、 $h_i$ 、 $\dots$ 、 $h_n$ ;  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\dots$ 、 $\gamma_i$ 、 $\dots$ 、 $\gamma_n$  则岩体的自重初始应力为

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \\ \sigma_x &= \sigma_y = \lambda \sigma_z \end{aligned} \quad (2-6)$$

由式 (2-6) 可知, 岩体的自重应力随深度成线性增长。在一定的深度范围内, 岩体基本上处于弹性状态。当埋深超过一定深度时, 自重应力大于岩体的弹性强度, 岩体将转化为处于潜塑性状态或塑性状态。如果应用最大剪应力理论, 塑性条件为

$$\tau_{\max} = \tau_0 \quad (2-7)$$

$$\frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x) = \tau_0 \quad (2-8)$$

由式 (2-4)、式 (2-6)、式 (2-8) 可算出岩体由弹性状态过渡到塑性状态的临界深度。岩体初始应力状态的静水压力理论认为, 在埋藏较深条件下, 铅直压应力相当大, 岩石呈现明显的塑性。泊松比近似等于 0.5, 侧压系数  $\lambda$  为 1.0, 此时

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \gamma H \quad (2-9)$$

静水压力理论把岩石视为流变介质并经历漫长的地质历史阶段。如果把岩体看作任何一种弹黏性体 (本质是黏性流体), 把地质历史看作应力作用时间无限长, 则深部的岩体自重应力场都将达到静水应力状态。

假定岩体是理想松散介质, 由松散介质极限平衡条件建立铅直应力与侧向应力关系:

$$\lambda = \frac{\sigma_x}{\sigma_z} = \frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} \quad (2-10)$$

式中  $\varphi$ ——松散岩体的内摩擦角, ( $^\circ$ ), 一般在  $30^\circ$  左右。

破碎岩体实际上是具有一定黏结力的松散介质。具有一定黏结力的松散岩体, 铅直应力与侧向应力关系为

$$\sigma_x = \sigma_z \frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} - \frac{2C\cos\varphi}{1 + \sin\varphi} = \gamma H \frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} - \frac{2C\cos\varphi}{1 + \sin\varphi} \quad (2-11)$$

式中  $C$ ——松散岩体的黏结力, MPa。

侧向应力  $\sigma_x$  为压应力，如果  $\sigma_x$  是负值，则侧向应力  $\sigma_x$  不存在。令  $\sigma_x = 0$ ，由式 (2-11) 得

$$H_1 = \frac{2C \cos \varphi}{\gamma(1 - \sin \varphi)} \quad (2-12)$$

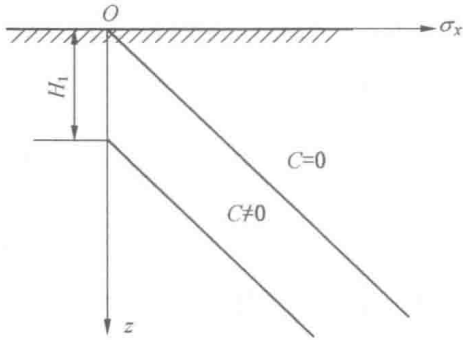


图 2-2 松散岩体内的侧向应力

具有黏结力  $C$  的松散岩体，在埋深大于  $H_1$  的条件下，才出现随埋深成线性增长的侧向应力  $\sigma_x$  (图 2-2)。

## 二、构造应力

构造应力是由于地壳构造运动在岩体中引起的应力，岩体构造应力可以分为现代构造应力和地质构造残余应力。前者是指正在经受地质构造运动的作用，在地质构造发生过程中，岩体内产生的应力；后者是指已经结束的地质构造运动残

留于岩体内部的应力。由于地壳处于不断运动之中，仅仅存在相对活跃期和静止期，在岩体中严格区分现代构造应力和地质构造残余应力是比较困难的。

地质构造运动过程中岩体经受相当大的外力作用，水平构造应力使岩层产生很大的弹性变形和塑性变形，形成了各种地质构造，例如向斜、背斜和褶皱，以及产生断裂而形成的各种节理及断层。岩体弹性变形储存弹性能，弹性变形越大，岩体内储存的能量越多。随着能量的增加，应力达到岩体的强度极限时，岩体产生破坏。除岩体中保存一部分残余变形外，其储存的能量将部分或全部释放，构造应力随之部分或全部消失。

构造应力以水平力为主，具有明显的区域性和方向性，其基本特点如下：

(1) 一般情况下地壳运动以水平运动为主，构造应力主要是水平应力；而且地壳总的运动趋势是相互挤压，所以水平应力以压应力占绝对优势。

(2) 构造应力分布不均匀，在地质构造变化比较剧烈的地区，最大主应力的大小和方向往往有很大变化。

(3) 岩体中的构造应力具有明显的方向性，最大水平主应力和最小水平主应力之值一般相差较大。

(4) 构造应力在坚硬岩层中出现一般比较普遍，在软岩中储存构造应力很少。

地球经历了无数次大大小小的构造运动，每次构造运动的应力场也经过多次叠加、牵引和改造。此外，构造应力场还受到其他多种因素的影响，造成构造应力的复杂性和多变性。目前，岩体的构造应力尚无法用数学力学的方法进行分析计算，构造应力的大小不可能通过数学计算或模型分析的方法获得，只能采用现场应力量测方法测定。但是，构造应力场的方向可以根据地质力学的方法加以判断。各种形态不同的地质构造是各地质历史时期的构造运动的产物，地质构造的遗迹，例如断层、褶曲等保留在岩体中，它的走向与形成它的应力有一定关系，可以根据地质构造线确定构造应力场的主轴方向。依据地质构造和岩石强度理论，一般认为自重应力是主应力之一，另一主应力与断裂构造体系正交。对于正断层，自重应力  $\sigma_z$  是最大主应力，即  $\sigma_1 = \gamma H$ ，最小主应力  $\sigma_3$  与断层带正交。对于逆断层，自重应力  $\sigma_z$  是最小主应力，即  $\sigma_3 = \gamma H$ 。最大主应力  $\sigma_1$  与断层带正交。对于平

移断层自重应力  $\sigma_z$  是中间主应力, 即  $\sigma_2 = \gamma H$ , 最大主应力  $\sigma_1$  与断层带成  $30^\circ \sim 45^\circ$  的交角, 而且  $\sigma_1$  与  $\sigma_3$  均为水平力。其他, 根据岩脉和褶皱也可推断构造应力的方向(图 2-3)。

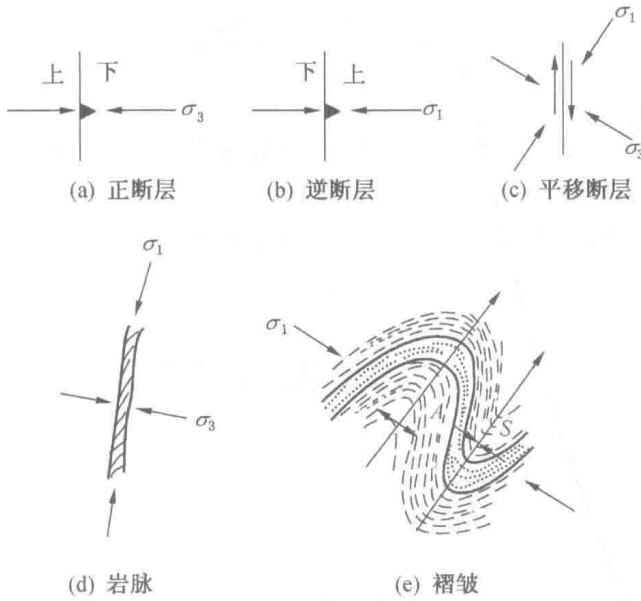


图 2-3 由地质特征推断构造应力方向的平面图

### 三、原岩应力分布的基本规律

通过理论研究、地质调查和大量的地应力测量资料, 原岩应力分布的主要规律归纳如下:

(1) 实测铅直应力基本上等于上覆岩层重量。对全世界有关实测铅直应力的统计资料表明, 在深度为  $25 \sim 2700 \text{ m}$  范围内, 铅直应力  $\sigma_z$  成线性增长, 大致相当于按平均体积力  $\gamma$  等于  $27 \text{ kN/m}^3$  计算出来的重力  $\gamma H$ , 如图 2-4 所示。但在世界多数地区并不存在真正的铅直应力, 即没有一个主应力的方向完全与地表垂直。在绝大多数测点都发现确有一个主应力接近铅直方向, 其偏差不大于  $20^\circ$ 。

(2) 水平应力普遍大于铅直应力。根据国内外实测资料统计, 水平应力  $\sigma_h$  多数大于铅直应力。最大水平应力  $\sigma_{h\max}$  与铅直应力  $\sigma_z$  的比值一般为  $0.5 \sim 5.5$ , 很多情况下比值大于 2, 最大可达到 30。最大水平主应力与最小水平主应力的平均值  $\sigma_{h,av}$  与  $\sigma_z$  相比, 一般仍为  $0.5 \sim 5.5$ , 大部分在  $0.8 \sim 1.5$ 。这说明在浅层地壳中平均水平地应力也普遍大于铅直应力, 铅直应力在多数情况下为最小主应力, 在少数情况下为中间主应力, 只有个别情况下为最大主应力。

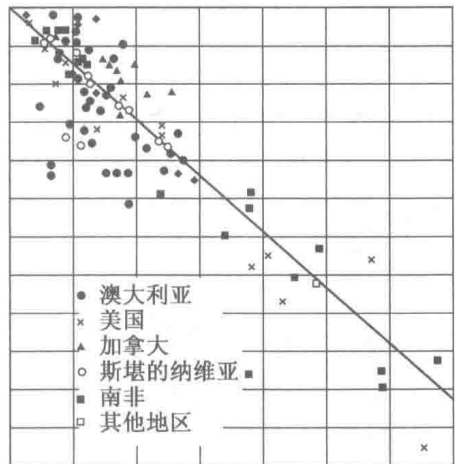


图 2-4 世界各国铅直应力  $\sigma_z$  与深度  $H$  变化规律图



(3) 平均水平应力与铅直应力的比值随深度增加而减小。平均水平应力  $\sigma_{h,av}$  与铅直应力  $\sigma_z$  的比值  $\lambda$  是表征地区原岩应力场特征的指标, 该值随深度增加而减小。但在不同地区, 变化的速度不相同。霍克和布朗用回归方法得出下列公式, 表示比值的变化范围:

$$\frac{100}{H} + 0.3 \leq \frac{\sigma_{h,av}}{\sigma_z} \leq \frac{1500}{H} + 0.5 \quad (2-13)$$

式中  $H$ ——深度, m。

从已有的资料看, 在浅部  $\lambda$  值比较分散, 随着深度增加,  $\lambda$  的离散程度变小并向 1 附近集中。这说明地壳深部可能出现静水压力状态。

(4) 最大水平主应力和最小水平主应力一般相差较大, 显示出很强的方向性。 $\sigma_{h,max}/\sigma_{h,min}$  比值一般为 0.2 ~ 0.8, 多数情况下为 0.4 ~ 0.8。

## 第二节 孔周围的应力分布

### 一、双向等压应力场内的圆形孔

#### 1. 基本假设

围岩为均质, 各向同性, 线弹性, 无蠕变或黏性行为; 原岩应力为各向等压 (静水压力) 状态; 巷道断面为圆形, 在无限长的巷道长度里, 围岩的性质一致。于是可以采用研究平面应变问题的方法, 取巷道的任一截面作为其代表, 且埋深  $H$  大于或等于 20 倍的巷道半径  $R_0$  (或其宽、高), 即

$$H \geq 20R_0 \quad (2-14)$$

研究表明, 当埋深  $H \geq 20R_0$  时, 可忽略巷道影响范围 (3 ~ 5 倍的  $R_0$ ) 内的岩石自重 (图 2-5), 水平原岩应力可以简化为均布的, 计算时可采用平面应变圆孔进行计算 (图 2-6)。

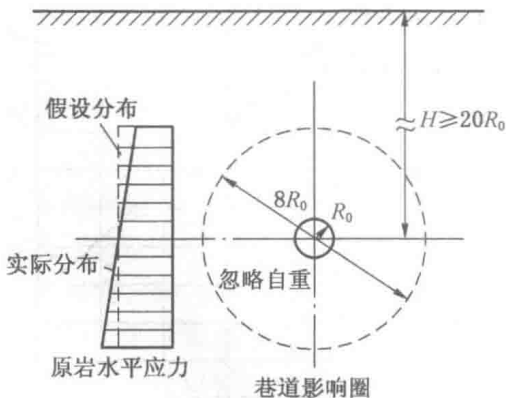


图 2-5 深埋巷道的力学特点

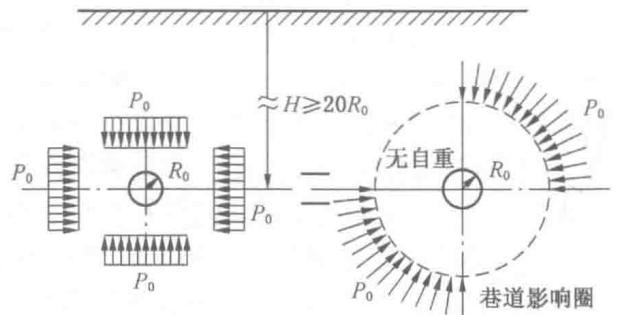


图 2-6 轴对称圆巷的条件

#### 2. 基本方程

根据图 2-7 的分析, 可列出以下各关系式。

平衡方程: