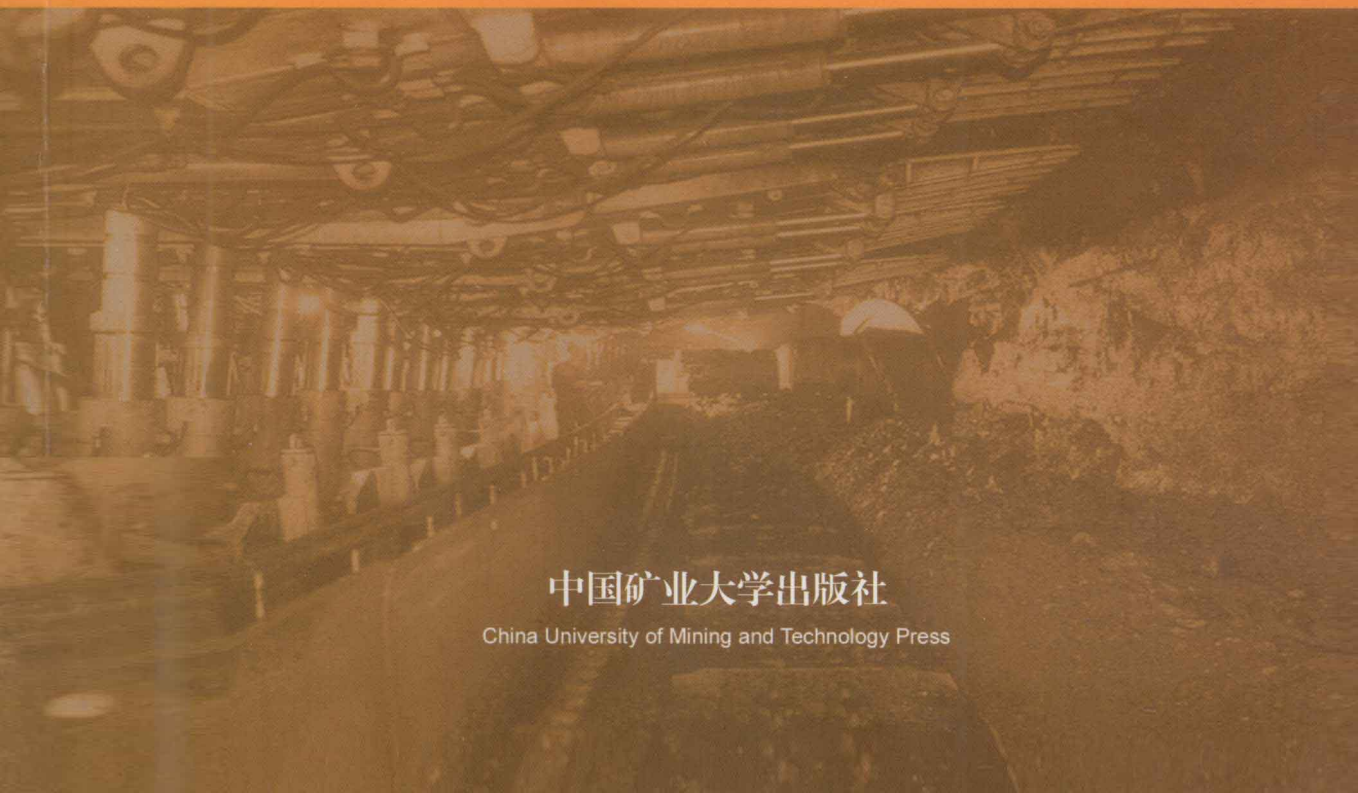


yan Jiegou Wendingxing Jiqi Kongzhi Jishu

采场围岩结构 稳定性及其控制技术

贾双春 朱建明 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

采场围岩结构稳定性及其控制技术

贾双春 朱建明 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书以山西省潞安集团王庄煤矿多年来在大采高综放工作面、端头区和沿空掘巷三个方面出现的技术难题为对象,采用现场观测、室内实验、理论分析和数值计算相结合的研究方法,提出了大采高工作面、端头区和窄煤柱沿空掘巷围岩大小结构稳定理论体系和关键参数确定方法。大采高工作面围岩稳定大结构为顶板基本顶岩梁,小结构为工作面煤壁和工作面支架;端头区大结构主要为端头区弧形三角板,小结构为端头支架;窄煤柱沿空掘巷围岩大结构为上区段基本顶断裂岩梁,小结构为窄煤柱和巷道支护体系;在分析上述大、小结构理论体系的基础上,提出了具体的控制技术。本书对指导厚煤层大采高综放工作面等类似工程条件下的安全高效生产,具有十分重要的理论意义和工程应用价值。

本书是一部系统研究如何解决大采高综放面生产过程中出现的难题的专著,研究内容丰富,实践性强,可供采矿、地质、安全、地下工程等相关专业的现场工程技术人员、科研人员 and 高校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

采场围岩结构稳定性及其控制技术/贾双春,朱建明著. —

徐州:中国矿业大学出版社,2012.7

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1524 - 6

I. ①采… II. ①贾… ②朱… III. ①围岩稳定性—安全控制技术 IV. ①TD325

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 140927 号

书 名 采场围岩结构稳定性及其控制技术

著 者 贾双春 朱建明

责任编辑 杨 洋

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 787×1092 1/16 印张 12.75 字数 312 千字

版次印次 2012 年 7 月第 1 版 2012 年 7 月第 1 次印刷

定 价 60.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

序

采场围岩结构稳定性及其控制技术是煤矿开采中重要的研究课题,本书以潞安集团王庄煤矿大采高综放工作面为实际工程背景,分别从采场顶板围岩结构、沿空掘巷围岩结构、端头区围岩结构三个方面的稳定性出发,提出了采场围岩大、小结构稳定性的概念和行之有效的围岩控制技术,并将上述结构稳定性控制技术应用到王庄煤矿具体实际生产中。

首先,将采场工作面顶板基本顶岩梁结构视为采场工作面围岩结构中的大结构,工作面支架和煤壁视为小结构。以砌体梁结构理论为基础,研究了基本顶断裂时的初次和周期来压步距计算公式,分析了采高、煤体强度等因素对岩梁大结构稳定性的影响,并应用该方法指导了王庄煤矿大采高综放工作面支架选型以及厚煤层一次采全高工作面煤壁稳定性及支架等小结构的设计,有效地保证了王庄煤矿大采高工作面安全高效生产。

其次,提出了综放沿空掘巷的围岩大、小结构确定方法,以邻近区段基本顶断裂岩梁为沿空掘巷围岩的大结构,煤柱中的核区和支护体系为巷道围岩小结构。基于上述大、小结构,建立了沿空掘巷窄煤柱核区计算方法,并结合现场实测和数值模拟分析,为王庄煤矿多年来一直使用的沿空掘巷提供了理论依据。

最后,针对综放工作面端头区提出了以基本顶形成的弧形三角板为端头区的大结构,端头支架为端头区的小结构,依据保证大、小结构稳定的方法设计了适合王庄煤矿特点的端头支架。该方法显著提高了王庄煤矿工作面煤炭回收率。

本书从大、小结构稳定性来研究采场工作面、区段巷道和端头区围岩稳定性,并将该方法成功地应用到王庄煤矿大采高综放开采工作面设计生产中,确保了王庄煤矿多年来安全高效生产,是一本理论联系实际及现场生产实践经验总结的著作,对类似矿井进行厚煤层安全高效生产具有重要的指导价值。

中国矿业大学教授
中国工程院院士



2012年6月于北京

前 言

我国厚煤层储量丰富,约占煤炭探明储量的45%,而每年地下开采的厚煤层产量占全国煤炭产量的40%~50%,因此厚煤层的合理开采对我国煤炭企业的生产和经济发展具有极其重要的影响。近年来采矿业快速发展,大采高综放开采已成为我国厚煤层的主要开采方法,但随着工作面采高增加,容易引发煤壁片帮、端面漏冒及支架失稳等现象。同时,厚煤层沿空掘巷也是目前大采高综放开采区段巷道布置的主要形式,目前已在潞安、兖州、内蒙古等煤矿中广泛使用。由于沿空掘巷围岩所处的特殊应力环境,决定了沿空掘巷与一般巷道无论在所受荷载、变形特征、围岩结构稳定、支护手段等方面都存在较大差别,其区段巷道和端头支护一直是困扰该类开采的技术难题,因此,研究厚煤层大采高综放开采工作面、端头区、沿空掘巷等围岩稳定性及其控制技术,是确保大采高综放开采方式成功实施的关键。

本书以山西省潞安集团王庄煤矿为工程背景,以大采高综放开采在工作面、端头区、窄煤柱沿空掘巷等方面遇到的技术难题为出发点,采用现场调查、室内试验、理论分析、数值模拟计算以及方案实施效果观测等综合手段,解决了在上述生产过程中出现的关键技术问题,实现了王庄煤矿在大采高综放开采技术方面一直处于全国领先水平的目标,被称为“中国煤炭工业战场的一盏明灯”。

在编写本书过程中得到了中国矿业大学(北京)王家臣教授的指导和帮助,王家臣教授并认真地审阅了本书的初稿。同时,王庄煤矿各位同仁以及中国矿业大学刘长友教授、北京科技大学高谦教授、煤炭科学研究总院安全分院李绍臣博士等对本书的部分研究工作提供了帮助和指导,在此一并表示衷心感谢,并对研究生彭新坡、马中文、赵沙沙、杨冲、吴则祥、江汪龙等付出的辛勤劳动也

表示由衷的谢意。此外,本书的研究工作还得到了兄弟科研院校其他科研人员的支持和帮助,并参考了相关的项目研究报告以及文献资料,在此谨向其他科研人员和文献作者表示衷心的感谢。

大采高采场围岩结构稳定及其控制技术研究一直是采矿工程中的研究热点和难点,由于作者水平所限,书中难免有不妥之处,敬请广大读者批评指正。希望本书的出版能够起到抛砖引玉的作用,为实现我国煤炭企业的安全高效生产作些贡献。

作 者

2012年6月

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	2
1.3 大采高综放开采在王庄矿的应用	10
1.4 大采高综放开采的主要技术问题	11
1.5 研究思路	12
2 大采高工作面围岩大、小结构及其稳定性	13
2.1 大采高工作面顶板围岩大、小结构概念	13
2.2 工作面顶板矿压显现规律分析	14
2.3 本章小结	22
3 大采高工作面矿压显现规律与支架适应性研究	23
3.1 大采高综放工作面基本情况	23
3.2 工作面顶板活动规律	25
3.4 大采高综放支架的承载特征及适应性分析	39
3.5 一次采全高工作面煤壁稳定性研究	44
3.6 一次采全高工作面支架选择及三级护帮结构设计	56
3.7 本章小结	60
4 综放开采沿空掘巷大、小结构及其稳定性	61
4.1 综放开采沿空掘巷力学特性	61
4.2 综放开采沿空掘巷大、小结构概念	62
4.3 大采高综放工作面概况	63
4.4 综放开采沿空掘巷围岩大结构稳定特征	65
4.5 沿空掘巷围岩小结构稳定特征	69
4.6 沿空掘巷围岩小结构关键参数确定	70
4.7 本章小结	71

5 大采高综放面沿空掘巷窄煤柱核区稳定分析	72
5.1 大采高综放面窄煤柱变形破坏机理	72
5.2 沿空掘巷窄煤柱极限核区稳定理论	75
5.3 沿空掘巷窄煤柱塑性区宽度计算	80
5.4 王庄矿大采高综放面窄煤柱宽度计算	81
5.5 大采高综放面窄煤柱宽度优化分析	81
5.6 本章小结	94
6 窄煤柱巷道支护方案设计及其实效效果分析	95
6.1 窄煤柱巷道围岩稳定性的数值模拟	95
6.2 锚杆支护下巷道变形分析	97
6.3 单侧注浆加固下巷道变形分析	102
6.4 双侧注浆加固下巷道变形分析	109
6.5 三种支护方式下巷道变形分析	114
6.6 沿空掘巷围岩注浆岩体物理力学性质测定	118
6.7 锚注支护技术实施方案	121
6.8 沿空掘巷围岩支护效果矿压观测	126
6.9 本章小结	131
7 综放开采端头区围岩大、小结构及其稳定性	132
7.1 端头区围岩大结构概念	132
7.2 大采高综放面端头区顶板断裂特征	132
7.3 综放开采端头区顶板结构形态	133
7.4 综放面端头区覆岩结构模拟分析	134
7.5 大采高综放面端头区顶板稳定性分析	139
7.6 综放开采端头区弧三角板形成条件分析	142
7.7 本章小结	143
8 综放开采端头区顶煤损失现状分析及端头支架设计	144
8.1 综放工作面地质条件	144
8.2 综放开采工作面端头区顶煤损失分析	146
8.3 端头支架设计	147
8.4 端头支架性能及其参数分析	152
8.5 大采高综放工作面新型端头支架研制	157
8.6 侧向自移式端头液压支架的配套与应用效果	160
8.7 本章小结	162

9 大采高综放工作面安全生产及效益分析	163
9.1 工作面瓦斯治理关键技术研究	163
9.2 工作面综合防尘技术	170
9.3 回风巷超前维护循环支移系统研究应用	175
9.4 大采高综放面煤炭采出率分析评价	182
9.5 本章小结	182
 10 主要结论.....	 184
 参考文献.....	 186

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

经济的发展和生产是建立在能源生产的基础上,同时,煤炭工业也是关系我国经济命脉的重要基础性产业,支撑着国民经济的持续、快速、健康发展。根据已探明地质情况分析,我国是一个煤炭资源丰富而油气资源相对短缺的国家,因此,长期以来形成了以煤为主的能源生产和消费结构。同时,我国厚煤层储量丰富,约占煤炭探明储量的 45%,而每年地下开采的厚煤层产量占全国煤炭产量的 40%~50%,因此厚煤层的合理开采对我国煤炭企业的生产和经济发展具有极其重要的影响^[1,2]。

近年来采矿工业快速发展,大采高开采工艺已成为厚煤层回采工艺发展的重要方向。大采高一般认为大采高割煤高度应大于 3.5 m(厚煤层定义的下限),大采高综采可定义为割煤高度大于 3.5 m 的综合机械化开采。大采高综采技术自 1978 年引进到我国以来,伴随大采高综采开采装备能力的提高,在大采高开采方面取得了一定的成绩,大采高开采理论也有了长足的发展和完善^[3,4]。

由于厚煤层资源在我国广泛分布,而且厚煤层是我国实现安全高效开采的主采煤层,具有资源储量优势。目前,我国厚煤层开采主要形成了分层、放顶煤、大采高 3 种开采方法各具特色的局面。随着煤炭开采技术的不断发展,近年来放顶煤开采和大采高开采技术得到了快速发展和广泛应用,并取得了安全高效的效果,例如:

位于山西省长治市的潞安集团王庄煤矿于 1966 年建成投产,为潞安集团特大型机械化生产矿井,目前实际生产能力超过 700 万 t/a。该矿主采下二叠系山西组 3[#] 煤,煤层厚度 5.72~7.79 m,平均 7.14 m,煤层倾角 3°~7°,现在的采煤方法主要为综采放顶煤一次采全高,是我国典型的特大型安全高效矿井,是煤炭行业的龙头企业。

位于陕北浩瀚的毛乌素沙漠中的大柳塔煤矿,埋深 50~60 m,采高 4 m。该矿井是神华神东煤炭集团有限责任公司所属的年产 2 000 万 t 的特大型现代化安全高效矿井,是神华神东煤炭集团有限责任公司最早建成的井工矿,位于陕西省神木县境内,该矿拥有井田面积 189.9 km²,煤炭地质储量 23.2 亿 t,可采储量 15.3 亿 t。

位于山东省兖州市的兴隆庄煤矿,于 1975 年开始兴建,1981 年投产。其主要可采煤层集中于一层,平均厚度为 8.29 m,设计年产量为 300 万 t。兖州煤业股份有限公司主要采用的综采放顶煤开采法就始于兴隆庄煤矿。

大采高开采与采高小于 3.5 m 的分层综采相比而言,主要有以下优点^[5-7]:① 工作面生产能力大,由于采用大采高综采技术,使得工作面单产能力得到提高,为矿井的集中生产提供了有力的开采条件;② 大采高综采技术使得工作面采区巷道布置简化,从而减小了工作

面采区巷道的掘进量和维护量,大幅度节约了工作面采区巷道的掘进成本和维护成本,实现了矿井的高效节能生产;③ 厚煤层工作面中采用大采高综采技术,减轻了由于放顶煤开采而造成的煤炭资源的高度浪费,实现节约式开采和工作面生产的高效高产,提高了煤炭资源回收率;④ 由于采用大采高综采技术,减少了工作面的搬家次数,也节省了工作面的人工假顶材料的使用,实现了矿井的成本节约。因此,基于上述优点,大采高综采技术在我国许多厚煤层矿井中得到了很好发展,并且取得了良好的经济效益和社会效益,使得该技术逐渐成为目前国内外厚煤层安全高效开采技术的重要的采煤工艺,也成为我国厚煤层综采的主要技术之一。

但是厚煤层工作面采用大采高综采技术之后,长壁工作面的垮落带高度将随着工作面采高的增大而增加,这导致了工作面垮落下的直接顶岩层将不能填满工作面后方采空区,从而在基本顶下方出现较大的空间,进而在工作面开采过程中引起强烈的周期来压。因此,也可以说,工作面采用大采高综采技术的基本顶来压比传统的分层开采更为剧烈,将导致工作面局部的冒顶和煤壁的片帮现象更为严重,出现煤壁片帮深度随着采高的增大而增加的规律^[8]。

大采高开采将会引起围岩充分垮落和岩层移动,因此研究大采高围岩结构稳定性及其控制技术是实现安全高效大采高开采需要研究的理论与技术难题。

综上所述,开展有关厚煤层大采高围岩结构稳定理论及其控制技术研究对于实现我国煤炭资源的安全高效开采具有重要的经济和社会意义。本书以潞安集团王庄煤矿为工程背景,对厚煤层大采高工作面岩层结构规律、综放工作面端头区、工作面回采巷道稳定性及其控制技术进行研究。采用理论分析、数值模拟以及现场测试的综合方法对大采高工作面岩层移动规律、综放工作面端头区结构稳定性、工作面回采巷道的变形破坏规律、受工作面回采影响下煤壁的弹塑性区位移、工作面回采护巷煤柱宽度留设尺寸以及采区巷道的保护治理方案进行系统有效的研究,为厚煤层大采高综采技术的安全有效的实施提供理论依据。因此,本书的研究工作可以为厚煤层大采高综放技术在我国煤炭开采领域的推广和发展提供重要的理论依据,同时对于减少工作面采区巷道的支护和维修成本、提高矿井的经济效益以及实现煤矿的安全高效生产具有重要的现实意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 大采高工作面回采技术使用现状

德国、英国、波兰等欧美国家以及亚洲的日本在 20 世纪六七十年代就开始采用并发展了厚煤层大采高综采技术,并取得了良好的经济效益。20 世纪 70 年代末,波兰在 7 个采煤工作面安装了 DOMA—25/45 型两柱掩护式支架,并设计开发了 PLOMA 系列两柱掩护式厚煤层大采高综采工作面支架。实践表明,这种两柱掩护式支架对于提高厚煤层综采工作面的生产效率具有很好的效果。20 世纪七八十年代的德国对于厚煤层大采高综采技术的发展起到了巨大的推动作用,其研发的贝考瑞特垛式支架、G550—22/60 掩护式支架使得采高提高到 6 m,并在维斯特伐伦煤矿取得了良好的使用效果。美国在 20 世纪 80 年代开始采用长壁大采高综放技术,初始采高为 4.5~4.7 m,取得了日产 6 200 t 的成功,为矿井的安全、高产、高效打下了坚实的基础;同时期的苏联,在 43 个煤矿采用厚煤层大采高综采或

综放技术,取得了良好的经济效益和社会效益。

以 1978 年首次引进德国 G320—20/37 型、G320—23/45 型等型号的大采高液压支架及相应的采煤设备为起点,我国开始了厚煤层大采高综放技术的使用及发展。1985 年西山矿务局官地矿首次使用国产 BC520—25/47 型支撑掩护式大采高液压支架;1987~1988 年东庞矿成功运用了与北京煤机厂合作研发的改进型 BY3200—23/45 型和 BY3200—25/50 型掩护式大采高液压支架。此外,2003 年神东矿区大柳塔煤矿、榆家梁煤矿以及补连塔煤矿等采用全套引进的大采高设备,取得了巨大的成功,大柳塔煤矿实现了 860 万 t 的年产量。经过广大科研人员以及一线生产单位的共同努力,我国的厚煤层大采高综采技术取得了长足的发展,在国内多个矿井使用,取得了良好的经济效益和社会效益。

1.2.2 大采高采场围岩稳定及其控制技术研究现状

1.2.2.1 上覆岩层运动规律

综放开采与薄煤层、中厚煤层和厚煤层分层综采及大采高综采岩层结构及“支架—围岩”关系的主要区别是开采空间与支护空间不一致。单一煤层开采时,支架直接支撑的是完整性较好的直接顶岩层,与煤体有明显的分界面,且两者的强度差异较大,由于一次采出的煤体空间较小,直接顶垮落后对采空区填充较充分,工作面上覆岩层垮落带及断裂带发展高度较小。综放开采时,直接顶与支架作用的是裂隙较为发育且整体性较差的顶煤,在支承压力作用下支架上方的顶煤逐渐破碎和垮落。随着顶煤的回收,采空区空间成倍增加,只有更高的垮落带才能维系整个采场岩体的平衡。由于岩层的分层垮落特征,原直接顶岩层垮落后不能充满采空区时,一定厚度的下位岩层将作为规则垮落带来弥补采空区充填的不足。

(1) 需控岩层的范围

仅对采场内部的顶板控制而言,放顶煤采场的需控岩层主要指直接顶和顶煤。由于顶煤的存在,基本顶的运动效应将被顶煤“弱化”,变为次要的控制对象。

(2) 顶板结构

在综放采场中,直接施加给支架载荷的传力介质是顶煤,而顶煤松软碎散、节理发育、稳定性差、流动性大,在前方支承压力的作用下垂直压缩变形并不显著,但水平膨胀破裂很明显。由于煤炭采出空间成倍增大,因此在直接顶垮落不能充满采空区的前提下,部分基本顶可能呈大块垮落来充填,从而使形成平衡顶板结构的层位增高。根据姜福兴教授的研究,综放采场存在“煤—煤”结构、“岩—矸”结构和梁式结构三种基本顶结构。

“煤—煤”结构是在支架上方未冒顶煤与采空区已冒顶煤之间的拱式平衡结构。“岩—矸”结构是指未垮落岩层与已垮落矸石挤压而成的半拱结构,随着放顶煤的进行,拱结构的位置是变化的。当煤层上存在大厚度坚硬岩层时,可能形成梁式结构,在梁式结构存在条件中,残煤厚度对基本顶和直接顶的相互转化起控制作用。

(3) 上覆岩层运动规律

根据前人研究成果,在采场上覆岩层运动过程中,根据各岩层运动性质的不同上覆岩层可以划分为三个部分:垮落带、断裂带和缓沉带。

① 垮落带——该部分岩层在采空区垮落,在采场由支架暂时支撑,在推进方向上不能始终保持传递水平力的联系。

② 断裂带——该部分岩层在推进方向上裂隙较发育,各岩层的裂隙已扩展到(或接近

扩展到)全部厚度。在采场推进过程中能够以“传递岩梁”的形式做周期性断裂运动,在推进方向上能始终保持传递水平力的联系。该部分岩层也是内应力场的主要压力来源。

③ 缓沉带——缓沉带的岩层在采场推进很长一段距离后才会开始运动,其运动缓慢,运动结束后在推进方向上形成的裂隙无论在数量上还是在深度上都比断裂带少且小。

根据前人的理论研究和相似材料模拟实验的结果表明,在采场推进过程中,采场上覆岩层中会形成一个压力拱。正是由于该压力拱的存在,使得工作面支架上所受的压力远小于采场上覆岩层的总重量,该压力拱的拱迹线为断裂带中各传递岩梁的端部断裂线和断裂带与缓沉带的分界线。垮落带和断裂带中已发生明显运动的岩层位于压力拱内,而断裂带中尚未发生明显运动的部分岩层及缓沉带岩层位于压力拱外。断裂带中覆岩运动的发展过程可分为两个阶段:第一次运动阶段和正常运动阶段,称为工作面初次来压和周期来压。

1.2.2.2 上覆岩层结构研究现状

在工作面开采过程中,由于煤层的采出使得工作面后方出现采空区,引起厚煤层上覆岩层的结构变化,从而导致工作面采区巷道出现矿压显现。因此,研究厚煤层大采高综放工作面上覆岩层的运动规律对于开展大采高综放技术的研究具有重要意义。许多学者对此进行了广泛研究,并取得了一定的研究成果。

(1) 压力拱理论

压力拱理论是由德国人哈克(W. Hark)和吉里策尔(G. Gillitzer)于1928年提出的。压力拱理论认为,由于采空区上方形成压力拱,上覆岩层的荷载只有一小部分作用在直接顶上,其他部分的上覆岩层荷载会向两侧的煤柱转移(图1-1)。

该理论说明了工作面支架所能承受的上覆岩层结构的范围是有限的,以及在工作面开采过程中,在采空区和煤壁上都形成了较大的支承压力。但是没有说明岩层变形、移动和破坏的发展过程以及围岩和支架的相互作用。

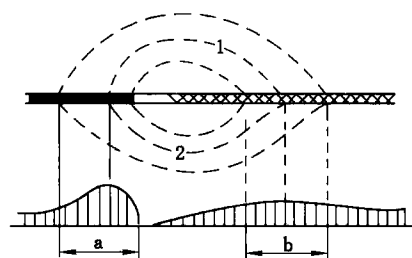


图 1-1 采煤工作面压力拱理论

1——顶板内压力拱轴线;2——底板内压力拱轴线;

a——前拱脚;b——后拱脚

(2) 悬臂梁理论

悬臂梁理论是德国的施拖克(K. Stoke)于1916年提出的,该理论将工作面及其采空区上方的顶板假设为一端固支,另一端悬伸的悬臂梁(图1-2)。如果岩层赋存条件中有几个岩层时,可以看成组合悬臂梁的形式,因此应用一般力学知识就可求得其断裂步距。该悬臂梁周期性断裂的特点与工作面周期来压特征一致^[9]。悬臂梁理论很好地解释了工作面出现的周期来压现象,但没有详细分析开采后上覆岩层结构活动的规律。

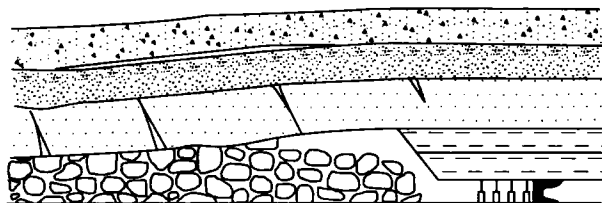


图 1-2 悬臂梁理论示意图

(3) 预成裂隙梁理论

预成裂隙梁理论是比利时学者 A. 拉巴斯于 20 世纪 50 年代提出,该理论认为由于开采的影响,工作面前方支承压力作用使上覆岩层的连续性不再存在,从而变为非连续岩层介质,在采煤工作面围岩附近存在三个影响区:应力降低区 I、应力升高区 II、采动影响区 III。如图 1-3 所示,随着工作面向前推进时,上述三个区域也不断地随工作面向前移动。

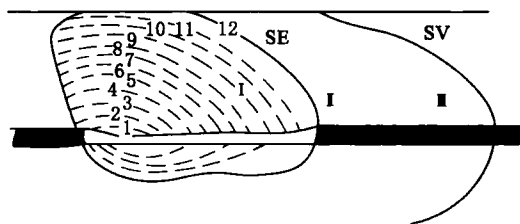


图 1-3 预成裂隙梁理论示意图

预成裂隙梁理论揭示了回采后岩层移动导致在煤层及其顶板岩层中受到超前支承压力作用而产生预生裂隙的机理,并提出了产生上述裂隙的主要原因。该理论的缺点是不能区分煤层赋存结构及开采条件、预生裂隙梁的范围无法界定等^[9,10]。

(4) 铰接岩块理论

铰接岩块理论是苏联学者库兹佐夫于 1950~1954 年期间提出的,根据直接顶岩层厚度与采煤工作面采高之间关系,得出了工作面回采后其上覆岩层受到破坏,形成具有不同特征的三带:① 不规则垮落带 M_1 ;② 规则垮落带 M_2 ;③ 断裂带 M_L 。如图 1-4 所示。

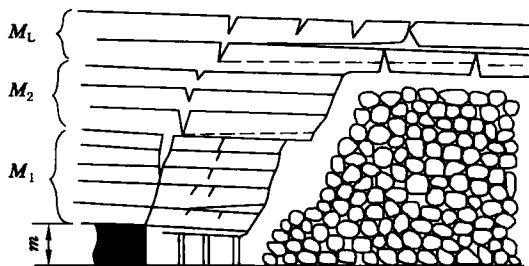


图 1-4 铰接岩块理论示意图

该理论认为 M_1 和 M_2 两带的高度是采厚、松散膨胀系数与垮落岩层厚度的函数。其中规则垮落带的岩块相互铰合形成一条多环节的铰链,规则地在采空区上面下沉。而垮落带

给支架的作用力必须由支架全部承担,而铰接岩块在水平推力的作用下,可能形成一个平衡结构,支架只承担铰接岩块部分重量。

该理论正确地阐明了工作面上覆岩层的分带特征,第一次提出了由于回采等原因导致围岩岩层移动,并在其移动岩层内部形成某种力学关系,并存在某种“结构”,初步揭示了回采工作支架与围岩的相互作用关系,从而为后来工作面支架设计提供了理论依据。由于上述理论,没有确立上述结构的铰接状态形成的力学条件以及岩层的具体范围,更没有对其结构进行力学模型化,建立支架与围岩之间的相互运动关系或某种定量评价^[9,10]。

(5) 砌体梁理论

砌体梁理论由钱鸣高院士于 20 世纪 70 年代提出。砌体梁理论是在总结铰接岩梁和预成裂隙岩梁理论基础上,并在总结大量生产实践及对岩层内部移动进行现场观测之后提出的。该理论较之前的岩层理论具有明确的力学模型和力学参数计算,为工作面支架设计和顶板管理提供了具体设计指导。

该理论提出了工作面上覆岩层结构由各个坚硬岩层构成,如果在上述每组岩体结构中存在软岩层时可以认为是上述硬岩层上的载荷。当工作面回采并在基本顶达到极限跨距时断裂,工作面上覆岩层破断后会下沉并相互挤压,从而岩块之间产生强大的水平推力,使上述岩块支架依靠摩擦力而相互咬合,形成外表似梁而实质是拱的砌体梁结构(图 1-5)。该结构具有滑落失稳和回转变形失稳两种失稳形式^[11-14]。

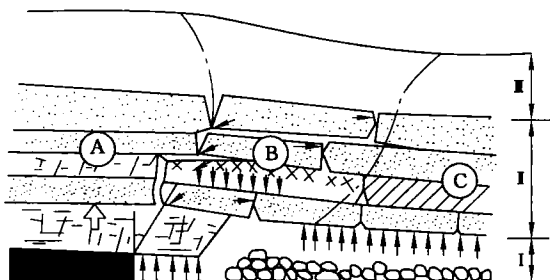


图 1-5 采场上覆岩层砌体梁结构示意图

(6) 板理论

贾喜荣教授根据工作面回采后岩层移动的空间关系,应用弹性薄板理论建立了采场薄板矿压理论。该理论将上覆岩层看成弹性薄板,在受到回采影响后出现薄板断裂,并以此建立了弹性薄板力学模型进行定量分析,依据上述理论模型并结合边界条件提出了基本顶断裂的来压步距和来压强度^[15]。

(7) 关键层理论

关键层理论的核心思想是:由于煤系岩层的成岩时间以及成岩的矿物组成成分的差异,在煤系岩层中形成了具有不同厚度和强度的岩层结构^[16-18]。对于其中的某些岩层,其具有较高的强度,在工作面采动过程中对上覆岩层结构的变形破坏起着主导作用,它们破断前以连续梁力学结构支承上覆岩层,破断后以砌体梁力学结构支承上覆岩层,并以砌体梁力学结构演化运动影响采场矿压、岩层移动和地表沉陷,这类岩层称为关键层^[19-23]。

关键层理论是由钱鸣高院士于 20 世纪 90 年代提出的。该理论是将采场矿压、岩层移动和地表沉陷三个方面研究内容形成了有机结合的纽带^[24],因此,自钱鸣高院士建立关键

层理论的初步框架^[25]以来,学术界以及工程应用界广泛关注。文献[26,27]分析了采动覆岩中关键层上部的载荷分布、下部的支承压力分布以及关键层的破断规律等一系列与关键层理论有关的基本原理。文献[28]分析了采动中关键层的复合效应。文献[29,30]将关键层理论研究成果应用到离层注浆、合理层位确定、地面瓦斯抽采钻孔布置设计及地下开采沉陷控制等方面,说明关键层理论有着非常广阔的应用前景。

张玉卓^[31]应用关键层理论研究了工作面开采后上覆岩层运动将导致中部层间脱开现象,并研究了产生上述岩层脱开的条件、发展过程、岩层结构与采矿条件的关系等。

1.2.2.3 端头区域理论研究及其应用

大采高综放面端头区域顶板受巷道掘进、回采超前支承压力作用、顶板被反复支撑等因素影响,加上要为了保护机头机尾设备提供较大的无立柱空间,使得端头区域顶板支护难度很大^[32,33]。工作面两侧为实体煤时,基本顶在端头部位的最大拉应力呈弧形正交迹线,弧形贯通的特征始终存在,使得端头基本顶存在一个带弧形斜边的三角形悬顶区(弧三角形结构),悬板结构的稳定性与相邻的工作面砌体梁结构稳定状态有关。由于砌体梁结构较大的旋转角和挤压力而破坏、失稳,在砌体梁结构的作用下,弧三角形结构自身也发生旋转、滑落失稳。基本顶初次破断之后,原先的弧形贯通特征仍然保持,致使弧三角形结构随工作面推进而前移,使得工作面端头维护空间经常处于弧三角形结构的保护之下,一般情况下顶板压力不大,周期来压特征不明显。随着工作面推进,破断的弧三角形结构逐渐失去煤体支撑,其稳定性降低,在采空区基本顶的作用下进一步旋转下沉,导致工作面后部的端头顶板旋转下沉而极难支护^[34-37]。

江光宏、尹士奎等通过弹性力学薄板理论对“弧三角悬板”极限跨距进行分析,认为若工作面顶板分层厚度和抗拉强度都较小时,不易形成“悬板”结构;若基本顶分层厚度和强度较大时,则易形成“悬板”。工作面上下巷道支护方式不同及顶板岩层的断层、裂隙、节理等因素都能改变“悬板”的破断位置和破断扩展方向,从而改变“悬板”的大小和形状^[38,39]。

李学华、邹向荣等对沿空掘巷弧形三角块稳定性进行研究,对弧形三角块参数进行分析,认为三角块在工作面倾向侧的断裂位置位于巷道侧煤体的支承压力弹塑区交接处,主要受直接顶厚度、直接顶力学性质、采深、煤层的力学性质和采高等因素影响,通过对断裂后的三角块结构进行受力分析来选择合适的沿空掘巷位置与支护方式^[40-42]。

在端部支护方面,工作面端头区域受采动影响明显,处于工作面走向与侧向支承压力叠加处,加上巷道掘进时产生的围岩破坏,到回采时端头区域已产生较大的围岩破坏和变形。端部支护主要有以下四种支护方式:

① 单体液压支柱端头支护方式——该方式以单体液压支柱配合八根工字钢梁支护为主体,同时,配套顶梁主要有金属十字顶梁、双楔顶梁、网状顶梁、铰接顶梁、Π型钢梁等。这种支护的强度和刚度一般情况下均能满足生产需要,控顶效果较好,有一定的适应性,具有结构简单、操作灵活、适应能力强等优点。但是,由于端头区域存在支护面积大、支护强度高、设备较多、人员往来频繁等特点,在顶板(顶煤)易破碎、压力大的情况下进行单体支柱的移架就存在安全性问题及支护效果不显著,而且单体支柱端头支护人工操作具有劳动强度大、安全性差的特点。

② 锚杆支护端头方式——工作面端头锚杆支护,可提高围岩强度,取得较好的支护效果,但仅适用于端头顶板相对较完整、顶板压力小的情况。

③ 普通液压支架或过渡支架端头支护方式——该支护形式在靠近回风巷道的上端头以及顶板完整、单一煤层一次采全高的下端头较适用,但下端头转载机机尾无法使用支架保护,仍需要设置长钢梁或铰接顶梁配合支护。对于顶板破碎、矿压显现剧烈的下端头,这种支护形式无法使用。

④ 端头液压支架支护方式——端头液压支架的种类很多,根据支架相对于巷道中心线的位置可分为中置(一主两副)和偏置(一主一副),偏置可以更好地利用巷道断面。根据配套情况,有与一般掩护式、支撑掩护式配套的,有与大采高、放顶煤液压支架配套的,也有和大倾角工作面配套的。

1.2.2.4 沿空掘巷窄煤柱稳定性研究现状

我国厚煤层占全部煤炭储量的45%左右,随着机械化程度的提高,大采高综采和综放已成为厚煤开采的主要方式,而沿空掘巷则是上述厚煤层开采巷道布置的主要方式。

我国自20世纪70年代后期就一直开展对工作面支承压力分布规律研究,如开滦、阳泉、平顶山等矿区的多工作面就开展了对工作面支承压力的系统观测,积累了大量的观测结果。

我国其他矿区,如丰城矿务局坪湖煤矿,开展了对工作面倾斜方向的支承压力观测,得出该矿(煤层条件为厚度2.4 m、倾角 20°)工作面沿倾斜方向距煤体边缘3 m范围内的煤体应力较小,应力峰值区位于距煤体边缘12~22 m范围内,支承压力影响的峰值位置距煤体边缘12 m。通过观测结果分析,工作面围岩支承压力峰值随着时间延长不断向煤体内部转移。

上述观测结果表明,工作面回采后在其倾斜方向上将产生支承压力,因此沿空掘巷存在两种情况:一是为了避开上述支承压力的影响,尽可能布置较宽的煤柱而避开上述支承压力的影响,以减少对布置巷道的影响;由于该方式布置巷道一般留设不少于20 m左右的煤柱,将造成大量的已经是回采储量的煤炭资源,严重影响煤矿企业的经济效益。二是在厚煤层开采中不少矿井采用另外一种方式布置巷道,即窄煤柱或无煤柱留巷方式;这种方式的最大好处就是克服了上一种方式造成资源浪费的不足,但按该方式所布置的窄煤柱所处的应力环境特殊,需要采取相应的技术措施才能取得好的效果。我国目前上述两种巷道布置方式在不同条件下都有比较广泛的应用,研究与发展水平也各具特色。

厚煤层综放开采沿空掘巷与中厚煤层和厚煤层分层开采一样,当采煤工作面回采后,在下一区段的煤体(柱)上将形成增压区、减压区、免压区。当厚煤层综放面采放后,由于大采高工作面采高大加上放顶煤开采,导致其工作面采后顶板垮落的矸石和剩余浮煤一般不能将采空区充满。根据基本顶岩梁的断裂规律,岩梁在煤体中断裂位置一般在8~15 m处,对于厚煤层大采高综放面由于工作面端头放煤率较低,上区段端头顶煤垮落后将给下沉的基本顶提供很好的垫层,从而减缓了基本顶下沉并在采空区边缘发生断裂,因而将在煤柱边缘一定范围内形成应力降低区(该范围一般在0~7 m),从而为沿空掘巷提供了条件;同时在上述顶板弯曲下沉、支承压力转移过程中,煤柱边缘的煤体被破坏,将形成一定厚度的破碎区,因此加强上述破碎区的支护,特别是锚杆注浆加固能够很好地提高上述破碎区围岩的强度,减少巷道围岩变形。

西安科技大学吴绍倩教授在对沿空掘巷矿压规律进行了深入研究^[43],国内许多院校和科研院所利用相似材料模型,进行了有关煤柱边缘支承压力分布规律的实验^[44-47]。通过相似材料模拟实验等方法,分析了工作面采深、采高以及顶板等力学参数对沿倾斜支承压力的影响,提出支承压力系数与上述参数的关系。