

侯运炳,何尚森,周殿奇,等. 特厚煤层大采高综放工作面覆岩结构及支架工作阻力研究[J]. 矿业科学学报,2017, 2(1):42-48.  
Hou Yunbing, He Shangsen, Zhou Dianqi, et al. Analysis of overburden structure and support working resistance of working face in fully-mechanized top coal caving with large mining height in ultra thick coal seam[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2017, 2(1):42-48.

## 特厚煤层大采高综放工作面覆岩 结构及支架工作阻力研究

侯运炳,何尚森,周殿奇,韩帅,周玉

中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院,北京 100083

**摘要:**为了掌握特厚煤层大采高综放工作面的覆岩结构及支架合理工作阻力,以同忻煤矿8107工作面为研究对象,采用理论分析、现场观测的方法对特厚煤层大采高综放工作面覆岩的破断和组合形式进行了研究,建立了覆岩力学模型,得出了同忻煤矿8107工作面支架工作阻力计算式。结果表明:正常开采期间,大采高综放工作面直接顶易形成具有整体性的倒台阶组合悬臂梁结构,悬臂梁结构的破断、回转是支架—围岩互馈过程中的主要压力来源;来压期间,高位砌体梁结构与低位悬臂梁结构耦合形成“砌体梁—悬臂梁”结构,砌体梁结构的滑落失稳引起悬臂梁结构的协同回转,是大采高综放工作面强冲击来压的原因;实测8107工作面正常回采以及来压时支架工作阻力分别为26 MPa(9 750 kN)和40 MPa(15 000 kN),与理论计算结果较为吻合;8107工作面采用的ZF15000/27.5/42型四柱低位放顶煤支架能够满足生产需求。

**关键词:**特厚煤层;大采高综放;覆岩结构;来压机理;支架工作阻力

中图分类号:TD 323

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2017)02-42-7

## Analysis of overburden structure and support working resistance of working face in fully-mechanized top coal caving with large mining height in ultra thick coal seam

Hou Yunbing, He Shangsen, Zhou Dianqi, Han Shuai, Zhou Yu

College of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

**Abstract:** In order to grasp the overburden structure and support working resistance of working face in fully-mechanized top coal caving with large mining height in ultra thick coal seam, this paper study the ultra thick coal seam in Tongxin coal mine. The fracture and combining form of the overburden strata in working face was researched using the methods of theoretical analysis and in-situ observation, and the mechanical model of overburden strata was also established, then the formula of support working resistance in 8107 working face was obtained. The results show that: In the period of normal mining, the immediate roof in working face of full-mechanized top coal caving with large height can easily form “re-

收稿日期:2016-06-19

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2011YZ02)

作者简介:侯运炳(1962—),男,陕西安康人,教授,博士生导师,主要从事资源开发与规划、资源开采新技术、充填采矿技术、数字矿山、矿区循环经济、矿业系统工程、矿物材料等方面的研究和教学工作。Tel:010-62339039, E-mail:houyunbing2000@163.com

通信作者:何尚森(1987—),男,河南灵宝人,博士研究生,主要从事矿山压力与岩层控制方面的研究。Tel:18810538290, E-mail:hsscumb@126.com

verse step combination cantilever beam” which was a global body and the fracture and rotary of the “cantilever beams” was the main source of pressure in the mutual feedback between the support and the surrounding rock. In the period of periodic weighting the up “masonry beam” and the down “cantilever beams” coupled with each other and formed new structure called “masonry beam - cantilever beam”, and the sliding instability of masonry beam resulted in the rotary of the “cantilever beams” which was the reason that the intensive impact pressure appeared in working face in fully-mechanized top coal caving with large mining height. The actual measurement of support working resistance in 8107 working face were respectively 26 MPa(9 750 kN) in normal mining period and 40 MPa(15 000 kN) in periodic weighting period, which tallied with the theoretical calculation results. The ZF15000/27.5/42 four bars low caving coal hydraulic support in 8107 working face can meet the production requirements.

**Key words:** ultra thick seam; fully-mechanized top coal caving with large mining height; overburden structure; mechanism of pressure in working face; support working resistance

随着经济技术和装备水平的发展,我国成功研制出具有超高工作阻力的大采高综放液压支架以及相关配套设备<sup>[1-2]</sup>,针对厚度 14~20 m 的特厚煤层开采,创造性地将大采高开采技术和综放开采技术有机结合,既避免了单一大采高开采支架高度限制、煤壁片帮严重、适应范围小的缺点,也避免了分层开采巷道掘进率高、工序复杂、工作面单产较低的缺点,形成了具有我国特色的大采高综放开采技术<sup>[3-4]</sup>。近年来,大采高综放开采技术发展迅速,已经成为条件适宜矿井发展高产高效工作面的有效途径。例如,大同<sup>[4-5]</sup>、平朔<sup>[6]</sup>、新汶<sup>[7]</sup>、鄂尔多斯<sup>[3]</sup>等矿区均已成功实施特厚煤层的大采高综放开采。然而,由于特厚煤层开采空间大,顶板不稳定岩层扩展增厚,顶板活动较普通综放开采剧烈,引起顶板能量突然释放、传递、转移等动力学过程,造成工作面矿压显现强烈并且伴有一定的冲击性<sup>[3,8]</sup>,部分工作面因支护阻力不足甚至出现大面积切顶压架现象<sup>[9-10]</sup>。对特厚煤层大采高综放工作面,现有综放开采的顶板控制理论已不完全适用于生产开采实践,因此,如何确定大采高综放工作面的覆岩结构以及合理的支架工作阻力成为当前研究的热点。

本文在前人研究的基础上,针对同忻煤矿 3—5 号特厚煤层开采,通过理论分析给出了支架工作阻力计算式,现场矿压观测表明,8107 工作面采用的 ZF15000/27.5/42 型低位放顶煤支架能够满足支护的要求。

### 1 工程概况

同忻煤矿位于大同市西南约 20 km,大同煤田北东部,设计可采储量为 847.91 Mt,设计规模 10 Mt/a。8107 工作面位于矿井北一盘区,现主采

石炭系 3—5 号煤,煤层厚度 12.79~19.55 m,平均 16.85 m,总体上厚度变化较小,层位稳定,在东南部赋存较厚,往北逐渐变薄,在北部尖灭。煤层倾角为 3°~10°,煤层埋深平均 447 m,工作面长度为 200 m,采用 ZF15000/27.5/42 型四柱低位放顶煤支架,采高 3.9 m,放煤 11.4 m,采放比约为 1:2.9,直接顶为砂岩,具水平层理,夹有煤屑,直接底为细砂岩,深灰色,半坚硬。煤岩综合柱状图如图 1 所示。

岩石名称	厚度/m	岩性柱状	岩性描述
细砂岩	10.72		深灰色, 断口贝壳状, 半坚硬
泥岩	3.34		黑灰色, 碎块状, 质疏松易碎
细砂岩	4.26		深灰色, 断口贝壳状, 半坚硬
砂质泥岩	4.50		深灰色, 断口平坦状, 松软
砂砾岩	13.53		灰色, 砂质以石英为主
泥岩	3.74		黑灰色, 碎块状, 含少量粉砂岩
中砂岩	4.10		灰白色, 钙质胶结, 可见绿色矿物
砂砾岩	3.98		灰色, 砂质以石英为主
泥岩	3.54		黑灰色, 碎块状, 质疏松易碎
中砂岩	3.40		灰白色, 钙质胶结, 可见绿色矿物
粉砂岩	4.62		深灰色, 断口贝壳状, 半坚硬
粗砂岩	3.86		灰色, 厚层状, 坚硬
细砂岩	4.15		深灰色, 断口贝壳状, 半坚硬
粉砂岩	3.65		深灰色, 断口贝壳状, 半坚硬
3—5号煤	16.85		以半亮型为主, 半暗型煤次之
细砂岩	2.53		深灰色, 断口贝壳状, 半坚硬
中砂岩	5.64		灰白色, 钙质胶结, 分选好

图 1 同忻煤矿煤岩综合柱状图  
Fig. 1 Synthesis column map of Tongxin coal mine

## 2 大采高综放采场覆岩结构分析

### 2.1 大采高综放采场覆岩结构特点及来压机理

由于一次采出高度大幅增加,大采高综放工作面的覆岩垮落空间增大,基本顶在更高的层位形成,部分在小采高工作面能够作为主要承载层的基本顶岩层转变为大采高工作面的直接顶<sup>[3]</sup>,因此大采高工作面的直接顶层数更多、厚度更大、需控岩层的范围更大<sup>[11]</sup>。随着工作面的推进,直接顶首先发生断裂,由于同忻煤矿顶板岩层多数为砂岩,岩性坚硬不易垮落,因此直接顶断裂后并不会立即垮落成为矸石并充满采空区。缺少矸石充填的采空区在直接顶后方形形成空隙,造成直接顶岩层水平力传递间断,直接顶因而容易形成具有整体性的“倒台阶”组合“悬臂梁”结构<sup>[3, 11-12]</sup>,如图2(a)所示。

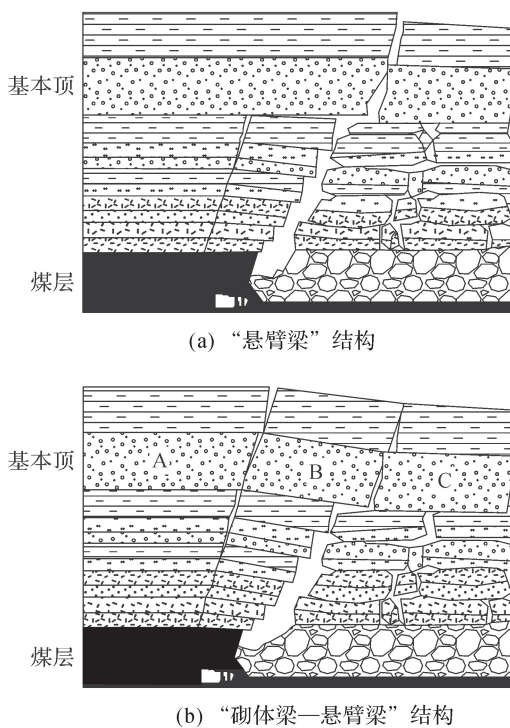


图2 大采高综放采场覆岩结构

Fig.2 Overburden structure in working face in fully-mechanized top coal caving with large mining height

随着工作面的继续推进,“悬臂梁”结构回转并压缩顶煤,顶煤在压力作用下孔隙逐渐闭合直至完全密实,密实的顶煤转变成“似刚性体”<sup>[11]</sup>并将“悬臂梁”的压力传递至支架,支架受压支撑,所产生的支撑力与顶板压力构成平衡力系,这一过程即为正常开采期间“支架—围岩”的互馈过程。当工作面推进至基本顶来压步距时,位于“悬臂梁”上

方的基本顶断裂成“关键块”A、B、C,并在回转过程中相互咬合形成“砌体梁”结构<sup>[13]</sup>。随着“砌体梁”结构的运动和调整,“关键块”将与下方的“悬臂梁”结构接触、耦合并形成“砌体梁—悬臂梁”结构,如图2(b)所示。若此时支架无法提供足够的支撑力,“关键块”将进一步下沉回转同时迫使“悬臂梁”协同回转,当达到“砌体梁”结构的滑落失稳条件时,“关键块”滑落并与“悬臂梁”同时作用于支架,工作面强烈来压,甚至产生冲击作用。此过程即为工作面来压期间的“支架—围岩”互馈过程。

由以上分析可以看出,大采高综放工作面的支架压力主要来源于两个方面,一是“悬臂梁”结构断裂回转的压力;二是“砌体梁”结构滑落失稳的压力。因此,欲得到支架合理工作阻力需要对以上两部分结构进行力学分析。

### 2.2 “悬臂梁”结构作用力分析

“悬臂梁”的力学模型如图3所示。

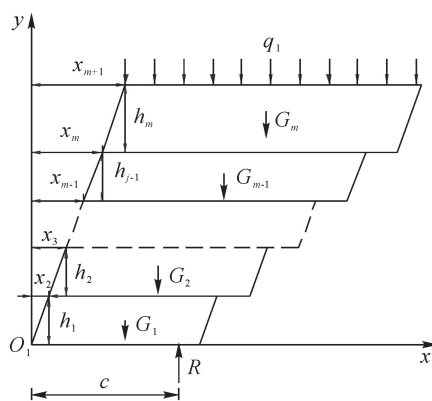


图3 “悬臂梁”力学模型

Fig.3 Mechanical model of “cantilever beams”

由力矩平衡条件  $\sum M_{O_1} = 0$  可得

$$R = \frac{q_1 l_m}{c} \left( \frac{l_m}{2} + x_m \right) + \sum_{i=1}^m \frac{G_i}{c} \left[ \frac{1}{2} (l_i + h_i \cot \alpha) + x_i \right] \quad (1)$$

式中, $R$ 为直接顶与顶煤之间的作用力,N; $c$ 为支架合力作用点到煤壁距离,m; $\alpha$ 为岩块的断裂角, $(^\circ)$ ; $q_1$ 为基本顶对直接顶的载荷,MPa; $G_i$ 为第*i*块直接顶岩块重力,N; $l_i$ 为第*i*块直接顶岩块长度,m; $h_i$ 为第*i*块直接顶岩块高度,m; $x_i$ 为第*i*块直接顶岩块角点到煤壁最短距离,m; $m$ 为组成“悬臂梁”岩块的数量。

式(1)等号右边第一项为“砌体梁”结构滑落失稳时对顶煤的力矩作用,当工作面正常开采时

$q_1 = 0$ , 式(1)等号右边只有第二项, 此项即为“悬臂梁”单独作用时对顶煤的力矩作用。根据式(1)可以得出“悬臂梁”结构对顶煤的作用力  $R$ 。

### 2.3 “砌体梁”结构作用力分析

“砌体梁”的力学模型如图4所示<sup>[13]</sup>。由图4可知, 组成基本顶“砌体梁”的三个“关键块”A、B、C的上下表面都受到相邻岩层挤压载荷作用, 其中关键块B的下表面与“悬臂梁”接触, 受到“悬臂梁”的支撑作用, 上表面受到上覆岩层的压力作用, 关键块A和C分别由实体煤和采空区矸石支撑。

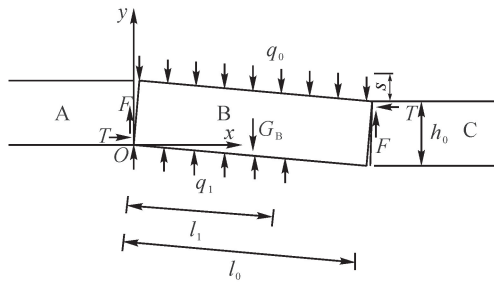


图4 “砌体梁”力学模型

Fig.4 Mechanical model of “masonry beam”

对关键块B进行受力分析, 由平衡条件

$$\sum M_O = 0, \sum F_y = 0 \text{ 可得}$$

$$\begin{cases} q_1 l_1^2 = \frac{(G_B - 2F)d_1 + 2q_0 l_0 d_2 - 2T(h_0 - s)}{\cos\beta} \\ q_0 l_0 + G_B = q_1 l_1 + 2F \\ d_1 = \left[ l_0 \cos\beta + h_0 \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\sin\alpha} \right] \\ d_2 = \left[ \frac{1}{2} l_0 \cos\beta + h_0 \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\sin\alpha} \right] \\ s \approx l_0 \sin\beta \\ F = Tf \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $l_1$  为基本顶与直接顶接触长度, m;  $G_B$  为基本顶关键块B重力, N;  $l_0$  为基本顶岩块周期断裂长度, m;  $h_0$  为基本顶岩块高度, m;  $\beta$  为基本顶岩块回转角, ( $^\circ$ );  $q_0$  为基本顶上覆载荷, MPa;  $s$  为关键块B的下沉量, m;  $T$  为关键块之间的水平挤压力, N;  $F$  为关键块之间的摩擦力, N;  $f$  为基本顶岩块之间摩擦系数;  $d_1$  为  $F$  到  $O$  点的力臂, m;  $d_2$  为集中载荷  $q_0$  的合力到  $O$  点的力臂, m。

根据式(2)得出  $q_1$  的计算式:

$$q_1 = \frac{q_0 l_0 d_1 f - 2q_0 l_0 d_2 f + (h_0 - s)(q_0 l_0 + G_B)}{l_1 d_1 f - l_1^2 \cos\beta f + l_1 (h_0 - s)} \quad (3)$$

根据式(3)可以得到“砌体梁”滑落失稳时对“悬臂梁”产生的压力作用。将  $q_1$  代入式(2), 最终可以得到基本顶来压时施加于顶煤的压力。

### 2.4 支架工作阻力分析

基于以上分析以及图2可知, 大采高综放工作面的支架除了要提供支撑正常回采期间低位“悬臂梁”结构回转的阻力, 以及来压期间高位“砌体梁”结构滑落失稳的阻力外, 还需要对顶煤提供一定的支撑阻力。此支撑力按照单一支架控顶范围内的顶煤重量计算, 则支架工作阻力  $p$  的计算公式为<sup>[3]</sup>

$$p = B l_d h_d \gamma + R \quad (4)$$

式中,  $R$  为直接顶与顶煤之间的作用力, N;  $B$  为支架中心距, m;  $l_d$  为支架控顶距, m;  $h_d$  为顶煤厚度, m;  $\gamma$  为顶煤容重,  $\text{kN/m}^3$ 。

## 3 大采高综放工作面支架工作阻力计算

以同忻煤矿8107工作面为例, 在计算支架工作阻力之前需要先确定基本顶“关键块”的断裂长度、“悬臂梁”的组合情况及断裂长度等基本参数。

### 3.1 基本顶层位及基本顶载荷

根据岩层控制的关键层理论可知, 基本顶是对采场矿压显现产生影响的下位亚关键层, 而关键层的判别可用式(5)进行计算<sup>[13]</sup>:

$$q_{n+1} < q_n \quad (5)$$

$$q_n = \frac{E_1 h_1^3 (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \dots + \gamma_n h_n)}{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3 + \dots + E_n h_n^3} \quad (6)$$

式中,  $q_{n+1}, q_n$  分别为计算到第  $n+1$  与第  $n$  层时第一层岩层所承载荷。

同忻煤矿的基本顶岩层载荷计算图如图5所示。

经计算, 位于距煤层顶板35.04 m的砂砾岩层属第4亚关键层, 其厚度和强度都显著大于其下方的3个低位亚关键层, 此岩层断裂后必然会明显影响工作面的矿压显现, 因此, 将此岩层作为同忻煤矿8107大采高综放工作面的基本顶。

根据式(6)计算可知, 3—5号煤层基本顶岩层只应考虑第1、2、3、4岩层对第1岩层载荷的影响, 第5岩层由于厚度和强度较大, 不会将载荷传递至基本顶, 经计算基本顶岩层所承载荷为604.21 kPa。

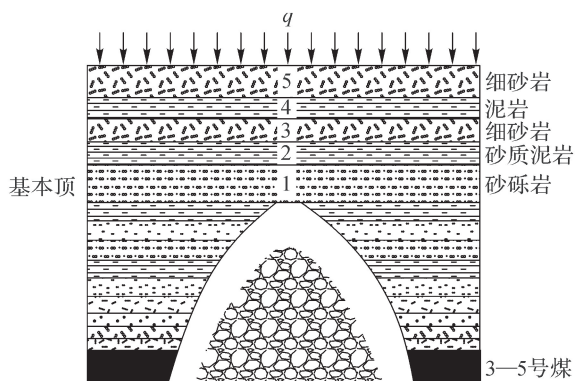


图5 基本顶岩层载荷计算图

Fig.5 Load analysis of main roof strata

### 3.2 基本顶断裂步距计算

基本顶岩层初次断裂前可将其视为两端固支的梁结构,在基本顶初次断裂后,随工作面继续推进,其岩层结构将经历“失稳—稳定—再失稳”的过程,即基本顶岩层的周期性破断,在工作面上表现为周期来压。初次破断之后,基本顶岩梁处于一端固支、另一端由断裂关键块支撑,周期断裂步距近似为初次断裂步距的一半,因此建立基本顶初次断裂的固支梁模型如图6所示。

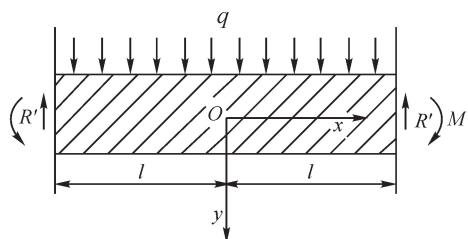


图6 基本顶固支梁初次断裂受力分析

Fig.6 Force analysis of main roof clamped-clamped beam

材料力学一般研究长度远大于高度和宽度的杆状构件,而弹性力学可以求解厚梁、板等实体结构,且求解过程中较材料力学少了一些形变状态和应力分布的假定,得到的结果更为准确。对图6的固支梁模型进行受力分析,得到岩梁的水平应力 $\sigma_x$ 计算公式<sup>[14]</sup>:

$$\sigma_x = \frac{2q}{h^3}(l^2 - 3x^2)y + \frac{4q}{h^3}y^3 - \frac{3(2 + \mu)}{2h}y - \frac{\mu q}{2} \quad (7)$$

式中, $\mu$ 为基本顶岩梁的泊松比。

取 $q = 0.6 \text{ MPa}$ ,  $h = 13 \text{ m}$ ,  $l = 15 \text{ m}$ ,  $\mu = 0.3$ ,利用式(7)绘制固支梁的水平应力云图,如图7所示。

由图7可以看出,均布载荷作用下固支梁的四

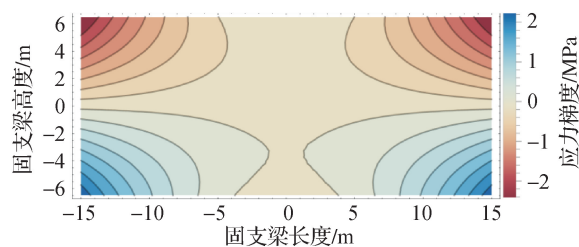


图7 基本顶固支梁水平应力云图

Fig.7 Stress nephogram of main roof clamped-clamped beam

角出现应力集中,应力最大值超过 $3q$ ,最大拉应力出现在 $(\pm 15, 6.5)$ 处,因此当应力超过岩梁的极限抗拉强度时,固支岩梁首先在两端发生断裂,之后转变为简支岩梁。根据岩石材料的最大拉应力强度准则可得到基本顶的初次断裂步距,将 $(\pm l, h)$ 代入式(7)可以推导出基本顶的周期断裂步距,计算式如下:

$$l_0 = \frac{\sqrt{2}}{2}h_0 \sqrt{\frac{\sigma_t}{q} - \frac{4 + \mu}{4}} \quad (8)$$

式中, $\sigma_t$ 为基本顶岩梁的极限抗拉强度,MPa。

根据8107工作面岩石物理力学试验的测试结果,取基本顶岩层的极限抗拉强度 $\sigma_t = 4.75 \text{ MPa}$ ,并将其他参数代入式(8)计算可得,8107工作面基本顶的初次断裂步距为48 m,周期断裂步距为24 m。

### 3.3 悬臂梁断裂长度计算

由图1可知,8107工作面的直接顶可分为3层组合悬臂梁,由顶煤开始向上由小到大对岩层编号,共有9层岩层,第1到第3层均为砂岩,厚度接近且小于第4层砂岩的厚度,因此前3层为第1层组合悬臂梁;第6层为泥岩,可将其作为组合梁的分界层,因此第4、5、6岩层为第2层组合悬臂梁;同理第7到9岩层为第3层组合悬臂梁。悬臂梁的长度可用下式进行计算<sup>[3]</sup>:

$$l_i = h_i \sqrt{\frac{R_{Ti}}{3q_i}} \quad (9)$$

根据式(9)计算可得,第1层组合悬臂梁的断裂长度为14 m,第2层的为18 m,第3层的为23 m。因此,8107综放工作面形成的组合“悬臂梁”结构如图8所示。

### 3.4 同忻煤矿支架工作阻力计算

根据支架的结构力学特征可知,四柱放顶煤支架的合力作用点大致位于前、后两排立柱之间的中心点处<sup>[15]</sup>,因此,由同忻煤矿的支架尺寸参数可知,支架合力作用点距煤壁的距离4.2 m,支架控

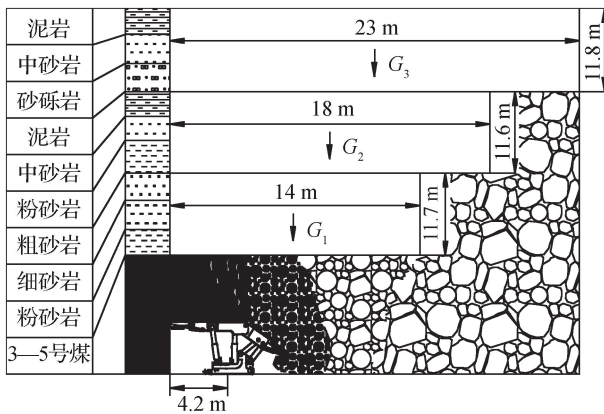


图8 同忻煤矿8107工作面组合“悬臂梁”结构

Fig. 8 The “combination cantilever beam” structure in 8107 working face of Tongxin coal mine

顶距5.3 m, 支架中心距1.75 m, 顶煤厚度11.4 m, 顶煤容重为 $13 \text{ kN/m}^3$ , 顶板岩层断裂角 $65^\circ$ ,  $j$ 取3, 联立式(1)和式(4)可得, 8107工作面正常回采时的支架工作阻力为

$$P_{\text{正常}} = 1\ 375 + 9\ 263 = 10\ 638 \text{ kN}$$

同理, 工作面来压时的支架工作阻力为

$$P_{\text{来压}} = 10\ 638 + 4\ 251 = 14\ 889 \text{ kN}$$

#### 4 现场矿压观测

8107工作面共布置110架中间支架, 分别在9号、39号、59号、79号、99号、109号支架处设置综采支架记录仪, 每隔5 min进行一次数据采集, 对8107工作面推进120 m过程中的矿压数据进行采集, 共采集数据51 390个, 对数据进行筛选并以循环末阻力进行分析。分析结果表明, 沿工作面倾向支架工作阻力呈现“两端小、中间大”的分布特征, 越靠近工作面中部, 支架工作阻力越大, 以59号支架为例, 其工作阻力在工作面推进过程中的变化特征如图9所示。

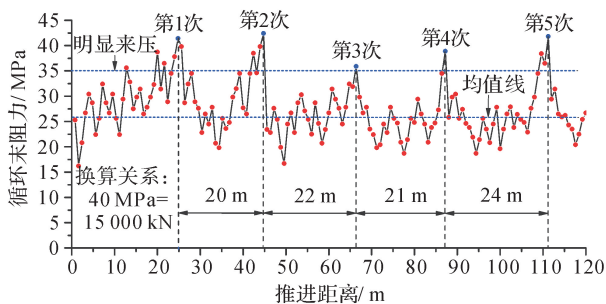


图9 支架工作阻力随推进距离变化曲线

Fig. 9 The changing curve of support working resistance with advance distance

由图9可知, 在工作面推进120 m的过程中,

共有5次明显来压, 平均周期来压步距22 m, 略小于理论计算值, 可能是由于基本顶岩层内存在节理裂隙, 造成岩层抗拉强度降低、基本顶岩层提前断裂。5次周期来压时, 支架的最大液压强度均在40 MPa附近, 根据支架工作阻力的换算关系, 来压时支架的工作阻力达到15 000 kN, 与理论计算值较为接近。正常回采时支架平均液压强度为26 MPa, 换算后为9 750 kN, 略小于理论计算值。5次周期来压平均动载系数为1.4, 工作面来压时表现出比较强烈的冲击性。

总体来看, 同忻煤矿8107工作面当前使用的ZF15000/27.5/42型四柱低位放顶煤支架能够满足生产需求, 支架工作阻力的理论计算值也与实际开采过程中的支架工作阻力较为吻合。

#### 5 结论

(1) 大采高综放工作面的直接顶容易形成厚度较大且具有整体性的“倒台阶”组合“悬臂梁”结构, “悬臂梁”结构的断裂、回转成为工作面正常回采期间“支架—围岩”互馈过程中的主要压力来源; 来压期间, 高位的“砌体梁”结构与低位的“悬臂梁”结构耦合形成“砌体梁—悬臂梁”结构, “砌体梁”结构的滑落失稳引起“悬臂梁”结构的协同回转, 是大采高综放工作面来压强度大且具有强冲击性的原因。

(2) 建立了直接顶“悬臂梁”力学模型, 分析了工作面正常开采与来压时“悬臂梁”对顶煤的载荷表达式, 并据此得到大采高综放工作面支架工作阻力计算式。

(3) 以同忻煤矿8107工作面为工程背景, 通过理论分析得到了基本顶的层位、周期断裂长度, 以及“悬臂梁”结构的组合特点和断裂长度, 最终得到8107工作面正常开采和来压期间支架所需的工作阻力, 分别为10 638 kN和14 889 kN。

(4) 现场矿压观测表明: 8107工作面正常回采期间支架末阻力平均为9 750 kN, 略小于理论计算值; 周期来压时支架最大末阻力为15 000 kN, 与理论计算值较为吻合; 同时也表明, 8107工作面采用ZF15000/27.5/42型四柱低位放顶煤支架能够满足生产需求。

#### 参考文献

- [1] 王国法, 刘俊峰, 任怀伟. 大采高放顶煤液压支架围岩耦合三维动态优化设计[J]. 煤炭学报, 2011,

- 36(1):145-151.  
Wang Guofa, Liu Junfeng, Ren Huaiwei. Design and optimization of high seam-caving coal hydraulic support based on model of support and wall rock coupling[J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(1):145-151.
- [2] 苏林军. 大采高综放液压支架的设计研究[J]. 煤矿开采, 2010,15(3):77-79.  
Su Linjun. Design of full-mechanized caving powered support with large mining height[J]. Coal Mining Technology, 2010,15(3):77-79.
- [3] 李化敏, 蒋东杰, 李东印. 特厚煤层大采高综放工作面矿压及顶板破断特征[J]. 煤炭学报, 2014,39(10):1956-1960.  
Li Huamin, Jiang Dongjie, Li Dongyin. Analysis of ground pressure and roof movement in fully-mechanized top coal caving with large mining height in ultra-thick seam[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10):1956-1960.
- [4] 王金华. 特厚煤层大采高综放开采关键技术[J]. 煤炭学报, 2013,38(12):2089-2098.  
Wang Jinhua. Key technology for fully-mechanized top coal caving with large mining height in extra-thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(12):2089-2098.
- [5] 张有喜. 塔山矿特厚煤层综放开采的实践及展望[J]. 中国矿业, 2011,20(9):72-75.  
Zhang Youxi. Practice and prospect of fully mechanized top coal caving mining in ultra thick seam of Tashan mine [J]. China Mining Magazine, 2011, 20(9):72-75.
- [6] 王金君, 林媛媛, 殷卫峰. 浅析大采高综放开采技术与应用现状[J]. 煤矿开采, 2013,18(6):1-4,56.  
Wang Jinjun, Lin Yuanyuan, Yin Weifeng. Current situation of full-mechanized top-coal caving mining technology and its application[J]. Coal Mining Technology, 2013,18(6):1-4,56.
- [7] 查文华, 华心祝, 王家臣, 等. 深埋特厚煤层大采高综放工作面覆岩运动规律及支架选型研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014,10(8):75-80.  
Cha Wenhua, Hua Xinzhu, Wang Jiachen, et al. Study on strata movement rules and hydraulic support selection for fully-mechanized working face with large mining height of extra thick coal seam in deep well[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014,10(8):75-80.
- [8] 刘长友, 杨敬轩, 于斌, 等. 覆岩多层坚硬顶板条件下特厚煤层综放工作面支架阻力确定[J]. 采矿与安全工程学报, 2015,32(1):7-13.  
Liu Changyou, Yang Jingxuan, Yu Bin, et al. Support resistance determination of fully mechanized top-coal caving face in extra thick seam under multi-layered hard strata[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015,32(1):7-13.
- [9] 闫少宏, 徐刚, 张学亮, 等. 特厚煤层综放工作面大面积切顶压架原因分析[J]. 煤炭科学技术, 2015,43(6):14-18,140.  
Yan Shaohong, Xu Gang, Zhang Xueliang, et al. Reason analyses on large area roof cutting and collapse of hydraulic supports at fully-mechanized top coal caving mining face in ultra thick coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2015,43(6):14-18,140.
- [10] 马立强, 张东升, 孙广京, 等. 厚冲积层下大采高综放工作面顶板控制机理与实践[J]. 煤炭学报, 2013,38(2):199-203.  
Ma Liqiang, Zhang Dongsheng, Sun Guangjin, et al. Thick alluvium full-mechanized caving mining with large mining height face roof control mechanism and practice[J]. Journal of China Coal Society, 2013,38(2):199-203.
- [11] 于雷, 闫少宏, 刘全明. 特厚煤层综放开采支架工作阻力的确定[J]. 煤炭学报, 2012,37(5):737-742.  
Yu Lei, Yan Shaohong, Liu Quanming. Determination of support working resistance of top coal caving in extra thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2012,37(5):737-742.
- [12] 闫少宏. 特厚煤层大采高综放开采支架外载的理论研究[J]. 煤炭学报, 2009,34(5):590-593.  
Yan Shaohong. Theory study on the load on support of long wall with top coal caving with great mining height in extra thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2009,34(5):590-593.
- [13] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003:78-79.
- [14] 樊友景, 高建华, 李大望. 均布荷载作用下两端固支梁的弹性力学解析解[J]. 河南科学, 2006,24(2):237-240.  
Fan Youjing, Gao Jianhua, Li Dawang. Analytical solution of the elastic mechanics for static indeterminate beams fixed at two sides under the even load[J]. Henan Science, 2006,24(2):237-240.
- [15] 于海湧, 于海波, 吴兆华. 四柱式与两柱式放顶煤支架适用条件分析[J]. 中国煤炭, 2011,37(9):59-63.  
Yu Haiyong, Yu Haibo, Wu Zhaohua. Suitable conditions for four-leg and two-leg sublevel caving shield supports[J]. China Coal, 2011,37(9):59-63.

(责任编辑:王晓玲)