

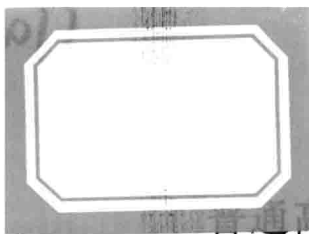
普通高等教育“十二五”规划教材

煤矿开采沉陷学

主编 郭增长 柴华彬



煤炭工业出版社



普通高等教育“十二五”规划教材

煤矿开采沉陷学

主编 郭增长 柴华彬

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书主要介绍了煤矿开采引起的岩层与地表移动规律、岩层及地表移动观测、开采沉陷预计、保护煤柱设计、建（构）筑物下采煤技术、水体下与承压水上采煤技术、铁路和公路下采煤技术、工业广场及井筒煤柱开采技术、开采沉陷对土地的影响及治理等方面的基础知识。

本书可作为测绘工程、采矿工程、土木工程等专业本科、研究生的教材或参考用书，也可供从事开采沉陷和矿山测量研究的科研人员及矿山企业的工程技术人员阅读参考。

图书在版编目（CIP）数据

煤矿开采沉陷学 / 郭增长, 柴华彬主编. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2013

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5020-4235-6

I. ①煤… II. ①郭… ②柴… III. ①煤矿开采—沉陷性—高等学校—教材 IV. ①TD82②TD327

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 096014 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

北京房山宏伟印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 13

字数 307 千字 印数 1—1 000

2013 年 9 月第 1 版 2013 年 9 月第 1 次印刷

社内编号 7063 定价 29.00 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

前 言

我国煤矿建筑物下、水体下和铁路下（称为“三下”）压煤量巨大。据对国有重点煤矿统计，全国生产矿井“三下”压煤量达 1.379×10^{10} t，其中建筑物下压煤 8.76×10^9 t，村庄下压煤占建筑物下压煤的 60% 以上。特别是我国东部地区，煤炭资源正在逐步枯竭，矿井储量逐年减少，剩余储量 50% 以上属于“三下”压煤。因此，掌握和学习煤矿开采沉陷的基本理论与方法对于提高煤炭资源采出率、减轻采动损害、保护地表建（构）筑物和矿区生态环境等具有重要的理论和实践意义。

本书的内容涉及面较宽，在学习本书之前，一般应具备高等数学、岩石力学、地质学、采矿学、工程测量学等方面的基础知识。

本书共分九章：第一章，绪论；第二章，开采沉陷基本规律；第三章，开采沉陷特殊规律；第四章，地表及岩层移动观测；第五章，开采沉陷预计；第六章，保护煤柱设计；第七章，“三下”采煤；第八章，工业广场及井筒保护煤柱开采；第九章，开采沉陷对土地的影响与治理。

本书由河南理工大学郭增长和柴华彬主编完成。其中，第一章、第二章、第六章和第七章由河南理工大学柴华彬编写；第三章由河南理工大学郭增长编写；第四章由河南理工大学李春意编写；第五章由河南理工大学蔡来良编写；第八章由河南理工大学郭增长和何荣共同编写；第九章由河南理工大学何荣编写。全书由郭增长和柴华彬统稿。

本书先后得到了国家自然科学基金（41102169）、河南省科技厅重点科技攻关计划项目（102102210196）和河南理工大学博士基金（B2010-4）的资助。同时也得到了河南理工大学测绘与国土信息工程学院的支持和资助。本书在编写过程中，引用了一些单位和国内外有关学者的著作和发表的文献资料，在此对所引文献的作者表示深深的感谢！

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正！

编 者

2013 年 7 月

目 次

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 岩石的物理力学性质	5
第三节 开采引起岩层移动的机理	8
本章复习题	10
第二章 开采沉陷基本规律	11
第一节 岩层移动和破坏规律	11
第二节 地表下沉盆地的特征	13
第三节 地表移动和变形分布规律	20
第四节 开采沉陷的主要影响因素	33
本章复习题	38
第三章 开采沉陷特殊规律	39
第一节 断层条件下开采沉陷规律	39
第二节 向斜褶曲条件下开采沉陷规律	42
第三节 山区地表移动与变形规律	46
第四节 厚松散层开采地表移动规律	48
第五节 深部开采地表移动规律	52
本章复习题	56
第四章 地表及岩层移动观测	57
第一节 概述	57
第二节 地表移动观测站设计	60
第三节 地表移动观测	65
第四节 岩层移动观测	68
第五节 实测数据处理与分析	76
本章复习题	88
第五章 开采沉陷预计	90
第一节 概述	90
第二节 概率积分法	91

第三节	地表任意点移动变形预计	109
第四节	其他预计方法简介	111
	本章复习题	113
第六章	保护煤柱设计	114
第一节	概述	114
第二节	保护煤柱设计参数	114
第三节	建筑物保护煤柱设计	117
第四节	井筒保护煤柱设计	120
第五节	铁路保护煤柱设计	124
	本章复习题	125
第七章	“三下”采煤	127
第一节	建筑物下采煤	127
第二节	铁路下采煤	138
第三节	公路下采煤	142
第四节	水体下采煤	146
第五节	承压水上采煤	156
	本章复习题	163
第八章	工业广场及井筒保护煤柱开采	165
第一节	概述	165
第二节	开采对地面建筑物与设施的影响	166
第三节	开采对地下生产系统的影响	169
第四节	工业广场与井筒保护煤柱开采实例	172
	本章复习题	183
第九章	开采沉陷对土地的影响与治理	184
第一节	土地和生态环境概述	184
第二节	开采沉陷对土地和生态环境的影响	185
第三节	开采沉陷对土地的影响评价及治理	191
第四节	矿区土地复垦方案	195
	本章复习题	199
	参考文献	200

第一章 绪 论

第一节 概 述

一、基本概念

当煤层被采出以后, 开采区域周围岩体的原始应力平衡状态受到破坏, 应力重新分布, 达到新的平衡。在此过程中, 煤层周围岩层和地表产生移动、变形和破坏(开裂、垮落等), 这种现象称为“开采沉陷”。广义上说, 煤层的开采可以是井工方法开采, 也可以是露天方法开采。本书中涉及的开采主要指的是层状煤层的井工开采。

煤矿开采沉陷的基本对象是煤层及其上覆岩层, 即地壳中的煤岩层。岩体是一种非常复杂的介质, 它不仅由各种不同性质的岩层组成, 而且由于各种地质作用(如褶皱、断层、开裂、火成岩侵入、陷落柱等)还产生了大量的不连续面。岩体在受到各种不同采煤方法的开采影响时, 产生的开采沉陷是一个在时间和空间上都是非常复杂的过程。从时间上看, 岩层移动过程中, 开采沉陷的形式和大小在不同的时间是不同的, 此时的开采沉陷是“动态的”; 随着工作面的推进和时间的推移, 开采沉陷的形式和大小逐渐趋向于稳定, 开采沉陷最终变成“静态的”或“最终的”。从空间上看, 当地下开采的范围较小、开采煤层的埋藏深度较大, 则开采沉陷波及的范围往往只局限于开采区域周围的岩体; 当开采范围较大、开采煤层的埋藏深度较小, 则开采沉陷波及的范围就会从岩体发展到地表, 引起“地表移动”。由于人类的生产和生活活动大部分都在地表进行, 所以地表移动对人类的影响更为普遍。

二、开采沉陷与其他学科关系

开采沉陷学是矿业工程中的学科分支之一, 它是一门研究地下矿物开采引起地表和岩层移动变形现象及其相关问题的学科。开采沉陷涉及采矿工程学, 地质学、岩土力学、建筑工程学, 工程测量学, 环境保护学等诸多学科门类。有丰富的理论内涵, 应用性很强, 直接为生产服务, 是一门多学科结合的交叉学科。

1. 与采矿工程学的关系

开采沉陷学研究的主要问题是开采沉陷的预计理论及“三下一上”(建筑物下、水体下、铁路下及承压水上)采煤。应用采矿工程学的基本理论和方法, 特别是采取特殊的采煤和顶板控制方法, 如充填开采、条带开采、多工作面协调开采等, 可以经济合理地回采被保护物附近的呆滞煤量。

2. 与地质学的关系

地质学是研究人类的生存环境——地球(特别是地壳)的组成、演变和发展的一门科学, 而工程地质学和水文地质学均为地质科学的一个分支。工程地质学是研究与工程规

划、设计、施工和运用有关的地质问题的科学，水文地质学是研究地下水的形成及运动、分布规律的科学。矿山开采在岩土体内进行，岩体的岩石和矿物成分、形成环境、岩体的结构面特性、岩体的水文地质和工程地质特征必将对岩土体的移动变形产生影响。因此，需要应用地质学的有关理论与方法来分析岩石、岩相和岩层的特征，分析岩体的结构。

3. 与岩土力学的关系

开采沉陷问题属于岩土力学研究的问题之一。岩土力学中有关岩体的应力、位移、应变的测试技术和计算理论可以结合矿山开采的特点，应用于开采沉陷学科之中。

4. 与建筑工程学的关系

在建（构）筑物下采煤时，为确保支护物安全正常使用，需要采用建筑工程学的理论和方法，对建（构）筑物的结构稳定性进行分析，提出在开采前和采后对建（构）筑物采取加固和维修的措施。

5. 与工程测量学的关系

开采沉陷学的重要研究方法之一是现场实地监测，测定岩土体及其建（构）筑物上各测点在不同时刻的空间位置。而工程测量的目的和任务就是以测绘仪器为手段，确定出测点的空间位置，并把它表示成数据形式描绘在图纸上。

6. 与环境保护学的关系

环境保护学是研究人类的生产与生活对自然环境产生影响的一门学科。开采沉陷对人类生活的环境造成各种各样的破坏，因此，需要采用环境保护学的理论和方法来对开采造成的农业生态环境（土地）和人类生活环境（建筑物、水体）等问题进行评价与治理。

三、开采沉陷研究的发展历史

开采沉陷问题的研究由来已久，早在 19 世纪末，人们就已注意到采矿引起的覆岩与地表移动、破坏，以及由此造成的井巷和地面建筑物的损害现象。20 世纪 30 年代，苏联、德国和波兰等一些采煤先进国家，把岩层与地表移动作为一项重要的研究工作。开采沉陷学作为一门学科，形成于 20 世纪 50 年代，20 世纪 60 年代迅速发展。

我国岩层移动研究工作是新中国成立后开始的。淮南和开滦矿区在 20 世纪 50 年代初期建立了地表移动观测站，开始了我国岩层移动科学研究的观测。20 世纪 50 年代后期，我国各主要矿区，开滦、抚顺、阜新、峰峰、淮南、大同、鹤岗、新汶、阳泉、本溪等先后制定了开展地表移动观测的规划，并建立了一批观测站。我国经过多年的现场观测和理论研究，完善和发展了岩层移动理论和计算方法，提出了适合我国岩层与地表移动的计算方法和公式。著名学者刘天泉、刘宝琛、廖国华、周国铨等，对我国的岩层与地表移动理论研究及其在生产实践中的应用做出了巨大的贡献。

由于矿山岩体结构十分复杂，煤层产状变化也较大，所以目前还没有一种完整的理论能解决生产实际问题。各国岩移研究工作者和现场工程技术人员在岩层与地表移动研究过程中，将现场实测、室内实验、理论研究三者相结合，使得岩层与地表移动的理论研究和在生产实践中的应用都取得了丰硕的研究成果，主要表现在以下方面：

（1）有针对性地开始了全面的现场监测研究工作，建成了多种地质采矿条件下的地表移动观测站，取得了大量的实测资料。

岩层与地表移动最初的研究工作是从现场实地观测开始的。通过大量的现场仪器观测，寻求岩层与地表移动各主要参数及地质采矿因素的关系。随着科学技术的发展，野外仪器观测手段发展也较快。目前，先进的测量技术（如智能型全站仪、全球定位系统、雷达干涉测量技术、激光技术等）应用于野外测量，提高了精度和工效，测量成果更能反映出地表移动和变形的真实性。自动记录仪器的出现，使测量地表移动的全过程和预报工作成为可能。现场观测为认识岩层与地表移动规律提供了大量的数据。

(2) 根据实测资料和室内试验研究，从时间上和空间上对地下煤层开采引起岩层及地表的移动形态形成了规律性认识。

在认识和探索岩层与地表移动规律时，往往需要多次反复试验单个因素的影响，这在现场条件下是难以实现的。于是，室内试验被提到日程上来。20世纪30年代，苏联的巴塔诺夫、库兹涅佐夫进行了相似材料模型试验，为发展相似模拟试验方法打下了基础。利用这一研究方法可以从定性方向得到与实际符合的结果。近年来，随着有限元和边界元等数值计算方法的广泛应用和计算机运算能力的提高，弹塑性理论用于计算岩层与地表移动和变形的研究取得了突破性进展，逐步进入定量的实用阶段。目前，俄罗斯、波兰、德国、英国等国都在应用数值计算和相似模型试验方法来研究开采沉陷问题。

(3) 建立了适用于一般条件下开采沉陷预计的数学模型和预计方法，并能在一定适应范围内指导采矿工程实践。

理论研究开采沉陷的优点是速度快，比较严密，可以定量分析。1956年波兰的李特维尼申教授提出随机介质理论，即把开采引起的地表移动看作随机事件，用概率积分（或其导数）来表示微小单元开采引起地表移动和变形的预计公式（影响函数），从而用叠加原理计算出整个开采引起的地表移动和变形。该理论能够解释岩层与地表移动的一些现象和规律，所以很快地应用于生产实践。我国的刘宝琛、廖国华等学者对该理论做出了大量的研究工作，完善和发展了这一理论，并提高了它的实用性。目前，概率积分法已成为我国较成熟的、应用非常广泛的预计方法之一。

(4) 提出了许多能够减缓地表沉陷的开采技术和对保护对象的保护措施，并应用于建（构）筑物下、铁（公）路下、水体下和承压水体上采煤（简称“三下一上”）工程实践。

随着岩层与地表移动规律研究的深入，岩层与地表移动预计方法不断完善，在矿山生产实践中岩层与地表移动理论应用的深度与广度不断扩大。学者们提出了许多地下开采技术（充填开采、条带开采、协调开采等）和建筑保护措施（刚性措施主要有顶底圈梁、构造柱、联系梁、双板基础等；柔性措施主要是设置滑动层），并已成功应用于“三下一上”采煤。比如波兰采用井上下综合保护的措施已成功地大面积用在城镇下、水体下、铁路下等开采活动中。目前波兰全国煤炭产量的42%是从“三下”开采出来的。

(5) 开采沉陷的环境治理技术。

开采沉陷的环境治理技术主要指矿区土地复垦。近年来，矿区土地复垦主要从恢复耕地向生物复垦、建筑复垦转化，即不但考虑将土地恢复成原状，而且要在此基础上提高土地利用的质量和效益，通过复垦对土地进行改良，使贫瘠的土地更加肥沃。中国矿业大学、煤炭科学研究总院和河南理工大学等相继开展了煤矿塌陷土地复垦和综合利用的试验研究，并取得了大量研究成果，明确了塌陷对土地质量的影响机理和规律、复垦土地改良

方法等。

四、开采沉陷研究的作用及意义

我国是一个产煤大国，每年有几十亿吨煤炭从地下采出，开采所引起的地表沉陷及环境灾害问题日益突出。这些矿区的地表多属建（构）筑物、水体、铁路、农田、公路、桥涵等设施的分布区。据不完全统计，目前我国仅国有重点煤矿的生产矿井“三下”压煤就达 1.379×10^{10} t。目前，我国建筑物下压煤 8.76×10^9 t，而村庄下压煤又占建筑物下压煤的 60%，达到 5.256×10^9 t。村庄下压煤几乎遍及各个矿区，一般占矿井储量的 10% ~ 30%。据统计，仅河南、河北、山东、安徽、江苏 5 省压煤村庄就达到 1094 个，住户约 11 万户。据有关资料，我国每采万吨煤，平均塌陷土地 0.2 hm^2 ；在村庄稠密的平原矿区，每采出 1×10^7 t 煤需迁移约 2000 人。因此，村庄建筑物下压煤开采已成为矿区面临的主要问题。

目前，我国铁路下压煤量达 1.391×10^9 t，而且随着铁路建设的发展，铁路下压煤量不断增大。近年来，高速公路建设不断发展，高速公路下压煤开采已成为“三下”采煤的又一大问题。我国水体下压煤量达 1.905×10^9 t，承压水体上压煤量达 1.734×10^9 t。水体下和承压水上采煤不但可能对矿井生产造成威胁，而且会对水资源造成破坏。因此，铁路下、水体下和承压水上采煤也是矿区面临的亟待解决的问题之一。

随着大量煤炭的采出，所引起的地表沉陷及环境灾害问题也日益突出。矿山开采沉陷不仅对地表建（构）筑物造成了严重损害，而且也破坏了矿区生态环境。开采沉陷对地表建（构）筑物和环境的影响主要表现为：

1. 开采沉陷造成土地资源的破坏

据不完全统计，全国每年因采煤新增塌陷地 $2.4 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，我国现有塌陷土地约 $6 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，地表塌陷后地面积水还会造成土地淹没、盐渍化。在山区，开采使山体、边坡滑移，导致巨大的灾害。我国西部地区，地下水较少，开采造成地下水位下降，进一步加剧了土地的沙漠化。而且开采沉陷造成土地资源的破坏，造成很多农民失去土地，会给社会增加了一些不安定因素。

2. 开采沉陷造成地表建（构）筑物的破坏

开采沉陷不但导致民房和厂房等建筑物变形和破坏，产生巨大的经济损失和人员伤亡事故，而且也会导致大量的公路、铁路、输电线路（如高压线路、通信线路等）、桥梁、隧道、堤坝等破坏，影响人民的生命财产安全和交通运输安全。

3. 开采沉陷造成水资源的破坏

地下开采导致覆岩移动破坏，当破裂岩体接触到地下、地面水体时，使水进入井下淹没矿井。过去 20 年间，我国有 250 多对矿井被水淹没，直接经济损失高达 350 多亿元。为治理煤矿水害，我国每年排出矿井水 $5.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，利用率只有 26%。开采沉陷引起地表水漏失，径流减少，井水位下降或断流，造成矿区水源枯竭、水资源破坏。

综上所述，如果通过开采沉陷的研究，能将我国“三下”压煤“解放”出来一半，就可供许多年产百万吨的大型矿井多生产几十年。但是，目前我国从“三下”采出的煤炭占整个“三下”压煤量的比例很小，远远落后于其他发达国家。由此可见，开采沉陷的研究现状还不能满足生产和我国现代化建设的需要。特别是自 20 世纪 80 年代以来，随

着煤矿的开采深度和开采强度增加，“三下”压煤量迅速扩大，严重影响了矿井的可持续发展。因此，解决“三下”压煤问题，无论从理论上、技术上，还是经济上都具有重要意义。

第二节 岩石的物理力学性质

开采沉陷的基本对象是煤层及其上覆岩层，即地壳中的煤岩层。因此，需要从岩石的物理力学性质开始研究。

在煤层开采之前，工作面周围的岩体处于相对静止状态，保持着岩体内部的应力平衡。在采煤工程实施中，为了采出地下煤炭，必须要开掘一系列的井筒、巷道、硐室、采场等，因此，使一定范围内的原有应力状态受到破坏，引起岩层内部应力的重新分布，直至达到新的平衡。岩层内部应力形成新平衡的过程，是周围岩层乃至地表产生移动和变形的过程。

岩层及地表的沉陷过程受很多因素的影响，其中岩石的物理力学性质起着重要的作用，它决定着各种现象的显现。因此，在研究有关岩层及地表沉陷时，必须对呈现沉陷的主体——岩石的物理及力学性质有所了解。岩石的物理力学性质主要是指岩石的结构、构造、比重、容重、空隙性、碎胀性、透水性、应变性质等。有关岩石的结构和构造问题将在第三章“开采沉陷特殊规律”中作详细介绍。

一、岩石的物理性质

岩石的物理性质是指由岩石固有的物质组成和结构特征所决定的比重、容重、空隙率、碎胀和渗透等基本属性。

1. 岩石的比重

岩石的比重是指岩石固体烘干重量与同体积纯水（4℃）的重量比。岩石的比重可在实验室内测定。岩石的比重（ G_s ）表达式为

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \quad (1-1)$$

式中 W_s ——岩石固体烘干重量，kN；

V_s ——岩石实体部分（不包含孔隙）的体积， m^3 ；

γ_w ——一个标准大气压下4℃时水的质量密度， kN/m^3 。

岩石的比重在数值上等于其密度，它取决于组成岩石的矿物比重及其在岩石中的相对含量。成岩矿物的比重越大，则岩石的比重越大。反之，则岩石的比重越小。

2. 岩石的容重

1) 岩石的天然容重

岩石的天然容重是指单位体积（包括孔隙在内）岩石的重量。其表达式为

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

式中 γ ——岩石的天然容重， kN/m^3 ；

G ——具有自然湿度的岩石试样的重量，kN；

V ——包括孔隙在内的岩石试样的体积， m^3 。

2) 岩石的干容重

岩石的干容重是指岩块中的孔隙水全部蒸发后的单位体积重量（108℃烘24h），其表达式为

$$\gamma_d = \frac{G_d}{V} \quad (1-3)$$

式中 γ_d ——岩石的干容重， kN/m^3 ；

G_d ——烘干后的岩石试样的重量， kN 。

岩石容重取决于组成岩石的矿物成分、孔隙发育程度及其含水量。岩石容重的大小在一定程度上反映出岩石力学性质的优劣。一般来说，岩石容重越大，其力学性质也越好，反之，则越差。

3. 岩石的空隙性

岩石的空隙性是岩石中孔隙性和裂隙性的统称，它反映岩石中孔隙和裂隙的发育程度，常用空隙率（ η ）表示。岩石的空隙率是指岩石的空隙体积与岩石总体积之比，其表达式为

$$\eta = \frac{v'}{v} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 v' ——岩石试样中孔隙和裂隙的总体积， m^3 ；

v ——包括空隙在内的岩石试样体积， m^3 。

一般来说，空隙率大的岩石，其整体性较差，岩石的容重较小，强度较低，而透水性较好，风化速度较快，反之亦然。

4. 岩石的碎胀性

从岩体中采掘或崩落下来的碎石，其整个体积大于它的岩体内的体积。这种体积增大的性质，叫作岩石的碎胀性。岩石的碎胀性通常用碎胀系数来表示。岩体碎胀系数（ k ）的表达式为

$$k = \frac{v + \Delta v}{v} \quad (1-5)$$

式中 $v + \Delta v$ ——采掘或崩落下来的碎石总体积， m^3 ；

v ——碎石在岩体内的体积， m^3 。

实践证明，岩石的碎胀系数恒大于1，其数值取决于岩石的组成、结构、强度、岩石块度的大小与排列方式等因素。

5. 岩石的透水性

岩石允许水透过的性能称为岩石的透水性。水只能沿连通的空隙渗透，而大多数岩石中的孔隙、裂隙是连通的，在一定压力作用下，水可以在岩石中通过（渗透）。岩石透水性的强弱可用渗透系数来衡量。渗透系数（ K_s ）的表达式为

$$K_s = \frac{Q}{iA} \quad (1-6)$$

式中 K_s ——岩石的渗透系数， cm/s ；

Q ——渗透流量， cm^3/s ；

A ——过水的法向断面, cm^2 ;

i ——水力坡度。

渗透系数是一个重要的水文地质参数, 它不仅是衡量岩石透水性能的指标, 而且是评价地下水资源和计算涌水量的重要参数, 其值主要取决于岩石空隙的大小、数量、方向及其连通程度。

二、岩石的力学性质

岩石的力学性质主要是指岩石的变形特征及岩石的强度。不同性质岩石的应力应变关系、变形条件或破裂条件等都不同。

1. 岩石的变形指标

泊松比和弹性模量是表征岩石的两个重要变形指标。

1) 泊松比

泊松比是指岩石在单轴压缩条件下横向应变和轴向应变的比值, 也称横向变形系数, 泊松比 (μ) 的表达式为

$$\mu = -\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_a} \quad (1-7)$$

式中 ε_c 、 ε_a ——岩石试件的横向应变、轴向应变。

2) 弹性模量

弹性模量是指材料在弹性变形阶段内正应力和对应的正应变的比值。当岩石在单向受压条件下, 弹性模量 (E) 的表达式为

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1-8)$$

式中 E ——岩石的弹性模量, kPa ;

σ ——轴向应力, kPa ;

ε ——对于轴向应力的轴向应变。

2. 岩石的强度

岩石的强度常用的指标有单轴抗压强度、单轴抗拉强度、抗剪强度和三轴抗压强度。

(1) 岩石的单轴抗压强度是指岩石试件在无侧压且只受轴向荷载作用下, 所能承受的最大压应力。它是目前采矿工程中使用最广泛的岩石力学性质参数。岩石的抗压强度可通过实验室内的岩石力学试验系统测得。

(2) 岩石的单轴抗拉强度是指岩石试件在单轴拉应力作用下所能承受的最大值。

(3) 岩石的抗剪强度是指岩石抵抗剪切破坏的极限强度。根据剪切试验时加载方式不同, 可分为抗切强度、抗剪强度和摩擦强度。

(4) 岩石的三轴抗压强度是指岩石在三向应力作用的强度, 常通过三轴应力试验测得。

3. 岩石的硬度分级

岩石坚固性系数 (f) 表征的是岩石硬度的相对值。把岩石单轴抗压强度极限的 1/10 作为岩石的坚固性系数, 即

$$f = \frac{R_c}{10} \quad (1-9)$$

式中 R_c ——岩石的单轴抗压强度，MPa。

岩石的坚固性系数 (f) 是个无量纲的值，在矿山工程中，为了使用方便，常常按照 f 大小，把岩石粗略分为 3 类：

(1) 硬岩石 ($f > 8$)：石英岩、玄武岩、花岗岩、硬砂岩、砂质页岩。

(2) 中硬岩石 ($3 < f \leq 8$)：石灰岩、大理岩、铁矿石、软砾岩。

(3) 软岩 ($f \leq 3$)：页岩、泥灰岩、石膏、冻土、无烟煤、胶结砾岩、硬表土、黄土、砾石、黏土。

第三节 开采引起岩层移动的机理

一、岩层内的应力状态

未经采动的岩体，在地壳内受到各个方向力的约束，处于自然应力平衡状态。岩体内的应力状态主要取决于上覆岩层的重量和性质。如图 1-1 所示，假设地面为水平，岩体为线弹性体，在深度为 H 的岩体内，有一个微小的单元体，在开采前，它处于原始的应力平衡状态，它的各面上的剪应力 τ_{xy} 为零，自重应力（或称铅直应力） σ_z 和水平应力 σ_x 、 σ_y 可分别表示如下：

$$\begin{cases} \sigma_z = \gamma H \\ \sigma_x = \sigma_y = \lambda \sigma_z \\ \tau_{xy} = 0 \end{cases} \quad (1-10)$$

式中 γ ——上覆岩土容重， kN/m^3 ；

H ——单元体的埋藏深度，m；

λ ——侧向压力系数；

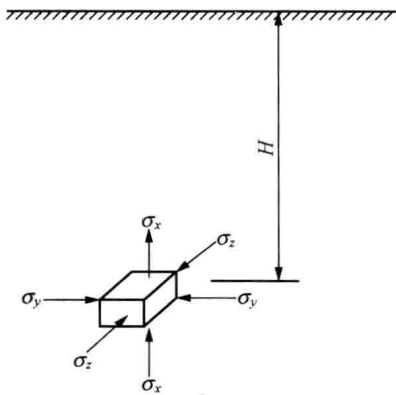


图 1-1 岩层内的应力状态

在岩土力学中，侧压力系数是指水平压应力与垂直压应力之比。侧压力系数的大小取决于岩石的泊松比。大量试验表明，岩石的泊松比并非常量，它是随着铅直应力的增加而增大，因而侧压系数也增大，并逐渐趋于 1。

如图 1-1 所示，在岩体处于应力平衡状态时，单元体的上部岩层会产生一个铅直向下的应力 σ_z ，若忽略单元体的自重，其下部也会产生一个向上的反作用力 σ_z 。在这两个力的作用下，单元体会在铅直方向上产生压缩变形，而在水平方向产生伸长变形。

岩土体的自重应力随深度呈线性增长。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。

二、岩层移动和破坏的过程

为了便于理解，以近水平煤层开采为例，说明覆岩移动和破坏过程及其应力状态的变化。如图 1-2 所示，由于工作面的推进，当地下煤层采出后，采空区周围原有的应力平衡遭到破坏，引起应力重新分布，采空区边界煤柱及其边界上、下方的岩层内应力增高，其应力大于采前的正常压力，使该区煤柱和岩层被压缩，有时被压碎，挤向采空区。而采空区的顶板岩层内应力降低，其应力小于采前的正常压力，使该区岩层产生回弹变形，顶板上部岩层由于受下部岩层移向采空区的结果，可能在顶板岩层内形成离层。

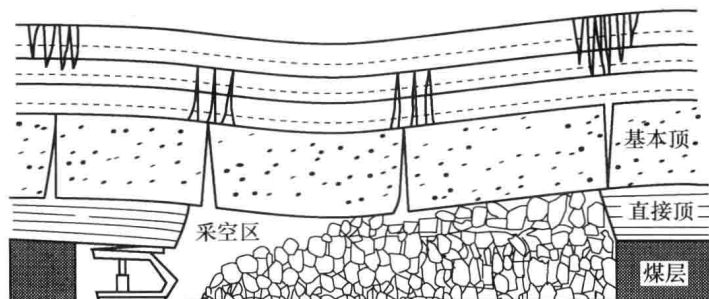


图 1-2 采空区上覆岩层移动

随着工作面向前推进，受到采动影响的上覆岩层范围不断扩大，采空区的直接顶在自重及其上覆岩层的作用下，产生向下的移动和弯曲。当其内部应力超过岩层的极限抗拉强度时，直接顶首先断裂、破碎，相继垮落，而基本顶岩层则以梁、悬臂梁弯曲的形式沿层理面法向方向移动、弯曲，进而产生断裂、离层。随着工作面继续推进，上覆岩层继续产生移动和破坏。这一过程和现象称为岩层移动。

由于岩层移动，致使顶板岩层悬空且其部分重量传递到周围未直接采动的岩体上，从而引起采空区周围岩体内的应力重新分布，如图 1-3 所示，形成增压区（支承压力区）和减压区（卸载压力区）。在采空区边界煤柱及其上、下方的岩层内形成支承压力区，在这个区域，煤柱和岩层被压缩，有时被压碎，挤向采空区。由于增压的结果，使煤柱部分被压碎，承受载荷的能力减小，于是支承压力区向远离采空区方向转移。在回采工作面的

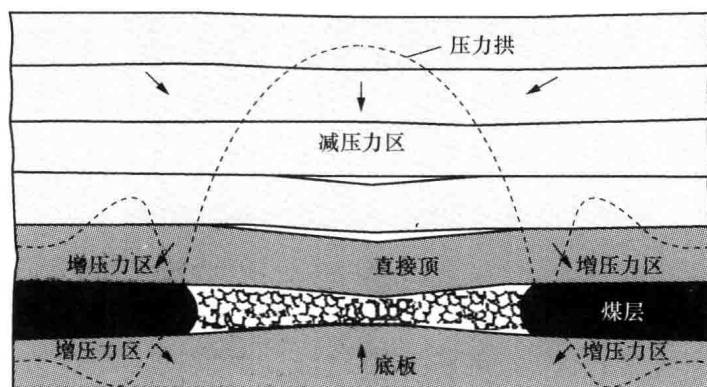


图 1-3 采空区围岩应力分布

顶、底板岩层内形成减压区，其压力小于开采前的正常压力。由于减压的结果，使岩层像弹性恢复那样发生膨胀，在顶板岩层内可能形成离层。而底板岩层除受减压影响外，还要受水平方向的压缩，会出现采空区底板向上隆起的现象。

在倾斜煤层（图 1-4），特别是急倾斜煤层（图 1-5）开采条件下，岩层移动的主要特征是岩石沿层面错动。在采空区上边界上方，岩层和煤在自重力的作用下，顶板岩层在产生法向弯曲的同时，受沿层理面柱分力的作用而产生沿层理面向采空区方向的错动和滑落。当煤层倾角接近和大于 50° 时，这种现象可扩展到煤层的底板岩层。若煤层的顶、底板岩层强度均较小时，则可同时产生沿层理面的下滑。

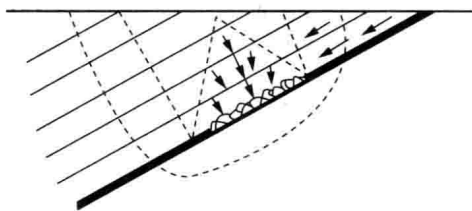


图 1-4 倾斜煤层开采围岩移动

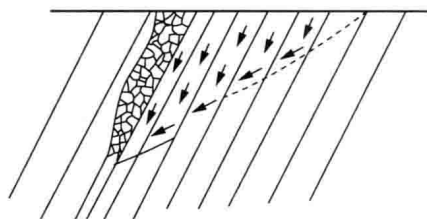


图 1-5 急倾斜煤层开采围岩移动



本章复习题

1. 简述开采沉陷的定义。
2. 简述开采沉陷与其他学科的关系。
3. 简述开采沉陷研究的发展历史。
4. 简述开采沉陷研究的作用及意义。
5. 岩石的物理力学性质有哪些？
6. 简述地下开采引起岩层移动的过程。

第二章 开采沉陷基本规律

第一节 岩层移动和破坏规律

一、岩层移动和破坏的过程

由于工作面的推进,当地下煤层采出后,采空区周围原有的应力平衡遭到破坏,引起应力重新分布,采空区边界煤柱及其边界上、下方的岩层内应力增高,其应力大于采前的正常压力,使该区煤柱和岩层被压缩,有时被压碎,挤向采空区。而采空区的顶板岩层内应力降低,其应力小于采前的正常压力,使该区岩层产生回弹变形,顶板上部岩层由于受下部岩层移向采空区的作用,可能在顶板岩层内形成离层。

随着工作面向前推进,受到采动影响的上覆岩层范围不断扩大,采空区的直接顶在自重及其上覆岩层作用下,产生向下的移动和弯曲。当其内部应力超过岩层的极限抗拉强度时,直接顶首先断裂、破碎,相继垮落,而基本顶岩层则以梁、悬臂梁弯曲的形式沿层理面法向方向移动、弯曲,进而产生断裂、离层。随着工作面继续推进,上覆岩层继续产生移动和破坏,这一过程和现象称为岩层移动。

二、岩层移动和破坏的形式

在岩层移动过程中,采空区周围岩层的移动和破坏形式主要有垮落、弯曲、煤的挤出、岩石沿层面的滑移、岩石的下滑、底板的隆起。

1. 垮落

垮落是岩层移动过程中最剧烈的形式,通常只发生在采空区直接顶板岩层中。当煤层采出后,采空区附近上方岩层弯曲而产生拉伸变形。当拉伸变形超过岩层的允许抗拉强度时,岩层破碎成大小不一的岩块,无规律地充填在采空区。此时,岩体体积增大,岩层不再保持其原有的层状结构。

2. 弯曲

弯曲是岩层移动的主要形式。当地下煤层被开采后,从直接顶板开始岩层整体沿层面法线方向弯曲,直到地表。此时,有的岩层可能会出现断裂或大小不一的裂隙,但不产生脱落,保持层状结构。

3. 煤的挤出

采空区边界煤层在上覆岩层强大的压力作用下,部分煤体被压碎挤向采空区,这种现象称为煤的挤出(又称片帮)。由于增压区的存在,煤层顶底板岩层在围岩压力作用下产生竖向压缩,从而使采空区边界以外的上覆岩层和地表产生移动。

4. 岩石沿层面的滑移

在开采倾斜煤层时,岩石在自重力的作用下,除产生沿层面法线方向的弯曲外,还会