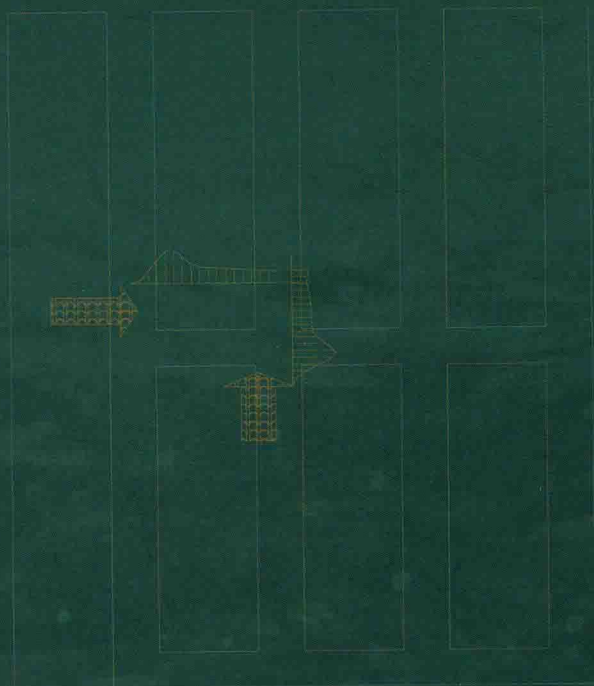


国家自然科学基金项目 (51564004)
贵州省教育厅创新群体重大项目 (黔教合KY字[2016]042)

顶板垮落法

短壁连采顶板控制



张开智 申玉三 臧传伟◎著

DINGBAN KUALUOFA
DUANBI LIANCAI DINGBAN KONGZHI



科学出版社

非外借

国家自然科学基金项目(51564004)

贵州省教育厅创新群体重大项目(黔教合 KY 字[2016]042)

顶板垮落法短壁连采顶板控制

张开智 申玉三 臧传伟 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

传统短壁连采主要是利用在工作面留置大量煤柱以支撑顶板,这导致煤炭资源回收率低,且易造成采空区顶板大面积悬顶进而引发冲击灾害事故。本书介绍的顶板全垮落法短壁连采技术主要在工程实践的基础上,采用理论分析、数值计算模拟、现场实测等多种研究方法,推导出取消煤柱后的可控最大采空区悬空面积、上覆岩层运动规律,进行通风安全及顶板可控安全评价。此研究成果是对传统短壁连采顶板控制的补充与完善,丰富了矿压控制理论。

本书可供地质、矿产资源勘探及开采等专业的科研人员,高等院校师生及从事相关专业生产、管理的工作人员参考和阅读。

图书在版编目(CIP)数据

顶板垮落法短壁连采顶板控制 / 张开智, 申玉三, 臧传伟著. —北京: 科学出版社, 2018.4

ISBN 978-7-03-056750-5

I. ①顶… II. ①张… ②申… ③臧… III. ①短壁采煤法-顶板管理-研究 IV. ①TD327.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 047714 号

责任编辑: 韩卫军 / 责任校对: 唐静仪
责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年4月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018年4月第一次印刷 印张: 11

字数: 260千字

定价: 96.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

短壁工作面开采是当前我国高效回收复杂边角煤块段的主要采煤方法之一，传统的房柱式短壁开采方法以留煤柱支撑上覆顶板，存在资源浪费量大和煤柱高应力集中对巷道维护、下层煤开采工作面支架产生矿压突变等严重问题，因此，研究不留煤柱的短壁连采技术，对提高煤炭资源回收率、实现特殊条件下的边角煤安全高效开采具有重要的意义。

采用顶板全垮落法的短壁连采技术，需要对覆岩顶板的运动规律进行系统研究，分析顶板岩层结构以及对工作面矿压显现有明显影响的岩层运动规律，包括其极限运动步距以及极限悬顶面积。因此，本书采用理论分析、实验室相似材料物理模拟、计算机数值模拟结合现场实测的方法，对全垮落法短壁连采覆岩组合动态运动规律及关键技术进行了系统研究：①提出以岩板理论进行短壁采场关键层判断的方法，将神东矿区短壁采场覆岩结构划分为单一关键层结构及多层关键层结构两种类型，通过理论计算得到不同覆岩结构的短壁采场顶板极限悬顶步距和悬顶面积，并通过理论研究与相似材料模拟分析短壁采场覆岩的运动特征与应力场分布。②提出“工艺极限回采面积”和“应力极限回采面积”两个概念，对垮落的直接顶的控制是对工艺极限回采面积的控制，而对关键层的控制是对应力极限回采面积的控制。理论分析提出规则形状和不规则形状关键层的悬顶步距以及极限回采面积计算式。③设计切块后退式、切块前进式、支巷后退式三种短壁开采方案，计算机模拟不同开采顺序下覆岩组合的动态运移与围岩应力场演化规律，确定块段后退式回采为最优的回采顺序。④提出坚硬顶板条件下全垮落法顶板控制的主要技术措施有：区域四周直接顶聚能爆破拉缝预切顶、回采过程中直接顶有规律的强放、合理使用线性支架及严格控制应力极限回采面积等。

全垮落法短壁连采顶板控制技术可取消区段内各种煤柱和区段间隔离煤柱，真正实现回采区域内无煤柱连续开采。通过现场工程实践，采用顶板全部垮落法短壁连采技术提高了约 10% 的采区回收率，多采出煤炭 3.5 万 t，同时对覆岩顶板运动进行了有效控制，工作面矿压显现不强烈，取得了良好应用效果。

本书内容为作者近十年来针对中国神华集团神东煤炭分公司（以下简称神东公司）现场条件研究的主要成果，共分为 8 章，研究成果由顶板控制与通风安全评价两方面组成，其中第 2、6、7、8 章由张开智执笔，第 1、3 章由臧传伟执笔，第 4、5 章由申玉三执笔，可作为采矿工程本科生、研究生学习和参考的资料。

本书出版得到国家自然科学基金项目(51564004)、贵州省教育厅创新群体重大项目(黔教合 KY 字[2016]042)的资助，在与神东公司合作进行“神东矿区短壁连采开采

技术”“顶板全垮落法短壁连采研究”项目研究过程中，得到公司领导及现场工程技术人员的大力支持与无私帮助，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中内容不当之处，敬请读者批评指正。

张开智

2016年12月20日于贵州理工学院

目 录

第1章 研究概述	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 神东矿区短壁连采顶板控制发展阶段	1
1.1.2 全垮落法短壁连采需解决的主要问题	2
1.2 研究内容	3
1.3 研究方法与技术路线	3
第2章 榆家梁42209顶板全垮落法短壁连采顶板控制	5
2.1 监测目的和内容	5
2.1.1 监测目的	5
2.1.2 监测内容	5
2.1.3 监测人员与时间	7
2.2 试验区域概况和监测方案	8
2.2.1 现场试验条件	8
2.2.2 监测方案	10
2.2.3 监测工作统计	11
2.3 顶板运动及其控制实践	12
2.3.1 顶板运动规律	12
2.3.2 极限回采面积	31
2.3.3 回采方案优化	34
2.3.4 顶板控制技术	35
2.3.5 回采率分析	38
2.4 本章小结	38
第3章 短壁连采顶板运动与极限面积理论计算	40
3.1 神东矿区短壁连采采场覆岩分类	40
3.1.1 单一复合关键层结构——厚冲积层薄基岩	48
3.1.2 多层关键层结构——薄冲积层厚基岩	49
3.1.3 含有复合关键层的多层关键层结构——厚冲积层厚基岩	49
3.2 短壁连采采场的关键层判别	50
3.2.1 短壁连采采场的关键层位置判别	51
3.2.2 短壁采场单一组合关键层结构形成条件、判别以及载荷和极限面积	53
3.2.3 含有复合关键层的多层关键层判别	55
3.3 单一复合关键层(两关键层)结构顶板运动及控制	56
3.3.1 榆家梁矿42209短壁连采工作面概况	56
3.3.2 榆家梁矿42209短壁连采工作面上覆关键层结构	57

3.3.3	强放以后的顶板运动规律	60
3.3.4	单一复合关键层结构短壁连采顶板控制措施	61
3.4	薄表土层多关键层结构顶板运动及控制	61
3.4.1	上湾矿 51203CL 短壁连采概况	62
3.4.2	上湾矿 51203CL 短壁连采工作面上覆关键层结构	65
3.4.3	上湾强放后的顶板极限悬顶面积计算	66
3.4.4	薄表土层多层关键层结构短壁连采顶板控制措施	66
3.5	厚表土层多关键层结构顶板运动及控制	67
3.5.1	大柳塔煤矿 12406-3 切眼外侧旺采区概况	67
3.5.2	大柳塔煤矿 12406-3 切眼外侧旺采上覆关键层结构	68
3.5.3	厚表土层多层关键层结构短壁连采顶板控制措施	70
3.6	三角形、梯形短壁连采块段顶板极限悬顶面积计算	70
3.6.1	三角形顶板极限悬顶面积	72
3.6.2	梯形顶板极限悬顶面积计算	72
3.6.3	计算实例——榆家梁 42213 短壁连采块段	73
3.7	本章小结	81
第 4 章	短壁连采覆岩运动与应力分布数值模拟	82
4.1	数值仿真原理	82
4.1.1	FLAC3D 程序计算方法	82
4.1.2	FLAC3D 基本功能和特征	83
4.1.3	软件的优点	83
4.1.4	五种计算模式	84
4.1.5	多种结构形式	84
4.1.6	强大的前后处理功能	85
4.2	采场数值建模	85
4.2.1	弹性阶段	86
4.2.2	塑性阶段	86
4.3	模拟方案	87
4.3.1	模拟方案	87
4.3.2	主要研究内容	89
4.4	模拟结果分析	89
4.4.1	方案 I——切块后退式	89
4.4.2	方案 II——切块前进式	102
4.4.3	方案 III——支巷后退式	107
4.5	本章小结	117
第 5 章	短壁连采覆岩组合运移规律相似材料模拟研究	119
5.1	相似材料模拟实验目的	119
5.2	相似材料模拟实验原理	120
5.2.1	几何相似	120

5.2.2	容重及强度相似	120
5.2.3	初始动力状态相似	120
5.2.4	边界条件相似	121
5.2.5	时间相似常数	121
5.3	实验模型设计	121
5.3.1	相似参数的确定	121
5.3.2	相似材料配比	122
5.3.3	模型监测设计	123
5.3.4	模型制作	124
5.4	短壁连采覆岩组合运动规律与支承压力分布	125
5.4.1	工作面开挖初期阶段	126
5.4.2	直接顶初次冒落阶段	128
5.4.3	覆岩关键层组合初次断裂阶段	129
5.4.4	顶板周期来压阶段	131
5.4.5	综合结果分析	131
5.5	本章小结	132
第6章	通风与安全	133
6.1	通风风路畅通性	133
6.1.1	42209 工作面通风概况	133
6.1.2	通风通道	133
6.2	现场实测研究	134
6.2.1	通风监测布置方案	134
6.2.2	监测结果分析	135
6.2.3	采空区自燃发火危险性分析	136
6.2.4	采空区温度变化	139
6.3	采空区瓦斯运移规律数值模拟	140
6.3.1	模拟软件 ANSYS CFD/CFX	140
6.3.2	模拟结果分析	141
6.4	采硐通风安全分析	144
6.4.1	采硐内气体成分实测	144
6.4.2	硐口硐底风流流动	144
6.4.3	煤机司机位置	146
6.4.4	神东多年安全实践	147
6.5	本章小结	148
第7章	全垮落法短壁连采安全评价	149
7.1	顶板控制的安全性评价	149
7.1.1	评价因素及评分标准	149
7.1.2	42209 工作面的各评价因素分值	152
7.1.3	顶板全垮落法短壁连采工作面顶板安全评价	153

7.1.4 顶板全垮落法短壁连采顶板条件分析 154

7.2 通风安全评价 154

7.2.1 评价原理 154

7.2.2 主要影响因素分析及评价函数建立 155

7.2.3 通风安全评价及适用条件 159

7.3 本章小结 159

第8章 主要研究结论 161

8.1 顶板控制方面 161

8.2 通风安全方面 162

主要参考文献 163

第1章 研究概述

1.1 研究背景

1.1.1 神东矿区短壁连采顶板控制发展阶段

神东矿区于1995年开始使用连采设备，主要用于巷道掘进，即使进行边角煤开采，仍沿用传统的房式开采。1998年神东公司成立之初，既面临着发展的机遇，也面临着当时煤炭市场疲软的严峻现实。为此，1999年神华集团组织相关人员赴澳大利亚查尔顿矿对旺格维利采煤法进行考察，为引进、消化、吸收此种采煤方法做准备。

2000年神东矿区最先在大海则(3⁻¹煤)、上湾(3⁻¹煤、2⁻²煤)、康家滩(8⁻¹煤)、大柳塔(2⁻²煤)等矿部署推广旺格维利采煤法，这既是当时矿井建设“投资少、见效快、滚动发展”原则的需要，也为先行开采小型井田和边角块段创造了条件，利用连采机动灵活的特点，“以不变应万变”适应市场变化。

短壁机械化开采在神东矿区由小区域试验到大面积推广，开采技术日趋成熟，在神东公司实现千万吨级矿井大跨越中起着十分重要的作用。就其对顶板的支护方式来分，其发展经历了三个阶段。

1.1.1.1 第一阶段：留煤柱支撑顶板短壁连采方式

2000~2006年，神东公司首先在大海则、上湾及康家滩煤矿的边角煤开采中推广“单翼短壁机械化采煤法”，对采空区顶板的支护主要靠留设在采空区中的各种煤柱来完成，如支巷煤柱、刀间煤柱、区段煤柱、顺槽煤柱。一般回采四条支巷后即留设10m的区段煤柱对区段进行封闭隔离。

此种回采方式留设煤柱多，煤炭损失量大，回收率较低，巷道万吨掘进率高，采空区顶板全由煤柱支撑，矿井开采后期会形成大面积的采空区顶板悬顶，给矿井本煤层后续开采和下组(层)煤开采带来极大的安全隐患。为此，榆家梁矿目前正在与煤炭科学研究院合作，从地面打钻孔对前期开采形成的大面积采空区顶板进行强制放顶，以消除安全威胁。

1.1.1.2 第二阶段：留小煤柱结合履带行走液压支架支撑顶板短壁连采方式

在前期短壁开采试验的基础上，神东矿区不断摸索，逐渐减少采空区留设的支撑顶板煤柱尺寸，同时借助自行研制或引进的线性履带行走液压支架支撑回采工作面煤壁附近的顶板，保证回采作业处人员的安全。当回采至最下层直接顶的初次垮落步距之前及时封闭区段，随着后续区段的回采，前期采空区顶板应力逐渐升高，迫使直接顶、基本

顶乃至上覆岩层中的关键层在区段封闭一段时间后滞后垮落，前一区段的顶板运动对正在回采的区段不造成直接的影响，并与回采区段隔开，从而保证了回采作业的安全。

此种回采方式的顶板控制设计思路先进、科学。2007~2009年神东公司与山东科技大学合作，在对留煤柱法短壁连采进行大量现场实测分析的基础上，在上湾矿51203CL工作面成功进行了实践。但是，此法对顶板控制的技术要求高，对顶板运动规律要有清楚的认识，从而增加了现场施工的难度。

1.1.1.3 第三阶段：顶板全垮落法无煤柱短壁连采方式

2011年开始，神东公司在榆家梁矿首先试验顶板全垮落法短壁连采，回采区段内部不留任何煤柱，让直接顶随着采空区面积的增加而及时垮落，同时在上覆关键层开始运动之时将区段封闭，这样保证回采后的采空区顶板充分运动，采空区没有大面积悬顶的威胁，从根本上保证了短壁连采的安全性，就对顶板运动的控制而言，此方法属于“本质安全型”短壁开采。

1.1.2 全垮落法短壁连采需解决的主要问题

由于顶板在采空区内要实现随采随垮，而工作面作业点没有像综采工作面的综采液压支架支撑与护顶，顶板垮落时只有邻近的两台履带式液压行走支架护顶，给作业人员及连采机的安全性带来一定的威胁。且此种回采方式通风风路要经过采空区，采空区通风的效果如何？各种通风指标是否超标也是值得重点关注的。为此将主要问题分为如下两大类。

1.1.2.1 顶板运动的安全控制问题

- (1)直接威胁到作业人员安全的直接顶运动控制。
- (2)对回采煤柱及前方煤体起应力传递作用的基本顶及关键层运动控制。
- (3)回采引起的超前支承压力传播规律。
- (4)履带式行走支架安设与合理工作阻力。
- (5)保证关键层充分运动的极限回采面积。

1.1.2.2 通风安全问题

- (1)采空区通风风流畅通问题。
- (2)采空区不同地点的瓦斯流动场与风流场。
- (3)防止采空区内煤层自燃发火的安全问题。
- (4)采硐内的通风安全问题。

针对上述问题，结合国家煤矿安全生产监督管理局对此法提出的疑问，神东公司特立此项目，与山东科技大学继续开展合作，对上述问题展开技术研究，研究成果在榆家梁矿42209顶板全垮落法短壁连采工作面的应用中得到验证，实现了安全控顶和通风安全，目前已安全回采四个区段，沿走向推进约500m，回收煤炭约25万t。

1.2 研究内容

针对全垮落法出现的技术难题，经与神东公司协调，确定主要研究内容如下：

- (1) 随回采面积增加顶板应力动态变化、运动规律及其控制。
- (2) 回采过程中对顶板起支撑作用的边界煤柱应力及其变化规律。
- (3) 不规则形状边角煤开采极限回采面积预计及开采参数设计。
- (4) 有利于巷道维护和顶板垮落的支巷尺寸与合理支护强度。
- (5) 采空区自燃发火倾向、瓦斯流动及回风流中气体成分动态变化规律。
- (6) 优化通风方式、对盲巷、风量、采空区矸石压实带分布、采空区通风的可靠性计算分析。
- (7) 神东矿区顶板全垮落法短壁连采安全评价。

1.3 研究方法与技术路线

本书的研究技术路线如图 1-1 所示。

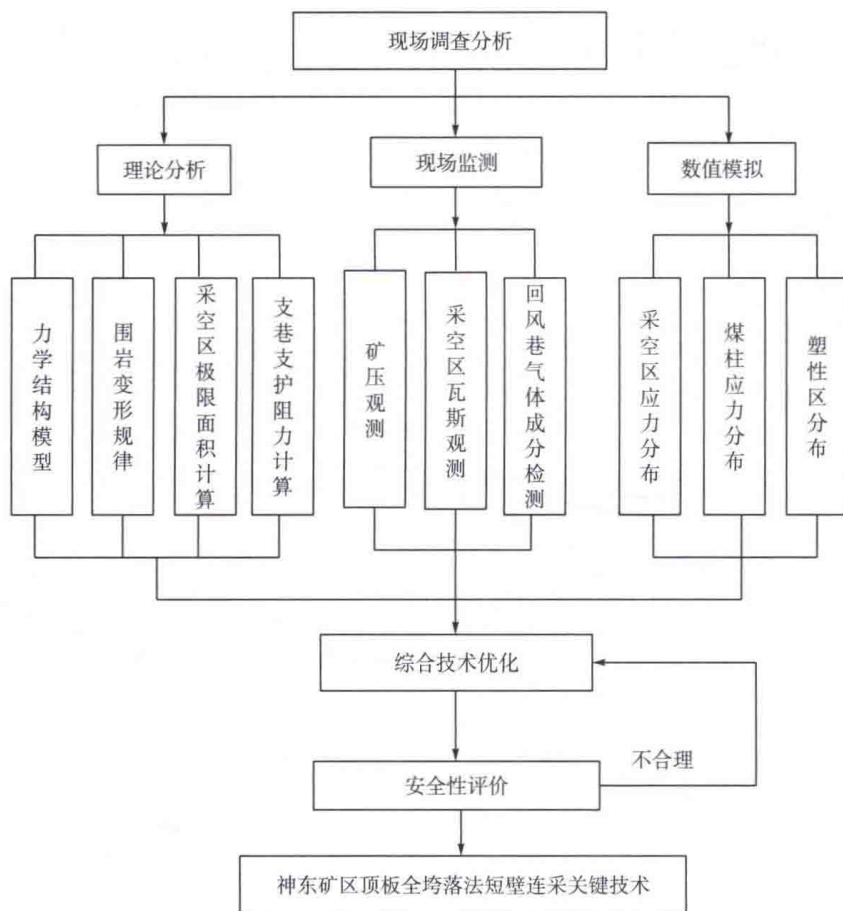


图 1-1 研究技术路线

针对研究问题的本质,结合研究内容,采用理论分析、数值模拟、现场监测相结合的方法展开全面系统的研究,各种研究方法相互补充、互为完善,研究结论更具有普遍指导意义。

理论分析:通过力学方法、矿压控制理论和关键层知识,分析研究直接顶运动规律、基本顶及关键层运动规律、支承压力传播规律、回采极限面积理论计算方法、安全回采的顶板控制措施及安全性评价。

数值模拟:运用 FLAC 有限元法模拟研究顶板、煤层应力及变形规律;运用 FLENT 软件模拟通风风流的流动与瓦斯运移规律。

现场监测:随回采面积增加顶板位移及煤柱应力的实时变化规律;对采空区内气体温度测试;采空区内气体成分监测;回风流中的空气成分测定;采硐内的气体成分实测分析;地表移动与变形监测。

第2章 榆家梁42209顶板全垮落法短壁连采顶板控制

2.1 监测目的和内容

2012年6月22日,本书课题研究人员进驻榆家梁煤矿,在矿方领导及相关部门的大力支持和协助下,课题组现场监测工作顺利展开。截至7月20日,第一区段共计八条支巷约11000m²已回采完毕,完成了煤柱应力和顶板位移全部现场监测工作,成功实现全垮落法顶板的安全控制,多回收煤炭3.5万t,回采率提高10%,榆家梁矿顶板全垮落法短壁连采技术取得圆满成功。

2.1.1 监测目的

通过现场实测,掌握特定条件下的顶板运动与应力分布、顶板位移变化的相互关系,从而通过应力和位移实测反推顶板运动规律,实现对顶板运动的可知和可控;通过实测全部垮落短壁连采通风时采空区内的气体成分变化和温度变化,实测回采期间采硐内、回风巷中的气体成分,来论证采空区通风的可行性,为全垮落连采方法的通风安全可靠提供实测依据。

2.1.2 监测内容

根据监测目的的不同,监测内容分为矿压参数和通风系统参数两大部分。

2.1.2.1 矿压监测

矿压监测包括煤体应力监测、顶板离层监测,以及矿压显现的宏观观察(如顶板冒落、煤壁片帮以及煤柱破坏情况等)。煤体应力监测包括监测回采区段边界煤柱上的应力和回采区域中部煤柱上的应力;顶板离层监测与煤体应力监测对应,离层钻孔孔底位于基本顶内,孔内设置两个离层监测测点,分别位于直接顶内和基本顶内。

应力、顶板离层监测采用在线监测系统进行监测,从测点引出电缆信号线至区域外围处安装应力分站和离层分站,再用主站将两种信号转换为物理信号后直接输出,进行数据分析和处理。

2.1.2.2 通风监测

通风监测内容包括采空区内的气体、采硐内的气体,以及胶带运输巷(总回风巷)中的气体成分和浓度、采空区内气体的温度变化。

2.1.2.3 监测仪器设备

主要监测仪器汇总见表 2-1，监测仪器如图 2-1~图 2-4 所示。监测主站、分站、地面主机以及电缆、束管、电话线等未统计在内。

表 2-1 主要监测仪器汇总表

监测项目	使用仪器	测点站位置	数量	备注
煤体应力	钻孔应力计	I、II、III、IV、V	11	钻孔直径为 40~42mm
顶板离层	顶板离层仪	I、II、III	3	钻孔直径为 40~42mm
采空区气体成分	束管探头	1、2、3、4	4	1 台抽气泵
采硐内气体成分	束管探头	支巷回采时的采硐		抽气泵
回风流气体组分	气体采集仪	连采胶带运输巷		抽气泵
采空区内部温度	温度探头和温度测试仪	13 支巷尽头	1	

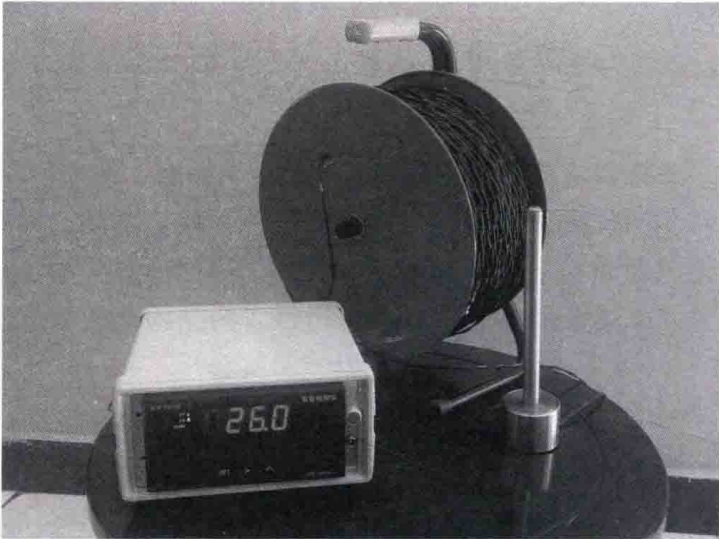


图 2-1 温度传感器和测试仪



图 2-2 抽气泵、气囊和连接管

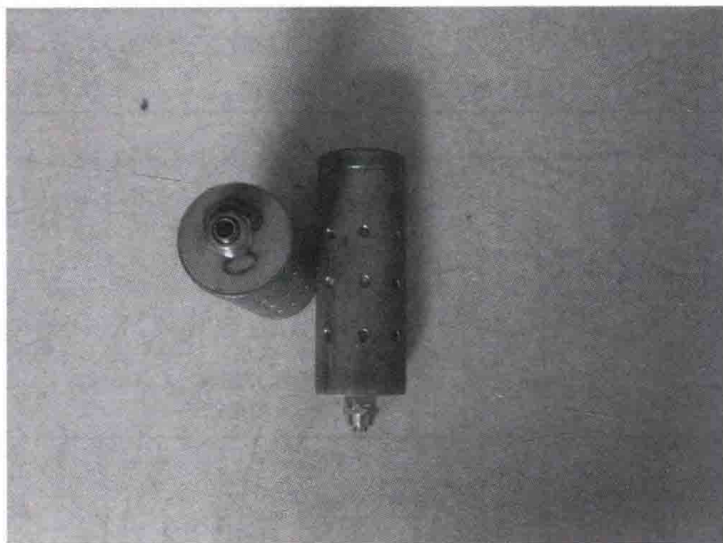


图 2-3 束管探头

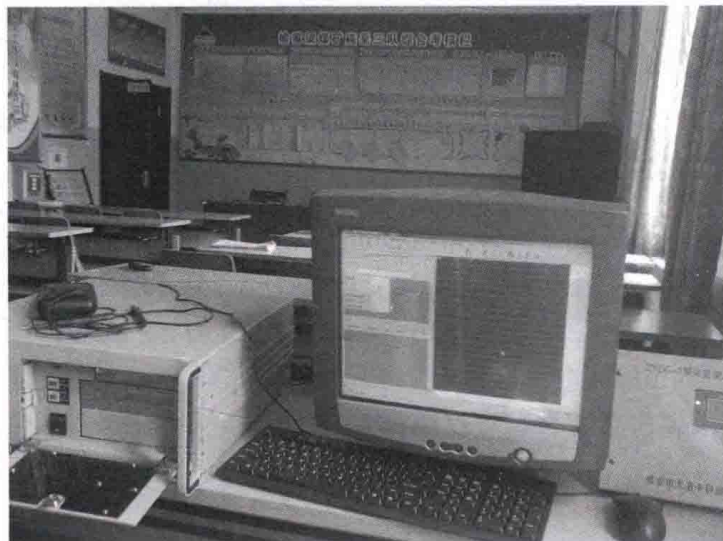


图 2-4 地面监测系统

2.1.3 监测人员与时间

2.1.3.1 监测时间安排

第1区段拟定于2012年6月30日开始回采，经与榆家梁矿沟通协商，定于6月25日开始现场进行仪器的安装、调试，30日开始正式测试。

随着回采的进行，不断总结分析数据，调整测点布置位置与方式，修改顶板控制方案，保证整个监测的顺利进行，收集可靠的数据。

6月25日~6月30日进行安装、调试；7月1日~7月30日进行监测、数据整理分析。

2.1.3.2 监测人员

监测工作人员包括：榆家梁矿现场组织与协调人员、仪器安装调试人员、现场施工

人员和课题组成员，人员组成和分工如表 2-2 所示。

表 2-2 监测人员配备

项目	人数	主要职责	工作单位
现场组织协调	2 人	负责现场组织协调	榆家梁矿
仪器调试人员	1 人	仪器安装、调试	仪器厂家
现场施工人员	3~10 人	打钻等施工	矿外支队
	1~2 人	审查实施方案	榆家梁矿
技术人员	4~6 人	制定监测方案、 分析数据、汇报结论	课题组

2.2 试验区域概况和监测方案

2.2.1 现场试验条件

2.2.1.1 工作面位置

42209 采区旺采工作面位于榆家梁煤矿 4⁻²煤东南部，东侧为 42209 运顺；南侧为 42209 已采综采工作面；西侧为 42209 回顺；北侧为 4⁻²煤东翼三段辅运大巷。

42209 采区可采面积为 7.46 万 m²，可采储量 34.9 万 t。其中，掘进顺槽及支巷 22 条，掘进长度 2814.71m；联巷 42 条，掘进长度 486.5m；掘进总长度 3301.21m，可产原煤 7.42 万 t；可采煤房 791 个，可产原煤 11.6 万 t；掘进及回采总煤量 19.03 万 t，回采率 54.48%。

2.2.1.2 地质概况

42209 房采工作面所在区域内地质构造简单，无断层褶曲等。工作面直接顶岩性为灰色、浅灰色泥岩，泥质结构，水平层理及微波状层理，具滑面，整体性较强，厚度 6.1m；老顶为细沙岩，浅灰色，中厚层，泥质胶结，水平及波状层理，厚度 3.69m；底板为粉砂质泥岩，深灰色、灰色，中厚层状，致密半坚硬，水平层理发育，具有滑面。工作面顶板岩层柱状图如图 2-5 所示。

4⁻²煤属于低瓦斯煤层，但也属于易自燃煤层，浮煤厚度超过 0.6m 可以引起自燃，应减少浮煤，并及时用岩粉覆盖，杜绝自燃热源。煤尘爆炸指数为Ⅱ级，开采时应足够重视，根据巷道性质限制一定的最高风速。本区地温正常，为无热害区。

本区断层、岩层裂隙不发育，根据相邻工作面涌水情况，掘进巷道涌水主要为基岩裂隙水，补给贫乏。古近系和新近系黏土为良好的隔水层，不利于补给，对生产影响甚微。预计掘进工作面正常涌水量为 15m³/h。考虑以后综采使用排水系统，设 DN100 钢管排水，足够满足最大涌水的排出。应设置不少于 60m³/h 的排水工程及时排水，以保证不影响正常掘进、回采。