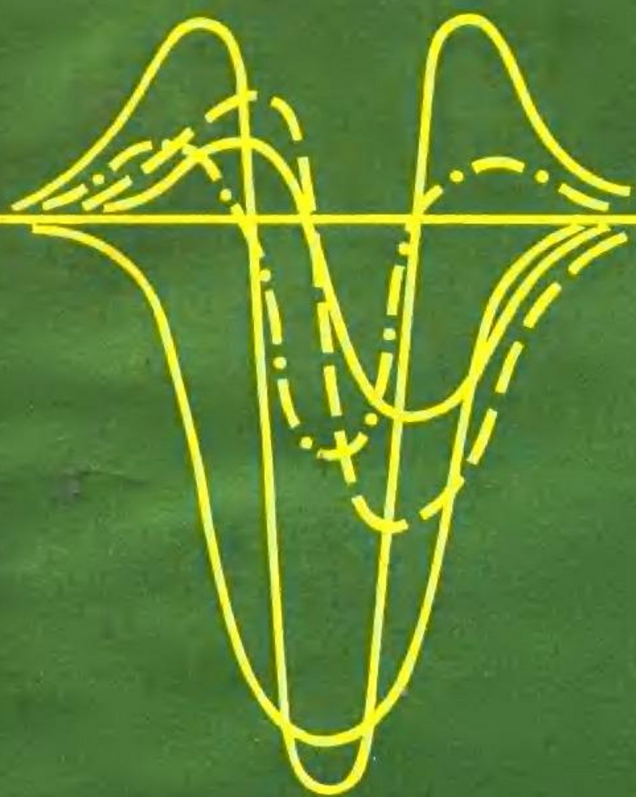




煤炭科学研究院北京开采研究所 编著

煤矿地表移动与 覆岩破坏规律及其应用

煤炭工业出版社

TD32

5

3

煤矿地表移动与 覆岩破坏规律及其应用

煤炭科学研究院北京开采研究所 编著

煤炭工业出版社

A 865908

内 容 提 要

本书比较系统、详细地讨论和分析了煤矿地表移动、覆岩破坏的基本规律及其在水体下、建筑物下、铁路下采煤中的应用。书中着重论述了地表下沉盆地主剖面 and 全面积的地表移动规律及计算地表移动和变形的概率积分法；覆岩破坏的特征、形态和最大高度的计算方法；民用建筑物受采动影响的变形与附加作用力的计算；水体下采煤可能性和可靠性的评价方法及减少采动影响的综合开采技术措施等。

本书可供煤矿、冶金、化工、建材等的矿山开采、矿山测量、矿井地质、水文地质、土建等专业的生产、设计、科研人员及高等院校师生参考，也可供矿区城市规划设计部门的有关专业人员参考。

煤 矿 地 表 移 动 与 覆 岩 破 坏 规 律 及 其 应 用

煤炭科学研究院北京开采研究所 编著

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平北路16号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ 印张 $23^{1/2}$ 插页 3
字数 558 千字 印数 1—2,200
1981年12月第1版 1981年12月第1次印刷
书号 15035·2413 定价 3.00元

前 言

在煤矿生产和建设中,经常遇到大量的地面各类水体、建筑物、铁路及矿井井巷。这些水体、建筑物、铁路及矿井井巷,在一般情况下,需要留设煤柱予以保护,从而造成了地下资源的积压和浪费。因此,研究不留或少留煤柱,并保护地面水体、建筑物、铁路、矿井井巷免遭破坏,实现在上述特殊条件下的安全采煤,是煤矿生产建设中一项具有长远和现实意义的重要综合性技术。不断发展,运用这项综合技术,对合理开发与利用煤炭资源、减少储量损失、挖掘生产潜力、延长矿井寿命及保证安全生产,具有重要的作用。

为了总结交流我国二十多年来在水体、建筑物、铁路等特殊条件下采煤及矿井井巷保护技术的实践经验及科学研究成果,推动采煤引起的采动影响这门学科及特殊条件下开采技术的发展,满足煤矿生产建设的迫切需要,我们在多年来从事这方面科学研究工作的基础上,编写了《煤矿地表移动与覆岩破坏规律及其应用》一书。

全书共分五篇二十四章。第一篇详细地论述了开采各种倾角煤层条件下地表下沉盆地主剖面 and 全面积的地表移动规律及计算地表移动和变形值的概率积分法,分析了概率积分法的各种计算参数及其与采煤地质因素的关系;第二篇论述了大面积采场覆岩破坏的规律,分析了覆岩破坏的特征、形态和最大高度,提出了覆岩破坏最大高度的计算方法和公式;第三篇讨论了民用建筑物受采动影响的变形和附加作用力的计算;第四篇阐述了以地层结构分析、采动影响预测、安全煤(岩)柱留设及技术途径选择等四个方面为内容的评价水体下采煤可能性和可靠性的综合评价方法;第五篇介绍了减少采动影响的综合开采技术体系。书末有五个附表,介绍了概率积分法的计算数据及表格。

本书由刘天泉同志总编审。书中第一篇以仲惟林同志为主编写,朱仁诒、耿德庸、杨秀英等同志参加部分编写工作;第二、四、五篇以刘天泉同志为主编写,郑世燕、刘修源、文学宽等同志参加部分编写工作;第三篇由焦传武同志编写。

本书在编写过程中,得到了长期同我们协作的许多矿务局和煤矿的大力支持,并提供了大量的实测资料,在此表示衷心的感谢。

由于作者的水平所限,书中不妥之处,恳请读者批评指正。

目 录

第1篇 地表移动与变形的规律

第一章 地表移动概述	2
第一节 地表移动研究现状	2
第二节 地表移动基本概念	3
第三节 地表移动计算方法简介	7
第二章 地表下沉盆地主剖面的移动与变形规律	9
第一节 下沉盆地主剖面的最终移动和变形	9
第二节 下沉盆地主剖面的最终移动和变形分布特征	18
第三节 地表的动态移动和变形	25
第四节 地表点的下沉速度	30
第三章 地表下沉盆地全面积的移动和变形分布规律	34
第一节 地表任意点A的下沉	34
第二节 地表任意点A沿任意方向 φ 的倾斜	35
第三节 地表任意点A沿任意方向 φ 的曲率	36
第四节 地表的扭曲	38
第五节 地表任意点A沿任意方向 φ 的水平移动	38
第六节 地表任意点A沿任意方向 φ 的水平变形	39
第七节 地表的剪应变	40
第八节 地表下沉盆地全面积的移动和变形分布规律	42
第四章 地表移动基本参数的变化规律及确定方法	50
第一节 地表移动参数的变化规律	50
第二节 地表移动参数的确定方法	61
第三节 确定地表移动参数实例	68
第五章 特殊条件下的地表移动和变形	74
第一节 断层对地表移动规律的影响	74
第二节 有向斜构造时的地表移动特征	76
第三节 极不充分采动地表移动和变形	77
第四节 松散层内有流砂层的地表下沉特征	79
第五节 地表倾斜地貌及大倾斜值对地表水平变形的影响	80
第六章 地表移动和变形值的计算方法	82
第一节 全面开采的地表下沉盆地主剖面移动和变形值计算方法	82
第二节 条带法开采的地表下沉盆地主剖面移动和变形值计算	98
第三节 地表下沉盆地任意点任意方向移动和变形值计算实例	102
第四节 用电子计算机计算地表下沉盆地任意点任意方向的移动和变形值	108
第五节 应用矩形格网法计算地表下沉盆地任意点任意方向的移动和变形值	112

第2篇 覆岩破坏规律

第七章 采场采动影响规律概述	130
----------------------	-----

第一节	一般概念	130
第二节	采场采动影响的空间-时间关系	131
第三节	采场采动影响的主要规律	133
第八章	煤层覆岩破坏的特征及最终形态	136
第一节	覆岩破坏的两种类型及其产生条件	136
第二节	覆岩破坏的特征	136
第三节	覆岩破坏范围的最终形态	149
第九章	煤层覆岩破坏范围的最大高度	165
第一节	覆岩破坏最大高度的现场实测结果	165
第二节	影响覆岩破坏范围最大高度的主要因素	185
第十章	地表破坏与覆岩破坏的关系	214
第一节	地表破坏的特征及形态	214
第二节	地表破坏和覆岩破坏的连通性	223
第3篇 民用建筑物受采动影响的变形与附加作用力的计算		
第十一章	地表移动和变形对建筑物与构筑物的影响和损害	230
第一节	地表下沉的影响	230
第二节	地表倾斜的影响	231
第三节	地表曲率的影响	232
第四节	地表扭曲和建筑物扭转间的关系	235
第五节	建筑物基础和地基间水平变形的关系	237
第十二章	具有带形基础的民用建筑物因地表弯曲引起附加内力的 计算与应力校核	238
第一节	矩形平面建筑物附加内力的计算	238
第二节	内墙非对称布置时矩形平面建筑物附加内力的计算	248
第三节	建筑物墙体的应力校核与加固	251
第十三章	地表水平变形引起建筑物附加内力的计算	255
第一节	作用于建筑物基础上的土壤侧压力	255
第二节	沿基础底面和侧表面摩擦力的计算	258
第三节	建筑物基础附加应力的变化规律及附加外力的计算	261
第十四章	地表剪切变形引起建筑物附加内力的计算	264
第一节	无内墙矩形平面建筑物附加内力的计算	264
第二节	有内承重墙矩形平面建筑物附加内力的计算	268
第十五章	地表扭曲变形引起建筑物附加内力的分析与计算	271
第一节	无内承重墙矩形平面建筑物附加内力的计算	271
第二节	无内承重墙矩形平面建筑物附加内力计算公式的分析	277
第三节	有对称布置内承重墙矩形平面建筑物附加内力的计算	279
第四节	考虑建筑物柔性条件下附加内力的计算	279
第十六章	应用有限单元法计算与分析受采动影响建筑物的附加应力	282
第一节	概述	282
第二节	计算模型的选择	283
第三节	建筑物基础底面的移动与变形实测值为已知条件下附加应力的计算与分析	285

第四节 地表移动与变形预计值为已知条件下建筑物附加应力的计算	288
第4篇 水体下采煤可能性和可靠性评价方法	
第十七章 覆岩地层结构分析	294
第一节 地层结构与地层结构分析方法概念	294
第二节 隔水层及其评价依据	295
第三节 水体的水文地质结构类型及其对水体下采煤的影响	303
第四节 地层的水文地质结构类型及其对水体下采煤的影响	306
第十八章 采动影响预测	311
第一节 采动影响对岩层和土层隔水性的破坏	311
第二节 采动影响的控制	312
第十九章 安全煤(岩)柱留设	313
第一节 安全煤(岩)柱类型及其适用条件	313
第二节 安全煤(岩)柱安全度分析	316
第三节 安全煤(岩)柱留设方法	324
第二十章 技术途径选择	330
第一节 水体下采煤的主要技术途径	330
第二节 水体下采煤技术途径的选择方法	333
第5篇 减少矿井采动影响的综合开采技术体系	
第二十一章 综合开采技术体系的实质和基础	336
第二十二章 建筑物下、铁路下采煤综合开采技术体系的主要原则	340
第一节 全柱开采	340
第二节 等厚开采	343
第三节 同时开采	345
第四节 择优开采	345
第五节 协调开采	346
第六节 连续开采	347
第七节 平行长轴开采	348
第八节 对称背向开采	349
第二十三章 水体下采煤综合开采技术体系的主要原则	350
第一节 分层间歇开采	350
第二节 长走向小阶段间歇开采	352
第三节 正常等速开采	352
第四节 试探开采	354
第五节 分区开采	355
第二十四章 综合开采技术体系的采煤方法和顶板管理方法	356
第一节 全部垮落方法	356
第二节 全部充填方法	358
第三节 条带开采方法	359
附表1~5	366
主要参考文献	368

第 1 篇

地表移动与变形的规律

第一章 地表移动概述

第一节 地表移动研究现状

早在十九世纪末,采矿引起的覆岩移动与破坏以及由此造成的井巷和地面建筑物的损害就引起了人们的注意,并进行了初步的观察和记录。本世纪三十年代,在一些产煤先进国家已把岩层与地表移动作为一项科学研究工作。从1950年起到现在,岩层与地表移动的科学研究工作获得了蓬勃的发展。特别是进入七十年代以来,由于煤炭工业的迅速发展,水体下、建筑物下、铁路下(简称“三下”,下同)采煤的客观需要,新的现场测试仪器的出现以及电子计算机的广泛使用,使岩层与地表移动的科学研究工作发展到了一个新的阶段。当前,岩层与地表移动学科已成为采矿科学的重要内容,成为解决“三下”采煤和井巷保护技术的基础理论之一。近十余年来多次召开了包括有岩层与地表移动内容的国际专业会议,说明这一学科在各国国民经济活动中占有重要的地位。国际上有许多学者,从事于岩层与地表移动的科学研究工作,例如西德的勃劳聂尔、克拉茨、聂姆茨克、克因赫尔斯特,英国学者金、瓦尔德、苏联学者阿维尔申、卡札柯夫斯基、阿基莫夫、柯尔宾阔夫,波兰学者布得雷克、克诺特、李特维尼申、柯赫曼斯基、科瓦尔契克、什佩特科夫斯基,匈牙利学者马尔托什,捷克学者聂谢塔,南斯拉夫学者伯特利奇等。

岩层和地表移动最初的研究工作是从现场实地观测开始的。目前已从个别测点的观测发展到由两条或三条线组成的观测站,以至网状观测站。自动记录仪器的出现使测量移动的全过程和预报工作成为可能。现场观测为认识岩层和地表移动规律提供了大量的数据。许多科学结论都是在分析大量实测资料基础上得出来的。在我国,为探索规律而进行的现场实测工作开始于五十年代,特别是从1954年以来,各主要矿区都分别建立了十几个至几十个地表移动观测站,获得了关于本矿区岩层和地表移动完整资料,也为建立计算方法提供了依据。各矿区现在应用的以实测资料为基础的计算方法,能够满足“三下”采煤和建筑物、井巷保护的要求。

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,室内实验被提到日程上来。1937~1939年苏联的巴塔诺夫、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面得到与实际符合的结果。苏联五十年代还进行过立体模型试验。由于模型上的开采工艺和观测手段未能很好解决,至今尚未取得明显的进展。从长远来看,立体模型更能反映实际的采动过程,将是一种大有前途的试验方法。目前,苏联、西德、波兰、捷克、印度等国都应用相似模型试验方法研究岩层和地表移动的规律。

从五十年代起,特别是六十年代以来,各国在各个领域广泛地使用了电子计算机,而有限元方法又为应用弹性理论和电子计算机研究地表移动规律提供了有效的工具。虽然这一方法目前尚未达到能够精确计算移动和变形的程度,但在定性的研究工作中却是一种多快好省的方法。可以设想,随着岩层与地表移动理论的不完善,大规模应用电子计算

机计算岩层与地表移动和变形的日子即将到来。

自1974年以来,我们按概率积分法用电子计算机计算了地表下沉盆地主剖面 and 全面积(任意点任意方向)的移动和变形,满足了焦作、本溪、峰峰、鹤壁等矿区铁路下、建筑物下采煤科研工作的需要。与此同时,应用电子计算机按有限元法分析受采动建筑物的附加应力,也取得了初步成果。

岩层和地表移动的科学研究工作目前正处于向纵深发展的阶段,即从研究水平和缓倾斜煤层到研究倾斜和急倾斜煤层的岩层与地表移动规律;从研究主剖面的移动和变形分布规律,到研究下沉盆地全面积的移动和变形分布规律;从研究无地质构造破坏、简单地质采煤条件,到研究有地质构造破坏、复杂地质采煤条件的移动和变形规律;从研究最终稳定的静态移动和变形,到研究开采过程的动态移动和变形的分布规律等。此外,旨在减少地面建筑物损害的井下开采措施也引起各国学者的普遍重视。上述问题,有的已经取得一些可喜的成果,有的尚待进一步的研究与实践。可以期望,随着“三下”采煤和建筑物、井巷保护技术的发展,岩层和地表移动的理论水平必将获得更大的提高。

第二节 地表移动基本概念

一、地表下沉盆地形态及其基本指标

当煤层被采空后,上覆岩层的原始状态遭到破坏,煤层以上一定范围的岩层发生冒落,冒落范围叫冒落带。冒落带以上一定范围的岩层产生沿层面和垂直层面的裂缝和断裂,出现裂缝和断裂的区间叫裂缝带。裂缝带以上直至地表的岩层发生下沉和弯曲,呈现整体移动,叫弯曲带或整体移动带。处于弯曲带上部的地表各点向采空区中心方向移动,并形成地表下沉盆地(图1-1)。上述过程统称岩层移动,对地表而言则称地表移动。

从地表移动的力学过程及煤矿生产建设中一系列工程技术问题的需要出发,地表移动的状态可用垂直移动和水平移动描述。其具体的定量指标有:下沉、倾斜、曲率、水平移动、水平变形、扭曲和剪应变。目前对于前五种指标的规律研究得比较充分,而对扭曲和剪应变则处于开始阶段,使用尚不广泛。

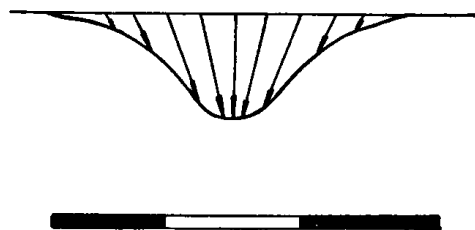


图 1-1 地表下沉盆地主剖面图

下沉

地表点的沉降叫下沉(W)。以本次与首次测得的点的标高差 Δh 表示,即

$$W = h_1 - h_i = \Delta h, \text{ 毫米}$$

式中 h_1 、 h_i ——第1次和第*i*次测得的点的标高,毫米。

倾斜

地表下沉盆地沿某一方向的坡度叫倾斜(T),也叫斜率(图1-2)。其平均值以两点间下沉差 ΔW 除以点间距 l° 表示,即

$$T_{AB} = \frac{W_B - W_A}{l_{AB}^\circ} = \frac{\Delta W_i}{l_i^\circ}, \text{ 毫米/米}$$

曲率

下沉盆地剖面线的弯曲度叫曲率(K)。其平均值以相邻两线段倾斜差 ΔT 除以两线段

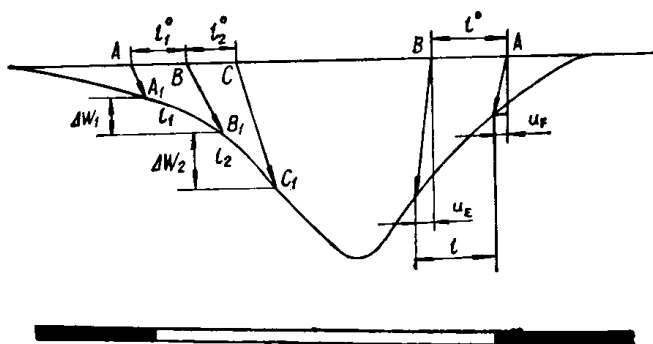


图 1-2 地表倾斜、曲率、水平移动、
水平变形计算示意图

中点的间距表示, 即

$$K_B = \frac{T_{BC} - T_{AB}}{0.5(AB + BC)} = \frac{\Delta T}{0.5(l_1^0 + l_2^0)}$$

10^{-3} 1/米〔或1/公里〕

水平移动

地表下沉盆地沿某一水平方向的位移叫水平移动 (u), 以本次与首次测得的从该点至控制点的水平距离差 Δl 来表示, 即

$$u = \Delta l = l_1 - l_0, \text{ 毫米}$$

式中 l_1 、 l_0 ——第 i 次和首次测得的该点与控制点的水平距离, 毫米。

水平变形

下沉盆地内两点间单位长的水平移动差叫水平变形 (ε)。其平均值以两点间水平移动差 Δu 除以两点间距表示, 即

$$\varepsilon = \frac{u_E - u_F}{AB} = \frac{\Delta u}{l^0} \cdot \text{毫米/米}$$

扭曲

地表下沉盆地内两平行线段倾斜差与其间距之比叫地表的扭曲 (S), 如图 1-3 所示。其平均值用下式表示,

$$S = \frac{T_{AB} - T_{CD}}{l_1^0} = \left(\frac{\Delta W_A^B}{AB} - \frac{\Delta W_C^D}{CD} \right) \frac{1}{l_1^0} = \frac{\Delta T}{l_1^0} \cdot 10^{-3} \text{ 1/米}$$

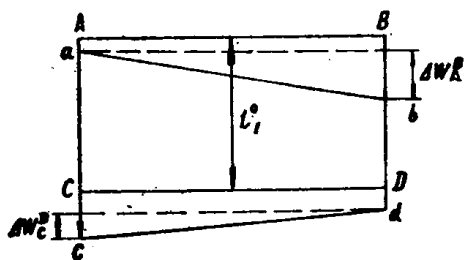


图 1-3 地表的扭曲

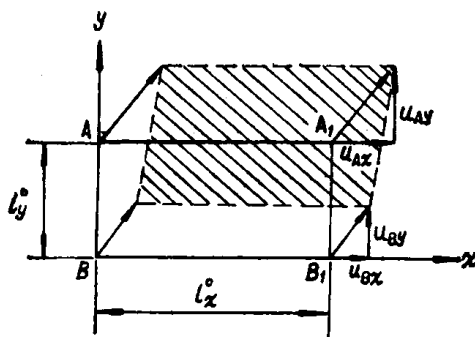


图 1-4 地表的剪应变

剪应变

地表单元正方形直角的变化叫地表的剪应变 (γ) (图1-4)。其平均值以两个对边长度变化值的差 ($u_{AX} - u_{BX}$, $u_{AY} - u_{BY}$) 除以其间距 l_y^0 、 l_x^0 的和表示, 即

$$\gamma = \frac{u_{AX} - u_{BX}}{A_1 B_1} + \frac{u_{AY} - u_{BY}}{A A_1} = \frac{\Delta u_x}{l_y^0} + \frac{\Delta u_y}{l_x^0}, \text{ 毫米/米}$$

实测结果表明, 地表下沉盆地的范围总是大于采空区的范围。当水平或缓倾斜煤层的回采区段形状为矩形时, 地表下沉盆地的平面形状为椭圆形, 剖面形状则为碗形或盆形。

当倾斜煤层的回采区段为矩形时,沿走向方向下沉盆地剖面形态以回采区段中心为对称点,沿倾斜方向则呈非对称分布,上山方向下沉盆地范围小,下山方向下沉盆地范围大。开采煤层的倾角越大,非对称性越明显。当急倾斜煤层的回采区段为矩形时,地表下沉盆地形状沿倾斜方向分布极不对称,随着煤层倾角的增大及地质采煤条件的不同,下沉盆地剖面形状由碗形发展到瓢形,甚至兜形。

二、连续变形与非连续变形

当地表移动过程在时间和空间上具有连续渐变的性质,且不出现台阶状大裂缝、漏斗状塌陷坑等突变现象时,叫连续变形。在采深采厚比大于 $25\sim 30$,无地质构造破坏和采用正规采煤方法开采的条件下,地表一般出现连续变形。连续变形的分布是有规律的,其基本指标可用数学方法或图解方法表示。在采深采厚比小于 $25\sim 30$,或虽大于 $25\sim 30$,但地表覆盖土层很薄,且采用如高落式之类非正规采煤方法或上覆岩层有地质构造破坏时,地表容易出现漏斗状塌陷坑、地堑状、台阶状破坏,称非连续变形。开采急倾斜煤层时容易出现非连续变形。非连续变形的基本指标目前尚无严密的数学方法表示。它对地面建筑物的危害较连续变形大。

三、非充分采动、充分采动、超充分采动与极不充分采动

在既定采深条件下,回采区段尺寸(长和宽)较小,达不到 $0.9\sim 2.2H$ (取决于覆岩性质, H —采深),或达不到 $2r$ (r —主要影响半径)时(图1-5),地表最终下沉盆地剖面形状呈碗形,最大下沉值随工作面尺寸的增大而增大,这种开采规模叫非充分采动或次临界开采。当回采区段尺寸增大到等于 $2r$ 或等于、大于 $0.9\sim 2.2H$,地表最终最大下沉值达到极限值时的开采规模叫充分采动或临界开采(图1-6)。当回采区段尺寸继续增加,使下沉盆地的中央出现平底,最大下沉和其他最大移动变形不再增大的开采规模(回采区段尺寸 $\gg 2r$ 或 $\gg 0.9\sim 2.2H$)叫超充分采动或超临界开采(图1-7)。

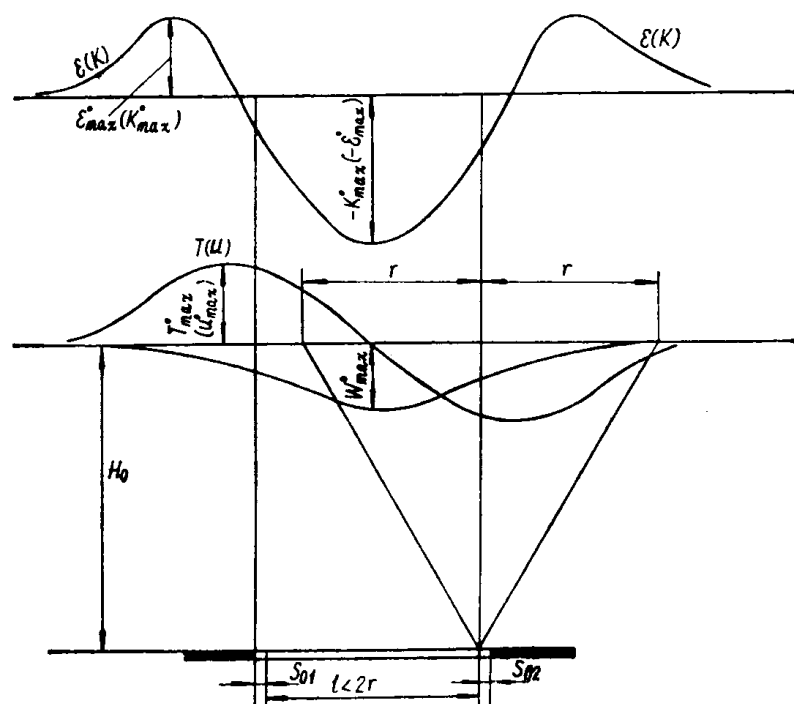


图 1-5 非充分采动的地表移动变形曲线

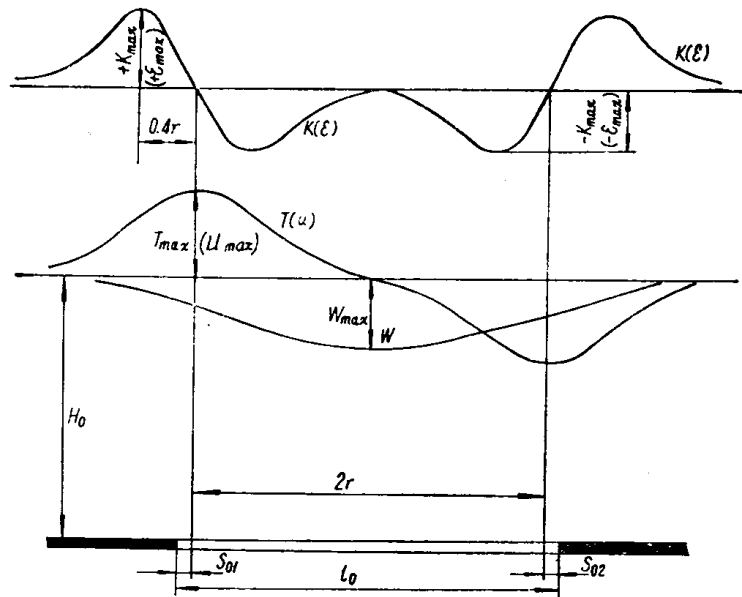


图 1-6 充分采动的地表移动变形曲线

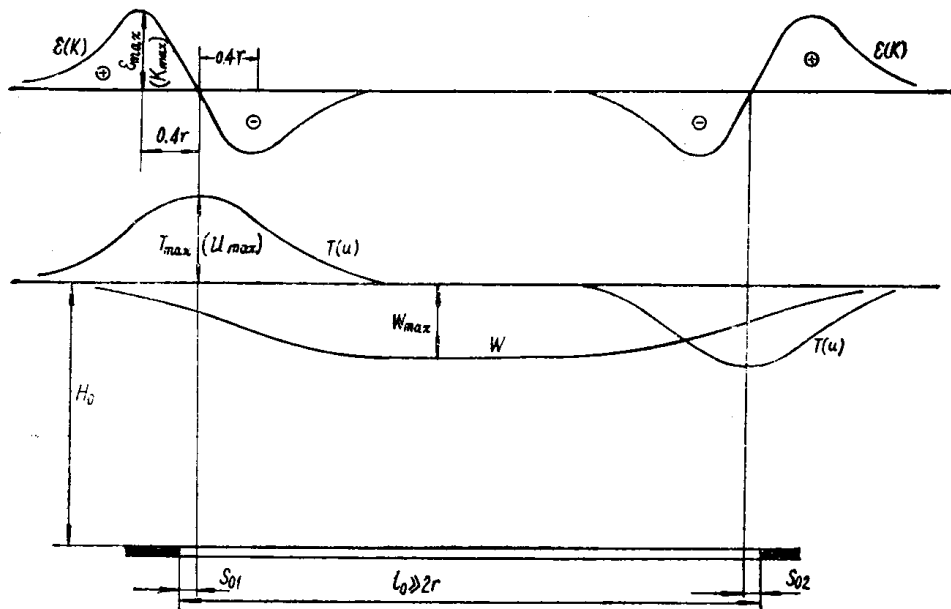


图 1-7 超充分采动的地表移动变形曲线

非充分采动时最终的最大移动和变形值,除负曲率和压缩变形值外,随回采区段尺寸的增大而增大,最大下沉、最大倾斜、最大水平移动,最大正曲率和最大拉伸变形小于充分采动时的最大值。最大负曲率、最大压缩变形先是随开采充分度的提高而增大,当回采区段尺寸为0.8倍于主要影响半径 r 时,为充分采动的两倍。然后随开采充分度的提高而减小,直至充分采动时的数值。超充分采动时盆地中央平底部分除下沉达到最大值外,其他的移动和变形值均为零,盆地边缘区的移动变形值与充分采动时相同。

当回采区段尺寸极小 (L_0 或 $l_0 \leq 0.2 \sim 0.3 L_c$, L_c —充分采动所需的尺寸) 或小于 $0.5 \sim 0.6r$ 时叫极不充分采动。此时的地表最终移动和变形值均小于一般的非充分采动时的移动和变形值 (图1-8)。

第三节 地表移动计算方法简介

目前,国内外比较广泛使用的地表移动计算方法有三类:理论法、典型曲线法和剖面函数法。

计算地表移动的理论法有随机介质理论法、弹塑性理论法、几何理论法等。

随机介质理论是李特维尼申教授1956年提出的。他把岩石移动过程看作是一个随机过程,并用概率理论证明岩石下沉场可用随机过程的柯尔莫哥洛夫方程式表示。由于这一理论能够解释岩层与地表移动的一些现象和规律,在学术上的意义是无容置疑的。刘宝琛、廖国华等同志在这方面做了许多工作,完善和发展了这一理论,并提高了它的实用性。

阿维尔申曾应用塑性理论研究地表移动,沙乌斯托维奇(波兰),库玛尔(印度)等人据弹性理论认为下沉盆地剖面类似于梁或板的弯曲。这种理论虽然能够解释岩层移动的力学现象,但由于受采动岩体的力学常数难以精确确定,至今尚未达到定量的实用阶段。近十余年来,有限元法的广泛应用,使弹塑性理论用于计算地表移动和变形成为可能。电子计算机的快速运算能力给选择较为复杂而又与实际符合的数学力学模型创造了条件。

几何理论创始于本世纪二十年代,按照这一理论用几何方法划开采影响带,即从几何学角度出发研究地表移动规律。1950年以来这个理论由布得雷克,克诺特教授加以发展和完善。由于用高斯曲线作为开采的连续影响曲线而使几何理论更加严密和符合实际。几何理论的最终表达式与随机介质理论的公式是一致的,由于都利用了概率积分函数计算,统称概率积分法。几何理论在我国和包括波兰在内的世界许多国家得到了广泛的应用。

典型曲线法是将同类型地质采煤条件地表下沉盆地的移动和变形分布用无因次曲线或表格表示。这种方法要求对应于类型相同的地质采煤条件,绘制出相应的典型曲线,使用起来比较简便。这种方法在我国峰峰、抚顺等矿区得到使用。在国外,苏联和英国应用的比较普遍。1975年英国煤炭管理局出版的《下沉工程师手册》所介绍的计算方法就属于典型曲线法。

剖面函数法是根据地表下沉盆地剖面形状来选择描述下沉盆地剖面的相应函数,作为计算地表移动和变形的公式。剖面函数法是建立在整理大量实测资料基础上,用数理统计方法确定公式中所需要的系数或参数。这个方法虽然不能解释岩层和地表移动的力学性质,但能够得到与实际相符合的移动和变形值。卡札柯夫斯基和阿维尔申是苏联早期提出用经验公式法计算地表移动的学者。他们提出的指数函数经验公式在苏联得到广泛应用,并为以后的充实和发展奠定了基础。波兰学者柯赫曼斯基的计算方法也是建立在统计理论的基础上的。由于为其公式配备了计算表格,应用也比较方便。柯尔宾阔夫提出的用三角函数

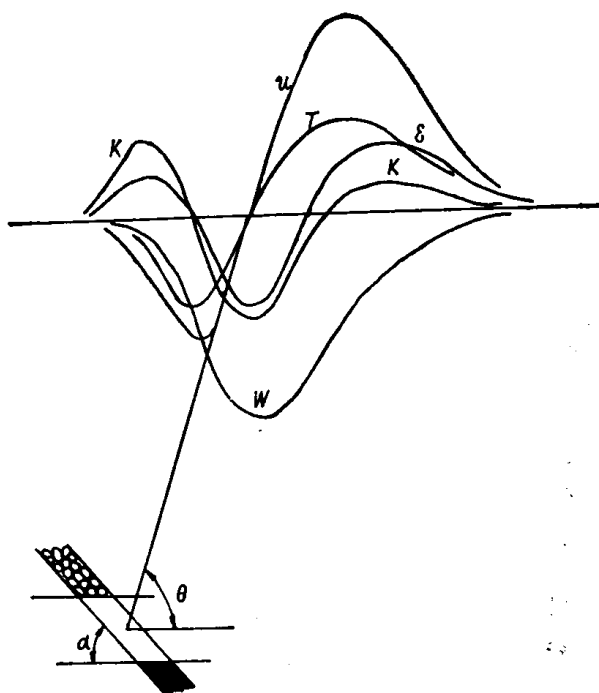


图 1-8 极不充分采动的地表移动变形曲线

作为计算地表移动的经验公式和杰·金·惠斯特提出的用双曲正切函数表示地表移动和变形的也有一定的使用范围。剖面函数法在匈牙利、苏联、德国、英国、南斯拉夫等国应用了多年。我国许多矿区使用过多种剖面函数法，特别是负指数函数法应用的较多。由于坐标原点选在最大下沉点位置，上、下山半盆地的移动和变形采用分别计算方法，而导致在坐标原点出现两个最大负曲率和最大压缩变形值的问题，所以这种方法不太适用于开采倾角较大的煤层。我们在与淮南孔集矿共同分析开采急倾斜煤层下沉盆地倾斜主剖面地表移动分布规律时，选取了坐标原点在沉降盆地一端的皮尔森Ⅲ型函数来描述倾斜主剖面的下沉的方法，以及新近提出的将坐标原点选在沉降盆地的一端和用叠加原理进行计算的方法，都避免了这一缺点。

第二章 地表下沉盆地主剖面的移动与变形规律

第一节 下沉盆地主剖面的最终移动和变形

一、下沉盆地主剖面的下沉

通过下沉盆地最大下沉点所作的沿煤层倾斜或走向的垂直剖面叫做下沉盆地的主剖面。

设开采一水平煤层矩形工作面，沿倾斜方向长度 L_0 相当长 ($L_0 \geq 2r$, r 为主要影响半径)，沿走向方向 (x 方向) 采出一微小块段 Δx (图 2-1)，坐标原点在地表点 A 的正下方，则 A 点的下沉 ΔW 为：

$$\Delta W = f(x) \Delta x \quad (2-1)$$

式中的 $f(x)$ 叫影响函数，据克诺特教授研究得出， $f(x)$ 为：

$$f(x) = \frac{m\eta}{r} e^{-\pi \left(\frac{x}{r}\right)^2}, \quad r = \frac{H}{\operatorname{tg} \beta}$$

式中 m —— 煤层法线采厚，米；

η —— 下沉系数；

r —— 主要影响半径，米；

H —— 平均开采深度，米；

β —— 主要影响角，度；

x —— 以 A 点为原点的横坐标，米。

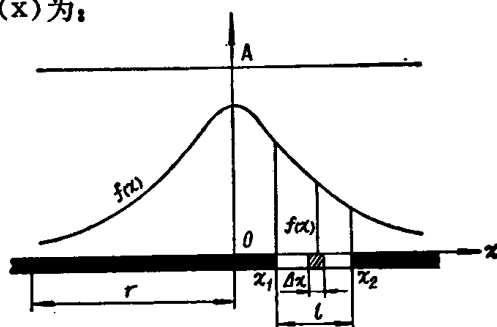


图 2-1 下沉影响曲线

开采 $x_1 x_2$ (图 2-1) 段后，A 点的下沉为：

$$W_A = \frac{m\eta}{r} \int_{x_1}^{x_2} e^{-\pi \left(\frac{x}{r}\right)^2} dx \quad (2-2)$$

式中 $m\eta = W_{\max}$ —— 充分采动的最大下沉值，即开采从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 段 A 点的下沉值，毫米。

令 $\lambda = \sqrt{\pi} \frac{x}{r}$ ，对 (2-2) 式作变元变换得

$$W_A = W_{\max} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\sqrt{\pi} \frac{x_1}{r}}^{\sqrt{\pi} \frac{x_2}{r}} e^{-\lambda^2} d\lambda \quad (2-3)$$

当工作面从 $x = -x_1$ 推进到 $x = \infty$ ，即半无限开采时 (图 2-2)，式 (2-3) 为：

$$W_A = W_{\max} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\sqrt{\pi} \frac{x_1}{r}}^{\infty} e^{-\lambda^2} d\lambda \quad (2-4)$$

式 (2-4) 可利用概率积分表 $\phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ 进行计算，为此，式 (2-4) 改写为：

$$W_A = W_{\max} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\sqrt{\pi} \frac{x_1}{r}}^{\infty} e^{-\lambda^2} d\lambda = \frac{W_{\max}}{2} \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{\pi} \frac{x_1}{r}} e^{-\lambda^2} d\lambda + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\lambda^2} d\lambda \right]$$

$$= \frac{W_{\max}}{2} [\phi(x) + 1] \quad (2-5)$$

将坐标原点移至工作面左边界 (图2-3), 由图 2-3 可见, 用影响函数曲线 $f(x-s)$ 的积分式所表示的 A 点下沉值 (工作面从无限远处开采至 0 处), 与用影响函数曲线 $f(x)$ 的积分式所表示的工作面边界上方地表点的下沉值相等, 即

$$W_A = \int_0^{\infty} f(x-s) dx = \int_{-\infty}^0 f(x) dx \quad (2-6)$$

式 (2-6) 右端可写为:

$$W_A = \int_{-\infty}^0 f(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx \quad (2-7)$$

将 $f(x)$ 的表达式代入上式得

$$\begin{aligned} \frac{m \cdot \eta}{r} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-s \cdot \left(\frac{x}{r}\right)^2} dx &= \frac{W_{\max}}{\sqrt{\pi}} \int_{-\sqrt{x-\frac{x}{r}}}{\infty} e^{-\lambda^2} d\lambda = \frac{W_{\max}}{2} \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{x-\frac{x}{r}}} e^{-\lambda^2} d\lambda + \right. \\ &\quad \left. + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\lambda^2} d\lambda \right] = \frac{W_{\max}}{2} [\phi(x) + 1] \end{aligned} \quad (2-8)$$

因 s 为 A 点的横坐标 x , 式 (2-8) 可写成

$$W_{(x)} = \frac{W_{\max}}{\sqrt{\pi}} \int_{-\sqrt{x-\frac{x}{r}}}{\infty} e^{-\lambda^2} d\lambda = \frac{W_{\max}}{2} [\phi(x) + 1] \quad (2-9)$$

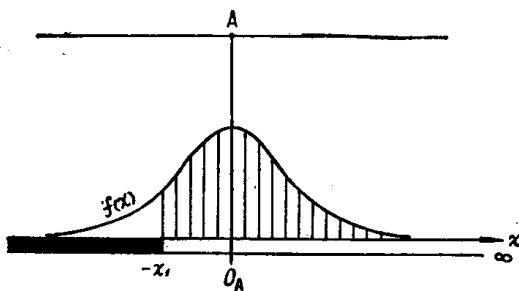


图 2-2 半无限开采时 A 点的下沉
影响函数曲线

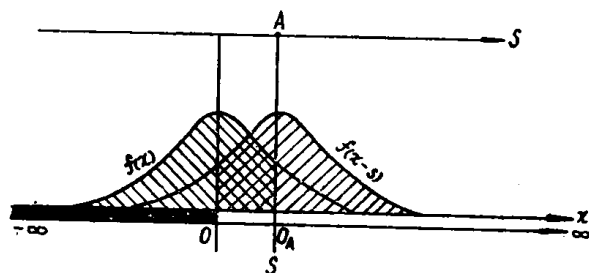


图 2-3 坐标原点在工作面边界半无限开采
时 A 点的下沉影响函数曲线

二、充分采动时主剖面的移动和变形

当回采区段沿走向和沿倾斜方向均达到充分采动条件时 (沿走向计算宽度为 $l \geq 2r$, 沿倾斜长度 L_0 按开采影响传播角向地表投影长度 $L \geq r_1 + r_2$), 对应于回采区段两个方向的主剖面地表移动和变形值, 可按下面半无限开采的公式计算。

(一) 水平和缓倾斜煤层 ($\alpha \leq 15^\circ$)

1. 下沉

$$W_{(x)} = \frac{W_{\max}}{\sqrt{\pi}} \int_{-\sqrt{x-\frac{x}{r}}}{\infty} e^{-\lambda^2} d\lambda, \text{ 毫米} \quad (2-10)$$

2. 倾斜

$$T_x = \frac{W_{\max}}{r} e^{-s \cdot \left(\frac{x}{r}\right)^2}, \text{ 毫米/米} \quad (2-11)$$