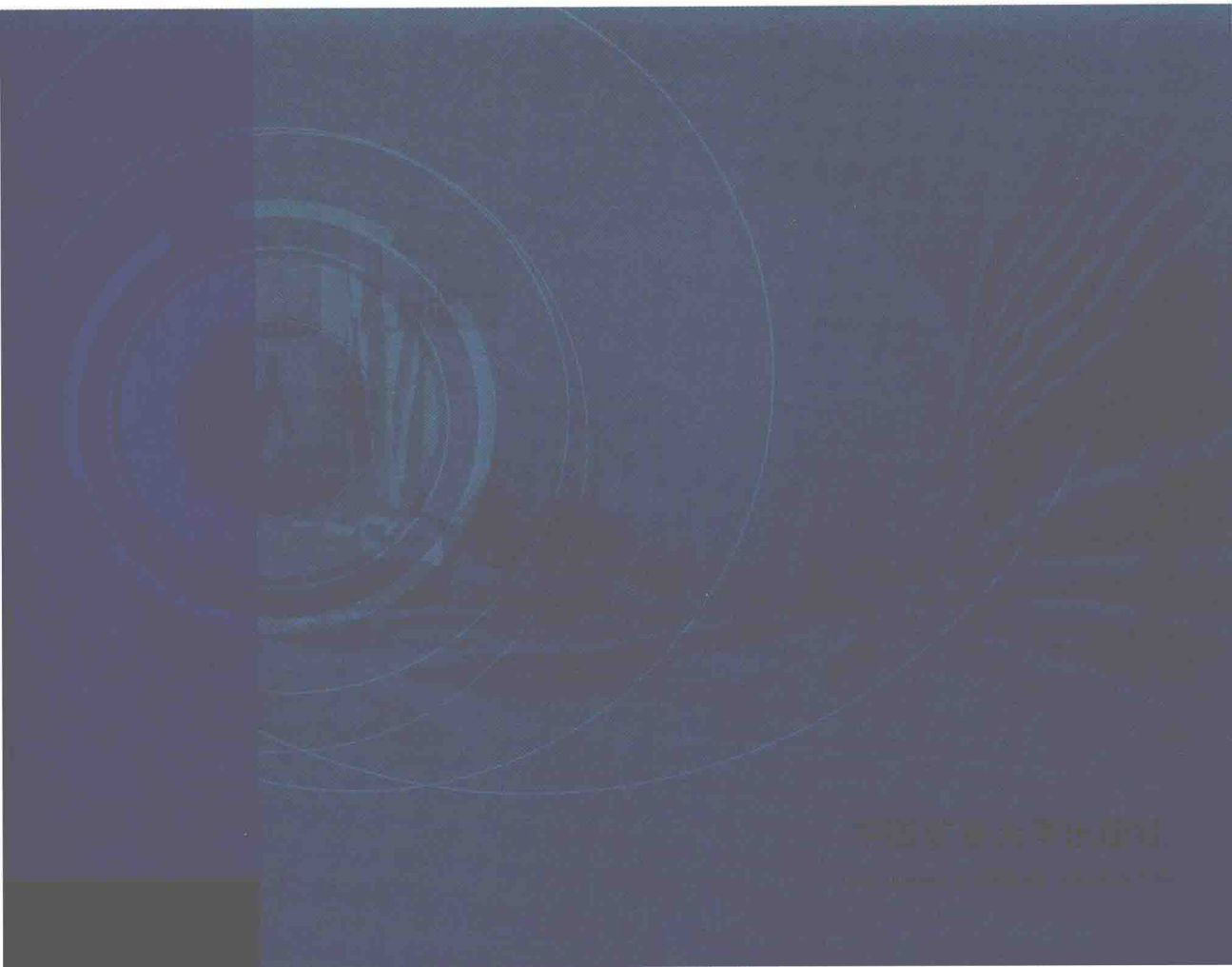
Caikongce Hangdao Bianxing Jili Jiqi Kongzhi Jishu Yanjiu

采空侧巷道

变形机理及其控制技术研究

朱建明 靳苏平 吴吉南 石建军 彭瑞 李家稳 / 著



采空侧巷道变形机理及其控制技术研究

朱建明　靳苏平　吴吉南
石建军　彭　瑞　李家稳　著



中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书以潞安王庄煤矿、余吾煤业和中煤平朔安家岭露天煤矿等矿井为工程背景，以典型的采空侧巷道如窄煤柱沿空掘巷、沿空留巷、双侧采空的巷道、露井联合开采影响下的露天边坡下大巷围岩控制等技术难题为出发点，进行分类研究，采用现场调查、室内试验、理论分析、数值模拟计算以及方案实施效果观测等综合手段，提出了采空侧巷道围岩存在大小结构稳定性问题，以及主次承载圈围岩控制理论和支护技术。本书对指导采空侧巷道特别是煤层巷道布置及其支护技术，实现采空侧巷道围岩的安全稳定，具有十分重要的理论意义和工程应用价值。

本书是一部系统研究如何解决采空侧巷道布置与支护设计等技术难题的专著，研究内容丰富，实践性强，可供采矿、地质、安全、地下工程等相关专业的工程技术人员、科研人员和高校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

采空侧巷道变形机理及其控制技术研究 / 朱建明等著. — 徐州 : 中国矿业大学出版社，2018.12

ISBN 978-7-5646-4196-2

Ⅰ. ①采… Ⅱ. ①朱… Ⅲ. ①采空区－巷道变形－围岩控制 Ⅳ. ①TD322

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第291460号

书　　名　采空侧巷道变形机理及其控制技术研究
著　　者　朱建明　靳苏平　吴吉南　石建军　彭瑞　李家稳
责任编辑　杨　洋
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　江苏淮阴新华印刷厂
开　　本　787×1092　1/16　**印张** 13.25　**字数** 330 千字
版次印次　2018 年 12 月第 1 版　2018 年 12 月第 1 次印刷
定　　价　75.00 元

（图书出现印装质量问题，本社负责调换）

前　言

采空侧巷道主要指巷道处在单侧和双侧采空区附近或边缘的巷道。采空侧巷道与地下开采相辅相成，但随着近年来我国机械化程度的大幅提高，出现了越来越多的大型和特大型矿井，这些矿井的一个显著特点就是出现了大量的煤层巷道。如以前布置在岩石中的开拓巷道、准备巷道以及一些集中巷均呈现向煤层中布置的趋势，而且这种趋势还在继续发展，许多矿井除了井筒等必需的岩石巷道外，均采用煤层布置巷道。出现这样大规模的煤层巷道，不仅可以大大节约巷道掘进成本，同时还能解决长期困扰矿山开采的采掘平衡问题，从而极大提高了矿山开采效率，使千万吨井工矿开采成为可能。

众所周知，煤的强度要远低于岩石强度，煤层巷道抵抗开采影响的程度也远不及岩石巷道。许多大型矿井的开采实践表明，由于人们在布置上述煤层大巷过程中没有认识到上述问题，许多还沿用以前岩石大巷或部分采区巷道的方法留设保护煤柱，结果导致许多布置在煤层中的开拓大巷或盘区大巷等均出现了不同程度的围岩变形、巷道底鼓等现象，导致这些巷道不得不进行二次或多次返修，给矿山生产带来了诸多不便，甚至出现许多安全隐患。课题组针对上述矿井生产中出现的技术问题，以潞安王庄煤矿、余吾煤业和中煤平朔安家岭露天煤矿等矿井为工程背景，以典型的采空侧巷道如窄煤柱沿空掘巷、沿空留巷、双侧采空的巷道、露井联合开采影响下的露天边坡下大巷围岩控制等技术难题为出发点，进行分类研究，采用现场调查、室内试验、理论分析、数值模拟计算以及方案实施效果观测等综合手段，解决了上述生产中出现的关键技术问题，取得了很好的经济效益和社会效果。

在编写本书过程中得到了中国矿业大学马占国教授和徐金海教授、北京科技大学高谦教授、中国矿业大学(北京)左建平教授的指导和帮助，同时潞安集团王庄煤矿、余吾煤业公司和中煤平朔安太堡露天矿等单位领导和技术人员对本书的部分研究工作提供了帮助和指导，在此一并表示衷心感谢，并对课题组冯锦艳博士、周保精博士，硕士研究生彭新坡、马中文、江汪龙、侯跃华、李会明、刘海雁、韩汉、张鹏举、任瑞乐等付出的辛勤劳动表示由衷的谢意。同时，本书的研究工作参考了相关的项目研究报告以及文献资料，在此谨向其他科研人员

和文献作者表示衷心的感谢。此外，本书的出版得到了河北省自然基金面上项目(E2017508085)和华北科技学院矿业工程学科基金的资助以及中国矿业大学出版社编辑的帮助，一并表示感谢。

采空侧巷道围岩变形机理及控制技术研究一直是采矿工程中的一个研究热点和难点，本书研究得还不够全面，特别是具有冲击地压矿井的采空侧巷道、受采动影响的一些特殊巷道如卸压巷道、瓦斯抽采巷道和受跨采影响的巷道等。由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。希望本书的出版能够起到抛砖引玉的作用，为实现我国煤炭工业的安全高效生产做些贡献。

作者

2018 年 10 月

目　录

1　绪论 …… 1
1.1　研究背景及意义 …… 1
1.2　国内外研究现状 …… 2
1.3　采空侧巷道布置应用现状及存在的问题 …… 6
1.4　研究思路 …… 7

2　采空侧巷道围岩变形机理与控制理论研究 …… 8
2.1　采空侧巷道围岩变形机理研究 …… 8
2.2　采空侧巷道围岩控制理论 …… 12
2.3　采空侧底鼓巷道围岩控制理论 …… 19
2.4　本章小结 …… 23

3　综放开采沿空掘巷围岩变形机理及其控制技术 …… 24
3.1　综放开采沿空掘巷力学特性 …… 24
3.2　综放开采沿空掘巷大、小结构概念 …… 25
3.3　大采高综放工作面概况 …… 26
3.4　综放开采沿空掘巷围岩大、小结构稳定特征 …… 28
3.5　沿空掘巷窄煤柱围岩支护方案设计 …… 34
3.6　锚杆支护下沿空掘巷窄煤柱围岩支护实施效果分析 …… 36
3.7　单侧注浆加固下沿空掘巷窄煤柱围岩支护实施效果分析 …… 42
3.8　双侧注浆加固下沿空掘巷窄煤柱围岩支护实施效果分析 …… 49
3.9　三种支护方式下沿空掘巷窄煤柱围岩变形对比分析 …… 54
3.10　本章小结 …… 58

4　双侧采空区巷道底鼓变形机理及控制技术研究 …… 59
4.1　双侧采空区巷道地质条件及巷道底鼓变形特征 …… 59
4.2　影响北风井西翼大巷底鼓的主要因素 …… 64
4.3　单侧采动影响下大巷变形与工作面停采线位置关系分析 …… 67
4.4　双侧采动影响下大巷变形与工作面停采线位置关系分析 …… 72
4.5　双侧采动影响巷道围岩支护参数确定 …… 78
4.6　双侧采空区底鼓巷道支护对策 …… 81
4.7　本章小结 …… 86

5 露采边坡下大巷变形破坏机理及治理对策研究 …… 87
5.1 露井联采工程背景分析 …… 87
5.2 露井联采巷道布置特征 …… 89
5.3 工作面开采对边坡下大巷影响分析 …… 91
5.4 边坡下大巷围岩受回采影响后深部离层破坏特征分析 …… 96
5.5 边坡下大巷受采动影响后围岩变形破坏机理分析 …… 103
5.6 边坡下大巷变形治理对策研究 …… 105
5.7 本章小结 …… 119

6 无巷旁充填支护沿空留巷围岩控制研究 …… 120
6.1 沿空留巷围岩控制理论 …… 120
6.2 沿空留巷围岩控制技术 …… 125
6.3 工程背景分析 …… 130
6.4 沿空留巷支护设计 …… 131
6.5 巷道使用效果观测分析 …… 134
6.6 本章小结 …… 148

7 超大断面巷道围岩控制技术研究 …… 149
7.1 超大断面巷道围岩变形特征 …… 149
7.2 超大断面围岩控制技术 …… 150
7.3 超大断面巷道控制效果分析 …… 155
7.4 本章小结 …… 157

8 陷落柱区域巷道掘进与支护对策研究 …… 159
8.1 陷落柱主要地质特征及其危害 …… 159
8.2 陷落柱对采掘工程的影响 …… 160
8.3 陷落柱影响大巷变形机理研究 …… 163
8.4 受陷落柱影响大巷的支护对策 …… 164
8.5 本章小结 …… 167

9 小窑影响区域巷道支护准则及其技术研究 …… 169
9.1 小窑影响区域分布情况分析 …… 169
9.2 小窑影响区域巷道掘进遇到的主要困难 …… 172
9.3 小窑影响区域采空区围岩失稳机制分析 …… 172
9.4 小窑影响区域巷道掘进的主要原则 …… 173
9.5 小窑区域巷道掘进超前探孔技术 …… 173
9.6 小窑影响区域巷道掘进支护技术 …… 175
9.7 本章小结 …… 183

10　孤岛区域采场巷道变形机理及支护技术研究 …… 184
10.1　工程背景分析 …… 184
10.2　孤岛区域采场巷道围岩变形破坏机理 …… 186
10.3　孤岛区域采场巷道支护理论及关键技术研究 …… 191
10.4　孤岛区域典型试验段巷道效果分析 …… 193
10.5　本章小结 …… 196

参考文献 …… 197

1 绪论

1.1 研究背景及意义

能源关系着国计民生，而作为一个石油和天然气资源相对匮乏的国家，我国的能源需求长期依赖于煤炭开采[1-2]。据统计，2016 年我国煤炭产量达到 33.64 亿 t，位居世界第一，约为美国当年煤炭产量(7.39 亿 t)的 4.55 倍。国家经济发展对煤炭资源的需求逐年增加，导致矿井的开采强度越来越大，进而给煤炭开采带来了诸多技术难题，如开采引起的巷道围岩强烈变形破坏、采场覆岩破断运移及工作面矿压显现复杂难探、冲击地压防治不成熟、瓦斯爆炸、透水问题等时有发生，严重制约着矿井的安全高效生产。在诸多技术难题中，采空侧巷道维护难度大成为各大矿区面临的最主要问题之一。采空侧巷道维护涉及顶板、煤柱、底板管理等诸多方面。由于顶板垮落或煤柱破坏失稳将直接造成人员伤亡或井下设备损坏，严重影响工作面正常推进，因此，顶板管理和煤柱设计始终是采空侧巷道围岩稳定的研究重点。近 20 年，随着矿井生产地质条件的恶化，采空侧巷道矿压问题逐渐显现，部分矿井采空侧巷道强烈底鼓甚至导致采空侧巷道闭合、回采工作面废弃，因此，采空侧巷道围岩控制问题逐渐引起了专家学者的注意。

采空侧巷道主要指巷道处在单侧和双侧采空区附近或边缘的巷道。采空侧巷道的形成主要是由不同开采方法决定的，有的为了防止采空区瓦斯涌入或者支撑和阻隔采空区设置一定宽度的煤柱，即窄煤柱沿空掘巷；有的矿井在条件允许的情况下(如煤层厚度一般在 4 m以下)在采空侧不留煤柱，采用无煤柱沿空留巷；有的矿区采用露井联合开采，在露天边坡下布置开采工作面巷道，这样巷道受到露天边坡临空面和地下采空区的多重影响；有的矿井遇到小窑采空区，为了布置工作面需要穿越上述采空区，这样巷道也受到已有采空区和巷道掘进引起的动压等相互作用；还有的如孤岛工作面，受到周围多重开采引起的应力场叠加影响等。由此可见，上述采空侧巷道布置与不同的开采方法紧密相关，但是上述采空侧巷道的变形破坏情况均主要取决于应力环境和围岩(煤岩)强度，因此上述不同巷道变形情况不尽相同。部分巷道围岩变形量小，并不会对煤炭开采造成直接影响；但有的巷道围岩变形强烈，导致巷道断面缩小，行人、通风困难。上述采空侧巷道围岩均不同程度地经历了动压影响，应力状况最为复杂，围岩变形破坏十分普遍[3-4]。其中受多次影响的采空侧巷道、沿空巷道等特殊条件下的回采巷道围岩变形问题尤其严重。如潞安矿区近年来在大规模开采 3# 煤层中常采用的窄煤柱沿空掘巷、高位瓦斯巷等，由于巷道经历多次采动影响，发生局部冒顶、片帮、强烈底鼓等问题，严重影响工作面的推进速度，因此，亟须开展采空侧巷道的围岩变形机理及控制技术的研究。

长期以来，国内外众多专家学者对此类巷道围岩变形机理与控制技术做了大量的研究

工作，取得了一批重要的理论研究成果。一般主要采用连续介质力学理论建立巷道围岩变形力学模型，或基于现场实测和数值计算，研究原岩应力和工作面超前支承压力作用下巷道围岩的变形破坏规律，进而归纳得出巷道围岩的变形机理，但目前系统研究采空侧巷道围岩变形机理及其控制技术的研究成果较少。事实上，采空侧巷道受一次动压影响的巷道变形机理和受多次复合采动影响的煤柱内沿空巷道围岩变形机理既有联系又有显著差异，两者的主要影响因素都包括原岩及采动应力、围岩强度、长时加载弱化效应等，两者的主要区别在于应力环境差异较大，受多次采动影响的巷道，底板变形破坏范围更大、过程更复杂、控制难度更大。因此，本书在前人研究的基础上，结合不同开采方法下采空侧巷道布置特点，研究上述采空侧巷道围岩变形机理和支护技术，综合采用理论分析、数值计算、实验室试验、工程实践等多种研究手段，研究影响采空侧巷道变形的主要因素及其变形破坏过程，揭示采空侧巷道围岩变形机理，提出不同开采方法时采空侧巷道围岩变形机理和控制技术，从而实现减小围岩变形和促进工作面快速推进的研究目标。

1.2 国内外研究现状

国内外专家学者近年来对采空侧巷道围岩多次加卸载下的岩体力学特征、围岩变形机理、围岩支护技术等多方面进行了深入分析，借助岩石力学测试、力学模型、数值计算、相似模拟、现场试验等多种研究手段，得到了一大批采动侧巷道围岩变形机理与控制技术的研究成果。

1.2.1 多次加卸载下岩体力学特性的研究现状

在煤炭开采中，采空侧巷道围岩具有围岩加卸载作用和轴向加载作用特征。目前我国煤炭开采方法有多种，如长壁开采、短壁开采、充填开采、放顶煤开采、保护层开采、无煤柱开采、露井联合开采等。不同的开采方式，造成采煤工作面煤层及周围顶底板围岩的受力情况不同，进而影响采空侧巷道及工作面围岩的支护措施和稳定性。谢和平院士等[5]系统总结了三种开采方式下（保护层开采、放顶煤开采、无煤柱开采）工作面前方支承压力分布规律的共性特征，即随着工作面的推进，作用在工作面前方的支承压力由原岩应力状态开始增大，环向应力逐渐降低，当峰值应力超过煤岩体极限强度后，支承压力逐渐减小至残余强度，形成一个动态演化过程。将支承压力的概念用于分析工作面前方煤岩单元体因采动而引起的应力状态，提炼出无煤柱开采、放顶煤开采和保护层开采三种典型开采条件下采动应力特征如图 1-1 所示。

分析上述采空侧巷道围岩主要特点就是受到多次采动应力的叠加影响，因此国内外专家模拟了上述巷道围岩的受力特点，对其围岩开展了循环加卸载条件下的加载破坏试验。

国外在岩石加卸载方面的试验研究主要有：Yoshinaka 等[6]对 Ohya 凝灰岩、Yokohama 砂泥岩、Kobe 泥岩和砂岩进行循环加卸载试验，分析了 4 种软岩的变形行为和剪胀特性，发现变形模量与塑性应变呈指数关系，且给出了描述内摩擦角和剪胀角与塑性应变的关系模型。Bagde 和 Petroš[7]对砂岩进行单轴循环加卸载试验，研究了加载频率对力学参数的影响，认为弹性模量、割线模量、单轴抗压强度随着加载频率的增大而增大。国内在岩石加卸载试验研究主要有：葛修润院士[8-9]开展了循环荷载作用下岩石的变形和强度特

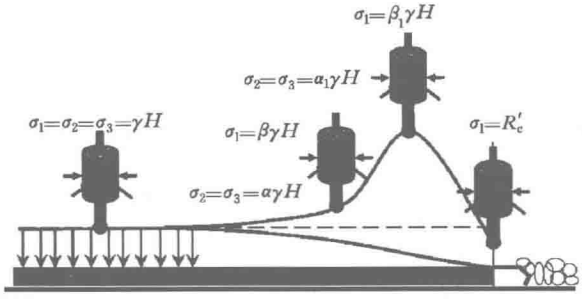


图 1-1 不同开采方式下工作面前方煤岩体的应力环境

性研究，探讨了应力水平对岩石不可逆变形的影响，认为不可逆变形随着循环次数的增加而呈现急剧增长趋势，是岩石发生破坏的前兆；之后对砂岩、大理岩和花岗岩进行了周期循环荷载作用下的批量试验，认为岩石轴向不可逆的累积变形最终导致岩石破坏。对大理岩、粉砂岩和煤进行三轴卸围压试验，发现岩石在轴向压缩过程中吸收能量，但是在卸围压时释放能量。Huang 等[10]采用三轴卸围压试验模拟隧道开挖中围岩的变形破坏特征，结果表明，卸围压条件下岩石的弹性模量比常规加载下的小。He 等[11]研究了灰岩在卸围压条件下的声发射特征，发现卸围压起始时到试样发生破坏时声发射累积能量迅速升高。Yang 等[12]对红砂岩进行常规三轴和卸围压试验，结果表明，在同一初始围压下，卸围压条件下的峰值应变比常规三轴压缩下的大；常规三轴压缩下，红砂岩的破坏模式为剪切破坏，卸围压条件下砂岩的破坏比较复杂，呈现不稳定破坏特征。

在卸围压下岩石破坏的主要特征研究主要有：对大理岩、粉砂岩和煤进行三轴卸围压试验，发现岩石在轴向压缩过程中吸收能量，但是在卸围压时释放能量。关于卸荷下花岗岩的破坏力学行为研究，任建喜等[13]、黄润秋和黄达[14]、李地元等[15]分别对花岗岩进行三轴卸围压试验，研究了卸围压过程中花岗岩的裂纹演化 CT 识别、力学特性、破坏形态及能量演化规律，结果表明卸围压下花岗岩的破坏更具有突发性，卸荷过程中变形模量逐渐减小，泊松比逐渐增大，卸围压条件下花岗岩的张拉破坏更明显。在大理岩的卸荷破坏力学研究方面，张黎明等[16]、李新平等[17]、丛宇等[18]分别研究了大理岩卸围压过程中的声发射、强度及能量演化特征，发现卸围压时声发射振铃计数在扩容点后迅速增加，大理岩的内聚力降低，内摩擦角升高。在砂岩的卸荷破坏力学方面，李建林和王乐华[19]研究了卸围压条件下砂岩的变形与强度特征，试验发现卸围压条件下岩石的强度在低围压下高于加载破坏强度，高围压下低于加载破坏强度；卸围压过程中，岩石的变形模量随围压的降低而逐渐减小。

1.2.2 采空侧巷道围岩变形破坏机理研究现状

1.2.2.1 巷道围岩变形研究理论基础

（1）弹塑性理论

20 世纪 30 年代，Fenner 最先提出了硐室开挖的极限平衡弹塑性理论。随后 H.Kastner在 Fenner 公式的基础上进行了修正，提出了 H.Kastner 公式，用来计算在假设体积不变的条件下岩体破坏特性的曲线。在当时能够解释很多地下硐室破坏变形特征，该公式得到了一定的推广，成为后来新奥法的经典力学基础[20]。随着后来学者对巷道变形理论

的深入研究，发现理想状态下的弹塑性理论模型并不能解释日益复杂的巷道变形破坏形式。葛树高、于学馥等[21]学者提出了在进行弹塑性模型的计算时，应考虑到岩石的应变软化特性，用来提高围岩应力分析结果的可靠性；刘夕才、林韵梅[22]等学者基于 Mohr-Coulomb 屈服准则分析了轴对称软岩巷道的变形规律，舍弃了围岩塑性区体积不变的假设，并对岩石的扩容性进行了描述；姚国圣、李镜培[23]等学者在考虑岩体扩容和塑性软化特性的基础上，将扩容梯度及软化模量的概念引进理论求解当中，推导出了更为全面和详细的软岩应力应变问题解析解。

（2）流变理论

20 世纪 80 年代，陈宗基[24]将流变力学理论引入到岩石力学当中，提出了岩石的封闭应力、蠕变性和扩容性，并建立其本构方程；刘夕才[25]基于巷道轴对称基本方程和 Maxwell 流变模型，推导出了软岩巷道的线性及非线性黏弹性解；万志军[26]等学者通过大量的岩块进行实验室流变试验，建立了巷道围岩非线性力学模型，并进行了验证；随后一段时期，关于岩石流变相关理论研究日益丰富，考虑岩石软化、流变、扩容、损伤等的围岩力学模型相继被提出[27-30]。

（3）松动圈理论

1994 年董方庭等提出了围岩松动圈支护理论[31]，该理论认为地应力与围岩的相互作用导致围岩松动圈的大小不一；松动圈的范围越大，支护的难度越大；围岩松动圈在其发展过程中产生的碎胀变形直接影响了巷道围岩的变形破坏。随后，围岩松动圈理论被应用到深井、隧道、爆破等领域[32-33]。

（4）非线性大变形理论

20 世纪末，随着工业化进程的加快，世界各大矿井的深度逐步延伸，关于深部矿井硐室围岩变形机理的研究越来越多。A.Lionco 和 A.Assis[34]对将非线性理论引入到经典弹性力学模型，将常数弹性模型以函数的形式替代，探讨了开采深度与弹性模型的相关关系，并建立了深部围岩体的非线性大变形力学模型；何满潮等[35-36]将大变形力学理论引入到工程地质学，通过对深井软岩变形力学变形机制的研究，提出了新的深部软岩非线性大变形理论，该理论指出工程软岩的定义及分类、深部矿井围岩的软化时机及特征等。

（5）围岩分区破裂化理论

针对传统的连续介质弹塑性理论未能有效地解释巷道破坏区和过渡区的新现象，有关学者开始研究探讨围岩的分区特征。钱七虎等[37]学者在国外研究的基础上，揭示了产生分区破裂化现象的相关条件，并对其主要特征参数和变化规律进行归纳总结；贺永年、韩立军等[38]基于分区破裂化理论提出巷道围岩的稳定是一种结构效应，并非仅是应力极限平衡问题。高富强、康红普等[39]利用 FLAC 数值模拟软件对深部分区破裂进行模拟，分析了巷道分区破裂的产生及演化过程。

1.2.2.2 采空侧巷道围岩变形机理研究

秦忠诚等[40]研究了煤层开采过程中形成的超前支承压力不但会对本煤层巷道产生影响，而且也会对底板岩层以及巷道造成一定的影响。经过分析得出产生影响的大小与两个因素有关：一方面是与底板巷道受到的采动影响压力的大小、分布范围和作用时间的长短有关；另一方面是与巷道围岩的自身稳定性有关，包括围岩的完整性和岩性、强度以及承受压

力的能力大小。

缪协兴等[41]根据关键层理论，研究动压巷道矿压演化规律和巷道围岩控制技术，对回采时工作面侧向支承压力分布及巷道围岩弹塑性区分布进行了深入研究。

朱术云等[42]根据矿山压力理论，建立煤层底板应力力学模型，计算回采时工作面底板任意位置的应力解析解，得出煤层底板垂直应力和水平应力在不同深度范围内变化规律情况；并利用超声成像技术和钻孔应变感应法进行综合实测，对采集的数据资料进行整理分析，确定工作面采动底板扰动深度和支撑力的影响范围。

顾士亮[43]借助理论分析、数值模拟研究巷道围岩力学效应、围岩弹塑性区以及变形与支承压力的相互关系，分析巷道变形特征与破碎围岩支护的相互作用关系，提出深部巷道围岩控制原理。

陆士良等[44]根据采动影响下巷道变形特征提出“深表比”的概念，研究巷道深表比与采动影响前后的作用关系。

尹光志等[45]对工作面回采过程中的围岩体损伤破坏机理进行理论研究，建立蠕变损伤模型，研究采动影响下煤层顶底板岩体破坏规律，借助工程实践对研究成果加以验证。

陈建功等[46]考虑开挖时巷道围岩的力学作用，将围岩松动区分为破碎区和塑性软化区。依据弹性力学理论，求得弹性应力场、位移场、破碎区半径解析解，并通过现场实际监测对理论成果进行验证。

总结受采动影响的巷道一般均变形量大、变形形式复杂，尤其围岩强度低的巷道，其稳定性更难控制。因此，对这类巷道进行支护可以归纳为三种方法——加固法、卸压法和联合法。

（1）加固法

巷道支护的目的就是加固围岩，控制围岩变形，使其保持稳定。加固手段分为主动支护和被动支护两大类。主动支护主要有锚、喷、网联合支护，可缩性U形棚，锚索，注浆，锚注等；被动支护主要是金属架棚支护。

（2）卸压法

卸压法是高应力软岩巷道围岩稳定性控制的一种主要方法，尤其在底鼓较强烈的软岩巷道中效果明显。国内外使用的卸压法包括底板切缝、两帮切缝、钻孔、松动爆破、卸压煤柱及卸压巷道等。

（3）联合法

对于一些受采动影响大的巷道，特别是受动压影响的采准巷道，仅使用一种支护方式很难控制巷道的变形破坏，在这种情况下，综合应用上述方法维护巷道稳定，尤其采用联合支护技术、锚喷＋注浆＋锚索、锚杆＋网＋锚索、U形棚＋锚杆等，但联合支护方式一般费用较高。

上述是一般受采动影响巷道的支护方法，但遇到特殊情况还需要深入研究，区别对待。

1.2.3 采空侧巷道围岩控制技术研究

国内外学者对采空侧巷道围岩变形控制技术做了相关研究，在大量使用锚杆支护的基础上，随着注浆加固理论及技术的蓬勃兴起，注浆加固技术作为在此类巷道支护中的应用逐渐得到推广。郭建平[47]分析了坚硬顶板条件下强动压巷道掘进和回采时期的变形特征，并对大巷变形破坏机理进行分析，针对原支护强度和刚度不足的问题，提出了加强深部支护和

顶板卸压处理的支护方案，并取得了很好的治理效果。

1.3 采空侧巷道布置应用现状及存在的问题

采空侧巷道与地下开采相辅相成，但随着近年来我国机械化程度的大幅提高，出现了越来越多的大型和特大型矿井，这些矿井的一个显著特点就是出现了大量的煤层巷道，以前布置在岩石中的开拓巷道、准备巷道，以及一些集中巷均呈现向煤层中布置的趋势，而且这种趋势还在继续发展，许多矿井除了井筒等必需的岩石巷道外，均采用煤层布置。出现这样大规模的煤层巷道，其优点是显而易见的，它不仅大大节约了成本，而且还解决了长期困扰矿山开采的采掘平衡问题，从而极大提高了矿山开采效率，使千万吨或几千万吨的井工矿成为可能。

众所周知，煤强度要远低于岩石强度，煤层巷道抵抗开采影响的程度也远不及岩石巷道，许多大型矿井的开采实践表明，由于人们留设上述煤层大巷时没有认识到上述问题，许多还沿用以前岩石大巷或部分采区巷道的方法留设保护煤柱，结果导致许多布置在煤层中的开拓大巷或盘区大巷等均不同程度地出现了围岩变形、巷道底鼓，这些矿井不得不对这些巷道进行二次或多次返修，给矿山生产带来了诸多不便，甚至出现许多安全隐患，为了区别不同类型的采空侧巷道及其变形机理和支护技术，这里将上述采空侧巷道进行了适当分类研究。

我国煤层条件赋存多样，导致了采空侧巷道存在多种形式：一是从分析工作面与区段巷道布置角度进行分析；二是从开拓大巷与工作面空间关系角度进行分析；三是从已有采空区等特殊地质条件下布置巷道进行分析。

1.3.1 工作面与区段巷道布置问题

目前我国主要以长壁开采体系为主，在该体系下采空侧巷道布置主要以单巷、双巷或多巷布置为主，而巷道布置方式又主要有沿空掘巷和沿空留巷两种形式。

沿空掘巷一般布置在相邻采空区边界外 3～8 m，作为本工作面的回采巷道，以提高煤炭资源回收同时减缓巷道矿压显现，其中要以厚煤层中采用的留设窄煤柱沿空掘巷较为困难，沿空掘巷的关键问题在于留设煤柱稳定性。目前国内要以潞安集团开采 3# 厚煤层采用的窄煤柱沿空掘巷较为成功。

而沿空留巷是指通过合理的巷内支护和巷旁支护技术，沿采空区边缘将本区段工作面一条回采巷道保留下来，实现相邻区段工作面复用的无煤柱连续开采回采巷道布置方式。沿空留巷不同于普通回采巷道，工作面回采后通常需要在采空区边缘（充填区域）构筑一定宽度的巷旁充填体将巷道保留下来，沿空留巷充填区域顶板是采空区构筑的巷旁充填体上方顶板，该区域顶板（主要是直接顶或者顶煤）起到向下传递基本顶的载荷及旋转作用、向上传递充填体对基本顶的支撑作用。由于受工作面超前支承应力的加卸载作用、工作面液压支架反复支撑作用，充填区域直接顶出现强度衰减和剪胀变形，而巷旁充填体往往出现接顶不实以及直接顶与基本顶之间的较大离层，致使无法传递巷旁充填体支护阻力、顶板回转下沉量大，从而造成沿空留巷顶板和巷旁充填体严重破坏，沿空留巷无法成功。因此，充填区域直接顶的稳定对沿空留巷成功实施有重要影响。

1.3.2 开拓大巷与工作面空间之间的布置问题

除了上述壁式体系开采，目前在一些矿井开拓大巷布置过程中也不可避免地受到开采的影响。例如许多近水平煤层在采用盘区或带区开采过程中，大巷两翼开采时经常会受到来自工作面回采带来的采动影响，甚至导致大巷变形破坏影响整个盘区或区域的开采，因此分析确定单翼或双翼开采条件下大巷稳定性及其对策对此类矿井的安全开采具有重要意义。

1.3.3 特殊条件下的巷道布置问题

一些特殊条件下，如露井联合开采条件下，常常在露天边坡下布置井工开采的大巷，此条件下大巷处在露天边坡临空面和地下工作面采动的多重应力场叠加区，大巷围岩稳定是决定露井联采的关键。另外一些特殊条件主要是指陷落柱、小窑影响区域重新复采需要布置巷道，存在如何在老窑采空区布置巷道问题，涉及采空区的物理探测、钻孔探测和防水、过老窑区域巷道设计和掘进技术等问题。

1.4 研究思路

采空侧巷道布置形式多样，不仅与开采方法有关，还与巷道所处的地质和力学环境相关，对于上述采空侧巷道遇到的三种情形，课题组采用了现场调研、理论分析、室内试验、现场工业性试验等多种手段，先后成功地解决了窄煤柱留巷道、沿空留巷、复杂条件下大巷维护、老窑采空区巷道布置等技术难题。具体的研究思路如图 1-2 所示。

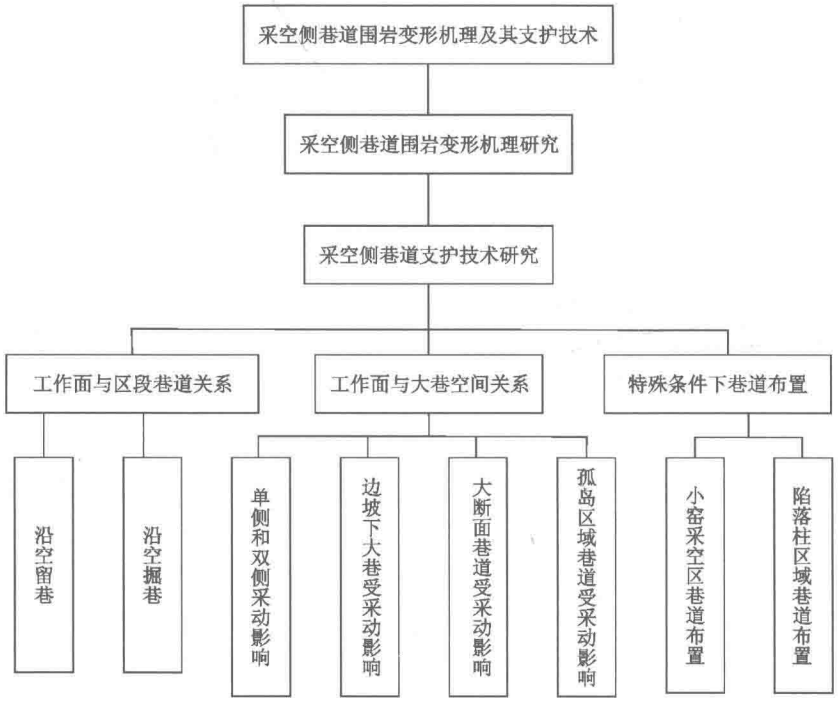


图 1-2 研究思路

2 采空侧巷道围岩变形机理与控制理论研究

2.1 采空侧巷道围岩变形机理研究

研究表明，采空侧巷道围岩稳定性与其特定的覆岩结构密切相关，如图 2-1 所示。采空侧巷道一侧为实体煤，另一侧为采空区，实体煤一侧相当于板的固支端，靠近采空侧又有一段外伸的顶板，基本顶断裂沿工作面倾向形成的破断面为岩块 B、岩块 C 以及实体煤侧的岩块 A，上述三个岩块之间的平衡对采空侧巷道围岩稳定状态和应力条件起决定性影响。

掘进期间，上述岩块下方煤体产生破碎区和塑性区，随着时间推移，巷道变形严重，对巷道围岩稳定性影响相对较小；但在采动作用下，上述岩块结构 B、C 中悬臂岩梁的回转破断，将引起采空侧巷道瞬间失稳破坏。

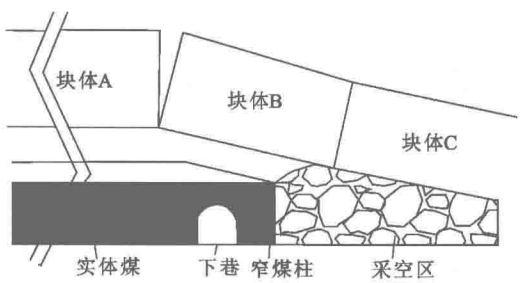


图 2-1 采空侧巷道覆岩结构

2.1.1 采空侧巷道覆岩区域围岩大小结构概念

在采空侧巷道区域，定义覆岩岩块 A、B、C 及其组成的结构为巷道围岩的大结构，该大结构稳定性具有以下特性：

(1) 作为采空侧大结构主体的端头区巷道锚杆支护是该大结构稳定的主要承载结构。

(2) 采空侧大结构支撑的空顶面积大，顶板回转，采空侧巷道支护急剧受载、下缩、变形、破损等。

定义采空侧小结构为巷道锚杆支护系统，该小结构的稳定与采空侧上方岩块大结构的影响有很大关系，当上述大结构的稳定受到影响时，传递到小结构周围，将造成小结构各部位应力状态和量值上存在较大差异。

2.1.2　采空侧巷道围岩大小结构关系

采空侧巷道受采动所产生的荷载最为剧烈，该大结构具有很好的让压特征，能够承载较大的变形。由于小结构中锚杆支护系统的存在，使得采空区侧巷道围岩能够承受较大变形而不失稳，继续保持小结构的“锚杆支护系统”作用，具有一定的让压特征。

考虑到大小结构是一个空间结构，其结构的整体力学特征是一个非常复杂的问题，从巷道围岩的整体稳定性考虑，采空侧巷道围岩大结构无论是围岩本身特征，还是空间特征，都具有明显的非均衡现象。同样小结构锚杆支护也受到不均衡荷载作用，保证小结构本身的稳定是采空侧巷道围岩稳定的关键。

2.1.3　采空侧巷道围岩稳定性分析

2.1.3.1　直接顶对采空侧巷道顶板稳定性影响

回采工作面从开切眼开始向前推进，直接顶悬露面积将增大，当达到其极限跨距时将开始垮落。直接顶在垮落前，其变形一般相对上覆基本顶变形大，容易出现直接顶与基本顶间的离层。当直接顶垮落后，上述采空区侧巷道附近的工作面端头区的基本顶也将随之发生破断失稳，破断后的基本顶沿着工作面的倾向回转下沉。由此可见，工作面端头区基本顶的这种破断失稳将直接影响采空侧巷道围岩的稳定，然而端头区基本顶的破断失稳程度又与工作面直接顶岩层自身的支护条件、上覆荷载、厚度及其他岩性直接相关。

(1) 支护条件

工作面端头区支护体系承载着工作面直接顶上部岩层的全部岩重以及直接顶岩层的部分荷载。由于工作面直接顶的自身不能形成一种自平衡结构，也就不能向工作面回采巷道两侧煤体和采空区的垮落矸石传递荷载，即使直接顶岩层能够形成短砌体梁结构，但是相对于工作面长期采动影响来说，其也只能保持相对较短时间，所以工作面直接顶荷载最终还是作用在端头区基本顶的支护体上。

(2) 上覆荷载

根据回采工作面端头区支护所承载的岩重及直接顶岩层的部分荷载可知，随着直接顶厚度的变大(采空区填充越密实)，端头区支护体受基本顶的作用力将逐渐减小，到工作面采空区被完全充填时，几乎就可以不考虑基本顶的荷载，直接顶的岩层自重将成为工作面端头区支护所主要承担的荷载，并影响端头区顶板的变形。

(3) 直接顶厚度

根据工作面实际岩层移动规律观测，当直接顶的厚度小于或者等于基本顶厚度时，容易形成二者的离层。当随着工作面的不断向前推进，在直接顶垮落后，由于岩石所具有的碎胀性，在破碎后将出现岩石体积增大的现象，因此出现堆积的高度大于直接顶岩层原有的厚度，工作面采空区的自由高度将变得很小。

工作面端头区基本顶与垮落矸石间隙 Δ_e(在未放顶煤段为 Δ'_e)为：

$$\begin{cases}\Delta_e = M - [M(1-\eta)K_m + H_z(K_z - 1)] \\ \Delta'_e = M - M_d(1+K_m) - H_z(K_z - 1)\end{cases} \tag{2-1}$$

式中　M——煤层高度，m；