

DOI: 10.11779/CJGE201906016

浅埋房式采空区下长壁采场动载矿压发生机制

霍丙杰¹, 荆雪冬¹, 范张磊¹, 谢伟², 段志华¹, 解振华¹

(1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 神东天隆集团有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: 为了揭示浅埋房式采空区对下位煤层开采矿压显现的控制机制, 降低工作面过房式采空区的动压显现强度和压架风险, 以神东矿区霍洛湾煤矿 2²煤层房式采空区下 3¹煤层长壁开采工作面动压特征为研究对象, 将 3¹煤层覆岩结构分为四类, 利用理论分析和相似材料模拟等方法, 系统研究了不同覆岩结构类型运动特征、力学模型及对 3¹煤层长壁工作面的动压控制机制。结果表明: 房式采空区稳定房柱下易形成上下位关键层双悬臂梁结构, 双悬臂梁结构协同失稳是形成动载矿压的主要原因; 房柱失稳区主关键层形成的不稳定砌体梁结构及靠近大煤柱未失稳的房柱随下位煤层开采滑落失稳是导致长壁工作面动载矿压发生的原因; 当 3¹煤层工作面上覆前方为房柱失稳区时, 工作面推出集中煤柱时的动载矿压是由于大煤柱两侧关键块已提前滑落失稳, 两关键块间无作用力, 倒梯形岩柱与亚关键层联合失稳作用结果; 当 3¹煤层工作面上方为房柱稳定区时, 工作面推出集中煤柱时, 动载矿压是由房柱失稳所致。

关键词: 浅埋煤层; 房式采空区; 覆岩结构; 动载机制; 覆岩运动

中图分类号: TD325 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)06-1116-08

作者简介: 霍丙杰(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事矿山压力与矿井动力灾害防治研究工作。Email: huobingjie@163.com。

Mechanism of dynamic load of longwall mining under shallow room mining goaf

HUO Bing-jie¹, JING Xue-dong¹, FAN Zhang-lei¹, XIE Wei², DUAN Zhi-hua¹, XIE Zhen-hua¹

(1. College of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Shendong Tianlong Group, Erdos 017000, China)

Abstract: In order to explore the control mechanism of pressure appearing in the lower coal seam of shallow-buried coal bed with room mining goaf, to reduce the dynamic pressure of the working face through the room mining goaf, and to mitigate the risk caused by the coal pillar due to removal of hydraulic support, dynamic pressure characteristics of the 3¹ coal bed working face with longwall mining under the 2² coal bed room mining goaf are studied. The overburden structure of 3¹ coal seam is divided into four types. The theoretical analysis and simulation of similar materials are adopted to analyze the structure and motion models for the overlying strata under dynamic load, and to reveal the mechanism of dynamic pressure. Conclusions are as follows: with the stability of the room goaf, the double cantilever beam structures easily lead to the upper and lower key layers, and the fracture of the key stratum is the main reason for the formation of dynamic load. The unstable masonry beam structure with the instability of the main roof and the room pillars near the large coal pillar are not unstable. The instability of the structure is caused by the collapse of the lower coal seam, resulting in the dynamic ground pressure. The key block firstly slides due to instability, and two key blocks without force and trapezoidal weight of rock pillar above the coal pillar are directly applied on the working face, which causes the roof to fall behind. When the coal pillar cannot effectively support the above inverted trapezoidal rock pillar, the instability of trapezoidal rock pillar and crack movement of roof collapse cause dynamic load in common.

Key words: shallow seam; room mining goaf; overburden structure; mechanism of dynamic load; overburden movement

0 引言

浅埋房式采空区对下伏近距离煤层采场覆岩结构、工作面矿压显现具有重要影响。霍丙杰等^[1]分析了霍洛湾煤矿 2²煤层房式采空区覆岩结构特征及其对下位 3¹煤层应力场的影响; 解兴智等^[2-3]研究了房柱式采空区下长壁工作面顶板结构特征, 提出房柱式

采空区上部覆岩在一定的采高范围内存在叠合梁结构; 孔令海等^[4]探讨了房柱采空区下上覆岩层运动规律; 杨真等^[5]分析了近距离房柱采空区下长壁采场覆岩随时间变化的渐进破断过程和采动裂隙的发展演化

基金项目: 国家自然科学基金项目(51504127, 51774174)

收稿日期: 2018-07-20

表1 霍洛湾煤矿²⁻²—³⁻¹煤层柱状图及力学参数Table 1 Coal column of Huoluowan coal mine ²⁻²—³⁻¹ and mechanical parameters

柱状图	岩层名称	厚度/m	体积力/(kN·m ⁻³)	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	体积模量/GPa	剪切模量/GPa
...	细粒砂岩	20.26	23.53	1.95	2.96	6.02	3.97
...	砂质泥岩	1.51	23.3	2.18	3.82	6.12	4.21
...	2-2煤	5.36	14.7	0.82	2.64	1.60	0.67
...	泥岩	4.21	23.8	1.58	3.55	4.35	2.73
...	砂质泥岩	2.09	23.3	2.18	3.82	6.12	4.21
...	细粒砂岩	2.54	23.53	1.95	2.96	6.02	3.97
...	砂质泥岩	4.7	23.3	2.18	3.82	6.12	4.21
...	细粒砂岩	11.71	23.53	1.95	2.96	6.02	3.97
...	粉砂岩	7.86	22.09	4.24	2.94	5.26	3.46
...	砂质泥岩	1.88	23.3	2.18	3.82	6.12	4.21
...	3-1煤	4.16	14.7	0.82	2.64	1.60	0.67
...	泥岩	1.94	23.8	2.18	3.55	4.35	2.73

开采边界→ 2-2煤层	房柱稳定区 四区段	应力 集中区	房柱失稳区 五区段	应力集中区	六区段	开采边界
...
3-1煤层	6×8房柱	20 m煤柱	50 m煤柱

图1 霍洛湾矿²⁻²煤层浅埋房式采空区覆岩结构分类^[1]Fig. 1 Classification of overburden structure in shallow room mining goaf of ²⁻² coal seam in Huoluowan Coal Mine

规律。杨治林^[6]认为顶板强烈来压主要是由结构滑落失稳造成的; 李浩荡等^[7]认为基本顶的失稳切冒且无法形成稳定结构是瞬间压架的根本原因; 杨俊哲^[8]确定采空区集中煤柱失稳引发其上覆基岩关键块回转失稳, 导致动压事故。鞠金峰等^[9-12]、许家林等^[13]研究了出煤柱阶段煤柱上方两关键块体的三铰式结构的不稳定性及其压架机理; 付兴玉等^[14]分析了超前支承压力作用下小煤柱保持稳定时的临界弹性核宽度、动载荷作用下工作面覆岩结构及支架载荷; 田臣等^[15]提出集中煤柱破坏失稳形成功载矿压是工作面上覆煤层集中煤柱及采空区过程中出现的冒顶事故原因; 徐敬民等^[16]、朱卫兵等^[17-18]研究了神东矿区浅埋近距离煤层关键层结构特征与房式采空区下采煤的动压机理; 朱德福等^[19]首次定义了房式采空区煤柱单元失稳概率, 以石圪台煤矿为实例, 计算了3-1-1号煤层房式采空区中煤柱的稳定性。刘畅等^[20]分析了工作面长度对覆岩结构演化及采场矿压显现的影响。

以上房式采空区下工作面动载矿压机理多数是以出集中煤柱阶段采空区顶板铰接岩块滑落回转失稳为主, 对关键层破断后不能形成稳定砌体梁结构工作面出集中煤柱的情形、房柱群结构整体周期性失稳致灾机制研究很少, 且关于本文研究的多关键层不同覆岩

结构种类引发动载矿压的情形还没有涉及。本文以浅埋房式采空区下位煤层开采为研究对象, 补充提出了“已采房式多关键层结构”类型, 对不同覆岩结构可能引发动载矿压现象进行分类研究, 建立覆岩运动模型和力学模型, 揭示动载矿压发生机理, 为浅埋房式采空区下位煤层安全开采提供理论基础。

1 工程背景

1.1 霍洛湾矿²⁻²煤层房式采空区特征

霍洛湾矿²⁻²煤层采用后退房式炮采工艺, 煤房宽度为6 m, 煤柱尺寸为8 m, 即采用“采6留8”布置, 采高为4.0 m。其下位约30 m的³⁻¹煤层厚度平均为3.86 m, 倾角为0~3°, 属稳定煤层。煤层柱状、顶底板岩性特征及煤岩层力学参数见表1。

1.2 ²⁻²煤层房式采空区覆岩结构分类

浅埋房式采空区煤柱留设状况复杂、覆岩结构特征复杂, 煤柱在集中载荷的作用下两侧将发生塑性破坏, 随着时间的增加, 塑性破坏区发展, 尺寸较小的煤柱将失稳破坏; 有的区域由于房柱群稳定覆岩结构的特殊性, 煤柱没有失稳。通过现场调研和地表考察, 综合分析得到房式采空区中20 m、50 m等大煤柱上方地表未发生沉陷, 小尺寸房柱有的区域失稳、有的

区域没有失稳。所以, 将 2² 煤层房柱采空区覆岩结构划分为 4 类, 即房柱稳定覆岩结构、房柱失稳覆岩结构、20 m 煤柱覆岩结构、50 m 煤柱覆岩结构(图 1), 便于分析不同类型覆岩结构特征及其对下位 3¹ 煤层开采的影响。

2 覆岩关键层及破断特征研究

根据钱鸣高等^[21]提出的关键层理论, 确定关键层及破断特征见表 2。

表 2 关键层及其破断特征

Table 2 Distribution and fracture characteristics of key strata

岩性	厚度 /m	初次破断/m	周期破断/m	关键层	至 3 ¹ 煤顶板距离/m
细粒砂岩	20.26	85	33.28	主关键层	41.92
细粒砂岩	11.77	39	15.60	亚关键层	9.74

针对浅埋煤层关键层结构类别^[22]分析, 本煤层的关键层结构属于多层关键层结构, 但和多煤层关键结构又有着很大的差别, 稳定房柱群覆岩结构上方关键层稳定存在, 上煤层具备完整的顶板条件, 待下煤层回采时, 此房式采空区上的关键层还具有主关键层的破断特征, 对下煤层工作面的矿压显现与覆岩运动有重要影响; 房式采空区与 3¹ 煤层之间的亚关键层决定着 3¹ 煤层工作面的常规矿压显现特征。因此, 根据文献[22]的命名方式, 将霍洛湾矿 3¹ 煤层关键层结构称为“已采房式多关键层结构”, 即房式采空区稳定房柱群上下围岩特有的一种关键层结构; 而房柱失稳区下关键层结构为上煤层已采单一关键层结构。

3 不同覆岩结构下动载矿压机制

3.1 房柱稳定区覆岩结构力学模型与动载矿压机理

3¹ 煤层工作面长壁开采会产生一定的自由空间, 上覆岩层在自重应力的作用下会发生一定量的下沉移动变形, 导致岩层失稳、破坏。上下煤层间距大于 20 m, 上煤层顶板可以保持其完整性, 结合霍洛湾煤矿特有的覆岩结构条件, 3¹ 煤开采初期, 房柱群受采动影响较小, 工作面矿压显现和正常长壁开采区别不大, 不会发生动载矿压灾害。

但随着工作面持续推进, 采空区中部房柱随着 3¹ 煤层顶板垮落发生下沉, 2² 煤层顶板离层跨度增大, 载荷向两侧煤柱转移, 同时两侧相邻煤柱承受偏心荷载, 引起相邻煤柱破坏, 最终导致前方大面积小煤柱发生连锁失稳。采动应力影响下, 小煤柱不发生突变失稳的临界弹性核宽度为^[23]

$$w \geq 2a \sqrt{\frac{q}{[\sigma_m]}} \quad (1)$$

式中 w 为小煤柱弹性核宽度 (m); a 为小煤柱宽度 (m); q 为弹性基础所受载荷 (Pa); $[\sigma_m]$ 为小煤柱压缩应力峰值 (Pa)。

随着房柱失稳, 跨度增大至一定距离将导致主关键层初次破断, 如图 2 所示, 覆岩载荷向临近房柱①转移, 过大的载荷使处于临界稳定的房柱①失稳破坏, 进而引发房柱上方关键层发生破断形成块体 B 再次发生回转, 将该关键层控制的载荷传递至下方关键块上, 使其发生滑落失稳并沿顶板切落, 产生动载矿压、支架压死等事故。在此期间, 关键块 B 下的随自重下沉的房柱, 可能因承载过大载荷发生失稳, 更易引发压架事故。之后长壁工作面覆岩形成“双悬臂梁结构”, 上下关键层的周期破断, 将控制 3¹ 煤工作面的矿压显现, 由关键层周期破断距的理论分析可知, 亚关键层破断两次主关键层将协同破断, 上下关键层协同破断即双悬臂梁结构失稳工作面将产生周期动载矿压, 如图 3 所示。

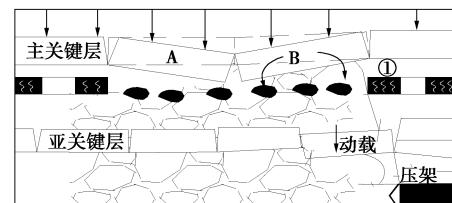


图 2 关键层初次破断动载演化

Fig. 2 Dynamic evolution of first break of key stratum

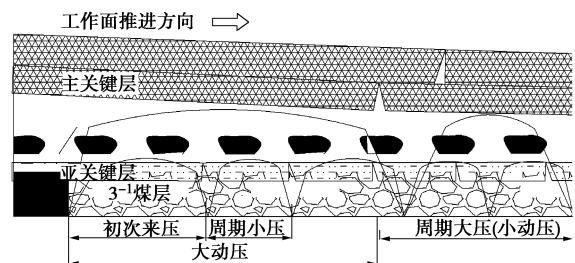


图 3 动载性矿压示意图

Fig. 3 Sketch map of dynamic load rock pressure

3.2 房柱失稳区覆岩结构力学模型与动载矿压机理

房柱失稳区下关键层结构类型类似于上煤层已采单一关键层结构, 下位 3¹ 煤层顶板破断失稳特征与覆岩主关键层破断后的砌体梁结构是否失稳关系很大。若房柱失稳后其覆岩主关键层破断后的砌体梁结构能形成稳定结构, 则下位煤层工作面矿压显现一般不会出现压架事故; 反之, 下部煤层开采时砌体梁结构易出现滑落失稳, 下煤层工作面易发生动载矿压。可以用砌体梁结构的 S-R 稳定判据来进行说明^[24]:

$$h + h_1 \leq \frac{\sigma_c}{30\rho g} \left(\tan \varphi + \frac{3}{4} \theta \right)^2 \quad (\text{S 判据}) \quad (2)$$

$$h + h_1 \leq \frac{0.15\sigma_c}{\rho g} \left(i^2 - \frac{3}{2} i \sin \theta + \frac{1}{2} \sin^2 \theta \right)^2 \quad (\text{R 判据}) \quad (3)$$

式中, h 为亚关键层厚度 (m); h_1 为亚关键层所负载荷岩层厚度 (m); σ_c 为亚关键层的抗压强度 (MPa); ρg 为岩体的体积力; θ 为砌体梁中暴露岩块断裂后的回转角 ($^\circ$); $\tan \varphi$ 为岩块间的摩擦系数; i 为岩块的厚长比, 即 $i = h/l$ (l 为岩块长度)。

房柱失稳区下并不一定所有房柱全部失稳, 靠近大煤柱的房柱稳定性高, 因此房柱失稳区过大煤柱阶段形成关键层块体结构状态, 如图 4 所示, 图中水平推力 T 的作用点位置取 $a/2$ 处, $a = 0.5(h - l \sin \theta)$ 为岩块间接触面高度。

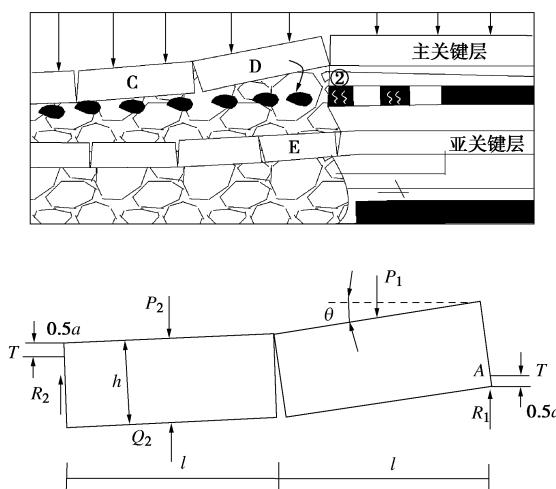


图 4 主关键层块体结构运动与力学模型

Fig. 4 Movement and mechanical model of main key stratum block structure

可以看出主关键层 C, D 岩块是砌体梁结构的关键块, 此结构失稳是导致动载矿压的根本原因。要使结构不发生回转变形失稳, 必须满足:

$$3i \frac{\Delta}{l} - \left(\frac{\Delta}{l} \right)^2 \leq \frac{40p_1}{3\sigma_c} + 2i^2 \quad , \quad (4)$$

$$\Delta = m - \sum h(K_p - 1) \quad . \quad (5)$$

式中 p_1 为关键层块体 D 承受的载荷 (MPa); m 为 2# 煤层等效采高 (m); $\sum h$ 为直接顶岩层的垮落厚度 (m); K_p 为岩石的碎胀系数; Δ 为自由空间高度 (m)。由此可见, 随着 3# 煤层顶板覆岩垮落时 Δ 增大, 当式 (4) 左侧值大于右侧值时, 砌体梁结构发生回转变形失稳, 当两层煤集中应力重合在一起时, 对 3# 煤工作面造成冲击。

此结构的最大剪切力 R_1 发生在 A 点, 为防止结

构在 A 点滑落失稳需满足:

$$i \leq \tan \varphi + 0.75 \frac{\Delta}{l} = 0.3 + 0.75 \frac{\Delta}{l} \quad . \quad (6)$$

将霍洛湾矿 3# 煤层实际开采参数代入式 (6), 易知此结构不稳定。断裂线刚裸露于房柱边缘时结构是不可能存在的, 若要形成此结构, 断裂线内错于房柱边缘, 此时房柱将支撑关键块 D, 随着 3# 煤工作面继续推进, 处于临界稳定状态的房柱②的破坏失稳必然导致关键块 D 的滑落失稳, 载荷向下传递至关键块 E 上, 引发动载矿压。

3.3 长壁工作面过大煤柱时动载矿压机理 (工作面上覆前方为房柱失稳区)

对于出大煤柱动载矿压的研究多是以关键块三铰结构的失稳为研究对象, 由式 (6) 及霍洛湾矿开采条件可知, 主关键层关键块在大煤柱边缘可形成两种结构: 一是断裂线内错于煤柱的砌体梁结构, 此类结构前人已做大量研究。因此, 本文针对第二种结构形态, 即工作面出大煤柱时, 其两侧关键块已提前滑落失稳, 两关键块无作用力, 主要呈现为无规则散体堆积状态, 如图 5 所示。

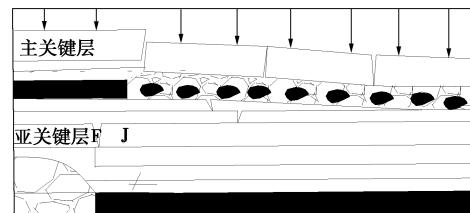


图 5 出煤柱前关键块已提前失稳垮落

Fig. 5 Unstable collapse of key blocks before coal pillar

大煤柱下方 3# 煤层工作面处于应力集中状态, 且在过大煤柱时尤为明显, 两层煤应力叠加, 煤柱下方亚关键层因不满足式 (6) 必然发生架后切落, 且煤层间岩层整体下沉, 矿压显现较为强烈、频繁。

随着煤柱弹性核宽度逐渐减小, 出煤柱时, 当煤柱不能稳定支撑上覆岩层重量时, 煤柱上方倒梯形岩柱失稳, 其上方岩层迅速下沉, 易沿煤柱影响范围边缘切落, 对亚关键块 F, J 冲击, 此时动载矿压和以往不同, 不仅对工作面造成冲击, 对超前工作面一定范围回采巷道的破坏性也较大。

3.4 长壁工作面过大煤柱时动载矿压机理 (工作面上覆前方为房柱稳定区)

房柱的稳定性决定着动载矿压的显现情况, 若房柱因受超前支承压力影响在下伏工作面将要推出大煤柱而未进入房柱稳定区下方发生大面积失稳时, 这种情况下形成不稳定的三铰结构或无作用力的主关键块结构, 类似于工作面前方为房柱失稳的出大煤柱岩层

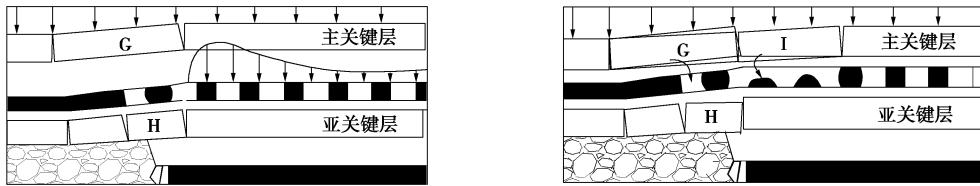


图 6 动载矿压演化过程

Fig. 6 Evolution process of dynamic load

结构, 但此时不仅是关键块体的失稳, 还伴随动力载荷。这类事故发生的位置在煤柱边界 $\pm 5\text{ m}$ 处。

根据邻矿生产经验可判定, 房柱在工作面将要推出大煤柱时未发生失稳, 出大煤柱时不具备上述动载矿压发生的条件, 因此出大煤柱前一般不会发生动载矿压, 此类动载矿压是由大煤柱失稳引发。当工作面推出大煤柱时, 工作面前方采动应力主要由稳定房柱承担, 因此房柱进一步弱化, 但只要房柱不失稳, 工作面就不会产生动载矿压。当工作面继续推进至稳定煤柱下方时, 随着层间亚关键层周期性失稳, 破断块体上方房式采空区煤柱所承受载荷转移至前方的稳定煤柱, 叠加的载荷将使处于临界稳定的煤柱过载而失稳破坏, 进而使煤柱上方主关键层发生超前破断形成块体 I, G 并释放能量和 I 块体的逆向回转将主关键层控制的上覆岩层重量传递至下伏亚关键块体 H 上, 受动力载荷和结构回转失稳传递上覆岩层载荷的双重作用, 使块体 H 发生滑落失稳并沿顶板切落, 产生动载矿压造成支架压死、煤壁炸帮等动载事故, 如图 6 所示。

4 物理模拟的试验验证

4.1 相似材料模型的建立

根据相似准则, 工程原型和模型的长度比为 $\alpha_L = 100$, 密度比为 $\alpha_r = 1.5$ 。模型装填尺寸 $5000\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 2000\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高), 如图 7 所示, 图中点表示压力盒埋设位置, 模型上边界直至地表, 不施加外力。

采用石蜡加热融化方式模拟稳定房采区煤房的开挖(图 7 煤层中空白框区域), 融化的石蜡从模型的前端流出, 起到煤房开采的作用, 然后人为破坏留设房柱模拟房柱失稳区域; 20 m 和 50 m 大煤柱按比例留设(图 8)。

4.2 房柱稳定区域下动压机理

房柱稳定区下覆岩垮落及矿压显现规律如图 9 所示。由图可知, 关键层破断且形成砌体梁结构, 残留煤柱所受支承压力较小且满足式(1)要求, 3# 煤层开采过程中上覆房式采空区煤柱没有破坏, 这种情况

下可以忽略上覆房式采空区对下伏 3# 煤层的影响(图 9 (a)), 3# 煤层长壁工作面的矿压显现可以认为不受上覆房采区的影响。此时主关键层的破断对下煤层开采有着较大影响, 是工作面发生动载矿压的主要原因。由图 9 (b) 可知, 主关键层发生初次破断, 关键块回转失稳, 且右侧为房柱失稳区域, 使得关键块有着较大的回转空间, 模拟中工作面前方煤体发生弹射现象, 预计实际生产中可能引发动载矿压。

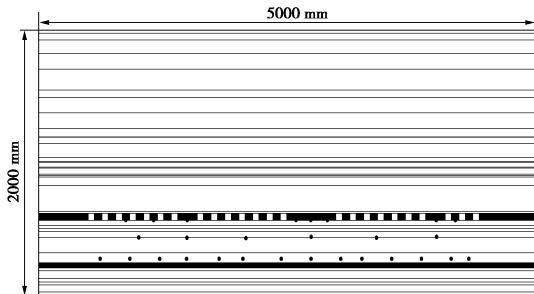


图 7 物理模型装填尺寸及应力监测点

Fig. 7 Loading sizes of model and monitoring points of stress of similar materials

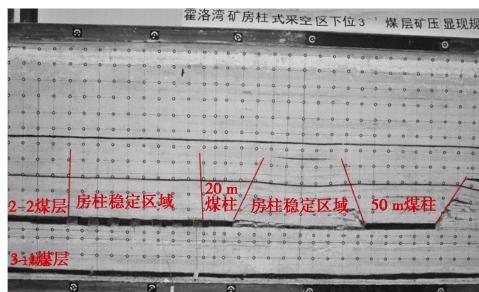
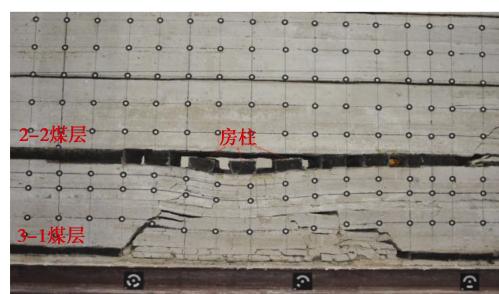
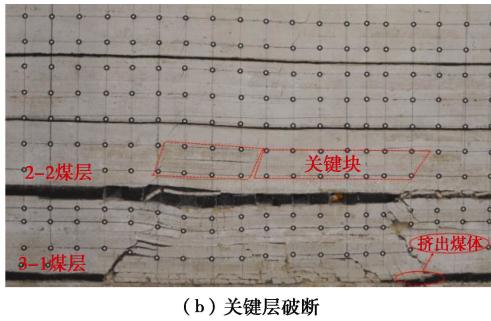


图 8 房式采空区覆岩结构相似模拟

Fig. 8 Similar materials of overburden structure in room gob area



(a) 关键层破断前



(b) 关键层破断

图 9 房柱稳定区域动载矿压相似模拟

Fig. 9 Similar simulation of dynamic load and rock pressure in stable area of room and column

4.3 3^1 煤层长壁工作面出大煤柱动载矿压机理 (工作面上覆前方为房柱失稳区)

房柱失稳区域主关键层关键块较为破碎且分层较多, 大煤柱上方关键块间竖向裂隙发育明显, 没有形成稳定的砌体梁结构, 关键块间基本无作用力, 和理论分析一致, 此时决定工作面动载矿压的是大煤柱上方倒梯形岩柱, 其稳定性决定 3^1 煤层工作面的矿压显现, 如图 10 所示。

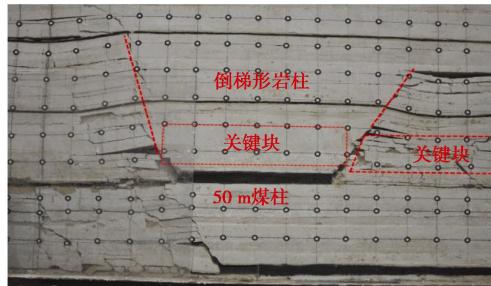


图 10 50 m 煤柱上方关键块结构形态

Fig. 10 Shape of key block structure 50 m above coal pillar

但随着工作面的推进, 由于大煤柱边界存在一定范围的塑性区, 当 3^1 煤工作面煤壁进入其右侧塑性区范围时, 影响煤柱稳定性, 煤柱将不能有效支撑上覆岩层重量, 此时 50 m 煤柱及上方倒梯形岩柱整体下沉, 导致岩柱上方岩层破断垮落, 倒梯形两侧裂隙被重新压实, 此时岩层间作用力较大, 顶板沿煤壁竖向切落, 未开采部分工作面煤体被挤出, 方向和倒梯形岩柱右边界呈反对称形式, 矿压显现剧烈, 如图 11 所示。建议实际开采此位置对煤柱进行弱化措施。

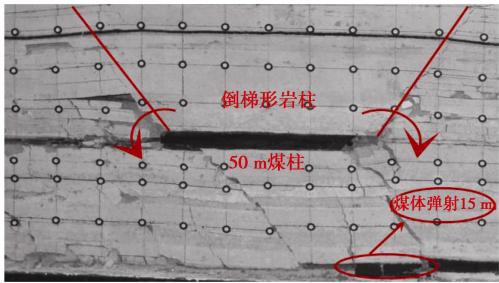


图 11 倒梯形岩柱失稳引发动载矿压示意图

Fig. 11 Dynamic strata triggered by instability of inverted trapezoidal rock pillar

4.4 3^1 煤层长壁工作面出大煤柱动载矿压机理 (工作面上覆前方为房柱稳定区)

若大煤柱前方为房柱稳定区且在出大煤柱时, 大煤柱前方房柱未发生失稳, 工作面进入房柱稳定区下方, 此时靠近大煤柱的房柱卸压, 更不会发生失稳, 因此不具备理论分析中任何一种出大煤柱动载矿压机理, 不会发生动载矿压, 如图 12 所示, 和理论分析一致。

因此此类动载矿压不是由于集中煤柱造成的, 而是由于局部房柱失稳, 但对于房柱失稳的覆岩垮落形态及特征, 应做进一步研究。

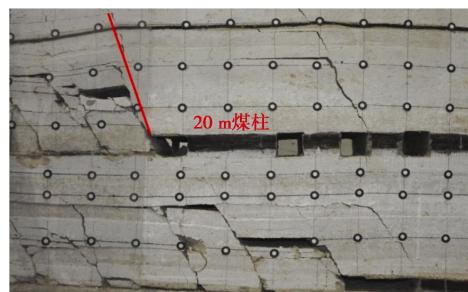


图 12 出大煤柱覆岩运动示意图

Fig. 12 Movement of overlying strata during occurrence of large coal pillar

5 结 论

本文针对霍洛湾矿 3^1 煤层上覆房式采空区的开采特征、关键层赋存特征、覆岩结构特征等进行研究, 分析了不同类型覆岩结构的运动特征、力学模型与动载矿压发生机理, 理论研究与相似模拟研究有较好的一致性, 主要结论如下:

(1) 将霍洛湾矿 3^1 煤层上覆房式采空区关键层结构命名为“已采房式多关键层结构”, 建立了不同覆岩结构类型的运动模型和力学模型, 揭示了房式采空区下长壁工作面动载矿压的发生机理, 研究成果丰富了浅埋房式采空区下位煤层覆岩结构失稳理论。

(2) 3^1 煤层在稳定房柱下易形成上下位关键层双悬臂梁结构, 双悬臂梁结构协同失稳是形成动载矿压的主要原因。

(3) 对于房柱失稳区范围内覆岩结构特征, 类似于上煤层已采单一关键层结构, 受 3^1 煤层开采扰动, 主关键层形成的砌体梁结构和大煤柱附近未失稳房柱结构易发生滑落失稳, 引发 3^1 煤层工作面动载矿压现象。

(4) 对于大煤柱两侧为房柱失稳区类型的覆岩结构, 大煤柱两侧顶板结构无法形成稳定的砌体梁结构, 其覆岩为倒梯形岩柱结构, 当 3^1 煤层工作面推出此类

结构时, 其与亚关键层联合失稳, 对工作面造成冲击。

(5) 对于大煤柱两侧(一侧)为房柱稳定区类型的覆岩结构, 3^1 煤层工作面出大煤柱时, 覆岩类似于实体煤下开采, 不会引发动载矿压; 房柱失稳的时空特征决定了动载矿压的发生机制。

参考文献:

- [1] 霍丙杰, 范张磊, 谢伟, 等. 浅埋房式采空区覆岩结构及对下位煤层开采的影响[J]. 安全与环境学报, 2018, **18**(2): 468 - 473. (HUO Bing-jie, FAN Zhang-lei, XIE Wei, et al. Overburdened structure frames of the room mining goaf in the shallow coal seam and its impact on the lower level mining [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, **18**(2): 468 - 473. (in Chinese))
- [2] 解兴智. 浅埋煤层房柱式采空区下长壁开采矿压显现特征[J]. 煤炭学报, 2012, **37**(6): 898 - 902. (XIE Xing-zhi. Study on the characteristics of strata behavior in shallow seam longwall mining under the room-and-pillar mining goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2012, **37**(6): 898 - 902. (in Chinese))
- [3] 解兴智, 范志忠. 房柱采空区下长壁开采工作面支架支护强度研究[J]. 煤矿开采, 2014, **19**(4): 108 - 111. (XIE Xing-zhi, FAN Zhi-zhong. Supporting density of long-wall mining face under room-and-pillar gob[J]. Coal Mining Technology, 2014, **19**(4): 108 - 111. (in Chinese))
- [4] 孔令海, 王永仁, 李少刚. 房柱采空区下回采工作面覆岩运动规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, **43**(5): 26 - 29. (KONG Ling-hai, WANG Yong-ren, LI Shao-gang. Analysis on overburden strata movement law of coal mining face under goaf of room and pillar mining face[J]. Coal Science and Technology, 2015, **43**(5): 26 - 29. (in Chinese))
- [5] 杨真, 童兵, 黄成成, 等. 近距离房柱采空区下长壁采场顶板垮落特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, **29**(2): 157 - 161. (YANG Zhen, TONG Bing, HUANG Cheng-cheng, et al. Study on the movement law of overlying strata in mining face under room and pillar goaf[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, **29**(2): 157 - 161. (in Chinese))
- [6] 杨治林. 浅埋煤层长壁开采顶板岩层灾害控制研究[J]. 岩土力学, 2011, **29**(增刊 1): 459 - 463. (YANG Zhi-lin. Study of controlling catastrophe for roof strata in shallow seam longwall mining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **29**(S1): 459 - 463. (in Chinese))
- [7] 李浩荡, 杨汉宏, 张斌, 等. 浅埋房式采空区集中煤柱下综采动载控制研究[J]. 煤炭学报, 2015, **40**(增刊 1): 6 - 11. (LI Hao-dang, YANG Han-hong, ZHANG Bin, et al. Control study of strong strata behaviors during the fully mechanized working face out of concentrated coal pillar in a shallow depth seam in proximity beneath a room mining goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2015, **40**(S1): 6 - 11. (in Chinese))
- [8] 杨俊哲. 浅埋近距离煤层过上覆采空区及煤柱动压防治技术[J]. 煤炭科学技术, 2015, **43**(6): 9 - 13, 40. (YANG Jun-zhe. Dynamic pressure prevention and control technology of coal mining face with shallow depth and contiguous seams passing through overburden goaf and coal pillars[J]. Coal Science and Technology, 2015, **43**(6): 9 - 13, 40. (in Chinese))
- [9] 鞠金峰, 许家林. 倾向煤柱边界超前失稳对工作面出煤柱动载矿压的影响[J]. 煤炭学报, 2012, **37**(7): 1080 - 1087. (JU Jin-feng, XU Jia-lin. Influence of leading instability in the upper dip coal pillar boundary to the strong strata behaviors during the working face out of the pillar[J]. Journal of China Coal Society, 2012, **37**(7): 1080 - 1087. (in Chinese))
- [10] 鞠金峰, 许家林. 浅埋近距离煤层出煤柱开采压架防治对策[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, **30**(3): 323 - 330. (JU Jin-feng, XU Jia-lin. Prevention measures for support crushing while mining out the upper coal pillar in close distance shallow seams[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, **30**(3): 323 - 330. (in Chinese))
- [11] 鞠金峰, 许家林, 朱卫兵, 等. 近距离煤层工作面出倾向煤柱动载矿压机理研究[J]. 煤炭学报, 2010(1): 15 - 20. (JU Jin-feng, XU Jia-lin, ZHU Wei-bing, et al. Mechanism of strong strata behaviors during the working faceout of the upper dip coal pillar in contiguous seams[J]. Journal of China Coal Society, 2010(1): 15 - 20. (in Chinese))
- [12] 鞠金峰, 许家林, 朱卫兵, 等. 大柳塔煤矿 22103 综采面压架机理及防治技术[J]. 煤炭科学技术, 2012, **40**(2): 4 - 7. (JU Jin-feng, XU Jia-lin, ZHU Wei-bing, et al. Hydraulic powered support jammed mechanism and prevention technology of fully mechanized coal mining face in Daliuta mine[J]. Coal Science and Technology, 2012, **40**(2): 4 - 7. (in Chinese))
- [13] 许家林, 朱卫兵, 鞠金峰. 浅埋煤层开采压架类型[J]. 煤炭学报, 2014, **39**(08): 1625 - 1634. (XU Jia-lin, ZHU Wei-bing, JU Jin-feng. Supports crushing types in the longwall mining of shallow seams[J]. Journal of China Coal

- Society, 2014, **39**(08): 1625 – 1634. (in Chinese))
- [14] 付兴玉, 李宏艳, 李凤明, 等. 房式采空区集中煤柱诱发动载矿压机理及防治[J]. 煤炭学报, 2016, **41**(6): 1375 – 1383. (FU Yu-xing, LI Hong-yan, LI Feng-ming, et al. Mechanism and prevention of strong strata behaviors induced by the concentration coal pillar of a room mining goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2016, **41**(6): 1375 – 1383. (in Chinese))
- [15] 田臣, 刘英杰, 周海丰. 综采工作面回采过上覆集中煤柱及采空区技术[J]. 煤炭科学技术, 2014, **42**(8): 125 – 128. (TIAN Chen, LIU Ying-jie, ZHOU Hai-feng. Technology of fully-mechanized coal mining face passing through overburden concentrated coal pillar and goaf[J]. Coal science and Technology, 2014, **42**(8): 125 – 128. (in Chinese))
- [16] 徐敬民, 朱卫兵, 鞠金峰. 浅埋房采区下近距离煤层开采动载矿压机理[J]. 煤炭学报, 2017, **42**(2): 500 – 509. (XU Jing-min, ZHU Wei-bing, JU Jin-feng. Mechanism of dynamic mine pressure occurring below adjacent upper chamber mining goaf with shallow cover depth[J]. Journal of China Coal Society, 2017, **42**(2): 500 – 509. (in Chinese))
- [17] 朱卫兵. 浅埋近距离煤层重复采动关键层结构失稳机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010. (ZHU Wei-bing. Study on the instability mechanism of key strata structure in repeat mining of shallow close distance seams[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010. (in Chinese))
- [18] ZHU W B, XU J M, LI Y C. Mechanism of the dynamic pressure caused by the instability of upper chamber coal pillars in Shendong coalfield, China[J]. Geosciences Journal, 2017, **21**(5): 729 – 741.
- [19] 朱德福, 屠世浩, 王方田, 等. 浅埋房式采空区煤柱群稳定性评价[J]. 煤炭学报, 2018, **43**(2): 390 – 397. (ZHU De-fu, TU Shi-hao, WANG Fang-tian, et al. Stability evaluation on pillar system of room and pillar mining in goaf at shallow depth seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, **43**(2): 390 – 397. (in Chinese))
- [20] 刘畅, 刘正和, 张俊文, 等. 工作面长度对覆岩空间结构演化及大采高采场矿压规律的影响[J]. 岩土力学, 2018, **39**(2): 691 – 698. (LIU Chang, LIU Zheng-he, ZHANG Jun-wen, et al. Effect of mining face length on the evolution of spatial structure of overlying strata and the law of underground pressure in large mining height face[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(2): 691 – 698. (in Chinese))
- [21] 钱鸣高, 缪协兴. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报, 1996(3): 225 – 230. (QIAN Ming-gao, MIAO Xie-xing. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. Journal of China Coal Society, 1996(3): 225 – 230. (in Chinese))
- [22] 许家林, 朱卫兵, 王晓振, 等. 浅埋煤层覆岩关键层结构分类[J]. 煤炭学报, 2009(7): 865 – 870. (XU Jia-lin, ZHU Wei-bing, WANG Xiao-zhen, et al. Classification of key stratastructure of overlying strata in shallow coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2009(7): 865 – 870. (in Chinese))
- [23] 王方田, 屠世浩, 李召鑫, 等. 浅埋煤层房式开采遗留煤柱突变失稳机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, **29**(6): 770 – 775. (WANG Fang-tian, TU Shi-hao, LI Shao-Xin, et al. Mutation instability mechanism of the room mining residual pillars in the shallow depth seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, **29**(6): 770 – 775. (in Chinese))
- [24] 钱鸣高, 张顶立, 黎良杰, 等. 砌体梁的“S—R”稳定及其应用[J]. 矿山压力与顶板管理, 1994(3): 6 – 11, 80. (QIAN Ming-gao, ZHANG Ding-li, LI Liang-jie, et al. “S-R” stability for the voussoir beam and its application[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1994(3): 6 – 11, 80. (in Chinese))