

沿空留巷开采技术

袁树来 袁伟昊 编著



煤炭工业出版社

沿空留巷开采技术

袁树来 袁伟昊 编著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

沿空留巷开采技术 / 袁树来, 袁伟昊编著. --北京: 煤炭工业出版社, 2013

ISBN 978-7-5020-4338-4

I. ①沿… II. ①袁… ②袁… III. ①无煤柱—作用—巷道掘进 IV. ①TD823.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 231003 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 10¹/₂
字数 239 千字 印数 1—1 000
2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷
社内编号 7166 定价 30.00 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

沿空留巷是煤炭企业改善安全条件和提高技术经济指标,增产、增盈的重要途径之一。本书在总结国内外沿空留巷开采技术的基础上,比较系统地介绍了沿空留巷开采的基本原理、采区巷道矿山压力与矿压显现规律、沿空巷道的护巷技术、高水材料巷旁充填沿空留巷技术、膏体巷旁充填沿空留巷技术。

本书可供煤矿生产、设计和科研部门的工程技术人员阅读,也可作为矿业院校师生的参考书。

前 言

我国是世界第一产煤大国，煤炭产量占世界的 37%，同时煤炭又是我国的主要能源，分别占一次能源生产和消费总量的 76% 和 69%。国家《能源中长期发展规划纲要（2004—2020 年）》中已经确定，中国将坚持以煤炭为主体、电力为中心、油气和新能源全面发展的能源战略。显然，在相当长的时期内，煤炭仍将是我国不可替代的主导能源。

我国的煤炭生产多采用井工开采，年掘进巷道几百万千米，其中采区平巷占 70% 以上，而绝大部分采区平巷长期以来一直沿用保留煤柱的方法维护，采用煤柱维护区段巷道的煤炭损失量很大，一般占全矿煤损总量的 40% 左右。随着矿井开采深度的增加，原岩应力升高，护巷煤柱宽度越来越大。如此一来，不仅煤炭采出率降低、巷道维护困难，而且较宽的区段煤柱在工作面回采后形成应力集中，使布置在煤柱下方的底板岩巷和下层煤回采巷道维护困难，有时甚至会导致煤与瓦斯突出。因此，研究区段不留煤柱、实现采区无煤柱护巷，具有重要战略意义。

从 20 世纪 50 年代开始，国内外开展了大量无煤柱护巷的试验研究，对无煤柱护巷的矿压显现规律、沿空留巷支护系统的支护阻力、巷道围岩控制技术等进行了系统的研究，取得了大量的研究成果，在许多矿井得到了成功应用，推动了煤炭科技的进步。

无煤柱开采分为两种方式：一种是沿空掘巷，一种是沿空留巷。由于巷道与采煤工作面在空间位置上和时间关系上的变化，沿空掘巷和沿空留巷受到采动引起的上覆岩层运动和支承压力的分布不同，致使巷道的围岩变形和维护状况相差悬殊。沿空掘巷可大幅度提高采区煤炭的采出率，避开了煤柱支承压力和工作面第一次采动后围岩强烈活动的影响，缩短了巷道维护时间，减少了巷道维护工作，降低了维护费用。但沿空掘巷必须在临近工作面采完和采空区顶板岩层活动大体稳定以后进行，这给采掘接替造成很多困难，尤其是在推进速度较快的综采工作面。为缓和采掘关系紧张的矛盾，往往采取工作面跳采布置方式，跳采导致出现大量孤岛工作面，更是加大了巷道维护的难

度。尤其是进入深部以后，小煤柱沿空掘巷围岩虽然处于应力低值区，但由于煤柱松软破碎，承载能力很低，在工作面受采动影响时，上覆基本顶岩层三角块结构旋转下沉，塑性区、破碎区迅速扩展，导致巷道变形剧烈（通常以米计算），该类巷道围岩的稳定性问题越来越突出，严重影响生产效率，威胁生产安全。

沿空留巷在技术和经济上都具有很大的优越性。首先，因为沿空留巷可以完全取消区段煤柱，因而比沿空掘巷能更有效地提高采出率。其次，沿空留巷可以较大幅度地降低掘进率，缩短采区的准备时间。据对部分矿井统计，沿空留巷一般可使采区巷道的掘进率降低，效果好的可降低40%。此外，彻底取消煤柱，对改善近距离煤层的巷道维护十分有利。发展沿空留巷技术，可以有效克服目前沿空掘巷采煤系统中存在的上述问题，对降低回采巷道掘进率、减少综采工作面搬家时间、实现工作面正常接替、提高采区采出率、提高煤炭开采的经济效益和社会效益具有重要意义。

沿空留巷可实现工作面Y形通风，采空区的漏风主要流向留巷，从根本上解决了上隅角瓦斯积聚难题；有效解决了工作面的瓦斯超限问题，利于实现高浓度瓦斯抽采；从而可成倍提高我国高瓦斯难抽放煤层工作面的单产水平，具有重大的社会经济效益与安全高效的开采效益。沿空留巷符合煤炭工业走“资源利用率高、安全保障、经济效益好、环境污染少和可持续的煤炭工业发展道路”的要求，符合绿色采矿、科学采矿的发展方向，对促进我国无煤柱护巷技术的发展具有重要的理论意义和实用价值。

为推动我国沿空留巷技术的发展和进步，编者编著了《沿空留巷开采技术》一书。本书是在总结我国煤炭科研工作者沿空留巷理论和实践的基础上，根据煤炭矿床沿空留巷开采技术条件及矿山特点编著而成的。全书共分5个章节，从不同的角度对沿空留巷开采的概念、基本形式、原理、技术、设备进行了论述，试图为我国煤矿探索和应用沿空留巷开采技术提供借鉴。

本书编著过程中得到了太原理工大学矿业工程学院院长梁卫国教授（博导）的指导和帮助，参考并融入了《无煤柱开采》（李栖风主编，煤炭工业出版社，1986年8月）、《沿空留巷的理论和实践》（孙恒虎、赵炳利编著，煤炭工业出版社，1992年8月）、《低透性煤层群无煤柱与瓦斯共采理论与实践》（袁亮著，煤炭工业出版社，1992年8月）等编著者的研究成果和近年来国内外无煤柱开采研究者发表的相关科技文献，焦学锋、耿兆丁为本书的出版做了

大量的资料收集、文字编辑、图表制作工作，在此一并表示衷心感谢！因笔者学识与水平所限，加之沿空留巷开采技术尚处于发展阶段，很多规律还未被人们所认识，错误与不足在所难免，衷心期盼读者评判斧正！

编 者

2013 年 10 月于北京

目 次

1 概 论	1
1.1 沿空留巷的定义及其必要性	1
1.2 沿空留巷的基本方式及适用条件	1
1.3 沿空留巷研究现状综述	6
1.4 沿空留巷研究和应用存在的不足及研究目标	12
2 采区巷道矿山压力与矿压显现规律	14
2.1 巷道矿山压力的基本概念	14
2.2 采区巷道的变形与破坏	17
2.3 采区巷道矿压显现规律	21
2.4 沿空留巷开采覆岩移动规律	28
3 沿空巷道的护巷技术	31
3.1 护巷方式分类与巷旁支护类型	31
3.2 机械构筑护巷带	35
3.3 风力充填构筑凝固材料护巷带	38
3.4 泵送充填构筑凝固材料护巷带	67
3.5 沿空巷道护巷带参数的选择、计算与观测	72
3.6 巷道壁后充填与巷道周边封闭	76
4 高水材料巷旁充填沿空留巷技术	83
4.1 高水材料的物理力学特性	83
4.2 高水材料的水化反应及水化硬化机理	86
4.3 高水材料的稳定性能	89
4.4 高水固结充填体的力学特性	94
4.5 高水巷旁泵充填技术	108
4.6 山西保利合盛煤业有限公司综合机械化高水巷旁充填沿空留巷技术	115
5 膏体巷旁充填沿空留巷技术	125
5.1 膏体充填材料	125
5.2 快速留巷巷旁充填系统的研究	137
参考文献	156

1 概 论

1.1 沿空留巷的定义及其必要性

沿空留巷 (gob-side entry retaining) 是指在采煤工作面后方沿采空区边缘维护原回采巷道, 采用一定的技术手段将上一个区段的巷道重新支护留给下一个区段使用, 是无煤柱开采技术中的一种方式。

沿空留巷在技术和经济上都具有很大的优越性。首先, 因为沿空留巷可以完全取消区段煤柱, 所以比沿空掘巷能更有效地提高采出率。其次, 沿空留巷可以较大幅度地降低掘进率, 缩短采区的准备时间。据对部分矿井的统计, 沿空留巷一般可使采区巷道的掘进率降低, 效果好的可降低 40%。此外, 沿空留巷彻底取消煤柱, 对改善近距离煤层的巷道维护十分有利。最后, 沿空留巷对降低回采巷道掘进率, 减少综采工作面搬家时间, 实现工作面正常接替, 提高采区采出率, 提高煤炭开采的经济效益和社会效益具有重要意义。

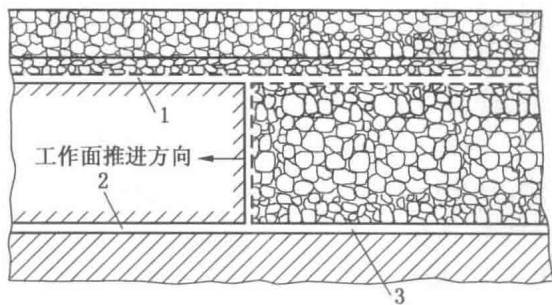
沿空留巷可实现工作面 Y 形通风, 采空区的漏风主要流向留巷, 从根本上解决了上隅角瓦斯积聚的难题; 采空区内部易积存大量高浓度瓦斯, 利于实现高浓度瓦斯抽采; 有效解决了工作面的瓦斯超限问题, 从而可成倍提高我国高瓦斯难抽放煤层工作面的单产水平, 具有重大的社会效益与安全高效开采效益。沿空留巷符合煤炭工业走“资源利用率高、安全保障、经济效益好、环境污染少和可持续的煤炭工业发展道路”的要求, 符合绿色采矿、科学采矿的发展方向, 对促进我国无煤柱护巷技术的发展具有重要的理论意义和实用价值。

1.2 沿空留巷的基本方式及适用条件

1.2.1 沿空留巷的基本方式和原理

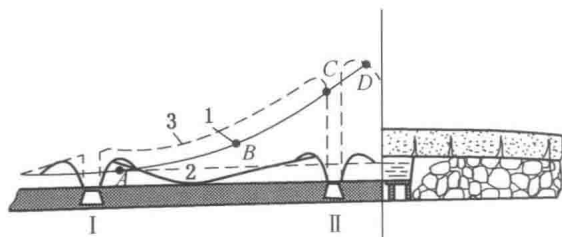
沿空留巷的基本方式是将上区段工作面的运输巷, 留作下区段工作面的回风巷, 即一条巷道可以得到两次利用, 如图 1-1 所示。当上工作面采过后, 将其运输巷用专门的支护材料进行维护, 使此保留下来的巷道作为下区段工作面的回风巷。

由于采区中各类巷道产生严重变形和破坏的原因主要是受采动压力的影响, 所以减轻巷道受压变形和破坏的原则性措施, 一是在空间上使巷道位置躲开支承压力强烈作用区; 二是在时间上当开掘巷道时避开支承压力剧烈影响期。要达到上述目的, 有以下几种方法:



1—沿空留用的回风巷; 2—运输平巷; 3—巷旁支护体

图 1-1 沿空留巷的基本方式



1—回采引起的支承压力；2—掘进引起的
支承压力；3—叠加压力

图 1-2 巷道位置与受力分布

曲线 2) 外，还有随工作面向前推进在煤体上形成的侧向支承压力的作用 (图中曲线 1)，则叠加压力分布曲线如图中的曲线 3。显然，这是井下各类巷道产生变形和破坏的主要原因。

(2) 将巷道开掘在采空区内顶板冒落压实后的压力稳定区。在此区域内开掘的巷道，既不受采动影响，也没有集中压力，因而巷道容易维护。

(3) 不留煤柱。过去有一种观点认为，只要煤柱尺寸大一些，就会使巷道维护状况好一些。这种看法在一定条件下是正确的，但也不是一个普遍规律，更不能作为改善巷道维护状况的理论依据。目前的研究工作已经证实，煤柱尺寸的大小对巷道维护状况有明显影响，但它并不是一个简单的线性函数关系。如阳泉四矿的观测结果表明，即使留 20 m 宽的煤柱，也不能起到避免支承压力和保护巷道的作用，且留 3 m 宽煤柱与留 30 m 宽煤柱的状况基本相似。从一些矿区的统计资料分析可得出一个规律，即在一定的护巷煤柱尺寸范围内，随着煤柱尺寸的加大，反而使巷道维护状况越来越困难。但在某一范围外，继续加大煤柱尺寸时，巷道维护状况又有所改善。如新汶禹村矿、平顶山六矿和舒兰矿在留 15 ~ 20 m 宽的煤柱护巷时，压力显现都很剧烈。若再加大煤柱，即在 30 m 以外 (如舒兰矿区)，则压力显现趋于正常，巷道就容易维护。如果不留煤柱或留较小的煤柱，巷道也容易维护，这是因为巷道处于压力降低区内。对此规律性的认识，为无煤柱开采提供了一定的实践依据。

由采场压力分布规律可知，采动在煤体上引起的支承压力高峰区的分布既有一定范围，又离煤壁边缘有一定距离。如果躲开这个高峰区 (即在降压区内) 来掘进或维护巷道，就可以使巷道避免支承压力的危害，而取得良好的护巷效果。这个规律也为无煤柱开采提供了一定的理论依据。

为此，从矿山压力观点看，对回采巷道采用不留煤柱的沿空留巷方式更为有利。目前，我国已有很多个矿区采用无煤柱开采，都取得了良好的效果，明显地改善了矿井的技术经济指标。

1.2.2 适用条件

根据目前我国的生产实践，沿空留巷适用于一定的地质条件。

1. 煤层厚度

沿空留巷一般在薄及中厚煤层应用较多。近年来，有些矿区，如兖矿、潞安等在厚煤层中也成功地应用了沿空留巷，因而为扩大沿空留巷的使用范围开创了先例。表 1-1 为我国部分矿井使用沿空留巷的煤层厚度状况。

表 1-1 我国部分矿井使用沿空留巷的煤层厚度状况

煤层厚度类型	局、矿	煤层名称、编号	煤层厚度/m	备 注
薄煤层	开滦唐家庄矿	11 槽	0.8~1.2	3~5 m 矸石带护巷
	峰峰矿务局	一座、野青、山青、	0.6~1.3	
	鸡西矿务局	小青	0.7~1.3	
	淮北岱河矿	5 号层	平均 1.2	
	枣庄矿务局	16 号层、17 号层、18 号层	0.6~1.0	
	淄博矿务局		0.6~1.2	
	焦作王封矿	二 煤	1~2 (平均 1.3)	料石墙护巷
	资兴矿务局	杨梅垅组	0.6~1.4	
	铜川三里洞矿	10 号层	0.7~3 (平均 1.3)	
	松藻矿务局	K ₁	0.6~1.2	
	永荣矿务局	主采层	0.3~0.7	
	广旺矿务局		0.5~1.0	
	赵官庄煤矿	7 层煤	0.7~1.0	膏体巷旁充填 高水材料
	兖矿集团南屯煤矿	16 煤	0.95~1.2	
中厚煤层	本溪田师傅矿		1.6~2	上分层采高 1.4 m
	徐州张集矿	7 号层	3.2	
	淮北杨庄矿	6 号层	2.2~3.5	
	枣庄矿务局 (东部)		(一般 3.0)	
	平顶山六矿	14 号层	1.5	
	铜川桃源矿	戊 ₈	2.0	
	澄合权家河矿	10 号层	1.4	矸石带 高水材料 高水材料 膏体巷旁充填
	芙蓉矿	5 号层	2.4	
	梅田一矿	C ₅	1.2~1.8	
	晋城古书院煤矿	12	1.8	
	肥城白庄煤矿	8 煤	2.0	
	皖北卧龙湖煤矿	10 煤	2.52	
厚煤层	开滦唐家庄矿	12 槽	3~8 (平均 5)	留 3 m 小煤墙 综放, 大断面, 小断面
	萍乡安源矿	上煤组 4 层煤	4~10	
	兖州兴隆庄矿	3	8.5	
	六枝矿务局	7 号层	4~5 (平均 5)	
	内蒙古福成煤矿	9 层煤	5.01	
	潞安王庄煤矿	3 号煤	7.44	

2. 煤层倾角

从我国目前的情况看, 多数矿井使用沿空留巷的煤层倾角一般小于 14° , 但一些矿井由于对支架倒滑及窜矸等问题采取了相应的技术措施, 故梅田、松藻和安源等煤矿在倾角为 $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 的煤层中同样采用了沿空留巷。六枝和渡口太平矿等在急倾斜煤层中也采用沿空留巷, 取得了良好的效果 (表 1-2)。从表 1-2 可见, 只要对支架倒滑及窜矸等问题采取相应的技术措施, 煤层倾角并不是限制应用沿空留巷的因素。

表 1-2 我国部分矿井使用沿空留巷的煤层倾角状况

煤层倾角分类		局、矿	煤 层 号	煤层倾角/(°)	备 注
近 水 平		铜川桃源矿	10 号层	5 ~ 6	
缓 倾 斜	6° ~ 12°	焦作王封矿	二 煤	6 ~ 8	> 13°要采取挡矸措施
		铜川三里洞矿	10 号层	4 ~ 10	
		澄合权家河矿	5	5 ~ 10	
		四川芙蓉矿	C ₅	7 ~ 10	
		枣庄矿	14、16、17、 18 号层	10	
		赵官庄煤矿	7 层煤	4 ~ 6	
	13° ~ 25°	兖矿集团南屯煤矿	16 煤	4 ~ 8	
		淮北杨庄矿	六 层	9 ~ 13	
		平顶山六矿	戊 ₈	8 ~ 14	
		峰峰矿务局	一座、野青、山青、小青	14	
		淮北岱河矿		平均 19	
		开滦唐家庄矿	5 号层	20 ~ 24	
		四川永荣矿务局	12 槽	25	
		潞安王庄	主采层 3 号煤	2 ~ 6	
倾 斜		梅田一矿	一层	22 ~ 30	用木垛或顶柱档矸留 2 ~ 3 m 三角小煤墙护巷; 膏体巷旁充填; 膏体巷旁充填
		松藻矿务局		30	
		萍乡安源矿	上煤组四煤层	35	
		徐州张集煤矿	10 煤	31	
		淮南顾桥	10 - 2	3 ~ 10	
急倾斜		六枝矿务局	7 号层	53 ~ 57	留 3 m 小煤柱; 留 2 ~ 4 m 小煤柱
		渡口太平煤矿	1、4、11 号层	50 ~ 65	
		内蒙古福成煤矿	9 层煤	14.5 ~ 45	

1.2.3 顶板条件

顶板类型是影响无煤柱护巷方式的一个重要因素。根据我国目前各矿的生产经验,除了极难冒落的顶板外,在其他顶板条件下都可应用沿空留巷。表 1-3 列出了我国部分矿井使用沿空留巷的顶板条件。

表 1-3 我国部分矿井使用沿空留巷的顶板条件

顶板冒落性	局、矿	煤层号	直接顶板组成	顶板冒落及来压特征
易冒落的	枣庄矿务局	18 号层	泥页岩	较破碎,随采随冒
	铜川桃源矿	10 号层	灰页岩 1.5 m	放顶时易冒落
	澄合权家河矿	5 号层	砂岩及粉砂岩 3 ~ 7 m	层理发育、质脆易冒
	淮北杨庄矿	6 层	页岩、砂页岩	破碎易冒落
	铜川三里洞矿	10 号层	页岩 2 m	性脆易冒落
	松藻矿务局	K ₁	钙质页岩 6 ~ 12 m	回柱后可冒落
	开滦唐家庄矿	12 槽	腐泥质页岩 3 ~ 7.5 m	性脆采后易冒落
	赵官庄煤矿	7 层煤	黑色泥岩 0.94 ~ 5.5 m	性脆采后易冒落

表 1-3 (续)

顶板冒落性	局、矿	煤层号	直接顶板组成	顶板冒落及来压特征
中等冒落的	焦作王封矿	二煤	灰岩 2~5 m	坚硬性脆、中等冒落性能 分层、分次冒落 中等稳定、直接顶初次 冒落步距 18~21 m 可由密集支柱切断
	平顶山六矿	戊 ₈	泥页岩 2 m	
	峰峰矿务局 徐州张集煤矿	10 煤	砂质页岩 粉砂质泥岩	
不易冒落的	焦作市焦西矿	二煤	石灰岩 1.7~2.2 m	直接顶初次冒落步距 19 m, 有周期来压 初次来压步距 25~30 m, 有明显的周期来压 坚硬稳定、不易冒落, 周期来压显著
	枣庄矿务局	14 号层	石灰岩 5~6 m	
	芙蓉煤矿	C ₅	泥质石灰岩 0.3~0.9	
能缓慢下沉的	枣庄矿务局	16 号层	石灰岩 6.5~7 m	均能缓慢下沉 能缓慢下沉 回采后不易冒落 能缓慢下沉 能缓慢下沉
		17 号层	石灰岩 1.2~1.5 m	
	峰峰矿务局	野青、小青	石灰岩 2.5~4 m	
	淮北岱河矿	5 号层	灰白砂岩 7 m	
	兖矿南屯煤矿	16 煤	石灰岩	

沿空留巷多数矿井适用于中等稳定的顶板,而有的矿井若工作面前方 100 m 内顶板移动量小于 100 mm,则可成功地应用沿空留巷。国外如苏联、前联邦德国等,在顶板松软、采区巷道顶板下沉较大的情况下也采用了沿空留巷。表 1-4 为我国鸡西矿区和苏联使用沿空留巷顶板条件的对比表。

表 1-4 我国鸡西矿区和苏联使用沿空留巷顶板条件的对比表

顶板类型	鸡西矿务局			苏 联		
	顶板岩石	顶板冒落特征	沿空留巷工作面比重/%	顶板岩石	顶板冒落特征	沿空留巷工作面比重/%
易冒落的顶板	松软页岩、泥页岩、粉砂岩 (1.0 m 以下)	直接顶板易冒落	24	软弱泥质岩、薄层泥质岩、粉砂岩 (分层厚度 <0.5 m)	直接顶板可随回柱冒落,基本顶悬伸跨度不大	60
中等冒落的顶板	泥页岩、粉砂岩、各种类型的砂岩 (2~6 m)	直接顶板冒落性好	60	泥质岩及粉砂岩、坚硬砂岩或石灰岩厚度小于 2 m	直接顶板的冒落性也较好,有轻微周期性来压显现	27.3
难冒落的顶板	坚硬砂岩和砂页岩	顶板趋向于悬伸在采空区上,基本顶难冒落	16	坚硬砂岩及石灰岩,总厚度大于 5 m 时分层厚度大于 2 m	顶板在采空区内悬伸,跨度很大 (达 60 m 或更大)	12.7

对于坚硬难冒落的顶板,目前应用沿空留巷的很少,但国外仍有应用沿空留巷的实例,它需要在留巷之前沿巷道与采空区交界处采取水力压裂和深孔强制放顶等专门措施,因而增加了沿空留巷的费用。

沿空留巷另一个值得注意的问题是:在掘进巷道时应将伪顶挑落,以免在巷道受压后发生冒落,给沿空留巷的维护工作造成困难。

1.2.4 底板条件

对于底板非常松软或有严重底鼓的巷道,要采取防治措施,否则不宜采用沿空留巷。

1.2.5 开采深度

从矿山压力观点出发,随着开采深度的增加,矿山压力加大,因而沿空留巷要求采取严格的技术措施。从国外统计资料可见,当开采深度为 500 ~ 600 m 时,沿空留巷的比重逐渐减小。但有的国家由于采取了有效的护巷措施,即使在 600 ~ 800 m 的深度,也在实行沿空留巷。因此,开采深度不是限制沿空留巷的根本因素。

综上所述,地质条件虽在不同程度上对沿空留巷有一定限制,如煤层太厚、倾角太大、顶板太硬、底板太软以及采深太大等都是沿空留巷的不利因素,但从我国煤矿的地质条件看,沿空留巷仍有相当广泛的应用范围。

1.3 沿空留巷研究现状综述

1.3.1 沿空留巷上覆岩层活动规律的研究综述

陆士良编著的《无煤柱护巷矿压显现研究》中提出了沿空留巷顶板下沉量主要取决于“裂隙带岩层取得平衡前的强烈沉降”的重要观点。

朱德仁提出了长壁工作面端头顶板可能形成三角形悬板结构的观点。人们认识到沿空留巷的矿压显现规律与采场基本顶的关系,建立的采场顶板结构力学模型为人们研究沿空留巷矿压显现规律提供了启示和契机。

何廷峻根据 MARCUS 板的简化算法,把三角形悬板看成由若干伪倾斜条梁组成的板,进一步研究了基本顶在工作面端头形成的三角形悬板对沿空巷道的危害,并对悬顶破断结构进行了分析,尝试预测三角形悬顶在沿空留巷中破断的位置和时间,为确定滞后加固沿空巷道的时间和长度提供了理论依据。

漆泰岳通过现场实测和理论分析,对不同围岩条件下基本顶断裂引起的整体浇注充填体的支护强度和变形能力进行了深入研究,提出了使沿空留巷巷道保持稳定的整体浇注充填体支护强度与变形的理论计算方法,并且对沿空留巷整体浇注充填体的适应性进行了研究。应用弹性基础梁理论和数值模拟证明:沿空留巷的基本顶断裂不会发生在靠巷道煤帮侧的边沿的上方,而是煤层内的上方,基本顶断裂深度随围岩级类的提高而加大;煤层和直接顶的刚度对护巷带的稳定性影响较大,刚度越大,护巷带切顶效果越好。

涂敏运用 Winker 弹性地基理论把沿空留巷上方顶板看成弹性薄板条,建立了顶板运动力学模型,导出了顶板挠曲运动方程,分析了顶板内应力分布的特征。

孙恒虎通过相似材料立体模型试验,深入分析沿空留巷矿压显现规律,揭示了沿空留巷围岩活动的前期和后期规律,进而提出并讨论了支护前期作用和后期作用问题,指出支护前期作用对控制顶板下沉的效果是显著的,而对控制顶板平移下沉的效果不明显。前期支护应坚持以顶为主,“顶、让兼顾”的支护原则。设计支护最大载荷以前期为主。后期

支护应坚持以让为主,“让、顶兼顾”的支护原则。设计支护最大变形以后期为主。

李化敏认为,沿空留巷顶板岩层运动可分为前期活动、过渡期活动及后期活动3个时期,对应的巷道变形特征为前期顶板以旋转变形为主,过渡期顶板仍以旋转变形为主,但变形速度快、变形量大,后期顶板运动特征以平行下沉为主,但下沉速度较小。巷旁充填体不能改变基本顶“大结构”的形态。只须保持直接顶的完整和与基本顶的紧贴,不能改变顶板岩层过渡期活动时顶板下沉量的大小,也不能约束顶板岩层后期活动引起的平行下沉。明确了顶板岩层运动各阶段巷旁充填体的作用,根据充填体与顶板相互作用的原理,确定了各阶段沿空留巷巷旁充填体支护阻力的控制设计原则,并建立了相应的支护阻力及合理压缩量数学模型。

王卫军根据砌体梁理论,基本顶以给定变形方式作用于沿空巷道围岩,应用能量原理分析了巷道围岩的变形机理,建立了巷道顶煤的力学模型,运用变分法对基本顶给定变形下顶煤的变形进行了初步求解,并对顶煤下沉量与支护阻力、煤体弹性模量、巷道宽度的关系进行了探讨。

谢文兵在工程实践基础上采用适合分析岩层断裂和垮落的数值分析软件 UDEC 建立相应的数值分析模型,详细分析了沿空留巷围岩运动规律,系统分析了基本顶断裂位置、端头不放顶煤长度、原有巷道支护技术、充填体宽度、充填方式和充填体强度对沿空留巷围岩稳定性影响规律,得出了许多有益的结论。研究表明,在保证顶煤及顶板稳定的前提下,合理利用围岩运动规律,确定合理的充填方式和充填体强度,既能保证充填体稳定,又能达到很好的留巷效果。

华心祝从如何提高巷道围岩自承能力入手,提出了一种主动的巷旁加强支护方式——巷旁采用锚索加强支护,建立了考虑巷帮煤体承载作用和巷旁锚索加强作用的沿空留巷力学模型,并分析了巷内锚杆支护和巷旁锚索加强支护的作用机理。利用理论分析所得结论进行工程实践,其研究成果为较大采高工作面沿空留巷技术提供了理论依据和借鉴经验。

朱川曲根据沿空留巷围岩变形大且围岩力学参数中有许多随机变量的特征,阐述了支护结构可靠性分析的必要性。应用工程结构可靠性理论,建立了沿空留巷支护结构可靠性分析模型,得到了支护结构可靠度的计算公式。研究认为:通过合理选择锚杆类型,加大锚杆支护密度,改善锚固体及充填材料力学性能等措施,可达到提高沿空留巷支护结构可靠性的目的。

1.3.2 沿空留巷巷旁支护阻力的研究综述

英国学者 Whittaker 等人将采场矿压研究的 Wilson 模型加以发展,利用岩体结构静力关系提出了分离岩块力学模型 (Detached Block Theory); 苏联学者 B. 胡托尔诺依将采场矿压悬梁模型推广到沿空留巷的研究中,得到了计算巷旁支护切断直接顶的工作阻力计算公式。这些理论都认为,直接顶之上的基本顶破断后能形成一自身平衡的结构。直接顶沿煤壁破断后形成一与基本顶无力的联系的孤立岩块,沿空留巷的支护阻力可按能支撑直接顶这一孤立岩块的重量计算。这些理论忽视了支护作用对顶板岩层稳定性和自承能力的影响。

英国学者 Smart 提出了顶板倾斜力学模型 (Roof Beam Tilt Theory), 这种方法的基本思想是限制巷道煤体一侧到采空区边缘之间的顶板的下沉量,提出了顶板倾斜角和转动支点位置是巷旁支护设计的两个重要参数的观点。

陈名强认为,巷旁支护的工作阻力应能承受巷道上方(包括巷旁支护及其顶板悬伸范围)相当于采高4倍的直接顶岩石重量,承受由于支撑点和上覆岩层载荷重心不一致引起的附加载荷,承受上覆岩层破断时的动压载荷,承受由工作面上、下端顶板形成的“弧三角板悬板”结构重量及其破断前移时的载荷。

吴健借鉴采场支架与围岩相互作用的研究成果,提出了沿空留巷支护系统最终承受的是冒落带岩块的静压以及巷道变形大小由裂隙带活动和稳定过程决定的观点。据此,讨论了沿空留巷的力学模型、巷旁支护载荷的计算及支架可缩量的设计。

孙恒虎根据煤层顶板特征和弹塑性力学的有关理论,将长壁工作面沿空留巷的煤层顶板简化成了层间结合力忽略不计的矩形“叠加层板”,认为沿空留巷支护载荷只与短支承载边界的载荷有关,采用条带载荷法和塑性极限分析法确定沿空留巷巷旁支护阻力,同时还提出了巷旁支护体的后期阻力的计算方法。

周华强通过相似材料模拟试验,认为巷旁充填体控制顶板下沉是通过其对顶板足够的支撑作用,改变顶板弯矩分布、实现充填体侧切落下位顶板。一方面卸掉部分切落岩块作用在巷道支护体系上的载荷,另一方面为上位顶板平衡创造条件,使巷道顶板变形不受下位被切落岩层的平衡结构控制,而是服从更上位下沉量较小的基本顶倾斜下沉规律。由于顶板岩层分层或分组垮落,沿空留巷巷旁充填体必需的切顶阻力根据最难切落的那层岩层(岩层组)切顶需要来确定。

柏建彪研究认为,巷旁支护阻力大小应根据块体不同时期的平衡条件推导出不同时期的巷旁支护阻力的计算式,根据极限平衡梁理论给出巷旁充填体的初期、后期阻力计算式。该算式已经涉及到煤体对基本顶的控制作用,但由于巷道围岩和基本顶断裂位置等参数选定往往受人为因素的影响,所以计算结果不太合理。

张东升采用相似材料模拟和计算机数值模拟,对沿空留巷基本顶破断位置与形状、不同支护方式对顶板活动的影响以及巷旁充填技术参数的确定进行了初步分析,并给出了充填带宽度和充填材料抗压强度的最低要求。马立强在巷内充填原位沿空留巷技术基础上,根据岩层控制的关键层理论,建立巷内充填原位沿空留巷围岩结构力学模型,推导出不同地质条件下巷内充填体的支护阻力计算式,并对围岩与巷内充填体之间的相互作用机制进行深入分析。研究表明,留巷围岩的稳定性与充填体的支护阻力和巷内支护方法密切相关。采用锚梁网索巷内支护技术结合及时巷内充填和加强临时支护等工艺措施,可形成良好的充填体——围岩共同承载体系,能充分发挥留巷围岩的自承能力,增强巷道整体性,有效减小需由充填体来平衡的围岩载荷。

1.3.3 沿空留巷工程实践综述

1. 国外沿空留巷工程实践概况

世界上的一些主要产煤国家对沿空留巷的矿压显现、适用条件、合理支护形式及新型支护材料等都进行了大量研究,在这方面做得较多的是苏联、德国、英国、波兰等国家。

苏联在现场对许多专门为沿空留巷设计的支架进行了试验,并结合理论分析和实验室研究进行了各种实测工作,据报道,至1993年,俄罗斯无煤柱开采产量占80%,对不同矿区变动在60%~90%之间,在各种无煤柱护巷方式中,应用最广的是沿空留巷,占65%。

德国无煤柱开采多为沿空留巷,其传统的巷旁支护多采用木垛、矸石带等。20 世纪 60 年代末,德国根据本国资源的特点,研究成功了采用石膏、飞灰加硅酸盐水泥、矸石加胶结料等低水材料作为巷旁充填,有效地减少了重型支架和巷道的变形,从而实现 $14 \sim 18 \text{ m}^2$ 时断面巷道第二次利用,且不须修理,取得了良好的经济效益。目前,德国有 $1/2 \sim 2/3$ 的沿空留巷采用这项技术。而且,德国在埋深 $800 \sim 1000 \text{ m}$ 的煤层开采中成功地运用了沿空留巷技术,并通过实测得出了预计留巷移近量的经验公式。

英国煤层普遍较薄,多用沿空留巷,巷旁支护多采用矸石带,并研制出了矸石带机械化砌筑装置。同时,英国在提高矸石带强度方面进行了不少探索,研制成功了不同胶结物的胶结矸石带,1979 年在井下试验成功了高水材料巷旁充填,随后有了迅速的发展,高水材料充填已占全英巷旁充填的 90% 左右。

波兰无煤柱开采应用较多的是沿空留巷,在前进式或后退式采煤时都用单巷准备。沿空留巷应用于走向开采或倾斜开采根据备件而定。沿空留巷一般巷内支护采用金属可缩性支架,巷旁支护使用充填带、矸石带或混凝土墩柱等。

2. 国内沿空留巷工程实践概况

我国的沿空留巷开采技术最早可追溯到新中国成立初期,大体上经历了以下 5 个发展阶段:

(1) 20 世纪 50 年代的自发尝试阶段。在一些薄煤层开采中用矸石带代替煤柱作为巷旁支护用,即在采煤工作面的运输巷砌矸石墙,将该巷道保留下来作为下区段采煤工作面的回风巷,如淄博、鸡西、本溪、双鸭山、枣庄、峰峰等矿区薄煤层中都在应用。同时,开滦、峰峰、焦作等矿区在中厚煤层、厚煤层分层开采试验沿空掘巷也获得成功,减少了巷道的维护量和煤炭资源的损失。其中,1952 年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。尽管我国煤矿在 20 世纪 50 年代初就有了无煤柱护巷的实践,但当时并没有形成完整、系统的“无煤柱开采”技术体系。

(2) 20 世纪 60 年代的初期试验阶段。20 世纪 60 年代初期,全国煤矿贯彻改革矿井开拓部署技术会议精神,为了提高资源采出率,延长矿井寿命,减少巷道掘进量和维护量,将水平运输大巷布置在岩石中,取消水平运输大巷煤柱,采煤工作面实行跨大巷、跨石门、跨上山回采。我国部分矿井开始有计划地取消区段煤柱的试验。例如,石嘴山二矿在 1963 ~ 1964 年曾经取消运输大巷的护巷煤柱,并把回风巷的煤柱宽度缩小到 3 m 左右,试验取得了成功。西山杜儿坪矿 1965 年 4 月在 9 尺煤层(16 号煤)中进行了沿空掘巷试验,把原来宽 20 m 的回风巷煤柱缩小为 2 ~ 3 m;阳泉矿区于 1966 年 1 月在丈八煤层中进行了缩小回风巷煤柱的试验都获得了成功。又如,1966 年 3 月,淮南谢一矿在 A_3 和 B_7 煤层曾沿上阶段采空区掘进风巷,并进行了短期矿压观测,也取得了较好的护巷效果。峰峰矿务局从 1963 年起,各生产矿井先后在大煤工作面采用单巷布置,对回风运料巷实行沿空掘巷,有的矿对工作面的开切眼采用沿空掘巷或沿空留巷,以取消采区隔离煤柱,在个别采区还试验了工作面间隔回采(跳采)的工艺系统。

平顶山一矿将原设计第一水平运输大巷留有 100 m 煤柱取消,实行采面跨大巷采煤成功;开滦范各庄矿采面跨石门、上山开采成功,同时在采煤工作面保留输送机巷作下区段工作面的回风巷;平顶山一矿在丁组中厚煤层,沿空留巷采用密集支柱及台棚作巷旁支