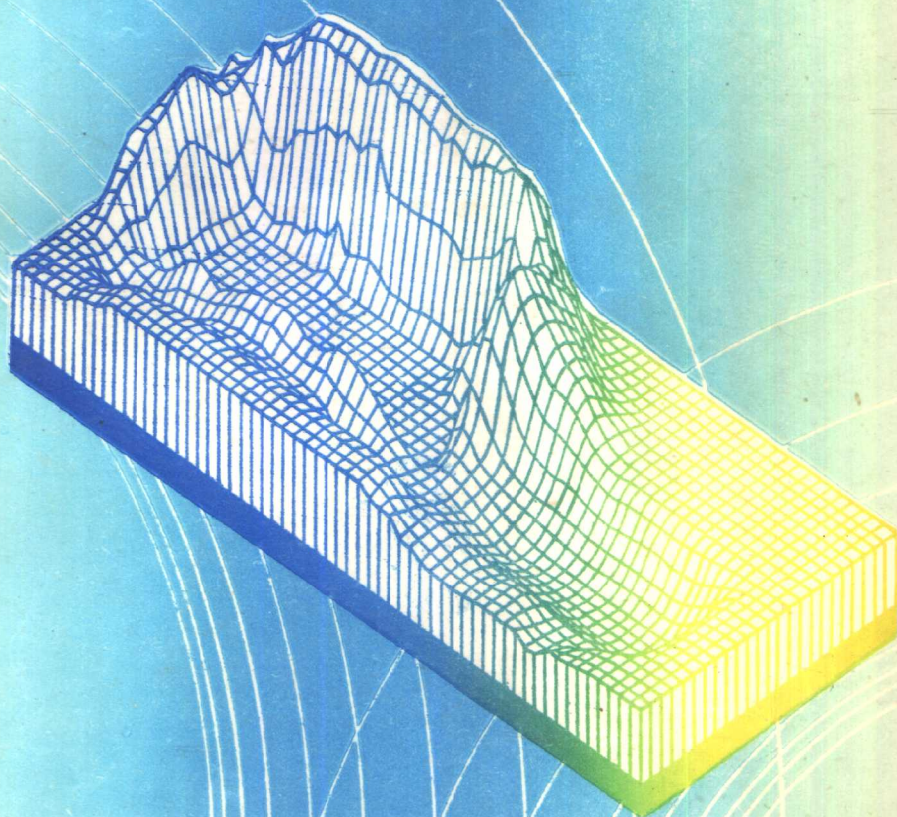


高等学校教学用书

采动损害与防护

邹友峰 胡友健 郭增长 编著



中国矿业大学出版社

TD823.83
二-917

高等学校教学用书

采动损害与防护

邹友峰 胡友健 郭增长 编著

中国矿业大学出版社

825489

内 容 提 要

本书系统阐述了地下开采对建筑物、水体、铁路及井筒的损害,并详细介绍了“三下”采煤的开采措施和防护措施。全书共分七章,主要内容有:采空区处理技术、覆岩破坏的基本规律及观测方法、保护煤柱设计、建筑物下采煤、水体下采煤、铁路下采煤和井筒煤柱开采等。

本书为煤炭系统高等院校测量工程专业的教材,也可供采矿、工程地质、建筑、土地管理等专业的科技人员参考。

责任编辑 洪 敏

责任校对 杜锦芝

高等学校教学用书

采动损害与防护

邹友峰 胡友健 郭增长 编著

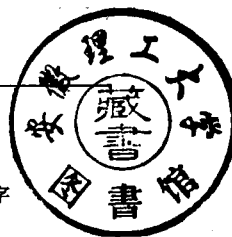
中国矿业大学出版社 出版发行

新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 9 字数 219 千字

1996 年 9 月第一版 1996 年 9 月第一次印刷

印数 1—1500 册



ISBN 7 - 81040 - 553 - 5

TD · 57

定价:9.50 元

序

据不完全统计,我国国有煤矿在建筑物下、铁路下、水体下及承压水上(即所谓的“三下一上”)压滞的煤炭储量达130亿t以上,不能用常规的方法开采。随着国民经济的发展,煤矿开采强度增大,矿区地面建设规模扩大,矿区建筑用地紧张,大多数矿区人口增加而农业用地相对地有所减少。同时随着人民生活水平的改善,人民对于地面环境保护的要求也逐渐提高。因此,充分开发利用地下资源与保护工业及民用建筑、保护环境和保证矿井安全生产的矛盾日益尖锐,规划或处理不当的情况时有发生,以至于成为困扰矿山生产和建设的重要因素。

60年代以来,国内外采矿界的工程及科技人员致力于“三下一上”压煤开采的试验与研究,取得了大量的成果与经验,使“采动损害与防护”的原理与技术逐步形成为采矿科学技术的重要组成部分。若不充分考虑采动损害与防护的问题,搞出来的矿区规划就有可能是不完整的规划,矿山建设设计就有可能是不尽合理的设计,生产计划就有可能难以实现的计划。为此,现代化矿山的工程技术人员应该具备系统的采动损害与防护的知识,并掌握这方面的技术。实践表明,合理地解决采矿与保护建筑物、铁路、水体以及矿井安全的矛盾,对于充分利用地下资源、延长矿井服务年限、发挥投资效能、提高企业经济效益,都有着十分重要的意义。

培养采矿工程技术人才的高等学校,在有关的院系中设置“采动损害与防护”的课程作为必修课或选修课,是必要的和有益的。本书作为这门课程的教材,较系统全面地介绍有关的原理和技术是恰当的。本课程是一门涉及知识面较广,并且实用性较强的课程。学习这门课会有一定的难度,同时也会带来诸多的兴趣。相信学习这本书将对学生未来的实践有所裨益,也相信这本书将会在今后的教与学的实践中,随着本学科领域的科学技术发展而不断完善。

中国矿业大学教授 马伟民

1995. 9. 24

1995/9/24

前 言

“采动损害与防护”涉及到许多学科,如“矿山开采沉陷学”、“岩石力学”、“工程岩土学”、“房屋建筑学”、“土地管理”等。它是一门新兴的边缘学科,是“矿山开采沉陷学”的原理和方法在建筑物下、水体下、铁路下(即通常所说的“三下”)采煤和井筒煤柱开采中的应用。学生在学习本课程之前,应先学习“矿山开采沉陷学”。

“采动损害与防护”是测量工程专业开设的一门指定选修课,目前各院校尚缺乏统一的教材。为了适应和满足教学的需要,焦作矿业学院(现焦作工学院)曾于1988年编写了《采动损害与防护》油印教材。本书就是在该油印教材的基础上,总结了编著者多年的教学经验和吸收了当前“三下”采煤及相关学科的新技术和新成果,并经扩充、改编而成。

本书共分七章,包括:采空区处理技术、覆岩破坏的基本规律及观测方法、保护煤柱设计、建筑物下采煤、水体下采煤、铁路下采煤、井筒煤柱开采。本书为煤炭系统高等院校测量工程专业的教材,也可供采矿、工程地质、建筑、土地管理等专业的科技人员参考。

本书由邹友峰主编,参加编写工作的有:邹友峰(第一、二、三章)、胡友健(第四、六章)、郭增长(第五、七章)。

在本书的编写过程中,焦作工学院的张凤举教授给予了热情的支持和帮助,焦作工学院开采沉陷与土地利用研究所的老师们也提出了许多宝贵的意见;书稿编写完成之后,承蒙中国矿业大学的马伟民教授作了审阅并作序,在此一并表示衷心感谢。

由于编者学识有限,实践经验不足,书中肯定存在不少缺点甚至错误,恳请读者予以批评指正。

作者

1995年6月于焦作

目 录

第一章 采空区处理技术	(1)
第一节 概述.....	(1)
第二节 垮落法.....	(2)
第三节 充填开采法.....	(3)
第四节 条带开采尺寸设计的一般方法.....	(8)
第五节 条带开采尺寸设计的弹塑性方法	(13)
第二章 覆岩破坏的基本规律及观测方法	(22)
第一节 采动岩体的应力、位移和变形.....	(22)
第二节 覆岩破坏的基本特征及最大高度	(29)
第三节 覆岩破坏的观测方法	(39)
第三章 保护煤柱设计	(46)
第一节 保护煤柱的留设原理	(46)
第二节 垂直断面法和垂线法	(50)
第三节 数字标高投影法	(53)
第四节 临界面标高投影法	(55)
第五节 临界变形值法	(58)
第四章 建筑物下采煤	(62)
第一节 开采沉陷对建筑物的影响	(62)
第二节 建筑物的损害程度与地表变形的关系	(65)
第三节 建筑物下采煤的防护措施	(71)
第四节 建筑物下采煤设计	(80)
第五节 采动区内抗变形建筑物设计	(81)
第五章 水体下安全采煤	(86)
第一节 岩层的隔水性分析	(86)
第二节 水文地质结构类型	(88)
第三节 地下开采对隔水层的影响	(91)

第四节	矿井涌水量的预测方法	(92)
第五节	安全煤岩柱的留设	(95)
第六节	水体下采煤的技术途径	(100)
第七节	承压水上采煤	(101)
第六章	铁路下采煤	(104)
第一节	铁路下采煤的概况及特点	(104)
第二节	地下开采对路基及上部建筑的影响	(105)
第三节	铁路下采煤的安全技术措施	(111)
第七章	井筒煤柱开采	(119)
第一节	井筒煤柱开采对井筒的损害	(119)
第二节	井筒移动变形预计	(121)
第三节	井筒保护煤柱的开采方法	(126)
第四节	井筒的加固维护措施	(129)
参考文献		(134)

第一章 采空区处理技术

第一节 概 述

煤矿区地表沉陷控制的关键是采煤方法和顶板管理方法,后者又称之为采空区处理技术。目前采空区处理技术有垮落法、顶板缓慢下沉法、充填法和条带开采法等(图 1-1)。

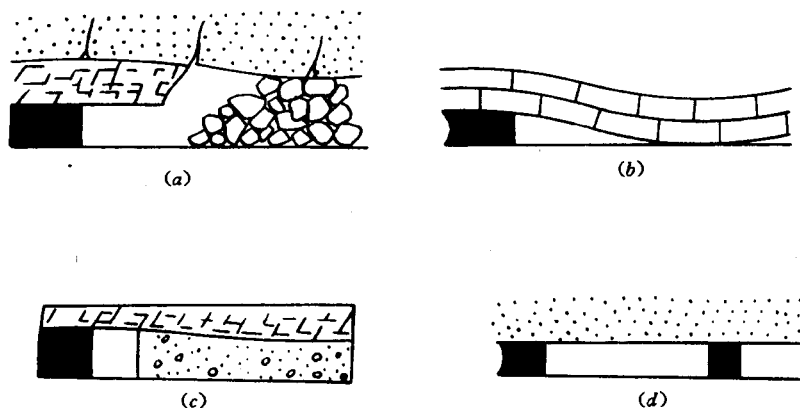


图 1-1 采空区处理技术

a—垮落法; b—顶板缓慢下沉法; c—充填法; d—条带开采法

垮落法就是让直接顶板垮落,利用岩石垮落后的碎胀性使采空区填满,以控制老顶的活动。

顶板缓慢下沉法是指随着工作面的推进,开采后的顶板产生弯曲下沉,从而将采空区填实。这种顶板管理方法一般在采厚较小,顶板易于弯曲下沉(如石灰岩顶板)时采用,这里不作详细介绍。

充填法是指随着工作面的推进,将采集的充填材料用机械和人工的方法充填于采空区,以控制顶板的活动和地表下沉。这种顶板管理方法费用较高,通常只在厚及特厚煤层开采或重要建筑物下采煤时使用。

条带开采法是沿煤层的走向或倾向,将开采区划分为若干个宽度相等或不相等的条带,开采一条,保留一条,利用留下的条带煤柱支撑顶板,以达到减小地表沉陷的目的。条带开采法按其条带长轴的方向,可划分为走向条带开采和倾向条带开采(图 1-2)。

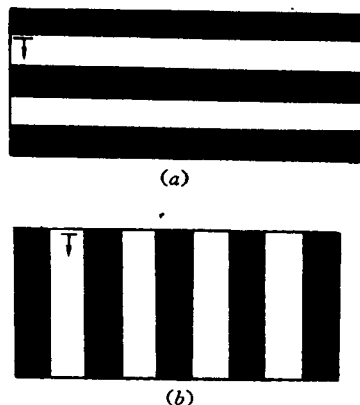


图 1-2 条带开采的类型

a—走向条带开采; b—倾向条带开采

第二节 垮落法

垮落法管理顶板具有开采工艺简单、回采率高、煤炭损失量小、经济效益好等优点,因而这种采空区处理技术在国内外矿井开采中得到了广泛应用。然而垮落法也同时存在着对围岩扰动剧烈、地表移动变形量大等弊端,所以在建筑物下、铁路下、水体下及灰岩承压水上(简称“三下一上”)采煤时,应注意以下问题:

一、合理布置开采边界

地下开采后,各种变形的最大值均出现在两侧开采边界附近上方的地表处,因此在“三下一上”采煤时,应尽量避免在建筑物、构筑物下留设开采边界,而把开采边界布置在对其影响较小或无影响的地方。多煤层开采时,应避免开采边界的重叠。如图 1-3 所示,当两个煤层的开采边界重叠时,地表出现最不利叠加(图 1-3a);相反,若两煤层的开采边界相错 $s = 0.4(r_1 + r_2) + s_1 - s_2$ 时,地表出现有利叠加,叠加后地表的水平变形和曲率大大减小(图 1-3b)。这里 s 为两煤层的错距, r_1 、 s_1 和 r_2 、 s_2 分别为第一煤层和第二煤层的主要影响半径和拐点偏移距。

二、合理设计残留煤柱

理论分析和实测资料表明,残留于采空区内的煤柱将在一定程度上出现地表移动变形的叠加。由图 1-4 可知,当煤柱的宽度为 $4r - 2S_0$ 时,地表移动变形基本上不出现叠加现象。其中 r 为主要影响半径, S_0 为拐点偏移距。当煤柱宽度为 $2r - 2S_0$ 时,地表移动变形出现叠加,但峰值仍为煤柱两侧各自开采的最大变形值。当煤柱的宽度减小到 $0.8r - 2S_0$ 时,地表变形叠加后,其峰值达到煤柱两侧各自开采引起的最大变形值的两倍。

当煤柱宽度继续减小时,地表仍会出现变形叠加,但煤柱两侧各自开采的最大变形值不再叠加在一起。当煤柱的宽度小于一定尺寸时,由于应力的集中,使煤柱完全丧失承载能力,地表下沉几乎与无煤柱开采相同。因此,在进行“三下”采煤时,应尽量干净回采,不留残柱。若因某些需要而留设残柱时,也应合理设计残留煤柱的尺寸。

三、避免垮落岩(煤)块的流失

垮落在采空区内的岩块和煤块的碎胀性,是使垮落能在岩体一定范围内终止的根本原因之一。如果垮落在采空区内的岩块和煤块出现流失现象,这无异于增加了开采厚度,垮落和断裂的高度也会相应增大。因此避免垮落岩块和煤块的流失,是水体下采煤的一项重要措施。

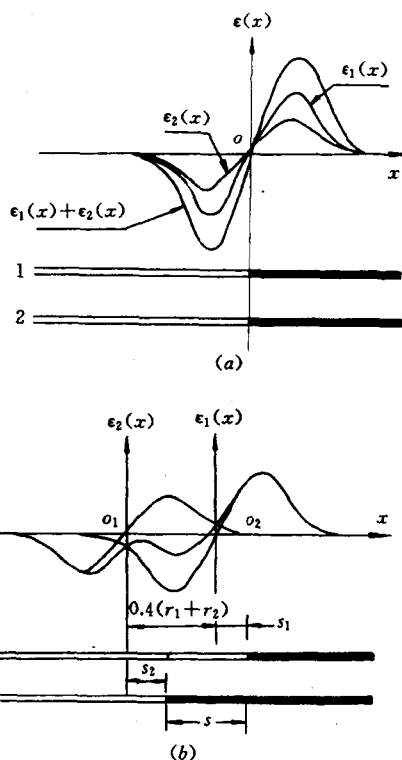


图 1-3 地表变形的叠加
a—最不利叠加; b—有利叠加

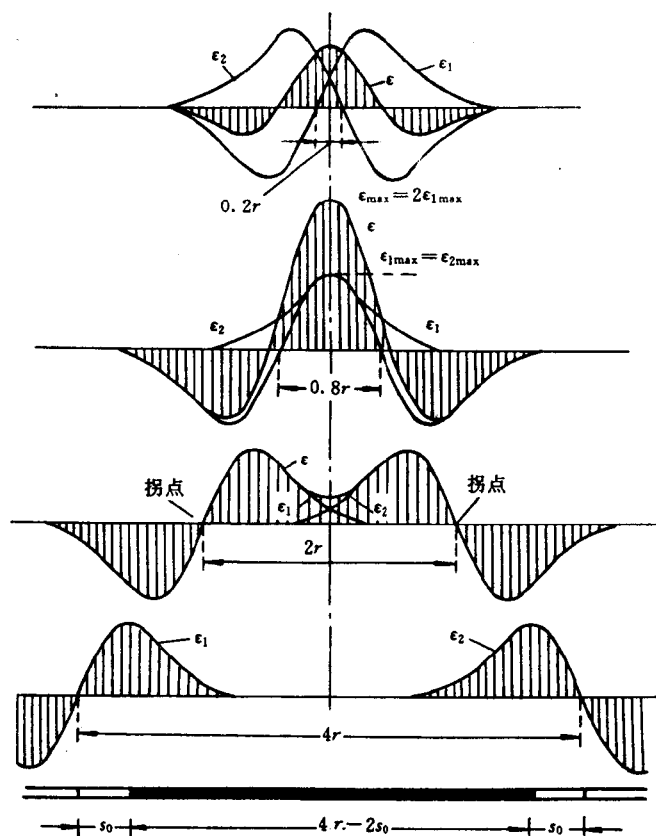


图 1-4 残柱对地表移动变形的影响

开采缓倾斜煤层时,一般不会出现垮落岩(煤)块的流失现象。但当开采上限接近基岩风化带时,往往会在回风巷和工作面上口发生局部抽垮。所谓抽垮,就是指顶板岩层或煤层本身在一个较小范围内超过正常高度的垮落现象。若处理不好,势必产生垮落岩块的流失,并使这种局部抽垮向上扩展。特别是当回风巷离松散层底部的含水砂层很近时,可能引发水砂溃入事故,故此时应加强回风巷的维护及工作面上口的顶板管理工作。

开采急倾斜煤层时,经常采出由采区上部垮落于采空区内的煤炭,这就属于典型的垮落煤块流失问题。在第一水平开采时,采空区内垮落的煤块一般来源于回采上限处煤层的抽垮。若采出抽垮的煤量越多,煤柱的破坏越严重,这种抽垮甚至会扩展到煤层露头,在煤系地层内有含水松散层覆盖的情况下,水砂和泥土可能会溃入井下。因此,在水体下开采急倾斜煤层时,为了避免垮落在采空区内的煤炭的流失,应严禁超限采煤。

第三节 充填开采法

地表移动变形值与其最大下沉值(或开采厚度)成正比,因此,减小煤层的开采厚度就可有效地降低地下开采对建筑物或构筑物的损害程度。充填开采法就是用充填材料来充填开采空间,这就相当于减小了煤层的开采厚度,它是减小地表沉降的有效措施之一。国内外常

用的充填方法有：水砂充填、风力充填、矸石自溜充填、人工带状充填和边界充填等。

一、水砂充填

(一) 水砂充填系统

水砂充填开采法的主要特点是要将大量的充填材料利用水力运入采空区，因此，必须建立为输砂、排泥、排水所需要的工程和设施，以及由它们所组成的水砂充填生产系统。如图 1-5 所示，水砂充填系统由以下四部分组成：

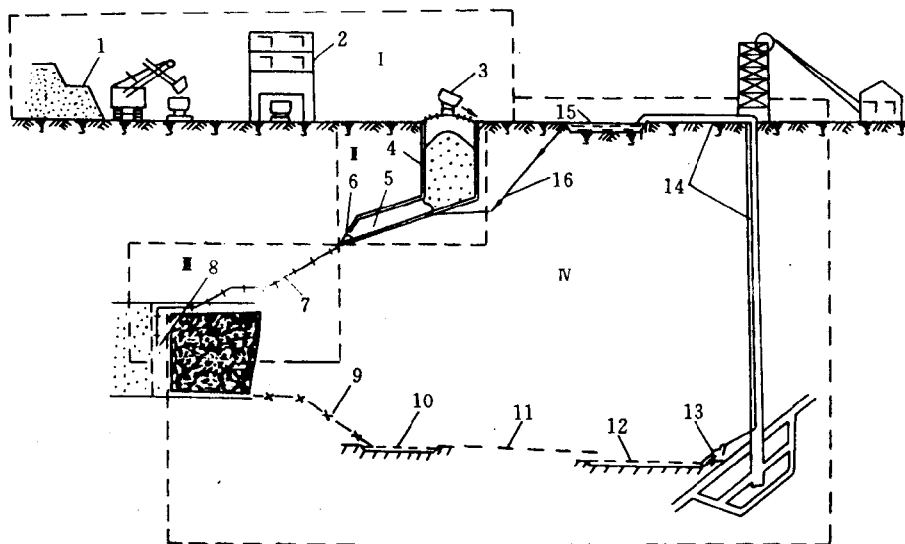


图 1-5 水砂充填开采示意图

1—地面采砂场；2—填料加工厂；3—地面运填料矿车；4—砂仓；5—注砂室；
6—喇叭口；7—充填管路；8—充填工作面；9—自流污水沟；10—沉淀池；
11—水沟；12—水仓；13—水泵房；14—排水管；15—贮水池；16—供水管；
I—填料开采、加工、选运系统；II—贮砂及水砂混合系统；
III—输砂管路系统；N—供水及废水处理系统

- (1) 由填料的开采和运输所形成的“填料开采、加工、选运系统”；
- (2) 由贮存填料的砂仓和水砂混合设施所形成的“贮砂及水砂混合系统”；
- (3) 利用管路把混合好的水和砂（称之为砂浆），输送到充填地点的“输砂管路系统”；
- (4) 由地面贮水池及供水管，井下沉淀池、水仓及排水管路所形成的“供水及废水处理系统”。

从图 1-5 可见，由露天采砂场 1 所采出的原料，经矿车运入加工车间 2，进行破碎与筛分后混合成为成品砂，再经运输线路运到砂仓 4 贮存。在注砂室 5 中，将成品砂与水混合成砂浆，经喇叭口 6 注入充填管路 7，送入采空区 8。砂浆在采空区内脱水后，填料停留于采空区，排出的废水从水沟 9 流入井下沉淀池 10。澄清后的水再经水沟 11 流入水仓 12，然后由水泵经排水管 14 排至地面贮水池 15 以便循环使用。

(二) 水砂充填开采的影响因素

采用水砂充填开采时，地表的下沉系数变化于 0.06~0.20 之间，这主要与充填材料的性质和水砂充填的充满程度有关(图 1-6)。

1. 充填材料的质量

影响充填材料质量的主要因素有

(1) 砂子的沉缩率。一般情况下,砂子的沉缩率不应超过 10~15%,否则地表沉陷量较大。根据沉缩率的不同,可将砂子分为三级(表 1-1),在重要的建筑物下采煤时,应采用低沉陷率的砂子。

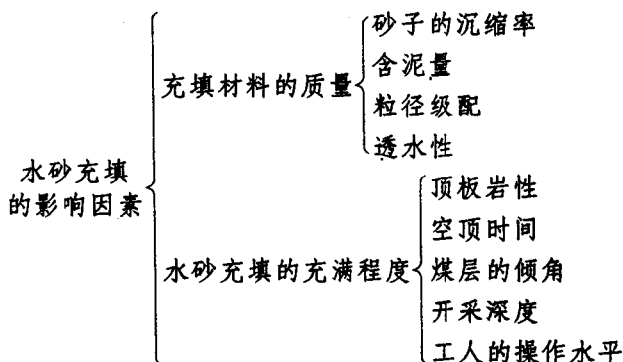


图 1-6 水砂充填地表沉陷的影响因素

(2) 含泥量。充填材料中直径在 1mm 以下的颗粒或粉末称为泥分,它存在两种相反的作用:其一是易于脱水而停留于采空区内的泥分(称为截留泥分),它可以充填大颗粒间的空隙,使充填体密实。这既可降低沉缩率,还可减少对管路的磨损,它是充填材料中的有益成分。其二为不易脱水或顺水流出的泥分(称为流失泥分),它使充填体的沉缩率增大,填料的消耗量大,且易于磨损水泵,污秽巷道。若含泥量达 20~30%时,将使充填体泄水不畅,常发生胀破砂门造成跑砂事故。因此,一般规定 1mm 以下颗粒的含量不应超过 10~15%。

表 1-1

砂子的级别与沉缩率

砂子级别	沉缩率 (%)	建筑物的重要程度
I	5	重要
II	10	比较重要
III	15	一般

(3) 粒径级配。所谓粒径级配是指不同粒径在填料中的相对含量。充填体致密坚固的理想条件是大块间充填中块,中块间充填小块,小块间充填粉末,尽可能消除颗粒间的空隙。此外,为了保证输砂工作顺畅,最大粒径应小于管径的 2/5。抚顺矿区水砂充填的合理粒径级配为:

粒径(mm)	50~30	30~10	10~3	3~1	1~0
含量(%)	15	25	30	20	10

(4) 透水性。它是以一定时间内透水量占注入水量的百分比来表示透水的强弱,即向固定体积的填料试样中注入一定量的水,及时观测水量渗出的时间及其不同时间渗出水量的百分比。若试样的注水量在较短时间内全部渗出者为优;而在十分钟内尚不能渗出 80%者,

应视为透水性很弱的填料。只有当充填体的透水性很强时,才能缩短充填时间,提高充填效率。

2. 水砂充填的充满程度

影响水砂充填充满程度的主要因素有:

(1) 顶板岩性。顶板岩性越软弱,充满程度越低,因为顶板软弱,在煤层采出至开采空间充满这段空顶时间内,顶板已有较大的下沉,因而地表下沉量也较大。例如扎赉诺尔矿务局采用水砂充填开采时,地表下沉系数高达 0.23~0.25 的原因就是顶板岩层过于软弱的缘故。

(2) 开采深度与煤层倾角。由于地应力与采深成正比,当采深越大时,地下开采后开采水平的附加应力较大,充填体的压缩量也较大。而当煤层倾角较大时,因充填体自重分力的作用,开采空间易于充满。

(3) 空顶时间及工人的操作水平。空顶时间越长,顶板的下沉量越大。工人的充填操作技术越熟练,则开采空间的填满程度越高。

由于水砂充填需要专门的充填设备和大量的充填材料,增加了辅助掘进工作量,降低了劳动效率,从而增加了煤炭生产的吨煤成本。因此,只有在大型重要建筑物下采煤时,才考虑采用水砂充填开采法。

二、风力充填

风力充填法就是将地面的充填材料通过垂直管道溜入井下贮料仓,然后由运输机输送到风力充填机,风力充填机利用风压,通过充填管道将充填材料送入采空区,用以支承顶板。风力充填减小地表下沉的效果不如水砂充填,而且使得井下粉尘也较大,但它对充填材料和充填设备的要求较低。焦作演马庄矿曾采用过风力充填法管理顶板,地表下沉系数为 0.4~0.5。风力充填法在英国、德国、日本、比利时等国也曾得到过应用。

三、矸石自溜充填

当煤层的倾角较大时,矸石在自重的作用下,能沿煤层底板自溜充填于采空区。这种充填方法可以就地取材,并将井下的矸石仍旧充填于井下。矸石自溜充填设备简单,但其减小地表下沉的效果较小。南京青龙山矿曾用矸石自溜充填法进行过建筑物下采煤。

四、带状充填

带状充填就是沿工作面方向每隔一定距离垒砌一个矸石带来支承顶板,而且随着工作面的向前推进,矸石带也随之加长。图 1-7 为枣庄矿用矸石带状充填的 165 工作面。用带状充填法减小地表沉陷的效果,主要取决于矸石带能否承受住上覆岩体的压力。当煤层的埋藏深度较浅时,垒砌的矸石带长轴方向尽量与建筑物的长轴方向直交,以避免地表扭曲变形对建筑物的影响。

为了最大限度地减小地表变形,有时采用混凝土充填。如波兰贝托姆城下开采浅部铅锌矿($H=80\sim90\text{m}$ 、 $M=4\sim5\text{m}$)时,采用仓房式采矿法,采空区就是用混凝土充填。

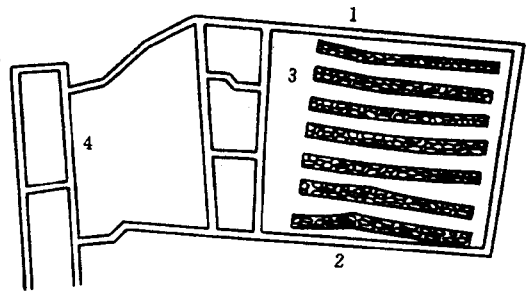


图 1-7 枣庄矿矸石带状充填

1—回风巷; 2—运输巷; 3—矸石带; 4—八号上山

五、边界充填法

因在开采边界上方附近地表的移动变形值最大,所以若把开采边界附近的采空区进行充填,就能在充填面积较小的情况下有效地减小地表的移动变形(图 1-8)。充填宽度可取为 $(4 \sim 6) \sqrt{H}$, H 为开采深度,这样地表的最大变形值可减小 $1/4 \sim 1/6$ 。充填宽度可根据建筑物的保护要求、技术经济条件由地表移动变形预计的反演来确定。

六、充填开采时地表的最大下沉值

采用全部垮落法管理顶板时,地表的下沉系数一般为 $0.6 \sim 0.8$,而当采用充填法管理顶板时,地表的沉陷量可大大减小。表 1-2 给出了各种采空区处理技术时地表的下沉系数 q 。

水平煤层开采时地表的最大下沉值 W_0 可采用两种方法进行计算:一是利用充填开采的下沉系数 $q_{\text{充}}$ 乘以采出煤层厚度 M ;二是利用全部垮落法的下沉系数 $q_{\text{垮}}$ 乘以开采计算厚度 M_c ,即

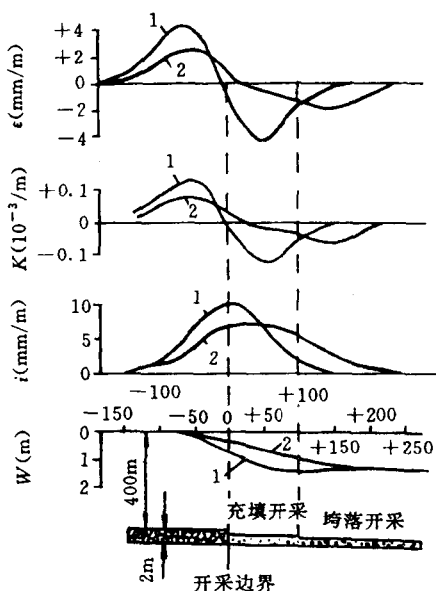


图 1-8 边界充填时地表的移动变形

表 1-2

各种采空区处理技术时的地表下沉系数

采空区处理技术	下沉系数 q	备注
全部垮落法	0.6~0.8	
条带开采法(垮采)	0.06~0.16	
条带开采法(水砂充填)	0.01~0.05	
水砂充填法	0.06~0.20	
加压水砂充填法	0.05~0.08	
风力充填法	0.4~0.5	
矸石自溜充填法	0.45~0.55	
带状充填法	0.55~0.70	
混凝土充填法	0.02	

煤层的倾角大于 35°

$$W = \begin{cases} q_{\text{充}} M \\ q_{\text{垮}} M_c \end{cases} \quad (1-1)$$

由图 1-9 可知,计算采厚 M_c 可按下式进行计算:

$$M_c = (h_m + h_f)(1 - B) + BM \quad (1-2)$$

式中 h_m ——充填之前顶底板的移近量,无实测资料时可取 h_m 为 0.15m ;

h_f ——充填不充分量, m ;

B ——充填材料的沉缩率,可根据充填开采经验或充填体压缩试验来确定。无实测资料时, B 可取表 1-3 中的值。

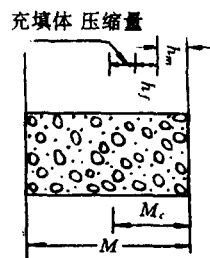


图 1-9 充填开采计算采厚 M_c 示意图

表 1-3

充填材料的沉缩系数 B

充 填 方 法	沉 缩 率 B
水矿充填	0.05~0.15
破碎矸石水力充填	0.15~0.30
风力充填	0.25~0.40
破碎矸石自溜充填	0.25~0.45
一般矸石自溜充填	0.35~0.50

第四节 条带开采尺寸设计的一般方法

条带开采法因其具有对围岩扰动轻、地表变形小的特点,首先在波兰、英国、前苏联、美国、南非等国得到了广泛应用,之后澳大利亚、印度、德国等也相继采用。自 1967 年以来,我国在抚顺、阜新、蛟河、淄博、峰峰、平顶山等地进行了大量的条带开采试验研究,取得了许多有益的经验。目前条带开采已日益成为建筑物下采煤的一种十分有效的开采措施。

一、条带开采尺寸设计的原则

合理确定条带开采尺寸是条带开采能否取得成功的关键。在进行条带开采尺寸设计时,必须遵循下列三项原则:

(1) 强度稳定性。在进行条带开采时,首先应保证所留设的条带煤柱的强度大于实际承受的荷载,使煤柱具有长期的稳定性。通常煤柱的宽高比不应小于 2(充填条采)或不少于 5(垮落条采)。

(2) 抗滑稳定性。采用走向条采回采倾斜煤层时,随着煤层倾角的增大,其条带煤柱向下山方向产生滑移的可能性增大,因而需要进行条带煤柱的抗滑稳定性分析。

(3) 变形稳定性。条带开采的目的就是为了保护地面建筑物,使其免遭开采的影响。因此在进行条带开采尺寸设计时,应根据建筑物的质量和保护要求,确定一个合理的地表变形值,并使得条带开采后地表出现的变形值小于该合理变形值。国内外条带开采的经验表明,当采出条带宽度达到采深(H)的 $1/3$ 时,地表会出现波浪形下沉盆地。为了保证条带开采后地表出现单一平缓的下沉盆地,采出条带宽度一般为 $H/4 \sim H/10$ 。

条带开采尺寸设计是一个不断优化的过程。首先根据条带开采的经验和煤矿生产的要求,初步选取采出条带宽度和保留条带宽度;然后进行强度稳定性、抗滑稳定性(倾斜煤层走向条采)和变形稳定性分析;不断调整采出条带和保留条带的宽度,直到既满足稳定性要求,又便于煤炭生产且采出率最高为止。我们来着重分析强度稳定性的问题。

目前条带开采尺寸设计(强度稳定性分析)的方法有:单向应力法、A·威尔逊的三向应力法、弹塑性椭圆孔法和刚塑性滑移线法。下面着重介绍前两种方法。

二、单向应力法

单向应力法留设条带开采尺寸的基本原理为:煤体的单向抗压强度应大于煤体实际承受的荷载。煤体实际承受的荷载 $p_{\text{煤}}$ 可按“分载面积法”确定[见图 1-10,图中($a+b$)阴影部分为煤柱分载的面积],即条带开采后采出条带上方岩体的自重全部转移到煤柱上,因此有

$$p_{\text{煤}} = \frac{0.01\gamma H(a+b)}{a} \quad (1-3)$$

式中 γ ——上覆岩体的平均容重, g/cm^3 ; ①

a ——保留条带(煤柱)的宽度, m ;

b ——采出条带宽度, m ;

$p_{\text{煤}}$ ——煤柱上实际出现的平均荷载, MPa 。

煤体的三向抗压强度可用在实验室内测定的煤块单轴抗压强度及煤体所在位置处的侧应力,按霍克-布朗(Hoek-Brown)的节理化强度准则来确定,即

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2)^{1/2} \quad (1-4)$$

式中 σ_1 ——煤体的三轴抗压强度, MPa ;

σ_3 ——煤体所在位置处的侧应力, MPa ;

σ_c ——煤块试样的单轴抗压强度, MPa ;

m, s ——经验常数,可参照表 1-4 选取。

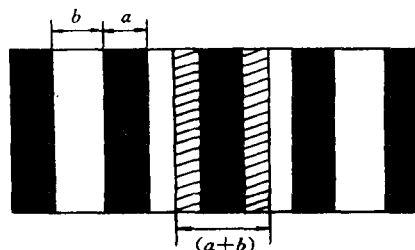


图 1-10 分载面积法基本原理示意图

表 1-4 岩体的质量及其经验常数

经验破坏准则 $\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2)^{1/2}$	碳酸盐岩: 晶体 解理发育的白 云岩、石灰岩、 大理岩	成岩较好的粘 土质岩石: 泥 岩、粉砂岩、页 岩和板岩(垂直 于层理)	砂质岩石: 结晶 好、晶体解理发 育的砂岩和石 英岩	细粒多矿物火 成结晶岩: 安山 岩、结晶玄武 岩、辉绿岩和流 纹岩	粗粒多矿物火 成变质结晶岩: 角闪岩、辉长 岩、片麻岩、花 岗岩、苏长岩、 石英闪长岩
完整岩石					
实验室尺寸岩样, 无原 始裂隙	$m=7.0$ $s=1.0$	$m=10.0$ $s=1.0$	$m=15.0$ $s=1.0$	$m=17.0$ $s=1.0$	$m=25.0$ $s=1.0$
优质岩体					
紧密镶嵌结构, 未扰 动, 具有粗糙未风化节 理, 节理间距为 1~3m	$m=3.5$ $s=0.1$	$m=5.0$ $s=0.1$	$m=7.5$ $s=0.1$	$m=8.5$ $s=0.1$	$m=12.5$ $s=0.1$
良质岩体					
新鲜或微风化岩体, 轻 微扰动, 节理间距 1~ 3m	$m=0.7$ $s=0.004$	$m=1.0$ $s=0.004$	$m=1.5$ $s=0.004$	$m=1.7$ $s=0.004$	$m=2.5$ $s=0.004$
中等岩体					
数组中等风化节理, 节 理间距为 0.3~1m	$m=0.14$ $s=0.0001$	$m=0.20$ $s=0.0001$	$m=0.30$ $s=0.0001$	$m=0.34$ $s=0.0001$	$m=0.50$ $s=0.0001$
差质岩体					
多组泥质充填的风化 节理, 节理间距为 30~ 50mm, 或干净、压密的 填石	$m=0.04$ $s=0.00001$	$m=0.05$ $s=0.00001$	$m=0.08$ $s=0.00001$	$m=0.09$ $s=0.00001$	$m=0.13$ $s=0.00001$
劣质岩体					
多组夹泥的强风化节 理, 节理间距为 50mm, 或废岩	$m=0.007$ $s=0$	$m=0.010$ $s=0$	$m=0.015$ $s=0$	$m=0.017$ $s=0$	$m=0.250$ $s=0$

① 岩石“容重”这个术语已经不能用了,因为它既包含与“质量”有关的概念,又包含与“重力”有关的概念,很不严密。根据有关国家标准,今后凡在指质量(习惯称重量)的场合,应称作质量密度,简称密度,用 ρ 表示,计量单位为 kg/cm^3 ;凡在指重力的场合,应称作重力密度,简称重度,用 γ 表示,计量单位为 N/m^3 。考虑到现有的一些公式,都是在以前那样的定义之下推导出来的,要改有困难。但在应用这些公式时,应按新的规定进行计算。——责任编辑

若取 $\sigma_3=0$, 则可求得煤体的单轴抗压强度 R_c 为

$$R_c = \sqrt{s} \sigma_c \quad (1-5)$$

此外, 煤体的强度还可按其它经验公式来确定, 如南非沙拉蒙(Salamon)得出的矿柱强度 R_c 经验公式为

$$R_c = 7.18a^{0.46}M^{-0.66} \quad (1-6)$$

这里 R_c 的单位为 MPa, a 和 M 的单位为 m。

因此, 条带开采的安全系数 s_f 应满足

$$s_f = R_c / p_{\text{煤}} \geq 1 \quad (1-7)$$

三、A. 威尔逊的三向应力法

(一) 煤体的极限强度

由图 1-11 所示的极限平衡条件可知, 在三向应力状态时应有

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + c \cot \varphi \right) \sin \varphi$$

$$\text{即 } \sigma_1 = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 \quad (1-8)$$

式中 c ——煤体的粘聚力, MPa;

φ ——煤体的内摩擦角, ($^\circ$)。

从式(1-8)可见, 煤体的单轴抗压强度 R_c 为

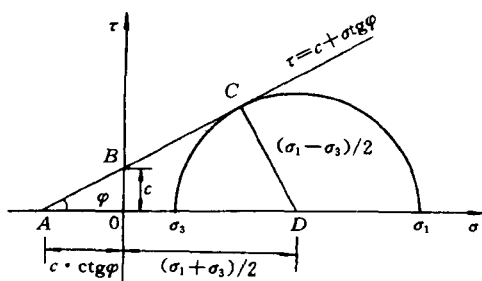


图 1-11 三向应力状态下的极限平衡条件

$$R_c = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (1-9)$$

条带开采后, 由于应力的集中, 煤体的边缘部分失去承载能力, 这个范围称之为屈服区或塑性区, 屈服区向里为弹性核区(图 1-12)。在屈服区内可近似认为 $c=0$, 在煤柱边缘侧应

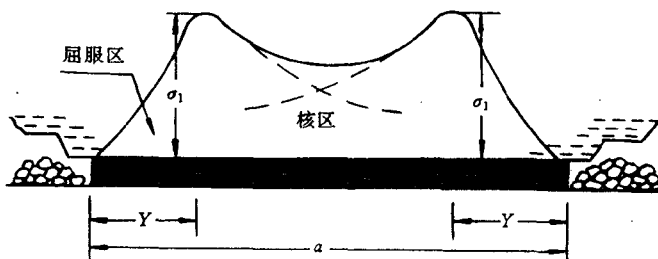


图 1-12 屈服带及其弹性核区

力 $\sigma_3=0$, 而在弹塑性交界处, 侧向应力恢复到开采前的应力值, 即 $\sigma_3=0.017H$ (MPa)。因煤体的内摩擦角 φ 近似于 36° , 于是煤体的极限强度值 σ_1 为:

$$\sigma_1 = 4\sigma_3 = 0.047H \text{ (MPa)} \quad (1-10)$$

(二) 煤体所能承受的极限荷载

A·威尔逊通过试验得出了屈服带宽度(Y)与采深(H)和采厚(M)之间的关系为

$$Y = 0.00492MH \quad (1-11)$$