

TEHOU MEICENG DACAIGAO ZONGFANG KAICAI
DINGMEI HUODONG GUILV JI
GONGYI CANSHU YOUHUA YANJIU

特厚煤层大采高综放开采 顶煤活动规律及 工艺参数优化研究

王 开 著

特厚煤层大采高综放开采顶煤活动 规律及工艺参数优化研究

王 开 著

煤 炭 工 业 出 版 社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

特厚煤层大采高综放开采顶煤活动规律及工艺参数优化
研究/王开著. --北京:煤炭工业出版社, 2014

ISBN 978-7-5020-4394-0

I. ①特… II. ①王… III. ①特厚煤层—大采高—放顶
煤开采—研究 IV. ①TD823.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 302497 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
北京市郑庄宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*
开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 8¹/₂
字数 190 千字

2014 年 2 月第 1 版 2014 年 2 月第 1 次印刷
社内编号 7226 定价 28.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 提 要

本书针对我国煤层赋存厚度为 14 ~ 20 m 及以上的特厚煤层开采实践中存在的问题,以高产、高效、高回收率为目标,对特厚煤层大采高综放工作面的顶煤活动规律和工艺参数优化进行了深入研究。本书主要内容有:大采高综放工作面顶煤变形力学分析及活动规律试验研究;大采高综放工作面合理工作面长度优化研究;大采高综放工作面合理采放比研究;大采高综放工作面煤矸流场特征及放煤参数优化研究;大采高综放工作面工艺参数优化研究。

本书可作为采矿工程、岩土工程等专业的本科生和研究生的参考书,也可供有关科研工作者、工程技术人员及高校教师阅读参考。

前 言

目前,大采高综采开采3.5~6.0 m和综放全厚一次开采5~14 m的厚及特厚煤层已获成功,其开采工艺、配套装备和安全措施等已趋于合理与完善。但我国有些矿区赋存有厚度为14~20 m及以上的特厚煤层,如山西、陕西、内蒙古、宁夏、甘肃、新疆等地,在这种特厚煤层条件下如果采用普通综放开采,势必需要分层开采,然而分层开采不仅成本高、产量低,留煤皮假顶煤炭损失量大,而且下分层巷道维护困难,上分层采空区的残留煤、积水和积聚瓦斯等也对下分层开采造成严重威胁。大采高综放开采是开采此类特厚煤层的首选方法,其具有高产、高效、放煤空间大、工作面过风断面大、资源回收率高、经济效益好等优点。

2009年,康天合教授及笔者承担了西山煤电集团晋兴公司斜沟煤矿特厚煤层大采高综放开采技术研究课题。在课题研究过程中,针对斜沟煤矿13号煤的煤层赋存条件进行了不同采高不同放煤步距的相似模拟试验,通过理论分析和数值模拟对工作面合理采放比、工作面合理长度、合理放煤方式进行了研究,同时对斜沟煤矿23103大采高工作面进行了现场实测研究。通过对课题研究,我们深刻地认识到,大采高综放作为特厚煤层开采是非常有发展前途的开采技术,但要想实现高产、高效、高回收率,合理选取回采工艺参数是关键。

鉴于此,笔者在康天合教授的指导下开始从事特厚煤层大采高综放工作面工艺参数优化研究,即笔者的博士论文研究工作。在研究工程中,我们获得了第一手工艺参数实测资料,在此基础上,深入、系统地研究了特厚煤层大采高综放开采工艺参数的相关课题。

本书的完成首先归功于导师康天合教授的悉心指导。在课题研究过程中,梁卫国教授、弓培林教授、宋选民教授从学科发展的高度给笔者提出很多有益的建议,并始终给予极大的帮助与支持。在课题现场工作中,笔者得到斜沟煤矿矿长于建军、总工常卫、队长康志华、书记张占春的帮助和支持。课题试验部分得到胡耀青教授、杨永康博士、柴肇云博士、靳京学高工、康军高工的帮助。课题的数值模拟部分得到张小强博士、张百胜博士、段东博士的帮助。在此,向他们表示衷心的感谢!

应当说明,特厚煤层大采高综放开采技术仅仅是一个开始,大量细致的

研究工作还有待于开展及完善。愿本书的出版能起到抛砖引玉的作用，让大采高综放开采技术的研究引起同行的高度重视，共同为我国的特厚煤层大采高综放开采技术作出贡献。

由于笔者的能力和水平有限，偏颇与疏漏在所难免，恳请专家、学者和同行批评、指正。

著 者

2014 年 1 月

目 次

第一章 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 特厚煤层分层开采技术的发展及存在问题	1
1.3 特厚煤层大采高综采技术的发展及存在问题	2
1.3.1 大采高综采技术的发展	2
1.3.2 大采高综采技术的优越性	3
1.3.3 大采高综采技术存在的问题	3
1.3.4 大采高综采技术研究现状	4
1.4 特厚煤层放顶煤开采技术的发展及存在问题	5
1.4.1 放顶煤技术的发展	5
1.4.2 放顶煤技术的优越性	6
1.4.3 放顶煤技术存在的问题	6
1.4.4 放顶煤技术研究现状	7
1.5 特厚煤层大采高综放开采技术的发展及存在问题	11
1.5.1 大采高综放的提出	11
1.5.2 大采高综放开采工业性试验	11
1.5.3 大采高综放开采技术的优越性	12
1.5.4 特厚煤层大采高综放开采技术存在的问题	13
1.5.5 特厚煤层大采高综放开采技术研究现状	13
1.6 本文的主要研究内容、研究方法及技术路线	14
第二章 大采高综放工作面顶煤变形力学分析及活动规律试验研究	16
2.1 顶煤变形力学分析	16
2.1.1 前方支承压力变化规律	16
2.1.2 顶煤破坏机理	17
2.1.3 顶煤变形破坏基本规律	22
2.2 PFC 模拟顶煤顶板运移过程试验研究	23
2.2.1 PFC 模拟综放开采的基本原理	23
2.2.2 模型建立	23
2.2.3 试验数据分析	24
2.3 顶煤活动规律相似模拟研究	28
2.3.1 试验装置与试验模型设计	28

2.3.2 试验结果及分析	28
2.4 本章小结	31
第三章 大采高综放工作面合理工作面长度优化研究	32
3.1 工作面长度优化方案设计	32
3.2 计算模型	33
3.3 模拟过程及采空区模拟	34
3.4 顶煤破坏性的评价方法与评价指标	35
3.5 模拟结果分析	36
3.5.1 煤壁前支承压力分布随工作面长度与推进距离的变化	36
3.5.2 工作面长度方向上支承压力分布规律	39
3.5.3 随工作面长度、推进距离和支架支撑力变化的顶煤破坏规律	40
3.5.4 支架支撑力与工作面长度的关系	46
3.6 本章小结	48
第四章 大采高综放工作面合理采放比研究	50
4.1 引言	50
4.2 特厚煤层大采高综放工作面煤壁片帮机理分析	50
4.2.1 煤岩损伤统计演化模型的建立	50
4.2.2 煤体破碎机理	52
4.3 特厚煤层合理采放比的确定	54
4.3.1 数值计算模拟方法的确定	54
4.3.2 数值计算模型的建立	55
4.3.3 不同方案情况下顶煤及煤壁屈服破坏分布规律	57
4.3.4 大采高综放开采条件适应性分析	67
4.4 应用举例	70
4.4.1 工作面概况	70
4.4.2 煤壁片帮分析	72
4.4.3 合理采放比的确定	72
4.5 本章小结	72
第五章 大采高综放工作面煤矸流场特征及放煤参数优化研究	74
5.1 引言	74
5.2 合理放煤步距物理模拟研究	74
5.2.1 模型设计	75
5.2.2 试验装置	75
5.2.3 试验材料	75
5.2.4 试验方法	76
5.2.5 试验结果及其分析	76

5.3 合理放煤步距 PFC 数值计算	86
5.3.1 模型及参数的确定	86
5.3.2 模拟过程及其分析	86
5.4 合理放煤方式 PFC 数值计算	89
5.5 本章小结	92
第六章 大采高综放工作面工艺参数优化研究	94
6.1 引言	94
6.2 工艺参数优化原则与工序分析	94
6.2.1 优化原则	94
6.2.2 主要工序分析	95
6.3 参数设计优化	98
6.3.1 合理割煤速度的确定	98
6.3.2 产量分析	99
6.4 大采高综放工作面工艺参数实测研究	99
6.4.1 实测目的及内容	99
6.4.2 实测工作面开采技术条件	100
6.4.3 实测方法	101
6.4.4 实测结果	102
6.4.5 千万吨级工作面工艺参数优化	109
6.5 本章小结	114
第七章 结论与展望	116
7.1 主要工作	116
7.2 主要结论	116
7.3 不足与展望	119
参考文献	120

第一章 绪 论

1.1 问题的提出

中国是能源开采大国,也是能源消费大国,能源消费量占世界总消费量的 10% 以上。煤炭在我国一次能源开采和消费结构中分别占 76.3% 和 68.9% (其中,井工开采的煤炭产量约占煤炭总产量的 95%),并且这一状况在今后相当长时间内不会改变,因此煤炭开采在我国能源战略中将长期处于主导地位。

世界煤炭储量的 1/3 以上为厚煤层。在我国已探明的煤炭储量中,厚煤层占 45% 以上,产量也相应为我国原煤总产量的 50% 左右,因此厚煤层开采技术几乎决定着整个煤炭行业,甚至决定着国民经济发展水平。按照厚煤层定义,井工开采时单层煤厚超过 3.5 m 为厚煤层,单一煤厚超过 8 m 则为特厚煤层。目前,大采高综采开采 3.5 ~ 6.0 m 和综放全厚一次开采 5 ~ 14 m 的厚及特厚煤层是成功的,其开采工艺、配套装备和安全措施等已趋于合理与完善。我国有很多矿区赋存有厚度为 14 ~ 20 m 及以上的特厚煤层,如山西、陕西、内蒙古、宁夏、甘肃、新疆等地,在这种煤层条件下,如果采用普通综放开采,至少需要两个分层。然而,分层开采不仅成本高、产量低,留煤皮假顶煤炭损失量大,而且下分层巷道难维护,上分层采空区的遗留煤、积水和瓦斯等也对下分层开采造成严重威胁。大采高综放开采是开采此类煤层的首选方法,具有高产高效、放煤空间大、工作面过风断面大、资源回收率高、经济效益好等优点。然而,近年来我国的大采高综放工作面实践表明,大采高综放工作面除易发生煤壁片帮、端面冒顶及支架稳定性事故等围岩控制方面的问题外,顶煤回收率、含矸率及不同条件下合理的放煤工艺等问题尚无系统的理论研究成果,不能有效指导大采高综放工艺的现场实践。

特厚煤层的开采方法主要有分层开采、大采高开采和放顶煤开采、大采高综放开采。

1.2 特厚煤层分层开采技术的发展及存在问题

分层开采是传统的厚煤层采煤方法,即将厚煤层分成若干中厚分层,每个分层用半机械化或机械化方法采出。这种采煤方法工艺成熟,具有设备投资少、一次采高小、瓦斯治理技术相对成熟、覆岩及地表实现缓慢下沉等优点,但随着煤矿开采技术和装备水平的提高,其缺点也越来越明显。成倍增加巷道掘进率,成本高、产量低,下分层巷道位置的选择和维护都十分困难,搬家费用成倍增加,也增大了煤柱损失量;分层间人工顶板材料消耗大、工序复杂、劳动效率低;下分层回采时采空区积水和瓦斯不易处理;采空区反复扰动,由于矿压作用多次启封采空区容易引起煤炭自燃;如果采用下分层,放顶煤时容易引起混矸,煤与矸石界面难控制,影响回收率。20 世纪 80 年代后,随着开采技术的发展,传统的分层开采方法已经逐渐被淘汰。

1.3 特厚煤层大采高综采技术的发展及存在问题

1.3.1 大采高综采技术的发展

20 世纪 70 年代,国外开始研究、应用大采高综采技术及装备。1970 年,德国采用贝考瑞特垛式支架回采了热罗林矿 4 m 厚煤层;1970 年末,波兰研发设计了两柱掩护式大采高支架 P10 MA 系列,使用效果较好;1980 年,德国研发出最大高度为 6 m 的 G550 - 22/60 掩护式支架,在威斯特法伦矿进行现场工业性试验,取得成功后该支架曾出口到南斯拉夫,在现场取得良好效果;1983 年,美国开始采用大采高综采回采怀俄明州卡邦县 1 号矿 Hanana No. 80 厚煤层,采高达 4.5 ~ 4.7 m,取得单班生产日产量 3600 t,两班生产日产量 5000 t,三班生产日产量达 6200 t,工作面工效达 210 ~ 360 t/工,实现了高产高效;1993 年开始,捷克的 LAZY 矿不断改进 DBT 公司的大采高支架,将采高从 4 m 增加到 6 m,在较破碎顶板条件下,工作面最高单产达 8000 t/d,正常条件下单产达 7500 t/d。苏联、日本、澳大利亚、英国等也使用大采高开采技术。

20 世纪 70 年代末期,我国开始采用大采高开采技术。1978 年,开滦范各庄煤矿从德国引进 G320 - 20/37、G320 - 23/45 等型号的大采高液压支架及相应的采煤、运输设备,用于开采厚度为 3.3 ~ 4.5 m、倾角为 10°条件下的 7 号煤层,工作面最高月产达到 94997 t,月产平均达到 70819 t,是我国当时的最高水平。与此同时,我国开始自主研发大采高液压支架及采煤机等配套设施。1980 年,邢台东庞矿采用国产 BYA329 - 23/45 型两柱掩护式液压支架及配套大采高综采设备,在开采厚度为 4.3 ~ 4.8 m 的煤层中进行工业试验,试验期间最高月产达 12 万吨,平均月产 6.3 万吨;1984 年,西山矿务局官地矿使用我国自主研发的 BC520 - 2/47 型支掩式支架、MXA - 300/45 型无链牵引采煤机等在 18202 工作面进行工业性试验,在 II 级 3 类顶板及采高 4.0 m 条件下,该面 3 个月采煤 11.2 万吨;1986 年,东庞矿采用国产 BY3200 - 23/45 型两柱掩护式液压支架及配套大采高设备,在 2702 工作面成功进行工业性试验;1988 年,东庞矿在试验基础上进一步研发采高达 5 m 的 BY3600 - 25/50 型两柱掩护式支架,在 4.8 m 采高情况下,最高月产达 14.2 万吨,平均月产 10.4 万吨;20 世纪 80 年代至 90 年代初期,开滦、西山、铜川、兖州、徐州等矿区先后采用大采高开采方法,但采高均未超过 5 m。

随着矿井高产高效技术的深入,人们普遍认识到高产高效大采高工作面是矿井高产高效的基础,大采高工作面的优势越来越得到认可,大采高回采技术发展迎来新的阶段,工作面采高突破 5 m,部分工作面采高已经达到 6 m、7 m,日产量普遍超过万吨,个别工作面的产量达到千万吨、效率达到并超过国际水平,成为国际一流的大采高工作面(表 1 - 1)。1997 年,神华东胜矿区补连塔煤矿使用 ZY6000/25/50 型掩护式大采高液压支架,1999 年创月产 42 万吨,日产 3.04 万吨的全国纪录,后来又使用德国生产的 WS1.7 型两柱掩护式液压支架,2000 年 1 月产煤 51 万吨,2 月产煤 53.8 万吨;2002 年,晋城煤业集团开始研究适合晋城矿区的大采高开采技术,2003 年与郑州煤机厂合作研制的 ZY8600/25.5/55 型两柱掩护式大采高液压支架最高月产达 67 万吨,随后又研制使用了 ZY9400/28/62 型两柱掩护式大采高液压支架,工作面年产量达到 800 万吨水平,最高日产达到 2.7 万吨;2003 年,大同煤矿集团等研制使用了 ZY9900/29.5/50 型四柱支撑掩护式液压支架及相关设备,在四老沟矿平均煤厚 4.75 m 的“两硬”条件下,最高月产达 31.55 万 t;2003 年,

补连塔煤矿 32201 工作面单面年产原煤 9.24 Mt，工作面采高为 4.5 ~ 4.8 m；2004 年，神华上湾煤矿 55101 工作面单面年产原煤超过一千万吨，最大采高 6 m；2004 年，晋城寺河 2306 工作面使用的 ZY9400/28/62 型支架平均采高为 6.0 m，最大高度为 6.2 m；2005—2009 年，神东矿区大采高综采的采高经历了 5.0 ~ 7.0 m 的发展历程。为了提高厚度大于 6.0 m 煤层的资源回收率和开采效率，2009 年，目前世界上采高最大的综采工作面——补连塔煤矿 22303 工作面开展了采高 7.0 m 的综采工业性试验，取得了较好效果。

表 1-1 我国某些特厚煤层大采高工作面参数与设备配套统计

工 作 面	平均煤厚/m	采高/m	平均埋深/m	工作面长度/ m	支架额定工作 阻力/kN	平均月产量/ 万吨
寺河矿 2301 工作面	6.22	4.50	305.2	224	8638	44.6
寺河矿 2306 工作面	6.36	6.00	315.5	220.3	9400	46.3
赵庄矿 1301 工作面	4.60	4.60	539.6	220	12000	37.9
康家滩 88101 工作面	5.67	4.00	177.4	207	8638	38.5
长平矿 4303 工作面	5.86	5.86	245.3	225	12000	38.96
大柳塔 12205 工作面	3.57	3.50	88.2	230	7625	23.9
活鸡兔井 21303 工作面	6.00	3.20	79.0	240	7645	41.7
上湾矿 51101 工作面	7.40	5.30	82.0	240	8638	45.2
上湾矿 55101 工作面	7.10	6.00	115.5	300	10800	97.89
补连塔 22303 工作面	7.55	6.80	234.1	301	16800	103.4

1.3.2 大采高综采技术的优越性

实践表明，绝大多数大采高工作面均可实现高产高效，取得较好的技术经济效果。一般情况下，其主要经济技术指标优于分层综采工作面，在条件合适的情况下，也要优于综放工作面，因此大采高技术在我国发展比较迅速。在合适的煤层条件下，如倾角小、硬度大、厚度在 3.5 ~ 7.0 m 之间、顶底板较平整、地质构造简单、工作面生产能力要求较大的煤层，采用大采高开采具有独特的技术优势，主要表现在以下几个方面：

(1) 资源回收率高。从 3.5 ~ 6 m 厚煤层的开采实践看，大采高综采工作面的煤炭采出率均在 90% 以上，且采出煤炭质量好，含矸率低。

(2) 大断面、低负压，通风阻力小，更适合瓦斯较大、通风距离长的煤层开采。

(3) 粉尘主要来源由机组割煤产生，只要加强机组内外喷雾，并利用抽放钻孔实施煤层注水，就会取得好的降尘效果。

(4) 设备少、回采工艺单一，劳动环境好，系统管理简单。

(5) 工作面设备可靠性高，采、装、运和支护设备综合开机率在 90% 以上，可实现一井一面集约化生产。

1.3.3 大采高综采技术存在的问题

由于采高的加大和设备的大型化，大采高存在的主要问题有：

(1) 煤壁片帮及由煤壁片帮引起的端面冒、漏严重。

(2) 支架载荷大, 要求支架重型化, 以免支架被压死或损坏。

(3) 支架稳定性差。

(4) 对煤层厚度变化的适应性差。回采高度很难正好与煤层厚度相同, 加之回采过程中端面漏冒及操作不熟练等, 往往会人为降低工作面采高, 加快推进速度和提高产量, 客观上造成煤层的厚度损失。当煤层厚度变化加大或顶底板不平时, 更易造成煤层厚度损失。

(5) 设备大型化、复杂化, 设备维护量和设备管理难度大。

1.3.4 大采高综采技术研究现状

1.3.4.1 支架-围岩关系

弓培林博士、靳钟铭教授针对大采高综采随采高增大进入垮落带顶板范围增大的特点, 根据侯忠杰教授断裂带基本顶的判别法则, 得出直接顶厚度与采高的非线性关系, 并与普通采高断裂带高度和采高的经验公式对比, 发现当一次采高大于 4 m 后, 垮落带经验公式就不再适用了。

郝海金博士应用球壳理论并结合模拟研究, 提出上覆岩层的“压力壳”的概念, 并对压力壳的力学特征及形态特征进行研究后提出大采高开采上覆岩层压力壳-梁结构模型, 认为压力壳是岩块间应力传递的包络线, 是不可观测的客观存在。我国目前大采高(采高 5.5 m 左右)条件下, 砌体梁平衡结构位于 2~3 倍采高处。

弓培林和靳钟铭将大采高综采的直接顶分为 I、II、III 型 3 种类型。I 型直接顶支架载荷按采高倍数或给定载荷法计算。II 型直接顶暂时不适合用大采高工艺。III 型直接顶支架载荷主要考虑直接顶关键层力学特性、层位及厚度。

1.3.4.2 煤壁片帮及端面稳定性控制

随采高增大, 煤壁片帮概率和程度增加, 严重的煤壁片帮直接影响工作面正常生产。某些矿区构造复杂带片帮更加严重, 出现片帮深度达 3~5 m, 宽度几十米, 块度 5~20 m³, 大块煤导致输送机变形, 堵住采煤机通道, 甚至进入支架行人通道内, 影响人身安全; 另外, 煤壁片帮导致支架端面距增大, 引起端面冒落, 导致支架无法很好地接顶, 支架受力不均匀, 失去顶部煤岩的控制, 容易引起支架部件损坏, 进一步导致支架围岩关系恶化而引起顶板事故和片帮事故, 形成恶性循环。

目前, 人们都认识到工作面前方支承压力是煤壁片帮的主要原因, 煤层强度、节理裂隙发育程度、构造情况、支架性能等对煤壁片帮有影响, 但如何定量分析及采取措施尚未解决。

大采高煤壁高, 暴露空间大, 煤壁片帮是大采高工作面的主要技术难题之一。

弓培林教授根据煤体裂隙分布特点, 对煤壁稳定性进行了评价, 并采用模糊数学方法对煤壁稳定性进行了分类。

郝海金博士根据数值模拟结果, 认为在 3~5 m 范围内, 工作面采高的增加不会直接导致煤壁片帮, 因为随采高增加, 采场范围内各种应力增加幅度均不大。另外, 利用边坡工程随机分布原理, 研究得出煤壁片帮发生概率的影响因素: 不连续面的多少和方向, 内摩擦角, 直接顶对煤壁的压力及它们之间的摩擦系数。

华心祝教授认为开挖后煤壁呈双向或单向受力状态, 支承压力的增加或煤体强度的降低均会导致壁片帮, 并提出俯斜开采、快速推进、提高支架工作阻力、加固煤壁和及时带

压移架等煤壁片帮控制技术,在淮南张集矿大采高工作面取得较好效果。

宁宇研究员认为采用二级护帮机构、缩小端面距、提高支架工作阻力、电液控制系统实现擦顶移架、及时移架,将移架速度控制在8 s内可有效控制煤壁片帮。

袁永博士认为煤壁片帮是一个由微观裂隙发育到宏观“楔形”滑动体失稳的过程,并从微观和宏观两个角度分析了其稳定性的主要因素。

1.4 特厚煤层放顶煤开采技术的发展及存在问题

1.4.1 放顶煤技术的发展

放顶煤开采是一种高产、高效的厚煤层回采方法。它在煤层下部布置一个中厚采高的工作面进行机采,顶煤体在支承压力作用下被压裂破碎后自然冒落放出,支架前后两个采煤场所组成了放顶煤工作面。

放顶煤开采的思路源于厚煤层开采初期的高落式采煤,即底煤用手镐破煤,然后用锤楔崩落上部的煤炭。20世纪初,欧洲将房式和仓式放顶煤开采技术作为复杂地质条件下的一种特殊采煤方法。20世纪60年代,随着液压支架的迅速发展,苏联、法国、南斯拉夫等采用放顶煤方法开采回采4.5~8.5 m厚煤层。20世纪70年代,放顶煤技术沿着两条思路发展:一条是在支架前布置一台输送机,尾梁封闭,顶梁前部或后部放煤的高位或中位放顶煤技术;另一条是支架前后布置两台输送机,放煤口为千斤顶带动可伸缩掩护板的低位放顶煤技术。20世纪80年代中期以后,由于粉尘、自然发火、瓦斯灾害、采出率等关键技术没有得到很好的解决,所以这一技术在国外没有得到系统的研究和推广。

1982年,我国开始引进、研究综合机械化放顶煤开采技术(简称综放),经历了摸索(1984—1990年)、逐渐发展(1990—1996年)、技术成熟和大范围推广(1996年至今)3个阶段。

1984年,沈阳浦河矿首次运用国产FY400-14/28型综放支架进行工业性试验,虽然试验并不理想,但其优越性及取得的经验教训很快在急倾斜厚煤层获得成功并推广应用;1987年,平顶山一矿引进匈牙利VHP高位综放支架及全套综放设备在缓斜软煤中试验成功,但最高月产仅6.5万吨;1988年12月,阳泉一矿运用掩护式中位开天窗ZFS-4400型综放支架在中硬煤中试验效果良好;1989年9月,潞安王庄煤矿运用国产高位开天窗放顶煤综放支架实施顶煤动压复注水措施,在中硬煤中取得平均日产3067 t、最高月产82800 t、工作面采出率87.82%、回采工效40.12 t/工的好成绩,首次显示了综放开采的高产、高效,从而揭开了中硬煤综放开采推广应用的序幕。

1990年7月,阳泉4个矿均采用ZFS4400-16/26型中位开天窗综放支架取得了月产14万吨的好成绩;1993年,潞安王庄矿年产253万吨,取得了月产31万吨的世界水平;紧接着潞安漳村矿、兖州兴隆庄矿等都进行了工业性试验,1994年全国已经有6个单产超过200万吨的综放工作面,至1995年综放单产最高水平已达315.67万吨。同时,综放支架也由高位、中位、低位放顶煤支架系列逐渐演化统一到适合我国的低位放顶煤为主的综放支架系列。

1998年,兖州东滩矿在丈八煤中综放单产达501.06万吨、工效235.4 t/工的世界水平;1998年,大同忻州窑矿在“两硬”条件下运用顶煤预爆破技术,取得了综放开采工业试验的成功,日产超过0.5万吨,月产超12万吨,工效29 t/工,工作面采出率

80.3%。至此,综放开采在我国软煤、中硬煤、硬煤层、缓倾斜煤层、急倾斜煤层中全面推广,更值得肯定的是在复杂地质条件,如“三软”“大倾角”“高瓦斯”“易燃”“边角煤”“残采煤”等条件下的综放开采有成功经验。目前,厚煤层综放开采技术与设备已日趋完善,表1-2列出代表我国先进水平的特厚煤层工作面工艺参数、配套设备和产量情况。2007年,平朔1号井综放面年产860万吨,平朔2号井综放面年产943万吨,兖州东滩煤矿、兴隆庄煤矿、鲍店煤矿和潞安王庄煤矿、常村煤矿、余吾煤业等综放面的年产量都达到500万吨以上。

1.4.2 放顶煤技术的优越性

实践证明,综放开采已成为我国5~14 m厚煤层开采的首选采煤方法,其独特的技术优势主要表现在以下几个方面:

(1) 煤层厚度适应性强,对于厚度变化、断层切割等复杂煤层,可实现一次采全厚,两个出煤点同时出煤,开采强度大、产量大、效率高。

(2) 在较低支架高度下一次采出5~14 m厚煤层,不需要假顶材料和人工费,初期投资小。

(3) 利用矿压放煤,能耗少,煤炭块率大。

(4) 巷道布置简单,掘进和维护量小,缓解采掘接替,减少工作面搬家次数。

(5) 在顶煤的“垫层”作用下,顶板来压强度缓和,周期来压不明显,支架载荷不大,对支架工作阻力的要求小。

1.4.3 放顶煤技术存在的问题

放顶煤开采技术还存在一些问题没有彻底解决,突出的问题有以下几个:

(1) 全煤巷道支护。放顶煤工作面顺槽和切眼均沿煤层底板掘进,巷道四周均为强度较低的煤层,且放顶煤工作面开采过程中,前方支承压力分布范围广,对巷道影响范围大。支护强度低,巷道变形量大,工作面两端无法正常推进;支护强度过高,工作面推过后,两顺槽尾巷将滞后垮落或垮落不充分,易形成成长的进风通道而造成瓦斯积聚。高强度可切割帮锚杆也需要进一步研发。合理的巷道支护措施需要根据理论研究和现场实践进一步探索。

(2) 煤炭采出率低。

(3) 火灾防治。放顶煤开采通常会遗失部分煤在采空区,这些遗失的破碎煤体如遇到供氧和聚热条件等,则会发生自燃,同时工作面顺槽和切眼如有支护质量问题,则会产生冒顶或者长期垮落不充分,形成聚热空洞等,也会发生自燃。采空区遗失煤、工作面推进速度较慢、采空区空洞是放顶煤开采防火不利的主要原因,但其有利方面是工作面一次推进,不再扰动采空区,不会形成二次或多次扰动采空区后引起自燃,只要在推进过程中不引起火灾,就可以有效防治发火。目前主要的防灭火方法是采空区注氮、防止采空区漏风、黄泥灌浆、提高工作面推进速度等,各种防灭火技术的效果还有待于进一步提高。

(4) 地面沉陷控制。放顶煤开采一次采出煤层厚度较大,如何缓解覆岩移动及地面沉陷,避免上覆岩层的突然垮落,以避免河床的渗漏等需要进一步研发,但其有利方面是避免了分层开采引起的地表重复塌陷和破坏,有利于开采破坏区地表植被快速恢复,有利于实现绿色开采。

(5) 瓦斯治理。目前虽有一些实用的瓦斯治理技术,如高位专用瓦斯排放巷、加大

工作面割煤高度等,但放顶煤开采煤层全厚同时出煤,出煤集中、放煤量大、煤岩卸压范围大、顶板活动剧烈、瓦斯涌出量大,上隅角和放煤时局部瓦斯超限时有发生,目前为止该项研究仍处于定性阶段。利用合理的采动影响进行瓦斯的预抽采(排)是正确的选择。

(6) 煤尘控制。放顶煤工作面与一般综采面相比,顶煤冒落和放煤口放出是主要尘源,应加强煤层注水等措施,将煤尘浓度控制在最低限度。

1.4.4 放顶煤技术研究现状

围绕上述问题,国内外学者已经做了大量的研究工作。

1.4.4.1 支架-围岩关系

钱鸣高院士认为,放顶煤开采采高增大,覆岩中破断基本顶所引起的稳定的砌体梁结构高度也将增大,直接顶的厚度将大于分层开采,且结构的损失程度也加大。基本顶视为可滑、可转的刚体,直接顶(包括顶煤)简化为损失破裂体,直接给支架载荷,同时传递基本顶给支架的作用力。

吴健教授认为,放顶煤采场上覆岩层存在着由众多断裂岩块组成的梁式自稳结构,该结构在水平挤压力作用下具有承载和变形特性,并进一步提出综放采场支架-围岩关系的“大变形梁”的概念,该梁与采高不是线性关系,支架与围岩相互作用的效果应根据顶煤破碎状况或顶煤拉应力区分布的数值试验来判断。

靳钟铭教授、宋选民教授等就放顶煤围岩结构进行了深入研究,由于放顶煤综放面顶煤、直接顶和基本顶的差异,从顶煤至基本顶可形成砌体梁半拱式、压力拱、搭桥式传递岩梁、悬臂岩梁、台阶岩梁5种移动结构,并结合放顶煤工作面矿压显现规律、顶煤冒放结构和我国厚煤层赋存状况,提出6种组合力学模型及控制计算公式。

姜福兴教授根据现场微震监测和理论分析,提出基本顶存在类拱、拱梁、梁式3种基本结构。对覆岩“O”形空间结构、形成、演化规律、支承压力分布及规律进行分析,提出“板-壳”大空间结构,提出采场覆岩空间结构的概念,认为存在4种由采动引起的岩体破裂类型,展示了覆岩破裂与采动应力场的动态关系及不同结构形式下的支架围岩关系。

谢广祥教授认为综放采场上位岩层三维空间中存在宏观应力壳,系统研究了采高、护巷煤柱等的变化对宏观应力壳的影响,揭示了采场围岩力学特征及减缓动力灾害机理,取得较好的工程效果。

吴健教授认为支架顶梁只需承担工作空间内,控顶面积以上松动椭球体范围内的煤岩重量;史元伟教授通过现场实测研究后认为支架所需强度约为顶煤和煤层厚度相当的直接顶岩重之和,并给出初撑力和工作阻力的公式;王庆康教授认为支架工作阻力应为2~2.5倍采出厚度的岩层重量,并考虑矸石阻力及附加载荷的影响来确定;闫少宏博士对顶煤破裂过程进行损失力学研究,认为支架载荷等于促使顶煤体在竖直方向变形的压力,并给出了定量的计算公式;张顶立教授和钱鸣高院士认为支架承受覆岩的外载由松脱体压力和基本顶回转变形压力所确定,并给出积分表达式;刘长友教授认为直接顶为可变形体,建立了采场直接顶为似零刚度、中间型刚度和似刚性3种条件下的支架围岩整体力学模型。

1.4.4.2 顶煤可放性及变形、破坏、放出规律

顶煤的可放性及变形、破坏、放出规律直接关系到顶煤的回收率和支架围岩关系的确定。

定,是确定合理开采工艺及参数的关键。割煤高度 2~3.5 m 范围的前提下,国内外已经做了大量的研究工作。

靳钟铭教授等利用分形理论对顶煤裂隙的演化规律进行了现场实测分析研究,利用网络尺度-裂隙条数法、测线法测定的裂隙分维是对综放采场顶煤裂隙分布的一个指标,可反映裂隙密度及贯通情况。

宋选民教授研究了煤体应力状态、煤体强度和煤体内裂隙发育程度 3 个主要因素对煤体破碎块度的影响规律,提出了以顶煤块度为指标的冒放性评价判别准则,利用裂隙分布规律分析了裂隙分布与冒落块度的关系,并采用分形理论研究采动影响前后顶煤裂隙分维值及冒落块度分维值的关系,认为煤层裂隙组数、方位、间距、发育程度及其与工作面布置匹配关系是顶煤冒放性的重要影响因素,组数多、间距小、匹配合理,则顶煤的冒落块度小,顶煤冒放性好。

康天合教授提出了煤岩体内裂隙尺度分布的分形研究方法,为定量评价顶煤的冒放特性和预注水处理顶煤的工程效果提供了分类参数和依据,定量和定性研究了硬煤、中硬煤、软煤的冒放结构,运用模糊数学理论将不同赋存条件的顶煤的冒放性分为 5 类,提出了各类顶煤的控制和预处理方法。

常春和郑雨天教授运用人工神经网络评估综放开采顶煤的冒放性,采用计算机研究方法,输入煤体节理夹角、节理密度、采深、夹矸比例、煤体强度、顶板级类、煤层倾角、采放比、工作面长度及支架阻力等参数,输出月产量、月进度和回收率,以此评价顶煤的可放性,为综合技术经济和顶煤可放性指标预测开辟一个新方法。该方法需要收集到的样本较多,现场人员很难操作实施。

针对顶煤可放性课题,前人研究主要是从理论上采用数学方法分类评价顶煤冒放性,有些指标是比较模糊的,很难定量衡量顶煤冒放的难易程度。在特定地质和采矿条件下,煤体强度、应力以及裂隙发育程度对顶煤冒放性影响是很难定量分析的。

与顶煤可放性研究相联系,探索顶煤变形、破坏、放出规律及冒放结构有更重要的理论实际意义。

山东科技大学郭忠平、樊克恭、高延法等教授对顶煤位移观测后认为,采取松动爆破后,煤壁上方位移量显著增大,但并不能改变顶煤始动点的位置。

张海戈博士通过现场实测和模拟试验认为,顶煤在煤壁后方 2~3 m 范围内累计位移小于 100 mm 时,顶煤很难放出;顶煤在煤壁前方累计位移达到 100 mm 时,顶煤裂隙较发育,可顺利放出,回收率较高;顶煤在超过 2 m 的煤壁前方累计位移量达到 100 mm 时,顶煤裂隙能充分发育,但过早地影响煤壁和端面顶煤的稳定,据此认为,端面距、垂直应力、水平应力、合力作用点位置是影响软煤综放开采端面稳定性的 4 个主要因素。

张开智博士通过现场实测得到顶煤位移曲线放出,建立了位移特征法,以此作为顶煤可冒性的判别方法,并判别顶煤的可冒放等级。

太原理工大学靳钟铭教授经过研究,得到以下基本结论:

(1) 工作面前方支承压力对顶煤的压裂破坏,顶煤才能及时冒落放出。靳钟铭教授根据工作面前方极限平衡区内的支承压力,得出走向塑性区内和弹性区内支承压力分布规律方程式,结合相似模拟和数值模拟得出基本规律。和综采相比,放顶煤开采支承压力分布范围大,塑形宽度大,峰值压力相对低;煤质越软、煤层越厚,顶煤回收率越高,支承