

国家自然科学基金项目 (50374065) 资助
国家自然科学基金青年科学基金项目 (50904063) 资助
教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-05-0480) 资助

综放(采)大断面 原位沿空留巷技术

张东升 马立强 茅献彪 著

ZONGFANG (CAI) DADUANMIAN YUANWEI YANKONG LIUJANG JISHU



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金项目(50374065)资助

国家自然科学基金青年科学基金项目(50904063)资助

教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-05-0480)资助

综放(采)大断面原位沿空留巷技术

张东升 马立强 茅献彪 著

中国矿业大学出版社

内 容 摘 要

本书是研究综放(采)工作面沿空留巷机理及技术方面的专著。我国厚煤层储量丰富,且有些煤层生产技术条件非常适合综放开采,基于综放(采)沿空留巷技术的Y形通风方式及其对应的留巷瓦斯抽放技术,是有效治理工作面瓦斯积聚与超限的重要技术之一。作者针对综放(采)沿空留巷的特点和难点,提出巷内充填大断面原位沿空留巷新技术,建立了综合考虑充填体、煤帮及顶煤变形协调的综放(采)沿空留巷围岩结构力学模型,可以定量计算充填体稳定所需的强度和变形量、顶煤的应力分布及变形特征;对影响围岩稳定的各种因素进行了多元分析和敏感度分析;分析了充填体稳定的时间效应及上区段采空区底鼓对充填体稳定的影响;并在潞安矿区常村煤矿进行了工业试验。研究成果不仅可应用于厚煤层综放(采)工作面,也可应用于中厚煤层工作面;不仅适用于高瓦斯煤层工作面,也适用于低瓦斯高产高效工作面;还可为沿空掘巷和工作面端头稳定性控制提供借鉴。

本书可作为从事采矿工程、矿山安全及岩石力学与工程等专业的科技工作者、研究生和高年级本科生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

综放(采)大断面原位沿空留巷技术/张东升,马立强,茅献彪著. —徐州:中国矿业大学出版社,2009.11
ISBN 978 - 7 - 5646 - 0524 - 7

I. 综… II. ①张…②马…③茅… III. 厚煤层—巷道支护 IV. TD353

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第201798号

书 名 综放(采)大断面原位沿空留巷技术

著 者 张东升 马立强 茅献彪

策划编辑 张怡菲

执行编辑 刘红岗

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市解放南路 邮政编码 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 徐州中矿大印发科技有限公司排版中心

印 刷 江苏淮阴新华印刷厂

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 11 字数 300千字

版次/印次 2009年11月第1版 2009年11月第1次印刷

定 价 42.00元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

近年来,采用 Y 形通风方式解决工作面瓦斯积聚与超限问题,从而推动了沿空留巷技术的发展,充填材料、充填工艺与装备的研发进展较快,达到了预期的工业性试验效果。加之该项技术固有的无煤柱开采的技术优势,必将使我国沿空留巷技术迎来新的发展机遇。

该书内容主要基于国家重点技术创新项目“综放面大断面沿空留巷治理瓦斯技术”和国家自然科学基金面上项目“综放沿空留巷围岩控制机理”(50374065)的研究成果,融合了相关内容的研究生学位论文(马立强、董国伟及卢文厅等)及长期推广该项技术的累积经验。本书的完成得到了本课题组成员和现场技术人员的大力支持,尤其是得到了中国矿业大学缪协兴教授、东南大学张晓春教授和山西潞安矿业集团有限责任公司赵英利高级工程师的指导与帮助,在此作者对他们表示衷心感谢和崇高敬意。

全书共九章,第一章、第九章由张东升撰写;第二章由马立强与茅献彪主写;第三章、第四章、第五章、第八章由张东升与马立强主写;第六章、第七章由茅献彪与张东升主写。

由于作者水平和时间有限,书中难免有错误和不当之处,恳请读者不吝指正。

作 者

2009 年 11 月于徐州

目 录

前言	I
1 绪论	1
1.1 我国沿空留巷技术发展回顾	1
1.2 综放(采)沿空留巷基本顶破断规律及技术难点	3
1.3 大断面原位沿空留巷技术	5
2 综放(采)原位沿空留巷顶板与充填体相互作用机理	7
2.1 综放(采)原位沿空留巷围岩结构力学模型	7
2.2 综放(采)原位沿空留巷顶板变形分析	7
2.3 破碎岩体的碎胀与压实本构关系	11
2.4 充填体与顶板相互作用机理及其控制	16
2.5 综放(采)原位沿空留巷围岩应力分布的三维模拟分析	18
2.6 小结	23
3 综放(采)原位沿空留巷充填体支护阻力计算	24
3.1 充填体支护阻力计算的围岩结构力学模型	24
3.2 充填体支护阻力计算	25
3.3 充填体—围岩共同承载机理分析	26
3.4 小结	27
4 综放原位沿空留巷围岩稳定性影响因素分析	28
4.1 综放原位沿空留巷数值计算模型	28
4.2 围岩不同厚度及硬度对沿空留巷稳定性的影响	30
4.3 留巷稳定性的技术因素分析	46
4.4 复合关键层对留巷围岩整体协调变形的影响	52
4.5 沿空留巷底鼓变形特征分析	56
4.6 多元变形因素分析	57
4.7 小结	58
5 综放(采)原位沿空留巷围岩整体协调变形规律的数值分析	59
5.1 综放原位沿空留巷数值计算模型参数	59

5.2	采高 6 m 时沿空留巷围岩和充填体垂直位移及应力规律	59
5.3	采高 10 m 时沿空留巷围岩和充填体垂直位移及应力规律	67
5.4	原位沿空留巷围岩整体协调变形规律及协调留巷参数	75
5.5	综放(采)原位沿空留巷协调留巷参数的应用	101
5.6	小结	107
6	综放原位沿空留巷顶板锚杆受力变形分析	108
6.1	综放原位沿空留巷顶板角锚杆支护的数值分析	108
6.2	综放沿空巷道顶部锚杆的受力特征	115
6.3	综放沿空巷道顶部锚杆剪切数值计算	116
6.4	小结	120
7	充填体稳定性的流变分析	122
7.1	充填体受力变形与应力的时间相关性分析	122
7.2	不同侧压与不同宽度时充填体蠕变特性分析	125
7.3	综放沿空留巷充填体顶底板的流变分析	128
7.4	流变数值计算	131
7.5	小结	147
8	综放巷内充填沿空留巷工业性试验	148
8.1	综放沿空留巷围岩活动规律的相似材料模拟	148
8.2	综放原位留空留巷关键技术及参数	155
8.3	综放原位留空留巷实施方案	156
8.4	巷内充填工艺	159
8.5	综放原位沿空留巷控制效果	162
8.6	经济效益分析	163
8.7	小结	164
9	主要结论	165
	参考文献	167

1 绪 论

1.1 我国沿空留巷技术发展回顾

我国新疆、内蒙古、陕西、山西、山东等省(自治区)厚煤层煤炭储量极其丰富,且其生产技术条件非常适合采用综放开采技术以获得高产高效。综放开采技术是我国煤矿实现高产高效并具有国际领先水平的一项煤炭开采技术,随着该项技术的大面积推广与应用,因其单产高和瓦斯涌出源多,使得综放工作面瓦斯积聚和超限现象频繁出现,已成为制约工作面高产高效和矿井集中生产的主要因素之一。尤其是在开采高瓦斯含量低透气性难抽放煤层时,工作面瓦斯超限问题日益突出,已严重威胁矿井的安全生产。国外先进采煤国家处理综采工作面瓦斯涌出与积聚的措施,除适当提高工作面回风流中的瓦斯允许浓度外,还采用 Y 形通风方式。Y 形通风方式使回风风流方向与进风风流方向相同,采空区涌出的瓦斯受矿井通风风流的作用只会向回风巷道方向流动,而不会朝着相反方向流向工作面,从根本上消除了工作面上隅角瓦斯的积聚与超限。理论与实践都表明,综采工作面采用 Y 形通风方式是治理工作面瓦斯的有效途径之一,而沿空留巷技术是 Y 形通风方式实施的一个关键。通过沿空留巷,实现在工作面推进过程中维护住一条专用回风巷,并兼作下一区段回采时的轨道平巷^[1-2]。同时,综放(采)沿空留巷技术本身还可大幅度提高煤炭资源回收率、降低回采巷道掘进率、实现往复式开采及缩短工作面搬家时间,其技术优势明显,经济效益显著。

我国沿空留巷的发展始于 20 世纪 50 年代,主要巷旁支护手段采用矸石垛、密集木支柱等,仅限于在薄煤层中应用。到了 70 年代,巷旁支护开始采用混凝土砌块和密集金属支柱,并成功应用于中厚煤层。利用高水充填材料(水灰比大于或等于 1.85,净浆时水体积比 85% 以上)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。国外高水巷旁充填技术是 20 世纪 70 年代末首先在英国发展起来的,迄今仍居领先地位。80 年代初,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,推动我国煤炭工业的发展,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;同时又组织科研单位、高等院校及生产单位一起对充填材料和充填设备进行攻关,经过十多年的研究,到 90 年代初,充填材料和充填设备已实现了国产化。我国高水材料巷旁充填技术整体已达到国际先进水平^[17-20]。我国沿空留巷技术的发展重点是巷旁支护方式或材料,尤其是高水材料泵送巷旁充填技术的开发成功,使得沿空留巷围岩稳定性控制机理的研究集中在充填体上,注重充填体支护与顶板岩层的相互作用关系,并根据不同的现场条件建立了基于“砌体梁”理论的不同沿空留巷力学模型,为充填体合理支护参数的确定和沿空留巷技术的推广作出了较大贡献^[3-7]。在这方面,中国矿业大学、河南理工大学、西安科技大学、太原理工大学、山东科技大学及煤炭科学研究总院等做了大量的基础研究工作^[8-10]。但由于沿空留巷沿工作面倾向要受顶板回转下沉的影响,

沿工作面走向又要受到基本顶周期来压的影响,故仅建立平面力学模型用以指导设计是不全面的,应建立更为科学有效的立体力学模型;且沿空留巷围岩稳定性控制仅考虑巷旁充填体而忽视煤帮和顶板是不完善的,还须保证巷旁支护、巷内支护及煤帮的协调变形,这一点对综放(采)沿空留巷尤为重要。另外,我国沿空留巷巷内支护原本多采用金属支架或木棚支护,属于被动支护,不能适应巷道大变形。随着沿空留巷断面的不断增大,金属支架作为巷内基本支护的弊端更为明显。近年来,随着我国高强锚杆支护技术的推广应用,基于煤巷锚杆支护的沿空留巷技术取得了成功,克服了金属支架支护无初撑力及难适应大变形等缺点,非常有利于顶板的稳定^[11-15]。

就整个巷旁充填沿空留巷技术而言,并没有摆脱传统的技术体系,即原运输平巷或回风平巷按正常设计断面掘进,沿空留巷时,在巷道靠采空区一侧进行充填形成条带,整个充填带在采空区里面,不受原巷内支护的保护,如图 1-1(a)所示。而综放沿空留巷的顶板为煤层,其厚度一般在 3 m 以上,并需经受二次工作面采动影响,其围岩尤其是顶煤,将更加破碎,如实施传统沿空留巷技术,则不仅使巷内顶板难以维护,而且充填体上方顶煤的整体性更难以控制,一旦发生塌漏,使充填体不能将支撑阻力传递给直接顶,必然导致基本顶回转下沉量加大,进而又造成巷道顶板和巷道煤帮更为严重的破坏,综放沿空留巷难以成功。

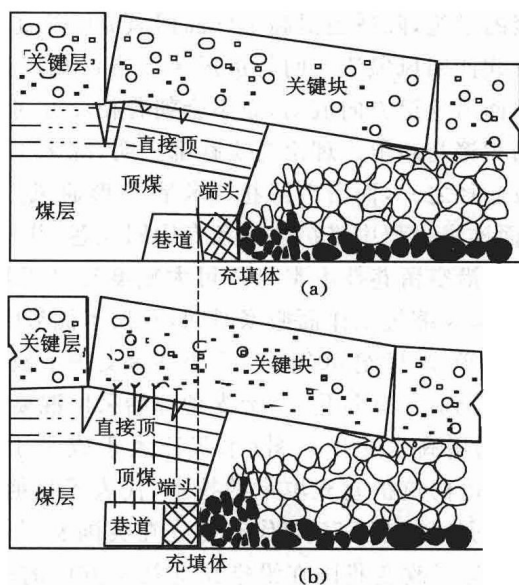


图 1-1 综放(采)沿空留巷巷旁充填与巷内原位充填对比示意图

可见,综放开采技术的特性决定了厚煤层综放沿空留巷不同于薄及中厚煤层工作面沿空留巷,其最突出的特点是采高大、直接顶厚度与采高的比值小,不可避免地引起上覆岩层大范围的剧烈活动。加之充填体上方是破碎松软的顶煤而不是较坚硬的直接顶,使得综放沿空留巷围岩控制的难度较大。只有掌握综放沿空留巷围岩控制机理,才能进行科学的沿空留巷支护设计,建立综放沿空留巷技术的理论基础。我国虽然已基本掌握了薄及中厚煤层工作面沿空留巷的矿压显现规律及充填体作用机理,但对于综放工作面而言,在大断面锚网索联合支护技术的基础上,利用高水材料进行巷内充填而实现大断面沿空留巷的研究在国内外还是空白。

正是由于沿空留巷的基础研究还存在许多不足之处,加之充填材料与充填设备比较昂贵,使得沿空留巷的初期投资较大,因而沿空留巷技术除在资源紧缺或煤质优良的矿区使用外,并没有得到大面积的推广和应用^[21-24]。在当前高水材料充填技术和大断面锚杆支护技术日益完善的基础上,钱鸣高院士与靳钟铭教授等知名学者早就呼吁开发综放沿空留巷技术,以进一步提高综放开采技术的资源回收率^[25]。潞安矿业集团常村煤矿为解决高瓦斯含量低透气性难抽放煤层综放工作面瓦斯积聚超限及单产低的难题,首次在我国开发综放沿空留巷技术,以推广应用 Y 形通风方式。本书作者及其课题组在国家重点技术创新项目的资助下,开展了“综放大断面沿空留巷治理瓦斯技术”的研究工作,取得了一些初步成果^[26-29]。其核心内容就是开发出的综放原位沿空留巷技术。为实施新的技术方案,对巷内基本支护为梯形棚架的原有巷道,应分三步进行:第一步,对原巷采用锚梁网索联合支护实施加固,撤掉梯形棚架;第二步,在已加固巷道下一工作面侧煤壁,实施扩帮锚网支护;第三步,在原巷位置实施巷内充填。井下工业性试验达到了预期效果,充填体高度为 3.2 m,宽度为 2.5 m,留巷断面稳定后超过 10 m²。但从推广应用的角度看,我们对综放沿空留巷稳定性控制机理并没有完全弄清,主要表现在两个方面:一是所建立的沿空留巷围岩结构力学模型没有体现顶煤、煤帮与充填体三者的变形协调关系;二是没有充分考虑顶煤及煤帮的应力分布与变形特征,大变形巷道锚杆仍然对称布置,这也正是本书需重点论述的问题。

此外,采用锚杆(索)联合支护技术来控制全煤巷道围岩大变形已成为共识^[35-37],我国煤巷锚杆支护技术自被列为煤炭工业“九五”重点科技攻关项目之后,已取得了快速提升和发展^[38-39],自行成功研制了锚杆钻机等机具和适合国情的高强度、超高强度锚杆及高黏结力树脂药卷。我国的高强度锚杆支护技术已达到国际先进水平。随着锚杆技术的大面积推广,对锚杆和锚索的作用机理的理论研究也在不断深化^[40-44],根据综放沿空留巷围岩的受力和变形特点,分析锚杆(索)的作用机理,并进行合理的支护设计,也将成为一个重要的研究和发展方向。

1.2 综放(采)沿空留巷基本顶破断规律及技术难点

1.2.1 基本顶破断规律

正确认识综放沿空留巷顶板破断规律,是建立合理围岩结构力学模型的前提。沿空留巷位于上一个采场的采空区边缘,其受力变形与支护稳定性必然受采空区上覆岩层破断块体结构运动的影响。在我国沿空留巷技术不断发展和完善的同时,采场岩层控制理论也有了长足的进展^[30-32]。最近,中国矿业大学钱鸣高院士和缪协兴教授在采场基本顶“砌体梁”理论的基础上,提出了采动覆岩的关键层理论^[33-34]。传统上以“梁”理论为基础建立的沿空留巷力学模型,仅考虑覆岩中某一坚硬岩层(基本顶)的影响,而不考虑主、亚关键层或复合关键层或关键层复合效应的影响,显然过于简化。因此,将关键层理论应用于巷道围岩控制,建立综放沿空留巷围岩结构力学模型,分析清楚顶煤及煤帮的应力分布和变形特征及充填体与顶板(含顶煤)的变形协调关系,并由此提出沿空留巷围岩稳定性控制原则与措施,是本书重点论述的内容之一。

板的塑性极限分析、板破断的相似材料模拟试验以及现场观测均已证明:长壁工作面自

开切眼向前推进一段距离时,首先在暴露基本顶的中央及两个长边形成平行的断裂线 I_1 、 I_2 ,再在短边形成断裂线 II ,并与断裂线 I_1 、 I_2 贯通,最后基本顶岩层沿断裂线 I 和 II 回转而形成分块断裂线 III ,形成结构块 1、2。基本顶在采空区中部接触矸石后,运动较平缓。基本顶初次破断后的平面图形近似呈椭圆状,如图 1-2(a)所示。

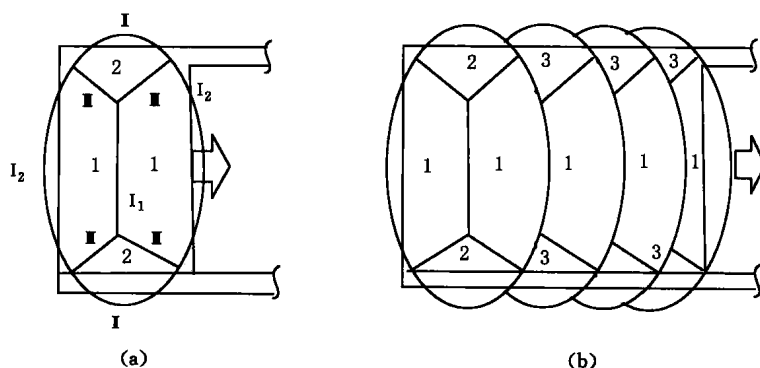


图 1-2 基本顶破断的基本形态

随着工作面继续推进,顶板出现周期性垮落,依次出现断裂线 I_2 ,并绕周边断裂线 II 回转形成周期性顶板垮落。又形成新的结构块,即图 1-2(b)中的 1、3 结构块。

沿空留巷的直接顶板除采空区自然冒落影响外,必然会由于结构块(即 2 或 3 结构块)的运动而被迫下沉。因此,结构块 2 或 3 的稳定状况直接影响沿空留巷的稳定状况。一般来说,充填体很难阻止结构块 3 的旋转下沉。可见,当基本顶破断下沉时,要求巷旁充填体具有一定的可缩量,使其适应结构块 3 的旋转下沉,以减小充填体的压力。为了保持巷道顶板的完整性,以及减少顶板的下沉量,要求充填体具有一定的支护阻力,最好能将结构块 3 在采空区侧沿充填体边缘切断(即切顶)。

由图 1-2 所示的沿空留巷基本顶断裂结构可以看出,结构块 2 或 3 在其中部悬顶距达到最大,此时充填体既要适应结构块的运动,又要控制顶板的旋转下沉量,所承担的载荷最大。此时,充填体外侧顶板最可能发生切顶断裂,因而充填体的支护阻力必须满足这种切顶要求。

1.2.2 综放(采)沿空留巷技术难点

(1) 实体煤帮的合理支护

实体煤帮是综放(采)沿空留巷围岩的主要承载体,是关键块回转下沉的支点,其下沉与变形必将导致沿空留巷围岩产生大变形。实体煤帮的有效支护将对围岩稳定起到很大作用。

基本顶关键层在从破断到“砌体梁”平衡结构的形成过程中,关键块的回转与下沉使综放(采)沿空留巷煤帮作为砌体梁的一个支撑点承受较集中的支承压力,所以沿空巷道煤帮会产生严重破裂。这不仅导致煤帮强烈位移,而且随关键块的回转角增加,会引起巷道顶煤急剧沉降。因此,制止煤帮强烈位移是控制整个巷道围岩大变形的难点之一。

(2) 顶板煤体的合理支护

综放沿空留巷顶煤一般都比较破碎,其稳定性较差,故应通过合理的锚杆支护对其进行

预加固。保持顶板煤体的稳定性是围岩稳定的又一关键。

充填体上方顶煤在工作面前方超前支承压力的作用下,已比较破碎,刚度和强度都较低。如果充填前顶煤已严重塌漏,则充填体不能将支撑阻力传递给直接顶,导致关键块回转下沉量加大,因而造成巷道顶板和巷道煤帮严重破坏,可见,充填体上方顶煤完整性的控制是综放工作面沿空留巷成功的又一难点。

(3) 充填体的合理设计

为有助于沿空留巷围岩结构尽快稳定,并能适应关键块的回转下沉,充填体必须具有早强、速凝和可缩的特性。充填体的合理尺寸是充填体具有较高支护阻力和一定可缩量保证,从而使其与巷道的实体煤帮共同承载,确保围岩稳定。

(4) 巷道帮角的合理加固

一般而言,巷道帮角的应力集中程度较高,易导致底鼓和顶煤冒落。通过合理的锚杆布置加固巷道帮角,既可强化帮角的围岩强度,又可使帮角的应力集中区向围岩深部转移,从而达到提高围岩稳定的目的。

综上所述,综放(采)沿空留巷围岩结构经合理加固后无论是受第一次采动影响,还是受第二次采动影响时,均可以保持稳定。围岩结构中的基本顶关键块虽然有一定的回转下沉,但不会失稳。如果再采用合理支护技术和充填技术保证围岩的稳定,则综放(采)沿空留巷就一定能成功。也正是基于上述基本规律的认识,从而为下一步理论和实验研究的深化奠定了坚实基础。

1.3 大断面原位沿空留巷技术

1.3.1 技术特点

传统沿空留巷技术为工作面运输平巷或回风平巷按正常设计断面掘进,沿空留巷时,在采空区靠巷道一侧进行充填形成条带,整个充填带在采空区里面,不受原巷内支护的保护,如图 1-1(a)所示。我国沿空留巷巷内支护多采用金属支架或木棚支护,属于被动支护,不能适应巷道大变形。随着综放(采)沿空留巷断面的不断增大,金属支架作为巷内基本支护的弊端愈加明显。近年来,随着我国高强锚杆支护技术的推广应用,工作面煤巷锚杆支护的技术已取得成功,克服了金属支架支护无初撑力及难适应大变形等缺点,非常有利于顶板的稳定。在此基础上提出大断面原位沿空留巷技术,即工作面原运输平巷或回风平巷一次成巷时按大断面掘进,沿空留巷时,靠采空区一侧在巷道内进行充填形成条带,整个充填带不在采空区里面,受原巷内支护的保护,如图 1-1(b)所示,变传统的巷旁充填为巷内充填。

1.3.2 技术关键

确保此项技术成功的关键有三个方面:一是建立全新的综放沿空留巷围岩结构力学模型,系统分析充填体、顶煤及煤帮的应力分布与变形协调关系,以揭示综放沿空留巷围岩稳定性控制的机理;二是实施大断面全煤巷道锚杆支护技术,以满足综放工作面 Y 形通风和高产高效的要求,确保一次成巷时的断面不小于 12 m^2 ;三是形成巷内快速充填工艺,以适应综放工作面的快速推进,并确保充填作业的安全^[16]。

对于原支护为棚架被动支护方式的巷道而言,由于综放(采)沿空留巷将经受二次采动影响,围岩变形量较大,如要实施此项新技术,可分三步进行:第一步,对原巷采用锚梁网索联合支护实施加固,撤掉梯形棚架;第二步,在已加固巷道下一工作面侧煤壁实施扩帮锚网支护;第三步,在原巷位置实施巷内充填,并加固充填体。

总之,本书介绍的研究成果不仅可应用于厚煤层综放开采工作面,也可应用于中厚煤层工作面;不仅适用于高瓦斯煤层工作面,也适用于低瓦斯高产高效工作面;还可为沿空掘巷和工作面端头稳定性控制提供借鉴^[45-54]。本书内容可为拓宽关键层理论的应用领域、深化锚杆支护机理的认识和推广沿空留巷技术的应用起到积极的促进作用。

2 综放(采)原位沿空留巷顶板与充填体相互作用机理

为揭示综放(采)原位沿空留巷的变形特征及其可控性,本章运用采动岩体控制的关键层理论建立综放原位沿空留巷的围岩结构力学模型,分析顶板与充填体的变形与应力关系和破碎岩体的碎胀与压实本构关系。研究表明,顶煤与充填体的刚度和强度必须互相匹配,并使顶煤与充填体的变形引起的应力小于其相应的抗压强度。控制端头割煤高度,进行端头充填,控制充填体减充高度及对充填体进行有效加固都能起到有效控制综放(采)原位沿空留巷顶板变形的目的。

2.1 综放(采)原位沿空留巷围岩结构力学模型

综放原位沿空留巷的直接顶、顶煤、充填体需要承受来自关键块体的给定变形。为保证顶煤、直接顶和充填体整个系统的稳定性,充填体除了需要具有足够的强度外,还需要有足

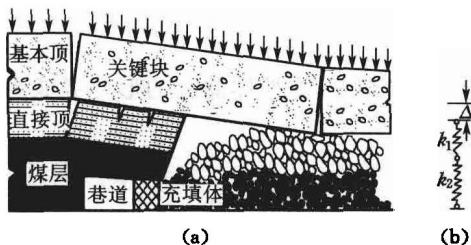


图 2-1 综放(采)原位沿空留巷的矿压简化力学模型

够的抗变形能力,并与直接顶和顶煤的强度、抗变形能力相匹配。根据关键层(基本顶)的给定变形、直接顶(包括顶煤)、充填体之间相互作用关系和特点,可将综放原位沿空留巷围岩结构模型图 2-1(a)简化为如图 2-1(b)所示的两串联弹簧模型。图中 k_1 为直接顶在垂直方向的等效弹簧刚度系数, k_2 为充填体在垂直方向上的等效刚度系数, Δ 为关键块的给定变形。

2.2 综放(采)原位沿空留巷顶板变形分析

综放原位沿空巷道的顶板下沉量除了与基本顶和直接顶的活动规律有关以外,还与支护强度、巷道宽度、直接顶厚度及其力学性质有关。根据综放(采)原位沿空留巷围岩的变形特点,可将直接顶视为可变形体,利用能量变分理论求解巷道顶板下沉变形问题。

2.2.1 顶板力学模型的建立

根据综放(采)原位沿空留巷围岩的变形特征,基本顶以给定变形方式作用于下方煤岩,如图 2-2 所示。类似于煤矿采场覆岩基本顶的超前断裂效应,综放(采)原位沿空留巷基本顶关键块的断裂位置距巷道实体煤帮

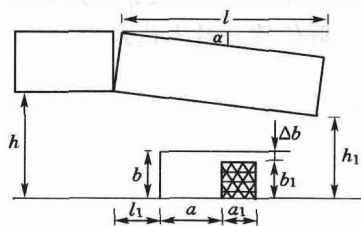


图 2-2 综放(采)沿空留巷结构简图

有一定距离 l_1 , 基本顶的支承压力主要由实体煤帮承担, 造成实体煤帮较大范围的塑性变形或破坏, 而顶板(包括顶煤)靠煤帮侧附近则形成一个应力降低区, 因而直接顶仍可近似视为弹性体。由于基本顶的给定变形作用, 综放(采)原位沿空留巷直接顶上边界为施加给定变形的位移边界, 下边界受到支护阻力 p_1 的作用。巷道直接顶左边界可视为固定边界, 右边与采空区冒落煤矸接触, 简化为破碎煤体作用于直接顶的横向阻力 p_2 , 这样可建立直接顶下沉量分析的力学简化模型, 如图 2-3 所示。

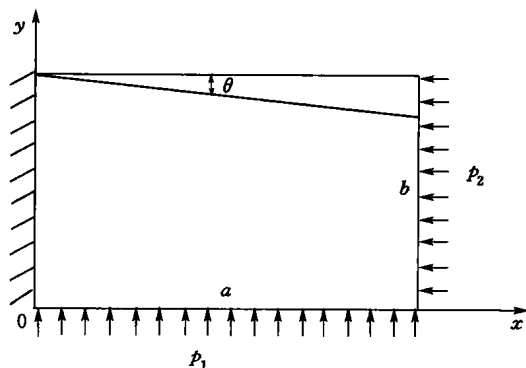


图 2-3 直接顶下沉量分析的力学简化模型

2.2.2 顶板下沉量分析

直接顶下沉量采用位移变分法求解。在一般应力状态下, 弹性体储存的形变势能为

$$U = \frac{1}{2} \iiint \sigma \cdot \epsilon dv \quad (2-1)$$

采用位移分量可表示为

$$U = \frac{E}{2(1+\mu)} \iiint \left[\frac{\mu}{1-2\mu} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] dx dy dz \quad (2-2)$$

假设弹性体位移分量 u, v, w 发生了位移边界条件所允许的微小变化 $\delta u, \delta v, \delta w$, 则得到拉格朗日位移变分方程为

$$\delta U = \iiint (X\delta u + Y\delta v + Z\delta w) dx dy dz + \iint (\bar{X}\delta u + \bar{Y}\delta v + \bar{Z}\delta w) ds \quad (2-3)$$

式中 X, Y, Z ——体力分量;

$\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ ——面力分量。

取位移分量表达式为

$$\begin{cases} u = u_0 + \sum_m A_m u_m \\ v = v_0 + \sum_m B_m v_m \\ w = w_0 + \sum_m C_m w_m \end{cases} \quad (2-4)$$

式中 A_m, B_m, C_m ——待定常数;

u_0, v_0, w_0 ——满足边界条件的设定函数；

u_m, v_m, w_m ——在边界上等于 0 的函数。

将式(2-4)代入式(2-3)得

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial A_m} = \iiint Xu_m dx dy dz + \iint \bar{X}u_m ds \\ \frac{\partial U}{\partial B_m} = \iiint Xv_m dx dy dz + \iint \bar{X}v_m ds \\ \frac{\partial U}{\partial C_m} = \iiint Xw_m dx dy dz + \iint \bar{X}w_m ds \end{cases} \quad (2-5)$$

如选取的位移表达式同时满足位移边界条件和应力边界条件,则上式可简化为

$$\begin{cases} \iiint \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial e}{\partial x} + \nabla^2 u \right) + X \right] u_m dx dy dz \\ \iiint \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial e}{\partial y} + \nabla^2 v \right) + Y \right] v_m dx dy dz \\ \iiint \left[\frac{E}{2(1+\mu)} \left(\frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial e}{\partial z} + \nabla^2 w \right) + Z \right] w_m dx dy dz \end{cases} \quad (2-6)$$

式中, e 为体积应变, $e = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$ 。

直接顶在 Z 方向可视为无限长,本问题为平面应变问题,则用位移分量表示的形变势能表达式(2-2)简化为

$$U = \frac{E}{2(1+\mu)} \iint \left[\frac{\mu}{1-2\mu} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (2-7)$$

式(2-5)可简化为

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial A_m} = \iint Xu_m dx dy + \int \bar{X}u_m ds \\ \frac{\partial U}{\partial B_m} = \iint Yv_m dx dy + \int \bar{Y}v_m ds \end{cases} \quad (2-8)$$

根据直接顶的力学简化模型,确定边界条件如下:

体力分量: $X=0, Y=-\rho g$;

面力边界条件: $x=A: \bar{X}=-p_2, \bar{Y}=0$;

$y=0: \bar{X}=0, \bar{Y}=p_1$;

位移边界条件: $x=0: u=v=0$;

$y=b: v=-x\theta$;

则位移分量表达式可构造为

$$u = A_1 \frac{x}{a} \left(1 - \frac{y}{b} \right) \quad (2-9)$$

$$v = -x\theta \frac{y}{b} + B_1 \frac{x}{a} \left(1 - \frac{y}{b} \right) \quad (2-10)$$

式中 a ——巷道宽度, m;
 b ——直接顶的厚度, m;
 θ ——基本顶回转角, ($^{\circ}$);
 A_1, B_1 ——待定常数。

显然, 式(2-9)、式(2-10)满足位移边界条件, 可用瑞兹法求解。将式(2-9)、式(2-10)代入式(2-7)得直接顶的应变能为

$$U = \frac{E}{2(1+\mu)(1-2\mu)} \left\{ \frac{A_1[B_1 - a\theta(1-4\mu)]}{4} + \frac{a[A^2(1-2\mu) + (1-\mu)(2B_1^2 + 4aB_1\theta + 2a^2\theta^2)]}{6b} + \frac{b[2A_1^2(1-\mu) + (1-2\mu)(B_1^2 - aB_1\theta + a^2\theta^2)]}{6a} \right\} \quad (2-11)$$

则

$$\frac{\partial U}{\partial A_1} = \frac{E}{2(1+\mu)(1-2\mu)} \left[\frac{B_1 - a\theta + 4a\mu\theta}{4} + \frac{a(1-2\mu)A_1}{3b} + \frac{2b(1-\mu)A_1}{3a} \right] \quad (2-12)$$

$$\frac{\partial U}{\partial B_1} = \frac{E}{2(1+\mu)(1-2\mu)} \left[\frac{A_1}{4} + \frac{2a(1-\mu)(B_1 + a\theta)}{3b} + \frac{b(1-2\mu)(2B_1 - a\theta)}{6a} \right] \quad (2-13)$$

根据式(2-8)和边界条件得

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial A_1} = -\frac{p_2 b}{2} \\ \frac{\partial U}{\partial B_1} = -\frac{\rho g a b}{4} + \frac{a p_1}{2} \end{cases} \quad (2-14)$$

将式(2-14)代入式(2-12)和式(2-13), 可得求解待定常数 A_1, B_1 的方程组为

$$\begin{cases} \frac{E}{2(1+\mu)(1-2\mu)} \left[\frac{B_1 - a\theta + 4a\mu\theta}{4} + \frac{a(1-2\mu)A_1}{3b} + \frac{2b(1-\mu)A_1}{3a} \right] = -\frac{p_2 b}{2} \\ \frac{E}{2(1+\mu)(1-2\mu)} \left[\frac{A_1}{4} + \frac{2a(1-\mu)(B_1 + a\theta)}{3b} + \frac{b(1-2\mu)(2B_1 - a\theta)}{6a} \right] = -\frac{\rho g a b}{4} + \frac{a p_1}{2} \end{cases} \quad (2-15)$$

由式(2-15)可得 A_1, B_1 的表达式, 代入式(2-9)和式(2-10)可求得位移分量。

2.2.3 实例分析

在综放(采)原位沿空留巷时, 巷道顶板(煤)下沉量在充填侧达到最大, 所以, 下面分别讨论顶板(煤)在充填侧($x=a$)的下沉量与支护阻力、直接顶厚度、弹性模量、巷道宽度的关系。根据某矿条件, 取 $a=4.5$ m, $\theta=4^{\circ}$, $\rho g=19.8 \times 10^3$ N/m³, $b=3$ m, $\mu=0.3$, $E=1\ 000$ MPa, $p_1=0.3$ MPa, $p_2=0.1$ MPa。

(1) 直接顶下沉量与支护阻力的关系

将以上参数代入式(2-10)和式(2-15), 利用数学软件 Mathcad, 可得到直接顶下沉量与支护阻力的关系式为

$$v=0.314-0.316p_1$$

根据上式, 绘出顶板下沉量与支护阻力的关系如图 2-4 所示。由图 2-4 可以看出, 巷道顶板下沉量与支护阻力呈反比关系, 即随着支护阻力的增加, 顶板下沉量逐渐减小。

(2) 直接顶下沉量与直接顶厚度的关系(见图 2-5)

计算方法同上,得到直接顶下沉量与直接顶厚度的关系式为

$$v=0.2237+0.012b-0.0045b^2$$

由图 2-5 可以看出,顶板(煤)下沉量随直接顶厚度的增加而减少,这是因为直接顶厚度的增加增强了本身的承载能力和储存变形能的能力。

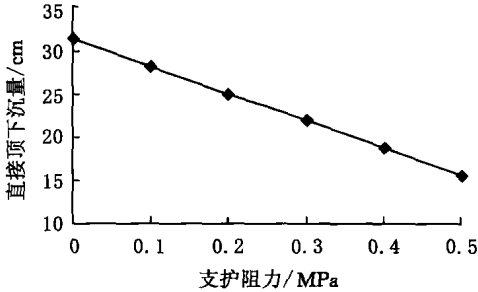


图 2-4 直接顶下沉量与支护阻力的关系

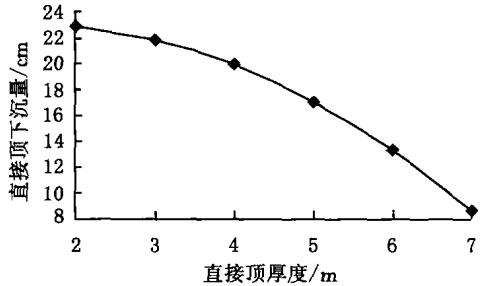


图 2-5 直接顶下沉量与直接顶厚度的关系

(3) 直接顶下沉量与其弹性模量的关系

如图 2-6 所示,其关系为

$$v=0.2381-18.9/E$$

由图 2-6 可以看出,巷道顶板(煤)下沉量与直接顶弹性模量成正比,这主要是因为随弹性模量的增加,直接顶储存形变势能的能力降低;而弹性模量小的顶板岩(煤)层,则可以更多地吸收基本顶给定的变形。

(4) 直接顶下沉量与巷道宽度的关系

如图 2-7 所示,其关系为

$$v=0.113+0.003a+0.0046a^2$$

由图 2-7 可以看出,巷道直接顶下沉量随巷道宽度的增加而增大,即巷道宽度越大,直接顶下沉量越大,并且巷道宽度越大,直接顶下沉量增长幅度越大。

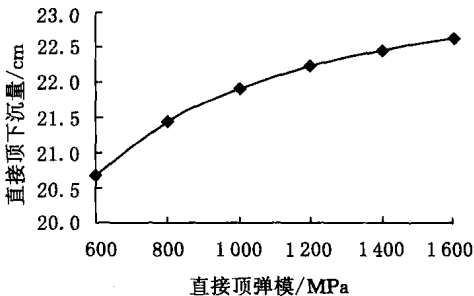


图 2-6 直接顶下沉量与直接顶弹模的关系

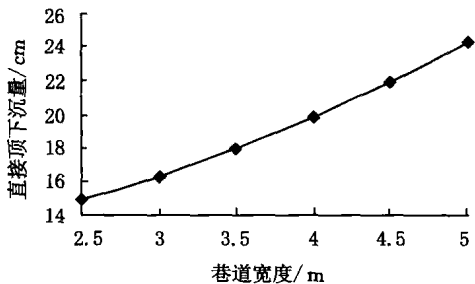


图 2-7 直接顶下沉量与巷道宽度的关系

2.3 破碎岩体的碎胀与压实本构关系

从图 2-1、图 2-2 可以看到,关键块体的给定变形(转动变形)主要由充填帮外侧的破碎顶煤和破碎直接顶的碎胀与压实本构特性确定。为此,对煤系岩层的碎胀与压实本构关系