

# 大采高综采采场顶板控制力学模型研究

弓培林, 靳钟铭

(太原理工大学 采矿工艺研究所, 山西 太原 030024)

**摘要:** 采用现场实测及相似模拟技术研究大采高综采采场顶板结构特征, 建立大采高综采采场的顶板控制力学模型。根据直接顶岩层结构不同, 将大采高直接顶划分为 I, II, III 型 3 种类型, I 型直接顶顶板荷载按给定载荷法或采高倍数法计算; II 型直接顶暂不宜采用大采高开采技术; III 型直接顶顶板控制应主要考虑直接顶关键层厚度、层位及工程力学特征, 当直接顶关键层距离支架较近时, 必须考虑冲击载荷影响。

**关键词:** 采矿工程; 大采高; 结构; 力学模型

**中图分类号:** TD 322

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2008)01 - 0193 - 06

## MECHANICAL MODEL STUDY ON ROOF CONTROL FOR FULLY-MECHANIZED COAL FACE WITH LARGE MINING HEIGHT

GONG Peilin, JIN Zhongming

(Institute of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

**Abstract:** By using in-situ measured data and the physical simulation technique, the structural characteristics of roof control with large mining height are studied. The mechanical model of roof control for the coal face with large mining height was put forward. According to different strata structures of the immediate roof, the immediate roof of the large mining height is divided into three types: type I, type II, and type III. Immediate roof type I will be calculated according to the given loading method and multiplying mining height method. Immediate roof type II is not suitable for large mining-height technique. The roof control of immediate roof type III should consider the thickness, location and engineering mechanical characteristics of the key layer of immediate roof. When the key layer of the immediate roof is closer to support load, the influence of shock loading should be considered.

**Key words:** mining engineering; large mining height; structure; mechanical model

## 1 引言

大采高开采技术是厚煤层开采工艺的重要发展方向之一。我国很多矿区赋存有 6.0 m 左右厚煤层, 如晋城、潞安、大同、阳泉、邢台、徐州、兖州、阜新、神府及东胜煤田, 在这种煤层条件下, 大采高开采是首选方法。近十余年来, 大采高工艺得到了一定发展, 大采高采场矿压理论研究逐步深

入<sup>[1~13]</sup>, 但现场实践表明, 仍有一些大采高工作面由于顶板控制存在问题而影响工作面生产能力发挥; 同时, 有很多矿区煤层厚度适合于采用大采高工艺技术, 但由于没有成熟的顶板控制理论指导, 推迟了该技术的应用, 主要问题是, 现有的适用于普通采高的顶板控制理论及相关的技术规范不能有效指导大采高顶板控制设计。本文在大采高采场矿压观测的基础上, 通过实验室相似模拟技术研究了大采高采场顶板结构特征, 给出了不同顶板条件下

**收稿日期:** 2007 - 03 - 20; **修回日期:** 2007 - 09 - 29

**作者简介:** 弓培林(1966 -), 男, 博士, 1987年毕业于山西矿业学院采矿工程专业, 现任教授, 主要从事岩石力学、采矿工程等方面的教学与研究工作。E-mail: plgong@126.com

的顶板控制力学模型。

## 2 大采高工作面矿压显现规律

### 2.1 大采高综采的矿压显现特征

#### (1) 工作面支护强度高

表 1 为大采高工作面支护强度统计情况，由表可知，大采高工作面支护强度平均达 832 kPa，较我国顶板分类所要求的支护强度高 10%~30%。

表 1 大采高工作面支护强度统计

Table 1 Statistics for support strengths in large mining height

矿名	工作面	采高 /m	最大平均支护强度 $Q_d$ /kPa	顶板分类支护强度 $Q_p$ /kPa	$Q_d/Q_p$
大柳塔	1203	4.0	780	715	1.09
大柳塔	20604	4.3	833	715	1.11
活鸡兔	12205	3.5	727	660	1.10
沙曲	24101	4.0	846	798	1.06
康家滩	88101	4.5	857	715	1.20
寺河	2302	5.5	930	715	1.30
寺河	2301	4.5	858	715	1.20

#### (2) 动载系数小

表 2 为大采高工作面动载系数统计情况，由表可知，虽然统计工作面的顶板类型不同，但动载系数差别不大，一般为 1.2~1.3，均较普通综采的动载系数小。

表 2 大采高工作面动载系数统计

Table 2 Statistics for coefficients of impact load with large mining height

矿名	实测动载系数	顶板分类级别	动载系数范围
大柳塔	1.26	II	1.3~1.5
大柳塔	1.28	II	1.6~1.7
活鸡兔	1.20	I	1.1~1.3
沙曲	1.26	II~III	1.6~1.7
康家滩	1.20	II	1.3~1.5
寺河	1.43	II	1.3~1.4
寺河	1.52	II	1.3~1.5

#### (3) 支架载荷分布以正态为主

根据工作面支架阻力直方图<sup>[7]</sup>，大采高阻力基本上为正态分布，对于普通综采，随顶板级别不同，会出现正态、双正态叠加、双正态和双正态加冲击 4 种不同分布。

### 2.2 大采高支架 - 围岩关系

(1) 支架载荷和现行顶板类别关系不明显。

根据我国现行的顶板分类，顶板支护强度随基本顶级别增大呈线性增大，这是因为采场来压强度与顶板岩体结构失稳和来压步距大小直接相关，对于大采高综采，这一关系不明显。如表 1 中大柳塔矿 1203 工作面直接顶为厚 5 m 的泥岩、砂质泥岩，基本顶为 16 m 厚的砂岩层，在普通综采条件下为 II 级顶板，支护强度不超过 715 kPa，但实际上达到 780 kPa。寺河矿 2301 工作面直接顶为 15 m 厚的砂质泥岩、泥岩和煤顶，基本顶为 5 m 厚的砂岩，近乎 I 级基本顶，但其实际所需支护强度达 858 kPa，与大柳塔矿相近。

(2) 支架初撑力与工作阻力呈线性关系

寺河矿、康家滩矿、沙曲矿及大柳塔矿的初撑力与工作阻力关系曲线<sup>[7]</sup>表明，初撑力及工作阻力曲线为线性关系，这一关系显示了其以静载为主的特性，岩体结构的失稳对采场支架无明显影响。

(3) 支架受力以围岩静载为主

由于控制的顶板层位高，其上岩体结构失稳的动载对支架本身影响不大，即使有较大的动载荷，由于厚的破碎矸石做垫层，也很难传递给支架。因此虽然载荷大，但动载系数很小，是以静载即顶板的重力加在支架上的。

由此可见，大采高采场的矿压显现规律及支架围岩关系与普通采高采场有明显区别，其根本原因是大采高采场的顶板冒落高度大，支架控制岩层的范围及支架围岩作用关系发生了变化。因此，有必要在分析大采高采场不同顶板结构冒落特征的基础上，给出相应的顶板控制原则。

## 3 大采高直接顶结构的分类

现场观测、相似模拟及理论分析<sup>[6~8]</sup>均表明，大采高采场随着采高的加大，覆岩中能形成平衡的结构岩层上移，在普通采高工作面中能形成铰接平衡结构的岩层，在大采高情况下折断，垮落进入采空区。本文约定不能形成平衡结构岩层均称为“直接顶”，则大采高采场直接顶厚度要大于普通采高。大采高直接顶厚度一般为采高的 2.0~4.0 倍，因此大采高直接顶不仅仅为随采随冒的易垮落岩层，也包括普通采高下视为基本顶的岩层。据此计算，采高 5.0 m 时，直接厚度为 10~20 m，采高 6.0 m 时，直接顶厚度为 12~24 m。

显然, 大采场高采场直接顶的构成发生了变化, 必然影响到直接顶作为载荷及传力方式的变化, 有必要分类区别研究。根据岩层组合结构, 将大采高直接顶分为 3 类(见图 1)。

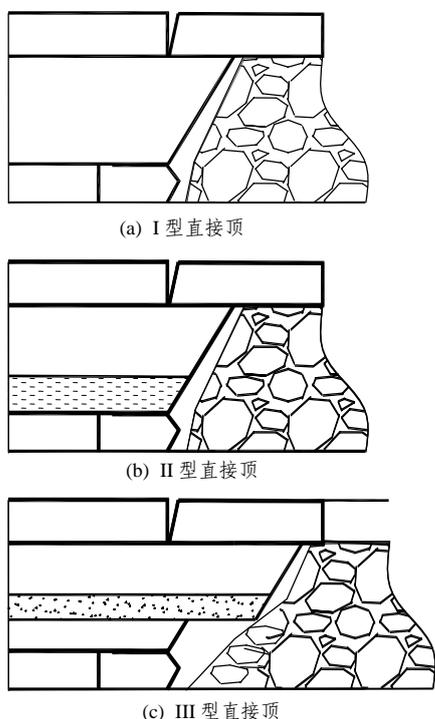


图 1 大采高直接顶分类

Fig.1 Immediate roof classifications with large mining height

(1) I 型直接顶(见图 1(a)), 其特点是煤层上方直接顶由同一岩性或不同岩性但力学差异较小的岩层组成。

(2) II 型直接顶(见图 1(b)), 其特点是煤层上方有一层较厚的、裂隙发育的软岩, 与上覆较硬岩层共同组成直接顶。由于大采高支架高度大, 处理端面漏冒极为困难, 因此该类条件暂不宜采用大采高工艺。

(3) III 型直接顶(见图 1(c)), 其特点是在直接顶中赋存有一层或两层强度高、裂隙不发育的厚层岩层, 在普通采高时, 此岩层相当于“基本顶”, 大采高时则作为直接顶。

## 4 大采高采场顶板控制力学模型

### 4.1 I 型直接顶变形破坏规律及工作阻力确定

数值模拟结果<sup>[7]</sup>表明, 大采高采场 I 型直接顶的破坏是由于上位的拉断, 下位端面距部位的压剪破坏所引起的, 增大初撑力可以直接减小顶板的

初始下沉量, 同时改变下位直接顶端面距部分的应力状态, 因而快速达到较高的初撑力有其重要意义。

#### 4.1.1 给定载荷的估算方法

尽管理论分析<sup>[7]</sup>认为基本顶形成了平衡结构, 但由于基本顶岩性、厚度、上覆载荷层以及厚度的变化, 加之地质构造的影响, 该构造并不总是能够形成, 如现场周期来压步距有时变化范围较大, 说明基本顶岩块并不总是以固定长度断裂, 而是有一个范围。这样, 支架工作阻力可按给定载荷的方法估算。顶板控制力学模型见图 2, 基本顶以载荷形式给予支架  $P_1$  力。基本顶失稳瞬间时, 其全部重力均由支架承担, 则有

$$P_1 = LBh\gamma_1 \quad (1)$$

式中:  $h$  为基本顶及上覆承载层厚度,  $\gamma_1$  为基本顶岩石容重,  $B$  为支架宽度,  $L$  为基本顶断裂长度。

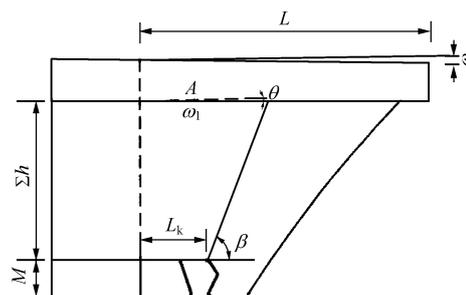


图 2 顶板控制力学模型

Fig.2 Mechanical model of roof control

支架支护阻力  $P$  可表示为

$$P = \gamma B \Sigma h \left( L_k + \frac{1}{2} \Sigma h \cot \beta \right) + P_1 \quad (2)$$

式中:  $L_k$  为控顶距,  $\gamma$  为直接顶岩石容重,  $\Sigma h$  为直接顶厚度,  $\beta$  为断裂角。

实例验证: 寺河矿 2301 工作面主要参数为:  $L = 14.2 \text{ m}$ ,  $B = 1.75 \text{ m}$ ,  $h = 5 \text{ m}$ ,  $\Sigma h = 15 \text{ m}$ ,  $L_k = 5.145 \text{ m}$ ,  $\beta = 75^\circ$ 。

经计算, 支护阻力为 7 962 kN/架, 实测来压时最大平均载荷为 7 574 kN/架, 基本对应, 说明用给定载荷估算 I 型直接顶的工作阻力基本可行。

#### 4.1.2 用采高倍数估算工作阻力

I 型直接顶分区见图 3, 首先按图中  $bceg$  矩形区域考虑支架载荷, 直接顶重力为  $L_k \gamma B \Sigma h$ , 考虑增载系数  $n$  的支架载荷为  $P_0$ , 则有

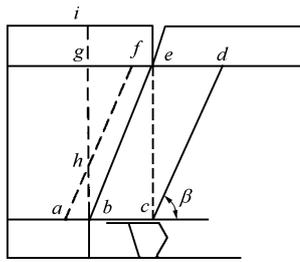


图3 I型直接顶分区

Fig.3 Zoning of immediate roof type I

$$P_0 = nL_k \gamma B \Sigma h \quad (3)$$

大采高承载以静载为主，一般情况下  $n \leq 1.5$ ，当取  $n = 1.5$ ，碎胀系数  $K_p = 1.3 \sim 1.5$  时，有

$$P_0 = (3 \sim 5) M \gamma B L_k \quad (4)$$

由于采高加大，应考虑图3中  $cde$  区域的重力  $P_2$ ， $\Sigma h$  按  $(3 \sim 5)M$  取值 ( $M$  为开采高度)，则有

$$P_2 = \frac{1}{2} [(3 \sim 5)M]^2 \gamma B \cot \beta = \frac{(9 \sim 25)}{2} M^2 \gamma B \cot \beta \quad (5a)$$

$$P = P_0 + P_2 \quad (5b)$$

式(5b)的含意是，支架载荷可按  $3 \sim 5$  倍采高的岩重加顶梁末端悬向采空区相应厚度的直接顶重力，系数  $3 \sim 5$  是来压程度的综合反映，与实际采高  $M$  不直接相关。选取时应分析采场结构及来压程度大小，基本顶断裂步距大，其下自由空间大，则取大值。

仍以寺河矿为例，计算得  $P = 7788$  kN/架，略大于实测支架来压平均载荷。

### 4.2 III型直接顶变形破坏规律及工作阻力的确定

#### 4.2.1 III型直接顶结构及变形破坏特点

大采高 III 型直接顶结构参数如图4所示。

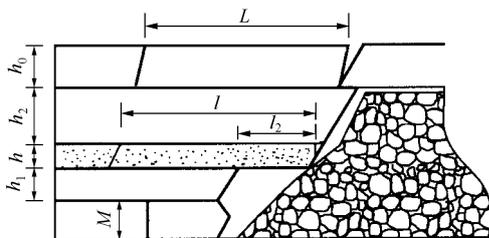


图4 III型直接顶结构参数

Fig.4 Parameters of immediate roof structure type III

如前所述，III型直接顶的基本特点是直接顶中

包含一层或几层厚硬岩层，这些岩层在普通采高时即为基本顶，能形成铰接平衡结构，而在大采高时，无法形成平衡结构而垮落于采空区中，需要说明的是，现在仍有很多文献资料称这些厚岩层为基本顶，这样容易与普通采高的基本顶在概念上混淆，从学术的观点来看，笔者建议将这些直接顶中的厚硬岩层称为“直接顶关键层”，而将厚硬岩层以外的其他直接顶称为“主要直接顶”(或简称直接顶)，直接顶的变形破坏规律、围岩控制研究中直接顶关键层起主要控制作用，根据其层位不同，可以分为下位、中位及上位直接顶关键层。

显然，III型直接顶与I型直接顶的变形破坏规律不同，主要特点是增加了“悬顶”的概率(见图4)。由于直接顶关键层的控制作用，可能出现图4所示的悬顶情况，悬顶长度为  $l_2$ ，如果存在下位直接顶关键层，可以在回采工作面观察到悬顶的存在。

#### 4.2.2 III型直接顶顶板压力及载荷估算

当回采工作面推进至直接顶关键层断裂线上方时其载荷计算情况如图5所示。此时，直接顶关键层以断裂线为支点，将产生向采空区旋转的趋势，使直接顶关键层产生旋转运动的外力是直接顶关键层的自重  $Q_0$ 、悬顶部分承担的上位直接顶载荷  $Q_1$  以及基本顶的附加力  $P'$ ；阻止其发生旋转运动的是下位直接顶给予直接顶关键层的阻力  $P_0$ 。直接顶关键层旋转时，其上层面在点A处向煤壁方向产生离层，同时在断裂线附近受到上位直接顶及前方未断裂直接顶关键层的附加力  $Q_2$ ，直接顶关键层的旋转，将导致下位直接顶变形、下沉。因此，支架阻力应在断裂线刚进入煤壁上方时阻止其大幅度旋转造成的破坏，同时要防止直接顶关键层在断裂线处的滑落而造成工作面的台阶下沉，不考虑  $P'$  时，有

$$P_0 = Q_0 + Q_1 + Q_2 \quad (6)$$

将  $P_0$  简化为集中力，对点  $o$  取力矩，有

$$Q_2 L_k = Q_0 \left( \frac{l}{2} - L_k \right) + Q_1 \left[ l_1 + \frac{l_2}{2} + \frac{1}{2} (h + h_2) \cot \beta - L_k \right]$$

化简可得

$$Q_2 = Q_0 \left( \frac{l}{2L_k} - 1 \right) + Q_1 \left[ \frac{l + l_1 + (h + h_2) \cot \beta}{2L_k} - 1 \right] \quad (7)$$

其中，

$$Q_0 = h l \gamma$$

$$Q_1 = h_2 l_2 \gamma$$



工程力学特征。当直接顶关键层距离支架较近时，必须考虑冲击载荷影响，顶板控制机制尚需深入研究。

(4) I 型直接顶在我国煤矿占有较大比例，这是我国采用大采高开采技术的有利条件。

### 参考文献(References):

- [1] 王金华. 我国大采高综采技术与装备的现状与发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(1): 4 - 7.(WANG Jinhua. Present status and development tendency of fully-mechanized coal mining technology and equipment with high cutting height in China[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(1): 4 - 7.(in Chinese))
- [2] 王家臣. 我国综放开采技术及其深层次发展问题的探讨[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(1): 14 - 17.(WANG Jiachen. Fully-mechanized longwall top coal caving technology in China and discussion on issues of further development[J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(1): 14 - 17.(in Chinese))
- [3] 毛德兵. 大采高综放开采及其应用可行性分析[J]. 煤矿开采, 2003, 8(1): 11 - 14, 21.(MAO Debing. Longwall top coal caving mining with higher mining height and its feasibility[J]. Coal Mining Technology, 2003, 8(1): 11 - 14, 21.(in Chinese))
- [4] 何富连, 钱鸣高, 刘学锋, 等. 大采高液压支架倾角特征与控制条件[J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(4): 20 - 24.(HE Fulian, QIAN Minggao, LIU Xuefeng, et al. Tilt characteristics and control conditions of high powered support[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1997, 26(4): 20 - 24.(in Chinese))
- [5] 黄庆享. 浅埋煤层长壁开采顶板结构及岩层控制研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000: 28 - 33.(HUANG Qingxiang. Study on roof structure and ground control in shallow seam longwall mining[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2000: 28 - 33.(in Chinese))
- [6] 弓培林, 靳钟铭. 大采高采场覆岩结构特征及运动规律研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 7 - 11.(GONG Peilin, JIN Zhongming. Study on the structure characteristics and movement laws of overlying strata with large mining height[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(1): 7 - 11.(in Chinese))
- [7] 弓培林. 大采高采场围岩控制理论及应用研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006: 11 - 22.(GONG Peilin. Surrounding rock control theory and application study of the coal face with greater mining height[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2006: 11 - 22.(in Chinese))
- [8] 弓培林, 靳钟铭, 郝海金. 综采采场超大空间结构稳定性控制及工艺参数优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增): 1 982 - 1 985.(GONG Peilin, JIN Zhongming, HAO Haijin. Stability control of large space structure in fully-mechanized mining coal face and the optimization of technological parameters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(增): 1 982 - 1 985.(in Chinese))
- [9] 方焕明. 特厚煤层综放开采瓦斯防治技术分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(2): 236 - 240.(FANG Huanming. Analysis of comprehensive prevention technology of gas burst in top-coal caving mining of extremely thick coal seam[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2006, 23(2): 236 - 240.(in Chinese))
- [10] 康天合, 柴肇云, 李义宝. 底层大采高综放全厚开采 20 m 特厚中硬煤层的物理模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1 066 - 1 071.(KANG Tianhe, CHAI Zhaoyun, LI Yibao. Study on physical simulation of full-seam mining for a 20 m very thick and medium hard seam by sub-level caving mining with high bottom cutting height[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 1 066 - 1 071.(in Chinese))
- [11] 赵宏珠. 大采高支架的使用及参数研究[J]. 煤炭学报, 1991, 16(1): 32 - 38.(ZHAO Hongzhu. Application of support with great mining height and study of its parameters[J]. Journal of China Coal Society, 1991, 16(1): 32 - 38.(in Chinese))
- [12] 胡国伟, 靳钟铭. 大采高综采工作面矿压观测及其显现规律研究[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(2): 127 - 130.(HU Guowei, JIN Zhongming. Practice of pressure law and study on the strata behavior regularity of large mining height fully-mechanized face[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37(2): 127 - 130.(in Chinese))
- [13] 郝海金, 张 勇. 大采高开采工作面煤壁稳定性随机分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2005, 24(4): 489 - 491.(HAO Haijin, ZHANG Yong. Stability analysis of coal wall in full-seam cutting workplace with fully-mechanized in thick seam[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2005, 24(4): 489 - 491.(in Chinese))
- [14] 姜福兴. 采场支架冲击载荷的动力学分析[J]. 煤炭学报, 1994, 19(6): 649 - 658.(JIANG Fuxing. Dynamic analysis of impact load on the support in the workings[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(6): 649 - 658.(in Chinese))
- [15] 靳钟铭, 徐林生. 煤矿坚硬顶板控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994.(JIN Zhongming, XU Linsheng. Hard roof control in coal mine[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1994.(in Chinese))