

Dynamic Characteristics and Control Factors of
Thin Bedrock Coal Seam with Threat of Water Inrush

薄基岩突水威胁煤层 动力学特征及控制因素

李振华 著



科学出版社

国家自然科学基金面上项目(No. 51374093)

薄基岩突水威胁煤层 动力学特征及控制因素

Dynamic Characteristics and Control Factors of
Thin Bedrock Coal Seam with Threat of Water Inrush

李振华 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以焦作煤业集团赵固一矿为工程背景,采用现场观测、室内试验、数值模拟和理论分析相结合的研究方法,运用材料力学、弹性力学、损伤力学、分形理论和人工智能等理论,较全面地研究了采动影响下厚松散层薄基岩突水威胁煤层动力学特征及控制因素,主要包括顶板的破坏特征和机理、覆岩破坏裂隙演化特征、不同基岩条件下煤层矿压显现规律、覆岩破坏高度和底板破坏深度,建立了覆岩裂隙演化特征的分形损伤模型、覆岩破坏高度和底板破坏深度的预测模型。研究成果在赵固一矿薄基岩突水威胁煤层条件下进行了应用,取得了显著的经济效益。本书对指导现场安全生产及类似工程实践,具有十分重要的理论意义和工程实用价值。

本书可供采矿工程、安全工程、地质工程等专业和从事相关课题研究的科研人员、现场工程技术人员和高等院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

薄基岩突水威胁煤层动力学特征及控制因素 = Dynamic Characteristics and Control Factors of Thin Bedrock Coal Seam with Threat of Water Inrush / 李振华著. —北京:科学出版社,2016.3

ISBN 978-7-03-047634-0

I. ①薄… II. ①李… III. ①薄煤层-矿井突水 IV. ①TD823.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 047223 号

责任编辑:李 雪 / 责任校对:胡小洁

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京科印技术咨询服务公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2016 年 3 月第一次印刷 印张:12 3/4

字数:257 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

煤炭是我国主要的能源和重要的工业原料。富煤、贫油、少气的能源资源赋存特点,决定了煤炭在我国能源供应中具有重要的地位。在我国能源生产和消费结构中,煤炭占总能耗的 70%左右,煤炭工业在国民经济发展中占有举足轻重的地位,并且煤炭作为我国主要能源的现状短时间不会发生改变。在我国,薄基岩、厚松散层地质条件的煤层储量非常丰富,例如神东矿区,是典型的薄基岩、厚松散层的煤层,储量达亿吨,占全国探明储量的 1/3,此外,潞安、永城、两淮、济宁和焦作等矿区也都存在这种特殊地质条件的煤层。我国东部地区是经济发达地区,能源需求量大,冲积层较薄的煤炭资源已开发殆尽,开发东部地区(山东、安徽、河南、河北等省)400~600m 特厚松散层薄基岩所覆盖的煤炭资源能够有效缓解东部地区煤炭供应紧张的不合理局面,对改善铁路运输和国民经济运行态势具有积极作用。

河南省焦作煤田是我国著名的优质无烟煤产地,赋存丰富的华北型石炭、二叠系煤层,对河南省的经济发展起到重要的推动作用。近年来,随着一批老矿井的相继报废,焦作煤业(集团)有限责任公司煤炭生产能力逐年下降,为了解决后备资源严重不足的问题,于 2003 年 6 月依法从河南省煤田地质局取得了赵固矿区的探矿权转让手续,并依据资源分布和建井规划布局,将原赵固矿区以 F17 为界,分为赵固一矿和赵固二矿。赵固矿区位于新乡、焦作两市交界地带,煤田划分属焦作煤田。煤层上覆松散层厚度大、富水性强、基岩薄、承压水压力大、底板隔水层薄是本井田的突出特点。赵固一矿煤层埋深大、上覆基岩薄、围岩破碎且矿压显现剧烈,加之矿井受顶板水和底板高压水两种水害威胁,影响东一盘区的工作面布置,困扰矿井安全生产。因此,开展大埋深、高应力、薄基岩煤层突水威胁条件下围岩破坏机理研究,对于降低浅部煤岩柱高度,最大限度回收煤炭资源,预防顶底板突水事故发生,实现安全高效生产,意义重大。

本书采用现场观测、室内试验、数值模拟和理论分析相结合的研究方法,运用材料力学、弹性力学、损伤力学、分形理论和人工智能等理论,较全面地研究了采动影响下厚松散层薄基岩突水威胁煤层动力学特征及控制因素,并将研究成果在赵固一矿进行了应用与实践,取得了很好的效果。本书共分为 9 章:第 1 章为绪论,介绍本书的研究意义及主要内容;第 2 章为矿井水文工程地质环境分析与评价,重点进行了煤层顶底板岩石力学性质实验,分析了覆岩结构对采煤的影响;第 3 章为薄基岩煤层开采工作面矿压显现规律,从室内相似模拟试验和现场测试两个方面研究了工作面矿压显现规律;第 4 章为薄基岩煤层覆岩破坏裂隙演化特征,利用分

形几何的知识研究了覆岩采动裂隙网络演化特征,建立了覆岩破坏损伤的分形模型;第5章为厚松散层不同厚度基岩煤层围岩运动规律,利用数值模拟研究了不同厚度基岩煤层围岩的运动规律;第6章为薄基岩煤层覆岩破坏高度,从理论分析、现场实测和室内试验等方面预测了覆岩的破坏高度;第7章为突水威胁工作面底板破坏深度,从现场观测、室内试验和理论分析等方面预测了煤层底板破坏深度;第8章顶底板防治水技术措施,提出了顶板防水(防溃砂)技术措施和底板注浆加固方案;第9章为结论与展望,总结了本书的研究结论,并提出了展望。

在本书的撰写过程中,先后得到了中国矿业大学(北京)和河南能化集团焦煤公司赵固一矿等单位的大力支持和热情帮助,华北科技学院李见波老师参与了室内试验和现场测试工作,书中引用了部分专家、学者的研究成果,在此一并表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,难免有不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2016年2月于焦作

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 问题的提出及研究意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 采场覆岩控制理论研究现状	2
1.2.2 采场底板变形破坏理论研究	7
1.2.3 薄基岩煤层矿压规律研究现状	10
1.2.4 存在的问题	12
1.3 研究内容	12
1.4 研究方法与研究路线	13
1.4.1 研究方法	13
1.4.2 技术路线	14
第 2 章 矿井水文工程地质环境分析与评价	15
2.1 井田地质概况	15
2.1.1 地层	15
2.1.2 地质构造	17
2.1.3 煤层	17
2.2 矿井水文地质条件分析	18
2.2.1 区域水文地质特征	18
2.2.2 井田水文边界条件及水文地质勘探类型	19
2.2.3 井田主要含水层及隔水层	19
2.2.4 矿床充水因素分析	21
2.2.5 矿井涌水量预算	21
2.3 矿井围岩物理力学性质	22
2.3.1 黏土层的物理力学特征	22
2.3.2 岩样的物理力学特征	24
2.4 上覆岩层对采煤影响的综合评价	28
2.4.1 第四系、新近系地层结构特征	28
2.4.2 二 ₁ 煤顶板岩层结构特征	31

第3章 薄基岩煤层开采工作面矿压显现规律	34
3.1 薄基岩煤层开采顶板破坏规律试验	34
3.1.1 相似原理与相似材料	34
3.1.2 模型设计	36
3.1.3 试验结果分析	38
3.2 薄基岩煤层综采矿压显现规律观测	43
3.2.1 观测内容与方法	43
3.2.2 观测结果分析	46
3.2.3 矿压观测的基本结论	53
第4章 薄基岩煤层覆岩破坏裂隙演化特征	55
4.1 分形基本知识	55
4.1.1 分形	55
4.1.2 分维	56
4.1.3 分形维数的计算方法	56
4.2 裂隙的几何参数	58
4.2.1 裂隙的几何特征	58
4.2.2 描述裂隙参数的常用分布函数	59
4.2.3 统计方法	61
4.3 裂隙的分形特征	62
4.3.1 裂隙分布的分形特征	63
4.3.2 裂隙长度和开度的分形特征	63
4.3.3 裂隙强度的分形特征	64
4.3.4 裂隙面粗糙度的分形特征	65
4.3.5 裂隙各向异性的分形特征	65
4.4 覆岩采动裂隙网络演化的分形特征	65
4.4.1 采动岩体裂隙网络研究方法	65
4.4.2 采动岩体裂隙网络演化的分形规律	69
4.4.3 “上三带”分形维数	71
4.5 覆岩破坏损伤的分形特征	72
4.5.1 损伤力学基本概念	72
4.5.2 损伤岩石的分形特征	73
4.5.3 覆岩破坏损伤的分形模型	74
第5章 厚松散层不同厚度基岩煤层围岩运动规律	76
5.1 模型建立	76
5.1.1 FLAC ^{3D} 简介	76

5.1.2	模拟目的	77
5.1.3	三维模型建立	77
5.1.4	边界条件的确定	77
5.1.5	岩体物理力学参数的选取	78
5.2	模拟结果分析	79
5.2.1	11011 工作面模拟结果分析	79
5.2.2	不同厚度基岩模拟结果分析	90
第 6 章	薄基岩煤层覆岩破坏高度	105
6.1	覆岩破坏高度的研究方法	105
6.1.1	经验公式法	105
6.1.2	物理模拟	107
6.1.3	数值模拟	107
6.1.4	现场实测	108
6.2	覆岩破坏高度的主要影响因素	110
6.2.1	开采方法与开采厚度	110
6.2.2	覆岩岩性和结构	111
6.2.3	地质结构	112
6.2.4	煤层倾角	113
6.2.5	工作面几何参数	113
6.2.6	时间	114
6.3	基于人工神经网络的裂隙带高度预测	114
6.3.1	BP 算法的改进	114
6.3.2	选择学习和训练样本	116
6.3.3	模型结构	117
6.3.4	网络的学习训练	119
6.4	赵固一矿覆岩破坏高度研究	121
6.4.1	现场实测	121
6.4.2	相似模拟试验	125
6.4.3	结果对比	126
第 7 章	突水威胁工作面底板破坏深度	127
7.1	底板破坏深度探测	127
7.1.1	观测原理	127
7.1.2	现场观测	128
7.1.3	观测成果分析	132
7.2	底板岩体破坏的相似模拟试验	142

7.2.1	模型设计	142
7.2.2	试验结果分析	143
7.3	基于 SVM 的底板破坏深度预测模型	146
7.3.1	底板破坏深度影响因素分析	146
7.3.2	支持向量机原理	148
7.3.3	支持向量回归机	150
7.3.4	预测模型设计	153
7.3.5	预测模型仿真实例	155
第 8 章	顶底板防治水技术措施	170
8.1	顶板防水(防溃砂)技术措施	170
8.1.1	露头区保护安全煤岩柱的设计	170
8.1.2	开采技术措施	172
8.1.3	防水或防砂安全技术措施	172
8.2	底板突水威胁性评价	173
8.2.1	底板隔水层性质评价	173
8.2.2	含水层导升高度评价	174
8.2.3	底板突水性评价	175
8.3	底板加固技术措施	177
8.3.1	地面注浆站建设	177
8.3.2	注浆系统工艺参数	179
8.3.3	造浆系统	180
8.3.4	底板含水层注浆改造工程设计	181
8.3.5	注浆效果	184
第 9 章	结论与展望	185
9.1	主要结论	185
9.2	展望	188
参考文献		189

第 1 章 绪 论

矿业工程作为一门科学技术,研究的对象是岩层和矿床,目前对于岩层和矿床的描述,仍是一个在质与量方面都不甚清楚的模糊体。矿业科学所涉及的内容、研究对象均为破碎与稳定的矛盾体,要在理论上彻底解决这一问题,还需很长的路要走。此外,矿业工程作业空间有限,工作场所及围岩动态变化,水、火、瓦斯等灾害并存,构成了复杂变幻的生产环境。所有这些问题的解决有待矿业科学技术专家艰苦的探索^[1]。

1.1 问题的提出及研究意义

煤炭作为一次性能源,在我国能源构成比例中占 70% 以上,其主要地位在以后 50 年内将不会发生变化。2012 年我国的煤炭产量为 3.66Gt,居世界第一位。在《中国可持续能源发展战略》研究报告中,20 多位中国科学院院士和中国工程院院士一致认为,今后煤炭在一次性能源生产和消费中将占 60% 左右;到 2050 年,煤炭所占比例不会低于 50%。可以预见,在未来几十年内煤炭仍将是我国的主要能源和重要的战略物资,具有不可替代性。煤炭工业在国民经济中的基础地位,将是长期和稳固的。

根据煤层上覆岩层厚度将基岩分为厚基岩、薄基岩和超薄基岩。考虑到导水裂隙带的发育规律和实际煤层厚度关系,并根据对薄基岩矿区煤层及基岩层厚度的统计结果(表 1-1)分析,将煤层厚度超过 4m、上覆岩层厚度小于 40m 的基岩层

表 1-1 薄基岩矿区煤层及基岩厚度统计表

煤矿名称	开采煤层	煤层厚度/m	煤层倾角/(°)	基岩厚度/m
大柳塔煤矿	二	3.8	3	40.3
陈四楼煤矿	二	2.55	5~10	10~46
陕西南梁煤矿	二	2.05	1~2	32
补连塔煤矿	二	5.3	0~3	60
宝山煤矿	六	6	1~3	20.5
司马煤矿	三	6.6	0~20	20
兖州杨村矿	三	7.8	2~7	18.45

定义为薄基岩,并将煤层上覆岩层厚度小于垮落带与裂隙带高度之和的基岩称为薄基岩,将上覆岩层厚度小于垮落带高度的基岩称为超薄基岩。

我国东部地区是经济发达地区,能源需求量大,冲积层较薄的煤炭资源已开发殆尽,开发东部地区(山东、安徽、河南、河北等省)400~600m 特厚松散层所覆盖的煤炭资源能够有效缓解东部地区煤炭供应紧张的不合理局面,对改善铁路运输和国民经济运行态势具有积极作用。河南省焦作煤田是我国著名的优质无烟煤产地,赋存丰富的华北型石炭、二叠系煤层,对河南省的经济发展起到重要的推动作用。近年来,随着一批老矿井的相继报废,焦作煤业(集团)有限责任公司煤炭生产能力逐年下降,为了解决后备资源严重不足的问题,于2003年6月依法从河南省煤田地质局取得了赵固矿区的探矿权转让手续,并依据资源分布和建井规划布局,将原赵固矿区以 F_{17} 为界,分为赵固一井田和赵固二井田。赵固矿区位于新乡、焦作两市交界地带,煤田划分属焦作煤田。煤层上覆松散层厚度大、富水性强、基岩薄、承压水压力大、底板隔水层薄是本井田的突出特点。煤层埋深大、上覆基岩薄、围岩破碎且矿压显现剧烈,加之矿井受顶板水和底板高压水两种水害威胁,影响东一盘区的工作面布置,困扰矿井安全生产。因此开展大埋深、高应力、薄基岩突水威胁条件下围岩破坏机理研究,对于降低浅部煤岩柱高度,最大限度回收煤炭资源,预防顶底板突水事故发生,实现安全高效生产,意义重大。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 采场覆岩控制理论研究现状

自煤矿采用长壁开采技术以来,采场覆岩控制一直是采矿学科研究的核心问题之一。纵观覆岩控制理论的发展过程,大致可以将覆岩控制理论的发展分为三个阶段:20世纪60年代以前,采场覆岩控制理论的认识和初步研究阶段,该阶段也是覆岩控制理论的假说阶段;20世纪60~90年代,采场覆岩控制理论的发展阶段,这一阶段是覆岩控制理论发展的重要时期,产生了影响采矿领域的重大理论;20世纪90年代以后,采场覆岩控制的现代发展阶段,该阶段综放技术的发展和开采条件的复杂化推动了覆岩控制理论的进一步发展。比较有代表性的理论包括以下几个方面。

1. 压力拱假说

1928年德国 Hack 和 Gillitzer 提出了压力拱假说^[2],该假说认为煤层开采后工作面上方的岩层在自然平衡作用下形成一个拱形的结构,即压力拱,拱的两个脚分别是工作面前方的煤体和工作面后方的矸石或者采空区的充填体(A、B),如

图 1-1 所示。压力拱随着工作面的向前推进也随之向前移动,工作面始终位于应力降低区,而两个拱脚始终为应力增高区(S_1 、 S_2),在前后拱的拱角之间顶板或底板中都形成一个减压区(L_1),因此工作面的支架只承担压力拱内(C)岩层的重量。该假说解释了两个重要的矿压现象:一个是煤壁和采空区矸石或充填物承担控顶上方的岩层重量,因此上方将形成较大的支撑压力;二是支架由于只承受上覆岩层的部分重量,因此支撑压力是有限的。由于该假说无法定量地揭示矿压现象,只能对一些简单的矿山压力显现现象进行解释,而对于周期来压等重要的矿压现象无法解释,实践性较差,因此很少应用。

2. 铰接岩块假说

1954 年苏联学者库兹涅佐夫在大量的实验室试验基础上提出了铰接岩块假说,该假说最大的突破点在于可以定量地解释矿压现象。该假说将工作面上方破坏后的上覆岩层分为垮落带和移动带,其中垮落带分为上下两部分,下部杂乱无章,上部规则排列,但在水平方向无挤压力;移动带岩块之间互相铰接,并随着垮落带的下沉规则下沉,如图 1-2 所示。另外该假说给出了支架和围岩之间的相互作用关系,工作面需要控制的顶板由垮落带和上方的铰接移动带组成,垮落带的作用由支架全部承担,给予支架的是给定载荷。铰接的移动带岩块在水平推力作用下,与支架之间构成给定变形的关系,移动带岩块之间的关系属于铰接的三铰拱式平衡。该假说重大突破点在于首次提出了直接顶厚度的计算公式,揭示了支架载荷和顶板下沉量与顶板运动之间的关系,这一成果为矿压理论的进一步发展奠定了基础。该假说的局限点在于未能对铰接拱的平衡条件做进一步探讨,也未全面揭示支架与岩梁运动之间的关系。

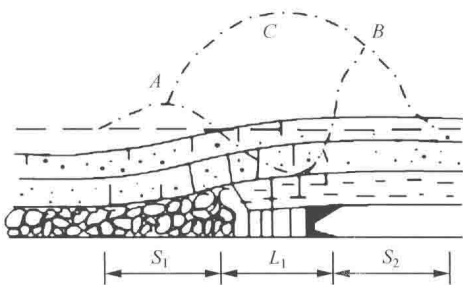


图 1-1 压力拱假说模型

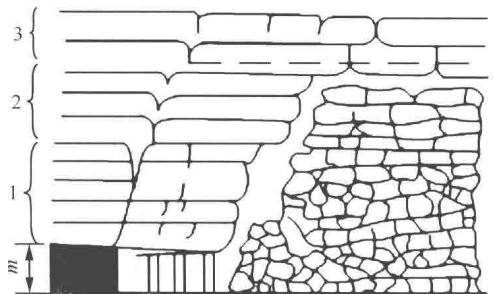


图 1-2 铰接岩块假说模型

此外,比较有代表性的假说还有 1907 年俄罗斯学者普罗托基亚科诺夫提出的普氏平衡拱假说、1916 年德国学者施托克提出的悬臂梁假说、1947 年比利时学者拉巴斯提出的预生裂隙梁假说。这些假说从不同的角度分析了采场围岩活动规律,在一定程度上从上覆岩层可能形成的结构出发研究了矿山压力,尽管存在一些

缺点,但对后来进一步研究上覆岩层结构具有重要的意义。

3. 砌体梁理论

自 20 世纪 60 年代开始对上覆岩层破坏结构形态的研究工作,钱鸣高院士在阳泉、大屯孔庄、开滦等矿岩层移动实测的基础上,结合铰接岩块假说和预生裂隙假说,提出了开采后上覆岩层呈“砌体梁”式平衡的结构力学模型^[3-11],该模型研究了裂隙带形成结构的可能性以及结构的平衡条件。该理论认为上覆岩层的结构是由若干层坚硬岩石组成,每个岩层组合中的软岩可以视为坚硬岩层的载荷,当坚硬岩层发生断裂后,岩块在水平推力作用下形成铰接结构,图 1-3 所示。

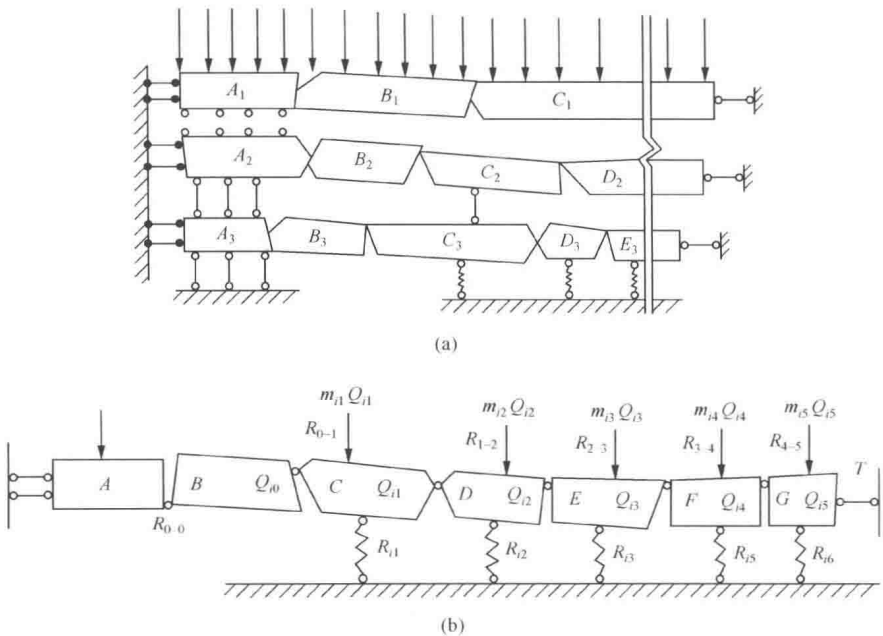


图 1-3 采场上覆岩层中的“砌体梁”力学模型

T 为结构的水平推力; Q 为载荷; R 为块间接接力及支撑力; m 为载荷系数; i 为任意承载层号;

$A, B, \dots, G$ 为铰接岩块

砌体梁具有滑落和回转两种失稳形式($S-R$ 为稳定条件),其滑落稳定条件(S 条件)为^[12,13]

$$h + h_1 \leq \frac{\sigma_c}{30\rho g} \left(\tan\varphi + \frac{3}{4} \sin\theta_1 \right)^2 \quad (1-1)$$

回转变形稳定条件(R 条件)为

$$h + h_1 \leq \frac{0.15\sigma_c}{\rho g} \left(i^2 - \frac{3}{2} i \sin\theta_1 + \frac{1}{2} \sin^2\theta_1 \right) \quad (1-2)$$

式中, h 为承载层厚度, m ; h_1 为载荷层厚度, m ; σ_c 为岩体抗拉强度, MPa ; φ 为岩块间的摩擦角, $(^\circ)$; ρ 为岩石密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; θ_1 为断裂面与垂直面的夹角, $(^\circ)$ 。

该理论给出了采场上覆岩层发生断裂后形成平衡结构的条件和支架—围岩之间的关系, 以及采场上部的具体条件, 为论证各项围岩控制参数奠定了基础。由于该理论建立在覆岩为坚硬岩层的基础上, 因此更适合应用于坚硬顶板条件下的采场。

4. 传递岩梁理论

20 世纪 80 年代, 宋振骐院士等在大量现场观测的基础上提出了传递岩梁理论, 该理论以岩层运动为中心, 包含预测预报、控制设计和控制效果判断三位一体的实用矿压理论^[14-19]。该理论认为, 基本顶对支架的作用主要取决于支架对岩梁的作用, 存在给定变形和限定变形两种工作方式, 给出支架围岩作用的位态方程, 并且认为工作面前方以基本顶的断裂线为界分为内、外两个应力场, 这一点对于确定巷道的合理位置以及设计顶板控制参数具有重要作用, 如图 1-4 所示。该理论揭示了岩层运动与支承压力的关系, 建立了系统的矿山压力预测预报理论和技术, 提出了系统的顶板控制设计理论和技术。

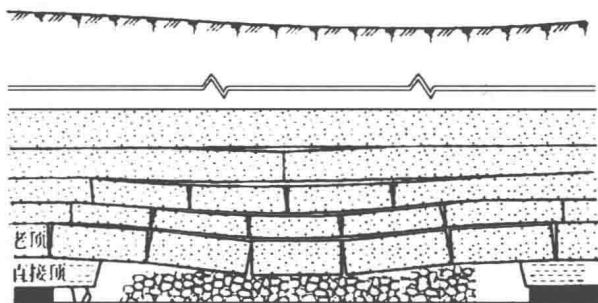


图 1-4 采场上覆岩层中传递岩梁结构模型

5. 岩板及弹性基础梁(板)理论

随着采场矿山压力的发展, 基于弹性薄板理论和弹性基础梁(板)理论, 一些学者对基本顶来压预报的发展进行了研究, 取得了一些成果。钱鸣高和赵国景建立了岩层断裂前后的弹性基础梁模型和基于 Winkler 弹性理论的不同支撑条件下 Kirchhoff 板力学模型^[20]。姜福兴采用厚板力学的方法, 研究了坚硬顶板采场薄板力学解的可行区域作出了实用的工程判断图, 并导出了四种边界条件板的厚化系数表达式^[21]。贾喜荣等将基本顶岩层简化为四周为各种边界条件的薄板, 建立了采场薄板矿压理论, 对建立该理论的基本思想、理论依据和成果进行了阐述, 并

将该理论应用于生产实际^[22-25]。刘广责、翟所业、林海飞等将薄板理论应用于对采场顶板关键层的判别,取得了较好的效果^[26-28]。陈忠辉等针对长壁工作面顶板垮落特征,将顶板划分为若干个相互铰接的薄板,建立了薄板组力学模型,给出几种支承条件下薄板的应力分布和变形特征,所得结论在工程上得到了较好的应用^[29,30]。华心祝采用薄板理论研究了走向长壁、仰斜开采、俯斜开采三种回采方向的基本顶初次来压步距和周期来压步距^[31]。

6. 关键层理论

钱鸣高院士领导的课题组根据多年的研究工作与实践,在 20 世纪 80 年代后期提出了岩层控制的关键层理论^[32-39]。该理论认为在采场上覆的多层岩层中存在一层或者多层对岩体活动起主要控制作用的岩层,该岩层即为关键层。关键层判别的依据主要是当其发生断裂时其上部岩层的下沉是否协调一致,当全部岩层下沉一致时,该层称为岩层活动的主关键层;当部分岩层下沉一致时,该层称为岩层活动的亚关键层。换言之,关键层的断裂将直接引起全部上覆岩层或者部分上覆岩层产生整体性运动。在此基础上,缪协兴等提出了复合关键层理论,并对复合关键层的形成条件、判别方法以及对矿压的影响进行了研究^[40-42]。徐金海等建立了短壁开采的关键层力学模型,并将其用于指导生产,获得了较好的效果^[43]。

关键层理论主要是研究岩层自下而上移动的动态过程及其采场矿压显现,被广泛应用于岩层中节理裂隙的分布、瓦斯抽放问题、突水危险性评价与防治及“三下一上”采煤问题。在瓦斯抽放方面,许家林、钱鸣高建立了卸压瓦斯抽放的“O”形圈理论,该理论已在“两淮”瓦斯抽放中得到试验和应用,取得了较好的效果^[44-47]。在突水防治方面,黎良杰首次建立了采场底板突水的关键层力学模型,利用薄板理论对模型失稳条件进行了分析^[48],此外还建立了承压水底板关键层失稳的尖点突变模型^[49]。在绿色开采技术方面,缪协兴等提出了保水开采隔水关键层的基本概念,并进行了力学分析,成功应用于生产指导^[50,51]。在开采沉陷方面,许家林等利用覆岩主关键层对开采沉陷问题进行了研究,研究结果表明覆岩主关键层对地表下沉动态过程起主控作用,覆岩关键层的断裂将会引起地表的急剧下沉和变形^[52,53]。

7. 其他理论

北京科技大学姜福兴教授对基本顶的基本结构和采场覆岩空间结构进行了研究^[54-62],研究认为基本顶存在类拱、拱梁和梁式三种基本结构,提出了基本顶结构形式的岩石质量指数法,建立了基本顶控制设计的专家系统;基于现场测试结果,将覆岩空间结构分为中间有支撑的“ θ ”形、中间无支撑的“O”形、“S”形和“C”形四类,并揭示了覆岩空间结构与应力场的动态关系;基于两端底固梁力学模型分析了

厚层坚硬顶板的破断规律,提出了厚层坚硬顶板的三种破坏方式。

在放顶煤方面,煤炭科学研究总院开采研究分院闫少宏等利用有限变形力学理论,建立了上位岩层结构面稳定性的定量判别式,分析了放顶煤开采上覆岩层平衡结构向高位转移的原因^[63,64]。西安科技大学石平五教授基于拱壳结构力学分析方法,宏观分析了放顶煤上覆岩层拱结构^[65]。张顶立提出了构成综放工作面覆岩结构的基本形式包括砌体梁与半拱式两种结构,指出造成综采放顶煤工作面矿压显现复杂化的主要原因是覆岩结构过于复杂和顶煤松软破碎^[66]。陆明心等认为放顶煤覆岩结构以大变形梁的形式存在,该结构比分层放顶煤层位更高^[67]。赵经彻等对全厚综放、网下综放和分层开采条件下的三带高度和地表沉陷特征以及支承应力分布特征利用内外应力场理论进行了分析和探讨,并建立了相应的计算模型^[68]。

此外,其他学者也在采场覆岩结构和运动规律及其矿压理论方面做了大量卓有成效的工作^[69-73],进一步完善和推动了岩层控制理论。近年来,随着非线性科学的发展,一些学者尝试将非线性理论应用到矿山压力的研究领域,尤其在矿压的预测方面进行了一些有益的探讨,并取得了一定的成果^[74-79]。

1.2.2 采场底板变形破坏理论研究

煤层开采引起底板所受载荷发生变化,造成应力重新分布,底板发生破坏,采矿业对于采动引起的底板破坏的研究相对较少,其理论也远远没有顶板研究那么成熟。目前对于底板的研究往往是在研究承压水上开采时进行的,其研究主要集中在三个方面:一是底板采动过程中应力场和位移场变化规律及底板破坏特征;二是底板岩体变形破坏之后渗流特征及突水预测预报研究;三是底板突水防治技术研究。目前对于底板破坏常用的研究方法主要有实验室相似模拟试验、现场实测和理论分析。

国外主要产煤国家中只有波兰、匈牙利等国家在煤矿开采过程中不同程度的存在底板突水问题^[80-90]。由于国外已经有 100 多年的煤矿开始历史,因此底板变形破坏的研究和底板突水治理也是率先进行的。20 世纪 40 年代,苏联学者斯列萨列夫提出了固定梁的概念,并利用此对底板进行研究,判断底板的强度。鲍莱茨基等学者给出了底板破坏的一些名词和概念,如底板开裂、底臃、底板断裂等。多尔恰尼诺夫等学者则认为底板岩体在高应力作用下容易出现脆性破坏,破坏形式主要是裂隙发生扩展发育直至发生脱落。自 20 世纪 60 年代初至 80 年代末,许多国家的岩石力学工作者开始研究底板的破坏机理。比较有代表性的如匈牙利开展的以保护层为中心的突水理论研究,Santos 和 Bieniawsk 进行的、以改进的 Hoek-Brown 岩体强度准则和临界能量释放点的概念为基础进行的底板承载能力研究。

自 20 世纪 60 年代以来,由于我国煤矿突水事故大幅度上升,越来越多的学者

投入到底板突水问题的研究之中,并且对突水机理的研究越来越深入,提出了许多底板破坏理论。

1. “三带”理论

1981年刘天泉院士通过对采空区底板破坏形态的描述,提出了底板破坏的“三带”概念^[91],将采空区底板自上而下分为鼓胀开裂带(8~15m)、微小变形移动带(20~25m)和应力微变带(60~80m)。在此研究基础上,刘天泉等从力学角度出发将底板岩层分为采动导水裂隙带和底板隔水带,并利用弹性力学、库仑-莫尔强度准则和格林菲斯准则求出了底板的最大破坏深度^[92-94]。此外,还利用薄板理论计算得出了底板所能承受的极限水压力计算公式^[95,96]。

2. “下三带”理论

1998年,山东矿业学院李白英等学者在现场实测、实验室试验、数值模拟和理论分析的基础上,提出了“下三带”理论^[97-100],该理论是将煤层底板自上而下分为底板破坏带、完整岩层带和承压水导高带。底板破坏带是由于采动造成的底板破坏深度,承压水导高带是承压水在水压作用下的渗透高度,完整岩层带是未受采动和承压水作用的岩层。该理论相对刘天泉院士提出的“三带”概念,考虑了承压水在水压力作用下的渗流作用,进一步分析了底板的破坏状态,为更加准确地判断底板突水威胁性提供了理论基础。

3. 矿压破裂理论

破裂构造是导致底板破坏突水的重要因素,据统计,90%以上的突水均发生在岩体的某种破裂面或损伤面附近(如断层、裂隙带、火成岩墙周边等)。而由于采动形成的矿山压力往往是产生新破裂和诱发旧破裂的关键因素。矿压进一步破坏和降低了底板的岩体强度和阻水性能,促使在水压力作用下突水通道的形成。根据井下工作面综合测试资料显示,在一次周期来压步距内,支承压力对底板隔水层的作用具有明显的分带特征。由于采空区的形成使得采空区上覆岩层的压力转移到采空区周围岩柱,从而使采空区周围为压缩区,底板岩层在采空区周边一个环状带内处于受压状态;而在采空区中心部位,由于上悬下压(下部在水压作用下存在一个向上的推力)而处于降压或者减压区,底板岩层处于张拉膨胀状态;在受压区和张拉区之间便形成了一个剪切区,这一区往往是优先遭到破坏的位置,且这一破坏深度一般为6~14m,同样这一带是最易发生底板突水事故的区域。矿压破裂理论给出了底板易突水区分析,但没有给出预测突水是否发生的判据,影响了其实用性。