

贵州省一流专业“采矿工程”建设项目 (SJZY2017006) 资助
目 见划 (973) 项目 (2010CB226801) 资助

厚层软弱顶板巷道灾变机理 及控制技术研究

HOU CENG RUAN RUO DING BAN HANG DAO ZAI BIAN JI LI
JI KONG ZHI JI SHU YAN JIU

● 马振乾 吴桂义 著

 煤炭工业出版社

“采矿工程”建设项目(SJZY2017006)资助
国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB226801)资助

厚层软弱顶板巷道灾变机理及 控制技术研究

马振乾 吴桂义 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

厚层软弱顶板巷道灾变机理及控制技术研究/马振乾, 吴桂义
著. --北京: 煤炭工业出版社, 2017
ISBN 978-7-5020-6257-6

I. ①厚… II. ①马… ②吴… III. ①煤巷—顶板管理—研
究 IV. ①TD353

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 280932 号

厚层软弱顶板巷道灾变机理及控制技术研究

著 者 马振乾 吴桂义
责任编辑 刘永兴 赵金园
责任校对 尤 爽
封面设计 于春颖

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 北京建宏印刷有限公司
经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm¹/₁₆ 印张 9¹/₄ 字数 220 千字
版 次 2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷
社内编号 9137 定价 45.00 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

前 言

我国煤层赋存条件较为复杂，厚层软弱顶板条件所占比重较大，在山西、安徽、河南等省主要矿区均有分布，煤层直接顶多为炭质泥岩、砂质泥岩、炭质页岩、粉砂岩等，岩石的抗压强度在 5~40 MPa，不稳定岩层的厚度在 8 m 以上，有的甚至更大。每年厚层软弱顶板巷道的开挖和维护工程量庞大，巷道服务期间顶底板变形剧烈，两帮严重收缩，由于巷道顶板的大变形，常常出现锚固层承载性能衰减甚至失效而导致锚固层整体切落坍塌的现象，如何消除冒顶、确保煤巷顶板安全，是进一步发展煤巷锚杆支护的关键。

本书以典型的厚层软弱顶板煤巷为工程背景，围绕厚层软弱顶板巷道灾变机理与控制技术两个关键问题，综合运用现场调研、室内测试、数值模拟、理论分析与现场应用等研究方法，分别对厚层软弱顶板巷道的变形破坏特征及典型巷道的地质力学特征、围岩裂隙演化规律及其能量特征、巷道灾变机理、巷道稳定性关键影响因素、围岩控制技术、巷道安全评价系统等问题开展了系统研究，主要研究成果如下：①采用多参量监测手段得出了厚层软弱顶板巷道围岩裂隙演化特征，建立了软弱岩层厚度、埋深、水平应力、节理性质等参数与巷道围岩稳定性的关系。②提出了厚层软弱顶板巷道稳定性参数敏感性分析方法，得出了围岩强度、支护强度和巷道尺寸等因素对巷道稳定性的敏感程度。③基于突变级数法对厚层软弱顶板巷道支护难度进行科学合理的分级归类；提出离层类指标、变形类指标、支护结构受力指标和松动圈范围指标 4 大类 10 项指标，引入层次分析法对巷道安全性进行评判。④基于能量平衡原理，提出实现厚层软弱顶板巷道安全控制的三大技术途径：优化巷道布置、提高支护延伸量和设置弱结构，出路仍然是发展和创新锚杆支护技术，基本思路是控制顶板的渐进破坏，现场应用效果良好。

在本书撰写过程中，得到了中国矿业大学（北京）姜耀东教授、赵毅鑫教授、王宏伟副教授、祝捷副教授以及中煤科工集团康红普院士、中国矿业大学张农教授、李桂臣教授等的诸多帮助和有益指导；博士研究生张科学、杨英明、宋红华，硕士研究生秦亚洲、张文钊、万保华参与了试验和现场实测工

作,在此表示感谢。同时,写作过程中参考了大量国内外文献资料,所做的现场调研和实测工作得到了国投昔阳能源有限责任公司领导和工程技术人员的大力支持。

本书的出版得到了国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226801),贵州省一流专业“采矿工程”建设项目(SJZY2017006)、贵州省科技厅联合基金项目(黔科合LH字〔2017〕7281),国土资源部喀斯特环境与地质灾害重点实验室开放基金(2017k05)的资助,在此一并致谢。

由于笔者水平所限,书中难免存在疏漏和欠妥之处,恳请读者批评指正。

著 者

2017年10月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究的目的地意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 研究内容及技术路线	7
2 厚层软弱顶板巷道围岩地质力学特性	9
2.1 厚层软弱顶板巷道变形破坏特征	9
2.2 地应力场分布特征	19
2.3 煤岩物理力学性能测试	24
2.4 围岩结构探测	35
2.5 本章小结	36
3 厚层软弱顶板巷道裂隙演化及灾变机理	38
3.1 裂隙演化的力学机理	38
3.2 裂隙演化的数值模拟	40
3.3 裂隙演化的能量特征	57
3.4 采动裂隙演化现场实测研究	66
3.5 考虑损伤的巷道-支护体本构模型	72
3.6 厚层软弱顶板巷道灾变机理	73
3.7 本章小结	74
4 厚层软弱顶板巷道稳定性关键影响因素分析	76
4.1 厚层软弱顶板巷道稳定性影响因素敏感性分析	76
4.2 厚层软弱顶板巷道顶板稳定性分析	81
4.3 本章小结	84
5 厚层软弱顶板巷道安全控制技术体系	85
5.1 基于能量平衡的巷道支护技术原理	85
5.2 厚层软弱顶板巷道控制技术	91
5.3 厚层软弱顶板巷道支护难度分级	100
5.4 厚层软弱顶板巷道稳定性多参量监测预警	105
5.5 本章小结	111

6 工程实践	113
6.1 锚杆支护工程案例	113
6.2 U型钢支护工程案例	123
6.3 本章小结	128
7 结论与展望	129
7.1 主要研究结论	129
7.2 创新点	131
7.3 不足及展望	131
参考文献	132

1 绪 论

1.1 研究的目 的及意义

我国多数矿区的巷道锚杆支护效果较好,能够满足生产需要,但受煤炭赋存条件、开采条件等因素影响,部分矿区的锚杆支护效果较差,需要进行二次扩刷才能满足生产要求,甚至还有一些矿区时常发生因锚杆支护失效造成的顶板安全事故。由图 1-1 可知,2000—2012 年我国煤矿顶板事故的年均起数占煤矿事故总起数的 51.22%,年均死亡人数占总死亡人数的 35.76%,因巷道支护不当发生的顶板事故在煤矿事故中的比例居高不下,已成为煤矿安全生产中必须重点解决的问题之一。

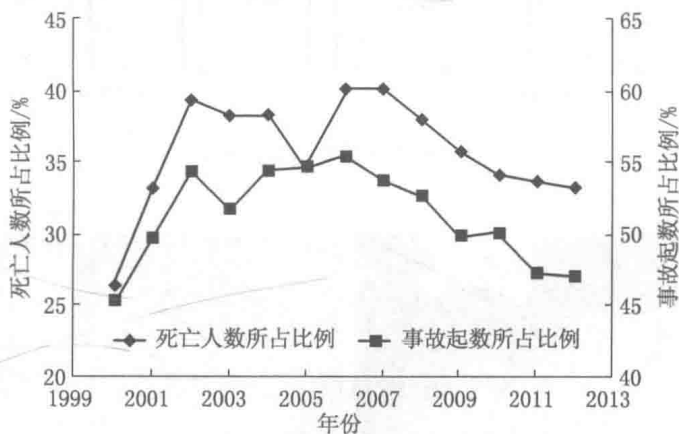


图 1-1 2000—2012 年我国煤矿顶板事故统计

煤系地层多为沉积形成的层状岩层,对于煤层巷道而言,直接顶是巷道支护的重要对象,很多矿区煤层直接顶为炭质泥岩、砂质泥岩、炭质页岩、粉砂岩等强度较低的岩层,岩石的抗压强度在 5~40 MPa 之间,泥质顶板的厚度在 8 m 以上,有的甚至更大,典型厚层软弱顶板柱状图如图 1-2 所示。这种条件下,采用锚杆支护时不能有效避免冒顶事故的发生,巷道支护体系容易出现失效。因此,现场常采用的方法是增大锚杆的直径和长度以及加大锚杆密度,这样锚杆锚固体内的煤岩体变形可以得到有效控制,并能消除锚固区内的离层,产生很大的支护阻力。但是锚杆锚固区以外的离层并不能得到有效控制,而这一问题导致巷道垮冒的关键因素,所以,这种方法不能从根本上解决顶板的安全可靠性难题。我国煤层赋存条件复杂多样,厚层软弱顶板条件所占的比重较大,在我国山西、安徽、河南等省主要矿区均有分布,巷道顶板软弱层较厚,松动破碎区范围大,悬吊理论不适用。由于巷道顶板的大变形,常常出现锚固层承载性能衰减甚至失效而导致锚固层整体切落坍塌的现象,支护难度较大,如图 1-3 所示。

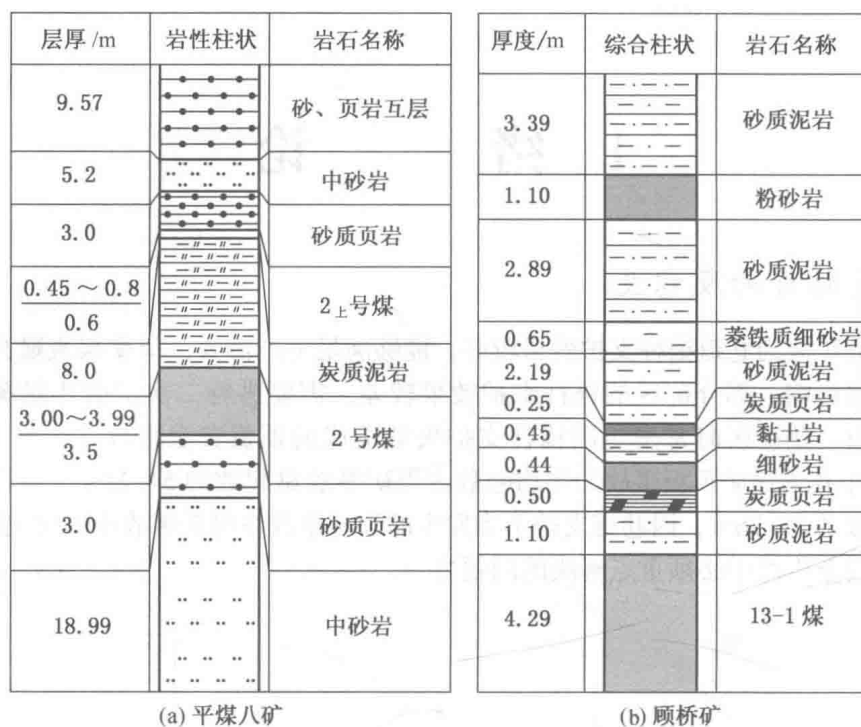


图 1-2 典型厚层软弱顶板柱状图

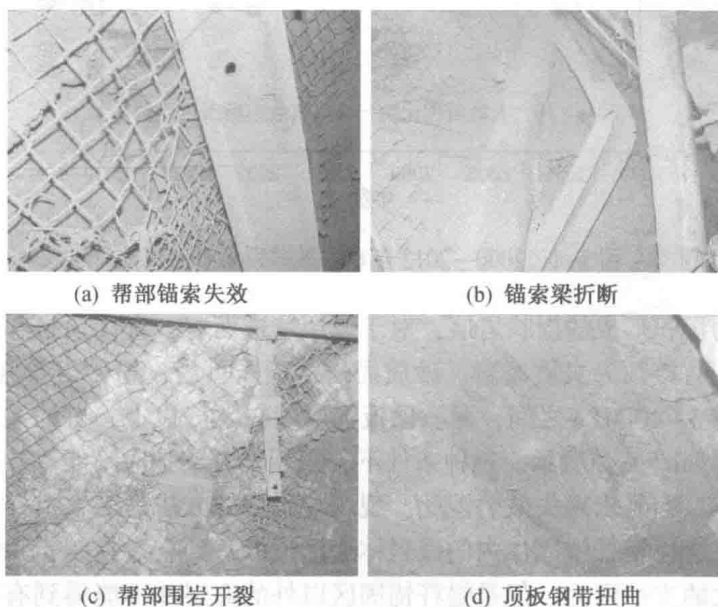


图 1-3 厚层软弱顶板巷道矿压显现 (黄岩汇煤矿)

本书以“黄岩汇煤矿基于地应力与围岩力学性能测试的回采巷道关键支护技术研究”项目为依托,运用现场调研、室内测试、UDEEC 及 FLAC 数值模拟、理论分析与现场应用等研究方法,对厚层软弱顶板巷道变形特征、灾变机理、控制技术等内容开展系统研究,

并形成了完善的厚层软弱顶板巷道控制技术和安全评判体系。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 厚层软弱顶板巷道灾变机理研究现状

巷道冒顶事故的发生是地应力、煤岩体力学性能及围岩结构、水文地质条件等地质因素共同作用的结果,同时也与巷道布置、巷道断面、支护方式、开采活动等非地质因素密切相关。在厚层软弱顶板巷道灾变机理方面,国内外学者从顶板离层机理、裂隙演化、地下水以及支护结构失效等方面出发开展了深入的研究,取得了大量成果。

杨永康等人采用 RFPA^{2D}数值模拟结合现场调研、相似材料模拟、室内试验等方法研究了大厚度泥岩顶板的破坏机制,认为易风化崩解的大厚度泥岩在高应力调整过程中发生拉剪破坏而产生大范围碎胀扩容变形,是该类巷道的破坏机制。

李学华等人从围岩裂隙演化的角度分析了富水泥岩顶板的垮冒机理,认为采掘过程中形成的裂隙场将成为导水通道,随着含水率的增加,泥岩的力学性质和锚杆支护效果将大幅度弱化,进一步加剧了裂隙扩展,极易发生巷道冒顶。

余伟健等人分析了深井厚层复合顶板实体煤巷和沿空掘巷顶板的整体下沉机制,锚索锚固范围内无稳定的岩层致使锚索的承载能力没有得到充分发挥,巷道顶板普遍出现 1000 mm 以上的下沉量。

何炳银将复合顶板煤巷中锚索的破断形式分为拉破坏、剪破坏和混合破坏三种类型,提出顶板 6 m 范围内复合顶板的膨胀系数可达 3%~5%,远大于钢绞线的工程延伸量,是造成锚索破断的主要原因。

张农等人研究了厚层复合破碎顶板的垮冒类型,认为松脱型垮冒表现为锚固区内离层,是由局部表层围岩破坏引起的;离层扩展到锚固区外,锚固区弯曲变形持续发展最终引起挤压型垮冒。

黄旭等人认为软弱岩层厚度是影响层状顶板巷道稳定性的重要因素,采用 RFPA 数值模拟研究了软弱岩层厚度在 0.5~4 m 条件下巷道的破坏过程。

贾明魁在对 162 起煤矿冒顶事故调研的基础上提出岩层组合劣化是引起煤巷冒顶的主要原因,占事故总起数的 60% 以上,其中泥岩顶板厚度变大超过锚杆索长度引起的冒顶事故占组合劣化型冒顶的 96%。

李磊等人认为复合顶板沿空掘巷的灾变机理在于顶板易离层破碎,在采掘应力作用下强度较低的各分层裂隙逐步向上扩展,锚固体容易出现整体剪切破坏发生冒顶事故。

岳中文等人采用相似材料模拟研究了复合顶板大断面煤巷的渐进破坏机理,发现巷道两帮以脆性压裂破坏为主,而顶板则以离层为主。

谷拴成等人探讨了复合顶板巷道的失稳过程,认为复合顶板中的软弱夹层将首先破坏,使得顶板承载结构和刚度弱化,经过应力调整后顶板出现剧烈变形直至失稳,失稳过程可概括为结构承载调整→刚度弱化→应力调整→结构失稳。

综合以上研究成果可以看出,有关专家学者在厚层软弱顶板巷道的灾变机理方面已经做了大量工作,但相关研究仍存在以下问题:

(1) 对厚层软弱顶板巷道灾变机理进行研究相关学者采用的研究方法单一。首先上述文献所涉及的研究方法主要有理论分析、现场测试、数值模拟等,大多是单一的现场测试

或单一的数值模拟,没有将现场测试、数值模拟、理论分析有机结合在一起。其次是已公开报道的数值模拟方面的成果大多是采用岩石破裂过程分析系统 RFPA 软件,着重分析了围岩的破裂演化过程,并未对巷道位移、围岩塑性区、裂隙演化及能量演化进行综合分析。

(2) 在围岩裂隙演化规律研究方面考虑的因素单一。如仅考虑地应力或仅考虑顶板厚度,其他因素(如顶板节理性质、顶板强度、构造应力等)对围岩裂隙演化的影响有待进一步深入研究。

(3) 对厚层软弱顶板巷道稳定性影响因素研究不够深入。除部分 RFPA 数值计算外,未见考虑软弱岩层厚度、软弱岩层强度、煤层强度、支护强度等多种因素的较系统的研究成果,各因素的敏感程度也不明确。

1.2.2 厚层软弱顶板巷道锚杆支护机理研究现状

1872 年锚杆首次被用在加固露天矿边坡,至今已有 140 多年的发展历史,我国煤矿自 1956 年开始使用锚杆支护,至今也已有 60 年的历史。作为一种简单有效的主动支护方式,锚杆支护在世界各主要采煤国家得到了大范围的推广应用,特别是美国和澳大利亚其煤矿埋深浅、地质条件简单,煤巷锚杆支护比重接近 100%。目前,锚杆支护技术已成为煤矿实现安全高效生产的关键保障技术之一,与此同时,国内外学者一直致力于煤矿锚杆支护机理方面的研究,针对不同的围岩条件提出了不同的锚杆支护机理,对提高锚杆支护效果起到了积极作用。

(1) 悬吊理论。当煤层顶板上部存在坚硬稳定的岩层而下位岩层软弱破碎时,采用悬吊理论将下位不稳定岩层悬吊在上部稳定岩层中,如图 1-4 所示。这种围岩赋存条件在美国、澳大利亚较为常见,采用悬吊理论煤巷锚杆支护可行性高,但对厚层软弱顶板巷道而言,锚杆长度范围内无稳定岩层,悬吊理论的应用受到极大的限制,不能用来指导厚层软弱顶板条件下锚杆支护参数设计。

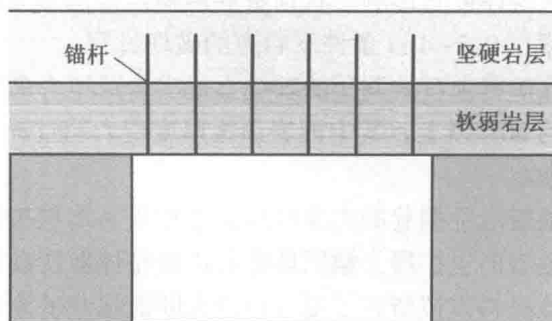


图 1-4 悬吊作用原理

(2) 组合梁理论。组合梁理论来源于经典的材料力学,该理论认为在层状岩层中锚杆可将各个厚度较薄的岩层锚固在一起形成组合梁,如图 1-5 所示,组合梁所受的最大拉应力为叠合梁的 $1/n$ (n 为岩层总数),最大挠度为叠合梁的 $1/n^2$,可以有效控制顶板下位岩层的离层、滑动等扩容变形。在厚层复合顶板条件下,锚杆的组合梁作用明显,并且组合梁厚度越大越有利于巷道稳定。如果岩层松散破碎,顶板的连续性遭到破坏,锚杆的组合梁作用微乎其微。

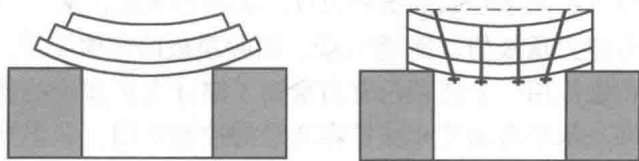


图 1-5 组合梁作用原理

(3) 组合拱理论。组合拱理论适用于拱形巷道，如图 1-6 所示，该理论认为在松散破碎的围岩中锚杆压应力作用范围将相互叠加形成具有一定厚度的均匀压缩带—组合拱，这一承载结构可以承受其上部破碎岩石施加的径向荷载，在软岩巷道中得到了广泛应用。厚层软弱顶板煤巷一般为矩形断面或斜顶矩形断面，组合拱理论一般不能作为该类巷道支护参数定量设计的依据。由于巷道的等效开挖效应，矩形巷道围岩塑性区分布等效于开采矩形外接圆巷道，因此，在厚层软弱顶板矩形巷道中顶板密集锚索的支护作用可参考组合拱理论。

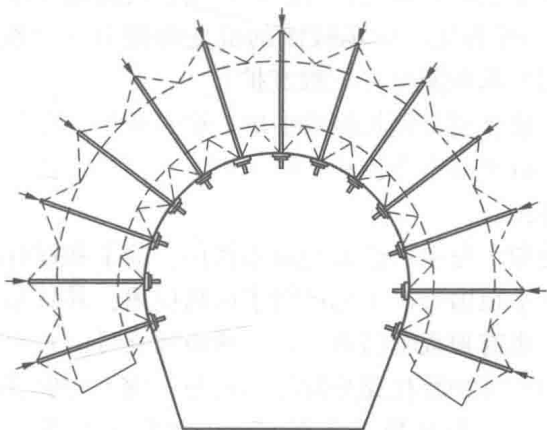


图 1-6 组合拱作用原理

(4) 围岩松动圈支护理论。围岩松动圈支护理论是由董方庭在大量的现场测试的基础上提出的，围岩应力大于围岩强度就会产生松动圈，在目前的开采条件下，煤矿巷道普遍存在松动圈，其厚度是围岩应力与围岩强度的综合体现，并且松动圈范围与巷道支护难度存在定量关系。松动圈范围在 0.4~1.5 m 之间可以采用悬吊理论设计锚杆支护参数，而当松动圈范围大于 1.5 m 后则采用组合拱理论进行锚杆支护设计。在厚层软弱顶板巷道围岩松动圈范围大，一般都在 1.5 m 以上，对于直线型断面不适合采用围岩松动圈理论进行锚杆支护设计。

此外，侯朝炯等人提出的围岩强度强化理论，认为锚杆支护可以提高锚固体的 E 、 C 、 φ 值等力学参数，提高锚固体的峰值强度及残余强度。王明恕提出的全长锚固中性点理论，认为锚杆最大轴向拉力的位置处在剪应力为零的中性点，并给出了中性点半径公式。W. J. Gale 提出的最大水平应力理论，阐明了在最大水平应力作用下，对锚杆刚度、强度和抗剪能力提出了更高的要求，以有效抑制岩层的剪切错动和膨胀变形。赖应得等人提出的能量支护学说，建立了能量支护的平衡方程，探讨了围岩和支护的能量再分配过程，用

能量支护理论指导锚喷支护和条带硐的支护设计。郭颂等人提出的“刚性”梁理论,强调充分利用锚杆的预应力建立顶板的“刚性”梁,消除顶板的弯曲变形,同时可以使水平应力的消极作用转化为积极作用。上述理论有力推动了锚杆支护理论的研究,人们逐步开始认识到锚杆对围岩离层、水平滑动等碎胀扩容变形的控制作用,认识到不同的预紧力产生不同的锚杆工作曲线,锚杆预紧力在整个支护系统中的决定性作用。

1.2.3 厚层软弱顶板巷道控制技术现状

随着煤矿开采条件的日益复杂,厚层软弱顶板条件所占的比重越来越大,此类巷道的开掘和维护工程量大。同时,由于高强度综合机械化开采的效率逐步提高,对巷道断面的要求也越来越高,因此,厚层软弱顶板巷道的安全控制技术已成为煤炭安全高效开采的关键技术之一。

苏学贵等人结合厚度 10 m 以上的典型松软复合顶板的工程案例,揭示了该类巷道中锚杆支护的拱—梁耦合作用机制,并指出构建浅部锚杆组合梁和深部锚索承载拱的耦合承载结构是实现该类巷道稳定的关键。

吴志忠等人提出复合顶板的叠加支护方法,首先利用短锚杆形成次生承载圈(一级支护),其次利用长锚杆进一步强化次生承载圈的抗变形能力(二级支护),最后利用锚索的减跨效应继续提高围岩的承载能力(三级支护)。

高明仕等人针对厚层松软复合顶板煤巷中单一锚索支护存在的问题提出了梯次支护理论,即一阶锚杆支护、二阶短锚索支护和三阶长锚索支护联合作用在松软顶板中形成立体承载结构,控制巷道的稳定。

在厚层软弱顶板巷道中十分强调锚索的加固作用,除了和锚杆联合作用外,全锚索支护在阳泉、红庙、潞安、平顶山等矿区也得到了成功应用,并且布置方式呈现多样化,既有顶帮全断面锚索支护,也有顶板全锚索支护,顶板锚索可以长短间隔布置,也可以长度一致。巷道顶板采用全锚索支护旨在充分发挥锚索预紧力大的优点,建立顶板“刚性”梁来消除顶板中部的拉应力区,使顶板不出现或少出现弯曲变形,提高顶板自身的承载能力,使顶板破坏不向纵深方向发展,顶板的渐进破坏过程得到有效控制。

此外,在厚层软弱顶板巷道中锚索桁架的优越性得到充分体现,在现场得到了广泛应用。何富连等人针对阳泉矿区新元煤矿强动压厚层复合泥岩顶板巷道的破坏特征,提出了顶板强力锚索桁架与短锚索联合支护系统,论述了强力支护作用下顶板中的拱桥强应力区支护原理及双拱桥耦合机理,从理论上验证了强力桁架支护系统的合理性。余伟健等人针对软弱半煤岩巷的变形破坏特征,提出了以“桁架锚索”为核心的综合控制技术,在广西百色矿区东笋煤矿得到了成功应用。高思强等人提出了采用顶板和煤柱三维锚索桁架控制深井沿空掘巷的剧烈变形,并在唐口煤矿 5302 工作面得到了成功应用。

当顶板不稳定岩层厚度超过 8~10 m 以后,采用单一的锚索往往不能取得满意的加固效果。此时,利用相对稳定的肩窝部位作为锚固点,通过连接器将两根锚索连接在一起形成桁架系统,可以对顶板岩层施加向上的力矩,消除顶板中部的拉应力区,改善围岩应力状态,并能对顶板松软破碎岩层形成兜护作用,有效防治顶板垮冒事故。锚索桁架的布置方式根据现场情况合理选择,既可以采用顶帮全断面桁架,也可以采用顶板或帮部单一桁架,断面较大时也可以采用顶板双锚索桁架或锚索桁架与单体锚索联合布置。

综上所述,大量对厚层软弱顶板巷道控制技术的研究侧重于锚索网支护的现场应用及

锚索支护机理及布置方式,但都没有形成一套完善的厚层软弱顶板巷道顶板变形监测、控制和安全性判定系统,因此相关内容有待进一步深入研究。

1.3 研究内容及技术路线

1.3.1 主要研究内容

本书针对目前厚层软弱顶板巷道控制机理及技术上存在的问题,以黄岩汇煤矿为工程背景,开展厚层软弱顶板巷道灾变机理、控制技术以及支护安全性评判等方面的研究,主要研究内容如下。

(1) 厚层软弱顶板巷道破坏特征及地质力学特性。首先,通过对黄岩汇煤矿 15107 轨道巷、芦岭煤矿 2927 运输巷及曲江煤矿 212 回风巷等 5 个典型巷道的现场调研和矿压观测分析,总结出厚层软弱顶板巷道的变形特性。其次,以黄岩汇煤矿为工程背景,从地应力场分布、煤岩物理力学特性和围岩结构 3 个方面分析围岩的地质力学特性。

(2) 厚层软弱顶板巷道灾变机理研究。首先,以黄岩汇煤矿 15107 工作面为工程背景,采用离散单元法程序 UDEC5.0 构建巷道裂隙演化的数值计算模型,研究顶板软弱岩层厚度、顶板岩层强度、埋深、水平应力以及顶板节理性质等因素对巷道裂隙演化规律的影响。其次,结合钻孔窥视、便携式地质雷达探测、顶板离层监测以及锚杆索受力监测等多种手段,开展厚层软弱顶板裂隙时空演化规律研究。最后,结合理论分析和现场监测探讨该类巷道顶板的灾变机理。

(3) 厚层软弱顶板巷道稳定性关键影响因素分析。首先,借助正交试验方法和 FLAC5.0 数值软件,设计 6 因素 3 水平正交试验分析直接顶厚度、直接顶强度、顶板支护强度、帮部支护强度、巷道宽度及煤层强度等因素的敏感性。其次,对可控性较强的因素—顶板支护强度进行研究,设计 6 因素 5 水平正交试验探讨锚杆长度、锚杆间距、锚杆预紧力、锚索长度、锚索间距和锚索预紧力等因素对巷道稳定性的影响,为厚层软弱顶板巷道选择针对性的支护方案、确定支护参数提供参考和借鉴。

(4) 厚层软弱顶板巷道安全控制技术体系。在上述研究的基础上,采用理论分析、数值模拟等方法,提出基于能量平衡的巷道支护技术原理和相应的控制技术,结合突变级数法和层次分析法等数学方法,对厚层软弱顶板巷道支护难度进行分级归类,并提出巷道稳定性多参量监测指标体系,形成完善的厚层软弱顶板巷道控制技术和安全评判体系。

(5) 厚层软弱顶板巷道工程实践。结合上述研究结果,分别选取黄岩汇煤矿 15111 轨道巷和芦岭煤矿 2927 运输巷为试验巷道,开展厚层软弱顶板巷道锚杆支护和 U 型钢支护的现场实践,验证提出理论的可行性和实用性,并完善理论研究成果和相关控制技术。

1.3.2 研究思路及技术路线

本书所述内容采用了现场调研、室内试验、理论分析、数值模拟、工程实践等多种方法,技术路线如图 1-7 所示。

(1) 现场调研。采用应力解除法进行了黄岩汇煤矿的地应力实测,统计分析矿井地应力分布规律;利用钻孔窥视仪对采动影响下围岩结构进行观察,采用便携式地质雷达对巷道围岩裂隙发育范围进行探测,综合分析顶板裂隙演化规律;对巷道位移、锚杆索受力、帮部深部位移、顶板离层等进行综合监测,分析巷道变形破坏特征。

(2) 室内试验。采用 TAW-2000 型电液伺服岩石三轴试验机对顶板砂质泥岩及 15 号

煤进行力学性能测试, 统计分析围岩的变形特征、强度特征及能量特征。

(3) 理论分析。建立考虑损伤的巷道-支护体本构模型, 将巷道顶板煤岩体看作是损伤体和粘缸的并连体, 给出不同条件下巷道顶板变形量的计算公式。

(4) 数值模拟。采用 UDEC 软件建立数值计算模型, 研究顶板软弱岩层厚度、顶板岩层强度、埋深、水平应力以及顶板节理性质等因素对巷道围岩裂隙演化的影响规律。采用 FLAC5.0 软件建立 43 个数值计算模型, 分析巷道稳定性关键影响因素。

(5) 工程实践。选取典型试验地点进行现场实践, 提出合理的巷道支护方案及参数, 进行系统的矿压监测, 评价方案的支护效果, 验证提出的理论的实用性。

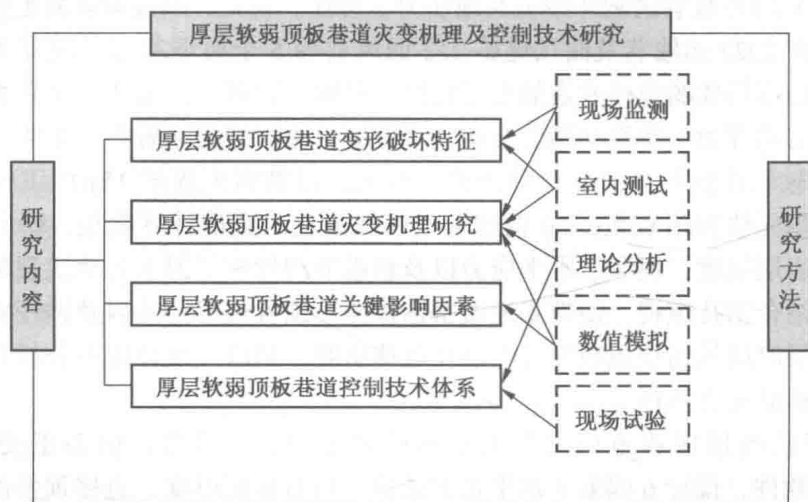


图 1-7 技术路线图

2 厚层软弱顶板巷道围岩地质力学特性

本章主要研究厚层软弱顶板巷道的变形破坏特征,以及典型巷道围岩的地质力学特性。首先,通过对黄岩汇煤矿 15107 轨道巷、芦岭煤矿 2927 运输巷及曲江煤矿 212 回风巷等 5 个典型巷道的现场调研和矿压监测分析,总结厚层软弱顶板巷道的变形特性。其次,以黄岩汇煤矿为研究对象,从地应力场分布、煤岩物理力学性质和围岩结构等 3 个方面分析围岩的地质力学特性。

2.1 厚层软弱顶板巷道变形破坏特征

选取黄岩汇煤矿 15107 工作面轨道巷、正利煤业 14⁻¹103 工作面轨道巷、芦岭煤矿 2927 工作面运输巷、神州煤业 4[#]煤层回采巷道和曲江煤矿 212 工作面回风巷 5 个典型厚层软弱顶板巷道,分析归纳该类巷道的变形破坏特征。

2.1.1 黄岩汇煤矿 15107 轨道巷

黄岩汇煤矿位于沁水煤田的东北部边缘,总体地势西高东低,海拔 869.90~1121.40 m。主采 15 号煤层,位于石炭系上统太原组,煤层厚度 4.35~9.50 m,平均厚 5.91 m,倾角 4°~18°,平均为 10°,赋存较稳定,全区可采。如图 2-1 所示为矿井煤岩层对比图,15 号煤顶板多为砂质泥岩,厚度在 10 m 以上,北部较薄,南部较厚;直接顶裂隙发育,抗压、抗拉强度相对较低,胶结弱,组分以泥质成分为主,易破碎。底板岩性多为砂质泥岩,顶底板围岩物理力学参数见表 2-1。

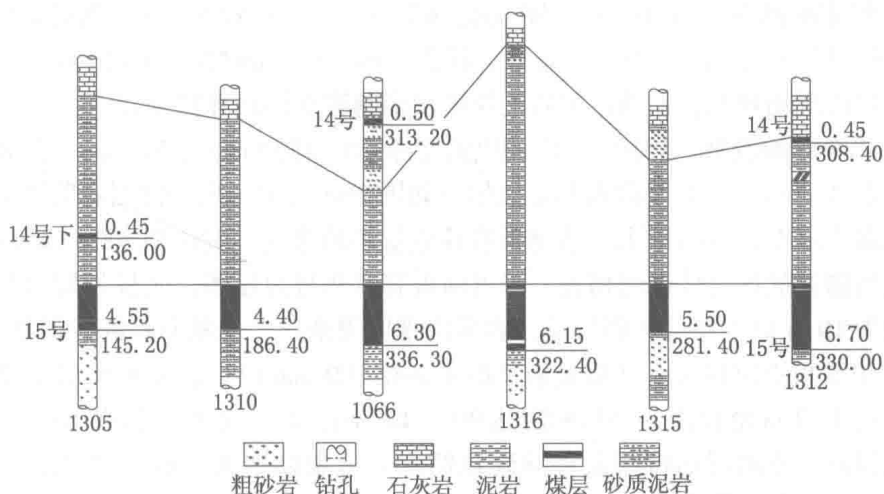


图 2-1 矿井煤岩层对比图

表 2-1 顶底板围岩物理力学参数

岩性	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
15 号煤	1385.7	13.83	0.86	2.915	42.96
顶板泥岩	2747.7	26.22	1.38	11.911	46.41
底板泥岩	2694.2	70.71	5.26	21.586	56.25
顶板灰岩	2705.7	146.0	8.87	44.467	59.46



图 2-2 15107 工作面煤岩柱状图

15107 工作面地面标高 880~1020 m，平均埋深 360 m，工作面南到阳涉铁路保护煤柱，北部为寺家庄铁路保护煤柱，东部为 15105 工作面采空区，西部为 15109 工作面采空区。15107 工作面煤岩柱状图如图 2-2 所示，由图可见 15 号煤层直接顶厚度在 10 m 以上，岩性为厚层状砂质泥岩、泥岩，灰色到灰黑色；直接底为平均 2 m 厚的泥岩，含 3~4 层煤线，较松软。

15107 工作面轨道巷为矩形断面，净宽 4500 mm，净高 3700 mm，采用锚杆+W 型钢带+菱形网+锚索联合支护，详细支护参数如下：

(1) 巷道顶部每排布置 6 根锚杆，间排距为 800 mm×900 mm， $\phi 20$ mm×2000 mm 的左旋无纵筋螺纹钢锚杆，锚杆托盘为 120 mm×120 mm×8 mm 的弧形钢压板，为增大锚杆延伸量增加了 200 mm×200 mm×50 mm 的木托盘。使用规格为 4400 mm×280 mm×3 mm 的 W 型钢带和 5000 mm×1000 mm

的 10 号镀锌金属菱形网。

(2) 巷道帮锚杆间排距为 800 mm×900 mm，锚杆规格同顶板。两帮采用 10 号镀锌金属菱形网，规格为 4000 mm×1000 mm。

(3) 顶锚索间排距为 2000 mm×900 mm， $\phi 21.6$ mm，长 9000 mm，钢梁采用 2.6 m 长的 14 号槽钢，槽钢平行于 W 型钢带布置，托盘采用 150 mm×120 mm×10 mm 的钢压板。

通过大量的现场观测，归纳出黄岩汇煤矿回采巷道变形破坏特征如下：

(1) 巷道全断面收敛。15107 工作面轨道巷净断面 4500 mm×3700 mm，共布置了 8 个测点，如图 2-3 所示。1~8 号测点巷道变形量如图 2-4 所示。现场监测表明该类巷道全断面收敛，断面收缩率在 40% 以上，巷道顶底移近量和两帮变形量达到 800~1200 mm。巷道全断面收敛与围岩赋存条件密切相关，该类回采巷道两帮为煤体，底板为较为软弱的泥质岩体，顶板为 10 m 以上厚层软弱岩层，容易出现四周来压、全断面收敛的现象。

(2) 巷道顶板下沉量大。巷道顶板下沉量多在 200 mm 以上，顶板离层监测表明回采期间巷道顶板 3~7 m 范围内，顶板离层达 90~140 mm，0~3 m 离层量在 20 mm 以内。回采期间顶板锚固区外离层的持续发育导致顶锚索受力急剧增大，巷道冒顶的风险显著增加。监测发现在超前工作面 60 m 范围内，锚索载荷增加到 150~200 kN，顶板锚杆受力在回采期间变化较小，一般在 25~100 kN。地质条件与之类似的 15102 工作面轨道顺槽在超前工作面 36 m 处发生冒顶事故，垮冒高度 2.5 m，超过了锚杆长度， $\phi 17.8$ mm×9000 mm