

Yankong JueHang Weiyan Kongzhi

沿空掘巷围岩控制

柏建彪 著

Yankong JueHang Weiyan Kongzhi

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

责任编辑 朱明华

封面设计 肖新生

Yankong Juehang Weiyan Kongzhi

ISBN 7-81070-977-1



9 787810 709774 >

ISBN 7-81070-977-1 / TD-165 定价: 20.00 元

国家自然科学基金项目资助(50574089)

国家自然科学基金重大项目资助(50490273)

沿空掘巷围岩控制

柏建彪 著

中国矿业大学出版社

前 言

长期以来,对受采动影响的巷道一般留煤柱护巷。随着矿井开采深度增加,仍采用留煤柱方法护巷则护巷煤柱宽度越来越大,不仅巷道维护困难、维护费用高,较宽的区段煤柱形成应力集中,使煤柱下方的巷道维护困难,诱发冲击地压、煤与瓦斯突出等灾害;而且煤炭采出率低。从上世纪50年代开始,国内外开展了主要包括沿空留巷和沿空掘巷两种方法的无煤柱护巷技术的试验研究,对无煤柱护巷的矿压显现规律及围岩控制进行了系统的研究,推动了无煤柱护巷技术的发展。

沿空留巷在相邻工作面回采的同时构筑,受到采空区岩层剧烈活动的影响,在本工作面回采期间,又受到本工作面超前支撑压力的作用,巷道经历两次采动影响,巷道围岩强烈变形、维护困难。沿空掘巷是在相邻工作面回采引起的应力重新分布趋于稳定后掘进,巷道位于应力降低区,沿空掘巷的维护条件均优于沿空留巷,所以,我国无煤柱护巷大部分采用沿空掘巷。

本书在前人研究的基础上,针对沿空掘巷围岩赋存特征,建立了沿空掘巷基本顶弧形三角块结构力学模型,分析该结构在巷道不同阶段的稳定性;研究窄煤柱稳定性与巷道围岩变形的关系及锚杆支护强度对窄煤柱稳定性的作用,提出窄煤柱是沿空掘巷围岩承载结构的重要组成部分,并确定了不同条件下的窄煤柱合理宽度;研究沿空掘巷锚固体及其与外部围岩的相互作用关系,锚固体厚度及锚杆支护强度对锚固体内、外应力分布和位移的作用,提

出了沿空掘巷合理的锚杆支护主要参数和锚杆支护技术;结合工程实例,介绍了综放沿空掘巷锚杆支护技术和胶结顶板巷道锚杆支护技术。

在作者的研究过程中,得到了侯朝炯教授、钱鸣高院士、董正筑教授、缪协兴教授、邹喜正教授、华安增教授等老师的具体指导和热情关怀。另外还得到了周华强博士、王卫军博士、张农博士、刘长友博士、李学华博士、曹胜根博士、陈庆敏博士、许家林博士、勾攀峰博士、方新秋博士、谢文兵博士等热情帮助和积极合作。在现场研究工作中,得到了王庄煤矿有关领导和工程技术人员的大力支持,得到了徐州矿务集团有限公司等单位的领导和工程技术人员的大力支持。在此作者表示深切的感谢。

由于作者经验和水平有限,书中难免有疏漏和欠妥之处,敬请读者不吝指正,联系地址:江苏省徐州市中国矿业大学能源学院,邮编:221008,E-mail:bjianb@163.com。

柏建彪

2006年5月

目 录

1	绪论	1
1.1	沿空掘巷研究的意义	1
1.2	沿空掘巷的研究现状及评述	3
1.3	存在的问题	10
1.4	主要研究内容	12
2	沿空掘巷弧形三角块稳定性分析	13
2.1	沿空掘巷基本顶弧形三角块结构力学模型	14
2.2	掘巷前弧形三角块结构的稳定性分析	20
2.3	掘巷后弧形三角块结构的稳定性分析	29
2.4	采动影响弧形三角块结构的稳定性分析	31
2.5	本章小结	35
3	护巷窄煤柱的稳定性分析	37
3.1	引言	37
3.2	窄煤柱稳定性的数值模拟模型	38
3.3	窄煤柱应力分布	42
3.4	窄煤柱变形机理	49
3.5	煤柱宽度对巷道变形的影响	57
3.6	窄煤柱宽度的合理确定	59
3.7	保持窄煤柱稳定的锚杆支护技术	60

3.8	本章小结	61
4	综放沿空掘巷围岩控制原理	63
4.1	锚杆与围岩的相互作用	64
4.2	锚固体与围岩相互作用的实测分析	71
4.3	围岩应力、位移分布与锚杆支护关系的数值模拟	76
4.4	锚固体与外部围岩相互作用	91
4.5	综放沿空掘巷锚杆支护技术	94
4.6	本章小结	102
5	综放沿空掘巷工程实践	104
5.1	工程生产地质条件	104
5.2	弧形三角块结构稳定性分析	106
5.3	窄煤柱的稳定性及合理宽度确定	107
5.4	锚杆支护设计	112
5.5	试验巷道矿压观测与支护效果分析	124
5.6	本章小结	142
6	胶结顶板巷道锚杆支护工程实践	144
6.1	引言	144
6.2	试验巷道工程地质条件	145
6.3	胶结顶板矿物成分与强度试验分板	147
6.4	胶结层厚度	149
6.5	巷道支护参数	150
6.6	胶结顶板树脂药卷锚固锚杆适应性分析	152
6.7	胶结顶板巷道锚杆支护矿压显现规律	154
	参考文献	164

1 绪 论

1.1 沿空掘巷研究的意义

我国煤矿每年新掘巷道约 1.3 万 km,其中受采动影响的煤巷约占 80%^[1]。长期以来,对受采动影响的煤巷一般采用煤柱护巷,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。这样,不仅使煤炭采出率降低、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巷道维护困难,同时又不利于防治煤炭自然发火和煤与瓦斯突出等灾害。

从 20 世纪 50 年代开始,国内外开展了主要包括沿空留巷和沿空掘巷两种方法的无煤柱护巷技术的试验研究,对无煤柱护巷的矿压显现规律及围岩控制进行了系统的研究,取得了大量的成果^[2~10],推动了无煤柱护巷技术的发展。

由于沿空掘巷与沿空留巷的应力环境、受采动影响的程度不一样,两类巷道围岩受力和变形明显不同。沿空留巷在上区段工作面回采的同时构筑,受到采空区岩层剧烈活动的影响,在下区段回采期间,又受到下区段工作面超前支承压力的作用,巷道经历两次采动影响,无论是顶板,还是两帮都强烈变形,而且底鼓严重,巷道维护困难。

而沿空掘巷是在第一个工作面采空区岩层活动基本终止,回采引起的应力重新分布趋于稳定后掘进,巷道位于应力降低区,采

用宽度较小的煤柱和合理的支护技术可以保证巷道在掘进及掘后围岩变形较小,巷道只经历一次采动影响,因此沿空掘巷的应力环境和维护条件均优于沿空留巷,所以,我国无煤柱护巷大部分采用沿空掘巷。

综放沿空掘巷与薄及中厚煤层沿空掘巷又有较大的差别。综放工作面煤层为厚煤层、采高大,受采空区侧向支承压力作用,下区段煤体边缘形成的破碎区和塑性区的宽度大于薄及中厚煤层,因此,综放沿空掘巷一般处于塑性区和破碎区煤体中;巷道上方弧形三角块在超前支承压力作用下回转下沉量比薄及中厚煤层沿空掘巷大;综放沿空掘巷顶板为煤体,而薄及中厚煤层沿空掘巷顶板为岩层。

由此可见,综放沿空掘巷围岩力学性质比薄及中厚煤层沿空掘巷更差,维护更为困难。近年来,综放沿空掘巷作为综采放顶煤的配套技术越来越受到人们的重视,是我国煤炭开采技术进步的重要标志。但综放沿空掘巷的稳定原理及其控制技术还很不成熟,一些普遍的具有广泛适用性的规律有待于进一步探索,如关于沿空掘巷上方“弧形三角块”的稳定状况的研究尚属空白,窄煤柱稳定性的控制技术及锚杆支护巷道锚固体与外部围岩的相互作用关系均有待于进一步研究。这些均制约了综放沿空掘巷技术的发展。

本书在前人研究的基础上,针对工作面端头基本顶弧形三角块在巷道不同阶段的稳定状况,以综放沿空掘巷为研究对象,着眼于巷道支护的实际效果,对基本顶弧形三角块、巷道顶煤、窄煤柱及实体煤帮的稳定性原理、巷道围岩应力场、围岩变形破坏特点、锚固体结构与围岩活动关系等进行了系统的研究,初步形成了沿空掘巷围岩稳定性理论和控制技术。这对促进我国无煤柱开采的进一步发展,充实和发展回采巷道支理论,大力推广锚杆支护技术应用,实现高度集约化生产的高产高效矿井建设无疑都具有重要的理论意义和实用价值。

1.2 沿空掘巷的研究现状及评述

锚杆支护沿空掘巷的围岩稳定性原理及控制技术研究内容主要涉及两方面:一是工作面端头基本顶弧形三角块的破断特征及其结构稳定性;二是沿空掘巷围岩锚固体结构的稳定性原理及控制技术。

1.2.1 沿空掘巷上覆岩层活动规律的研究综述

沿空掘巷上覆岩层与采煤工作面的上覆岩层为同一岩层,其破断特征及活动规律与上区段工作面和本区段工作面回采时上覆岩层的断裂特征及活动规律紧密相关,但又有其自身的特点和规律。

国内外对采场上覆岩层破断特征和活动规律开展了大量的研究^[17,20~30],提出了采场上覆岩层的关键层理论、基本顶及关键层的断裂规律、S-R 稳定性原理等。随着综采放顶煤技术的发展,文献[28、29]对综采放顶煤采场上覆岩层的活动规律做了进一步的研究,明确提出了综采放顶煤采场上方存在“砌体梁”基本顶结构,并认为采场冒落带的高度为采高的 2.0~2.5 倍,其中 1.0~1.2 倍采高的直接顶岩层呈现不规则垮落,其上为规则垮落带。以上研究基本对综采放顶煤一次采全高的大采高采场沿工作面推进方向的上覆岩层活动规律有了明确的认识。

针对沿空掘巷围岩力学环境和维护特点,对巷道上覆岩层稳定状况、沿工作面倾斜方向上覆岩层的活动规律研究很少。文献[31~34]通过对工作面及顺槽矿压观测分析和相似模拟试验研究认为:随工作面回采推进,采空区侧煤体及上覆岩层依次垮落,形成砌体梁结构;侧向煤体支承压力峰值点与采放比有关,且随采放比增大峰值点远移,有利于留设窄煤柱;分析了巷道上覆岩层结构特征,提出煤柱宽度 d 与侧向支承压力峰值点深入煤体的距离 x 有关,一般认为 d 小于 x 的一半是比较合理的,此时对巷道稳定

有利。文献[35、36]将基本顶沿倾斜方向形成的结构作为沿空掘巷围岩的大结构,基本顶在工作面端头形成的弧三角形块视为巷道上方的关键块,定性分析了关键块在巷道不同阶段的稳定性,认为关键块在不同阶段是稳定的,为沿空掘巷创造了良好的外部力学环境。

基本顶岩层的稳定状况和活动规律直接影响其下方沿空掘巷围岩的应力状态、变形特征和稳定状况,是该类巷道能否采用锚杆支护的一个关键因素。而国内外对基本顶沿倾斜方向的稳定性研究很少,该问题对沿空掘巷稳定性极其重要,将基本顶岩层的稳定性与沿空掘巷稳定性统一考虑开展研究则更少,使人们对上覆岩层活动规律与巷道稳定性的关系缺乏明确的认识。

1.2.2 沿空掘巷护巷煤柱的研究综述

在生产实践中,沿空掘巷包括沿采空区边缘掘巷、与采空区之间留窄煤柱的沿空掘巷。护巷煤柱宽度对巷道稳定性的影响主要有两个方面:一是煤柱宽度影响巷道围岩应力;二是煤柱宽度影响巷道围岩完整性。具体可分为:沿空掘巷围岩的应力状态、沿空掘巷的矿压显现规律和窄煤柱稳定性原理。国内外在沿空掘巷煤柱研究方面做了大量工作,取得了很多成果。

沿空掘巷从20世纪50年代开始研究和应用,取得了有益的结论^[1~10],主要有:①留窄煤柱沿空掘巷,巷道位置处于侧向残余支承压力峰值附近,掘巷扰动了侧向支承压力分布,因而,留窄煤柱沿空掘巷不仅在掘进期间围岩强烈变形,而且在掘后稳定期间仍保持较大的变形速度,比沿采空区边缘不留煤柱沿空掘巷变形剧烈。②留窄煤柱沿空掘巷,因窄煤柱破碎、煤柱支撑作用极小,增加了巷道跨度和悬顶距,巷道压力增大、维护困难。③窄煤柱裂隙发育,甚至破碎,不同程度存在漏风现象。④留窄煤柱改善巷道掘进条件,对加快掘进速度以及隔离采空区是有利的。

国内外许多学者对煤柱的宽度和稳定性做了大量的研究工

作^[1~10,38~42],但对煤柱的合理宽度一直没有统一的认识,其结论差别较大,合理煤柱宽度从1~5 m直到20~30 m不等。文献[5]对煤柱宽度做了详细的评述,并提出用智能决策系统和人工神经网络选择煤柱宽度的方法。文献[41]认为在20 MPa铅直应力的作用下,一侧采空后煤体内的塑性区宽度达到5~8 m,采用5 m左右的窄煤柱不能保证巷道和煤柱安全使用。1996年原煤炭工业部科教司与澳大利亚SCT岩层控制技术公司合作在东庞煤矿开展煤巷锚杆支护技术研究,SCT岩层控制技术公司计算结果认为:在煤体侧距采空区13 m的岩层中存在1组裂隙,留窄煤柱沿空掘巷时巷道处于裂隙区内,受采动影响后不能保证巷道安全,认为煤柱宽度应大于15 m^[102],因而,澳大利亚一般不采用沿空掘巷。

以上研究是建立在薄及中厚煤层、厚煤层倾斜分层开采、埋深浅、巷道基本采用木支护或金属架棚支护基础之上的(文献[41]、[102]采用锚杆支护)。

沿空掘巷围岩在基本顶岩层的作用下,产生了严重的塑性变形和破坏,尤其是大采高工作面,基本顶弧形三角块旋转下沉量大,巷道变形、破坏更加严重,围岩强度降低更多,尤其受到工作面采动影响之后,基本顶岩层活动更加剧烈,综放沿空掘巷维护更加困难。采空区边缘应力降低区的形成正是由于煤岩体强度降低造成承载能力减小,因此,确定窄煤柱的宽度、判断巷道围岩稳定性,应考虑大采高引起基本顶弧形三角块旋转下沉量增大导致采空区边缘煤岩体强度减小的影响。

支护对护巷窄煤柱稳定性的影响以往研究较少。显然,采用木支护或金属架棚支护时,由于支护阻力小,而且均属于被动支护,初撑力几乎为零,棚式支护难以阻止围岩塑性区的扩展,因而棚式支护对窄煤柱的稳定性影响极小。因此,研究护巷窄煤柱宽度、确定巷道位置可以不考虑支护作用。但是,随着巷道埋深增加、原岩

应力增大,综采放顶煤一次采全高等大采高采煤方法的应用,沿空掘巷围岩变形剧烈,高强度锚杆支护系统和预应力锚索的应用,支护对围岩稳定状况的影响显著增大,确定护巷窄煤柱宽度、研究其稳定性,应考虑支护的作用;同时确定窄煤柱宽度应考虑锚杆在窄煤柱中的锚固力,过窄的煤柱难以保证锚固力而影响支护效果。采用高强度锚杆系统和预应力锚索支护、大采高、深埋藏的综放沿空掘巷,与采用架棚支护、浅埋藏、薄及中厚煤层沿空掘巷存在很大的差异。因此,采用原来的研究成果指导综放沿空掘巷显然是不够的。国内外在这方面的研究主要集中在工程实践上,系统研究这个问题非常重要。

针对以上问题,本书将重新认识综放沿空掘巷在采用锚杆支护时,窄煤柱的合理确定及其对巷道稳定的作用,窄煤柱稳定的控制原理及方法。

1.2.3 锚杆支护原理及技术的研究综述

在国外主要产煤国家,锚杆支护技术得到了广泛应用^[1,11]。美国煤层地质条件较简单、埋藏较浅,锚杆支护技术水平处于世界领先地位,由于锚杆支护可有效控制巷道围岩的稳定性,因而所有井工巷道均布置在煤层中,目前锚杆支护为巷道顶板的唯一支护方式,锚杆支护比例接近100%^[43,44,49]。澳大利亚煤层巷道顶板好,结合自身条件,以地应力实测结果为基础,以计算机数值模拟为核心,应用高强度、超高强度锚杆支护,煤巷锚杆支护比例接近100%^[45]。原以金属支架为主的欧洲一些主要产煤国家,随着采深加大,巷道维护日益困难、支护成本增加,也积极发展锚杆支护。英国1987年引进澳大利亚成套锚杆支护技术之前,90%以上的巷道采用金属架棚支护,煤矿生产被动,引进锚杆支护成套技术后,锚杆支护得到迅速发展,目前锚杆支护比例超过80%^[46,47]。德国是U型钢支架支护技术最为成熟的国家,U型钢支架支护比重达90%以上,由于巷道断面和采深加大,即使增加U型钢重量、减小

棚距,巷道仍然难以维护,20世纪80年代初期,在鲁尔矿区试验锚杆支护成功后,得到推广,现已用到深度达千米的深井巷道支护;法国及俄罗斯的最大矿区库兹巴斯矿区煤巷锚杆支护比例也超过50%^[48]。总结锚杆支护技术先进国家的经验,锚杆支护技术发展有以下4个特点:①建立一套适合本国地质条件、技术水平的锚杆支护设计方法。美国在现场监测和信息反馈的基础上进行锚杆支护设计,把顶板特性和锚杆支护参数结合起来,形成一个通用的方程组、诺模图,据此选择锚杆支护参数^[49];澳大利亚充分考虑水平应力的作用,采用“地质力学评估—计算机数值模拟进行初始设计—现场施工、监测—信息反馈、修改完善设计”动态方法进行锚杆支护设计^[45],英国、波兰等国家也借鉴澳大利亚锚杆支护设计方法^[11];法国以经验为基础,采用工程类比法设计锚杆支护参数,适合煤层地质条件变化相对较小的特点。②研究高强、超高强锚杆的同时,结合巷道围岩地质特征和生产技术条件,发展适宜的锚杆。美国锚杆屈服极限一般在500 MPa以上,有树脂锚固锚杆、机械式锚固锚杆、摩擦式锚杆(管缝式、水力膨胀管式)、混合式锚杆、桁架式锚杆等^[51];澳大利亚锚杆屈服极限一般在400~600 MPa,近年研究开发应用800 MPa的超高强度锚杆,以全长树脂锚固锚杆为主要发展方向,煤帮还应用树脂可切割锚杆;英国锚杆屈服极限一般在600 MPa以上,也以全长树脂锚固锚杆为主;德国除发展树脂锚固金属锚杆之外,积极发展可伸长锚杆,延伸率最大的可达50%;俄罗斯也发展使用多种型式的锚杆。在使用高强度材质的同时,锚杆直径也较大,多数为20~22 mm,因而锚杆破断载荷一般在200~300 kN以上,近年澳大利亚、英国研究应用破断载荷400 kN以上的锚杆^[52],锚杆延伸率均大于15%~17%。③建立锚杆支护监测技术,确保锚杆支护巷道安全,同时为完善、修改锚杆支护设计提供反馈信息。④研究开发锚杆支护配套机具,提高巷道掘进速度、保证锚杆支护施工质量。

由于我国煤层地质条件复杂、变化大,煤巷围岩松软、破碎,受采动影响后巷道变形量大,锚杆支理论、设计方法等不完善,所以,我国煤巷锚杆支护发展缓慢。“九五”期间煤炭部将采准巷道煤巷锚杆支护列为重点科技项目组织攻关,有力推动了锚杆支护技术的发展。目前,锚杆支护已成为岩巷的主要支护形式^[53],煤巷锚杆支护技术水平也有了较大提高^[54],基本解决了稳定性较好的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类煤巷锚杆支护技术问题^[11],并在Ⅳ、Ⅴ类煤巷中试验应用。我国煤巷锚杆支护技术水平与先进国家的差距还较大,其中重要的原因是锚杆支理论还不完善,锚杆支护设计缺乏科学的理论指导,不能满足实践需求;没有一套普遍有效的、可操作的、得到公认的锚杆支护设计方法,生产中锚杆支护参数如锚杆类型、间排距、长度、直径、锚固长度等确定基本依靠经验确定,并且变化不大,这与我国煤层赋存条件和开采条件差别极大的情况不相适应。

锚杆支护技术的快速发展,推动了锚杆支理论的研究工作,取得了许多重要的成果^[55~68],如传统的悬吊理论、组合梁理论、压缩拱理论、围岩松动圈支理论、最大水平应力理论等,它们解释了特定条件下的锚杆支护机理,对锚杆支护的作用有了不同程度的认识,至今对特定条件巷道的锚杆支护设计仍然具有指导意义,对推动锚杆支护技术的发展起了重要的作用。但悬吊理论、组合梁理论、组合拱理论等将锚固体与原岩体分开,不考虑锚固范围内岩层自身的承载能力,将围岩作为载荷体作用于锚杆上,没有考虑巷道围岩应力,计算结果与实际应用情况相差较大,不能通用。最大水平应力理论考虑围岩应力对巷道稳定性的影响,锚杆的作用是阻止岩层沿锚杆轴向方向的膨胀和离层、阻止岩层沿垂直锚杆轴向方向的层面间错动,锚杆支护设计方法采用以计算机数值模拟为核心的动态设计方法,由于某些参数的测试和数值模拟计算需要较高的专业水平,根据实测反馈信息调整锚杆支护设计所依据的准则未能确定,又因地而异^[59],因而难以推广应用。

近几年国内外开展了锚杆支护提高巷道围岩力学性能的研究^[69~78,15],认为:系统布置锚杆可以提高锚固体的极限强度、弹性模量、内聚力、内摩擦角等力学参数;锚杆支护可以改变围岩应力状态及应力应变特性;锚固效果与锚杆长度、密度及锚杆材料性质有关,锚固效果随岩体强度提高而减小;系统布置锚杆的围岩可看作力学参数提高而均化的岩体等。

侯朝炯、勾攀峰结合煤巷埋藏深、受采动影响、地应力大、围岩松软破碎的特点,通过相似材料模拟试验和理论分析,研究锚固体峰前、峰后、残余强度阶段的力学行为,提出了锚杆支护围岩强度强化理论^[79,16]。认为:锚杆与围岩相互作用,形成锚杆—围岩的共同承载结构,改善锚固体力学性能,提高锚固体峰值强度和残余强度,特别是残余强度的提高,可有效提高围岩的自承能力,控制围岩塑性区、破碎区发展,促使巷道围岩由不稳定状态向稳定状态转变。锚杆支护围岩强度强化理论加深了对锚杆支护机理、锚杆与围岩相互作用关系的认识,推动了困难条件下煤巷锚杆支护技术进步^[104],对进一步开展锚杆支护理论研究具有指导意义。

上述理论成果用于指导锚杆支护实践,促进了锚杆支护安全、快速发展。

沿空掘巷在采空区侧向支承压力作用下,围岩存在破碎区、塑性区和弹性区,锚固区域的岩体可能完全处于破碎区内或者处于破碎区、塑性区,相应锚固区域的岩体强度为峰后强度或残余强度。在工作面采动支承压力作用下,围岩破碎区、塑性区进一步发展,锚固体的力学状态发生剧烈变化,深部围岩与锚固体相互作用,促使锚固体向巷道内移动,巷道产生大变形,维护困难。因此,只有将处于残余强度阶段、峰后强度阶段的锚固体稳定机制、锚固体与外部围岩形成的“支护—围岩”相互作用原理结合起来研究,才能揭示沿空掘巷围岩稳定性原理。

1.3 存在的问题

高强度锚杆支护的沿空掘巷矿压显现规律显著不同于采用架棚及低强度锚杆支护的沿空掘巷矿压显现规律,沿空掘巷的矿压理论 and 支护技术存在以下几个方面问题。

(1) 基本顶弧形三角块是沿空掘巷的上边界,它的旋转下沉及稳定状况直接决定沿空掘巷的稳定性。基本顶在工作面端头形成的弧形三角块结构,受工作面采动影响后,弧形三角块的受力情况和稳定状态复杂,目前对基本顶弧形三角块稳定状况研究较少。

(2) 护巷窄煤柱是沿空掘巷围岩结构的重要组成部分,窄煤柱的稳定性直接关系到沿空掘巷的稳定,同时窄煤柱的宽度决定巷道围岩应力的与围岩完整性,如何确定合理的窄煤柱宽度,保持窄煤柱稳定,使窄煤柱成为沿空掘巷围岩结构的一部分,同时使围岩应力较小、完整性较好,保持巷道稳定,提高采出率,这有待于对采煤工作面沿倾斜方向矿山压力显现规律及沿空掘巷围岩变形、破坏规律的深入研究。

(3) 采空区侧向支撑压力分布表明:一般在采空区侧向煤体 0~12 m 范围内铅直应力变化较大,从 0 倍变化到 2.5 倍左右原岩应力^[1],沿空掘巷正开挖在该范围内,巷道围岩应力状况相差较大,巷道掘进和本工作面超前支撑压力的叠加作用,引起巷道围岩应力状态改变。根据岩石降压破碎过程的能量分析^[12],在最大主应力减小过程中,岩体内变形能小于其储存能量的能力,岩体不发生破坏;当最大主应力超过岩石单轴抗压强度,在最小主应力降低过程中,由于岩体内的变形能超过其储存能量的能力,会使岩体破坏。巷道掘进对顶板是最大主应力减小,对两帮是最小主应力减小^[13],造成两帮尤其是窄煤柱较大范围的破坏,而对顶板影响相对较小,所以,沿空掘巷两帮相对移近量显著大于顶底板相对移近量,两帮相对移近量中窄煤柱的鼓出量大于实体煤帮鼓出量,国内