

国家自然科学基金项目(51304202)
江苏省自然科学基金项目(BK20130190)
采矿工程卓越工程师培养计划项目
江苏省高校优势学科建设工程资助项目
中国矿业大学青年科技基金项目(2013QNA28)

浅埋房式采空区下

近距离煤层长壁开采致灾机制及防控技术

王方田 屠世浩 著

Qianmai Fangshi Caikongqu Xia

Jinju Li Meiceng Changbi Kaicai Zhizai Jizhi Ji Fangkong Jishu

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金项目(51304202)

江苏省自然科学基金项目(BK20130190)

采矿工程卓越工程师培养计划项目

江苏省高校优势学科建设工程资助项目

中国矿业大学青年科技基金项目(2013QNA28)

浅埋房式采空区下近距离煤层长壁 开采致灾机制及防控技术

王方田 屠世浩 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书主要包括浅埋房式采空区下近距离煤层地质特征、房式采空区残留煤柱稳定性机理及其影响分析、浅埋房式采空区下近距离煤层开采覆岩结构特征分析、浅埋房式采空区下近距离煤层开采覆岩运动规律研究、深孔预裂爆破强制放顶机理及应用、浅埋房式采空区下近距离煤层开采顶板控制技术。本书可供从事采矿工程及相关专业的科研及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

浅埋房式采空区下近距离煤层长壁开采致灾机制及
防控技术/王方田,屠世浩著. —徐州:中国矿业大学出版
社,2015.3

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2523 - 8

I. ①浅… II. ①王…②屠… III. ①浅埋煤层—长
壁采煤法—安全技术—研究 IV. ①TD823.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 254279 号

书 名 浅埋房式采空区下近距离煤层长壁开采致灾机制及防控技术
著 者 王方田 屠世浩
责任编辑 王美柱
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×960 1/16 印张 11.5 字数 219 千字
版次印次 2015 年 3 月第 1 版 2015 年 3 月第 1 次印刷
定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

我国西北矿区(如神东煤田等)煤层埋藏浅、地质条件简单、煤层群为近距离赋存,在进行大规模开发之前多采用房式开采,采用该方法以留下煤柱或充填后的煤房来支撑顶板,控制顶板与地表沉陷。如乌兰煤炭集团石圪台煤矿、伊泰集团大地精煤矿及陕北榆神矿区大量煤矿等,仅鄂尔多斯市境内的房式采空区面积就超过 300 km^2 ,采空区内残留煤炭资源超过 18 亿 t。房式采煤方法煤炭采出率仅为 36%,不仅造成大量煤炭资源浪费,而且形成大面积煤房采空区和残留煤柱。在浅埋房式采空区下近距离煤层进行长壁开采时安全隐患多,如由于煤层群累计采高大,易出现顶板台阶下沉、架前切落;煤柱支承压力与顶板运动垮落形成叠加造成局部切顶冒落、支架压死损毁;采动应力集中诱发残留煤柱群大面积突变失稳产生“多米诺骨牌”效应,产生冲击和飓风等灾害。

本书以浅埋房式采空区下近距离煤层的安全高效高回收率开采为目标,综合运用现场调研、实验室测试、理论分析、数值计算、物理模拟及现场应用等研究方法,对房式煤柱稳定性、顶板大面积来压机理及防治技术、房式采空区下近距离煤层开采覆岩运动规律及其控制技术等进行系统分析,主要研究成果有:

- ① 对浅埋煤层房式残留煤柱稳定性情况进行了现场调研,采用突变理论建立了浅埋房式煤柱破坏失稳的尖点突变模型,得到了系统发生突变的必要条件,与现场勘测结果相一致,揭示了浅埋房式残留煤柱失稳机理。
- ② 基于能量理论分析了浅埋房式采空区下煤层采动影响时顶板变形能分布规律,提出在开采过程中加强覆岩破断来压预报及控制,防止发生直接顶切落造成冒顶及压架事故。
- ③ 建立了浅埋房式采空区下煤层开采覆岩结构模型,得到了控制顶板滑落失稳所需的合理支架工作阻力。通过建立浅埋房式采空区下煤层开采直接顶切冒力学模型,为防止直接顶切冒和支架压死事故提供了理论依据。
- ④ 为防止顶板大面积来压,提出了切眼深孔预裂爆破强制放顶技术。采用 LS-DYNA3D 程序建立了深孔预裂爆破强制放顶计算模型,优化了主要爆破参数,经现场应用有效减小了顶板初次来压步距,工作面推进较为顺利,表明深孔预裂爆破强制放顶技术取得了预期的效果。
- ⑤ 依据浅埋房式采空区下近距离煤层开采覆岩运动规律并结合现场试验分析,提出了以合理控制采高、注砂充填采空区、加强支护管理

及加快工作面推进速度为主的顶板控制技术体系,现场应用实现了浅埋房式采空区下近距离煤层安全高效开采。

全书共8章,其中,第1章揭示了本书的研究背景、意义和国内外研究现状;第2章介绍了浅埋煤层地质特征、房式残留煤柱主要破坏形式及稳定性分类;第3章基于突变理论对房式煤柱稳定性规律进行了分析,并研究了煤柱集中载荷在底板中的传递特征、形状变形能及体积变形能分布规律;第4章分析了浅埋房式采空区下近距离煤层开采覆岩结构特征,得到了控制顶板滑落失稳所需的合理支架工作阻力,揭示了直接顶切冒和支架压死原因;第5章介绍了浅埋房式采空区下近距离煤层开采覆岩运动规律;第6章提出了顶板大面积来压机理,建立了深孔预裂爆破强制放顶计算模型,优化了主要爆破参数,并进行了现场应用效果分析;第7章介绍了浅埋房式采空区下近距离煤层安全高效开采顶板控制技术;第8章对本书所做的工作进行了总结、展望。

课题组万志军教授、袁永副教授、马文顶高级工程师及屠洪盛博士参与了部分研究工作;博士研究生白庆升、张村、张小刚,硕士研究生窦凤金、陈芳、张艳伟、宋启、魏帅锋、闫瑞龙、段超华参与了研究的实验和现场实测工作,在此表示感谢。同时,在本书的撰写过程中,参考了大量国内外文献资料,所做的现场调研和应用实测工作得到了内蒙古鄂尔多斯市乌兰煤炭(集团)有限责任公司领导和工程技术人员的大力支持。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目(51304202)、江苏省自然科学基金项目(BK20130190)、采矿工程卓越工程师培养计划项目、江苏省高校优势学科建设工程资助项目及中国矿业大学青年科技基金项目(2013QNA28)的资助,在此一并致谢。

由于笔者水平所限,书中难免存在疏漏和欠妥之处,恳请读者批评指正。

著 者

2014年秋于徐州

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状及存在问题	4
1.3 主要研究内容与研究方法	14
1.4 主要研究目标与创新点	17
2 浅埋房式采空区下近距离煤层地质特征分析	18
2.1 浅埋煤层地质特征	18
2.2 浅埋房式开采残留煤柱	21
2.3 采动影响下房式煤柱群稳定性分类	23
2.4 煤岩物理力学性能测试	29
2.5 本章小结	30
3 房式采空区残留煤柱稳定性机理及其影响分析	31
3.1 煤柱稳定性逐步破坏分析	31
3.2 基于突变理论的房式煤柱稳定性分析	35
3.3 煤柱稳定性岩层探测记录分析	39
3.4 煤柱稳定性影响因素数值分析	40
3.5 煤柱集中载荷在底板中的传递特征	44
3.6 基于能量演化规律的冲击倾向性分析	48
3.7 本章小结	54
4 浅埋房式采空区下近距离煤层开采覆岩结构分析	55
4.1 覆岩结构特征分析	55
4.2 顶板断裂步距计算分析	57

4.3	顶板破断运动力学分析	64
4.4	支架阻力主要影响因素分析	74
4.5	本章小结	76
5	浅埋房式采空区下近距离煤层开采覆岩运动规律研究	77
5.1	覆岩运动规律数值计算分析	77
5.2	覆岩运动规律物理模拟	90
5.3	深孔预裂爆破及煤柱弱化物理模拟	98
5.4	石圪台煤矿 131201 综采面矿压规律实测分析	107
5.5	石圪台煤矿 131203 综采面矿压规律实测分析	118
5.6	本章小结	122
6	深孔预裂爆破强制放顶机理及应用	124
6.1	顶板大面积来压机理及影响	124
6.2	深孔预裂爆破强制放顶力学分析	128
6.3	深孔预裂爆破强制放顶 LS-DYNA3D 数值 计算分析	132
6.4	深孔预裂爆破强制放顶技术应用	141
6.5	本章小结	146
7	浅埋房式采空区下近距离煤层开采顶板控制技术	147
7.1	合理控制采高	147
7.2	注砂充填采空区	151
7.3	加强矿压监测及支护管理	155
7.4	加快工作面推进速度	159
7.5	本章小结	162
8	结论与展望	163
8.1	主要研究结论	163
8.2	展望	164
	参考文献	166

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

浅埋煤层是以埋深浅、基岩薄、上覆松散砂土厚为典型赋存特征的煤层,采用长壁开采时一般出现基本顶破断不易形成稳定结构、裂隙发育直达地表、地表呈现明显台阶下沉、来压有明显动载现象的矿压显现特点^[1,2]。在我国西北部广泛赋存着浅埋煤田,主要有神府—东胜煤田(以下简称神东煤田)、陕北榆神煤田、宁夏灵武煤田及新疆哈密煤田等,仅神东煤田预测储量 6 690 亿 t,探明储量 2 236 亿 t,占全国已探明储量的 1/5,是目前国内已探明的最大煤田,也是世界七大煤田之一^[3,4]。神东煤田具有可采煤层多、煤层厚、煤质优良、结构简单、稳定性好等优越的地质开采条件,但也存在上覆厚风积砂胶结和韧性差、采场顶板极易沿煤壁形成全厚切落、支护难度大、覆岩裂隙导通地表易造成涌水溃砂及采空区自然发火等难题,已引起大量关注。从 2000 年开始,内蒙古自治区煤炭产量快速增长,2009 年内蒙古煤炭产量达到 6.37 亿 t,比 2008 年增产 1.72 亿 t,增长 37%,超过山西(6.15 亿 t)位居全国第一。2010 年全区煤炭产量达 7.82 亿 t,同比增产 1.81 亿 t,百万吨死亡率 0.063(全国百万吨死亡率 0.798),成为全国第一个煤炭产量突破 7 亿 t 的省区市,其中浅埋煤层产量占有重要比例。2000~2013 年,鄂尔多斯市、内蒙古自治区及全国煤炭产量统计结果如图 1-1 所示,鄂尔多斯市主要开采浅埋煤层,煤炭产量从 2000 年不足 0.23 亿 t,迅速增长至 2013 年的 5.76 亿 t,所占内蒙古自治区及全国煤炭总产量的比例也分别从 33.9%、1.8% 增长至 57.9%、15.7%^[5]。

神东煤田煤层埋藏浅、地质条件简单,在进行大规模开发之前多采用房式或刀柱式开采,采用该方法以留下煤柱或充填后的煤房来支撑顶板,控制顶板与地表沉陷。如乌兰煤炭集团石圪台煤矿、温家梁三号煤矿,伊泰集团大地精煤矿、凯达煤矿,神东煤炭集团哈拉沟煤矿、寸草塔煤矿及陕北榆神矿区等,仅鄂尔多斯市境内的房式采空区面积就超过 300 km²,采空区内残留煤炭资源超过 18 亿 t。该采煤方法煤炭采出率仅为 36%,房式开采不仅造成大量煤炭

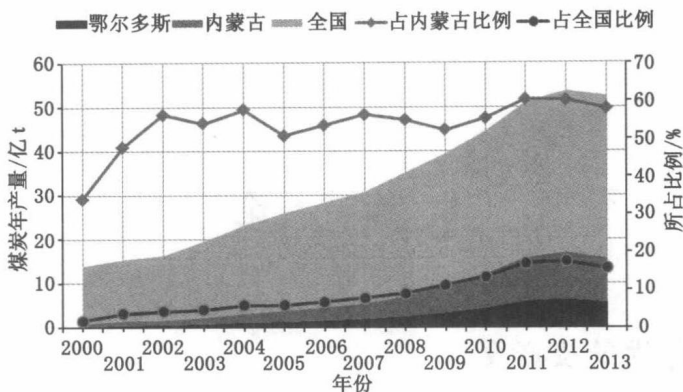


图 1-1 2000~2013 年鄂尔多斯、内蒙古及全国煤炭产量统计

资源浪费,而且形成大面积煤房采空区和残留煤柱,采空区残留煤柱形成局部应力集中,可能破坏围岩。随着时间的推移,煤柱自然风化、蠕变、破裂,经常会导致部分煤柱失稳破坏,波及相邻煤柱产生“多米诺骨牌”效应,造成采空区大面积塌陷,产生飓风对井下工作人员及开采设备设施造成威胁,甚至引发矿震灾害(根据陕西地震信息网发布的数据,从 2009 年 1 月至 2012 年 8 月,榆林地区有 42 次地震是由于煤炭采空区塌陷造成的,震级高达 3.3)^[6,7]。由于浅埋煤层开采易出现顶板整体破断切落,房式采空区的存在进一步增加了下方邻近层开采的难度。

随着开采强度不断加大,神东煤田部分矿区第一层主采煤层已基本开采完,开始回采第二层主采煤层。由于上下煤层间距较小,开采时相互有较大影响,形成了近距离煤层群开采的特征。在一些特殊的地质开采条件下,下煤层矿压显现强烈,工作面发生液压支架活柱瞬时大幅度下缩,甚至造成支架压死、损毁等事故,严重威胁着煤矿安全高效生产^[8]。浅埋房式采空区下近距离煤层长壁开采概况如图 1-2 所示。

在浅埋房式采空区下近距离煤层进行长壁开采时,主要存在以下安全隐患:

- ① 由于房式采空区和下层煤形成的累计采高大,顶板不易形成稳定的结构,工作面来压存在明显动载矿压现象,易出现工作面覆岩台阶下沉、顶板架前切落;
- ② 上方煤柱支承压力对下层煤工作面及回采巷道形成较大的应力集中;
- ③ 受采空区、煤柱的影响,煤柱支承压力与顶板运动垮落形成叠加,突然失稳易造成顶板局部突然切顶冒落,上方残留煤柱与直接顶一同被压落至下煤层,造成支架压死损毁;
- ④ 长壁开采造成采动应力重新分布,应力集中引起大面积煤柱失去支撑能力,可能诱发残留煤柱群大面积突变失稳,在短时间内剧烈来压,产生冲

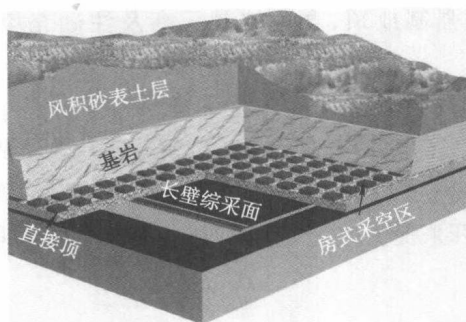


图 1-2 浅埋房式采空区下近距离煤层长壁开采模型图

击性动力灾害和飓风^[9-11],回采巷道也容易发生大面积冒顶和压垮事故,甚至出现人员伤亡事故;⑤ 采动覆岩裂隙直接波及地表,形成与地表水和空气传导通道,可能引发涌水、采空区自燃等灾害。如图 1-3 所示,在内蒙古伊泰集团大地精煤矿 2 号煤层房式采空区发生了残留煤柱大面积失稳,在地表形成多处塌陷区,并形成了飓风灾害。

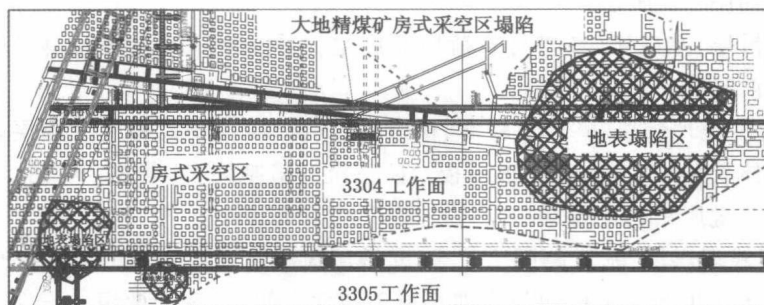


图 1-3 大地精煤矿房式残留煤柱群失稳导致地表塌陷图

以上浅埋房式采空区下近距离煤层长壁开采过程中出现的灾害与以往单纯研究浅埋煤层、残留煤柱上、下煤层开采的影响及近距离煤层群开采不同,是各项因素综合作用的结果,具有与以上各单项或两项因素结合时相异的特征,已成为制约该类煤层安全高效开采的重大技术难题,迫切需要对浅埋煤层长壁开采时覆岩结构特征及运动规律、上层房式残留煤柱失稳机理、顶板灾害形成机制以及有效的控制技术进行深入研究。

中国矿业大学屠世浩教授带领的课题组根据浅埋房式采空区下近距离煤层赋存特征,对该类煤层开采引起覆岩变形破坏、岩体弹性能聚集造成冲击式来压和压架机理、地表裂隙发育规律和井下矿压规律关系等进行了研究,现场采取了

基本顶深孔预裂爆破强制放顶、合理控制采高及注砂充填房式采空区等防治措施^[1,10,11]。

本书将针对神东煤田浅埋房式采空区下近距离煤层长壁开采地质生产条件,综合运用现场调研、实验室实验、理论分析、数值计算及现场试验等研究方法,系统研究长壁开采时近距离上层房式残留煤柱稳定性、覆岩运动规律及顶板控制技术,为该类煤层安全高效开采提供理论依据,促进我国西北部浅埋煤炭资源安全高效高采出率开发。

1.2 国内外研究现状及存在问题

1.2.1 浅埋煤层开采覆岩运动规律

黄庆享教授^[3]根据普采、综采与快速推进工作面矿压实测统计,指出神东煤田浅埋煤层顶板破断规律与普通煤层不同,具有顶板切落式破断、台阶下沉及采动形成垮落带、裂缝带的“两带”覆岩运动特征。浅埋煤层及普通煤层覆岩运动特征简图如图 1-4 所示。

以关键层、基载比(基岩与载荷层厚度之比 J_z)和埋深为指标,将浅埋煤层分为以下两种类型:

① 典型浅埋煤层:基岩比较薄、松散载荷层厚度比较大的浅埋煤层,其顶板破断为整体切落形式,易于出现顶板台阶下沉。概括为:埋藏浅,基载比小,基本顶为单一关键层结构的煤层。

② 近浅埋煤层:基岩厚度比较大、松散载荷层厚度比较小的浅埋煤层,其矿压显现规律介于普通工作面与浅埋煤层工作面之间,表现为两组关键层,存在轻微的台阶下沉现象。

国外浅埋煤田较典型的有莫斯科煤田(Moscow Coalfield)、美国阿巴拉契亚煤田(Appalachia Coalfield)、印度拉尼根杰煤田(Raniganj Coalfield)和澳大利亚猎人谷煤田(Hunter Valley Coalfield)^[12-16]。20 世纪 50 年代前苏联学者 M. 秦巴列维奇^[17,18]针对浅埋深煤层提出了顶板台阶下沉假说,视上覆岩层为均质材料,顶板以斜方六面体形式沿煤壁斜上方垮落直至地表,指出支架所受载荷应考虑整个上覆岩层重力的作用;当有坚硬基本顶时,基本顶破断在煤壁内,支架载荷按控顶区跨度计算上覆岩层全部重力。该假说把岩层运动的几何形状过度绝对化,对基本顶的分析没有涉及基本顶的破断过程及其破断机理,也未涉及顶板破断后岩块的平衡条件,存在一定的局限性。B. B. Bodrac (1981)^[19]通过分析莫斯科近郊煤田埋深 100 m、上覆厚黏土层条件下放顶煤

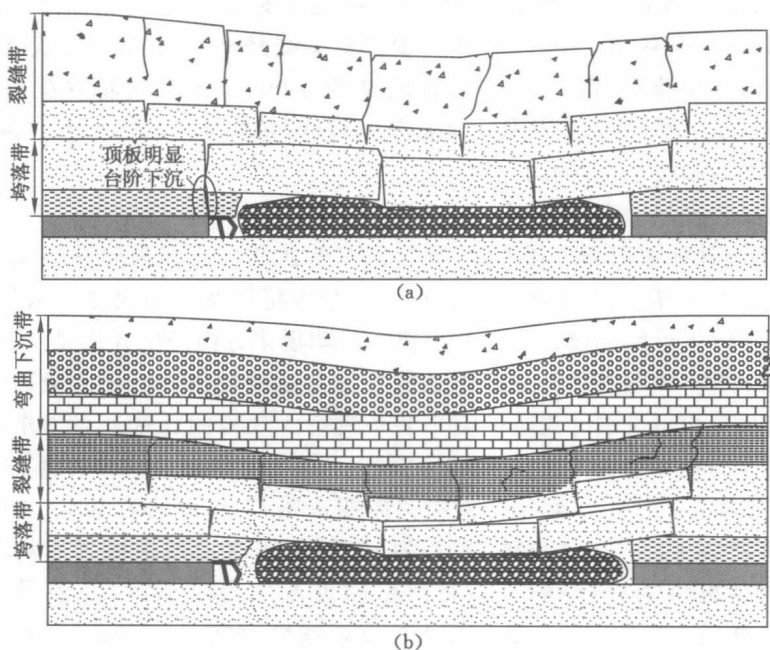


图 1-4 浅埋煤层与普通煤层开采覆岩运动特征简图

(a) 浅埋煤层; (b) 普通煤层

开采出现的动载现象,发现约 12% 的煤柱出现动载现象,表明浅埋煤层顶板来压强烈,与普通采场顶板从下至上逐层变形垮落的比较缓和的来压特征有明显区别。

澳大利亚学者 B. K. Hebblewhite 和 L. Holla 等^[12,13]认为浅埋煤层顶板沿采空区边缘几乎垂直断裂,顶板垮落高度约为采高的 9 倍,地表下沉速度快,采空区迅速压实,顶板破断从煤层到地表成“瓶塞”状切落,支架有动载现象。顶板破断期间支架以很快的速度达到甚至超过额定工作阻力,来压剧烈且难以控制。英国和美国多采用房柱式开采控制地表沉陷,对地表岩层移动和采前地层地震波探测与工程地质评价进行了研究^[20,21]。南非等国家因缺乏相关理论与技术支持而较少采用长壁开采,主要进行了房柱式开采地表沉陷预测和煤柱载荷确定等方面的研究^[22-24]。

印度对浅埋煤层长壁开采矿压规律进行了观测分析,以印度巴兰布矿为例^[14],开采 5 号煤层埋深 47.5~50.1 m,基岩为 41.2 m 厚砂岩(单轴抗压强度、单轴抗拉强度分别为 13.96、1.32 MPa),开采期间矿压显现异常,主要特点有:① 顶板大面积来压(垮落面积为 12 600 m²);② 来压强度大(动载系数最大达

2.5);③ 来压速度快,立柱刚性支撑而损坏(压死支架 32 架);④ 全工作面顶板来压不均(后柱受载高于前柱,工作面中部支架受载高于两端);⑤ 大块岩石断裂转动使得支架推向煤壁(采空区有质量约 4 000 t 的大块将支架推向煤壁 200~400 mm);⑥ 顶板来压同时地表产生裂缝(每隔 4~6 m 产生一条裂缝),地表平均下沉系数小(平均为 0.42)。

其他主要采煤国家对浅埋煤层开采后上覆岩层的运动规律有了一定的研究,但由于国外地表以表土层为主,我国神东等西北矿区多为砂基型表层,岩层赋存条件存在差异,因此上覆岩层存在不同结构特征及运动规律。国外在浅埋深房式采空区下近距离煤层长壁开采覆岩运动规律方面的研究仍是空白。

我国学者对浅埋煤层开采覆岩结构特征及运动规律进行了大量研究^[25-27]。神东煤田从开始引进国外先进的综采装备进行大规模的长壁开采以来,十分重视矿压规律的观测分析,以大柳塔煤矿第一个综采工作面(1203)为例,其矿压观测具有以下特征:① 工作面存在初次和周期来压,工作面覆岩基本上分为垮落带和裂缝带“两带”;② 来压强、周期短,周期来压时发现顶板架后切落现象;③ 来压时顶板沿基岩全厚切落,在煤壁附近产生台阶下沉,地表形成地堑;④ 非来压期间支架支护阻力具有较大的富余系数,而来压期间超过额定支护阻力,部分支架立柱因动载而出现胀裂现象;⑤ 顶板载荷层运动具有“迟滞”现象和“载荷传递”效应,支架承受的不是载荷层全厚重力,体现了支架与围岩共同承载的特性。

侯忠杰教授等^[26-31]对浅埋煤层顶板破断机理及其控制进行了深入探讨。根据基岩的残留抗剪厚度和支架共同平衡破断岩块反算其上覆松散层重力的原理,推算出了不发生台阶下沉的支护强度计算方法。并就“短砌体梁”与“台阶岩梁”的定义提出了商榷,指出将控制岩块视为岩梁建立模型的求解方法^[25]。

黄庆享教授等^[3,32-34]认为浅埋煤层长壁开采基本顶破坏遵从拉破坏准则,研究了基本顶岩块挤压点的挤压和摩擦性质,确定了顶板结构量化分析的关键参数——基本顶岩块挤压点的挤压因素和摩擦因素。在物理实验和现场实测分析的基础上,将初次来压分成两个阶段,并建立了基本顶岩块触矸前的“非对称三角拱”结构和触矸后的“单斜岩块”结构模型,指出浅埋煤层顶板块度大时,基本顶岩块触矸前后的顶板结构容易出现滑落失稳,这是造成初次来压强烈和台阶下沉的根本原因。提出了周期来压的“短砌体梁”和“台阶岩梁”结构,基本顶“短砌体梁”结构的水平力随块度的增大而减小,随回转角的增大而增大,“短砌体梁”结构参数决定了该结构不易出现回转变形失稳而具有强滑落失稳的特征。“台阶岩梁”结构的水平力随回转角、块度的增大而减小,随落差的增大而增大,该结构的失稳形式为滑落失稳。在顶板载荷中引入载荷传递因子,按支架和

围岩共同承载的观点给出了采场支护阻力的确定方法。

许家林教授等^[35,36]研究了神东矿区浅埋煤层的关键层结构类型及其破断失稳特征,将浅埋煤层覆岩关键层结构类型划分为单一关键层和多层关键层结构。其中,单一关键层又可分为厚硬单一关键层结构、复合单一关键层结构及上煤层已采单一关键层结构3种类型。同时,认为单一关键层结构是导致浅埋煤层特殊采动损害现象的地质根源。浅埋煤层单一关键层结构采动破断运动不仅对工作面矿压产生影响,同时会影响顶板涌水溃砂和地表沉陷,关键层破断块体结构承担的载荷层厚度大而不能满足砌体梁结构不发生滑落失稳的条件,从而导致关键层破断块体滑落失稳,这是导致神东矿区浅埋煤层单一关键层结构工作面易出现台阶下沉和压架出水等采动损害问题的力学机理。

朱卫兵博士等^[37]根据现场采动覆岩内部岩移钻孔的原位测试结果,指出主关键层完全控制了上覆基岩与砂砾岩层的运动,基岩与砂砾岩层的运动随着主关键层的破断出现相应的周期性变化,并对地表沉陷观测时间间隔提出了建议。首次将浅埋近距离煤层覆岩关键层结构分为上煤层已采单一关键层(包括厚硬和复合单一关键层两种)、上煤层已采无典型关键层结构和上煤层已采多层关键层结构3类4种。在此基础上分析了浅埋上煤层已采单一关键层结构的破断失稳特征与动载矿压显现发生条件,揭示了过沟谷地形时下煤层顶板关键层结构失稳机理^[8]。

张志强博士^[38]以沟谷地形条件下浅埋煤层开采为研究对象,对其工作面产生动载矿压的影响因素及发生条件进行了研究。指出浅埋煤层工作面过沟谷地形期间矿压特征及产生机理:上坡时活柱急剧下缩、片帮冒顶严重、地面台阶大等动载矿压明显,而其他地段一般不会出现动载矿压,且动载程度随沟深加大而增强,沟谷上坡段坡角越大、采高越大、层间距越小,越易发生动载矿压,沟坡走向投影线与工作面推进方向夹角越小,沿沟谷地形倾向开采,工作面过沟谷地形上坡时越易发生动载矿压。沟谷地形覆岩主关键层被侵蚀缺失是引起工作面动载矿压的根本原因。

杨治林教授等^[39]应用初始后屈曲理论和尖点突变模型分析了顶板岩层分岔失稳的机理及其屈曲后的不稳定性,得出了采场基本顶初次来压时的断裂下沉计算公式,建立了顶板破断后台阶下沉的判据并给出了台阶下沉量。在顶板破断后岩块处于非平衡状态,台阶下沉是由单一岩块逆向回转引起的,且台阶下沉与断裂下沉之间存在着确定的关系。

孙远进^[40]根据榆阳矿区煤层赋存特征:埋藏浅、基岩薄、煤系地层上方为厚风积砂层覆盖层、地质构造简单,采用相似材料模拟及数值计算等多因素拟合,指出厚风积砂层下浅埋煤层采动形成的顶板结构和来压特征与普通非薄基岩浅

埋煤层存在明显的区别,顶板难以形成稳定结构,表现出明显的动压和台阶下沉特性,形成了薄基岩浅埋煤层的顶板“台阶岩梁”结构。

蔡美峰教授等^[41]通过对大柳塔煤矿 1-2 煤层(厚 6 m)及其赋存地层构造特征、岩性组分显微结构特征和煤岩微观与宏观断裂特征的综合实验研究,指出覆岩松软、微裂隙发育、软弱层(如泥岩层)多、整体强度低是在开采过程中顶板覆岩断裂破坏引起采空区动力失稳的内在原因。而开采过程中采空区顶板暴露面积大,当弯曲应力值超过其强度极限时,会出现断裂裂缝或使原生的微裂隙扩展,并演化断裂直至动力失稳破坏。从时空过程分析,采空区的失稳破坏可分为两个阶段:岩层在重力和冲击载荷作用下的从微观到宏观不断演化发展的断裂、离层阶段和断裂后垮落及动力冲击失稳阶段。

张聚国等^[42]根据昌汉沟煤矿浅埋煤层开采地表移动变形规律观测分析指出,覆岩松软条件下地表移动具有如下特征:地表易产生连续性变形,覆岩松软导致采动顶板易垮落而不形成悬顶,岩层及地表下沉量大,水平煤层开采时一般不出现塌陷坑或塌陷漏斗,覆岩移动角小,导水裂缝带高度小。随工作面不断推进,覆岩断裂长度不等,岩层移动变形呈跳跃式变化,导致地表形成剧烈的不平衡移动,出现了裂缝产生期、扩展期及闭合期。

马立强教授^[43]对神东矿区浅埋煤层采动覆岩导水通道分布特征及其可控性进行了研究,并按照分区治理的原则,提出了沙基型浅埋煤层导水通道控制的基本条件及不同基岩厚度的适用条件初步分类。通过三维流固耦合模拟计算,指出基本顶破断时采场最易发生水资源漏失,正常回采区域的导水通道高度比初次来压区域低 10%~25%以上,随工作面推进速度加快,覆岩下沉趋于平缓,整体性变强,导水通道发育程度变小。采动覆岩导水能力和裂隙压力都经历了由小到大到小的过程,反映了顶板破断及破断岩块再组合压实过程中导水通道起始、扩展和闭合的普遍演化过程。并提出了工作面快速推进、支架合理选型防止工作面台阶下沉及局部处理的长壁工作面导水通道控制核心技术。

刘玉德博士^[44,45]基于导水通道的可控性,即通过控制可控因素确保裂缝带不导通含水层或导水裂缝带能够在采后快速闭合,初步提出了一套适合神东矿区的浅埋煤层保水开采技术,并以导水裂缝带高度为分类综合指标,采用多因素综合指标分析方法初步形成了沙基型浅埋煤层保水开采的分类体系。

王旭锋博士^[46]以基岩型和沙土质型冲沟采动坡体为研究对象,研究了这两类坡体的活动方式和对矿压影响的机理,建立了基岩型采动坡体滑落失稳的多边块铰接结构,沙土质型采动坡体块状断裂形成的偏心载荷易使顶板结构滑落失稳,且坡角越大,采动坡体对工作面矿压显现的影响程度越大。在物理模拟实

验及现场实测的基础上,建立了沙土质型冲沟坡体下长壁开采基本顶初次与周期来压顶板结构力学模型,认为基本顶初次破断后触矸前、后及周期来压时的顶板结构都易滑落失稳,揭示了冲沟坡体下开采矿压异常的根本原因。分析了“支架—围岩”相互作用关系,在考虑载荷传递效应的基础上,确定了控制沙土质型采动坡体初次、周期来压顶板结构滑落失稳的有效支护阻力。此外,将冲沟切割系数及坡角确定为冲沟坡体对矿压影响敏感性分类的指标,初步将冲沟采动坡体划分为敏感型、不敏感型和过渡型坡体三种。

范钢伟博士等^[47,48]根据神东矿区 3 类典型的煤层赋存条件(以基岩厚度、关键层数为指标),采用相似材料模拟和数值计算的方法,分析了浅埋煤层长壁开采覆岩移动与裂隙在水平和垂直方向扩展分布的动态演变特征:随工作面推进覆岩会出现与地表同步垮落现象,工作面推进越快,则裂隙扩展的时间越短,裂隙闭合也越快,而覆岩强风化带的存在有利于消解部分采动裂隙。基于常规浅埋煤层覆岩与关键层同步下沉且裂隙发育受控于关键层移动的特点,根据关键层理论建立了关键层初次和周期破断时的结构力学模型,并基于关键层结构稳定性构建了关键层破断形式的四种判别模型:触矸前沿煤壁切落、触矸后沿煤壁切落、触矸前架后切落和触矸后架后切落,依此形成了覆岩移动形式判别体系。研究了隔水层采动渗漏机理和隔水层采动保水性能演化规律,指出常规浅埋煤层保水开采机理为隔水层采动裂隙的快速愈合、减小隔水层的采动损伤程度、增加隔水层的采动保水能力,并提出了保水开采技术的两大层次(基础条件和支撑技术)及开采设计体系的五大模块。基于冲沟下浅埋煤层覆岩移动特征,建立了向沟、背沟开采时坡体结构力学模型,并提出了相应的保水开采技术。以隔裂位态系数和冲沟采动敏感性为指标,构建了常规浅埋煤层保水开采和冲沟下浅埋煤层保水开采技术适应性分类体系。

1.2.2 残留煤柱稳定性

神东煤田浅埋煤层赋存条件下有数百个中小矿井采用房式采煤方法。传统房式采煤方法不仅采出率低(仅 30%左右),而且还存在开采劳动强度大、开采效率低、作业环境差、材料电耗大等缺点,甚至引发顶板大面积塌陷灾变,给下方煤层长壁开采带来不便。为提高煤炭采出率和经济效益,避免塌陷灾变,个别煤矿进行了单体支柱长壁采煤方法。但均因单体支柱不能在顶板来压时有效控制顶板,工作面出现较大台阶切落,支柱被压死,又不得不放弃长壁采煤方法而改回房式开采。

房柱式开采有其简单灵活、顶板易维护的优点,20 世纪 90 年代,在美国、澳大利亚等国 80%以上的煤矿采用房柱式开采体系^[49]。房柱式开采应用连续采煤机,配合梭车、转载机、锚杆支护机,生产过程连续,产量大,且顶板易于维护。

煤柱回收主要采用劈柱式、开端式、外进式、肋条式、旺格维里采煤法等方法,且每种方法都在各自不同的条件下取得了较好的技术经济效益^[50]。

国内外学者对条带开采煤柱、房柱式残留煤柱、巷道保护煤柱等煤柱的稳定性进行了大量研究。M. D. G. Salamon(1966, 1967)等^[51, 52]进行了煤柱强度的综合研究,分析了125个实例,其中27个区域煤柱已经破坏,余下的98个未破坏。研究成果在南非得到了普遍推广,因此到今天南非井工开采仍以房柱式为主。澳大利亚于1995年出版的新南威尔士大学(UNSW)煤柱设计方法论(J. M. Galvin and B. K. Hebblewhite, 1995)为适应澳大利亚条件提供了合理的煤柱设计方案,如矩形煤柱及菱形煤柱等,并对煤柱稳定性进行了实验分析^[53, 54]。印度绝大多数煤矿采用了房柱式开采方法,统计表明在1996~2001年,印度共出现490次不同类型的顶板事故,造成253人死亡和401人受伤的恶劣影响,其中32.7%的伤亡发生在房柱式开采冒顶事故^[55]。传统煤柱设计采用经验公式计算,受具体煤矿地质条件所限,经常要求安全系数在2以上,造成大量煤炭资源损失。为提高煤炭采出率,提出了两切宽垛方法(two-split wide-stall method, TSWS),计算分析表明该方法可保证煤柱稳定性,且在浅埋煤层条件下,应用该设计可将煤炭采出率从45%提高至61%^[56]。

A. H. Wilson(1972)^[57]提出了煤柱两区约束理论(或渐进破坏理论),在煤柱加载实验中发现加载过程中煤柱应力发生变化,从煤柱应力峰值位置到煤柱边界这一区段,煤体应力超过了屈服点,并向采空区流动。并从实验得出屈服区宽度 Y 与采深 H 、采厚 M 存在关系式 $Y=0.00492MH$ 。同时对符合库仑准则的三向应力状态下的煤柱极限强度进行了简化处理:①将煤体内摩擦角取固定值 36° ;②舍去煤体内聚力相关项,从而得出简化后的极限强度 $\sigma_1 \approx 4\gamma H$ (式中, γ 为覆岩重度, H 为采深)。由于内摩擦角与煤体力学性质有关,该简化在大采深情况下是不准确的。王旭春等^[58]通过三维物理模拟及FLAC数值计算对厚9 m、宽80 m条带煤柱进行分析,实验得出 $Y=0.00635MH$,并对煤柱极限强度影响因素的敏感度进行了分析。刘贵等^[59]采用FLAC3D模拟分析了不同开采条件下煤柱塑性区宽度,得出了其与采深、采厚及采出率的关系。郭文兵、邹友峰教授等^[60-62]应用突变理论建立了条带煤柱突变失稳的尖点突变模型,该模型综合考虑了地下水对煤柱稳定性的影响,主要是软化煤柱弹性核区的强度、降低煤柱弹性核区的刚度致使走向条带煤柱的稳定性恶化,并推导出条带煤柱破坏失稳的充要条件表达式。

鲍凤其^[63]采用UDEAC数值模拟分析了3种不同开采煤房煤柱参数下的煤柱塑性区分布,指出当煤柱尺寸留设合理时煤柱中间处于弹性区内,稳定性较好;当煤柱尺寸过小时,煤柱全部处于塑性区,煤柱发生剪切破坏失去稳定性。