

采空区及上覆岩层空隙率三维分布规律

王少锋^{1,2}, 王德明^{1,2}, 曹凯^{1,2}, 王帅领^{1,2}, 皮滋滋³

- (1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州, 221116;
2. 中国矿业大学 通风防火研究所, 江苏 徐州, 221116;
3. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 江苏 南京, 210016)

摘要: 在构建采场覆岩下沉连续曲面数学模型基础上, 理论推导出采空区及上覆岩层三维空隙场分布模型, 并通过实际算例验证模型的适用性。研究表明: 离层带裂隙以“双驼峰”比例耦合形式变化, 外围区域呈“凸峰”, 空隙率大, 内部区域呈“凹陷”, 空隙率小, 并且在与工作面平行的截面上存在空隙率竖向变化突变点, 随埋深增大截面一侧空隙率升高, 另一侧则降低; 冒落带空隙率以“铲”状分布, 浅部及两巷侧空隙率大, 而中部及内部空隙率小。

关键词: 采空区; 覆岩; 下沉连续曲面模型; 三维空隙场; 空隙率

中图分类号: TD 325

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2014)03-0833-07

Distribution law of 3D fracture field of goaf and overlying strata

WANG Shaofeng^{1,2}, WANG Deming^{1,2}, CAO Kai^{1,2}, WANG Shuailing^{1,2}, PI Zizi³

- (1. School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China;
2. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China;
3. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The 3D fracture field distribution model of goaf and overlying strata was derived on the basis of the continuous surface mathematical model of overlying strata. The applicability of 3D model was verified through practical examples. The overlying strata fissure changes in proportion coupled form of double hump. The porosity in external area is small and convex front-like, while the porosity in the internal region is large and hollow. The junction point of ionosphere porosity exists in the vertical direction, with depth increases the side of the porosity increases, and the other side gets lower. The distribution of porosity appears shovel-like in the Caving zone of the goaf. The porosity is large in the periphery of the goaf, but small in the internal range.

Key words: goaf; overlying strata; continuous surface model; 3D fracture field; porosity

随着煤炭开采强度的日益加深, 采空区遗煤自燃、瓦斯涌出以及煤与瓦斯共存条件下的耦合灾害对井下安全生产的危害愈加突出, 因此掌握采空区火与瓦斯的热质传递规律以及防灭火介质的流动特性对防治采

空区火与瓦斯灾害显得尤为重要, 其中采空区及上覆岩层的空隙率与其内部的传热传质特性有着密切的联系。李树刚等^[1]通过模拟实验得出覆岩裂隙发育区空隙率及渗透系数的理论解; 程久龙等^[2]通过探地雷达

收稿日期: 2013-03-07; 修回日期: 2013-05-22

基金项目: 国家专项基金资助项目(50927403); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主课题(SKLCRSM08X06); 江苏省创新攀登计划项目(BK2009004); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012DXS02)

通信作者: 王德明(1956-), 男, 贵州遵义人, 教授, 博士生导师, 从事矿井通风及防灭火研究; 电话: 0516-83590592; E-mail: wdmcmct@163.com

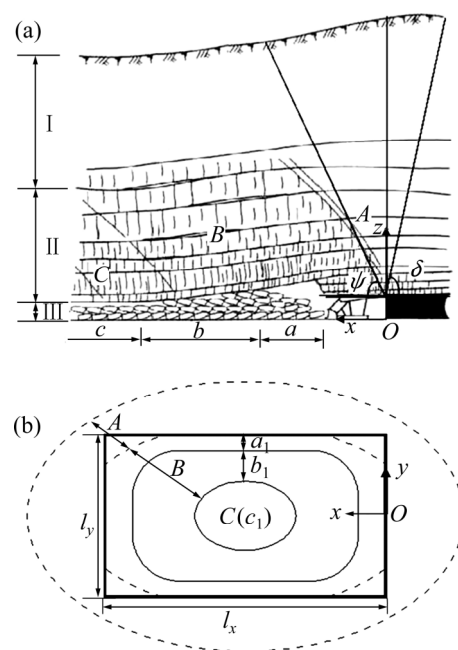
技术分析了浅部采空区的物理特性；宋颜金等^[3]利用弹性薄板理论和关键层理论，在定量描述覆岩下沉量基础上，研究了覆岩裂隙的分布特征；周西华等^[4]利用 MiVnt 图像分析软件，对拍摄的采空区冒落岩石堆积状态照片进行分析处理，得到采空区孔隙率在空间上呈簸箕形状分布。这些研究成果对采场空间的空隙率进行了定性定量描述，但是大都为离散分区模型和一维变化模型。此外，李宗翔等^[5]、梁运涛等^[6]和王月红等^[7]为了模拟研究采空区流场特性而对孔隙率连续变化模型进行了探析，张玉军等^[8-9]、黄炳香等^[10]和林海飞等^[11]结合现场实测及可视化技术、相似材料及数值模拟研究了采场覆岩裂隙分布及动态演化规律，同时，马占国等^[12-13]和苏承东等^[14]研究了采空区破碎岩石在受压条件下的空隙分布、渗透特性以及碎胀系数的变化规律。本文作者结合已有研究成果，在关键层挠曲方程基础上提出了覆岩倾向、走向比例耦合平面连续挠曲模型，通过此模型得到了覆岩离层带裂隙场的“双驼峰”比例耦合空间曲面模型，同时根据基本顶下沉曲面及采空区倾向空隙率变化系数，并考虑重力对破碎岩体空隙率的影响，推导出冒落带空隙率连续变化曲面方程，从而给出了采空区及覆岩的三维空隙场数学模型，为研究采空区火源发展规律及防灭火介质的流动特性、采场瓦斯运移规律及瓦斯综合治理提供重要参量。

1 采空区及覆岩三维分区

煤层开采后采场中形成矩形采动空间，破坏了围岩的原始应力平衡及分布状态，受二次应力影响，围岩发生垮落、断裂和变形。采场上覆岩体结构的“砌体梁”模型将上覆岩层的变形、移动和破坏沿垂直方向分为弯曲带、裂隙带及垮落带，沿走向分为煤柱支撑区、离层区及压实稳定区；根据冒落岩石的破坏特性及堆积状态又可将垮落带沿采空区走向分为自然堆积区、载荷影响区和重新压实区。采空区及覆岩三维分区见图 1。本文取采空区底板与采煤工作面交线的中点为坐标原点 O ，沿底板中轴线指向采空区深部为 x 轴方向，沿采煤面指向上巷端头为 y 轴方向，沿采煤面指向地面并与底板垂直的方向为 z 轴方向，坐标系及采场构造如图 2 所示。

根据采场覆岩移动及破坏规律^[15]，煤层垮落带高度 H 和裂隙带高度 H 可由下式计算：

$$H = \frac{H - W}{(K_p - 1)\cos\alpha} ; H = \frac{100H}{aH + b} \pm c \quad (1)$$



(a) 正视图；(b) 俯视图

(—) 弯曲带；—— 裂隙带；—— 垮落带；A—煤柱支撑区；B—离层区；C—压实稳定区； a_1 —自然堆积区； b_1 —载荷影响区； c_1 —重新压实区)

图 1 采空区及覆岩分区示意图

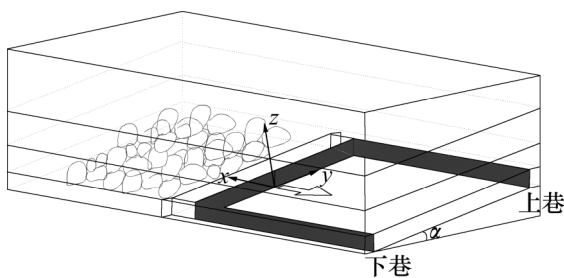


图 2 坐标系及采场构造示意图

Fig. 2 Coordinate system and configuration schematic of stope

式中： H 为采高或采放高； W 为直接顶垮落后基本顶的下沉量； K_p 为垮落岩石碎胀系数； α 为煤层倾角； a 、 b 和 c 为和顶板岩性有关的系数。

煤柱支撑区位于走向采动影响角 ψ 的边界线和走向边界角 δ 的边界线所围区域；离层区即从采动影响角 ψ 的边界线至岩层移动基本稳定线之间的区域。

垮落带中自然堆积区的宽度 l_a 约为 1 个周期来压步距 L ；载荷影响区的宽度 l_b 约为岩层移动基本稳定线距工作面的距离 L_s 减去 L 。 l_a 和 l_b 可由以下 2 个公式^[15]计算：

$$l_a = L = H_b \sqrt{\frac{\sigma_t}{3q}}; l_b = L_s - L = L_s - H_b \sqrt{\frac{\sigma_t}{3q}} \quad (2)$$

式中: H_b 为基本顶破断厚度, m; σ_t 为岩梁抗拉强度, Pa; q 为基本顶自重加其上载荷, Pa; L_s 为岩层移动基本稳定线距工作面的距离, 一般为 50~60 m。

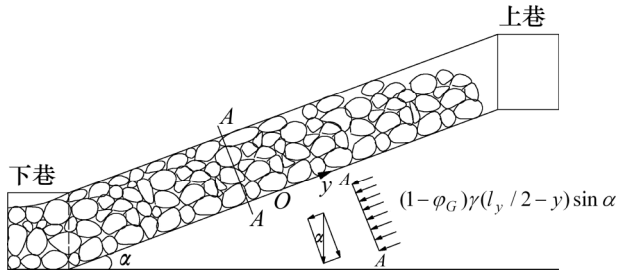


图3 采空区破碎岩石重力作用示意图

Fig. 3 Influence of gravity on crushed rock

2 覆岩移动规律

采场覆岩是多层厚度不同、强度各异的岩层的有序堆列。基本顶岩层在移动过程中, 由于自身强度、受力的不同会导致变形的不协调性, 从而在竖直方向上产生离层, 形成离层裂隙。同时, 岩层在弯曲的过程中, 横向截面会发生转移, 从而会在岩层走向上产生破断裂隙。然而直接顶岩层则随着工作面的推进而直接垮落、堆积并存在孔隙。

2.1 岩层竖向位移

未破断失稳的岩层在自重和上部载荷作用下发生挠曲下沉, 可以运用弹性薄板弯曲理论计算其下沉量。根据采场覆岩破断“O”型圈特性, 将岩层弯曲假设成受均布载荷作用、边界固支的椭圆形薄板的挠曲下沉, 其下沉量 w_{ki} 可由式(3)计算^[16]:

$$w_{ki}(x, y) = \frac{(\rho_i g T_i + q_{0i}) \cos \alpha \left(\frac{4x^2}{l_x^2} + \frac{4y^2}{l_y^2} - 1 \right)^2}{8D_i \left(\frac{48}{l_x^4} + \frac{32}{l_x^2 l_y^2} + \frac{48}{l_y^4} \right)} \quad (3)$$

式中: ρ_i 为第 i 岩层岩石密度; T_i 为第 i 岩层厚度; q_{0i} 为第 i 岩层上部载荷; α 为煤层倾角; l_x 为采空区走向长度; l_y 为采空区倾向宽度; D_i 为第 i 岩层抗弯刚度, $D_i = ET_i^3 / [12(1 - \nu^2)]$ (其中 E 为弹性模量, ν 为泊松比)。

根据岩体结构的“砌体梁”力学模型理论, 岩层破断后则形成稳定的“砌体梁”结构, 其竖向位移 w_{kix} 沿煤层走向的拟合曲线为^[1]:

$$w_{kix} = w_{0i} (1 - e^{-\frac{x}{2l_i}}) \quad (4)$$

式中: w_{0i} 为第 i 岩层移动稳定后的下沉量; $w_{0i} = H - h_i (K_{p_i} - 1)$; H 为采高或采放高, h_i 为第 i 岩层到煤层顶板的距离; K_{p_i} 为 h_i 内岩石的残余碎胀系数; l_i 为第 i 岩层岩石破断长度, $l_i = h_i [\sigma_{ti} / (3q)]^{1/2}$ (其中 h_i 和 σ_{ti} 为第 i 岩层的厚度和抗拉强度, q 为自重和上部载荷强度)。

同时, 在煤层倾向方向, “砌体梁”的下沉量也具有

类似的曲线, 可表示为 $w_{kiy} = w_{0i} (1 - e^{-\frac{l_y/2 - |y|}{2l_i}})$ 。在图2的直角坐标系中, 假设破断关键层下沉量在 x 轴上按式(4)分布, 同时受着 w_{kiy} 的等比例影响, 即:

$$\frac{1 - e^{-\frac{l_y/2 - |y|}{2l_i}}}{1 - e^{-\frac{l_y}{4l_i}}} = \frac{w_{ki}(x, y)}{w_{0i} (1 - e^{-\frac{x}{2l_i}})}$$

所以,

$$w_{ki}(x, y) = \frac{w_{0i} (1 - e^{-\frac{x}{2l_i}}) (1 - e^{-\frac{l_y/2 - |y|}{2l_i}})}{1 - e^{-\frac{l_y}{4l_i}}} \quad (5)$$

2.2 岩层平面伸张量

岩层在受到采动影响后会发生弯曲变形甚至破断, 其所占有的空间体积增大, 可以用采动影响前后岩层面积变化量来描述其平面伸张量, 即:

$$u_i = \int_0^{L_x} \int_{-l_y/2}^{l_y/2} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial w_{ki}(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_{ki}(x, y)}{\partial y} \right)^2} dx dy - L_x l_y \quad (6)$$

式中: u_i 为第 i 关键层平面伸张量。

3 采空区及覆岩空隙率三维分布

3.1 离层带空隙率

采场上覆规则移动带在下沉过程中因各岩层变形的不连续性而产生离层, 形成离层裂隙, 同时受拉应力的作用产生大量破断裂隙。根据空隙率的定义可以给出式(7)和式(8)分别来计算相邻 2 个岩层范围内的空隙率 $\phi_{i,i+1}$ 和平均空隙率 $\phi_{i,i+1}$ 。

$$\phi_{i,i+1} = \frac{\Delta w_{ki} dx dy}{\Delta \Sigma_{h_i} dx dy} = \frac{w_{ki} - w_{ki+1}}{\Sigma_{h_i} - \Sigma_{h_{i+1}}} \quad (7)$$

$$\Phi_{i,i+1} = \frac{V_{\text{空隙}}}{V_{\text{区域}}} = \frac{\int_0^{L_s} \int_{-l_y/2}^{l_y/2} \Delta w_{ki} dx dy + u_i \Delta \Sigma_{h_i}}{L_s l_y \Delta \Sigma_{h_i}} = \frac{\int_0^{L_s} \int_{-l_y/2}^{l_y/2} (w_{ki} - w_{ki+1}) dx dy}{L_s l_y (\Sigma_{h_i} - \Sigma_{h_{i+1}})} + \frac{u_i}{L_s l_y} \quad (8)$$

整个离层带内的平均空隙率 Φ 可由式(9)得出:

$$\Phi = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\int_0^{L_s} \int_{-l_y/2}^{l_y/2} \Delta w_{ki} dx dy + u_i \Delta \Sigma_{h_i} \right)}{L_s l_y \Sigma_{h_n}} \quad (9)$$

式中: n 为采场上覆岩层的层数; Σ_{h_n} 为第 n 层覆岩(从采空区往地面数)距离煤层顶板的距离。

3.2 垮落带空隙率

破碎岩体的空隙率可以由破碎状态下岩块间的孔隙体积与总体积之比来表示, 而其碎胀系数为岩体破碎后的体积与破碎前的体积之比。根据破碎岩体空隙率和碎胀系数的定义可知, 两者之间存在如下关系:

$$\varphi = 1 - \frac{1}{K_p} \quad (10)$$

式中: K_p 为破碎岩石的碎胀系数; φ 为破碎岩石的空隙率。

由岩石碎胀系数定义可得采空区松散煤矸石的碎胀系数沿底板走向中线的分布为

$$K_p = \frac{h_d + H - w_b(y=0)}{h_d} \quad (11)$$

所以, 采空区底板走向中轴线($y=0$)上的空隙率变化曲线可由下式表示

$$\varphi_G(y=0) = 1 - \frac{h_d}{h_d + H - w_b(y=0)} \quad (12)$$

其中, $w_b(y=0) = [H - h_d(K_{pb} - 1)](1 - e^{-\frac{x}{2l}})$

式中: $\varphi_G(y=0)$ 为采空区底板走向中轴线上的空隙率变化曲线; h_d 为直接顶厚度; H 为采高或采放高; $w_b(y=0)$ 为基本顶沿采空区底板走向中轴线分布的下沉量; K_{pb} 为直接顶破碎岩体残余碎胀系数; l 为基本顶破断岩块长度。

根据“O”形圈理论和现场测定情况, 在工作面倾向上, 上、下巷端头附近采空区的空隙率较采空区中部的大。工作面倾向(y 轴方向)上偏离 y 轴原点的孔隙率变化系数符合如下关系^[17]

$$\varphi_{G,y} = 1 + e^{-0.15(\frac{l_y}{2} - |y|)} \quad (13)$$

如果工作面存在倾角, 采空区松散煤矸石的空隙率会受到岩石重力的挤压影响, 采空区下侧受重力载荷大, 压实程度高, 空隙率相对上侧较小, 而采空区上侧正好相反。根据破碎岩体空隙率随轴向应力变化规律的多项式回归方程^[18]

$$\varphi_y = \beta_3 \sigma^3 + \beta_2 \sigma^2 + \beta_1 \sigma + \beta_0 \quad (14)$$

式中: φ_y 为松散破碎岩石受轴向应力作用后的空隙率; σ 为相对轴向应力, MPa; $\beta_{i=1,2,3}$ 为回归系数; β_0 为破碎岩石未受轴向应力前的空隙率。

并由图 3 分析, 因采空区松散岩石自身重力作用, 任意界面 $A-A$ 在倾向上上的压应力为

$$\sigma = \frac{(1 - \varphi_G) \gamma (\frac{l_y}{2} - y) \sin \alpha}{\sigma_0} \quad (15)$$

式中: σ 为任一截面 $A-A$ 上的相对压应力, MPa; γ 为冒落岩石容重, N/m^3 ; $\sigma_0 = 1$ MPa。由于煤矿实际条件下, 冒落煤矸石的容重一般为 $2 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4 N/m^3$, 煤层或工作面倾角 α 一般较小, 再加上松散岩石孔隙的影响, 一般情况下由岩石自重引起的 $A-A$ 截面上的压应力往往很小, 因此式(14)中的二次项和三次项均可忽略。

综上, 考虑重力影响的采空区冒落岩石的空隙率满足如下方程:

$$\varphi_G = \beta_1 \sigma + \varphi_{G,y} \varphi_G(y=0) =$$

$$\beta_1 \frac{(1 - \varphi_G) \gamma (\frac{l_y}{2} - y) \sin \alpha}{\sigma_0} + \left[1 + e^{-0.15(\frac{l_y}{2} - |y|)} \right]$$

$$\left\{ 1 - \frac{h_d}{h_d + H - [H - h_d(K_{pb} - 1)](1 - e^{-\frac{x}{2l}})} \right\}$$

解上式得:

$$\varphi_G(x, y) = 1 +$$

$$\frac{\left[1 + e^{-0.15(\frac{l_y}{2} - |y|)} \right] \left\{ 1 - \frac{h_d}{h_d + H - [H - h_d(K_{pb} - 1)](1 - e^{-\frac{x}{2l}})} \right\} - 1}{1 + \sigma_0^{-1} \beta_1 \gamma (\frac{l_y}{2} - y) \sin \alpha}$$

(16)

其中: 冒落岩石为页岩时 $\beta_1 = -0.048$; 冒落岩石为泥岩时 $\beta_1 = -0.028$; 冒落岩石为砂岩时 $\beta_1 = -0.0254$ ^[18]。

综上式(7)~(9)和式(16)给出了采空区及其覆岩各

个区域的空隙率计算方法。根据渗透率与空隙率的 Kozeny-Carman 关系式以及 Hoek 和 Bray 对 Kozeny-Carman 关系式的研究结果^[19]

$$k = \frac{\varphi^3}{(1-\varphi)^2} (F_s^2 s^2 S_{gv}^2) = \frac{k_0}{0.241} \cdot \frac{\varphi^3}{(1-\varphi)^2} \quad (17)$$

式中: k 为渗透率, μm^2 ; φ 为空隙率; F_s 为形状系数; s 为迂曲度; S_{gv} 为单位质量介质中所包含颗粒的表面积; k_0 为基准渗透率, 可取值 $10^3 \mu\text{m}^2$ 。从而可计算出采空区及上覆岩层各个区域内的渗透率。

4 模型适用性验算

某矿某工作面所开采煤层实际地质赋存条件及开采参数如下: 煤层平均厚度 2.7 m, 直接顶厚度 6 m, 煤层倾角平均为 5° , 工作面走向长 1 050 m, 倾向宽为 200 m, 采高 3 m, 顶板为层状细砂岩和泥岩。覆岩各层参数见表 1。

表 1 覆岩各岩层特性参数

Table 1 Characteristic parameters of overlying strata

岩层 编号	埋深/ m	岩层 厚度/m	岩层到煤层 的距离/m	残余碎胀 系数	破断岩块 长度/m
1	464	4	10	1.005	8
2	455	9	19	1.007	11
3	434	21	40	1.012	12
4	411	23	63	1.024	15
5	396	15	78	1.049	18

通过式(3)和(5)计算工作面推进 300 m 后, 其后方 100 m 范围内的覆岩下沉曲面如图 4 所示。图 5 所示为在煤层走向中线($y=0$)处覆岩的下沉曲线, 从各曲线的变化趋势上看, 紧邻直接顶的覆岩在工作面后方 50~60 m 后下沉量基本稳定, 而在其上部随着埋深变浅各覆岩层的稳定距离(从工作面到覆岩基本稳定点的距离)有所增长, 依次为 67, 79, 92 和 110 m, 总体上各覆岩的稳定距离一般为其破断岩块长度的 6~8 倍。

由式(7)求出不同埋深各覆岩离层区域空隙率在 xy 平面上的变化曲面如图 6 所示。从图 6 可以看出: 覆岩空隙率呈走向和倾向“双驼峰”比例耦合形式变化, 外围区域呈“凸峰”, 空隙率大, 内部区域呈“凹陷”, 空隙率小。图 7 所示为 $y=0$ 截面上空隙率变化曲线。由图 7 可以得出在工作面后方约 50 m 处是空隙率

变化交界点, 0~50 m 范围内覆岩空隙率从深至浅逐渐降低, 50 m 以后的范围覆岩空隙率从深至浅逐渐增大, 这是由于靠近工作面的区域冒落岩体碎胀系数大, 下部岩层下沉受到阻碍力小而下沉速度和下沉量都大于上部岩层, 然而在远离工作面的区域, 碎胀岩体被逐渐压实, 下部岩层的下沉受到较大的阻碍, 下沉量和下沉速度都大幅降低, 而上部岩体由于离层空隙的存在而保持下沉惯性。这样由于各岩层下沉速度和下沉量的不协调性, 覆岩空隙率分布会出现变化突变点。

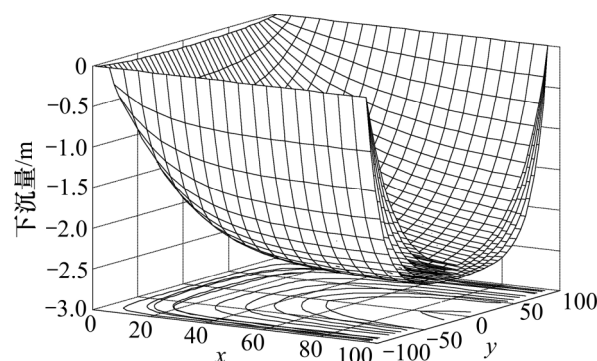


图 4 采场覆岩下沉曲面

Fig. 4 Sink surface of overlying strata

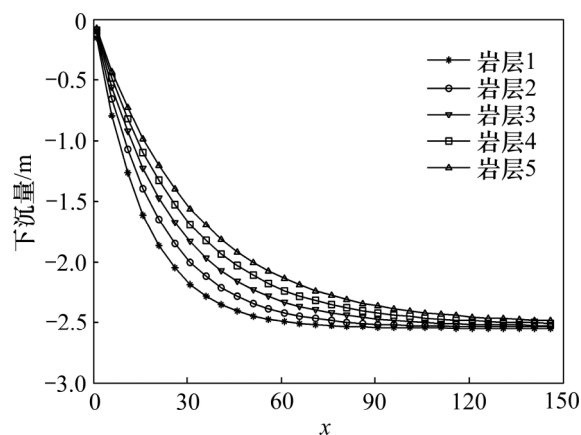


图 5 $y=0$ (即走向中线)处覆岩下沉曲线

Fig. 5 Sink curve of overlying strata at $y=0$

由式(16)计算出的冒落带破碎岩体的空隙率变化曲面如图 8 所示。从图 8 可以看出: 考虑重力影响的采空区冒落岩石的空隙率在 xy 平面上的分布基本呈“铲”状, 采空区浅部及两巷侧空隙率大, 而中部及内部空隙率小。

通过上述实际算例分析, 结果与矿井实际情况基本吻合。上述模型描述了采空区及覆岩的空隙率分布规律, 能够反映瓦斯积存及煤自燃漏风供氧空间特性, 为瓦斯治理及煤自燃防治提供重要的参数。

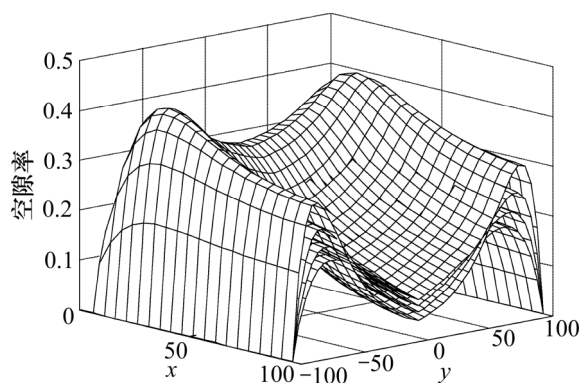


图 6 空隙率变化曲面

Fig. 6 Change surface of porosity

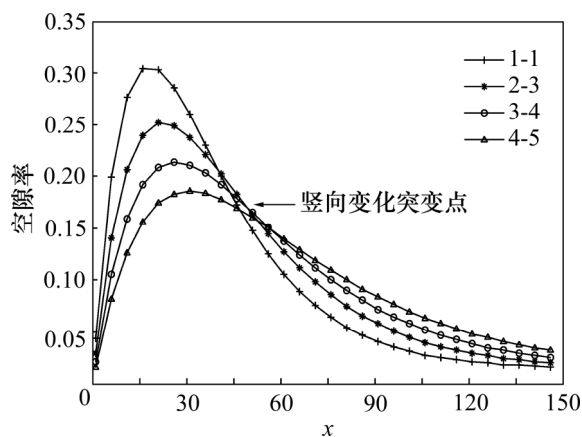
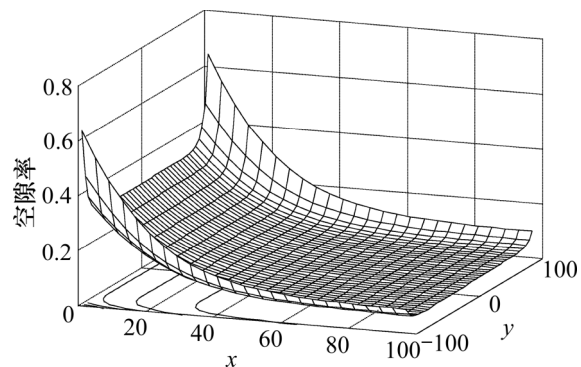
图 7 $y=0$ 截面上的空隙率变化曲线Fig. 7 Change curve of porosity at $y=0$ 

图 8 冒落带破碎岩体空隙率变化曲面

Fig. 8 Change surface of broken rock's porosity in caving zone

5 结论

(1) 给出了各覆岩层挠曲或者破断下沉曲面模型, 未破断岩层以受均布载荷、边界固支的椭圆形弹

性薄板挠曲形式下沉, 已破断岩层则以倾向、走向双“砌体梁”比例耦合弯曲形式下沉, 且上部岩层下沉曲面呈“碗底”形, 下部岩层下沉曲面呈“盆底”形; 紧邻直接顶的岩层在工作面后方 50~60 m 后下沉量基本稳定, 往上随着埋深变浅各覆岩层的稳定距离有所增长, 总体上各覆岩的稳定距离一般为其破断岩块长度的 6~8 倍。

(2) 给出了覆岩空隙率三维分布数学模型, 得出: 离层带空隙率呈走向和倾向“双驼峰”比例耦合形式变化, 外围区域呈“凸峰”, 空隙率大, 内部区域呈“凹陷”, 空隙率小; 在与工作面平行的截面上存在空隙率竖向变化突变点, 随埋深增大截面一侧空隙率升高, 另一侧则降低, 一般在工作面后方 0~50 m 范围内覆岩空隙率从深至浅逐渐降低, 50 m 以后范围覆岩空隙率从深至浅逐渐增大。

(3) 根据基本顶下沉曲面及采空区倾向空隙率变化系数, 并考虑重力对破碎岩体空隙率的影响, 推导出冒落带空隙率连续变化曲面方程。分析得出: 采空区冒落带空隙以“铲”状分布, 浅部及两巷侧空隙率大, 而中部及内部空隙率小。以上定性及定量结论为研究采空区火源发展规律及防灭火介质的流动特性、采场瓦斯运移规律及瓦斯综合治理提供了重要参量。

参考文献:

- [1] 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 Shugang, QIAN Minggao, SHI Pingwu. Study on the variation of abscission fissures and seepage characteristics of interspace of the caving mining overlying strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 604-607.
- [2] 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 Jiulong, HU Kefeng, WANG Yuhe, et al. Research on detecting of underground mined-out areas by using GPR[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Supp.1): 79-82.
- [3] 宋颜金, 程国强, 郭惟嘉. 采动覆岩裂隙分布及其空隙率特征[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 533-536.
SONG Yanjin, CHENG Guoqiang, GUO Weijia. Study of distribution of overlying strata fissures and its porosity characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 533-536.
- [4] 周西华. 双高矿井采场自燃与爆炸特性及防治技术研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006: 41-43.
ZHOU Xihua. Study on spontaneous combustion and explosion

- characteristic and prevention and control technology with high-gas and easily-spontaneous combustion coal seam in stope[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2006: 41–43.
- [5] 李宗翔, 衣刚, 武建国, 等. 基于“O”型冒落及耗氧非均匀采空区自燃分布特征[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 484–489.
- LI Zongxiang, YI Gang, WU Jianguo, et al. Study on spontaneous combustion distribution of goaf based on the “O” type risked falling and non-uniform oxygen[J]. Journal of China coal society, 2012, 37(3): 484–489.
- [6] 梁运涛, 张腾飞, 王树刚, 等. 采空区孔隙率非均质模型及流场分布模拟[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1203–1207.
- LIANG Yuntao, ZHANG Tengfei, WANG Shugang, et al. Heterogeneous of porosity in gobs and its airflow field distribution[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1203–1207.
- [7] 王月红, 温佳丽, 秦跃平, 等. 采空区多参数气-固耦合渗流模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2012, 31(5): 760–764.
- WANG Yuehong, WEN Jiali, QIN Yueping, et al. Numerical simulation of multi-parameters coupling seepage in goaf based on fluid-solid theory[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2012, 31(5): 760–764.
- [8] 张玉军, 张华兴, 陈佩佩. 覆岩及采动岩体裂隙场分布特征的可视化探测[J]. 煤炭学报, 2008, 31(11): 1216–1219.
- ZHANG Yujun, ZHANG Huaxing, CHEN Peipei. Visual exploration of fissure field of overburden and rock[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 31(11): 1216–1219.
- [9] 张玉军, 李凤明. 高强度综放开采采动覆岩破坏高度及裂隙发育演化监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 2994–3000.
- ZHANG Yujun, LI Fengming. Monitoring analysis of fissure development evolution and height overburden failure of high tension fully-mechanized caving mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Supp 1): 2994–3000.
- [10] 黄炳香, 刘长友, 许家林. 采动覆岩破断裂隙的贯通度研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 45–49.
- HUANG Bingxiang, LIU Changyou, XU Jialin. Research on through degree of overlying strata fracture fissure induced by mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(1): 45–49.
- [11] 林海飞, 李树刚, 成连华. 覆岩采动裂隙带动态演化模型的实验分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 298–303.
- LIN Haifei, LI Shugang, CHENG Lianhua. Experimental analysis of dynamic evolution model of mining-induced fissure zone in overlying strata[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 298–303.
- [12] 马占国, 缪协兴, 陈占清, 等. 破碎煤体渗透特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 985–988.
- MA Zhanguo, MIAO Xiexing, ZHEN Zhanqing, et al. Experimental study of permeability of broken coal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 985–988.
- [13] 马占国, 兰天, 潘银光, 等. 饱和破碎泥岩蠕变过程中孔隙变化规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1447–1454.
- MA Zhanguo, LAN Tian, PAN Yinguang, et al. Experimental study of variation law of saturated broken mudstone porosity during creep process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1447–1454.
- [14] 苏承东, 顾明, 唐旭, 等. 煤层顶板破碎岩石压实特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 18–26.
- SU Chengdong, GU Ming, TANG Xu, et al. Experiment study of compaction characteristics of crushed stones from coal seam roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 18–26.
- [15] 徐永圻. 采矿学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 531–533.
- XU Yongqi. Mining science[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press: 2003: 531–533.
- [16] 吴家龙. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 316–333.
- WU Jialong. Elastic mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 316–333.
- [17] 朱建芳. 动坐标下采空区自燃无因次模型及判别准则研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 2006: 20–24.
- ZHOU Jianfang. Study on the dimensionless mathematical model and criterion for spontaneous combustion in goaf on the moving coordinate[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing). Faculty of Resources and Safety Engineering, 2006: 20–24.
- [18] 马占国. 采空区破碎岩体压实和渗流特性研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009: 21–28.
- MA Zhanguo. Compaction and seepage characteristics of goaf broken rock[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2009: 21–28.
- [19] 高博禹, 彭仕宓, 龚宏杰, 等. 油气储层流动单元划分标准的探讨[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(1): 82–86.
- GAO Boyu, PENG Shimi, GONG Hongjie, et al. Discussion on classification criteria of reservoir flow unit[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(1): 82–86.

(编辑 陈爱华)