

特厚复合顶板巷道 围岩稳定性控制

苏学贵 著



科学出版社

特厚复合顶板巷道 围岩稳定性控制

苏学贵 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书通过理论研究、实验室试验及工程应用,分析特厚复合顶板的结构形态与破坏特征,揭示特厚复合顶板巷道浅部岩层锚杆组合梁与深部岩体锚索承载拱的形成及其耦合作用机理;提出特厚复合顶板巷道拱梁耦合支护理论,阐明承载拱对组合梁的减压作用和减跨作用,并提出减跨系数及确定方法;建立特厚复合顶板巷道拱-梁结构体系力学模型,确定巷道支护结构稳定性与支护参数、埋深、水平构造应力等因素的定量解析关系,提出巷道支护结构计算与设计方法,为该类巷道支护方案与参数的合理确定提供依据,同时为地下工程巷道施工与维护提供参考与借鉴。

本书可供从事采矿工程、地下工程等的科研人员、工程技术人员及高校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

特厚复合顶板巷道围岩稳定性控制/苏学贵著. —北京: 科学出版社, 2014. 9

ISBN 978-7-03-041854-8

I. ①特… II. ①苏… III. ①复合顶板-巷道围岩-稳定性-研究 IV. ①TD263

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 209385 号

责任编辑: 胡晓春 李 娟/责任校对: 桂伟利

责任印制: 赵德静/封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 9 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2014 年 9 月第一次印刷 印张: 11 1/4

字数: 226 000

定价: 90.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

煤矿地下开采是我国煤炭资源开发的主要途径,由于煤矿煤层地质条件越趋复杂,在煤矿生产中会产生更多的工程灾害,顶板事故频发率增高。据统计,顶板事故的发生率达煤矿事故总次数的53%,死亡人数占20%。导致顶板事故多发性和突发性的根本原因,在于岩体处于高地应力以及复杂的地质环境中,围岩表现出特殊的力学行为,使传统的岩体力学与巷道支护理论面临新的挑战。这就需要有新的巷道支护理论与方法来指导煤矿安全生产。

我国大多数矿区煤层为复合顶板。随着巷道掘进,在围岩应力作用下复合顶板会产生变形。当岩层结构面上的剪切力达到一定限度时,由于层间剪切使各岩层产生滑移错动而离层。同时在上部围岩自重应力和结构应力的作用下岩层会产生弯曲变形,如果相邻岩层的弯曲变形程度不均等,下部岩层在结构面上产生的弯曲往往较上部岩层大,同样会导致离层。再是巷道开挖后,巷道复合顶板会承受较大的集中应力使顶板各岩层产生塑性压缩破坏,表现为较大的垂直变形与碎胀扩容,导致复合顶板碎胀离层破坏。复合顶板中松软岩层的存在,使得顶板层状岩体一旦屈服破坏,围岩松动,离层范围迅速扩展,容易发生大面积冒顶。而特厚复合顶板主要是由多层厚度较小、层理和裂隙发育、强度较低的软弱岩层相间构成,通常不稳定层状岩层累计厚度较大(大多超过10m)。其岩层间物理力学性态差异大、强度低,岩层赋存状态变化较大,层间弱面多、抗剪强度低,自稳能力弱。在高地应力作用下,其巷道顶板会发生大范围垮落,造成重大伤亡事故,严重影响煤矿安全生产。因此,加强对特厚松软复合顶板巷道围岩稳定性控制的研究至关重要。

基于此,作者在多年巷道支护理论与技术研究的基础上,结合承担的国家自然科学基金项目(51274145)、深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLG DUEK1311)以及煤气化资助项目的研究,采用理论分析、试验模拟、数值模拟及工程实践应用等方法,对特厚复合顶板巷道支护结构与围岩稳定控制进行了研究。

本书主要内容:①实测与试验分析特厚复合顶板的原位特性、结构形态及破坏特征。借鉴传统与现代支护理论,揭示特厚复合顶板巷道浅部岩层锚杆组合梁与深部岩体锚索承载拱的形成及其耦合作用机理,提出特厚复合顶板巷道拱梁耦合支护新理论。建立巷道拱-梁结构体系力学模型,提出支护结构稳定性力学计算与支护参数设计方法。②利用大尺度相似模拟试验系统,以神州煤业4[#]煤层特厚复合顶板为原型,模拟高应力环境下(加载0~40MPa)不同支护条件巷道围岩应力、

位移变化等规律,分析特厚复合顶板巷道拱-梁结构的形成及其耦合作用机理。③采用 RFPA^{2D}及 FLAC^{3D}对不同支护条件巷道分级加载时围岩破坏过程进行模拟,分析不同围岩应力对巷道支护结构稳定性的影响规律以及随锚索密度、预应力增加对特厚复合顶板巷道拱-梁结构的影响特征。④基于特厚复合顶板巷道支护理论,合理优化设计巷道支护参数,并在神州煤业 4303 工作面顺槽巷道及切眼中实际应用,监测分析表明巷道结构稳定,支护效果良好。

本书的撰写和出版得到宋选民教授、康天合教授、杨双锁教授的指导和帮助,同时得到研究生李浩春、原鸿鹄及李本奎的帮助,在此表示衷心感谢。

由于作者的水平和时间有限,书中不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 复合顶板巷道稳定性控制研究现状	2
1.2.1 复合顶板特征及分类	2
1.2.2 国内外巷道支护技术发展过程	3
1.2.3 现代巷道支护理论与研究现状	6
1.3 特厚复合顶板巷道支护存在的问题	12
1.4 主要研究内容及方法	13
第 2 章 特厚复合顶板力学及原位特性研究	15
2.1 特厚复合顶板物理力学特性测定	15
2.1.1 地质条件	15
2.1.2 物理力学参数测定	15
2.1.3 特厚复合顶板物理力学特性分析	18
2.2 特厚复合顶板的原位特性研究	18
2.2.1 围岩层理构造探测	18
2.2.2 围岩应力场对巷道稳定性的影响	22
2.3 本章小结	24
第 3 章 特厚复合顶板巷道拱梁耦合支护理论与结构分析	25
3.1 特厚复合顶板变形特征	25
3.2 特厚复合顶板巷道拱梁耦合支护理论	27
3.2.1 复合顶板锚杆组合梁结构的形成	27
3.2.2 特厚复合顶板锚索组合拱结构的形成	29
3.2.3 锚索支护压缩拱与锚杆支护组合梁的耦合作用	30
3.3 巷道支护结构分析与支护设计	31
3.3.1 巷道支护结构力学模型的建立与结构分析	31
3.3.2 巷道支护设计与流程框图	46
3.4 本章小结	46
第 4 章 特厚复合顶板巷道组合梁结构体试验模拟	47
4.1 试验模型设计	47

4.1.1	相似模拟理论	47
4.1.2	试验原型条件	48
4.1.3	试验方案设计	48
4.1.4	试验模型材料及配比	48
4.1.5	试验设备及测试系统	50
4.2	模型制作与测点布置	54
4.2.1	应力测试仪器标定	54
4.2.2	模型制作	55
4.2.3	测点布置	55
4.2.4	加载测试与数据整理	57
4.3	无支护巷道试验结果分析	57
4.3.1	无支护巷道围岩应力变化规律分析	58
4.3.2	无支护巷道围岩变形规律分析	64
4.4	顶帮锚杆支护巷道围岩变形破坏规律分析	74
4.4.1	顶帮锚杆支护巷道围岩应力变化规律分析	74
4.4.2	顶帮锚杆支护巷道围岩变形规律分析	81
4.5	试验结果对比分析	92
4.5.1	巷道顶板围岩控制	92
4.5.2	巷道两帮位移控制	93
4.5.3	巷道底板破坏控制	93
4.6	本章小结	94
第5章	特厚复合顶板巷道拱-梁组合结构体试验模拟	95
5.1	垂直锚索+顶帮锚杆支护巷道围岩变形破坏规律分析	95
5.1.1	巷道围岩应力变化规律分析	95
5.1.2	巷道围岩变形规律分析	102
5.2	倾斜锚索+全断面锚杆支护巷道试验结果分析	114
5.2.1	巷道围岩应力变化规律分析	114
5.2.2	巷道围岩变形规律分析	121
5.3	试验结果对比分析	132
5.3.1	巷道顶板围岩控制	132
5.3.2	巷道两帮位移控制	134
5.3.3	巷道底板破坏控制	135
5.3.4	巷道断面收缩对比	136
5.4	本章小结	138

第 6 章 特厚复合顶板巷道拱-梁结构数值模拟	140
6.1 巷道变形破坏演化数值模拟	140
6.1.1 RFPA 数值计算软件	140
6.1.2 RFPA ^{2D} 数值计算模型	143
6.1.3 数值模拟结果分析	144
6.2 巷道拱-梁结构数值模拟	150
6.2.1 FLAC ^{3D} 数值计算模型	150
6.2.2 锚索密度对拱-梁结构的影响	151
6.2.3 锚索预应力对拱-梁结构的影响	152
6.3 本章小结	153
第 7 章 工程应用研究	155
7.1 工程概况	155
7.2 巷道支护结构计算与支护方案优化	156
7.3 工程监测与稳定性评价	160
7.3.1 巷道监测方案	160
7.3.2 巷道稳定性分析	161
7.4 本章小结	162
第 8 章 结论	163
参考文献	166

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

煤炭是地球上蕴藏最丰富的化石燃料,据世界能源委员会(WEC)评估,世界煤炭可采资源量达 4.84×10^4 亿吨,占世界化石燃料可采资源量的 66.8%。随着世界经济的快速发展,全球能源需求不断增加,能源结构中占有近 30% 的煤炭资源无疑将是全球经济发展的重要动力。我国是全球最大的煤炭消费国,能源消费结构中煤炭占 70% (油气为 20%,其他为 10%),2010 年我国煤炭消费量达到 31 亿吨,占全球消费总量的 48.4%^[1,2]。据预测,2050 年我国煤炭消费需求将达到 42 亿吨^[3],仍将占据不可替代的重要地位。煤炭是资源丰富、经济廉价、可洁净利用的可靠能源,煤炭工业是关系到国家能源安全和国民经济持续发展的重要产业。提升煤炭科技水平,对保证煤炭工业持续发展意义重大。

煤矿地下开采是我国开采煤炭资源的主要途径,但是随着煤炭长期高强度的开采,浅部、易开采的煤层储量日趋减少,大部分地区均已开采深部煤层或地质条件较复杂、地应力较大、较难以开采的煤层。因此,加强我国煤炭主产区的深部或复杂地质条件下的煤炭资源开发和生产是我国煤炭工业今后发展的必然趋势。据统计,我国煤矿开采深度以每年 8~12m 的速度增加,东部矿井则高达 20~25m/a。并且我国已经有 170 多座矿井采深超过 800m。预计在未来 10 年内,我国现有大部分煤矿将进入 1000~1500m 的深部开采环境^[4]。

随着煤炭开采不断向深部延伸,煤层地质条件越趋复杂,在煤矿生产中会产生更多的工程灾害,如由于地质构造复杂,地应力增大,巷道围岩变形显著,围岩收敛变形速度加快,巷道支护损坏严重,巷道翻修率剧增,使深部巷道的稳定与维护变得异常困难。同时随着开采深度的增加,煤矿安全生产难度加大,事故频发率增高。2005~2009 年煤矿事故起数统计表明,顶板事故的发生频率最高,占煤矿事故总次数的 43%,死亡人数也较多,占总死亡人数的 20%^[5]左右,仅次于瓦斯爆炸。导致顶板事故多发性和突发性的根本原因,在于岩体处于高地应力、高温、高渗透压以及复杂的地质环境,从而使深部岩体的组织结构、力学性态和工程响应均发生根本性变化,围岩表现出特殊的非线性力学行为,使得传统的岩体力学与巷道支护理论面临新的挑战。这就给井下巷道围岩的稳定控制提出更高的要求,传统的巷道支护材料与支护结构已不能满足复杂条件下巷道支护的要求,因而需要有新的巷道支护理论与技术来指导,确保煤炭的科学生产安全^[6]。

1.2 复合顶板巷道稳定性控制研究现状

1.2.1 复合顶板特征及分类

(1) 复合顶板的特征

复合顶板是指由多层厚度较小,层理、节理和裂隙发育,强度较低的软弱煤岩层相间构成的顶板。由于煤形成的地质年代主要是古生代的石炭纪、二叠纪,中生代的侏罗纪以及新生代的古近纪^[7]。受成煤条件的影响,煤大多数是在沼泽环境下,植物被泥沼掩埋,经过数万年的分解、化合、泥化、成岩作用而形成的。由于煤岩形成年代的关系,煤系地层多为层状沉积岩层,因此复合顶板是一种较常见的岩层赋存形态,复合顶板巷道在煤矿中分布广泛^[8]。复合顶板具有以下特征^[9~11]: ①顶板岩层中含有多层煤岩互层的岩层,各岩层间物理力学性能相差悬殊;②岩层总体抗压强度低,各岩层松散易碎,自稳能力弱,岩层整体性差;③岩层之间的结构上存在弱面,节理裂隙发育,构成复合关系,抗剪强度低,易离层冒落;④各岩层结构疏松,容重小,孔隙度大,内应力超过自身的抗压强度,遇水膨胀,易产生塑性变形;⑤大多与煤层呈整合接触,上层煤的底板即下层煤的顶板,两煤层间的岩体以灰黑色粉细砂岩较多见,含植物碎屑化石,岩性较软,给顶板支护带来困难;⑥各岩层在赋存区域内的赋存状态变化较大,层间联系不紧密,摩擦力小,极易产生离层。

我国大多数矿区煤层巷道顶板为复合式顶板,随着巷道掘进,在围岩应力作用下复合顶板会产生变形,当岩层结构面上的剪应力达到一定限度时,由于层间剪切作用各岩层会产生滑移错动,层间分离。在上部围岩自重应力和结构应力的作用下顶板会产生弯曲变形,如果相邻岩层的弯曲变形程度不均等,下部岩层在结构面上产生的弯曲往往较上部岩层大,从而会导致离层。再是巷道开挖后,巷道复合顶板会承受较大的集中应力作用,致使顶板各岩层产生塑性压缩破坏,表现为较大的垂直变形与碎胀扩容,导致复合顶板离层。另外在动压的影响下,巷道顶板整体承载能力与抗变形能力下降,导致巷道失稳破坏。由于复合顶板中软弱薄煤岩层的存在,顶板层状岩体一旦屈服破坏,围岩松动,离层范围迅速扩展,极易发生突发性的大面积冒顶与切顶。

由于复合顶板的物理力学与层状构造特性,其巷道复合顶板大范围垮落失稳极易造成重大的人员伤亡事故,将严重影响安全生产。因此对煤矿复合顶板条件下的巷道进行稳定性控制与维护显得尤为重要。为更好地对复合顶板巷道进行合理的加固与有效的稳定控制,并对其采取可靠的支护措施,必须对复合顶板的物理力学特性、原岩应力与构造应力影响、巷道围岩体结构、支护材料与参数等诸多因

素进行综合分析研究,给复合顶板巷道支护提供科学依据,为煤矿的安全生产提供可靠的保证。

(2) 复合顶板分类

煤炭行业根据巷道掘进和回采需要对围岩的分类方法繁多^[12],依据指标主要有围岩性质、围岩强度、围岩松动圈大小、围岩位移速率等。煤炭行业根据支护设计与施工需要制定的围岩分类见表 1.1。

表 1.1 巷道支护与施工围岩分类

围岩分类		岩层描述	巷道开挖后 稳定状态	岩层举例
类别	岩层名称			
I	稳定岩层	1. 完整坚硬岩层, $R_b > 60 \text{MPa}$ 2. 层间胶结好, 无软弱夹层	围岩稳定, 不需支护	玄武岩、石英砂岩、 奥灰岩
II	较稳定岩层	1. 完整较坚硬岩层, $R_b = 40 \sim 60 \text{MPa}$ 2. 层间胶结较好, 无泥质夹层	稳定期大于一个 月, 局部掉落	砂岩、砾岩
III	中等稳定岩层	1. 完整中硬岩层, $R_b = 20 \sim 40 \text{MPa}$ 2. 层状以硬岩为主, 少量软夹层	稳定期 仅几天	砂岩、砂质页岩、 石灰岩
IV	稳定性较差岩层	1. 较软的完整岩层, $R_b \leq 20 \text{MPa}$ 2. 中硬的块状岩层	围岩易冒 顶、片帮	页岩、泥岩
V	不稳定岩层	1. 易风化松软岩层 2. 破碎层状岩层	巷道极易 受破坏	碳质页岩、 泥岩、煤

注: R_b 为岩石的饱和抗压强度。

复合顶板因其层状构造发育、软弱夹层多、整体强度低,大多属于稳定性较差的IV类或V类围岩。复合顶板根据其软弱层状岩层累计厚度和支护难易程度可分为三大类:

1) 薄层复合顶板: 软弱层状直接顶厚度在 $0 \sim 2 \text{m}$, 上部为稳定岩层。采用锚杆支护即可稳定控制巷道顶板。

2) 中厚复合顶板: 软弱层状直接顶厚度在 $2 \sim 8 \text{m}$, 上部为稳定岩层。依据传统的支护理论,采用锚杆、锚索支护可有效控制巷道顶板。

3) 特厚复合顶板: 软弱层状岩层累计厚度大于 8m , 如神州煤业 4[#] 煤不稳定复合顶板厚度达 $13 \sim 15 \text{m}$, 上部较大范围内没有稳定岩层。依据传统的支护理论难以诠释锚索的作用机理与巷道支护结构,要合理确定支护方案与参数也较为困难,解决这些问题正是本书的重点。

1.2.2 国内外巷道支护技术发展过程

巷道支护理论与技术的发展大致可以分成如下几个阶段:①萌芽阶段。19世

纪初到 20 世纪 30 年代末;②快速发展阶段。20 世纪 40 年代到 60 年代,现代岩石力学和材料力学的研究成果被引入到巷道支护技术和理论的研究中,是支护技术和理论快速发展和成型的时期;③成熟发展阶段。60 年代以后,巷道支护技术和理论体系已经基本确立,但随着现代材料科学、机电技术科学的发展,整个行业不断进行技术更新换代,自动化程度显著提高,支护技术日趋成熟。

1803 年法国开凿的 1.1km 长的 Tronquoy 隧道,从流沙状软岩体中穿过,隧道宽度达到 8m,可谓是世界隧道工程的开端。该隧道采用自下而上开挖小断面隧道进行木支护,形成拱形支护断面后,再将拱形隧道的中心岩体挖出,形成最终隧道断面。该工程第一次实现了在困难条件下根据工程原理进行大断面隧道支护。此后 1830~1850 年铁路工程在欧洲特别是在英国的发展,需要开凿又长又深的大断面隧道,支护技术和理论进入快速探索阶段。可以从两个方面来总结早期的支护技术和理论发展,即支护理论的探索 and 支护方式的变革^[13,14]。

(1) 支护理论的探索

从 1820 年开始,在隧道开挖过程中,工程技术人员开始对支护理论进行科学探索。1830~1860 年出现了一些工程概念和思想,如岩层响应、松动、膨胀、鼓出、岩石压力等。1866 年 Culmann 通过假设土坡破坏面为通过坡趾的平面来分析土坡的稳定性,并提出了土压力理论。1879 年 Ritter 修改了隧道承载静力计算模型,以隧道顶板岩石自重作为垂直载荷,提出了自然平衡拱模型。1882 年 Engeser 第一次尝试对隧道自然平衡拱形成的支护效果进行解释,认为支护载荷为隧道顶部拱形松动区和巷道衬砌之间的岩土体。1878 年 Heim 指出,在上覆岩层很厚的条件下开凿隧道将遇到巨大困难,提出以单轴抗压强度作为强度标准。1912 年在修建长 20km、埋深 2100m 的 Simplon 隧道时,Wiesmann 提出应该采用三轴抗压强度表示岩层强度,最早认识到了隧道周围岩体应力重新分布的作用。1923 年 Maillart 第一次在带小孔平板计算模型的应力重新分布过程中采用屈服准则,区分了弹性区和塑性区。Mohr 在 1956~1957 年提出允许隧道周围岩体发生一定变形,可以减少作用在衬砌上的力,对岩体的支护只需达到岩体能够自稳的程度即可;而且采用岩体特征线和衬砌特征线的方法揭示了岩石压力和衬砌之间的相互作用机理。

(2) 支护方式的变革

隧道和巷道工程早期都采用木支护方式,从世界范围来看,木支护方式在 20 世纪 50 年代之前一直处于支配地位。但是由于木支护的强度很低,难以满足过程要求。因此钢拱、喷射混凝土、锚杆等一系列支护方式很早就已经被开发出来,远远超前于这些支护方式的大规模应用时间。据文献记载,最早使用钢拱支护可以追溯到 1850 年。1934 年德国研制了专门用于隧道支护的钢材和连接配件,使得

钢拱支护在设计和制造方面取得了巨大的进步,钢拱在承载能力和稳定性方面大大提高。

喷射混凝土技术 1911 年就在美国出现了。1914 年美国矿业局开始在煤矿采用喷射混凝土代替木支护,取得了惊人的支护效果。此后喷射混凝土技术被引入到欧洲、加拿大,广泛应用于水利、铁路隧道和采矿巷道。

德国人 1913 年提出锚杆发明专利,但这项发明多年来一直没有在实践中应用。锚杆支护技术很大程度上得益于美国矿业局对锚杆的成功应用和推广。美国的 Weigel 在 1943 年首次对锚杆支护技术进行了全面、详细的介绍,认识到锚杆支护的及时性和岩层破坏的渐进性。他认为锚杆将浅部岩层固定到深部岩层中,可以控制浅部岩层的破坏,阻止破坏向深部发展,并使顶板形成一个能够自承载的、强度很高的厚梁结构。1943~1950 年是美国煤矿快速推广应用锚杆支护技术的鼎盛时期。在支护理论方面也提出了一些当时看来惊人的观点,如顶板显然具有自承载能力而不是由木支护来承载;锚杆支护除了悬吊作用外,还必须使所支护的岩层本身能够成为整体承载结构的一个组成部分。

1950~1962 年,锚杆与喷射混凝土联合得到了普遍的应用。瑞典工程师发明了全长锚固锚杆,并在工程中得到应用。法国 1949 年开始开凿的水电工程隧道长达 11.7km,上覆岩层厚达 2000m,经常发生岩爆现象,采用锚杆支护技术基本解决了岩爆问题,并且实现了全断面一次开挖。1958 年开凿的连接法国和意大利的公路隧道长达 11.6km,上覆岩层厚达 2200m 以上,该工程遇到了严重的流沙状软岩和岩爆问题,采用锚杆支护成功解决了该问题,并实现了全断面同时开挖施工。1961 年美国的 Lang 基于美国采矿工业在锚杆支护方面的各种成就发表的《锚杆支护理论与实践》一文非常著名,引发了对锚杆支护机理的大量探讨,至此锚杆支护技术逐渐走向成熟阶段。

可以说,到 20 世纪中叶,以锚杆为中心的巷道支护理论体系已经建立起来,尤其是美国和澳大利亚在煤矿锚杆支护的实践和理论方面遥遥领先。反观世界其他地区,尽管相当程度上也在采用锚杆支护,但在煤矿巷道支护领域,采用锚杆支护的很少。欧洲大多数国家和中国在 20 世纪 80 年代还普遍采用以钢拱为主的棚式支护。20 世纪 80 年代后期和 90 年代初是锚杆在世界范围内迅速发展的黄金时期,各国普遍引进了美国和澳大利亚的技术,锚杆支护技术迅速成为煤矿巷道支护的主要方法。

由此可见,巷道支护经历了从木支护、砌碛支护、型钢支护到锚杆支护的漫长过程。目前,锚杆支护技术已在国内外得到普遍应用,成为煤矿巷道首选的、主要的支护方式。支护技术是伴随着隧道工程和采掘工程的发展而出现的一项专门技术。隧道工程和矿山巷道虽然作用不同,但就支护技术而言有很多共同之处,因此早期的隧道和巷道支护实践引发了人们对支护理论的探索和研究,而社会发展对

隧道和巷道工程的巨大需求导致了支护技术和理论的快速发展。

我国煤矿从 20 世纪 50 年代引进锚杆支护技术,首先在岩巷中成功应用且得到了大力推广,并发展了锚喷支护技术。但我国煤巷锚杆支护技术发展较慢,经历了 40 多年,国有重点煤矿煤巷锚杆支护率占总巷道的不到 10%,煤巷支护仍以木棚或金属棚支架为主,大大影响了煤矿巷道锚杆支护技术的发展进程。因此,在国家“八五”期间煤巷锚杆支护技术被列为重点科技攻关项目,促进了锚杆支护技术的发展,一批巷道支护技术难题被攻克,科技成果被应用于国内各大矿区,得到了较好的支护效果。1995 年国有重点煤矿新掘的巷道中,锚杆支护所占比重上升为 28.19%,其中岩石巷道占 57.2%,煤层巷道占 15.15%。而对于复合顶板、破碎顶板及沿空留巷等复杂条件下的巷道支护仍受到制约。国家“九五”期间煤巷锚杆支护技术又被列入重点研究领域,展开了更深入、细致和全面的试验研究。先后从澳大利亚、美国等国家成功引进了锚杆支护技术,如树脂锚杆、锚杆钻机等,并在邢台矿务局、西山矿务局等的大力推广下,取得了显著的效果,提高了我国巷道锚杆支护技术的水平^[15~18]。如高强度螺纹钢锚杆、小孔径树脂锚固预应力锚索这些支护新材料、新技术被广泛应用,我国国有重点大型矿井的煤巷锚杆支护率已经达到了 60% 以上,有些矿区甚至达到了 90%~100%,这标志着我国煤巷锚杆支护技术发展到了一个崭新的阶段。进入 21 世纪,随着厚煤层综采放顶煤和一次采全高技术的快速发展,对煤巷锚杆支护技术的要求也得到了提高。同时随着煤矿开采深度和开采强度的增加,地质条件日趋复杂,巷道断面越来越大,要求更高的煤矿生产安全系数,这就对巷道支护技术提出了更高的要求。

1.2.3 现代巷道支护理论与研究现状

随着巷道支护技术的发展与实践应用,巷道支护理论也在不断完善与创新,国内外学者提出了众多巷道支护与围岩稳定性控制理论。目前在国内外较有影响的巷道支护理论,尤其是针对复合顶板巷道支护的理论包括:组合梁理论、新奥法理论、组合拱理论、松动圈支护理论、巷道围岩强化理论及最大水平应力理论等。其中组合梁理论、巷道围岩强化理论、组合拱理论主要建立在锚杆与围岩共同作用机理的基础上,侧重于阐述围岩结构力学机理,着重从岩体微观角度揭示支护体和被支护体的相互作用原理;而新奥法支护理论、松动圈支护理论探讨更多的是一种支护方法论,着重强调工程实施应用的科学性。

(1) 组合梁理论

组合梁理论可用来阐述复合顶板层状岩体中的锚杆支护机理^[19]。由于煤系地层具有层状沉积岩层的特性,组合梁理论是最适合煤矿巷道围岩特点的锚杆支护理论,也是煤巷支护技术研究和应用方面最常用的一种理论。该理论认为若在

锚杆锚固范围内不存在稳定岩层,顶板由多层薄层状岩层构成,各分层完整性较好。在这种顶板情况下,锚杆的主要作用是靠较大的预紧力将多层薄岩层紧固组合在一起,形成一个较厚的梁结构,厚梁结构的强度和刚度要远远大于多个薄分层强度之和;增加各分层之间的正向应力,从而增加分层间的摩擦力,达到阻止岩层界面发生水平滑动的目的。锚杆通过预紧力将各分层紧固在一起,使各分层在垂直方向上的运动大致相同,可以避免或减少离层的发生。同时锚杆本身也提供一定的抗剪力,阻止岩层层间的相对移动,从而起到支护作用,如图 1.1 所示。

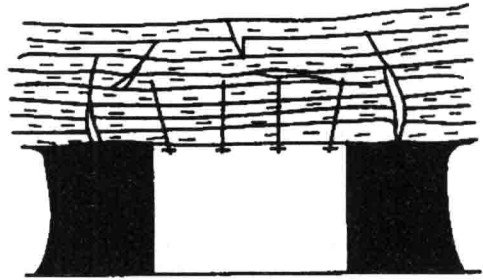


图 1.1 锚杆组合梁示意图

1956 年美国的 Panek 在对组合梁的相关研究中提出了支护因子 RF 的概念,用来评价和指导支护设计。在锚杆预紧力作用下,顶板层状岩层之间产生较大的正应力和摩擦力形成组合梁,以减少顶板岩层的弯曲应变,并指出组合梁的抗变形能力随着锚杆间距减小、锚杆预紧力增加、锚固分层数目增加和顶板跨度减小而提高。Peng 基于材料力学对锚杆支护组合梁机理进行了研究^[20],提出了组合梁最大弯曲应变计算公式,表明梁的厚度越大,其弯曲应变越小。Snyder 在 1982 年研究了组合梁与单独叠合梁之间承载的不同作用,给出了两种梁之间在承载时应力分布的不同^[21];指出预紧式锚杆通过增加岩层之间的正应力,来增加岩层间摩擦力,而全长粘接无拉伸锚杆则通过“锚杆-锚固剂-岩层”体系的剪切刚度来传递剪切力。Krohn、Jeffrey 和 Daemen 对组合梁的试验研究表明^[22,23],全长粘接无预紧力锚杆对减少梁中部的挠曲有很好的效果,可以在岩层之间产生滑移和离层时,产生抵抗力。如果各层之间能充分协同作用,弯曲主要发生在组合梁的中性轴;如果不能充分协同作用,则弯曲部分发生在组合梁的中性轴,部分发生在每层的中性轴,随着层间抗剪能力趋近于零,各层将独立作用,弯曲将主要发生在各层的中性轴,并且最大层间剪切应力并不发生在梁两端,而是发生在离开梁末端一定距离处。Stimpson 研究发现,当锚杆密度较低时,随着锚杆数增加,梁的挠曲显著减少;当锚杆密度增加到一定程度,增加锚杆对挠曲影响不大。

(2) 新奥法支护理论

新奥法是 1964 年由奥地利的 Labcewicz 教授根据本国多年隧道施工经验提出的,即新奥地利隧道施工法(New Austrian Tunneling Method, NATM)。它以隧道工程施工方法和经验为基础,结合现代岩体力学理论对这种成功的施工方法进行了合理的解释^[24,25]。新奥法的理论基础是岩石力学,强调围岩与支架共同作用原理,采用主动支护,调动围岩自身稳定性,尽可能控制围岩变形,防止围岩松动破

坏。新奥法认为普通支架不能紧贴岩面,为被动支护;强调采用锚喷支护为主动支护,能调动围岩自身稳定;喷射混凝土支护能及时压密封闭围岩表面风化,并且具有一定柔性让压作用,同时可二次补强支护;强调施工监测的作用,根据监测结果修正初始支护设计参数,做到“设计—施工—监测—设计”的科学过程。20世纪70年我国在煤炭、铁路、水电等工程领域广泛应用新奥法理论。在煤炭领域,结合自身的特点,发展并完善了新奥法。

(3) 组合拱理论

关于锚杆对围岩的支护原理,人们是从悬吊概念开始认识的,但后来一系列的事实说明这种概念并不能全面反映客观情况,锚杆不一定非要深深锚入稳固岩体中才能起到支护作用。组合拱理论认为,在锚杆锚固力的作用下,每根锚杆周围形成一个两头带圆锥的筒状压缩区。各锚杆所形成的压缩区彼此连成一个有一定厚度的均匀压缩带,即组合拱^[26],该拱具有较大的承载能力。如果是拱形或圆形巷道,把锚杆以适当的间距沿拱形轮廓布置,就会在巷道周围形成连续的均匀压缩带,起到拱的作用,如图1.2所示。

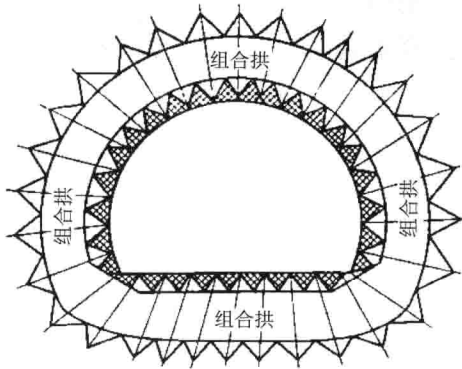


图 1.2 锚杆支护的均匀压缩拱

应力重叠区域实际上与锚杆的间排距有关,因而其有效厚度也与锚杆的间排距有直接的关系。再者,理论上将岩梁的破断位置设定在巷道的中部,而实际上由于岩体内的裂隙与弱面的存在,岩梁的破断形式是十分复杂的,形成三铰拱的几率会有很大程度的降低。

(4) 松动圈支护理论

松动圈支护理论是由董方庭教授提出的。该理论认为,开巷以后巷道围岩应力将发生显著变化,巷道周边径向应力为0,围岩强度明显下降,围岩中出现应力集中现象。如果集中应力小于岩体强度,围岩将处于弹性状态。当围岩中的应力超过围岩强度以后,巷道周边首先破坏,并逐渐向深部扩展,直至在一定深度达到应力平衡。此时,巷道周边围岩出现破坏区域,围岩中产生的这种松弛破碎带被定义为围岩松动圈^[27],图1.3为开巷后围岩状态,图中 σ 为围岩应力, σ_θ 为环向应力, σ_r 为径向应力, L_p 为松动圈厚度。图1.4为围岩松动圈实测结果,图中 V_p 为超声波波速。

围岩松动圈的性质包括以下内容:①围岩松动圈的形状,由于围岩性质不同,

