

国家自然科学基金重点项目(50534090)资助
安徽省科技厅自然科学基金项目(050440402)资助
煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室资助

保护层开采覆岩变形移动特性 及防突工程应用实践

石必明 著



煤炭工业出版社

国家自然科学基金重点项目 (50534090) 资助

安徽省科技厅自然科学基金项目 (050440402) 资助

煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室资助

保护层开采覆岩变形移动特性 及防突工程应用实践

石 必 明 著

煤 炭 工 业 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书深入研究了煤与瓦斯突出防治中远距离开采保护层时,覆岩垮落、移动、变形规律,以及被保护层透气性变化和瓦斯流场分布。

第0章,绪论,简要介绍所研究问题的提出背景、研究现状及其理论基础;第1章,矿井煤(岩)、瓦斯动力现象及其特征;第2章,保护层开采覆岩破断移动特性;第3章,保护层开采覆岩裂隙分布特性;第4章,保护层开采覆岩移动变形数值模拟;第5章,裂隙煤岩体渗透特征和变形移动试验研究;第6章,保护层开采煤岩破裂过程固气耦合模型及数值解法;第7章,远距离保护层开采现场试验研究;第8章,主要结论。

本书适合从事煤与瓦斯突出防治工作的煤矿工程技术人员、科研工作者及大专院校师生阅读使用。

目 次

0 绪论	1
0.1 问题的提出	1
0.2 保护层开采研究现状	3
0.3 保护层开采覆岩垮落移动裂隙演化研究 现状	11
0.4 煤(岩)瓦斯渗流和煤层卸压瓦斯抽放研究 现状	13
0.5 保护层开采的发展方向	15
0.6 本书所研究内容的理论基础	16
0.7 研究路线及主要研究内容	16
1 矿井煤(岩)、瓦斯动力现象及其特征	20
1.1 煤(岩)与瓦斯突出	20
1.2 预防煤与瓦斯突出准数	22
1.3 煤与瓦斯突出分布规律	24
1.4 保护层开采保护范围	30
2 保护层开采覆岩破断移动特性	36
2.1 概述	36
2.2 保护层覆岩破坏特征及分布形态	37
2.3 保护层开采覆岩破坏及移动的力学模式	44
2.4 关键层的破断特性及对覆岩裂隙发育的 影响	46

2.5	本章小结	54
3	保护层开采覆岩裂隙分布特性	55
3.1	概述	55
3.2	覆岩离层动态分布规律	56
3.3	断裂带裂隙特征与分布	61
3.4	弯曲下沉带裂隙的形成特征	62
3.5	本章小结	63
4	保护层开采覆岩移动变形数值模拟	64
4.1	概述	64
4.2	细观单元岩石损伤模型及本构关系	66
4.3	保护层开采力学特性	69
4.4	远距离保护层开采被保护层应力及变形特性 数值模拟	71
4.5	相对层间距与被保护层变形关系	80
4.6	保护层开采对被保护层作用分析	83
4.7	本章小结	84
5	裂隙煤岩体渗透特征和变形移动试验研究	86
5.1	概述	86
5.2	裂隙煤岩渗流特征	87
5.3	型煤应力与渗透性关系	91
5.4	远距离保护层开采相似模型试验	96
5.5	煤层变形与透气性关系	127
5.6	本章小结	128
6	保护层开采煤岩破裂过程固气耦合模型及数值解法	131
6.1	概述	131

6.2	含瓦斯煤岩流固耦合模型 (F-RFPA)	131
6.3	F-RFPA 流固耦合模型数值解法.....	134
6.4	远距离保护层开采被保护层透气性演化 规律数值模拟	137
6.5	被保护层穿层钻孔瓦斯抽放流场数值模拟	139
6.6	本章小结	142
7	远距离保护层开采现场试验研究	144
7.1	矿井地质、开采概况	144
7.2	试验区瓦斯地质概况	144
7.3	被保护层远程卸压瓦斯抽放	147
7.4	远距离保护层开采效果考察	149
7.5	远距离保护层开采对被保护层防突效果 分析	158
7.6	远距离被保护层回采期间瓦斯涌出动态 分析	162
7.7	本章小结	164
8	主要结论	166
	参考文献.....	170

0 绪 论

0.1 问题的提出

我国是以煤炭为主要能源的国家,目前及今后 20 年煤炭在我国一次能源中的比重仍将占 70% ~ 75%^[1]。国家对矿物资源开采工业的可持续发展的要求越来越严,为保证国民经济的正常发展,仍需有计划、大规模地开采煤炭资源。煤矿瓦斯(以 CH_4 为主)是同煤共生,并存储在煤与围岩中的气藏资源。在煤炭生产过程中,它以涌出、喷出和突出等形式释放出来。因瓦斯具有燃烧、爆炸和窒息性,所以它严重地威胁着煤矿生产安全,制约着煤炭工业的发展和效益的提高。

我国目前已探明煤炭地质储量超过了 1.0 Tt,其中厚煤层储量占 44.0% 左右。然而,我国煤矿地质构造及煤层赋存条件比较复杂,在目前开采的矿井中,30% 以上是高瓦斯或煤与瓦斯突出矿井;80% 以上的厚煤层具有自燃倾向;全国大中型煤矿开采平均深度 400 m 以上,冲击地压和地热灾害也在不断增加,如何安全高效地开采煤炭以满足社会发展需求,是目前摆在采矿工作者面前的重要任务。

我国煤炭储量丰富,同时也是世界上煤层瓦斯资源最丰富的国家之一。据测算,仅陆地 2 000 m 以浅的烟煤和无烟煤层中就蕴藏着 $(30 \sim 35) \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的瓦斯,我国煤层瓦斯资源为美国的 3 倍,但瓦斯抽采量与美国相差较大,这主要是我国煤层瓦斯储存特征所决定^[2],其特点是“两低一高”,即煤层瓦斯压力低、煤层透气性低、煤层瓦斯吸附能力高,这一特点给煤层开采和瓦斯抽放带来了较大困难。我国多年的科研和生产实践,尤其

是煤矿瓦斯抽放经验表明, 瓦斯和煤岩除有共生、共储的特点(即煤岩体内既是生气源, 又是瓦斯的储气源)外, 瓦斯只是在煤体直接被开采和围岩体在采动影响下变形、破断后才会有大量的运移, 包括瓦斯的渗流、扩散、升浮, 向采场涌出、突出等, 由于煤层本身赋存条件和经济技术因素, 不能有效地大规模进行地面钻井抽放瓦斯, 而应该着力于研究采动过程中层状岩体应力分布状态和裂隙分布与煤层瓦斯运移的特点, 研究有效控制瓦斯运移的技术。

预防煤与瓦斯突出措施按作用范围来划分, 有区域性措施和局部性措施, 其中开采保护层是预防突出最有效、最经济的区域性措施。几乎所有发生煤与瓦斯突出的国家, 只要有保护层, 都采用这项措施。我国《防治煤与瓦斯突出细则》规定: “开采煤层群时必须首先开采保护层”; “矿井首次开采保护层时, 必须进行保护范围及保护效果的考察”。我国从 1958 年起成功地使用了开采保护层的技术, 目前开采保护层的矿井占突出矿井总数的 26%。但由于不同矿井煤层赋存条件的差异, 以及在保护层开采中对于防治煤与瓦斯的作用规律还认识不够, 所以目前需要解决的问题主要集中在以下几方面:

(1) 保护层开采引起采场围岩体矿山压力重新分布并使煤岩体结构发生变化, 采动后上覆岩层移动与破断引起的采动裂隙的分布变化, 随之引起煤岩体中瓦斯赋存状态和运移形态的变化。在以往的研究中, 国内不少学者多把研究重点集中在覆岩应力变化上, 而在现场实际条件下, 对覆岩应力变化与煤岩透气性之间的关系, 特别是保护层开采以后被保护层透气性系数的空间分布形态等的研究较少。

(2) 保护层开采以后, 被保护层采用钻孔进行卸压瓦斯抽放时, 钻孔参数的布置及对瓦斯抽放效果的影响等缺少理论支持。为此, 有必要探讨被保护层煤层透气性变化对卸压瓦斯抽放的影响, 被保护层瓦斯运移特征及钻孔参数与瓦斯抽放量的关系。

(3) 目前远距离保护层开采对被保护层作用效果的认识还是初步的, 当煤层群中无合适邻近层开采, 相对层间距(保护层与被保护层层间距与保护层采高之比) 大于一定值时, 保护层开采过程中及开采以后, 被保护层地应力、煤层变形及煤层透气性分布等还处于研究阶段。

(4) 煤岩体中瓦斯的涌出、突出等是一种包括吸附瓦斯解吸与瓦斯分子扩散等的复杂过程, 它与煤岩体的孔隙结构破坏特性、矿山压力、煤层瓦斯压力、瓦斯含量、瓦斯的吸附解吸特性等关系密切, 因此在理论与实践上所取得的成果都是阶段性的。在保护层开采过程中, 矿山压力通过一定的形式作用在采场周围的煤岩体上, 使煤岩体的孔隙裂隙分布、渗透系数和力学特性发生很大变化。因此, 保护层开采时采场围岩矿山压力和瓦斯运移并非独立的, 而是相互制约、相互影响的, 是一个较为复杂的变化过程, 有待进一步研究。

0.2 保护层开采研究现状

0.2.1 保护层作用机理研究现状

在突出矿井中, 预先开采的, 并能使其他相邻的有突出危险煤层受到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, 在时间上和空间上都超前开采位于危险煤层顶板或底板内的煤(岩)层。保护层与被保护层之间的层间距若合适, 开采保护层才能使突出危险煤层的应力-应变状态和瓦斯动力状态发生改变, 以达到预防煤与瓦斯突出的目的。

开采薄保护层起防护作用的条件是保护层的采高要大于围岩的总形变量, 当其他因素相同时, 主要取决于开采深度和回采参数(工作面长度和顶板控制方法)。若保护层太薄, 采空区被岩石自行充填, 或在保护层变薄带留下煤柱, 开采保护层所起的保护作用影响范围就缩小了, 因为在上或下保护层产生保护作用之前, 采空区的顶板和底板已闭合。

开采保护层方法的选取，首先决定于煤系地层的结构——煤系中含有的煤层数，以及是否有可作为保护层的煤层；其次是保护层与被保护层之间的岩层厚度，这些岩层的岩石成分和物理力学性质对保护效果具有实质性的影响。

按瓦斯因素，保护的范同是保护层和被保护层之间的层间距相适应。在层间距合适时可以消除瓦斯因素（危险煤层的瓦斯压力和瓦斯含量）对煤与瓦斯突出势态造成的影响。当突出危险煤层的应力-应变和瓦斯动力状态发生人为变化时，保护作用才能表现出来。

保护层的围岩在自然平衡拱内移动，取决于工作面推进后的时间，以及保护层与被保护层之间的法线距离。前苏联学者根据岩石移动时岩层裂隙发育及透气性把自然平衡拱内的围岩分为不规则移动和冒落带、断裂移动带和未断裂移动带，简称“三带”^[3]。不规则移动和冒落带内有贯通的透气裂隙，形成统一的透气系统；断裂移动带内形成解吸瓦斯可通过贯通裂隙，但未形成统一的透气系统，其残余瓦斯压力很少与原始压力有关；未断裂移动带内煤层透气性没有明显的提高，瓦斯不能沿裂隙从被保护层流向保护层巷道，被保护层的瓦斯排放和突出危险性只有不大的局部变化，其残余瓦斯压力主要取决于原始压力。各带岩层移动及变形特征见表0-1。保护层回采后有突出危险煤层的瓦斯动力状态与层间岩石厚度的关系可用下式表示：

$$p' = \varphi \exp(\alpha R)$$

式中 p' ——被保护层残余瓦斯压力；

R ——保护开采后的保护范围，m。上保护层时 $R = M$ （ M 为层间距，m），下保护层时 $R = M/m$ （ m 为保护层采高，m）；

α, φ ——经验系数。在未进行瓦斯抽放，被保护层的瓦斯只通过层间岩石排放的条件下，其值可依据表0-2选取；进行瓦斯抽放时，其值可依据表0-3选取。

表 0-1 缓倾斜和急倾斜上、下保护层回采时不同透气性
采动裂隙形成范围

带	层间岩石采动 裂隙特征	层间岩石破裂 相对伸张 形变量	保护层开采后的保护范围 R/m			
			缓倾斜煤层		急倾斜煤层	
			下保 护层	上保 护层	下保 护层	上保 护层
I	贯通的透气裂隙- 通道, 形成统一的透 气系统	0.006 ~ 0.010	≤ 50	15 ~ 16	$\leq 38 \sim 40$	30 ~ 35
II	裂隙产生, 但未形 成统一的透气系统, 个别裂隙穿过层间岩 石, 且阻力大	0.010 ~ 0.002	50 ~ 100	16 ~ 30	40 ~ 85	35 ~ 50
III	瓦斯不能沿裂隙从 被保护层流向保护层 巷道	≤ 0.002	100 ~ 110	30 ~ 35	85 ~ 90	50 ~ 60

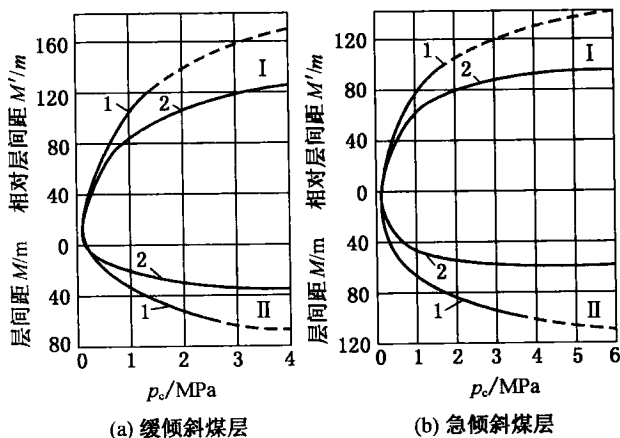
表 0-2 被保护层未进行瓦斯抽放时 φ 和 α 的经验值

系 数	缓倾斜煤层		急倾斜煤层	
	下保护层	上保护层	下保护层	上保护层
φ	0.82	0.76	0.769	0.22
α	0.029 8	0.106 4	0.045 5	0.097 3

表 0-3 被保护层进行瓦斯抽放时 φ 和 α 的经验值

系 数	缓倾斜煤层		急倾斜煤层	
	下保护层	上保护层	下保护层	上保护层
φ	2.803	2.19	1.65	0.551
α	0.014 7	0.041 6	0.024 5	0.043

采取保护层开采的同时,向上部或下部煤层打钻抽放瓦斯,可以使距钻孔 18~20 m 范围内的煤层瓦斯压力显著降低。图 0-1 所示为缓倾斜被保护层采用人工抽放瓦斯和未采用人工抽放瓦斯时残余瓦斯压力与层间距的关系,由此可以看出,采用人工抽放瓦斯可以大大提高保护层开采的保护范围,提高防突的可靠程度。尤其是处于岩石不断裂移动带内的煤层,采取穿层钻孔瓦斯



1—抽放瓦斯; 2—未抽放瓦斯

I—开采下保护层; II—开采上保护层

图 0-1 保护层开采残余瓦斯压力与层间距或相对层间距的关系

抽放才能有效消除煤层瓦斯突出危险。

文献[4]利用有限元方法研究了缓倾斜煤层下保护层开采的保护作用得出:下保护层开采后,在其上覆岩层中形成集中应力区、卸压区和原岩应力区。岩层的卸压边界点、最大卸压点随层间距增大向采空区深部移动,后者移动幅度较前者大,岩层的卸压程度随层间距的加大而衰减;卸压区中岩层发生膨胀变形,不同层位其变形特性不同,下位岩层中,由于离层裂隙的影响,变形曲线为具有凹向变化的复杂曲线,上位岩层为宽缓的上凹曲线,岩层的膨胀变形随层间距的增大而降低,离层现象可影响到50倍采高以远;煤层的透气性变化主要取决于煤层的膨胀变形,其变形与渗透率之间具有负指数关系。

总而言之,开采保护层的作用归纳为:

(1) 地压减少,弹性潜能得以缓慢释放。

(2) 被保护煤层膨胀变形,形成裂隙与孔道,煤层透气性增加。所以被保护层内的瓦斯能大量排放到保护层的采空区内,瓦斯含量和瓦斯压力都将明显下降。

(3) 被保护煤层瓦斯涌出后,煤的强度增加。所以,保护层开采后,不仅减弱了引起煤层发生煤与瓦斯突出的两个动力,而且增强了抵抗煤层发生煤与瓦斯突出的能力。

0.2.2 国内外保护层开采应用现状

超前开采保护层是防止煤与瓦斯突出的有效措施,所以该措施被国内外广泛用于煤与瓦斯突出矿井煤层群开采时预防突出的区域性防突措施。但随着保护层与突出煤层(被保护层)间距的加大,保护效果逐渐降低,远距离保护层可能会出现保护效果不足,甚至失效的问题。因此国内外对远距离保护层的保护效果和扩大其保护范围及效果的措施进行了考察研究。地质条件不同,保护层的保护范围和效果差异很大,考察研究主要在不同的地质条件下进行。

前苏联是研究和实施保护层开采、预防突出最早和最广泛

的国家之一。在保护层开采、保护范围测定,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。法国从 1933 年开始对保护层开采进行了试验研究,德国、波兰等国也应用开采保护层防治突出。我国从 1958 年起在北票、重庆中梁山矿区开始进行保护层开采防治突出的试验研究,目前北票、中梁山、天府、南桐、松藻、鸡西、乐平、涟邵、六枝、水城等矿区都在应用这一措施,积累了较丰富的经验。重庆地区各矿务局一直坚持采用开采保护层措施,年突出次数从 1961 年的 155 次大幅下降到 1976 年的 10 次左右,已基本控制住突出的发生。表 0-4 给出了一些矿井保护层开采的情况。

表 0-4 我国部分矿井保护层开采情况

煤田	矿井	开采深度/m	保 护 层				被保护层	层间距/m	层间岩性
			煤层	位置	倾角/(°)	采高/m			
中梁山	南井	200	2	下	65	0.7	1	3~7	粉砂岩
天府	磨心坡	360	7	上	60	0.55	9	23	页岩、粉岩
南桐	鱼田堡	360	6	下	30	1.2	4	30	灰岩、页岩
南桐	南桐一井	310	3	上	27	0.6	4	6~10	粉砂岩、砂岩
南桐	东林矿	200	5	下	86	1.5	4	36	灰岩、页岩
松藻	松藻一井	250	10	下	30	0.5	8	21	灰岩、页岩
松藻	松藻二井	250	6	上	30	0.9	8	16	灰岩、页岩
天府	刘家沟	450	3	上	60	1.1	9	64	砂岩、石灰岩

表 0-4 (续)

煤田	矿井	开采深度/m	保 护 层				被保护层	层间距/m	层间岩性
			煤层	位置	倾角/°	采高/m			
北票	台吉一井	500	3 _C	上	46	0.8	4	19	砂岩、细砂岩
北票	台吉二井	530	3 _A	上	50	1.5	4	28	砂岩、细砂岩
北票	台吉三井	440	2	上	62	1.2	3	22	砂岩、细砂岩
北票	冠山二井	400	3 _A	上	41	1.4	41/2	60	砂岩、砂质页岩
乐平	涌山二井	280	4	下	70	2.7	6	55	
白沙	红卫	150	5	上	30	0.8	6	30	砂岩、砂质页岩
六枝	地宗矿	270	3	上	50	1.23	7	43	细粉砂岩、页岩
鸡西	滴道四井	500	13	上	24	0.6	12	6~12	砂岩
鸡西	滴道四井	500	19	上	24	1.3	20	17	砂岩
涟邵	立新蛇形山	250	1 _上	上	30	1.15	3中	35	砂岩、砂质页岩
淮南	新庄孜	400	C ₁₄	上	13	1.5	C13	14~18	页岩、砂岩
淮南	谢二矿	470	C ₁₅	上	13~30	1.82	C13	16.8	页岩、砂岩
淮南	谢三矿	500	B ₁₀	上	25	1.0	C13	13~18	页岩、砂岩

表 0-4 (续)

煤田	矿井	开采深度/m	保 护 层				被保护层	层间距/m	层间岩性
			煤层	位置	倾角/(°)	采高/m			
淮南	谢一矿	570	B ₁₀	上	26	0.8~1.5	B11b	25	页岩、砂岩
淮南	李一矿	450	C ₁₅	上	20~30	1.5	C13	13	页岩、砂岩
水城	老鹰山	390	8	上	28	1.5	12	21	砂岩、粉砂岩

急倾斜上保护层层间距最大的成功实例是天府磨心坡矿, 层间距达 78 m。急倾斜下保护层层间距最远的是乐平涌山二井, 层间距为 55 m。我国缓倾斜下保护层开采现场考察数据很少, 层间解放范围一般不超过 50 m。淮南谢一矿 1985 年对开采下保护层 B₁₀ 煤层, 保护 B_{11b} 煤层进行了系统的考察研究, 层间距只有 18~24 m, 倾角 26°。南桐鱼田堡煤矿从 1977 年开始利用有局部突出危险的可采煤层 6 号煤层作为突出危险的 4 号煤层(主采煤层)的下保护层的试验区, 试验区为 2601 采区, 层间距 33~37 m, 6 号煤层厚度 0.8~1.3 m, 倾角 30°~32°, 层间岩石有一层厚达 7.6 m 的硅质灰岩, 其硬度系数 $f=10\sim12$ 。6 号煤层瓦斯压力为 3.35 MPa, 瓦斯含量是 15~17 m³/t, 4 号煤层厚度 2.6~2.9 m, 瓦斯压力为 6.0 MPa, 瓦斯含量是 25~27.5 m³/t, 该煤层全层具有严重突出危险。在试验区, 首先对 6 号煤层的突出危险性进行区域性预测。在煤巷总长度 9 299 m 中, 预测无突出危险的长度为 8 509 m, 有突出危险的长度为 790 m, 突出危险巷道长度仅占 8.5%, 预测有突出危险的巷道掘进采取防突措施, 在无突出危险的巷道掘进, 只采取安全防护措施。这样大大

提高了保护层的掘进速度,加快了4号主采煤层的保护,取得了显著的效益,扭转了长期以来矿井产量低,采掘接替紧张和企业亏损严重的局面。该试验区存在的问题是在6号煤层已采4~6年的保护范围内,在抽放卸压瓦斯不充分的地点发生了5次突出,突出煤量13~79 t,瓦斯量391~8 128 m³;在保护范围内巷道掘进的瓦斯涌出量也较大(平均值为1.0~5.2 m³/min)。

上述矿区多数矿井开采的突出煤层都是缓倾斜煤层,无全面可采的上保护层,而下保护层层间距都在50 m以上(属远距离下保护层)。例如淮南潘一、潘三矿的11号煤层距突出煤层13号煤层接近80 m。这样远的距离,其保护效果如何?效果如果不好,人为采取瓦斯抽放措施增加其效果是否可行?技术参数如何?等等。这些研究不仅对发展保护层理论有重大意义,而且对解决淮南、淮北、平顶山等大型煤炭企业深部安全开采的重大关键技术问题有实际意义。

0.3 保护层开采覆岩垮落移动裂隙演化研究现状

为了研究下保护层远距离保护层开采防突作用机理,有必要分析研究覆岩及被保护层煤(岩)的断裂变形及渗透性变化规律。

地下矿体的采出必定会引起采场围岩体内的应力重新分布,引起围岩的变形、破坏及运动,从而导致围岩裂隙状态的变化。岩层移动与开采沉陷是采矿学科的基础之一,也是保护层开采防突作用考察的基础。参与研究的学者与研究成果众多,提出了多种假说与理论,其中具有代表性的有压力拱假说、悬臂梁假说、预成裂隙假说、铰接岩块假说、砌体梁理论(钱鸣高院士)、传递岩梁假说(宋振骥院士)等。钱鸣高院士^[5]根据砌体梁理论对煤层开采后覆岩移动规律提出“横三区”、“竖三带”,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,由下往上岩层移动分为垮落带、断裂带、整体弯曲下沉带。实践表明,上覆岩层的岩性对岩层移动、变形和断裂有很大