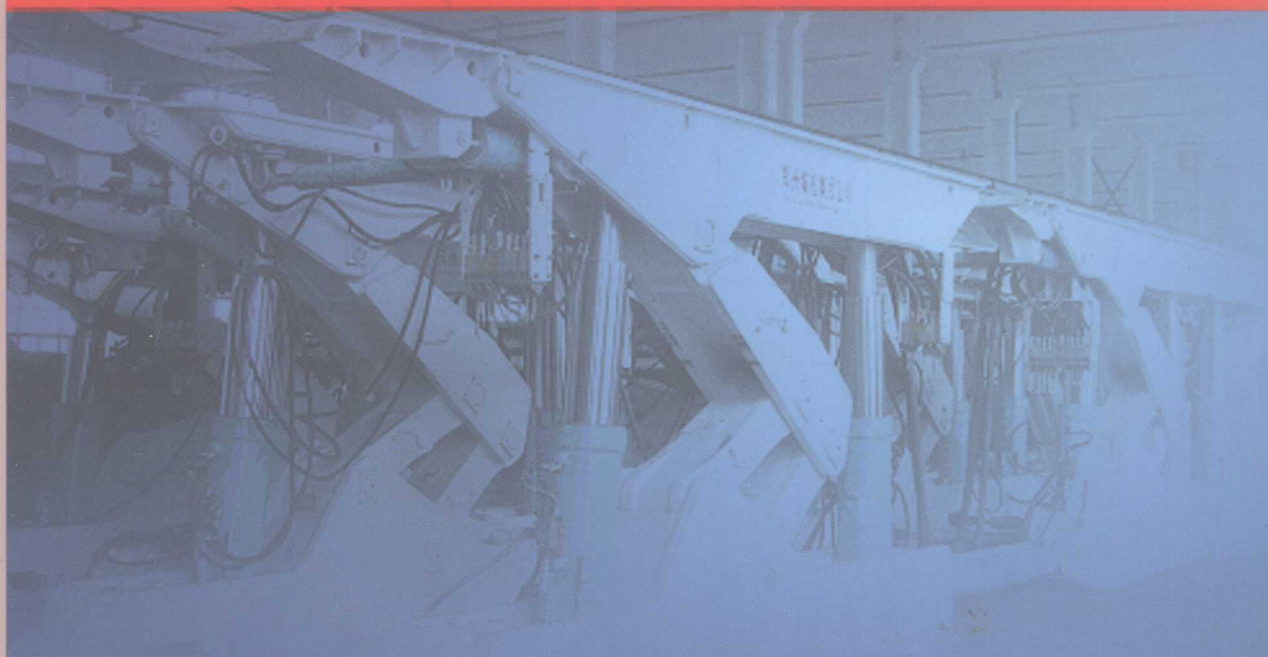


倪兴华 苗素军 杨永杰 编著

综放工作面端头及 顺槽超前液压支架支护技术



煤炭工业出版社

综放工作面端头及顺槽超前液压支架 支 护 技 术

倪兴华 苗素军 杨永杰 编著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

综放工作面端头及顺槽超前液压支架支护技术/倪兴华
等编著. —北京: 煤炭工业出版社, 2008. 12

ISBN 978-7-5020-3414-6

I. 综… II. 倪… III. 煤矿—液压支架 IV. TD355

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 157387 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
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*
开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 14¹/₂

字数 336 千字 印数 1—1,500

2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷
社内编号 6219 定价 38.00 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

本书详细阐述了矿山压力与岩层控制理论、工作面支架-围岩关系、综合机械化开采技术的发展、综合机械化采煤装备及支护技术的发展、液压支架支护技术的发展、工作面端头及顺槽超前液压支架支护技术的研究现状，介绍了工作面端头及顺槽超前支护用液压支架的研制过程，深入分析了综采、综放工作面端头及顺槽超前支护系列液压支架的结构特点和适用范围。经现场工业性试验效果检验，形成了工作面端头及顺槽超前液压支架支护成套技术。

本书可供机械制造、自动化控制及采矿工程等专业领域的广大科技工作者参考。

编 著 委 员 会

主任	倪兴华	苗素军	杨永杰		
委员	李 政	张崇宏	孙洪江	马晓东	骆念海
	祝炳梁	辛忠玉	左金忠	邢士军	许 义
	张 刚	谢 波	吕建为	刘国良	曲延伦
	马俊鹏	王建周	张善波	张宗社	刘 欣

序 言

20 世纪 80 年代以前, 我国的机械化采煤方法为普通长壁综合机械化采煤或厚煤层分层综采, 综合机械化放顶煤开采技术从 20 世纪 80 年代初期开始试验研究, 到 20 世纪 90 年代中期首先在兖州煤业股份有限公司兴隆庄煤矿创造了月产 25 万 t 的纪录, 目前综放工作面最高年产煤已突破 600 万 t, 达到国际先进水平。虽然综采放顶煤技术已经成为我国高产高效矿井现代化建设、实现集约化生产的技术途径之一, 但是综采、综放工作面端头区乃至两顺槽超前区域的维护仍处在需要深化发展阶段。综采、综放工作面端头区设备布置密集, 是行人、输煤的咽喉, 端头的管理和支护质量是决定工作面能否正常运转和评价工作面安全程度的关键, 为了适应大功率、大配套重型设备的使用要求, 需要提高工作面端头作业的机械化, 才能更好地发挥成套装备的能力、保证高产高效。目前综采、综放工作面端头及顺槽超前支护所普遍采用的十字金属铰接顶梁(或一字梁)配合单体支柱支护方式, 工作面劳动强度高、危险系数大、事故频发, 尤其是无煤柱开采的沿空掘巷端头, 还必须设置密集支柱加强支护。在工作面轨道顺槽出口的顶板支护工作繁琐, 延长了采煤机的停机等待时间, 增大了回料工作的危险性。因而, 传统的工作面端头及顺槽的超前支护方法与现代化的综采、综放装备不相匹配, 成为综采、综放开采技术的薄弱环节。针对综采、综放工作面端头及顺槽超前采用单体液压支柱配以金属铰接顶梁进行支护的局限性, 在借鉴综采工作面液压支架支护的基础上, 采用自移式超前支护液压支架代替单体液压支柱和金属铰接顶梁对工作面端头及顺槽超前进行支护, 显然具有重要意义。

工作面端头及顺槽超前液压支架支护成套技术将替代传统的单体支柱支护方式, 从而实现工作面端头及两顺槽超前支护的全面机械化。本书参阅了大量国内外相关文献资料, 包括矿山压力与岩层控制理论、工作面支架-围岩关系、综合机械化开采技术与发展、综合机械化采煤装备及支护技术、液压支架支护技术的发展以及工作面端头及顺槽超前液压支架支护技术研究现状等。在此基础上研究工作面端头及顺槽超前支护用的液压支架: 分析工作面端头及顺槽超前支护段的应力场规律; 运用有限元软件对综采、综放工作面端头及两顺槽超前液压支架的结构进行力学计算; 由易到难研制综采、综放工作面端头及两顺槽超前支护系列液压支架, 包括研制适用于简单条件的

ZT9800/16/30 型综放工作面实体煤运输顺槽端头液压支架、研制支护强度较高的 ZT24500/18/35 型综放工作面实体煤运输顺槽超前液压支架、研制应用于沿空轨道顺槽的 ZT83200/19/35 型综放工作面端头及沿空轨道顺槽超前液压支架、研制适用于复杂条件的 ZT103500/22/38 型综放工作面端头及沿空轨道顺槽超前液压支架；最终通过现场工业性试验方法评价综采、综放工作面端头及两顺槽超前液压支架的应用效果，形成了工作面端头及顺槽超前液压支架支护的成套技术。

囿于作者水平，书中错误及不当之处，敬请读者朋友批评指正。

作 者

2008 年 6 月 6 日

目次

第一章 绪论	1
第一节 我国煤炭资源开采背景	1
第二节 工作面端头及顺槽超前支护支架化趋势	2
第二章 矿山压力与岩层控制理论	5
第一节 上覆岩层运动规律研究	5
第二节 矿山压力与岩层控制研究现状	6
第三节 工作面顶板破断的力学分析	7
第三章 工作面支架-围岩关系	9
第一节 采场支架-围岩关系研究的意义	9
第二节 支架-围岩关系研究的国内外现状	10
第四章 综合机械化开采技术与发展	13
第一节 综放开采技术国内外现状	13
第二节 大采高综采开采技术的发展	14
第三节 厚煤层大采高强度液压支架的发展	15
第五章 综合机械化采煤装备及支护技术	19
第一节 综放高产高效的技术途径与装备配套原则	19
第二节 综采装备及支护技术的发展	20
第六章 液压支架支护技术的发展	24
第一节 液压支架支护技术现状	24
第二节 液压支架的架型及适用条件	26
第三节 液压支架的液压控制系统	53
第七章 工作面端头及顺槽超前液压支架支护技术研究现状	60
第一节 工作面端头液压支架支护技术	60
第二节 顺槽超前液压支架支护技术	64

第八章 兖州矿区工作面端头及顺槽单体支柱支护工艺特点	68
第一节 煤巷围岩稳定性分类及支护对策	68
第二节 兖州矿区煤层巷道的矿压显现特点	80
第三节 综采工作面端头传统支护工艺特点	82
第四节 综采工作面顺槽超前传统支护工艺特点	83
第五节 端头及顺槽超前液压支架支护的必要性	84
第九章 工作面端头及顺槽超前支护段应力场数值分析	86
第一节 沿空掘巷与实体煤顺槽围岩变形规律	86
第二节 工作面端头及沿空侧轨道顺槽超前应力场	93
第三节 端头及顺槽超前支护段应力-位移场	108
第十章 工作面端头及顺槽超前支护液压支架设计	111
第一节 端头及顺槽超前液压支架支护的技术要求	111
第二节 确定端头及顺槽超前支护液压支架架型	112
第三节 液压支架有限元分析方法及其求解步骤	119
第四节 端头及顺槽超前液压支架结构力学计算	121
第五节 端头及顺槽超前支护液压支架技术参数	175
第十一章 工作面端头及顺槽超前支护液压支架试制	188
第一节 试制液压支架的基本条件	188
第二节 端头及顺槽超前支护液压支架试制过程	190
第三节 综放端头及沿空轨道顺槽超前液压支架试制	190
第十二章 端头及顺槽超前液压支架支护技术的工业应用	192
第一节 工作面端头液压支架在兴隆庄煤矿的应用	192
第二节 端头及沿空轨道顺槽超前支架应用于鲍店煤矿	194
第三节 端头及沿空轨道顺槽支架应用于兴隆庄煤矿	202
第十三章 端头及顺槽超前支护液压支架现场应用效果	208
第一节 超前液压支架结构的现场适应性	208
第二节 端头及顺槽超前液压支架及其技术要求与适用条件	210
第三节 端头及顺槽超前支架支护技术应用总结	211
附录 ZT103500/22/38 型端头及顺槽超前液压支架操作	217
参考文献	221

第一章 绪 论

第一节 我国煤炭资源开采背景

煤炭是世界上储量最多、分布最广的常规能源资源。据世界能源委员会 1995 年发表的报告,世界化石能源最终可采总资源量为 5.09 万亿 t,其中煤炭占 66.8%,石油和天然气分别占 16% 和 17%。从 18 世纪 60 年代美国的工业革命开始,煤炭生产发展迅速,直至 19 世纪 60 年代初一直在世界能源系统中占主导地位。二十世纪中叶以来石油发展加快,1966 年石油产量和消费量超过煤炭,成为第一能源。1973 年石油危机后,世界能源结构又逐渐发生变化。从 1973 年到 1995 年世界一次能源增长了 51%,石油所占比例从 50.8% 降至 39.6%,天然气从 18.0% 增至 22.4%,煤炭从 28.0% 降至 27.3%,水电有所增长,核电有了较大发展^[1]。

煤炭作为我国的主要能源,在国民经济建设中具有重要的战略地位。长期以来,煤炭在我国一次能源生产和消费构成中均占 2/3,在一次能源消费结构中石油占 17%,天然气占 2%,水电、核电占 6%。根据国家计委近期的研究预测,2015 年煤炭占全国能源消费总量不会低于 55%,2050 年也将不低于 50%。新疆、内蒙古、山西和陕西四省(区)占全国资源总量比重很大。在我国煤炭总储量中,有 73.2% 的储量埋深在 600m 以下,随着煤炭资源的不断开发,越来越多的矿井进入深部开采。因此,从长远看,深部开采的关键技术问题研究,是我国进一步开发利用深部煤炭资源具有战略意义的重大课题。井下巷道围岩所处的地质力学环境随着煤矿开采深度的增加而变得更加复杂,特别是在高应力作用下,巷道围岩变得松软破碎,如何解决深部松软破碎围岩巷道的支护问题,是目前深部煤炭资源开采中的一项技术难题。

西部大煤田的开发建设,将为西部大开发奠定良好的能源基础。西部煤田中相当一部分在开发初期主要开采距地表较浅的浅部煤层,最典型的是神府、东胜煤田。神府、东胜煤田探明储量 2236 亿 t,占全国探明储量的 1/3,相当于 70 个大同、160 个开滦,是我国目前探明储量最大的煤田,该煤田与美国的阿巴拉契亚煤田、德国的鲁尔煤田等被称为世界七大煤田。以开发神府、东胜煤田为中心的“神华工程”,是我国大型项目建设中总投资仅次于“三峡工程”的第二大工程。神东矿区目前及今后相当一段时期内,各矿开采区域大部分集中于埋深在 100 ~ 150m 的浅部。埋深浅、基岩薄、上覆厚松散沙层是煤层的典型赋存特征。浅埋深煤层可分为 2 种类型:①基岩比较薄、松散载荷层较厚的浅埋深煤层,其顶板破断为整体切落形式,易于出现顶板台阶下沉,此类厚松散层浅埋深煤层称为典型的浅埋深煤层。可以概括为:埋藏浅,基载比小,基本顶为单一关键层结构的煤层。②基岩厚、松散载荷层较薄的浅埋深煤层,其矿压显现规律介于普通工作面与浅埋深煤层工作面之间,表现为两组关键层,存在轻微的台阶下沉现象,可称为近浅埋深煤层。

总体上,浅埋深煤层工作面的主要矿压特征是基本顶破断运动直接波及地表,顶板不易形成稳定的结构,来压存在明显动载现象,支架处于给定失稳载荷状态。浅埋深煤层可以采用以下指标判定:埋深不超过150m,基岩与载荷层厚度之比小于1,顶板体现单一主关键层结构特征,来压具有明显动载现象。传统的顶板分析中:一是把关键层上的垂直压力简化为均布载荷,且以静载处理;二是传统的顶板控制研究主要是采场顶板的支护控制;三是开采沉陷的研究主要从地表岩移测量建立数学模型,很少涉及岩层塌陷过程及其力学结构的影响。由于浅埋深煤层顶板地层垮落直达地表,因此,浅埋深煤层顶板力学结构及与支架相互关系的研究对矿山压力与岩层控制、地表破坏控制等都具有理论价值,对于神东等浅埋深煤层赋存条件的矿区开发建设具有实践意义。开采时间相对较短、开采强度将随着技术的发展不断加大,为浅埋深煤层的岩层移动规律研究带来了新的课题。由于对浅埋深煤层顶板力学结构及矿压显现特征的研究时间较短,所以浅埋深煤层支架-围岩关系研究、支架主要参数确定以及浅埋深煤层液压支架适应性的研究非常迫切^[1,2]。

第二节 工作面端头及顺槽超前支护支架化趋势

在20世纪80年代以前,我国的机械化采煤方法为普通长壁综合机械化采煤或厚煤层分层综采,综合机械化放顶煤开采技术从20世纪80年代初期开始试验研究,经过了十余年的引进、探索、提高和推广,到90年代中期首先在兖州煤业股份有限公司兴隆庄煤矿创造了月产25万t的纪录,已经实现了国产化综放设备的高产高效。目前,综放工作面最高年产煤已突破600万t,达到了国际采煤工作面年产量的先进水平。综采放顶煤技术已经成为我国高产高效矿井现代化建设、实现集约化生产的技术途径之一。但是,综采、综放工作面端头区乃至两顺槽超前区域的维护仍处在需要深化发展阶段,为了适应大功率、大配套重型设备发展及使用要求,需要提高工作面端头作业的机械化,才能更好的发挥成套装备的能力、保证高产高效。目前综采、综放工作面端头及顺槽的超前支护仍普遍采用十字金属铰接顶梁(或一字梁)配合单体支柱进行支护,由于支护强度低、工艺落后,工作面上下端头出口的维护,成了综采、综放工作面劳动强度最大、危险系数大和事故频发的一项工作。随着综采技术的发展,对综采工作面的单产要求也越来越高。根据国内外的统计资料,提高设备开机率,加快推进速度、提高工人的工作效率等,是提高单产的有效途径。尤其在无煤柱开采的工作面,轨顺多为沿空掘巷布置,为了减少巷道变形、保证工作面的正常推进,必须通过设置密集支柱来加强支护。在煤机端头进刀、推移刮板输送机、移架的过程中,工作面轨道顺槽出口的顶板支护工作非常繁琐,不但增加了工人的劳动强度,延长了煤机在工作面端头的停机等待时间,更严重的是增大了回料工作的危险性,给综采、综放工作面的高效推进和安全管理带来一定困难。据有关资料介绍,德国的综采工作面端头劳动消耗占工作面用工总数的25%,我国一些使用较好的局、矿端头劳动消耗在30%以上,个别达到40%。因而,实现端头作业的机械化,是减少工人笨重的体力劳动,降低事故率,提高工作面推进速度,实现高产高效的关键因素。传统的工作面端头及顺槽的超前支护方法与现代化的综采、综放装备不相匹配,成为综采、综放开采技术的薄弱环节^[1,2]。

综采、综放工作面端头区是指工作面与回采巷道的交汇处,是采运设备的交接点,设

备布置密集，是行人、输煤的咽喉。端头管理和支护的好坏，是决定工作面能否正常运转和评价工作面安全程度的关键。据不完全统计，在使用木支护、摩擦式金属支柱或单体液压支柱维护端头时，因支护状况不佳而在综采、综放工作面端头出现的人身伤亡事故占综采事故的 53%，近年来我国综采工作面端头顶板事故数量虽逐年减少，但事故率仍居高不下。因而，改善综采工作面端头的支护状况，实现综采工作面端头作业的机械化，是提高综采工作面安全程度的重要途径。《煤矿安全规程》规定：采煤工作面所有安全出口与巷道连接处 20m 范围内，必须加强支护；综合机械化采煤工作面，此范围内的巷道高度不得低于 1.8m，即采煤工作面两顺槽 20m 范围内必须采取超前支护。现在采煤工作面两顺槽超前支护主要采用单体液压支柱配以金属铰接顶梁的支护方法，该支护方法存在诸多缺点：①支护强度低，单体液压支柱钻底量大，回撤困难，对于顶板压力较大的煤层，达不到支护强度，易造成工作面安全出口处的顶板下沉；②支护速度慢，由于单体液压支柱、金属铰接顶梁回撤速度难以大幅度提高，制约了采煤工作面推进速度，难以实现综采面的高产高效；③劳动强度大，由于支设、回撤单体液压支柱及铰接顶梁频繁，并且全部采用人力，造成了工作面使用人员多，劳动强度大；④成本高、安全性差，因顶板压力大或操作等原因，支柱、铰接顶梁、柱鞋的损坏量较大，并且工序复杂，人工操作多，造成事故的概率较大。针对综放面端头及顺槽超前采用单体液压支柱配以金属铰接顶梁进行支护的局限性，在借鉴综采工作面液压支架的基础上，采用自移式超前支护液压支架代替单体液压支柱和金属铰接顶梁对综放面端头及顺槽超前进行支护，具有重要意义。

国际上发达国家由于地质条件和开采方式与我国不同，普遍对工作面综采设备的研究较多，成果突出，对端头的顶板机械化支护装备技术研究较少。我国在 20 世纪 80 年代末、90 年代初期试验研究了几种形式的端头支护方式，均因空顶面积过大，顶板不稳定，冒落严重而失败，因此当前我国配套大功率采煤机和大运量刮板输送机的端头支架还没有成功的架型。近几年来，锚网支护技术成功地应用在顺槽顶板维护，大大提高了顶板的坚固性，一些局矿、科研院所及厂家对顺槽端头支护机械化进行了尝试，对顺槽端头机械化支护技术开展了研究。通过对综采、综放工作面端头液压支架进行探索和研究，先后研制出了中置式三架一组放顶煤端头支架、前后两架一组放顶煤端头支架等，解决了特定条件端头区域的顶板支护问题，取得了阶段性成果。根据我国国情，通过对综采、综放工作面两端头及顺槽超前段矿压显现规律的深入研究，对设备配置进行合理造型和优化设计，吸收国内外高新技术，研制适应我国大功率配套综采、综放工作面端头的支护设备，提高综采、综放工作面的高产、高效，保证生产安全性、可靠性，提高其机械化性能，提高经济效益，将为我国在综采、综放工作面大配套端头支护及顺槽超前支护方向探索出一条新路子。特别是当前国内外尚未见到综采、综放工作面沿空轨道顺槽端头及顺槽的超前支护支架，因此进一步研究开发综采、综放工作面新型端头支架，解决工作面端头区的支护难题，实现综采、综放工作面端头及两顺槽超前支护的支架化，对推动综采、综放开采技术的发展是十分必要的，具有创新性重要的实际意义。

采用大型岩土工程数值计算软件对工作面端头及顺槽超前支护段的应力场进行理论分析，结合现场矿压观测掌握的工作面端头及顺槽单体支柱支护时的矿压规律，摸清工作面端头及顺槽超前支护区的矿压显现特点。在此基础上，通过对综采、综放工作面设备布置状况和生产工艺的深入分析，处理好端头支架与前、后部输送机机尾、排头支架和采煤机

之间的空间关系,创造性地构思端头支架的结构。采用钢架结构有利于保持安全空间,通过液压技术实现支架对顶板的支撑和整体自移。运用有限元软件对综采、综放工作面端头及两顺槽超前液压支架的结构进行力学计算,以辅助确定端头支架的相关技术参数。分阶段设计出适合现场特点、能满足安全高效生产需要的综采、综放工作面端头及两顺槽超前支护液压支架。对于所研制的综采、综放工作面端头及两顺槽超前支护系列液压支架,要求分别逐步适应综采运输顺槽、综采轨道顺槽、综放运输顺槽和综放沿空轨道顺槽的条件。端头及顺槽超前液压支架支护成套技术将取消传统的单体支柱支护方式,从而实现工作面端头及两顺槽超前支护的全面机械化。可见,工作面端头及顺槽超前支护的液压支架化是发展趋势,具有创新性与可行性。

研究工作面端头及顺槽超前支护用的液压支架,需要沿着科学可行的技术路线:在充分的国内外综采、综放工作面端头及顺槽超前支架支护技术的相关资料调研的基础上,采用大型岩土工程数值计算软件,分析工作面端头及顺槽超前支护段的应力场规律,掌握工作面端头及顺槽单体支柱支护时的矿压规律,为端头及顺槽超前液压支架的研制提供依据。之后运用有限元软件对综采、综放工作面端头及两顺槽超前液压支架的结构进行力学计算,以确定相关技术参数。由易到难研制综采、综放工作面端头及两顺槽超前支护系列液压支架,包括研制适用于简单条件的 ZT9800/16/30 型综放工作面实体煤运输顺槽端头液压支架,为简易式两架一组(前、后架形式)前后迈步端头支架,由两组单独支架组成,支架由四连杆机构稳定水平位移,适用于条件相对简单的实体煤运输顺槽端头支护,端头支架工作阻力为 9800kN,支护长度 14000mm,前架高度为 1.8~3.5m,后架高度为 1.6~3.0m;研制支护强度较高的 ZT24500/18/35 型综放工作面实体煤运输顺槽超前液压支架,为在 ZT9800/16/30 型支架基础上的改进,提高了支架工作阻力、扩大支护空间,仍为两架一组形式、前后迈步移架方式;研制应用于沿空轨道顺槽的 ZT83200/19/35 型综放工作面端头及沿空轨道顺槽超前液压支架,主要由金属构件、执行油缸和液压控制元件三大部分组成,结构形式为三架型六组合,包括端头第一架四柱支撑掩护式支架 1 架、端头第二架两架一组支架 1 架、端头第三架两架一组支架 3 架和端头四柱垛式锚固支架 1 架,既提高支护强度,又适宜于综放工作面端头及沿空轨道顺槽的超前支护,实现左右交替迈步式自移;研制适用于复杂条件的 ZT103500/22/38 型综放工作面端头及沿空轨道顺槽超前液压支架,结构形式为四架型八组合,包括端尾支架 1 架、端头支架Ⅱ1 架、端头支架Ⅱ2 架、超前支架 3 架和锚固支架 1 架,除端尾支架为支撑掩护式以外,其余支架均为两架一组架型,互换性提高,不仅提高支护强度,还适宜于综放工作面端头及沿空轨道顺槽的超前支护,尤其是扩大支护断面后,对大断面、大变形、应力场复杂且应力水平高的综放沿空轨道顺槽的控制效果更加明显,结构性能更趋完善,为左右交替迈步式自移方式,可以适用于最困难条件的综放端头及沿空轨道顺槽超前支护,沿空轨道顺槽的断面规格为大断面,其上净宽 4600mm、下净宽 5000mm、净高 3500mm。最后通过现场工业性试验方法评价综采、综放工作面端头及两顺槽超前液压支架的应用效果,形成工作面端头及顺槽超前液压支架支护的成套技术^[3]。

第二章 矿山压力与岩层控制理论

第一节 上覆岩层运动规律研究

一、采场上覆岩层的结构

关于回采工作面上覆岩层的活动规律,有许多传统理论及假说,如砌体梁理论、传递梁及板的理论等,其目的都是为了研究上覆岩层的活动对支护体的影响、支架-围岩关系,这些传统理论都是从单一长壁开采的基础上发展起来的,随着放顶煤开采技术的大范围应用,放顶煤开采的矿压研究也有了很大的发展。采场内的一切矿压显现都要受到基本顶活动规律的影响。长期以来,人们一直在讨论采场上覆岩层可能形成的结构,因为它直接涉及采场岩层控制的基本问题,如采场事故形成的原因、顶板压力的来源、采场支护原理及各项参数的确定、顶板来压的产生等。关于采场上覆岩层可能形成的结构,20世纪20年代以来就以各种假说形式被提出来,用以解释各种矿山压力现象,其中有代表性的假说有压力拱假说、悬臂梁假说、铰接岩块假说和预成裂隙假说。早在20世纪60年代初,钱鸣高、李鸿昌就开始研究断裂岩块间的力学关系,在总结铰接岩块假说和预成裂隙假说以及对岩层内部移动进行现场观测的基础上,20世纪70年代末80年代初,钱鸣高等率先建立了采场裂隙带岩体的砌体梁结构模型,从而发展了上述有关假说。随着研究工作开展,砌体梁理论不断得到深化和完善。砌体梁理论的核心就是认为在直接顶上方的基本顶岩层内将会形成一定的结构。满足一定的条件后,该结构实现稳定并表现为一种动态的方式。结构-直接顶-支架以一定的方式实现信息传递,形成力的相互传递。支架对围岩的作用是被动的,结构对支架的作用是主动的,这种支架-围岩关系也是最优的,相反就会减少支护效率。之后,钱鸣高与朱德仁等在砌体梁假说基础上,继续研究岩板的受力破坏机理,提出了夹持于弹性基础边界的岩板力学模型,研究了它的破断线分布,建立了基本顶破断与来压预报的理论基础和预测控制方法,并指出了基本顶对直接顶稳定性的影响,从而推进和完善了对安全生产有重要影响的端面冒落机理的研究。对于综放开采,钱鸣高院士认为:由于综放开采一次采出煤厚大于分层开采,因而形成稳定的砌体梁结构岩层的高度必将高于分层开采;不仅直接顶(包括顶煤)的厚度要大于分层开采,而且其结构的损伤破碎程度加大。根据综放采场围岩-支架整体力学模型中各单元的受力状态和结构特性,可将其简化为相应的受力体,基本顶为刚体,在整体力学模型中起主动作用;直接顶可简化为损伤或破碎体。与此同时,我国学者宋振骐提出了“传递岩梁”力学模型。该假说认为,基本顶岩梁对支架的作用力取决于支架对岩梁运动的抵抗程度,可能存在“给定变形”和“限定变形”两种工作方式。当支架在“限定变形”状态下工作时,来压时的顶板运动受到支架阻力限制,来压结束时岩梁不可能沉降至无阻碍最终沉降位置(最低

位态), 采场实际的顶板下沉量将小于“给定变形”条件下的最大顶板下沉量。此时, 支架受力大小由限定的岩梁位态(用对应的采场顶板下沉量表示)决定, 而与支柱的刚度无关。

20 世纪 80 年代钱鸣高院士总结的铰接岩块和预成裂隙假说, 分析了大量采场矿山压力及岩层移动观测资料, 提出了采场上覆岩体结构的“砌体梁”力学模型, 以及宋振骐院士提出的“传递岩梁”力学模型, 共同在宏观上建立了单一煤层(或厚煤层分层)开采采场上覆岩体的整体结构模型, 并对砌体梁的力学平衡条件、失稳形式以及支架与围岩的相互作用关系进行了深入的研究, 从而使采场上覆岩体结构模型的假说得到了进一步的发展。这些学说对我国采矿界的矿山压力理论研究及生产实践起到了重要的指导作用, 尤其是砌体梁力学模型以及对此进行的平衡条件、失稳形式等的力学分析, 为支架与围岩相互作用关系的研究奠定了理论基础^[4-7]。

二、大采高工作面上覆岩层活动规律

从引进大采高综采开采技术以后, 我国煤炭行业的科技工作者就开始了大采高开采技术与工艺的研究。中国矿业大学何富连等人对大采高液压支架倾倒特征与控制进行了一定的研究; 姜学云对大采高综采端部底煤的留设进行了分析和计算; 李鸿昌教授在研究了大采高支架的合理工作阻力和大采高综采的片帮冒顶等问题后认为, 随着采高的增加, 必须相应地提高支架初撑力及合理工作阻力, 提高的程度应考虑顶板岩层的组成情况, 防止煤壁片帮是松软煤层大采高综采的关键问题之一。弓培林博士认为: 覆岩的垮落断裂受关键层的特征、层位及分布的控制, 在不同采高时“三带”范围的确定应根据关键层的特征确定, 当一次性开采高度小于 3m 时, 垮落带高度符合经验公式的近似分式函数关系, 当一次性开采高度大于 3m 时, 垮落带高度大于相同煤厚分层开采时的垮落带高度^[7]。

第二节 矿山压力与岩层控制研究现状

从 20 世纪 60 年代至今, 我国矿山压力与岩层控制理论得到了长足的发展。对回采工作面、各种巷道进行了大量的观测, 对工作面以及采前、采后支承压力显现规律有了一定的了解, 完善和发展了实验室研究方法和手段, 提出了各种矿山压力理论, 为支架参数确定、工艺选择、巷道布置、煤柱尺寸确定等起到了良好的作用。在理论研究方面, 除了继续应用连续介质力学方法研究与矿山压力及岩层控制有关的问题外, 又发展了考虑岩石真实特性的各种矿压理论研究。对在不同地质条件下出现的矿压显现规律和岩层控制特点进行了研究, 提出了新的理论和岩层控制方法, 为顺利实现回采创造了条件。

随着放顶煤开采在中国的迅速发展, 在实践中发现, 由于放顶煤开采支架上方面对的是相对松软的煤层, 使得综放开采的矿压显现规律和岩层控制特点与一次采全高时有较大的不同。中国对放顶煤开采的矿压显现规律、顶煤破碎规律、顶煤冒放性、支架-围岩关系进行了深入的研究, 对放顶煤安全、高效生产提供了保证。对神东、平朔等煤田浅埋深煤层的特点, 提出了浅埋深煤层的定义, 总结了浅埋深煤层的矿压显现特征, 指出其顶板基岩沿全厚切落, 基岩破断角波及地表, 来压期间有明显的顶板台阶下沉和动载现象, 工作面覆岩分为冒落带和裂隙带等特有的规律, 并给出判断标准和岩层控制方法。对坚硬顶

板基本顶初次来压和周期来压十分强烈、并且具有较强烈的冲击载荷的情况,提出了煤柱支撑法、矸石局部充填法、水沙充填法、工作面步距爆破放顶法、采空区爆破法、超前工作面深孔爆破法、超前工作面高压注水法等,取得了较好的社会、经济效益。在大倾角条件下进行回采的工作面数量的增加,也使科研人员认识到,大倾角工作面矿压显现具有明显的不对称性。由于受地质条件的影响,采空区矸石的滑落和工作面设备在自身重力和顶底板运动作用下产生的下滑和倾倒,导致岩层控制和回采工艺的完成更具复杂性。通过实践认识到,在大倾角工作面岩层控制技术中,设备的防倒、防滑是大倾角工作面顺利实现回采的关键。在进行充分研究的基础上,研制大倾角工作面成套设备以顺利实现大倾角煤层的高产、高效开采。对深井开采、大采高开采、“三下”开采、“三软”开采等各种地质条件下各种采煤方法的矿压显现和岩层控制都取得了突出的成果,为各类复杂条件下顺利实现回采创造条件。相应地,各种矿压理论、实验研究方法和手段不断完善,矿压监测仪器、仪表实现了直观、轻便、小型化和数字化^[2]。

第三节 工作面顶板破断的力学分析

一、采场开挖过程的顶板损伤特点

采场基本顶破坏的实质是不断开挖下的渐进破坏过程,岩石作为一种含有裂隙等缺陷的天然损伤材料,由于裂隙和缺陷的扩展是不可逆的,岩石具有明显的记忆特性,这种工艺过程对研究采场基本顶破断机理非常重要。例如神东矿区浅埋煤层工作面来压剧烈,发挥现代化采支设备的效能就应该从符合开挖工艺的分析手段入手仔细研究顶板破断机理。采场开挖工艺过程的主要特点是分步开挖引起的损伤积累,顶板的破断形态和垮距将受这种工艺过程的明显影响,浅埋煤层的顶板稳定性主要取决于基本顶关键层的稳定性。因此,研究重点就在于认识顶板关键层的破断机理。

对岩石微观破断机理的认识有助于正确理解基本顶关键层的破坏和失稳机理。岩石损伤力学的研究表明,从工程意义上说,岩石是脆性材料,几乎不存在宏观塑性变形。造成岩石(体)弹性和非线性变形的的主要和直接原因是:在岩石中原始微裂纹重新张开和扩展,在岩石中的微缺陷及局部应力集中导致的次破裂,与局部拉伸裂纹相伴的裂纹摩擦滑移。因此,顶板岩层破坏从微观上讲属于张拉破坏,则岩体损伤的主要因素可以认为是拉应力引起的裂隙扩展。对基本顶关键层宏观破坏过程和形态的研究,应当重视顶板岩体裂缝的起始位置与扩展方向对顶板破断形态的影响。

二、工作面顶板初次破断机理

采场岩体作为天然材料,是一种自然损伤体,随采空跨度的增加,顶板岩层中部下侧的拉应力区向开切眼侧发育,这是因为岩梁自开切眼侧逐渐向工作面煤壁延长,岩梁的中部是从开切眼侧逐渐向工作面侧发展,而基本顶中部点经历了一个反复受载累积损伤的过程。当岩梁长度接近极限跨距时,岩梁下部拉应力破坏区向上发展,使岩梁有效厚度变厚,在剪切作用下发生剪切破坏,破断点应靠近切眼侧,呈前长后短的非对称性。岩石力学研究认为岩体基本上属于非抗拉材料,岩石损伤力学的研究也发现岩石的微观破坏为拉

破坏。

三、工作面基本顶周期性破断机理

基本顶在经过初次破断后，由原来的固支岩梁变为一端悬空的悬臂岩梁，岩石的受拉破坏机理以及这种岩梁的形式，决定了基本顶的周期破坏形式，应该是随工作面的推进在工作面前方煤壁内某处形成达到抗拉强度时的拉应力后，再随工作面推进而逐渐使该处拉裂隙由上向下贯通到煤层，等待工作面煤壁推到此位置下而发生周期性破断^[4,5,8,9]。