

山西省留学回国人员科研基金项目(98-41)

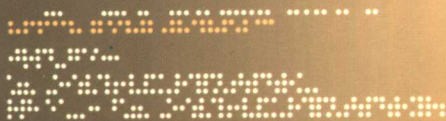
大同煤矿集团公司博士后科研工作站

联合资助

翟英达 著

采场上覆岩层中的 面接触块体结构 及其稳定性力学机理

MECHANISM OF PLANE CONTACTED
BLOCKSTRUCTURE AND ITS STABILITY
IN OVERLYING FORMATION
OF WORKINGS



煤炭工业出版社

山西省留学回国人员科研基金项目 (98-41)
大同煤矿集团公司博士后科研工作站

联合资助

MECHANISM OF PLANE CONTACTED BLOCK-
STRUCTURE AND ITS STABILITY IN
OVERLYING FORMATION OF WORKINGS

采场上覆岩层中的面接触块体 结构及其稳定性力学机理

翟英达 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·



翟英达 (Zhai Yingda), 博士, 副教授, 硕士研究生导师。1966年10月出生, 河北辛集人, 现任太原理工大学矿业工程学院岩土力学与工程教研室主任。1985年7月毕业于吉林大学数学系力学专业, 获学士学位; 1994年8月毕业于山西矿业学院采矿工程专业, 获硕士学位; 2003年4月毕业于煤炭科学研究总院采矿工程专业, 获博士学位。主要从事岩土力学与工程、岩层控制领域的教学与科学研究工作, 主持、主要参与完成省部级研究项目3项、横向协作研究项目11项, 发表研究论文20余篇。2004年6月, 进入大同煤矿集团公司博士后科研工作站作博士后, 从事岩层稳定性控制方面的研究工作。

内 容 提 要

采场上覆岩层中可能形成的块体结构型式及其遵循的力学规律、稳定性,是采场上覆岩层控制研究领域的一项重要研究内容。该书首先通过力学分析,系统研究了采场上覆岩层中可能形成的面接触块体结构的力学特性,并给出了该种结构的稳定条件;在理论研究的基础上,利用数值模拟对完全面接触块体结构中最大主应力的分布规律以及块体的长高比对块体破坏的影响进行了分析;研究了块体接触面抗摩擦性能的基本参数,从试验数据中总结出了采场上覆岩层破断面遵循的抗摩擦规律;借助碎块体理论,对块体介质中自重应力的传递规律进行了研究;研究了面接触块体结构在采场矿山压力计算中的应用,建立了以研究采场矿山压力为目的的基本顶岩层面接触块体结构理论框架。

本书可供岩层控制、采矿工程领域的科研与工程技术人员以及相关专业的高校教师阅读参考。

序

由于研究对象的复杂性，采矿工程领域仍旧存在着许多未曾解决的问题，其中包括采场上覆岩层破断后形成的结构问题。

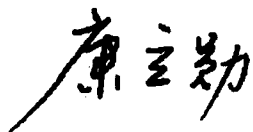
就采场上覆岩层的结构问题而言，岩石破断后形成的块体可能以点接触的方式形成铰接触块体结构，也可能以面接触的形式形成面接触块体结构。研究岩石块体结构时对块体之间接触方式的力学处理不同，所得结构遵循的力学规律就一定有所差异。岩石结构的力学特性决定着采场矿压显现的规律。传统的矿压理论主要建立在岩石破断块体以点接触的方式形成的铰接触块体结构基础上，这种“铰”是一种理想化的力学处理。铰接触块体结构的力学特性研究已经进行得相当深入，并在指导采场矿压控制方面发挥了重要作用。到目前为止，面接触块体结构的相关研究还没有开展过，因此系统研究面接触块体结构中力的传递规律、稳定条件等力学特性既非常重要也非常必要，研究取得的结果有助于全面、正确地理解和指导采矿领域的矿山压力控制。

该书综合运用理论分析、数值模拟、实验研究的方法，全面、系统地研究了面接触块体结构力学特性、影响块体结构稳定性的块体破断面的抗摩擦特性、采场上覆岩层裂隙带内块体间应力传递规律，取得了创新性的成果，为岩层控制理论增添了新的内容。

书中研究的问题，属于应该研究但很少有人愿意研究的问题，因为解决这些问题不仅需要好的数学、力学基础，而且还需要有科学奉献精神。作者对这些问题勇于研究是非常值得赞赏的。应当说，作者在书中面对的是一个新颖、重要的研究课题，尽管研究已经取得了好成绩，但书中涉及的问题还有进一步深入研究的必要，希望作者能够坚持探索下去。

愿本书的出版，能为解决地下采矿工程中的相关问题提供借鉴和帮助，并成为推动岩层控制理论与实践研究的新动力。

太原理工大学 教授、博士生导师

A handwritten signature in black ink, reading '康震' (Kang Zhen). The characters are written in a cursive, expressive style. The first character '康' is larger and more prominent, with a long, sweeping stroke extending downwards and to the left. The second character '震' is smaller and positioned to the right of the first.

2005年10月于太原

前 言

在煤炭地下开采过程中，工作面上方基本顶范围以内岩层的控制（即采场岩层控制）是一项十分重要的工作，它不仅直接影响采煤工作空间的安全以及采煤设备使用效率的发挥，而且还会对采场上覆岩层中裂隙带到地表范围内岩层的移动产生影响。要实现对这一范围内岩层的有效控制，搞清其中岩石破断块体平衡遵循的力学规律是十分必要的，这样做不仅可以帮助我们认识、了解被控制范围内岩石的存在状态、移动规律，还可以指导我们合理、有效地进行岩层的控制。也正是由于这个原因，本书从力学机理上对上述岩层控制中涉及的一些基本问题进行了系统研究。

采场岩层控制的基本问题之一是工作面上方基本顶范围以内岩石块体形成的结构问题。针对这个问题，本书在第二章、第三章做了大量的研究和论述。笔者首先通过力学分析的方法，系统研究了面接触块体结构的力学特性，获得了面接触块体结构中力的传递规律，并给出了该种结构的稳定条件，同时研究了块体几何参数以及结构偏转角对结构稳定性的影响。在理论研究的基础上，笔者利用数值模拟方法一方面对全面接触块体结构中最大主应力的分布规律进行了分析，证实了该种结构的承载能力受控于拱结构效应；另一方面对块体的长高比对块体破坏的影响进行了分析，针对面接触的特点，选择接触面粗糙度系数、接触面的壁面抗压强度和岩石基本摩擦角作为描述接触面抗摩擦性能的基本参数，从试验数据中总结出了采场上覆岩层破断面遵循的抗摩擦规律。上述三个参数随接触面上所作用的压应力的变化而有所改变，进而导致接触面摩擦系数的改变。

面接触块体结构研究中涉及的另一个重要问题，是破断岩层

中应力的传递规律，它是确定破断岩层中块体结构承受载荷的基础，也是本书第四章的研究内容。在第四章，笔者借助碎块体理论，建立了块体介质模型，并对该模型中的自重应力的传递规律进行了研究，总结出块体内部平均应力的计算公式，为基本顶下位岩层结构的载荷计算创造了条件。

作为面接触块体结构理论的应用，本书在第五章对基本顶形成面接触块体结构后的采场矿山压力计算进行了有益的探索，给出了相应的来压强度计算公式，并研究了岩层破断面力学参数对来压强度的影响以及工作面控顶范围顶板下沉量与基本顶结构偏转角的关系。

本书是笔者在综合自己的博士论文以及近年来研究工作的基础上成稿的，基本反映了笔者在岩层控制领域的理论研究成果。应当特别说明的是，笔者的博士生导师朱德仁教授（中国煤炭工业协会）、康立勋教授（太原理工大学）对笔者的研究工作给予了悉心指导，贾喜荣教授（太原理工大学）为笔者的研究提出过好的建议并给予了无私帮助，在本书出版之际，谨向三位老师表示衷心的感谢。

本书写作时参考了大量文献，谨向这些文献的作者致以崇高的敬意并表示衷心的感谢。

本书的主要研究内容是在山西省留学回国人员科研基金项目的资助下完成的，本书的出版也得到了大同煤矿集团公司博士后科研工作站的资助。在此，谨向上述部门及有关人员表示感谢。

鉴于笔者的研究水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者

2005年9月

目 录

1 绪论	1
1.1 矿山压力及其控制研究领域中的岩层结构 新问题	1
1.2 采场上覆岩层结构理论的研究历史和现状	3
1.3 采场上覆岩层结构的研究方法	10
1.4 采场上覆岩层结构理论中有待进一步研究 的问题	11
1.5 本书的研究内容、研究方法	12
2 采场上覆岩层块体结构力学分析	15
2.1 概述	15
2.2 覆岩块体的空间描述	18
2.3 面接触块体结构及其受力分析	19
2.4 面接触块体结构的稳定性分析	28
2.5 面接触块体结构的几个其他问题	49
2.6 小结	66
3 块体接触面的力学参数	68
3.1 概述	68
3.2 接触面基本力学参数测定	71
3.3 粗糙度系数对接触面摩擦性能的影响	74
3.4 破断面抗摩擦性能规律	79
3.5 小结	86

4 块体结构上覆岩层中的载荷传递	88
4.1 初次破断前的基本顶承受的载荷.....	88
4.2 初次破断以后的基本顶承受的载荷.....	89
4.3 小结	112
5 面接触块体结构与采场矿山压力	113
5.1 概述	113
5.2 基本顶形成面接触块体结构的机理	114
5.3 采场基本顶岩层破断规律及顶板来压强 度计算	116
5.4 块体接触面力学参数对来压强度的影响	122
5.5 基本顶块体结构的偏转角与工作面顶板 下沉量	126
5.6 小结	130
6 主要结论	132
附录 面接触块体结构的另外一种可能形式及其 受力和稳定性分析.....	138
参考文献.....	156

1 绪 论

1.1 矿山压力及其控制研究领域中的岩层结构新问题

煤层开采以后，随着采空区的不断扩大，采场上覆岩层原始的平衡状态被打破，导致岩层中应力分布的调整，这种应力调整随工作面的不断推进而循环进行。当岩层中的应力达到岩层本身的强度极限时，岩层便破断为一些块体。破断前的采场上覆岩层由于其存在特点，岩层中的应力和破断条件由板结构理论已得到较合理的解决。但岩层破断成块体后，由于块体间接触方式的不同，使得块体组成的结构具有不同的承载能力和平衡规律，而且对力的传递规律也会不同，这对整个采场上覆岩层的移动规律和工作面矿山压力的显现规律及工作面矿压控制参数都会有影响。岩石块体间以点接触的形式组成的结构所遵循的力学规律以及该结构对采场矿压和矿压控制的影响在砌体梁理论中已有详尽阐述。砌体梁理论为采场岩层控制奠定了基础，在煤炭生产中发挥了重要的指导作用。

按照砌体梁理论的结论，当破断面与垂直方向夹角为零、岩块间摩擦角的正切函数为1时，组成砌体梁结构的岩块的长度起码要大于其层厚的2倍，结构才能取得平衡。1974年，太原理工大学矿业工程学院的康立勋教授参与了在大同矿务局煤峪口矿9号煤层的8907工作面进行的我国自行研制的第一套垛式液压支架的工业性试验。他在进行现场矿压观测时多次发现，采场上覆岩层（直接顶）的断裂块体，当其长厚比远远小于2时，仍能形成半拱形平衡结构，断裂块体之间呈面接触状态（图1-1），这说明采场上覆岩层面接触块体结构是客观存在的。那么，这种面接触

块体结构所遵循的平衡规律是什么？它对采场矿压显现及矿压控制有什么影响？对整个采场上覆岩层的移动有什么影响？要回答这些问题，就必须对这种面接触块体结构进行深入研究，探讨结构的平衡条件、失稳机理等，进一步发展岩层控制的基础理论。

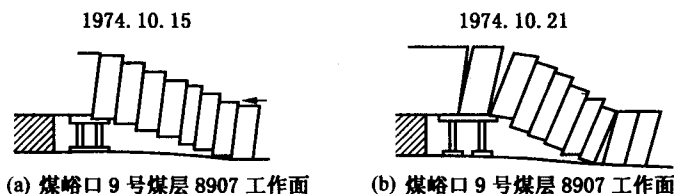


图1-1. 直接顶中的面接触块体结构

(观测素描图, 康立勋)

煤层开采过程中涉及的基本问题之一是采场岩层控制问题，其中像采场事故形成原因、顶板压力来源、采场支护原理、支护参数确定等问题，都与采场上覆岩层的结构形式密切相关。所以，研究采场上覆岩层的结构形式和相应的稳定—失稳规律，是采场矿压基础理论研究的核心内容，也是解决采场支护和岩层控制的关键。

煤层开采后，采场围岩的原始平衡被打破。为达到新的力学平衡，采场围岩产生相应的移动和破坏，这种移动和破坏自采场逐渐向上传递直至地表，形成沉陷盆地。采场上覆岩层结构的存在，必然对沉陷盆地的形成产生重要影响。因此，对煤层开采后采场上覆岩层所形成的结构形式进行研究，有助于加深对开采沉陷问题的认识，对开采沉陷控制理论的研究有指导意义。

岩层破断之后以面的形式相互接触更具有普遍性，即使以点的形式相接触时，一旦接触点的应力达到岩石的强度，随着接触点的破坏，接触方式也会由点接触转为面接触。所以，从面接触的角度去研究采场上覆岩层结构，可以看作是采场“砌体”结构理论的进一步深入。

岩体中原生结构面的存在及岩石工程施工导致的破坏面将岩层分割为许多块体。力在块体中的传递规律不同于连续介质。对块体中应力分布规律的研究导致了岩石块体力学理论的产生。采场上覆岩层面接触块体结构的研究无疑将丰富块体力学理论的研究内容。

总而言之，研究采场上覆岩层以面接触形式形成的块体结构可用于指导解决采矿工程中岩层控制的相关问题，具有重要的工程实际意义，同时还可以丰富和发展矿山压力及岩层控制理论，具有重要的理论价值。

1.2 采场上覆岩层结构理论的研究历史和现状

采场上覆岩层结构理论研究主要集中在采场矿压及其控制和开采沉陷及其控制两个研究领域。从历史的角度上看，采场上覆岩层结构理论的形成和发展过程经历了三个阶段。

1.2.1 采场上覆岩层结构早期认识与初步研究阶段

在上世纪五六十年代以前，尽管采矿工程中所出现的各种矿压及岩层控制问题已引起了人们的注意，但由于受科技发展水平的限制，同时投入的研究力量相对较弱，人们对采场上覆岩层结构的认识仅处于假说阶段，即仅仅能够利用简单的力学原理解释采矿工程实践中出现的矿压现象。

这一阶段比较有代表性的假说有：

1) 压力拱假说

德国学者V. 海克和R. 日特采尔特提出的此假说认为，在工作面上方由于岩层自然平衡的结果而形成了一个“压力拱”。前拱脚为工作面前方的煤体，后拱脚为采空区已垮落的矸石或采空区的充填体，如图1—2所示。随工作面推进，前后拱脚也将向前移动。

压力拱切断了拱内外岩石力的联系，承担了上部岩层的重量，并将其传递到拱脚A、B，从而形成支承压力区 S_1 、 S_2 ；在两个拱

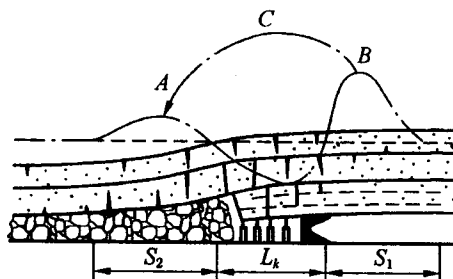


图1-2 压力拱假说模型^[17]

脚之间形成了一个减压区 L_k ，采场支架仅需承担压力拱 C 内的岩石重量。

压力拱假说可以解释长壁开采的某些矿山压力现象，但对采场周期来压等仍不能解释清楚。

2) 悬臂梁假说

德国学者 W. Hack 和 G. Giuitzer 于 1928 年提出了悬臂梁假说。该假说认为，顶板岩层是一种连续介质，初垮以后，可以看作一端固定在工作煤壁前方煤体上的悬臂梁。正是这种岩梁随采场推进有规律的折断，才导致采场来压的现象。悬臂梁折断的步距可由连续介质力学的方法确定。

悬臂梁假说可以较好地解释工作面周期来压的现象，但没有考虑支承压力预破坏顶板岩层的影响，因而对覆岩结构形态的描述不够全面。

3) 预成裂隙假说

1947 年，比利时的 A. 拉巴斯提出了预成裂隙假说。该假说认为，由于工作面前方支承压力的作用，使顶板岩体中形成了矿压裂隙，上覆岩层的连续性遭到破坏，从而形成非连续体，这种介质将似塑性体那样发生很大的变形，因此可将其视作“假塑性体”。并且假说认为，在回采工作面周围存在着应力降低区、应力

升高区和采动影响区。随着工作面的推进，三个区域同时相应地向前移动，如图1-3所示。

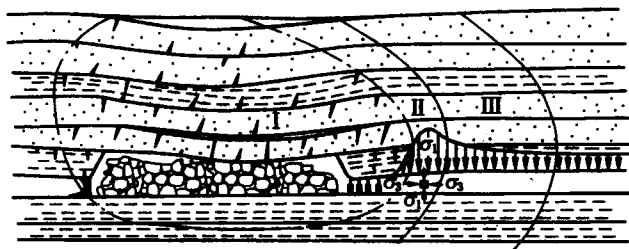


图1-3 预成裂隙假说示意模型^[17]

I—应力降低区；II—应力升高区；III—采动影响区

假说还认为，为有效地控制顶板，应保证支架具有足够的初撑力和工作阻力，并及时支撑住顶板岩层，使各岩层的岩块之间保持彼此挤紧状态，借助于彼此之间的高摩擦力，阻止它们之间的相对滑移、张裂与离层。

预成裂隙假说的贡献在于它揭示了煤层及临近采场的部分岩层在支承压力的作用下超前破坏的可能性，正确地指出了其破坏的原因，但不能正确地解释采场上覆岩层的周期性破坏和来压规律。

4) 铰接岩块假说

该假说由前苏联学者Г. Н. 库兹涅佐夫于1954年提出。假说中采用的工作面上覆岩层破坏模式如图1-4所示。

假说认为，若直接顶分层厚度 $h < m$ (m 为采高)，则在采空区形成冒落带，并且当满足 $(2 \sim 2.5)h < m$ 时，则成为不规则垮落带，即 M_1 区。

当采空区已冒落的矸石堆积有一定高度后，它与上部尚未垮落岩层之间的间隙为 m' ，如果 $h' < m'$ ，但 $m' < (2 \sim 2.5)h'$ ，则将形成规则冒落带，即 M_2 区。该范围的冒落岩块排列比较整齐，但相互间没有足够的水平力使其连为一个整体。

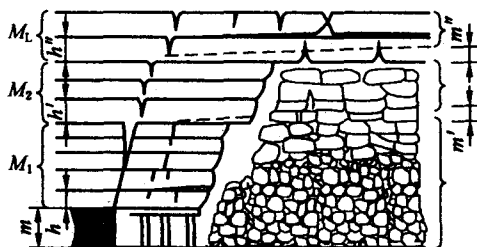


图1-4 铰接岩块假说示意模型^[12]

在规则垮落带之上，形成的间隙将变得更小。若其上部的岩层厚度为 h'' ，且 $h'' > m''$ 时将形成裂隙带，即 M_L 区。此区域内的岩块之间由于互相的咬合，在运动过程中将彼此受到牵制。铰接岩块间的平衡关系为三铰拱式的平衡。

假说认为，针对上述两部分岩层的运动，采场支架有可能在给定载荷和给定变形两种条件下工作。假说初步涉及到岩层内部的力学关系及其可能形成的“结构”，但对铰接岩块间的平衡条件未作进一步探讨，同时也未能更全面地揭示支架与这部分岩梁运动间的关系。

以上这些假说从不同的角度阐述了对采场上覆岩层形成的结构的认识。在一定程度上，这些假说都是从上覆岩层可能形成的结构出发来研究可能出现的矿山压力，从这个意义上看，这些假说都包含有某种合理的成分。除最后一种假说有定量分析的内容外，其他都局限在定性分析的基础上。这些假说所提出的观点对后来进一步研究采场上覆岩层的结构都具有十分重要的意义。

1.2.2 采场上覆岩层结构理论的成熟阶段

20世纪60年代以后，随着地下采矿工业的飞速发展，开采中出现和导致的问题要求人们必须研究可以用定量分析的手段来指导采矿设计与生产的采场上覆岩层结构理论。这些理论的研究主要是结合采场矿压控制和开采沉陷预测而展开的。由于西方国家

的经济实力及国情特点，使得国外对采场矿压的控制更多地从机械设备方面加以解决，因此，国外对采场上覆岩层结构的研究显得不足。在我国，国情要求只能以最低的设备投入实现安全及高效生产，因此，研究采场上覆岩层结构以搞清采场矿压的规律并加以控制就成为我国学者的研究重点之一。总的来讲，我国专家学者在这一阶段对采场上覆岩层结构的研究作出了重要贡献，成熟理论的代表主要有：

1) “砌体梁结构”理论^[12]

该理论由中国工程院院士钱鸣高教授创立。钱鸣高教授根据现场观察到的实际情况而推测的块体结构形态模型如图1-5所示，可称之为点接触块体结构模型。钱鸣高教授于20世纪60年代初就开始研究断裂岩块间的力学关系，在总结铰接岩块假说和预成裂隙假说以及在大量生产实践及对岩层移动现场实测的基础上，于70年代末80年代初提出了采场裂隙带岩体的“砌体梁”结构模型理论。该理论认为采场上覆岩层的岩体结构主要是由各个坚硬岩层组成，每个分组中的软岩层则视为坚硬岩层上的载荷，在水平推力作用下，断裂后且排列整齐的坚硬岩块可形成铰接关系。此结构具有滑落和回转变形两种失稳形式。

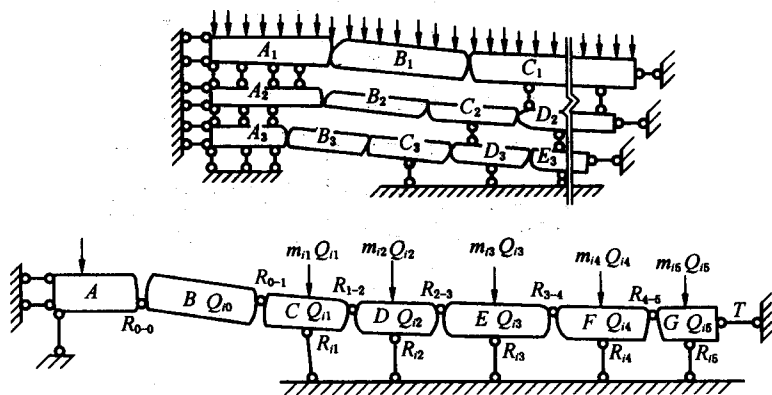


图1-5 “砌体梁”力学结构模型