



NINGDONG MEITIAN CAIMEI
CHENXIAN DIZHI ZAIHAI GUILÜ YANJIU

宁东煤田采煤沉陷地质灾害 规律研究

路学忠◎主编




黄河出版传媒集团
宁夏人民出版社

宁东煤田采煤沉陷 地质灾害规律研究

路学忠 主编

编委会成员

路学忠 杨站伟 李学军 张天文 海连富
魏向成 魏启明 王磊 高军

 黄河出版传媒集团
宁夏人民出版社

图书在版编目(CIP)数据

宁东煤田采煤沉陷地质灾害规律研究 / 路学忠主编
—银川: 宁夏人民出版社, 2019.3
ISBN 978-7-227-07036-8

I. ①宁… II. ①路… III. ①煤矿开采—采空区—地
质灾害—研究—灵武 IV. ①TD163②P694

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第051676号

宁东煤田采煤沉陷地质灾害规律研究 **路学忠 主编**

责任编辑 姚小云 周淑芸
责任校对 管世献
封面设计 李家强
责任印制 肖 艳



黄河出版传媒集团

宁夏人民出版社

出版发行

地 址 宁夏银川市北京东路139号出版大厦(750001)
网 址 <http://www.yrpubm.com>
网上书店 <http://www.hh-book.com>
电子信箱 nxrmcbs@126.com
邮购电话 0951-5052104 5052106
经 销 全国新华书店
印刷装订 宁夏报业传媒印刷集团有限公司
印刷委托书号(宁)0012749

开本 787mm×1092mm 1/32
印张 5.25 字数 180千字
版次 2019年4月第1版
印次 2019年4月第1次印刷
书号 ISBN 978-7-227-07036-8
定价 58.00元

版权所有 侵权必究

序

能源矿产资源是我国当前经济发展所必须依赖的,以前的矿山遵循“先开发,后治理”的老路子已然不适用我国现状,要走现代化、科学开发的新路子,就必须过程管控,必须“边开发、边治理”,对矿山开采过程中出现的一系列地灾环境问题进行实时观测、治理和预防。煤炭开采过程中引起的地表岩移动、裂缝和塌陷,是破坏性很强的一种地灾现象,也就是采煤沉陷。而其作为一门综合性很强的边缘研究领域,涉及探矿、采矿、工程地质与水文地质、岩土工程、环境工程、测量、数学、力学、建筑结构等方面的知识。

《宁东煤田采煤沉陷灾害规律研究》编著路学忠等人,在总结原有采煤沉陷方面研究成果的基础上,结合宁夏宁东煤田目前已开采矿区的地质、采矿、环境等特点,对其采煤沉陷地质灾害进行了长期深入研究,系统地向我们介绍了宁东煤田采煤引起的沉陷地质灾害现状、灾害损害程度评价、灾害动态发展规律观测与流变特性、采煤沉陷数值模拟计算、宁东采煤沉陷发展规律与趋势预测等问题,提出了宁东煤田采煤沉陷地质灾害防治与保护的科学措施。宁东煤田正开发利用的煤炭矿山,在采煤沉陷灾害规律研究方面已有大量的观测数据和实践经验,我相信,通过本书在这方便专业理论的支撑,取长补短、相得益彰,定能强化采煤沉陷这一专业研究领域的权威性和影响力。

本书内容专业性强,不仅能为从事地质勘查的工作人员拓宽业务领域,也为地方矿山开采引发的地灾沉陷治理提供了有益的

参考,而且贴合国家大的方针政策,那就是“绿水青山就是金山银山”。本书的出版对社会的贡献将是积极的、可见的。



目 录

第一章	绪 论	1
第二章	宁东采煤区沉陷地质灾害现状	27
第三章	随机介质理论基础	80
第四章	宁东地下采煤引起地表沉陷的数值模拟计算	89
第五章	宁东采煤沉陷的基本规律与特点	100
第六章	宁东采煤地质灾害状况与损害程度风险评价	109
第七章	采煤区未来地表沉陷趋势预测	122
第八章	宁东煤田地质灾害防治与生态保护措施	136
第九章	结论与展望	149
	参考文献	152

第一章 绪 论

宁夏是全国富煤省份之一,煤炭工业起步于1956年,全区含煤地层分布面积17000km²,占全区总面积的1/4。在全国14个大煤种中,宁夏占有11种,在全区21个县中有12个县分布有煤炭资源,总量居全国第六位,人均占有量居全国第一位。根据“宁夏回族自治区矿产资源储量表”数据表明,截至2010年底,宁夏累计探明的煤炭储量291.05亿t,累计消耗资源储量9.72亿t,保有资源储量281.33亿t。

从含煤地层来看,宁夏地处华北聚煤区西部,鄂尔多斯盆地西缘;在区域构造背景上,处于华北陆块和秦—祁—昆造山带这两大构造单元衔接处,这两大构造单元长期活动所形成的裂隙与坳陷为含煤地层提供了场所,并控制了含煤地层的特征与分布。因此,按照地理位置为宁东、贺兰山、宁南和香山4个含煤区,仅宁东一地探明资源储量就约为273亿吨,占宁夏煤炭探明总储量的86.8%^[1],相当于东北三省煤炭探明储量的总和。同时,宁夏还探明无污染、无危害、高热量的环保型煤炭164.5亿t,占宁夏累计探明煤炭资源量的54.76%。主要分布在汝箕沟矿区、碎石井矿区、鸳鸯湖勘探区、碱沟山矿区和马家滩—萌城矿区。

宁东煤田位于宁夏东部,属灵武、盐池、同心3县管辖。煤田北起红墩子与内蒙古分界,南至萌城与甘肃相邻,以吴忠市和固原市的市界为界,西以黄河断裂及青铜峡固原大断裂为界,东以宁夏陕

西省为界。南北长 104~200km,东西宽 80~105km,含煤面积约 7482.52km²。煤田由 10 个矿区和 1 个勘查区构成,位于北部的红墩子、横城、四股泉、韦州、三眼井勘查区为古生代石炭二叠纪煤矿区,位于中部的自西向东为石沟驿、灵武、鸳鸯湖、马家滩、积家井、萌城 6 个中生代侏罗纪煤矿区,地质勘探程度较高,累计探获资源量 320.3 亿 t;查明资源量为 274.9 亿 t,其中已开采煤矿占用资源量 79.2 亿 t,未开发利用资源量 195.7 亿 t(未开发利用的资源量中可供新建煤矿的有 176.5 亿 t,可进行下一步勘查工作的有 19.2 亿 t)。煤田地势较为平缓,呈南高北低之缓坡,苦水河以北属干旱半沙漠低丘地形,海拔在 1250~1500m 之间,苦水河以南为黄土侵蚀地形,地貌复杂,海拔在 1500m 左右。发育河流有苦水河、甜水河、西天河,水量受季节影响。煤田的西部为黄河灌区,农业发达,交通以公路为主,大坝到古窑子铁路把该区与包兰铁路连通。区内公路发展较快,省级公路与地方公路已成网,交通方便。原煤属优质配焦用煤、动力用煤、长焰煤、不黏结煤和优质气化煤^[2]。宁东地质构造及地质条件简单,瓦斯含量低,开采条件优越,具有突出的资源优势、区位优势和市场优势。

中国产业调研网发布的《2016 年中国宁夏煤炭工业市场专题研究分析与发展前景预测报告》认为,未来几年,宁夏将全力打造被喻为宁夏“一号工程”的宁东煤炭基地。预计到 2020 年,宁东基地煤炭生产能力将达到 1.3 亿 t;8 个大型坑口电厂到 2020 年发电总装机容量达到 26990MW;煤炭间接液化、煤基甲醇、煤基二甲醚和大化肥等项目,到 2020 年达到 1300 万 t。

同时,宁夏回族自治区党委和政府于 21 世纪初做出建设宁东能源重化工基地的决定,确定了三大产业:电力、煤化工、煤炭开采^[3]。宁东能源重化工基地的建设,符合国家关于大力发展和推广洁净煤技术,寻求以煤代油的产业发展方向,是我国能源发展战略的必然选择,也是宁夏落实国家“西电东送”战略方案的重大举

措。宁东煤炭开发坚持煤炭就地转化为为主的发展战略,采用先进技术,走煤电结合、煤化结合之路,为实现“中国梦”“四个宁夏”提供资源保障。

为了避免我国多数煤炭企业从前“先开发,后治理”而给企业后续发展背上沉重负担与包袱的老路,宁东煤田走现代化、科学开发的路子,对可能产生的各种灾害与废物等实行“边开发、边治理”的新型道路,即资源综合开发,经济循环发展,实现煤炭资源的可持续开发^[4]。因此,本书结合宁东正在开采的碎石井勘探区内的磁窑堡井田、羊场湾井田和石沟驿勘探区的石沟驿井田采煤引起的沉陷灾害现状,研究了其地表沉陷规律、沉陷预测方法与理论及沉陷等灾害的评价与预防治理。

1.1 选题依据及研究意义

地下有用煤炭被采出后,开采区域周围的岩体原始应力平衡状态受到破坏,造成应力重新分布,并寻求新的平衡,从而使岩层和地表产生主移动变形和非连续破坏,这种现象称为“煤矿开采沉陷(Coal Mining Subsidence)”^[5]。煤炭开采沉陷学(又称岩层与地表移动)作为一门实用性很强的学科,其主要研究内容是地下煤炭采出以后,开采空间及周围岩体及地表移动变形和破坏的发生、发展、终止、稳定的机理和过程及其分布形态、力学特征、破坏程度和预测并控制岩体与地表破坏及其所造成的一系列灾害性问题(地面建筑破坏、铁路损坏、水体溃漏、耕地损失、地表土地荒漠化等)的原理与方法。煤炭开采沉陷学是一门理论性和实践性都很强的交叉学科,既要求具有很深的理论基础,以保证自身的发展和可靠的应用与实践,同时又要切实可行地解决生产实践中、具体实例中所遇到的问题。

采煤引起的地表移动的研究由来已久。2014年我国从地下采出的煤炭达26.36亿t,2015年达26.1亿t,2016年达到24.09亿t,地

表沉陷中尤以采煤引起的地表沉陷最为突出。虽然近年来各级政府与组织注重预防和治理地表沉陷,但总体来说,地表沉陷问题仍十分突出。人们已认识到,岩层与地表移动计算是一项十分重要的工作,是确定“三下”(建筑物下、铁路下和水体下)压煤开采方案的基础。据统计,我国矿区在这些需要保护的對象下(上)压煤达133.5亿t,其中建筑物78.2亿t,铁路下18.9亿t,地面水体下19.1亿t,石灰岩下17.3亿t^[6]。为了充分开发这些煤炭资源,又使受保护构筑物保持原有功能,对采动影响的预测是必不可少的。

因此,开采沉陷的课题对我国煤炭生产、环境保护、矿区的社会稳定以及可持续发展都具有重要意义。据估算,在我国的主要产煤区,构筑物下压煤占可采储量的30%左右,若采用村庄搬迁、道路改线等被动的办法,经济费用巨大,也会成为企业沉重的经济负担。而且,由于采煤引起的大面积沉陷,靠迁移来选址也越来越困难。另外,开采沉陷对农田和地表环境的危害也十分突出。开采沉陷引起地表高低不平,甚至,出现地裂缝和断陷沟,使农田水利灌溉发生困难;低潜水位地区农田因积水而汪洋一片,部分地区饮用水受到污染;等等^[7]。所以,开采沉陷的研究是当今煤矿开采及矿区环境建设的大事,其引发了许多地表的建(构)筑物、水体、耕地、铁路、桥梁和环境破坏等,并导致了許多灾害性后果:

(1)农村煤矿区开采沉陷严重破坏了矿区环境,造成村庄的房屋裂缝、耕地积水、乡村道路断裂、果树木枯死、水塘干涸等,给乡村人们的日常生活、生产带来了很大的影响和损失,并且地面环境的破坏是很难恢复的。

(2)对城市的建(构)筑物、公路、铁路、桥梁、地下管网及城市的基础设施等造成破坏和潜在的威胁。

(3)地表沉陷破坏地下的潜水位及地下水系,形成大面积的低洼区和积水区,甚至形成沼泽地,使之既不能栽种植物,又不能养殖,成为荒地;地下水系破坏和地下水的流失,也是不可恢复的。

(4)对天然的森林、草原、天然植被、山体等造成的破坏,影响了生态平衡。

(5)地表沉陷激化企业与地方及居民之间的矛盾。导致社会不稳定因素的加剧。

(6)地表沉陷的治理与恢复耗资巨大。一般矿区的万吨采煤塌陷率($\text{hmV} \cdot 10^4\text{t}$)一般变化在28~675之间,仅就耕地而言,复垦一亩塌陷区平均耗资3000元人民币,而我国每年煤矿行业开采导致土地的塌陷达40万a左右。所需要的费用就达12亿元人民币。

而宁东煤田作为宁夏煤炭资源的主要蕴藏地,煤炭资源在开采中遇到的问题若不及时解决将影响其进一步的可持续发展,如煤炭开采过程中引发的多种地质灾害,已严重破坏了采区的自然环境;采煤沉陷引发的多种地质灾害,又加重了当地的生态环境的破坏;宁东煤炭资源利用率较低、浪费严重,煤炭在宁夏一次性能源消耗结构中占70%以上,燃煤形成的煤烟型污染是区内大气环境污染的主要原因^{[8][9]}。因此,采煤沉陷课题的研究有利于探索其内部固有的客观规律,为地表沉陷的预计、控制、治理、复垦、恢复提供理论依据,对我国煤炭工业的发展、社会的稳定和谐、生态环境的保护具有重大的现实意义和深远的社会意义,也是保证我国西部能源战略实麓、煤炭工业可持续发展不容忽视的重大研究课题。要把宁东的资源优势合理有效地利用,在积极推进宁夏煤炭资源开发的同时,必须及时解决煤炭开采、使用等过程中遇到的问题,早日使宁夏回汉人民同全国一起打赢脱贫攻坚战。

1.2 课题研究历史与现状

1.2.1 开采沉陷理论发展回顾

开采沉陷是一门综合性较强的边缘学科,研究方向是矿山测量研究的一个重要领域,涉及大地测量、矿山测量、采矿、地质、岩石力学、统计学和计算机科学等学科,是一个交叉学科,也是大地

测量学与测量工程专业的一个重要研究方向,在我国矿业类高等院校都设有该学科。

人们很早就注意到了开采沉陷问题。在英国,15世纪初就有关于开采沉陷损害财产的争论和诉讼方面的记载。比利时在15、16世纪曾颁布一项法令,对因开采而破坏了列日城用水含水层者处以死刑。从学科发展的历史看,大致可分为三个时段:1900年前,1901年至二次世界大战,二次世界大战后到现在。如果从开采沉陷学科的发展阶段,大致也可分为三个时段:假说与推理阶段,现场实测与规律认识阶段,预测方法和预测理论建立及实际应用阶段^[10]。

1.2.2 假说与推理阶段

这一阶段从时间上划分在1900年以前。对开采沉陷的机理和理论的认识是伴随着采矿对建(构)筑物和水体的破坏而进行的,当时人们提出了一些初步认识,其中最主要的理论有:法线理论、自然斜面理论、圆拱理论、二等分线理论、Hausse理论和达尔特姆特规则等。这些理论和规则大多以地面的有限实地观测资料为基础,因而带有一定片面性,简要回顾如下。

(1)法线理论

1825年和1839年,比利时对列日城受开采影响造成的破坏进行调查,调查结果产生了“垂线理论”(Shadbolt, 1975)。垂线理论认为,开采沉陷只出现在采空区的上方,矿柱上方不产生下沉,地表下沉的大小与矿层开采厚度相同且采空区上方各点下沉相等。这一理论显然与实际不符。

对列日城的调查还发现,在工作面下山方向矿柱上方的建筑物产生了大量损害。为解释这一现象,1858年,Gonot提出了法线理论。该理论认为,对于倾斜矿层,开采塌陷不是出现在开采工作面的正上方,而是沿矿层法线方向传播,塌陷偏向开采工作面的下山方向上方。比利时的工程师认为法线理论在矿层倾角小于 65°

时适用。1871年,比利时人 Dumont 指出它只适用于倾角小于 68° 的情况(阿威尔辛,1947,ShadboIt,1975),在褶曲条件下岩层移动仍按法线方向移动,因此在褶曲轴部移动方向发生变化,但始终沿矿层的法线方向。他还指出,断层可使移动方向发生变化,这一结论与实际情况相符。

法线理论并未得到大多数研究者赞同,仅在法国和英国的部分煤田得到了证实。但是,岩层沿法线移动的思想至今仍具有较大的影响^[11]。

(2) 自然斜面理论

1882年,耳西哈(Oesterr)教授提出了自然斜面理论^[12]。其主要观点如下:在采空区上方岩层产生塌陷,而塌陷区呈抛物线形状,但此过程尚未结束(如图1-1)。

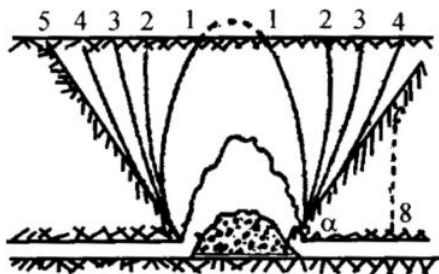


图1-1 自然斜面理论图式

采动围岩中的附加应力将引起岩层的进一步破坏和移动,移动将逐渐波及2-2、3-3等带。当塌陷岩层的边界与水平线呈 α 角时,塌陷过程终止,这里 α 是岩层的自然斜面角。

耳西哈圈定的移动范围与现代开采沉陷理论相近,遗憾的是他没有认识到矿层的上下山方向岩体移动的影响不同的,他的理论只适用于水平矿层。另一方面,他否定了岩层的弯曲,认为岩层移动仅仅以塌陷形式发生。但是,耳西哈第一次提出了岩层移动范围与岩层的性质有关的思想是正确的。

(3) 圆拱理论

1885年,法国人Fayol提出了“圆拱形理论”(阿威尔辛,1947)^[13]。他通过现场和室内模拟研究的大量资料,得出岩层移动的形式是塌陷式的,移动波及的区域呈圆拱形(如图1-2)。

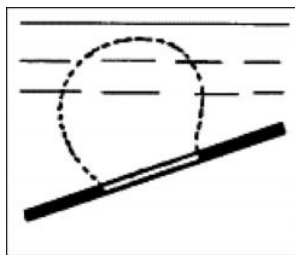


图1-2 圆拱理论图示

同时,Fayol假定,圆拱内的体积通过采动破裂岩石的碎胀作用来充填,充填后圆拱将保持稳定。他还得出,岩石的碎胀系数等于1/200。按照他的观点,当采深等于采厚的200倍时,采出空间将被破裂岩体的碎胀作用充满,地表将不会产生移动。这一观点后来被证实是错误的。但Fayol有关采空区上方存在一个平衡圆拱的理论已成为矿山压力学科中的基本理论之一。

(4) 二等分线理论

1876~1884年,德国人Jlcinsky将岩层移动过程分为两个时期,第一时期是迅速塌陷过程,第二时期是岩层移动过程,是由于垮落岩层的被压密,移动过程是缓慢的^[14]。他的观点中最重要的是岩层除了垮落外还呈现弯曲和流动形式。其中,他假定岩层产生塌陷,而在冲积层中产生弯曲。

Jlcinsky在大量观测基础上,得到了岩层移动线是通过煤层法线和铅垂线所形成的二等分线,并得到了移动角的计算式:

$$\beta = 90^\circ - \frac{\alpha}{2}$$

$$\gamma = 90^\circ - \frac{\alpha}{2} \quad (\text{式中 } \alpha \text{ 为煤层倾角}) \quad (1-1)$$

Jlcinsky 还给出了岩石的体积碎胀系数为 0.01, 即认为不影响到地面的开采深度为 100 倍采厚, 这与实际是不相符的。

(5) Hausse 理论

1895~1897 年, Hausse 建立了他自己的理论^[15]。他认为, 在采空区上方直接形成综合移动带—塌落和弯曲, 再往上是完全的弯曲带(见图 1-3)。

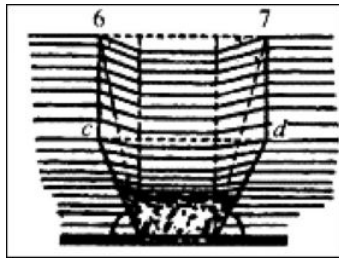


图 1-3 Hausse 理论图式

他给出的塌落带的高度为 30~60 倍采厚, 认为岩层碎胀系数的变化范围是: 非充填开采, 碎胀系数 0.01, 充填开采碎胀系数 0.002。对于移动角, 他给出了表 1-1 的值和相应的计算公式如下:

$$\tan \beta = \frac{1 + \cos^2 \alpha}{\sin \alpha \cos \alpha} \quad (1-2)$$

表 1-1 不同倾角的移动角 (单位: °)

α	0	10	15	20	30	35	40	45	50	60	70	80	90
β	70	75	63	61	57	56	54	51	56	56	58	64	70
γ	70	76	79	82	86	88	91	93	95	94	90	80	70

上表给出的 β 值与现在的观测结果类似, 但 γ 值随着矿层倾角增大而增大的结论与现在的观测结果不相同。

(6) 达尔特姆特规则^[16]

达尔特姆特煤矿管理局在对地面进行系统观测的基础上获得了下列的角值参数:

①对于含煤地层而言, 在任何倾角条件下, γ 和 δ 角等于 75° 。

当煤层倾角为 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 时, β 等于 75° ;当倾角为 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 时, β 角等于 $90-\alpha$ (α 为煤层倾角);当煤层倾角大于 35° 时, β 角等于 55° 。

②对于煤系上方的泥灰岩来说,下沉角等于 70° 。

③极限深度是不存在的,只要开采面积足够大,地面将产生下沉。

④对于风力充填或矸石充填,地面下沉可达采厚的 $40\%\sim 50\%$ 。

⑤当泥灰岩质的覆盖厚度达 120m 时,地面仍然出现裂缝,而当厚度为 200m 时就不出现裂缝。

达尔特姆特规则的一些认识在现在的开采沉陷研究实践中仍具有指导意义。

除了以上理论外,法国人琪里阿拉一板涅提出的正切规则在法国采矿界大受欢迎,即移动角 β 应为:

$$\tan(90^{\circ}-\beta)=0.5\tan\alpha(\text{式中}\alpha\text{为煤层倾角}) \quad (1-3)$$

总的来看,19世纪以前“三下一上”开采尚未形成系统理论,人们虽然进行了一些实践,但并没有成熟理论作为指导。19世纪中叶,人们首先进行了矿山开采沉陷的观测工作。这一时期的观测以地表观测为主,通过对地面房屋损害情况的观测和对地表设立的零星水准点的观测,获得了地表下沉与采厚、工作面长度之间的关系;同时也进行了一些水平移动观测,但尚未形成系统的观测站;人们对岩体内部移动、破坏规律的观测才刚刚开始。

1.2.3 现场实测与规律认识阶段

1901年至二次世界大战这一时段是开采沉陷学的现场实测与规律认识阶段,具体包括三个方面内容。

(1)开采沉陷机理和规律的研究

从20世纪初,各国研究者开始进行岩层与地表移动的系统观测,获得了大量观测资料,并在对资料进行分析的基础上取得如下一些成果。

①关于地表水平移动变形规律^[17]

1907年, Korten 发表了自己的观测结果, 提出了水平移动和水平变形的分布规律。他给出最大水平移动位于采空区边缘的正上方而不存在拐点的水平移距, 也认识到在急倾斜开采条件下地表的水平移动可能大于下沉。

②关于老采空区的“活化”问题

苏联专家通过顿涅茨煤田的观测认为, 当新采空区临近老采空区时, 岩层移动过程加剧、移动角变小, 移动向老采空区扩展^[18]。这是人们对于老采空区“活化”的初步认识, 这一认识至今仍在被采用。

③关于地表移动时间

Schultz 通过对沙尔伯留坎煤田的观测, 认为移动过程要延续 5 年, 甚至可达 10~12 年。伊米茨分析了鲁尔煤田 50 年的资料后发现, 主要下沉发生在最初的 1~3 年, 移动过程在 5~6 年后完全终止。这个时期取得的主要成果如下^[19]: a. 采深越大, 地表移动时间越长。b. 采用房柱式开采的地表移动时间比采用全部垮落法开采更长。c. 下沉速度大于 50mm/d 的地表移动为地表下沉活跃期。d. 获得了活跃期内下沉占总下沉的百分比数。e. 初步得出了移动时间与覆岩岩性之间的关系。f. 对地表移动结束的标准进行了讨论但并未获得一致意见。

④关于地表的超前影响^[20]

人们已认识到, 地表点的移动超前于工作面, 其超前的距离与覆岩岩性和开采深度等因素有关。

⑤关于岩层移动

1910年, Puschmann 在其著作中首次发表了岩层移动的观测结果(观测站设在开采煤层上方的巷道中)。后来, 各国学者相继进行了大量观测, 获得成果如下^[21]: a. 随着远离采空区下沉逐渐减小, 其衰减系数为 0.004 (Puschmann, 充填开采) 和 0.023 (Mathilde