国家自然科学基金项目（51804129）资助
江苏省博士后科研资助计划项目（2019K039B）资助
江苏省住房和城乡建设厅科技项目（2018ZD154）资助

深井沿空留巷

顶板致灾机理与控制技术研究

武精科 著

Shenjing
Yankong Liuhang
Dingban Zhizai Jili
Yu
Kongzhi Jishu Yanjiu

中国矿业大学出版社

国家自然科学基金项目(51804129)资助
江苏省博士后科研资助计划项目(2019K039B)资助
江苏省住房和城乡建设厅科技项目(2018ZD154)资助

深井沿空留巷顶板致灾机理与控制技术研究

武精科 著

常州大学图书馆
藏书章

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

深井沿空留巷围岩控制是巷道支护领域的技术难题之一，尤其是其顶板直接关系沿空留巷的成败，实现对顶板岩层的控制是沿空留巷围岩稳定的关键。本书采用工程调研实测、实验室测试、理论分析、物理模拟、数值计算等方法，围绕深井沿空留巷顶板变形、垮冒等灾变特征及控制技术进行深入系统研究，阐明不同覆岩条件深井沿空留巷顶板致灾机理及其失稳关键因素，揭示留巷覆岩运动形式及力学作用机制和顶板岩层控制机理，提出顶板岩层控制关键技术并开发出顶板稳定性综合评价软件系统。

本书可供从事采矿工程的科研、设计、生产单位工程技术人员及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

深井沿空留巷顶板致灾机理与控制技术研究 / 武精科著. —徐州：中国矿业大学出版社，2019.8

ISBN 978-7-5646-4110-8

Ⅰ. ①深… Ⅱ. ①武… Ⅲ. ①深井—沿空巷道—顶板事故—事故预防—研究 Ⅳ. ①TD77

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 201691 号

书　　名　深井沿空留巷顶板致灾机理与控制技术研究
著　　者　武精科
责任编辑　马晓彦
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)83884103　83885105
出版服务　(0516)83995789　83884920
网　　址　http://www.cumtp.com　**E-mail**:cumtpvip@cumtp.com
印　　刷　江苏凤凰数码印务有限公司
开　　本　787 mm×1092 mm　1/16　**印张** 9　**字数** 172 千字
版次印次　2019 年 8 月第 1 版　2019 年 8 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

据预测，至2020年，将有40%的国有重点煤矿和60%的国有地方煤矿因浅部煤炭资源枯竭而关闭。随着赋存于地层浅部的煤炭资源逐步开采殆尽，我国煤矿将转入深部煤炭资源的开采，开采难度不断提高。一方面，由于开采深度的不断增加，煤炭开采所处的地质力学环境也在不断地恶化，煤岩体的物理力学特性发生明显的变化，浅部条件下的硬岩在深部表现出明显的软岩特征，深部开采难以逃避高地应力、高地温、高渗透压以及开采扰动这一复杂地质力学环境所带来的严峻挑战；另一方面，煤炭的伴生资源瓦斯含量也迅速增大，经常性地发生工作面回风隅角瓦斯超限及瓦斯事故。除此之外，深部开采目前还需面对高冲击以及掘巷对其周围采掘巷道围岩的扰动，严重影响了矿井的安全生产。

沿空留巷技术是煤矿开采技术的一项重大改革，它具有提高采出率、消除煤柱应力集中、缓解采掘接替紧张局面、解决保护层开采回风隅角瓦斯超限问题、抽采被保护层瓦斯等诸多优点。近年来，随着煤矿开采方法不断完善和机械装备水平的提高，沿空留巷已成为当前我国深部矿井煤炭开采的科学模式和技术发展重要方向。为实现深井高瓦斯矿井安全高效开采，各矿区联合企业、院校对深井沿空留巷再次进行了技术攻关，形成了以煤巷高强锚网索支护为主、以回采阶段单体辅助加强的无煤柱连续开采沿空留巷钻孔法煤与瓦斯共采技术，实现了深井沿空留巷工程。根据淮南矿区深井沿空留巷经验，在采深600～1 000 m的薄及中厚煤层、顶底板为中等偏厚的泥岩等软弱岩层条件下，沿空留巷后巷道断面很难保持在8 m^2 以上。造成这种结果的原因，一方面是缺乏对不同顶板条件沿空留巷断面的敏感程度的研究，出于安全性考虑，在沿空留巷之初就选择了较小的断面；另一方面是缺乏对不同顶板条件下沿空留巷的协调变形机理的认识，以往的沿空留巷过多地关注于巷旁充填体本身切顶及可缩性能，没有将其放入整个沿空留巷围岩结构体系内进行研究。因此，本书结合深井沿空留巷不同顶板条件，研究沿空留巷上覆岩层活动规律及其围岩承载结构的协调变形机理，揭示不同顶板条件沿空留巷围岩结构运动特征，据此形成针对性的沿空留巷围

岩强化控制技术，指导沿空留巷工程实践的开展，对促进我国无煤柱开采技术的进一步发展具有一定的理论意义和实践价值。

本书的写作和出版得到国家自然科学基金项目(51804129)、江苏省博士后科研资助计划项目(2019K039B)、江苏省住房和城乡建设厅科技项目(2018ZD154)的资助。

由于作者水平有限且时间仓促，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请同行专家与广大读者批评指正。

著　者

2019年7月

目　录

1　绪论 …… 1
1.1　研究背景和意义 …… 1
1.2　国内外研究现状 …… 3
1.3　主要研究内容 …… 9

2　深井沿空留巷矿压显现特征及顶板致灾机理 …… 11
2.1　深井沿空留巷矿压显现特征分类 …… 11
2.2　深井沿空留巷顶板岩层特性及结构 …… 22
2.3　深井沿空留巷顶板岩层致灾机理探究 …… 30
2.4　深井沿空留巷顶板灾变关键影响因素分析 …… 41
2.5　本章小结 …… 46

3　深井沿空留巷上覆岩层运动形式及力学作用机制 …… 47
3.1　沿空留巷顶板岩层离层形成机制 …… 47
3.2　沿空留巷上覆厚硬顶板短悬臂岩梁结构形成机制 …… 52
3.3　短悬臂岩梁结构形态关键影响因素分析 …… 62
3.4　本章小结 …… 63

4　深井沿空留巷顶板岩层控制机理与技术 …… 64
4.1　深井沿空留巷顶板控制原则 …… 64
4.2　深井沿空留巷顶板控制机理分析 …… 65
4.3　可伸缩型锚索桁架结构设计研发 …… 81
4.4　本章小结 …… 94

5　深井沿空留巷顶板灾变监测方法与稳定性评价 …… 96
5.1　沿空留巷矿压监测及信息反馈方法探究 …… 96
5.2　深井沿空留巷顶板灾变风险评价 …… 98

5.3 本章小结 …… 114

6 深井沿空留巷工程试验 …… 116
6.1 深井沿空留巷工程实例一 …… 116
6.2 深井沿空留巷工程实例二 …… 122
6.3 本章小结 …… 125

7 结论与展望 …… 126
7.1 主要研究成果 …… 126
7.2 展望 …… 127

参考文献 …… 129

1 绪 论

本章首先概述了沿空留巷围岩支护理论的研究现状和发展动态趋势，介绍了沿空留巷适用条件、支护技术及相关工艺装备等。然后，针对深井沿空留巷的关键技术难题进行了总体性梳理和简要分析，并详细阐述了本书的主要研究内容。

1.1 研究背景和意义

煤炭是我国最丰富、最经济、最安全的能源，也是可以清洁利用的能源，在我国能源供应中长期占据重要地位，作为主导能源不可替代[1]。“十三五”期间，煤炭消费弹性系数在0.2～0.3之间，年均增速为2%左右，2020年全国煤炭消费总量预计在43亿t左右[2-3]。然而，随着赋存于地层浅部的煤炭资源开采殆尽，预测“十三五”期末将有40%的国有重点煤矿和60%的国有地方煤矿因浅部煤炭资源枯竭而关闭，深部煤炭开采势在必行[4]。

从我国煤炭资源赋存特点看，60%的煤炭资源埋藏深度超过800 m。目前，井工开采深度以每年8～12 m的速度递增，我国煤矿将逐渐转入深部煤炭资源的开采，开采难度不断提高[5-9]。谢和平等[10]探讨深部矿井岩体力学一些共性的概念性和基础性问题，尝试采用新视角和新手段对深部矿井岩体力学进行研究。何满潮等[11]总结提出深部矿井的复杂地质力学环境所带来的严峻挑战，即高地应力、高地温、高渗透压。除了这“三高”以外，深部开采还面临高瓦斯、高冲击以及采掘对其周围巷道围岩的扰动等问题，基于前人研究成果，张农等[12]提出“五高两扰动”的开采环境特点，如图1-1所示，进而提出深部开采亟待解决的难题。

近年来，随着煤矿开采方法的不断完善和机械装备水平的提高，沿空留巷已成为当前我国深部矿井煤炭开采的科学模式和技术发展重要方向，它具有提高采出率、消除煤柱应力集中、缓解采掘接替紧张局面、解决保护层开采回风隅角瓦斯超限问题、抽采被保护层瓦斯等诸多优点[13-16]，在我国煤炭行业中得到快速发展并已在新汶矿业集团、平煤神马集团、淮南矿业集团等企业推广

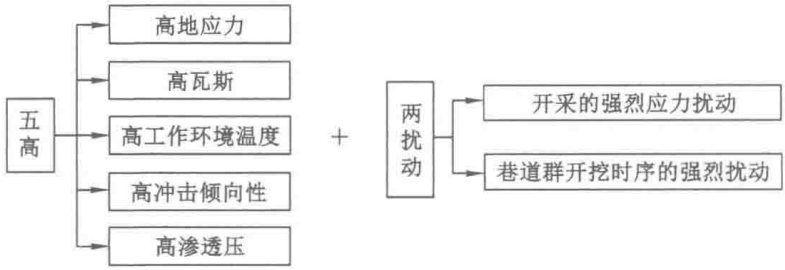


图 1-1　深井开采环境特点

应用且占据突出地位。但沿空留巷开采模式必然带来采场侧向支承压力范围和峰值显著增大、采动影响程度剧烈化和矿山压力显现严重化，加之建设和发展大型集约化矿井使巷道断面尺寸增大，传统煤巷矿压理论与控制技术难以甚至根本不能适应深部矿井开采生产技术条件和发展对保障沿空留巷安全畅通之研究主体——顶板变形破坏与控制的要求。在现场采矿实践中发现深井沿空留巷顶板破碎难以形成承载结构，出现大量旧式支护结构失效、损毁甚至恶性冒顶等矿压现象(图 1-2)，严重制约了工作面安全高产高效开采的进一步发展。事实上，有关矿山压力难题对传统的沿空留巷顶板破坏机制及相应的控制理论与技术形成了艰难的挑战，有针对性地开展深入系统研究已具有刻不容缓的必要性和紧迫性。

由于沿空留巷围岩性质结构和受采动影响程度在沿巷道横截面的水平方向存在差异性，传统的支护体系与深井沿空留巷矿压显现之间的矛盾趋向尖锐化。深井沿空留巷顶板变形破坏结构形态与采动环境的关联程度如何？深井沿空留巷顶板岩层应力位移场时空演化规律、在垂直方向和水平方向运移破坏的动态响应如何？深井沿空留巷切放顶后顶板覆岩破断结构、其运动的力学作用机制及与之相适应的控制方向如何？深井沿空留巷顶板灾变预警响应特征如何？只有这些关键科学问题得到深入系统研究，才能深刻揭示深井沿空留巷顶板致灾机理，进而在开采过程中达至对顶板变形破坏的科学控制。

本书将重点探索深井沿空留巷顶板矿压显现的结构形态、顶板岩层致灾机理、上覆岩层运动形式及力学作用机制、顶板岩层控制机理与技术及顶板稳定性评价方法的一整套内容，具有重要的科学意义。本书对现场实践中发现的深井沿空煤巷顶板岩层破坏矿压现象及其致灾机理进行深入考究，丰富矿山压力与岩层控制学科的工程内涵和视角；研究深井沿空留巷切放顶后覆岩失稳准则和判据及岩梁结构特征以揭示其形成机制，实质创新采矿工程与顶板灾变失稳防治理论；探究深井沿空留巷顶板岩层控制机理，设计具有双向恒阻功能的锚索桁

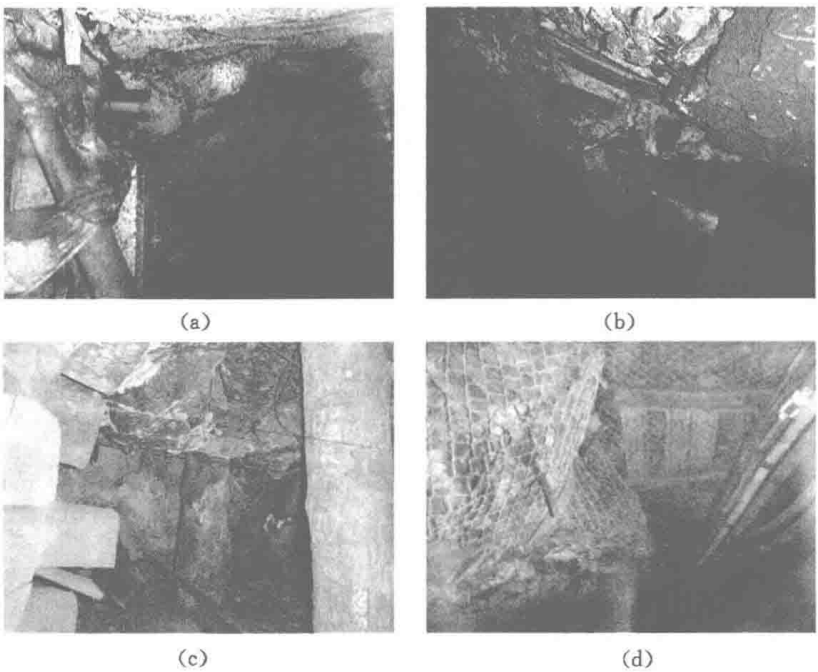


图 1-2 深井沿空留巷顶板破坏状态

(a) 顶板急剧下沉;(b) 顶板倾斜回转;(c) 顶板破碎垮冒;(d) 顶板台阶下沉

架,革新采动煤巷支护方法和结构;探析深井沿空留巷顶板灾变失稳致险因素,形成科学化安全评价系统,实现巷道围岩控制领域的突破和新进展。本书以淮南矿区潘一矿东区深井沿空留巷相应的关键科技难题——顶板灾变失稳与控制工程为例,研究成果将对沿空留巷技术在深部矿井生产中的推广应用具有重要的现实指导意义,对推动我国煤炭产业科技进步有着重要的理论意义和实践价值。

1.2 国内外研究现状

沿空留巷上覆岩层与采场上覆岩层为同一岩层,其破坏特征及活动规律与采场上覆岩层的活动规律紧密联系,但又具有其自身的特点和规律。国内外学者从采矿工程、土木工程、地质力学等学科的不同视角,借鉴采场矿山压力与岩层控制研究方法和成果对沿空留巷矿压显现特征、覆岩活动规律、围岩控制理论与支护技术及工艺装备等方面进行了有益的探索和实践。

1.2.1 采场上覆岩层活动规律研究

矿山压力假说是采矿科学发展的重要形式，是明晰矿山压力及其显现规律的有效途径。1916 年德国学者施托克(K.Stoke)提出悬臂梁假说，1928 年德国学者哈克(W.Hack)和吉里策尔(G.Gillitzer)提出压力拱假说，1950 年代苏联学者库兹涅佐夫提出铰接岩块假说，同期比利时学者 A.拉巴斯提出预成裂隙假说。1970 年代末，我国学者钱鸣高提出采场上覆岩层的“砌体梁”力学模型，为采场矿山压力与岩层控制研究奠定了基础[17-25]，并系统研究了“砌体梁”结构的“S-R”稳定条件[26]。之后利用线弹性断裂力学、岩体力学、弹塑性力学理论，将顶板视为板并分析了岩层的破断特征，提出了顶板“O-X”破坏规律[27-30]。与砌体梁学说同一时期提出的还有“传递岩梁”学说[31-35]。这些理论研究成果为探索沿空留巷覆岩活动规律创造了优越条件。

1.2.2 沿空留巷上覆岩层运动规律研究

沿空留巷的发展历程情况大致分为三个阶段[36]：第一阶段，20 世纪 50～70 年代，通过现场矿压观测描述特定地质条件下沿空留巷矿压显现特征，掌握中等稳定顶板、薄及中厚水平煤层及缓斜煤层条件的沿空留巷支护技术；第二阶段，20 世纪 70～80 年代，借鉴采场矿山压力与控制的研究理论方法，得出一些特定煤岩赋存条件下巷旁支护体力学参数计算公式，该阶段是沿空留巷矿压机理研究的初期阶段；第三阶段，20 世纪 80 年代至今，从三维和动态分析角度对沿空留巷顶板裂隙拓展演化特征及表面与深部变形规律、岩层移动与控制等方面进行了系统研究。

1.2.2.1 采场侧向基本顶破断位置

张东升等[37]采用相似材料模拟试验和数值模拟方法，研究了采场侧向基本顶破断位置与形状对沿空留巷顶板活动的影响规律。何廷峻[38]根据 MARCUS 板的简化计算法，研究采场基本顶侧向破断位置对沿空留巷顶板岩层结构形态的影响。基于专家学者们的研究成果，按照沿空留巷覆岩结构特征，可以将采场侧向基本顶破断位置划分为 4 种类型，如图 1-3 所示。

1.2.2.2 沿空留巷基本顶关键块力学模型及稳定性

借鉴采场侧向顶板矿压研究成果：在工作面推过后，采空区基本顶按断裂线形成“O-X”型破断，产生关键块 B、关键块 C，关键块 B 在工作面端头破断呈弧形，形成“基本顶关键块 B”，如图 1-4 所示。学者们将不规则的弧形基本顶关键块 B 简化成规则的基本顶三角块并视作一块薄三角板进行力学分析。侯朝炯、柏建彪、李学华[39-40]提出沿空掘巷围岩大、小结构概念，并建立沿空掘巷基本顶

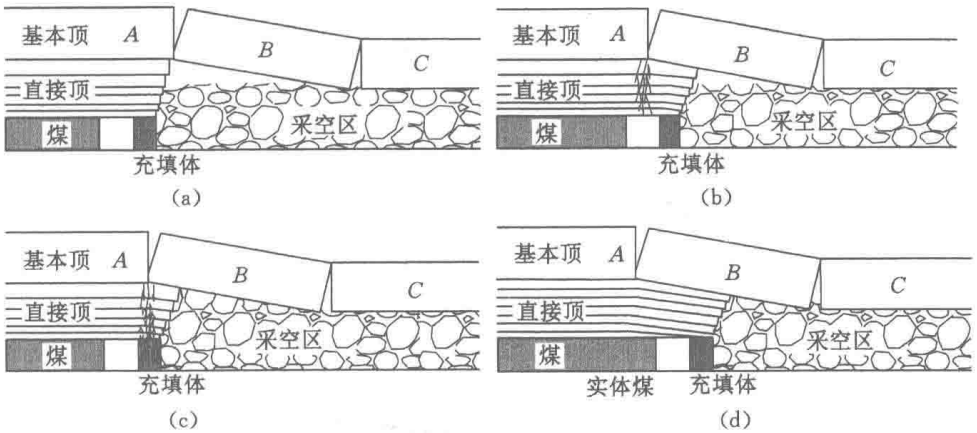


图 1-3 采场侧向基本顶破断位置

(a) 在充填体外侧断裂;(b) 在巷道上方断裂;(c) 在充填体上方断裂;(d) 在实体煤上方断裂

弧形三角块结构力学模型。李迎富、陈勇等[41-42]建立基本顶关键块结构的力学模型,明晰关键块与沿空留巷围岩相互作用机制。

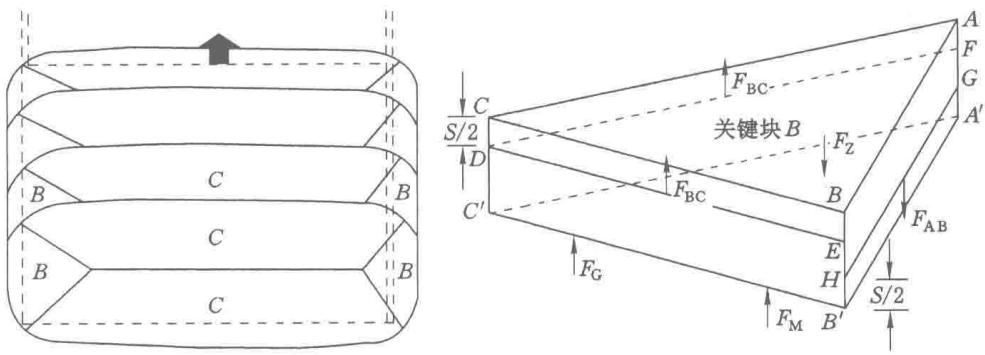


图 1-4 弧形三角块力学模型

(a) 采空区基本顶破断形态;(b) 关键块 B 力学模型

1.2.2.3 叠加层板结构力学分析

孙恒虎等[43-44]将沿空留巷顶板简化为矩形叠加层板受弯折破坏的力学模型(见图 1-5),提出顶板载荷的条带分割法,推导出顶板第一次破断和第二破断时的巷旁支护阻力计算公式。

在矩形叠加层板受弯折破坏的力学模型基础上,郭育光、黄玉诚、漆泰岳等[45-47]根据巷旁支护强度和巷旁支护材料的力学性能,建立巷旁充填体力学模型,得出充填体力学参数的计算公式。华心祝等[48]建立了考虑巷帮煤体承载作用和巷旁锚索作用的沿空留巷力学模型,由此推导出巷旁支护阻力计算公式。

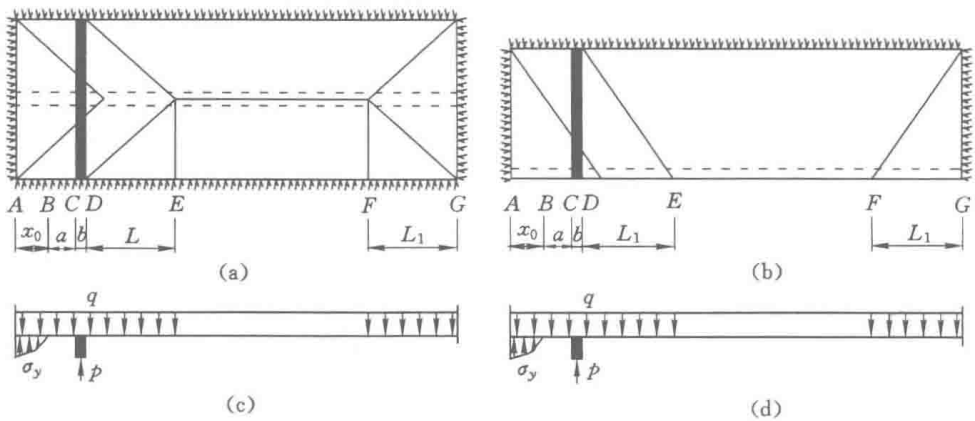


图 1-5　叠加层板力学模型

马立强等[49]在综放巷内充填原位沿空留巷技术基础上，建立综放巷内充填原位沿空留巷围岩结构力学模型，推导出顶板有关键层或无关键层两种情况下巷内充填体的支护阻力计算公式。阚甲广等[50]考虑巷帮煤体承载作用，得出 3 种典型顶板条件下沿空留巷巷旁支护阻力的计算公式。

上述科研成果为进一步探究深井沿空留巷顶板动态破坏特征及力学机制奠定了基础，下一步研究工作的重要进展将根据深井沿空留巷顶板变形破坏特性，探究采掘过程中深井沿空留巷顶板应力位移场时空演化规律及其动态破坏力学响应特征以揭示深井沿空留巷顶板致灾机理，建立其上覆岩层空间结构的整体力学模型以探明覆岩运动规律和破坏形式。

1.2.3　沿空留巷控制理论与技术研究

1.2.3.1　沿空留巷方式

目前，按照巷旁支护体在靠采空区一侧相对位置不同，可将沿空留巷划分为原位留巷、半原位留巷、巷内留巷和靠帮留巷 4 种类型[51-56]，如图 1-6 所示。

原位留巷[图 1-6(a)]的宽度与采前巷道宽度相同，但顶板支护比较困难，适用于无伪顶、岩性条件好的完整顶板；半原位留巷[图 1-6(b)]充填墙体向留巷内移近距离 Δh，留巷初始断面减小，适用于开采强度大、留巷时间长、有完善尾巷修复系统的工程条件；巷内留巷[图 1-6(c)]将充填墙体完全砌筑在留巷内，充填墙体移入巷道的距离 Δh 与墙体宽度相等，适用于岩性好且完整的顶板；靠帮留巷[图 1-6(d)]是将充填墙体预先砌筑在紧贴实体煤帮一侧，但下一工作面回采前需沿充填墙体一侧重新掘巷，适用于瓦斯储量低、煤层硬度大或厚煤层条件。

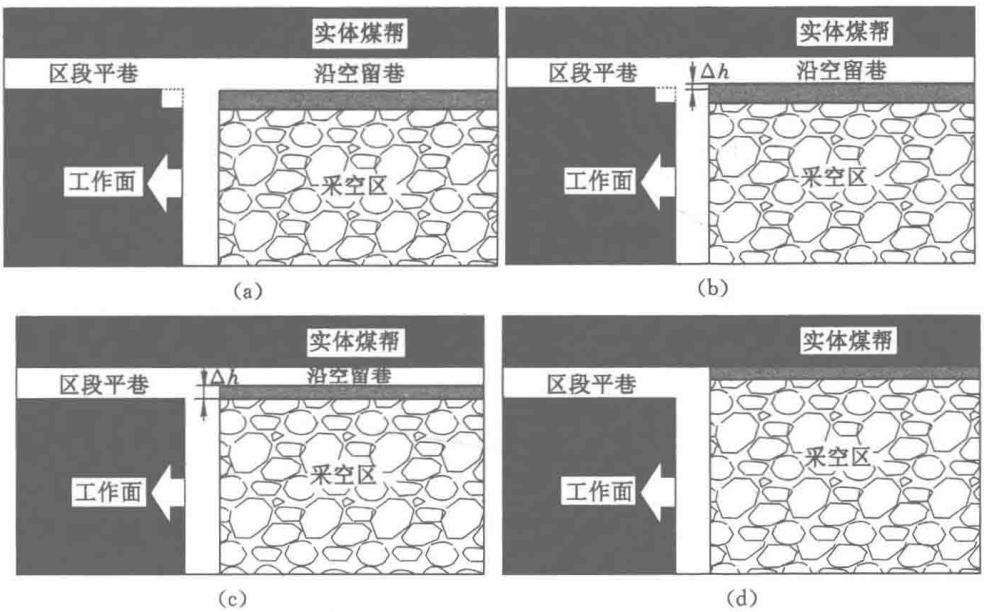


图 1-6 沿空留巷类型

(a) 原位留巷;(b) 半原位留巷;(c) 巷内留巷;(d) 靠帮留巷

1.2.3.2 巷内控制理论与支护技术

专家学者们通过现场调研实测、理论分析、相似模拟试验、数值模拟和工程实践等手段,提出多种围岩支护理论,如围岩松动圈理论[57]、联合支护理论[58]、围岩强度强化理论[59]、高预应力强力支护理论[60-61]等,为沿空留巷支护体系的发展奠定了理论基础。康红普等[62-63]探析煤巷掘进、留巷及其复用全程围岩变形破坏特征和控制方法,提出沿空留巷支护设计原则;张农等[64]基于巷旁支护系统刚度匹配原则,阐明整体强化的沿空留巷结构控制原理;华心祝等[65]建立巷帮煤体承载作用和巷旁锚索加强作用力学模型,分析巷内锚杆(索)加强支护的作用机理;薛俊华等[66]分析大采高沿空留巷矿压显现特征,提出围岩分位控制新技术;谢生荣等[67]探究深部大采高沿空留巷围岩结构沉降破坏规律,提出钢管混凝土组合支架巷旁支护新方法。陈勇等[68]分析巷内支护与围岩变形、应力分布的关系,揭示沿空留巷巷内支护机理。姜鹏飞等[69]分析不同工作面回采阶段沿空留巷围岩、充填墙体及煤柱中的应力、变形分布特征,提出沿空留巷合理的支护对策。

1.2.3.3 巷旁控制理论与支护技术

(1) 巷旁支护原理与技术。

在几十年的研究应用中,巷旁充填经历了密集支架、矸石堆垛、预制块砌墙、构筑充填墙体和巷旁墩柱等的发展过程,沿空留巷巷旁支护技术见表 1-1。

表 1-1　　沿空留巷巷旁支护技术

巷旁支护	支护材料	施工速度	承载能力	隔离效果	技术缺陷
密集支柱	单体柱	慢	弱	差	承载效果差
矸石堆垛	矸石	慢	弱	差	不能及时支撑顶板
预制块砌墙	混凝土砌块	较快	较强	较好	墙体接顶效果差
间隔墩柱	高水材料	快	较强	差	整体效果比充填带差
充填墙体	充填材料	快	强	良好	充填技术工艺复杂

关于巷旁支护理论与技术的研究较多。谭云亮等[70]深究沿空留巷覆岩与巷旁充填体的力学作用关系，提出软硬复合层充填体支护技术。柏建彪等[71]建立巷旁膏体充填沿空留巷的力学模型，提出巷旁膏体充填的力学参数确定方法。张吉雄等[72]研究固体密实充填采煤的覆岩活动规律，阐明沿空留巷巷旁支护体的作用机理。谢文兵等[73-74]采用数值分析模型，探明基本顶断裂位置、充填体力学参数和充填方式对综放沿空留巷围岩稳定性的影响规律。唐建新等[75]提出采用普通混凝土巷旁充填与巷内锚网索联合支护＋单体液压支柱临时支护以及采空区侧用锚索加强支护的护巷方式。李化敏、涂敏[76-77]探究充填体与顶板的相互作用原理，提出巷旁支护体力学参数的控制设计原则。陈勇等[78]深究巷内支护与围岩应力位移场分布关系，阐明巷内和巷旁支护体的作用机制。韩昌良等[79]提出大采高沿空留巷巷旁复合承载结构概念，揭示巷旁结构稳定性控制原理。成云海等[80]提出一种适于煤矿沿空留巷巷旁分段承载不等强支护方法，控制充填体的侧向位移技术。沿空留巷巷旁支护工程如图 1-7 所示。

(2) 放顶卸压原理与技术。

强制切放顶卸压可以改善沿空留巷覆岩结构形态和围岩应力环境，避免采空区大面积悬顶突然垮冒对围岩产生的冲击以及采空区瓦斯大量涌出而诱发的安全事故[81-82]。专家学者们针对沿空留巷顶板稳定性控制方面已开展了大量研究工作，取得了很多研究成果。张农等[83]提出沿空留巷围岩区域应力优化技术思路，揭示了采空侧顶板预裂卸压机制。薛俊华等[84]建立 10 m 厚坚硬顶板沿空留巷放顶后覆岩结构破断力学模型，阐明了侧向悬顶结构平衡原理。陈勇等[85]分析导向孔作用，明晰了导向孔参数对浅孔爆破效果的影响。高魁等[86]探究深孔爆破应力波的传递和岩体裂隙发展规律，阐释了坚硬复合顶板沿空留巷深孔爆破卸压原理。另外，何满潮、孙晓明、张国锋等[87-90]提出切顶卸压自动成巷技术(110 工法)，切顶卸压沿空留巷技术如图 1-8 所示，在白皎煤矿、嘉阳煤矿、城郊煤矿等得到成功应用和推广。

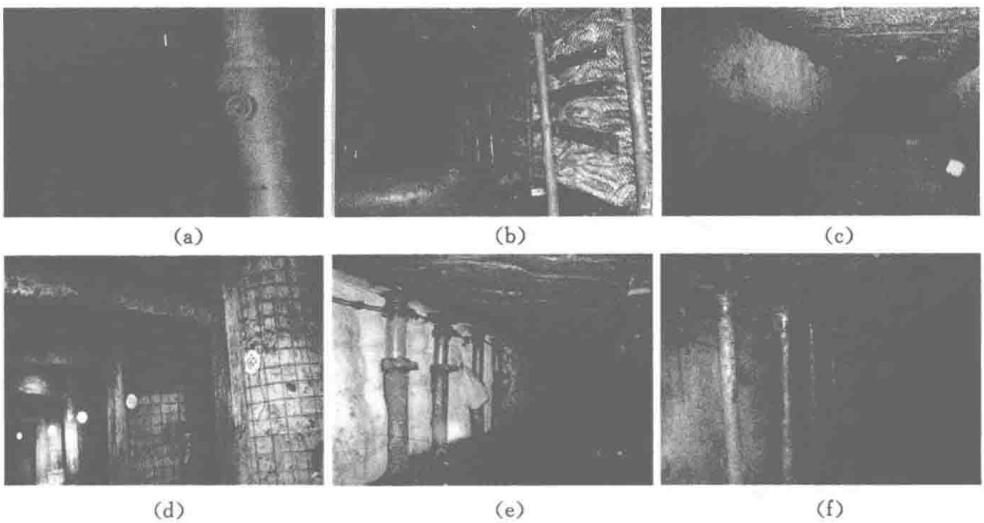


图 1-7 沿空留巷巷旁支护

(a) 密集支柱;(b) 矸石袋堆垛;(c) 预制混凝土砌块;(d) 墩柱;
(e) 柔性膜充填;(f) 钢模板支架充填

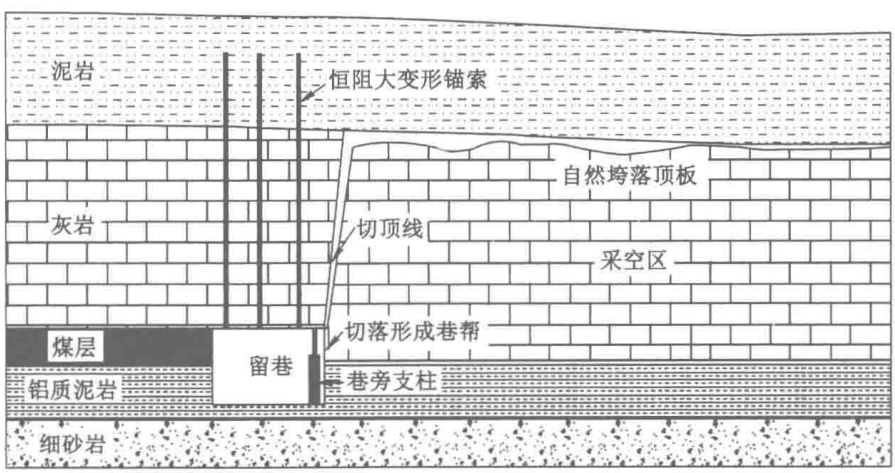


图 1-8 切顶卸压沿空留巷技术

1.3 主要研究内容

(1) 深井沿空留巷矿压显现特征及顶板致灾机理。

现场调查研究深井沿空留巷矿压显现几何位态、严重程度及发生动态过程,对顶板破坏形式进行归纳分类;分析顶板岩层物理力学性质及宏观、细观结构特

征，划分覆岩结构类型；研究深井沿空留巷顶板岩层破断过程以及不同阶段覆岩裂隙扩展演化规律，探明顶板破坏不对称性分布规律及不同类型严重变形破坏程度和区位特征；研究采掘进程不同阶段围岩体塑性区、应力场和位移场分布与演化规律，阐明深井沿空留巷顶板致灾机理并明晰顶板灾变失稳的关键因素。

（2）深井沿空留巷上覆岩层运动形式及力学作用机制。

分类并建立深井沿空留巷顶板离层力学模型，揭示其顶板离层形成机制；构建切放顶沿空留巷上覆岩层结构力学模型，深究采动条件下基本顶短悬臂岩梁结构的互馈力学行为，获得上覆厚层坚硬顶板失稳的准则与判据，并分析影响基本顶短悬臂岩梁结构形态的关键因素。

（3）深井沿空留巷顶板岩层控制机理与技术。

提出深井沿空留巷顶板“多支护结构”控制系统和围岩分级分区支护控制技术；设计有效控制深井沿空留巷顶板在垂直与水平方向不对称变形破坏且具有水平双向恒阻功能的新型锚索桁架结构，进行桁架结构件几何力学特性分析与强度校验，明晰其对水平方向挤压-松扩不对称变形破坏双向控制作用机理。

（4）沿空留巷顶板灾变监测方法与稳定性评价系统开发。

综合运用物元概念的可拓学理论与层次分析法，构造经典域物元、节域物元和可拓集合中的关联函数，建立多层次多指标的综合评价模型，对深井沿空留巷顶板稳定性进行评价，并建立数字化综合评价系统。

（5）形成深井沿空留巷顶板及围岩体的科学化控制系统，并将相关理论成果进行现场应用和验证，研究成果汇集和总结。