

大倾角松软厚煤层综放开采 矿压显现特征及控制技术

郭东明 范建民 朱衍利 朱现磊 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

大倾角松软厚煤层综放开采 矿压显现特征及控制技术

郭东明 范建民 朱衍利 朱现磊 著

北 京

冶金工业出版社

2012

内 容 提 要

本书以杜家村矿大倾角松软厚煤层开采为研究背景,采用理论分析、相似模拟、数值模拟和现场监测等方法,对大倾角松软厚煤层综放开采的矿压显现规律及矿压控制关键技术进行了研究,可极大提高同类地质条件下煤炭开采的安全性和高效性,对我国大倾角煤层开采具有重要的实用价值和指导意义,同时也可弥补目前大倾角煤层开采方面研究的不足。

本书可供从事采矿工程、岩土工程、地下工程等工作的科研人员、工程技术人员及生产管理人员使用,也可供高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

大倾角松软厚煤层综放开采矿压显现特征及控制技术/
郭东明等著. —北京:冶金工业出版社, 2012. 12

ISBN 978-7-5024-6080-8

I. ①大… II. ①郭… III. ①大倾角煤层—软煤层
—厚煤层—煤矿开采—矿压显现—研究 IV. ①TD326

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 255004 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcbbs@cnmip.com.cn

责任编辑 张耀辉 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6080-8

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2012 年 12 月第 1 版, 2012 年 12 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 5.25 印张; 152 千字; 156 页

25.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

我国煤田中急倾斜、大倾角厚煤层较多，约占煤炭总储存量的 14.05%，特别在我国西北地区 and 山西等地，大倾角煤层为许多矿区或矿井的主采煤层。随着我国煤炭工业发展“十二五”规划“控制东部，稳定中部，大力发展西部”战略的落实和推进，大倾角煤层的开采研究将是一项重大课题。

大倾角厚煤层处于急倾斜厚煤层与倾斜厚煤层的过渡阶段，缓倾斜、倾斜厚煤层的综放开采与急倾斜厚煤层的开采方法均难以直接适用。国外对于大倾角厚煤层的研究，主要限于长壁综合机械化开采方面，但因工作面倾角大、工艺复杂、产量和效率较低，近几年的发展缓慢，大倾角复杂厚煤层的走向长壁综放开采也少有报道。

本书从理论和技术两个方面着手，对我国大倾角松软厚煤层开采进行了较系统的矿压显现特征分析和矿压控制关键技术研究。研究表明，综放采场矿压显现上部最强、中段次之、下段最弱，覆岩顶板形成“厂”形弯曲结构移动拱，“三带”高度呈现下小上大逐渐变化形态；回风平巷采用直墙圆拱形断面、运输平巷采用留三角煤特殊断面的形式，能有效改善巷道围岩应力状态；运用采一放一（0.6m）的放煤步距和单轮间隔多口的放煤方式，可有效避免支架滑移、倾倒，有利于采场围岩的稳定和动态控制。

本书内容共分为 6 章。第 1 章介绍了我国大倾角煤层开采所遇到的难题和国内外对大倾角煤层开采研究的现状，以及全书的内容框架；第 2 章介绍了大倾角松软厚煤层典型矿井——杜家村矿的工程概况，并对其首采面进行了地质力学评价；第 3 章根据杜家村矿 1201 工作面地质条件特征，对大倾角松软厚煤层开采过程进行了相似模拟试验研究，获得了模拟开采条件下上覆岩层破

坏与运移规律和矿压显现规律；第4章通过对顶板结构力学分析、开采过程数值模拟和现场矿压实测，获得了杜家村矿大倾角综放开采工作面的应力分布和矿压显现规律；第5章采用FLAC3D数值软件，分析了大倾角特软厚煤层煤巷的支护参数，提出了适合杜家村矿大倾角特软煤层回采巷道的支护方案，并通过现场矿压观测进行了方案验证；第6章从支架控制原则、支架选型、支架和煤壁的稳定性控制及采场合理的采煤工艺等方面研究了采场围岩控制技术。

本书由郭东明、范建民、朱衍利和朱现磊共同撰写。其中：第1章、第2章和第5章由郭东明撰写；第3章和第6章由范建民、朱衍利和朱现磊撰写；第4章由郭东明、范建民和朱衍利撰写。郭东明、范建民和朱衍利负责全书的修改和整理；郭东明和范建民还负责全书的统稿工作。在撰写本书过程中得到了中国矿业大学（北京）杨仁树教授的无私指导和帮助；王国栋硕士、吴宝杨硕士、杨立云博士等对本书的撰写也给予了许多帮助；在此对他们表示衷心的感谢！

本书的撰写和出版得到了中央高校基本科研业务费（2009QL04）、国家自然科学基金面上项目（51274204）、国家自然科学基金联合基金重点项目（51134025）等资金的资助；得到了中国矿业大学（北京）深部岩土力学与地下工程国家重点实验室、中国矿业大学（北京）力学与建筑工程学院、新汶矿业集团有限责任公司等单位的大力支持和协助；在此一并表示感谢！

在撰写过程中，参阅了许多煤层综放开采及矿压控制方面的著作、学术期刊论文和互联网刊载文章，在此谨向文献的作者表示感谢！

由于作者水平所限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

作 者

2012年9月

目 录

1 绪论	1
1.1 课题研究背景与意义	1
1.1.1 课题研究背景	1
1.1.2 课题研究意义	2
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 国外研究现状	3
1.2.2 国内研究现状	6
1.3 主要研究内容和研究方法	11
1.3.1 主要研究内容	11
1.3.2 研究方法和技术路线	12
1.4 本书内容结构	14
2 工程概况与地质力学评价	15
2.1 井田及地质概况	15
2.1.1 井田位置	15
2.1.2 井田地质特征	15
2.1.3 杜家村矿大倾角工作面开采技术条件	20
2.2 杜家村矿地质力学评价	23
2.2.1 1201 采面两巷地应力测试	23
2.2.2 1201 采面煤层普氏系数测定	32
结语	43
3 1201 工作面煤层综放开采矿压显现特征试验研究	44
3.1 物理相似模拟实验理论	44
3.2 大采高综放开采实验模型设计	45

IV 目 录

3.2.1 模拟对象概况	45
3.2.2 模型构建及参数确定	46
3.2.3 相似材料配比分析	47
3.3 实验方法设计	49
3.3.1 测点布置及测试方法	49
3.3.2 实验方法与数据处理方法	51
3.4 1201 工作面大倾角松软厚煤层开采相似模拟结果分析 ..	54
3.4.1 上覆岩层破坏与移动规律	54
3.4.2 大倾角煤层开采矿山压力显现规律	59
结语	63
4 大倾角煤层开采覆岩运移机理与现场试验研究	65
4.1 大倾角煤层开采岩层运移规律分析	65
4.2 大倾角煤层开采顶板结构力学分析	66
4.2.1 直接顶岩层的结构力学模型	66
4.2.2 基本顶岩层的结构力学模型	68
4.3 1201 工作面采场覆岩与顶煤活动规律数值分析	70
4.4 1201 大倾角综放工作面采场矿压显现实测及分析	77
4.4.1 观测目的及测区布置	77
4.4.2 矿压观测结果分析	77
4.5 1201 大倾角综放工作面巷道矿压显现实测及分析	85
4.5.1 观测目的及测区布置	85
4.5.2 矿压观测结果分析	86
结语	98
5 大倾角特软煤层煤巷控制力学对策研究	101
5.1 引言	101
5.2 数值分析软件概述	102
5.2.1 FLAC3D 软件简介	102
5.2.2 FLAC3D 的基本原理	103
5.3 1201 回风巷道支护参数优化及数值分析	105

5.3.1 工程概况	105
5.3.2 数值模拟分析	105
5.3.3 支护现场矿压测试	115
5.4 1201 工作面运输平巷支护技术研究	116
5.4.1 原断面形式与支护方式	116
5.4.2 变形破坏特征及机理分析	117
5.4.3 新的运输平巷断面形式与支护方式的提出	120
5.4.4 新支护方式的数值模拟分析	121
结语	128
6 大倾角松软厚煤层综放采场围岩控制技术研究	129
6.1 采场围岩控制原则	129
6.2 支架选型的合理性评价	130
6.2.1 支架对软煤层的适应性	130
6.2.2 支架对软底板的适应性	131
6.2.3 大倾角综放液压支架防护措施	132
6.2.4 支架工作阻力的确定	133
6.3 工作面支架的稳定性控制研究	134
6.3.1 支架的稳定性分析	134
6.3.2 支架的稳定性控制技术	136
6.4 工作面煤壁的稳定性控制研究	140
6.4.1 煤壁的受力模型分析	140
6.4.2 煤壁的稳定性控制技术	141
6.5 不同采煤工艺条件下采场围岩控制分析	142
6.5.1 PFC2D 软件简介	142
6.5.2 放煤过程中顶煤的受力分析	143
6.5.3 合理放煤步距的确定	146
6.5.4 合理放煤方式的确定	148
结语	150
参考文献	151

1.1 课题研究背景与意义

1.1.1 课题研究背景

我国传统能源具有“煤多油少”的特点。2009 年中国煤炭工业的统计年鉴表明^[1]：2009 年我国一次性能源生产及消费结构中煤炭大约占 70%，预计到 2020 年煤炭将占我国总能源结构的 60% 左右，到 2050 年时将占 50% 以上；从产量上看，2001 年我国煤炭总产量大约为 11 亿吨，2003 年达到 16 亿吨，2006 年则为 24 亿吨，2009 年已经超过 30 亿吨。由此可见，我国的能源结构和能源消费结构中以煤炭为主的格局将在相当长一段时间内不会改变。根据 2012 年 1 月中国海关总署公布的数据显示，2011 年中国煤炭进口增长 11%，达到 1.824 亿吨，超过日本成为全球最大煤炭进口国。造成中国煤炭进口量激增的主要原因是，煤炭占我国能源消耗比重的近 70%，作为一次性能源和重要的化工原料，其具有不可替代性。因此，加强煤炭资源安全高效开采对促进我国国民经济快速稳定发展具有重要作用^[2]。

我国煤炭资源预测总量为 5.06 万亿吨，呈现分布广泛、西多东少、埋藏较深、煤层开采条件差等特点。近年来，大倾角煤层（ $35^{\circ} \sim 55^{\circ}$ ）越来越引起采矿界的重视，主要原因有：

（1）西北部赋存有大量 35° 以上的大倾角煤层。我国煤田中急倾斜、大倾角厚煤层较多，大约占煤炭总储存量的 14.05%，特别在我国的山西、陕西、宁夏、甘肃和新疆等地，大倾角煤层为许多矿区或矿井的主采煤层。目前，虽然大倾角煤层年开采量仅占我国煤炭总产量的 8% ~ 10%，但在一些特定地区，大倾角煤层年产量却占有非常大的比例，如四川省大约有 40% ~ 50% 的煤炭产量为大倾角煤层开采产量^[3]。随着我国“十二五”发展计划中“控制东部、稳

定中部、大力发展西部”的煤炭发展战略的稳步推进^[4]，大倾角煤层开采问题的研究将是一项重大课题。

(2) 多年的开采已使得埋藏较浅、地质构造简单的煤层储量越来越少。许多东部矿区，如安徽的淮北和淮南矿区、江苏的徐州矿区、山东的兖州矿区、河北的邢台和开滦矿区等，随着煤炭开采强度的日益提高，赋存条件优越的煤层越来越少，条件恶劣的复杂煤层开采势在必行，特别是大倾角复杂条件下的煤层开采^[5]。

若要保证大倾角复杂煤层的安全高效开采，必须解决大倾角煤层开采过程中存在的技术难题^[6]。

1.1.2 课题研究意义

大倾角厚煤层处于急倾斜厚煤层与倾斜厚煤层的过渡阶段，缓倾斜、倾斜厚煤层的综放开采与急倾斜厚煤层的开采方法均难以直接适用。传统的水平分段综放开采，工作面单产较低、回采周期短、搬家频繁，而且由于将运输平巷沿煤层底板布置，运输平巷底板侧大量的留滞三角煤难以放出，导致煤炭回收率低^[7]。传统的倾斜分层走向长壁开采，巷道采掘比高，材料消耗大，生产成本低，工作面单产不高，为了满足矿井设计生产能力，往往布置多个工作面同时生产，造成设备占用多且效率低，经济效益普遍较差，不利于矿井的安全高效生产。

杜家村煤矿为改扩建矿井，主采2号煤层为大倾角厚煤层，且煤质松软，为保证矿井的安全高效生产，经技术比较后采用走向长壁综采放顶煤技术进行开采（见图1-1）。但是，大倾角煤层开采的

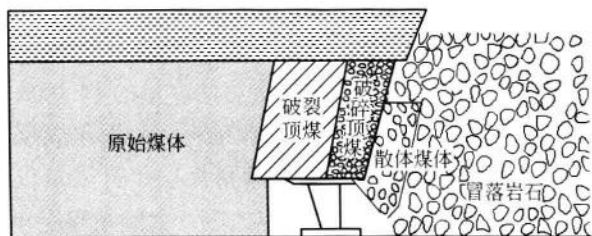


图 1-1 放顶煤开采示意图

技术水平远低于缓倾斜煤层,尤其在煤层较厚、煤质较软等复杂地质条件下,仍存在许多基本的技术难题。

相对于缓倾斜近水平煤层,大倾角煤层由于煤、岩层沉积结构的特殊性,导致其具有显著的各向异性特征,并且随倾角的增加,各向异性越发明显,加之松软的煤质,使得大倾角松软厚煤层综放开采具有特殊的矿压显现规律和顶煤运移规律。近年来,国内外学者对综采放顶煤开采过程中的回采工艺、巷道围岩控制、上覆煤岩运移规律等问题进行了大量的理论和实验研究,取得了大量成果,但这些研究工作往往只是针对缓倾斜近水平煤层,而对大倾角煤层特别是大倾角松软厚煤层的综放开采研究工作却进行的相对较少^[8,9]。因此,对影响因素多、物理过程复杂的大倾角松软厚煤层综放开采的关键技术,尤其是矿山压力显现规律、围岩控制等问题进行深入研究,不仅具有重要的理论价值,而且对 21 世纪我国的能源战略、煤炭行业可持续发展及大倾角煤层高产高效安全生产具有重要的保障和促进作用。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

1.2.1.1 国外大倾角煤层开采方法的研究进程

大倾角煤层的煤炭储量在俄罗斯、英国、法国、德国、波兰等国家的煤炭资源总量中占有相当大的比重。早在 20 世纪 70 年代,苏联就开始了急倾斜、大倾角煤层机械化开采的研究,并研制出用于综合机械化开采的采煤机和液压支架,同时还对倾角大的煤层进行开采工艺研究,奠定了大倾角煤层开采技术研究的科学基础^[10,11]。20 世纪 80 年代,乌克兰顿涅茨煤矿机械设计院为急倾斜、大倾角煤层工作面设计了采煤机及相应的配套支护设备。为保证采煤机有足够的爬坡能力,在工作面上回风巷中安装了绞车,并将采煤机的牵引部接到绞车系统,从而令其得以成功的应用^[12]。1992 年威斯特伐里亚-贝考特公司生产的 G9-38Ve4.6 加高型滑行式刨煤机,辅助配

合 WS1.7 型宽体双伸缩二柱掩护液压支架, 应用于鲁尔矿区的威斯特豪尔特 (Westerholt) 矿, 开采了鲁尔矿区的大倾角煤层^[13]。德国将用于缓倾斜煤层的赫姆夏特液压支架与用于急倾斜煤层的曼斯菲尔德液压支架进行改造, 并结合防倒、防滑技术, 来开采急倾斜、大倾角煤层^[14]。英国将适用于 $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 煤层倾角的多布逊支架与伽里克支撑式支架应用于大倾角煤层开采, 也取得了一定的技术与经济效益^[15]。另外, 印度研究了掩护支架采煤法、柔性支架采煤法、综合机械化配套设备等应用于急倾斜和大倾角煤层, 发展了大倾角煤层开采的研究^[16]。西班牙在帕里奥和圣安托尼奥煤田使用了机械化方式开采大倾角煤层^[17]。

1.2.1.2 国外大倾角煤层开采的覆岩运动规律研究动态

人类利用地下资源之初, 就观察和认识到开采带来的覆岩运动与破坏, 并探索控制岩层移动的措施。早在 18 世纪下半叶, 比利时人就提出了“法线理论”和“自然斜面理论”, 并能够初步估算出覆岩移动的范围。这些理论为以后覆岩运移规律的进一步研究奠定了基础。20 世纪后期, 门者尔观测到开采过程中地表除下沉外, 还存在水平方向的变形和位移, 并对水平位移进行了计算和大倾角煤层开采地表的移动过程进行了分析。

第二次世界大战后, 各国学者对大倾角煤层开采覆岩运动规律继续进行了大量研究, 出版了专著《煤矿地下开采的岩层移动》^[18], 提出了覆岩下沉盆地剖面方程及数学塑性理论。布德雷克在波兰学者克诺特研究的基础上, 解决了下沉盆地中水平移动及水平变形问题, 提出了现在所谓的布德雷克-克诺特理论。20 世纪以来, 多名学者提出了矿山压力假说, 原苏联学者提出的铰接岩块假说, 阐明了工作面上覆岩层的分带情况和岩层内部结构; 德国人 W. Hack 和 G. Gillitzer 提出悬臂梁假说, 将垮落后的顶板看做一端固定在工作面前方煤体上的悬臂梁; 比利时学者认为回采工作面上覆岩层因连续性被破坏而成为非连续体^[19]。1954 年波兰学者李特威尼申提出了著名的随机介质理论, 他把岩层移动看做一个随机过程, 认为地表下沉服从柯尔莫哥罗夫方程, 从而大大丰富和发展了岩层移动计算理

论。法国学者通过在达尔西矿进行深基点观测,认为大倾角放顶煤开采过程中顶煤的运移与煤壁的水平断裂有关,顶底板移近量很大,从煤壁到支架后方的移近量均可达 1m 左右,且放顶煤工作面也被认为是一动态应力分布场^[20]。

1.2.1.3 国外大倾角煤层开采和围岩控制研究现状

国外对矿山压力规律的研究主要集中在近水平和缓倾斜煤层上,对于大倾角煤层占据一定比例的前苏联、德国、法国、英国、波兰、乌克兰等几个国家中,前苏联对矿山压力和采煤工艺的研究占据主导地位^[21]。20 世纪 30~40 年代,苏联开始对矿山压力显现规律进行研究。通过对大倾角煤层开采过程中上覆岩层沉陷现象进行观测,得到了实测数据和原始记录,并在分析与总结的基础上对岩层控制和采煤工艺规律进行了完善和总结,并最终生产出了综采设备。通过对不同开采条件、不同赋存煤层、不同支护设备条件下的工作面进行矿压规律观测,得出了大倾角煤层在多种条件下矿压显现的基本规律。通过实验室相似材料模拟,对倾斜煤层进行了顶板分类,并研究了采动对顶板运动特性和矿压分布规律的影响^[22,23],并在 1974 年出版了研制大倾角厚煤层综合机械化装备和开采方法及工艺的专著^[24]。英国学者 Wilson 和 Brown 通过研究煤层倾角对工作面上覆顶板岩层的影响,得出了确保工作面顶底板不出现滑移的合理支架工作阻力^[25,26]。俄罗斯的顿巴斯矿区、乌克兰的卡拉岗达矿区、法国的洛林矿区、德国的鲁尔矿区分别在大倾角煤层中应用综采技术进行开采,使其矿井生产效率和利润有了明显的提高,获得了良好的技术经济效益。捷克共和国的鲍迪研究了无人开采技术在较坚硬大倾角煤层应用的安全性及可操作性。俄罗斯的库拉科夫系统研究并完善了大倾角煤层工作面矿压规律显现的一般规律^[27]。印度的 Singh 利用实验室研究方法,对印度东北部的大倾角厚煤层进行研究,探讨了放顶煤开采技术运用的可行性^[28,29]。

综上所述,国外对于大倾角厚煤层的研究,主要限于长壁综合机械化开采方面,并集中在前苏联、德国、波兰等国家。但因工作面倾角大、工艺复杂、产量和效率较低,其近几年的发展缓慢,而

大倾角复杂厚煤层的走向长壁综放开采也少有报道。

1.2.2 国内研究现状

1.2.2.1 国内大倾角煤层的开采方法发展

大倾角煤层的开采方法选择不仅与煤层的围岩性质、埋藏深度、水文地质、自然发火期等因素有关,更和煤层倾角、厚度有关。20世纪50年代前我国对大倾角煤层开采,主要采用高落式采煤法及人工落煤等方法,开采工艺极落后,且存在生产安全条件差、资源回收率低等问题。

20世纪50年代初,倒台阶采煤法被广泛地应用于开采急倾斜、大倾角煤层。这种方法具有对断层、煤厚、倾角等地质变化的适应性强,采出率较高,通风系统简单等优点;但劳动环境差,采煤工序繁杂,顶板管理工作量大^[30]。到20世纪50年代末,我国一些矿区的大倾角松软煤层开采开始采用钢丝绳锯采煤法开采,并相继在河北、辽宁、四川省的一些矿区获得了一定范围的推广应用^[31]。

20世纪60年代初,我国淮南矿区开始率先对大倾角煤层采用伪倾斜柔性掩护支架采煤法开采,随后开滦、徐州等矿区也相继有所使用^[32,33]。这种采煤方法沿煤层走向推进,工作面沿煤层倾向布置,伪倾斜柔性掩护支架将工作面与采空区分开,其特点是工作面支架在安装之后依靠冒落矸石的作用自动调整和前移。这种方法具有生产系统简单,通风条件好,掘进率低等优点,但却存在支架对煤层厚度和倾角变化适应性较差,工作面煤层较大,工作环境较差等缺点。

20世纪80年代初,我国一批煤炭院所,如煤炭科学研究总院北京开采所和唐山分院、中国矿业大学、东北大学等致力于研究大倾角厚煤层综合机械化开采的配套装备,并从德国、波兰、西班牙、苏联等国家引进先进的设备,在北京矿务局、安徽淮南矿务局、辽宁沈阳矿务局、辽宁鹤岗矿务局、新疆艾维尔沟煤矿、四川攀枝花矿务局等矿区进行了试验与生产,均取得了较好的效果。放顶煤采煤法能够适应复杂多变的地质条件,工作面效率较高,巷道系统简

单,机械化程度较高,便于集中生产和科学管理^[34,35]。1984年煤炭科学研究总院北京开采所研制出 ZYS9600-14/32 大倾角液压支架,经试验检验能够适用于 $35^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 的煤层开采,但未进行工业性试验。沈阳蒲河煤矿运用国产 FY400-14/28 型综放支架进行综放开采的工业性试验,取得了大倾角煤层综放开采的技术经验^[36]。1986年制定的煤炭工业“七五”发展规划中提出研发“三软”(软顶、软煤、软底)、“二大”(大倾角、大采高)等煤层应用的支架,从而使大倾角煤层开采设备研制及技术研究进入了一个高潮期。甘肃窑街矿务局率先进行了大倾角特厚煤层的水平分段综放开采试验,之后甘肃靖远矿务局、内蒙古平庄矿务局、新疆乌鲁木齐矿务局等也相继使用了该方法进行开采,均取得了较好的技术经济效益^[37]。1989年煤炭科学研究总院北京开采所与辽宁沈阳矿务局红菱矿共同研制了我国第一套大倾角液压支架 ZYJ3200-14/32,填补了我国大倾角煤层液压支架的空白,经改进后该支架在沈阳红菱矿进行了工业性试验,并通过了技术鉴定,但最终却未得到推广使用^[38]。

20世纪90年代,河南平顶山矿务局十三矿、宁夏石炭井矿务局乌兰矿等进行了大倾角厚煤层开采工业性试验研究,取得了一定的成效。新疆艾维尔沟煤矿采用 ZZX4000-17/35 液压支架,进行了大倾角、坚硬顶板($f > 8 \sim 18$),软煤($f = 1.0$)、软底(抗压强度小于 1.5MPa)的大倾角煤层开采工业性现场试验^[39]。安徽淮南矿务局、四川攀枝花矿务局、重庆南桐矿务局、北京矿务局也分别在多个工作面进行了大倾角煤层综采装备(适应最大煤层倾角为 55°)工业性试验。1992年宁夏石炭井矿务局乌兰矿在煤层倾角 $25^{\circ} \sim 70^{\circ}$,煤厚平均 8m 的工作面,采用 MXP350 型窄身采煤机, ZFSB3200-16/28 型放顶煤液压支架与 ZTG3400-20/30 型过渡型液压支架进行了工业性试验,取得了月产量 3 万吨,工作面采出率 84.9% 的较好成果^[40]。1996年,煤炭科学研究总院北京开采所、西安矿业学院(现西安科技大学)等单位成功研制并试验了大倾角煤层综采成套设备和开采理论与技术,并将其应用到煤层倾角为 $35^{\circ} \sim 43^{\circ}$ 的华蓥山绿水洞煤矿,实现了“一井一面”生产与管理,产量稳定在 60 万吨/年左右^[41]。安全可靠的大倾角工作面系统,使得我国

关于大倾角煤层综合机械化开采的研究处于国际领先水平^[42]。1998年又进行了大倾角厚煤层综合机械化长壁开采的工业性试验,较好地解决了开采过程中的技术设备问题,从而为大倾角厚煤层走向长壁综采和综放开采的技术推广与应用奠定了基础^[43]。

2003年靖远煤业公司的王家山煤矿将工作面倾斜布置的技术,运用于大倾角厚煤层综放开采的工业性试验中,并对开采技术与工艺进行了实验室与理论研究,较好解决了开采过程中的难题,获得了成功^[44]。

1.2.2.2 国内大倾角煤层开采的覆岩运动规律研究动态

在我国,有关苏联的典型曲线法对于覆岩运动规律的研究一直持续到20世纪60年代。1958年起,我国的抚顺、淮南等矿区别建立了地表移动观测站,在总结分析观测数据的基础上,编制了淮南等三矿区的《地表建筑物及主要井巷保护暂行规程》。学者刘宝琛和廖国华将李特威尼申的随机介质理论引入我国并将其完善,编著了《煤矿地表移动的基本规律》一书^[45]。

1981年,刘天泉和仲惟林等学者通过对大倾角煤层开采时上覆岩层运移的深入研究,分析了大倾角煤层开采时的覆岩破坏规律,研究涉及水体下采煤。马伟民、王金庄等在对该领域研究成果进行系统总结的基础上,于1983年组织编著了《煤矿岩层与地表移动》^[46,47]。基于覆岩层结构理论的研究,钱鸣高于1983年出版了《采场矿山压力与控制》^[48],宋振骐于1988年在以研究采场上覆岩层运动为中心的基础上提出了传递岩梁理论,并出版了《实用矿山压力控制》等专著。

20世纪90年代后期,钱鸣高提出了岩层控制的关键层理论,系统阐述了关键层理论的意义、概念和判别方法,分析了关键层对覆岩移动、矿压显现规律的影响等,并最终出版了专著《岩层控制的关键层理论》^[49]。庞矿安、刘俊峰、董德彪等^[50]研究了大倾角开采顶煤运移规律及支架和围岩的关系,并建立了液压支架的动态受力模型,提出了支架稳定性的影响因素和控制措施。王卫军^[51,52]引进了“煤梁”的概念,应用弹塑性力学及矿压理论构造了“煤梁”极

限跨度模型,认为大倾角煤层放顶煤开采顶煤下部存在一个两端固支的“煤梁”,它支撑上覆顶煤和覆岩,当达到抗拉强度极限时就会断裂,随着顶煤的运移,“煤梁”不断的垮落,形成新的“煤梁”,再垮落,如此循环。赵朔柱^[53]认为,急倾斜放顶煤开采工作面的顶煤和顶板以散体介质存在,随开采的进行,暴露的顶板会断裂冒落,并会沿倾斜方向形成铰接结构。工作面巷道的破坏主要来自顶板压力,底板巷道的破坏表现为底鼓现象。吴健^[54]通过对急倾斜水平分段放顶煤工作面观测后认为,工作面煤壁前方3~10m的顶煤开始移动,以水平位移为主,后方则以垂直位移为主。顶煤从液压支架尾梁冒落后的过程分为冒落过程、压实过程和放出过程。周英^[55]运用深基点观测的方法,对比分析了“卸载移架”和“带压移架”两种移架方式对顶煤破碎效果的影响,研究了顶煤在不同的压力条件下裂隙的产生、发展、贯通和破碎机理,这对控制顶煤的破碎程度,提高采出率具有重要意义。朱川曲、缪协兴^[56]运用灰色统计方法及模糊数学理论建立了急倾斜煤层顶煤可放性评价模型,将顶煤分为可放性好、可放性较好、可放性一般、可放性较差及可放性差5类。赵旭清、陈忠辉等^[57,58]利用深基点跟踪观测法,对淮北矿业集团朱仙庄矿8413-2“三软”中厚煤层综放工作面顶煤变形运移特性进行了研究,认为顶煤的损伤破坏是个周期性很长的过程。

1.2.2.3 国内大倾角煤层开采和围岩控制研究现状

我国对矿山压力规律的研究,大多集中于近水平和缓倾斜煤层,直到20世纪80年代才开始针对大倾角煤层开采时的矿压显现特征进行研究,其采用的研究方法有实验室物理模拟、数值分析和现场监测等。

早在1986年,南桐矿务局就在南桐二矿进行了矿压观测,通过对实测数据的分析,获得了工作面的周期来压步距,并总结了顶板下沉与采煤工序之间的关系^[59]。华道友、平寿康^[60]利用立体模拟试验台,通过对大倾角煤层不同倾角、不同开采体系下矿压规律进行研究,获得了开采过程中上覆岩层破坏规律及控制措施,同时也较系统地研究了大倾角煤层矿压显现规律及防治对策。王永建^[61,62]在