

中国矿业大学青年科技基金资助(0A4452)

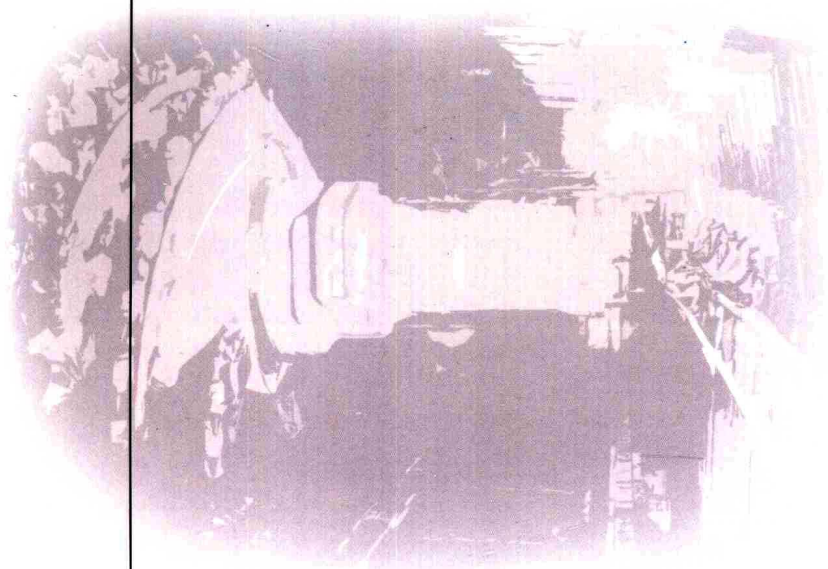
国家自然科学基金项目(50774077,50574089)

全国博士学位论文作者专项资金资助项目(200760)

教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0475)

综放沿空掘巷围岩稳定 控制原理与技术

李学华 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

ZONGFANG YANKONGJUEHANG WEIYAN WENDING KONGZHI YUANLI YU JISHU

中国矿业大学青年科技基金资助(0A4452)

国家自然科学基金项目(50774077.50574089)

全国博士学位论文作者专项资金资助项目(200760)

教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0475)

综放沿空掘巷围岩稳定 控制原理与技术

李学华 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是论述煤矿综放沿空巷道支护理论与技术的专著。通过近年完成的综放沿空巷道围岩控制方面的探索与实践,著者系统地总结了该领域内理论和技术等方面的研究成果,首次阐述了综放沿空巷道大、小结构围岩控制理论,提出了控制巷道围岩稳定的技术体系,并结合工程实践详细介绍了理论与支护技术的应用,反映了煤炭行业地下工程围岩控制领域中锚杆支护的应用成果和技术水平。

本书可供从事采矿工程、岩土工程等领域的科技工作者和工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

综放沿空掘巷围岩稳定控制原理与技术/李学华著.

—徐州:中国矿业大学出版社,2008.6

ISBN 978 - 7 - 81107 - 776 - 6

I. 综… II. 李… III. 巷道支护—围岩稳定性—研究
IV. TD353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 083261 号

- 书 名 综放沿空掘巷围岩稳定控制原理与技术
著 者 李学华
责任编辑 耿东锋 孙建波
责任校对 张建国 杜锦芝
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)
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 徐州中矿大印发科技有限公司
经 销 新华书店
开 本 850×1168 1/32 印张 5.625 字数 145 千字
版次印次 2008 年 6 月第 1 版 2008 年 6 月第 1 次印刷
定 价 24.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

综采放顶煤开采技术自 1982 年被引进到我国后,发展十分迅速,随着“三软”、“两硬”、“大倾角”、“高瓦斯”、“易燃”、“较薄厚煤层”等难采煤层开采技术的提高和成熟,综放开采已成为我国煤矿高产高效的重要手段和煤矿开采技术的重要发展方向。目前,我国综采放顶煤开采技术已走在了世界的前列,综放开采技术的应用范围还在进一步扩大。

从目前的发展看,综放采场围岩控制的基础理论研究已取得了很大成果,而综放面沿空侧巷道的控制和安全性问题则成了制约综放技术进一步发展的主要因素。同时一些矿区仍采用大煤柱护巷方式,而采用较小煤柱护巷时,巷道围岩控制缺乏有效的理论与技术支持,维护效果不能满足生产要求。因此,探索留窄煤柱条件下综放沿空掘巷的安全控制机理与对策,对提高煤炭采出率和保证安全、高效的综放开采具有重要的科学与工程意义。

本专著针对综放开采的特点,以综放沿空掘巷为研究对象,着眼于巷道支护的实际效果,对巷道围岩大、小结构的稳定性原理,巷道围岩应力与围岩变形破坏特点,窄煤柱稳定的机理,巷道围岩锚固结构与围岩活动关系等问题进行了系统的理论研究,初步形成了综放沿空掘巷围岩稳定性的控制原理与控制技术。

全书共分 8 章。第 1 章简要回顾了综放沿空掘巷的理论和现有技术现状,提出了采空区侧上覆煤岩体活动规律与综放条件下窄煤柱护巷的特殊性问题;第 2 章研究了综放沿空巷道围岩的裂隙演化规律,分析了巷道围岩力学环境与维护特点,并以围岩变形实测

资料为基础,结合数值模拟方法得出该类巷道围岩变形与围岩应力分布的基本规律;第3章提出了综放沿空掘巷上覆岩体大结构的观点,并围绕大结构展开研究,通过对大结构的形成机制、运动方式和特点的详细分析,揭示了上覆岩体大结构稳定性的原理及其对沿空掘巷的影响;第4章提出了综放沿空掘巷小结构的观点,通过实验与理论分析的方法,对小结构的锚固性能的主要影响因素如锚杆拉拔力的实质、锚杆的临界锚固长度进行了探讨,依靠相似模拟、数值分析软件对小结构的锚固机理、力学机理进行了分析,提出了影响小结构稳定的几个关键问题,并就大、小结构相互关系与巷道稳定做了进一步的研究;第5章通过研究窄煤柱的应力分布及演化规律,分析了窄煤柱的变形特点与变形的影响因素,阐明了对于综放沿空掘巷来说可以采用窄煤柱护巷的观点;第6章根据以上的研究成果,研究了提高综放沿空巷道围岩锚固性能的锚杆支护技术,提出综放沿空巷道围岩锚固结构稳定的设计与围岩控制的关键技术体系;第7章结合兴隆庄煤矿的工程实践,给出了大、小结构原理与控制技术在煤矿综放沿空掘巷中的实际应用。

本专著的完成得到了我国煤炭行业著名的采矿专家侯朝炯教授的关怀与指导,得到了中国矿业大学采矿工程系多位老师的热情鼓励与帮助,在此表示由衷的感谢。

由于作者经验和水平有限,书中难免有不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正。

李学华

2007年7月于徐州

目 录

1 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 研究现状与发展	3
1.3 本书的主要内容	8
1.4 本书的主要研究方法	9
2 综放沿空掘巷的矿压显现规律	16
2.1 综放沿空掘巷的围岩控制特点	16
2.2 巷道围岩裂隙发展的特点	19
2.3 综放沿空掘巷的围岩变形规律实测	25
2.4 综放沿空掘巷的围岩应力分布规律	33
3 综放沿空掘巷上覆岩体大结构的稳定性分析	49
3.1 大结构的基本观点	49
3.2 老顶岩层断裂位置研究	54
3.3 大结构的稳定性分析	59
3.4 大结构对煤层层面上应力分布的影响	67
4 综放沿空掘巷围岩小结构的稳定性原理	75
4.1 小结构的基本观点	75
4.2 小结构的锚固性能	78
4.3 小结构变形破坏的力学机理	90

4.4	影响小结构稳定的几个关键问题	99
4.5	大、小结构相互关系与巷道稳定	100
5	窄煤柱合理宽度设计	104
5.1	窄煤柱的变形机理	104
5.2	窄煤柱变形的影响因素	111
5.3	窄煤柱宽度的设计方法	113
6	综放沿空掘巷围岩控制关键技术及体系	120
6.1	基本控制原理	121
6.2	高强度锚杆支护系统选择	131
6.3	围岩小结构稳定的锚杆支护技术	141
7	厚煤层普通综放沿空掘巷工程实践	148
7.1	工程概述	148
7.2	工程的控制原理	149
7.3	试验巷道锚杆支护设计	151
7.4	工程实践效果及分析	156
7.5	工程实践结论	164
	参考文献	165

1 绪论

1.1 问题的提出

我国是世界主要产煤大国之一,2005 年生产原煤 21.9 亿 t,有关专家预测,2010 年产量将增至 25 亿 t,煤炭占能源的比重仍然要达到 50%^[1]。我国厚煤层的储量十分丰富,占总储量的 45%左右,产量则占原煤产量的 44.8%以上。在我国国有大中型煤矿中拥有 5 m 以上厚煤层的生产矿井数量为生产矿井总数的 50%以上。综采放顶煤开采技术自 20 世纪 80 年代引进我国后,经过众多科研院所与生产单位的共同努力,克服了诸多的困难,近 20 年来发展十分迅速,随着“三软”、“两硬”、“大倾角”、“高瓦斯”、“易燃”、“较薄厚煤层”等难采煤层开采技术的提高和成熟,综放开采已成为我国煤矿高产高效的重要手段,亦成为今后煤矿开采技术的重要发展方向。目前,我国综采放顶煤技术已走在了世界的前列,其应用范围还在进一步扩大^[2~7]。

提高综放开采的采出率是关系到综采的技术经济合理性、矿井的开采寿命和技术发展方向的重大问题,留设合理的煤柱对于开采的安全性及采出率都有很大的影响,长久以来,受采动影响巷道煤柱的留设问题是研究的难点与重点。从 20 世纪 50 年代起,国内外开展了大量的包括沿空掘巷和沿空留巷两种方法的试验研究,取得了大量的研究成果。沿空掘巷是在上一区段工作面开采垮冒基本稳定、应力重新分布趋于稳定后,沿采空区边缘留设窄煤柱掘进。与沿空留巷技术相比,巷道只经历一次采动影响,从巷道的应力环境和维护条件上比较而言,显然采用综放沿空掘巷是十

分有利的。

近十年来综放巷道围岩控制技术,尤其是综放沿空巷道围岩控制,同综放开采技术一样受到越来越多的重视,综放采场围岩控制的基础理论研究已取得了很多成果,而综放沿空掘巷稳定原理与控制技术还不成熟。综放沿空掘巷与薄及中厚煤层中沿空掘巷有很大的不同,因而综放面沿空侧巷道的控制和安全性问题则成了制约综放技术进一步发展的主要因素。如山西阳泉、宁夏灵武等多个矿区目前仍采用大煤柱护巷方式(约在 30 m 左右),其目的—是为了巷道本身的围岩稳定;二是为了防止窄煤柱变形或破坏后会与相邻采空区沟通,形成更大的安全隐患。但从实际效果来看,大煤柱护巷并没有改善巷道维护的状况,个别成功的工程实例从表面上掩盖了问题的本身。

从目前的发展看,综放沿空掘巷的矿压理论 and 支护技术是制约综放开采进一步发展的主要因素之一,主要表现在以下几个方面^[8~10]:

(1) 综放开采时,由于一次采出厚度大,相应的波及岩层范围也增大。大量的实测资料表明,综放回采巷道的矿压显现并没有预料中的强烈,这用现有的回采巷道矿压理论无法给出满意的解释。

(2) 采区回收率是影响综放开采发展的主要因素之一。如何确定合理的区段煤柱参数,从而减小煤柱尺寸,是提高采区回收率的一种有效手段。但这取决于对综放采场煤岩变形和破坏机理以及沿工作面倾斜方向矿山压力显现规律认识的进一步深入。

(3) 长期以来,综放回采巷道尤其是采空侧沿空巷道的支护多采用木棚、金属支架等支护方式。随着综放设备能力、生产技术和管理水平的提高,传统的巷道支护方式已严重地影响到了综放工作面的推进速度,阻碍了综放设备能力的充分发挥,迫切需要改善综放回采巷道的支护技术。

(4) 实测资料显示,综放沿空掘巷的围岩变形规律与其他回采巷道明显不同,主要原因在于巷道周围煤岩体性质影响,以及上区段工作面回采后在巷道上方形成的煤岩体结构在本工作面回采时发生变化而引起的,而国内外在这方面的研究较少。

(5) 高强度锚杆支护系统作为一种先进的支护方式,与其他支护方式相比,其显著的优越性表现在:及时加固围岩,充分利用围岩的自承能力;减小围岩变形,防止巷道围岩离层和片帮,改善巷道的稳定状况;大幅度降低巷道支护成本,提高掘进工效;减少支护材料运输量,减轻工人劳动强度等。目前,锚杆支护已广泛应用于采区煤巷中,并取得了巨大成功。尽管综放沿空掘巷采用锚杆支护也在一些矿井开始了应用,但相关的围岩变形规律和支护理论却相对滞后,影响了锚杆支护发展的进程与锚杆支护效能的发挥。

因此,探索留窄煤柱(1~6 m)条件下综放沿空掘巷的安全控制机理与对策,对提高煤炭采出率和保证安全、高效的综放开采具有重要的科学与工程意义。

1.2 研究现状与发展

1.2.1 采空区侧上覆煤岩体活动规律研究现状

综放沿空掘巷上覆煤岩体的活动规律,在一定程度上与上区段工作面和本区段工作面回采时煤层顶板的断裂特征及运动方式相关,但又有其自身的特点和规律。

国内外在采场上覆岩体活动规律方面做了大量的研究工作^{[9][12~13][19~20]},例如提出了采场的关键层理论、研究了采场上覆岩体的断裂规律、完善了砌体梁理论等^[59~60],明确提出了综放采场上方的“砌体梁”老顶结构问题,并认为采场冒落带的高度为采

出厚度的(2.0~2.5)倍,其中(1.0~1.2)采厚的直接顶岩层呈现不规则垮落,其上为规则垮落带。以上的研究,基本上对综放采场上覆岩体的活动规律有了明确的认识。

针对综放沿空掘巷的维护特点,研究巷道上覆岩体活动规律的工作则做得很少,仅是通过对部分综放面及巷道矿压观测分析和相似模拟实验做了一些研究,认为:

(1) 随工作面回采,采空侧煤体及上覆岩体依次垮落,形成砌体梁结构。侧向煤体支承压力峰值点与放采比有关,且随放采比增大,侧向煤体支承压力峰值点远移,有利于留设窄煤柱。

(2) 分析了巷道上覆岩体结构特征,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。

综放沿空掘巷时,上覆岩体的活动规律是关系到该类巷道能否采用锚杆支护的一个关键问题,而国内外在这方面所做的研究工作还很少,人们对上覆岩体活动规律与巷道稳定性的关系缺乏明确的认识。

1.2.2 窄煤柱护巷问题的研究现状

对于综放沿空掘巷来说,能否采用窄煤柱护巷,在国内还存在较大的争议^[7,39],其主要的原因就在于锚杆支护是否能保证巷道的稳定。一般认为,较窄的煤柱尺寸,虽可以使巷道处于一个应力相对较低的位置,但这样的煤柱其自身的稳定性比较差,掘巷后煤体强度急剧降低引起煤柱向巷内强烈位移,不利于巷道的稳定。

客观地说,以上问题是窄煤柱综放沿空掘巷推广的关键之所在,但同时也应注意到这样的事实:一是综放沿空掘巷的煤柱上面是煤体,下面则与底板岩层接触,煤柱实际上是夹持在煤体和岩层之间的,因此其变形与其他回采巷道的窄煤柱是不同的。二是以往采用窄煤柱护巷的巷道多采用架棚支护,架棚对巷道围岩的支

护作用是单纯地从围岩外部施加一定的支护阻力。而采用锚杆支护时,锚杆可以改善其锚固范围内围岩的力学行为,对围岩起到强度强化的作用;同时,系统的布置锚杆还可以使锚杆与巷道围岩形成一个承载结构(即本书中所提出的小结构),也就是说,锚杆支护巷道的围岩稳定是通过小结构来实现的,从一定程度上来看,锚杆对围岩的支护作用要比架棚支护更为有效。

窄煤柱护巷在我国应用较早,国内对此做了大量的研究工作^{[37~38][19,33]},取得的结论基本上是一致的,认为:

(1) 窄煤柱沿空掘巷不仅在掘巷期间围岩强烈变形,而且在巷道掘出后仍保持较大速度的持续变形,这种变形要比完全沿空掘巷大。

(2) 认为巷道的压力主要来自窄煤柱一侧,破坏了的窄煤柱对顶板不仅起不到支承作用,相反,使巷道维护极为不利。

(3) 窄煤柱巷道中的煤柱可以改善巷道掘进条件,加快掘进速度以及隔离采空区,防止矸石和采空区积水进入巷道是有利的。

窄煤柱的稳定性是该类巷道的另一个重要问题,国内自 20 世纪 50 年代开始应用至今,对煤柱的宽度一直没有统一的认识,在许多矿井中,煤柱宽度从 1~5 m 到 20~30 m 不等。

但不容忽视的是,以上研究取得的结论是建立在薄及中厚煤层、巷道采用架棚支护基础上的。而在综放条件下,窄煤柱的沿空掘巷围岩主要由煤体组成,巷道采用锚杆支护,与一般意义上的窄煤柱护巷道问题存在很大的差异。因此,照搬原来的研究成果来认识综放沿空掘巷的问题显然是不够的。目前,国内外在这方面的研究仅是停留在极少数的一些实践上,系统地认识这个问题是非常重要的。

1.2.3 锚杆的支护原理及技术

目前,在国外主要产煤国家,锚杆支护技术已得到广泛应用。

且技术先进。例如:美国凭借其地质条件简单的优势,锚杆支护占整个煤矿支护形式的比例达 90% 以上;澳大利亚结合自身条件,应用岩石力学原理和综合实测技术发展锚杆支护技术,井下巷道基本上均采用了锚杆支护;德、英、法等国的锚杆支护发展都走过了一个曲折的道路。到目前为止,法国和德国的锚杆支护比例已占到了 50% 以上;英国的锚杆支护比例已达到 80% 以上,为煤矿带来了巨大的经济效益。我国从 1956 年起在煤矿使用锚杆,至今已有 40 余年的历史,20 世纪六、七十年代锚杆支护就已进入采区。目前,I、II、III 类回采巷道锚杆支护技术已经基本解决,综放回采巷道的锚杆支护也在多个矿区中应用。

锚杆支护技术的快速发展,推动了锚杆支护理论的研究工作。国内外均在这方面做了大量的研究,取得了许多有价值的成果^{[18,22] 25~26}。例如锚杆的悬吊理论、组合梁理论、压缩拱理论、围岩松动圈理论、最大水平应力理论等。这些研究工作均在实践中得到了不同程度的应用,也使对锚杆支护的作用有了不同程度的认识。近几年来,国内外开展了对锚杆锚固后岩体力学性能改善状况的研究,这些研究均深度不同地探讨了锚杆加固后提高岩石强度、弹性模量、黏聚力及内摩擦角等问题,取得了相应的成果。

侯朝炯教授和勾攀峰博士针对回采巷道锚杆支护技术发展过程中存在的主要问题,采用相似材料模拟试验和理论分析,深入研究了锚杆支护对岩体峰值强度和残余强度的强化作用。提出了锚杆支护的围岩强度强化理论^[36],认为:锚杆支护作用的实质就是锚杆与围岩相互作用,组成锚固体,形成锚杆—围岩的共同承载结构;改善锚固岩体的力学参数,提高锚固岩体的强度,使岩体强度,特别是峰后强度和残余强度得到强化;充分发挥围岩的自承能力,促使巷道围岩由不稳定向稳定转化,锚杆支护的围岩强度强化理论推动了煤巷锚杆支护的应用。

以上的研究,对综放沿空掘巷锚杆支护问题的研究提供了许

多可供参考的资料,为开展复杂困难条件下锚杆支护研究有重要的意义。但还应注意这样一个事实,综放沿空掘巷围岩锚固结构实质上是一个由锚杆组合支护与巷道不同条件部位的围岩组成的小结构。在采动影响下,巷道上覆岩体的活动规律,必然影响到小结构的稳定性,在其影响过程中,小结构能否保持稳定,采用什么措施来保持稳定,该条件下锚杆支护原理等问题还没有从根本上得到解决。

1.2.4 综放沿空掘巷的工程实践经验

对综放沿空掘巷采用锚杆支护的研究是近几年才兴起的,对此问题还没有形成一个基本的理论体系,只是在个别矿区做了一些实践性的工作^[11~15]。

例如:潞安矿务局王庄矿 4320 综放面留 5 m 窄煤柱的锚网支护实践认为:① 掘进影响期巷道围岩变形量小,累计变形量顶底为 38.06 mm,两帮为 32.46 mm,最大变形速度顶底为 5.3 mm/d,两帮为 1.61 mm/d,掘进 50 m 后趋于稳定;② 回采期间巷道两帮的变形量和变形速度均大于顶底,两帮相对变形量为 758.7 mm,最大变形速度为 77.1 mm/d;顶底相对变形量为 473.45 mm,最大变形速度为 58 mm/d,且顶煤下沉量大于底鼓量,占顶底移近量的 77.3%,煤柱帮的变形量大于实体煤帮的变形量,占两帮移近量的 60%以上;③ 巷道受采动影响的范围较大,其中两帮为 90~100 m,顶底为 60~70 m,但巷道受采动剧烈影响范围较小,顶底约为 20~25 m,两帮约为 30~40 m。

鲍店煤矿 1306 综放窄煤柱沿空掘巷的矿压显现特征进行研究后认为:① 工作面超前支承压力影响范围大,一般为 120~160 m,剧烈影响为 50~60 m,巷道变形量也大;② 巷道矿压显现表现出明显的周期性,一般为 20 m 左右;③ 综放窄煤柱沿空掘巷的合理煤柱宽度为 0~4 m,此时煤柱中应力值很小,巷道两帮及顶底

板移近量都较小,当煤柱宽度在 4~12 m 时,煤柱及实体煤中应力较大,巷道变形量也增大,巷道留设大煤柱的合理尺寸为煤柱宽度大于 16 m。从现场实践的观点看,在现有技术中锚杆加注浆是综放窄煤柱沿空掘巷的最佳支护方式。

由上面的介绍可见,目前对综放沿空掘巷采用锚杆支护的认识还很不全面,取得的成果只是阶段性的。因此,从理论上系统地解决这个问题,揭示沿空掘巷围岩稳定原理是实现综放沿空掘巷围岩稳定的基础。

1.3 本书的主要内容

在本书中,将沿上区段综放面采空侧留 1~6 m 窄煤柱掘进的巷道称为综放沿空掘巷。据此,本书在前人研究的基础上,针对综放开采的特点,以综放沿空掘巷为研究对象,着眼于巷道支护的实际效果,围绕巷道大、小结构的稳定性原理、巷道围岩应力与巷道围岩变形破坏特点、窄煤柱稳定、巷道围岩锚固结构与围岩活动关系等问题,进行了系统的理论研究和实践探索,初步形成了综放沿空掘巷的矿压理论和控制方法。

综放沿空掘巷合理围岩控制主要涉及两方面:一是综放沿空掘巷上覆岩体破断结构的特征及其稳定性问题;二是综放沿空掘巷围岩支护结构的稳定性原理及技术。本书主要开展以下几个方面内容的研究:

(1) 综放沿空掘巷的围岩应力分布及裂隙演化规律。通过综放沿空掘巷基本的生产技术条件和巷道围岩的维护特点,以围岩变形实测资料得出该类巷道围岩变形规律。通过数值计算方法,对综放沿空掘巷的围岩应力分布及演化规律进行研究,对该类巷道围岩变形的力学机制进行分析。

(2) 综放沿空掘巷上覆岩体大结构的稳定性分析。结合现有

的采场矿压理论,在对综放沿空掘巷上覆煤岩体活动规律进行分析的基础上,建立综放沿空掘巷上覆岩体大结构的力学模型;研究大结构的形成机制及其参数特征;对上覆岩体大结构在巷道掘进前、掘进后、回采时的稳定性进行分析,从理论上解决该类巷道采用锚杆支护的适应性问题;同时,对上区段工作面采空侧煤层层面上的应力分布规律、影响支承压力分布的主要因素进行分析,以揭示综放沿空掘巷在巷道掘进前的应力环境。

(3) 综放沿空掘巷围岩小结构稳定性原理。提出综放开采条件下,巷道围岩锚固结构相对于上覆岩体大结构是一个小结构的观点;对小结构的应力和变形特点进行研究,揭示综放沿空掘巷围岩大、小结构的动态稳定性原理与巷道稳定的相互关系。根据综放沿空掘巷的围岩变形破坏方式,提出综放沿空掘巷的围岩小结构变形破坏的力学机制与控制原理。

(4) 窄煤柱合理宽度的设计方法与控制技术。利用数值模拟软件,研究窄煤柱的变形机理及煤柱上的应力分布及演化规律。分析窄煤柱变形的影响因素,提出窄煤柱合理宽度的设计原则与方法。通过分析高强度锚杆基本控制原理,研究提高综放沿空掘巷围岩锚固性能的锚杆支护技术,提出保持综放沿空掘巷围岩锚固结构稳定性的设计方法及技术措施。

(5) 根据以上研究成果,将理论研究成果应用于综放沿空掘巷工程实践,在实践中检验理论的适用性,并调整相应的支护技术参数。

1.4 本书的主要研究方法

根据以上研究内容,确定本书采用的研究方法主要包括四个方面,即数值计算分析、现场的工程实践和观测、实验室相似材料模拟和理论研究。

1.4.1 数值计算研究

数值计算方法是一种解决采矿与岩土力学问题的有力工具,在解析存在困难的时候,它有着突出的优越性,它可以考虑众多的影响因素,进行多方案的快速比较,在参数敏感性分析中具有明显优势,同时有的软件还具有强大的前处理和后处理功能,显著提高了输入和输出结果的可视化程度,FLAC 软件就是其中的一种。

FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 是一种用于工程力学计算的显式有限差分程序^[73~75]。该程序可模拟土、岩石等材料的力学行为,FLAC^[2D] 3.3 程序采用了显式拉格朗日算法及混合离散划分单元技术,程序内部含有多个力学模型,如库仑-摩尔模型、应变软化(硬化)模型、节理模型及双屈服模型等,用于模拟高度非线性、不可逆等地质材料的变形。

另外,FLAC^[2D] 3.3 中含有的界面单元可以模拟岩层中不连续面,如断层、节理及层理等滑动和离层;FLAC^[2D] 3.3 中含有梁、锚杆、桩及支柱单元,可以模拟各种支护构件,其中锚杆单元是一种一维轴向单元,在一定拉力下会屈服,锚杆的锚固方式可以是端锚、全长锚固或任意长度的锚固,该单元还可以施加预紧力,非常适合于锚杆支护工程的研究;FLAC 内部还有一种编程语言 FISH,用户用它可以编制自己的函数、变量,甚至引入自定义的力学模型,扩大了程序的使用范围和灵活性;FLAC^[2D] 3.3 还具有强大的前处理和后处理的功能,数值的输入和输出结果的可视化程度极高。

与其他软件相比,FLAC^[2D] 3.3 主要有以下特点:

① 混合离散化方法使得 FLAC 在模拟塑性流动和破坏方面比有限元中采用的一些方法更为合理。

② FLAC^[2D] 3.3 中采用了全动态运动方程,即使模拟静态过程也是如此,这就使 FLAC 可以模拟真实的不稳定过程而不至于