


国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

煤矿灾害防控新技术丛书

谭云亮 赵同彬 于凤海 著

煤矿沿空留巷 安全支护理论与技术

 煤炭工业出版社

煤矿灾害防控新技术丛书

煤矿沿空留巷安全支护理论与技术

谭云亮 赵同彬 于凤海 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

煤矿沿空留巷安全支护理论与技术/谭云亮等著. --北京: 煤炭工业出版社, 2017
(煤矿灾害防控新技术丛书)
ISBN 978-7-5020-5672-8

I. ①煤… II. ①谭… III. ①沿空巷道—煤巷支护
IV. ①TD353

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 323234 号

煤矿沿空留巷安全支护理论与技术(煤矿灾害防控新技术丛书)

著 者 谭云亮 赵同彬 于凤海
责任编辑 闫 非
编 辑 郝 岩
责任校对 尤 爽
封面设计 王 滨

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
电 话 010-84657898 (总编室)
010-64018321 (发行部) 010-84657880 (读者服务部)
电子信箱 cciph612@126.com
网 址 www.cciph.com.cn
印 刷 北京玥实印刷有限公司
经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm¹/₁₆ 印张 11¹/₄ 字数 267 千字
版 次 2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷
社内编号 8535 定价 88.00 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,电话:010-84657880

内 容 提 要

近些年来,沿空巷道支护理论与技术受到广泛关注。本书重点介绍了近年来在坚硬顶板、中等稳定顶板、石灰岩顶板、复合顶板及深井大倾角条件下沿空留巷安全支护方面的研究成果。主要包括沿空留巷安全支护理论、坚硬顶板“柔—强”充填支护、中等稳定顶板对穿锚固矸石墙支护、石灰岩缓沉顶板切顶安全支护、倾斜煤层复合顶板冒落矸石锚注成墙安全支护、深井大倾角沿空留巷安全评价及支护技术等。

本书可供采矿工程、非煤开采及岩土工程等科研人员、现场工程技术人员和高等院校师生参考。

前言

煤炭是我国的基础能源，其在我国能源结构中所占比重超过 60% 的现状将长期存在。国家《能源中长期发展规划纲要（2004—2020 年）》中明确提出“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”目标。沿空留巷无煤柱开采技术，不仅可以实现煤炭资源的合理开发，提高煤炭资源采出率，延长矿井服务年限，减少巷道掘进量，缓解采掘接替矛盾；而且由于取消区段煤柱，降低应力集中带来的冲击地压危害及高应力巷道支护难题，有利于实现 Y 型通风，从而有效解决工作面瓦斯超限等问题，成为近些年来我国采矿界普遍探讨和试验的重大理论与技术。

然而，大量试验表明，沿空留巷理论与技术应用具有适用性，即有些工程条件适合采用沿空留巷技术，而有些工程条件盲目采用沿空留巷技术时易产生安全隐患。因此，沿空留巷安全支护理论与技术的探索主要体现在以下三个方面：

第一，沿空留巷支护设计需要科学理论指导。

第二，沿空留巷支护方式选择要与顶板运动特征相适应。

第三，基于工程特征的沿空留巷安全支护理论与技术体系构建势在必行。

本书集中体现山东科技大学“矿山压力与岩层控制”创新团队十多年来在沿空留巷安全支护理论与技术方面进行攻关所取得的成果，共分为 7 章：绪论由谭云亮编写，第 1 章由谭云亮、臧传伟编写，第 2 章由于凤海、宁建国编写，第 3 章由赵同彬、谭云亮编写，第 4 章由赵同彬、谭云亮编写，第 5 章由于凤海、赵同彬编写，第 6 章由赵同彬、于凤海编写。

本书得到了国家自然科学基金（项目编号 51474137，51474136）、山东省泰山学者专项经费等的支持，在此表示感谢。

此外，对张振宇、胡善超、刘学生、张玉宝、刘长雷、和树栋等人为本书所做的工作及现场工程技术人员提供的支持一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免有错误之处，敬请读者批评指正。

作者

2017 年 5 月

目次

0 绪论	1
0.1 科学开采与沿空留巷	1
0.2 沿空留巷发展历程	3
0.3 沿空留巷理论与支护技术研究现状	4
0.4 沿空留巷安全支护理论与技术展望	7
1 沿空留巷安全支护理论	9
1.1 采场顶板岩梁破断运动规律	9
1.2 沿空留巷应力环境及变形承载特征	18
1.3 沿空巷道安全支护适应性理论	27
1.4 沿空巷道巷旁支护方式	29
2 坚硬顶板“柔—强”充填安全支护机理与技术	38
2.1 沿空巷道坚硬顶板运动与安全支护	38
2.2 “柔—强”充填安全支护结构力学模型	39
2.3 “柔—强”充填安全支护技术	44
2.4 现场试验	55
3 中等稳定顶板对穿锚固矸石墙安全支护机理与技术	62
3.1 沿空巷道中等稳定顶板运动与安全支护	62
3.2 对穿锚固矸石墙安全支护结构模型	67
3.3 对穿锚固矸石墙安全支护技术	70
3.4 现场试验	81
4 石灰岩缓沉顶板切顶安全支护机理与技术	103
4.1 沿空巷道石灰岩顶板运动与安全支护	103
4.2 石灰岩顶板切顶支护结构力学模型	104
4.3 石灰岩顶板安全切顶及支护技术	107
4.4 现场试验	116
5 倾斜煤层复合顶板冒落矸石锚注成墙安全支护机理与技术	128
5.1 倾斜煤层沿空巷道复合顶板运动与安全支护	128

5.2	冒落矸石锚注成墙支护结构力学模型	129
5.3	倾斜煤层复合顶板锚注矸石成墙支护技术	131
5.4	现场试验	134
6	深井大倾角沿空留巷安全评价及支护技术	143
6.1	深井大倾角岩层运动特征与安全支护	143
6.2	深井大倾角沿空留巷支护结构力学模型	149
6.3	深井大倾角沿空留巷安全支护技术	154
6.4	沿空留巷可行性评价方法	158
	参考文献	167

0 绪 论

0.1 科学开采与沿空留巷

长期以来,煤炭是我国的主体能源和重要的工业原料,在一次能源消费结构中所占比重重大。据统计,2014年煤炭消费占我国一次能源消费总量的比重达到了66.0%,石油占比17.5%,天然气占比5.6%,可再生能源占比1.5%。尽管能源结构在调整,但以煤为主的格局短期内难以改变,据预测,到2020年,我国煤炭发电仍占61%左右(图0-1)。在《中国可持续能源发展战略》研究报告中,20多位中科院和工程院院士一致认为,在未来几十年内,煤炭仍将是我国的主要能源和重要的战略物资,到2050年,煤炭所占比例不会低于50%(图0-2)。我国经济发展的特点,决定了短期内我国以煤炭为主的能源供应与消费格局无法改变。然而煤炭资源属于不可再生资源,具有可耗竭性。随着经济发展对煤炭资源的不断消耗,煤炭也将由原先“丰富的资源”逐渐转变成“短缺的资源”。从全球角度看,按照目前的开采强度,世界煤炭可采230年,而我国煤炭仅可采81年。因此,如何实施煤炭资源的科学可持续开采,成为了我国能源战略的重要组成部分,并引起了广大学者的高度关注。在进行大量研究的基础上,谢和平等针对我国煤炭资源开采的现状 & 存在的问题,指出“科学开采是指在科学发展观引领的与地质、生态环境相协调前提下最大限度地获取自然资源,在不断克服复杂地质条件和工程环境带来的安全隐患前提下进行的安全、高效、绿色、经济、社会协调的可持续开采”。

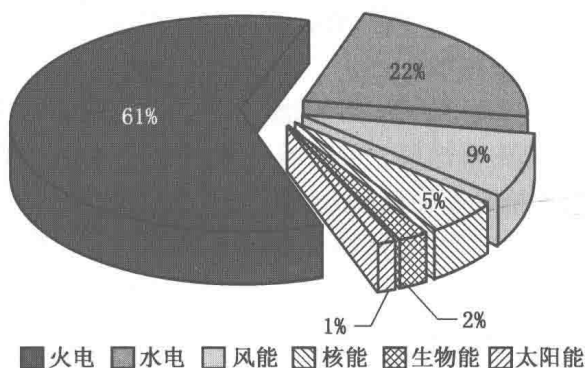


图 0-1 2020 年我国能源组成预测

沿空留巷作为无煤柱护巷技术,是煤矿开采的一项重大改革,其主要优点如下:

(1) 显著提高了采出率,减少了煤炭资源的浪费。传统区段煤柱 20 m 左右(图 0-3),就斜长 200 m 工作面而言,沿空留巷可提高煤炭采出率 10%。这不仅少浪费国家资源,而且延长了矿井的服务年限。

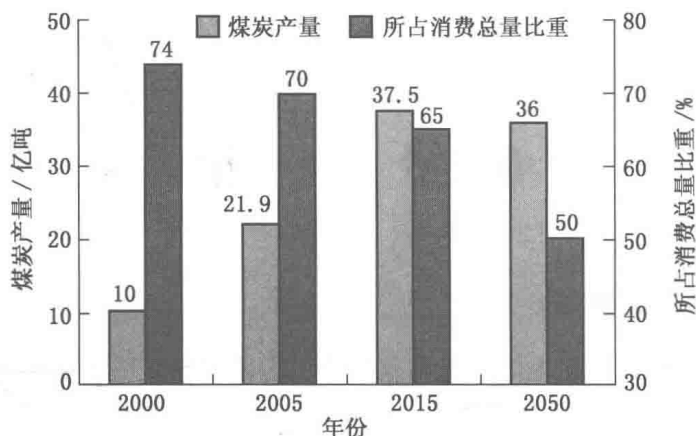


图 0-2 2050 年我国煤炭所占能源消费预测

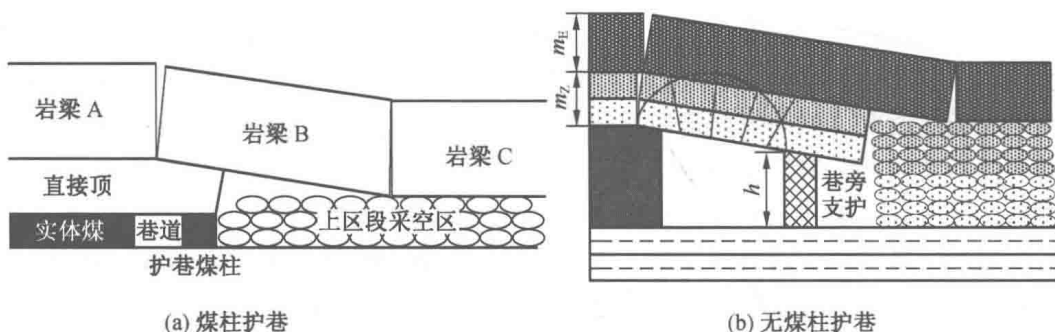


图 0-3 煤柱护巷与无煤柱护巷

(2) 减少了因留设煤柱造成应力集中而引起的冲击地压等动力灾害，有效防止了煤柱失稳破坏造成的漏风、煤层自然发火等灾害，通过前进式和往复式开采，实现 Y 型通风方式，有效治理工作面瓦斯超限难题。

(3) 减少掘进工程量，缓解了开采接续紧张，有利于高效连续生产。

(4) 利用矸石作为巷旁充填材料，可以减少矸石地面排放，缓解了煤矿安全生产问题，改善了矿井地面环境，推动了绿色矿山建设。

然而，沿空留巷在上区段工作面回采的同时进行构筑工作，受到上区段回采的强烈影响，本区段回采时又受到超前支承压力的影响，沿空巷道要经历两次采动影响，导致巷道围岩矿压显现剧烈，巷道围岩塑性区范围明显增加，特别是沿空巷旁构筑以后在基本顶岩梁旋转、断裂沉降过程中，沿空留巷顶板发生剧烈下沉、实体煤帮鼓出及底板出现严重底鼓等现象，易导致沿空巷道围岩支护系统发生破坏，尤其是巷旁支护结构遭受强烈动载而失稳，使沿空巷道安全使用受到威胁。众所周知，巷道围岩稳定性与其支护体系密切相关，对沿空巷道而言，其支护体系主要由巷内支护与巷旁支护两部分组成，巷内支护主要是保证围岩整体性，而巷旁支护则是决定沿空留巷成功与否的关键。因此，开展煤矿沿空留巷安全支护理论与技术研究，特别是巷旁安全支护理论技术，对我国无煤柱开采技术的推广应用具有积极的推动作用，是科学开采的重要组成部分。

0.2 沿空留巷发展历程

国内外沿空留巷研究已有较长的历史,特别是英国、德国、波兰等国相继开展高水材料沿空留巷巷旁支护研究,取得了重要进展,对我国后期沿空留巷研究工作的开展影响很大。事实上,我国沿空留巷技术最早可以追溯到新中国成立初期,其主要历程可以划分为以下三个阶段。

第一阶段(新中国成立初期—20世纪70年代初):自由探索试验阶段。

早在20世纪50年代,枣庄、淄博、峰峰、鸡西等矿区就在薄煤层中采用矸石带代替煤柱来维护上区段运输巷,而作为下区段回风巷。巷内主要采用木棚支护,其存在着矸石的沉缩量、巷内支架变形严重、维护工作量大、工人垒砌矸石的工效低、劳动强度大、安全性差等问题。在此期间,沿空巷道问题属于自由探索阶段,人们并未形成以沿空留巷或沿空掘巷为理念的无煤柱开采技术。进入60年代,我国在浅部矿区有计划进行取消区段煤柱的试验。如1965年,山西省西山煤田杜儿坪矿进行沿空留巷试验,把原来20 m宽的区段煤柱缩减到2~3 m宽。峰峰矿务局从1963年开始实施沿空留巷或沿空掘巷试验。在这一期间,试验研究工作普遍在1.5~2.5 m厚的煤层中应用密集支柱、木垛、矸石带、砌块等作为巷旁支护,巷内多采用木棚、工字钢梯形支架支护,沿空留巷取得了一定成功,并得到了一定程度的应用,为研究沿空留巷及沿空掘巷基本理论奠定了基础。

第二阶段(20世纪70年代中期—20世纪末):行业积极推广与基本理论的构建阶段。

自1976年以后,我国政府部门开始重视无煤柱开采技术。1977年,国家煤炭工业部在山东兖州召开了无煤柱开采技术座谈会,标志着我国从煤炭行业管理层面上拉开了无煤柱开采技术研究推广的序幕。1979年和1981年,煤炭工业部先后在淮北和资兴召开了两次座谈会;1982年又在宜宾召开了高瓦斯、易自燃煤层无煤柱开采技术座谈会,这标志我国进入了无煤柱开采研究的新阶段。在这阶段,无论是在技术实践方面,还是在理论研究方面,都取得了长足进展。

(1) 无煤柱开采矿井数量迅速提升。在新中国成立初期仅有少量矿井在探索无煤柱护巷技术,但到了1982年全国已有216个矿井、572个工作面推广应用无煤柱开采技术,多采出煤炭达9.16 Mt。到1984年,采用无煤柱开采产量约占25%。

(2) 推广煤层类型扩大。在煤层厚度方面,从薄煤层,推广到了中厚及厚煤层。在煤层倾角方面,从缓倾斜煤层推广到了倾斜及急倾斜煤层,如太平矿在急倾斜煤层试验成功。在瓦斯煤层及易自燃煤层方面,也取得了重要进展,如枣庄柴里煤矿易自燃的厚煤层5个分层均采用沿空掘巷技术;南桐、丰城、白沙等高瓦斯矿井,均采用沿空留巷技术。开滦的唐家庄矿、赵各庄矿成功试验了大断面沿空留巷和沿空掘巷技术。这些技术的推广与实践工作,为我国无煤柱开采的发展做出了重要贡献,特别为无煤柱护巷理论的建立奠定了实践基础。

在理论与试验研究方面,也取得了重要进展。许多煤矿与高等院校、科研院所联合开展研究,从无煤柱开采条件下矿压显现规律的井下实测和室内试验研究出发,获得了围岩变形、支架载荷变化及支承压力分布等方面规律。在此基础上,1982年,中国矿业大学陆士良教授从采动影响巷道围岩应力和变形出发,揭示了巷道矿山压力与无煤柱护巷基本原理,阐述了缓倾斜中厚煤层和厚煤层分层开采时,沿空留巷和沿空掘巷围岩变形规律,并

探讨了煤柱宽度对巷道稳定性的影响,标志着我国沿空留巷理论从离散转入系统研究新阶段,具有里程碑的意义。

第三阶段(21世纪初至今):理论深化与支护工程的科学化阶段。

进入21世纪后,高强度的开采导致我国中东部地区矿井逐步进入深部,巷道围岩压力增大,变形严重。一方面,随着综采放顶煤技术的大力推广应用,巷道支护更加困难;另一方面,瓦斯灾害及煤层自然发火防治要求越来越高。高效安全生产要求沿空巷道支护必须安全可靠。随着锚网索支护技术的推广应用和巷旁充填技术的不断完善,我国有些学者和工程技术人员,在厚煤层综放工作面进行了沿空留巷技术试验研究,巷内采用锚网索联合支护,巷旁运用高水材料充填,进行综放大断面沿空留巷试验,并取得初步成功。

在理论上,注重从覆岩结构力学模型和应力分布特征出发,进行沿空留巷的支护设计。在巷道基本支护方式上,从原来工字钢梯形刚性金属支架、U型钢可缩性金属支架,过渡到锚杆、锚索联合支护。在巷旁支护上,从密集支柱、矸石带、砌块发展到适应不同顶板运动特征的巷旁充填研发材料与支护结构设计,更加科学化。

0.3 沿空留巷理论与支护技术研究现状

国外沿空留巷研究已有较长的历史,较有影响的理论是英国南威尔斯大学斯麦脱于1982年提出的岩梁倾斜理论。该理论认为巷旁支护对巷道基本顶起控制作用,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依据。而开展大量创造性研究工作的是中国的学者与工程技术人员,代表了国际先进水平。目前,开展沿空留巷安全支护研究的重点主要聚焦在留巷位置、留巷方式、沿空留巷顶板结构力学模型及相应支护方式与参数确定方法方面,如“内应力场”留巷力学模型、“切顶成巷”模型、“大一小结构”模型、“楔形”结构模型、“柔—强”支护力学模型等。

1. “内应力场”留巷力学模型

宋振骐院士提出了基于“上覆岩层运动为中心”的矿压理论,把顶板断裂结构载荷贡献形成的支承压力部分区域称为“内应力场”(图0-4);而把其他覆岩重力作用下形成的支承压力区称为“外应力场”。显然,在内应力场掘巷或留巷是最佳选择:其一,应力低,冲击地压等动力灾害得以避免;其二,支护结构受力取决于顶板的运动,只要支护有足够允许变形量(即基本顶显著运动完成触矸后,支护结构承受变形而不被破坏),则可以选

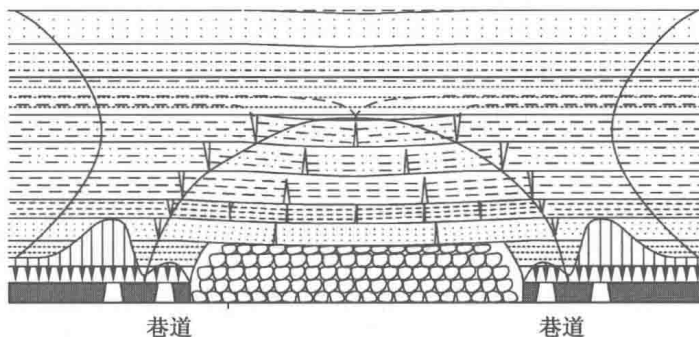


图0-4 “内应力场”留巷力学模型(宋振骐等)

择既定支护方式下的沿空留巷。巷旁支护的承载是由破断岩层作用力决定的。不仅如此，当顶板岩梁运动参数已知时，便可确定巷道开掘的合理位置和时间，预计受采动影响围岩变形量。沿空巷道在顶板活动稳定后长期处于卸压区，上覆基本顶运动引起的巷道顶板下沉量为围岩变形的主要部分。巷道合理位置是在内应力场中沿空送巷，内应力场中送巷的合理时间是在基本顶运动（即内应力场）稳定后再进行施工。

2. “切顶成巷”模型

何满潮院士领导的团队采用双向聚能拉伸爆破超前预裂顶板技术，通过顶板岩梁的超前预裂，在周期来压作用下将悬臂梁切落成巷，消除了悬顶现象，以减小悬臂梁上覆荷载以及旋转变形力，从而大大减小岩梁传递到巷旁和巷内支护的荷载，从根本上改善巷道的力学环境。切落的顶板形成巷帮，隔断采空区，从而保留工作面下平巷，实现单面单巷采掘模式（图 0-5）。该方法具有消除临近工作面煤体上方应力集中，避免留设煤柱引发的冲击地压、瓦斯突出等优势。

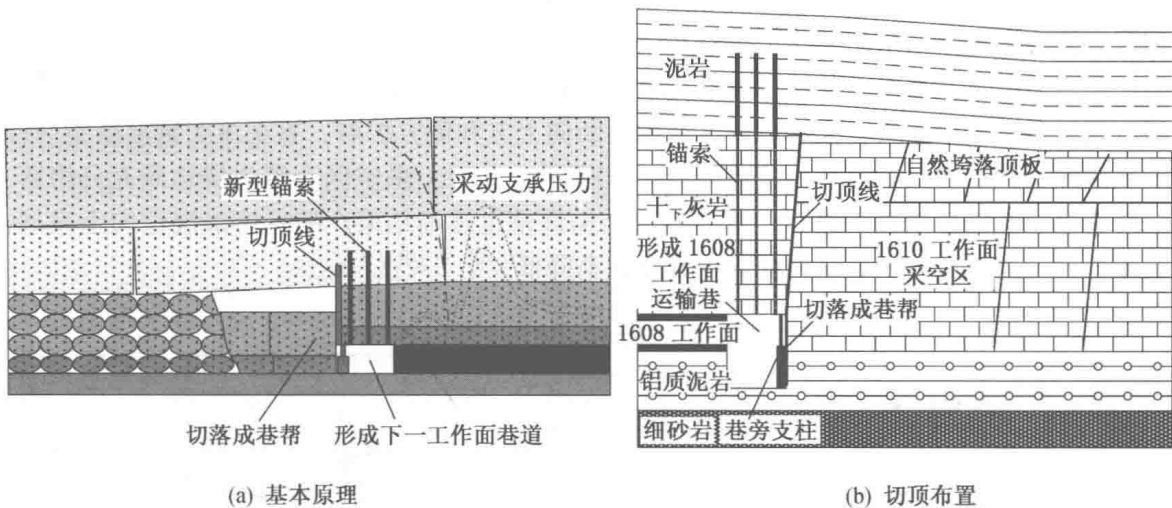


图 0-5 沿空留巷切顶成巷模型（何满潮等）

3. “大一小”结构模型

袁亮院士领导的团队把沿空留巷的上覆围岩稳定过程看作顶板覆岩“大一小”结构的相互平衡作用过程（图 0-6）。沿空留巷顶板覆岩大结构是指采场上覆岩层周期性垮落形成侧向砌体梁绞式平衡结构；小结构是指由留巷上方下位锚固岩层、充填墙体、煤柱及巷

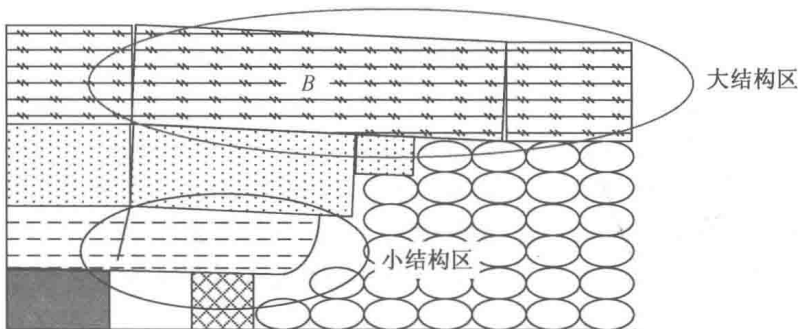


图 0-6 沿空留巷顶板“大一小”结构模型（袁亮等）

内加强支架形成的稳定平衡结构。在沿空留巷的顶板活动过程中,大结构范围内顶板岩层的滑动位移,包括基本顶关键块的回转下沉,直接影响留巷围岩小结构的稳定性,从大结构中围岩应力和变形的调整变化过程中,把握小结构围岩稳定性控制的时空机制,是沿空留巷围岩稳定性控制的关键技术。

大结构稳定是小结构稳定的前提,而大结构稳定性控制技术的重点是控制关键块 B 的回转下沉,确保大结构中侧向砌体梁断裂位置在实体煤壁的前上方,避免大结构内采空区侧向悬臂过长给留巷墙体带来附加载荷。小结构对大结构有牵制作用。除大结构中关键块 B 的断裂位置外,小结构稳定还与围岩强度、围岩结构、支护构件这三者的强化程度有关。依据工作面顶板岩层的活动周期,应对小结构采取针对性的围岩补强支护措施,抗顶板剪切回转锚杆主动支护、采动应力调整期间巷内自移辅助加强支护、高承载性能巷旁充填墙体支护,最终提升小结构围岩的稳定性。

4. “楔形”结构模型

张农等根据顶板沿采空区侧向垮落展布形态,认为采空区顶板岩层发生渐次上向垮落期间,侧向未垮落岩层形成楔形承载区,该区域岩层既承担上覆载荷又向低位岩层传递压力,是沿空留巷顶板压力的传载体。随着顶板垮落层位的升高,侧向岩体强度持续弱化,高位岩层承载基础缺失,楔形承载区范围不断向上方和侧方扩展,直至主关键层断裂时楔形承载区达到最大,如图 0-7 中①、②、③所示。此时,采空区上覆岩层达到充分垮落,对留巷稳定性的影响趋于缓和,留巷顶板结构调整也逐渐结束。随着垮落层位向上发展,上覆岩层垮落对留巷围岩结构的影响程度逐渐降低。

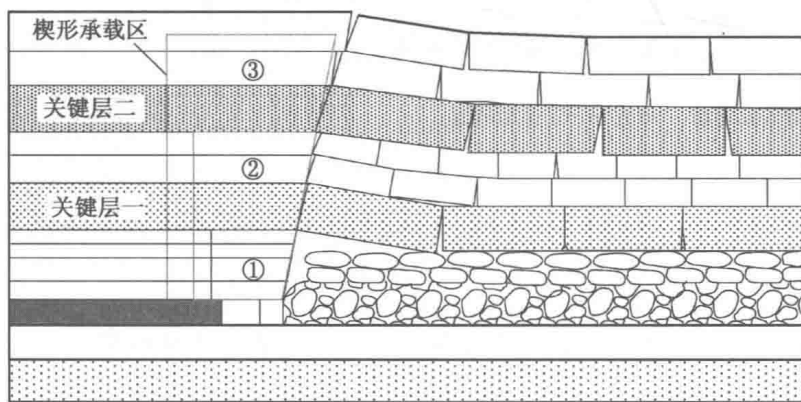


图 0-7 沿空留巷顶板“楔形”结构模型(张农等)

5. 沿空留巷巷旁“柔—强”复合充填支护力学模型

谭云亮领导的课题组基于顶板岩梁运动特征,从巷旁安全支护结构与顶板运动变形、载荷相适应的角度,构建“柔—强”复合充填支护力学模型,如图 0-8 所示。坚硬顶板运动沉降对巷旁支护结构影响有两个显著阶段:一是顶板剧烈运动阶段,当岩梁断裂后,以实体煤侧岩梁断裂位置为中心快速弯曲沉降,在此过程中由于约束作用不足,岩梁始终处于剧烈沉降运动状态,容易产生动压冲击;二是顶板缓慢沉降阶段,坚硬顶板岩梁沉降触矸后,沉降速度迅速减缓,且随着矸石压缩量的增加,采空区矸石对坚硬顶板岩梁支撑反力增大,限制了坚硬顶板岩梁下沉速度,并以非线性形态减小,直至矸石重新被压实。

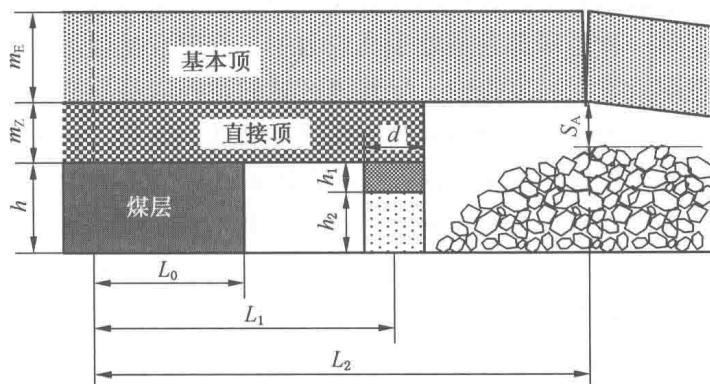


图 0-8 顶板“柔—强”复合充填巷旁支护结构力学模型

针对顶板岩梁的运动特征，沿空留巷巷旁支护需要其既适应坚硬基本顶岩梁前期剧烈沉降运动，又能有效控制顶板岩梁触矸后缓慢递减下沉的运动形态，保证巷道围岩支护承载结构系统的稳定性，该理论称为沿空留巷巷旁支护适应性理论。这一理论具有显著特征：①顶板运动特征对支护结构起着主导性作用；②适应变形、“让—抗”结合；③支护结构的性能达到最优化。

根据这一原理，可以确定柔性缓冲材料厚度 (h_1) 和高强支撑材料厚度 (h_2)：

$$h_1 = \Delta h_1 = \frac{h - (K_A - 1)m_Z}{L_2} L_1 \quad (0-1)$$

$$h_2 = h - h_1 \quad (0-2)$$

式中 h_1 ——柔性缓冲材料厚度；

h_2 ——高强支撑材料厚度。

而且，很容易获得既定强度下所需巷旁支护宽度或既定支护宽度下所需巷旁支护材料的强度。这为科学地进行巷旁支护提供了依据。

0.4 沿空留巷安全支护理论与技术展望

就沿空留巷而言，在理论与技术上，需要在以下几个方面进一步开展攻关研究。

1. 适合于沿空留巷的围岩与工程条件界定

近些年来，沿空留巷技术进入广泛应用阶段，在许多条件下取得了成功，特别是从综采工作面沿空留巷，推广到综采放顶煤沿空留巷试验成功，是一个重要进展。然而，迄今为止，哪些煤层条件、围岩结构及工程特点适合于沿空留巷，而哪些煤层条件、围岩结构及工程特点不适合于沿空留巷，没有给出界定。这给科学、安全推广应用沿空留巷技术带来困难。因此，需要对沿空留巷适应条件及其类型划分进行深入研究。

2. 不同类型岩层运动特征与沿空留巷支护结构力学模型

建立合理的岩层结构力学模型是进行沿空留巷安全支护的基础，许多学者都进行过探讨。研究表明，合理的沿空留巷巷旁支护方式取决于顶板运动特征及围岩属性。因此，需要针对不同类型顶板岩层运动特征，构建起科学的支护结构力学模型，给出与之相适应的支护设计方法。

3. 深部沿空巷道围岩强流变变形控制

研究表明,深部巷道围岩变形破坏比浅部严重得多。从顶板破坏来看,深部顶板变形破坏具有两种形态。第一种是深部巷道处于高应力中,巷道开挖以后,巷道围岩应力将重新分布,应力在巷壁附近发生高度集中,导致该区域的顶板岩层屈服进入塑性状态,形成破坏塑性区。塑性区的出现,致使应力集中区向纵深发展,当应力集中的程度超过顶板屈服强度时,将导致新的塑性区产生,从而形成所谓的松动破坏区。第二种是在水平高应力作用下,顶板岩层产生屈曲破坏,出现折断现象。同时,巷道开挖后,巷帮的破坏扩展,将进一步引发顶板和底板的破坏。强烈底鼓破坏已经成为难点之一,可分为4种基本类型:挤压流动型、挠曲褶皱型、剪切错动型和遇水膨胀型,如何控制成为一大难点。

事实上,深部沿空留巷的一个最大难点就是围岩强流变变形导致支护结构失效,特别是底板持续鼓起变形,进而导致巷旁支护结构失效,成为决定深部沿空巷道是否安全的关键之一,而传统的锚杆、锚索支护已经无法适应深部围岩大变形的需要。因此,在深入揭示“顶板—两帮—底板”各区域流变破坏演化机理的基础上,探索从控制围岩流变变形着手,基于“关联”破坏控制原理,有效保障巷旁支护的稳定性,是实现深部沿空留巷的重要研究内容。

4. 沿空留巷充填墙体材料制备及构筑技术

巷旁墙体材料、构筑技术及工艺是决定沿空留巷能否成功的重要部分,未来的发展应重点把握两个方面。

(1) 无煤柱沿空留巷墙体构筑技术。未来无煤柱沿空留巷墙体构筑技术将逐渐淘汰安全性差、劳动强度高、效率低的构筑方式,机械化成为主要发展方向。但是目前我国机械模板构筑墙体还达不到规模化、标准化、成套装备的应用阶段,而且,针对薄煤层、大倾角煤层、综放工作面的机械模板充填装备还存在着很大的技术障碍亟须突破。

(2) 无煤柱沿空留巷充填材料制备和泵送工艺。随着我国矿井的延深,高水充填材料强度低、易风化破坏的缺点将日益明显,膏体混凝土充填材料将逐渐扩大使用范围,其高强的特点在深井巷道内的优势将逐渐显现。以碎矸石、粉煤灰等废弃矿物材料为主的粗骨料将成为充填材料制备,干混材料井下机械化运输、搅拌、泵送的无缝对接,是今后大力提倡的工程研究方向。

5. 沿空留巷施工规范与安全支护设计专家系统

随着大范围沿空留巷支护技术的推广与应用,暴露出的问题越来越明显:一是缺乏施工规范的指导,导致许多企业在施工过程中走了不少弯路,带来安全隐患;二是支护设计还停留在经验水平上,现代化计算机技术未能得到充分利用。因此,需要在尽快建立沿空留巷施工规范的基础上,研发安全支护设计专家系统,指导确定巷旁支护类型和参数。

1 沿空留巷安全支护理论

1.1 采场顶板岩梁破断运动规律

1.1.1 采煤工作面顶板分类

采场顶板岩梁运动特征决定了沿空留巷安全支护控制设计，而顶板分类特征与顶板岩梁运动特征密切相关。《缓倾斜煤层采煤工作面顶板分类》（MT 554—1996）中直接顶分类的基本指标采用平均直接顶初次垮落距 $\bar{L}_Z$ ，同时综合考虑直接顶单轴抗压强度、分层厚度、节理裂隙间距及顶板岩梁的抗弯能力，将采煤工作面直接顶分为四类，见表1-1；基本顶分级指标采用初次来压当量 p_e ，其值由基本顶初次来压步距、直接顶充填系数与采高确定，将采煤工作面基本顶分为四级，见表1-2。

表1-1 直接顶分类表

直接顶类别			平均直接顶初次垮落距 $\bar{L}_Z/\text{m}$	岩 性
I	不稳定	I a	$\bar{L}_Z \leq 4$	泥岩、泥页岩，节理裂隙发育或松软
		I b	$4 < \bar{L}_Z \leq 8$	泥岩、炭质泥岩，节理裂隙较发育
II	中等稳定		$8 < \bar{L}_Z \leq 18$	致密泥岩、粉砂岩、砂质泥岩，节理裂隙不发育
III	稳定		$18 < \bar{L}_Z \leq 28$	砂岩、灰岩，节理裂隙很少
IV	非常稳定		$28 < \bar{L}_Z \leq 50$	致密砂岩、灰岩，节理裂隙极少

表1-2 基本顶分级表

基本顶级别	来压程度		初次来压当量 $p_e/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	岩 性
I	不明显		$p_e \leq 895$	一般砂页岩
II	明显		$895 \leq p_e \leq 975$	层理不发育的砂页岩及小厚度砂岩
III	强烈		$975 \leq p_e \leq 1075$	4~5 m 的细粒及中粒砂岩
IV	非常强烈	IV a	$1075 < p_e \leq 1145$	厚度> 10 m 的砂岩
		IV b	$p_e > 1145$	高强砂岩

凌标灿、彭苏萍在分析影响工作面顶板稳定性的岩石介质条件、环境条件以及工程三方面影响因素基础上，提出了基于岩石单轴抗压强度、岩石质量指标、煤体抗压强度、地下水状况及工作面月推进速度五个指标的顶板稳定性动态分类方法，该方法采用神经网络，以回采过程中顶板事故影响生产的时间为主要判据将顶板分为不稳定顶板（I类，每月累计影响多于240 h）、中等稳定顶板（II类，每月累计影响60~240 h）、稳定顶板（III类，每月累计影响15~60 h）、极稳定顶板（IV类，每月累计影响少于15 h）。黄建功、平寿康根据大倾角煤层开采方法和矿压研究，建立了一套用于大倾角薄及中厚煤层采面顶板

分类的“五类四级”分类方案。其中，直接顶按其岩层从暴露到支护以及放顶冒落过程中的完整稳定程度，以初次垮落距及综合稳定性指数为基本指标、放顶有效冒采比为参考指标，将其划分为极不稳定（Ⅰ）、不稳定（Ⅱ）、中等稳定（Ⅲ）、稳定（Ⅳ）、极稳定（Ⅴ）五类；基本顶分级采用周期来压步距和采面冒矸充填度两个指标，将其分为不明显、明显、较强烈、强烈四级。

由于沿空留巷在薄及中厚煤层、倾斜及急倾斜煤层、坚硬顶板、石灰岩顶板、中等稳定顶板和复合顶板等条件下均取得成功应用，仅采用上述标准进行分类研究受到了限制。因此，基于课题组近些年来在沿空留巷方面取得的研究成果，将适于沿空留巷的围岩条件分为坚硬顶板、中等稳定顶板、灰岩缓沉顶板、复合顶板及大倾角煤层五类。

1.1.2 采场顶板岩梁破断结构

由于采煤工作面的长度远大于基本顶厚度，可将基本顶岩梁假设为薄板。对于首个采煤工作面而言，其四周均为实体煤，基本顶的边界条件为四边固支结构。随着长壁采煤工作面自开切眼推进，基本顶的悬顶距离越来越大，弯矩相应增大，当基本顶岩层达到强度极限时，将形成断裂。

采煤工作面自开切眼推进一个初次来压步距时，基本顶产生O型断裂，如图1-1a所示。首先采空区基本顶按断裂线1、2顺序破断，然后基本顶在短边形成断裂线3，并与断裂线2贯通，至此基本顶O型断裂线形成，最后基本顶岩层沿断裂线2、3回转形成断裂线4。至此，基本顶内出现4个结构块Ⅰ、Ⅱ，形成外部O型内部X型的结构。此后，基本顶形成三边固支一边简支的薄板，工作面再推进一个周期来压步距时，基本顶将再次发生破断，长边形成断裂线2，短边形成断裂线5、4，出现新的结构块Ⅲ。而后，随工作面继续推进，基本顶将发生周期性破断，依次出现断裂线2、5、4，基本顶绕周边断裂线回转形成周期性顶板垮落，如图1-1b所示。

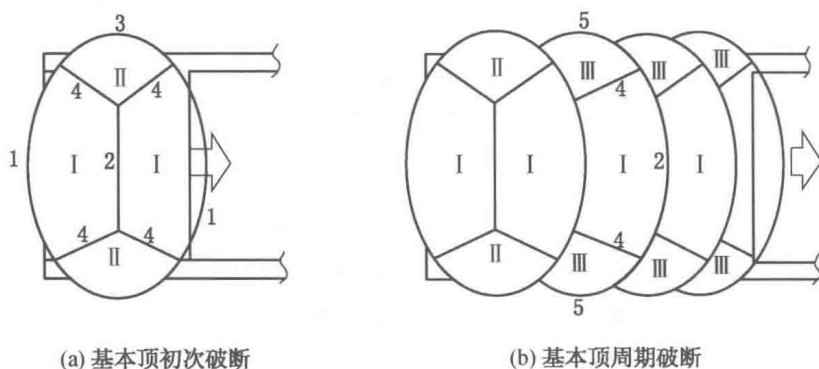


图 1-1 采场基本顶破断的基本形态

由图1-1b可以发现：基本顶垮落时，在工作面上下端头区域有一定范围的块体（Ⅱ、Ⅲ块体）随着工作面推进会发生周期性破断、回转、下沉，但不会垮落，该结构为弧三角块结构。工作面侧向基本顶形成弧三角板结构，其下方的岩层和工作空间可以得到该结构的保护，维护条件比中部好，且基本顶下沉量小，但该处直接顶因采动影响，促使直接顶提前加剧破裂，与基本顶间发生离层，尤其在工作面侧向区域进行支护交替作业时，此松动煤岩体可能冒落，造成冒顶事故。