

国家重点基础研究计划(973计划)项目(2015CB251600)资助
国家自然科学基金项目(51264035)资助
新疆维吾尔自治区引进高层次人才及“天山学者”启动基金项目资助
中国矿业大学科技攀登计划项目(OA090239)资助
煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金项目(09KF06)资助

沿空巷道窄帮蠕变失稳控制 机理及其应用研究

王红胜 张东升 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家重点基础研究计划(973 计划)项目(2015CB251600)资助

国家自然科学基金项目(51264035)资助

新疆维吾尔自治区引进高层次人才及“天山学者”启动基金项目资助

中国矿业大学科技攀登计划项目(OA090239)资助

煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金项目(09KF06)资助

沿空巷道窄帮蠕变失稳控制 机理及其应用研究

王红胜 张东升 著

中国矿业大学出版社

内容提要

本书系统地阐述了沿空巷道窄帮蠕变失稳控制机理,研究了沿空巷道上覆基本顶四种断裂结构形式下窄帮应力变形规律和窄帮蠕变特性、破坏准则及其稳定性控制技术。主要内容包括:沿空巷道上覆基本顶断裂结构对窄帮稳定性影响规律分析;混凝土人造帮蠕变模型及破坏准则分析;10 000 kN 大尺寸人造帮蠕变实验系统研制;不同构筑材料、不同构筑方式、锚栓强化及“软+硬”结构人造帮的蠕变特性及破坏特征分析;人造帮合理强度及高宽比分析;沿空巷道长期稳定性控制技术分析。基于以上研究成果,提出了预筑人造帮置换窄煤柱二步骤沿空掘巷新技术和预制混凝土大砌块构筑人造帮沿空留巷新技术,对无煤柱开采技术推广应用进行了有益的探索。本书对于沿空巷道窄帮蠕变失稳控制机理的深入研究,在沿空巷道围岩控制及无煤柱开采等方面具有重要的理论意义和实用价值。

本书可供沿空巷道围岩控制、无煤柱开采及相关领域的科研人员和工程技术人员参考使用,亦可作为普通高校研究生和高年级本科生参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

沿空巷道窄帮蠕变失稳控制机理及其应用研究/王红胜,张东升著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-5646-2629-7

I. ①沿… II. ①王… ②张… III. ①沿空巷道—蠕变—研究 IV. ①TD263.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 027990 号

书 名 沿空巷道窄帮蠕变失稳控制机理及其应用研究

著 者 王红胜 张东升

责任编辑 徐 玮 黄本斌

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 14.5 字数 362 千字

版次印次 2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷

定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

窄帮作为沿空巷道围岩结构的重要组成部分,在1~2 a的服务期间内要经历2次较大采动影响和长期的蠕变变形,如果窄帮的支护阻力不足、抗变形能力差、蠕变变形量过大,易导致巷道围岩强烈变形,最终造成沿空巷道维护困难或报废,对矿井安全高效生产造成极大影响。本书以沿空巷道窄帮及其上覆基本顶为研究对象,以窄帮时间效应为切入点,综合采用实验室实验、理论分析、物理模拟分析、数值模拟分析及工业性试验相结合的研究方法,对沿空巷道上覆基本顶四种断裂结构形式下窄帮应力变形规律和窄帮蠕变特性、破坏准则及其稳定性控制技术展开了较为系统的分析。

本书作者建立了沿空巷道围岩结构力学模型,基于窄帮、沿空巷道及基本顶断裂线“三者”空间位置关系,提出了沿空巷道上覆基本顶断裂结构存在四种形式,分析了窄帮应力与变形规律,推导了窄帮的静载荷计算公式;并尝试分析了基本顶断裂回转下沉产生的动载效应对窄帮稳定性的影响。系统分析了混凝土人造帮试件的蠕变特性和破坏特征,建立了混凝土人造帮蠕变模型与本构关系方程,确定出其蠕变失稳最短时间;采用正交八面体对其进行了受力分析,得到了双剪应力函数及双剪强度理论,并通过实验验证了混凝土人造帮强度破坏准则为双剪强度破坏准则。研制了10 000 kN大尺寸蠕变试验系统,对大尺寸人造帮蠕变特性、锚栓强化人造帮蠕变特性、不同构筑方式人造帮蠕变特性进行了系统分析;建立了窄帮“软+硬”结构效应力学模型,分析出影响人造帮整体稳定性的主要因素;提出了人造帮关键参数的确定方法和提高人造帮整体稳定性的强化技术,并在预筑人造帮置换窄煤柱二步骤沿空掘巷新技术和预制混凝土大砌块构筑人造帮沿空留巷新技术中得到成功应用。

全书共8章。第1章介绍了本书的研究背景、意义和国内外研究现状,提出了本书的研究内容与方法。第2章深入研究了基本顶四种断裂结构形式下窄帮的应力变形规律。第3章深入分析了基本顶断裂回转产生的动载效应对窄帮稳定性的影响规律。第4章分析了窄帮受力及变形特点,深入研究了混凝土人造帮蠕变特性、破坏特征及强度破坏准则。第5章研制了10 000 kN大尺寸人造帮蠕变实验系统,深入研究了不同构筑材料、不同构筑方式、锚栓强化及“软+硬”结构人造帮的蠕变特性及破坏特征。第6章研究了人造帮合理强度及高宽比,并建立了沿空巷道围岩控制技术体系。第7章开展了沿空巷道窄帮蠕变失稳控制机理的工程应用实例分析。第8章对本书所做的工作进行了总结。

本书在成书过程中,参阅了大量国内外相关专业文献,他们的研究成果给了作者很大的启发,在此谨向文献的作者表示诚挚的感谢。感谢中国矿业大学屠世浩教授、窦林名教授、张农教授、柏建彪教授、董正筑教授,西安科技大学李树刚教授、伍永平教授长期以来给予的帮助及指导。感谢煤炭资源与安全开采国家重点实验室张少华高工、马文顶高工、赵海云高工对物理模拟实验的大力支持,感谢西安科技大学张天军教授对蠕变试验基础参数测试的大力支持。感谢枣庄矿业(集团)有限责任公司高庄煤矿、铁法煤业有限责任公司小青矿、旬邑县中达燕家河煤矿有限公司、邯郸矿业集团有限公司陶一煤矿、龙煤集团双鸭山分公司集

贤煤矿的领导及工程技术人员在工业性试验研究过程中给予了大力支持和帮助。感谢周睿、王琳、马咪娜、杨建林、郭正超等硕士研究生参与的部分研究工作。最后,感谢中国矿业大学出版社相关工作人员为本书的出版付出的辛勤劳动。

本书在沿空巷道窄帮蠕变失稳控制机理研究方面虽然取得了一些成果,但很多内容还有待于今后进一步地深入研究和完善。受作者知识水平所限,书中疏漏之处在所难免,敬请读者不吝指正。

作 者

2015 年 1 月

目 录

1	绪论	1
1.1	问题的提出与研究意义	1
1.2	研究现状及存在问题	2
1.3	主要研究内容与方法	10
1.4	研究目标与创新点	12
2	沿空巷道上覆基本顶四种断裂结构形式分析	14
2.1	沿空巷道上覆基本顶四种断裂结构形式	14
2.2	基本顶断裂结构形式下窄帮静载荷计算公式的理论推导	15
2.3	基于基本顶断裂结构形式相似材料模拟实验分析	21
2.4	基本顶四种断裂结构形式下窄帮变形规律数值模拟分析	24
2.5	小结	43
3	基本顶断裂回转对窄帮的动载效应数值模拟分析	44
3.1	LS-DYNA 软件简介	44
3.2	数值模型建立	45
3.3	模拟方案	46
3.4	模拟结果及分析	46
3.5	小结	66
4	窄帮力学模型和混凝土人造帮蠕变特性分析	67
4.1	窄帮力学模型	67
4.2	混凝土人造帮强度配比力学实验	69
4.3	混凝土人造帮蠕变力学实验	72
4.4	混凝土人造帮蠕变模型确定	77
4.5	混凝土人造帮破坏准则的确定	82
4.6	小结	89
5	大尺寸人造帮蠕变特性物理实验分析	90
5.1	10 000 kN 大尺寸蠕变实验系统的研制	90
5.2	实验方案设计	94
5.3	人造帮蠕变特性实验分析	97
5.4	锚栓强化人造帮蠕变特性实验分析	104

5.5	不同构筑方式人造帮蠕变特性实验分析	108
5.6	人造帮“软+硬”结构效应提出	116
5.7	小结	117
6	沿空巷道围岩控制技术关键	119
6.1	沿空巷道围岩控制技术体系	119
6.2	基本顶断裂结构形式的判定方法	120
6.3	窄帮强度与尺寸的合理确定	121
6.4	沿空巷道整体稳定性控制技术	123
6.5	沿空巷道围岩监测技术	129
6.6	小结	130
7	工程应用实例分析	131
7.1	预筑人造帮置换窄煤柱的二步骤沿空掘巷新技术	131
7.2	综采原位沿空留巷技术	140
7.3	基于基本顶关键岩块 B 断裂线位置的窄煤柱合理宽度确定	149
7.4	新型高水速凝材料沿空留巷技术	170
7.5	预制混凝土大砌块构筑人造帮沿空留巷新技术	177
7.6	小结	214
8	主要结论	216
	参考文献	218

1 绪 论

1.1 问题的提出与研究意义

我国煤炭资源丰富,煤炭储量居世界第三位,并且我国是世界上第一大煤炭生产国与消费国^[1-3],这种状况决定了我国以煤为主的能源生产和消费格局将在今后一个相当长的时期内不会改变。目前,我国煤炭生产多采用井工开采,生产矿井每年新掘巷道约 20 000 km^[4],其中采区平巷进尺占 2/3 以上。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,即在工作面之间留设 3~5 m 的窄区段煤柱或 15~30 m 的宽区段煤柱,其目的是为了防止工作面与相邻采空区通透漏风而引起采空区的自然发火,同时也兼顾了工作面矿山压力的控制。区段煤柱虽然短期内对防治窜风、自然发火起到一定作用,但造成煤炭资源的浪费(约占全矿煤炭损失的 40%^[5-7])。而且,采空区侧煤柱被压酥,甚至压碎,极易造成采空区煤柱自然发火,严重威胁矿井的安全生产;如煤柱留设不合理,易形成应力集中,造成其下伏巷道维护困难。因此,研究区段不留煤柱,实现无煤柱护巷、提高煤炭回收率和降低巷道掘进率,对安全生产、增加经济效益和社会效益都具有十分重要的意义^[8-10]。

为提高采区回收率、降低回采巷道掘进率、有效解决上隅角瓦斯积聚难题和实现工作面 Y 形通风,国内外开展了大量无煤柱开采试验和应用。作为巷旁支护的窄帮也逐渐出现多样性,由传统的木垛、密集支柱、矸石带、混凝土砌块等逐渐发展到以泵送高水材料^[11]巷旁充填带;尤其近 10 年来,锚网索支护技术及充填设备的发展为沿空巷道窄帮多样性提供了技术支持。如煤矿瓦斯治理国家工程中心自主研发的 CHCT 系列充填材料^[12]具有良好压缩性能和很高残余强度;冯光明教授发明的超高水充填材料^[13]具有凝固速度快、早期强度高、良好的承载和变形能力等特点;为解决井下矸石不升井,把矸石井下处理与提高资源回收率有机结合在一起,张东升教授提出了以矸石为骨料预筑人造帮置换窄煤柱的二步骤沿空掘巷新技术^[14-15]。

随着材料、设备及技术的提升,无煤柱开采获得了新的生命力。对无煤柱开采矿压显现规律、沿空巷道围岩控制技术、沿空掘巷窄煤柱宽度的合理确定、沿空留巷巷旁支护系统的支护阻力、巷旁充填材料与工艺等进行的系统的研究,现已取得了大量的研究成果并在部分矿井得到了成功应用。但是,无论是窄煤柱,还是沿空留巷人造帮、沿空掘巷预置人造帮,它们都存在一个共性问题,即所处的围岩结构、应力环境具有相似性,应力和变形具有时效性。目前,对这些窄帮的时效性研究还不够,尤其是对不同材料窄帮的蠕变特性的研究。服务期限内,窄帮在恒定载荷下发生强烈的蠕变变形,因窄帮蠕变失稳导致巷道围岩强烈变形,造成沿空巷道维护困难或报废。因此,窄帮是沿空巷道围岩结构中的重要组成部分之一,其长期稳定特性直接影响沿空巷道整体的稳定性,同时也是成功开发无煤柱开采技术的难点。

本书以沿空巷道窄帮及其上覆基本顶为研究对象,通过研究基本顶断裂结构形式及其

对窄帮应力变形规律的影响、基本顶断裂回转作用在窄帮上的动载效应、窄帮蠕变特性及其强度破坏准则,提出了基于窄帮蠕变特性的合理强度的确定方法、基于窄帮尺寸效应的合理高宽比的确定方法,进一步提出窄帮新型构筑方法以及提高窄帮整体稳定性的强化技术。研究成果不仅可应用于厚、薄及中厚煤层沿空巷道窄帮围岩变形及控制技术,也可应用于“三软”煤层、深井高应力软岩巷道围岩变形及控制技术,同时也可为双巷掘进煤柱、房柱式开采煤柱的稳定性控制提供理论指导。对推动窄帮的多样性、丰富流变力学在采矿工程中的应用和推广无煤柱开采技术的应用都具有重要的理论意义和实践价值。

1.2 研究现状及存在问题

本书的研究重点将涉及沿空巷道上覆岩层活动规律、基本顶断裂回转产生的动载效应对窄帮稳定性的影响、窄帮蠕变特性及其稳定性控制等相关内容,所以对沿空巷道上覆岩层活动规律、沿空留巷巷旁支护阻力、沿空巷道围岩协调变形、煤矿开采围岩流变及沿空留巷工程实践等方面的国内外研究现状分别进行综述。

1.2.1 沿空巷道上覆岩层活动规律研究现状

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以解释各种矿山压力现象。具有代表性的有德国学者 K. Stoke 于 1916 年提出的悬臂梁假说,德国学者 W. Hack 和 G. Gilitzer 于 1928 年提出的压力拱假说,比利时学者 A. Labasse 于 20 世纪 50 年代初提出的预成裂隙假说,苏联学者 T. H. 库兹涅佐夫于 1954 年提出的铰接岩块假说^[16]。20 世纪 70 年代末 80 年代初,钱鸣高院士通过总结铰接岩块假说和预成裂隙假说,并在大量生产实践和对岩层内部移动进行观测的基础上,提出了采场上覆岩层的砌体梁结构力学模型^[17-23],明确了工作面开采以后上覆岩层破断的结构形态,为采场给出了具体的上部边界条件,同时砌体梁结构形态与平衡条件为论证各项采场矿山压力控制参数奠定了基础。20 世纪 90 年代,钱鸣高院士提出了关键层理论、基本顶及关键层的断裂规律^[24-28],进一步研究了上覆岩层中的厚硬岩层所承受的载荷及其变形规律。同时还提出了“S-R”稳定性原理,确定了砌体梁关键块 B 的滑落与转动变形失稳条件^[29-31]。宋振骐院士提出了传递岩梁力学模型^[32-33],由于断裂岩块之间的相互咬合,始终能向煤壁前方及采空区矸石上传递作用力;支架承担岩梁作用力的大小,由对其运动的控制作用决定;基本顶岩梁给支架的力,一般取决于支架对岩梁运动的抵抗程度,可能存在给定变形和限定变形两种工作方式。这些学说对我国煤矿采场矿压理论的研究和指导生产实践起到了重要作用。

沿空巷道上覆岩层破断特征与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结构特征及活动规律紧密相关,但又有自身的特点和规律^[34]。针对沿空巷道围岩结构和维护特点,国内外对沿空巷道上覆岩层稳定状态、沿工作面倾斜方向上覆岩层的活动规律也开展了大量的研究。陆士良^[6,35-36]提出沿空留巷顶板下沉量取决于裂隙带岩层取得平衡之前的急剧沉降,沿空留巷的顶板下沉量属给定变形,与采厚呈正比关系,一般为采厚的 10%~20%。朱德仁^[37]提出长壁工作面端头顶板形成三角形悬板的观点,开始认识到沿空留巷的矿压显现规律与采场基本顶的关系较为密切。刘长友、马其华等^[38-41]通过对工作面及其巷道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;侧向煤体压力峰值点与采放比有关,且随采放比增大峰值点远离,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 b 与侧向支承压力峰值点深入煤体的距离 x 有关,一般认为 b 小于 x 的一半是比较合理的,此时对巷道稳定有利。漆泰岳等^[42-44]对不同围岩条件下基本顶断裂引起的整体浇注充填的支护强度和变形能力进行了深入的研究,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,并对沿空留巷的整体浇注充填体的适应性进行了分析。何廷峻^[45]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,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及时间,为确定滞后加固沿空巷道的时间和长度提供了理论依据。孙恒虎等^[11]通过相似材料立体模拟实验研究揭示了沿空留巷围岩活动的前期和后期规律,提出了支护前期作用对控制顶板下沉的效果是显著的,前期支护应以顶为主,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、顶兼顾的原则,设计支护最大变形以后期为主。李化敏^[46]认为沿空留巷的巷道顶板运动按时间可划分为前期活动、过渡期活动和后期活动三个时期。前期活动留巷顶板由于直接顶垮落及基本顶下沉的带动,其变形形式主要以回转变形为主;过渡期活动留巷顶板变形仍以回转变形为主,但变形速度快,变形量大(一般占巷道总回转变形的60%~70%);后期活动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。巷内支架只需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,巷内支架和巷旁支护也不能约束顶板岩层后期活动而引起的平行下沉,支护阻力的大小对后期活动顶板的平行下沉没有影响。王卫军等^[47]根据砌体梁理论,基本顶以给定变形方式作用于综放沿空巷道围岩,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。

鉴于围岩力学性质和应力环境,沿空巷道是一类特殊的回采巷道。因上区段工作面回采,采空区上覆岩层垮落,基本顶初次来压形成“O-X”破断,周期来压即基本顶周期破断后岩块沿工作面走向方向形成砌体梁结构,在工作面端头破断形成弧形三角块^[37]。弧形三角块断裂回转下沉,其破断位置、运动状态及稳定性直接影响下方窄煤柱或充填体的应力和变形。理论研究和工程实践都表明受下区段工作面回采超前支承压力作用,弧形三角块结构的稳定性及运动状态发生了较大的改变,并通过直接顶作用于沿空巷道,弧形三角块结构的稳定性及运动状态对沿空巷道的稳定性有重要影响;因此,基本顶破断后形成的砌体梁结构构成了沿空巷道上部力学边界。侯朝炯、李学华^[48-49]针对综放沿空掘巷围岩的特点,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形三角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;把巷道周围锚杆组合支护以及锚杆与围岩组成的锚固体作为小结构,认为小结构的稳定性取决于大结构的稳定性,同时还与窄煤柱的稳定性、锚杆支护对围岩强度的强化程度有关,阐述了提高锚杆预紧力和支护强度对保持围岩小结构稳定性的重要意义。柏建彪^[50]通过建立沿空掘巷基本顶弧形三角块结构的力学模型,分别对弧形三角块在掘巷前、掘巷后以及受采动影响时的结构稳定性进行力学分析,揭示基本顶弧形三角块结构稳定性原理及其对沿空掘巷的影响。

1.2.2 沿空留巷巷旁支护阻力研究现状

1.2.2.1 国外巷旁支护阻力

英国 A. N. Wilson、B. N. Whittaker 等^[51-53]利用岩体结构静力关系提出了分离岩块力学模型。英国 B. G. D. Smart 等^[54]提出了顶板倾斜力学模型,核心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,阐述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。苏联学者 B. 胡托尔诺依将采场矿压悬臂模型推广到沿空留巷的研究中,得到了计算巷旁支护切顶工作阻力计算公式^[55]。

1.2.2.2 国内巷旁支护阻力

吴健等^[56]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活动和稳定过程决定的观点,并讨论了沿空留巷力学模型、巷旁支护载荷的计算及支架可缩量的设计。陈名强^[57]认为巷旁支护阻力应能承受巷道上方相当于采厚 4 倍的直接顶岩石重量、由于支撑点和上覆岩层载荷重心不一致引起的附加载荷、上覆岩层破断时的动压载荷、由工作面上下端头顶板形成的“弧形三角板”结构的重量及其破断前移时的载荷。周华强等^[58]通过相似材料模拟实验研究,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,充填体通过改变顶板弯矩分布,实现充填体侧切落位顶板。并认为巷旁充填体必需的切顶阻力应根据最难切落的那层岩层的切顶需要来确定。孙恒虎^[11]根据长壁工作面采空区顶板垮落特征,将沿空留巷顶板简化为连续的或等效连续的叠层板模型,并应用塑性力学塑性极限分析法及块体力学平衡法,对沿空留巷顶板破断特征及其控制机理以及沿空留巷支护参数进行了详细的研究,得出了主动垮落和被动垮落时的巷旁支护切顶阻力的计算方法以及巷旁支护后期阻力的计算方法。郭育光等^[59]在运用高水灰渣巷旁充填体沿空留巷的现场实践基础上,对高水灰渣巷旁充填体的作用机理进行研究,得到了求解巷旁充填体力学参数的力学模型和计算公式。根据工作面后方下位基本顶的运动的三种状态,即稳定-失稳-再稳定,与之相对应,巷旁充填体的作用可分为三个阶段,分别确定三个阶段中巷旁充填体的主要参数,即巷旁充填体初期支护阻力、切顶阻力和后期支护阻力。涂敏^[60]运用 Winkle 弹性地基理论,把沿空留巷巷道上顶板看作弹性薄板条,建立了顶板运动力学模型导出顶板的挠曲运动方程,分析了顶板内应力的分布特征,提出了计算巷旁支护阻力的新方法。柏建彪等^[61]提出膏体材料巷旁充填沿空留巷新技术,分析沿空留巷顶板破断垮落特征,建立了膏体材料巷旁充填沿空留巷的力学模型,提出了膏体材料巷旁支护体主要参数的确定方法。

张东升等^[62-63]采用相似材料模拟和计算机数值计算方法,对沿空留巷基本顶断裂位置与形状、不同支护方式对顶板活动规律的影响、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强度的基本要求。张东升提出综放原位沿空留巷技术^[62,63-65],在综放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,建立综放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。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。

直接顶厚度对沿空巷道矿压显现、充填体支护阻力有重要影响。阚甲广博士^[66]把直接顶条件分为3类:厚层直接顶、薄层直接顶和无直接顶,利用块体力学平衡法计算了3类顶板条件下充填体支护阻力。认为巷帮煤体、充填区域顶板承载结构性能的提高有助于降低巷旁充填体支护阻力,随着直接顶厚度的减小,充填体支护阻力反而增大。

1.2.3 沿空巷道围岩协调变形理论

张东升教授提出了沿空巷道上覆基本顶的断裂与回转下沉是不可抗拒的,其变形量需由直接顶、顶煤、窄帮及底板共同承担,窄帮要适应“给定变形”的特点,既要有一定的强度,又要有一定的抗变形能力^[67]。根据沿空巷道的围岩结构模型,推导出满足巷道稳定所需的充填材料的关键参数^[68]。影响沿空巷道稳定的因素很多,张东升教授系统地分析了煤层硬度、采高、直接顶厚度及硬度、基本顶硬度及关键层复合效应等因素对沿空巷道稳定性的影响^[69-72]。

可见,由顶板、底板、实体煤帮及窄帮构成的沿空巷道须协调变形,与顶煤、直接顶共同承担基本顶的“给定变形”,要避免沿空巷道因局部变形量过大造成应力集中导致围岩性能进一步劣化情况的发生。

1.2.4 煤矿开采围岩流变研究现状

材料流变现象是客观存在的,但引起人们的关注则是在19世纪30年代,直到1929年,流变学才形成独立学科,流变学发展的春天从此开始,并在近90年中取得了长足进展,衍生了许多新分支和应用领域。在此过程中,W. Weber、W. Thomson、J. C. Maxwell、L. Boltzmann、E. C. Bingham等功不可没^[73-77]。我国流变力学虽然发展较晚,但随着我国重大基础设施建设,如在建或拟建水电工程达30多项、矿山开采向深部延伸、能源地下储备、核废料的深地质处理等重大项目的开展,促进了流变力学的发展,取得了丰硕的成果^[78-129]。

1.2.4.1 试验研究及理论研究

流变试验方法涉及室内岩石材料的弯曲试验、扭转试验、单轴压缩试验、三轴压缩试验、剪切蠕变试验、室内岩体结构面剪切试验、现场岩体压缩试验、岩体及结构面剪切蠕变特性试验等。加载方式上有单级加载蠕变、分级加载蠕变、分级加卸载蠕变试验等。对于岩石的类别上有砂岩、泥岩、页岩、煤岩、大理石、花岗岩等,既有软岩、中硬岩,也有高强度硬岩。基于流变试验对本构关系的表述方式上,既有对数和指数函数描述的形式,也有用幂函数定律描述实验结果的表述方式。岩体流变试验与理论的研究使人们从中找到了比较普遍的规律,并由实验证明,对于许多岩石的实验室实验,用不同形式的介质模型可以给出合理有效的表述。因此,通过基本元件的不同串并联组合模型建立本构方程,形成较完善的理论体系,并应用于实际问题的分析^[78]。

许多研究者开展了大量的试验与理论研究,取得了丰富的研究成果^[79-106]。1939年D. T. Griggs^[79]对砂岩、泥岩等进行的系列蠕变试验,从中获得了砂岩类岩石在载荷达到破坏载荷的12.5%~80%时将发生蠕变变形的观点,而且蠕变本构关系可采用对数型经验公式来表述,同时还证明孔隙水压力对某些材料的蠕变有非常显著的效应。E. Maranini等^[80]对一种叫莱切石(Pietra Leccese)的石灰岩进行了单轴、三轴压缩蠕变试验,表明蠕变的机理

主要为低围压下裂隙扩展和高应力下孔隙塌陷。H. Ito 等^[81-82]先后对 6 根花岗岩、3 根辉长岩试样进行了历时几十年的弯曲蠕变试验,这是迄今为止世界上持续时间最长的岩石蠕变试验。

陈宗基院士^[83]是中国开展流变学研究的先驱,在岩土、岩体流变学领域做了许多创造性工作。1961 年,他将岩体流变理论推广到各项异性岩体;1966 年,通过对节理岩体的试验,研究了节理岩体的流变变形及现场流变性的测定;1979 年,对岩石蠕变、扩容及本构方程进行研究,建立和发展了岩石流变扩容理论等。

李永盛等^[84-85]采用伺服刚性机对粉砂岩、大理岩、红砂岩和泥岩四种不同岩性的岩石进行了单轴压缩条件下的蠕变和松弛试验,指出在一定的常应力作用下,岩石材料一般都出现蠕变速率减小、稳定、增大三个阶段,各阶段的时间与所观测的岩石性质和所施加的应力水平有关。张向东等^[86]采用自制的重力杠杆式岩石蠕变试验机,对泥岩进行了三轴蠕变试验,指出软弱岩石的三轴蠕变呈非线性关系,其蠕变变形量为瞬时变形量的 3 倍以上。金丰年^[87]利用伺服控制刚性试验机,采用应力反馈控制方法获得了多种岩石单轴拉伸试验的完全应力-应变曲线,通过对岩石单轴拉伸、单轴压缩及其荷载速度效应和蠕变试验的研究,首次提出了岩石受拉和受压力学特征具有相似性的理论观点。

徐平等^[88-90]对三峡花岗岩进行了单轴蠕变试验,给出了三峡花岗岩的蠕变经验公式,认为三峡花岗岩存在一个应力门槛值 σ_s 。当应力水平低于 σ_s 时,采用广义 Kelvin 模型来描述三峡花岗岩的蠕变特性;当应力水平高于 σ_s 时,采用西原模型来描述,并给出了相应的蠕变参数。孙(Sun J.)、胡(Hu Y. Y.)^[91]对三峡花岗岩进行的劈裂拉伸蠕变试验,表明蠕变拉伸强度与加载速率有关,文中还研究了水对拉伸蠕变特性的影响。

山下秀等^[92]介绍了蠕变试验及疲劳试验与岩石破坏过程和普通的单轴压缩破坏之间的相关性,及岩石的蠕变极限和疲劳极限的研究结果。李建林^[93]通过试验指出,当拉伸应力为岩石抗拉强度的 30% 时,流变变形可持续 6 个月以上。

许宏发^[94]根据软岩的单轴压缩蠕变试验,讨论了软岩强度和弹性模量的时间效应问题。软岩的强度和弹性模量均为时间的函数,它们的变化规律具有相似性,都随时间的延长而降低。最后,分析了岩石损伤的时间效应,提出了长期弹性模量和长期损伤变量的概念。孙钧^[95]以多个岩石流变试验为基础,研究了黏滞系数随加载应力和加载持续时间的变化规律。

陈有亮等^[96]在传统断裂力学基础上,引进时效特性,提出了判断岩石起裂的流变断裂准则以及裂纹时效扩展机理,分析了裂尖微裂区对断裂韧度的影响,并将非等距灰色理论用于岩石蠕变断裂时间预测。陈有亮等^[97]采用三点弯曲试验方法对层状岩石的流变断裂特性进行了试验研究与理论分析,得到了岩石流变断裂准则。陈有亮^[98]以一类红砂岩为例对蠕变条件下岩石裂纹起裂和扩展的机理、准则进行了试验研究和理论分析,指出蠕变断裂韧度是岩石工程设计和计算的重要参数。

邓广哲等^[99-100]通过试验得到了裂隙岩体强度弱化与裂隙扩展之间的基本关系,主裂纹的产生与时效扩展是间断裂隙岩体蠕变的内在机制,裂隙扩展和裂隙岩体蠕变都具有阶段阈值。

张晓春等^[101]综述了岩石裂纹演化及其力学特性研究的近期进展,内容包括微细观裂纹演化及其力学特性、时间相关性、裂纹扩展与岩石破坏,指出深部矿井由于岩石特性的软

化,岩石流变损伤断裂的研究将是极为重要的领域。张晓春等^[102]采用岩石板裂梁的纵向受压的力学模型,考虑深部岩石的流变性,分析了板梁稳定性的时间分叉特性,指出板梁失稳与岩体的流变性质密切相关,在一定载荷下,经历一段时间后会发生延迟失稳,并给出了时间分叉点的计算式。

曹树刚等^[103]使用 INSTRON-1346 型电液伺服刚性试验机,采用陈氏加载法,做了软岩的单轴和三轴蠕变试验。利用非牛顿体黏性元件构成五元件的改进西原正夫模型,探讨了与时间有关的软岩一维和三维的本构方程和蠕变方程,全面反映了软岩真实的三阶段蠕变实验规律。通过非线性的麦夸脱法求得的软岩流变力学参数形成的理论结果与软岩的实验结果的对比分析,验证了理论结果的正确性。

万志军等^[104]基于大量的岩块流变试验,从岩石长期强度的衰减特征和岩石的应变能守恒原则出发,建立了非弹塑黏性元件组合模型的软岩(煤)非线性流变数学力学模型。在此基础上,进一步建立了软岩(煤层)巷道围岩非线性流变数学力学模型,并采用实验室三轴巷道围岩流变试验对该模型的有效性进行了验证。

黄先伍等^[105]基于 Burgers 流变本构模型,对岩层的中性层位置和相对蠕变函数随时间的变化特征进行了系统研究。岩层弯曲中性层和曲率的初始状态取决于岩石材料的弹性参数,而最终状态取决于它的黏性参数;蠕变前期,岩层弹性、黏性参数对中性层位置和变形曲率都有较大影响,但随着时间增加这种影响迅速减弱;若岩石的抗拉、抗压、黏性性质相同,则中性层最终趋于几何中面,否则趋于某一确定位置;由于蠕变的作用,岩层曲率随时间不断增大,直至岩层发生破断;对于稳定蠕变情况,岩层弯曲中性层要偏离初始状态,但经过一定时间后又将回到初始状态,而岩层的变形曲率则随时间单调增加,但最终趋于某一定值。

崔希海^[106]研究高应力状态下岩石表现出的力学特性,提出了岩石流变扰动效应研究课题。课题组进行了“岩石流变扰动效应试验系统”的研制,设计制造了岩石流变扰动效应试验系统,进行了岩石流变扰动效应试验系统的刚度和精度分析。建立了岩石单轴压缩蠕变扰动效应的本构方程。开展了围压对岩石蠕变破坏强度、蠕变起始应力、蠕变黏滞系数等蠕变参数影响的研究,得出了围压对岩石蠕变参数影响的规律。开展了应变软化岩石的单轴压缩变形规律、低围压条件下的压缩变形规律以及低围压条件下的压缩变形扰动效应等的试验研究,得出了有关应变软化岩石单轴压缩变形规律、低围压条件下的压缩变形规律及低围压条件下的压缩变形扰动效应规律。

1.2.4.2 流变数值模拟研究

对于较简单的岩体黏弹性和黏塑性流变问题,可寻找解析解,而大多数岩体流变问题则需要采用数值模拟方法来开展分析和研究,以便真实地模拟在流变过程中受多因素影响的岩体的力学行为。目前许多大型专业有限元分析软件如 FLAC、MSC、ABAQUS 等都具有蠕变专用计算模块。孙钧院士等^[107]试用凯尔文(Kelvin)体和宾哈姆(Bingham)体相串联的黏性流变模型描述深层隧洞围岩按匀质、各向同性连续介质分析时的瞬时与蠕变变形,并编制了平面应变问题的有限元计算程序。该计算模型和电算程序具有处理隧洞围岩的瞬弹性、黏弹性、黏塑性等性态的多种功能,主要适用于研究如盐岩、页岩、泥灰岩等较软弱岩层的黏性机理。王芝银等^[108]讨论了岩体流变的数值模拟。对复杂地质条件下岩石工程及巷、硐围岩稳定性分析,编制完成了功能较强、具有实用性的有限元法分析程序。该程序适用于黏-弹-塑性岩体并能利用现场测据进行反算分析。给出了计算实例理论解与数值解的

比较,结合某地下工程进行的计算分析与某工程现场量测结果基本一致。张玉军等^[109]建立了一种正交各向异性岩体的黏弹-黏塑性模型,推导和描述了相应的数值计算表达式和有限元分析的步骤,并使用所编制的三维有限元程序,以在层状岩体(横观各向同性介质)中的地下硐室开挖为算例,考察了围岩的流变动态。陈卫忠等^[110-111]采用弹塑性蠕变模型运用 FLAC 程序预测某大型水电站地下厂房正常运行期的围岩变形规律;通过对 ABAQUS 有限元的二次开发,对某废弃盐岩溶腔的储气库围岩和岩柱的蠕变变形规律及腔顶蠕变损伤区的范围进行数值模拟。褚卫江等^[112]依据 FLAC^{3D}所提供的二次开发程序接口,结合西原黏弹塑性流变模型分析了二次开发程序运行的基本原理,给出了西原流变模型具体实施的程序框图和代码编写中应该注意的几个关键技术。王芝银等^[113]为了探讨龙游石窟 5 号硐顶板破坏过程,了解硐室的长期稳定性,基于最大拉应力追踪法和岩石断裂过程的反演数值模型,利用现场实测破坏形态及变形数据,对 5 号硐进行了流变断裂过程的数值模拟与反演分析。

1.2.4.3 充填体流变研究

王卫军等^[114]、柏建彪等^[115]和李学华^[116]对巷道两帮及顶煤的弹性变形进行了分析,但这些研究仍缺少综放沿空留巷的充填体受力与变形的时间相关性分析。张东升等^[117-122]采用相似材料模拟、现场试验和数值分析等方法,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相关的巷旁充填技术参数进行了研究,并对不同宽度、不同水灰比充填体的特性进行了分析。张东升^[62,122]早已提出充填体蠕变特性研究的重要性,根据综放沿空留巷的充填体受力特性,建立了充填体的黏弹塑性力学分析模型,运用全量理论的变分原理研究了充填体的位移、应力分布特征及其随时间变化的规律,初步得到了充填体内的位移场、应力场分布规律,为综放沿空留巷的充填体稳定性及控制技术的研究提供了理论依据。

充填体是沿空留巷围岩结构中的一个重要组成部分,其长期稳定特性直接影响巷道整体的稳定性。事实上,由于充填体两侧均存在破碎区,且长期受压,充填体在工作中将产生很大的塑性变形,且这种塑性变形将随时间的增长而不断增大。这主要是由于由充填体在井下环境中其物理力学性能不断弱化,损伤不断增加,表现为流变特性,因此,充分理解充填体在工作期间其强度、刚度和稳定性如何随时间变化将是沿空留巷充填体设计与支护的关键。岩石流变特性与岩石工程稳定性的时效研究,在岩土力学界已进行了相当长的时间,研究成果也相当丰富^[123-124]。对不同岩石的蠕变特性、流变模型、流变参数确定、流变分析方法等都已有了较完善的研究方法,不少研究成果也已成功应用到大量的岩土工程中^[103,125-128]。而充填体的流变研究成果较少,只是从理论分析^[123]、巷道围岩控制^[129]等角度进行了实验研究,这些初步研究成果还不足以指导工程设计。

1.2.5 沿空留巷工程实践研究现状

世界一些主要产煤国家为了提高矿井回收率,降低巷道掘进率,缓解采掘紧张关系,降低成本,提高经济效益和实现矿井集约化生产,而采用往复式“Z”形开采,前进式和后退式的工作面沿空留巷方法已实现无煤柱开采。巷旁支护技术是沿空留巷技术的关键,他们对沿空留巷的矿压显现规律、适用条件、支护形式、支护阻力、支护材料及巷旁充填工艺等进行大量研究。

1.2.5.1 国外沿空留巷工程实践概况

苏联为沿空留巷设计的支架进行了理论分析、实验研究及工业性试验^[130-132]。德国的巷旁支护多采用木垛、矸石带等。20 世纪 60 年代末,德国成功研发了采用硬石膏、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,该项技术得到广泛应用,并在深井煤层开采中也成功应用于沿空留巷技术。英国巷旁支护多采用矸石带,并实现了矸石带机械化砌筑装置;同时,在提高矸石带强度方面也进行了大量研究,且成功研究出不同胶结物的胶结矸石带;并于 1979 年成功试验了高水材料巷旁充填技术,迄今仍居领先地位。波兰在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^[133]。

1.2.5.2 国内沿空留巷工程实践概况

我国沿空留巷技术发展始于 20 世纪 50 年代,首先在双鸭山、淄博、鸡西、峰峰、本溪、枣庄、徐州等矿区的薄煤层开采中使用矸石带、木密集支柱等代替煤柱作为巷旁支护用^[122]。

20 世纪 60~70 年代,在淮南、淮北、双鸭山、阳泉、兖州、新汶等矿区的中厚煤层开始采用木垛、混凝土砌块和密集金属支柱作为巷旁支护。但这些巷旁支护存在支护阻力不够、可缩性能不匹配、机械化程度低、劳动强度大和采空区密封性能差等缺点,限制了沿空留巷的使用范围^[122]。

20 世纪 80 年代初,我国煤矿大力推行综合机械化开采后,随着采高增大、工作面推进速度加快,原煤炭工业部为了改变我国在沿空留巷技术方面的落后局面,先后从英国、德国引进了充填材料和充填设备,并在阳泉、开滦、平顶山等矿区进行了工业性试验,取得了较好的效果。同时又组织高等院校、科研单位和生产单位共同进行充填材料和充填设备攻关。

经过 10 多年的研究和试验,到 20 世纪 90 年代初,我国充填材料和充填设备已实现了国产化,我国高水材料巷旁支护技术整体已达到国际先进水平。中国矿业大学于 20 世纪 80 年代末、90 年代初成功研制了 ZKD 高水速凝材料及高水灰渣充填材料,于 1991 年通过煤炭部验收,并由石家庄水泥制品厂工业化生产,各项技术指标达到或超过国际先进水平。此后,以高水材料泵送巷旁充填技术在淮南、淮北、潞安、徐州、阳泉、新汶等矿区得到了广泛的应用^[62,134-139]。

21 世纪初,煤矿瓦斯治理国家工程研究中心自主研发的 CHCT 系列充填材料^[12],由水泥、粉煤灰、石子、砂、水和复合外加剂组成,可实现远距离泵送,1 d,2 d,3 d,7 d,28 d 抗压强度分别可达 5 MPa,10 MPa,12 MPa,15 MPa,28 MPa;具有良好的压缩变形性能,压缩率 5%~10%,残余强度可达极限抗压强度的 35%~60%。以 CHCT 系列充填材料泵送巷旁充填技术在淮南、淮北、铁法、徐州、阳泉、双鸭山等矿区得到了广泛的应用。

利用高水速凝充填材料^[11,140]、超高水充填材料^[13]、CHCT 系列充填材料^[12]在巷旁实现机械化构筑护巷充填带的技术,代表了目前沿空留巷技术的世界水平。

1.2.6 存在问题

综上所述,上述研究取得了丰硕的成果,但作者认为目前研究还存在以下不足:

(1) 窄帮稳定性研究主要侧重于巷内围岩控制技术 & 小结构的稳定性控制技术,没有考虑基本顶的断裂结构形式对窄帮稳定性的影响;同时窄帮位于采空区边界,没有考虑第一次采动影响时基本顶断裂回转产生的动载效应对窄帮稳定性的影响。

(2) 窄帮在服务期间以蠕变变形为主,目前窄帮蠕变研究主要侧重于窄煤柱煤岩试件的蠕变分析,以此反映窄煤柱的蠕变特性,没有将窄煤柱的蠕变特性与基本顶的断裂结构特征联系起来,即没有考虑基本顶的断裂结构形式对窄煤柱蠕变特性的影响。

(3) 没有对沿空留巷和沿空掘巷的大尺寸人造帮蠕变特性、锚栓(锚杆、锚筋)强化人造帮蠕变特性、不同构筑方式人造帮蠕变特性进行研究。

(4) 常用的蠕变模型和强度破坏准则,何种蠕变模型最适合人造帮的蠕变分析,以及何种强度破坏准则最适合人造帮的强度破坏分析,至今仍没有成熟的研究成果。

本书将在上述方面有所突破,建立基于基本顶断裂结构形式下的窄帮围岩结构力学模型,推导基本顶断裂结构形式下的窄帮静载荷的计算公式,分析基本顶断裂结构形式、基本顶断裂回转下沉产生的动载效应对窄帮稳定性的影响。分析窄帮蠕变特性和破坏特征,确定窄帮蠕变模型和强度破坏准则。自行研制大尺寸蠕变实验系统,对沿空留巷和沿空掘巷的大尺寸人造帮、人造帮强化技术、人造帮构筑方式进行蠕变特性研究。分析窄帮的应力、应变与时间的关系。基于蠕变特性、尺寸效应合理确定窄帮强度和高宽比,提出窄帮强化技术。提高窄帮整体的承载性能和稳定性,确保窄帮在预期服务年限内不发生蠕变失稳。

1.3 主要研究内容与方法

1.3.1 研究内容

窄帮服务年限一般为1~2 a,窄帮在整个服务期间主要经历三个阶段的影响:

第一个阶段,受上区段工作面采动的影响,持续的时间相对较短,一般为15~30 d。随着上区段工作面的推进,直接顶随之发生不规则或规则的垮落下沉,导致与上位基本顶发生离层,基本顶在直接顶垮落后,发生断裂回转下沉。窄帮在基本顶的下方或附近,基本顶断裂回转下沉对窄帮产生动载效应,如果窄帮的初撑力不足,易引起窄帮变形量大,容易导致窄帮失稳。

第二个阶段,在上区段工作面回采结束围岩稳定后至下区段工作面采动影响之前,这个阶段持续时间很长,一般为1~2 a。上区段工作面回采结束围岩稳定后,关键岩块A、岩块B、岩块C的铰接结构一般情况不会发生改变,窄帮的支护阻力基本处于恒定状态,但是窄帮在恒定的载荷下发生蠕变变形,如果窄帮蠕变变形速度较快,窄帮因变形量大而导致失稳。

第三个阶段,受下区段工作面采动影响,持续的时间较短,一般为3~5 d。下区段工作面回采时,窄帮再次受到采动的影响。因受到超前支撑压力的作用,窄帮的变形量逐渐增大,窄帮因变形量大而导致失稳。一般情况下,只要窄帮在第一、二阶段时维护较好,下区段工作面回采时,窄帮在工作面超前加强支护的保护下基本能够满足工作面回采要求。

因此,窄帮的稳定性是沿空巷道围岩控制技术的关键,本书围绕窄帮蠕变特性及其稳定性控制技术展开系统的研究。根据窄帮各阶段受力特点,确定主要研究内容如下:

(1) 为分析基本顶断裂结构形式(即基本顶断裂线的位置)对窄帮稳定性的影响,提出沿空巷道基本顶四种断裂结构形式,建立相应的窄帮稳定性分析的结构力学模型。分析四种基本顶断裂结构形式下,基本顶断裂回转下沉作用在窄帮上的载荷规律,分析基本顶四种