



移动阅读

李志华,杨科,华心祝,等. 采场覆岩“宏观-大-小”结构及其失稳致灾机理[J]. 煤炭学报,2020,45(S2):541-550.

LI Zhihua, YANG Ke, HUA Xinzhu, et al. Disaster-causing mechanism of instability and “macroscopic-big-small” structures of overlying strata in longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 541-550.

## 采场覆岩“宏观-大-小”结构及其失稳致灾机理

李志华<sup>1,2</sup>, 杨科<sup>1,2</sup>, 华心祝<sup>1,2</sup>, 李迎富<sup>1,2</sup>, 刘钦节<sup>1,2</sup>

(1. 安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 能源与安全学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**针对薄基岩工作面易发生顶板整体切落压架事故问题,采用理论分析和数值模拟对一般工作面和薄基岩工作面采场覆岩结构失稳致灾机理进行对比研究。建立采场覆岩“宏观-大-小”结构力学模型,确定不同覆岩结构失稳支架临界工作阻力,分析了关键层上覆载荷对关键层破断形式和破断块体稳定性的影响,并通过 UDEC 数值模拟软件对典型工程地质条件下采场覆岩结构及应力场演化特征进行了模拟验证。研究表明:①一般工作面回采后,采场覆岩中会自下而上依次形成“支架-围岩”小结构、“砌体梁”大结构、“压力拱”宏观结构,小结构的稳定性取决于大结构的稳定性,而大结构的稳定性又取决于宏观结构的稳定性;②在宏观结构的保护作用下,关键层上覆载荷较小,关键层破断岩块容易形成“砌体梁”平衡结构,作用在支架上的力较小,工作面矿压显现缓和;③随着关键层上覆载荷增大,关键层破断步距减小,破断形式由弯拉破断转变为剪切破断;④当关键层破断岩块上覆载荷过大,大结构发生失稳,关键层自重及其上覆载荷经垮落带岩层作用在采场支架上,导致小结构失稳,发生压架事故;⑤薄基岩工作面采场覆岩中无法形成宏观结构,上覆岩层在承压含水层水压力及自重作用下沿煤壁发生全厚整体切落,易造成工作面压架事故;⑥一般厚层坚硬顶板工作面来压步距越大,矿压显现越剧烈,而薄基岩工作面来压步距小,矿压显现反而剧烈。

**关键词:**覆岩结构;关键层;薄基岩;压力拱;砌体梁;支架-围岩关系

中图分类号:TD325

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2020)S2-0541-10

### Disaster-causing mechanism of instability and “macroscopic-big-small” structures of overlying strata in longwall mining

LI Zhihua<sup>1,2</sup>, YANG Ke<sup>1,2</sup>, HUA Xinzhu<sup>1,2</sup>, LI Yingfu<sup>1,2</sup>, LIU Qinjie<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Safety and High-efficiency Coal Mining Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Mining and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** The powered support jam accidents due to the intact shear fall of all overlying strata occur easily in the longwall working face under thin bedrock. The theoretical analysis and numerical simulation were used to study the difference in the disaster-causing mechanism of overlying strata structure instability between in normal longwall working face and thin bedrock longwall working face. The mechanical model of “macroscopic-big-small” structure were established for overlying strata in longwall mining, the critical support working resistance was defined based on the stability analysis of different overlying strata structures, the impact of pressure above the key stratum on the breaking form and block

收稿日期:2020-03-13 修回日期:2020-04-20 责任编辑:钱小静 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2020.0406

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51604008)

作者简介:李志华(1981—),男,陕西汉中,副教授,博士。E-mail:lizhihua81@126.com

通讯作者:杨科(1979—),男,四川叙永,教授,博士。E-mail:yksp2003@163.com

stability of key stratum was analyzed, and the overlying strata structure and the evolution feature of the stress field were simulated by UDEC numerical simulation software. The results show that ① from bottom to top, the overlying strata are formed by “support and surrounding rocks” small structure, “voussoir beam” big structure and “pressure arch” macroscopic structure in longwall mining under normal working face, the stability of small structure is mainly determined by the stability of big structure, while the stability of big structure is mainly determined by the stability of macroscopic structure. ② The breaking block of key stratum is ease to form a “voussoir beam” balance structure due to the lower pressure on the key stratum under the protection of macroscopic structure, so that the support load is lower, and the strata behaviors is easing. ③ The breaking interval of key stratum decreases due to the increase of pressure on the key stratum, and the breaking form changes from shear breaking to flexural tensile breaking. ④ The big structure is in an unstable state due to the high pressure on the key stratum, which will lead to the small structure instability under a dead load of key stratum and pressure on the key stratum, so that the powered support jam accidents occur. ⑤ The macroscopic structure cannot be formed in overlying strata when mining below the thin bedrock, the intact shear fall of all overlying strata takes place due to the hydraulic pressure of unconsolidated confined aquifer and the weight of the overlying strata, which may induce powered support jammed accidents. ⑥ The longer the weighting step is, the stronger the strata behaviors for a normal working face with thick and hard roof, while the shorter the weighting step is, the stronger the strata behaviors for a thin bedrock working face.

**Key words:** overlying strata structure; key stratum; thin bedrock; pressure arch; voussoir beam; relation between support and surrounding rocks

长期以来,人们一直在讨论采场上覆岩层可能形成的结构。这主要是因为它直接涉及到采场岩层控制的基本问题,例如采场事故形成的原因、顶板压力的来源、采场支护原理及各项参数的确定等<sup>[1]</sup>。目前,为解释采场矿山压力现象而提出的假说及采场上覆岩层结构理论主要有以下几种:压力拱假说、悬臂梁假说、铰接岩块假说、预生裂隙梁假说、砌体梁理论、传递岩梁假说、关键层理论<sup>[2]</sup>。这些理论和假说已被广泛应用,并不断在实践中得到发展。

随着我国西部厚松散层浅埋煤层和东部松散承压含水层下薄基岩煤层在开采过程中相继发生的压架突水事故,我国学者对薄基岩工作面采场覆岩结构失稳机制进行了大量的研究,同时也进一步丰富和发展了采场矿压理论<sup>[3-4]</sup>。侯忠杰<sup>[5]</sup>根据浅埋煤层的特点,提出了覆岩全厚整体台阶切落的判断公式。黄庆享等<sup>[6]</sup>认为西部浅埋煤层厚松散砂土层在初采期间形成下方为“拱”,上方为“梁”的“拱梁”式破坏。许家林等<sup>[7-8]</sup>基于关键层理论,认为由于松散承压含水层的载荷传递作用,导致覆岩关键层易产生复合破断。王家臣等<sup>[9]</sup>对浅埋薄基岩工作面初次来压顶板切落压架机理进行了研究。方新秋等<sup>[10]</sup>认为厚表土薄基岩工作面具有较大承载力的厚黏土层能与薄基岩组合形成稳定的结构。汪锋<sup>[11]</sup>建立了采动覆岩“关键层-松散层拱”结构的力学模型。侯俊领等<sup>[12]</sup>按基采比大小将厚冲积层薄基岩采场划分为“有板有壳”、“有板无壳”和“无板无壳”3种类型。张华磊

等<sup>[13]</sup>认为采场覆岩仅有一层关键层时,在松散含水层的载荷传递作用下覆岩大范围的垮落下沉,易发生压架事故。冯军发等<sup>[14]</sup>认为浅埋近距离煤层中间厚关键层以分层方式垮落。杜锋等<sup>[15]</sup>研究了薄基岩综放采场支架-围岩关系,认为基本顶“给定变形”压力能够有效地传递至支架。伊康等<sup>[16]</sup>建立了塑性铰连杆模型,给出了适用于表土层厚度小于卸荷拱最低成拱高度时的液压支架工作阻力计算公式。杨永康等<sup>[17]</sup>认为浅埋厚基岩松软顶板综放面在工作面长度方向存在“复合压力拱”,随工作面长度增加压力拱逐渐升高且扁平率趋于增大。薛东杰等<sup>[18]</sup>提出浅埋煤层采动裂隙柱式结构并揭示柱式结构生成机制。李福胜等<sup>[19]</sup>运用数值模拟软件 UDEC 对工作面在不同基采比条件下的矿压显现规律进行分析。

尽管许多学者已经在薄基岩工作面采场覆岩结构形态、关键层破断形式、支架-围岩关系、覆岩结构失稳机理及防控技术等做了大量的研究,且取得了一定的成就,然而过去所做的研究往往只侧重于一种覆岩结构稳定性分析,很少分析不同覆岩结构之间的作用机理。笔者借鉴前人的研究成果,对一般工作面和薄基岩工作面采场覆岩结构进行对比分析,构建了从顶板一直到地面的采场覆岩“宏观-大-小”结构力学模型,并通过 UDEC 数值模拟软件对典型工程地质条件下采场覆岩结构形态进行了模拟验证。

现场实测表明薄基岩工作面在回采初期有非常高的压架危险性,如神府大柳塔矿 1203 工作面、淮北



支架工作阻力  $P_3$  计算公式为

$$P_3 = (Q_z + Q_1 + Q_B)(\cos \alpha)K \quad (8)$$

通过以上分析可以看出,关键层破断岩块能否形成稳定的“砌体梁”结构,不仅与关键层下方自由空间高度、破断块体的高长比有关,而且还与关键层上覆载荷有关。当作用在关键层破断岩块 B 上的载荷过大,大结构发生失稳,关键层自重及其上覆载荷经垮落带岩层作用在采场支架上,导致采场覆岩小结构失稳,发生压架事故。

## 2.3 采场覆岩宏观结构稳定性分析

### 2.3.1 采场覆岩压力拱效应

关键层破断岩块能否形成稳定的“砌体梁”结构,主要与作用在关键层上的载荷有关<sup>[23]</sup>。我国学者已经对关键层上覆载荷进行了大量的研究,认为作用在采场关键层上载荷并非上覆岩层的全部载荷,关键层上覆载荷会随煤层的开挖而明显降低,关键层破断岩块容易形成稳定的“砌体梁”结构<sup>[8]</sup>。工作面开采引起关键层上覆载荷降低必将和更高层位覆岩结构有关。“压力拱”假说认为:“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<sup>[24-27]</sup>。很好的解释了为什么采动影响下作用在关键层上的载荷远小于上覆岩层重量。

由图 1 可以看出,采场覆岩宏观结构即工作面采场顶板岩层发生冒落后更高层位岩层形成的“压力拱”结构<sup>[28]</sup>。在宏观结构的保护作用下,作用在关键层上的载荷较小,关键层破断岩块容易形成大结构。因此,采场覆岩小结构的稳定性取决于大结构的稳定性,而大结构的稳定性又取决于宏观结构的稳定性。

我国学者一致认为无论是西部厚松散层浅埋煤层还是东部松散承压含水层下薄基岩煤层,在工作面开采过程中,上覆厚风积沙层或承压含水层的载荷以均布载荷的方式作用在基岩上,当顶板岩层大面积初次来压,上覆岩层沿煤壁全厚整体切落,造成工作面支架被压死<sup>[5,7]</sup>。西部厚松散层浅埋煤层由于煤层埋藏较浅,采场覆岩结构失稳时地表出现台阶下沉,采场覆岩运移和破坏形态如图 2 所示。

### 2.3.2 宏观结构对基本顶破断形式的影响

基本顶破断形式一般有 2 种:弯拉破坏和剪切破坏,根据基本顶岩梁(固定梁)的这 2 种破断形式可以分别求得其断裂时的极限跨距<sup>[2]</sup>。

#### (1) 弯拉破坏力学条件

$$\sigma_{\max} = \frac{h_y \gamma_y + h_s \gamma_s}{2h_y^2} L_{ll}^2 = [\sigma_1] \quad (9)$$

$$L_{ll} = h_y \sqrt{\frac{2[\sigma_1]}{h_y \gamma_y + h_s \gamma_s}} \quad (10)$$

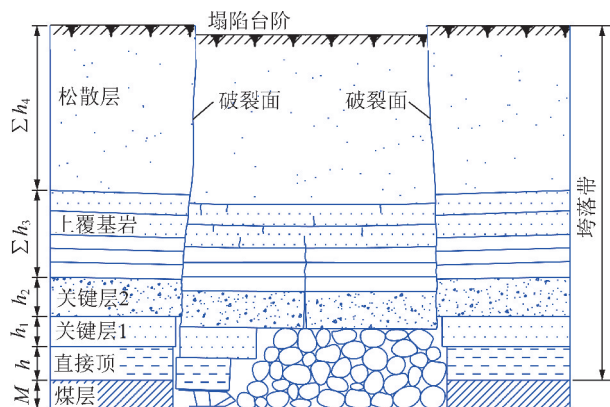


图 2 采场覆岩结构失稳模型

Fig. 2 Instability model of overlying strata structure in longwall mining

#### (2) 剪切破坏力学条件

$$\tau_{\max} = \frac{3(h_y \gamma_y + h_s \gamma_s)}{4h_y} L_{ls} = [\tau_s] \quad (11)$$

$$L_{ls} = \frac{4h_y [\tau_s]}{3(h_y \gamma_y + h_s \gamma_s)} \quad (12)$$

式中,  $\sigma_{\max}$ ,  $\tau_{\max}$  分别为基本顶岩梁最大拉应力和最大剪应力, MPa;  $h_y$ ,  $h_s$  分别为基本顶厚度和附加岩层厚度, m;  $\gamma_y$ ,  $\gamma_s$  分别为基本顶容重和附加岩层容重,  $\text{kN/m}^3$ ;  $L_{ll}$ ,  $L_{ls}$  分别为基本顶岩梁发生弯拉破坏和剪切破坏时的破断步距, m;  $[\sigma_1]$ ,  $[\tau_s]$  分别为基本顶抗拉强度极限和抗剪强度极限, MPa。

由式(9)和(11)可以看出,基本顶无论发生哪种形式的破断,其破坏力学条件与关键层上覆载荷和破断步距有关。上覆载荷和岩梁跨度越大,基本顶破断条件越容易实现。一般厚层坚硬顶板工作面 and 薄基岩坚硬顶板工作面基本顶破断机理有很大差异,一般工作面采场覆岩可以形成宏观结构,作用在关键层上的上覆载荷仅为拱内岩体的重量,上覆载荷较小,当基本顶强度较高时,只有形成大面积的悬顶后基本顶才发生破断,来压步距越大,矿压显现越剧烈。而薄基岩工作面,采场覆岩无法形成宏观结构,上覆松散层或承压含水层以恒定载荷的形式作用在关键层上,关键层上覆载荷大,当基本顶跨度并不大时,即可满足基本顶破坏力学条件,基本顶发生破断。这很好的解释了薄基岩工作面顶板来压步距小,矿压显现反而剧烈的现象。

取  $[\sigma_1] = 6.0 \text{ MPa}$ ,  $[\tau_s] = 3.2 \text{ MPa}$ ,  $h_y = 8.5 \text{ m}$ , 代入式(10)和(12),可以得到不同附加岩层厚度下基本顶岩梁破断步距  $L_{ll}$  和  $L_{ls}$  的变化曲线,如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,基本顶岩梁破断步距  $L_{ll}$  和  $L_{ls}$  与附加岩层厚度成负指数关系,随着附加岩层厚

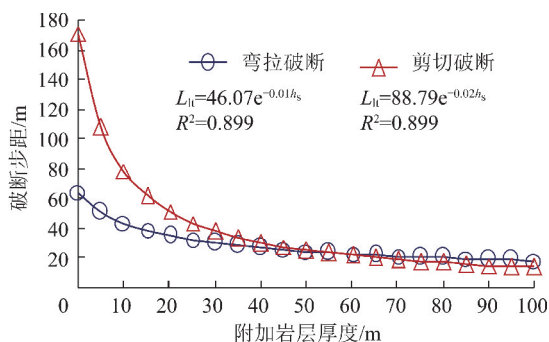


图3 不同附加岩层厚度下基本顶破断步距变化曲线

Fig.3 Curves of main roof breaking step with different thickness of additional strata

度的增大而减小,但减小幅度逐渐减小。当附加岩层厚度为0时,基本顶岩梁按弯拉破坏计算的破断步距为63.87 m,剪切破坏破断步距为170.67 m,基本顶岩梁在发生剪切破坏前就已经发生弯拉破坏,所以在基本顶上覆载荷较小时,岩梁主要发生弯拉破坏。随着基本顶上覆载荷的增加,剪切破坏破断步距迅速减小,当附加岩层厚度大于55 m后,基本顶岩梁弯拉破坏破断步距大于剪切破坏破断步距,基本顶岩梁主要发生剪切破坏。

## 2.4 采场覆岩结构与“三带”的划分

一般工作面采用全部垮落法处理采空区后,可以将采场覆岩分为垮落带、裂隙带与弯曲下沉带“三带”<sup>[2]</sup>。“三带”除了与岩层移动的特点和形态有关,还与覆岩内部结构有关。借助于采场覆岩“宏观-大-小”结构,可以对“三带”进行准确划分。如图1所示,垮落带排列杂乱无章,之间无水平挤压力,无法形成结构,因此要求工作面支架应能支撑住工作空间及采空区上方(悬顶)垮落带岩层的重量,工作面支架与垮落带岩层形成小结构。裂隙带破断岩块排列整齐,在水平挤压力作用下可以形成“砌体梁”大结构<sup>[2]</sup>。大结构只有在宏观结构的保护作用下,才能保持稳定,因此,可将“压力拱”内边界以下,垮落带以上岩层作为裂隙带。“压力拱”宏观结构是确保其

上方岩体不会塌落的一个具有拱的力学特性的结构<sup>[27]</sup>。因此,可以将“压力拱”内边界以上岩层及表土层作为弯曲下沉带。

如图2所示,西部厚松散层浅埋煤层开采时,上覆厚风积沙层以均布载荷的形式作用在关键层上,出现覆岩全厚整体切落,甚至导致地表出现台阶下沉,这时就出现了“三带合一”,采场覆岩中只有垮落带。当上覆厚风积沙层载荷较小时,顶板岩层发生不同步破断,采场覆岩有可能只形成“两带”(垮落带和裂隙带)。

## 3 一般工作面覆岩结构数值分析

压力拱现象在岩体工程中客观存在,但是无法用肉眼观测到<sup>[27]</sup>。随着数值计算分析方法及计算机软硬件的发展,深入研究压力拱现象成为可能<sup>[25]</sup>。采用 UDEC 数值模拟软件对一般工作面和薄基岩工作面采场覆岩结构进行了对比分析。

### 3.1 工作面概况

张集煤矿 1410(1)工作面煤层倾角平均 $9^\circ$ ,煤层厚度平均 2.8 m,煤层埋深 446 m。顶板岩层自下而上依次为泥岩 3.00 m,粉细砂岩 2.16 m,砂质泥岩 2.16 m,粉砂岩 0.47 m,泥岩 1.41 m,石英砂岩 4.69 m,砂质泥岩 14.24 m。经分析工作面直接顶厚度 9.20 m,4.69 m 的石英砂岩为第 1 层关键层。工作面采用 ZZ7200/18/38 综采支架,支护强度 0.86 MPa。工作面初次来压步距为 29.0 m,周期来压步距为 11.5 m。来压期间工作面支架安全阀开启较少,矿压显现不显著<sup>[23]</sup>。

### 3.2 数值模拟模型

以张集煤矿 1410(1)工作面工程地质条件为背景,建立相应的数值模拟模型,煤岩层厚度及块体力学属性见表 1。模型长 180 m,高 150 m。模型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,上部边界施加 7.82 MPa 外载荷。数值模拟中岩块采用莫尔-库仑模型,节理面采用库伦-滑移模型。

表 1 数值模型中岩体物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock mass in numerical model

岩性	厚度/m	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/ $(^\circ)$
上覆岩层	110	2 550	5.36	3.18	2.58	38
基本顶	5	2 650	11.49	7.91	3.83	40
直接顶	9	2 500	3.32	2.27	1.25	28
煤	3	1 400	2.37	1.25	1.04	27
直接底	3	2 500	4.31	2.54	1.36	30
基本底	5	2 600	5.36	3.18	2.58	38
下伏岩层	15	2 500	3.94	2.60	1.62	35

### 3.3 数值模拟结果

工作面推进到 30 m 时,工作面发生初次来压。图 4 为工作面采场围岩主应力矢量图,可以看出,采动影响下采场覆岩应力场发生变化,在采空区上方围岩中形成应力集中区(压力拱结构),受到该压力拱保护作用,可将压力拱结构岩体本身及上覆岩层的重量传递到采场周围煤岩体上,在工作面煤壁前方及切眼后方形成应力集中区<sup>[24]</sup>。因此,作用在基本顶上的载荷仅为上方冒落拱内岩体的重力。作用在关键层破断岩块上的载荷较小,关键层破断岩块容易形成“砌体梁”结构。

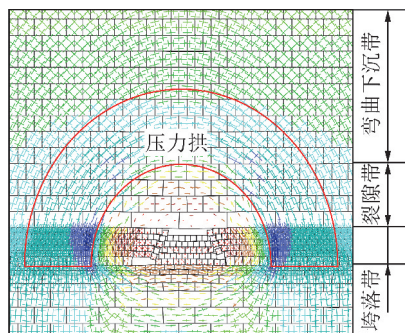


图 4 一般工作面围岩主应力矢量图

Fig. 4 Principal stress vector map of surrounding rock in normal working face

通过在关键层上界面布置监测线,提取监测线上的垂直应力,可以反映出作用在关键层上的上覆载荷。图 5 为工作面开采前后关键层上覆载荷对比曲线。可以看出,在煤体开挖前,作用在基本顶上的载荷为原岩应力 10.33 MPa。煤体开挖后,引起基本顶上覆载荷重新分布,在采空区两侧煤柱上方形成应力集中区,而在采空区上方上覆载荷急剧降低,近乎为 0。

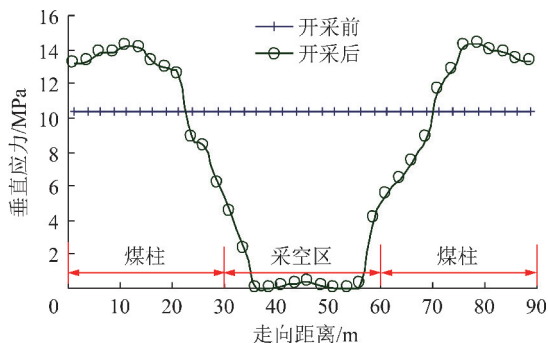


图 5 一般工作面关键层上覆载荷变化曲线

Fig. 5 Curves of pressure on the key stratum in normal working face

为了更好的研究采场覆岩应力场演化特征和确定压力拱内外边界,在采空区顶板岩层中布置一条竖直监测线,提取监测线上的垂直应力和水平应力,可

以得到采场覆岩应力变化规律(图 6)。

从图 6 可以看出模型在开挖前原岩应力为一条随高度增加而不断减小的斜线,工作面的开挖,引起采场附近围岩应力释放,直接顶垮落后应力几乎为 0,从基本顶向上,围岩应力逐渐增加,垂直应力缓慢增加,而水平应力急剧增加,在煤层上方 30 m 处水平应力达到原岩应力,在煤层上方 40 m 处达到峰值,之后逐渐减小,在煤层上方 65 m 处水平应力和垂直应力接近原岩应力。根据采场覆岩应力随高度变化规律可以确定压力拱的内边界高度 30 m,外边界高度 65 m。以此可确定工作面“三带”高度,工作面垮落带高度 9 m,裂隙带高度 30 m,30 m 以上为弯曲下沉带。

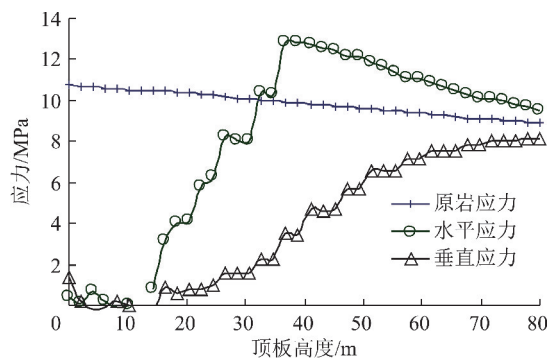


图 6 采场覆岩应力分布特征

Fig. 6 Stress distribution characteristics of overlying strata in longwall mining

提取监测线上的垂直位移,可以得到覆岩下沉量随高度变化曲线,从图 7 中可以看出工作面回采后由于直接顶软弱破碎无法形成结构,发生冒落,下沉量达到 2.6 m,从直接顶到基本顶顶板下沉量发生突变,说明直接顶和基本顶之间产生离层,基本顶没有和直接顶发生同步下沉。从基本顶向上,覆岩下沉量由煤层上方 10 m 处的 462.3 mm 迅速减小到煤层上方 30 m 处的 157.5 mm,往上顶板下沉量变化较小。

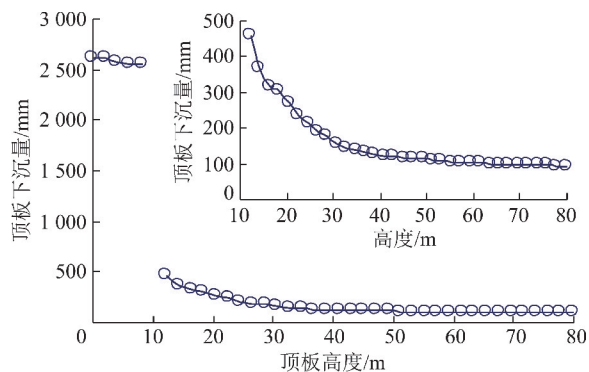


图 7 覆岩下沉量随顶板高度变化曲线

Fig. 7 Curves of overlying strata displacement at different height

因此可以以顶板上方 30 m 处作为裂隙带与弯曲下沉带的分界线。

## 4 薄基岩工作面覆岩结构数值分析

### 4.1 工作面概况

顾北矿 1202(3) 提高回采上限工作面煤层倾角平均  $5^\circ$ , 煤层厚度平均 3.7 m, 煤层埋深 515 m。1203(3) 工作面最小防水煤柱垂高为 27.6 m, 下隔厚度为 27.4 m, 最小防水煤岩柱高度 55 m。顶板岩层自下而上依次为细砂岩 8.5 m, 炭质泥岩 1.0 m, 风化泥岩 0.1 m, 炭质泥岩 0.1 m, 风化粉砂岩 4.4 m, 风化砂岩 3.0 m。工作面采用 ZZ6400/22/45 综采支

架, 支护强度 0.85 MPa<sup>[23]</sup>。

1202(3) 工作面于 2011-05-12 中班开始回采, 5 月 16 日工作面突然来压, 支架安全阀全部开启, 大部分支架后立柱没有行程。本次事故共造成工作面 52 架支架损坏, 不得不提前拆除工作面。工作面初次来压步距 30 m (含 6 m 切眼)。

### 4.2 数值模拟模型

以顾北矿 1202(3) 薄基岩工作面工程地质条件为背景, 建立相应的数值模拟模型, 煤岩层厚度及块体力学属性见表 2。模型长 180 m, 高 150 m。模型上边界施加 9.75 MPa 外载荷。

表 2 数值模型中岩体物理力学参数

Table 2 Mechanical parameters of rock mass in numerical model

岩性	厚度/m	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/( $^\circ$ )
中隔水层	50	1 800	2.70	1.30	0.50	15
下含水层	18	2 000	1.20	0.60	0.20	10
下隔水层	27	1 800	2.70	1.30	0.50	15
上覆岩层	20	2 550	7.35	4.63	3.04	42
基本顶	8	2 650	16.04	5.62	3.47	43
煤	4	1 400	1.90	0.93	0.80	27
直接底	3	2 500	3.94	2.60	1.68	30
基本底	5	2 600	7.94	6.31	2.93	35
下伏岩层	15	2 600	10.92	3.72	2.10	43

松散承压含水层载荷传递力学特性在数值模拟中的正确实现是至关重要的一步。本文基于二维离散元计算软件 UDEC4.0 程序中的 FISH 内嵌语言进行二次开发, 通过内部应力边界命令在承压含水层底界面上施加补偿面力, 从而实现了承压含水层作用于承压含水层底界面上的压力恒定。

### 4.3 数值模拟结果分析

数值模拟研究表明, 当工作面推进到 30 m 时, 工作面发生初次来压, 在基本顶破断岩块发生旋转下沉过程中, 上覆岩层及下部隔水层在承压含水层水压力 (4.5 MPa) 和自重作用下沿煤壁和开切眼上方发生全厚整体切落, 滑动体克服破裂面两侧岩体的摩擦整体向下运动。由于作用在关键层破断岩块上的载荷较大, 关键层破断岩块无法形成“砌体梁”结构, 发生滑落失稳 (图 8)。顶板出现整体台阶下沉, 工作面矿压显现剧烈, 易造成工作面“压架”事故。

图 9 为工作面开采前后关键层上覆载荷对比曲线。从图中可以看出在煤体开挖前, 作用在基本顶上

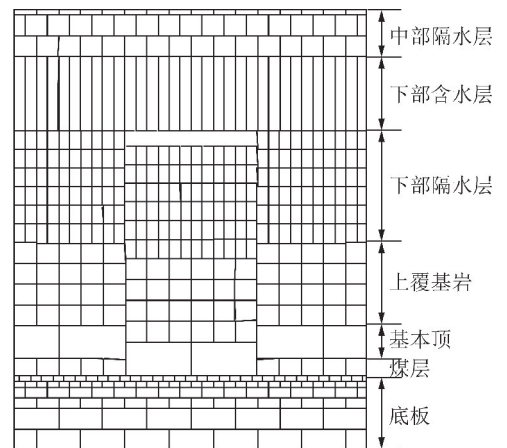


图 8 松散承压含水层下覆岩结构失稳模型

Fig. 8 Instability model of overlying strata structure under unconsolidated confined aquifer

的载荷为原岩应力 12.10 MPa。煤体开挖后, 引起基本顶上覆载荷重新分布, 在采空区两侧煤柱上方形成应力集中区, 而在采空区上方关键层上覆载荷明显降低, 但是在上覆岩体自重和水压力作用下, 上覆载荷仍达到 1.87 MPa。

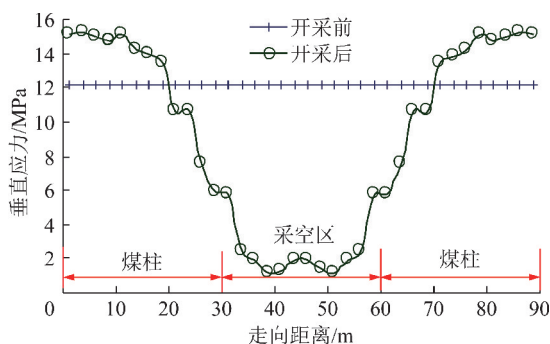


图9 薄基岩工作面关键层上覆载荷变化曲线

Fig. 9 Curves of pressure on the key stratum in thin bedrock working face

通过理论分析和数值模拟得到一般工作面和薄基岩工作面采场覆岩结构差异,揭示了薄基岩工作面覆岩结构失稳致灾机理。一般工作面采场覆岩存在“宏观-大-小”结构,在“压力拱”宏观结构保护作用下,关键层破断岩块能形成稳定的“砌体梁”大结构,工作面支架仅需支撑住垮落带岩层重量,工作面矿压显现缓和;而薄基岩工作面由于基岩厚度较薄或基岩风化严重,强度降低,无法形成“压力拱”结构,上覆松散层载荷直接作用在采场支架上将导致压架事故。

## 5 现场应用

顾北矿 1512(3)工作面为提高回采上限试验面,工作面面长 195 m,可采长度 392 m<sup>[13]</sup>。主采 13-1 煤层,厚度平均 4.5 m,倾角平均 5°,根据工作面开切眼附近的十二~十三 K<sub>2</sub>4 钻孔综合柱状图,工作面开切眼上口处防水煤柱高度为 50 m,煤层顶板上方 20~50 m 为风氧化带。

经分析,1512(3)工作面工程地质条件与该矿之前已经发生过压架事故的 1202(3)工作面类似,煤层上方仅有 20 m 的硬岩层,在基本顶发生破断后,由于上覆岩层中风氧化带岩石破碎,泥化严重,难以形成“压力拱”结构,导致采场覆岩结构失稳,发生压架事故。

采场覆岩能够形成“压力拱”结构,这就要求上覆岩层有足够的厚度且有相当稳定的岩体,以承受岩体自重和其上的荷载<sup>[23]</sup>。为了提高风氧化带强度,顾北矿设计了一种 J 型水平羽翼分支孔的注浆孔布置方式,结合定向钻孔技术和水平预注浆技术,对工作面顶板风氧化带进行了地面预注浆加固<sup>[13]</sup>。

根据注浆前后风氧化带钻孔取芯及岩石力学试验,表明注浆后风化泥岩的抗剪强度、黏聚力等均值较注浆前提高约 40%。通过对工作面顶板风氧化带岩性改良,从而使关键层上方能够形成“压力拱”结构,避免“砌体梁”大结构发生滑落失稳,保证了

1512(3)工作面顺利回采。

## 6 结 论

(1)构建了采场覆岩“宏观-大-小”结构力学模型,一般工作面回采后,采场覆岩中会自下而上依次形成“支架-围岩”小结构、“砌体梁”大结构、“压力拱”宏观结构。

(2)在宏观结构的保护作用下,关键层上覆载荷较小,关键层破断岩块容易形成“砌体梁”大结构,作用在支架上的力较小,工作面矿压显现缓和。

(3)薄基岩工作面开采时,采场覆岩中无法形成宏观结构,上覆岩层在承压含水层水压力及自重作用下沿煤壁发生全厚整体切落,易造成工作面“压架”事故。

(4)根据采场覆岩“宏观-大-小”结构力学特征,可以对“三带”发育高度进行准确划分。一般工作面回采后,采场覆岩可以形成“三带”。厚松散层浅埋煤层回采后,采场覆岩无法形成结构,采场覆岩中只有垮落带“一带”。

## 参考文献 (references):

- [1] 钱鸣高, 缪协兴, 何富连. 采场“砌体梁”结构的关键块分析[J]. 煤炭学报, 1994, 19(6): 557-563.  
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, HE Fulian. Analysis of key block in the structure of voussoir beam in longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(6): 557-563.
- [2] 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: 65-90.
- [3] 袁亮, 刘满才. 淮南潘集矿区部分块段可缩小防水煤柱开采探讨[J]. 煤炭科学技术, 1999, 27(1): 32-35.  
YUAN Liang, LIU Mancai. Discussion on reducing waterproof pillar on part block in Panji mining area[J]. Coal Science and Technology, 1999, 27(1): 32-35.
- [4] 熊晓英, 李俊斌. 1402(3)综采工作面压架原因分析[J]. 中国煤炭地质, 2004, 16(3): 34-37.  
XIONG Xiaoying, LI Junbin. A case study of support break-off at 1402(3) fully mechanized mining face[J]. Coal Geology of China, 2004, 16(3): 34-37.
- [5] 侯忠杰. 浅埋煤层关键层研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(4): 359-363.  
HOU Zhongjie. Study on key stratum in shallow seam[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(4): 359-363.
- [6] 黄庆享, 张沛, 董爱菊. 浅埋煤层地表厚砂土层“拱梁”结构模型研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2722-2726.  
HUANG Qingxiang, ZHANG Pei, DONG Aiju. Mathematical model of “arch beam” of thick sandy soil layer movement in shallow seam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2722-2726.
- [7] 许家林, 朱卫兵, 王晓振. 松散承压含水层下采煤突水机理与防治研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3): 333-339.

- XU Jialin, ZHU Weibing, WANG Xiaozhen. Study on water-inrush mechanism and prevention during coal mining under unconsolidated confined aquifer[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(3): 333-339.
- [8] 许家林, 陈稼轩, 蒋坤. 松散承压含水层的载荷传递作用对关键层复合破断的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 699-704.
- XU Jialin, CHEN Jiakuan, JIANG Kun. Effect of load transfer of unconsolidated confined aquifer on compound breakage of key strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 699-704.
- [9] 王家臣, 王兆会. 浅埋薄基岩高强度开采工作面初次来压基本顶结构稳定性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(2): 175-181.
- WANG Jiachen, WANG Zhaohui. Stability of main roof structure during the first weighting in shallow high-intensity mining face with thin bedrock[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(2): 175-181.
- [10] 方新秋, 黄汉富, 金桃, 等. 厚表土薄基岩煤层开采覆岩运动规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S1): 2700-2706.
- FANG Xinqiu, HUANG Hanfu, JIN Tao, et al. Movement rules of overlying strata around longwall mining in thin bedrock with thick surface soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 2700-2706.
- [11] 汪锋. 采动覆岩结构的“关键层-松散层拱”理论及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- WANG Feng. Structure of “key strata and arch structure in unconsolidated layers” and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [12] 侯俊领, 谢广祥, 唐永志, 等. 厚冲积层薄基岩采场围岩三维力学特征[J]. 煤炭学报, 2013, 38(12): 2113-2118.
- HOU Junling, XIE Guangxiang, TANG Yongzhi, et al. Three-dimensional mechanical characteristics of rocks surrounding the stope of thick unconsolidated layers and thin bedrock[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(12): 2113-2118.
- [13] 张华磊, 涂敏, 程桦, 等. 薄基岩采场覆岩破断机理及风氧化带整体注浆加固技术[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2126-2132.
- ZHANG Hualei, TU Min, CHENG Hua, et al. Breaking mechanism of overlying strata under thick unconsolidated layers and integrated grouting reinforcement technology for wind oxidation zone[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2126-2132.
- [14] 冯军发, 周英, 张开智, 等. 浅埋近距离多煤层采空区下厚关键层破断特征及支架工作阻力确定[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(2): 332-338.
- FENG Junfa, ZHOU Ying, ZHANG Kaizhi, et al. Fracture characteristics of thick key stratum and calculation of shield work load under multiple coal seam mining gobs with shallow depth[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(2): 332-338.
- [15] 杜锋, 郑金雷. 薄基岩综放采场支架-围岩关系研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(3): 418-424.
- DU Feng, ZHENG Jinlei. Relationship between support and surrounding rock of fully-mechanized sublevel caving face with thin bedrock[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2017, 34(3): 418-424.
- [16] 伊康, 弓培林, 刘畅. 浅埋薄表土层薄基岩综放工作面覆岩结构及顶板控制[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1230-1237.
- YI Kang, GONG Peilin, LIU Chang. Overlying strata structures and roof control of working face under thin topsoil and thin bedrock in shallow seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1230-1237.
- [17] 杨永康, 李建胜, 康天合, 等. 浅埋厚基岩松软顶板综放采场矿压特征工作面长度效应[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 709-716.
- YANG Yongkang, LI Jiansheng, KANG Tianhe, et al. Effect of working face length on underground pressure characteristics by fully-mechanized top-coal caving mining under shallow-buried thick bedrock loose roof[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 709-716.
- [18] 薛东杰, 周宏伟, 任伟光, 等. 浅埋煤层超大采高开采柱式崩塌模型及失稳[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 760-765.
- XUE Dongjie, ZHOU Hongwei, REN Weiguang, et al. Instability of pillar collapse model and generation of cracks in thick coal seam mining at shallow depth[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 760-765.
- [19] 李福胜, 张勇, 许力峰. 基载比对薄基岩厚表土煤层工作面矿压的影响[J]. 煤炭学报, 2013, 38(10): 1749-1755.
- LI Fusheng, ZHANG Yong, XU Lifeng. Influence of ratio of basement and loadings on mining face rock pressure in thin basement rock thick surface soil[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(10): 1749-1755.
- [20] 侯朝炯, 李学华. 综放沿空掘巷围岩大、小结构的稳定性原理[J]. 煤炭学报, 2001, 26(1): 1-7.
- HOU Chaojiong, LI Xuehua. Stability principle of big and small structures of rock surrounding roadway driven along goaf in fully mechanized top coal caving face[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(1): 1-7.
- [21] 许家林, 鞠金峰. 特大采高综采面关键层结构形态及其对矿压显现的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1547-1556.
- XU Jialin, JU Jinfeng. Structural morphology of key stratum and its influence on strata behaviors in fully-mechanized face with super-large mining height[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1547-1556.
- [22] 窦林名, 陆荣平, 牟宗龙, 等. 采场顶板控制及监测技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009: 55-61.
- [23] 李志华, 华心祝, 杨科, 等. 上提工作面支架围岩关系及其对矿压显现的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1162-1171.
- LI Zhihua, HUA Xinzhu, YANG Ke, et al. Relation between support and surrounding rocks and its influence on strata behaviors in working face with a raise of mining upper limit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(6): 1162-1171.
- [24] 谢广祥. 综放工作面及其围岩宏观应力壳力学特征[J]. 煤炭学报, 2005, 30(3): 309-313.
- XIE Guangxiang. Mechanical characteristics of fully mechanized top-coal caving face and surrounding rock stress shell[J].

- Journal of China Coal Society, 2005, 30(3): 309-313.
- [25] 李延. 薄层破碎硬质岩隧道群施工的压力拱效应及荷载理论模型研究[D]. 成都:西南交通大学, 2014.
- LI Yan. Research on pressure arch effects and its load-theory models for tunnel group construction in thin-layered fracture hard rocks [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [26] 李宁. 采场压力拱演化特征及失稳机理分析[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2014.
- LI Ning. Mechanics evolution characteristics and instability mechanism analysis of the pressure-arch in mining field[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.
- [27] 梁晓丹, 刘刚, 赵坚. 地下工程压力拱拱体的确定与成拱分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(3): 314-317.
- LIANG Xiaodan, LIU Gang, ZHAO Jian. Definition and analysis of arching action in underground rock engineering[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33(3): 314-317.
- [28] 文志杰, 蒋宇静, 宋振骥, 等. 沿空留巷围岩结构灾变系统及控制力学模型研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2011, 26(3): 12-16.
- WEN Zhijie, JIANG Yujing, SONG Zhenqi, et al. Study on mechanical model and surrounding rock catastrophe system of Gob-side retaining entry[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 26(3): 12-16.