

四面采空

采场覆岩运动规律研究 及工程实践

■ 汪华君 著 ◀

煤炭工业出版社

四面采空采场覆岩运动规律研究及 工 程 实 践

汪华君 著

煤 炭 工 业 出 版 社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

四面采空采场覆岩运动规律研究及工程实践 / 汪华君
著. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2012

ISBN 978-7-5020-4150-2

I. ①四… II. ①汪… III. ①采空区—岩层移动—研究
IV. ①TD325

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 284957 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 $880\text{mm} \times 1230\text{mm}^{1/32}$ 印张 7

字数 210 千字

2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

社内编号 6973 定价 20.00 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

前 言

本书依托国家自然科学基金项目“采动覆岩空间结构及其与应力场动态关系研究(50074021)”和国家自然科学基金重大国际合作项目“煤矿覆岩破裂灾变的机理、监测与控制研究(50320120001)”,运用相似材料模拟、现场实测、数值模拟和理论分析等方法,对四面采空采场“ θ ”型覆岩多层空间结构的形成、演化规律、与支承压力分布的关系及其控制技术进行了研究。

本书提出了四面采空采场“ θ ”型覆岩多层空间结构理论。覆岩多层结构的形成过程存在岩梁结构和拱结构转换的过程,是动态的。在非充分采动阶段,采场覆岩的整个空间结构是由最大结构拱及其掩护下成对小结构拱共同组成的;在充分采动阶段,整个采场覆岩多层空间结构分为两个相对独立的较小的多层空间结构。

本书提出“ θ ”型覆岩多层空间结构是由上向下逐步形成的。

本书研究揭示了“ θ ”型覆岩多层空间结构演化及矿山压力分布规律为:当“孤岛”煤柱剩余走向尺寸为 $L \approx 2h \cot \delta$ (h 为拱结构最高层覆岩顶部到开采煤层的平均距离, δ 为岩层移动角)时,采场上方两个“C”型空间结构开始产生力的关系,开始形成一个“ θ ”型空间结构;该结构的支承压力开始叠加,此后“孤岛”煤柱上支承压力明显增大。

“ θ ”型覆岩多层空间结构下的“孤岛”煤柱开采,可能出现的主要灾害为冲击地压或煤柱快速变形。本书提出利用煤层应力计压力显现规律预测煤柱的破坏形式。针对可能出现的灾害,本书提出利用分阶段控制顶煤放出率来控制顶板运动剧烈程度的

方法，并提出了不同阶段的顶煤放出率和工作面覆岩结构稳定性关系的判据。对积水、瓦斯以及煤炭自燃等灾害提出了防治措施。

通过鲁西煤矿井下微地震覆岩空间结构监测和河南义马矿务局常村矿四面采空采场开采工程实践，验证和应用了本书关于四面采空采场“ θ ”型覆岩多层空间结构的理论。

最后，感谢姜福教授对本人的学术指导，以及史红、马其华、程云海等老师的帮助，同时感谢参考文献作者。

本书由毕节学院贵州省采矿工程重点支持学科、毕节学院采矿工程重点学科、毕节学院高层次人才科研启动基金支持出版。

作者

2013 年 1 月

目 次

1	绪论	1
1.1	课题的提出	1
1.2	文献综述及国内外研究现状	5
1.3	本书的研究内容和研究方法	17
1.4	本章小结	19
2	四面采空采场“ θ ”型覆岩多层空间结构的形成与 发展演化	20
2.1	四面采空采场“ θ ”型覆岩多层空间结构 演化的研究方法	20
2.2	相似材料模拟揭示的覆岩多层空间结构	24
2.3	基于钻孔应力反演覆岩运动揭示的多层结构	43
2.4	四面采空采场“ θ ”型覆岩多层空间结构的 形成和发展演变	57
2.5	本章小结	65
3	四面采空采场“ θ ”型覆岩多层空间结构运动与 矿压分布规律	67
3.1	“ θ ”型覆岩多层空间结构形成与矿压分布 规律的基本认识	67
3.2	四面采空采场矿压分布规律的数值模拟研究	79
3.3	本章小结	109
4	微地震定位监测揭示的覆岩空间结构及其矿压规律	111
4.1	微地震监测技术研究现状和应用范围简介	112
4.2	微地震定位监测位置与观测系统设计安装	117
4.3	微地震定位监测数据统计与处理	125
4.4	微地震事件定位成果图揭示的空间结构及	

其与矿山压力分布	134
4.5 本章小结	142
5 四面采空采场“θ”型覆岩多层空间结构运动与 矿压控制	143
5.1 四面采空采场“ θ ”型覆岩多层空间大 结构运动与矿压控制	143
5.2 四面采空采场“ θ ”型覆岩多层空间结构 的“有限矿压”控制	150
5.3 本章小结	161
6 四面采空采场“θ”型覆岩多层空间结构观点的 验证与应用	164
6.1 微地震定位监测揭示的覆岩空间结构的 验证与应用	164
6.2 四面采空“孤岛”型采场的工程实践	169
6.3 本章小结	203
7 主要研究成果和结论	205
参考文献.....	208

1 绪 论

1.1 课题的提出

煤炭是我国的主要能源。安全高效地开采煤炭是关系到国计民生的大事。

准确地推断采场上覆岩层的结构模型,将对一系列采矿工程问题产生重大影响。例如,采场工作面顶板来压与支架受力;上覆岩体中裂隙分布与地面瓦斯抽放;采动应力集中与冲击地压关系;上覆岩体的断裂失稳与地表沉陷;控制煤岩分离与提高放顶煤采出率等。因而覆岩运动破坏的规律一直是人们关注的课题。

综采和综放开采技术方法是目前我国煤炭产量得以保证的最主要的两种开采方法。综采的煤层厚度一般为 $2 \sim 3 \text{ m}$, 人们对其一般开采条件下开采煤层的上覆岩层的运动规律研究得最为透彻。综放开采技术在我国的发展已经历了 20 多年的历史。经过深入研究和开发^[1-4], 综放技术已趋于成熟, 成为我国厚煤层高产、高效开采的主导技术^[5]。针对综放开采这一新的影响覆岩运动的开采条件, 人们对其开采的上覆岩层的运动规律进行了积极的研究, 并取得了一定的成果。

近年来, 在综采、综放技术的应用和煤炭开采向深部发展的趋势下, 许多矿井出现了一种新型开采条件的采场: 四面采空的“孤岛”型采场。例如兖矿集团东滩煤矿十四采区第六区段东翼的 14306 工作面和南屯煤矿的 63_上10 工作面, 就是典型的四面采空“孤岛”型综放回采面。14306 工作面东西走向长度为 1105 m, 南北倾斜长度为 146.8 m; 前期综放开采 3 号煤层上、下分层的合层, 后期是 3_上煤二分层综采; 中间区段虽然也是综放开采 3 号煤层上、下分层合层, 但其上、下两侧均为 3_上煤综

放工作面的采空区,前方则是 $3_{上}$ 煤一分层综采面的采空区,后方即本工作面的采空区,从而形成了典型的“孤岛”综放开采区段。 $63_{上}10$ 工作面位于南屯煤矿六采区北部,工作面标高 $-305 \sim -335$ m;东部与 $73_{上}14$ 工作面采空区间隔70 m煤柱相邻,西部开切眼沿 $33_{上}03$ 采空区布置,且留有3 m小煤柱;工作面运输巷南部相邻 $63_{上}04$ 、 $63_{上}06$ 、 $63_{上}08$ 等条带采空区,相隔3~4 m的小煤柱;工作面回风巷北部为 $73_{上}11-1$ 采空区,形成四面均为采空区的“孤岛”综放工作面。再例如义马矿业集团常村煤矿的 2107_2 工作面。该工作面倾斜长度223 m,走向长度1460 m,其中自开切眼开始580 m为顶分层未采区,外段880 m为 2107_1 顶分层已采区,工作面上侧为 2105_1 及 2105_2 采空区,下侧为 2109_1 及 2109_2 采空区。当回采580 m段煤炭时形成四面“孤岛”型的采场。

形成“孤岛”型采场的原因主要有以下几个方面:①由煤层自然开采条件造成的。比如断层的存在,隔离了一定区域内煤层的联系,造成了事实的“孤岛”型采场。②生产需要造成的情况。有的煤矿为了生产接续、多出煤,或者为减少工作面彼此间的干扰而间隔布置工作面,每个采区要形成2~4个“孤岛”工作面(多为三面采空的“孤岛”工作面)。③开采技术发展造成的情况。伴随综采采煤方法而来的是综放开采技术的发展,综放开采技术的应用打乱了原普采、综采情况下生产设计的布局,出现了放顶煤情况下的“孤岛”型工作面。还有其他情况下的“孤岛”煤柱的开采,比如采区上、下山煤柱的开采、原有条带煤柱的开采等。

“孤岛”型综放采场对安全生产最大的潜在威胁有以下几个方面:①开采后期,煤柱突然破裂而形成冲击地压,严重威胁安全生产。②开采期间,工作面上下巷道围岩长期处于流变状态,并且受到高应力作用而加剧变形速度,严重威胁人员出入和机械设备的正常运转。③覆岩空间结构的失稳给工作面支架造成冲击载荷,造成工作面的大面积片帮、“压死”输送机、压爆支架油

缸或压死支架、挤出煤体封堵工作面出口、瓦斯涌出量增加等灾害。

传统的采场矿压研究覆岩范围多研究 6~8 倍采高以内的采场覆岩情况,大多数采矿设计的支护强度也依其确定,而对于地表以下、6~8 倍采高以上的基本顶上覆岩层,开展的研究不多。而国内外研究表明,采后采场局部围岩移动、围岩应力重新分布诱发这部分岩层所形成的空间结构失稳,是造成一系列工程灾害发生的根本原因,而用传统的平面岩层运动理论难以解释事故发生的机理。对采场矿压有明显影响的岩层运动范围扩展后,在理论上用何种观点来表述、在工程上用何种方法来监测和控制,已成为矿压研究的新课题。为对“采动覆岩空间结构”进行系统的研究,山东科技大学姜福兴教授以“采动覆岩空间结构及其与应力场的动态关系研究”为题申请国家自然科学基金资助,并获得批准。同时获得国家自然科学基金重大国际合作项目“煤矿覆岩破裂灾变的机理、监测与控制研究(50320120001)”资助,开发并应用井下微地震技术在“四维”空间上监测采场覆岩空间结构运动,以寻求其运动造成的灾害控制原理与方法。

根据采场的边界条件、覆岩岩层断裂线和触矸线等情况,姜福兴教授将采场覆岩空间结构分为 4 种类型:“O”型、“S”型、“C”型和“ θ ”型。“中间无支撑”的“O”型空间结构一般为一面采空(四周为实体煤)的工作面所形成,如图 1-1 所示;“S”型空间结构一般为两面采空的工作面所形成,如图 1-2 所

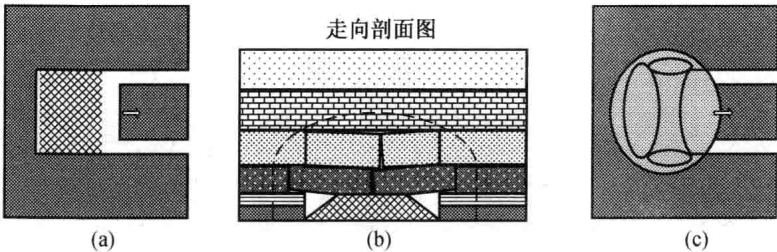


图 1-1 “O”型覆岩空间结构示意图

示；“C”型空间结构一般为三面采空的“孤岛”工作面所形成，如图 1-3 所示；而“ θ ”型空间结构一般为四面采空的“孤岛”工作面所形成，如图 1-4 所示。

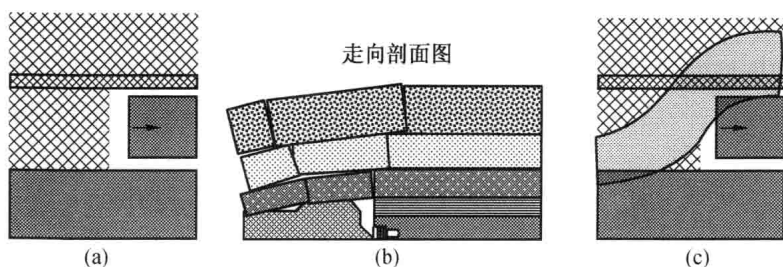


图 1-2 “S”型覆岩空间结构示意图

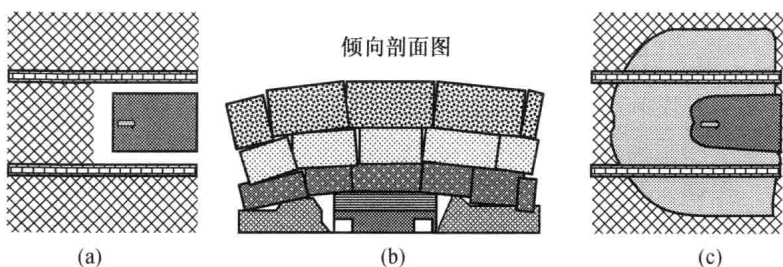


图 1-3 “C”型覆岩空间结构示意图

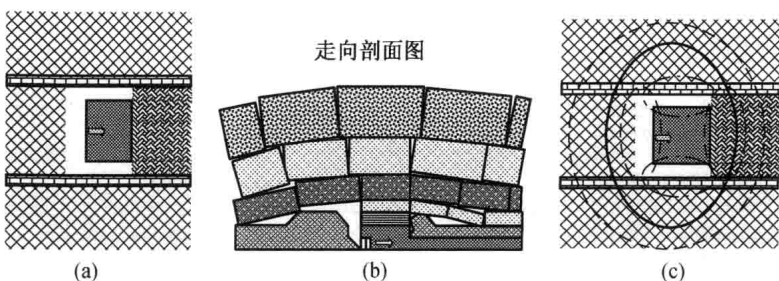


图 1-4 “中间有支撑”的“ θ ”型覆岩空间结构示意图

在上述 4 种类型采场覆岩空间结构中,四面采空“孤岛”采场所形成的“ θ ”型空间结构是最为复杂的采场覆岩空间结构。四面采空的“孤岛”工作面煤柱上除了作用直接顶和基本顶的作用力外,主要作用的是由上覆多组组合岩层形成的“中间有支撑”型空间结构的作用力,由于该型覆岩空间结构从平面投影上看像字母“ θ ”形状,故称为“ θ ”型覆岩空间结构。

四面采空采场“ θ ”型覆岩多层空间的研究具有重大的工程意义。越来越多的矿井,特别是老矿井,出现四面采空“孤岛”采场,由此而带来的安全生产问题越来越受到人们的重视,研究其发展演化规律及其影响因素,对采场矿压控制,实现安全生产具有重要的现实意义。“ θ ”型覆岩空间结构理论具有实用性、长期性、使用面越来越宽的特点。

本书以上述情况为背景,重点研究四面采空采场“ θ ”型覆岩多层空间结构运动演化规律及其与矿山压力的关系、煤柱应力和稳定性的关系,以及相关矿山压力监测监控技术问题等。

本书研究的理论意义在于探索四面采空采场“ θ ”型覆岩多层空间结构运动与采动应力场的内在联系,揭示采场覆岩空间结构运动演化的影响因素及影响规律;本书研究的工程意义在于应用多层空间结构学术观点为四面采空采场“ θ ”型安全生产提供理论上的指导,同时提出相关矿山压力监测监控技术,以保证矿井安全生产。

1.2 文献综述及国内外研究现状

四面采空采场覆岩空间结构的研究离不开对简单开采条件下前人研究成果的继承和借鉴。

四面采空采场复杂而困难的开采条件是简单开采条件下开采煤炭后遗留的问题,由此而造成的覆岩空间结构与矿压分布规律是情况最复杂、研究难度最大的一种特殊的煤炭开采条件。

四面采空采场“ θ ”型覆岩多层空间结构运动及控制研究所涉及的前人的理论问题主要有采场(包括综放采场)矿山压力

理论,比如压力拱假说、铰接岩块学说、砌体梁结构假说、板结构假说、以岩层运动为中心的矿压理论、基本顶的3种基本结构理论、关键层理论等;采场顶板结构的稳定性研究和现阶段人们对“孤岛”工作面(包括三面和四面“孤岛”工作面)矿山压力理论的认识等。首先对以上各个有关矿压理论进行详细的总结,在此基础上确定四面采空采场“ θ ”型覆岩多层空间结构运动及控制研究的研究内容和研究方法。

1.2.1 采场矿山压力理论的国内外研究现状

从19世纪末开始,人们就对采场上覆岩层中结构提出了种种推测,即岩体结构假说。如压力拱假说、铰接岩块学说、砌体梁结构假说、板结构假说等。

1.2.1.1 压力拱假说

矿山压力理论是随着人们的开采实践而不断发展的。19世纪后期到20世纪初,是采场矿压假说的萌芽阶段。这一时期开始利用比较简单的力学原理解释实践中出现的一些矿压现象,并提出了一些初步的矿压假说。20世纪50年代,比较有影响的是苏联工程师 Φ ·许普鲁特提出的压力拱假说。他认为,采场在一个“前脚在煤壁、后脚在采空区”的拱结构的保护之下。这种观点解释了两个重要的矿压现象:一是支架承受上覆岩层的范围是有限的;二是煤壁上和采空区矸石上将形成较大的支撑压力,其来源是控顶上方的岩层重力。由于拱假说没有解释采场周期来压等现象,现场也难以找到定量描述拱结构的参数,所以拱假说只能停留在对一些矿压现象一般解释的水平上,不能很好地应用于生产实践。

1.2.1.2 铰接岩块学说

苏联学者T·H·库茨涅佐夫在实验室进行采场上覆岩层运动规律研究的基础上提出了铰接岩块学说。该学说是定量地研究矿压现象的一个重大突破。铰接岩块学说比较深入地揭示了采场上覆岩层的发展状况,特别是岩层垮落实现的条件。该学说认为,需要控制的顶板有垮落带和其上的铰接岩梁组成。垮落带给

予支架的是“给定荷载”，它的作用力必须由支架全部承担。而铰接岩块在水平推力的作用下，构成一个平衡结构，这个结构与支架之间存在“给定变形”的关系。铰接岩块学说的重大贡献在于，它不仅解释了拱假说所能解释的矿压现象，而且解释了采场周期来压现象，第一次提出了预计直接顶厚度的公式，并从控制顶板的角度出发，揭示了支架荷载的来源和顶板下沉量与顶板运动的关系。这一成果是以后矿压理论发展的重要基础。但是，该学说未能够确定出呈铰接状态基本顶形成的条件和具体的范围；未能更全面地研究和揭示支架与该部分岩梁运动间的关系；没有说明采场顶板下沉量在很大程度上能够由支架的阻力控制的事实，因此未能将采场顶板控制设计提高到科学定量的程度。

此外，描述采场矿山压力的假说和理论还有俄国学者 M·M·普罗托吉亚阔诺夫提出的“自然平衡拱假说”；“悬臂梁”假说；比利时学者 A·拉巴斯 1947 年提出的“预生裂隙梁”假说等。

1.2.1.3 砌体梁结构假说

煤层开采后上覆岩层将形成结构，此结构的形态与稳定性将直接影响到采场支架参数和性能的选择，同时也将影响到开采后上覆岩体内节理裂隙及离层区的分布和地表沉陷。因此，上覆岩层形成结构的特点及其形态是研究的重点。

上覆岩层结构形态主要的研究工作始于 20 世纪 60 年代初。70 年代末，中国工程院院士钱鸣高教授在铰接岩块学说和预成裂隙假说的基础上，借助于大屯煤电公司孔庄矿开采后岩层内部移动观测资料，研究了裂隙带岩层形成结构的可能性和结构的平衡条件，提出了上覆岩层开采后呈砌体梁式平衡的结构力学模型^[2-5]。该理论认为采场上覆岩层的岩体结构主要是由多个坚硬岩层组成，每个分组中的软岩可视为坚硬岩层上的载荷，此结构具有滑落和回转变形两种失稳形式。该研究的意义主要在于：开采以后上覆岩层结构形态的解决为采场提供了具体的上部边界条件，此结构的形态与平衡条件为论证各项采场矿山压力控制参数

奠定了基础。从该理论的假说条件可以看出,该理论的结论更适用于存在坚硬岩层的采场。缪协兴、钱鸣高(1995)给出了关于砌体梁全结构模型^[6],并对全结构进行了力学分析,得出了砌体梁的形态和受力的理论解以及砌体梁排列的拟合曲线。

1.2.1.4 板结构假说

砌体梁结构的研究是限于采场中部沿走向的平面问题。随着采场矿山压力研究的深入,尤其是基本顶来压预报的发展,在坚硬顶板工作面,讨论了将基本顶岩层视为四周为各种条件下的“板”的破断规律、基本顶在煤体上方的断裂位置以及断裂前后在煤与岩体内所引起的力学变化。由此钱鸣高院士等(1986)提出了岩层断裂前后的弹性基础梁模型,从理论上证明了“反弹”机理,并给出了算例^[7];钱鸣高院士、朱德仁博士(1987)和钱鸣高、何富连(1989)提出了各种不同支撑条件下的 Winkler 弹性基础上的 Kichhoff 板力学模型^[8,9],利用基本顶岩层形成砌体梁结构前的连续介质力学模型分析了顶板断裂的机理和模式。山东科技大学姜福兴教授(1991)对长厚比小于 5~8 倍的中厚板进行了解算^[10],得到了一些有益的结论。

至此,开采后基本顶的稳定性、断裂时引起的扰动及断裂后形成的结构形态形成了一个采场覆岩结构和运动规律的总体概貌。

1.2.1.5 以岩层运动为中心的矿压理论

20 世纪 70 年代以来,我国岩层控制领域取得了很多处于国际领先水平的成果。在采场矿压理论研究方面,中国科学院院士宋振骥教授等人在大量现场观测的基础上,建立并逐步完善了以岩层运动为中心,预测预报、控制设计和控制效果判断三位一体的实用矿压理论体系^[11-16]。此理论的要点如下:

(1) 采场上覆岩层运动对采场矿山压力分布及其显现有明显影响的岩层范围是有限的。这部分岩层一般由直接顶及基本顶组成。直接顶岩层在采空区已冒落,不能始终保持向煤壁前方和采空区矸石上传递作用力的联系。基本顶是由明显影响采场压力

显现的传递岩梁（板）组成，其上部岩层对采场矿压显现的影响只有通过基本顶的运动才能显现出来。

（2）在足够的采深条件下，基本顶断裂后，采场周围煤体上的支承压力分为两部分：内应力区 and 外应力区。内应力区的支承压力来源于基本顶运动的作用力，其分布及变化特征由基本顶重力及运动发展状况决定。外应力区的支承压力来源于上覆岩层的总体，其大小和分布特征取决于开采深度、岩层悬空所形成的集中载荷、岩层强度和边界约束条件等因素。内外应力区的形成是由于起着载荷传递作用的基本顶结构状态发生明显变化所致。

（3）随采场推进和基本顶运动的发展，内外应力区的范围、应力分布特征及大小始终是处在不断的有规律的变化之中。基本顶断裂来压时，两个应力区应力变化的主要特征是：内应力区应力随采场推进和基本顶的回转向煤壁方向集中、收缩，外应力区应力分布的范围及高峰位置向煤壁前方扩展。这个变化一直到基本顶运动结束为止。

（4）内外应力区应力变化有明显的周期性。推进方向的周期性规律与基本顶各岩梁（板）断裂运动的周期性相吻合。两侧支承压力分布变化的周期性及每周期变化的发展过程，分别与基本顶的岩梁（板）数目及相应的断裂和沉降相对应。

1.2.1.6 基本顶的3种基本结构理论

在以岩层运动为中心的矿压理论指导下，山东矿业学院姜福兴教授（1994）对采场顶板结构进行了定量描述。为了对顶板结构进行定量描述，应用模糊数学理论提出了判断上覆岩层质量的岩层质量指数法^[17,18]。认为在影响岩层运动的因素中，起主要作用的是岩层的强度、分层厚度和节理间裂隙间距三因子。三因子决定的岩层“综合强度”称为岩层的质量。利用岩层质量指数法可对层状节理岩体的稳定性进行定量描述，对岩层的组合方式进行诊断，并对基本顶的结构形式进行判断。与岩层质量指数法相对应，提出了基本顶的3种基本结构形式^[19]：第一种模型是代表松软基本顶结构的“类拱”结构，第二种模型是代表

中硬基本顶结构的“拱梁”结构，第三种模型是代表坚硬基本顶结构的“梁式”结构。基本顶的3种基本结构是基于岩层质量的量变而引起质变观点的，不同的岩层质量取值范围，对应不同的基本顶结构形式。3种不同的基本顶结构中，“类拱”不可预报来压，“拱梁”结构可预报来压，“梁式”结构可准确预报来压。对坚硬基本顶，基本顶结构的失稳以断裂为主，岩块断裂长度即为来压步距；对松软基本顶，以变形失稳为主，失稳步距为周期来压步距；中硬基本顶具有两者的特点。不同结构形式的岩层对应不同的围岩支护关系。在此研究基础上，姜福兴教授（1994）完成了采场顶板控制设计和来压预测预报的专家系统研究^[20]。

1.2.1.7 关键层理论

由于成岩时间及矿物成分不同，煤系地层形成了厚度不等、强度不同的多层岩层。实践表明，只有其中一层或数层厚硬岩层在岩层移动中起主要的控制作用。钱鸣高院士领导的课题组根据多年对顶板岩层控制的研究与实践，在20世纪80年代中后期提出了岩层控制的关键层理论^[21-26]。对上覆岩层活动全部或局部起控制作用的岩层称为关键层。覆岩中的关键层一般为厚度较大的硬岩层，但覆岩中的厚硬岩层不一定是关键层。关键层判断的主要依据是其变形和破断特征，即在关键层破断时，其上覆全部岩层或局部岩层的下沉变形是相互协调一致的，前者称为岩层活动的主关键层，后者称为亚关键层。关键层的破断将导致全部或相当部分的上覆岩层产生整体运动。岩层中的亚关键层可能不止一层，而主关键层只有一层。茅献彪、缪协兴、钱鸣高（1998）研究了覆岩中关键层的破断规律^[27]，钱鸣高、茅献彪、缪协兴（1998）就采场覆岩中关键层上载荷的变化规律作了进一步的探讨^[28]，许家林、钱鸣高（2000）给出了覆岩关键层位置的判断方法^[29]。

关键层理论揭示了采动岩体的活动规律，特别是内部岩层的活动规律，是解决采动岩体灾害的关键。关键层理论及其有关采