

煤矿覆岩空间结构 OX-F-T 演化规律研究

窦林名, 贺 虎

(中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 煤矿工作面高强度、大尺度快速推进, 导致采场覆岩运动范围增大, 空间结构复杂。多工作面情况下, 工作面与采空区覆岩结构协同运动, 相互影响, 造成的矿山动力灾害, 称之为覆岩空间结构失稳型动力灾害。根据工作面上覆岩层边界状态的不同, 将覆岩空间结构分为 OX, F 与 T 型 3 类。研究 OX-F-T 演化特征, 即顶板 O-X 破断形成的 OX 结构为覆岩基本形式, 同时又作为相邻工作面的边界条件, 一侧为 OX 结构形成 F 型覆岩结构, 两侧存在 OX 则形成 T 型覆岩结构。阐述不同结构的断裂运动规律, 并将各结构进行详细分类。利用现场 SOS 微震监测系统, 分别选取代表 OX, F 与 T 覆岩结构的单一工作面、双工作面、孤岛工作面, 分析各工作面开采过程中的震源分布规律。针对不同覆岩结构特征, 提出不同的防治措施, 为冲击震动的预防工作提供理论指导。

关键词: 采矿工程; 覆岩空间结构; 冲击灾害; 关键层; 综采综放; 微震

中图分类号: TD 324

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2012)03-0453-08

STUDY OF OX-F-T SPATIAL STRUCTURE EVOLUTION OF OVERLYING STRATA IN COAL MINES

DOU Linming, HE Hu

(State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology,
Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: The rupture and movement scope of overlying strata increase sharply since the high strength and rapid exploitation of the longwall mining faces; and the spatial structure formed by fractured strata becomes much more complex. The overlying strata would move and interact coordinately when more workfaces exist; hence leading to mining dynamic disasters that defined as spatial structure instability in this paper. Based on the boundary conditions, three basic forms that named OX, F and T structure are identified, respectively. The OX-F-T evolution of the overlying strata is presented that the O-X fracture is the elemental structure of overlying strata and also the boundary of adjacent workface, one side is OX constitute F structure, and both side with OX is T structure. The characteristics and detailed classifications for each type are elaborated. The microseismic system is used for on-site monitoring, single, double and isolated workfaces that represent the OX, F and T structure are selected respectively to research the distribution rules of seismic events; the results confirmed the OX-F-T spatial structure feature. At last, specialized methods are proposed targeted to workfaces with different spatial structures. The research results provide theoretical guidance for dynamic disaster prevention and control in coal mines.

Key words: mining engineering; spatial structure of overlying strata; dynamic disaster; key strata; fully mechanized mining with sublevel caving; microseismicity

收稿日期: 2011-10-10; **修回日期:** 2012-01-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226805); 国家自然科学基金资助项目(51174285); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 窦林名(1963-), 博士, 1983年毕业于西安矿业学院采矿系采矿工程专业, 现任教授、博士生导师, 从事矿山压力、冲击矿压、采矿地球物理等方面的教学与研究工作。E-mail: lmdou@126.com

1 引言

近年来，以综采放顶煤、大采高开采，无煤柱护巷技术为代表的一系列先进采煤科技在我国得到了广泛应用与长足发展^[1-3]，从而使长壁工作面开采尺度与推进速度急剧上升。随着无煤柱(小煤柱)成功应用到综放工作面，纵向与横向层面上覆岩运动范围远大于综采工作面，由此引发的采动应力场、覆岩空间结构演化规律更加复杂^[4-6]。大规模、高强度的开采扰动不仅导致垮落带覆岩剧烈运动，并且周围采空区中已经存在的空间平衡结构也将进一步失稳，而未断裂的岩层会与工作面协同破断运动，从而诱发冲击矿压等煤岩动力灾害，对于此类冲击矿压，本文称之为空间结构失稳型。

煤岩震动冲击灾害在我国呈爆发式增长态势，目前已超过 120 余处矿井有发生矿震与冲击报道，累计破坏巷道 30 多千米，造成大量人员伤亡与财产损失^[7]。在山东兖州矿区、新汶矿区、淮北海仔煤矿、河南义马矿区等均存在巨厚主关键层，随着开采尺度的增大，主关键层断裂失稳诱发矿震不仅影响井下采掘工作面安全，更对地面社区造成影响，由于震源距地表距离近，烈度堪比 5 级以上地震^[8-9]，已经逐步演化为矿区社会公共安全问题，这些问题的解决需建立在对覆岩空间结构形成与失稳以及煤岩动力破坏机制的研究上。钱鸣高等^[9-10]建立的“砌体梁”与“关键层”理论，为研究煤矿采动覆岩结构的形成与失稳提供了理论依据。但是以往的研究范围多局限于单一工作面距离采场较近的老顶岩层以及煤层前方几十米内支承压力的区域内，而与冲击矿压等动力灾害相关的岩层范围已经到达主关键层，在层面方向上也远远超过本工作面采动范围^[11]。姜福兴等^[12]提出了覆岩空间结构的概念，并根据采场的边界条件，分为 θ 、O、S 和 C 型 4 类结构，拓展了传统矿压研究范围的限制，具有重要的指导意义，但是并没有给出结构形成与失稳条件，和煤岩动力灾害关系联系不紧密。本文基于关键层理论，并根据现场微震监测，提出覆岩空间结构的 OX-F-T 演化模型，以期对空间结构失稳型冲击矿压机制研究与预防提供理论基础。

2 覆岩空间结构形成条件

对于多工作面回采，两相邻采空区覆岩能否形成相互作用的空间结构，主要取决于两者之间的煤

柱宽度。大煤柱能够有效地隔离采空区覆岩裂隙的联系，一般情况下，工作面之间 20 m 以上的煤柱即可将两工作面间覆岩运动隔离开来。因此，当工作面煤柱小于一定值时，工作面之间覆岩将会形成协同运动，形成相互作用的空间结构。

2.1 顶板断裂线因素

由矿压理论可知，老顶岩层的断裂发生在煤壁中，如果煤柱宽度过小，两相邻采空区顶板覆岩断裂线将会重合在一起，覆岩直接联系。利用弹性基础梁模型，可以解出老顶断裂线距离煤壁的位置^[10]：

$$L_d = \frac{\tan^{-1} \left[\frac{\beta(2\alpha M_0 s + rQ_0)}{r^2 M_0 + \alpha r Q_0} \right]}{\beta} \tag{1a}$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \left[\frac{\sqrt{k/(EI)} + \frac{N}{4EI}}{2} \right]^{1/2} \\ \alpha &= \left[\frac{\sqrt{k/(EI)} - \frac{N}{4EI}}{2} \right]^{1/2} \\ s &= N/(EI) \\ r &= \sqrt{k/(EI)} \end{aligned} \right\} \tag{1b}$$

式中： k 为 Winkler 地基系数，与上下夹支的软岩层的厚度及力学性质有关； EI 为老顶岩梁的抗弯刚度； M_0 ， Q_0 ， N 分别为工作面煤壁位置($x=0$)所对应的截面弯矩、剪力和轴力。

老顶断裂线位置主要受下层垫层，即直接顶煤壁的性质以及自身力学性质影响，根据现场测试一般为 2~10 m，因此考虑老顶断裂线因素，煤柱最小宽度判据为： $L_{min} = 2L_d$ 。

2.2 煤柱破坏因素

当煤柱的宽度可以阻止覆岩断裂线重合时，由于采空区侧向支承压力的作用，煤柱上方将会形成应力集中，在高支承压力的作用下，煤柱会发生变形破坏，甚至发生煤柱型冲击矿压。煤柱破坏后，将失去支撑作用，引起上方覆岩结构的连锁运动，断裂后的平衡结构可能失稳运动，没有发生断裂的覆岩由于下方离层区域的扩大，将会经历初步断裂与周期断裂，从而引发新的矿压显现。目前常用的煤柱稳定性设计方法有极限平衡理论以及经验公式法^[13]。在高应力区域，不但要考虑煤柱的塑性破坏，还要满足核区率稳定要求。因此，可得

$$L_{\min} \geq 2R + \rho \quad (2)$$

式中： R 为煤柱屈服区宽度， ρ 为煤柱弹性区宽度。

根据极限平衡理论可得近水平煤层屈服区宽度

R 为

$$R = \frac{mA}{2 \tan \varphi_0} \ln \left(\frac{\lambda \gamma H + \frac{c_0}{\tan \varphi_0}}{\frac{c_0}{\tan \varphi_0} + \frac{P_x}{A}} \right) \quad (3)$$

式中： m 为煤柱高度； A 为侧压系数； φ_0 ， c_0 分别为煤体与顶底板岩层交界面的内摩擦角与黏聚力； λ 为应力集中系数； γ 为岩层的平均容重； H 为煤柱埋深； P_x 为支架对巷帮的支护阻力。根据稳定性理论，核心区宽度应满足：

$$\rho = \frac{W - 2R}{W} = \left\{ 0.65_{\text{软煤}}, 0.85_{\text{中硬煤}}, 0.9_{\text{硬煤}} \right\} \quad (4)$$

式中： W 为煤柱宽度。因此，综合顶板断裂线与煤柱稳定所需宽度条件，形成覆岩空间结构的煤柱宽度为

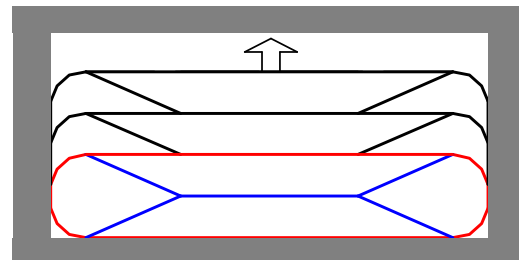
$$L_{\min} = \max \{ 2L_d, 2R + \rho \} \quad (5)$$

3 覆岩空间结构分类

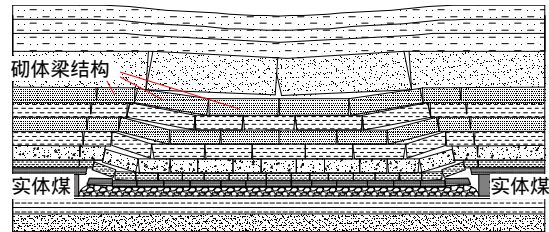
3.1 单一工作面 OX 结构

单一工作面 OX 结构四周边界为实体煤或足以隔断采空区联系的大煤柱。单一工作面开采后覆岩 OX 结构的本质是钱鸣高等^[9]提出的顶板 O-X 破断后形成的覆岩结构形态，平面上呈现 OX 状，走向与倾向剖面断裂后岩体呈“砌体梁”结构平衡状态。如图 1 所示，OX 结构形态与范围由本工作面长度、煤层厚度、关键层层位与物理力学性质决定。根据关键层的破断与否，OX 型空间结构可分为 2 种结构：(1) 主关键层破断后，全空间 OX 结构；(2) 主(亚)关键层尚未破断时，半空间 OX 结构。OX 型空间结构因为四周为实体煤，开采过程中矿压显现主要受覆岩各关键层“砌体梁”结构形成与失稳过程造成的应力场变化与冲击动载的影响。存在多层亚关键层时，在满足一定条件下会出现关键层的复合破断^[8]，工作面的矿压显现更为强烈。

覆岩 O-X 破断形成的 OX 型结构是覆岩空间结构演化的基本形式，同时也是其他空间结构形式的边界条件与演化过程的重要组成部分。



(a) 单一工作面覆岩 O-X 破断形成 OX 结构平面图



(b) OX 结构沿走向剖面的“砌体梁”结构

图 1 OX 覆岩空间结构示意图

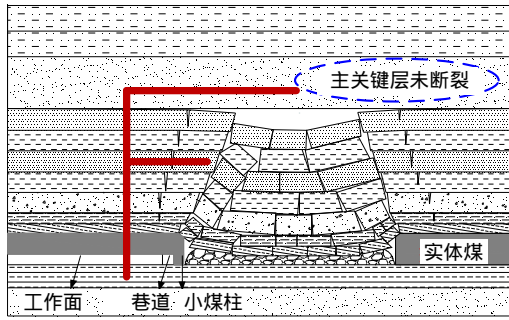
Fig.1 Sketches of the OX overlying strata spatial structure

3.2 相邻工作面 F 结构

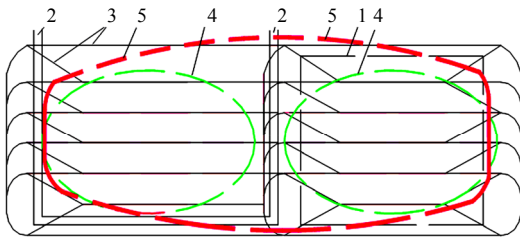
一侧相邻采空区，并且两工作面煤柱宽度小于隔离采空区所需最小宽度，而另一侧为实体煤或者大煤柱的工作面，如图 2 所示，由于其覆岩边界条件一侧为实体，一侧为相邻工作面 OX 型结构的弧三角板，似字母 F，因此，命名为 F 型覆岩空间结构。F 结构的主要特点是小煤柱侧采空区覆岩会对工作面开采造成显著影响，即下一工作面覆岩会与采空区覆岩结构的一部分协同运动，而本工作面上部覆岩随开采的进行也将经历 OX 结构演化特征，即 F 结构包括了 F 臂在采动影响下的结构失稳运动以及 OX 结构演化。同样，根据关键层的性质与破断特征，F 结构可以分为两大类：长臂与短臂 F 结构，当存在多层亚关键层时，每类下又分别可细分为单层与多层 F 结构。处于 F 覆岩结构下的工作面，开采时矿压显现、覆岩运动与应力场演化比 OX 结构复杂，体现在采空区震动频繁，造成采空区一侧沿空巷剧烈变形破坏。

3.3 孤岛工作面 T 结构

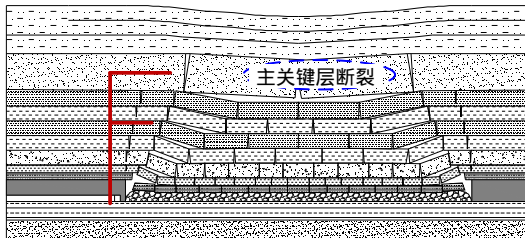
孤岛工作面是指相邻两侧及以上为采空区，并且煤柱宽度小于隔离采空区所需最小宽度。孤岛工作面应力集中程度高、覆岩运动剧烈，矿压显现强于非孤岛工作面，极易出现冲击矿压动力灾害^[14]。由于孤岛工作面四周覆岩均已发生断裂，工作面开采后四周覆岩与工作面顶板岩层将协同运动、相互



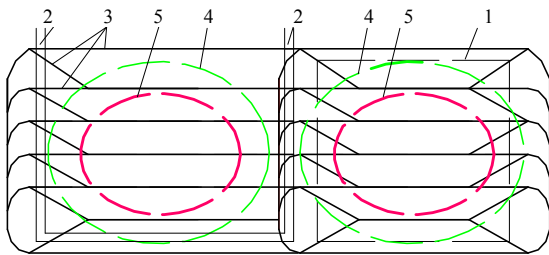
(a) 长臂 F 覆岩结构剖面示意图



(b) 长臂 F 覆岩结构平面示意图



(c) 短臂 F 覆岩结构剖面示意图



(d) 短臂 F 覆岩结构平面示意图

1—上区段采空区；2—下区段工作面平巷；3—低位亚关键层断裂线；
4—高位亚关键层断裂线；5—主关键层断裂线

图 2 F 覆岩空间结构示意图与分类

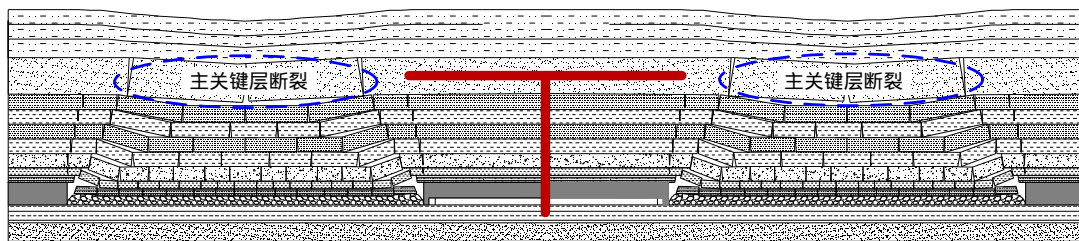
Fig.2 Sketches and classification of the F overlying strata spatial structure

影响，导致孤岛工作面支承压场峰值高、扰动远、变化快。孤岛工作面两侧覆岩边界条件均呈 F 型结构，整体似字母 T，称之为 T 型覆岩空间结构。T 结构可以分为三大类：两侧关键层均为断裂的对称短臂 T 结构；两侧主关键层断裂的对称长臂 T 结构；一侧关键层未断裂，一侧主关键层断裂的非对称 T 结构。当存在多层亚关键层时，每类又分别可细分为单层与多层 T 结构，如图 3 所示。不同的结构对应着不同的矿压显现规律。对称短臂 T 结构整个工作面范围矿压显现与短臂 F 结构采空侧的矿压显现类似。对称长臂 T 结构由于两侧关键层尚未断裂，工作面两侧支承压场要高于对称短臂 T 结构，两巷维护难度加大，煤体震动增多，并且当工作面推进一段距离后，由于关键层跨度的增大，会出现关键层断裂来压现象，从而引起高能量级别矿震。虽然破裂源主要集中在两侧采空区与本工作面中部，但是高能量震动波传播至工作面后，仍极有可能造成工作面冲击矿压事故。对于第三类非对称 T 结构，开采前其支承压场分布短臂一侧与对称短臂 T 结构类似，而长臂一侧则与对称长臂 T 结构类似，工作面推进初期，矿压显现规律也与前两类结构类似。但是，尚未断裂的关键层开始断裂运动时，则矿压显现要比前两类剧烈很多，主要原因在于：此时关键层的一侧断裂线位于工作面巷道上方，中间的断裂线也靠近另一条巷道上方，因此，关键层断裂诱发的高能级震动对巷道的破坏作用要高得多。

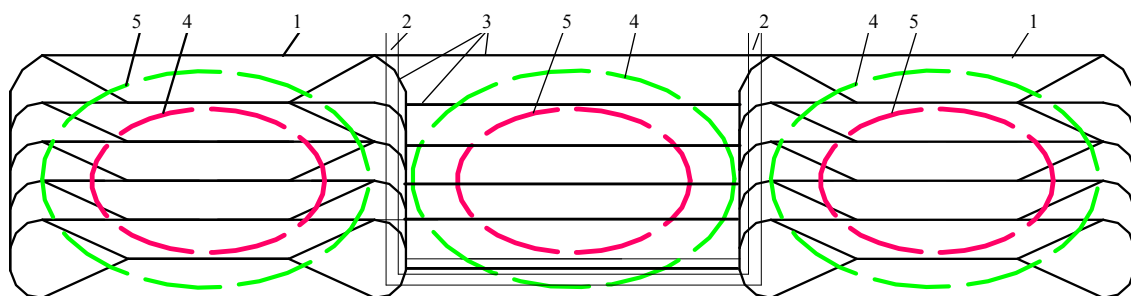
4 覆岩空间结构的现场微震验证

4.1 OX 结构微震监测

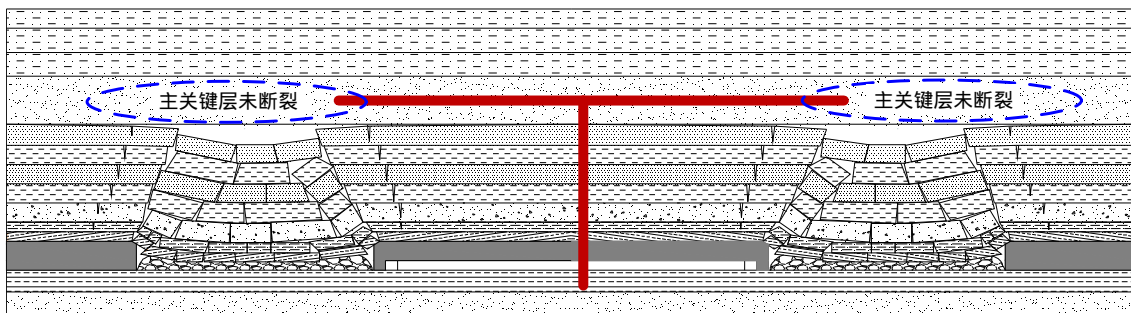
兖州煤业赵楼煤矿目前正在回采的 1304 工作面为一采区第二个工作面，四周均为实体煤，埋深平均为 1 000 m，倾角平均 4°，煤层厚度为 1.5 ~ 8.1 m，



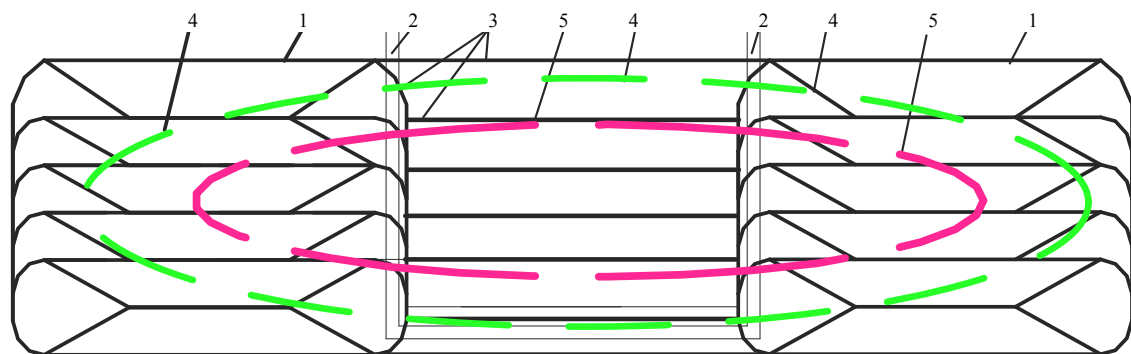
(a) 对称短臂 T 覆岩结构剖面示意图



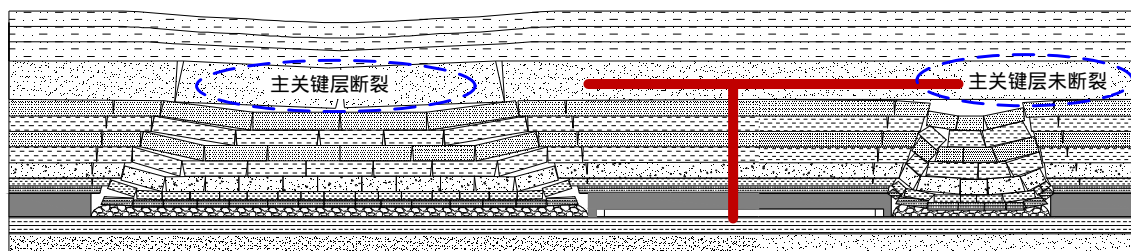
(b) 对称短臂 T 覆岩结构平面示意图



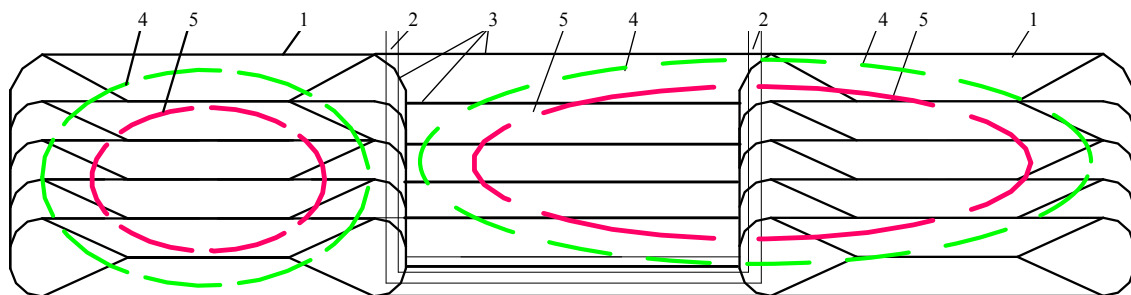
(c) 对称长臂 T 覆岩结构剖面示意图



(d) 对称长臂 T 覆岩结构平面示意图



(e) 非对称 T 覆岩结构剖面示意图



(f) 非对称 T 覆岩结构平面示意图

1—上区段采空区；2—下区段工作面平巷；3—低位亚关键层断裂线；
4—高位亚关键层断裂线；5—主关键层断裂线

图 3 T 覆岩空间结构示意图与分类

Fig.3 Sketches and classification of the T overlying strata spatial structure

平均 4.81 m。选取正常运行阶段，即工作面推进至 280 m 以后的震动数据，微震定位分布如图 4 所示。单一工作面 OX 覆岩空间结构，震动主要集中在工作面两巷以内，工作面前方支承压力范围内。运输顺槽外侧震动集中在距离巷道 10 m 以内，而回风顺槽外侧则主要集中在距巷道 20 m 以内。由图 4(b) 可以看出，震源包络线角度较小，运输顺槽侧为 30°，回风顺槽为 40°。顶板上方 20 m 以内震源分布密集，20 m 以上震源呈“马鞍状”分布，50 m 以上逐渐呈拱形分布，最大破裂高度为 150 m，说明 1304 工作面属于半空间 OX 结构，上覆仍有未断裂关键层。

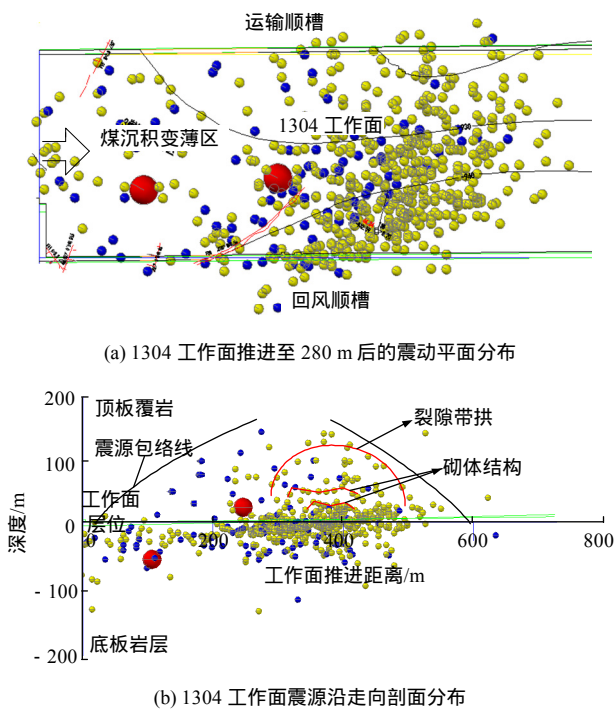


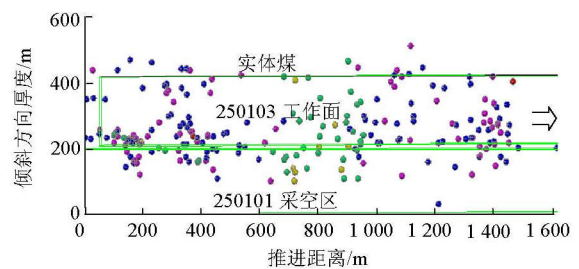
图 4 1304 工作面微震定位分布

Fig.4 Distribution of the microseismic location in LW1304

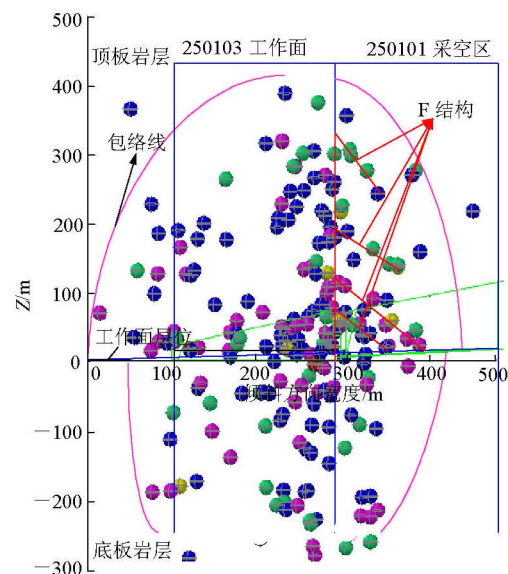
4.2 F 结构微震监测

甘肃华亭煤矿目前正在开采 250103 工作面，是 2501 采区的第三个工作面，面长 200 m，倾角 5° 左右，西侧与已采的 250101 综放工作面相邻，之间留有 5 m 小煤柱，东部为实体煤。开采深度 700 m 左右。250102 工作面(与 250101 工作面相邻，留有 20 m 煤柱)回采期间矿震频繁，震源定位显示，震动主要集中在 250102 工作面与 20 m 煤柱中，250101 采空区中矿震则很少，说明 20 m 煤柱有效的隔开了 250101 与 250102 工作面采空区之间的联系。但是 250103 工作面开采后，250101 采空区中震动相当频繁，并且诱发了多起冲击事故，给巷道维护与正常

生产带来了巨大困难。如图 5(a)所示为 250103 工作面采空区侧顶板岩层中震源分布平面图。震动分布位置均靠近小煤柱侧，250103 工作面回风顺槽侧断裂线距煤壁平均为 20 m，而 250101 采空区中断裂线距煤壁则约为 30 m。采空区中震动则为受开采扰动后，垮落不充分岩层的再次失稳所致。初采期间，采空区中高能量震动很少，表明采空区中岩层结构的失稳过程滞后于开采工作面岩层断裂垮落。随着工作面的推进，250101 采空区中震动频次与能量显著上升，在距离 250103 工作面切眼 120~150 m 范围内，震动密集，并向采空区中部延伸，根据 2501 采区矿压观测结果，工作面推进至 150 m 时，进入初次来压阶段，矿压显现剧烈，与图 5 中的震动密集区域相吻合，表明受采动影响下，原本断裂形成的平衡结构在此处失稳，诱发震动。由图 5 可以看出，250103 工作面开采后，由于覆岩与 250101 采空区相互贯通影响，最大破裂高度到了工作面上方 350 m，裂隙带高度大大增加，并且在 0~100 与 200~300 m 两带内集中，说明在此范围内存在 2 个



(a) 250103 工作面震源分布平面图



(b) 250103 工作面震源沿倾向剖面分布图

图 5 250103 工作面微震定位分布

Fig.5 Distribution of the microseismic location in LW250103

关键结构。整个断裂震源包络线向 250101 采空区倾斜，采空区中震源包络线角度明显大于实体煤一侧。由图 5(b)可以看出，华亭 250103 工作面属于短臂 F 空间结构，结构的臂长约为 100 m。

4.3 T 结构微震监测

鲍店煤矿 103_上02 工作面是十采区 3_上层煤第二个区段，南北侧分别与 103_上03，10301 工作面相邻。最大采深约 500 m，采区上覆岩层存在若干较厚的坚硬岩层，最上层为 200 m 厚左右的细粉砂岩，为十采区主关键层，十采区内大震动的发生与此关键层的断裂运动密切相关。103_上02 工作面回采前，103_上01，103_上03，103_上04，103_上05 工作面已经回采完毕。分析可知，103_上02 左面南侧的 3 个采空区由于开挖面积大，上覆关键层已经处于断裂状态，而北部只有 10301 一个工作面，主关键层依然保持稳定的平衡状态。因此，103_上02 工作面处于非对称 T 空间结构，工作面北侧主要受 F 结构重复采动失稳影响，南侧则受主关键层断裂运动影响明显。图 6 为 103_上02 工作面开采期间大震动分布图，由图可知，强矿震几乎都发生在 10301 和 103_上02 工作面上覆的厚层高位“主关键层”中，而在相邻大范围回采的 103_上03，103_上04 和 103_上05 工作面没有强矿震发生，并且当 103_上02 工作面推进距达到 100 ~ 150 m 时，大震动发生密度增加，这与主关键

层的来压步距是相符的。

5 覆岩 OX-F-T 空间失稳动力灾害防治对策

由以上分析可知，工作面覆岩处于不同空间结构状态时，覆岩的断裂运动方式与强度是不同的，而由此诱发的矿压显现也是不同的。覆岩的断裂与失稳复杂程度是按照 OX F T 逐渐增加的，决定了矿压显现烈度与防治难度也是如此递增的。因此，必须根据不同覆岩结构，选取具有针对性的监测与治理方法，才能做到有的放矢，提高防治效率。

5.1 OX 覆岩结构型冲击治理对策

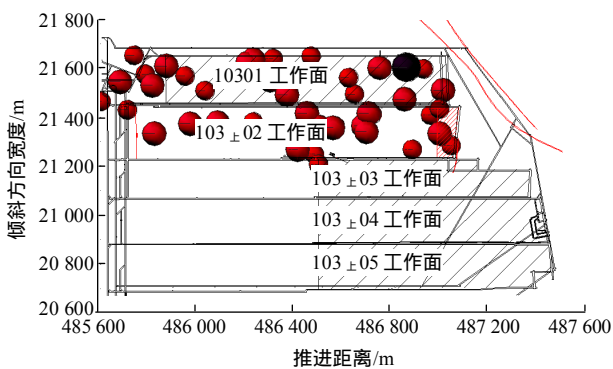
由分析可知，OX 覆岩结构受本工作面顶板断裂的影响，工作面矿压显现主要集中在超前支承压力范围内，主要影响因素为老顶来压与煤体性质。因此，OX 覆岩结构工作面的防冲方法主要针对煤体与顶板进行弱化处理，包括煤体注水、钻孔卸压、深孔爆破与顶板强制放顶与深孔爆破技术，处理范围为工作面两巷前方支承压力影响区。

5.2 F 覆岩结构型冲击治理对策

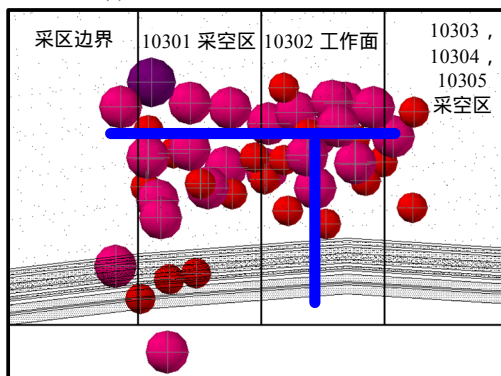
F 覆岩结构工作面受相邻采空区影响较大，表现为采动开始后，F 臂结构重新失稳，诱发震动，对沿空侧巷道造成破坏。由于沿空巷道煤柱已经处于塑性或破碎状态，对煤体进行卸压，不能有效地控制巷道破坏。必须针对 F 臂的特点进行防治，提出 3 种方法：(1) 主动切断 F 臂，可以采取定向水力致裂与顶板断顶爆破技术；(2) 加强抗冲能力的被动法，主要采取加强巷道支护，锚网索+O 型棚联合支护，超前支承压力区采用液压支架与密封门式支架；(3) 避让法，对于厚煤层，可将沿空巷道布置“空下巷道”，即两工作面相邻巷道采取错层位布置方式，将下一工作面临空巷道布置在采空区下方，这样就有效避免 F 结构失稳震动的影响，同时采空区下巷道的维护状态大大改善。上述 3 种方法中，在有条件的情况下，当优先选用避让法。巷道布置已经形成，则优先选用切断 F 臂方法，如果震动冲击灾害严重，则需要多种解危方法合理组合。F 结构工作面实体煤一侧，若也存在冲击危险，则按照 OX 结构工作面治理方法即可。

5.3 T 覆岩结构型冲击治理对策

对于第一类短臂对称 T 结构，工作面两侧均可按照 F 覆岩结构临空侧治理方法。对于后 2 种长臂 T 结构，尤其是巨厚主关键层的参与，协同运动与覆岩范围急剧增加，严重影响工作面与地表建筑的



(a) 103_上02 工作面大震动分布平面图



(b) 103_上02 工作面大震动沿倾向剖面分布图

图 6 103_上02 工作面大震动分布图

Fig.6 Distribution of the strong micro-seismic sources in LW103_{upper}02

安全。此时可以采取充填法控制大范围覆岩运动，包括关键层离层注浆与采空区直接充填 2 种方式。

6 结 论

(1) 根据现场观测与理论分析，提出了覆岩空间失稳型震动冲击。并根据工作面周围边界的不同，将工作面开采过程中覆岩所形成的空间结构分为 3 种基本类型，即单一工作面 OX 结构、两工作面 F 结构、孤岛工作面 T 结构。

(2) 考虑了老顶断裂线与煤柱塑性破坏的影响，分析了工作面覆岩空间结构的形成与继续演化的条件，给出了最小煤柱宽度判据。

(3) 系统分析了 OX, F, T 三种结构的特征，覆岩断裂运动形态，并根据关键层是否断裂，进一步将 3 种结构进行了系统分类。

(4) 利用现场微震监测系统，选取具有代表性的单一工作面、双工作面、孤岛工作面，分析了各工作面开采过程中的震动分布规律，证实了 OX-F-T 空间结构特征。

(5) 在 OX-F-T 结构特征的基础上，分析了不同结构下，冲击震动危险所在区域，针对 3 种结构，分别提出了相应的防治方法。

参考文献(References) :

- [1] 王家臣, 富强. 低位综放开采顶煤放出的散体介质流理论与应用[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 337-341.(WANG Jiachen, FU Qiang. The loose medium flow field theory and its application to the longwall top-coal caving[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 337-341.(in Chinese))
- [2] 闫少宏, 尹希文. 大采高综放开采几个理论问题的研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(5): 481-484.(YAN Shaohong, YIN Xiwen. Discussing about the main theoretical problems of longwall with top coal caving[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(5): 481-484.(in Chinese))
- [3] 柏建彪. 综放沿空掘巷围岩稳定性原理及控制技术研究[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 2005.(BAI Jianbiao. Study on stability and control of roadway driven along next goaf for fully-mechanized top-coal caving face[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2005.(in Chinese))
- [4] 蒋金泉, 张开智. 综放开采矿震的成因及防治对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 1): 3 277-3 282.(JIANG Jinquan, ZHANG Kaizhi. Cause and control method of mine earthquake in fully mechanized top coal caving mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 3 277-3 282.(in Chinese))
- [5] 姜福兴, XUN L, 杨淑华. 采场覆岩空间破裂与采动应力场的微震探测研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 23-25.(JIANG Fuxing, XUN L, YANG Shuhua. Study on microseismic monitoring for spatial structure of overlying strata and mining pressure field in longwall face[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(1): 23-25.(in Chinese))
- [6] 贺 虎, 龚林名, 巩思园, 等. 覆岩关键层运动诱发冲击的规律研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1 261-1 265.(HE Hu, DOU Linming, GONG Siyuan, et al. Rock burst rules induced by cracking of overlying key stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(8): 1 261-1 265.(in Chinese))
- [7] DOU L M, LU C P, MU Z L, et al. Prevention and forecasting of rock burst hazards in coal mines[J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(5): 585-591.
- [8] 龚林名, 赵从国, 杨思光, 等. 煤矿开采冲击矿压灾害防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006: 7-10.(DOU Linming, ZHAO Congguo, YANG Siguang, et al. Prevention and control of rock burst in coal mine[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2006: 7-10.(in Chinese))
- [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: 85-88.(QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin, et al. Key strata theory in ground control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2000: 85-88.(in Chinese))
- [10] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 91-96.(QIAN Minggao, SHI Pingwu. Ground pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003: 91-96.(in Chinese))
- [11] 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): 3 066-3 069.(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): 3 066-3 069.(in Chinese))
- [12] 姜福兴, 张兴民, 杨淑华, 等. 长壁采场覆岩空间结构探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 979-984.(JIANG Fuxing, ZHANG Xingmin, YANG Shuhua, et al. Discussion on overlying strata spatial structures of longwall in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 979-984.(in Chinese))
- [13] 谢和平, 段法兵, 周宏伟, 等. 条带煤柱稳定性理论与分析方法研究进展[J]. 中国矿业, 1998, 7(5): 37-41.(XIE Heping, DUAN Fabing, ZHOU Hongwei, et al. Recent developments of theory and analysis methods of strip pillar stability[J]. China Mining Magazine, 1998, 7(5): 37-41.(in Chinese))
- [14] 龚林名, 何 焯, 张卫东. 孤岛工作面冲击矿压危险及其控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1 866-1 869.(DOU Linming, HE Ye, ZHANG Weidong. Hazards of rock burst in island coal face and its control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1 866-1 869.(in Chinese))