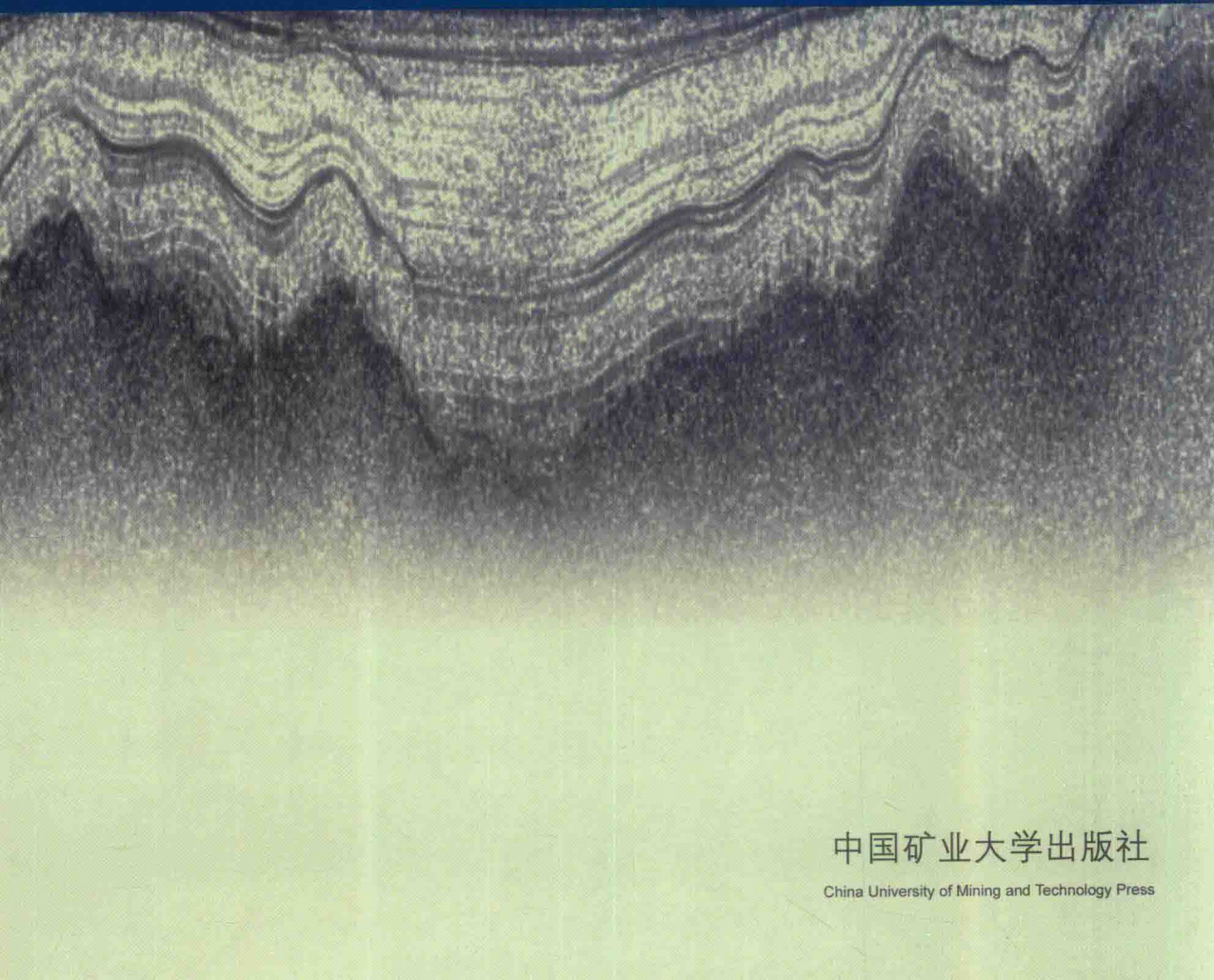


国家自然科学基金项目资助(50804013, 51274088, 51304065)

下保护层开采 上覆岩层结构演化与瓦斯运移规律研究

熊祖强 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金项目资助(50804013,51274088,51304065)

下保护层开采上覆岩层结构演化与 瓦斯运移规律研究

熊祖强 著



1747942



中国矿业大学出版社



内 容 简 介

本书综合运用理论分析、数值模拟、现场试验相结合的研究手段,研究了下保护层开采条件下上覆岩层结构演化与瓦斯运移规律。主要研究内容包括:下保护层开采上覆岩层结构分析、上覆岩层运动及破坏规律、下保护层开采覆岩裂隙时空演化规律、上覆煤岩体变形与卸压瓦斯运移规律、上覆煤岩巷道变形破坏规律及围岩控制研究、保护层工作面矿压显现规律。

本书可供从事采矿工程、安全工程及相关专业的研究人员、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

下保护层开采上覆岩层结构演化与瓦斯运移规律研究/
熊祖强著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2015. 8

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2827 - 7

I. ①下… II. ①熊… III. ①地下采煤—岩层移动—
研究 IV. ①TD823

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第209860号

书 名 下保护层开采上覆岩层结构演化与瓦斯运移规律研究
著 者 熊祖强
责任编辑 王美柱
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 江苏淮阴新华印刷厂
开 本 787×1092 1/16 印张 11.25 字数 281 千字
版次印次 2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷
定 价 38.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

煤炭,在我国国民经济发展中居战略性地位,随着煤炭资源的大量回采,浅埋深煤层已趋于殆尽,煤矿企业不得不向深部开采,深部开采中,煤与瓦斯突出煤层及其低透气性特征的解决已成为工程安全、顺利回采的关键。采取开采保护层保护煤与瓦斯突出煤层是一种经过实践检验的有效措施。本书在广泛借鉴前人经验的基础上,系统地对笔者的科研成果和工程实践进行了总结。

全书内容共分七章:第一章介绍了保护层开采的概念、保护层开采的适用条件、保护层开采国内外发展现状、保护层开采覆岩破断特征研究现状、保护层开采覆岩裂隙演化研究现状、煤层瓦斯卸压瓦斯抽采研究现状;第二章介绍了工程概况并对下保护层开采上覆岩层结构进行了分析,通过理论计算得出覆岩主、亚关键层、覆岩“两带”发育高度以及开采保护范围;第三章分析了上覆岩层运动及破坏规律,阐述了覆岩破坏类型与特征,通过钻孔深基点和钻孔电视技术得出覆岩运动规律,并对其进行数值模拟和相似模拟研究;第四章分析了覆岩裂隙时空演化特征,通过双端封堵测漏技术对覆岩破坏特征进行了分析,并对覆岩裂隙演化特征进行相似模拟实验、数值模拟实验以及数字化分析;第五章分析了上覆煤岩体变形与卸压瓦斯运移规律,通过井下和地表观测站对覆岩以及巷道变性特征进行了分析,并对上覆煤岩体应力演化和卸压瓦斯运移规律进行了阐述;第六章分析了上覆煤岩巷道变形破坏规律及围岩控制特征,通过实测数据分析了顶板下沉、底鼓变形、两帮移近特征,对回采过程中被保护层巷道支承压力进行了监测与分析,并对巷道进行了围岩控制设计同时进行了效果检验;第七章分析了保护层工作面矿压显现规律,通过矿压监测记录仪对初采阶段、正常回采阶段、末采阶段各个支架阻力进行监测并进行阻力变化特征分析。

本书内容丰富,理论性和实践性强,是一本集保护层开采技术经验和研究成果于一体的综合书籍,可供相关专业工程技术人员与科研人员参考使用。

本书在编写过程中参考了大量的文献和专业书籍,谨向相关作者深表谢意!

由于作者水平和能力所限,书中疏漏和不妥之处在所难免,敬请读者严加斧正,不吝指教为盼!

著 者

2015年7月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 引言	1
第二节 保护层开采研究现状	2
第三节 保护层开采覆岩移动破断研究现状	5
第四节 保护层开采覆岩裂隙演化研究现状	9
第五节 煤层卸压瓦斯抽采研究现状	10
第六节 晋煤集团保护层开采必要性和可行性分析	10
第七节 本书主要研究内容	10
第二章 下保护层开采上覆岩层结构分析	12
第一节 引言	12
第二节 工程概况	12
第三节 上覆岩层物理力学性质测试与分析	13
第四节 上覆岩层结构分析	20
第五节 上覆岩层破坏特征理论分析	23
第三章 上覆岩层运动及破坏规律	26
第一节 覆岩破坏类型与特征	26
第二节 保护层开采覆岩破坏及移动模型	27
第三节 钻孔深基点实测与分析	29
第四节 钻孔电视实测与分析	41
第五节 实验室模拟与分析	45
第四章 下保护层开采覆岩裂隙时空演化规律	53
第一节 引言	53
第二节 覆岩裂隙演化现场测试及分析	53
第三节 覆岩裂隙演化模拟实验测试及分析	64
第五章 上覆煤岩体变形与卸压瓦斯运移规律	69
第一节 上覆煤岩体结构演化规律	69
第二节 上覆煤岩体沉降规律	71
第三节 上覆煤岩体应力演化规律	85

第四节 卸压瓦斯运移规律	87
第六章 上覆煤岩巷道变形破坏规律及围岩控制研究	94
第一节 动压作用下巷道变形特征	94
第二节 动压条件下被保护层巷道支承压力监测与分析	111
第三节 巷道围岩控制分析及效果检验	117
第七章 保护层工作面矿压显现规律	124
第一节 监测设计	124
第二节 初采阶段支架载荷统计与分析	124
第三节 正常回采阶段支架载荷统计与分析	137
第四节 末采阶段支架载荷统计与分析	158
参考文献	169

第一章 绪 论

第一节 引 言

我国是煤炭资源/储量大国,煤炭作为一次性能源在我国能源结构中占有重要位置,是我国国民经济的支柱产业。我国也是煤炭产量大国,产量位居世界第一,2009年30.5亿t,2010年32.4亿t,2011年35.16亿t,2012年36.6亿t,2013年37亿t。预计到2020年,随着我国经济的突飞猛进,煤炭产量将达到48亿t,煤炭生产在我国经济发展中具有关键性地位^[1]。

伴随着煤炭产量连年增加的是煤矿瓦斯事故的频发,虽近年来我国加大了对煤矿瓦斯治理力度,瓦斯事故数量与伤亡人数呈下降趋势,但煤与瓦斯突出造成的重大事故仍难以遏制,防突工作依然非常艰巨。据统计,2001~2013年我国共发生煤与瓦斯突出事故426起,死亡2831人。

煤与瓦斯突出是煤矿五大灾害之一,也是煤矿最严重的灾害之一,它是破碎的煤与瓦斯由煤体内突然向采掘空间大量喷出,是一种由地应力、煤层瓦斯特征、煤结构特征综合作用的动力现象,通常发生在煤巷掘进和工作面回采过程中。

随着煤炭资源的大量采出,浅埋深煤层已趋于殆尽,不得不向深部延深,开采深度正在以每年8~12m的速度增加,开采深度的增加导致煤与瓦斯突出矿井增多,如何采取有效措施保证安全、高效生产是煤矿面临的首要任务。另外,我国煤层瓦斯储存在压力低、透气性低、吸附能力高的特点,给瓦斯抽采带来了巨大困难,经过多年的理论与现场实践表明:煤与瓦斯有共生关系,瓦斯只是在煤体被开采和围岩体在采动影响下变形、产生裂隙才会有运移(渗流、升浮、涌出、突出等)。由于我国瓦斯赋存“两低一高”的特点和经济因素,不能进行大规模有效的钻井抽采瓦斯,而应着力于煤层开采过程中煤岩体应力分布特征和裂隙演化规律及瓦斯运移特点,发展有效控制瓦斯运移技术^[2]。

目前,对于煤与瓦斯突出的防治按作用范围来分主要有区域性措施和局部性措施,区域性措施有保护层开采和预抽瓦斯。其中,保护层开采是防突最经济有效的技术措施。目前,对于有发生煤与瓦斯突出的国家,只要有保护层,基本都采取此措施。《防治煤与瓦斯突出规定》(2009)第四十条规定:“区域防突措施应当优先采用开采保护层。突出矿井首次开采某个保护层时,应当对被保护层进行区域措施效果检验及保护范围的实际考察。”《煤矿安全规程》(2011)第一百九十二条规定:“对于有突出危险煤层,应采取开采保护层或预抽煤层瓦斯等区域性防治突出措施。”第一百九十三条规定:“在突出矿井开采煤层群时,应优先选择开采保护层防治突出措施。”第一百九十八条规定:“开采保护层时,应同时抽放被保护层的瓦斯。开采近距离保护层时,必须采取措施严防被保护层初期卸压的瓦斯突然涌入保护层采掘工作面 and 误穿突出煤层。”这些措施,有保护层开采条件的,必须选择开采保护层,不能

单单只预抽煤层瓦斯^[3]。

所谓保护层开采,就是开采保护层(为消除邻近煤层的突出危险而先开采的煤层或岩层)后,保护层上下围岩向采空区移动,采空区上方岩体冒落并形成自然冒落拱,下方岩体向采空区膨胀并形成裂隙,被保护层中弹性潜能得以释放,岩石和被保护层的地应力降低;同时,被保护层透气性系数大大增加,有利于抽采瓦斯,降低煤层瓦斯压力;此外,还能改变被保护层的物理力学性质,增强煤体抗破坏能力,从而达到防止煤与瓦斯突出的目的。其首要目的就是卸压,在卸压基础上释放被保护层的压力,法国最先尝试保护层开采技术,成功地防治了突出,我国在1958年首次采用了保护层开采技术,并取得了成功,随后在全国进行推广,由于我国煤炭资源分布广阔,造就了煤层赋存条件的差异和保护层开采对防治突出作用规律的认识不足,因此,目前需要解决的问题主要是保护层开采引起的矿山压力重新分布及使煤岩体结构发生变化和覆岩裂隙演化分布特征与瓦斯运移规律^[2]。

第二节 保护层开采研究现状

一、保护层开采作用机理

大量实践证明,开采保护层是最经济、有效的区域瓦斯治理措施。《煤矿安全规程》第一百九十四条规定:“优先选择无突出危险煤层作为保护层。矿井中所有煤层都有突出危险时,应选择突出危险程度较小的煤层作保护层。”^[3]

保护层是预先开采的煤层或矿层,一般是煤层群条件下的首采煤层。保护层开采后,周围的煤、岩层发生移动变形,采空区上、下方的岩体向采空区膨胀变形。开采后,原始地应力重新分布,地应力向开采空间的周围转移,采空区上、下方煤岩体位于应力降低区。保护层开采后,除了在垂向会产生垮落带、裂缝带、弯曲下沉带外,在水平方向会产生卸压区、应力集中区和原岩应力区——“横三区”^[4],被保护层工作面应布置在应力降低区内。保护层保护作用机理如图1-1所示。

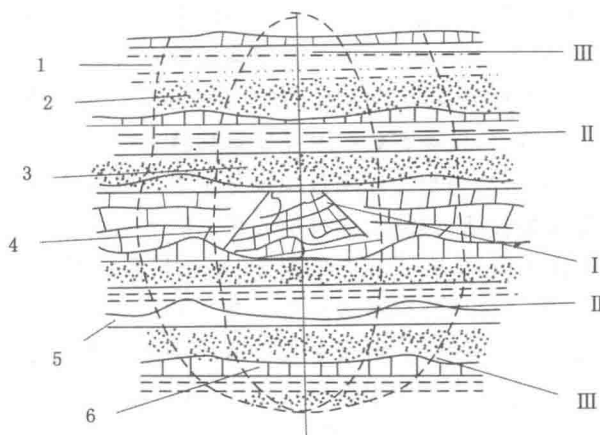


图 1-1 保护层保护作用机理示意图

I——破坏带; II——裂缝带; III——弯曲下沉带

1——正常应力带; 2——应力集中带; 3——卸压带; 4——裂缝带; 5——应力分布曲线; 6——卸压瓦斯运移

保护层开采后对周围的煤层和岩层产生采动影响,岩层间结构发生改变,卸压带范围内的煤岩层中产生大量的采动裂隙,一定距离内裂隙彼此贯通。当被保护层位于保护层开采后形成的裂缝带内时,采动裂隙与保护层采空区连通,形成被保护层解吸瓦斯的涌出通道,形成卸压瓦斯运移条件,煤层透气性得到大大提高,被保护层的卸压使瓦斯压力下降,提高了瓦斯排放能力,瓦斯不断涌出,煤体的力学强度得到相应提高。当被保护层与保护层间距较远时,采动裂隙不能发育至被保护层,此条件下被保护层瓦斯不会向采空区运移,保护层开采保护效果和保护范围需要考察。保护层开采后,被保护层的煤体力学强度、瓦斯压力、透气性系数等参数发生较大的改变^[5],被保护层突出危险性消除或有所降低。保护层开采消除煤层突出危险性机理如图 1-2 所示。

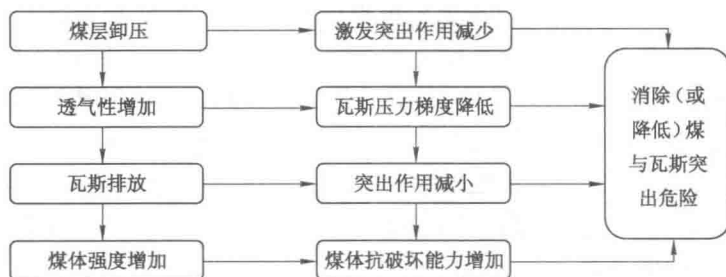


图 1-2 保护层开采消突作用示意图

袁亮院士^[6-7]针对不同煤层和瓦斯地质条件,探索出一整套“开采煤层顶底板卸压瓦斯抽采工程技术方法”,丰富与发展了煤与瓦斯共采理论。煤层卸压瓦斯抽采技术与保护层开采相结合,取得了较大的发展,形成了卸压瓦斯抽采技术。

当前保护层核心技术由被保护层的卸压作用和卸压瓦斯通过开采形成层间裂隙的自然排放,向被保护层的卸压作用和卸压瓦斯的强化抽采转化。

二、保护层开采分类依据

根据保护层与被保护层之间的垂直距离,于不凡^[8-9]将保护层开采定义为近距离、中距离和远距离保护层开采三类。具体定义为,近距离保护层层间距小于 10 m,中距离保护层层间距为 10~50 m,远距离保护层层间距大于 50 m。国内方面,重庆、铁法、松藻、淮南、鸡西等矿区在应用保护层开采时,层间距通常没有超过 50 m,相对层间距一般在 10~30 m,《保护层开采技术规范》和《防治煤与瓦斯突出规定》对保护层开采最大有效层间距作出了不超过 100 m 的规定^[10-11]。

国外方面,美国、俄罗斯、英国、德国、波兰、乌克兰、澳大利亚等,在采高为 1.3~2.0 m 的条件下,保护层开采的层间距最大均不超过 50 m,相对层间距一般不大于 25~30 m。根据统计数据,最大相对层间距德国为 37 m,乌克兰为 37.5 m,美国为 33 m,俄罗斯为 35 m,并建议最大层间距不宜超过 70 m。

程远平等^[12-15]通过分析保护层开采的作用机理和保护效果的主要影响因素,综合考虑煤层赋存条件、回采参数以及层间硬岩的影响,在反映保护层厚度与层间垂距的相对层间距基础上,构建了以当量相对层间距 R 为指标的保护层分类判定方法,将下保护层开采划分

为近距离、远距离、超远距离开采等三类,并提出相应的卸压瓦斯治理技术,见表 1-1^[16]。

表 1-1

下保护层开采分类情况表

下保护层分类	当量相对层间距/ R	被保护层层位	瓦斯抽采效率/%	卸压瓦斯治理措施
近距离	$R_{\min} < R < 20$	裂缝带中下部	> 70	需瓦斯抽采
远距离	$20 < R < 40$	裂缝带和弯曲下沉带边缘	> 60	需强化抽采
超远距离	$40 < R < R_{\max}$	弯曲下沉带	> 50	需强化抽采

国内外的许多相关研究成果均提出应根据保护层采厚、顶板控制方法、覆岩关键层位置、采煤工作面长度、开采深度等因素确定保护层开采最大有效垂距,但不同矿井煤层赋存条件的差异性导致保护范围的差异性,保护层的分类和判定方法始终不明确,大多仍根据《防治煤与瓦斯突出规定》提出的最大有效层间距对保护层的类型进行判定。随着以区域瓦斯治理为主方针的推行及卸压瓦斯抽采技术的发展应用,以往不具备开采保护层条件的矿区,开采层间距较大的煤层作为保护层是今后的发展方向。淮南、平顶山等矿区对超远距离保护层开采进行了积极探索。

三、保护效果与保护范围

保护层开采的保护效果主要体现在对被保护层卸压作用、裂隙发育和煤层渗透性系数的改变,其保护效果直接影响被保护层开采及被保护层卸压瓦斯抽采技术和施工参数的选择。

钱鸣高院士等采用相似模拟方法,研究煤层开采后上覆岩层中的裂隙分布规律,提出以离层率 F (岩层的膨胀变形率) 反映单位厚度岩层内离层裂隙发育情况。离层率 F 计算公式为:

$$F = (S_1 - S_2) / h$$

式中 F ——离层率, mm/m;

S_1, S_2 ——上、下岩层下沉量, mm;

h ——上、下岩层的层间距, m。

若 $F < 0$, 说明上下岩层发生了离层; 若 $F > 0$, 说明岩层受到压缩。

俞启香等通过保护层的开采试验, 得到当煤层的膨胀率为 $2\% \sim 3\%$ 时, 煤层将充分卸压, 其渗透率增大数十倍; 《防治煤与瓦斯突出规定》指出被保护层的最大膨胀变形率大于 3% 时, 则保护层的开采可起到良好的保护效果, 可以适用于其他区域。

王志亮等^[17]建立了保护层开采测评体系, 测评体系包括保护范围和保护效果两部分, 并选择淮南矿区应用评价指标深入分析保护层开采的实施效果。如图 1-3 所示。

判别保护层保护效果主要依据是采动影响对被保护层的卸压是否充分, 瓦斯抽采措施能否保证卸压瓦斯抽采效果达到《煤矿瓦斯抽采基本指标》的要求^[18]。其中, 卸压角是判断保护层开采后卸压范围的重要参数。胡国忠等^[19]利用数值模拟方法, 得出了保护层开采后围岩应力分布规律, 给出了保护层开采后在走向和倾向方向的卸压角。

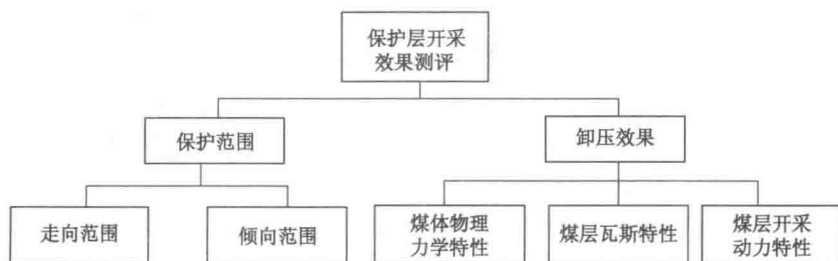


图 1-3 保护层开采效果测评指标体系

第三节 保护层开采覆岩移动破断研究现状

一、理论研究

国内外对于覆岩移动规律的研究起步均较早,早期主要是根据煤矿开采出现的一些现象提出假说来对生产中遇到的问题进行解释,最有名的假说主要有“压力拱”假说和悬臂梁假说^[20]。压力拱假说由德国人哈克和吉里策尔于 1928 年提出,此假说认为在采场上方由于岩层重新平衡而出现一个“压力拱”,压力拱一端位于采场前方的煤壁内,另一端位于采场后方冒落的矸石上,这样“压力拱”下方的工作面就处于应力降低区内,而在前后拱脚所在的位置会形成应力增高区,“压力拱”假说对采场矿压分布做了形象的解释,但对于岩层的移动破坏变形以及支架与围岩的相互作用并没有进行分析。悬臂梁假说是由德国人施托克于 1916 年提出的,此假说主要认为工作面上方的岩层可以视作梁,梁的一端固定在工作面前方的岩体内,另一端则在工作面后方呈悬伸状态,此假说形象地解释了工作面处顶板沉降较小、支架所承受支承压力较小以及工作面出现周期来压等现象,而对于覆岩的移动规律研究并不具体。20 世纪 50 年代初,库兹涅佐夫提出了“铰接岩块”假说^[21-24],不仅对采场覆岩中的移动带进行了划分,还对不同工作状态下的“支架—围岩”作用进行了分析。比利时学者 A. 拉巴斯提出了以假塑性梁为主要组成部分的“预成裂隙”假说^[25-26],认为在工作面开采过程中,上覆岩层由于受力导致内部产生各种裂隙,从而破坏了岩梁的连续性,岩梁产生类似假塑性体的塑性弯曲变形。

国内学者钱鸣高等,在总结了铰接岩块假说及预成裂隙假说并结合大量现场实测数据的基础上,提出了“砌体梁”结构模型,该力学模型将上覆岩层分成若干组,每组以坚硬岩层为底层,其上部软弱岩层可视为载荷作用在骨架上,此假说对于岩层破断的平衡方式及岩块间的咬合方式给出了解释,同时也对采场矿山压力显现给出了很好的解释。宋振骐院士则认为,上部断裂岩层之间的咬合可以将部分力传递到工作面前方煤壁及工作面后方采空区矸石上,因此,工作面支架无需承担岩梁运动的全部载荷^[27-28]。

二、实测研究

国内外对于覆岩破坏的理论亦进行了长期研究,并根据本国实际情况制定了一系列的技术规范,英国矿业局早在 1968 年就颁布了海下采煤条例,对覆岩厚度、组成、开采厚度以

及开采方法等作了具体的规定,规定要求,在用长壁开采垮落法控制工作面顶板时,上覆岩层的厚度不应小于 105 m,而利用房柱式采煤法时,允许的最小采深为 61 m^[29]。前苏联对于水体下采煤规定,有隔水层时,防水岩层的厚度可取 20~40 倍采高;没有隔水层时,则可根据覆岩中不同性质类型岩层所占的比例,取防水岩层的厚度为 20~60 倍采高。美国规定在水体下采煤时,安全采深为 60 倍采高^[30-35],同时美国还对煤柱回收提出了适合于特定水文地质条件的设计方案^[36]。南斯拉夫维伦杰褐煤矿在地表水体下采用垮落或分段垮落的长壁方法采掘上覆 500 m 第四系多含水层系统的褐煤层^[37],并取得成功。此外,日本也进行过海下采煤作业,一般从海底到开采煤层留设 100 m 的防水煤岩柱。

我国于 1985 年制定了《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》并在 2000 年进行了修订,规程给出了不同条件下导水裂缝带的发育高度计算公式。我国也进行了大量的水体下采煤试验,比如在渤海湾地区、微山湖下、淮河下均进行过成功的开采,积累了丰富的经验。

我国采矿工作者经过多年的研究,在对现场遇到问题进行分析整理后,形成了导水裂缝带预计公式及影响导水裂缝带发育因素的体系^[38-39]。目前,对于导水裂缝带的研究方法主要有经验统计法、类比法、数值模拟法、相似材料模拟法及现场实测法等。

三、研究手段

(1) 经验统计法和类比法

主要是靠以往监测数值,来判断采场的导水裂缝带发育高度。参考邻近矿井或是具有相似地质条件采场的监测数值来确定裂缝带高度,或是采用各研究部门根据不同地质条件总结出来的经验公式进行粗略估算。由于不同采场的覆岩特性各有特点,要找到完全相似覆岩赋存条件的煤层相对困难,采用该方法的误差较大,且采用经验公式进行计算,由于经验公式本身带有中误差数值,计算仅仅是一个很广的范围;另外,由于我国不同地区地质条件差异较大,再加上我国对于覆岩的分类不够细,导致不同地区利用相同经验公式误差较大,因此,该方法只能作为参考值。许延春^[40]等在对前人研究成果进行总结后,提出了利用覆岩岩体性质综合评价系数(P 系数)预计裂缝带发育高度。此方法考虑覆岩的岩性问题,并充分利用现代数学方法而得到,但是还没有得到推广。

(2) 数值模拟

数值模拟在当今的工程研究中得到了充分的应用,是一种随着计算机技术的发展而形成的算法。主要包括有限元法、边界元法、离散元法、有限差分法等。

有限元法^[41-43]可以解决一些经典力学无法解决的工程力学问题,它是基于最小总势能变分原理,能够有效地处理工程实践中复杂的施工过程,并能灵活地处理各种非线性问题,在现今工程实践中应用比较广泛的有限元数值模拟软件主要有 SAP5、ADINA、RFPA 等。

边界元法是求解边界问题的一种数值方法。它把边界问题转化为边界积分方程的计算问题,将边界划分为单元,对边界积分方程进行求解,从而得出边界处任一点的场变量。该种计算方法的主要缺点有,计算过程中未知数较多,并且在进行弹塑性和非线性分析时,为调整内部不平衡力,需要在计算域内进行单元剖分,此时边界元法就不如有限元法灵活。

离散元法是一种对不连续体的数值分析方法,它既能对块体受力后的运动进行模拟,又能对块体本身的变形进行模拟,是建立在牛顿第二定律的基础之上,以每个单元刚体运动方

程为基础,建立描述整个系统运动的显式方程组之后,根据牛顿第二运动定律和相应的本构模型,以动力松弛法进行迭代计算,可以形象地反映岩体运动变化的立场、位移场、速度场等各种力学参数的变化,常用的离散元程序有 UDEC、3DEC 等。

有限差分法是近似地用差分代数方程来表示研究问题的基本方程和边界条件,即由有一定规则的空间离散点处的场变量(应力、位移)的代数表达式代替,从而把求解微分方程的问题转化为求解代数方程的问题。有限差分法原理简单,可以处理一些相对复杂的问题,应用范围很广。

(3) 相似模拟方法

相似材料模拟是采用不同配比材料来模拟覆岩的移动破坏情况,可以有效地弥补现场观测及数值模拟的不足,能够更直观地反映覆岩的破断规律。姜福兴^[44]等利用机械模拟的方法对采场上覆岩层的运动与支承压力的关系进行研究;马庆云、钟道昌、汤建泉等^[45-50]利用相似模拟材料对覆岩的运动及破坏规律进行研究;张永吉等^[51]进行了综放开采覆岩破坏及顶煤冒落的相似模拟,揭示了覆岩的破坏形式、超前支承压力与覆岩破坏的关系、覆岩的破坏发育过程等。相似模拟只是理想条件下的模拟,能够在一定程度上反映覆岩移动破坏规律,而现场地质条件相对复杂,因此不能真实反映现场岩层垮落情况。

(4) 现场实测

覆岩移动破坏规律的实测研究手段较多^[52-62],主要有:① 钻孔深部基点法;② 钻孔电视法;③ 钻孔冲洗液法;④ 井下仰孔注水法;⑤ 超声波穿透法;⑥ 超声波成像及数字测井法;⑦ 钻孔 CT 及电法;⑧ 微震探测法等。

① 钻孔深部基点法

深部基点法是从采场上方的地面或是观测巷道,向采场覆岩施工钻孔,然后在钻孔内的不同岩层内安装基点,基点通过引线引至地面,通过测量引线的变化来确定基点所在岩层的移动情况,作为一种简单可靠的岩层移动观测方法,在开滦、阳泉、大屯等矿井得到了应用,并且取得了一些岩层移动观测成果。

② 钻孔电视法

钻孔电视观测法可以清晰直观地观测覆岩受采动影响的破坏情况,对裂隙的发育高度、发育宽度、裂隙的数量、裂隙角度等均能作出定量的分析。张玉军等^[63-64]利用钻孔电视对采动前后覆岩的变化情况进行分析,并对裂隙的发育高度、裂隙的宽度、裂隙的连通情况等进行分析,推动了覆岩裂隙演化特征的研究;刘福权等^[65]通过钻孔电视图像,对覆岩裂隙产状进行了统计与分析,对覆岩的地质构造及构造层面进行了定位,提出了以钻孔电视为主要手段,以钻孔取芯为辅助手段的地质勘查方法;高保彬等^[66]通过钻孔电视图像,对覆岩裂隙的分布位置及数量给出了关系式,并得出了裂隙集中区在煤壁后方的结论。

③ 钻孔冲洗液法

钻孔冲洗液法主要是通过钻进过程中冲洗液的损失量来对岩层破坏程度进行判断的测试方法;另外,通过钻进过程中出现的一些现象进行辅助判别,如夹钻、卡钻、掉钻等现象,来综合判断“两带”高度。依靠钻进过程中冲洗液的损失量及钻孔水位变化来判断覆岩裂缝带的高度,而通过钻进过程中的夹钻、卡钻、掉钻等现象来判断垮落带的高度。

陈秀友等^[67]利用钻孔冲洗液观测方法,对祁东煤矿 3224 工作面覆岩的破坏高度进行测试,得出了工作面的导水裂缝带高度为 46~72.18 m;范立民等^[68]利用钻孔冲洗液法对

大柳塔矿 1203 工作面覆岩破坏高度进行测试,得出导水裂缝带的高度为 42.78 m;王世东等^[69]在霍洛湾煤矿 22101 工作面进行测试,得出导水裂缝带的高度为 34.98 m。该测试方法能够简单有效地对覆岩的导水裂缝带高度进行测试,但是在覆岩中可能存在原生裂隙,并且需要工作人员要随时对钻进过程中出现的情况进行判断并记录分析,因此该测试方法只能对导水裂缝带高度进行粗略测试。

④ 井下仰孔双端封堵测漏法

井下仰孔双端封堵测漏法是一种覆岩破坏高度观测的有效方法,主要是利用井下巷道直接向采场上方岩层施工钻孔,然后进行封堵测漏测试,根据测试数据即可得出覆岩的破坏高度与分界位置,该方法既避免了地面施工钻孔的巨大工程量,同时也省去了地面占地及青苗补偿等相应费用,具有工程量小、时间快、费用低、数据可靠等一系列优点。测试部分主要由两端胶囊和中部注水探管组成,利用两端胶囊封堵钻孔然后向中部注水,根据不同区段的注水速度,可以得出中部区段的裂隙发育情况。李艳波等^[70]在沈家湾煤矿 2666 工作面进行双端封堵测漏,得出了该工作面的导水裂缝带高度为 41.4 m;景继东等^[71]在华丰矿深部 4 煤开采时利用双端封堵测试,得出导水裂缝带的最大高度为 130 m;邢延团等^[72]对许厂煤矿 1302 上工作面进行了井下仰孔测漏法,得出导水裂缝带的发育高度为 51.3 m,并对导水裂缝带的形状进行了预测,为中部低边界高的“马鞍形”。

⑤ 微地震监测

微地震监测技术是利用传感器接受并记录岩石破断或移动时产生的地震波,并可以对地震波的传播方向、到达时间等进行记录,通过对数据处理分析可以得出岩层的破断位置,即震源的空间位置。通常情况下,记录这些微弱的地震信号都使用灵敏度较高的三分量地震检波器,通过对接收数据的分析可以确定岩层破断的时间、震源位置、震源能量等特征,从而可以实现对工作面覆岩破断规律的长期连续监测。张兴民^[73]等在山东兖州兴隆庄煤矿进行了微地震测试,将事件发生的密集区作为导水裂缝带高度的判定依据,测试结果表明微地震事件密集区高度为 45~95 m;汪华君等在鲁西煤矿采用微地震技术对覆岩的破坏高度进行研究,得到导水裂缝带高度为 25 m。

⑥ 声波 CT 探测

声波探测主要是依靠不同岩层具有不同的波阻抗,并对声波的反射能力也不同。其主要工作原理就是向孔壁发射超声波脉冲,并接受反射波,然后通过接收反射波的强弱来判断岩层裂隙的发育特征,并可以对裂隙产生的位置等信息进行分析,再结合裂隙的发育特征,对导水裂缝带的高度进行判别。这种监测方法可以获得较为直观的资料,同其他方法结合,可以对裂隙的发育程度、与采空区连通情况等进行分析,对裂缝带高度的确定具有现实意义。

⑦ 电阻率法

目前,电阻率成像主要分为直流电法电阻率成像和测井电阻率成像。其中,直流电法又分为普通直流电法层析成像和高密度直流电法层析成像;而测井电阻率成像又分为孔—孔、孔—地成像两种^[74]。

在工作面回采过后,上覆岩层会出现不同程度的弯曲破坏,地下水会顺着裂隙向采空区流动,并溶解岩层中的电解质,于是就会出现遭到破坏区域岩层的电阻率明显小于正常围岩电阻率的现象,而对于离层发育的区域,则会出现电阻率高于正常围岩电阻率的情况,并且

离层越发育,电阻率越高。因此,可以根据裂缝带不充水时电阻率高、充水时电阻率低的特点,来判断覆岩的破坏范围。

第四节 保护层开采覆岩裂隙演化研究现状

保护层开采引起的覆岩裂隙演化和采动应力场变化是保护层开采试验研究的关键,国内的一些学者通过相似模拟、数值模拟及现场实测等方法,研究了保护层开采覆岩裂隙演化及采动应力分布特征。

一、相似模拟实验研究

李树刚等^[75-77]通过相似模拟,研究了采动中关键层的运动特征对裂缝带分布形态的影响,提出采动裂隙呈椭抛带分布特征。周世宁院士^[78-79]等通过相似模拟实验,研究了远距离缓倾斜煤层保护层开采对煤岩层破裂变形的影响,揭示了覆岩破坏及裂隙演化规律。许家林等^[80]通过实验与理论分析,研究了岩层移动过程中的覆岩采动裂隙动态发育特征,综合分析了其影响因素,提出了下保护层的最大卸压高度由覆岩主关键层位置决定。刘泽功等^[81]通过理论分析、物理模拟,研究了采动过程中覆岩裂隙的时空演化规律。研究表明,采场覆岩在采动过程中,岩层之间会产生不一致性的连续变形,岩层间的不协调变形可形成岩层移动过程中的各种裂隙分布。涂敏等^[82-83]运用相似模拟、数值模拟,研究了远距离条件下保护层开采过程中覆岩微变形移动特性,指出保护层开采可以消除或减少被保护层煤与瓦斯突出危险性。石必明等^[84]在相似材料模型中设计了煤岩渗透性测定系统,实现了远距离保护层开采过程中上覆被保护层透气性变化的测定,得出上覆被保护层透气性的时空演化分布规律。

二、数值模拟研究

司荣军^[85]采用 FLAC3D 模拟分析了煤层开采过程中采场支承压力的动态变化规律,依据数值模拟结果,拟合了支承压力集中系数与工作面推进距离的关系曲线,总结出采场支承压力分布规律。熊祖强等^[86]采用 UDEC 离散元数值模拟软件,对远程下保护层开采条件下上覆煤岩层卸压特征、膨胀变形进行了分析。石必明等^[87-88]基于岩石破裂损伤理论,运用 RFPA 软件研究了保护层开采过程中远距离煤岩破裂变形特征,得出了采动过程中覆岩裂隙动态演化规律及被保护煤体应力和变形分布特征。张拥军等^[89]在含瓦斯煤岩渗流—应力损伤耦合理论^[90]的基础上,应用 RFPA-Gas 软件研究了近距离上保护层采动顶底板岩层变形破坏、裂隙演化规律与瓦斯运移规律,根据瓦斯渗流特征对保护层底板进行了分区。黄志安等^[91]运用数值模拟分析岩层应力状态,提出了准确划分采空区上覆岩层的“三带”范围准则。

综上所述,通过模拟实验可以综合得到位移、应力等比较全面的数据,对覆岩运动有比较全面的认识。模拟实验中岩层物理力学参数的准确性及模型边界的合理性对模拟结果有很大的影响。

三、现场实测研究

钻孔深部基点法是从地面或观测巷道,向工作面煤层施工钻孔,在钻孔内的不同岩层内

安装基点,通过引线牵引基点,测量引线的长度变化来确定基点所在岩层的移动情况。作为一种简单可靠的岩层移动观测方法,在阳泉、开滦等矿井得到了应用。钱鸣高等^[92]采用钻孔深部基点法对大屯孔庄煤矿7号与8号煤层之间岩层移动进行了现场实测,得到了岩层移动曲线,根据此曲线对覆岩移动特征进行了深入分析。

钻孔电视法是基于光学技术,以照相胶片或视频图像的方式直接提供钻孔孔壁的图像。数字全景技术可以实现同时观测360°的钻孔,并具有形成、显示和处理图像的能力,所有的图像不仅可用于定性识别钻孔内情况,而且还可准确地获得相关的数据,并进一步进行定量分析。该技术在岩土工程、工程地质、采矿工程等诸多方面具有广阔的应用前景^[93-95]。其中,张玉军等^[96-97]利用钻孔彩色电视系统对采场裂隙场分布特征进行了可视化探测研究,得出坚硬岩层内裂隙尺寸较大,以高角度纵向裂隙为主,软弱岩层内裂缝发展较多,以纵横交错的相交裂缝为主。随着离煤层越近,顶板岩层钻孔内裂隙明显由横向转变为斜向,并且出现纵向裂隙逐步向破碎型裂隙发展的特点。

第五节 煤层卸压瓦斯抽采研究现状

卸压瓦斯抽采被广泛地应用于高瓦斯矿井煤层群的开采,如何合理地布置抽采钻孔是关键,我国在20世纪60年代进行了卸压瓦斯抽采试验,取得了一定成效,并形成了卸压瓦斯抽采体系。但目前的研究仍存在不足,主要表现在:其一,对采动覆岩裂隙演化分布特征的认识,影响抽采钻孔的合理布置;其二,卸压瓦斯抽采是以开采煤层工作面安全为出发点,研究本层与邻近层卸压瓦斯抽采,对于远距离煤层卸压特征及抽采效果缺乏研究。针对以上研究的不足,钱鸣高等学者基于关键层理论,将采动覆岩移动、破坏规律及裂隙场演化规律应用于卸压瓦斯抽采技术,建立了以“O”形圈理论为基础的钻孔布置方案,即采动覆岩存在“O”形圈破坏,此圈相当于一“瓦斯湖”,若将瓦斯抽采钻孔设计到此圈内,可以保证有较高的抽采率。

第六节 晋煤集团保护层开采必要性和可行性分析

晋城矿区为多煤层赋存区域,主采煤层为3[#]、9[#]、15[#]煤,煤层层间距分别为50 m, 45 m;3[#]煤层为厚煤层,多数为高瓦斯和突出区域,9[#]和15[#]煤为中厚煤层,具备良好的保护层开采自然条件,采用上行开采顺序,进行下保护层开采,可以最大限度地解放3[#]煤层,提高瓦斯抽采效果,消除突出危险性。

第七节 本书主要研究内容

结合晋煤集团矿区煤层赋存特征,利用岩层控制等理论,探讨保护层开采过程中覆岩断裂移动规律及裂隙演化特征,在此基础上,进行保护层开采相似模拟实验和数值模拟研究。根据实验结果,结合相关力学理论对被保护层与覆岩中瓦斯运移规律进行系统研究,主要包括以下几个方面:

(1) 保护层采动过程中上覆岩层裂隙时空演化规律

构建相似模拟实验系统,研究保护层采动过程中,上覆岩层裂隙场演化及被保护层变形规律。采用钻孔深基点监测上覆岩层移动变形规律,钻孔电视和分段注水试验实测保护层覆岩“两带”高度,判断被保护层位于保护层顶板“三带”的位置。

(2) 保护层采动过程中上覆岩层应力场演化规律

采用数值模拟,研究保护层采动过程中,上覆岩层采动应力分布特征以及被保护层的卸压程度,考察被保护层保护效果和保护范围。

(3) 被保护层卸压瓦斯运移分析

利用覆岩破坏及裂隙演化规律结果,结合流体力学对被保护层及上覆岩层中瓦斯运移规律,尤其是被保护层中瓦斯流态、瓦斯储运规律等进行深入、系统研究。