

ROOF COAL DEFORMATION MECHANISM AND ITS CONTROL TECHNOLOGY FOR ROADWAYS DRIVEN ALONG THE FLOOR IN ULTRA-THICK COAL SEAMS

国家自然科学基金项目 (51404248)  
江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)

# 特厚煤层沿底巷道 顶煤变形机理与控制技术

严红〇著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

兼外借

国家自然科学基金项目(51404248)

江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

# 特厚煤层沿底巷道顶煤变形 机理与控制技术

严 红 著

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书以特厚煤层沿底巷道为研究对象,采用现场调研、数值模拟、力学计算、现场工程实践等综合研究方法,较系统地分析了顶煤离层机理与关键影响因素、新型离层监测方法、厚煤顶支护安全性评价方法及控制技术等,并给出工程应用实例。

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大专院校相关专业师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

特厚煤层沿底巷道顶煤变形机理与控制技术 / 严红  
著. — 徐州: 中国矿业大学出版社, 2017. 2  
ISBN 978 - 7 - 5646 - 2955 - 7

I. ①特… II. ①严… III. ①特厚煤层—巷道—围岩  
变形—研究 IV. ①TD353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 298682 号

书 名 特厚煤层沿底巷道顶煤变形机理与控制技术  
著 者 严 红  
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)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 11.75 字数 224 千字  
版次印次 2017 年 2 月第 1 版 2017 年 2 月第 1 次印刷  
定 价 38.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

# 前 言

在我国,特厚煤层赋存矿区分布较广,如大同、阳泉、平朔、西山、兖州、潞安、神东、宁东矿区等。每年特厚煤层沿底巷道开掘和维护数量庞大,且由于开掘断面大、顶板由厚煤层和多层薄层状软弱夹矸层组成、煤层中节理裂隙普遍发育等复杂因素,在顶板变形特性及灾变机理、顶板离层形成机制及关键影响因素、顶板合理控制技术等方面研究极具挑战性,特厚煤层沿底巷道顶板失稳致灾已成为我国煤矿井下各类巷道顶板灾害中发生频率最高和造成人员伤亡事故最严重的灾害之一,并严重制约着我国特厚煤层赋存矿区煤炭的安全、持续和高效开采。

因此,本书在总结前人研究工作的基础上,以特厚煤层沿底巷道为对象,主要对巷道围岩变形特征及其变形关键影响因素、顶板灾变发展机理、顶板离层科学定义、离层变形机理、离层的关键影响因素、离层的科学监测方法、顶板安全性评价综合指标及评价系统、顶板控制技术等内容开展系列研究。全书共七章,各章主要研究内容如下:

(1) 第一章论述了特厚煤层沿底巷道顶煤安全状况、顶板离层以及支护理论与技术的研究现状和研究意义、存在的问题,提出了研究内容和方法。

(2) 第二章结合多个典型工程实例,利用数值模拟的方法研究了特厚煤层沿底巷道的围岩变形特征;从工程结构、沉积结构和支护结构方面对特厚煤层沿底巷道顶板变形影响因素进行了分类,并确定出其中的关键影响因素;分析探讨了特厚煤层沿底巷道顶板灾变过程和机理。

(3) 第三章研究了特厚煤层沿底巷道顶板离层。提出了顶板离层概念并进行了分类,探讨了不同支护条件下顶板离层机理,构建了顶板离层数值模型,确定了顶板离层的关键影响因素。

(4) 第四章主要研究了特厚煤层沿底巷道顶板控制理论和技术。如:特厚煤层沿底巷道顶板安全性判定原则和加固方法;以控制危险离层发展为核心的新型“多支护结构体”系统,包括该系统的组成子结构及其支护原理。

(5) 第五章研究了特厚煤层沿底巷道顶板离层监测方法与顶板安全评价分析系统。提出了一套顶板离层监测新方法和以“离层类”监测为核心的顶板安全

评价指标及顶板安全性分析评价系统。

(6) 第六章分别介绍了采动影响下特厚煤顶大断面回采巷道和软弱厚顶煤大跨度开切眼两个工程实例,验证了上述理论研究的可靠性和实用性。

(7) 第七章归纳了本书研究得出的主要结论,并对后续研究工作进行展望。

在本书编写过程中,得到了中国矿业大学矿业工程学院领导、老师和众多专家、学者的大力支持和指导。中国矿业大学(北京)何富连教授在作者博士学习期间所进行的研究课题给予了深入指导;我国煤矿巷道围岩控制领域著名学者、中国矿业大学侯朝炯教授对研究的切入点和深度方面进行了悉心指点和帮助;中国矿业大学(北京)王家臣教授、侯运炳教授、孟宪锐教授、许延春教授、马念杰教授、张守宝副教授、谢生荣副教授等对研究内容、写作思路、研究方法等提出了大量宝贵建议,在此谨向他们致以衷心的感谢!

本书中工程实践涉及我国多个现代化煤矿。在此,对有关领导及工程技术人员的大力支持和热情帮助表示诚挚谢意!

本书还引用了国内外大量的文献资料,对这些专家和学者深表感谢!同时,还要感谢中国矿业大学出版社的大力支持与关心!

本书的出版得到国家自然科学基金项目(51404248)、中国博士后科学基金项目(2014M551702)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)、江苏省品牌专业建设工程项目(PPZY2015A046)、深部煤矿采动响应与灾害防控安徽省重点实验室开放基金(KLDCMERDPC15101)的资助,在此一并表示感谢。

由于作者水平和学识所限,书中难免存在疏漏、缺陷和错误之处,恳请专家和读者批评指正。

著 者

2017年1月

# 目 录

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第一章 绪论                       | 1   |
| 第一节 引言                       | 1   |
| 第二节 巷道顶板离层与支护技术研究综述          | 4   |
| 第三节 主要研究内容与研究方法              | 15  |
| 第二章 特厚煤层沿底巷道变形特性及顶板灾变机理      | 16  |
| 第一节 特厚煤层巷道变形特性               | 16  |
| 第二节 巷道顶板变形关键影响因素及灾变机理        | 32  |
| 第三节 特厚煤层沿底巷道顶板灾变机理初探         | 53  |
| 第四节 本章小结                     | 55  |
| 第三章 特厚煤层巷道顶板离层机理及关键影响因素      | 56  |
| 第一节 特厚煤层巷道顶板离层概念和分类          | 56  |
| 第二节 特厚煤层锚杆(索)联合支护下巷道顶板离层机理   | 60  |
| 第三节 特厚煤层锚杆(索)支护巷道顶板离层关键影响因素  | 66  |
| 第四节 本章小结                     | 82  |
| 第四章 特厚煤层巷道顶板控制技术研究           | 83  |
| 第一节 特厚煤层巷道顶板控制安全现状           | 83  |
| 第二节 特厚煤层沿底巷道顶板控制系统           | 86  |
| 第三节 本章小结                     | 109 |
| 第五章 厚煤顶离层监测方法、支护安全性判定指标及系统开发 | 111 |
| 第一节 厚煤层巷道顶板离层监测新方法探究         | 111 |
| 第二节 厚煤层巷道顶板“离层类”监测指标研究       | 118 |
| 第三节 特厚煤层巷道顶板安全性综合分析软件        | 125 |
| 第四节 本章小结                     | 134 |



|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第六章 现场工程实践.....              | 136 |
| 第一节 采动影响下特厚煤层沿底回采巷道工程实例..... | 136 |
| 第二节 软弱厚顶煤大跨度开切眼工程实例.....     | 147 |
| 第三节 本章小结.....                | 151 |
| 第七章 结论及后续研究工作.....           | 153 |
| 第一节 主要结论.....                | 153 |
| 第二节 后续研究工作.....              | 155 |
| 参考文献.....                    | 156 |
| 附录.....                      | 168 |

# 第一章 绪 论

## 第一节 引 言

煤炭是我国的主要能源之一,在所有一次能源的生产和消费总量中煤炭占比值分别达到 76%和 69%,2014 年我国原煤产量已达 38.7 亿 t。在《能源中长期发展规划纲要(2004~2020 年)》中也明确提出“坚持以煤炭为主体、电力为中心、油气和新能源全面发展的能源战略”目标。因此,在相当长一段时期内煤炭的主体能源地位不会改变。

我国矿山顶板灾害威胁严重,顶板事故目前我国矿山各类事故中发生频率最高。由于煤系地层赋存条件复杂、岩体普遍较软弱且节理裂隙发育,矿山顶板事故中又以煤矿顶板事故发生率最高且造成的事故伤亡人数最多,仅 2010 年我国煤矿顶板事故死亡人数就达 890 人。然而,由于单次顶板事故伤亡人数普遍在 10 人以下,与透水、火灾等事故单次伤亡人数悬殊巨大,因此一些煤矿未给予足够的重视,但频繁发生的顶板事故迫使煤矿科技和管理人员开始将顶板事故防治视为与瓦斯、水灾事故防治同等重要。国家安全生产监督管理总局统计得出 2001~2010 年煤矿主要事故发生数,如图 1-1 所示,顶板事故数分别为透水、火灾灾害事故数的 8 倍和 49 倍。据联邦矿山安全与健康局(MSHA)报告,在美国,因顶板事故造成的死亡人数在所有地下死亡人数中占比值高达 70%,1995~2000 年印度顶板事故数及死亡人数在井下所有事故数和死亡人数中也分别占比为 43.6%和 41.9%。

国家“十五”、“十一五”和“十二五”煤炭工业发展规划中,分别将煤矿突发性灾害监测及防治、煤矿重大安全隐患防治技术及煤矿围岩支护机理研究内容列为重点科技攻关课题。矿山顶板灾害的研究涉及地质、采矿、力学、地球物理等学科,顶板灾害发生时一般没有明显的宏观前兆,具有突发性、瞬时性、巨大破坏性的特征,顶板灾害发生主要是顶板岩体由于采掘活动在变形破坏过程中应力场、位移场非线性转移、积累和释放显现的力学过程,是其外部岩体环境、内部岩性结构、地质构造及其物理力学性质的综合反映,具有明显时空演化特征。



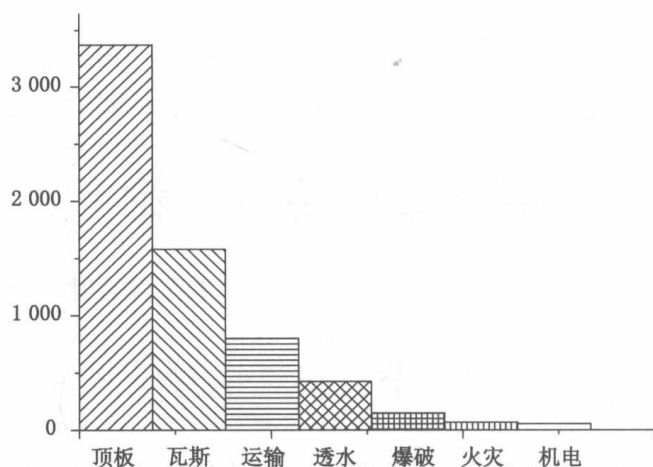


图 1-1 2001~2010 年我国煤矿主要事故发生数统计结果

我国厚煤层可采储量约占全国总可采储量的 45%。伴随我国煤矿开采强度与规模的不断增加以及采煤工作面装备的大型化,相应地各类巷道的断面也越来越大,各大型矿井回采巷道宽度普遍已达 5~6 m,断面面积达到 16~20 m<sup>2</sup>,有的甚至更大,接近甚至突破了部分学者提出的平均临界巷道宽度值,对于大跨度特厚煤层沿底巷道围岩控制系统研究迫切而必要。

通过对大量特厚煤层沿底巷道支护情况调研:部分现场采用传统的支护理念或工程类比法设计支护方案,巷道服务期间往往表现为顶板剧烈下沉、两帮回缩、底鼓等异常矿压显现特征,如图 1-2 所示;部分巷道甚至发生局部或大面积突发性顶板垮冒事故,造成重大经济损失和人员伤亡;缺乏厚煤层巷道变形特征的研究,尤其是厚顶煤离层灾变特征的深入研究;已公开的大部分研究成果忽略了特厚煤层沿底巷道顶煤性质、夹矸层及煤与矸交叉混合等因素影响。因此,深入研究特厚煤层沿底巷道变形特征、顶板离层变形机理及科学合理的顶板控制技术意义重大。

对于厚煤层巷道顶板灾变过程,部分学者认为是煤岩界面处层面先离层、煤梁端部断裂、解除约束后顶板向某一方向运动而发生事故。煤矿回采巷道中普遍安装顶板离层仪,顶板离层变形数据由煤矿现场技术人员进行观测和记录。然而,该测量方式存在以下几种缺点:观测不方便,误差大;数据实时连续性差,且随机盲目性强;数据集中分析处理烦琐且效率低。因此,我国部分煤炭高校和科研院所[中国矿业大学、中国矿业大学(北京)、山东科技大学、太原理工大学、煤炭科学研究总院、山东大学等]、企业(兖洛卡矿业安全工程股份有限公司、济南科泰测控技术有限公司、山西潞安环保能源开发股份有限公司、兖州煤电股份

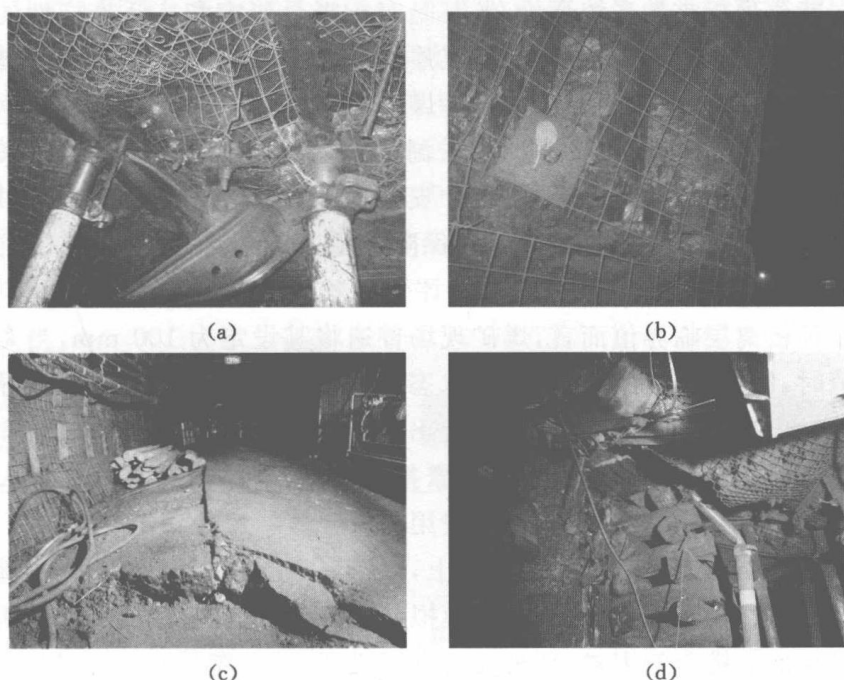


图 1-2 部分特厚煤层沿底巷道异常矿压

(a) 顶板下沉;(b) 煤帮内移;(c) 底板起裂底鼓;(d) 加强单体柱体弯曲

有限公司等)对其智能化改进开展了大量研究工作,已成功开发出 KZL300、KJ216、KJ132 等系列成套巷道顶板离层智能监测系统。这类监测系统的共同原理是:将煤矿井下巷道顶板的离层监测数据通过在线传输模式至地面主机,然后结合开发的在线离层监测软件对井下传输的离层数据进行分析,并根据现场对数据的不同要求,形成相应的数据或曲线报表。顶板离层智能监测系统研制的成功减少了现场作业人员的工作量,提高了顶板离层数据监测的准确度,在一定程度上有利于现场人员及时了解顶板变形动态,并针对顶板变形异常区域采取加固措施。

然而,软硬件装备仅是锚杆支护巷道是否离层的外在监测手段,能够捕捉并记录顶板离层值,在宏观上起到一定的指示预警作用。但是对于巷道顶板离层发生机理和演化特征等内在原因如果分析不清楚,也可能导致顶板事故发生,如:哪些因素会导致离层,主导因素是什么,测站如何设置能正确揭示离层特征,如何解释和应用离层测量数据,利用监测数据如何有效地建立和评判围岩控制系统。国内外学者对此作了一定的研究,然而已公开的研究成果多依赖于连续性数值模拟分析,倾向于复合顶板岩层离层研究,以及单一方法得出离层界限值(结合锚杆与锚索延伸率或实测顶板跨冒离层值)等。同时,缺乏将离层变形信

息应用于巷道顶板支护系统评价,尤其是对于极具研究和广泛推广性的特厚煤层沿底巷道而言相关研究更少,特厚煤层沿底巷道顶板与传统研究的复合岩层顶板变形、离层特征差别较大。由于厚煤顶中含多层薄层状软弱夹矸层、煤层中节理裂隙普遍发育且巷道跨度较大,采掘过程中巷道垮冒威胁性大。其中如顶板变形特征、离层机理、影响因素、支护安全性、支护技术等关键问题的研究,对于指导巷道矿压监测方案科学设计和保障巷道围岩稳定至关重要。例如,煤矿现场大多对特厚煤层巷道顶板安全性评估依赖于顶板表面位移值和离层临界值。对于顶板离层临界值而言,煤矿现场普遍将其设定为 100 mm,当离层变形超过此值时,即认为顶板处于不安全状态,这是不科学的判定方法,易导致现场生产过程中出现两种不利结果,即顶板出现垮冒而示警信号还未发出和顶板尚无冒落危险可能的情况下预警系统频繁报警,而“谎报”既易降低井下人员安全防范心理,又会增加无谓的强化支护费用。

本书在总结前人研究工作的基础上,以特厚煤层沿底巷道为对象,综合现场调研、实验测试、力学模型分析、数值模拟和现场实测方法,主要对巷道围岩变形特征及其变形关键影响因素、顶板灾变发展机理、顶板离层定义、离层变形机理、离层的关键影响因素、离层监测方法、顶板安全性评价综合指标及评价系统、顶板控制技术等内容开展系列研究,并在现场进行实践验证,取得了良好的社会效益,有效保障特厚煤层沿底巷道顶板支护安全,防止巷道顶板垮冒,形成一套完善的特厚煤层沿底巷道顶板变形监测、控制 and 安全性判定系统。研究成果有利于提高特厚煤层沿底巷道顶板监测的科学性,克服盲目性。同时,对于推动特厚煤层沿底巷道顶板支护技术改革和安全性判定有重要的理论与实践意义。

## 第二节 巷道顶板离层与支护技术研究综述

### 一、巷道顶板离层的研究概况

我国煤炭产量的快速增长和经济效益的稳步提升并未使得顶板灾害事故大幅减少,各地顶板事故仍频繁发生,这迫使煤矿现场及研究人员开始探索如何更有效地监测和防范顶板事故的问题。众多矿用安全监测设备也得到快速发展,尤其与顶板安全关系最为密切的顶板离层监测仪器发展十分迅速。总体来看,煤矿井下顶板离层监测仪器的发展历程主要经历了两个阶段:机械式直读离层位移指示仪和智能化离层监测系统。

(1) 机械式位移指示仪。该类型的离层仪仅由简单的机械结构组成,顶板监测的具体离层数据则由现场工程技术人员进行测读。例如,LBYⅢ型顶板离

层仪和 DLZ-2 型顶板离层位移指示仪,前者监测原理主要是依靠孔内钢丝将离层位移转换为孔口钢管的相对位移,而后者通过内、外测筒随巷道顶板深、浅岩层的相对位移变化而在对应测筒的标尺上反映出离层量。

(2) 智能化离层监测系统。其基本原理是:将生成的离层变形数据进行转化,生成磁信号、电信号等,采用电缆或其他媒介将信号传输至地表,再由地面装置将其转化为离层变形数据值,并将所有生成的数据自动传输、储存和分析,其基本架构如图 1-3 所示。

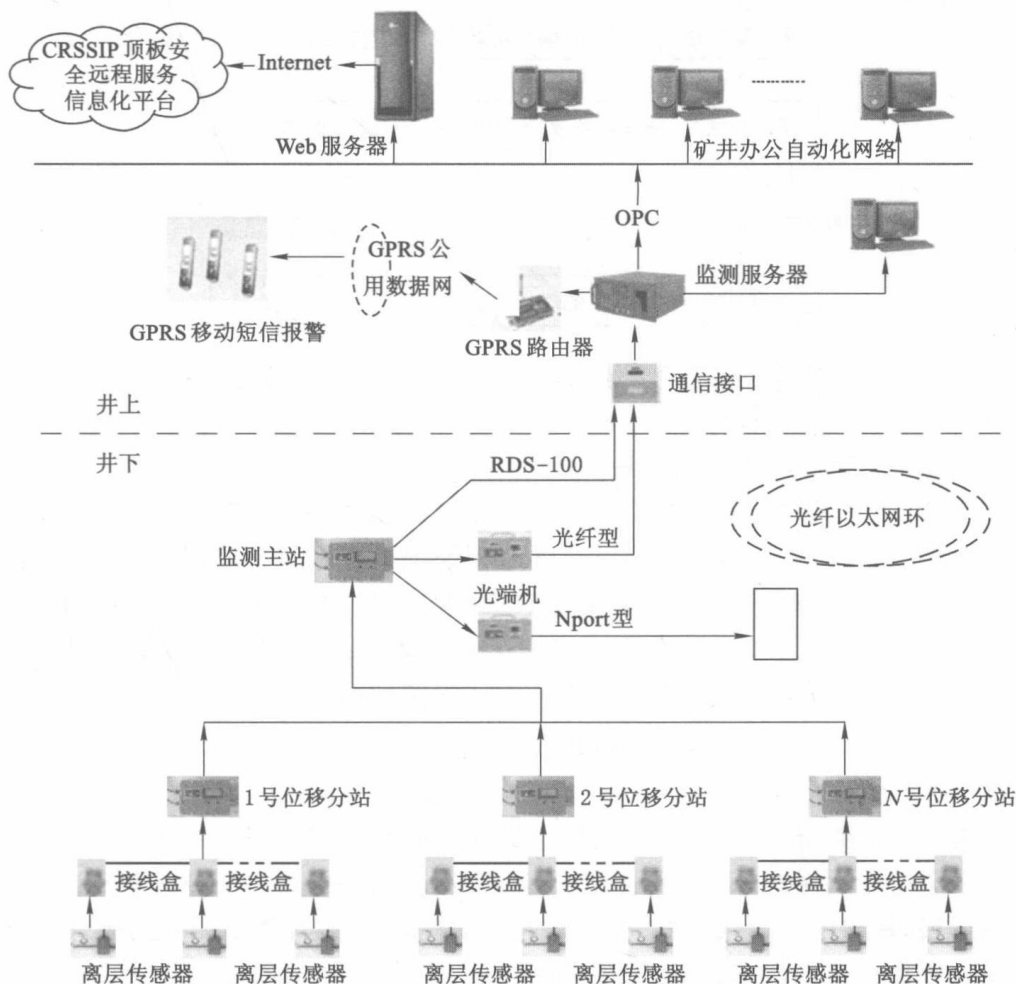


图 1-3 某智能化离层监测系统的组成结构

煤矿现场中的智能化离层监测系统主要有 GDY306 型矿用顶板位移监测系统、锚网支护巷道顶板离层监测系统、光栅位移监测系统、KZL-300 离层监测系统和尤洛卡矿业安全工程股份有限公司开发的 KJ-216 离层监测报警系统等。

```

graph TD
    subgraph AboveGround [地面以上]
        WS[Web 服务器]
        MLAN[矿区局域网]
        GPRS_T[GPRS 收发器]
        MS[监测服务器]
        GPLAN[GPRS 公用局域网]
        WS --> MLAN
        MLAN --> MS
        GPRS_T --> WS
        GPRS_T --> GPLAN
        GPLAN --> MS
    end

    subgraph BelowGround [地面以下]
        T1[通信分站 1]
        T2[通信分站 2]
        Tn[通信分站 n]
        S1[位移传感器 (1~n)]
        S2[位移传感器 (1~n)]
        Sn[位移传感器 (1~n)]
        T1 --> S1
        T2 --> S2
        Tn --> Sn
    end

    MLAN --> T1
    MLAN --> T2
    MLAN --> Tn
    T1 --> GPLAN
    T2 --> GPLAN
    Tn --> GPLAN

```

图 1-4 监测网络的组成框图

总结上述发展过程,顶板离层在线监测系统是在机械式测量工具的基础上进行智能化改进和完善的产物。由于它集在线测量、数据采集和超限报警为一体,不仅可大幅降低现场监测强度,减少工人作业量;更重要的是能够准确、实时连续记录顶板的变形特征,为现场技术人员或院校科研人员进一步分析特定支护状态下顶板支护状况提供依据,验证或完善相应的支护对策,必将得到进一步的推广应用和发展。

对于煤矿巷道顶板离层,煤炭科学研究总院鞠文君教授等认为离层的含义不应局限于岩层间的分离,还包括岩层的扩容、碎胀、折曲等;近年来随着工程实践的开展,提出了临时性顶板离层、周期性顶板离层、临界离层面积的概念,现场根据顶板离层不同位置,一般又分为锚杆锚固外离层和锚固内离层。

苏联列宁格勒矿业学院 A. A. 鲍里索夫教授认为离层是在顶板弯曲阶段煤和煤层中夹矸变形的结果, 载荷通过煤与夹矸层间相互叠压支点附近从一层传递到另一层上。在破坏发展过程中各层的跨距从下向上逐步减小, 使巷道两壁上方出现类似伞檐现象, 且煤矸层间易受剪应力破坏。

$$\tau_{\max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{Q_{\max}}{\sum h_i} \quad (1-1)$$

式中  $Q_{\max}$ ——危险断面中的最大正应力；

$\sum h_i$ ——煤与软弱夹矸的总厚度。

由此,最大剪应力值还可以表示为:

$$\tau_{\max} = 0.25\sigma_{\max} \quad (1-2)$$

通过对国内外大量文献检索,顶板离层理论研究主要集中在以下五部分:离层影响因素及离层形式;离层临界值的确定;离层规律的分析;离层机理的研究;离层稳定性判定。

#### (一) 第一部分:离层影响因素及离层形式研究

鞠文君等给出了顶板离层的几种形式,包括广义的弹塑性变形引起的离层、岩层扩容引起的离层,以及狭义上的微弱面滑动和张开导致的岩层间分离;并简要分析了6个影响巷道顶板离层变形因素。陆庭侃等概括了离层不同方式,即岩层受拉、岩层间挠度不一致、高水平应力作用、岩层间力学特性差异、地下水作用因素,并分析5个影响顶板离层因素,即直接顶厚度、巷道宽度、埋深、侧压系数及围岩力学性质,得出埋深和巷道宽度对离层影响均存在临界值,超过此临界值离层影响增大以及顶板岩层力学性质对顶板离层影响明显。陈勇等模拟分析了影响特厚煤层大断面巷道顶板离层几大因素,包括巷道埋深、侧压力系数、弹性模量、抗拉强度、内摩擦角、黏聚力、巷道断面及锚固方式,得出:巷道埋深、侧压力系数及弹性模量是影响顶板离层的关键因素;断面的宽度与高度相比,对顶板离层影响更为显著。

#### (二) 第二部分:离层临界值的确定

顶板离层产生并不代表岩层失稳开始,只有当顶板离层发展到一定数值范围才会诱发失稳灾变。顶板离层临界值长期以来一直作为判定巷道顶板安全与失稳的重要指标,并受到国内外研究学者的重点关注。在国外,顶板离层临界值一般依据最大水平应力理论确定。当顶板岩层在水平应力作用下松动膨胀达到1/10时,水平应力影响程度急剧降低,岩层进入软化阶段,应力释放或发生转移。澳大利亚向英国、印尼、日本、波兰输出锚杆支护技术时,顶板离层界限按1 in(约为2.54 cm)考虑。

在国内,主要通过力学模型、数值模拟、现场监测统计、位移反分析正演、神经网络计算中的一种或多种混合方法得出巷道顶板离层临界值。

刘长武、沈荣喜等建立了锚网实体煤巷顶板临界离层的力学模型,如图1-5所示,通过将锚网实体煤巷掘进时顶板简化为固支梁和简支梁,得出了锚网煤巷



的离层临界近似表达式。

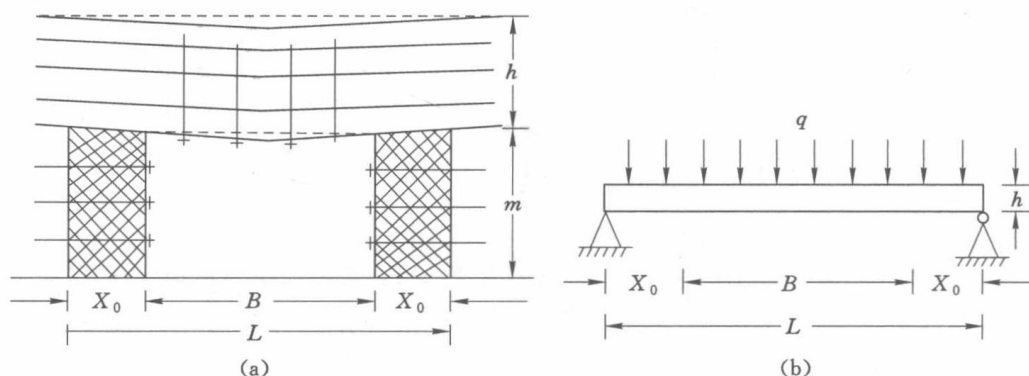


图 1-5 锚网支护实体煤巷离层临界值力学模型

(a) 临界状态的锚网组合体; (b) 抽象力学模型图

(1) 仅锚杆支护而无锚索支护时, 离层临界值为:

$$DIS_c = \frac{5\gamma(B+2X_0)}{32Eh^2} \quad (1-3)$$

式中  $DIS_c$ ——顶板离层临界值, m;

$\gamma$ ——顶板煤(岩)层容重,  $\text{kN}/\text{m}^3$ ;

$B$ ——巷道跨度, m;

$X_0$ ——极限平衡区深入巷帮的宽度, m;

$E$ ——锚网组合梁的弹性模量, MPa;

$h$ ——梁高, m。

(2) 锚杆、锚索联合支护时, 离层临界值为:

$$DIS_c = (l_{\text{总}} - l_{\text{外}}) E \sin \alpha \quad (1-4)$$

式中  $l_{\text{总}}$ ——锚索总长度, m;

$l_{\text{外}}$ ——锚索外露长度, m;

$\alpha$ ——锚索安装时与巷道顶面的夹角,  $(^\circ)$ 。

周明提出首先按垮落时顶板离层值作为临界值, 若没发生垮落就按经验设置较小离层值作为准离层值, 然后根据离层情况, 上下幅度进行调整。当所观测的离层量小于准离层值时, 则不必修正; 当实际顶板离层量超过设定值时, 逐渐加大准离层值, 再观测和修正。章伟等分别研究了锚网支护和锚索支护煤巷顶板离层临界值大小, 认为锚网支护巷道顶板离层临界值与煤层赋存、开采技术条件、锚杆长度、直径、支护密度、金属网性质等因素密切相关; 锚索支护巷道离层临界值主要取决于索体延伸率以及顶板倾斜角度。王泽进、鞠文君和张里程结合数值模拟和回归分析得出顶板锚固段内外离层临界值计算经验公式[式(1-5)]

和式(1-6)];杨风旺、毛灵涛提出将位移反分析正演法、神经网络和 FLAC 软件模拟结合起来确定离层临界值,即在测定巷道围岩位移量基础上,利用神经网络和反分析正演法得到围岩弹性模量和黏聚力,最后通过 FLAC 数值计算确定顶板离层临界值。

(1) 锚固范围内顶板离层表达式:

$$U_d = 0.764 \frac{\lambda k \sigma H}{\sqrt{K_R \sigma}} + 4.537 \frac{B}{\sqrt{M_s Q}} - 49.163 \quad (1-5)$$

式中  $\sigma$ ——顶板上方相当于巷道宽度范围内的各岩层单轴抗压强度的加权平均值,MPa;

$H$ ——巷道埋藏深度,m;

$B$ ——巷道腰线位置的设计宽度,m;

$Q$ ——锚杆支护强度,kN/m<sup>2</sup>;

$\lambda$ ——侧压系数,即水平应力与垂直应力的比值;

$k$ ——反映采动影响的应力集中系数;

$K_R$ ——顶板完整性系数;

$M_s$ ——锚固系数,即锚固段长度与锚杆长度的比值。

(2) 锚固范围外顶板离层表达式:

$$U_d = 0.0259 \frac{\lambda k \sigma H}{\sqrt{K_R \sigma}} - 1.502 \frac{B}{\sqrt{M_s Q}} + 36.681 \quad (1-6)$$

(三) 第三部分:离层规律的分析

澳大利亚 B. K. Hebblewhite 和 T. Lu 从现场某一平均埋深为 500 m 的巷道掘进时、掘进后和回采时三个阶段对顶板离层变形数据监测和分析后得出:掘进时,离层主要分布于巷道顶板以上 6 m 区域范围内,且较均匀;掘后一段时间后,离层变形出现区域集中化,主要分布于 2~3 m 和 5~6 m 两个范围内;受工作面回采影响时,合并形成较大的离层域,主要在顶板以上 6 m 处,离层范围进一步向顶板深处扩展。张百胜等根据非线性接触理论,运用 ANSYS 软件对大宁煤矿大断面全煤巷道层状顶板的离层特性进行模拟研究,并将得出的模拟结果与现场采用钻孔窥视读取的离层结果进行比较,数值模拟结果基本与现场相符,这为离层规律的研究提出了新的方法和分析思路。孔恒、张文军等从顶板离层的变形协调条件与锚杆锚固系统关系角度开展了相关研究,并结合现场验证说明离层监测和反馈的重要性。施从伟、沈有智主要从圭山煤矿顶板离层监测结果出发,得出:① 顶板离层主要集中在浅部层面交界处,深部也有离层但离层量不大;② 从记录的离层变化情况来看,顶板离层最初发生在离巷道顶板表面较近的地方,随着时间的推移,离层从最初的较低岩层部位向较高岩层部位发展;③ 顶板离层量大小与工作面开采扰

动密切相关,开采扰动较大,顶板离层值也较大。

#### (四) 第四部分:离层机理的研究

李唐山、黄侃认为顶板离层是由于重力与顶板岩层中的法向拉伸应力超过了岩层的层面法向抗拉强度,直接顶下部岩层与上部岩层脱离,自重下沉造成岩层自下而上逐步减弱弯曲而在岩层间出现分裂现象。鞠文君等提出了广义顶板离层和狭义顶板离层的概念,认为顶板离层主要由围岩弹塑性变形、岩层扩容以及微观力学性质较差的弱面间滑动和松开等引起。时连强和郝玉龙等重点研究了综放巷顶板离层的作用机理以及按冒落拱稳定性、形状、冒落时间等对顶煤的冒落机理开展相关研究,认为层理面对顶板离层和冒落影响非常大。

#### (五) 第五部分:离层稳定性判定

钱平皋、谢和平建立了顶板岩层稳定性力学模型,结合宏观损伤力学推导出顶板离层失稳准则。吴德义等研究了深部复合顶板离层稳定性,认为离层初期(0~25 d)以塑性离层为主,后期以层间离层为主;结构面离层分离范围可判定离层稳定值,结构面中部离层以拉应力为主,两端离层以剪应力为主。

纵观上述研究成果,在巷道顶板离层问题上,国内外学者已作了大量的研究工作,但是相关问题研究仍远落后于实践的需要,主要表现在以下两方面:

(1) 顶板离层监测仪器在不断改进创新,但配合离层监测系统监测方法比较笼统。顶板在线离层监测系统由于具有实时监测、系统安装配置灵活、设置报警值后能自动声光报警等优点,在全国大部分矿区已得到推广使用,但其监测方法有待改进或优化,如顶板离层临界值合理化确定、钻孔中基点的安设位置以及巷道围岩中测试点的有效编排等,需要更深入地研究。

(2) 大断面特厚煤层沿底巷道顶板离层机理、影响因素、监测系统布置、顶板安全性评价、控制技术与复合岩层顶板存在较大区别,文献中主要分析复合顶板岩层离层影响因素、变形特征及控制技术,而对于特厚煤层沿底巷道顶板离层机理及影响因素分析,除部分零星的数值模拟外,还未检索到其他相关研究成果;其次是已公开报道的利用数值模拟得出的成果多依赖于连续性差分软件,而顶板离层的变化发展是非连续性过程,采用非连续性数值软件开展研究或分析相对而言更为合理;再次是研究方法单一化,如单一地采用数值模拟分析或现场测试方法,而没有将模拟分析、现场监测和支护系统设计或优化进行综合性研究,导致部分研究成果难以有效在现场指导相关巷道围岩控制实验并得到推广使用。

## 二、煤巷锚杆支护机理研究现状综述

国内外学者对煤巷锚杆支护机理开展了大量深入的研究,研究成果为煤巷锚杆支护理论的进一步发展和支护技术在各种煤矿巷道中的推广应用奠定了坚