

文章编号:0253-9993(2013)10-1749-07

基载比对薄基岩厚表土煤层工作面矿压的影响

李福胜,张 勇,许力峰

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院,北京 100083)

摘 要:为研究薄基岩厚表土煤层工作面矿压显现规律,以李家豪煤矿为背景,对工作面基本顶结构进行了稳定性分析,并运用数值模拟软件 UDEC 对工作面在不同基载比条件下的矿压显现规律进行分析,结合工作面现场实测数据,分别提出依据岩块块度 i 和基载比判断工作面基本顶结构的稳定性。分析认为,基本顶初次破断后岩块的三铰拱结构及触矸后的单斜结构在煤壁处发生滑落失稳区域的块度范围为 $0.40 \leq i \leq 1.57$;基载比小于 0.9 时,覆岩在初次来压与周期来压时易发生滑落失稳现象;薄基岩厚表土煤层关键层出现滑动失稳破坏,工作面来压时对于煤壁前方的应力影响区域不大;薄基岩厚表土煤层工作面来压时主要特征为顶板沿煤壁切落,形成台阶下沉,工作面支架动载明显。

关键词:基载比;薄基岩;矿压;稳定性

中图分类号:TD322 **文献标志码:**A

Influence of ratio of basement and loadings on mining face rock pressure in thin basement rock thick surface soil

LI Fu-sheng, ZHANG Yong, XU Li-feng

(School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: For studying the regularity of strata behavior in mining face in thin bedrock with thick surface soil, the stability of structure of main roof were analyzed based on Lijiahao Coal Mine, and numerical simulation software UDEC was used to analyze the regularity of strata behavior in mining face under different ratio of rock and loadings, combined with field measurement of mining coal, block degree of rock i and ratio of rock and loadings were separately put forward to judge the stability of structure of main roof. It was considered analysis that the three-hinge arch structures formed after main roof breaking and the monoclinic structure formed after contacting waste rock of main roof will occur sliding instability when the block degree of rock i is more than 0.40 and less than 1.57; overburden also takes place sliding instability phenomenon easily when first weighting or periodic weighting of the main roof comes; key strata represents sliding instability in thin bedrock with thick surface soil, while it is not large of the ground pressure of regional in front of coal wall when the roof weighting comes; during the roof weighting coming, the regularity of strata behavior in thin bedrock with thick surface soil is that main roof cuts and splits along the coal wall, and emerges roof steps, the dynamic load action on face shield comes obviously.

Key words: ratio of basement and loadings; thin basement rock; rock pressure; stability

我国薄基岩、厚表土的煤层储量较大,如神东煤田,探明储量 223.6 Gt,占全国探明储量的 1/5,神东煤田埋藏浅、基岩薄、上覆厚松散层是煤层典型的赋

存特征。薄基岩厚表土煤层工作面由于控制其覆岩移动变形的关键岩层较薄,且通常为单一关键层,故其矿压显现的影响因素及矿压显现规律表现出与一

收稿日期:2013-07-10 责任编辑:常 琛

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2013CB227900)

作者简介:李福胜(1964—),男,内蒙古察右中旗人,高级工程师,博士研究生。E-mail: lifusheng@shenhua.cc

般工作面不同的特点。神东矿区的生产实践表明,薄基岩厚表土煤层长壁工作面普遍出现台阶下沉现象,支架压毁,矿压显现剧烈,因而顶板岩层控制具有特殊性。国内一些学者在“砌体梁”理论的指导下,对此进行了深入研究,分析了薄基岩厚表土煤层顶板的破断及运移规律,指导了许多现场实践^[1-10]。然而,关于薄基岩厚表土煤层顶板结构的稳定性判断依据的研究还相对较少,笔者通过对薄基岩厚表土煤层工作面基本顶结构的稳定性分析,并结合现场地质资料进行数值模拟,对薄基岩厚表土煤层工作面矿压显现规律进行分析研究。

1 薄基岩厚表土煤层工作面基本顶结构稳定性分析

工作面煤层基岩断裂后所形成的关键岩块的稳定程度决定了整个砌体梁结构的稳定性。关键岩块以稳定转动形态在开采前后经历了初期破断、触矸回转、砌体稳定 3 个过程^[1];在非稳定状态下,关键块易出现滑落失稳(未触矸前即发生逆向回转,易造成沿煤壁的整体滑移)和回转失稳(铰接点受到压力被挤坏挤碎,会发生突然逆向回转出现切落,在支架后方发生台阶下沉)^[2,11-14]。

(1)初期破断的三角拱结构:由于分步开挖在岩梁中部下面造成的拉应力损伤的慢慢积增,使得基本顶初次断裂后出现不对称性,远离工作面一方的岩块长度一般小于靠近一方的,如图 1 所示。通过神东矿区煤层现场观测和模拟分析,基本顶关键岩层断裂岩块的非对称长度比为 1.3 ~ 1.5。

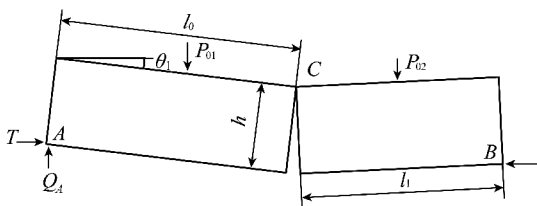


图 1 基本顶初次破断后三角拱力学模型

Fig. 1 Mechanical model of triangular arch after main roof first weighting

水平力 T 为

$$T = \frac{2KP}{(1+K)^2(1-\sin\theta_1)} \quad (1)$$

垂直力 Q_A 为

$$Q_A = \frac{(K^2 + 3K)P}{2(1+K)^2} \quad (2)$$

式中, P 为竖向力, $P=P_{01}+P_{02}$; K 为前后岩块的长度比(取 1.3 ~ 1.5)。

若要使基本顶断裂岩块在煤壁处不发生滑落失

稳,必须满足条件^[5]:

$$T \tan \varphi \geq Q_A \quad (3)$$

式中, $\tan \varphi$ 为破断岩块间的摩擦因数。

由此可得出

$$i \leq \frac{4}{K+3} \tan \varphi + \sin \theta_1 \quad (4)$$

θ_1 值取决于煤壁的刚度,刚度越大, θ_1 值越接近 0,则要求块度 $i \leq 0.34 \sim 0.54$ 。神东矿区煤层硬度较大,起始回转角小于 3° ,则关键层岩块度 $i \leq 0.4$ 时不发生滑落失稳。

(2)触矸回转后的单斜岩体结构:基本顶断裂岩体接触底板后,形成一个单斜结构,岩块回转角 θ_1 达到最大值 $\theta_{1\max}$ 。则水平力 T 以下式计算^[15-16]:

$$T = \frac{(1 + 2i \tan \theta_{1\max}) \tan \varphi'}{2(1 - \tan \varphi' \tan \theta_{1\max})^2} P_{01} \quad (5)$$

垂直力 Q_A 为

$$Q_A = \left[1 - \frac{1 + 2i \tan \theta_{1\max}}{2(1 - \tan \varphi' \tan \theta_{1\max})^2} \right] P_{01} \quad (6)$$

式中, $\tan \varphi'$ 为岩块与矸石的摩擦因数。

防止单斜岩块结构触矸后的单斜结构发生滑落失稳需满足式(3),由此得

$$i = \frac{1 - \tan \varphi' \tan \theta_{1\max}}{(1 - \tan \varphi' \tan \varphi) \tan \theta_{1\max}} - \frac{1}{2 \tan \theta_{1\max}} \quad (7)$$

其中, $\theta_{1\max}$ 一般为 10° 左右,则要防止滑落失稳需满足 $i \geq 1.57$ 。

基于上述对基本顶关键层初次断裂后的三角拱结构的稳定性和基本顶触矸后的单斜岩块结构稳定性研究与计算,基本顶初次破断后岩块的三角拱结构及触矸后的单斜结构在煤壁处出现滑落失稳的区域为 $0.40 \leq i \leq 1.57$ 。

表 1 汇总了神东矿区薄基岩厚表土煤层在不同基岩厚度条件下块度计算结果^[5]。

表 1 基岩在不同厚度条件下的块度

Table 1 Bedrock blockness size of different thicknesses

基岩厚度/m	直接顶厚度 h /m	初次断裂长度 L /m	周期断裂长度 l /m	前后岩块长度比 K	块度 i^*
30	7	75	18	1.40	0.67
45	10	100	25	1.30	0.71
60	15	120	30	1.25	0.90
75	15	120	30	1.25	0.90
90	20	136	38	1.20	0.96

注: * 块度预计公式 $i = [(K+1)h]/(Kl)$, K 取 1.0 ~ 1.5。

由表 1 可知,神东矿区薄基岩厚表土煤层上覆岩层的初次断裂后形成的三角拱结构和基本顶触矸后的单斜结构极易出现滑落失稳。

2 基载比对薄基岩厚表土煤层工作面矿压显现影响

为了研究薄基岩厚表土工作面上覆岩层发生滑落失稳及回转失稳的发生的条件,依据基载比的大小并结合李家壕矿现场数据资料进行模拟分析。

对于薄基岩厚表土煤层工作面,开采工艺、开采方法、工作面推进速度等都影响其矿压的显现规律,

而基岩与表土厚度是影响其矿压显现的关键因素,由表 1 可知,基岩厚度越大,块度 i 越大,故基岩与松散载荷层厚度之比(基载比 J_z)对于工作面顶板破断运动形式,是否发生滑落失稳及出现顶板台阶下沉现象,垮落带和断裂带发育情况,工作面来压步距及支架阻力等均具有决定性作用。

表 2 为神东矿区不同基载比工作面矿压显现规律总结。

表 2 不同基载比工作面矿压显现

Table 2 Working face strata behaviors of different ratio of basement and loadings

工作面	顶板组成			来压步距			支架阻力/(kN·架 ⁻¹)		台阶下沉/mm	
	基岩层/m	载荷层/m	J_z	初次/m	周期/m	D_z	初撑力	工作阻力	初次	周期
C202	17.3	48.3	0.36	24.0	7.56	3.20	30×6	234.6×6		458
1203	18.0	32.0	0.56	27.0	12.00	1.26	2 012	2 800	1 000	架后
1209	23.2	31.5	0.73				2 012	2 800		1 000
20601	45.0	42.5	1.06	35.4	11.10	1.16	4 728	5 283	很小	很小
20604	42.6	61.4	0.69	54.2	14.60	1.58	3 666	5 063	200	100

注: D_z 为动载系数。

为了研究基载比对工作面矿压显现规律的影响,应用 UDEC 数值模拟软件建立不同类型基载比煤层工作面数值模型,并通过开挖运行计算对基载比对于薄基岩厚表土煤层工作面矿压显现影响研究提供依据。

2.1 UDEC 数值模型

通用离散元程序 UDEC (Universal Distinct Element Code) 是一个处理不连续介质的二维离散元程序。

根据薄基岩厚表土煤层工作面开采经验,分别建

立 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 四种基载比条件工作面模型,研究其顶板运动及来压规律。以李家壕煤矿地质资料为模板,构建长 260 m、高随基载比而变、地层水平的二维平面 UDEC 模型,其岩层物理力学参数见表 3,模型中网格的大小与尺寸根据不同岩性而定。在模型上部施加约 5 MPa 的垂直向下的上部岩层自重载荷,模型前后侧面施加侧压系数为 1 的荷载,同时侧边界施加水平约束,底边界施加水平及垂直约束。地应力平衡时,围岩本构关系采用 Mohr-Coulomb 模型。

表 3 岩体物理力学参数

Table 3 Rock mass mechanics parameters

岩性	厚度/m	弹性模量 B /GPa	剪切模量 S /GPa	抗拉强度 σ_t /MPa	黏聚力 C /MPa	内摩擦角 φ /(°)	密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
松散表土	22	20.0	14.2		5.0	15	
风化砂岩	14	11.5	9.5	3.2	4.3	10	2 630
粗砾砂岩	9	1.9	1.21	6.0	4.3	45	2 810
泥岩	4	4.5	1.73	1.4	2.0	23	2 500
中粒砂岩	2	37.5	9.5	3.2	4.3	33	2 630
细粒砂岩	6	40.8	20.2	6.7	3.4	31.5	2 710
粉砂岩	6	30.3	13.0	3.0	9.6	33	2 660
2-2 中煤层	2	2.3	2.0	0.6	1.8	27	1 470
泥岩	9	4.3	3.9	1.0	3.5	31	2 500
砂质泥岩	10	6.3	6.9	1.1	2.0	35	2 630

2.2 基载比对矿压显现影响

工作面推进过程中,通过分步每 2.0 m 开挖一次

来模拟采动的影响,记录开挖过程的来压步距及覆岩移动变化情况,笔者选取基本顶初次来压与开挖

100 m 时的岩层移动特征来说明。

观察不同基载比条件下工作面直接顶初次垮落,发现 4 种条件下直接顶初次垮落具有相同的特征:工作面在推进至约 12 m 时直接顶粉砂岩发生垮落,充填采空区,垮落高度为直接顶厚度 6 m,直接顶和基本顶之间出现较大空间,基本顶并未产生明显的断裂变形,如图 2 所示。

不同基载比条件下工作面初次来压覆岩移动破坏情况如图 3 所示。

观察模拟过程中工作面顶板矿压特征,结合图 3,4,将 4 种条件下工作面矿压显现规律总结见表 4。

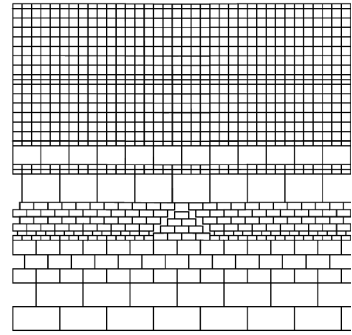


图 2 直接顶初次垮落

Fig. 2 Initial caving of immediate roof

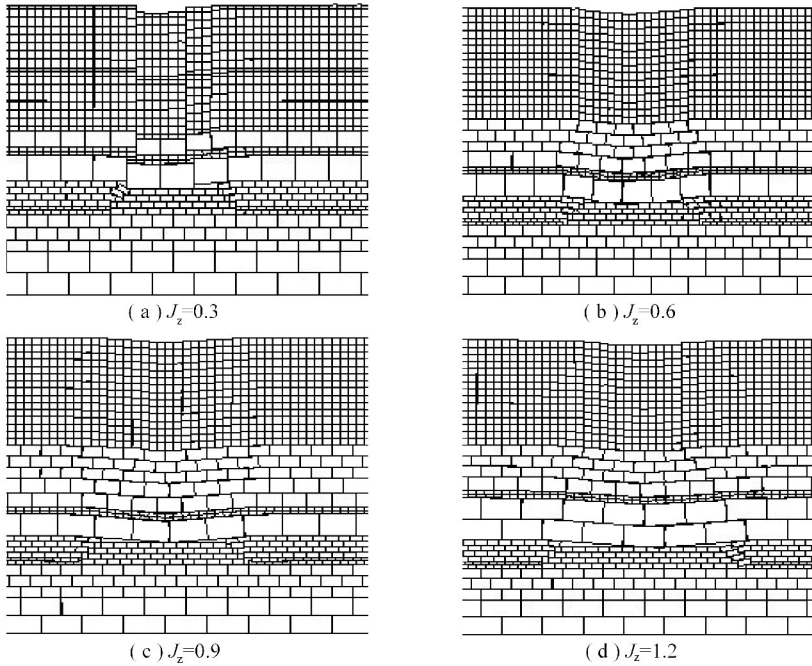


图 3 不同基载比条件下基本顶初次来压时覆岩移动

Fig. 3 Overburden movement and destruction of different ratio of basement and loadings when main roof first weighting

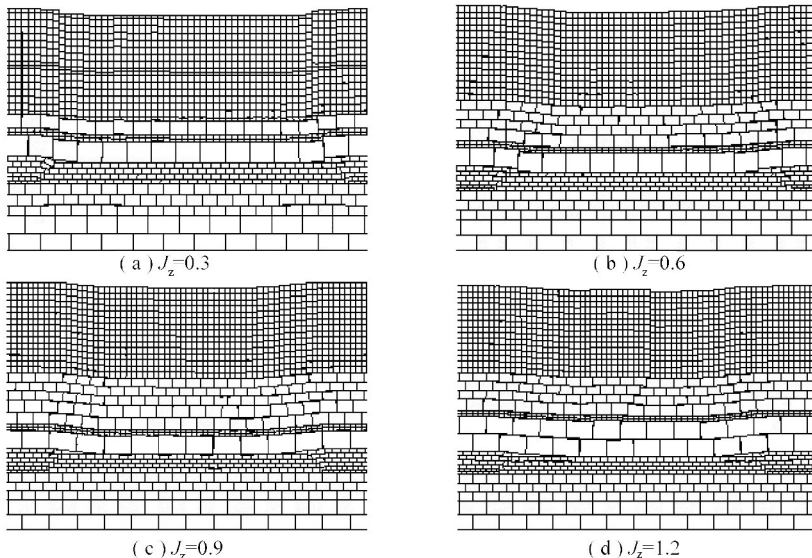


图 4 不同基载比条件下工作面推进 100 m 时覆岩移动

Fig. 4 Overburden movement and destruction of different ratio of basement and loadings when working face advancing to 100 m

表 4 不同基载比下工作面矿压特征

Table 4 Characteristics of the ground pressure under different ratio of basement and loadings

参数	基载比 J_z			
	0.3	0.6	0.9	1.2
初次来压步距/m	30	40	45	50
初次来压特征	三角拱结构发生明显滑落失稳,台阶下沉	三角拱滑落失稳,出现台阶,但无明显下沉	形成稳定三角拱结构,未出现滑落失稳	形成稳定三角拱结构
周期来压步距/m	15	20	25	30
周期来压特征	单斜岩块滑落失稳,出现直至地表切落	同 $J_z=0.3$	单斜岩块出现轻微台阶,未出现直至地表切落	形成稳定单斜结构,与一般工作面规律相似

图 4 为不同基载比下工作面推进 100 m 时的覆岩移动情况。结合图 3,4 分析可知,基载比为 0.3 和 0.6 条件下工作面周期来压时基本顶均发生了台阶下沉现象,基载比为 0.9 时基本顶发生轻微下滑,基载比为 1.2 时基本顶岩层与一般工作面具有相同的回转特征。

通过以上模拟监测总结了不同基载比下对应基岩岩块块度及基岩是否发生台阶下沉、台阶下沉量大小,见表 5。

表 5 不同基载比下顶板台阶下沉量

Table 5 Roof sidestepped subsidence under different ratio of basement and loadings

参数	基载比 J_z			
	0.3	0.6	0.9	1.2
块度 i	0.82	0.57	0.42	0.33
是否发生台阶下沉	是	是	轻微	否
台阶下沉量(初次)/mm	1 872	935	很小	很小
台阶下沉量(周期)/mm	1 926	1 811	542	很小

基载比为 0.3 和 0.6 时,基岩出现台阶下沉量大,并且基载比为 0.3 时的下沉量和基载比为 0.6 时的周期下沉量接近全煤采厚,即已发生整体切落;基载比为 0.9 及以上时,台阶下沉量很小甚至不出现台阶下沉,基岩以稳定转动形态形成整体稳定的砌体梁结构,经历了初期断裂、触研回转、砌体稳定过程。

故对于薄基岩厚表土煤层工作面,基载比 0.9 为基岩是否发生沿煤壁台阶下沉现象的界限,基载比小于 0.9 时,基岩初次断裂后的块度处于岩块三角拱结构及触研后的单斜结构在煤壁处发生滑落失稳的范围以内,覆岩易发生滑落失稳现象;基载比的判据为薄基岩厚表土煤层工作面现场安全开采、来压过程、支架选型及支架工作面阻力大小等判断提供依据。

2.3 煤层及顶板垂直应力分布规律

以基载比为 0.6 为对象,模拟时通过分别在推进过程中煤层及基本顶内设置测线,并每隔 5 m 布置一

个测点,对模拟过程中煤层开挖时煤层及顶板垂直应力变化进行监测记录,后期整理去除少数不符合数据,做出煤层及顶板岩体内垂直应力分布曲线,如图 5 所示。分析曲线变化规律得出:

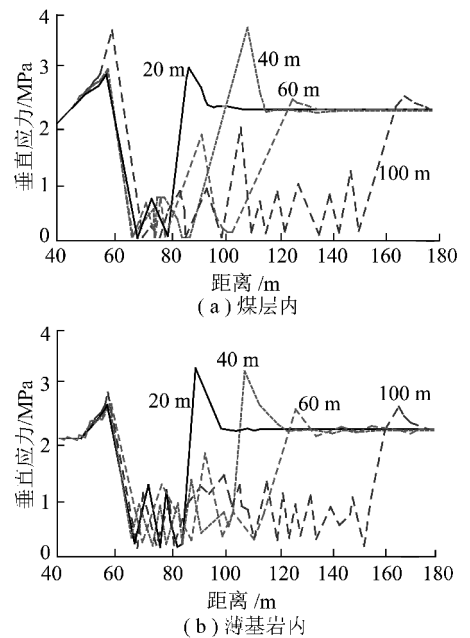


图 5 工作面推进过程中围岩垂直应力分布

Fig. 5 Vertical stress distribution of surrounding rock during working face advancing

(1)工作面开挖推进至约 40 m,工作面煤壁及其顶板前方有明显的应力增高现象,表明工作面出现了初次来压,此时基岩及上覆松散表土层发生完全垮落,而基岩未出现完整整体切落。

(2)工作面开挖推进至约 60 m,工作面煤壁及其顶板前方应力集中现象不明显,基本顶出现初次整体切落,由于基岩发生滑落失稳现象,导致工作面前方的应力影响区域并不大,这与实际测试的结果基本相符。

(3)工作面开挖推进至约 100 m,由图 5 中可以看出随着煤层的开挖基本顶关键层每推进约 20 m 时会出现周期式切落现象。

3 现场观测分析

根据李家壕煤矿 2-2 中煤层综合柱状图,如图 6 所示,作为单一关键层的细砂岩,基岩与载荷之比约为 0.67,符合基载比 $J_z = 0.6$ 时的矿压显现类型,在工作面推进过程中基岩有发生失稳滑落的可能。

柱状	岩性	厚度/m
	细砂岩	18.0
	2-2上煤	2.58
	细砂岩	7.00
	2-2中煤	2.02
	泥岩	6.75
	2-2下煤	1.54
	砂质泥岩	18.89
	3-1上煤	1.50
	砂质泥岩	6.41
	3-1号煤	3.86
	砂质泥岩	6.00

图 6 李家壕煤矿煤层柱状图

Fig. 6 Histogram of coal seam of Lijiahao Coal Mine

从工作面开切眼起,在李家壕煤矿 2-2 中煤层 11208 工作面开展了 2 个月的现场的矿压监测,监测点布置示意如图 7 所示。

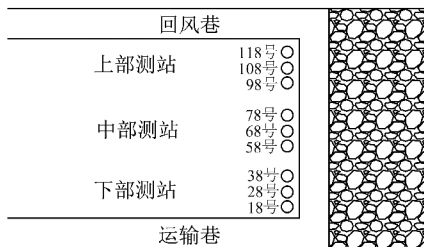


图 7 测点布置示意

Fig. 7 Schematic diagram of monitoring point arrangement

在工作面设置 3 个观测站,每个观测站选出 3 架数据较合理的支架作为代表输出数据,对所观测的数据进行整理并处理,如基本顶的初次来压、周期来压,以及支架工作阻力和动压系数等。具体观测结果见表 6。

通过对上表所统计数据的统计分析得出:① 工作面初次来压步距约为 37 m,来压时主要表现出工作面顶板沿煤壁切落,造成台阶下沉,来压剧烈,顶板下沉量约为 350~1 400 mm。② 周期来压步距约为 15.5~24.0 m,平均为 20.5 m,来压过程历时不长;来压时支架动载明显,动压系数最大达到了 2.2,其主要原因为工作面基本顶岩层重力直接作用在支架

上所造成。

表 6 李家壕煤矿 11208 工作面来压观测结果
Table 6 Pressure change observation results of 11208 working face in Lijiahao Coal Mine

来压次数	来压步距/m	持续时间/d	来压支架平均工作阻力/kN	动压系数
初次来压	37.0	3	6 462	2.20
第 1 次周期来压	16.8	3	6 014	1.65
第 2 次周期来压	24.0	5	6 111	1.73
第 3 次周期来压	21.5	4	6 258	1.62
第 4 次周期来压	18.2	3	5 995	1.81
第 5 次周期来压	15.5	2	6 122	1.66
第 6 次周期来压	19.0	2	6 337	1.79

4 结 论

(1) 基本顶初次破断后岩块的三角拱结构及触研后的单斜结构在煤壁处发生滑落失稳区域的块度范围为 $0.40 \leq i \leq 1.57$ 。

(2) 基载比 0.9 为基岩是否发生沿煤壁台阶下沉现象的界限,基载比小于 0.9 时,基岩初次断裂后的块度处于岩块三角拱结构及触研后的单斜结构在煤壁处发生滑落失稳的范围以内,覆岩易发生滑落失稳现象;基载比的判据为薄基岩厚表土煤层工作面现场安全开采、来压过程、支架选型及支架工作面阻力大小等判断提供依据。

(3) 厚表土煤层关键层出现滑动失稳破坏,工作面来压时对于煤壁前方的应力影响区域并不大。

(4) 薄基岩厚表土煤层工作面来压时主要特征为顶板沿煤壁切落,形成台阶下沉,工作面支架动载明显。

参考文献:

- [1] 钱鸣高,缪协兴,许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报,1996,21(3):225-230.
Qian Minggao, Miao Xiexing, Xu Jialin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(3):225-230.
- [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,2003:202-211,280-293.
Qian Minggao, Shi Pingwu. Mining pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003: 202-211, 280-293.
- [3] 侯忠杰. 组合关键层理论应用研究及参数确定[J]. 煤炭学报,2001,26(6):611-615.
Hou Zhongjie. Study on application of combinatorial key stratum theory and parameters determining, [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(6):611-615.

- [4] 侯忠杰. 断裂带基本顶的判别准则及在浅埋煤层中的应用[J]. 煤炭学报, 2003, 28(1): 8-12.
Hou Zhongjie. The criterion on determining main roof in breaking zone and its application to the shallow seam. [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(1): 8-12.
- [5] 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 blocks of under thick sandy soil stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4179-4182.
- [6] 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, 6(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, 6(S1): 2700-2706.
- [7] 侯忠杰. 浅埋煤层关键层研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(4): 359-362.
Hou Zhongjie. Study on key stratum in shallow seam. [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(4): 359-362.
- [8] 石平五, 侯忠杰. 神府浅埋煤层顶板破断运动规律[J]. 西安矿业学院学报, 1996, 16(3): 203-207.
Shi Pingwu, Hou Zhongjie. Law of roof breaking movement of shallow seams in Shenfu CMA[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1996, 16(3): 203-207.
- [9] 黄庆享. 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 shallow seams. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1174-1177.
- [10] 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 longwall face [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6): 581-585.
- [11] 张东升, 刘玉德, 王旭锋. 沙基型浅埋煤层保水开采技术及适用条件分类[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009: 49-58.
Zhang Dongsheng, Liu Yude, Wang Xufeng. Shallow coal seam water protection mining techniques and applicable conditions [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2009: 49-58.
- [12] 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 blocks of under thick sandy soil stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4179-4182.
- [13] 任艳芳, 齐庆新. 浅埋煤层长壁开采围岩应力场特征研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1612-1618.
Ren Yanfang, Qi Qingxin. Study on characteristic of stress field in surrounding rocks of shallow coalface under long wall mining [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1612-1618.
- [14] 谷拴成, 李昂. 浅埋薄基岩厚煤层覆岩移动演化规律数值模拟研究[J]. 煤炭工程, 2012(3): 67-70.
Gu Shuancheng, Li Ang. Study on numerical simulation of overburden strata migration evolution law above thick seam in shallow depth thin base rock [J]. Coal Engineering, 2012(3): 67-70.
- [15] 郝桐生. 理论力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 115-121.
Hao Tongsheng. Theoretical mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 115-121.
- [16] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 209-214.
Sun Xunfang, Fang Xiaoshu, Guan Laitai. Mechanics of materials [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 209-214.