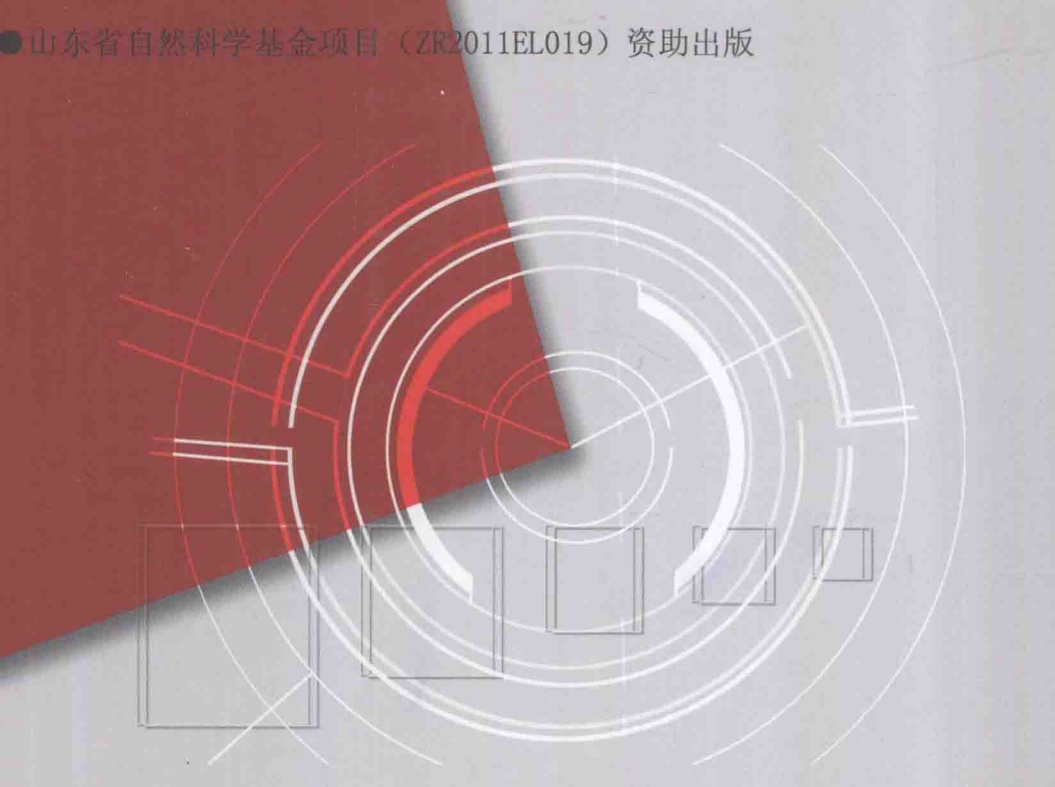


山东省自然科学基金项目 (ZR2011EL019) 资助出版



顶板动态监测监控及 信息融合技术研究

张 勇 著

 煤炭工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

顶板动态监测监控及信息融合技术研究 / 张勇著. --
北京: 煤炭工业出版社, 2013

ISBN 978 - 7 - 5020 - 4333 - 9

I. ①顶… II. ①张… III. ①计算机应用—顶板—动态监测—监控系统 IV. ①TD322 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 226292 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
北京房山宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

开本 880mm × 1230mm ¹/₃₂ 印张 8³/₈ 插页 1
字数 216 千字

2013 年 10 月第 1 版 2013 年 10 月第 1 次印刷
社内编号 7161 定价 26.00 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

内 容 提 要

本书较为详尽地介绍了作者多年来在煤矿顶板动态监测、监控领域的工作及科研成果，特别是对近年来迅速发展的信息融合技术及其算法在顶板预测、预报中的应用做了较大篇幅的论述。内容主要包括：绪论；顶板动态监测系统及其集成原理；顶板动态监测集成系统的分析与建模；顶板动态监测系统集成的技术方法；基于证据理论的冲击地压算法模型研究；基于统计模式识别方法的采场顶板动态规律研究和工程应用；时间序列在综采工作面支护阻力预测中的应用研究；神经网络在顶板动态监测集成系统中的应用；顶板动态监测模糊理论及应用。

本书可供采矿、安全技术及工程、电子信息工程、测控、计算机等领域的科技与工程技术人员和高等院校师生参考。

前 言

中国是世界上最大的煤炭生产和消费国，约有 500 多万煤矿工人。然而，由于煤炭资源储存条件复杂，煤矿地质灾害频发，是煤矿事故多发国家，中国煤矿事故和死亡人数占到了世界总数的 80% 左右。在煤矿所有发生的事故中，顶板事故死亡人数约占煤矿总死亡人数的 40%，其中 80% 的顶板事故发生在回采工作面。因此对顶板的监测和预报引起了国家和企事业单位的高度重视。

本书研究内容是山东省自然科学基金项目“基于信息融合技术的综采工作面顶板动态监测海量数据关联算法模型研究”（项目编号 ZR2011EL019）、山东省科技攻关项目“煤矿顶板动态监测系统”（项目编号 2008GGA09001）的组成部分，也是落实我国煤矿安全生产“十二五”规划和煤矿安全科技“十二五”规划的具体行动，对于我国煤矿安全发展、构建和谐社会都具有重要的现实意义和长远的战略意义。

众所周知，煤矿生产是一个动态的过程，顶板运动受到各种因素的影响，各种参数和变量随时发生变化，但各个变量之间不是孤立的，而是相互联系的。例如，支架上测到的是压力变化，锚杆测到的是应力变化，离层测到的是位移量或下沉量等，这些量从不同的侧面反映顶板的变化，因此是一个多信息融合问题。

多传感器信息融合又称数据融合，是对多种信息的获取、表示及其内在联系进行综合处理和优化的技术。多传感器信息融合技术从多信息的视角进行处理及综合，得到各种信息的内在联系和规律，从而剔除无用的和错误的信息，保留正确的和有用的成分，最终实现信息的优化，它为智能信息处理技术的研究提供了新的观念。数据融合的方法很多，例如有卡尔曼滤波、模糊逻

辑、聚类分析、Bayes 统计、D-S 证据理论、人工神经网络、数据挖掘技术、粗糙集等。这些方法各有优缺点，应结合具体问题灵活运用。

近年来，随着国家科技投入的不断增加，国内许多煤矿企业安装了不同公司的独立监测预报系统。这些系统侧重点不同，检测到的信息是不完整、不全面、不精确甚至有时是互相矛盾的。信息融合中心不得不依据这些信息进行推理，以达到监测监控的目的。这就涉及对不确定性信息进行推理，即多传感器信息融合的过程。

本书是作者长期从事安全监控系统的总结。书中详细介绍了煤矿顶板监控的原理、方法、信息融合技术在顶板监控中的具体应用。值得注意的是，由于各个企业的生产情况不同，地质条件千差万别，地质构造指数、推进尺寸等不尽相同，对各变量的阈值选择、赋值概率等的选择也不相同。在信息融合时，必须根据情况进行取舍和参数设置。

本书共分为 9 章，具体内容安排如下：

第一章，绪论，介绍顶板动态监测、监控的发展现状及存在的问题；顶板动态监测监控的矿山压力理论基础。

第二章，顶板动态监测系统及其集成原理，按矿压信息来源种类及矿山压力形成的力源、监测信息的位置差异，将矿压信息监测范围分成 3 个区域：回采工作面观测区（Ⅰ）、内应力观测区（Ⅱ）、外应力观测区（Ⅲ）。按信息来源进行分区，更加便于揭示矿压显现的规律性。矿压信息集成研究的重点是表征采场推进过程中矿山压力与覆岩运动发展的规律性。矿压显现“三要素”特征（包括矿压显现的时间、位置和程度）的差异是矿压信息集成的关键。按矿压信息力源分区所揭示的矿压显现的基本规律是矿压信息集成的理论基础。

第三章，顶板动态监测集成系统的分析与建模，应用面向对象的技术对煤矿顶板动态监测系统进行需求分析。系统的集成包括数据集成、信息集成、硬件及网络集成、软件与分析、预测算

法集成。并应用 UML 对整个系统进行分析和建模,提高了软件开发的速度和效率。

第四章,顶板动态监测系统集成的技术方法,集成系统应用了 C/S + B/S 的网络拓扑结构,提高了矿井通信网络的传输速度,同时也提高了控制层也即整个控制网络的通信可靠性,阐述了煤矿井下顶板动态监测网络的设计原理、方法和步骤,给出了系统的通信协议。重点介绍了网络数据库的设计原理和各种表的结构、网络数据库利用 ADO. NET 进行存取访问的技术等,并对 GPRS 设计原理和网络信息的安全问题进行了探讨。

第五章,基于证据理论的冲击地压算法模型研究,通过建立的 D-S 算法模型,把微震监测系统、综采压力系统、电磁辐射系统、钻孔应力系统、钻屑法等环节获得的数据,进行信息融合,使不确定性的基本概率赋值下降,可信度提高,增加了估计结果的正确性。选择合适的门限值,最终的决策结果表明系统处于临界状态,对冲击地压现象进行了较为准确的预测预报,对于提前掌握顶底板运动变化的趋势,指导安全生产决策有一定的实际意义。

第六章,基于统计模式识别方法的采场顶板动态规律研究和工程应用,顶板动态监测信息的集成包括井下采集的有量纲的实时信息,通过模式识别而建立的归一化无量纲信息以及能够在同一时空关系中进行对比分析的综合决策信息。采用正态统计模式识别的方法对实时信息进行归一化处理,取得了较好的效果。综合决策信息能够体现矿压显现“三要素”特征,揭示采场推进过程中顶板运动状态和矿山压力的变化规律。

第七章,时间序列在综采工作面支护阻力预测中的应用研究,应用时间序列理论和方法对工作面支架或支柱的工作阻力进行分析和预测,通过选择合适的模型,降低了预测值和检测值之间的误差,提高了预报的准确率。

第八章,神经网络在顶板动态监测集成系统中的应用,介绍采煤工作面基于神经网络的多传感器信息融合的风险评估模型,

并对模型的分析预测结果进行讨论。

第九章, 顶板动态监测模糊理论及应用, 应用隶属度函数、模糊综合评价的方法对顶板的稳定性进行预测和评价; 最后探讨了基于模糊推理的专家系统的构成及实现方法。

在本书出版之际, 特别感谢山东省自然科学基金委员会的资助; 感谢内蒙古伊泰煤炭股份有限公司、曲阜星村煤矿、兖矿集团、亭南煤矿、纳林庙煤矿、肥城矿业集团等工程技术人员的支持; 感谢中国矿业大学窦林名教授、王连国教授, 北京科技大学姜福兴教授, 山东科技大学资源与环境工程学院宋振骥院士、谭云亮教授、杨永杰教授、吴士良教授、潘立友教授, 山东尤洛卡自动化仪表股份有限公司董事长黄自伟教授, 肥城煤炭工业局魏世忠局长, 曲阜天安矿业马学春副矿长、郑玉友高工、蔡辉工程师, 山东省泰安市耀汇三维软件有限公司张东升高工, 刘林祥教授、刘建波处长等的大力支持和帮助, 恕不一一列出。

本书参阅和引用了众多专家、学者的研究成果, 在此感谢导师俄罗斯自然科学院外籍院士, 中国煤炭工业协会顶板专业委员会主任委员, 山东科技大学副校长宋扬教授的指导。感谢山东科技大学教授, 山东尤洛卡自动化装备股份有限公司副总经理, 总工程师闫相宏导师的指导。由于顶板动态监测、监控的复杂性和多样性, 本书中涉及的许多概念、观点、结论是初步的或不完善的, 可能存在着不少错误和不妥之处, 恳求读者给予批评和指正, 以期共同为我国的矿业工程安全事业做出一点实实在在的贡献。

作 者

2013 年 8 月

目 次

1 绪论	1
1.1 顶板动态监测面临的问题	1
1.2 顶板动态监测研究的现状	4
1.3 多传感器信息融合的基本理论	23
1.4 顶板动态监测及信息融合研究的关键问题	30
2 顶板动态监测系统及其集成原理	33
2.1 顶板动态监测系统	33
2.2 顶板动态监测系统集成原理	50
2.3 矿山压力显现的基本规律性	55
3 顶板动态监测集成系统的分析与建模	64
3.1 顶板动态监测集成系统的需求分析	64
3.2 基于 UML 的系统建模	68
4 顶板动态监测系统集成的技术方法	85
4.1 系统的网络拓扑结构	85
4.2 井下顶板动态监测传感器工作原理	90
4.3 煤矿井下顶板动态监测网络的设计原理	97
4.4 顶板动态监测集成系统的网络通信原理	113
4.5 网络数据库设计	116
4.6 Web 数据库存取访问技术	127
4.7 网络安全问题	133
4.8 顶板动态监测集成系统的实现	134

4.9	综采工作面矿压显现分析举例	137
5	基于证据理论的冲击地压算法模型研究	151
5.1	Bayes 推理	151
5.2	D-S 证据理论	154
5.3	星村煤矿 3207 采煤工作面简介	156
5.4	各个独立的监测系统功能及安装布置方法	161
5.5	基于信息融合技术的冲击地压算法模型研究	175
5.6	冲击地压防治方法	179
6	基于统计模式识别方法的采场顶板动态规律 研究和工程应用	182
6.1	基于统计模式识别方法的采场顶板动态 规律研究	182
6.2	基于统计模式识别方法的采场顶板动态 集成系统的工程应用	189
7	时间序列在综采工作面支护阻力预测中的应用研究	199
7.1	时间序列基本算法	200
7.2	顶板动态监测集成系统的时间序列 建模的方法和步骤	202
7.3	时间序列在顶板动态监测中的工程实践	204
8	神经网络在顶板动态监测集成系统中的应用	209
8.1	前馈神经网络	210
8.2	采煤工作面基于神经网络的多传感器信息 融合的风险评估模型	218
8.3	数据采集过程与方法	219
8.4	BP 神经网络预测	229

9 顶板动态监测模糊理论及应用	234
9.1 模糊理论在顶板风险预测中的应用	234
9.2 模糊决策预测预报方法	239
9.3 基于模糊推理的矿山压力专家系统	243
参考文献.....	249

1 绪 论

1.1 顶板动态监测面临的问题

我国煤炭储量丰富,产量居世界首位,2011 年原煤产量达到 35.2×10^8 t。煤炭是我国能源的基石,是重要的基础产业,是国家能源工业的主体,煤炭占我国一次能源生产和消费的比重一直在 73% 和 68% 左右。

中国是世界上最大的煤炭生产和消费国,有 500 多万煤矿工人。然而,由于煤炭资源储存条件复杂,煤矿地质灾害频发,在世界上是煤矿事故多发国家,中国煤矿事故和死亡人数都占到了世界总数的 80%。“十五”时期,工矿商贸企业共发生事故 68805 起、死亡 77158 人,其中,煤矿共发生事故 18516 起、死亡 31064 人,分别占工矿商贸企业事故起数和死亡人数的 26.91% 和 40.26%。

2006 年全国煤矿事故死亡人数 4746 人,百万吨死亡率为 2.041,其中因顶板、瓦斯、水灾事故而死亡的人数分别占总死亡人数的 42.3%、25.4%、9.1%。2007 年,全国煤矿事故起数和死亡人数同比分别下降 19.7% 和 20.6%,煤矿事故死亡 3770 人;但是煤矿发生的重大事故和死亡人数有上升趋势,安全生产形势仍然十分严峻。

近年来,煤矿开采过程中频繁发生的重大安全事故,已经引起了党中央、国务院的高度重视,并引起社会的广泛关注。在各类煤矿事故中,顶板事故仍居前位。随着生产能力的提高,开采强度的增大和向深部开采转移,顶板安全等问题越来越凸现,主要体现在 3 个方面。一是以锚杆支护为主要形式的巷道稳定性。现有的支护参数到底有多大安全系数?需要对监测手段进行评估

及潜在的危險性预测。二是超前支承压力影响范围多大？压力集中程度多高？支承压力高峰位置在何处？支承压力前移速度是多少等。这些都是与超前支护和冲击地压因素密切相关的监测问题。三是回采工作面支护稳定性和安全性。回采工作面支架工作状态怎样？支护是否满足控制顶板的要求？回采工作面上覆岩层初次来压与周期来压的步距有多大？来压时对目前支护系统有多大影响等。我国几乎所有煤矿都面临开采时的顶板安全问题，而这些问题往往由于局限于相对落后的监测手段和信息处理技术而被忽略，这是顶板控制不到位的主要原因。因此，着眼于国内研究的前列，充分利用网络资源，建立“煤矿顶板动态监测系统”，对促使煤矿安全上一个新台阶具有实际意义，在全国煤矿中具有重要的推广应用价值。

煤矿顶板安全监测技术泛指在采动后揭示围岩破坏状态、破坏过程及其与矿山压力分布关系的监测技术。当监测到岩层离层和断裂破坏的状态及过程（包括裂断时间和位置）的信息后，就可以对顶板进行垮落的预报，并实施针对性的控制措施，从而避免顶板事故发生。将支架工作阻力监测系统、顶板离层监测系统、锚杆（锚索）应力监测系统、超前支承压力监测系统等现有的系统进行集成，并实时显示各种应力和位移的变化，可以实现顶板的动态监测，为煤矿的安全高效生产奠定良好的基础。

实践证明，煤矿顶板、冲击地压、突水、煤与瓦斯突出等事故的发生，都与围岩的破坏、运动和矿山压力分布的变化直接相关，如果能够在事故发生前比较接近实际的了解与事故发生相关的围岩破坏状态和发展过程，了解围岩内部矿山压力分布状态，对事故发生的可能性进行科学的、正确的评价和预测，在此基础上再采取针对性的控制设计和措施，许多事故完全是可以避免的。

我国煤矿顶板事故死亡人数约占煤矿总死亡人数的 40%，其中 80% 的顶板事故发生在回采工作面，无论是直接顶或基本顶，发生事故的条件必是先在层面上离层，然后再在岩梁的端部

裂断，解除约束后顶板向某一方向运动而发生事故。将离层仪安装在工作面或巷道顶板上方，离层数据可由在线采集器采集，然后将数据与适配器和计算机相连，并进行处理和分析，给出离层结果，对掌握顶板运动规律，预防顶板事故起着积极的作用。

近年来，锚注支护工艺已在我国煤矿受采动影响严重的巷道和软岩工程中广泛应用，锚注工程设计的前提是了解巷道围岩的分区范围，包括弹性区、塑性区和残余强度区，后者即是锚注区。锚注支护的机理是通过注浆来改变残余强度区内部的岩体结构，充分发挥岩体本身的支承能力。因此，无论是巷道围岩分区范围的确定，还是锚注效果的判断，都要进行围岩内部岩性及其结构变化情况的监测分析，才能保证工程的有效性。此外，顶板安全监测技术还在钻孔注浆防止地表沉降，以及我国西部浅埋煤层的地表保水开采中得到了大量的应用。

国家高度重视安全生产及安全科技工作。在 2006 年 6 月全国煤矿瓦斯治理和利用工作现场会上，中国工程院和中国煤炭工业协会共同要求，根据煤矿安全生产的要求，对国内外行之有效的安全技术进行集成创新，采取工程示范，以点代面的方法，尽快在全国煤矿有针对性地推广先进适用的灾害防治技术。

《国务院第 81 次常务会议纪要》对煤矿安全生产做出了部署，制定了安全生产“十一五”规划和安全科技“十一五”规划，特别把煤矿安全摆在重中之重的位置，要求加快推进安全生产科技进步，针对重点行业和领域的共性、关键性安全生产技术难题开展科研攻关，提高安全生产技术水平和安全装备水平，把“推动安全科技进步作为安全生产的重要治本之策”。其中，“规划”把煤矿和非煤矿山列入重点行业和领域，要求到 2010 年基本形成技术支撑体系，安全生产死亡率比 2005 年下降 35% 以上；将遏制煤矿重大事故和开展安全科技研发及成果推广应用作为重要任务；把煤矿事故预防与主要灾害治理工程和安全生产信息系统建设工程等列为重点工程；将“煤矿瓦斯、火灾和顶板灾害防治关键技术研究”作为国家科技支撑计划首批重点项目。

最近,国家煤矿安全监察局提出在构建和谐社会进程中不断推进安全发展,要以安全生产基础理论研究为突破口,重点围绕煤矿典型重大灾害事故致因机理等方面的问题开展研究,加快安全科技重大项目、重点课题攻关研究,研发集成先进技术装备,为防患治理和安全技术改造提供技术支持,用科技创新引领和支撑煤矿安全发展。

《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》中,首次将“公共安全”列为重点领域,将“重大生产事故预警与救援”确定为优先主题,要求煤矿安全科技工作要按照“自主创新、重点跨越、支撑发展、引领未来”的科技发展方针,包括以先进适用技术的集成创新提高我国煤炭企业的安全技术装备水平,促进煤矿安全科技的可持续发展。

综上所述,本课题的研究是山东省自然科学基金项目“基于信息融合技术的综采工作面顶板动态监测海量数据关联算法模型研究”(项目编号 ZR2011EL019)、山东省科技攻关项目“煤矿顶板动态监测系统”(项目编号 2008GGA09001)的组成部分,也是落实我国煤矿安全生产“十二五”规划和煤矿安全科技“十二五”规划的具体行动,对于我国煤矿安全发展、构建和谐社会都具有重要的现实意义和长远的战略意义。

1.2 顶板动态监测研究的现状

1.2.1 顶板动态监测的基础理论

矿山压力理论是研究开采后围岩破坏运动与矿山压力分布之间关系的理论,它是煤矿安全技术研发的基础,也是煤矿安全生产的保证。20 世纪初,众多国外学者提出关于采场矿山压力的假说,如悬臂梁假说由德国的 K. Stock 于 1916 年提出。1928 年,德国人哈克(W. Hack)和吉果策尔(G. Gilicer)提出了压力拱假说。铰接岩块假说由苏联的 $r \cdot H$ ·库兹涅佐夫于 1950—1954 年提出。

20 世纪 50 年代,我国采矿界为了适应煤炭工业发展的需

要，在国外早期矿山压力假说的影响下，结合煤矿安全生产，针对我国煤层的复杂条件，开始了我国矿山压力理论的研究工作，经过几代人的共同努力，至今已形成了具有中国特色的矿山压力理论体系，在我国煤矿安全生产和煤矿安全科技的发展中发挥了重要的作用，其地位居于世界领先水平。“砌体梁矿山压力理论”和“实用矿山压力理论”就是其中最具特色的代表。

1. “砌体梁”矿山压力理论

中国矿业大学钱鸣高等通过实例研究提出了基本顶岩层组成的“砌体梁”力学模型，以此为基础形成了“砌体梁矿山压力理论”。“砌体梁理论”集中研究了基本顶断裂后形成铰结岩梁结构的稳定和破坏的力学条件，其失稳后将导致采场矿压显现，并以此作为顶板控制设计的依据。模型如图 1-1 所示。

采场上覆岩层形成了垮落带（Ⅰ）、规则移动带（Ⅱ）及弯曲下沉带（Ⅲ），在规则移动带及其以上岩层内断裂的岩块相互咬合有可能形成外形如梁，实质为拱的结构体，又由于岩块排列为砌体，故称之为“砌体梁”。此结构由“煤壁—支架—采空区已垮落岩石”支撑，由于这种结构的存在，沿开采方向上覆岩层可分为 3 个区：煤壁支撑影响区、离层区和重新压实区。上覆岩层的位移曲线由“煤壁—支架—采空区岩石”力学性能所决定。“砌体梁”的平衡由块与块之间的水平挤压力引起的摩擦力决定，不满足平衡条件时，可形成滑落失稳及回转失稳，“砌体梁”理论创造性地发展了铰接岩块假说与预成裂隙假说，使上覆岩层对工作面作用力的定量计算成为可能。“砌体梁”结构受力如图 1-2 所示。

随着开采对上覆岩层内地下水、岩体内赋存气体分布的改变以及地表塌陷规律的影响，必然导致“关键层”理论的研究。因此，研究者在“砌体梁”研究的基础上，将研究范围向上引申至裂隙带和弯曲沉降带，提出了岩层控制的“关键层理论”。“关键层理论”的基本观点认为，在采场覆岩中存在着多层硬岩层时，对岩层活动全部或局部起控制作用的硬岩层称为关键层。

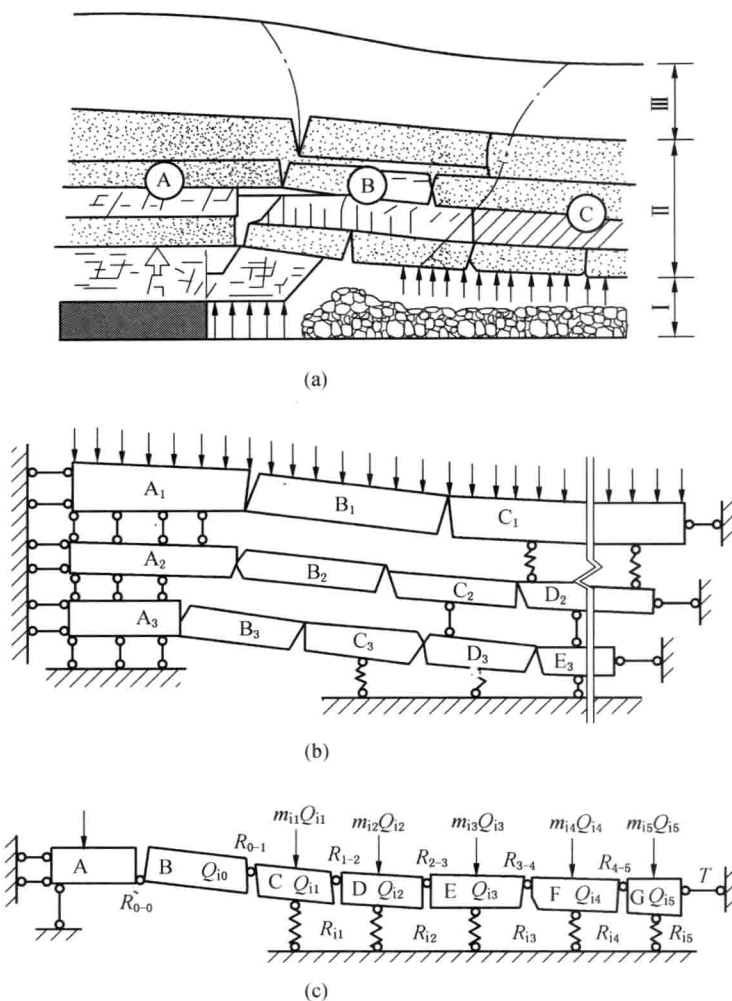


图 1-1 采场上覆岩层“砌体梁”结构模型

关键层判别的主要依据是其变形破断特征，即在关键层破断时，其上部全部岩层或局部岩层的下沉变形相互协调一致，关键层的断裂将导致全部或部分的上覆岩层产生整体运动。“砌体梁”关

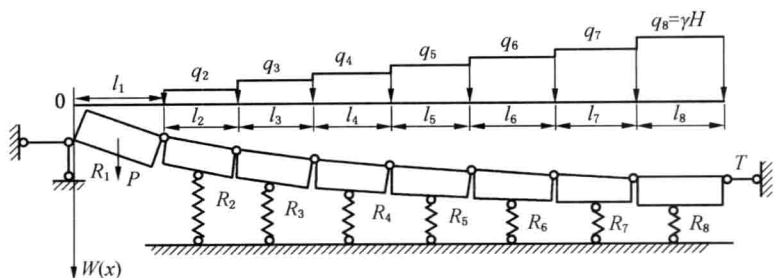


图 1-2 “砌体梁”结构受力图

键块的分析为采场直接顶的上部作用力与位移提供了边界条件，从而为分析直接顶稳定性奠定了基础。钱鸣高建立了“砌体梁”的“S-R”稳定理论，得出了滑落稳定条件（S 条件）和回转变形稳定条件（R 条件）。随后，研究者还将“砌体梁”理论中的岩块咬合失稳沉降运动而得到的岩运动条件及运动规律应用于矿井突水、覆岩离层和地表沉降研究，并试图建立起从煤层到地表的关键层结构模型。

钱鸣高在研究直接顶稳定性理论及采场“支架-围岩”系统监控原理的基础上，开发完成集“围岩运动预测、支架选型设计和采场矿压监控”为一体的实用工程技术，在全国大部分煤矿综采工作面和普采工作面得到了推广应用，取得了显著的经济效益和社会效益。

2. 实用矿山压力理论

由山东科技大学宋振骐等提出的“实用矿山压力理论”体系是我国煤炭系统最具特色的两大矿压学派之一。该体系的指导思想是采场上覆岩层中对采场矿压显现有明显影响的部分是有限的，搞清其范围和组成是矿压研究和控制的首要问题，了解矿山压力分布和显现与该部分岩层运动间的关系是矿压控制的核心问题。为此，提出了控制对象包括“直接顶”与“基本顶”的全新概念；搞清了“矿山压力”与“矿山压力显现”的区别和联