

文章编号:0253-9993(2010)08-1252-05

# 大倾角煤层开采覆岩空间倾斜砌体结构

伍永平<sup>1,2</sup>,解盘石<sup>1,2</sup>,王红伟<sup>1,2</sup>,任世广<sup>1,2</sup>

(1. 西安科技大学 能源学院,陕西 西安 710054;2. 西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室,陕西 西安 710054)

**摘要:**以大倾角煤层走向长壁采场为研究对象,采用相似材料模拟实验、数值模拟和理论分析综合方法,分析了采场顶板应力分布特征和变形破坏规律,认为大倾角煤层采场顶板破断后形成了倾斜砌体结构,该砌体结构以倾向堆砌和反倾向堆砌两种形式存在,且沿工作面走向和倾向均具有不同的分布特征,该结构的非均衡运动是导致“R-S-F”(“顶板-支架-底板”)系统失稳的主导影响因素,同时,该结构的运动形式亦受到上覆未垮岩层的变形破坏影响。倾斜砌体结构不仅是支护结构的施载体,也是“似壳结构”断裂失稳对工作面支护系统作用的传力媒介,对倾斜砌体结构的深入研究是探讨大倾角煤层采场“主承载结构”失稳致灾的关键。

**关键词:**大倾角煤层;倾向堆砌;反倾向堆砌;“R-S-F”系统失稳;主承载结构

**中图分类号:**TD823.21 **文献标志码:**A

## Incline masonry structure around the coal face of steeply dipping seam mining

WU Yong-ping<sup>1,2</sup>, XIE Pan-shi<sup>1,2</sup>, WANG Hong-wei<sup>1,2</sup>, REN Shi-guang<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. China Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Based on the roof structure around the coal face in steeply dipping seam, the theoretical analysis, physical simulation experiments and numerical simulation were used to analyze the stress distribution and movement of the roof. According to the conclusion, the incline masonry structure was formed after the roof failure, of which the dip direction pile and anti-dip direction types were made, and different distribution of the structure was concluded around the coal face, the nondirective movement was found when the coal face is moving forward, which is also the main reason of the instability of “R-S-F” system. At the same time, the behavior of incline masonry structure is affected by the upper strata structure which can be defined as the key load-bearing structure, therefore, the incline masonry structure is not only loader of the support, but also load medium between the support and the key load-bearing structure. At last, the study of the incline masonry structure is the key point to discuss mechanism of the key load-bearing structure failure and catastrophe.

**Key words:** steeply dipping seam; dip direction pile; anti-dip direction pile; instability of “R-S-F” system; the key load-bearing structure

大量的研究与实践表明<sup>[1-15]</sup>, 开采大倾角煤层所造成的采场顶板力学特征呈现非对称性, 破坏、运移特征具有时序性和不均衡性等等, 但缺乏对大倾角煤层破断顶板岩层(直接顶和老顶)空间结构特点及其形成机理的深入认识和对空间结构与“支架-围岩”系统的相互作用特征、失稳形式等问题进行系统地研究, 使众多该类工程问题难以在理论和实践上达到较好的统一, 既影响了生产过程中的安全高效, 又制约

了该类煤层开采技术水平的进一步发展, 因此, 有必要对大倾角煤层顶板空间结构及其施载机理等基本问题进行研究。

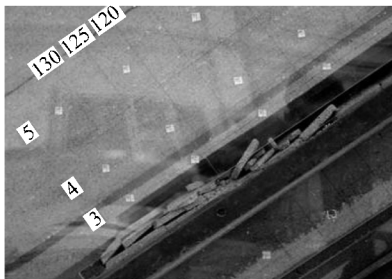
### 1 倾斜砌体结构的形成机理

#### 1.1 大倾角煤层开采实验与矿压监测实践

通过大量的现场观测和实验研究<sup>[7-10]</sup>总结出大倾角煤层走向长壁工作面顶板岩层破坏运移具有以

下特征:

(1)在大倾角煤层走向长壁开采过程中,工作面直接顶的垮落和基本顶的周期来压在工作面倾斜方向的上、中、下部不同步,实验与现场实测表明,在一般情况下,工作面倾斜中上部先垮落或先周期来压,倾斜下部滞后于上部;沿倾斜上方的顶煤或直接顶垮落后,会沿工作面倾斜方向滚(滑)动,最后堆积于工作面下部;工作面顶煤或顶板的运移不对称,在工作面倾斜中上方较大,下方较小;工作面倾斜上部岩层的破坏方式表现为拉剪破坏,在下部表现为压剪破坏,如图 1(a)所示。



(a) 直接顶破坏特征



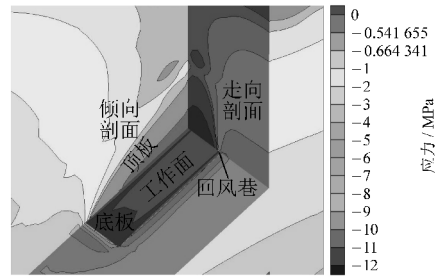
(b) 基本顶破坏特征

图 1 相似材料模拟实验

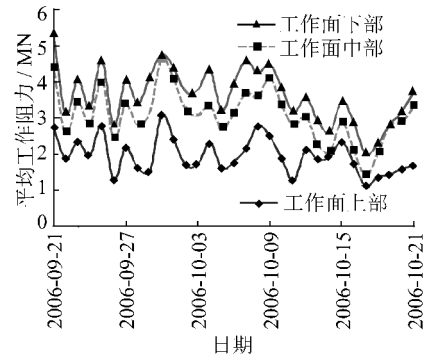
Fig. 1 Physical simulation experiments

(2)上覆岩层的运移是一个空间问题,包括了上覆岩层垂直于层面的弯曲下沉、破断、回转,还包括沿工作面倾斜方向和垂直于工作面倾斜方向的运移;在破断之前主要表现为弯曲下沉,在破断之后主要表现为沿工作面倾斜方向的滚(滑)动,如图 1(b)所示。

(3)大倾角煤层走向长壁工作面开采具有初次来压和周期来压现象,初次来压和周期来压强度(显现程度)取决于顶板岩层中“主承载结构”(采场空间上覆未破坏的“似壳结构”与破坏的“倾斜砌体结构”的总称,是大倾角煤层采场特有的结构<sup>[7]</sup>)的岩性、厚度(组合厚度)、上覆岩层荷载、“结构”极限稳定跨距以及“主承载结构”形成的层位(距煤层的距离)等。与缓倾斜煤层开采时相比,在顶板条件相同时,老顶来压的步距较大,持续时间较长,但来压强度较同样岩性及生产技术条件下的缓倾斜煤层要小,如图 2 所示。



(a) 空间应力特征



(b) 支架工作阻力特征

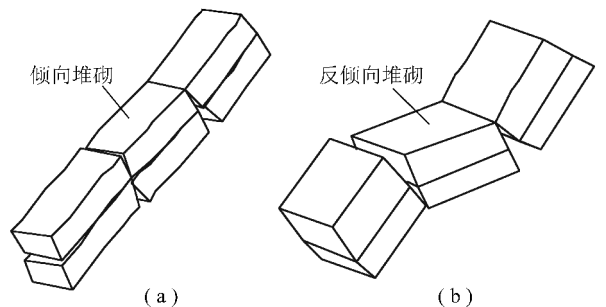
图 2 数值模拟和矿压观测

Fig. 2 Numerical simulation and mineral pressure observation

### 1.2 倾斜砌体结构<sup>[11]</sup>的形式

大量的模拟实验和现场观测表明,在大倾角煤层走向长壁开采过程中,顶板岩层裂断后主要以两种形式存在:

(1)倾向堆砌结构,该结构的形成过程:随着工作面推进,顶板岩层产生垂直裂隙和离层裂隙,导致顶板发生低位裂断与分离(即直接顶板发生破坏),裂断与分离后顶板在重力沿工作面倾斜向下分力作用下产生下滑,并与倾斜下方岩层挤压形成沿工作面倾斜方向的堆砌结构,该结构通过岩层沿倾斜方向的挤压向下部直接顶岩层传递作用并通过该作用保持结构稳定;随着工作面推进,工作面上覆岩层在一定范围内逐层裂断与分离,形成高位岩层的倾向堆砌结构(图 3(a))。



(a)

(b)

图 3 倾斜砌体结构

Fig. 3 Incline masonry structure

(2)反倾向堆砌结构,该结构形成过程:大倾角煤层采场的覆岩活跃区域主要处于倾向中上部,低位岩层垮落下滑充填了采场倾斜下部采空范围已成空间,使得下部形成较为稳定的结构,同时亦为倾斜上部高位岩层运移提供了空间,该范围上覆岩层发生裂断与分离后易发生以倾斜下方铰接部位为轴的回转运动,从而形成反倾向堆砌;此外,在大倾角放顶煤开采过程中,由于煤层厚度较大,煤体放出的空间亦为顶板岩层回转提供了条件,所以,放顶煤开采时也较易形成反倾向堆砌结构(图 3(b))。

## 2 倾斜砌体结构的分布特征

在大倾角走向长壁综采(放)采场区域内,破坏岩层均以倾斜砌体结构形式存在,同时,由于大倾角煤层的倾斜赋存特征,倾斜砌体结构沿工作面走向和倾向方向的存在形式各具特点。

### 2.1 沿工作面走向的分布特点

沿工作面推进方向上,顶板岩层垮落破坏与缓倾斜煤层特征基本相似,具有周期性破断特征:从煤壁向采空区依次为结构活跃区、过渡区和压实区。其中活跃区主要位于工作面附近,且沿工作面长度方向呈不对称分布,即该区域随着工作面倾向向下逐渐向采空区偏离,这主要是由于顶板岩层裂断与分离沿工作面长度方向具有明显的时序性造成的;过渡区域岩层结构指的是裂断与离层特征不明显、且已趋于稳定的岩层,该岩层已对工作面未垮岩层和支护系统影响较小,仅起到对上覆岩层的支撑作用;压实区岩层为已稳定结构;同时,大倾角煤层采场走向岩层结构特征与缓倾斜煤层相同,都存在“砌体梁”结构,但沿工作面倾斜方向“砌体梁”结构形成位置存在不一致性,其中倾斜下部滞后于倾斜中上部区域(图 4(a))。

### 2.2 沿工作面倾向的分布特点

与走向分布特点相似,沿工作面倾斜方向倾斜砌体结构亦存在不同的形式,倾斜中上部为结构活跃区,该范围内倾向堆砌与反倾向堆砌结构并存,且岩层运移活跃,其中低位岩层以下滑运移为主,高位岩层易发生回转运动形成反倾向堆砌结构,因此该区域为顶板岩层控制的重要区域;过渡区域处于工作面倾斜方向中部偏下区域,该区域岩层以倾向堆砌结构为主,该范围岩层在倾斜上部岩层挤压作用和上方岩体重力的共同作用下处于基本稳定状态;稳定区岩层处于倾斜下部区域,即靠近工作面运输巷范围内顶板,该范围顶板破坏以低位岩层裂断与离层为主,在受到倾斜上部岩层下滑挤压作用下,该倾向堆砌结构较稳定(图 4(b))。

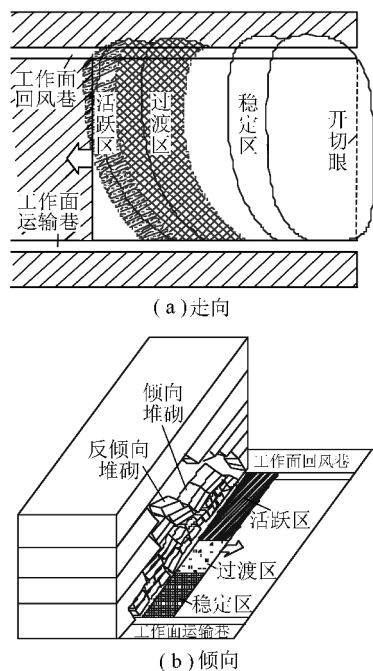


图 4 倾斜砌体结构存在形式

Fig. 4 Types of incline masonry structure

## 3 倾斜砌体结构的运动特征

如上所述,在大倾角煤层走向长壁工作面倾斜砌体结构发生明显运动的区域主要处于活跃区,特别是工作面倾斜中上部,支架上方的倾斜砌体结构的运动过程是一个“非均衡”运动过程,即顶板破断岩块除在垂直岩层层面内运动(缓倾斜煤层工作面顶板破断岩块运动一般形式)外,在平行岩层层面内也产生运动。由于在垂直岩层层面内顶板的破断和运动是非均衡的(破断岩块的下沉—回转—反回转),因此造成顶板破断岩块在平行岩层层面内的运动随之产生非均衡特征(破断岩块靠近采空区方向沿倾斜的运动速度较大),很显然,这种在两个正交平面内出现的非均衡运动组合形成了破断岩块的空间“非均衡”运动(图 5(a))<sup>[1]</sup>。同时,该结构的运动形式亦受到上覆未垮岩层的变形破坏影响,倾斜砌体结构不仅是支护结构的施载体,也是似壳结构断裂失稳对工作面支护系统作用的传力媒介。

假设倾斜砌体结构为刚体,采场顶板岩层则是以有限个倾斜砌体结构组成的刚体系统,刚体之间则存在着约束。根据分析力学中刚体动力学原理可知,在力的作用下,该结构的运动可以分解为随刚体上任意参考点  $P$  的平动和绕参考点  $P$  的转动,所以,可以用刚体动力学普遍方程来描述其受力和运动特征,即 
$$\int_m \delta_i (dF - adm) = 0$$
, 其中,  $m$  为刚体的质量;  $\delta_i$  为刚

体上质点的虚位移; $dF$ 为作用于质点上的外力; $a$ 为质点的绝对加速度; $dm$ 为质点的质量。

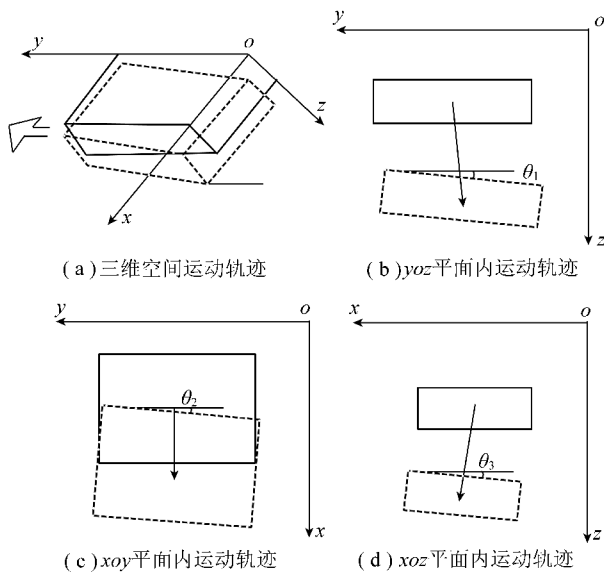


图5 倾斜砌体结构的非均衡运动形态及轨迹

Fig. 5 Nondirective movement form and track of the incline masonry structure

$\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ —顶板破断岩块在沿层面( $yoz$ 、 $xoy$ )方向和垂直层面方向( $xoz$ )运动过程中出现的回转角

#### 4 倾斜砌体结构与“顶板-支架-底板”系统失稳<sup>[1]</sup>

倾斜砌体结构的非均衡运动可能引发的支护系统失稳,主要表现在以下3个方面:

(1)倾向堆砌结构是工作面开采空间顶板的主要存在形式,该结构给工作面支护系统施加沿倾斜方向的作用力,且在局部区域内作用力的瞬间方向和强度不同,加剧支架(支护系统)挤压、倾倒和下滑运动。

(2)工作面倾斜砌体结构的非均衡移动与充填给中、上部区域内的破断顶板留下了较大的运动空间,有可能在工作面中、上部形成“空洞”,使工作面支护系统与顶板处于非接触状态,造成系统元素“顶板”缺失,不能构成“顶板-支架-底板”系统。

(3)反倾向堆砌结构形成后,也会对支架系统产生作用,反倾向堆砌结构本身对支架的反倾向推挤作用,同样,受到上覆结构破坏失稳的冲击作用(周期来压等),该结构会对支架产生反倾向冲击,使支架超载、压死或产生反倾向倾倒。

#### 5 结 论

(1)在大倾角煤层走向长壁采场中,顶板裂断与

离层岩层易形成倾斜砌体结构,该结构主要有两种形式,即倾向堆砌和反倾向堆砌,其中采场大部分破断岩层以倾向堆砌结构存在,仅在工作面倾向方向中上部、运移空间较大的范围内才会形成反倾向堆砌,与缓倾斜煤层开采垮落岩层沿工作面倾向形成的结构不同。

(2)倾斜砌体结构从煤壁向采空区依次为结构活跃区、过渡区和稳定压实区。

(3)大倾角煤层采场走向岩层结构特征与缓倾斜煤层相同,存在“砌体梁”结构,但沿工作面倾斜方向“砌体梁”结构形成位置存在不一致性,其中倾斜下部滞后于倾斜中上部区域。沿工作面倾斜中上部位活跃区,中部偏下区域为过渡区,下部区域为稳定区。

(4)倾斜砌体结构的运动过程是一个“非均衡”运动过程,即垂直岩层层面内运动和平行岩层层面内的运动复合运动。可以用刚体动力学普遍方程来描述其受力和运动特征。倾斜砌体结构的运动形式受到上覆未垮岩层的变形、破坏和运移影响,也是主承载结构变形破坏和运移对工作面支护系统作用的传力媒介。

#### 参考文献:

- [1] 伍永平. 大倾角煤层开采“R-S-F”系统动力学控制基础研究[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2006.  
Wu Yongping. Study on dynamics controlling basis of system “R-S-F” in steeply dipping seam mining[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Publishing House, 2006.
- [2] 伍永平, 俞东风, 张淼丰. 大倾角煤层综采基本问题研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(5): 465-468.  
Wu Yongping, Yun Dongfeng, Zhang Miaofeng. Study on the elementary problems of full-mechanized coal mining in greater pitching seam[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(5): 465-468.
- [3] 石平五. 急斜煤层老顶破断运动的复杂性[J]. 矿山压力与顶板管理, 1999(3): 26-28.  
Shi Pingwu. The complexity of movement of broken overlying strata in steep coal seam mining[J]. Journal of Ground Pressure and Roof Control, 1999(3): 26-28.
- [4] 伍永平, 解盘石, 任世广, 等. 大倾角煤层群开采岩移规律数值模拟及复杂性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(4): 392-395.  
Wu Yongping, Xie Panshi, Ren Shiguang, et al. Numerical simulation and complexity analysis of strata movement in exploiting steep coal seams group[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(4): 392-395.
- [5] Wu Yongping, Xie Panshi. Three-dimensional strata movement around coal face of steeply dipping seam group[J]. Journal of Coal Science & Engineering(China), 2008, 14(3): 352-355.
- [6] 黄建功. 大倾角煤层采场顶板运动结构分析[J]. 中国矿业大学

- 学报,2002,31(5):411-414.
- Huang Jiangong. Structural analysis for roof movement for steep coal seams[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002,31(5):411-414.
- [7] 周邦远,伍永平,伍厚荣,等. 绿水洞煤矿大倾角煤层综采技术研究[R]. 广安;华蓥山矿务局;西安;西安矿业学院,1998.
- Zhou Bangyuan, Wu Yongping, Wu Hourong, et al. Technology of fully mechanized coal mining in steeply dipping seam[R]. Guang'an; Huaying Mountain Mining Bureau; Xi'an; Xi'an Mining & Technology Institute, 1998.
- [8] 伍永平,俞东风. 大倾角特厚煤层综采放顶煤技术研究[R]. 兰州;靖远煤业集团公司王家山煤矿;西安;西安科技学院,2003.
- Wu Yongping, Yun Dongfeng. Technology of longwall top coal caving along the strike in steeply dipping thick coal seam[R]. Lanzhou; Wangjiashan Coal Mine of Jingyuan Coal Group; Xi'an; Xi'an University of Science and Technology, 2003.
- [9] 黄国春,伍永平,李如明,等. 大倾角硬顶软底煤走向长壁综放开采技术研究[R]. 乌鲁木齐;新疆焦煤集团;西安;西安科技大学,2009.
- Huang Guochun, Wu Yongping, Li Ruming, et al. Technology of longwall top coal caving along the strike in hard roof, soft floor and coal steeply dipping seam[R]. Xi'an; Xi'an University of Science and Technology; Urumqi; Xinjiang Tar Coal Group Co. Ltd, 2009.
- [10] 伍永平. 大倾角特厚易燃煤层群综放开采技术研究[R]. 兰州;华亭煤业集团公司东峡煤矿;西安;西安科技大学,2006.
- Wu Yongping. Technology of longwall top coal caving along the strike in steeply dipping thick and inflammable coal seams[R]. Lanzhou; Huating Coal Group; Xi'an; Xi'an University of Science and Technology, 2003.
- [11] 伍永平,解盘石,任世广. 大倾角煤层开采围岩空间非对称结构特征分析[J]. 煤炭学报,2010,35(2):182-184.
- Wu Yongping, Xie Panshi, Ren Shiguang. Analysis of asymmetric structure around coal face of steeply dipping seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2010,35(2):182-184.
- [12] 伍永平. “顶板-支护-底板”系统动态稳定性控制模式[J]. 煤炭学报,2007,32(4):341-346.
- Wu Yongping. Controlling pattern for dynamic stability of system “Roof-Support-Floor”[J]. Journal of China Coal Society, 2007,32(4):341-346.
- [13] 伍永平. 大倾角采场“顶板-支护-底板”系统动力学方程求解及其工作阻力的确定[J]. 煤炭学报,2006,31(6):736-741.
- Wu Yongping. Keys to dynamic equations of system R-S-F and determination on working resistance of face support in steeply dipping seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2006,31(6):736-741.
- [14] 伍永平. 大倾角煤层开采“顶板-支护-底板”系统稳定性及动力学模型[J]. 煤炭学报,2004,29(5):527-531.
- Wu Yongping. Dynamic model and stability of system “roof-support-floor” in steeply dipping seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2004,29(5):527-531.
- [15] 伍永平. 大倾角煤层开采“顶板-支护-底板”系统的动力学方程[J]. 煤炭学报,2004,30(5):685-689.
- Wu Yongping. Dynamic equation of system “roof (R)-support(S)-floor (F)” in steeply dipping seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2004,30(5):685-689.

## 2011年《JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING (CHINA)》(《煤炭学报》英文版)征订启事

《JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING (CHINA)》是由中国煤炭学会主办的、向国内外公开发行的英文版煤炭科学技术方面的综合性学术刊物。主要刊载煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护等方面的科学研究成果论著和学术论文,以及煤矿生产建设、企业管理经验的理论总结,也刊载重要学术问题的讨论及国内外煤炭科学技术方面的学术活动简讯。

《煤炭学报》英文版《JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING (CHINA)》是向世界传播我国煤炭科学技术的重要媒体,对加强中外科学技术交流,宣传我国煤炭科学成就,提高我国煤炭科学技术的国际地位将起到重要的作用。及时报道我国煤炭科技新理论、新技术、新经验也是《煤炭学报》英文版的主要任务。《煤炭学报》英文版和中文版具有不同的刊登内容和各自的特点。

《煤炭学报》英文版为季刊,每期112页,每册国内订价28元,全年共收费112元。订阅者可直接和本编辑部联系,订单函索即寄,编辑部随时办理订阅手续。

本刊地址:北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部 邮政编码:100013

联系电话:(010)84262930, E-mail:mtxbbyh@126.com, mtxb@vip.163.com