

文章编号: 1000-7598 (2011) 02-0533-04

采动覆岩裂隙分布及其空隙率特征

宋颜金, 程国强, 郭惟嘉

(山东科技大学 矿山灾害预防控制教育部重点实验室, 山东 青岛 266510)

摘 要: 利用弹性薄板理论和关键层理论, 对采空区上覆岩层的下沉进行定量描述, 研究采动影响下覆岩裂隙的分布特征, 得到了基于相对下沉量的覆岩规则移动带空隙率的近似公式。研究表明, 覆岩裂隙场内, 裂隙数量分布以两边为多, 中部较少, 在关键层下部的岩层往往产生较大的离层空间; 随着岩层深度减小, 空隙率逐渐变小, 覆岩底部, 空隙率曲线沿走向呈现马鞍状, 在关键层或者硬岩起作用的区域形态发生改变, 曲线形态逐渐变成拱状。其结论可应用于岩体渗流研究及瓦斯综合治理。

关 键 词: 采空区; 离层裂隙; 分布规律; 空隙率; 瓦斯治理

中图分类号: TD 325

文献标识码: A

Study of distribution of overlying strata fissures and its porosity characteristics

SONG Yan-jin, CHENG Guo-qiang, GUO Wei-jia

(Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control of Education Ministry,
Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China)

Abstract: Based on elastic thin plate theory and key strata theory, the stratum subsidence was described quantitatively. The characterization of fissures distribution in overlying strata under the influence of mining is studied. Then, an approximate formula of porosity in the regular movement zone of overlying strata along strikes is achieved. The results show that the amount of the fissures on both sides of fissure field is more than that in central area, while the bigger separation appears below the key strata. The porosity is lessening along with the decreasing of depth. Generally, the curve of porosity of bottom area in mining overburden takes on a saddle shape; and the change is located around the key strata or hard rocks. The porosity curve of top area along the strikes is symmetric arched. The conclusions can be applied to the research of rock mass seepage and the comprehensive gas control.

Key words: goaf; overlying strata fissure; distribution law; porosity; gas control

1 前 言

采空区覆岩裂隙的产生和扩展都是与采动影响下岩层运动分不开的。通过探讨覆岩下沉规律来研究裂隙分布, 进而分析采空区空隙渗透特性, 为研究采场瓦斯运移规律及瓦斯综合治理提供重要参量。

在已有的成果中, 钱鸣高^[1]、许家林^[2]、李树刚^[3]等在关键层理论指导下, 运用模型试验、图像分析、离散元模拟等方法对覆岩采动裂隙分布特征进行了研究和量化分析, 提出了关键层破断的岩层下沉拟合公式和采动裂隙分布的主要规律; 于广明、苏仲杰等^[4]从力学和结构角度描述了裂隙区域

的拱形结构, 利用能量法的稳定准则给出了离层的挠曲值; 宋振骥^[5]、姜福兴等^[6-7]、尹增德^[8]等对不同岩性的顶板进行分类和力学计算, 从工程的角度对覆岩的运动进行控制, 通过注水实测等手段给出了裂隙发育高度的采冒比和采裂比; 李向阳等^[9]采用数值模拟和相似模拟对采空区覆岩变形规律做了对比研究; 程久龙等^[10]利用测地雷达技术进行了探测地下采空区的研究, 较好地反映了采空区的空间分布。

本文利用弹性薄板理论推导离层的挠曲值, 结合砌体梁的拟合曲线公式, 得到覆岩规则移动区域岩层的下沉量表达式, 并给出一个基于相对下沉量的空隙率沿走向变化规律的计算方法。

收稿日期: 2009-10-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 基金项目 (No. 2005CB221504); 国家自然科学基金重点资助项目 (No. 50534080); 国家自然科学基金资助项目 (No. 50874070)。

第一作者简介: 宋颜金, 男, 1983 年生, 硕士研究生, 主要从事矿山岩石动力学方面的研究。E-mail: qqcheng12@gmail.com

2 裂隙场内岩层下沉量的表述

煤炭开采是一个二次应力分布的过程和一个动态的过程。为了研究方便,在采空区的时空尺度上,本文采用准静态作为研究的力学过程。二次应力影响范围内,覆岩存在状态有垮落、断裂、弯曲,在断裂岩层和弯曲岩层中,在上、下位岩层之间产生离层现象。

考虑冒落带上部的规则移动带^[4],分为竖向裂隙带和离层裂隙带。规则移动带内岩层沿层理裂开形成离层(离层裂隙),并在拉应力作用下产生大量的垂直或者斜交于岩层的裂隙(破断裂隙)。当其以竖向裂隙为主,可以采用砌体梁下沉公式描述;以离层裂隙为主,则采用弹性薄板理论计算。

2.1 规则移动带岩层下沉量的计算

竖向裂隙岩层下沉量采用关键层下沉的拟合公式^[3]计算,即

$$w_i = w_m \left(1 - e^{-\frac{x}{2l_i}} \right) \quad (1)$$

式中: w_m 为岩层基本稳定后的下沉量(允许下沉量); l_i 为岩层的破断距离; i 取值取决于岩层层数和工作面推进的距离。

离层裂隙是不随下部关键层一起运动的岩层在自重和其他应力作用下产生的挠曲裂隙,其中自重应力是主要作用。离层裂隙多位于竖向裂隙区域以上的位置,可用弹性薄板理论^[12]给出适当的边界条件计算其下沉量:

$$w_i = \frac{\rho g t \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 1 \right)}{8D \left(\frac{3}{a^4} + \frac{2}{a^2 b^2} + \frac{3}{b^4} \right)} \quad (2)$$

式中:抗弯刚度 $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$; 平面问题中 y 值为常数; a 、 b 为岩层走向跨度和倾向长度; ρ 为该岩层密度; t 为岩层厚度; g 为重力加速度。

式(1)、(2)的适用范围一般采用实际测量的采裂比 λ ^[8]进行区分,即离层裂隙带和竖向裂隙带的分界线距离底板 λh_0 (h_0 为采高)。要定量求出各岩层变形稳定后的下沉量,还需要确定在采动影响下覆岩的裂隙场空间中随工作面的推进岩层的破断距离 l_i 和跨距 a 。

2.2 岩层跨距及其破断距离的计算

根据孔洞在无限域内的受力分布情况^[11],利用压力拱形态作为裂隙场空间边界是比较适合的。

拱迹线方程可由下式确定^[4]:

$$q_0 x^2 = 2sfq_2 z + \left[\frac{(q_2 - q_1)}{h} + 2q_1 z^2 \right] \left[\frac{(2q_2 + q_1)}{3(q_2 + q_1)} \right] \quad (3)$$

式中: H 为采深; $q_0 = \gamma(H-h)$; $q_1 = \lambda\gamma(H-h)$; $q_2 = \lambda\gamma H$; f 为煤、岩石坚固性系数; s 、 h 为拱的形态参数, s 在不考虑煤壁塑性破坏区的情况下可以取为工作面推进距离, h 为拱高,二者的对应关系为 $x = \pm s$, $z = h$ 。

根据式(3),解出工作面推进 s 时的拱高 h ,进而确定出拱内某岩层跨度 a ,即 $z = h_m$ (研究区域距煤层的距离)时,

$$a = 2x = 2\sqrt{-\frac{\lambda(3H-h)h}{3(H-h)(2H-h)}h_m^2 + 2\frac{\lambda(3H-h)}{3(2H-h)}h_m^2 + 2\frac{sf\lambda H}{H-h}h_m} \quad (4)$$

岩层的破断距离可以取为 $l_i = \frac{a}{s}l$ (l 为顶板来压步距)。

3 基于相对下沉量采动裂隙分布规律

根据下沉表达式(1)、(2),确定出各岩层挠曲线分布之后,结合式(4)得出邻近岩层相对下沉量的表达式 Δw_i ,若目标范围内岩层中心距为 h_i ,该范围的沿走向空隙率 n_i 为

$$n_i = \frac{\Delta S_{\text{空隙}}}{\Delta S_{\text{区域}}} = (2 - \bar{K}_p) \frac{\Delta w_i \Delta x}{\Delta x h_i} = (2 - \bar{K}_p) \frac{\Delta w_i}{h_i} \quad (5)$$

式中: Δw_i 为目标范围内的岩层上下边界挠度差值; Δx 为沿走向单位长度; $\bar{K}_p$ 为区域平均碎胀系数; 当 h_i 足够小时,可以认为 n_i 是该点的空隙率,这个空隙率不考虑原生裂隙,下面给出一个计算实例。

某矿工作面的实际地质状况:煤层平均厚度为2.9 m,采深500 m;工作面长1 520 m,宽210 m;煤层变异系数为27%,可采系数为99%。煤层结构简单,局部含炭质泥岩夹矸一层。顶板以泥岩为主,8线以东多为砂岩及少量石英砂岩,底板为泥岩及砂质泥岩。覆岩各层的计算参数见表1。

利用式(1)、(2)得到工作面推进180 m时 $D \sim J$ 各层的下沉量,如图1所示。随着工作面逐步推进,裂隙逐渐从下往上发展。从图1中可以看出,随着岩层所处深度减小,覆岩各层的下沉量也在减少,底部的几个岩层两边的空隙较多, F 岩层起了关键层的作用, F 层下离层空间较大, F 层及其上覆层弯曲下沉量较少且差别不大,表明这些岩层是由关键层 F 的运动控制的。

表1 各岩层的计算参数
Table 1 Parameters of overlying strata

各层 编码	岩层深度 /m	岩层厚度 /m	弹性模量 /GPa	密度 /(g/cm ³)	碎胀 系数	泊松比
D	496	4	0.5	1.80	1.30	0.10
E1	494	4	2.0	2.20	1.50	0.23
E2	489	5	2.0	2.50	1.35	0.26
F	482	5	60.	2.60	1.32	0.34
G	476	3	4.0	2.95	1.34	0.38
H	473	3	2.5	2.20	1.50	0.25
I1	469	4	3.0	2.50	1.37	0.25
I2	465	4	3.0	2.50	1.60	0.26
J	450	20	20.0	3.00	1.60	0.38

注: 应用计算式(1)、(2)时, 若两层硬岩之间存在软弱岩层, 其运动形式与下层硬岩相同。

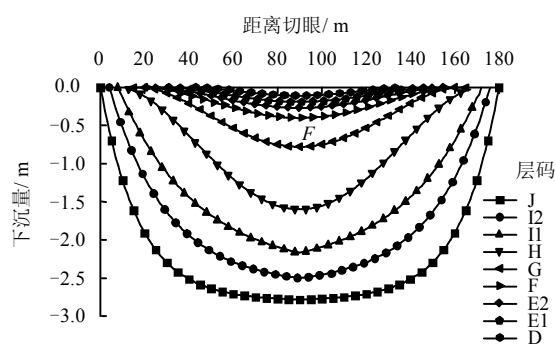


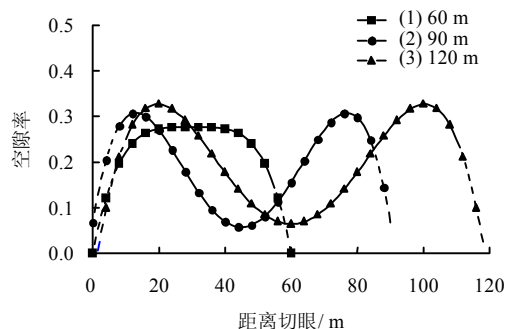
图1 工作面推进 180 m 时各个岩层的下沉量曲线

Fig.1 Subsidence curves of overlying strata in caving 180 m

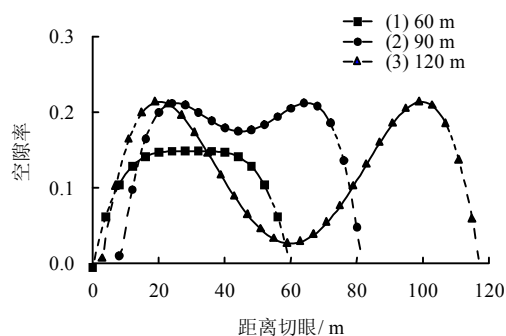
根据式(5), 得到采深 500 m 工作面推进 60、90 m 和 120 m 的不同深度区域空隙率沿走向变化规律, 如图 2 所示。从图 2 可以看出, 由于岩层运动形式不同, 各个区域空隙率随工作面推进的分布规律是不一样的。裂隙场的底部, 容易产生贯通的周边竖向裂隙, 而中部往往被垮落的岩石压实; 随岩层深度减小, 裂隙空间逐步向岩层中部靠近。从图 2(a)可见, 靠近煤层上部的岩层区域, 在工作面推进 60 m 时, 由于覆岩未大面积垮落, 该区域空隙率曲线沿走向呈现拱形; 随着工作面的推进, 覆岩不断垮落, 表征为跨度中心空隙率不断降低, 而靠近两端空隙率逐步升高, 呈现鞍状分布。图 2(b)体现了 489 m 岩层附近随工作面推进空隙率的演化规律, 可以明显看出空隙率曲线的拱形向鞍形转变的过程。一定的工作面推进距离下, 亚关键层 F 在控制其下部岩层区域空隙率曲线转变时产生重要作用。

4 空隙率近似计算公式

把式(2)、(3)代入式(5)中, 借鉴上节的结果和实际情况, 各个区域平均空隙率的曲线在 4 次



(a) 496 m 岩层



(b) 489 m 岩层

图2 采深 500 m 不同岩层区域平均空隙率随工作面推进演化曲线

Fig.2 The evolution curves of porosities in different overlying strata along different caving distances with mining depth of 500 m

多项式下充分满足基本形状特征^[13], 因此本文提出如下采动影响规则移动带空隙率的近似计算公式:

$$n_i = Ax^4 + Bx^2 + C \quad (6)$$

式中: n_i 为岩层规则移动区域空隙率, 区域范围由区域上下边界的岩层控制; x 为煤层开挖走向, 原点位于工作面推进长度中点, 通过坐标转换可以将原点切换到切眼处; 系数 A 、 B 、 C 由各岩层参数控制。

当 $H_i < H_0 - \lambda h_0$ 时,

$$n_i = \frac{\bar{\gamma}H}{Ea^4}x^4 + 4\frac{Hh_0}{sH_i} \quad (7)$$

式中: $\bar{\gamma}$ 为覆岩平均重度; H 为采深; h_0 为采高; H_i 为区域距地表高度; s 为工作面推进距离; E 为区域弹性模量的平均值; a 为本区域走向跨度; λ 为采裂比^[8], 一般受工作面推进距离和(亚)关键层控制。

当 $H_i \geq H_0 - \lambda h_0$ 时,

$$n_i = -\frac{x^4}{384l_i^4} + \frac{x^2}{24l_i^2} + \frac{w_m}{4l_i} \quad (8)$$

式中: $\bar{l}_i$ 为岩层区域破断长度。

参照现场情况, 不考虑重复采动对切眼处的影响, 近似公式的曲线在采空区的空隙率变化比较符合实际, 本文提出的近似计算公式是较为合理的, 但理论计算采取的弹性假设与实际可能有所差距。下一步的研究从弹塑性假设入手, 利用 Visual Basic 编程^[14]实现上述公式的图形以及计算的可视化, 输出不同工况下采空区空隙变化情况的实用公式和可视化曲线形态。

5 结 论

(1) 采场覆岩存在不同的运动形式, 利用弹性薄板理论可以描述离层裂隙空间, 利用砌体梁力学模型导出的拟合曲线可以来描述竖向裂隙空间。裂隙场内, 裂隙数量分布以两边较多, 中部较少; 在离层裂隙区域, 处于关键层下部岩层往往产生较大的离层空间。

(2) 由于岩层运动形式不同, 各个区域的空间率沿走向分布是不一样的。采动影响的底部岩层区域, 空隙率较大, 空隙率曲线沿走向呈现马鞍状; 随着岩层区域深度的减少, 空隙率逐渐变小, 空隙率在关键层起作用的区域存在曲线形态改变, 空隙率曲线逐步呈现拱状。

(3) 本文给出了不同工作面推进距离下覆岩规则移动区域空隙率沿走向的近似计算公式(6)。该公式可以应用于采空区瓦斯运移规律研究、卸压开采及离层区充填等领域。

(4) 根据采空区覆岩规则移动带空隙率拟和公式, 利用编程手段, 可以得到不同工况下的采空区空隙变化情况的实用公式和可视化曲线形态, 其结果与理论推导结果较为相符。

参 考 文 献

- [1] 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: 111—135.
- [2] 许家林, 钱鸣高. 关键层运动对覆岩及地表移动影响的研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(2): 122—126.
XU Jia-lin, QIAN Ming-gao. Study on the influence of key strata movement on subsidence[J]. *Journal of China Coal Society*, 2000, 25(2): 122—126.
- [3] 李树刚, 钱鸣高, 石平五. 综放开采覆岩离层裂隙变化及空隙渗流特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 604—607.
LI Shu-gang, QIAN Ming-gao, SHI Ping-wu. Study on bed-separated fissures of overlying stratum and interstice permeability in fully-mechanized top coal caving[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(5): 604—607.
- [4] 苏仲杰. 采动覆岩离层变形机理研究[博士学位论文 D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2001.
- [5] 宋振骐. 实用矿山压力控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988.
- [6] 姜福兴. 薄板力学解在坚硬顶板采场的适用范围[J]. 西安矿业学院学报, 1991, (2): 12—19.
JIANG Fu-xing. Application range of thin plate mechanics solution in hard roof and workface[J]. *Journal of Xi'an Mining Institute*, 1991, (2): 12—19.
- [7] 姜福兴, 王同旭, 潘立友, 等. 矿山压力及其控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [8] 尹增德. 采动覆岩破坏特征及其应用研究[博士学位论文 D]. 青岛: 山东科技大学, 2007.
- [9] 张安兵, 刘新侠, 高井祥, 等. 基于经验模式分解和相空间重构的采空区地表动态变形混沌性态及时变规律研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3191—3196.
ZHANG An-bing, LIU Xin-xia, GAO Jing-xiang, et al. Law of time-dependent deformation and chaos characteristics of goaf surface based on empirical mode decomposition and phase space reconstruction technique[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(10): 3191—3196.
- [10] 程久龙, 胡克峰, 王玉和, 等. 测地雷达探测地下采空区的研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 1): 79—82.
CHENG Jiu-long, HU Ke-feng, WANG Yu-he, et al. Research on detecting of underground mined-out areas by using GPR[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(Supp.1): 79—82.
- [11] 陈子荫. 围岩力学分析中的解析方法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994.
- [12] 吴家龙. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 316—357.
- [13] 陈新明, 胡新娇. 关于四次函数及其曲线的性质[J]. 高等数学研究, 2005, 8(5): 46—47.
- [14] 陈锦昌, 赵明秀, 张国栋, 等. VB 计算机绘图教程[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2003.