

贵州省教育厅基金项目(黔教高发[2012]426号)

贵州省教育厅教学质量与教学改革工程重点项目(黔高教发[2013]446号)

六盘水师范学院校级基金项目(六盘水师范学院发[2011]61)

六盘水师范: 3SYtszy201101)

薄煤层保护层卸压开采技术

BAOMEICENG BAOHUCENG Xieya Kaicai Jishu

谢小平 艾德春 方新秋 刘宗柱 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

项目(黔教高发[2012]426号)

贵州省教育科学规划项目(质量与教学改革工程重点项目(黔高教发[2013]446号)

六盘水师范学院校级基金项目(六盘水师范学院发[2011]61)

六盘水师范学院校级基金项目(LPSSYtszy201101)

薄煤层保护层卸压开采技术

谢小平 艾德春 方新秋 刘宗柱 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书全面系统地阐述了薄煤层上保护层卸压开采的基本原理及方法,概况了我国煤矿典型矿区薄煤层上保护层开采的最新成果、经验及可供借鉴的国内先进薄煤层卸压开采技术。内容包括薄煤层上保护层开采后下伏煤岩体的裂隙与应力分布规律、上保护层卸压开采的卸压范围、无煤柱沿空留巷全面卸压技术、合理的千米定向钻孔卸压煤层瓦斯抽采技术以及卸压保护效果分析、下被保护煤层回采巷道矿压显现规律、回采巷道合理位置、动压回采巷道支护技术、下被保护煤层工作面矿压显现规律及卸压区采煤工作面开采技术。

本书可作为煤炭高校采矿工程专业的参考书,也可供从事煤矿开采的生产技术管理、科研、设计等部门人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

薄煤层保护层卸压开采技术/谢小平等著. —徐州:

中国矿业大学出版社,2017.1

ISBN 978 - 7 - 5646 -3085 - 0

I. ①薄… II. ①谢… III. ①薄煤层采煤法
IV. ①TD823.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 087170 号

书 名 薄煤层保护层卸压开采技术
著 者 谢小平 艾德春 方新秋 刘宗柱
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 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 11.25 字数 281 千字
版次印次 2017年1月第1版 2017年1月第1次印刷
定 价 45.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

矿产资源是国家经济发展的命脉,对矿产资源的开发和利用直接关系到国计民生,随着我国经济的快速发展,对矿产资源的需求也不断增大。经过多年的开采,我国不少地区矿井的中厚和厚煤层的储量已接近枯竭,而对于薄煤层(厚度 ≤ 1.3 m)的开采,长期由于经济技术和安全等原因而处于缓慢发展的状态。我国煤炭储量中薄煤层的可采储量约为 61.5 亿 t,占全国煤炭总可采储量的 19%左右,然而据不完全统计,我国薄煤层的年产量只占全国煤炭总产量的 10.4%左右,产量与储量的比例严重失调。近年来,随着薄煤层采煤设备制造技术和自动化控制技术的提升,以及国家对资源合理开发利用要求的提高,薄煤层的安全高效开采日益受到重视。

目前,我国国有煤矿大多是瓦斯矿井煤层群开采,且高瓦斯矿井占 50%以上,其中 300 多对矿井为煤与瓦斯突出矿井,瓦斯突出灾害的发生次数为世界之最。现有瓦斯矿井主要特点是开采深度大、瓦斯压力大、瓦斯含量高,具有低透气性、可压密性和易流变性“三性”特征。我国大部分的高瓦斯矿区都为低透气性煤层,以贵州省盘江矿区为例,矿区垂深 300 m 内,煤层瓦斯含量 3.694~20.329 m^3/t ,透气性系数为 0.042 1~0.607 9 $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$,煤层瓦斯压力为 0.32~3.76 MPa,大部分煤层瓦斯不易在采前预抽,但在采掘过程中煤层瓦斯的放散量大、放散速度快,在一定条件下易发生煤与瓦斯突出,且突出规模大,瓦斯涌出或煤与瓦斯突出控制不当可能导致瓦斯爆炸事故的发生,从而造成更大的灾难。

在低透气性高瓦斯突出煤层群开采中,贵州省多数矿区都为薄、厚煤层共存煤田,矿井为了追求高产和高利润的目标,优先开采中厚煤层,对薄煤层进行搁置,使薄煤层大量积压未采,甚至有些矿井实施采厚丢薄的开采方式,造成薄煤层赋存煤炭采出率低的现象,不仅严重浪费煤炭资源,而且使矿井存在安全生产隐患。将薄煤层作为保护层进行开采能够达到理想的卸压效果,在全国治理瓦斯最先进的淮南矿业集团公司于 2006 年 3 月决定:加大薄煤层开采力度,凡是 0.8 m 以上,作为保护层的煤层必须开采。因此,薄煤层作为保护层开采已成为治理煤与瓦斯突出等动力灾害的重要手段。为有效解决低透气性高瓦斯突出煤层群安全高效开采的问题,提高矿山企业的经济效益和社会效益,加大对薄煤层保护层卸压开采技术的研究和探讨显得十分必要。

本书在前人研究的基础上,深入研究薄煤层上保护层卸压开采,以解决低透气性高瓦斯煤层群安全高效开采的问题,针对某典型矿区低透气性、高瓦斯、近距离煤层群、煤与瓦斯突出的特点,选择将 2 号薄煤层作为上保护层先行开采,且上保护层工作面采用无煤柱沿空留巷技术,无煤柱开采可充分回采宝贵的焦煤资源,并实现下被保护煤层的全面卸压。结合千米定向钻孔瓦斯抽采技术,预抽下被保护层的卸压瓦斯,消除被保护层突出危险性,保障了低透气性高瓦斯近距离煤层群的安全高效开采。本书研究的关键是确定薄煤层上保护层开采后下伏煤岩体的裂隙与应力分布规律、上保护层卸压开采的卸压范围、合理的千米定向钻孔卸压煤层瓦斯抽采技术以及卸压保护效果分析,进而实现采煤和抽采瓦斯的统一。本书

也对薄煤层上保护层开采下被保护煤层回采巷道矿压显现规律、回采巷道合理位置、动压回采巷道支护技术、下被保护煤层工作面矿压显现规律及卸压区采煤工作面开采技术进行了研究。通过对薄煤层保护层卸压开采技术的研究,对于我国低透气性高瓦斯突出煤层群的安全高效开采,特别是对于贵州省矿区煤层赋存更为复杂的条件,具有重要指导和参考意义。

在本书的撰写过程中,得到了六盘水师范学院陈才贤副教授、张鹏副教授、刘洪洋讲师、刘建刚讲师、苏静讲师的帮助。另外,还得到了中国矿业大学梁敏富博士、樊海亮硕士、刘晓宁硕士、王刚硕士的帮助。在现场期间得到了贵州省水城矿业(集团)有限责任公司、盘江煤电(集团)有限责任公司、华晋焦煤有限责任公司和沙曲煤矿有关领导和工程技术人员的大力支持和帮助,提供了大量的资料和素材。在此,笔者一并表示诚挚的感谢!

书中还引用了一些前人的研究成果与实测数据,未完全标出,在此一并表示诚挚的感谢!

由于作者经验和水平所限,书中难免有疏漏和欠妥之处,敬请读者不吝指正。

著 者

2016年3月

目 录

1	薄煤层保护层卸压开采技术综述	1
1.1	我国薄煤层开采概述	1
1.2	保护层开采的定义与分类	1
1.3	国内外研究现状	3
1.4	薄煤层保护层卸压开采技术存在的问题与展望	8
2	上保护层开采下伏煤岩层裂隙分布与卸压分析	10
2.1	典型矿区试验地点概况	10
2.2	下伏煤岩体裂隙分布及卸压瓦斯运移规律	13
2.3	上保护层开采后下伏煤岩体卸压分析	17
2.4	本章小结	22
3	薄煤层上保护层开采的卸压范围分析	24
3.1	上保护层开采的可行性分析	24
3.2	上保护层无煤柱开采全面卸压原理	24
3.3	上保护层留煤柱开采卸压盲区分析	25
3.4	薄煤层上保护层开采的卸压范围分析	26
3.5	本章小结	30
4	薄煤层上保护层开采的数值模拟分析	31
4.1	数值模拟概述	31
4.2	模型的建立及参数的选取	31
4.3	模拟的内容及方案设计	34
4.4	上保护层卸压开采采动裂隙演化规律	34
4.5	上保护层卸压开采下被保护层变形及应力规律分析	40
4.6	薄煤层上保护层无煤柱开采全面卸压分析	44
4.7	本章小结	46
5	薄煤层上保护层开采的卸压效果分析	48
5.1	典型矿区现场工业性试验	48
5.2	千米定向钻孔瓦斯抽采技术	63
5.3	本章小结	70

6	上保护层开采下煤层回采巷道矿压显现规律 ·····	71
6.1	典型矿区试验地点概况·····	71
6.2	煤岩层物理力学性质试验研究·····	72
6.3	巷道前期矿压观测·····	75
6.4	本章小结·····	78
7	薄煤层上保护层开采下伏煤岩层活动规律 ·····	79
7.1	近距离层群开采底板应力分布规律·····	79
7.2	近距离煤层群开采底板岩层破坏规律·····	86
7.3	本章小结·····	93
8	上保护层开采下煤层回采巷道合理位置分析 ·····	94
8.1	下煤层回采巷道合理位置分析·····	94
8.2	下煤层回采巷道合理位置数值模拟分析·····	98
8.3	下煤层回采巷道合理位置确定·····	100
8.4	本章小结·····	104
9	上保护层开采下煤层动压回采巷道支护技术 ·····	105
9.1	下煤层动压回采巷道变形规律·····	105
9.2	下煤层动压回采巷道围岩变形破坏机理·····	106
9.3	下煤层动压回采巷道围岩控制技术·····	108
9.4	下煤层动压回采巷道支护参数优化·····	114
9.5	下煤层动压回采巷道支护技术方案·····	124
9.6	支护方案可行性分析·····	124
9.7	本章小结·····	126
10	上保护层开采下煤层工作面矿压显现规律 ·····	127
10.1	下煤层试采工作面地质条件概况·····	127
10.2	下煤层试采工作面矿压显现规律·····	128
10.3	本章小结·····	135
11	卸压区采煤工作面开采理论分析 ·····	137
11.1	典型矿区试验工作面概况·····	137
11.2	煤柱下应力场分布规律理论分析·····	139
11.3	卸压区采煤工作面覆岩运动规律理论分析·····	142
11.4	本章小结·····	148
12	卸压区采煤工作面开采数值模拟分析 ·····	149
12.1	煤柱下应力场分布规律数值模拟研究·····	149

12.2	卸压区采煤工作面覆岩运动规律数值模拟研究·····	152
12.3	本章小结·····	160
13	卸压区采煤工作面开采技术·····	161
13.1	卸压区采煤工作面开采技术研究·····	161
13.2	可行性分析·····	166
13.3	本章小结·····	167
	参考文献·····	168

1 薄煤层保护层卸压开采技术综述

1.1 我国薄煤层开采概述

我国薄煤层煤炭资源分布地域辽阔,煤层赋存状态比较复杂,水文地质条件也复杂多变。从我国现有煤炭赋存情况来看,薄煤层储量所占比重比较大,我国在近80个矿区的400多个矿井中,赋存750多层薄煤层,保有工业储量98.3亿t,可采储量61.5亿t,约占煤炭总可采储量的19%,其中,厚度为0.8~1.3m的缓(倾)斜薄煤层占86.2%,厚度小于0.8m的占13.8%,中硬以下的薄煤层层数占总层数的64.59%^[1]。全国国有重点煤矿薄煤层储量为25.29亿t,其中,山西、河北、四川、内蒙古、贵州、东北和重庆,薄煤层储量达5.01亿t。薄煤层煤炭总储量约占全国煤炭总储量的19%左右,但产量只占总产量的10.4%,远远低于储量所占的比例,造成产量和储量比例的严重失调。近年来,虽然国家提高对资源合理开发利用的要求,薄煤层的开采日益受到重视,但形势仍然不容乐观,薄煤层的产量依然相对较低,且很难真正实现薄煤层的安全高效开采。

目前,我国薄煤层开采的机械化程度相对还比较低,大多还是采用炮采,产量低、事故多、工人的工作环境恶劣。薄煤层采煤机作为薄煤层开采机械,由于受其本身结构的限制,煤层厚0.8m已是其开采下限,而且维修、操作不便,工人需在极低的工作面条件下跟机作业,劳动强度大、作业环境差。我国薄煤层的开采经历了几个发展阶段^[2]:20世纪50年代薄煤层开采主要使用炮采工艺;60年代开始使用深截煤机掏槽,爆破落煤;70年代薄煤层机组得到较大发展,分别研制出不同类型的刨煤机,包括钢丝绳牵引刨煤机、全液压驱动刨煤机和刮斗刨煤机等;1974年研制成功BM—100型薄煤层滚筒采煤机;20世纪80~90年代,我国曾研制了多种型号的刨煤机(包括滑行刨煤机和拖钩刨煤机),以解决薄煤层的开采问题,并在一些局矿的使用中取得了不错的成绩;90年代,天府矿务局和徐州矿务局,分别从俄罗斯和乌克兰引进了螺旋钻采煤机;2003年新汶矿业集团也引进了2台三钻头的螺旋钻采煤机,用于薄与极薄煤层的开采,使一些用传统采煤工艺不能开采的薄煤层、极薄煤层得到有效开采利用。近年来,我国在薄煤层无人工作面采煤技术方面不断进行研究和探讨试验,铁法刨煤机综合机械化无人开采的成功,推动了我国薄煤层开采技术的发展。

将薄煤层作为保护层开采是高瓦斯突出煤层群开采条件下瓦斯灾害防治的重要手段,随着薄煤层采煤设备制造技术和自动化控制技术的提升,以及国家对资源合理开发利用要求的提高,薄煤层的开采日益受到重视,而将薄煤层作为保护层开采也将成为低透气性高瓦斯突出煤层群安全高效开采技术发展的重要途径。

1.2 保护层开采的定义与分类

多年的开采实践证明^[3],保护层开采及被保护层卸压瓦斯抽采技术是防治煤与瓦斯突

出最有效、最经济的区域性措施之一,该技术不仅可以避免长期与突出危险煤层“短兵相接”的状态,而且提高了防治煤与瓦斯突出措施的安全性和可靠性。预先开采的并能使其他相邻的有突出危险煤层受采动影响而减少或丧失危险的煤(岩)层称为保护层,即危险煤层掘进和回采之前,在时间和空间上都超前开采的危险煤层顶板或底板内的煤(岩)层。位于突出危险煤层上方的保护层称为上保护层,位于下方的称为下保护层^[3]。由于保护层开采的采动作用并抽采突出危险煤层卸压瓦斯,可使突出危险煤层的突出危险区域转变为无突出危险区,该突出危险煤层称为被保护层。

(1) 下保护层分类

根据目前已有的下保护层开采实践考察数据及上覆岩层内垮落带、裂缝带和弯曲下沉带的发育情况,在上覆岩层内无巨厚火成岩等坚硬岩层的条件下,将当量相对层间距 20 m 和 40 m 作为下保护层分类的界限,则下保护层可分为近距离保护层、远距离保护层和超远距离保护层 3 类,下保护层分类主要取决于上被保护层在“三带”的位置^[4]。

① 当被保护层位于保护层开采裂缝带中上部时,被保护层的采动裂隙虽较为发育,但未完全沟通形成系统,煤层透气性有较大增加,卸压瓦斯仅有部分能自然排放,需要卸压瓦斯抽采才能消除突出危险,此时的保护层类型为近距离下保护层,被保护层称为近距离上被保护层。

② 当被保护层位于保护层开采裂缝带与弯曲下沉带边缘时,被保护层采动裂隙以沿层拉张裂隙为主,仅有少量破断裂隙,透气性有些许增加,卸压瓦斯基本不能自然排放,要消除煤与瓦斯突出危险需采取强化瓦斯抽采措施,此时的保护层类型为远距离下保护层,被保护层称为远距离上被保护层。

③ 当被保护层位于保护层开采弯曲下沉带内时,被保护层采动裂隙仅有少量沿层拉张裂隙,透气性较原始煤层仅有数倍增加,卸压瓦斯仅出现解吸,没有运移现象,要消除煤与瓦斯突出危险需采用密集钻孔等强化瓦斯抽采措施,此时的保护层类型为超远距离下保护层,被保护层称为超远距离上被保护层。

(2) 上保护层分类

生产实践发现,底鼓裂缝带的高度为 18~20 倍采高,在底鼓变形带内,当量层间距不大于 50 m 时,被保护层均可消除突出危险,因此,将当量相对层间距 20 m 和 50 m 作为上保护层分类的界限,则上保护层分成近距离保护层、远距离保护层两类^[4]。

① 当被保护层位于保护层开采底鼓裂缝带中下部时,被保护层的沿层采动拉张裂隙虽较为发育,但未完全沟通形成系统,煤层透气性有较大增加,卸压瓦斯仅有部分能自然排放,需要进行瓦斯抽采才能消除突出危险性,此时的保护层类型为近距离上保护层,被保护层称为近距离下被保护层。

② 当被保护层位于保护层开采底鼓变形带中上部时,被保护层发生少量膨胀变形,仅有少量岩层拉张裂隙,透气性有些许增加,卸压瓦斯基本不能自然排放,要消除煤与瓦斯突出危险需采用密集钻孔等强化瓦斯抽采措施,此时的保护层类型为远距离上保护层,被保护层称为远距离下被保护层。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 薄煤层开采研究现状

近些年来厚及中厚煤层高产高效开采技术的发展有了较大提高,而薄煤层开采因开采条件复杂、劳动强度大、经济效益低、设备不配套等,开采技术水平相对较低。随着厚及中厚煤层资源的减少和一些矿井开采顺序的发展,我国将逐步加大薄煤层的开采。大多数薄煤层的地质条件比较恶劣,工作面空间狭小,所以开采难度比较大,薄煤层开采技术的发展还比较缓慢。

目前,国外发达国家的极薄煤层开采机械化水平较高。乌克兰顿巴斯主要研究刨煤机和螺旋钻机采煤,取得了较好的经济效果,主要适用于开采薄煤层和极薄煤层(煤层厚0.4~1.5 m);波兰研制的KSE—360型极薄煤层滚筒采煤机,适用于厚度1.0~1.6 m、倾角小于35°的煤层;德国薄煤层生产全部实现综采化,德国DBT(德国采矿技术)公司生产的高效长壁连续智能刨煤机应用于鲁尔矿区1.3 m的煤层中,使生产能力大幅度提高,实现了高产高效。

1.3.2 保护层开采研究现状

超前开采保护层是防止煤与瓦斯突出的有效措施,该措施作为防突的区域性措施在国内外突出矿井开采煤层群时被广泛应用。

1933年法国最早进行保护层开采试验研究,波兰、德国等国也应用开采保护层防治突出,前苏联也是研究保护层开采最早、最广泛的国家之一,在保护层开采、保护范围划定,突出危险参数变化规律研究,以及卸压瓦斯抽放等方面都积累了较为丰富的经验^[8]。我国从1958年开始在北票和重庆矿区进行试验研究,目前,北票、天府、中梁山、松藻、南桐、涟邵、乐平、鸡西、水城、六枝等矿区都在应用这一措施,取得了显著的效果。近年来,淮南等局矿的保护层开采又取得了新的成果。1997年,我国开展了开采远程下保护层上向卸压,低抽巷网格式钻孔抽放瓦斯技术研究,在淮南潘一、潘三矿试验成功。1998年,我国又针对高瓦斯煤层群开采,开展了上保护层下向卸压,低抽巷上向网格式钻孔抽放瓦斯技术研究,在新庄孜矿试验成功。2001年,我国开展了急倾斜煤层开采保护层卸压,低抽巷网格式钻孔抽放瓦斯技术研究,在谢李公司二井试验成功^[9-10]。2006年,刘泽功、袁亮^[11]认为低透气性松软高瓦斯煤层群的治理首先应开采关键卸压层,对卸压后顶底板岩层裂隙变化、瓦斯运移等规律进行了研究,发现存在竖向发育裂隙区。卸压瓦斯沿裂隙通道汇集到“O”形圈内,因此形成瓦斯积存池。2008年,石必明、刘泽功运用RFP软件对保护层开采后被保护层的裂隙及变形进行了分析^[12],提出被保护层垂直变形呈“M”形分布,并阐述了层间距对膨胀变形的影响。

1.3.3 保护层开采后裂隙分布规律研究现状

开采保护层后可引起岩层移动与破坏,并在岩层中产生采动裂隙。按岩层采动裂隙出现的位置可以分为顶板岩层采动裂隙、底板岩层采动裂隙、煤层采动裂隙和地表采动裂隙。按采动裂隙的性质可以分为竖向破断裂隙、岩层层间的离层裂隙和断层面的活化^[13]。贯通的竖向破断裂隙是地下水和瓦斯穿层流向工作面与采空区的通道;保护层采动裂隙分布的研究对于煤层采动瓦斯卸压流动、煤矿瓦斯事故及煤层气资源的高效开采有着重要的指导

作用。

钱鸣高院士根据砌体梁理论对煤层开采后上覆岩层运动规律提出了“横三区”、“竖三带”的总体认识^[14],即沿工作面推进方向上覆岩层将分别经历煤壁支承影响区、离层区、重新压实区,自下往上岩层运动分为垮落带、裂缝带、整体弯曲下沉带;钱鸣高院士等于1996年提出岩层控制的关键层理论^[15],为深入研究岩层内部运动的动态过程和岩层采动裂隙动态分布提供了理论根据,并建立了卸压瓦斯抽放的“O”形圈理论。1999年,李树刚等通过相似模拟实验分析了采动后上覆岩层活动特征对裂缝带分布形态的影响,首次提出上覆岩层中破断裂隙和离层裂隙贯通后呈椭圆抛带的分布特征^[16]。2003年,俞启香、程远平、袁亮等运用数值模拟与现场试验相结合的方法,研究了上覆远程卸压岩体裂隙分布规律,得出首采煤层开采之后其上覆远程卸压岩体发生弯曲下沉,在卸压煤层中形成顺层张裂隙为主的裂隙分布的结论^[17]。2004年,周世宁、俞启香、石必明等通过对缓倾斜煤层保护层开采远距离煤岩破坏变形的研究,得出上覆岩层垮落和裂隙演化规律^[18-19]。刘泽功、范维澄、廖光焯研究了受采动影响情况下覆岩裂隙的时空演化机理,研究表明,采场上覆岩层在采动过程中岩层之间产生不协调的连续变形,这种岩层间的不一致变形会形成岩层移动中的各种裂隙分布^[20]。2005年,谷明轮通过对下保护层开采岩体移动观测给出了采动裂隙的分布规律^[21]。2005年,石必明、俞启香基于相似模拟试验,首次应用非接触式数字近景摄影技术研究远距离保护层开采过程中上覆岩层微变形移动特性。

1.3.4 无煤柱开采研究现状

(1) 国外无煤柱开采现状

当今世界一些主要产煤国家也在积极推行和应用无煤柱开采技术,如波兰、德国、英国、法国等,开展了大量的试验和研究工作,并且取得了很多宝贵的研究成果,对无煤柱开采技术的提高作出了巨大的贡献^[22]。英国是以长壁式开采为主的国家,由于采煤方式是前进式,所以积极推行无煤柱开采。其巷内支护多采用金属可缩支架、巷旁支护采用矸石带及充填带,为了克服矸石带可缩量大的缺点,英国还通过在矸石带内充填黏性膨胀土和水泥来提高矸石带的载荷能力,改善其受载荷时的力学性能。同时,英国的部分矿井还运用了机械化的充填方式来进行沿空留巷的自动充填,避免了人工作业的繁琐,提高了填充的效率。德国的部分矿井主要是采用沿空留巷技术,20世纪80年代末期其主要采用膨胀黏土和充填石膏作为巷道的填充材料,形成了具有很高抗压性和密实性的充填带,可以起到防止采空区漏风、遗煤自燃和有害气体扩散的作用。90年代后期,德国在世界上首次采用了重型U型钢支架对巷道支护,使用膏体充填材料进行巷旁充填,其技术和工艺均处于当今世界领先水平^[23]。

前苏联和波兰等国家对巷内支护和煤层顶板进行了分类研究,做了大量的现场测试工作,采用可缩性支架和水泥、炉渣、矸石混合制成的轻型混凝土块对留巷进行维护,并取得了很好的效果。

(2) 国内无煤柱开采现状

无煤柱开采就是在采煤过程中紧贴采空区,保留和维护上采区段的机巷作为下采区段的回风巷,其间不预留煤柱而采用其他方式维护巷道的开采技术;这种开采技术可以提高开采效率和资源回收率、降低冲击地压对巷道的损坏,减少巷道的掘进量和维护量,是目前广泛采用的一种开采方式^[24]。我国的无煤柱开采技术大致经历了3个发展阶段:20世纪50

年代初期,我国在对鸡西、焦作等一些薄煤层或中厚煤层的开采中首次采用了大块矸石带替代煤柱作为巷旁支护,即在采煤工作面的输送机巷砌矸石墙,将该巷道保留下来作为下区段采煤工作面的回风巷,其中,1952年对峰峰四矿在厚煤层倾斜分层顶层和底层试掘沿空回风巷成功,为我国缓倾斜厚煤层沿空掘巷开创了先例。但是当时并没有形成完整的“无煤柱开采”技术体系^[25]。20世纪60年代中期,为了提高煤炭采出率,提高矿井开采寿命,在某些大型煤矿取消了运输大巷的煤柱,实行跨越式回采技术;1966年3月,在淮南谢一矿A₃煤层沿上阶段采空区掘进风巷,并进行了短期矿压观测,取得了较好的护巷效果。另外,在开滦、焦作、阳泉等矿区,厚煤层分层开采一般都应用了沿空掘巷,并取得了成功的经验。这说明当时无煤柱开采工艺的改革已经在我国煤矿中开始兴起。20世纪70年代至80年代,我国开始重视无煤柱开采技术,并着手对某些高瓦斯、易燃的煤层实行无煤柱开采方法进行研究;在护巷技术和工艺方面做了大量的开拓性工作,如巷内支护原来的木支架、刚性金属支架转化为金属可缩性支架,充填材料也由矸石逐渐转化为硬石膏和合成水泥,从而把沿空留巷技术引入新的发展阶段^[26]。20世纪80年代末至90年代初,我国从国外引进了高水充填技术,采用甲乙料充填,由高强度水泥和石膏反应形成结石、通过双液浆进行充填,形成连续墙体对巷道进行支护,此方法在全国得到了广泛的运用^[27]。在无煤柱采煤的使用范围上,我国已经对薄煤层、中厚缓倾斜煤层、厚煤层分别实施了沿空留巷技术,并取得了成功,而且支护材料的密闭性和强度也比以前有了很大的改善。尽管无煤柱开采被公认为是一种先进的技术,具有一系列的优点,但是其本身还是正在发展的技术,并且受多方面条件的制约,如在许多高地压、快速掘进的工作面和复杂地质条件下无煤柱留巷技术逐渐显示出捉襟见肘的态势,由于技术难以突破,留巷不能实施,并且随着矿井开采深度的增加,巷道矿压显现日益剧烈,在许多复杂地质条件下煤层巷道在第一个工作面超前采动的影响时即发生强烈变形,支架严重折损,不具备留巷的条件。因此,自20世纪80年代末,由于深层次的技术问题没有根本解决,无煤柱开采技术一直处于停滞阶段。

1.3.5 卸压煤层瓦斯抽采研究现状

(1) 国外瓦斯抽采技术应用现状

美国以地面钻孔瓦斯抽采(煤层气开发)为主,1981年开始从事煤层气商业化开采,1989年取得突破性进展,1991年产量超过90亿m³,1994年达到215亿m³,其中,在未开采矿区抽出180亿m³,占总产量的83.7%,12个生产矿井抽出35亿m³。目前,美国年抽出瓦斯量已接近400亿m³,巨大的瓦斯抽采量已成为美国一个重要的能源开发产业。美国12座矿井从事煤层气工业化开采,大大减少了矿井通风费用,改善了生产安全条件,从根本上防止了瓦斯灾害事故的发生,并向市场销售了大量的高质量气体,产生了显著的社会经济效益^[28-29]。

英国生产矿井的瓦斯抽采率达到45%以上,抽出的瓦斯全部被利用。英国在废弃矿井瓦斯抽采方面也取得成功,抽采废弃矿井的瓦斯用于发电,获取了新的洁净能源,同时减少废弃矿井瓦斯向大气泄露,减少了对环境的污染^[30]。

澳大利亚也是世界上主要产煤国之一,对瓦斯抽采也极为重视。澳大利亚立法规定,煤层瓦斯含量高于10m³/t时必须进行抽采,只有当瓦斯含量低于10m³/t时方可在足够供风条件下布置采掘工程。澳大利亚BHP公司在鲍恩和悉尼盆地实施的煤层气开发计划中,在鲍恩盆地北部的布罗德梅多地区试验过未开采区地面钻孔煤层气开发,但由于煤层渗

透性差、水力压裂成本高、效率低,使开发在经济上不可行,因此澳大利亚目前主要还是在煤矿井下抽瓦斯。澳大利亚悉尼和鲍恩煤田广泛采用井下水平钻孔和斜交钻孔抽采瓦斯,使煤层瓦斯含量降低到 $3\sim 5\text{ m}^3/\text{t}$ 以下,基本上消灭了瓦斯灾害事故,抽出的瓦斯广泛应用于发电,也取得了显著的社会经济效益^[31]。

前苏联是世界上煤层气资源量最丰富的国家之一,前苏联抽采瓦斯仅为解决煤矿瓦斯安全问题,没能够有效利用煤矿瓦斯资源。前苏联的瓦斯抽采量在1985就超过21亿 m^3 ,有效控制了煤矿瓦斯事故。加拿大煤层气资源量丰富,居世界第二位,其瓦斯的抽采主要是地下抽采,地面钻孔抽采瓦斯仍处于勘探试验阶段,据预测,随着瓦斯抽采技术的提高和对瓦斯资源的重视,加拿大煤层气工业化开发的进程将会加快发展。波兰煤层瓦斯主要赋存在下西里西亚、上西里西亚和芦布林盆地矿区,目前西里西亚18座煤矿井下年抽采瓦斯量就达到9.12亿 m^3 ,年利用瓦斯量2.82亿 m^3 ,有效治理了煤矿瓦斯灾害^[32]。

(2) 国内瓦斯抽采技术发展状况

我国的煤矿瓦斯研究开始于20世纪50年代煤矿井下的瓦斯抽放,主要集中在抚顺、阳泉等高瓦斯矿区,抽采出的瓦斯大部分排放到大气中,污染大气的同时浪费了宝贵的资源。60年代到70年代,国内煤矿逐渐认识到瓦斯资源的利用价值,部分矿区抽采的煤矿瓦斯气体逐渐投入民用和小规模的工业利用。70年代末期,一些矿井进行了地面瓦斯抽采试验,将瓦斯资源从煤炭能源中独立出来,作为单独的能源开采,主要集中于抚顺龙凤矿、阳泉矿、焦作中马村矿、湖南里王庙矿,并进行了压裂试验,但是抽采效果不佳。“六五”期间,煤炭、石油以及地质等行业相互合作,通过国家重点科技攻关项目对煤矿瓦斯资源进行区域性评价和基础理论研究。“七五”期间,设立了“我国煤层甲烷的富集条件及资源评价”项目专题,对我国煤层气资源从总体上作出初步认识。1989年,在沈阳首次召开了“开发煤层气研讨会”,会议上对瓦斯的认识有了根本性的改变,由“瓦斯灾害”转变为“优质能源”。“八五”期间,设立了“有利区块煤层吸附气开发研究”国家科技攻关项目专题。此后,煤层瓦斯的研究重点转移到抽采工艺上。1992年和1993年,我国的“中国煤层气资源开发”项目和“中国深层煤层气勘探”项目得到联合国全球环境基金资助,推动了中国煤层气的勘探开发的发展。1996年以后,科技攻关项目“煤层气选区评价与配套工艺技术”和“新集浅层煤层气示范开发成套工艺技术及专用装备研究”等一批有影响的国家级研究项目和规划相继完成,对矿井瓦斯的抽采逐步深入。到目前为止,对全国范围内的煤层瓦斯资源的分布、储存特征取得了基础性认识,圈定了煤层瓦斯资源开发的有利地区。但是由于我国的煤层瓦斯普遍具有瓦斯压力低、渗透率低等特点,采用地面抽采瓦斯的方法不能很好解决井下瓦斯问题。现阶段,瓦斯资源的开发利用逐渐由地面煤层气开发转向井下瓦斯抽采,并形成了一套完整的井下瓦斯抽采体系,例如,掘前预抽、边掘边抽、采后抽取、卸压瓦斯钻孔抽取以及开采层、邻近层、采空区瓦斯抽取等。目前,我国已经有一百多个矿井建立了井下瓦斯抽采系统,年抽采瓦斯量达6亿 m^3 以上,抽采瓦斯利用率达80%,但井下瓦斯的抽采率很低,只有20%左右^[33]。

钱鸣高院士首次提出了“煤矿绿色开采”的概念,煤与瓦斯共采技术是绿色开采的重要组成部分之一,其研究内容和发展方向具有重要的理论意义和现实意义^[34]。目前,我国煤矿在防治瓦斯灾害方面正在转变观念,在采掘部署上把煤层瓦斯抽采纳入煤矿正规生产的工艺流程,煤层瓦斯的开发和利用向规模化、系统化方向发展。将瓦斯作为一种资源抽采,

能够减少高瓦斯突出矿井治理瓦斯灾害费用,提高生产效率,实现在抽采瓦斯资源的同时治理矿井瓦斯灾害,形成一个良好的循环模式。

1.3.6 近距离煤层巷道布置研究现状

近距离煤层回采巷道目前有三种布置方式,分别是内错式布置、外错式布置和重叠式布置^[35]。通常人们认为采空区下方为减压区,该区域的围岩应力小于原岩应力,而煤体或煤柱下方为增压区,该区域的围岩应力大于原岩应力。因此,为了保证回采巷道的稳定性和安全性,下层煤回采巷道往往采用内错式布置,使其处于减压区范围内。

(1) 内错式布置。当上部煤层工作面遗留煤柱宽度较小时可采用内错式布置方式,下部煤层回采巷道布置在上部煤层回采巷道的内侧,处于上部煤层采空区下方的应力降低区内,巷道压力小,易于维护。

(2) 外错式布置。上部煤层工作面遗留煤柱宽度较大时,可采用外错式布置方式,即下部煤层回采巷道布置在上部煤层回采巷道的外侧,处于上部煤层遗留煤柱的下方。巷道围岩往往处于煤柱支承压力作用区,对巷道维护不利。

(3) 重叠式布置。重叠式布置方式即上、下部煤层回采巷道垂直布置,工作面长度一定,方向易于掌握。当上部煤层采用无煤柱护巷时,下部煤层回采巷道可采用重叠式布置。

1.3.7 煤层群开采理论及技术研究现状

同单一煤层开采研究成果相比,近距离煤层开采研究成果较少。在解决煤层群开采问题时,许多学者首先都尝试给“近距离煤层”这一概念下一个定义。前苏联学者根据煤层间的距离来作为确定能否采用上行顺序开采法的条件,主要是以煤层开采时顶板破坏带高度来定义“近距离煤层”,并给出破坏带高度计算公式。T. 葛尔巴节夫在总结上行顺序开采试验的基础上,以开采下部煤层时对上部煤层是否发生影响以及影响程度确定出上行顺序开采煤层群的基本要素和条件。我国《煤矿安全规程》中对近距离煤层定义为:煤层群层间距离较小,开采时相互有较大影响的煤层^[36]。

近距离煤层开采时,根据各煤层群开采顺序可分为下行式开采和上行式开采两种,先采上部煤层后采下部煤层称下行式开采,反之称上行式开采。国内外学者对上行开采研究都是围绕煤层间距和采厚进行的,特别是把煤层层间距离作为决定能否采用上行顺序开采的主要衡量指标^[37]。一种观点认为,上层煤应处于下部煤层开采形成的围岩弯曲下沉带,层间距为下层煤厚度的40~50倍以上;也有一种观点认为,只要处于不规则垮落带上方即可,但垮落带高度的计算差异较大。煤层群间能否采用上行顺序开采的判别方法主要有:实践经验法、比值判别法、“三带”判别法、围岩平衡法等,并给出了相应的判别基本准则。根据已有的研究成果,实现上行顺序开采的先决条件是,下部煤层开采不破坏上部煤层的完整性和连续性,从已有近距离煤层开采文献看,对上行开采的机理和准则,国内外研究较少,且认识也不统一。当煤层间距离很小时,采用该开采方法不能够实现。近距离煤层下行开采研究成果主要围绕以避开煤柱集中压力为出发点进行巷道布置及煤柱下方工作面的安全回采。由于以往研究近距离煤层下行开采问题,大部分是煤层间距相对较远,实际生产中采场围岩控制方面与单一煤层开采变化不大。因此,以往近距离煤层下行开采在此方面的岩层控制理论与技术研究主要是运用已有单一煤层开采的研究成果。

以上文献对于煤层间距离较大时,煤层相互开采影响程度相对较小,其研究成果对确定比较合理的开采煤层群的方法具有重要意义,而对于煤层间距很小的极近距离煤层开采不

能完全适用。

煤层开采引起回采空间围岩应力重新分布,不仅在回采空间周围的煤柱上造成应力集中,而且该应力会向底板深部传递。随着煤层间距离减小,上下煤层间开采的相互影响会逐渐增大,特别是当煤层间距很近时,下部煤层开采前顶板的完整程度已受上部煤层开采损伤影响,其上又为上部煤层开采时的直接顶垮落的矸石,且上部煤层开采后残留的区段煤柱在底板形成的集中压力,导致下部煤层开采区域的顶板结构和应力环境发生变化,从而使极近距离煤层开采出现了许多新的矿山压力现象。

史元伟等^[38]采用解析法、数值分析方法对近距离煤层开采的相互影响、开采层及煤柱下方的底板岩层应力分布以及跨越上山开采,上部宽巷开采,分层垮落法开采,条带开采等的围岩应力分布规律作了许多卓有成效的工作,为下部煤层开采设计优化及围岩控制设计起到了积极的作用。模拟结果对合理确定煤层群开采顺序以及回采巷道和区段煤柱合理布置具有一定的理论和实际意义,为多煤层同采生产实践提供了一定的参考依据。

在我国生产实践中极近距离煤层的开采方式主要有联合开采、单层逐层开采和含夹矸煤层的开采。过去,由于我国采煤机械化程度较低,尤其是综采的比重不大,回采工艺落后,采煤工作面的单产普遍不高,一个大中型矿井数个采区、多个工作面同时开采才能保证要求的产量,于是通常需对煤层群中的数个煤层实行联合开拓与准备,对联合开采的研究主要是集中在联合开采合理错距的确定。

极近距离煤层群采用单层开采方式是实现大型集约化矿井生产的必由之路,随着综采技术的应用,工作面单产大幅度提高,已成为目前各矿区开采极近距离煤层群主要的开采方式。目前,极近距离煤层群开采无特别说明均指单层开采方式。然而与其广泛应用极不相称的是,极近距离煤层的开采理论系统研究尚不完善,主要是极近距离煤层的开采实践和经验的定性总结。

1.4 薄煤层保护层卸压开采技术存在的问题与展望

薄煤层作为保护层进行开采能够达到理想的卸压效果,在全国治理瓦斯最先进的淮南矿业集团公司于2006年3月决定:加大薄煤层开采力度,凡是0.8 m以上,作为保护层的煤层必须开采。薄煤层作为保护层开采已成为治理煤与瓦斯突出等动力灾害的重要手段,在低透气性高瓦斯突出煤层群条件下薄煤层保护层开采具有以下技术和管理难点^[38]:

(1) 工作面采高低、工作条件差。人员出入工作面或在工作面内作业均十分困难,而且受空间尺寸限制,工作面设备布置密集,严重影响通风效果,使粉尘和瓦斯不宜排除,对工人的身体健康造成极大损害,不符合“以人为本”的开采理念。

(2) 在薄煤层开采时,其采掘比往往比较大、掘进率高,采煤工作面接替困难。由于工作面推进速度快,而回采巷道多为半煤岩巷,巷道掘进速度很慢,造成薄煤层综采工作面接替紧张。

(3) 煤层厚度变化、断层等地质构造对薄煤层工作面生产影响大,主要表现在工作面会根据地质条件的变化而频繁搬家或者跳采。

(4) 在薄煤层条件下采用常规的采煤方法,其经济效益不如开采厚及中厚煤层工作面。由于薄煤层推进相同长度下煤炭资源的回收量不及中厚煤层,使得从经济效益角度考虑时,

往往采取放弃薄煤层而优先开采中厚煤层的开采方式,这种开采方式必然会导致大量宝贵的焦煤资源被丢弃。

(5) 在高瓦斯煤层群中开采时,由于煤层中瓦斯涌出量大,采用常规的开采方式,由于工作面内的工人和设备较多,容易导致工作面内的通风不畅而引起瓦斯积聚,可能带来安全隐患。

目前,我国很多矿区都积极开展了薄煤层无人工作面采煤技术的研究和现场工业性试验,但多数仅实现了采煤工作面内的无人化,而且在工作面设备出现故障或遇到设备不能适应现场条件时,须人工停机,并派工人到工作面现场进行处理,并需要对工作面内设备进行必要的定期检修和维护;另外,在巷道掘进和支护工作面仍然需要大量的现场作业人员,从某种意义上讲还未真正实现煤矿井下的无人化采煤。将薄煤层作为保护层开采是高瓦斯突出煤层群开采条件下瓦斯灾害防治的重要手段,未来随着薄煤层采煤设备制造技术和自动化控制技术的提升,以及国家对资源合理开发利用要求的提高,薄煤层的开采日益受到重视,而将薄煤层作为保护层开采也将成为低透气性高瓦斯突出煤层群安全高效开采技术发展的重要途径。