



沿空留巷技术研究

张培森 林东才 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(No. 51109124, No. 51379119)

高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20113718120009)

中国博士后科学基金(No. 20090461257)

沿空留巷技术研究

张培森 林东才 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书针对沿空留巷研究现状,结合现代化矿井的地质条件和生产技术条件,设计研发了不同巷旁支护形式的沿空留巷技术。本书内容丰富,主要包括绪论、沿空留巷围岩活动破坏规律研究及力学模型的构建、巷旁支护材料选取及其力学特性试验分析、不同巷帮支护形式的沿空留巷系列技术、特定地质条件下相应沿空留巷技术的应用等。

本书是国内又一本有关沿空留巷技术方面的理论研究专著,可供采矿、土木、水利、工程力学等学科的广大科技工作者及相关专业的高校老师和高年级本科生、研究生参考。

沿空留巷技术

图书在版编目(CIP)数据

沿空留巷技术研究/张培森,林东才著. —徐州:中国矿业大学出版社,2014.2

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2255 - 8

I. ①沿… II. ①张… ②林… III. ①无煤柱开采—巷道掘进—研究 IV. ①TD823.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第025882号

书 名 沿空留巷技术研究

著 者 张培森 林东才

责任编辑 于世连

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 9.25 字数 231 千字

版次印次 2014 年 2 月第 1 版 2014 年 2 月第 1 次印刷

定 价 36.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

序

采用沿空留巷技术,对转变原煤柱护巷的传统错误观念,排除冲击地压和瓦斯突出具有重要意义。可以取消区段煤柱,提高煤炭回采率,充分挖掘利用煤炭资源,实现可持续发展;利用矸石、粉煤灰等废料进行支护墙体的构筑,可以减少废料对环境的污染,更加有效的利用资源;变掘巷为留巷,减少巷道掘进量,可以缩短回采工作面的准备时间,缓解采掘接续紧张的矛盾,有利于矿山的安全生产;推动无煤柱开采的发展,探索无煤柱开采的新思路,有利于防火和煤矿安全生产,对煤矿生产的安全生产及绿色开采具有重大意义。

本书以实用矿压理论为指导,结合理论计算、实验研究及现场实测等综合研究方法,分析了沿空留巷特有的围岩活动破坏规律,进行了巷旁支护墙体材料的试验研制,巷旁支护阻力、支护强度的计算及支护墙体位置、宽度设计,支护体材料远距离输送系统设计,巷内及巷旁支护参数设计,巷旁支护工艺及设备研发。针对不同工况条件,以所开发的新型巷旁支护材料为基础,对混凝土浇注实体墙、混凝土预制块空心墙、矸石袋锚杆加固墙、混凝土预制块实体墙等巷旁支护体进行了研究设计,并进行了相应的现场矿压设计及观测,达到了预期效果。

作者在参阅大量国内外相关文献资料和汲取前人最新研究成果的基础上,对基于不同巷旁支护形式的沿空留巷技术进行了深入、系统的研究。本书内容丰富、逻辑性强、重点突出,具有较高的学术价值和实用性。该书的付梓问世,我相信一定会引起同行们的广泛兴趣,并有力推动采矿工程无煤柱回采领域的学术进步。我期待该书早日出版,并乐意为之作序。

中国科学院院士



2013年11月

前 言

中国是世界第一产煤大国,煤炭是中国的主要能源,国家在“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,煤炭仍将作为中国不可替代的主导能源。

随着国民经济的发展,国家对能源需求量的不断增加,煤炭开采强度及深度不断加大。由于深部矿井数目成倍增加,高瓦斯和煤与瓦斯突出的矿井逐渐增多,在采动影响下,围岩发生变形、断裂后会有大量的瓦斯运移。U形通风方式能造成采煤工作面上隅角瓦斯超限。随着采掘工作不断延深,采掘工作面瓦斯涌出量迅猛增大,采煤工作面上隅角的瓦斯积聚不仅限制了采掘设备生产能力和生产效率的进一步提高,而且严重危及工作面作业人员的生命安全。因此,高瓦斯采煤工作面瓦斯超限的防治已成为目前很多矿区安全高效生产中迫切需要解决的难题之一。

沿空留巷在技术和经济上都具有很大的优越性,可以完全取消区段煤柱、提高煤炭资源采出率、改善巷道围岩的破坏情况、降低巷道支护难度、延长矿井服务年限、减少巷道掘进量、缓解采掘接替矛盾、实现Y形通风、取消孤岛工作面及缩短搬家时间,有利于改善矿井安全生产状况和增加矿井技术经济效益。

在新形势下,进一步探索研制沿空留巷所需的新材料及新工艺、新方法,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,对促进中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,因此,本书针对沿空留巷研究现状,结合现代化矿井的地质条件和生产技术条件,研发和实践不同巷旁支护形式的沿空留巷技术。

本书逻辑严谨、内容全面、图文并茂,是作者近年来一直在沿空留巷技术领域潜心研究的结晶,也是国内又一本有关沿空留巷技术方面的理论研究专著,可供采矿、土木、水利、工程力学等学科的广大科技工作者及相关专业的高校老师和高年级本科生、研究生参考。

本书出版获得了国家自然科学基金(No. 51109124, No. 51379119)、高等学

校博士学科点专项科研基金(No. 20113718120009)及中国博士后科学基金(No. 20090461257)的资助和支持。

在本书涉及的项目研究及实施过程中,有幸得到了兖矿集团黄福昌总工程师,济二煤矿刘心广总工程师,东滩煤矿邓小林总工程师,济三煤矿张广文总工程师,发耳煤矿张贵山总工程师,王楼煤矿肖庆华矿长等大力支持和帮助,且各位专家在方案设计时提出了指导性的设计思路和建议。在方案设计、试样制作及实验中,山东科技大学李洪教授、林跃忠副教授做了大量工作。

在现场资料收集、工程试验及实践过程中,得到了兖州煤业股份有限公司济宁二号煤矿、东滩煤矿、济三煤矿、发耳煤矿,山东能源临矿集团王楼煤矿等单位 and 工程技术人员的大力帮助。

在本书编写过程中,山东科技大学张文泉教授、石永奎教授等给与了大力支持与帮助;北京煤炭科学研究总院林惠立工程师,研究生栾恒杰、魏夕合、杨健、王明辉、王浩等做了大量的现场资料收集、文字及图表处理等工作。

借本书出版之际,作者对以上各位专家、老师及朋友们对本项研究及本书出版的指导、支持和帮助表示衷心感谢!在本书写作过程中,作者参考了大量相关书籍和文献,由于资料来源广,可能难以一一予以注明和查实,请相关作者给予谅解,并致以诚挚的谢意!向参与本项研究的同事和研究生们表示衷心感谢!

承蒙作者十分敬重的采矿工程专家、中国科学院院士宋振骐在百忙之中为本书作序,在此表示由衷的感谢!

限于作者的研究水平和条件,书中难免存在不足之处,真诚期望同行专家及阅读本书的读者不吝赐教、提出宝贵批评与建议。

作 者

2013 年 11 月

目 录

1 绪论	1
1.1 沿空留巷技术研究意义	1
1.2 沿空留巷理论研究现状	2
1.3 沿空留巷技术发展与应用现状	5
1.4 沿空留巷技术研究内容和研究方法	7
2 沿空留巷围岩活动破坏规律研究及力学模型的构建	10
2.1 顶板垮落形式及其规律	10
2.2 沿空留巷围岩结构活动基本规律及特征	12
2.3 沿空留巷力学模型的构建及力学解析	14
2.4 本章小结	27
3 巷旁支护材料选取及其力学特性试验分析	29
3.1 混凝土浇筑材料的配制与研发	29
3.2 新型轻质高强预制块的研制	40
3.3 研石袋锚杆加固墙体的力学试验	42
3.4 混凝土预制块的试验研制	44
3.5 本章小结	49
4 不同巷帮支护形式的沿空留巷系列技术	50
4.1 混凝土刚模浇筑实体墙巷旁支护技术	50
4.2 混凝土预制块空心墙巷旁支护技术	55
4.3 研石袋锚杆加固墙巷旁支护技术	56
4.4 小型混凝土预制块实体墙巷旁支护技术	58
4.5 大型混凝土砌块组装墙巷旁支护技术	59
4.6 本章小结	61

5 特定地质条件下相应沿空留巷技术的应用	62
5.1 混凝土浇筑实体墙支护设计	62
5.2 混凝土预制块空心墙支护设计	79
5.3 矸石袋锚杆加固墙支护设计	98
5.4 混凝土预制块实体墙支护设计	108
5.5 本章小结	133
6 主要结论及创新性	134
6.1 主要结论	134
6.2 创新性	135
参考文献	136

1 绪 论

1.1 沿空留巷技术研究意义

中国是世界第一产煤大国,煤炭是中国的主要能源。国家在“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,煤炭仍将作为中国不可替代的主导能源。

随着国民经济的发展,国家对能源需求量的不断增加,煤炭开采强度及深度不断加大,浅部资源日益减少,国内外矿井都相继进入深部开采。据统计,20世纪50年代,中国的立井深度平均不到200 m,而到90年代平均深度已达600 m。早在“八五”期间,国内新建的65个矿井的平均深度就达到了588 m。目前,国内许多矿区的开采深度都已超过了600~800 m,深度超过千米的矿井就有十几个,最大开采深度已接近1 200 m。可以预计,随着对煤炭需求量的不断增加,国内将有更多的煤矿进入到1 000 m以下深部进行开采。

随着矿井采深的逐年增加,深部巷道处于复杂的应力环境中,巷道地应力增加,围岩应力分布与矿压显现异常,围岩塑性区和破碎区范围增大,致使巷道在回采动压影响期间围岩变形及破坏严重,在采动支承应力作用下,塑性区和破碎区更大,两帮相对移近剧烈,降低了两帮对顶板的支护;高应力通过两帮传递到底板,因巷道底板一般不支护或支护强度较小,因此,深部巷道底鼓严重,两帮移近和底鼓明显。深部煤层巷道在两帮相对移近过程中,作用于顶板和底板,导致顶板下沉和底板鼓起,两帮相对移近与底鼓相互作用,即两帮相对移近促进底鼓,底鼓又加剧两帮移近,失修和严重失修的巷道增多,巷道维护十分困难,且常常出现前掘后修、重复返修的现象,与浅部巷道支护有显著的差别。

由于深部矿井数目将成倍增加,高瓦斯和煤与瓦斯突出的矿井逐渐增多,在采动影响下,围岩发生变形、断裂后会有大量的瓦斯运移。U形通风方式能造成回采工作面上隅角瓦斯超限。近年来,虽然通过采取瓦斯抽放措施可以减轻上隅角的瓦斯积聚,但是由于采空区涌出的大部分瓦斯都在这里积聚,仍容易在工作面上隅角有大量瓦斯聚积,严重限制工作面生产能力的提高和危害工作面安全生产。随着采掘工作不断延伸,采掘工作面瓦斯涌出量迅猛增长,回采工作面上隅角的瓦斯积聚不仅限制了采掘设备生产能力和生产效率的进一步提高,而且严重危及到工作面作业人员的生命安全。因此,高瓦斯回采工作面瓦斯超限的防治已成为目前很多矿区安全高效生产中亟待解决的难题。

沿空留巷在技术和经济上都具有很大的优越性。沿空留巷可以完全取消区段煤柱,提高煤炭资源采出率,改善巷道围岩的破坏情况,降低巷道支护难度,延长矿井服务年限,减少巷道掘进量,缓解采掘接替矛盾,取消孤岛工作面及缩短搬家时间。沿空留巷技术是有利于矿井安全生产和改善矿井技术经济效益的一项重大的护巷技术,能够实现Y形通风方式,

解决工作面瓦斯超限难题,并能合理开发煤炭资源,实现前进式和往复式开采。其技术优势和经济效益显著。

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发展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,对促进中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 沿空留巷理论研究现状

中国以及其他主要产煤国家为了达到少掘巷道,增加煤炭资源的回收率,提高生产的连续性以及矿井的经济效益的目的,在沿空留巷技术研究上投入较多的研究,主要对留巷适应条件、围岩变形破坏机理、巷旁及留巷巷道支护方式以及充填新材料的开发进行了深入的研究。

1.2.1 沿空留巷上覆岩层活动规律的研究综述

(1) 国内沿空留巷上覆岩层流动规律相关研究

陆士良认为沿空留巷顶板下沉量大小取决于“裂隙带岩层取得平衡前的强烈沉降”。

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,认识到沿空留巷的矿压显现规律与采场老顶的关系,采场老顶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。

何廷峻认识到基本顶在工作面端头形成的三角形悬顶对沿空巷道的危害,并对悬顶破断结构进行了分析,预测了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,对保护沿空留巷的安全具有重要意义。

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分析法证明,沿空留巷的老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,老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。

谢文兵等利用 UDEC 软件模拟分析了岩层断裂和垮落,研究了留巷前巷道支护形式、充填体宽度、充填方式、充填体强度和端头不放顶煤长度等对综放沿空留巷的作用和效果,认为:留巷顶板下沉是老顶回转运动与围岩变形的综合反映;充填体上方顶煤位移由老顶岩层运动引起,由浮煤和充填体压缩变形以及充填体承载前预留变形量三部分组成;端头留设一定长度的顶煤不放,有利于老顶回转触矸后形成具有自稳能力的承载结构。

涂敏运用弹性地基理论研究了沿空留巷巷道上方的煤体上方老顶的挠曲运动方程及应力分布特征,提出了巷旁支护阻力计算式;认为沿空留巷巷道上方的顶板内存在两个应力集中区:一个是煤体上方的固定支承压力区,切顶前后应力峰值位置变化不大,分布形式复杂;另一个是巷道支护体上方的应力集中区,切顶前后峰值位置变化较大,沿空留巷正是利用该集中应力且在足够底板强度下切落顶板。

李化敏认为将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三个时

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,后期顶板变形以平行下沉为主;认为巷旁充填体不能改变老顶“大结构”的形态;充填体前期的支护阻力,主要是平衡直接顶及其悬臂部分的重量,以保持直接顶与老顶的紧贴;充填体在过渡期的支护阻力,主要是通过参与顶板运动及平衡,缩短过渡期顶板剧烈活动的时间,减少留巷顶板过大下沉量;充填体在后期的作用主要是维持老顶“大结构”的稳定。

张东升采用相似材料模拟试验方法,对沿空留巷老顶破断位置与形状、不同支护方式对顶板活动的影响以及相关的巷旁充填技术参数进行了初步研究;认为采用锚杆(索)网联合支护和人工构筑较高强度的巷旁充填体,有利于综合机械放顶煤开采沿空留巷顶板的稳定,并给出了对充填带宽度和充填材料抗压强度的最低要求。

王卫军根据砌体梁理论,老顶以给定变形方式作用于综放沿空巷道围岩,分析了巷道围岩的变形机理,建立了巷道顶煤的力学模型,运用变分法对老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。

孙恒虎通过相似材料立体模型实验,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。

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。

薛俊华等运用理论分析和数值模拟方法探讨了采高因素影响下沿空留巷顶板应力的分布特性,得到大采高条件下留巷全断面变形分布特征,提出沿空留巷处于采空区侧向支承应力区的应力降低带;工作面采高越大,则岩层活动的影响幅度及范围就越广;认为需针对留巷各个边位的变形特征分别采取有效的支护控制对策;选择留巷断面的最优跨高比并采用以高初撑力为核心的高强支护体系,能够合理控制围岩变形。

韩昌良等从采场侧向覆岩活动的阶段特征入手,结合数值模拟分析了顶板离层的形成过程,建立了顶板岩梁受力模型,推导得出了顶板下沉与离层数值的影响因素和算式,认为巷道顶板同期破断的岩层组间不会发生离层,分次垮落岩层组间的离层值取决于各岩层组力学性质与层厚的差异。

黄庆亨等通过实测,得出了急倾斜临界角煤层回采巷道沿空留巷的变形和破坏基本特征和规律,提出大倾角临界角煤层回采巷道变形和破坏的主要特点是非对称变形,其主要机理是顶板下挫运动和底板的反向隆起而形成的相对挫动,揭示了大倾角临界角煤层非对称破坏和变形破坏严重的机理,认为对于非对称变形的巷道,必须采用与之相适应的断面形式,保障巷道围岩的稳定性和降低支护成本。

文志杰等运用“实用矿山压力控制理论”建立了沿空留巷开采灾害系统模型,提出了无

煤柱沿空留巷“大、小结构理论”,建立了“给定变形”、“限定变形”两种留巷结构力学模型;将采场模型空间形态划分为对采场矿压显现有直接影响的运动岩层结构“裂断拱”和未产生明显运动的岩层结构“应力拱”,认为巷旁充填体力源为“裂断拱”内裂断岩梁,煤帮力源来源于“应力拱”内岩梁作用。

(2) 国外沿空留巷上覆岩层流动规律相关研究

苏联学者们在理论上,提出了不同特征顶板情况下沿空留巷应用的可行性,对留巷维护中有关的参数提出了理论计算方法或经验公式,并对不同采深和岩性时留巷过程中围岩移近量进行了研究和实验测量。苏联学者 B. 胡托尔诺依将采场矿压悬梁模型应用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式。

德国学者们创造了包括掘进、回采及矿井混凝土管路运输系统及充填系统的沿空留巷体系,并在埋深 800~1 000 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。

英国学者 Whittake 等将采场矿压研究的 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。英国南威尔斯大学斯麦脱(Smart)提出了顶板岩梁倾斜力学理论,认为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,该理论认为巷旁支护对巷道老顶起控制作用,主张用控制巷道煤柱侧和巷旁支护侧的顶板下沉量,即控制顶板倾斜度的方法作为设计巷旁支护工作阻力和可缩量的依据。

1.2.2 沿空留巷巷旁支护阻力的研究综述

(1) 国内沿空留巷旁支护阻力相关研究

王飞等根据顶板稳定性分类,将直接顶分类和老顶分级组合为四种顶板类型,并分别建立了各种顶板类型的力学模型,依次给出了沿空留巷巷旁支护的载荷推算方法。

陈名强在分析沿空留巷矿压显现特点及现有各种巷旁支护带载荷设计方法的基础上,提出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)相当于采厚四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,为进一步探求合理的巷旁支护材料和结构提供了方向。

宋彦波等根据悬臂梁的计算原理,通过力学分析证明了缩短悬臂长度对减小巷旁支护阻力的重大作用;并研究了卸压法沿空留巷技术,即采用人工放顶的方法缩短悬臂长度。

孙恒虎等根据煤层顶板特征和弹塑性力学的有关理论,将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“叠层板”,采用条带载荷法和塑性极限分析法来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。

周华强等通过相似材料模拟试验,认为巷旁充填体控制顶板沉降是通过顶板足够的支撑作用,改变顶板弯矩分布,实现沿充填体侧切落下位顶板;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应根据最难切落的那层岩层(岩层组)切顶需要来确定。

马立强等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公式,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;认为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。

李化敏等研究了沿空留巷沿空留巷顶板岩层运动的过程及充填体受力特征,明确了顶板岩层运动各阶段巷旁充填体的作用,根据巷旁支护与顶板相互作用原理,研究了各阶段沿空留巷巷旁支护阻力设计原则,得出了巷旁支护阻力及顶板下沉量的计算方法。

郭育光等研究认为巷旁支护应具有早期强度高、增阻速度快的特点,巷旁充填体及时对直接顶提供支护阻力,避免直接顶与上部岩层离层,巷旁充填体要及时提供对顶板的支护阻力,而且到达能够切断直接顶的能力,让基本顶在充填体支护边缘侧及时切断;采高决定巷旁支护的切顶高度,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。

张吉雄等基于固体密实充填采煤的覆岩移动规律,分析了沿空留巷围岩变形特征及巷旁支护体的作用机理,认为夯实机构夯实充填体而传递来的侧压力是导致巷旁支护体失稳和变形的主要因素,并建立了侧向压力与巷旁支护体稳定性力学模型,推导出巷旁支护体宽度计算公式。

(2) 国外沿空留巷巷旁支护阻力相关研究

英国学者提出的岩梁倾斜理论,认为巷旁支护对巷道基本顶起控制作用,主张控制巷道煤柱侧和巷旁支护侧的顶板下沉量,即控制顶板倾斜度的方法作为设计巷旁支护工作阻力和可缩量的依据。

苏联学者研究了各类顶板下应用沿空留巷的可行性,利用采场矿压悬梁模型研究了沿空留巷巷旁切顶阻力计算式,并提出了留巷维护中有关的参数理论计算方法或经验公式,对留巷过程中采深和岩性不同时围岩移近量的方法进行了研究和实验测量。

1.3 沿空留巷技术发展与应用现状

1.3.1 国内沿空留巷技术发展及应用现状

(1) 国内沿空留巷技术发展历程

早在 20 世纪 50 年代,中国的科研部门、高等院校及煤矿企业以不同的合作方式对沿空留巷特别是巷旁充填技术进行了大量的研究和试验,目前已经取得了可喜的成果,许多领域的研究成果都处于国际领先地位。中国在沿空留巷技术领域的研究和发展情况,大致可分为以下四个阶段。

第一阶段,20 世纪 50 年代起,主要研究方法以现场实测和宏观规律研究为主。沿空留巷煤层厚度在 1.5 m 以下的较薄煤层中进行,巷旁支护比较简单,主要采用矸石作巷旁支护。主要应用沿空留巷的矿井有:鸡西、双鸭山、淄博、本溪等矿区。采用破碎矸石作为巷旁支护主要材料,既减少了矿井矸石外运的量和掘进巷道工程量,又提高了采区回采率。但对于没有采取措施处理的破碎矸石其受压变形量比较大,难以与巷道原有支护相匹配,维护工作量大,人工垒砌矸石的工效低、劳动强度大、安全性差等问题,其应用

范围受到极大限制。

第二阶段,20世纪60年代至70年代,此阶段主要以研究沿空留巷相关矿压显现机理为主。沿空留巷所能适应的煤层厚度有所增加,主要在1.5~2.5 m中厚煤层,留巷巷道断面也不断加大。主要应用矿区有:平顶山、徐州、淮北、枣庄、焦作等矿区,应用密集支柱、金属支柱、木垛和矸石砌块等作巷旁支护,维护工作量不大,基本保持稳定,在沿空留巷实施和推广方面取得一定成效。

第三阶段,20世纪80年代以后,此阶段对沿空留巷的机理和理论有了更加深入的动态研究,在前期研究获得成果的,进一步完善了沿空留巷的理论,丰富了沿空留巷技术,并将矿压机理和岩层活动最新理论进行有机结合。随着采煤综合机械化大力推行,以及采高不断增大、工作面推进加快,导致巷道顶底板下沉量增大。国家先后从德国、英国吸收、引进了充填材料和相关设备,取得比较好的效果。经过10多年现场实验和理论研究,至20世纪90年代初,我国在充填设备和充填材料方面成果已经得到很大提高。中国矿业大学甚至成功的研究了国内的高水速凝材料,在高水材料方面的研究一直处于国际领先水平。但由于这种技术要建立一套复杂的充填材料加工、运输和泵运充填系统,并装备相应的一整套设备,生产成本较高,故目前在大多数矿井中还难以广泛应用。

第四阶段,20世纪90年代以来,此阶段开始将沿空留巷技术用到厚煤层甚至放顶煤工作面。

(2) 国内沿空留巷技术应用现状

沿空留巷技术的研究与应用从20世纪50年代开始,一直是中国煤炭开采技术研究的重要发展方向。特别是近年来,绿色开采、可持续发展等国家能源政策制定后,沿空留巷技术是其中重点发展方向之一。

目前,国内沿空留巷巷内支护有金属支架及锚杆支护等方式。巷内支护情况由于顶板岩性不同而不同,顶板为泥岩、复合顶板及中等稳定顶板时多采用U形钢及工字钢梯形棚等支护方式,顶板为灰岩顶板时采用单体支柱支护。在顶板中等稳定以下时巷内采用金属支架的方法,在顶板稳定性较差,巷道围岩变形量较大时,多采用锚杆、锚索主动支护方式。随着采深及采高不断增大,留巷断面不断增大,在巷道围岩变形量逐渐增大、巷道维护越来越困难的条件下,高强度螺纹钢锚杆,锚杆锚索联合支护,锚索及金属网联合支护,锚网联合支护,锚索钢带联合支护等支护形式被越来越多的应用到现场。

目前,传统的巷旁支护有木垛巷旁支护、密集支柱巷旁支护、矸石带巷旁支护、混凝土砌块巷旁支护,后来开发了高水速凝材料及膏体材料巷旁支护新技术。

① 木垛作为巷旁支护时,与顶底板的接触面积大,比较稳定,挡矸性能好,方便、灵活,但是木材消耗量大,支护刚度低,增阻速度慢,可缩量小,支护阻力小,留巷维护效果差,不能密闭采空区。目前已很少采用。

② 密集支柱作为巷旁支护可缩量小,早期支撑性能好,巷道控顶宽度小,切顶效果好,架设方便,对采高适应性好,但是支护阻力小,稳定性差,不能密闭采空区,适用于脆性顶板、中等稳定的薄及中厚煤层。目前已较少采用。

③ 矸石带支护,其最大优点是可以节约大量的支护材料和相应的费用,稳定性较好。但是垒砌不易致密,前期支护阻力小,顶板下沉量大,构筑矸石带的劳动强度大,密闭采空区效果较差,主要适用于顶板韧性较大的薄及中厚煤层。

④ 混凝土砌块巷旁支护前期支护阻力大、增阻速度快、切顶效果好,密闭采空区效果较好;但是可缩量较小、成本较高、构筑巷旁支护的劳动强度大,机械化程度低,适用于顶板中等稳定的薄及中厚、中硬以上的煤层。

传统的巷旁支护存在支护阻力、可缩性等力学性能与沿空留巷围岩变形不相适应、密闭性能差和机械化程度低等缺点,不利于巷道维护和防止采空区漏风与自燃发火,针对沿空留巷围岩活动规律及传统巷旁支护存在的问题,研究、开发的高水速凝材料及膏体材料巷旁支护新技术,具有支护阻力大、增阻速度快、适量可缩,巷道维护效果好,机械化整体构筑巷旁支护对采空区密闭性好、劳动强度低等特点,但是高水速凝材料巷旁支护成本较高,未能在国内广泛应用。膏体材料巷旁支护由胶结料与矸石加水搅拌混合均匀形成膏体状充填材料、经膏体充填泵泵送、钢管输送到回采工作面后方由模板构筑的充填空间内凝结而成,可见,膏体材料巷旁支护价格低廉,经济效益显著。

1.3.2 国外沿空留巷技术发展及应用现状

苏联自 20 世纪 60 年代开始试验推广沿空留巷技术,对沿空留巷巷旁支护也进行了大量的研究。针对廉价而且来源丰富的巷旁支护材料做了不少研究。例如用矸石、水泥炉渣以及粉煤灰等不同配比较轻质混凝土砌墙,代替人工矸石袋、木垛填石以及丛柱等。

德国是世界采煤技术最发达的国家之一,早在西德时期,应用无煤柱开采沿空留巷,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,目前,该国有 $1/2 \sim 2/3$ 的沿空留巷采用这项技术。

英国煤矿对沿空留巷技术的研究有着较长的历史。由于英国煤层普遍较薄,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。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。20 世纪 70 年代末,英国国家煤炭局就加紧了对巷旁充填技术的研究,主要研究材料是两种浆液,一种是粉煤灰+水泥+悬浮剂,另一种是水泥+膨润土,将这两种浆液混合注入充填袋中,该方式存在的问题是硬化体抗压强度低,达不到要求;随后他们又研究了一种新的充填技术,同样由两种原料组成:一种是由矾土水泥、无水碳酸钙、硅酸水泥等八种原料混合而成,另一种是由膨润土等原料组成。在此基础上,英国相关研究机构又进行了深入研究,材料性能得到了提高,在英国煤矿得到了大面积推广。20 世纪 70 年代末,英国就发展起了高水速凝巷旁充填材料,其凝固速度快、早期强度大、增阻速度快、塑性变形量大、水用量大、固体料用料少,易于泵送,构筑巷旁支护的劳动强度小,高水材料充填已占全英巷旁充填的 90% 左右。

波兰煤矿有用水沙充填作沿空留巷巷旁支护,有用矸石带支护,还有混凝土砌墙和密集支柱等,也都取得了很好的效果。

1.4 沿空留巷技术研究内容和研究方法

1.4.1 沿空留巷技术研究内容

本书所涉及的项目研究是针对沿空留巷围岩活动规律和施工技术进行研究。本书结合

国内外沿空留巷理论和方法,分析了围岩结构活动规律,建立了力学模型进行解析;在不同地质条件下分析了巷旁支护体的不同施工工艺,深入研究了沿空留巷新型巷旁支护技术,并对各支护结构进行了设计和现场观测。

本书主要研究内容如下:

(1) 沿空留巷围岩活动破坏规律研究及力学模型构建

分析沿空留巷顶板的垮落形式、破断特征及垮落残留边界特征,围岩活动的分期规律及结构特征,构建沿空留巷力学模型,研究围岩应力分布规律,对实体煤、充填体的变形和顶板下沉进行力学分析以及覆岩分次垮落时留巷顶板离层力学分析。

(2) 混凝土浇筑实体墙巷旁支护技术研究

研究泵送早强混凝土的结构与强度形成机理,并以此为依据进行早强混凝土配制的研究,以早强混凝土为充填材料设计井下泵送管路充填浇灌混凝土墙作为沿空留巷的巷旁支护方式,研发自移、可调混凝土墙体成型模盒和自移护墙掩体支架进行巷旁充填,并对巷道和充填墙体进行现场监测。

(3) 混凝土预制块空心墙巷旁支护技术研究

研究混凝土预制块空心墙巷旁支护的沿空留巷方式,实验研制新型轻质高强泡沫混凝土砌块,并设计混凝土预制块砌墙的墙体结构,研究宽巷掘进,预掘留巷位置,预控留巷顶板,多规格混凝土卯榫砌块并字格纵横扣按纵码成墙技术,开发基于卯榫结构法快速沿空留巷技术。

(4) 研石袋锚杆加固墙巷旁支护技术研究

研究研石袋锚杆加固墙沿空留巷技术,提出沿空留巷顶板控制方法,研究提高巷旁充填带侧向应力对提高充填体强度作用以及墙体结构形式,最后通过对沿空留巷及综采采场进行矿压规律观测,分析留巷效果。

(5) 混凝土预制块实体墙巷旁支护技术研究

研究预制混凝土块砌墙巷旁支护的沿空留巷方式,根据混凝土预制块的强度、形状、排列方式的力学试验,分别设计混凝土大、小砌块砌墙的墙体结构及施工工艺,研发适应综采高效、快速、大断面的预制块实体墙巷旁支护技术。

1.4.2 沿空留巷技术研究方法

在现场调研与文献检索分析的基础上,基于采矿学、地质学、岩体力学与材料化学等学科理论,结合理论计算、数值分析、实验研究及现场实测等综合研究方法,分析沿空留巷围岩结构在工作面不同回采时期的活动规律,深入研究沿空留巷新型巷旁支护技术和支护材料设计,针对不同的地质条件、生产技术条件,设计合理有效的巷旁支护工艺,并进行现场矿压观测,分析沿空留巷效果。

本书采用的沿空留巷技术研究方法路线图如图 1.1 所示。

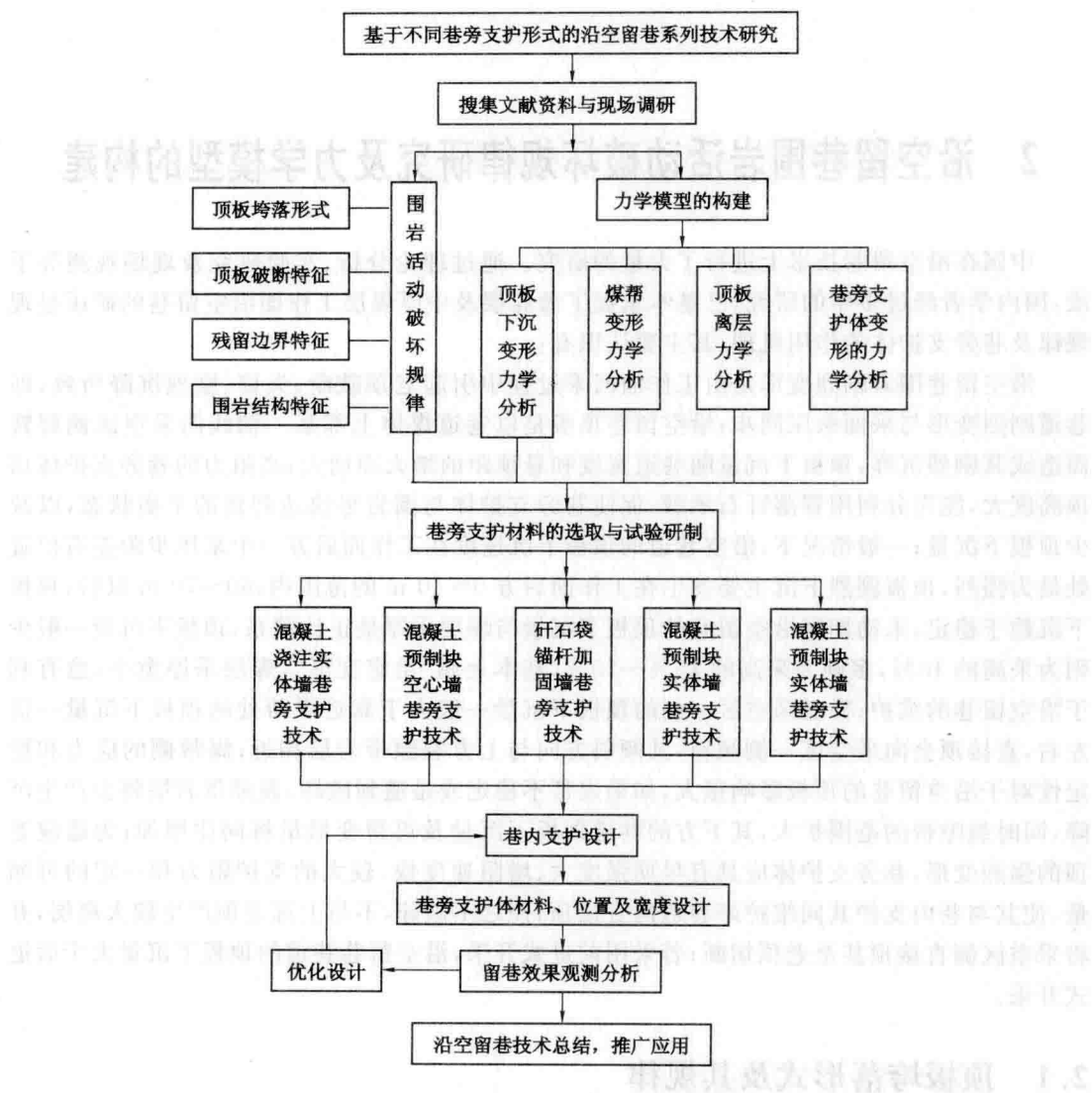


图 1.1 沿空留巷技术研究方法路线图