



移动扫码阅读

张 杰,何义峰. 浅埋煤层群裂隙演化规律及组合承载结构载荷研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 65-76.
ZHANG Jie, HE Yifeng. Research on the fracture evolution law and combined bearing structure load of shallow buried coal seam group[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 65-76.

浅埋煤层群裂隙演化规律及组合承载结构载荷研究

张 杰^{1,2},何义峰¹

(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: 浅埋煤层群高强度开采导致承载岩层破断形成组合承载结构, 使覆岩裂隙分布形态复杂化, 并对地表造成严重损害。为了研究浅埋煤层群开采覆岩裂隙演化规律与承载岩层承载结构关系及承载岩层保持稳定的支架工作阻力, 以陕西北部神府矿区韩家湾煤矿 2⁻² 和 3⁻¹ 煤开采为研究背景, 通过现场观测及相似模拟试验得到煤层群开采裂隙演化规律、承载岩层组合承载结构及两者相互关系, 采用理论计算的方法建立了组合承载结构力学模型, 研究组合承载岩层保持稳定的支架工作阻力。研究表明, 煤层群开采覆岩裂隙演化过程可划分为 4 个阶段, 分别为上煤层开采快速增长阶段、上煤层开采平稳增长阶段、下煤层开采快速增长阶段、下煤层开采稳定增长阶段; 不同承载结构导致地表产生不同的裂隙演化形态及沉降特征, “台阶岩梁”结构地表产生台阶下沉, “铰接岩梁”结构地表产生连续下沉; 通过地表沉降形式可间接判断上煤层承载岩层破断结构, 由层间岩层充填率和采高得到了下煤层承载岩层破断结构, 并揭示了浅埋煤层群开采承载岩层破断组合结构分为“台阶-铰接”结构、“铰接-铰接”结构、“铰接-台阶”结构、“台阶-台阶”结构的组合形态。由承载岩层破断组合结构建立了浅埋煤层群开采承载岩层承载结构力学模型, 得到了承载岩层保持稳定支架工作阻力的计算方法, 并得到了现场实测结果验证。

关键词: 浅埋煤层群; 裂隙演化; 地表裂缝; 组合承载结构; 支架阻力

中图分类号: TD325

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)09-0065-12

Research on the fracture evolution law and combined bearing structure load of shallow buried coal seam group

ZHANG Jie^{1,2}, HE Yifeng¹

(1. School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Mine Mining and Disaster Prevention in West China, Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The high-intensity mining of shallow-buried coal seams leads to the fracture of the bearing strata to form a combined bearing structure, which complicates the distribution of cracks in the overlying rock and causes serious damage to the surface. In order to study the relationship between the evolution law of the overburden fissures and the bearing structure of the bearing rock in the mining of the shallow coal seam group, and the working resistance value of the support to keep the bearing rock stable, the coal mining of Hanjiawan Coal Mine 2⁻² and 3⁻¹ in the Shenfu mining area in northern Shaanxi was studied. In the background, through field observation and similar simulation experiments, the evolution law of coal seam group mining cracks, the combined bearing structure of bearing rock layers and the relationship between the two were obtained. The mechanical model of combined bearing structure was established by theoretical calculation method, and the support work of the combined bearing rock layer to maintain stability was studied. resistance. The research shows that the evolution process of overlying fissures in coal seam mining can be divided into four stages: the upper coal seam mining rapid growth stage, the upper coal seam mining steady growth stage, the lower coal seam mining rapid growth stage, and the lower coal seam mining stable growth stage. This leads to different fissure evolution forms and subsidence characteristics on the surface. The surface of the “step rock beam” structure subsides in steps, and the surface of the “hinge rock beam” structure subsides continuously; The fractured structure of the

收稿日期: 2022-07-13

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1108

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774229, 52004200)

作者简介: 张 杰(1978—), 男, 四川达县人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: zhangjie655@163.com

bearing rock formation in the lower coal seam is obtained from the filling rate and mining height of the interlayer, and it is revealed that the fractured combined structure of the bearing rock formation in the shallow buried coal seam mining group is “step-hinged” structure, “hinged-hinged” structure, “hinged-hinged” structure. The combined form of the “step” structure and the “step-step” structure. Based on the fractured composite structure of the bearing rock, the mechanical model of the bearing rock bearing structure of the shallow buried coal seam group mining is established, and the calculation method of the working resistance of the bearing rock to maintain the stability of the support is obtained, and the field measurement results are verified.

Key words: shallow buried coal seam group; fracture evolution; surface fractures; composite bearing structure; stand working resistance

0 引言

我国西部神府矿区赋存着大量的浅埋煤层,随着上部煤层逐渐开采完毕,各矿区均准备或正在回采下部煤层^[1]。通过现场实测发现,浅埋煤层群开采地表存在连续下沉区和台阶下沉区,两者均会造成覆岩裂隙分布密集和张开度增大的现象,其中台阶下沉区地表破坏严重存在大量张开度及深度较大的地裂缝,导致漏风、溃水溃沙现象的发生,造成矿井无法安全高效回采^[2-4]。追究原因,是由于起控制上覆岩层运移作用的关键岩层破断后产生不同的破断力学结构所致,促使覆岩及地表裂隙出现不同程度的演化特征。

目前,关于浅埋煤层覆岩力学结构已进行了大量的研究,众多学者针对不同条件下浅埋煤层覆岩力学结构受力特征和影响因素展开了研究,主要分析了工作面开采强矿压的形成机理^[5-7],为后续开采提供了有利指导。根据浅埋煤层地层赋存特征,承载岩层破断后仍能形成承载结构,但稳定性不足^[8]。对于煤层群开采上煤层承载岩层受到二次扰动,导致承载岩层结构易出现失稳现象,且煤层群开采覆岩裂隙演化特征更加复杂化^[9]。通过对经典岩层结构理论分析,不难发现,无论覆岩中存在何种力学结构或是以何种形态存在,该结构的形成与失稳均会导致上覆岩层产生不同程度的运移或重组形成新的承载结构,同时对覆岩裂隙及地表裂缝产生不同程度的活化效应^[10-13]。通常浅埋煤层开采后,承载岩层能够形成承载结构,但由于基载比以及基岩层强度偏低的原因造成承载结构稳定性不足,易产生失稳。在受到上覆载荷层作用时,易产生整体断裂,使覆岩或地表产生台阶式结构^[14-16]。因此,对浅埋煤层群开采覆岩裂隙演化特征的研究,应从煤层群开采覆岩结构的形成、失稳以及稳定性出发,从根源上对裂隙的演化特性展开研究^[17]。

本文以浅埋煤层群开采为研究前提,通过相似模拟试验的手段对浅埋煤层群开采覆岩结构及重复采动作用下覆岩活化以及裂隙演化特征展开研究。

在模拟覆岩破断和承载结构形态特征试验的基础上,给出了不同的承载结构所对应覆岩及地表运移特征,建立了不同组合承载结构的力学模型,为浅埋煤层群开采地表运移及覆岩结构提供了一定的理论依据。

1 物理模拟试验设计

1.1 工程背景

韩家湾煤矿位于陕西北部神木市大柳塔境内,模拟试验以 2^{-2} 和 3^{-1} 煤层综合机械化下行开采为工程背景。研究区域内 2^{-2} 和 3^{-1} 煤层平均埋深分别为79 m和111.43 m,平均采高分别为4.3 m和2.7 m,属神府矿区典型浅埋近距离煤层群开采模式。

1.2 相似材料模拟试验

1) 相似常数选取。根据研究区地质赋存条件、相似定律以及模拟试验力学参数等确定几何相似常数: $K_l=1/100$;通过以下计算式可分别得到

容重相似常数:

$$K_\gamma = \gamma_p / \gamma_m = 1.56 \quad (1)$$

应力相似常数:

$$K_\sigma = K_n K_\gamma = 156 \quad (2)$$

时间相似常数:

$$K_t = \sqrt{K_n} \approx 10 \quad (3)$$

式中: γ_p 为实际地层密度, g/m^3 ; γ_m 为模型材料密度, g/m^3 ; K_n 为几何相似常数。

2) 模型尺寸。相似模拟试验架搭建尺寸为300 cm(长)×20 cm(宽)×123 cm(高),本次研究高度为90 cm。根据现场钻探资料,基岩层上部赋存约22 m左右的细砂松散层,不具备承载能力,下部基岩发生破断时,上部松散层会产生近似破坏下沉。因此,未将模型铺设至地表,采用施加等效载荷实现代替上部松散层载荷效果,如图1所示。

3) 试验材料选取。相似材料选用河沙、粉煤灰做骨料,石膏、大白粉做胶结物,云母做节理面分割材料。采用试验拍照、全站仪监测及现场记录的方法对试验结果进行记录。为了提高试验结果的可靠性,对研究区内煤岩层参数进行综合分析,主要考虑

原始岩层存在节理、层理面及地质条件弱结构面等影响因素。通过计算分析和试验得到模拟材料力学参数,见表 1。

2 浅埋煤层群开采承载岩层破断结构及裂隙演化分析

2.1 浅埋煤层群岩层破断结构特征

本次研究对象主要针对单一关键层和单一层间关键层的地质条件,通过现场实测及试验分析得到,上煤层工作面推进至 45 m 时,基本顶产生破断发生初次来压。随着工作面继续推进共计推进 263 m,产生 15 次周期性破断,平均来压步距为 14.5 m。下煤层开采时产生初次来压位置距开切眼 60 m,工作面共计推进 263 m,产生 13 次周期性破断,平均来压步距为 15.6 m。浅埋煤层群开采承载岩层破断产生的承载结构不仅受到本煤层开采扰动影响,同时也会受到相邻煤层开采扰动影响,导致覆岩频繁活化。因此,浅埋煤层群开采覆岩结构具有以下基本特点:

1) 煤层群开采覆岩破断垮落,岩层整体承载结构破坏,造成载荷层厚度增大,承载岩层厚度减小,

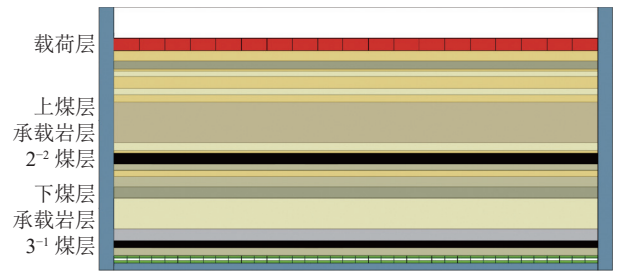


图 1 平面物理模拟试验示意

Fig.1 Schematic diagram of plane physics simulation experiment

整体表现为基载比减小。

2) 上煤层开采,上煤层承载岩层形成“铰接岩梁”或“台阶岩梁”的承载结构形态,起到承载上覆载荷岩层的作用。承载岩层形成“铰接岩梁”结构时,对上部地层产生连续承载效果,能够有效抑制覆岩及地表裂隙的发育,且地表产生均匀沉降,如图 2 所示。当承载岩层形成“台阶岩梁”结构时,岩梁内部存在一定垂距,对上部地层产生非连续承载,导致岩层产生与承载岩层近似的台阶破断结构,促使覆岩和地表裂隙充分演化,地表产生台阶下沉,如图 3 所示。

表 1 模型各材料主要力学性质

Table 1 Main mechanical properties of model materials

岩层编号	岩层	岩层厚度/m	模型厚度/m	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	容重/(kN·m ⁻³)	关键层位置
20	加载荷层	—	—	—	—	—	—	—	—
19	细粒砂岩	3.7	4	1.77	1.72	1 124	512	24.1	—
18	泥岩	2.8	3	1.04	1.38	752	435	25.3	—
17	细粒砂岩	0.8	1	2.02	1.50	998	488	22.7	—
16	砂质泥岩	1.69	2	2.12	1.34	715	472	22.4	—
15	细粒砂岩	4.8	5	1.78	1.90	1 180	641	23.4	—
14	砂质泥岩	2.6	3	2.12	1.32	780	467	24.1	—
13	泥岩	2.8	3	1.25	1.24	731	412	27.4	—
12	中粒砂岩	16.04	16	2.32	0.8	1 269	620	21.6	单一关键层
11	细粒砂岩	2.80	3	1.94	2.50	1 531	832	23.0	—
10	砂质泥岩	0.97	1.0	2.35	1.22	750	450	25.6	—
9	2 ⁻² 煤层	4.3	4.5	0.35	1.18	612	333	13.4	—
8	粉砂岩	2.78	3	1.53	0.15	141	510	23.4	—
7	砂质泥岩	2.42	2.5	2.64	1.42	745	435	23.1	—
6	粉砂岩	3.88	4.0	1.65	0.70	310	135	24.0	—
5	泥岩	4.35	4.5	1.35	1.52	821	456	23.5	—
4	细粒砂岩	12	12	1.84	2.50	1 921	1 042	23.5	单一层间关键层
3	中粒砂岩	4.3	4.5	2.13	2.5	1 885	1 077	22.6	—
2	3 ⁻¹ 煤层	2.7	3	0.38	1.10	587	286	12.7	—
1	粉砂岩	2.33	4	1.42	0.15	141	510	23.4	—

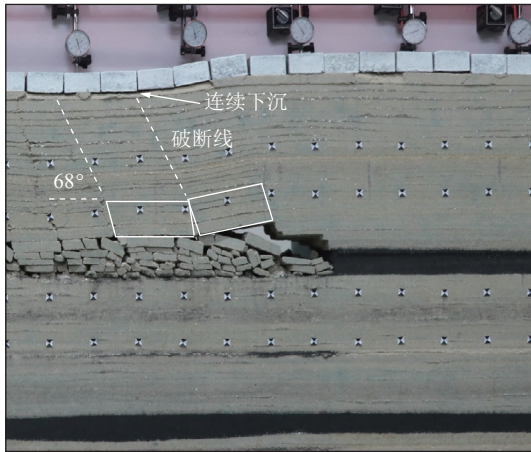


图2 上煤层开采承载岩层“铰接岩梁”结构

Fig.2 Structure diagram of “hinge rock beam” of bearing rock stratum in upper coal seam mining

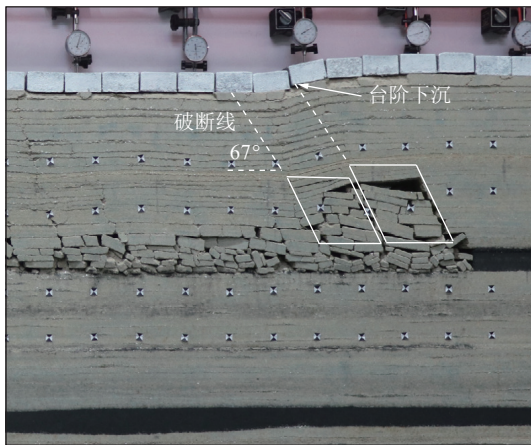


图3 上煤层开采承载岩层“台阶岩梁”结构

Fig.3 Structure diagram of “step rock beam” of bearing rock strata in upper coal seam mining

3) 在下煤层开采时,导致上煤层覆岩承载结构再次活化运移,由稳定承载结构赋存状态转变为活化状态,且承载结构形态主要受采高、层间岩层厚度及强度等因素影响^[18]。

4) 下煤层开采后,下煤层承载岩层受扰动产生不同的承载结构形态(“铰接岩梁”结构或“台阶岩梁”结构),上煤层覆岩载荷和层间岩层载荷对下煤层承载结构产生作用力,导致承载结构存在失稳的可能性。下煤层承载结构失稳主要受到上煤层承载结构形态、上下煤层承载结构位置以及覆岩载荷等因素影响。在承载岩层形成“铰接岩梁”结构时,覆岩承载结构稳定性更高,如图4所示。

2.2 浅埋煤层群覆岩裂隙演化分形几何分析

分形维数作为表征物体的复杂程度指标,同时也可对裂隙的演化特征进行定量分析^[19-20],将物理相似模拟初次来压和各周期来压裂隙演化图导入

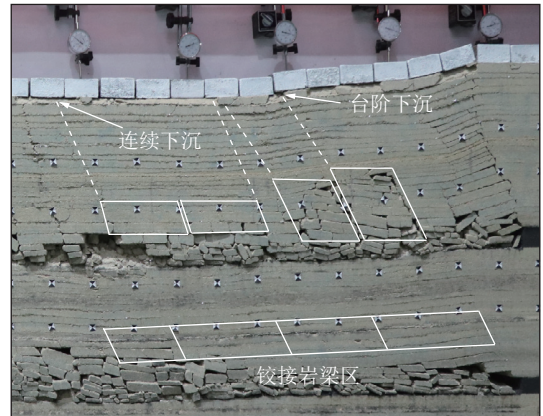


图4 下煤层开采承载岩层结构

Fig.4 Structure diagram of bearing rock strata in lower coal seam mining

MATLAB 软件,对图片进行降噪处理,利用计盒维数实现定量化计算。

由分形几何计算原则,计盒维数由下式确定:

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} [\lg N(\epsilon) / \lg N(1/\epsilon)] \quad (4)$$

式中: D 为层间岩层裂隙分形维数值; $N(\epsilon)$ 为裂隙图像所划分小正方形个数; $N(1/\epsilon)$ 为裂隙图像正方形个数。

通过分形几何计算原则,得到煤层群开采各来压阶段分形维数的变化规律,如图5所示。

根据图5分形维数变化趋势,将煤层群开采裂隙演化过程划分为4个阶段。

第1阶段:上煤层开采快速增长阶段(距开切眼84 m)。对试验分析可知,上煤层开采时,直接顶随采随落并在采空区呈不规则排列。随工作面推进长度增大,基本顶达到极限破断距产生破断,岩层排列较整齐。在达到充分采动前,破断岩层未被压实,导致裂隙分布密度演化特征明显,分形维数值快速增长。

第2阶段:上煤层开采平稳增长阶段(距开切眼84~263 m)。在达到充分采动时,岩层沿前一周期破断角产生周期性破断,破断岩层逐渐压实,裂隙闭合。工作面推进至充分采动后,岩层产生周期规则破断垮落,承载岩层产生周期性“铰接岩梁”或“台阶岩梁”结构,裂隙演化呈现规律性。在产生“台阶岩梁”时裂隙存在短暂发育增高期,受岩梁结构传递力作用采空区岩层逐渐压实,压实区部分裂隙闭合,裂隙数量减少,分形维数呈平稳增长趋势。

第3阶段:下煤层开采快速增长阶段(距开切眼78 m)。下煤层工作面推进至78 m时,下煤层承载岩层与上覆岩层产生同步破断运移,上覆岩层大量

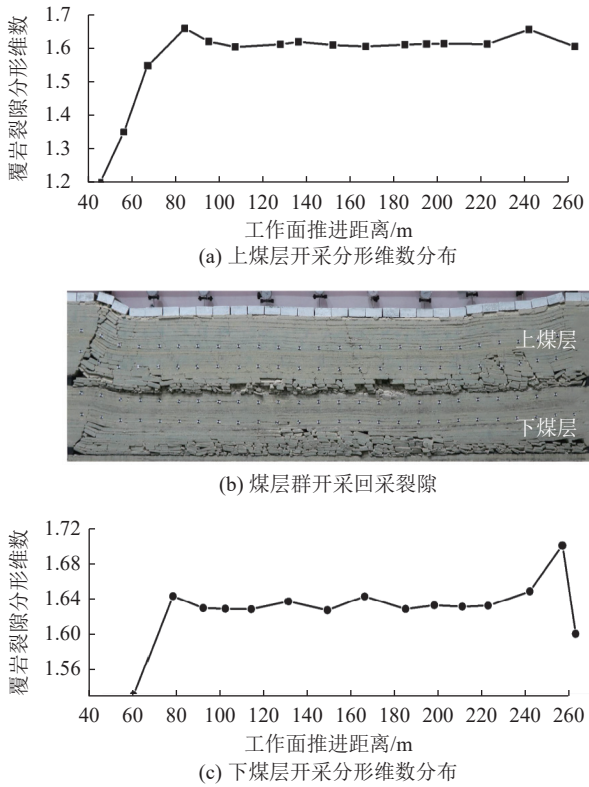


图 5 煤层群开采覆岩裂隙分形维数特征

Fig.5 Fractal dimension characteristics of overlying fissures in coal seam mining

活化形成新的岩梁结构，裂隙产生二次活化，分形维数值出现快速增长。

第 4 阶段：下煤层开采稳定增长阶段（距开切眼 78 ~ 263 m）。工作面继续推进，下煤层承载岩层产生周期破断，层间裂隙受上部载荷作用闭合，上覆岩层产生循环活化，承载岩梁结构产生活化与下煤层承载结构形成协同承载体用于承载上部载荷，裂隙产生周期性发育和闭合，分形维数值呈稳定增长趋势。在工作面推进至 240 m 接近终采线处，覆岩裂隙受煤壁支撑作用闭合程度较低，分形维数出现短暂增大的趋势。

3 煤层群开采承载岩层破断结构形态

3.1 承载岩层结构判断准则

浅埋煤层群开采覆岩结构形态主要由下煤层承载岩层结构和上煤层承载岩层结构形态组成。煤层群中下煤层开采承载结构破断形成各种局部承载结构形态的同时，上煤层覆岩承载结构受扰动产生活化，存在一定概率会产生新的承载结构。根据浅埋煤层开采覆岩破断特征，煤层开采后不具备承载作用的上覆松散岩土体随着承载结构的破断形态特征发育至地表，即承载结构产生“台阶岩梁”结构时，地

表将产生一定垂距 d 的台阶下沉。当承载岩层产生“铰接岩梁”结构时，地表产生连续下沉。因此，可根据地表形成的下沉现象间接判定承载岩层形成的承载结构，如图 6 所示。

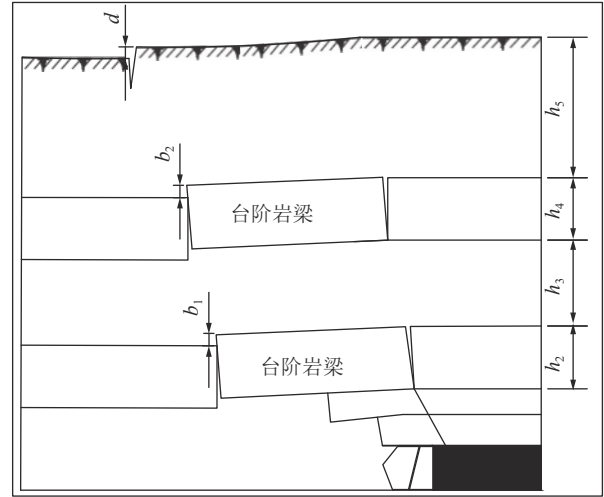


图 6 地表下沉形态反演计算承载结构

Fig.6 Bearing structure diagram of surface subsidence shape inversion calculation

当松散层产生台阶下沉，下沉值为 d 。此时，可以判定上煤层承载岩层必要产生“台阶岩梁”结构。由松散层碎胀量反演计算“台阶岩梁”结构的下沉量 b_2 为

$$b_2 = d - \eta \quad (5)$$

$$\eta = h_5(\omega_2 - 1) \quad (6)$$

由于松散层碎胀量仅受自重作用，可将式(5)和式(6)简化为

$$b_2 = d \quad (7)$$

同理，可通过计算下煤层承载岩层破断关键块的下沉量 b_1 确定

$$b_1 = d - h_3(\omega_1 - 1) \quad (8)$$

式中： η_2 为松散层碎胀量，m； ω_2 为松散层碎胀系数； h_5 为松散层厚度，m； ω_1 为层间岩层碎胀系数； h_3 为层间岩层厚度，m。

当 $b_2 > 0$ ，则上煤层承载岩层形成“台阶岩梁”结构。当 $b_2 = 0$ ，则上煤层承载岩层形成“铰接岩梁”结构。同理，由 b_1 值可判定下煤层承载岩层结构形态。为了提高判定的准确性，可结合钻孔窥视的方法对承载结构判定。

3.2 承载岩层结构形态分析

由上面分析可知，通过地表下沉情况及下沉值可对承载岩层判定得到煤层群采后承载结构形态。由现场和试验观测得知，通常煤层采高 $h < 3$ m 时承

载结构易形成“铰接岩梁”结构, $h \geq 3$ m时易产生“台阶岩梁”结构。因此, 煤层群开采承载结构可分为“铰接-铰接”结构、“台阶-铰接”结构、“铰接-台阶”结构、“台阶-台阶”结构。

1) “铰接-铰接”结构(图7)。工作面推进上煤层承载岩层产生破断, A 、 B 和 C 岩块相互铰接承载上部载荷。下煤层开采承载岩层破断岩块 A_1 、 B_1 和 C_1 相互铰接, 上煤层“铰接岩梁”结构受扰动未失稳仍以铰接形式存在, 同下煤层“铰接岩梁”结构共同承载上覆载荷的组合承载结构, 称为“铰接-铰接”结构。

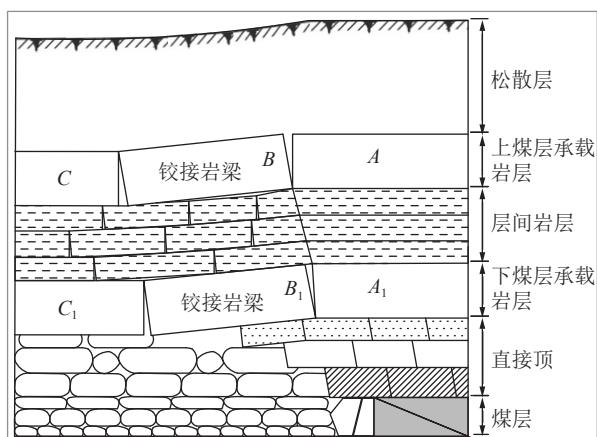


图7 “铰接-铰接”结构
Fig.7 “Hinged-Hinged” structure

2) “台阶-铰接”结构(图8)。工作面回采过程中上煤层破断承载岩块 E 和岩块 F 形成“前高后低、下承上压”受力形态的“台阶岩梁”结构, 导致地表产生台阶下沉。下煤层回采形成“铰接岩梁”结构且未导致上煤层“台阶岩梁”结构破坏, 此时地表台阶下沉值变化不大, 主要以上煤层“台阶岩梁”结构造成的地表下沉为主, 该组合结构称为“台阶-铰接”结构。

3) “铰接-台阶”结构(图9)。在上煤层产生铰接结构后, 下煤层回采承载破断岩块 E_1 和岩块 F_1 形成“台阶岩梁”结构^[9]。当上部铰接岩块受扰动未失稳时, 岩层形成“铰接-台阶”结构, 此时上部覆岩裂隙及地表裂缝发育不明显, 地表以连续下沉为主。

4) “台阶-台阶”结构(图10)。上煤层承载岩层形成“台阶岩梁”结构后, 下煤层承载岩层也形成“台阶岩梁”结构。当上下煤层“台阶岩梁”结构破断线出现重合时, 上煤层“台阶岩梁”结构若未产生失稳则覆岩裂隙及地表裂缝产生显著发育, 地表台阶下沉现象明显。若破断线未重合且下煤层“台阶岩梁”破断线超前时, 则上煤层“台阶岩梁”结构失稳几率增大, 地表下沉明显。当下煤层“台阶岩梁”

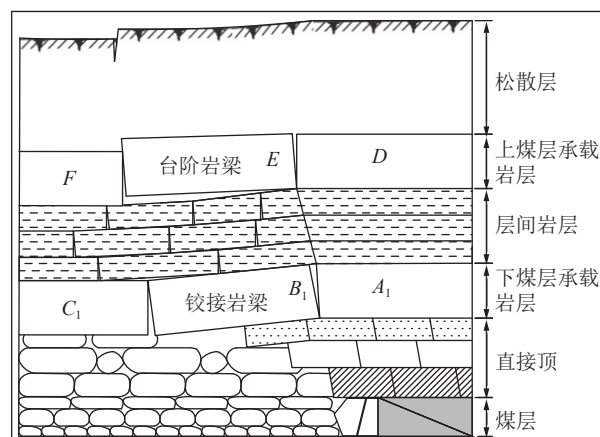


图8 “台阶-铰接”结构
Fig.8 “Step-Hinged” structure

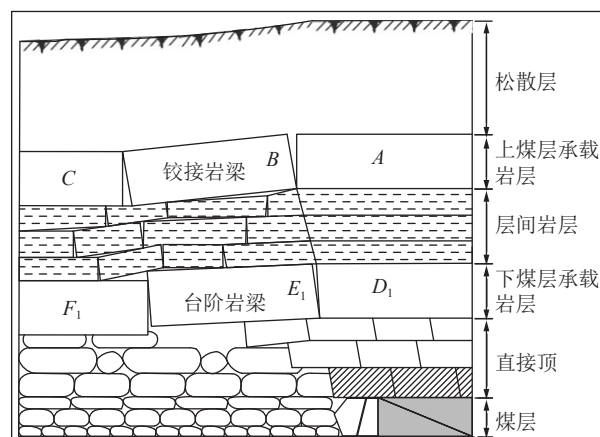


图9 “铰接-台阶”结构
Fig.9 “Hinged-Step” structure

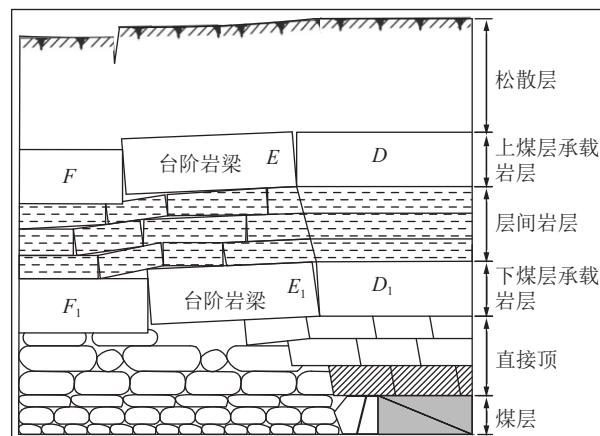


图10 “台阶-台阶”结构
Fig.10 “Step-Step” structure

破断线滞后上煤层“台阶岩梁”结构破断线时, 裂隙演化以上煤层破断特征为主, 产生该现象的组合结构称为“台阶-台阶”结构。

4 煤层群开采承载岩层组合承载结构分析

根据现场开采条件发现, 在工作面推进过程中

承载岩层会出现上煤层“台阶岩梁”和“铰接岩梁”结构以及下煤层“台阶岩梁”和“铰接岩梁”结构的组合结构形态,将相互组合用于承载上覆载荷的结构称为组合承载结构。由前面分析可知,根据采高 h 对承载岩层破断结构的影响,承载岩层破断组合结构形态可划分为 4 类。在煤层群开采过程中,工作面支架阻力力必须满足上部覆岩对支架的载荷,组合岩层破断结构载荷主要包括 3 部分:上煤层承载结构作用力、下煤层承载结构作用力和直接顶作用力。当煤层群开采过程中两种岩梁结构均存在时,则组合承载结构为“台阶-铰接”或“铰接-台阶”结构的力学模型可近似为如图 11 所示的力学模型结构。

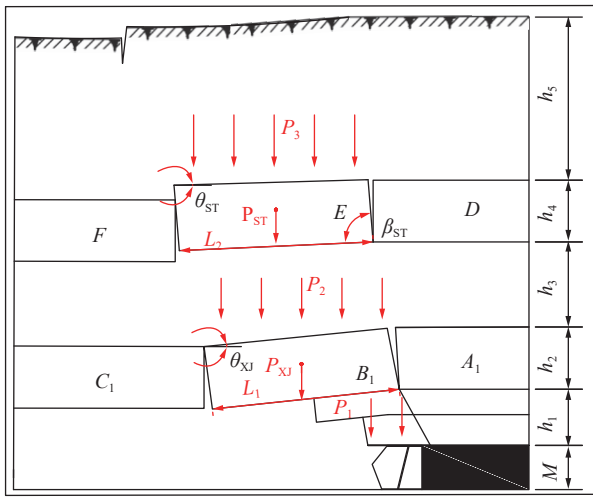


图 11 “台阶-铰接”结构力学计算模型

Fig. 11 “Step-Hinged” structural mechanics calculation model

图 11 中, M 为煤层开采高度, m ; h_1 为下煤层直接顶厚度, m ; h_2 为下煤层承载岩层厚度, m ; h_3 为层间岩层厚度, m ; h_4 为上煤层承载岩层厚度, m ; h_5 为上煤层承载岩层到地表松散层厚度, m ; P_1 为支架控制的直接顶悬顶自重, kN ; P_2 为层间岩层作用力, kN ; P_3 为上煤层承载岩层上部松散层对承载岩层传递的有效载荷, kN ; P_{X1} 为下煤层“铰接岩梁”结构 B_1 关键块自重, kN ; P_{ST} 为上煤层“台阶岩梁”结构 E 关键块自重, kN ; L_1 为下煤层承载岩层关键块破断长度, m ; L_2 为上煤层承载岩层关键块破断长度, m ; θ_{X1} 为下煤层“铰接岩梁”结构 B_1 关键块回转角, $(^\circ)$; θ_{ST} 为上煤层“台阶岩梁”结构 E 关键块回转角, $(^\circ)$; β_{ST} 为上煤层“台阶岩梁”结构岩层破断角, $(^\circ)$ 。

4.1 力学分析

4.1.1 上煤层承载结构作用力

上煤层承载岩层产生破断形成两种破断结构分别是“台阶岩梁”结构(图 12)和“铰接岩梁”结构(图 13),承载岩层破断结构受到上部松散岩土体有

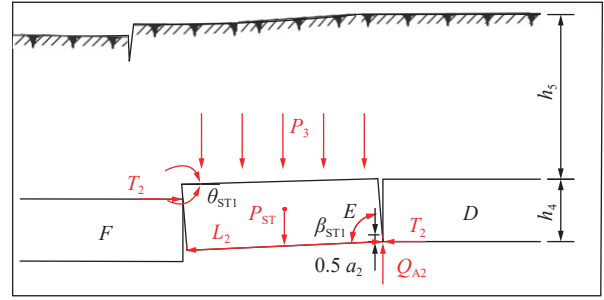


图 12 上煤层“台阶岩梁”结构力学计算模型

Fig. 12 Calculation model of structural mechanics of upper coal seam “step rock beam”

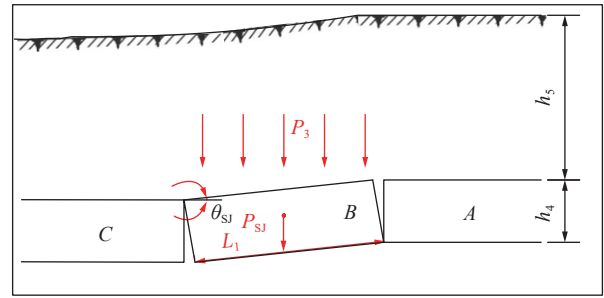


图 13 上煤层“铰接岩梁”结构力学计算模型

Fig. 13 Calculation model of structural mechanics of “hinged rock beam” in upper coal seam

效载荷 P_3 和自重载荷作用。

1) “台阶岩梁”结构作用力。对于上煤层形成“台阶岩梁”结构时,松散岩土体有效载荷 P_3 为

$$P_3 = L_2 \gamma_5 h_5 K_G \quad (9)$$

式中: γ_5 为上煤层承载岩层上部松散层平均容重, kN/m^3 ; K_G 为载荷传递系数。

根据“台阶岩梁”滑落失稳 S-R 判定准则可得:

$$T_2 \tan \varphi + R_{ST} \geq Q_{A2} \quad (10)$$

式中: T_2 为破断岩块 D 和 E 在接触点 A 的水平挤压力; R_{ST} 为保证上煤层承载岩层破断岩块稳定性支护力, kN ; Q_{A2} 为“台阶岩梁”接触点剪力, kN/m 。

上煤层承载岩层破断以“台阶岩梁”结构存在时,“台阶岩梁”作用力 $R_{ST}^{[21]}$ 为

$$R_{ST} \geq \left[1 - \frac{\frac{h_5}{\sin \beta_{ST}} \cos(\beta_{ST} - \theta_{ST}) + \frac{L_2}{2} \cos \theta_{ST}}{\frac{h_5}{\sin \beta_{ST}} \sin(\beta_{ST} - \theta_{ST}) - c_2 - 0.5a_2} \tan \varphi \right] \times (P_3 + P_{ST}) b_z \quad (11)$$

式中: a_2 为上煤层承载岩层形成“台阶岩梁”结构关键块挤压面高度, m ; $\tan \varphi$ 为岩块摩擦系数,可取 0.5; c_2 为台阶岩梁 E 岩块回转下沉量, m ; b_z 为支架宽度, m 。

“台阶岩梁”结构自重载荷 P_{ST} 为

$$P_{ST} = L_2 \gamma_4 h_4 \quad (12)$$

式中: γ_4 为上煤层承载岩层平均容重, kN/m^3 。

2) “铰接岩梁”结构作用力。上煤层“铰接岩梁”松散岩土体有效载荷 P_3 为

$$P_3 = L_2 \gamma_5 h_5 K_G \quad (13)$$

上煤层承载岩层破断块 B 作用力为

$$P_{SJ} = L_2 \gamma_4 h_4 \quad (14)$$

当上煤层承载岩层破断形成“铰接岩梁”结构时, “铰接岩梁”作用力 R_{SJ} 为:

$$R_{SJ} = \frac{4i_2(1 - \sin \theta_{SJ}) - 3\sin \theta_{SJ} - \cos \theta_{SJ}}{4i_2 + 2\sin \theta_{SJ}(\cos \theta_{SJ} - 2)} (P_3 + P_{SJ}) b_Z \quad (15)$$

式中: i_2 为上煤层承载岩层 B 关键块块度。

4.1.2 下煤层承载结构作用力

下煤层承载岩层结构作用力包括: 上煤层松散层岩土体作用力 P_3 ; 层间岩层作用于下煤层承载岩层关键块 B_1 上的作用力 P_2 , 上煤层承载结构作用力 P_{ST} (“台阶岩梁”结构) 或 P_{SJ} (“铰接岩梁”结构)。

1) “台阶岩梁”结构作用力。上煤层承载岩层破断结构为“台阶岩梁”结构时(图 14), 下煤层承载岩层作用力 R_{XT} 为

$$R_{XT} = W_2 + P_2 + P_{XT} \quad (16)$$

式中: P_{XT} 为下煤层“台阶岩梁”结构 E_1 关键块自重, kN ; W_2 为上煤层承载岩层破断结构作用力, kN 。

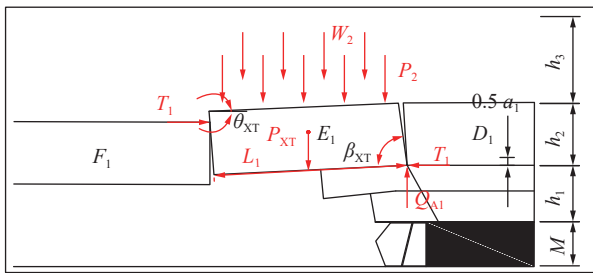


图 14 下煤层“台阶岩梁”结构力学计算模型

Fig.14 Calculation model of structural mechanics of “step rock beam” in lower coal seam

层间岩层作用于下煤层承载岩层关键块 B_1 上的作用力 P_2 和 P_{XT} 为

$$P_2 = L_1 \gamma_3 h_3 \quad (17)$$

$$P_{XT} = L_1 \gamma_2 h_2 \quad (18)$$

式中: γ_2 为下煤层承载岩层平均容重, kN/m^3 ; γ_3 为层间岩层平均容重, kN/m^3 。

根据“台阶岩梁”理论, 下煤层承载岩层“台阶岩梁”结构作用力 W_{XT} 为

$$W_{XT} \geq \left[1 - \frac{\frac{h_3}{\sin \beta_{XT}} \cos(\beta_{XT} - \theta_{XT}) + \frac{L_1}{2} \cos \theta_{XT}}{\frac{h_3}{\sin \beta_{XT}} \sin(\beta_{XT} - \theta_{XT}) - c_1 - 0.5a_1} \tan \varphi \right] \times R_{XT} b_Z \quad (19)$$

式中: a_1 为下煤层承载岩层“台阶岩梁”结构关键块挤压面高度, m ; c_1 为“台阶岩梁” E_1 岩块回转下沉量, m 。

将式(16)~(18)代入式(19)可得:

$$W_{XT} \geq \left[1 - \frac{\frac{h_3}{\sin \beta_{XT}} \cos(\beta_{XT} - \theta_{XT}) + \frac{L_1}{2} \cos \theta_{XT}}{\frac{h_3}{\sin \beta_{XT}} \sin(\beta_{XT} - \theta_{XT}) - c_1 - 0.5a_1} \tan \varphi \right] \times (W_2 + P_2 + P_{XT}) b_Z \quad (20)$$

2) “铰接岩梁”结构作用力。同上煤层“铰接岩梁”结构计算方法相近(图 15), 可采用“砌体梁”理论计算下煤层承载岩层破断岩块 B_1 作用力 R_{XJ} 为

$$R_{XJ} = W_2 + P_2 + P_{XJ} \quad (21)$$

$$P_2 = L_1 \gamma_3 h_3 \quad (22)$$

$$P_{XJ} = L_1 \gamma_2 h_2 \quad (23)$$

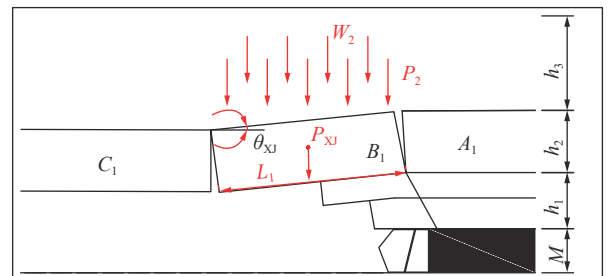


图 15 下煤层“铰接岩梁”结构力学计算模型

Fig.15 Calculation model of structural mechanics of “hinged rock beam” in lower coal seam

当下煤层承载岩层破断形成“铰接岩梁”结构形态时, “铰接岩梁”作用力 W_{XJ} 为

$$W_{XJ} = \frac{4i_1(1 - \sin \theta_{XJ}) - 3\sin \theta_{XJ} - \cos \theta_{XJ}}{4i_1 + 2\sin \theta_{XJ}(\cos \theta_{XJ} - 2)} R_{XJ} b_Z \quad (24)$$

将式(21)~式(23)代入(24)式可得:

$$W_{XJ} = \frac{4i_1(1 - \sin \theta_{XJ}) - 3\sin \theta_{XJ} - \cos \theta_{XJ}}{4i_1 + 2\sin \theta_{XJ}(\cos \theta_{XJ} - 2)} \times (W_2 + P_2 + P_{XJ}) b_Z \quad (25)$$

式中: i_1 为下煤层承载岩层 B_1 关键块块度。

4.1.3 直接顶作用力

直接顶作用力 P_1 (图 16)为自重载荷:

$$P_1 = \gamma_1 h_1 L_K b_Z \quad (26)$$

式中： γ_1 为直接顶平均容重， kN/m^3 ； L_K 为下煤层开采控顶长度， m 。

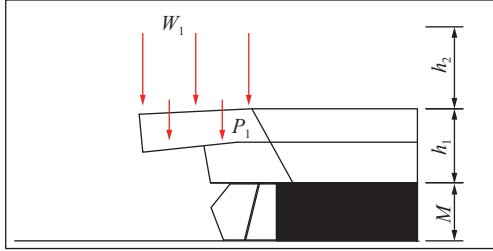


图 16 直接顶力学计算模型

Fig.16 Direct top mechanics calculation model

由上述研究可知，在下煤层开采过程中保证上部承载岩层稳定所需支护阻力 R 为

$$R = (W_1 + P_1) K_Z \quad (27)$$

式中： W_1 为下煤层承载岩层破断结构作用力， kN ； K_Z 为支架动载系数。

4.2 煤层群开采组合承载结构载荷计算

为了简化计算过程，结合现场实测和试验研究对各承载岩层组合结构相关系数附参。 θ_{ST} 和 θ_{XT} 为上下煤层“铰接岩梁”结构 B 和 B_1 关键块回转角，通常取 5° ； θ_{ST} 和 θ_{XT} 为上煤层“台阶岩梁”结构 E 和 E_1 关键块回转角，取 5° ； β_{ST} 和 β_{XT} 为上下煤层“台阶岩梁”结构 E 和 E_1 关键块破断角，取 65° ； i_2 和 i_1 分别为上下煤层承载岩层关键块块度，均取 1.3；由于铰接点处挤压面通常较小，可取 $a_1 \approx a_2 = 0$ 。将上述各参数代入组合岩梁结构载荷计算公式，可得简化后的承载岩层组合结构计算式，具体计算过程见 4.3.1 ~ 4.3.4 节所列。

4.2.1 “台阶-铰接”结构载荷计算

根据图 11 “台阶-铰接”结构力学计算模型，可看作上煤层为“台阶岩梁”结构(图 12)和下煤层为“铰接岩梁”结构(图 15)力学计算模型相结合的组合承载结构，计算支架载荷 R 为

$$R = \gamma_1 h_1 L_K b_Z + \frac{4i_1(1 - \sin \theta_{XJ}) - 3\sin \theta_{XJ} - \cos \theta_{XJ}}{4i_1 + 2\sin \theta_{XJ}(\cos \theta_{XJ} - 2)} \times b_Z \left[\left(1 - \frac{\frac{h_5}{\sin \beta_{ST}} \cos(\beta_{ST} - \theta_{ST}) + \frac{L_2}{2} \cos \theta_{ST}}{\frac{h_5}{\sin \beta_{ST}} \sin(\beta_{ST} - \theta_{ST}) - c_2 - 0.5a_2} \tan \varphi \right) \times (P_3 + P_{ST}) + P_2 + P_{XJ} \right] K_Z \quad (28)$$

将参数代入式(28)，可得：

$$R = \left[\left(1 - \frac{0.28h_5 + 0.11L_2}{0.96h_5 - c_2} \right) (P_3 + P_{ST}) + P_2 + P_{XJ} \right] \times (\gamma_1 h_1 L_K + 0.76K_Z) b_Z \quad (29)$$

4.2.2 “铰接-铰接”结构载荷计算

“铰接-铰接”结构力学计算模型，可看作上煤层为“铰接岩梁”结构(图 13)和下煤层为“铰接岩梁”结构(图 15)力学计算模型相结合的组合承载结构，计算支架载荷 R 为

$$R = \gamma_1 h_1 L_K b_Z + \frac{4i_1(1 - \sin \theta_{XJ}) - 3\sin \theta_{XJ} - \cos \theta_{XJ}}{4i_1 + 2\sin \theta_{XJ}(\cos \theta_{XJ} - 2)} \times \left[\left(\frac{4i_2(1 - \sin \theta_{SJ}) - 3\sin \theta_{SJ} - \cos \theta_{SJ}}{4i_2 + 2\sin \theta_{SJ}(\cos \theta_{SJ} - 2)} \times (P_3 + P_{SJ}) + P_2 + P_{XJ} \right) \right] b_Z K_Z \quad (30)$$

将参数代入式(30)，可得：

$$R = [0.69(P_3 + P_{SJ}) + P_2 + P_{XJ}] \times (\gamma_1 h_1 L_K + 0.69K_Z) b_Z \quad (31)$$

4.2.3 “铰接-台阶”结构载荷计算

通过前面分析已知，“台阶-铰接”和“铰接-台阶”结构力学计算模型所受载荷相近，但不可笼统分析计算。针对“铰接-台阶”结构力学计算模型，具体可看作上煤层为“铰接岩梁”结构(图 13)和下煤层为“台阶岩梁”结构(图 14，图中 $0.5a_1$ 为关键块 D_1 和键块 E_1 挤压接触面)力学计算模型相结合的组合承载结构，计算支架载荷 R 为

$$R = \left[1 - \frac{\frac{h_3}{\sin \beta_{XT}} \cos(\beta_{XT} - \theta_{XT}) + \frac{L_1}{2} \cos \theta_{XT}}{\frac{h_3}{\sin \beta_{XT}} \sin(\beta_{XT} - \theta_{XT}) - c_1 - 0.5a_1} \tan \varphi \right] \times \left[\frac{4i_2(1 - \sin \theta_{SJ}) - 3\sin \theta_{SJ} - \cos \theta_{SJ}}{4i_2 + 2\sin \theta_{SJ}(\cos \theta_{SJ} - 2)} \times (P_3 + P_{SJ}) + P_2 + P_{XT} \right] \times (b_Z + \gamma_1 h_1 L_K b_Z) \quad (32)$$

将参数代入(32)式，可得：

$$R = \left[0.76(P_3 + P_{SJ}) + P_2 + P_{XT} \right] b_Z \times \left(1 - \frac{0.28h_3 + 0.11L_1}{0.96h_3 - c_1} \right) + \gamma_1 h_1 L_K b_Z \quad (33)$$

4.2.4 “台阶-台阶”结构载荷计算

“台阶-台阶”结构力学计算模型，可看作上煤层为“台阶岩梁”结构(图 12)和下煤层为“台阶岩梁”结构(图 14)力学计算模型相结合的组合承载结构，

计算支架载荷 R 为

$$R = \left[1 - \frac{\frac{h_3}{\sin \beta_{XT}} \cos(\beta_{XT} - \theta_{XT}) + \frac{L_1}{2} \cos \theta_{XT}}{\frac{h_3}{\sin \beta_{XT}} \sin(\beta_{XT} - \theta_{XT}) - c_1 - 0.5a_1} \tan \varphi \right] \times \left[\left(1 - \frac{\frac{h_5}{\sin \beta_{ST}} \cos(\beta_{ST} - \theta_{ST}) + \frac{L_2}{2} \cos \theta_{ST}}{\frac{h_5}{\sin \beta_{ST}} \sin(\beta_{ST} - \theta_{ST}) - c_2 - 0.5a_2} \tan \varphi \right) \times (P_3 + P_{ST}) + P_2 + P_{XT} \right] \times b_Z + h_1 L_K b_Z \quad (34)$$

将参数代入式(34), 可得:

$$R = \left[\left(1 - \frac{0.28h_5 + 0.11L_2}{0.96h_5 - c_2} \right) (P_3 + P_{ST}) + P_2 + P_{XT} \right] b_Z \times \left(1 - \frac{0.28h_3 + 0.11L_1}{0.96h_3 - c_1} \right) + \gamma_1 h_1 L_K b_Z \quad (35)$$

根据大量现场及试验表明, 当开采煤层群层数 $n=2$ 时, 以上 4 种承载岩层组合结构均可能产生。当 $n>2$ 时, 上煤层承载结构多次活化, 导致上煤层“台阶岩梁”结构易失稳, 主要原因是在下煤层工作面推采完毕后, 根据“台阶岩梁”滑落失稳 S-R 判定准则可得: $T_2 \tan \varphi + R_{ST} \geq Q_{A2}$, “台阶岩梁”的稳定性受到 T_2 破断岩块间水平挤压力影响, 当下煤层再次开采时, 上覆岩层运动空间加大, 一定程度上降低了 T_2 和 R_{ST} 的值, 增大了“台阶岩梁”失稳的概率, 增大了形成“铰接岩梁”结构的概率, 从而组合承载结构转变为“铰接-铰接”结构。此时, 承载岩层组合承载结构为“铰接-铰接”结构和“铰接-台阶”结构。

4.3 工程实践

韩家湾煤矿主采 2^{-2} 和 3^{-1} 煤层, 研究区 2^{-2} 煤层埋深为 79 m, 平均采高为 4.3 m, 承载岩层厚度为 16.04 m, 上部赋存厚 22.68 m 的松散土层, 在采动作用下上煤层承载岩层上部基岩层可视为松散体, 厚度为 32.21 m。 2^{-2} 和 3^{-1} 煤层间岩层厚度为 32.5 m, 3^{-1} 煤平均采高为 2.7 m, 承载岩层厚度为 12 m, 直接顶厚度为 4.3 m。松散层平均容重为 23 kN/m^3 , 基岩层平均容重为 26 kN/m^3 。工作面最大控顶距为 5.72 m, 支架宽度为 1.75 m。

4.3.1 组合承载结构形态分析

由于上煤层采高较大, 实测地表产生台阶下沉量为 1.55 m, 根据承载岩层破断形态控制地表下沉的说法, 上煤层承载岩层将产生“台阶岩梁”结构。针对下煤层承载岩层能否产生“台阶岩梁”结构, 由

层间岩层破断碎胀量的充填高度和采高决定。如果充填高度能够充满下沉量, 下煤层承载岩层则可判定产生“铰接岩梁”结构, 反之, 则形成“台阶岩梁”结构。

$$b_1 = d - h_3(\omega_1 - 1) = 1.55 - 1.53 \approx 0$$

由计算结果及下煤层采高 ($h<3 \text{ m}$), 可判定下煤层承载岩层以“铰接岩梁”结构形态存在。因此, 韩家湾煤矿承载岩层组合结构为“台阶-铰接”结构。根据计算及试验数据显示“铰接-铰接”结构载荷值明显小于“台阶-铰接”结构, 因此, 本文仅对载荷值偏大的“台阶-铰接”组合结构分析计算。

4.3.2 上煤层承载结构载荷计算

由物理模拟试验得到, 上煤层承载岩层平均破断距 $L_2=14.5 \text{ m}$, 下煤层承载岩层平均破断距 $L_1=15.6 \text{ m}$, 载荷传递系数 $K_G=0.65$ 。

1) 松散岩土体有效载荷 P_3 为

$$P_3 = L_2 \gamma_5 h_5 K_G = (23 \times 22.68 + 26 \times 32.21) \times 14.5 \times 0.65 = 12\,809 \text{ kN}$$

2) 上煤层承载岩层作用力 R_{ST} 为

$$P_{ST} = L_2 \gamma_4 h_4 = 14.5 \times 26 \times 16.04 = 6\,047 \text{ kN}$$

3) 上煤层承载岩层“台阶岩梁”结构作用力 W_2 为

$$W_2 = \left[1 - \frac{\frac{h_5}{\sin \beta_{ST}} \cos(\beta_{ST} - \theta_{ST}) + \frac{L_2}{2} \cos \theta_{ST}}{\frac{h_5}{\sin \beta_{ST}} \sin(\beta_{ST} - \theta_{ST}) - c_2 - 0.5a_2} \tan \varphi \right] \times (P_3 + P_{ST}) \approx 12\,011 \text{ kN}$$

4.3.3 下煤层承载结构载荷计算

1) 层间岩层作用力 P_2 为

$$P_2 = L_1 \gamma_3 h_3 = 15.6 \times 26 \times 32.5 = 13\,182 \text{ kN}$$

2) 下煤层承载岩层作用力 R_{XJ} 为

$$P_{XJ} = L_1 \gamma_2 h_2 = 15.6 \times 26 \times 12 = 4\,867.2 \text{ kN}$$

3) 下煤层承载岩层“铰接岩梁”结构作用力 W_1 为

$$W_1 = \frac{4i_1(1 - \sin \theta_{XJ}) - 3 \sin \theta_{XJ} - \cos \theta_{XJ}}{4i_1 + 2 \sin \theta_{XJ} (\cos \theta_{XJ} - 2)} \times (W_2 + P_2 + P_{XJ}) \approx 5\,290.59 \text{ kN}$$

4) 直接顶作用力 W_1 为

$$P_1 = \gamma_1 h_1 L_K b_Z = 26 \times 4.3 \times 5.72 \times 1.75 = 1\,119.12 \text{ kN}$$

4.3.4 支架支撑载荷计算

根据现场实测, 支架动载系数 K_Z 取 1.6, 得到煤层群开采支架所需载荷为:

$$R = (W_1 + P_1) K_Z \approx 10\,255.54 \text{ kN}$$

由计算结果可知, 确保组合承载结构稳定所需支架额定工作阻力应大于 10 255.54 kN, 现场采用支架工作阻力为 12 000 kN。通过对该工作面 0~303 m 矿压数据监测(图 17), 在 13 次来压中仅存在 3 次支架工作阻力值大于理论计算值, 约占来压次数的 23%, 其中最大值仅为理论计算值的 1.01 倍, 现场实测数据和理论计算结果相近, 满足生产需要, 验证了本次研究的科学合理性。

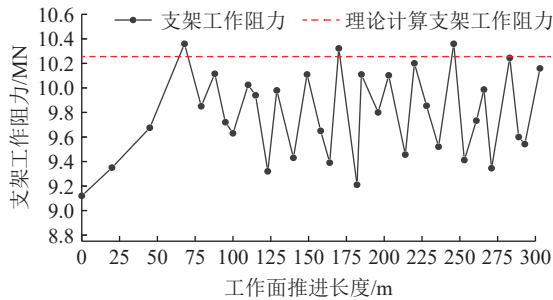


图 17 支架工作阻力变化曲线

Fig.17 Variation curve of support working resistance

5 结 论

1) 通过物理相似模拟得到, 煤层群开采覆岩多次活化, 裂隙演化过程可分为 4 个阶段, 分别为: 上煤层开采快速增长阶段; 上煤层开采平稳增长阶段; 下煤层开采快速增长阶段; 下煤层开采稳定增长阶段。

2) 由现场实测和试验验证, 上煤层开采承载岩层产生“台阶岩梁”结构时, 裂隙演化程度较高, 地表产生台阶下沉; 承载岩层产生“铰接岩梁”结构时, 裂隙演化程度偏低, 地表以连续下沉为主。下煤层开采后, 导致上煤层覆岩承载结构再次活化产生运移, 由稳定承载结构赋存状态转变为活化状态。

3) 浅埋煤层群组合承载结构形态主要由承载结构类型和层间岩层碎胀充填量决定。上煤层承载结构形态导致地表产生相应下沉, 可根据地表下沉量判定上煤层承载结构形态; 由层间岩层碎胀量 $b_1 = d - h_3(\omega_1 - 1)$ 判定下煤层承载结构形态。通过判定可确定浅埋煤层群组合承载结构形态为: “铰接-铰接”、“台阶-铰接”、“铰接-台阶”和“台阶-台阶”结构。

4) 当开采煤层群层数 $n > 2$ 时, 上煤层承载结构多次活化, 组合承载结构为“铰接-铰接”结构和“铰接-台阶”结构。

5) 建立了组合承载结构力学计算模型, 结合矿井地质条件, 通过计算得到了韩家湾煤矿承载岩层“台阶-铰接”结构形态保持稳定所需支架载荷应大

于 10 255.54 kN。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 刘清洲, 张 杰, 赵加才, 等. 浅埋煤层覆岩采动裂缝对采空区漏风影响的研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(12): 131-135.
LIU Qingzhou, ZHANG Jie, ZHAO Jiakai, et al. Influence of mining-induced fracture in overburden of shallow buried coal seam to air leakage in goaf[J]. Coal Engineering, 2021, 53(12): 131-135.
- [3] 董书宁, 姬亚东, 王 皓, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田典型顶板水害防控技术与应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2367-2375.
DONG Shuning, JI Yadong, WANG Hao, et al. Prevention and control technology and application of roof water disaster in Jurassic coal field of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2367-2375.
- [4] 赵毅鑫, 刘文超, 张 村, 等. 近距离煤层蹬空开采围岩应力及裂隙演化规律[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 259-273.
ZHAO Yixin, LIU Wenchao, ZHANG Cun, et al. Stress and fracture evolution of surrounding rock during mining above mined out area in contiguous coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 259-273.
- [5] 杨登峰, 张拥军, 王 盛, 等. 浅埋煤层顶板隐伏断层倾角对矿压显现影响分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(4): 72-82.
YANG Dengfeng, ZHANG Yongjun, WANG Sheng, et al. Analysis of the influence of hidden fault dip angle on ground pressure behavior in shallow seam roof[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(4): 72-82.
- [6] 李建伟, 刘长友, 赵 杰, 等. 沟谷区域浅埋煤层采动矿压发生机理及控制研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 104-110.
LI Jianwei, LIU Changyou, ZHAO Jie, et al. Study on occurrence mechanism and control technology of mining-induced strata pressure in shallow depth coal seams of valley region[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(9): 104-110.
- [7] 黄庆享, 周金龙. 浅埋煤层大采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.
- [8] 杨治林. 浅埋煤层长壁开采顶板岩层的不稳定状态[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1341-1345.
YANG Zhilin. Instability behavior for roof strata in shallow seam longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1341-1345.
- [9] 黄庆享, 杜君武, 侯恩科, 等. 浅埋煤层群覆岩与地表裂隙发育规律和形成机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(1): 7-15.
HUANG Qingxiang, DU Junwu, HOU Enke, et al. Research on

- overburden and ground surface cracks distribution and formation mechanism in shallow coal seams group mining[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2019, 36(1): 7-15.
- [10] 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.
- [11] 杨敬轩, 刘长友, 杨宇, 等. 浅埋近距离煤层房柱采空区下顶板承载及房柱尺寸[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(2): 161-168.
- YANG Jingting, LIU Changyou, YANG Yu, *et al.* Study of the bear-ing mechanism of the coal roof and the dimension selection of the room and pillar[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(2): 161-168.
- [12] 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商榷[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.
- [13] 张杰, 何义峰, 罗南洪, 等. 浅埋煤层群重复采动覆岩运移及裂隙演化规律研究[J]. *煤矿安全*, 2022, 53(3): 58-65.
- ZHANG Jie, HE Yifeng, LUO Nanhong, *et al.* Research on the movement and fracture evolution of overburden in the repeated mining of shallow coal seams group[J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(3): 58-65.
- [14] 任艳芳. 浅埋深工作面基岩层全厚切落的时空演化过程[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(S2): 561-570.
- REN Yanfang. Spatiotemporal evolution process of full thickness cutting of roof bedrock layer in shallow buried working face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S2): 561-570.
- [15] 徐祝贺, 朱润生, 何文瑞, 等. 厚松散层浅埋煤层大工作面开采沉陷模型研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 7(2): 264-271.
- XU Zhuhe, ZHU Runsheng, HE Wenrui, *et al.* Subsidence model of large working face in shallow buried coal seam with thick loose layer[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2020, 7(2): 264-271.
- [16] 侯恩科, 陈育, 车晓阳, 等. 浅埋煤层过沟开采覆岩破坏特征及裂隙演化规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(10): 185-192.
- HOU Enke, CHEN Yu, CHE Xiaoyang, *et al.* Study on overburden failure characteristics and fracture evolution law of shallow buried coal seam through trench mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(10): 185-192.
- [17] 任艳芳. 浅埋深工作面覆岩“悬臂梁-铰接岩梁”结构的提出与验证[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(S1): 1-8.
- REN Yanfang. Presentation and verification of “cantilever beam-articulated rock beam” composite structure in shallow buried working face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(S1): 1-8.
- [18] 黄克军, 黄庆享, 王苏健, 等. 浅埋煤层群采场周期来压顶板结构及支架载荷[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(10): 2687-2693.
- HUANG Kejun, HUANG Qingxiang, WANG Sujian, *et al.* Research on roof structure and support resistance during periodic weighting in shallow group coal seams mining face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(10): 2687-2693.
- [19] 谢和平, 张泽天, 高峰, 等. 不同开采方式下煤层应力场-裂隙场-渗流场行为研究[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(10): 2405-2417.
- XIE Heping, ZHANG Zetian, GAO Feng, *et al.* Stress-fracture-seepage field behavior of coal under different mining layouts[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(10): 2405-2417.
- [20] 杨滨滨, 袁世冲, 郑德志, 等. 近距离煤层重复采动覆岩裂隙时空演化特征研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(2): 255-263.
- YANG Binbin, YUAN Shichong, ZHENG Dezhi, *et al.* Spatial and temporal characteristics of overburden fractures due to repeated mining in close distance coal seams[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2022, 39(2): 255-263.
- [21] 黄庆享, 赵萌焯, 黄克军. 浅埋煤层群开采顶板双关键层结构及支护阻力研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(1): 71-77, 86.
- HUANG Qingxiang, ZHAO Mengye, HUANG Kejun. Study of roof double key strata structure and support resistance of shallow coal seam group mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(1): 71-77, 86.