

文章编号:0253-9993(2013)06-0977-05

# 基于岩体破裂规律的下沉系数变化

张广伟<sup>1,2</sup>,李凤明<sup>1,2</sup>,李树志<sup>2</sup>,邓喀中<sup>3</sup>

(1. 中国煤炭科工集团有限公司 煤炭科学研究总院,北京 100013;2. 中国煤炭科工集团有限公司 唐山研究院,河北 唐山 063012;3. 中国矿业大学 环境与测绘学院,江苏 徐州 221116)

**摘要:**采动岩体是一个运动变化的过程,根据其结构演化特征,建立了岩体运动破坏模型。而后根据采动岩体的运动破断规律,研究了岩体下沉系数衰减指数与单位长度断裂块数间的相互关系,并进一步根据现场矿压观测资料,回归出了不同岩性岩体垮落步距与采深之间的函数关系,进而通过推导得出了下沉系数与采深和岩性影响系数间的关系式。计算结果表明:下沉系数随着采深的增大而减小,近似呈负对数关系;不同岩性条件下下沉系数也不相同,岩性越硬,下沉系数越小,岩性越软,下沉系数越大。

**关键词:**岩体破裂规律;下沉系数;采深;衰减指数

**中图分类号:**TD327 **文献标志码:**A

## Change of subsidence factor on the law of rock mass rupture

ZHANG Guang-wei<sup>1,2</sup>, LI Feng-ming<sup>1,2</sup>, LI Shu-zhi<sup>2</sup>, DENG Ka-zhong<sup>3</sup>

(1. China Coal Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corp., Beijing 100013, China; 2. Tangshan Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corp., Tangshan 063012, China; 3. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The rock mass is change during mining, according to their evolutionary characteristics, the model of movement and destruction of rock mass was built up. Then the authors researched on the correlation between attenuation index of mass subsidence factor and the breaking number of unit length rock according to the law of the rock mass rupture. After that, we gained the functional relationship between the fracture length of rock mass and the mining height by regression fitting using of underground measurement data of field observation, at the while, we derived to confirm the relationship formula of subsidence factor with the mining height and influence coefficient of lithology. The results show that the subsidence factor decreases with the increase of the mining height, which approximately presents the negative logarithmic function relationship between them, and under different lithology, subsidence factor has different value: the harder the mass, the smaller the value, vice versa.

**Key words:** law of rock mass rupture; subsidence factor; height of mining; attenuation index

地下煤层的开采破坏了原岩应力,使岩体产生移动与变形<sup>[1]</sup>,造成覆岩的垮落、断裂、损伤和弯曲,进而产生地表沉陷。目前,在开采沉陷预计参数的确定方面(特别是下沉系数)还主要依赖于现场实测,然而该方法需要耗费大量的人力、财力,周期较长,无法满足急需,而且一个矿山采用一个下沉系数与实际存在较大出入。郭文兵等综合考虑影响下沉系数的多

种影响因素,建立了下沉系数的人工神经网络计算模型,提高了选择下沉系数的精确度,但此方法对样本的要求较高,不同的样本值可能导致较大的偏差<sup>[2]</sup>。赵兵朝等针对金属矿山开采矿体形态多变的特点,应用关键层断裂后的两种结构形态(即固支与简支岩梁模型)研究了地表下沉系数的变化,认为当覆岩中存在较厚坚硬关键层时,下沉系数将呈分段函数关系

出现,能够解释地表产生非连续变形的原因,但对于岩体的运动过程及断裂规律未作进一步研究<sup>[3]</sup>。由于影响地表下沉的因素较为复杂(如地表松散层厚度、岩性、断层、节理、开采深度等)<sup>[4-6]</sup>,并且有些因素是随机的、模糊的,难以用数学或力学方法全面而准确地描述,所以只能给出一定的经验公式。本文将尝试从采动覆岩结构破坏规律出发,分析不同采深与岩性条件下的下沉系数的变化特点以及相互关系。

## 1 采动岩体的运动破断模型

一般来讲,煤层采出后,煤层顶板及上覆岩层自下而上将依次出现冒落、岩体断裂、损伤破坏及弯曲变形等。

关于采动覆岩的结构运动形式,我国专家学者提出了“悬臂梁”结构、“砌体梁”结构和“传递岩梁”结构模型等<sup>[7-10]</sup>,这些结构学说有其特定的适用条件,实际上,采动覆岩运动是一个结构动态变化的过程<sup>[11-14]</sup>,其变化模型可用图 1~4 表示。在图 1 中,当开采范围较小时,岩梁表现出较强的两端固支的悬臂梁结构运动特点,岩梁中部在上覆载荷的作用下发生弹性弯曲下沉;在图 2 中,当开采范围进一步扩大,岩梁中间和固支的两端发生损伤,产生破坏裂隙,当悬臂岩梁达到该条件下的极限跨距时,岩梁在压剪作用下沿损伤裂隙面发生断裂,形成两段简支的铰接岩梁<sup>[15-16]</sup>;在图 3 中,随着开采范围的持续扩大,简支的铰接岩梁发生回转,并在工作面推进方向继续产生新的断裂岩梁,使先前的简支岩梁变成两端铰接的岩块,当岩块的回转变形达到一定程度而铰接力作用无法平衡岩块自重时,岩体将发生冒落,冒落下来的岩块堆砌在一起,形成了具有支撑作用的砌体梁;图 4 中,在砌体梁的作用下,推进方向上呈铰接态的岩块继续向工作面方向传递上覆岩体的载荷作用,形成了具有一定周期性的传递岩梁。

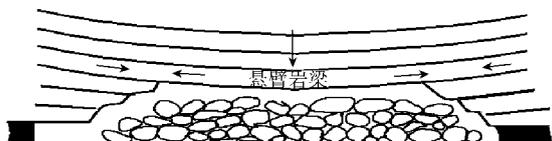


图 1 悬臂岩梁模型

Fig. 1 Cantilever rock beam model

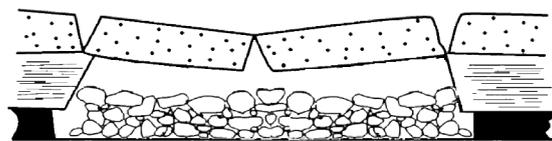


图 2 铰接岩梁模型

Fig. 2 Hinged rock beam model

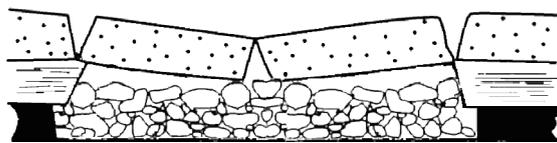


图 3 砌体梁模型

Fig. 3 Voussoir beam model

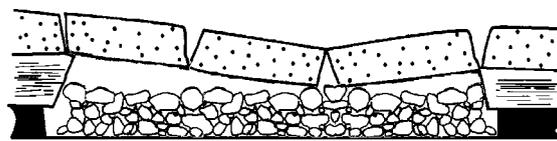


图 4 传递岩梁模型

Fig. 4 Transmission rock beam model

综合岩体的运动过程,拟对开采过程中岩体结构的运动及破坏作如下假设:

(1)采动覆岩的运动过程按时间先后分为 4 个阶段,即弹性弯曲阶段、损伤破坏阶段、铰接断裂阶段、冒落堆砌阶段。岩体自下而上运动,按破坏后的导水程度可覆岩分为三带:岩层移动垮落带、断裂带和弯曲下沉带。

(2)对同一水平岩层在相同标高断裂块度相同,且采深越小,断裂块度越大,断裂后的岩块以铰接方式连接。

(3)当铰式连接所构成的块链达到一定长度(极限跨距)时,即岩块间的铰接作用无法维持岩块的自重平衡时,岩块将垮落堆砌,形成具有一定支撑作用的砌体梁结构。

根据上述假设,建立了岩体运动的结构模型,如图 5 所示。

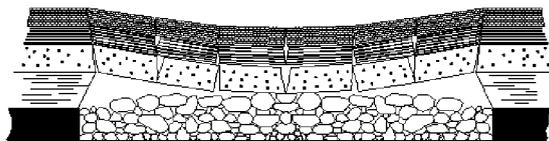


图 5 岩体运动破坏结构模型

Fig. 5 Structure model of rock mass about motion and destruction

## 2 下沉衰减指数与岩体破坏的关系

实践表明,采动岩体的下沉量与支撑岩层的破断程度有关,断裂的块数越少,岩体下沉量越小,当断裂块数达到某一数值时,下沉值达到该地质采矿条件下的最大值,不同断裂块数下沉量之差与最大下沉值的比值(即下沉系数衰减指数)与岩体断裂块数间有着较密切的关系。

根据上述岩体结构的运动破断模型,应用有限元软件模拟了岩梁加载断裂试验,得到了单位长度岩体

断裂块数与下沉系数衰减指数之间的对应数值(实际当中由于岩体不是各向同性,各向均一体所得的数值与计算机模拟结果会有一定偏差),见表1。

表1 下沉衰减指数与岩体不同断裂块数间的对应关系  
Table 1 Under different breaking number of unit length corresponding to subsidence attenuation of unit length

分组序号	单位长度断裂块数 $N$	下沉系数衰减指数 $I_q$
1	1	0.340
2	3	0.200
3	5	0.118
4	7	0.081
5	9	0.061
6	11	0.048
7	13	0.040
8	15	0.034
9	17	0.029
10	19	0.025

对表1的数据进行了拟合,其拟合与实验结果如图6所示。由图6的拟合结果可以得到单位长度块数与岩体下沉系数衰减值间的函数关系:

$$I_q = \frac{0.626}{N^{1.004}} - 0.0076 \quad (1)$$

表2 不同采深条件下岩体垮落步距实测统计

Table 2 Caving span of rock mass under different mining height

序号	所在矿山	采厚	采深	断裂步距	序号	所在矿山	采厚	采深	断裂步距
1	孙疃矿	3.40	440.3	23.78	18	梁家煤矿	2.00	460.0	13.50
2	纳林庙二矿	5.30	150.0	65.00	19	梅花井煤矿	3.40	90.0	47.00
3	补连塔煤矿	6.00	120.0	54.00	20	大同煤业一矿	6.00	340.0	36.50
4	淮南张集矿	3.62	420.0	23.60	21	何庄煤矿	3.00	726.0	17.00
5	朱仙庄煤矿	8.90	400.0	28.00	22	张集煤矿	1.41	760.0	25.00
6	开元煤矿	4.23	365.0	25.70	23	神东矿区	3.80	65.0	64.00
7	韩家湾矿	4.50	130.0	38.00	24	神东矿区	4.00	57.5	73.00
8	刘家梁矿	5.00	370.0	30.00	25	赵庄煤矿	4.00	95.0	35.70
9	刘桥一矿	2.93	465.5	23.90	26	风水沟煤矿	2.85	350.0	26.00
10	李雅庄煤矿	3.50	616.0	14.00	27	上湾煤矿	5.30	150.0	53.84
11	斜沟矿	4.50	165.0	41.20	28	塔山煤矿	3.35	425.0	26.00
12	祁东煤矿	1.79	585.0	28.00	29	朱庄煤矿	2.60	390.0	35.00
13	济二矿	3.08	140.0	56.70	30	贺西矿	1.58	323.5	25.00
14	南梁煤矿	2.00	65.0	71.00	31	许厂煤矿	4.00	450.0	27.20
15	亭南矿	1.50	170.8	40.00	32	丁家渠煤矿	2.70	80.0	55.00
16	印度 PVK 矿	3.00	84.0	65.00	33	峙峰山煤矿	8.00	288.0	45.00
17	寺河矿	4.20	412.0	20.20					

根据表2中的数据,对岩体垮落步距  $S$  与开采深度  $h$  的关系进行了回归拟合,其实测与拟合曲线如图7所示。

根据拟合结果,得到了岩体垮落步距与开采深度

其中,  $N$  为单位岩体断裂块数,无量纲。回归相关系数  $R=0.999$ 。

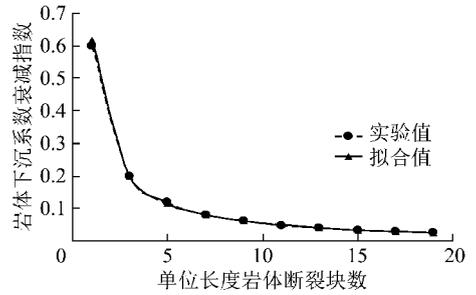


图6 岩体断裂块数与下沉衰减指数的关系

Fig. 6 Relationship between the number of fault blocks and subsidence attenuation index

式(1)说明单位长度岩体断裂块数与下沉系数衰减指数近似呈分式函数关系。

### 3 采动岩体断裂尺度与采深间的关系

大量的现场矿压观测资料表明,岩体的断裂尺度与采深存在密切的关系,一般来讲采深越大,断裂块度越小。因此,对国内多个矿山在一定开采深度条件下的基本顶垮落步距进行了统计,数据见表2。

间的回归关系式:

$$S = -18.469 \ln h + 139.42 \quad (2)$$

其中,  $h$  为开采深度,  $m$ 。回归相关系数  $R=0.86$ 。

分析发现,不同硬度的岩体,其岩体垮落步距有

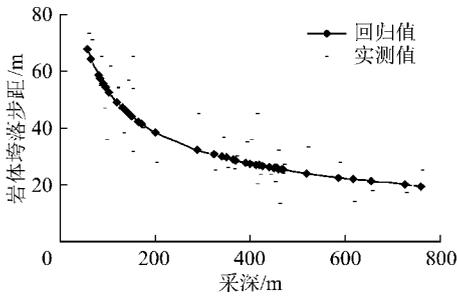


图7 岩体垮落步距与开采深度间的关系

Fig. 7 Relationship between the caving span of rock mass and mining height

所差别,岩体越硬,垮落步距越大,岩体越软,垮落步距越小。为此,根据不同硬度岩体对其影响的程度确定了岩体硬度影响系数 $Y$ 值,并根据硬度划分标准,对其进行了归类,其中 $Y=[0.7 \sim 1.3]$ , $Y=[0.7 \sim 0.9]$ 代表软岩, $Y=[0.9 \sim 1.1]$ 代表中硬岩体, $Y=[1.1 \sim 1.3]$ 代表坚硬岩体,则式(2)变为

$$S = Y(-18.469 \ln h + 139.42) \quad (3)$$

由式(3)可以看出,岩体垮落步距与采深之间呈负对数关系。

#### 4 采深与下沉系数间的关系

由于式(1)中的 $N$ 是百米断裂块数值,所以 $N$ 与垮落步距 $S$ 之间有如下关系:

$$N = 100/S \quad (4)$$

将式(3),(4)代入式(1),得到下沉系数衰减指数与采深间的关系,即

$$I_q = 0.006 [Y(-18.469 \ln h + 139.42)]^{1.004} - 0.0076 \quad (5)$$

根据式(5),绘制了下沉系数衰减指数随采深的变化曲线,如图8所示。

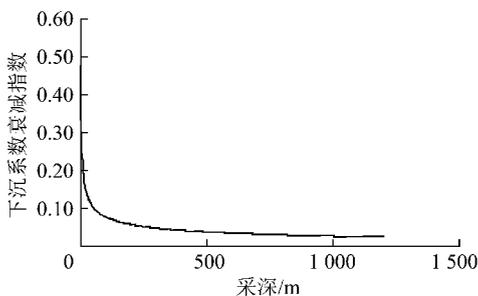


图8 下沉系数衰减指数与采深的关系曲线

Fig. 8 Relationship between subsidence attenuation index and mining height

令式(5)等于0,分别得到不同岩性条件下的下沉系数衰减极限深度,并根据不同采深岩体下沉系数衰减指数值计算了不同岩性条件下的下沉系数衰减率,并假定充分采动条件下煤层顶板充分冒落,其下

沉系数定为1,计算结果见表3。

表3 不同岩体结构条件下的下沉系数衰减率计算结果  
Table 3 Results of subsidence attenuation index under different structure of rock mass

项目	坚硬覆岩	中硬覆岩	软弱覆岩
极限衰减深度/m	1 810	1 781	1 701
下沉系数衰减率	0.000 678	0.000 565	0.000 452

由此得到了不同开采深度条件下的地表下沉系数,见表4。

表4 不同采深与岩性条件下地表下沉系数回归统计  
Table 4 Regression results of subsidence attenuation index under different mining heights and lithologies

采深/m	下沉系数		
	坚硬覆岩	中硬覆岩	软弱覆岩
50	0.96	0.97	0.98
150	0.90	0.92	0.93
200	0.86	0.89	0.91
250	0.83	0.86	0.89
300	0.80	0.83	0.86
350	0.76	0.80	0.84
400	0.73	0.77	0.82
450	0.69	0.75	0.80
500	0.66	0.72	0.77
550	0.63	0.69	0.75
600	0.59	0.66	0.73
650	0.56	0.63	0.71
700	0.53	0.60	0.68
750	0.49	0.58	0.66
800	0.46	0.55	0.64

由表4可知,采深越小,下沉系数越大,采深越大,下沉系数越小,当采深达到一定数值时,地下开采对地表的影 响较小。所以对于深部开采来说,虽然有高地压和 高地热等问题,但如能充分利用大采深小下沉的 优势,再加上一定的特殊开采方法(如充填开采 或条带开采),就能够较好地控制地表的移动变 形,从安全采出“三下”压煤。

值得一提的是,表4中所计算的下沉系数,是按岩块断裂后的极限下沉考虑的,所以采场达不到充分采动时,上述系数要适当减小。其值与采场大小的关系,还有待进一步的分析研究。

由于受地下采矿和地表移动观测站设置等因素的影响,目前深部充分开采条件下地表岩移规律的实测研究成果较少,有待进一步的深入研究。

#### 5 结 论

(1) 岩体块度越小,下沉系数衰减指数越小,岩

体块度越大,下沉系数衰减指数越大,且二者之间近似呈分式函数关系。

(2) 采深越大,岩体垮落步距越小,采深越小,垮落步距越大,二者之间近似呈负对数关系。

(3) 下沉系数随着采深的增大而减小,覆岩越坚硬,地表下沉系数越小,覆岩越软弱,下沉系数越大。

## 参考文献:

- [1] 何国清,杨伦,凌赓娣,等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1991:20-37.  
He Guoqing, Yang Lun, Ling Gengdi, et al. Mining subsidence theory [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1991:20-37.
- [2] 郭文兵,邓喀中,邹友峰. 地表下沉系数计算的人工神经网络方法研究[J]. 岩土工程学报,2003,25(2):212-215.  
Guo Wenbing, Deng Kazhong, Zou Youfeng. Study on artificial neural network method for calculation of subsidence coefficient[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2):212-215.
- [3] 赵兵朝,余学义. 金属矿层开采地表下沉系数研究[J]. 金属矿山,2010(3):126-128.  
Zhao Bingchao, Yu Xueyi. Metal seam mining subsidence coefficient [J]. Metal Mine, 2010(3):126-128.
- [4] 李凤明,梁京华. 厚冲积层矿区地表移动参数与地质采矿条件之间的关系及其特点[J]. 煤炭科学技术,1996,34(3):29-33.  
Li Fengming, Liang Jinghua. The relationship between the surface displacement parameters and the geological and mining conditions and its characteristics [J]. Coal Science and Technology, 1996, 34(3):29-33.
- [5] 邓喀中. 开采沉陷中的岩体结构效应[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1998:1-16.  
Deng Kazhong. The rock mass structure effect in mining subsidence [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1998:1-16.
- [6] 邹友峰. 地表下沉系数计算方法研究[J]. 岩土工程学报,1997,19(3):109-112.  
Zou Youfeng. Subsidence coefficient calculation method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(3):109-112.
- [7] 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.
- [8] 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.  
Qian Minggao, Shi Pingwu, Xu Jialin. Mining pressure and strata control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010.
- [9] 钱鸣高,缪协兴,许家林,等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2000.  
Qian Minggao, Miao Xiexing, Xu Jialin, et al. Theory of key strata control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2000.
- [10] 宋振骥. 实用矿山压力控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1988:1-133.  
Song Zhenqi. Practical ground pressure control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1988:1-133.
- [11] 谢广祥,王磊. 综放工作面煤层及围岩破坏特征的采厚效应[J]. 煤炭学报,2010,35(2):177-181.  
Xie Guangxiang, Wang Lei. Thickness effects of fracture characteristics of coal seam and surrounding rocks in fully mechanized top-coal caving face [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2):177-181.
- [12] 刘纯贵. 马脊梁煤矿浅埋煤层开采覆岩活动规律的相似模拟[J]. 煤炭学报,2011,36(1):7-11.  
Liu Chungui. Similar simulation study on the movement behavior of overlying strata in shallow seam mining in Majiliang Coal Mine [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1):7-11.
- [13] 伍永平,解盘石,王红伟,等. 大倾角煤层开采覆岩空间倾斜砌体结构[J]. 煤炭学报,2010,35(8):1252-1256.  
Wu Yongping, Xie Panshi, Wang Hongwei, et al. Incline masonry structure around the coal face of steeply dipping seam mining [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8):1252-1256.
- [14] 侯忠杰. 对浅埋煤层“短砌体梁”、“台阶岩梁”、结构与砌体梁理论的高榷[J]. 煤炭学报,2008,33(11):1201-1204.  
Hou Zhongjie. Concept of both short voussoir beam and step beam in shallow seam and voussoir beam theory [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(11):1201-1204.
- [15] 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.
- [16] 史红,姜福兴. 采场上覆大厚度坚硬岩层破断规律的力学分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(18):3066-3069.  
Shi Hong, Jiang Fuxing. Mechanical analysis of rupture regularity of hard and massive overlying strata of longwall face [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18):3066-3069.