

普通高等教育规划教材

变形监测及 沉陷工程学

主编 胡海峰



煤炭工业出版社

普通高等教育规划教材

变形监测及沉陷工程学

主编 胡海峰

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

变形监测及沉陷工程学 / 胡海峰主编. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2019

普通高等教育规划教材

ISBN 978 - 7 - 5020 - 5494 - 6

I. ①变… II. ①胡… III. ①变形观测—高等学校—教材
②矿山开采—沉陷性—高等学校—教材 IV. ①P227 ②TD327

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 288752 号

变形监测及沉陷工程学 (普通高等教育规划教材)

主 编 胡海峰
责任编辑 郭玉娟
责任校对 邢蕾严
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 - 84657880 (读者服务部)
网 址 www.cciph.com.cn
印 刷 北京玥实印刷有限公司
经 销 全国新华书店

开 本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 13¹/₄ 字数 317 千字
版 次 2019 年 2 月第 1 版 2019 年 2 月第 1 次印刷
社内编号 20181477 定价 45.00 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

本书主要讲述了矿山开采沉陷理论及技术、采动对建(构)筑物的损害及防护措施、变形监测的理论及方法等,主要内容包括矿山开采引起的覆岩与地表移动规律、开采沉陷预计理论与实践、开采沉陷的实验研究方法等、开采对建(构)筑物的影响、建(构)筑物下压煤开采技术、保护煤柱的留设方法、变形及变形规律、监测网设计、水平及垂直变形监测的方法、变形监测数据处理等。

本书可作为测绘工程本科及相关专业研究生的专业教材,也可作为相关工程技术人员的参考书。

前 言

《变形监测及沉陷工程学》教材内容涉及矿山开采引起地表损害、采动对建筑物的损害及变形监测的理论方法，是提供给测绘工程、采矿工程和地质工程专业本科生、研究生的专业教材，同时也是矿山工程技术人员解决实际问题的技术参考书。教材涉及地质学、采矿学、矿山测量学、岩体力学、计算机等多门学科，在学习本课程之前，一般应先了解和学习测量学、高等数学、概率论与数理统计、地球科学概论、煤矿开采、误差理论与测量平差等相关课程。

全书共分三篇。第一篇为矿山开采沉陷理论及技术，主要内容包括矿山开采引起的覆岩与地表移动规律、开采沉陷预计理论与实践、开采沉陷的实验研究方法等。第二篇为采动对建（构）筑物的损害及防护措施，主要内容包括开采对建（构）筑物的影响、建（构）筑物下压煤开采技术、保护煤柱的留设等。第三篇为变形监测的理论与方法，主要内容包括变形及变形规律、监测网设计、水平及垂直变形监测的方法、变形监测数据处理等。

本书由胡海峰教授主编。参加编写的人员有胡海峰教授（前言、第一章至第六章）、廉旭刚副教授（第七章至第十章）、蔡音飞博士（第十一章），研究生王小华、陈胜云、郭博婷、张凯、褚夫玉、邓迪等参加了部分章节的编写工作。

本书反映了国内外在开采损害及变形监测中较为成熟的理论与技术，介绍了当前研究的最新理论与成果，同时也包括作者及同仁多年来的研究成果。本书是山西省教学改革项目和太原理工大学教学改革重点项目的主要教学研究成果。

本书部分内容及图表取自所列的参考文献，在此向原作者致谢！

由于编者水平所限，书中可能存在谬误之处，敬请专家、学者及读者批评指正。

作 者

2018年10月

目次

第一篇 矿山开采沉陷理论及技术

第一章 采动覆岩与地表移动规律	1
第一节 采动覆岩移动破坏规律	1
第二节 开采沉陷的一般规律	5
第三节 地表移动盆地的空间分布和时间过程	28
第四节 工作面推进过程中地表移动和变形规律	34
第五节 山区地表移动变形规律	36
第六节 影响地表移动和变形的地质采矿因素	40
第二章 采动地表移动变形预计	44
第一节 地表移动变形预计的意义及内容	44
第二节 地表移动变形预计方法	45
第三节 概率积分法	46
第四节 开采沉陷软件及地表移动变形预计	75
第三章 采动损害监测研究方法	86
第一节 观测站	86
第二节 地表移动变形监测	87
第三节 岩层移动观测	96
第四节 开采沉陷监测新技术	98

第二篇 采动对建(构)筑物的损害及防护措施

第四章 建筑物下压煤开采	106
第一节 采动地表移动变形对建筑物的影响	106
第二节 保护建筑物的开采措施	113
第三节 建筑物的抗变形防护措施	118

第五章 铁路、公路下开采	125
第一节 线路下采煤的特点	125
第二节 开采沉陷对铁路、公路的损害	126
第三节 铁路、公路下开采及防护措施	130
第四节 开采沉陷对地下管线的损害	131
第六章 建(构)筑物保护煤柱的留设	133
第一节 保护煤柱的概念与类型	133
第二节 保护煤柱留设参数的确定	134
第三节 保护煤柱的留设方法	136
第三篇 变形监测的理论与方法	
第七章 变形监测概述	142
第一节 变形监测的目的与意义	142
第二节 变形监测的精度和周期	145
第三节 变形监测网精度设计	146
第四节 变形监测技术进展	150
第八章 变形监测点布设与测量	156
第一节 沉降监测点布设与测量	156
第二节 位移基准点布设与测量	160
第九章 垂直位移监测	162
第一节 精密水准测量	162
第二节 精密三角高程测量	164
第三节 液体静力水准测量	167
第四节 建筑物垂直位移监测	170
第五节 建筑基坑回弹观测	171
第六节 建筑物倾斜观测	175
第十章 水平位移监测	180
第一节 交会法观测	180
第二节 视准线测量	181
第三节 引张线测量	184
第四节 垂线法挠度观测	187
第五节 激光准直测量	188

第十一章 监测资料的整理与分析	191
第一节 监测资料的整理	191
第二节 监测资料的分析	194
第三节 监测资料的预处理	197
参考文献	201

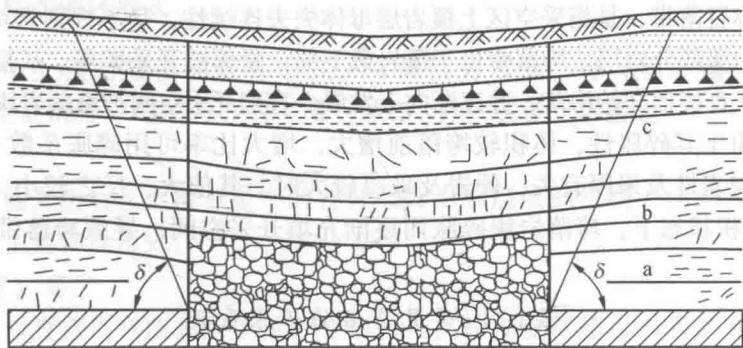
第一篇 矿山开采沉陷 理论及技术

第一章 采动覆岩与地表移动规律

第一节 采动覆岩移动破坏规律

各种有用的矿物赋存在地下岩体中的一定位置，与周围的岩体相接触，并保持其应力平衡状态。当地下的这些有用矿物被采出后，采出空间周围的岩层失去支撑而向采空区逐渐移动变形和破坏，这一移动变形过程随着开采工作面的不断推进，逐渐从采出空间位置向外（周边）、向上（顶板）扩展，直至波及地表，引起地表下沉和水平移动，形成地表下沉盆地。采动覆岩与地表移动变形的过程就是开采破坏原岩应力状态形成新的平衡的必然过程。

开采引起上覆岩体的移动和破坏在时间及空间上是一个复杂的过程，其从采空区至地表，覆岩破坏范围逐渐增大，破坏程度逐渐减弱，根据覆岩破坏特征一般将其划分为垮落带、裂隙带和弯曲下沉带，即上覆岩层移动变形“上三带”，如图1-1所示。

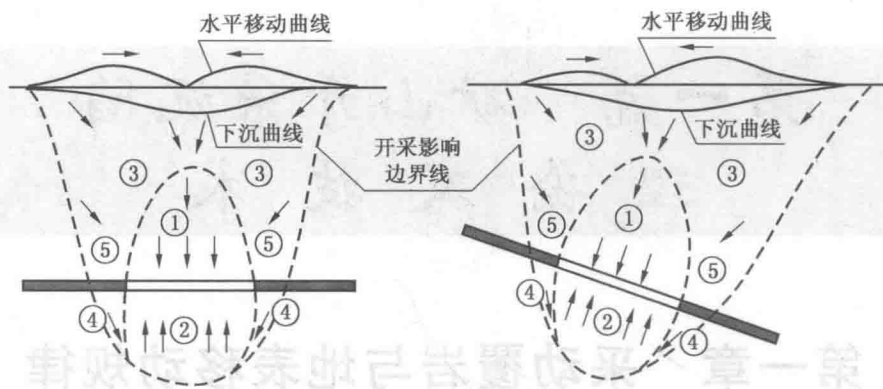


a—垮落带；b—裂隙带；c—弯曲下沉带； δ —移动角

图1-1 采动覆岩移动变形“上三带”分布图

覆岩移动变形状态可划分为垂直下移区、垂直上移区、垂直与水平移动区、底板下移区、开采支承压力区，如图1-2所示。

- (1) 垂直下移区。该区域的岩层在重力作用下作垂直于矿层的运动。
- (2) 垂直上移区。该区域的岩层在侧向及底板应力的作用下向上移动。



①—垂直下移区；②—垂直上移区；③—垂直与水平移动区；④—底板下移区；⑤—开采支承压区

图1-2 覆岩内部移动状态分布图

(3) 垂直与水平移动区。该区域的岩层在覆岩自重及水平应力的作用下，向采空区中心方向移动。

(4) 底板下移区。该区域的岩层在支承压力的作用下向底板卸压区移动。

(5) 开采支承压区。该区域的岩层要承受采空区上覆岩体重力的转移，形成开采支承压区。开采支承压力的应力值一般为原岩应力的1.5~3.0倍。

一、覆岩移动破坏“上三带”的形成及特征

覆岩移动和破坏具有明显的分带性，其分带特征与地质、采矿等因素有关。在采用走向长壁全部垮落法开采缓倾斜中厚矿层的条件下，只要采深达到一定深度，覆岩的破坏和移动就会出现分层，自下而上分别称为垮落带、裂隙带和弯曲下沉带（图1-1）。

1. 垮落带

垮落带也称冒落带，是指采空区上覆岩层母体失去连续性，呈不规则岩块或似层状巨块向采空区垮落的那部分岩层。垮落带位于覆岩最下部，紧邻被开采矿层。矿层开采后上覆岩层失去平衡，从直接顶开始垮落，并逐渐向上发展，直到开采空间被垮落岩块充满为止。

垮落岩块由于其碎胀性，体积较垮落前增大，增大比率可用碎胀系数（表1-1）表示。碎胀系数与岩性及采厚有关，硬岩及采厚较大时，其值大，反之较小，平均在1.2~1.6。在自由堆积状态下，垮落岩块碎胀而逐渐充填开采空间，导致垮落带发展到一定高度而自行停止。

表1-1 常见岩石的碎胀系数

岩石名称	碎胀系数	
	初始碎胀系数	残余碎胀系数
砂	1.06~1.15	1.01~1.03
黏土	<1.20	1.03~1.07
碎煤	<1.20	1.05
黏土页岩	1.40	1.10
砂质页岩	1.60~1.80	1.10~1.15
硬砂岩	1.50~1.80	

垮落带碎落岩块在上覆岩层自重压力下可逐渐压实,甚至部分形成再生顶板。厚矿层分层开采时,垮落岩块受重复采动的多次破坏,岩体碎度增大,碎胀系数减小。垮落带内岩块之间空隙多,连通性强,是水体和泥砂溃入井下的通道,也是瓦斯逸出或聚积的场所。

2. 裂隙带

裂隙带又称裂缝带,是指位于垮落带之上,含有与采空区相通的导水裂隙,但连续性未受破坏的那一部分岩层。裂隙带的裂隙主要有两种:一种是垂直或斜交于岩层的新生张裂隙,主要是岩层向下弯曲受拉而产生,可部分或全部穿过岩石分层;另一种是离层裂隙。离层裂隙发生在岩层与岩层之间,主要由上覆岩层向下异步弯曲移动所致。离层裂隙要占据一定空间,因此也是上部覆岩和地表下沉量减小的原因。离层裂隙是储水和导水的通道,裂隙带上部离层裂隙可以间接导水和积水,但因垂直裂隙不发育,导水性差。裂隙带下部垂向裂隙发育逐渐增强,离层裂隙和垂直裂隙带若波及水体,可将水导入井下。在水体下采矿时,垮落带和裂隙带之和称为导水裂隙带。

3. 弯曲下沉带

弯曲下沉带又称整体移动带,是指裂隙带顶部到地表的那部分岩层。弯曲下沉带基本呈整体移动,特别是带内为软弱岩层及松散土层时。在垂直剖面上,弯曲下沉带上下各部分下沉量差值很小。弯曲下沉带上部一般很少出现离层裂隙,但其下部可能出现离层裂隙。弯曲下沉带中的离层裂隙仅局部充水,不与导水裂隙带连通。

以上“三带”虽特征不同,但其界面是逐渐过渡的,因而具体划分时应合理掌握。根据地层及开采方法的不同,不是在所有开采条件下都会形成“三带”,如采用充填法管理顶板时,在覆岩中将不存在垮落带;在浅部厚矿层开采时,开采覆岩垮落破坏可能直达地表,此时将不存在裂隙带和弯曲下沉带。

二、覆岩移动破坏形式

开采过程中上覆岩层移动破坏形式,可概括为弯曲、垮(冒)落、煤的挤出(片帮)、岩石沿层面滑移、垮落岩石的下滑(或滚动)、底板岩层隆起。

1. 弯曲

当地下矿物采出后,上覆岩层中的各分层即沿岩层层面法线方向向采空区依次弯曲。弯曲是岩层的主要移动形式。

2. 垮(冒)落

矿层采出后直接顶弯曲而产生拉伸变形,当其拉伸变形超过岩石的允许抗拉强度时,直接顶及其上部的部分岩层便与整体分开,碎成块度不同的岩块,无规律充填采空区,岩层不再保持原来的层状结构。这是岩层移动过程中最剧烈的一种形式,通常只发生在采空区直接顶中。

3. 煤的挤出(片帮)

煤层采出后采空区顶板岩层内出现悬空,其压力便转移到煤壁(或煤柱)上,煤壁承受的压力增加,形成增压区(支承压区),煤壁在附加荷载的作用下,一部分煤被压碎,并挤向采空区,这种现象称为片帮。

4. 岩石沿层面滑移

在倾斜矿层条件下，岩层的自重力方向与岩层层面不垂直，岩石在自重力的作用下，除产生沿层面法线方向的弯曲外，还会发生沿层面方向的移动，称为滑移。如果把岩石的自重力分解为平行和垂直于岩层层面的两个分量，就可以明显地看出；随着矿层倾角的增大，岩石沿层面的滑移越明显。沿层面滑移的结果，使采空区上山方向的部分岩层受拉伸，甚至被拉断，而下山方向的部分岩层受压缩。

5. 垮落岩石的下滑（或滚动）

当矿层倾角较大且为下行开采时，下山部分矿层继续开采形成新的采空区，采空区上部垮落岩石可能下滑（或滚动），充填新的采空区。下滑使采空区上部空间增大，下部空间减小，使位于采空区上山部分的岩层和地表移动增大，而下山部分的岩层与地表移动减小。

6. 底板岩层隆起

如果矿层底板岩石很软且倾角大，矿层采出后，底板在垂直方向上减压，在水平方向上增压，造成底板向采空区方向隆起。

应该指出，在某一个具体的开采过程中，以上6种上覆岩层移动破坏形式不一定同时出现。

松散层的移动形式是垂直弯曲，不受矿层倾角影响。

三、岩层移动的典型形式

根据矿层的赋存条件，可将岩层移动的形态划分为3种典型形式。

1. 水平或缓倾斜矿层

在水平或缓倾斜矿层条件下，岩层移动形态如图1-3所示。矿层采出后矿层上覆岩层以层状弯曲的形式移动。这种条件一般不会因岩石的自重层面分力导致沿层面滑动，其条件可表示为

$$\alpha < \varphi$$

式中 α ——矿层倾角；

φ ——岩层中最软弱层面上的内摩擦角。

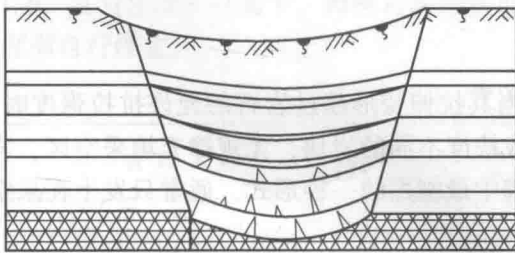
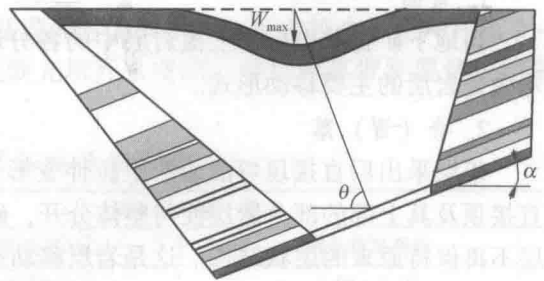


图1-3 水平及缓倾斜矿层开采岩层移动形态



W_{\max} —地表最大下沉值； θ —最大下沉角

图1-4 倾斜矿层开采岩层移动形态

2. 倾斜矿层

在倾斜矿层条件下，岩层移动形态如图1-4所示。当矿层采出后，其上覆岩层在层

状弯曲的同时,伴随微小的沿层面方向的相对移动。这种沿层面的移动,将导致在采空区下山方向的岩层和地表移动范围扩大。产生这种移动的条件为

$$\alpha \geq \varphi$$

3. 急倾斜矿层

在急倾斜矿层条件下,岩层移动形态如图1-5和图1-6所示。图1-5表明,矿层下盘(底板)发生移动,其发生的条件可近似表示为

$$\alpha > 45^\circ + \frac{\varphi}{2}$$

式中 φ ——岩石的内摩擦角。

对于沉积岩来说, φ 为 $26^\circ \sim 36^\circ$ 。一般矿层倾角为 $50^\circ \sim 60^\circ$ 时矿层下盘才产生移动。矿层下盘岩层的上部移动是沿层面的移动,而下部是沿 $\alpha > 45^\circ + \frac{\varphi}{2}$ 的角度移动。这种移动范围的大小不仅与煤岩倾角有关,而且与矿层底板各岩层的强度有关。

图1-6表明,开采急倾斜矿层时,位于移动盆地的上盘岩层是以悬臂梁弯曲形式移动。当各分层产生弯曲移动时,各分层岩层将沿弱面产生错动,由于这种错动的结果,岩层露头处将出现台阶状移动。

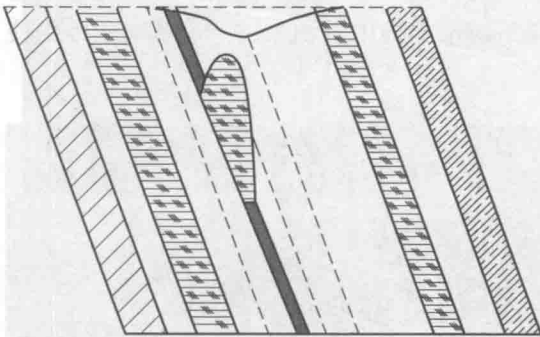


图1-5 急倾斜矿层开采岩层移动形态

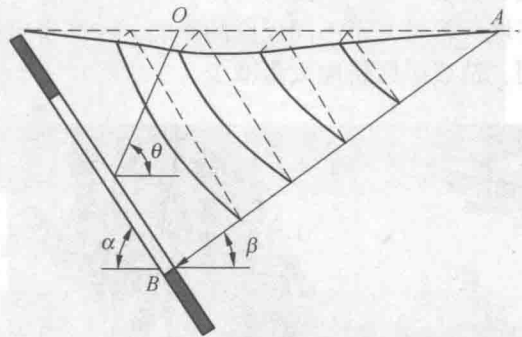


图1-6 急倾斜矿层开采岩层以悬臂梁形式移动示意图

第二节 开采沉陷的一般规律

开采沉陷规律是指地下开采引起的地表移动变形的大小、空间分布形态及其与地质采矿条件的关系。其内容主要包括水平、缓倾斜煤层及急倾斜煤层开采沉陷的分布规律;沉陷稳定后(静态)及工作面推进过程中(动态)的分布规律;简单地质条件和复杂地质条件下的分布规律等。

本节主要介绍移动盆地稳定后(静态)主断面内地表移动和变形分布规律、采动过程中(动态)主断面内地表移动和变形分布规律、地表移动盆地的空间分布和时间过程、地表移动和变形的预计方法、山区开采沉陷的一般规律。

一、地表移动变形的概念

(一) 地表移动的形式

所谓地表移动,是指采空区面积扩大到一定范围后,岩层移动发展到地表,使地表产生移动和变形,在地表沉陷研究中这一过程和现象称为地表移动。开采引起的地表移动过程受多种地质因素、采矿因素的影响,随开采深度、开采厚度、采煤方法及煤层产状等因素不同,地表移动和破坏的形式也不完全相同。当采深和采厚的比值(简称深厚比)较大时,地表的移动和变形在空间上和时间上是连续的、渐变的,具有明显的规律性;当采深和采厚的比值较小(一般小于30)或具有较大的地质构造时,地表的移动和变形在空间上和时间上将是不连续的,移动和变形的分布没有严格的规律性,地表可能出现较大的裂缝或塌陷坑。地表移动变形和破坏的形式,归纳起来有地表移动盆地、裂缝及台阶、塌陷坑。

1. 地表移动盆地

在开采影响涉及地表以后,受采动影响的地表从原有的标高向下沉降,从而在采空区上方地表形成一个比采空区面积大得多的沉陷区域,这种地表沉陷区域称为地表移动盆地,或称下沉盆地(图1-7)。地表移动盆地形成过程改变了地表原有的形态,引起了高低、坡度和水平位置的变化。因此,对位于盆地内部的道路、管路、河渠、建筑物、生态环境等都带来了不同程度的影响。在高潜水位地区移动盆地中可积水,严重影响土地的使用,造成矿区耕地大量减少。



图1-7 某矿1102工作面塌陷盆地

2. 裂缝及台阶

在地表移动盆地的外边缘区,地表可能产生裂缝。裂缝的深度和宽度与有无第四纪松散层及其厚度、性质和变形值大小密切相关。若第四纪松散层为塑性大的黏性土,一般地表拉伸变形值超过6~10 mm/m时地表才发生裂缝。塑性小的砂质黏土、黏土质砂等,地表拉伸变形值达到2~3 mm/m时地表即可发生裂缝。地表裂缝可分为永久裂缝和动态裂缝。地表永久裂缝一般平行于采空区边界发展,发生在采空区边界以外的拉伸变形区,如图1-8和图1-9所示。动态裂缝随工作面推进而发生,一般情况下在推进中的工作面前

方地表发生平行于工作面的裂缝，随工作面推进地表先受拉伸变形再受压缩变形，裂缝也呈先张后闭的趋势，如图 1-10 所示。

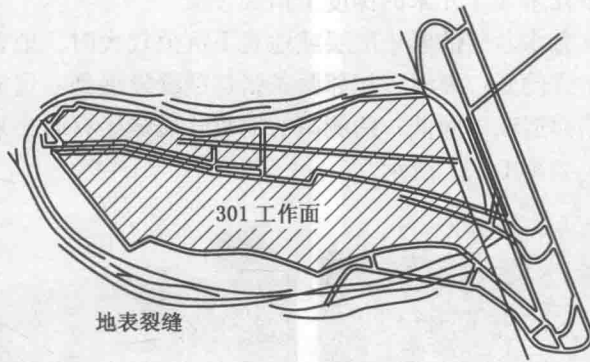


图 1-8 某矿 301 工作面实测地表裂缝

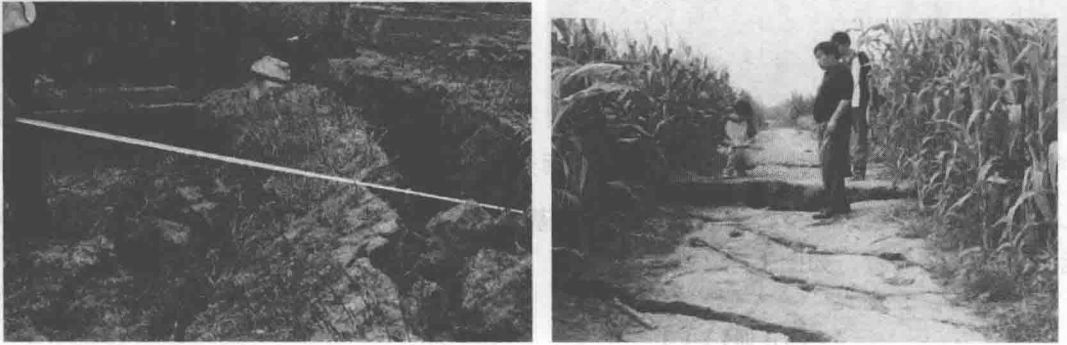


图 1-9 某矿 1102 工作面开采地表塌陷裂缝

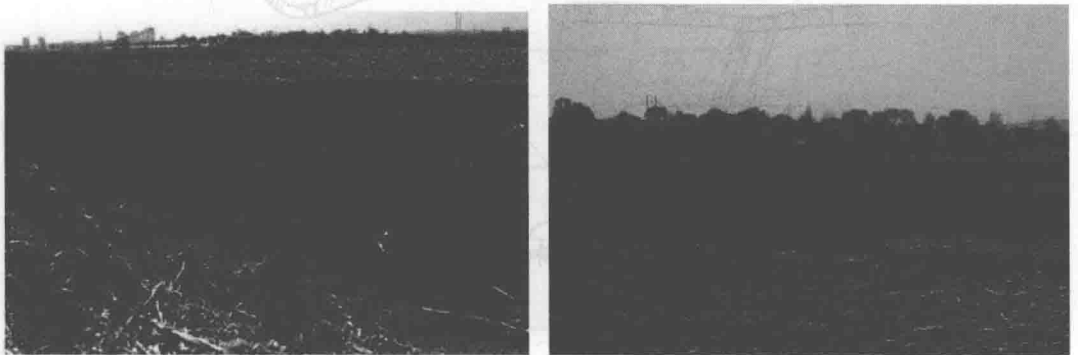


图 1-10 某矿 1101 工作面开采地表动态裂缝

地表裂缝的形状为楔形，地面的开口大，随深度的增大而减小，到一定深度后尖灭。我国某煤矿槽探资料表明，盆地边缘往往出现拉张裂隙，其深度为 3~5 m，一般不超过 10 m，其宽度自上而下渐窄，直至一定深度便闭合消失。当采深很小、采厚较大时，地表裂缝有可能与采空区相连通。

在采深和采厚比值较小时，地表裂缝的宽度可达到数百毫米，裂缝两侧地表可能产生

落差。落差的大小取决于地表移动的剧烈程度。在松散层很厚的条件下，分层开采厚煤层时，开采第一分层时地表产生的主要裂缝会在第二、三、四等分层开采时再次出现，但这种裂缝往往在地表以下几米或十几米的深度上消失。

当煤系地层覆盖有含水砂层的厚松散层或地表下沉值较大时，地表移动盆地的边缘可能产生一系列类似地堑式的张口裂缝。相邻两条张口裂缝发展到一定的宽度和深度后，两条裂缝中间的土层下陷而造成中间低、两侧高的地堑式裂缝。有时，采空区周围的地表可以形成环形破坏堑沟，如图 1-11 所示。



图 1-11 某矿采煤工作面开采地表台阶及地堑式裂缝

在急倾斜煤层条件下，地表移动取决于基岩的移动特征，特别是松散层较薄时地表可能出现裂缝或台阶，如图 1-12 所示。

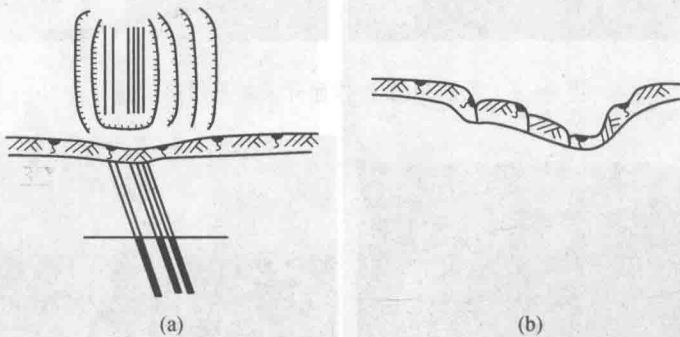


图 1-12 开采急倾斜煤层时地表移动特征

3. 塌陷坑

塌陷坑多出现在急倾斜煤层开采条件下。但在浅部缓倾斜或倾斜煤层开采，地表有非连续性破坏时，也可能出现漏斗状塌陷坑，如图 1-13 所示。在采深很小或采厚很大的情况下，用房柱式采煤或硐室式水力采煤时，由于采厚不均匀，造成覆岩破坏高度不一致，也会在地表产生漏斗状塌陷坑。

图 1-14 所示为平庄古山矿用水力采煤法开采浅部煤层时地表出现的塌陷坑。应当指出，在采深很小、采厚很大且用长壁式采煤法开采时，若采厚不一致，地表也可能出现漏斗状塌陷坑。

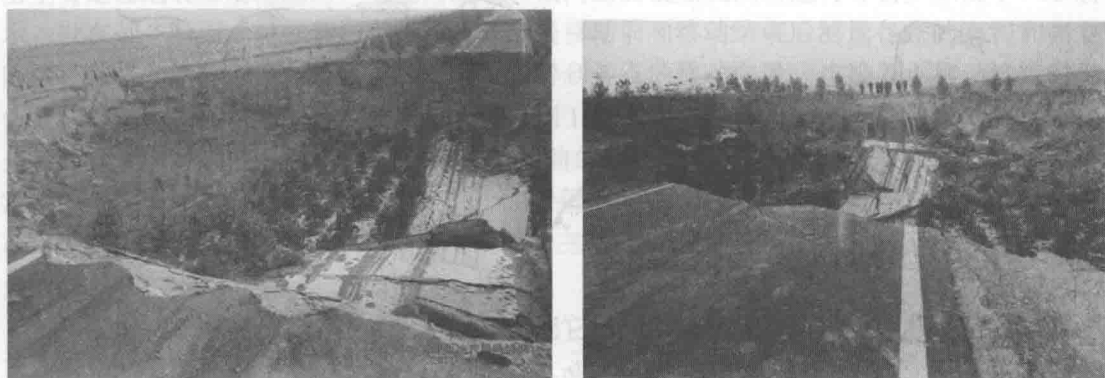


图 1-13 某矿 9308 工作面开采地表塌陷坑

在有含水层的松散层下采煤时，不合理地提高回采上限，也会在地表引起漏斗状塌陷坑。开滦唐家庄矿用水力采煤法开采厚度为 3.1~3.5 m、倾角 15° ~ 21° 的煤层，设计开采上边界距松散层底板垂高为 18 m，由于水枪落煤超过回采上限，造成水砂溃入大巷，地面出现直径为 30 m、深 11~13 m 的塌陷坑。鹤岗富力矿用倾斜分层下行垮落法开采厚度为 4~6 m、倾角 23° ~ 24° 的煤层，地表未出现塌陷坑。但由于该工作面上边界以上是采用落垛法回采，垮落破坏达到松散层底部，因此在地表产生了直径为 5~6 m、深 4~5 m 的圆形塌陷坑（图 1-15）。

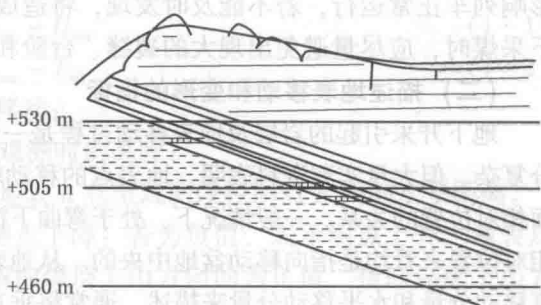


图 1-14 平庄古山矿浅部开采地表塌陷坑

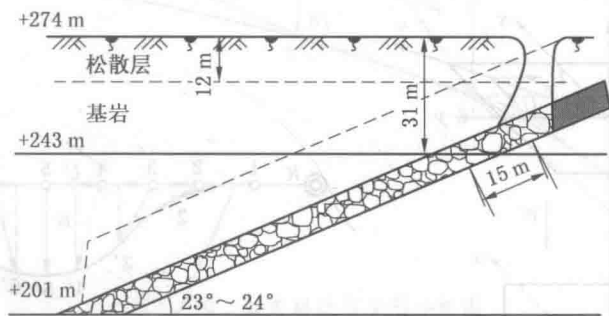


图 1-15 鹤岗富力矿浅部开采地表漏斗状塌陷坑

急倾斜煤层开采时，煤层露头处附近地表呈现出严重的非连续性破坏，往往也会出现漏斗状塌陷坑。塌陷坑大体位于煤层露头的正上方或略微偏离露头位置，偏离的距离与煤层倾角、顶底板岩性及基岩表面风化程度有关。塌陷坑的形状取决于松散层的性质和厚度。在有厚松散层覆盖的情况下多呈圆形或井形，有时也呈口小肚子大的坛式塌陷漏斗，如图 1-16 所示。