

文章编号:0253-9993(2013)08-1331-07

# 薄基岩综放采场直接顶结构力学模型分析

杜 锋<sup>1,2</sup>,白海波<sup>2</sup>

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院,河南 焦作 454000; 2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221116)

**摘 要:**为深入研究薄基岩综放采场矿压显现规律,以山西潞安矿业集团司马煤矿薄基岩区厚煤层开采为研究背景,采用数值模拟、理论分析、现场实测等方法对薄基岩综放采场直接顶结构特征进行了研究,建立了薄基岩综放采场直接顶结构力学模型,分析了直接顶“半拱”式平衡结构的形成机理和破断规律。结果表明:根据司马矿薄基岩区直接顶厚度和岩层性质不同,将直接顶划分为 I 型和 II 型两种类型;采高 6.5 m,直接顶厚度大于 15 m 时,容易形成“半拱”式平衡结构,采场矿压呈现出来压步距短、静压大、动压小、动载系数小等特征。“半拱”结构有规律的破断失稳是薄基岩综放工作面矿压显现的根源,该结论解释了司马煤矿薄基岩综放采场的矿压显现规律。

**关键词:**薄基岩;综放开采;直接顶;半拱结构;厚松散层

中图分类号:TD823.49 文献标志码:A

## Mechanical analysis of immediate roof in fully mechanized top coal caving mining with thin bedrock

DU Feng<sup>1,2</sup>, BAI Hai-bo<sup>2</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to further investigate the mine pressure behavior of thin-bedrock in fully-mechanized sublevel caving face, this paper took the thick coal seam mining under thin bedrock roof in Sima Coal Mine of Lu'an Group as a case in point. The structural characteristics of immediate roof in longwall top coal caving face with thin bedrock roof were studied by using of numerical simulation, theoretical analysis, in-site measurement, etc. Mechanical model of immediate roof in longwall top coal caving face with thin bedrock roof was established, and the formation mechanism and breakage law of semi-arch structural model of immediate roof were also analyzed. The results indicate that the immediate roof is divided into two types as type I and type II based on the thickness and rock properties of immediate roof in Sima Mine thin bedrock area; semi-arch structural model of immediate roof is easily formed, when mining height is 6.5 m and the thickness of immediate roof is more than 15 m; the phenomenon of short weighting interval, big static pressure, little dynamical pressure, little coefficient of live load is presented in mining pressure behavior; the regular breaking of semi-arch structure is the root of mining properly explains the law of mining pressure behavior of thin bedrock roof pressure behaviors of thin bedrock roof in longwall top coal caving face. The results explains the mine pressure behavior of Sima Coal Mine thin-bedrock in fully-mechanized sublevel caving face.

**Key words:** thin bedrock; fully mechanized top coal caving mining; immediate roof; semi-arch structure; thick alluvium

综放顶煤采煤法经过几十年的发展,取得了众多的研究成果<sup>[1-9]</sup>,由于综放开采造成一次采厚成倍

增加,基本顶的平衡结构也会不断上移,从而使矿压显现趋于复杂化。张顶立和王悦汉<sup>[10]</sup>通过理论研

收稿日期:2012-08-20 责任编辑:常 琛

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50974115);高等学校学科创新引智计划资助项目(B07028)

作者简介:杜 锋(1984—),男,安徽肥东人,讲师。E-mail: fdu\_cumt@126.com

究、现场观测等手段,证实了采厚较大时,直接顶容易出现“桥拱”结构,使工作面表现出大小周期性压力交替显现的特征;杨淑华,姜福兴等<sup>[11-12]</sup>也通过相似材料模拟和现场观测得到了相似的规律;高峰等<sup>[13-15]</sup>对综放工作面直接顶的力学性质进行了研究,得到了很多有益的结论;陈忠辉等<sup>[16]</sup>根据浅埋深特厚煤层综放开采的岩层移动特点,建立了基本顶断裂力学模型。虽然直接顶中“拱”结构的存在已经得到证实,但多集中于正常厚基岩情况下,对于厚松散层薄基岩条件下综放开采直接顶结构力学特性的研究鲜见报道。厚松散层薄基岩综放开采时,具有覆盖土层厚、基岩薄、岩层结构单一、顶板移动范围大等特点,综采条件下作为基本顶关键层的岩层也可能转化为直接顶,此种开采条件下对直接顶的分类和结构特征研究就显得尤为必要,将为合理解释该条件下矿压显现规律提供理论依据,对于进一步完善综放开采矿压理论具有重要的意义。笔者结合潞安矿区司马煤矿薄基岩区综放工作面开采条件,研究了不同厚度直接顶的矿压显现规律,并对直接顶进行了分类。

## 1 薄基岩区煤层开采条件

司马煤矿一采区全部和二采区大部分处于薄基岩区,主采 3 号煤层,煤层厚度平均为 6.5 m,煤层倾角 0~12°,平均为 6°,采用综放开采方式。由于薄基岩区位于煤层隐伏露头附近,煤系地层遭到严重剥蚀,3 号煤层上覆基岩厚度普遍小于 40 m,个别区域甚至不足 10 m,基岩上方通常赋存 160~200 m 的松散层。根据岩石力学测试结果,薄基岩区中、细砂岩强度为 29.93~78.03 MPa,砂质泥岩为 8.22 MPa,多为中等坚硬岩石。

## 2 数值模拟分析

### 2.1 模型的建立

根据司马煤矿薄基岩区地质条件,采用 UDEC 软件进行模拟分析,模拟煤层埋深 182 m,煤层厚度

6.5 m,采高 3 m,放煤高度 3.5 m,重点研究不同直接顶厚度条件下覆岩垮落情况及工作面矿压显现规律。

#### 2.1.1 模型边界条件

在岩层移动数值模拟中,因松散层较厚,故模型的垂直范围取到松散层内。走向方向长 200 m,垂直方向高为 120 m,总共开挖 80 m,切眼和终采线往外 60 m 煤柱做为煤柱作为固定边界,采用平面应变模型采用平面应力模型。

计算模型的位移边界条件为:模型的左右及下部边界为位移边界,左右边界限制水平方向的位移;下部边界限制垂直方向的位移,上部边界为自由边界。上部边界以上的松散层为 97 m,转换为外载荷 1.94 MPa,施加在模型的上边界。计算模型如图 1 所示。

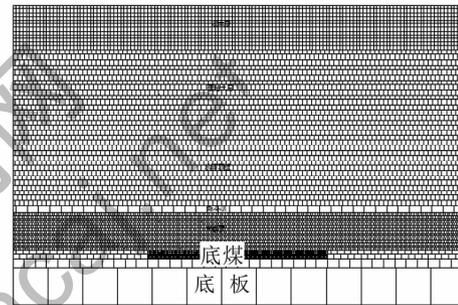


图 1 数值计算模型

Fig. 1 Numerical simulation model

#### 2.1.2 模拟参数及开采方案

岩块采用摩尔-库伦模型,节理模型采用面接触库伦滑移模型。岩层节理简化为水平方向与垂直方向两组节理,各岩层的材料属性参数设置见表 1,节理参数见表 2。

设计开采方案如下:薄基岩总厚度 40 m,支架通过 SUPPORT 单元进行模拟,支架工作阻力 7 000 kN,采高为 6.5 m,采用开挖底煤—支护—移架—开挖顶煤的循环开采工艺,每次开挖 5 m,分析直接顶厚度为 5, 10, 15, 20, 30, 35 m 时的顶板垮落规律及矿压显现规律。

表 1 块体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of blocks

岩层	体积模量 $K/\text{GPa}$	剪切模量 $G/\text{GPa}$	容重 $\rho/(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	摩擦角 $l/(\text{°})$	黏结力 $C/\text{MPa}$	抗拉强度 $E_t/\text{MPa}$
煤层	2.5	1.15	1 380	32	1.60	0.20
直接顶	2.4	1.64	2 600	35	2.00	1.20
基本顶	4.0	2.30	2 700	40	14.00	1.70
软弱顶板	2.4	1.64	2 600	35	2.00	1.20
黏土层	0.7	0.35	2 060	25	0.55	0.16
砂土层	0.275	0.127	2 000	20	0.02	0.10

表 2 接触面力学参数

Table 2 Mechanical parameters of interface

岩层	法向刚度/GPa	切向刚度/GPa	黏结力/MPa	摩擦角/(°)
煤层	0.8	0.4	0	10
直接顶	5.0	4.0	0	15
基本顶	11.0	10.0	0	20
软弱顶板	5.0	4.0	0	15
黏土层	0.7	0.4	0	12
砂土层	0.6	0.3	0	8

2.2 数值模拟结果分析

2.2.1 覆岩破断规律

图 2 为不同厚度直接顶时的覆岩垮落形态。从图 2 可以看出,直接顶厚度小于 10 m 时,基本顶岩层会转化为直接顶一部分,不再传递水平力,随着工作面不断推进,上覆软弱岩层内部会形成砌体梁平衡结构;直接顶大于 15 m 时,由于直接顶较厚,基本能够充满采空区,并且由于直接顶属于中等坚硬岩层,垮落过程中相互挤压,形成了“半拱”平衡结构,基本顶在“半拱”结构上方形成砌体梁结构。随着工作面推进,“半拱”跨度继续增加,当无法承受上覆岩层荷载

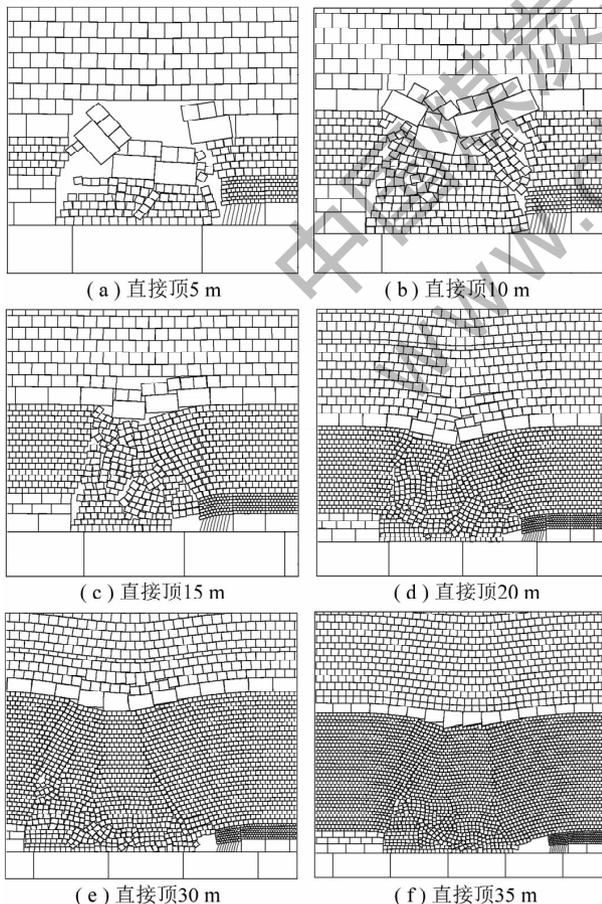


图 2 不同厚度直接顶垮落形态

Fig. 2 Caving forms of immediate roof with different thicknesses

时,将发生失稳破断,造成工作面支架压力增加,形成周期来压,如图 3 所示。

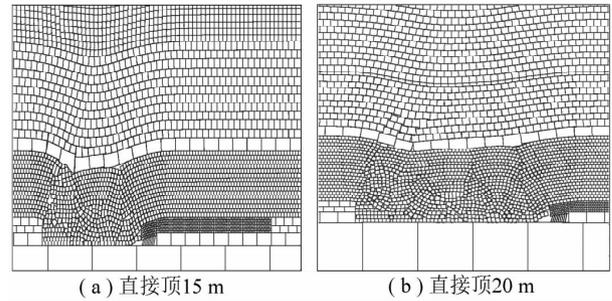


图 3 周期来压直接顶垮落形态

Fig. 3 Caving forms of immediate roof with periodic weighting

表 3 反映的是不同直接顶的工作面来压步距情况。从表中可以看出,直接顶厚度的增加对工作面初次来压步距影响较为明显,随着厚度加大,初次来压步距逐渐降低。直接顶厚度大于 15 m 时,厚度的改变对工作面来压步距基本没有影响,工作面来压步距较短。

表 3 不同直接顶来压步距

Table 3 Weighting step lengths of immediate roof with different thicknesses

直接顶厚度	5	10	15	20	30	35
初次来压步距	40	35	30	30	30	30
周期来压步距	不明显	15	10~15	15	15	15

2.2.2 支承压力分布规律

图 4 为不同厚度直接顶的支承压力变化曲线。支承压力与顶板移动有很大的关系,随着直接顶厚度加大,支承压力整体表现为降低趋势。直接顶为 5 m 时,峰值压力为 8.79 MPa,峰值系数达到 2.04;直接顶为 10 m 时,峰值压力为 7.91 MPa,峰值系数为 1.84;直接顶厚度大于 15 m 时,支承压力分布曲线几乎重合,峰值压力为 7.32 MPa,峰值系数为 1.70,表明此时直接顶厚度的改变对支承压力的影响不大,也即岩层移动引起的支承压力变化趋于一致。

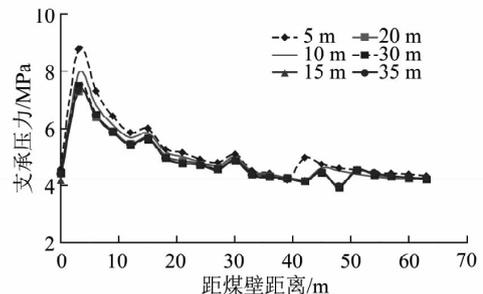


图 4 支承压力变化曲线

Fig. 4 Variation curves of supporting pressure

### 2.2.3 支架工作阻力变化规律

图 5 为不同厚度直接顶支架工作阻力变化曲线。由图 5 可以看出,直接顶初次垮落前,支架工作阻力相差不大,随着直接顶垮落,支架工作阻力明显表现出不同。由于直接顶岩层通常作为静荷载,支架必须承受其自重,故直接顶越厚,支架必须承受的静载荷越大,直接顶为 20 m,支架工作阻力达到 6 080.4 kN;直接顶为 15 m 时,支架工作阻力达到 5 580.9 kN;直接顶为 10 m 时,工作面开采期间,支架工作阻力最大为 5 405.3 kN;直接顶为 5 m 时,工作面支架工作阻力初次来压后变化不大,来压时压力为 5 058.5 kN。结合破断规律分析可知,直接顶小于 10 m 时,来压显现不明显,直接顶岩层以静荷载为主,砌体梁结构变形失稳造成的压力对其影响很小;直接顶大于 15 m 时,虽然动载系数较小,但仍具有来压特征,直接顶内部会形成平衡结构,结构反复的失稳破断是压力显现的根源。

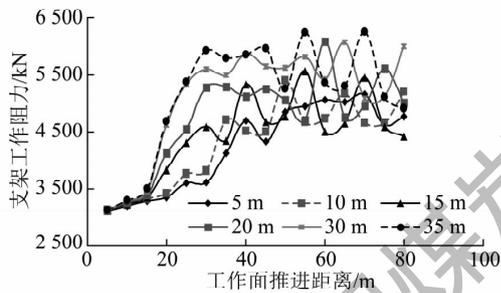


图 5 支架工作阻力变化曲线

Fig. 5 Variation curves of support working resistance

## 3 直接顶力学平衡结构

### 3.1 直接顶结构分类

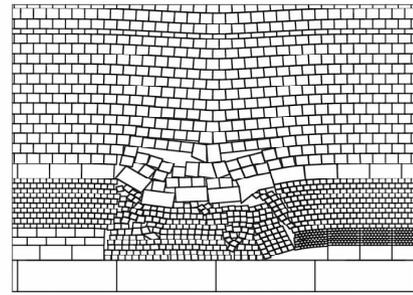
根据上述研究可以得到,直接顶厚度和岩性的变化将会造成覆岩运动的平衡结构以及工作面矿压显现的不同。由于司马矿薄基岩区综放开采,岩层结构较为单一,如果直接顶将采空区充满,则需要的直接顶厚度为  $\sum h$ ,即

$$\sum h = \frac{M}{K_p - 1} \quad (1)$$

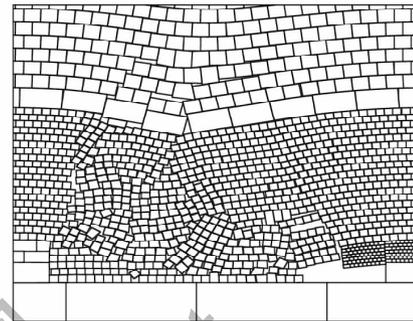
式中, $M$  为煤层厚度, m;  $K_p$  取值为 1.25 ~ 1.50。

当  $M = 6.5$  m 时,需要的直接顶厚度约为 13 ~ 26 m。显然,薄基岩区直接顶厚度的变化会直接影响覆岩结构运动,进而影响到直接顶作为载荷及传力方式的变化。故根据直接顶厚度的不同,并且通过适当的简化,将司马矿薄基岩区直接顶分为以下两类,如图 6 所示。

I 型直接顶:如图 6(a) 所示。煤层上方直接顶



(a) I 型直接顶



(b) II 型直接顶

图 6 薄基岩直接顶分类

Fig. 6 Classification of thin bedrock immediate roof

由两种不同岩性岩层组成,其中包括了综采条件下作为基本顶的坚硬岩层,该岩层已经作为垮落带一部分,无法传递水平力。随着采场不断推进,垮落覆岩最终会填满采空区,并将在上覆较为软弱岩层中形成平衡结构,该类型顶板在采空区充满后,支架承受的载荷多为直接顶的静载荷,基本顶周期性断裂对其影响不大,来压显现不明显。

II 型直接顶:如图 6(b) 所示。煤层上方直接顶由同一岩层或者力学强度较为相近的岩层组成,并且较厚,垮落后能够充满采空区,并且在垮落过程中,破碎矸石容易相互挤压形成半拱式平衡结构,拱顶位于支架上方岩层,“半拱”上方是坚硬岩层组成的“砌体梁”平衡结构,但由于直接顶厚度较大,支架的载荷主要随着“半拱”的形成、失稳而变化,“砌体梁”失稳造成的压力对支架影响不大。

### 3.2 直接顶“半拱”结构力学平衡机理

为了更好地分析“半拱”力学平衡机理,建立了直接顶“半拱”结构模型,如图 7 所示(图中  $s$  为相邻块体的相对竖直下沉量; $c$  为面接触块体结构中每一块体的长度)。对“半拱”结构模型进行适当的简化,满足如下假设条件:

(1) 块体尺寸相同,并且相互平行,与水平方向夹角相同,忽略块体自身扭转的影响;

(2)  $q$  为面接触块体结构中顶板单位长度的自重加上其上的折算为单位长度的载荷。自重假设为均布载荷为  $q$  的一部分。

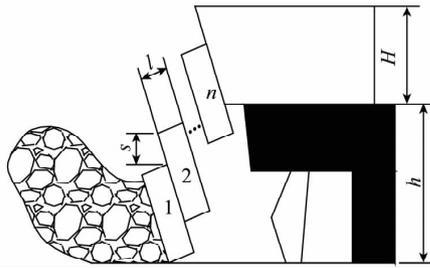


图 7 直接顶半拱结构模型

Fig.7 Semi-arch structural model of immediate roof

在此基础上,取其中第 2 个块体结构进行受力分析。从结构整体中隔离第 2 块至第  $n$  块,可知第 2 块上侧受向上摩擦力,同理下侧受向下的摩擦力,如图 8 所示。

$$\begin{cases} (T_2 - T_1) \cos \beta + (F_2 - F_1) \sin \beta = 0 \\ (F_2 - F_1) \cos \beta - (T_2 - T_1) \sin \beta - ql = 0 \end{cases} \quad (2)$$

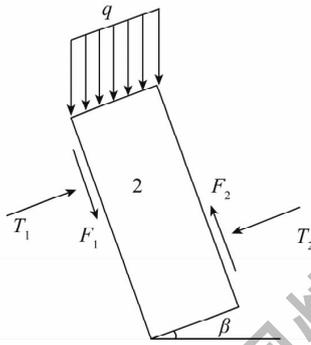


图 8 块体受力示意图

Fig.8 Loading of a block

由式(2)可得

$$\begin{cases} T_2 = -ql \sin \beta + T_1 \\ F_2 = ql \cos \beta + F_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $F$  为块体间摩擦力;  $T$  为块体成拱需要的水平

$$F_n = \frac{\left( H - \frac{h - n l \sin \beta}{\cos \beta} \right) (n - 1) ql (\cos \beta + f_1 \sin \beta) + n ql (l \cos \beta + H \sin \beta) + ql \left( l \cos \beta - \frac{h - n l \sin \beta}{n} \tan \beta \right) \sum_{i=1}^n i}{\left( H - \frac{ns}{\cos \beta} \right) + n l f_1} \quad (10)$$

当式(5)等号成立时是临界状态,结合式(7),(10)可以求出  $n$  的值。

#### 4 工程应用

1101 工作面为司马矿首采工作面,工作面开采 3 号煤层,均厚 6.6 m,倾角平均为  $4^\circ$ ,工作面走向长 160 m,倾斜长 995 ~ 975 m。钻探资料显示,在首采区及其附近,有 5 个基岩厚度小于 40 m 的钻孔,岩性

力;  $\beta$  为块体滑移面与水平方向夹角。

同理,将第 2 至  $n$  块块体作为一个整体分析,可得

$$\begin{cases} T_n = - (n - 1) ql \sin \beta + T_1 \\ F_n = (n - 1) ql \cos \beta + F_1 \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可看出,  $T_n < T_1$ ,  $F_n > F_1$ ,第  $n$  块上侧面所受滑动力  $F_n$  最大,水平力  $T_n$  最小,故此面为最先失稳面。结构整体保证稳定的条件为

$$F_n \leq f_n T_n \quad (5)$$

其中,  $f_n$  为第  $n$  个块体右侧接触面的摩擦因数。

根据 Barton 和 Choubey 提出的结构面的抗剪强度公式:

$$\tau = \sigma_n \tan \left( J_{RC} \lg \frac{J_{CS}}{\sigma_n} + \varphi_b \right) \quad (6)$$

得出

$$f_n = \tan \left( J_{RC} \lg \frac{J_{CS}}{\sigma_n} + \varphi_b \right) \quad (7)$$

其中,  $J_{RC}$  为结构面粗糙度系数;  $J_{CS}$  为结构面的抗压强度;  $\sigma_n$  为水平应力,等于水平推力  $T_n$  与接触面积  $A$  的比值;  $\varphi_b$  为岩石的残余摩擦角,同类岩石时为常数。

为进一步求出  $n$  的值,继续对第 2 至  $n$  块块体的整体进行力矩分析。

$$T_n \left( H - \frac{ns}{\cos \beta} \right) + F_n n l - n ql \frac{l \cos \beta + H \sin \beta}{2} - ql (l \cos \beta - \tan \beta) \sum_{i=1}^n i = 0 \quad (8)$$

其中,  $ns = h - n l \sin \beta$ 。

又已知:

$$F_1 = f_1 T_1 \quad (9)$$

由式(4),(8),(9)可得

基本为半坚硬岩层,直接顶厚度平均为 15.6 m,直接顶类型为 II 型,如图 9 所示。

1101 工作面采用倾斜长壁后退式综合机械化低位放顶煤一次采全高全部垮落采煤法,采高 3 m,放煤高度 3.6 m。工作面基本支架型号为 ZFS6200 - 17/33,共 109 架。

为了验证薄基岩直接顶中存在“半拱”平衡结构,沿着工作面布置了 3 个测站,进行矿压监测工作,

平均厚度/m	柱状	岩性	岩性描述
180.15		黄土	
		泥岩	黄色, 风化带, 局部土黄色, 断口不平整
10.85		中粒砂岩	灰黄色, 石英为主, 长石次之, 局部为水锈色, 质较硬
3.00		泥岩	黑色, 局部夹有煤粉, 夹植物化石, 断口较平整
15.60		3 煤	黑色, 半亮型
6.50		泥岩	黑色, 薄层状, 泥质结构
2.50		细粒砂岩	灰色, 薄层状, 石英为主, 长石次之, 裂隙发育
1.50			

图9 地层综合柱状图

Fig. 9 The comprehensive stratigraphic column

图10为中部测点支架工作阻力的变化情况,表4反映的是整个工作面的周期来压情况。可以看出,工作面初次来压步距平均为27.7m,周期来压步距为11.2~13.9m,来压时动载系数为1.10~1.30,有一定的来压显现情况,但不明显,反映了直接顶“半拱”

表4 1101工作面分区段顶板周期来压特征

Table 4 Periodic weighting characteristics in different sections of 1101 panel

来压序号	上部			中部			下部					
	来压步距/m	支架载荷/MPa		来压步距/m	支架载荷/MPa		来压步距/m	支架载荷/MPa				
		平时	来压		平时	来压		平时	来压			
1	13.9	25.13	32.67	1.30	13.1	17.21	21.00	1.22	12.4	17.65	21.00	1.19
2	11.8	19.54	21.50	1.10	11.5	21.67	26.00	1.20	11.2	18.26	22.83	1.25
3	12.8	22.76	23.67	1.04	12.8	12.23	13.33	1.09	12.8	25.07	30.33	1.21

(2) 根据直接顶厚度、岩性不同,将薄基岩综放采场直接顶划分为两种类型: I型和II型。I型直接顶时,会在远离煤层的软弱顶板中形成砌体梁结构,来压显现不明显;II型直接顶自身会形成“半拱”结构,其失稳破断将会引起工作面周期性来压。

(3) 初步建立了“半拱”结构力学模型,研究了平衡结构的力学机理,指出了“半拱”失稳的危险面,并给出了判别条件。在“半拱”结构作用下,薄基岩综放采场矿压表现为初次来压和周期来压步距小,动载系数小等特征,并通过现场观测得到了验证。

## 参考文献:

- [1] 古全忠,史元伟,齐庆新.放顶煤采场顶板运动规律的研究[J].煤炭学报,1996,21(1):45-50.  
Gu Quanzhong, Shi Yuanwei, Qi Qingxin. Rules of roof movement in sub-level caving workings[J]. Journal of China Coal Society, 1996,

结构的破断失稳步距为11.2~13.9m。

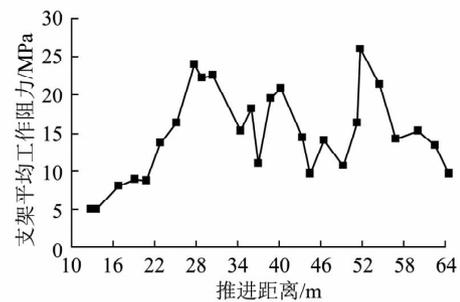


图10 工作面45号支架平均工作阻力与推进距离关系

Fig. 10 Average working resistance vs. advancing length of No. 45 support

## 5 结 论

(1) 分析了薄基岩综放采场条件下不同厚度直接顶的覆岩破断规律和采场矿压显现规律。采高为6.5m时,随着直接顶厚度加大,初次来压步距和支承压力随之降低;厚度增加至15m时,逐渐趋于一致。随着直接顶厚度加大,支架工作阻力不断增加。

21(1):45-50.

- [2] 赵经彻,陶廷云,刘先贵,等.关于综放开采的岩层运动和矿山压力控制问题[J].岩石力学与工程学报,1997,16(2):132-139.  
Zhao Jingche, Tao Tingyun, Liu Xiangui, et al. On movement of strata and strata pressure control in the fully mechanized mining with sub-level caving[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(2): 132-139.
- [3] 贾喜荣,翟英达,杨双锁.放顶煤工作面顶板岩层结构及顶板来压计算[J].煤炭学报,1998,23(4):366-370.  
Jia Xirong, Zhai Yingda, Yang Shuangsoo. Structure of roof rocks in sub-level caving face and calculation of roof weighting[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(4): 366-370.
- [4] 靳钟铭,魏锦平,靳文学.放顶煤采场前支承压分布特征[J].太原理工大学学报,2001,32(3):216-218.  
Jin Zhongming, Wei Jinping, Jin Wenxue. Distributive characteristic of front abutment pressure in top-coal caving face[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2001, 32(3): 216-218.

- [5] 范世民,胡学军. 放顶煤开采顶煤冒放性分类及其在潞安矿区的应用 [J]. 煤炭学报,2005,30(2):177-181.  
Fan Shimin, Hu Xuejun. The classification of top coal cavability and its application in Lu'an coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(2):177-181.
- [6] 邵小平,石平五,贺桂成. 急斜放顶煤开采顶板卸载拱结构分析 [J]. 北京科技大学学报,2007,29(5):447-451.  
Shao Xiaoping, Shi Pingwu, He Guicheng. Analysis on unloaded arch structure of roof in mining steep seams using section top-coal caving [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(5):447-451.
- [7] 陆明心,郝海金,吴 健. 综放开采上位岩层的平衡结构及其对采场矿压显现的影响 [J]. 煤炭学报,2002,27(6):591-595.  
Lu Mingxin, Hao Haijin, Wu Jian. The balance structure of main roof and its action to top coal in longwall top coal caving workface [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(6):591-595.
- [8] 侯树宏,柴 敬,邱 标. 综放开采沿工作面倾向顶板垮落规律 [J]. 西安科技大学学报,2009,29(3):266-269.  
Hou Shuhong, Chai Jing, Qiu Biao. Roof breaking law along top-coal caving face [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(3):266-269.
- [9] 毛德兵,姚建国. 大采高综放开采适应性研究 [J]. 煤炭学报,2010,35(11):1837-1841.  
Mao Debing, Yao Jianguo. Adaptability of longwall top coal caving with high cutting height [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11):1837-1841.
- [10] 张顶立,王悦汉. 综采放顶煤工作面岩层结构分析 [J]. 中国矿业大学学报,1998,27(4):340-343.  
Zhang Dingli, Wang Yuehan. Analysis of strata structure in fully-mechanized sub-level caving faces [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1998, 27(4):340-343.
- [11] 杨淑华,姜福兴. 综采放顶煤支架受力与顶板结构的关系探讨 [J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(3):287-290.  
Yang Shuhua, Jiang Fuxing. Research of the relationship between sublevel caving support load and roof structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(3):287-290.
- [12] 李红涛,刘长友,汪理全. 上位直接顶“散体拱”结构的形成于失稳演化 [J]. 煤炭学报,2008,33(4):378-381.  
Li Hongtao, Liu Changyou, Wang Liqun. Generating and destabilization evolutionary of granular arch structure of upper immediate roof [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(4):378-381.
- [13] 高峰,钱鸣高,缪协兴. 基本顶给定变形下直接顶受力变形分析 [J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(2):145-148.  
Gao Feng, Qian Minggao, Miao Xiexing. Mechanical analysis of the immediate roof subjected to given deformation of the main roof [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2):145-148.
- [14] 刘锦荣. 特厚煤层综放采场直接顶关键层及支架适应性 [J]. 煤炭科学技术,2009,37(6):1-8.  
Liu Jinrong. Key layer of direct roof and support suitability of fully mechanized top coal caving mining face in ultra thick seam [J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(6):1-8.
- [15] 刘长友,钱鸣高,曹胜根,等. 采场直接顶的结构力学特性及其刚度 [J]. 中国矿业大学学报,1997,26(2):20-23.  
Liu Changyou, Qian Minggao, Cao Shenggen, et al. Structural mechanics characteristics and stiffness of immediate roof for coal faces [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1997, 26(2):20-23.
- [16] 陈忠辉,冯竟竟,肖彩彩,等. 浅埋深厚煤层综放开采顶板断裂力学模型 [J]. 煤炭学报,2007,32(5):449-452.  
Chen Zhonghui, Feng Jingjing, Xiao Caicai, et al. Fracture mechanical model of key roof for fully-mechanized top-coal caving in shallow thick coalseam [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(5):449-452.