黄庆享,周金龙,马龙涛,等. 近浅埋煤层大采高工作面双关键层结构分析[J]. 煤炭学报,2017,42(10):2504-2510. doi:10. 13225/j. cnki. jccs. 2017.0423

HUANG Qingxiang, ZHOU Jinlong, MA Longtao, et al. Double key strata structure analysis of large mining height longwall face in nearly shallow coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10):2504-2510. doi:10.13225/j. cnki. jccs. 2017.0423

近浅埋煤层大采高工作面双关键层结构分析

黄庆享,周金龙,马龙涛,唐朋飞

(1. 西安科技大学 能源学院,陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室,陕西 西安 710054)

摘 要:根据实测统计分析,近浅埋煤层大采高工作面支架载荷普遍较大,且随采高增大有增加的 趋势,工作面来压存在大小周期,厚度较大的等效直接顶静载是工作面支架的基本载荷。通过物理 模拟实验,揭示了大采高工作面直接顶变厚和顶板结构铰接点上移的机理,提出了"等效直接顶" 的定义,建立了近浅埋煤层大采高工作面顶板"双关键层"理论。近浅埋煤层大采高工作面顶板主 要表现为"双关键层"结构,根据等效直接顶对采空区的充填程度,双关键层顶板结构分为"双砌体 梁"和"斜台阶岩梁-砌体梁"两类,常见的是"斜台阶岩梁-砌体梁"双关键层结构。建立了双关键 层顶板结构模型,揭示了工作面出现大小周期来压的机理,给出了支架初撑力和工作阻力的计算公 式,可为近浅埋煤层大采高工作面顶板控制提供理论依据。

关键词:近浅埋煤层;大采高;双关键层结构;来压机理;支护阻力

中图分类号:TD323 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2017)10-2504-07

Double key strata structure analysis of large mining height longwall face in nearly shallow coal seam

HUANG Qingxiang, ZHOU Jinlong, MA Longtao, TANG Pengfei

(1. School of Energy Engineering, Xi' an University of Science and Technology, Xi' an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention of the Ministry of Education, Xi' an University of Science and Technology, Xi' an 710054, China)

Abstract: Through field measurement and statistical analysis show that the support load of large mining height working face is generally larger and this is an increasing tendency with the increase of mining height, there is large and small periodic weighting in longwall face, and the static load of thick equivalent immediate roof is the basic load of support of longwall face. Through physical simulation experiments, the mechanism of immediate roof thickness increase and the move upward of hinge point of roof structure at large mining height longwall face are explored, the definition of "equivalent immediate roof" is proposed, and the "double key strata" theory of large mining height longwall face in nearly shallow seam is established. Roof is mainly the "double key strata" structure of large mining height longwall face in nearly shallow seam. According to the gob filling degree by equivalent immediate roof, the double key strata roof structure can be divided into two types including" double voussoir beam" and "blique step voussior beam-voussoir beam", and the common situation is" blique step voussior beam-voussoir beam" double key strata structure. The model of double key strata roof structure is established, and the mechanism of large and small periodic weighting in longwall face is explored, and the calculation formula of the setting load of support and the support resistance is put forward, which provide the theory basis for the roof control of large mining height longwall face in nearly shallow coal seam.

Key words:nearly shallow coal seam; large mining height; double key strata structure; mechanism of roof weighting; support resistance

我国西部普遍赋存浅埋煤层,其中顶板基岩厚度 较薄,顶板为单一关键层结构,表现为台阶下沉的浅 埋煤层称为典型浅埋煤层;顶板基岩厚度相对较 大(一般大于50~60 m),顶板能形成双关键层结构, 表现为大小周期来压,此类浅埋煤层称为近浅埋煤 层^[1]。大采高综采是浅埋煤层高产高效开采的主要 手段,得到普遍应用,实践中存在工作面强矿压现 象^[2-4],严重威胁安全生产。

自 20 世纪 90 年代初神东矿区开发以来,国内学 者对浅埋煤层顶板结构理论与岩层控制开展了系统 研究,掌握了典型浅埋煤层工作面的矿压显现基本规 律^[5],提出了初次来压的非对称三铰拱结构^[6]、周期 来压的"短砌体梁"和"台阶岩梁"结构^[7],以及松散 层载荷传递^[8]等代表性成果,基本解决了典型浅埋 煤层顶板控制理论问题。

实践中,随着采高的增加,采场支架的支撑能力 从过去的6000 kN/架增大到21000 kN/架,支护成 本直线上升。揭示大采高采场顶板来压机理,确定合 理的支架载荷成为研究热点。文献[9]基于3.5~ 5.5 m大采高的实测,得出大采高工作面支架阻力 高,动载系数小(1.2~1.3),以静载为主,基本顶结 构对支架载荷影响减弱,直接顶对支架载荷影响增强 的观点,将直接顶用给定载荷计算,未对基本顶结构 进行分析。文献[10]提出了大采高采场顶板"短悬 臂梁-铰接岩梁"结构,得出顶板垮落步距对支架工 作阻力有较大影响。文献[11]提出直接顶悬臂梁结 构,认为"悬臂梁--砌体梁"交替式运动导致大小周期 来压。上述研究丰富了大采高工作面岩层控制理论, 但对近浅埋煤层工作面顶板双关键层结构尚缺乏系 统,大小周期来压机理有待于进一步认识。

本文以近浅埋煤层大采高工作面来压规律实测 为基础,采用物理模拟、数值计算和理论分析相结合 的方法,研究大采高工作面"等效直接顶"效应,建立 "双关键层"结构,揭示工作面大小周期来压机理,为 近浅埋煤层大采高工作面支架选型和顶板控制提供 依据。

1 近浅埋大采高工作面支架载荷特征

工作面支架载荷的大小及变化规律与采场顶板 结构运动密切相关,可以反映采场顶板结构的变化特 征。通过对支架阻力的分析,有利于正确建立采场顶 板结构模型。

(1)直接顶作用明显,支架静载较大

根据6个近浅埋大采高工作面实测统计(表1), 大采高工作面支架工作阻力普遍大于普通采高工作 面(4000~6000 kN/架),支架初撑力也较大,且随 采高增加而增大。

工作面来压特点主要表现为平时来压较大,支架 处于持续较大载荷状态,表明支架承受较大的(直接 顶)静态载荷。大采高工作面支护设计应考虑这种 支架工作状态,顶板结构分析必须重视直接顶的影响 和作用。

Table 1 Support resistance of different mining height longwall face in nearly shallow coal seam								
矿名	工作面 编号	采高/m	埋深/m	支架型号	支架宽 度/m	初撑力/ (kN・架 ⁻¹)	工作阻力/ (kN・架 ⁻¹)	初撑力 比/%
榆树湾	20102	5.0	230	DBT 二柱掩护式	1.75	5 890	8 084	72.86
张家峁	15206	6.0	$80\sim 202$	ZY12000/28/63D	1.75	7 916	10 750	73.64
纳林庙	62105	6.3	169	ZY13000/28/63D	1.75	8 728	10 806	80.77
三道沟	85201	6.5	$116\sim 268$	ZY18000/32/70D	2.05	12 364	14 523	85.13
补连塔	22303	6.8	179	ZY16800/32/70D	2.05	12 370	16 030	77.17
大柳塔	52304	7.0	200	ZY16800/32/70D	2.05	11 500	17 403	66.08

表1 近浅埋煤层不同采高工作面支护阻力

(2)支护阻力随采高增大

随着采高的增加,采场上覆岩层结构发生了较大 变化,工作面支护阻力也随之变化。采高4,5,6,7 m 时,支架初撑力平均为4600,5500,6800,8200 kN/ 架;支架工作阻力平均为5800,8000,10000, 11000 kN/架。对13个大采高工作面支护阻力统计 如图1所示,随着采高的加大支护阻力有增加的趋 势,特别是当采高大于5.5 m 后支护阻力迅速上升。 据统计,支架实际达到的初撑力一般占工作阻力的 65%~80%,平均75%。

(3)支架载荷变化规律与双关键层特征

工作面支架载荷随推进距的变化曲线能直观反 映顶板来压过程,对建立工作面顶板结构,揭示来压 机理具有重要意义。以某矿6m大采高工作面中部 78号支架为例(图2),说明支架载荷变化规律。根据 统计发现,近浅埋煤层大采高综采工作面顶板来压呈

报



图 1 支护阻力随采高的变化(折算架宽 1.75 m) Fig. 1 Support resistance vs. mining height

一大一小的周期性变化,大周期来压时动载较明显,容 易造成压架事故。大周期来压步距一般为小周期来压 步距的2倍,大周期来压载荷为小周期的1.3倍。





Fig. 2 Large and small periodic weighting of longwall face 形成大小周期来压的原因,主要是基岩顶板跨落 过程可以形成双关键层结构。根据覆岩条件的不同, 直接顶厚度约占采高的2~3倍,每组关键层厚 度(铰接结构层)为采高的3~5倍,则当基岩厚度为 采高的8~13倍以上,就可能形成两组关键层。这一 现象在1997年活鸡兔煤矿首采工作面模拟中也曾发 现(图3),该工作面基岩厚度约60m,采高为4m,基 岩厚度为采高的15倍,垮落顶板形成双关键层结构。 下组关键层厚度约20m,破断顶板形成强断裂带,导 致小周期来压;上组关键层厚度约30m,破断形成弱 断裂带,上下关键层同步运动导致大周期来压。

2 近浅埋大采高工作面顶板结构

2.1 等效直接顶及其厚度

随着采高的加大,大采高工作面顶板垮落带变 厚,等效于"直接顶"的顶板岩层厚度加大。为了准 确描述大采高工作面"厚直接顶"特征,提出大采高 工作面"等效直接顶"概念,将煤层至铰接基本顶岩 层之间,不能形成结构的垮落带岩层统称为等效直接 顶^[12]。





物理相似模拟得出^[12-13],采高为4,5,6,7 m时, 等效直接顶厚度为10,15,21,26 m,分别为采高的 2.5,3.0,3.5,3.7 倍,如图4所示。可见,等效直接 顶厚度与采高呈近似线性增加,为采高的2.5~3.7 倍,平均3.2 倍,与按照碎胀系数1.3 计算得出的3.3 倍采高基本吻合。



图 4 等效直接顶厚度随采高的变化

Fig. 4 Thickness of equivalent immediate roof vs. mining height

2.2 等效直接顶载荷与支架初撑力

随着采高的加大,顶板冒落范围增大,大采高工 作面等效直接顶变厚,难以随支架前移及时破断,垮 落具有一定的滞后性,呈"短悬臂梁"形式存在^[10],使 得大采高工作面支架所承担的直接顶静载比普通采 高的大,这是大采高工作面平时压力大的原因之一。

等效直接顶厚度对采场顶板结构的形成具有直接 影响。随着等效直接顶厚度的增加,覆岩断裂带将向 上转移,基本顶铰接结构也将上移,因而工作面支架平 时主要承受较厚的等效直接顶静载,基本顶结构动载 参与较少,导致支架平时载荷较大,动载较缓和。

在大采高采场顶板控制时,支架通过等效直接顶向上覆岩层提供支护力,因此对等效直接顶的控制是 最基本的。数值计算表明,提供一定的支护阻力后, 等效直接顶和煤壁受力环境明显改善^[14]。若支架能 提供足够的初撑力,可保持等效直接顶的自承能力, 提高顶板结构自稳性,减轻支架压力,实现工作面顶 板的有效控制。因此,支架的初撑力至少应大于等效 直接顶重量。

2.3 工作面顶板结构分类

等效直接顶垮落后对采空区的充填程度不同,基本顶破断岩块回转空间不同,将形成不同的顶板结构。通过物理相似模拟得出^[15],按照等效直接顶对 采空区的充填程度,可将采场顶板结构大致分为两 类,如图5所示。



(b)"斜台阶岩梁-砌体梁"结构(A, B, C为关键块)

图 5 工作面顶板双关键层结构

Fig. 5 Double key strata roof structure of longwall face

(1)"双砌体梁"结构(图 5(a))。此类顶板的等效直接顶厚度较大,一般为采高的 3.3~3.7 倍。等效直接顶垮落后对采空区的充填较充分,下组关键层的关键块回转空间小,可形成稳定的"砌体梁"结构。 在近浅埋煤层双关键层条件下,表现为"双砌体梁" 结构形态。

在此类条件下,由于砌体梁结构稳定,工作面表 现为静载大,动载小。

(2)"斜台阶岩梁-砌体梁"结构(图5(b))。当 等效直接顶厚度相对较小(小于采高的3.0倍),垮 落顶板不能充满采空区,这是榆神府矿区近浅埋煤层 大采高采场的常见状况。在此条件下,下组关键层结 构的关键块 B₁和 C₁出现"台阶下沉",形成"斜台阶 岩梁"结构;此时,上组关键层结构受下组关键层结 构的充填,回转空间变小,岩块回转角较小,将形成 "砌体梁"结构形态。即,近浅埋煤层大采高工作面 顶板形成"斜台阶岩梁-砌体梁"双关键层结构。

此结构中,支架不仅承受等效直接顶的静载,还 要承受"斜台阶岩梁"非稳态结构的动载,支架载荷 相对较大。因此,近浅埋煤层大采高工作面支架选型 应当以此类结构为依据。

3 近浅埋顶板"双关键层"结构分析

3.1 "双关键层"结构的大小周期来压

3.1.1 构成"双关键层"效应的关键层间距

两组关键层的间距在一定范围内时,才能产生相 互影响,形成"双关键层"结构。可构成相互影响的 双关键层间距与岩层破断角和周期来压步距有关,计 算公式如下:

$$h_i \leq L_1 \tan \beta$$

式中, h_j 为关键层间距,m; L_1 为下组关键块 B₁长度(周期来压步距),m; β 为岩层破断角,(°)。

由于近浅埋煤层基岩厚度有限,一般具有双关键 层效应。根据陕北近浅埋煤层大采高下组关键层常 见的周期来压步距为15 m左右,岩层破断角按70° 计算可知,当两组关键层间距小于41 m时,上组关键 块B,对下组关键层结构及其稳定性构成影响,产生 "双关键层"顶板结构效应。

3.1.2 大小周期来压

近浅埋煤层大采高工作面"斜台阶岩梁-砌体 梁"双关键层结构,上组关键层破断步距较大,一般 为下组关键层破断步距的2倍。

大周期来压:当上、下两组关键层同时破断叠合运动,上组关键层结构失稳载荷作用于下组关键块 B₁上,双关键层结构容易滑落失稳(切落),此刻工作 面支护处于最危险状态。

小周期来压:当下组关键层破断,而上组关键层 未破断时,上、下组关键层将形成离层。上组关键层 结构阻隔了覆岩载荷传递,下组关键层处于上组关键 层结构的"保护"之下,下组关键块 B₁的载荷只是自 重和上覆夹层自重,在此情况下工作面支架载荷较 小,形成小周期来压。

3.2 "双关键层"结构稳定性分析

3.2.1 双关键层大周期来压顶板结构分析

在近浅埋煤层大采高综采条件下,随着工作面的 推进,下组关键层先破断,形成小周期来压。当工作 面继续推进,上下双关键层同步破断,形成大周期来 压,其结构形态如图6所示。

图 6 中, *m* 为采高, m; $\sum h_i$ 为等效直接顶厚 度, m; h_1 为下组关键层厚度, m; h_2 为等效直接顶"短 悬臂梁"厚度, m; h_3 为易垮落等效直接顶厚度, m; h_4 为两组关键层夹层厚度, m; h_5 为上组关键层厚 度, m; R_1 为关键块 B₁ 对等效直接顶的作用力, kN/ 架; R_2 为等效直接顶"短悬臂梁"自重, kN/架; R_3 为



Fig. 6 Roof structure model of double key strata of large periodic weighting

易垮落等效直接顶自重,kN/架; R_4 为关键块 B₁ 自重 与其上覆夹层自重之和,kN/架; R_5 为关键块 B₂ 向下 的作用力,kN/架; P_2 为关键块 B₂ 自重与其覆载之 和,kN/架; P_m 为支架载荷,kN/架; L_1 为关键块 B₁ 长 度,m; l 为"短悬臂梁"长度,m; l_k 为支架控顶 距,m; L_2 为关键块 B₂ 长度,m; W_1 为关键块 C₁ 回转 下沉量,m; W_2 为关键块 C₂ 回转下沉量,m; θ 为关键 块 B₁ 回转角,(°); α 为等效直接顶破断角,(°)。

如图 6 所示,支架载荷主要由等效直接顶自重和 "下位斜台阶岩梁"结构失稳载荷组成。下位斜台阶 岩梁的覆载为上组关键层结构传递的失稳载荷,上组 关键层的作用是通过其失稳载荷影响下组关键层结 构稳定性来体现的。

支架承受的载荷为

$$P_{\rm m} = R_1 + R_2 + R_3 \tag{1}$$

式中,R₁,R₂,R₃都以支架宽度 b 进行计算。

根据文献[16],"斜台阶岩梁"结构中关键块 B₁ 前铰点向下传递的载荷为

$$R_{1} = \begin{bmatrix} h_{1} \\ 1 - \frac{\frac{h_{1}}{\sin \beta} \cos(\beta - \theta) + \frac{L_{1}}{2} \cos \theta}{\frac{h_{1}}{\sin \beta} \sin(\beta - \theta) - W_{1} - 0.5a} \end{bmatrix}$$
(2)

根据图 6,等效直接顶部分 R₂, R₃ 分别为

$$R_2 \approx b l h_2 \gamma \tag{3}$$

$$R_3 \approx \left(l_k + \frac{1}{2} h_3 \cot \alpha \right) b h_3 \gamma \tag{4}$$

式中,a 为接触面高度,m; P_1 为下组关键块 B_1 自重 及承受的载荷, kN/χ ; tan φ 为关键块端角摩擦因 数;b 为支架宽度,m; γ 为基岩平均容重, kN/m^3 。

式(2)中,载荷 P_1 的确定与文献[16]不同。由于两组关键层同步破断,上组关键层结构失稳载荷和 夹层自重将同时施加到下组关键层结构。因此,载荷 P_1 包括下组关键块 B_1 自重和两组关键层夹层自重 之和(R_4)及"上位砌体梁"结构关键块 B_2 对夹层的 作用力(R_5)。

下组关键块 B₁ 自重和夹层自重为

$$R_4 \approx (h_1 + h_4) b L_1 \gamma \tag{5}$$

根据文献[17]可得,上组关键块 B₂ 传递的作用 力为

$$R_5 = \left[2 + \frac{L_2 \cot(\varphi + \beta - \theta)}{2(h_5 - W_2)}\right] P_2 \qquad (6)$$

式中, φ 为岩块间摩擦角,(°); P_2 可根据文献[16]中 P_1 的计算方法进行确定。

由式(5)和(6)可得
$$B_1$$
自重及载荷为
 $P_2 = R_2 + R_2 = (h_1 + h_2)hL_2 \chi +$

$$\left[2 + \frac{L_2 \cot(\varphi + \beta - \theta)}{2(h_5 - W_2)}\right] P_2$$
(7)

由式(1)~(4)和式(7)可得,控制顶板双关键层 大周期来压所需的支架工作阻力为

$$P_{\max} = R_{1} + R_{2} + R_{3} = \left(lh_{2} + l_{k}h_{3} + \frac{1}{2}h_{3}^{2}\cot\alpha\right)b\gamma + \left[1 - \frac{h_{1}}{\sin\beta}\cos(\beta - \theta) + \frac{L_{1}}{2}\cos\theta\right] + \frac{h_{1}}{2}\cos\theta + \frac{h_{1}}{2}\cos\beta + \frac{h_{1}}{2}\cos$$

3.2.2 下组关键层小周期来压顶板结构分析

当"双关键层"结构中下组关键层破断而上组关 键层破断滞后时,上、下关键层形成离层(图7),阻隔 了上部载荷的传递。此时,工作面支架载荷主要取决 于下组关键层结构自身的稳定性,来压步距和压力较 小,形成小周期来压。

通过上述分析可知,"上位砌体梁"结构关键块 B₂ 对夹层没有作用力,下组关键块 B₁ 的上覆载荷仅 为两组关键层夹层的自重,此时有

$$P_1 = R_4 \approx (h_1 + h_4) b L_1 \gamma \tag{9}$$

由式(1)~(4)和式(9)可得,控制顶板下组关键 层小周期来压所需的支架工作阻力为

$$P_{\min} = R_1 + R_2 + R_3 = \left(lh_2 + l_k h_3 + \frac{1}{2} h_3^2 \cot \alpha \right) b\gamma +$$



图 7 小周期来压顶板结构与支架载荷模型

Fig. 7 Roof structure model of small periodic weighting

$$\begin{bmatrix} 1 - \frac{h_1}{\sin\beta}\cos(\beta - \theta) + \frac{L_1}{2}\cos\theta \\ \frac{h_1}{\sin\beta}\sin(\beta - \theta) - W_1 - 0.5a \end{bmatrix}$$

$$(h_1 + h_4)bL_1\gamma \qquad (10)$$

4 支架合理支护阻力确定

4.1 支架初撑力确定

实测表明,大采高工作面支架初撑力普遍较大。 初撑力不足,容易造成片帮冒顶等事故,初撑力过度 则会导致工作阻力增加过快,容易造成过载。因此, 确定合理的支架初撑力十分重要。

大采高工作面等效直接顶厚度大,支架的初撑力 至少需满足平衡等效直接顶静载,考虑到支护效率及 安全,可以留有一定的富余系数。

由式(3)和式(4)可得支架初撑力为

$$P' = K(R_2 + R_3) = K \left(lh_2 + l_k h_3 + \frac{1}{2} h_3^2 \cot \alpha \right) b\gamma$$
(11)

式中,K为富余系数,可取1.1~1.2。

4.2 支架工作阻力确定

近浅埋煤层工作面顶板双关键层同步破断时,支 架载荷较大,形成大周期来压。上组关键层滞后下组 关键层破断时,支架载荷较小,形成小周期来压。因 此,支架选型设计应以控制大周期来压为准。

根据文献[7],关键块 C_1 和 C_2 回转下沉量为 $W_1 \approx W_2 = m - (K_P - 1) \sum h_i$,岩石碎胀系数 $K_P =$ 1.3, θ 很小可忽略不计,tan φ 取 0.5^[18],取 0.5a=0。 代入式(8),大周期来压时支架工作阻力应为

$$P_{\max} = \left(lh_2 + l_k h_3 + \frac{1}{2} h_3^2 \cot \alpha \right) b\gamma + \\ \begin{bmatrix} 1 & -\frac{h_1 \cot \beta + \frac{L_1}{2}}{2(h_1 - m + 0.3 \sum h_i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (h_1 + h_4) bL_1 \gamma - \frac{h_1 \cot \beta + \frac{L_1}{2}}{2(h_1 - m + 0.3 \sum h_i)} \end{bmatrix}$$

$$2P_{2} + \frac{L_{2}\cot(\varphi + \beta)}{2(h_{5} - m + 0.3\sum h_{i})}P_{2} \right]$$
(12)

考虑支护效率,则合理的支架工作阻力为

$$P_{\rm s} = \frac{p_{\rm max}}{\mu} \tag{13}$$

式中, μ为支架的支护效率, 可取 0.9。

4.3 实例分析

根据神东补连塔煤矿 22303 工作面 3 个钻孔柱 状判别,发现覆岩存在"双关键层"结构^[19]。以此工 作面为例,进行双关键层结构大小周期来压的支架工 作阻力计算。该工作面采高 m = 6.8 m, 基岩平均容重取 $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$,下组关键块长度(小周期来压步 距) $L_1 = 13.2 \text{ m}, 上组关键块长度(大周期来压步)$ 距) $L_2 = 25.0 \text{ m},等效直接顶厚度 <math>\sum h_i = 17.3 \text{ m},$ 等 效直 接 顶 "短 悬 臂 梁"长度 $l = 11.8 \text{ m}, h_1 =$ 10.2 m, $h_2 = 14 \text{ m}, h_3 = 3.3 \text{ m}, h_4 = 4.6 \text{ m}, h_5 =$ 8.7 m, $P_2 = 4.052 \text{ kN/}梁$ 。

工作面采用郑煤 ZY16800/32/70D 型液压支架, 支架宽度 b=2.05 m,支架控顶距 $l_k=6.62 \text{ m}$ 。岩层 破断角 $\beta=65^{\circ}$,岩块间摩擦角 $\varphi=27^{\circ}$,富余系数 K=1.2,下层等效直接顶破断角 $\alpha=60^{\circ}$ 。将以上参数代 入式(11)~(13),得出支架初撑力为 11 696 kN/架, 工作阻力为 17 560 kN/架。

实践表明,现场采用支架的额定工作阻力为16800kN/架,在部分区域略显不足,理论计算与现场实际基本吻合。

5 结 论

(1)近浅埋煤层大采高工作面支架载荷随采高的增大而增大,支架初撑力为工作阻力的75%,工作 面存在大小周期来压,大周期来压步距约为小周期来 压步距的2倍。随采高增大,顶板垮落带变厚,等效 直接顶厚度增大。直接顶静载所占比例增大,支架静 载增加,动载系数不大。

(2)根据等效直接顶对采空区的充填程度,顶板 "双关键层"结构分为两类:"双砌体梁"结构和"斜台 阶岩梁-砌体梁"结构,后者是近浅埋煤层采场常见 的结构形态。

(3)"双关键层"结构中,下位斜台阶岩梁结构失 稳形成小周期来压,上下两组关键层结构叠合失稳引 起大周期来压。大周期来压步距大,来压强度大,是 工作面最危险的状态。

(4)基于实测和双关键层结构分析,给出了支架 合理初撑力及工作阻力的计算公式。通过实例验证, 表明理论计算结果与实际符合,可为类似工作面顶板 控制和支架选型提供依据。

参考文献(References):

[1] 黄庆享. 神府浅埋煤层的矿压特征与浅埋煤层定义[J]. 岩石力
 学与工程学报,2002,21(8):1174-1177.
 HUANG Qingxiang. Ground pressure behavior and definition of shall

low seams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002,21(8):1174–1177.

 [2] 张书敬,张亮,解兴智.浅埋厚基岩坚硬顶板煤层初采强来压原 理分析[J].煤矿开采,2014,19(6):98-102.
 ZHANG Shujing, ZHANG Liang, XIE Xingzhi. Analysis of strong

weighting in initial mining shallow-buried coal-seam under thick basement and hard roof [J]. Coal Mining Technology, 2014, 19(6): 98–102.

[3] 宋选民,顾铁凤,闫志海.浅埋煤层大采高工作面长度增加对矿 压显现的影响规律研究[J].岩石力学与工程学报,2007, 26(S2):4007-4012.

SONG Xuanmin, GU Tiefeng, YAN Zhihai. Effects of increasing working face's length on underground pressure behaviors of mining super high faces under shallow coal seam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2):4007-4012.

[4] 许家林,朱卫兵,鞠金峰. 浅埋煤层开采压架类型[J]. 煤炭学报,2014,39(8):1625-1634.

XU Jialin, ZHU Weibing, JU Jinfeng. Supports crushing types in longwall mining of shallow seams [J]. Journal of China Coal Society, 2014,39(8):1625-1634.

- [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,2000:139-150.
- [6] 黄庆享. 采场基本顶初次来压的结构分析[J]. 岩石力学与工程 学报,1998,17(5):521-526.
 HUANG Qingxiang. Structural analysis of main roof stability during

HUANG Qingxiang. Structural analysis of main roof stability during first weighting in long wall face [J]. Journal Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(5):521–526.

[7] 黄庆享,钱鸣高,石平五.浅埋煤层顶板周期来压结构分析[J]. 煤炭学报,1999,24(6):581-585.

HUANG Qingxiang, QIAN Minggao, SHI Pingwu. Structural analysis of main roof stability during periodic weighting in long wall face[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6):581–585.

- [8] 黄庆享,张沛. 厚砂土层下顶板关键块上的动态载荷传递规律
 [J].岩石力学与工程学报,2004,23(24):4179-4182.
 HUANG Qingxiang,ZHANG Pei. Study on dynamic load distribution on key roof block in shallow seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(24):4179-4182.
- [9] 弓培林,靳钟铭.大采高综采采场顶板控制力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(1):193-198.
 GONG Peilin, JIN Zhongming. Mechanical model study on roof control for fully-mechanized coal face with large mining height[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 193-198.
- [10] 闫少宏,尹希文,许红杰,等.大采高综采顶板短悬臂梁-铰接 岩梁结构与支架工作阻力的确定[J].煤炭学报,2011,36

(11):1816-1820.

YAN Shaohong, YIN Xiwen, XU Hongjie, et al. Roof structure of short cantilever-articulated rock beam and calculation of support resistance in full-mechanized face with large mining height[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(11):1816–1820.

[11] 鞠金峰,许家林,王庆雄.大采高采场关键层"悬臂梁"结构运动型式及对矿压的影响[J].煤炭学报,2011,36(12):2115-2120.

JU Jinfeng, XU Jialin, WANG Qingxiong. Cantilever structure moving type of key strata and its influence on ground pressure in large mining height work face [J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(12):2115-2120.

- [12] 马龙涛. 近浅埋煤层大采高工作面等效直接顶破断机理与支架 载荷研究[D]. 西安: 西安科技大学,2013:30-33.
 MA Longtao. Study on mechanism of structure of equivalent immediate roof derumpent and surpport load of large mining height in fully mechanized mining face of nearly shallow seam[D]. Xi'an; Xi'an University of Science and Technonlogy,2013:30-33.
- [13] 唐朋飞. 浅埋煤层大采高工作面顶板结构及其稳定性研究 [D]. 西安:西安科技大学,2014:29-32.

TANG Pengfei, Shallow seam and large mining height working face roof structure and stability research [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2014:29-32.

[14] 黄庆享,马龙涛,董博,等.大采高工作面等效直接顶与顶板结构研究[J].西安科技大学学报,2015,35(5):543-546.

HUANG Qingxiang, MA Longtao, DONG Bo, et al. Study on equivalent immediate roof and roof structure of large mining height face [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2015, 35(5):543-546.

[15] 王锐军.浅埋煤层大采高综采工作面覆岩结构与来压机理研究 [D].西安:西安科技大学,2013:29-38.

> WANG Ruijun. Shallow seam and large mining height fully-mechanized working face overburden structure and pressure mechanism research[D]. Xi' an Xi' an University of Science and Technology, 2013:29-38.

[16] 黄庆享,周金龙. 浅埋煤层大釆高工作面矿压规律及顶板结构 研究[J]. 煤炭学报,2016,41(S2):279-286.

> HUANG Qingxiang, ZHOU Jinlong. Roof weighting behavior and roof structure of large mining height longwall face in shallow coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2):279-286.

- [17] 钱鸣高,石平五,许家林.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国 矿业大学出版社,2010:104-108.
- [18] HUANG Qingxiang. Experimental investigation on friction and squeezing of roof structure key blocks corner upon long-wall face
 [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005,12(2):102-105.
- [19] 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 superlarge mining height [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8):1547–1556.