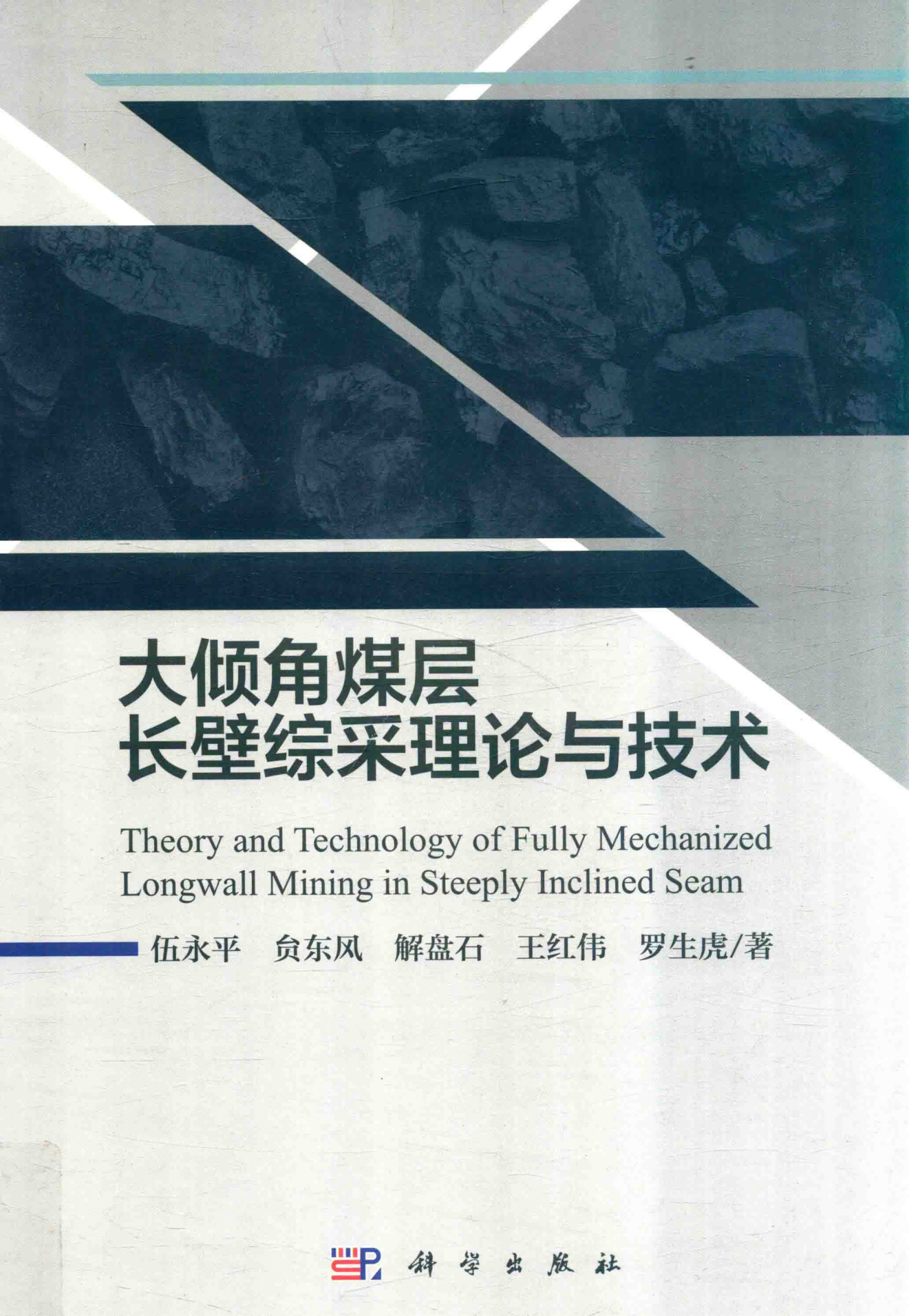




大倾角煤层 长壁综采理论与技术

Theory and Technology of Fully Mechanized
Longwall Mining in Steeply Inclined Seam

伍永平 贡东风 解盘石 王红伟 罗生虎/著



科学出版社

大倾角煤层长壁综采理论与技术

**Theory and Technology of Fully Mechanized
Longwall Mining in Steeply Inclined Seam**

伍永平 负东风 解盘石 王红伟 罗生虎 著

国家自然科学基金重点项目(51634007)资助

国家自然科学基金面上项目(51074120)资助

国家自然科学基金青年科学基金项目(51204132)资助

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书紧密结合近年来大倾角煤层综采技术的发展,系统总结了大倾角煤层综采理论、技术、装备与实践方面的研究成果。主要内容包括:大倾角煤层综采工作面矿压显现和围岩破断与运动规律、顶板—支架—底板系统动力学控制理论、采场倾斜砌体结构理论、采场应力拱壳及关键域岩体结构理论、大倾角煤层长壁综采关键技术、大倾角煤层长壁综采工程实践及主要装备。

本书可作为高等院校采矿工程专业本科生、研究生的教学参考书,也可供从事采矿工程技术研究的科研人员、煤矿企业生产、设计的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大倾角煤层长壁综采理论与技术 = Theory and Technology of Fully Mechanized Longwall Mining in Steeply Inclined Seam / 伍永平等著. —北京:科学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-03-053861-1

I. ①大… II. ①伍… III. ①大倾角煤层—倾斜长壁采煤法—研究 IV. ①TD823.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 139664 号

责任编辑:李 雪 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 倩 / 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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 9 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 9 月第一次印刷 印张: 17 1/2

字数: 455 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

大倾角煤层是指埋藏倾角为 $35^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 的煤层，是国内外采矿界公认的难采煤层。大倾角煤层广泛分布于我国大采高各大矿区，目前已探明大倾角煤层储量约为 1800 亿~3600 亿吨，约占我国煤炭总储量的 10%~20%，每年大倾角煤层开采产量约为 1.5 亿~3 亿吨，约占我国煤炭总产量的 5%~8%。随着开采强度和深度的不断增大，大倾角煤层已经成为了许多矿井的主采煤层。大倾角煤层由于成煤环境复杂，安全高效开采难度极大，截至 2016 年 12 月，除中厚煤层采用综合机械化开采和部分特厚及厚煤层试验综放与大采高开采外，大多数开采大倾角煤层的矿井仍然在使用不同类型的非机械化开采方法，产效与安全状况差，人员伤亡事故频发，成为了许多矿井(区)经营困难、百万吨死亡率居高不下的重要影响因素。

大倾角煤层长壁综采(综放)技术的成功应用变革了我国该类煤层非机械化开采历史，解决了大倾角煤层开采的基本安全问题。经过近 20 年的研究与发展，对特定条件下该类煤层开采科学问题的研究取得了一定的进展，促使其技术与装备水平均有了大幅度的提高，但工作面系统性的安全问题和产量与效益较低依然是制约该技术广泛应用与推广的瓶颈。

通过对大倾角煤层开采基础理论、关键技术、主要装备及工程实践的系统总结，不仅可以推动大倾角煤层创新科学研究方法、开拓技术变革领域、提高装备研制标准和安全管理水平，而且能够为难采煤层安全高效开采方法在科学层面上获得系统性突破奠定坚实的基础。

本书分为 8 章，由伍永平统稿，其中第 1 章由伍永平完成，第 2 章由伍永平、王红伟完成，第 3 章由伍永平、罗生虎完成，第 4 章由解盘石完成，第 5 章由王红伟完成，第 6 章由负东风完成，第 7 章和第 8 章由伍永平、负东风完成。

由于作者水平所限，书中不当之处，敬请读者批评指正！

作 者

2017 年 1 月

目 录

前言

第1章 大倾角煤层开采历史与现状	1
1.1 大倾角煤层开采方法	1
1.2 大倾角煤层开采围岩控制理论与技术	2
参考文献	3
第2章 大倾角煤层走向长壁工作面矿压显现和围岩破断与运动规律	5
2.1 大倾角煤层走向长壁开采矿压显现规律	5
2.1.1 大倾角煤层走向长壁单体支柱工作面矿压显现现场观测	5
2.1.2 大倾角煤层走向长壁综采工作面矿压显现现场观测	5
2.1.3 大倾角煤层走向长壁开采矿压显现实验室模拟	8
2.1.4 大倾角煤层走向长壁工作面矿压显现一般特征	21
2.2 大倾角煤层走向长壁开采围岩破断与运动基本特征	22
2.2.1 上覆岩层变形破坏过程	22
2.2.2 上覆岩层变形破坏特征	23
2.2.3 上覆岩层垮落与充填特征	28
2.2.4 底板破坏转移特征	32
2.3 大倾角煤层开采覆岩关键层与岩体结构的形成与变异	33
2.3.1 “关键层”形成区域	33
2.3.2 直接顶沿工作面倾斜方向运动状态	34
2.3.3 “关键层”迁移转化特征	35
2.3.4 “关键层”岩体结构变异致灾机理	36
参考文献	37
第3章 大倾角煤层开采“R-S-F”系统动力学控制理论	38
3.1 大倾角煤层走向长壁开采“R-S-F”系统稳定性基本概念	38
3.1.1 “R-S-F”系统研究的本质	38
3.1.2 支护系统的静态稳定性及其与围岩相互作用	39
3.1.3 大倾角煤层“R-S-F”系统的灾变因素	41
3.2 大倾角煤层走向长壁开采“R-S-F”系统动力学模型	42
3.2.1 “R-S-F”系统的失稳类型	42
3.2.2 “R-S-F”系统动力学模型	44
3.3 大倾角煤层走向长壁开采“R-S-F”系统动力学方程	46
3.3.1 “R-S-F”系统分析基本假设	46
3.3.2 “R-S-F”系统动能	46
3.3.3 “R-S-F”系统的动能函数及其微分	49
3.4 大倾角煤层走向长壁开采“R-S-F”系统动态稳定性分析与控制	61
3.4.1 “R-S-F”系统动态稳定性的概念	61

3.4.2	“R-S-F”系统动态稳定性分析	62
3.4.3	“R-S-F”系统保持动态稳定时的实际工作阻力	66
3.4.4	“R-S-F”系统动态稳定性控制模式与方法	68
	参考文献	73
第4章	大倾角煤层开采倾斜砌体结构理论	74
4.1	大倾角煤层长壁开采覆岩空间结构特征	74
4.1.1	大倾角煤层长壁采场顶板倾向破坏结构特征	74
4.1.2	大倾角煤层长壁采场顶板走向破坏结构特征	77
4.1.3	大倾角煤层长壁采场覆岩空间结构	77
4.2	大倾角煤层长壁开采覆岩空间结构稳定性分析	80
4.2.1	大倾角煤层采场倾斜砌体结构动力学方程	80
4.2.2	大倾角煤层长壁采场覆岩空间“壳体结构”稳定性分析	92
4.3	大倾角煤层长壁开采覆岩空间承载结构失稳准则及致灾机理	104
4.3.1	大倾角煤层长壁采场覆岩承载结构	104
4.3.2	大倾角煤层长壁采场覆岩承载结构失稳准则及致灾机理	108
	参考文献	113
第5章	大倾角煤层采场应力拱壳及“关键域”岩体结构理论	115
5.1	大倾角煤层采场覆岩应力迁移特征	115
5.1.1	工程地质和开采条件	115
5.1.2	数值计算模型建立	116
5.1.3	不同采高条件下采场应力形成及演化特征	117
5.1.4	不同倾角条件下采场应力形成及演化特征	122
5.1.5	采场围岩应力场形成特征	126
5.2	采场围岩支承压力分布特征	127
5.2.1	采场前后方煤岩体支承压力	128
5.2.2	回采巷道两侧煤岩体支承压力	130
5.2.3	采场四周煤岩体支承压力	135
5.2.4	采场支承压力分布类型及特征	140
5.3	采场围岩三维应力场形成及演化特征	142
5.3.1	应力拱壳形成特征	142
5.3.2	应力拱壳分析模型	143
5.3.3	应力拱壳形态方程	145
5.3.4	应力拱壳演化特征	147
5.4	采场覆岩垮落机制及“关键域”转化特征	150
5.4.1	大倾角煤层采场覆岩垮落机制	150
5.4.2	覆岩“应力—冒落”双拱特性	157
5.4.3	覆岩“关键域”形成层位	158
5.4.4	覆岩“关键域”岩体结构破断运移和平衡机制	160
5.5	大倾角煤层开采岩体结构稳定性分析	163
5.5.1	倾向“梯阶”结构形成特征	163
5.5.2	倾向“梯阶”结构力学模型	164
5.5.3	倾向“梯阶”结构稳定性分析	165

5.5.4 “关键域”岩体结构失稳机制·····	174
参考文献·····	175
第6章 大倾角煤层长壁综采关键技术 ·····	177
6.1 概述·····	177
6.2 工作面“R-S-F”系统完整性保持技术·····	177
6.2.1 区段“大范围”岩层控制技术·····	177
6.2.2 放顶煤工作面顶煤放出量区域控制技术·····	178
6.2.3 工作面支护系统工作阻力分区域控制技术·····	178
6.2.4 坚硬顶板超前预爆破弱化技术·····	179
6.2.5 松(散)软煤层与软弱底板加固技术·····	181
6.2.6 工作面支护系统与装备防倒、防滑技术·····	183
6.2.7 动态扶架与支护系统二次稳定技术·····	183
6.3 工作面(开切眼)与回采巷道布置及维护技术·····	185
6.3.1 工作面调伪斜技术·····	185
6.3.2 切眼穿层布置技术·····	186
6.3.3 切眼掘进技术·····	187
6.3.4 非规则(异型)断面巷道维护技术·····	189
6.4 工作面“三机”选型配套关键技术·····	190
6.4.1 大倾角“三机”选型·····	191
6.4.2 大倾角“三机”配套·····	197
6.5 回采工艺优化技术·····	202
6.5.1 落煤与装煤·····	202
6.5.2 运煤·····	204
6.5.3 支护与采空区处理·····	204
6.5.4 工序之间的配合·····	205
6.6 特殊条件处理技术·····	208
6.6.1 非等长工作面柔性支护过渡技术·····	208
6.6.2 工作面快速安装与回撤技术·····	208
6.7 工作面安全防护与管理·····	209
6.7.1 工作面端头防护技术·····	209
6.7.2 工作面内防护技术·····	210
6.7.3 安全管理·····	211
6.7.4 实施保障·····	213
参考文献·····	217
第7章 大倾角煤层长壁综采工程实践 ·····	219
7.1 大倾角中厚煤层综合机械化开采·····	219
7.1.1 地质与生产技术条件·····	219
7.1.2 工作面主要装备与采煤方法·····	220
7.1.3 研究、试验与生产过程·····	221
7.1.4 主要成果及创新点·····	221
7.1.5 技术经济与社会效益·····	222
7.2 大倾角特厚煤层综合机械化放顶煤开采·····	223

7.2.1 地质与生产技术条件	223
7.2.2 工作面主要装备与采煤方法	224
7.2.3 研究、试验与生产过程	225
7.2.4 主要成果及创新点	232
7.2.5 技术经济与社会效益	234
7.3 大倾角煤层群综合机械化放顶煤开采	234
7.3.1 地质与生产技术条件	234
7.3.2 采煤方法及回采工艺	235
7.3.3 研究、试验与生产过程	236
7.3.4 主要成果及创新点	236
7.3.5 技术经济与社会效益	237
7.4 广域坚硬顶板、软底大倾角松软煤层综合机械化开采	238
7.4.1 地质与生产技术条件	238
7.4.2 采煤方法及回采工艺	238
7.4.3 研究、试验与生产过程	240
7.4.4 主要成果及创新点	240
7.4.5 技术经济与社会效益	241
7.5 大倾角煤层走向长壁大采高综采	242
7.5.1 地质与生产技术条件	242
7.5.2 采煤方法及回采工艺	243
7.5.3 研究、试验与生产过程	244
7.5.4 主要成果及创新点	246
7.5.5 技术经济与社会效益	248
参考文献	249
第 8 章 大倾角煤层长壁综采主要装备介绍	250
8.1 大倾角煤层走向长壁综采工作面装备研制基本原则	250
8.2 大倾角煤层走向长壁工作面开采成套装备研制关键技术	251
8.2.1 液压支架防倒防滑技术	251
8.2.2 液压支架自身工作空间防护技术	251
8.2.3 输送机(运输机)防滑技术	252
8.2.4 输送机空间防护技术	253
8.2.5 输送机拉紧与防护技术	254
8.2.6 端头支护技术	254
8.2.7 采煤机牵引、制动等系列技术	256
8.2.8 采煤机与输送机配合技术	257
8.2.9 平行布置输送机电机减速器技术	257
8.3 大倾角煤层走向长壁工作面开采典型成套装备	257
8.3.1 工作面液压支架及其参数	257
8.3.2 工作面刮板输送机及其参数	261
8.3.3 工作面采煤机及其参数	264
8.3.4 工作面其他装备及其参数	265
8.3.5 “三机”的主要技术特点	267
参考文献	269

第1章 大倾角煤层开采历史与现状

1.1 大倾角煤层开采方法

大倾角煤层开采方法在国际上的研究始于 20 世纪 70 年代, 具有代表性的有世界采煤大国苏联、美国、德国以及法国、英国和印度。在 70 年代, 苏联就发展了大倾角厚及中厚煤层机械化开采技术, 研制了适用于大倾角煤层开采的机械设备和回采工艺, 并出版了相关专著, 为大倾角煤层机械化开采奠定了基础。1979 年至 1981 年, 美国采矿研究所丹佛研究中心与科罗拉多州斯诺马斯煤炭公司合作, 在美国倾斜到急倾斜煤层中, 采用刨煤机开采了倾角 $25^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 的煤层。在 1986 年至 1993 年期间, 乌克兰设计进行了大倾角煤层综合机械化开采试验。1992 年, 德国在鲁尔矿区开采了倾角为 $18^{\circ}\sim 38^{\circ}$ 、局部倾角达到 45° 的煤层。此外, 法国在洛林矿区采用综采设备成功开采了倾角 35° 以上煤层, 英国成功开采了倾角 $35^{\circ}\sim 43^{\circ}$ 的煤层, 印度在其东北部煤田研发了适用于大倾角煤层开采的采煤方法, 西班牙对倾角大于 40° 的煤层进行了机械化开采研究与试验。

我国对大倾角煤层开采方法的研究始于倾斜与急倾斜煤层开采技术的延伸。20 世纪 50 年代初期, 发明了大倾角煤层倒台阶采煤方法。60 年代, 在淮南、开滦等矿区出现了大倾角煤层伪斜柔性掩护支架采煤方法。80 年代, 在四川形成了伪斜短壁采煤法、伪俯斜走向长壁分段密集支柱采煤法、伪斜小巷多短壁采煤法等系列方法, 有效改善了四川各大矿区大倾角煤层开采效率, 取得了显著的经济社会效益。与此同时, 甘肃华亭矿区、窑街矿区、江苏徐州矿区、新疆建设兵团、河南义马矿区等也进行了大倾角煤层“高档普采”“双大开采”以及非机械化放顶煤开采方法的研究与试验。80 年代后期, 在我国沈阳红菱煤矿、新疆艾维尔沟煤矿、开滦唐山煤矿、鹤岗竣德煤矿等开始采用大倾角综采技术, 自主研制了大倾角设备, 此外, 在四川南桐、攀枝花等矿区引进国外综采设备和技术, 但均未取得较好的效果。

1996~1998 年, 在四川绿水洞煤矿 5654 工作面进行了大倾角煤层综合机械化开采, 研制了成套综采设备, 解决了设备防倒防滑、工作面“飞矸”等技术难题, 成功开采厚度 2.27m、平均倾角 38° 的煤层。工作面采出率达到 97.2%, 实现工作面月产量 2.19 万吨, 实现了大倾角煤层安全高效开采, 技术水平达到国际先进。

2000 年以后, 在绿水洞煤矿大倾角中厚煤层综采成功示范的带动下, 四川、重庆、贵州、甘肃、新疆、河北、黑龙江、北京、山东、安徽、内蒙古、宁夏等省市(区)的许多矿区先后进行了不同条件下大倾角煤层长壁综采(黑龙江双矿集团、北京昊华集团、新疆焦煤集团、四川广旺集团、达竹集团、内蒙古伊泰集团、神华宁煤集团、山东新汶集团等)和长壁综采放顶煤(甘肃靖煤集团、华煤集团、新疆建设兵团、河北开滦集团、新疆焦煤集团等)以及大采高技术(新疆焦煤集团、四川攀煤集团、安徽淮南集团等)创新与

试验,不同程度地解决了矿井大倾角煤层开采难题,取得了明显的经济效益^[1,2]。

1.2 大倾角煤层开采围岩控制理论与技术

大倾角煤层开采围岩控制最初研究借鉴了近水平及缓倾斜煤层部分成果,并在此基础上进行了创新。世界主要采煤国家俄罗斯、捷克、美国、印度等在该类煤层岩层控制方面做了一些研究。俄罗斯 Kulakov 系统研究了大倾角煤层工作面围岩应力和支承压力分布特征;捷克 Bodi 探讨了无人工作面安全开采技术应用在大倾角坚硬煤层开采的可行性;印度 Singh、Gehi 等通过实验分析了印度东北部煤田中大倾角厚煤层开采围岩应力分布特征。进入 21 世纪,西方主要产煤国家受市场经济控制,不再开采该类煤层,法国、英国、德国等国家几乎关闭了所有煤矿,检索表明,国外对大倾角煤层开采岩层控制理论与技术的研究进展缓慢,相关文献资料极少^[3~6]。

我国大倾角煤层赋存量大面广,是目前国际上开采该类煤层最多的国家,对大倾角煤层围岩控制理论与技术的研究处于世界领先水平,重点集中于长壁开采工作面矿山压力显现规律和顶板结构与灾害防控等领域。

在 20 世纪 80 年代,原成都煤炭干部管理学院平寿康教授及其团队首先开始大倾角煤层开采岩层控制理论与技术研究,揭示了大倾角薄及中厚煤层开采工作面矿压显现规律、大倾角煤层伪斜开采工作面顶板结构力学行为及破坏特征,其团队成员黄建功、楼建国等(四川师范大学)在后续研究中提出并建立了基本顶岩层“倾斜砌体结构板”大结构、直接顶中下段“砌体梁”小结构力学模型,分析了煤层倾角、矸石充填等因素作用下支架与围岩相互作用关系与岩体结构失稳形式以及软岩底板破坏滑移机理^[7~10]。

1986 年,西安矿业学院(现西安科技大学)吴绍倩、石平五教授及其团队通过对急斜煤层工作面矿压显现特征研究,提出了急斜煤层倾斜薄板破断和空间岩块平衡假说与弹性基础墙假说,证明了急斜煤层开采顶板断裂沿倾斜形成三铰拱结构的观点^[6]。1996 年 3 月,在昆明召开的“全国煤矿顶板事故分析与防治大会”会议上,西安矿业学院“复杂煤层开采理论与技术”研究团队首次明确了“大倾角煤层”的概念并给出了工程解释,并以此为基础,致力于大倾角煤层开采理论与技术研究,发现并揭示了长壁开采工作面覆岩“关键层”区域迁移和岩体结构变异机制,先后建立了“顶板(R)—支架与装备(S)—底板(F)”系统动力学模型、非对称约束条件下大倾角煤层走向长壁开采“关键层”岩体结构空间模型,揭示了长壁开采工作面矿压显现规律、围岩应力分布、覆岩变形破坏和运动的分区特征、“支架—围岩”相互作用关系以及底板破坏特征与力学过程和破坏滑移机理,提出了“R-S-F”系统失稳基本类型和覆岩空间承载结构失稳准则,确定了支架不同失稳状态下的工作阻力及系统动态稳定控制模式与方法,发展了岩层控制“关键层”理论^[11~16]。

与此同时,一大批矿业高等院校、科研院所和煤炭企业的学者和工程技术人员分别从不同的侧面对大倾角煤层长壁开采岩层控制理论与技术进行了大量的研究与实践。

煤炭科学研究总院王作宇,中国矿业大学何富连、张东升、孟宪锐、赵洪亮等通过在重庆南桐、河北开滦、山西潞安、山东兖州、新疆神新等矿区进行的工程实践与科学研究,分别揭示了大倾角煤层长壁开采围岩破坏与移动特征,大倾角松软煤层综放开采

矿压特征和岩体结构形态,深部大倾角综放工作面应力非均匀分布特征和来压步距中部大、两端小的分区特征,大倾角仰(俯)采顶板初次破断和周期破断机理,大倾角硬厚煤层综放采场围岩结构特征。同时,对大倾角煤层综采、综放开采、大采高开采工作面支架稳定性进行分析,建立了大采高支架滑倒失稳模型、综放支架滑倒失稳模型,揭示了大倾角煤层长壁开采工作面支架稳定性影响因素,提出了煤层综放工作面综放开采围岩控制技术^[17~20]。

北京科技大学王金安^[21,22]通过建立大倾角综放工作面基本顶薄板力学模型,分析了基本顶断裂线发育轨迹与破坏区演化规律,揭示了基本顶初次破断“V-Y”型断裂模式、周期破断的“四边形”型破断模式,得出基本顶初次断裂的“中上部—中下部—上部—下部”空间时序和周期断裂的“中下部—中上部—上部—下部”的空间顺序,验证了基本顶断裂过程中采场围岩应力场分布及采场矿压显现的时序性和非对称特征。

安徽理工大学赵元放、孟祥瑞、杨科等以安徽淮南矿区大倾角煤层开采工程实践为基础,分别研究了大倾角煤层开采顶底板应力沿工作面倾斜分布特征、工作面支护系统与围岩之间的相互作用关系,建立了顶板岩层沿倾斜形成“砌体板”结构模型,揭示了大倾角煤层开采周期来压沿倾斜方向的分段特征、顶板垮落及支架受力特征、不同倾角煤层煤壁支承压力分布特征以及支护系统工作载荷与倾角的关系,给出了工作面周期来压步距和采动影响范围,提出了采场围岩灾害防治技术^[23~25]。

重庆大学、东北大学、煤炭科学研究总院、山东科技大学、黑龙江科技学院、河北工程大学、内蒙古科技大学、河北建筑科技学院的尹光志、陶连金、孙广义、杨怀敏等学者分别对不同开采条件下的大倾角煤层长壁开采工作面矿山压力显现规律、围岩应力分布以及覆岩破坏运动特征、底板破坏滑移影响因素进行了研究,揭示了大倾角煤层采场围岩运动破坏向工作面上部区域发展的非对称特性和沿工作面倾向的分区破坏机理、大倾角大采高工作面周期来压沿工作面倾斜方向的分段特征以及分层开采复合顶板推垮型冒顶机理,提出了采用能量指标判别周期来压和地表沉陷的渐进灰色预测方法、推垮型冒顶围岩控制技术以及工作面支架工作阻力确定方法和稳定性控制技术^[26~29]。

四川广能集团、甘肃靖远煤业集团、甘肃华亭煤业集团、新疆焦煤集团的周邦远、谢俊文、纪玉龙、黄国春等工程技术人员分别对大倾角煤层开采工作面布置方式及工艺、采场围岩运动特征、采场灾害防治技术进行了大量的研究,揭示了大倾角煤层长壁综采围岩非均衡破坏作用下岩层移动分区特征和岩层分区破坏以及工作面灾害形成机制、长壁综放覆岩破断与运动规律、煤层群开采层间相互作用与影响机制,提出了减少和防治工作面灾害、提高产效的岩层控制技术与措施,并通过工作面布置方式和工艺参数优化及先进装备应用而付诸工程实践^[30~32]。

参 考 文 献

- [1] 国家能源局. 煤炭工业发展“十二五”规划[R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2012.
- [2] 伍永平, 刘孔智, 负东风, 等. 大倾角煤层长壁综采现状与发展趋势[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1611-1618.
- [3] Kulakov V N. Stress state in the face region of a steep coal bed[J]. Journal of Mining Science(English Translation), 1995(9): 161-168.

- [4] Bodi J. Safety and technological aspects of man less exploitation technology for steep coal seams[C]. 27th international conference of safety in mines research institutes, 1997: 955-965.
- [5] Singh T N, Gehl L D. State behavior during mining of steeply dipping thick seams—A case study[C]. Proceedings of the International Symposium on Thick Seam Mining, India, 1993: 311-315.
- [6] Syd S. Peng. Longwall Mining[M]. Department of Mining Engineering West Virginia University, 2006.
- [7] 华道友, 平寿康. 大倾角煤层矿压显现立体相似模拟[J]. 矿山压力与顶板管理, 1999, (3-4): 97-100.
- [8] 李维光, 黄建功, 华道友, 等. 大倾角薄及中厚煤层俯伪斜走向长壁采煤法矿压显现(上)[J]. 煤矿开采, 1999, 35(2): 29-31.
- [9] 黄建功, 平寿康. 大倾角煤层采面顶板岩层运动研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 2002, (2): 19-21.
- [10] 黄建功. 大倾角煤层采场顶板运动结构分析[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(5): 411-414.
- [11] 吴绍倩, 石平五. 急倾斜煤层矿压显现规律的研究[J]. 西安矿业学院学报, 1990, (2): 4-8.
- [12] 伍永平, 负东风, 张森丰, 等. 大倾角煤层综采基本问题研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(5): 465-468.
- [13] 伍永平. 大倾角煤层开采“R-S-F”系统动力学控制基础研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2003.
- [14] 伍永平, 负东风, 周邦远, 等. 绿水洞煤矿大倾角煤层综采技术研究与应[J]. 煤炭科学技术, 2001, (4): 30-33.
- [15] 伍永平, 解盘石, 杨永刚, 等. 大倾角煤层群开采岩移规律数值模拟及复杂性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(4): 391-395.
- [16] Wu Y, Xie P, Wang H. Theory and practices of fully mechanized longwall mining in steeply dipping coal seam[J]. Mining engineering, 2013, 65(1): 35-41.
- [17] 王作宇, 刘鸿泉, 葛亮涛. 采场底板岩体移动[J]. 煤炭学报, 1989, 14(3): 62-70.
- [18] 何富连, 杨伯达, 田春阳, 等. 大倾角综放面支架稳定性及其控制技术研究[J]. 中国矿业, 2012, 21(6): 97-100.
- [19] 赵洪亮, 袁永, 张琳. 大倾角松软煤层综放面矿压规律及控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 345-348.
- [20] 孟宪锐, 闫荣锋, 刘节影, 等. 千米深井大倾角煤层综放采场矿压显现实测研究[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(11): 14-17.
- [21] 王金安, 张基伟, 高小明, 等. 大倾角厚煤层长壁综放开采基本顶破断模式及演化过程(I)-初次破断[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1353-1360.
- [22] 王金安, 张基伟, 高小明, 等. 大倾角厚煤层长壁综放开采基本顶破断模式及演化过程(II)-周期破断[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1737-1745.
- [23] 赵元放, 张向阳, 涂敏. 大倾角煤层开采顶板垮落特征及矿压显现规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(2): 231-234.
- [24] 孟祥瑞, 赵启峰, 刘庆林. 大倾角煤层综采面围岩控制机理及回采技术[J]. 煤炭开采技术, 2007, 35(8): 25-28.
- [25] 杨科, 孔祥勇, 陆伟, 等. 近距离采空区下大倾角厚煤层开采矿压显现规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 4278-4285.
- [26] 尹光志, 鲜学福, 代高飞, 等. 大倾角煤层开采岩移基本规律的研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 450-453.
- [27] 陶连金, 王泳嘉. 大倾角煤层采场上覆岩层的运动与破坏[J]. 煤炭学报, 1996, 21(6): 582-585.
- [28] 孙广义, 陈刚, 王兴华. 长沟峪煤矿大倾角中厚煤层变薄带的顶板压力[J]. 黑龙江科技学院学报, 2011, 21(1): 40-42.
- [29] 杨怀敏, 崔景昆, 刘惠德. 大倾角采煤工作面矿山压力显现规律的研究[J]. 河北建筑科技学院学报, 2003, 20(1): 69-71.
- [30] 谢俊文, 高小明, 上官科峰. 急倾斜厚煤层走向长壁综放开采技术[J]. 煤炭学报, 2005, 30(5): 546-549.
- [31] 纪玉龙, 何凤强, 王东攀. 近距离大倾角综放工作面矿压规律及成因探讨[J]. 煤炭工程, 2012, (8): 79-84.
- [32] 黄国春, 陈建杰. 坚硬顶板、软煤、软底大倾角煤层综采实践[J]. 煤炭科学技术, 2005, (8): 33-35.

第2章 大倾角煤层走向长壁工作面矿压显现和围岩破断与运动规律

2.1 大倾角煤层走向长壁开采矿压显现规律

2.1.1 大倾角煤层走向长壁单体支柱工作面矿压显现现场观测

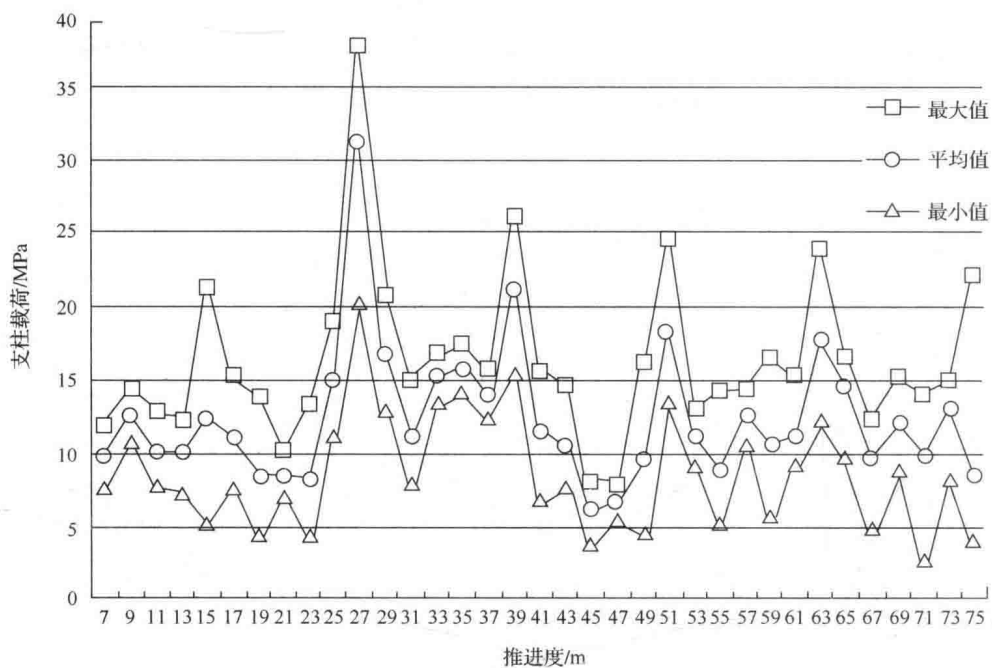
在开采大倾角煤层的矿区(矿井),几乎都进行过不同规模的大倾角煤层单体支柱工作面矿山压力观测工作,如在四川芙蓉矿务局、广旺矿务局进行的“大倾角俯伪斜走向与掩护密集支柱采煤法矿压显现研究”“大倾角大采高俯伪斜采面矿压显现实测研究”“大倾角薄及中厚煤层俯伪斜走向长壁采煤法矿压显现研究”,在甘肃华亭矿务局、河北开滦矿务局、四川达竹矿务局、新疆乌鲁木齐矿务局等进行的“急斜煤层矿压显现规律研究”等。表 2-1 和图 2-1 给出的是在甘肃华亭矿务局东峡煤矿 32208-7 工作面(煤层倾角 $36^{\circ}\sim 39^{\circ}$,厚度 2.01~2.10m,采用走向长壁倾斜分层下行垮落法开采)的矿山压力显现观测的主要结果。

表 2-1 32208-7 工作面矿山压力显现基本参数

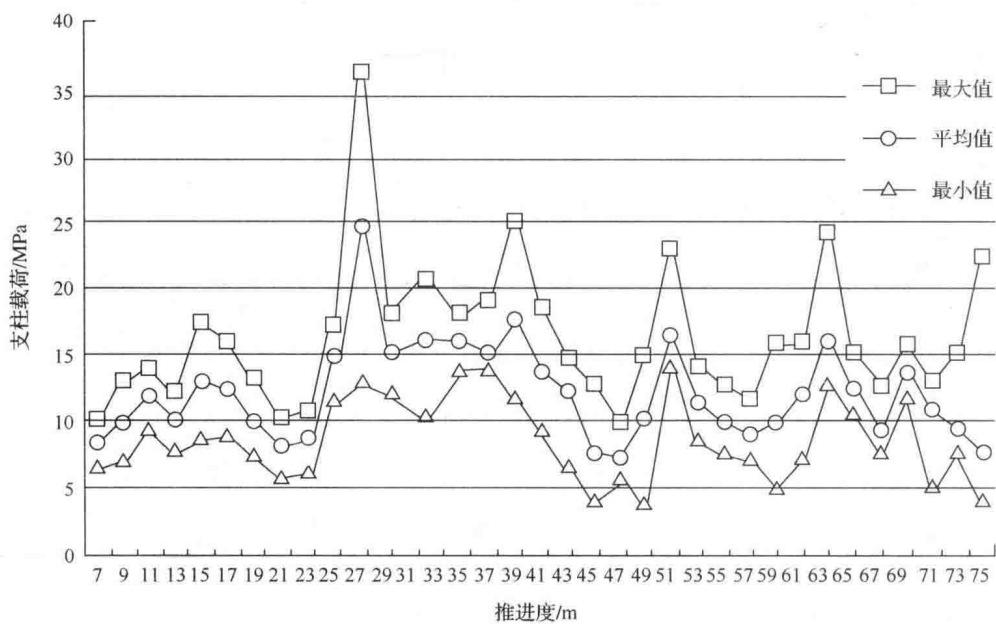
序号	来压特征		工作阻力/MPa			活柱下缩量/mm			步距/m	循环数
	次序	性质	上部	中部	下部	上部	中部	下部		
1	基本顶初次来压	来压期间	38.00	36.30	34.50	54.20	61.80	44.00	21.00	5
		正常推进	16.29	16.35	16.12	23.89	36.93	24.10		
		增载系数	2.33	2.22	2.14	2.27	1.67	1.83		
2	第一次周期来压	来压期间	31.00	25.00	23.00	45.00	50.20	39.40	10.00	4
		正常推进	16.29	16.35	16.12	23.89	36.93	24.10		
		增载系数	1.90	1.53	1.43	1.88	1.36	1.63		
3	第二次周期来压	来压期间	24.60	23.20	24.90	45.50	48.40	37.90	12.05 下部滞后 2.0	6
		正常推进	16.29	16.35	16.12	23.89	36.93	24.10		
		增载系数	1.51	1.42	1.54	1.90	1.31	1.57		
4	第三次周期来压	来压期间	23.80	24.50	24.00	51.00	48.40	37.30	12.00 下部滞后 2.0	5
		正常推进	16.29	16.35	16.12	23.89	36.93	24.10		
		增载系数	1.46	1.50	1.49	2.13	1.31	1.55		

2.1.2 大倾角煤层走向长壁综采工作面矿压显现现场观测

大倾角煤层的机械化(综合机械化)开采在我国历经磨难,虽然许多矿区和矿井都进行过研究与试验,但在 1996 年之前,几乎没有一个矿井能够利用综采设备(不论是国产



(a) 上部区域



(b) 中部区域

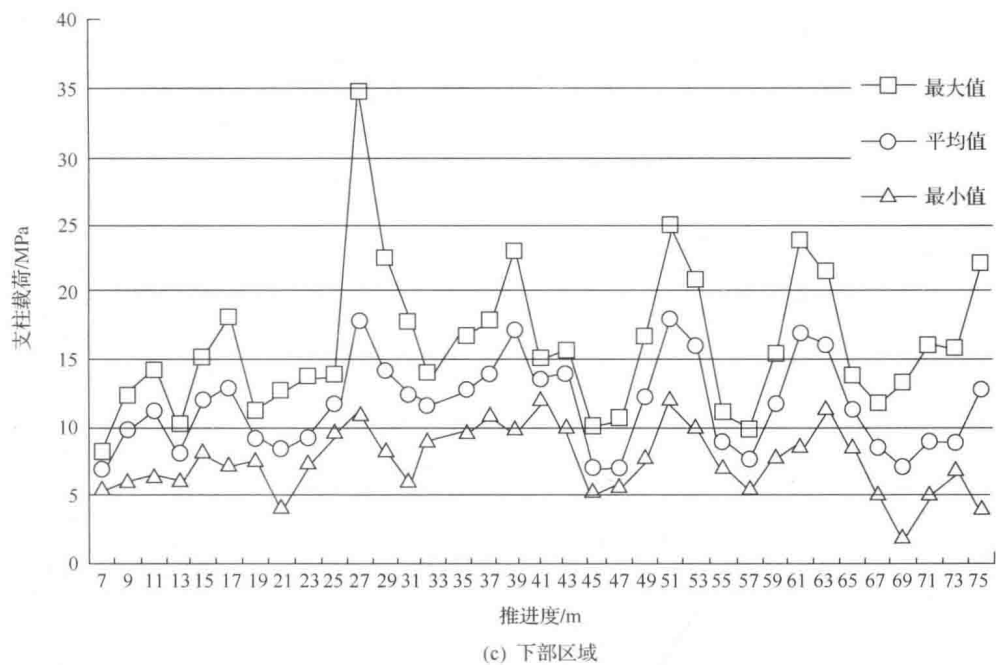


图 2-1 32208-7 工作面支柱载荷与推进度关系曲线

设备，还是引进装备)成功地开采一个完整的长壁工作面。因而，几乎没有对大倾角煤层综采工作面矿压显现规律进行观测和研究的文献资料。1996~1999 年，我们在四川华蓥山矿务局绿水洞煤矿研究大倾角煤层综采技术的过程中，对工作面的矿山压力显现进行了较系统地观测，表 2-2 和图 2-2 给出了在该矿 6134 综采工作面(煤层厚度 2.60~2.85m，倾角 25°~36°)矿压显现观测的主要数据与曲线^[1]。

表 2-2 6134 工作面矿山压力显现基本参数

序号	来压特征		最大工作阻力/(kN/架)			来压步距/m	持续时间 (循环)/天
	次序	性质	No.7	No.23	No.43		
1	基本顶 初次来压	来压时	1805	1875	1955	31.4	8
		来压前	1312	1345	1368		
		时/前	1.38	1.39	1.43		
2	第一次周期来压	来压时	1791	1765	1830	8.65	4
		来压前	1400	1401	1476		
		时/前	1.28	1.26	1.24		
3	第二次周期来压	来压时	1735	1880	1830	11.05	5
		来压前	1422	1507	1607		
		时/前	1.22	1.25	1.14		
4	第三次周期来压	来压时	1675	1817	1925	11.0	10
		来压前	1484	1376	1470		
		时/前	1.18	1.32	1.31		
5	第四次周期来压	来压时	1715	1720	1701	9.06	4
		来压前	1421	1422	1430		
		时/前	1.20	1.21	1.19		

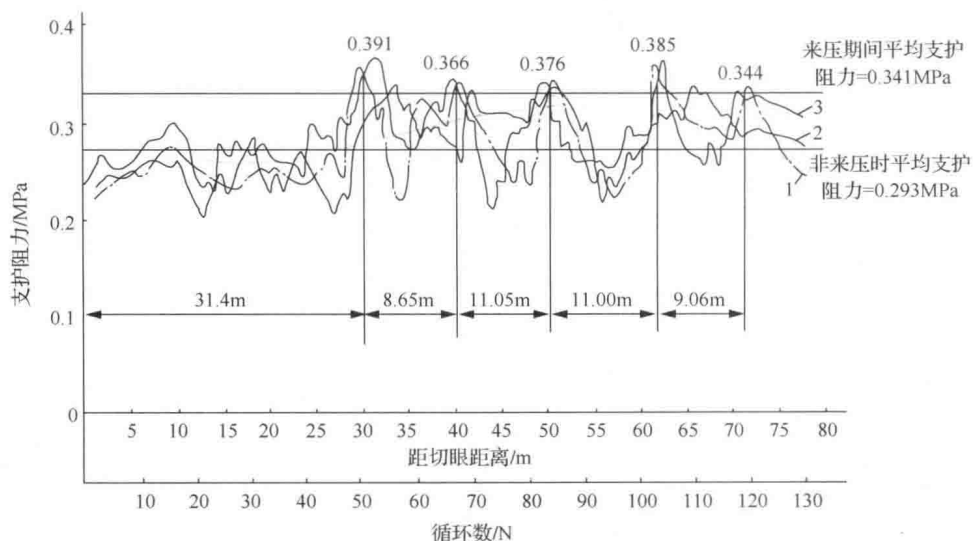


图 2-2 6134 工作面支架平均支护阻力随工作面推进的变化特征

1—测站 I (No.7); 2—测站 II (No.23); 3—测站 III (No.43)

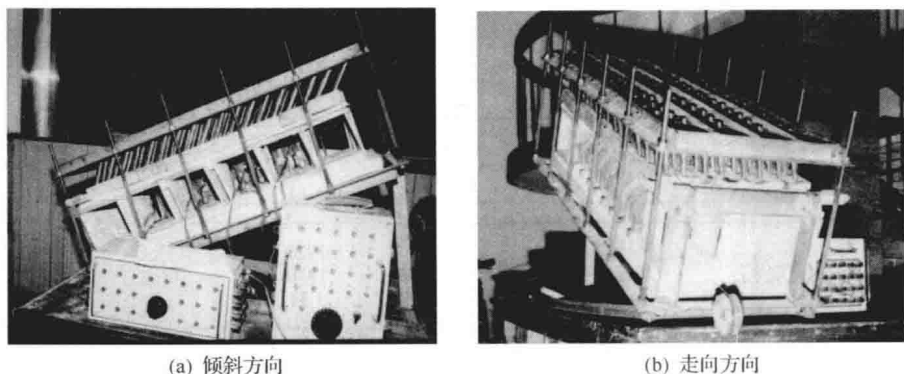
2.1.3 大倾角煤层走向长壁开采矿压显现实验室模拟

为了进一步分析大倾角煤层走向长壁开采工作面矿山压力显现、顶板破断活动、底板破坏滑移以及支架和设备运动的复杂性,专门设计和研制了目前国内唯一的大倾角煤层开采三维可加载块体模型^[2]和大比例模型液压支架,铺装大倾角煤层开采的平面倾向和走向平面模型,在陕西省岩层控制重点实验室所属的相似材料模型实验室中进行了较系统的实验研究^[3]。

1. 实验模型

1) 三维可加载块体模型

三维可加载块体模型由顶板加载框架、可变角底板框架、底座三个主要部分组成,其中顶板加载框架由载荷块(木质长方块)、加载杆(金属丝杠)、载荷簧管(不锈钢管中放置弹簧)等部件组成,共有零部件近千个(块)(图 2-3)。实验过程中载荷块可竖向转动,



(a) 倾斜方向

(b) 走向方向

图 2-3 三维可加载与变角块体相似模拟实验系统

且可沿煤(岩)层层面滑动,能够满足大倾角煤层开采时顶板破断、滑移的要求。同时,在加载块的下面放置一薄石膏板(强度根据煤层直接顶的平均强度确定)以模拟直接顶。实验开始前将支架沿工作面倾斜方向安装(支架编号自下而上分别为1~8号),用配重钢丝连接支架底座,模拟刮板输送机在开采过程中对支架的影响。用轻质木框模拟开采煤层(厚度可变化),每拆卸一排框架相当于采煤机割一刀煤。实验过程中使用8架模型支架,上下回采巷道及开采煤层用特制木框代替,基本顶为木块加弹簧,直接顶为石膏板。上覆岩层载荷利用可调节螺杆通过弹簧作用于顶板之上。

2) 平面应力模型

平面模型实验在 $2.15\text{m} \times 0.2\text{m} \times 2.0\text{m}$ 和 $5.0\text{m} \times 0.2\text{m} \times 1.2\text{m}$ 可回转模型架上进行,模拟比例为1:20。根据现场工作面(四川华蓥山矿务局绿水洞煤矿6134工作面)实际地质与生产条件,5m走向平面应力模型铺装高度为1.2m,相当于模拟现场的实际高度24m(大于煤层厚度、直接顶厚度和基本顶厚度之和),其他覆岩厚度(平均约296m)按相似准则用配重代替。模型长度5m,相当于工作面原型长度100m,在实验时分为三段开采,分别为正常开采段(2.5m)、断层段(1.0m)、分岔段(1.5m),分岔段和正常开采段包含边界条件。 $2.15\text{m} \times 0.2\text{m} \times 0.2\text{m}$ 倾向平面模型铺装高度1.6m,相当于模拟现场实际高度32m,其余高度与走向模型同样用配重代替。倾向模型长度为2.15m,倾角 39° (图2-4)。

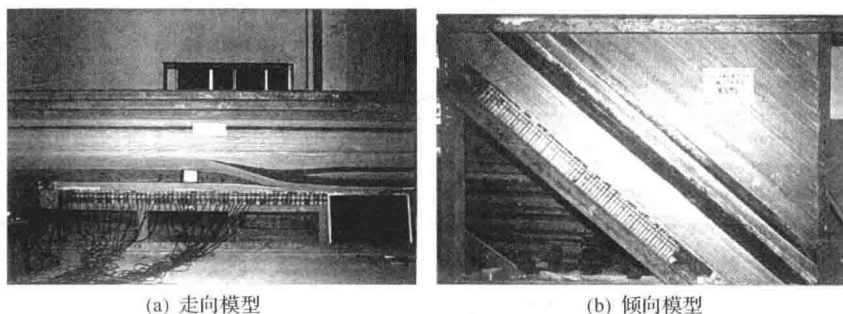


图2-4 平面应力模型

平面应力模型铺设称重式传感器,以观测沿工作面推进方向的支承压力分布规律,此外,倾向模型上工作面中部还设置了顶板下沉、破断与底板破坏、滑移观测区域。

5m走向平面模型宽度20cm,实验中用两架模型支架,支架支护阻力按每米支护强度计算,模型开采速度为 2.2cm/h (相当于现场日推进度2.4m)。 $2\text{m} \times 2\text{m}$ 倾向模型实验中先使工作面上下回采巷道成型,然后自下而上逐段开挖煤层并安装10架模型支架,模拟原型工作面长度16m,运输巷道中安装端头支架,工作面排头支架依托下端头支架架设。实验过程中将回风巷道以上的煤层采出,使顶板充分垮落,以弥补工作面长度的不足。

实验过程中对工作面围岩的变形与破坏及运移特征进行观测,同时测量工作面支承压力,支架的支护阻力和顶梁、掩护梁以及底座的侧推(护)力。

模型实验选用的模拟材料为河砂、粉煤灰、石膏和碳酸钙等,材料配比与铺装顺序见表2-3。