

文章编号: 0253-9993(2010)12-1957-06

相邻采空区关键层失稳诱发矿震机理研究

魏 东^{1,2} 贺 虎³ 秦原峰³ 范 军³ 周 澎²

(1. 煤炭科学研究总院 开采设计研究分院, 北京 100013; 2. 中国华能集团华亭煤业集团, 甘肃 华亭 744100; 3. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 基于岩层控制的关键层理论, 对工作面开采过程中相邻采空区震动机理进行了研究, 将相邻采空区震动机理归结为 3 种基本形式: ① 低位亚关键层回转滑移失稳; ② 高位亚关键层剪切滑移失稳; ③ 主关键层极限破断失稳。利用现场矿井微震监测系统, 分析了不同机理震动规律, 结果表明, 相邻采空区岩层失稳滞后于本工作面岩层运动, 震动频次上低位亚关键层最高, 高位亚关键层次之, 主关键层极限破断失稳震动最少, 震动能量上则相反; 本工作面破坏烈度则是高位亚关键层剪切滑移失稳最强, 低位亚关键层失稳震动次之, 而主关键层最小。最后, 根据震动诱发动力冲击的能量机理, 提出了相邻采空区震动灾害的治理措施, 并在现场实施应用。

关键词: 相邻采空区; 关键层; 失稳; 矿震; 冲击矿压

中图分类号: TD324.1 **文献标志码:** A

Study on mechanism of mining tremor induced by key strata instability in the gob beside the working face

WEI Dong^{1,2}, HE Hu³, QIN Yuan-feng³, FAN Jun³, ZHOU Peng²

(1. Coal Mining & Designing Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Huating Coal Group Co. Ltd. of China Huaneng, Huating 744100, China; 3. School of Mines, State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Based on the key strata theory in ground control, researched on mechanism of mining tremor induced by key strata instability in the gob beside the working face, and summarized three basic mechanism types that: ① Rotary slipping instability of the low inferior key strata, ② shear slipping instability of high inferior key strata, ③ ultimate rupture of main key strata. The different rules of mining tremor under different mechanisms were studied using the micro-seismic observing system installed around the working face. The results show that mining shocks in the gob induced by strata instability lag the strata movement in the working face, low inferior key strata have the most frequency of the tremor, follow by the high inferior key strata and the key strata least, the released energy level is just opposite. The most damage intensity to the working face or roadways is caused by the high inferior key strata, secondly the low inferior key strata and at last the main key strata caused the lighting level. Based on the energy of rock burst combined the researches on the mechanism, in the end, the prevent and control strategies for the tremor disaster in the gob were put forward and implemented in the coal mines.

Key words: the gob beside the working face; key strata; instability; mine tremor; rockburst

煤炭科技的进步, 使得工作面开采面积(采高与采宽)与速度急剧增加, 大尺度、强开采带来产量上升的同时也带来了新的矿压问题^[1-2]。随着小煤柱或无煤柱开采成功应用到厚煤层综放工作面, 放顶煤

收稿日期: 2010-07-22 责任编辑: 韩晋平

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2010CB226805); 国家自然科学基金资助项目(50490273, 50474068); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究课题资助项目(SKLCRSM10X05)

作者简介: 魏东(1969—), 男, 甘肃会宁人, 高级工程师, 博士研究生。E-mail: guyanah11@163.com

工作面覆岩运动范围增加,采动应力场、覆岩空间结构的演化规律更加复杂,煤岩非线性动力破坏日趋频繁,其中冲击矿震以其突然性和巨大的破坏性,对矿井安全高效生产构成极大威胁,成为国内外研究的热点与难点^[3-8]。

以往的研究对象多局限于距离采场较近的基本顶岩层范围内以及煤层前方几十米内支承压力规律,而现场事故的发生与显现却表明,与冲击矿压等动力灾害相关的岩层范围厚度上已超过传统一般概念上的基本顶范围,在层面方向上也远远超过本工作面上、下回采巷道影响范围^[9-10]。相邻采空区的稳定性与覆岩运动对本工作面开采过程中的影响以及诱发冲击矿压的机理与控制还缺乏相应的研究。因此开展矿井大范围覆岩运动诱发冲击矿压机理与规律的研究对于有效防止灾害发生、弱化灾害强度研究具有重要意义。利用矿井微震监测技术,使实时监测上覆关键层破断运动成为可能,相比其他监测手段更为精确,所得信息更加丰富^[11]。本文将基于岩层控制的关键层理论,同时结合矿井微震监测系统,对厚煤层综放开采过程中相邻采空区覆岩运动诱发矿震机理进行探讨。

1 相邻采空区关键层运动诱发矿震微震监测

1.1 矿井简介

某矿目前正在开采的二水平首采区 2501 的第 3 个工作面——250103 工作面,面长 200 m,倾角 5°左右,西部与已采的 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。在回采 250102 工作面(与 250101 工作面相邻,留有 20 m 煤柱)期间矿震频繁,并发生了几十次冲击矿压现象,为此,该矿引进波兰“SOS 微震监测系统”,在矿井开采区域周围布置了 16 个微震检波探头,对矿井内微震事件进行实时连续监测,通过分析微震事件发生的时空演化规律,结合岩层移动理论,对覆岩关键层运动规律进行反证,从而研究关键层破断以及诱发冲击矿压灾害规律,为科学防治提供依据。

1.2 矿井微震监测系统简介

现场监测使用波兰煤炭科学研究总院研制的最新“SOS 矿井微震监测系统”,该系统是目前国内外最为先进的煤矿用微震监测系统之一^[12],主要由记录仪、分析仪、微震探头和数字传输系统等组成,最大传输距离达 10 km,可准确计算出能量大于 100 J 的震动事件的发生时间、能量及空间三维坐标。微震探头的频带宽度为 1~600 Hz,台网优化布置情况下,水平定位误差小于 20 m,垂直定位误差小于 30 m。

图 1 为 SOS 微震监测系统的组成。

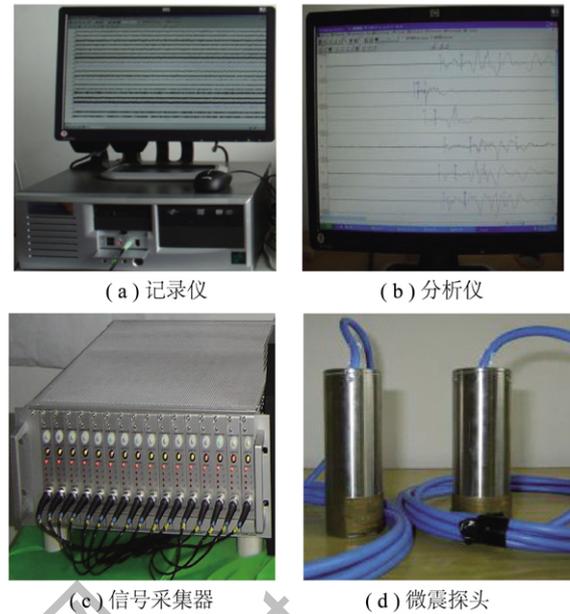


图 1 SOS 微震监测系统组成

Fig. 1 The component of SOS seismic observation system

1.3 微震监测结果

通过微震震源定位结果可以看出,250102 工作面回采期间,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 煤柱有效地隔开了 01 与 02 工作面采空区之间的联系,02 工作面的开采对 01 工作面采空区内岩层扰动较小,没有发生岩层再次失稳活动。由于 02 工作面 20 m 煤柱冲击严重,因此 03 工作面与 01 工作面改用小煤柱护巷,但在 03 工作面开采后,微震定位结果显示,01 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。

图 2 为 01 工作面采空区侧顶板岩层中震源位置平面图。从图 2(a) 可以看出,03 工作面初采期间,小震动在 03 工作面回风巷侧和 01 工作面采空区中频次大致相同,其分布位置均靠近小煤柱侧,03 工作面回风巷侧断裂线距煤壁平均为 20 m,而 01 工作面采空区中断裂线距煤壁约为 30 m,此时段内震动能小、层位低,平均为 980 m,处于煤层直接顶范围内,因此主要是由工作面开采后直接顶板的破裂垮落造成的,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。图 2(b) 显示了覆岩中高能震源定位图,可以看出初采期间,高能震动主要发生在 03 工作面内,距离回风巷侧煤壁形成一条断裂带,距离为 20 m,震源平均标高为 1 020 m。采空区中高能震动很少,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,01 工作面采空区中震动频次与能量显著上

升 如图2(c)、(d)所示,在距离01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2(c)中的震动

密集区域相吻合,表明受采动影响,原本断裂形成的平衡结构在此处失稳,诱发震动。同时震动位置不断向上发展,2010-03-15—04-01震动平均标高为1 080 m。

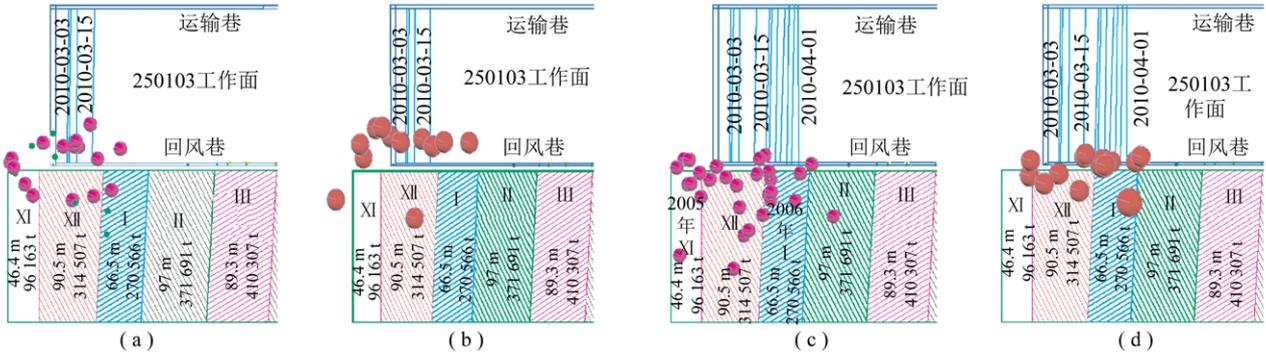


图 2 250103 工作面靠采空区侧震源分布

Fig. 2 Distribution of seismic source close to the gob side for 250103 working face

(a) 3月1日—15日震动,能量级别 $10^3 \sim 10^5$ J; (b) 3月1日—15日震动,能量级别大于 10^5 J;
(c) 3月15日—4月1日震动,能量级别 $10^3 \sim 10^5$ J; (d) 3月15日—4月1日震动,能量级别大于 10^5 J

2 相邻采空区关键层结构失稳震动机理

根据关键层理论,当未达到充分采动时,工作面停采一定时间后上覆岩层达到新的平衡,覆岩与地表移动基本停止,但采空区覆岩关键层破断后所形成的结构,即“砌体梁”结构依然存在^[1],伴随关键层结构形成时残留的离层空间和裂隙等依然存在,在重复采动或各种其他外力作用扰动下,处于相对平衡状态的覆岩关键层结构将失稳活化。

通常情况下,工作面覆岩中含有多层亚关键层与1层主关键层,各关键层在控制岩层运动上具有类似作用,但由于关键层所处层位、岩层物理力学属性以及所处应力环境的不同,其破断垮落形态以及失稳机理均有所不同。基于工作面开采过程中相邻采空区覆岩关键层失稳运动诱发震动规律研究,推测覆岩破裂发展的时空规律,提出岩层中各亚关键层与主关键层存在3种结构失稳机理:低位亚关键层转动滑移失稳、高位亚关键层滑动失稳与主关键层极限破断失稳。关键层不同的失稳机理,所诱发的冲击矿压或矿震形式不同,同时造成破坏的强度也具有明显差异。

2.1 低位亚关键层结构失稳机理

相邻采空区覆岩稳定性是影响本工作面覆岩运动范围与模式的重要因素,相邻采空区对本工作面影响最大、最显著的是边界关键岩块的稳定性,因此分析边界关键岩块的失稳条件、失稳震动机理对下区段工作面影响至关重要。图3为工作面开采后,上覆岩层破断规律示意图。

工作面回采后,随着不断向前推进,各亚关键层

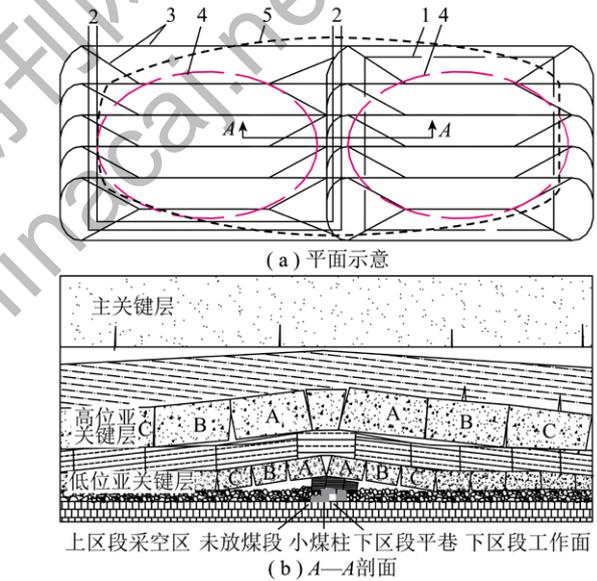


图 3 两工作面开采后采空区覆岩结构

Fig. 3 Schematic structure chart of overburden strata after two workface exploitation

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

破断垮落,并形成“砌体梁”平衡结构。倾向上在工作面两平巷上方形成“弧三角板”结构,“弧三角板”一端断裂在煤壁里,断裂线位置距煤壁2~10 m,与顶板力学性质有关^[13];另一端与工作面中部断裂岩块B、C相互铰合,亦能形成三铰拱式平衡结构。此平衡结构受到下区段实体煤与本区段端头未放顶煤、直接顶以及岩块B的夹持作用能够保持较好的稳定性,能够一直保持到下区段工作面回采之前。但是,当下区段工作面进行回采时,原本支撑夹持“弧三角

板”的实体煤与顶板岩层不断采出垮落,两区段之间的小煤柱宽度小于亚关键层断裂线至煤壁距离的两倍时,下区段亚关键层必然沿着上区段亚关键层断裂,如图 3(b) 所示。影响此塔式结构稳定性的主要是本区段关键岩块 B 的回转下沉。

图 4 为上区段低位亚关键层关键块的受力。对 O 取力矩平衡,即可得到维持关键块平衡所需最小水平力 T_2 , 见式(1)。

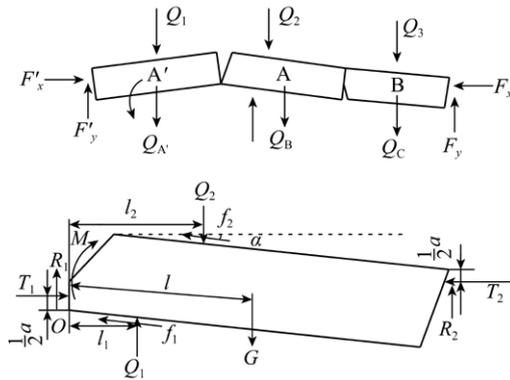


图 4 关键岩块受力

Fig. 4 Force of the key rock block

由 $\sum M_o = 0$ 得

$$M + Gl \cos \alpha + Q_2 l_2 + T_1 \frac{1}{2} a = Q_1 l_1 + T_2 \left[2l(1 - \sin \alpha) - \frac{1}{2} a \right] + R_2 2l \cos \alpha + f_2 \left(h - \frac{1}{2} a \right) \quad (1)$$

由 $\sum F_y = 0$ 得

$$T_2 = T_1 + (f_1 + f_2) \cos \alpha \quad (2)$$

则保持平衡所需的水平推力为

$$T_2 = \left[M + Gl \cos \alpha + Q_2 l_2 + \frac{a}{2} (f_1 + f_2) \cos \alpha - Q_1 l_1 - R_2 2l \cos \alpha - f_2 \left(h - \frac{a}{2} \right) \right] / \left[2l(1 - \sin \alpha) - a \right] \quad (3)$$

所以岩块 A、B 之间不产生滑落失稳的条件为

$$T_2 \tan \varphi \geq R_2 \quad (4)$$

式中 M 为本区段工作面低位亚关键层关键块 A' 旋转下沉过程中对 A 岩块的力矩; G 为岩块 A 的自重; Q_1 为采空区端头垮落煤岩体对岩块 A 的支撑力; Q_2 为上覆岩层对岩块 A 的载荷; f_1 、 f_2 为岩块 A 与上下岩层之间的摩擦力; T_1 、 R_1 为岩块 A' 对 A 的约束力; T_2 、 R_2 为岩块 B 对 A 的约束力; l_1 、 l_2 为 Q_1 、 Q_2 至 O 点距离; l 、 h 为岩块 B 的长度与厚度; a 为岩块 A 铰接点塑性区长度, $a = (l - h \sin \alpha) / 2$; α 、 φ 为岩块 A 的转角与内摩擦角。

由式(3)可见,受本区段工作面岩块 A' 的回转运动,保持平衡所需水平力变大,并且一旦岩块 B 开始向下回转运动,则重新回到平衡状态,所需水平力越来越大,而岩块 A' 与 B 所能提供的水平力 T_2 却在减小。因此,此平衡结构为非稳定平衡结构,一旦启动失稳,无外部能量输入的情况下,将一直运动下去,直到达到系统熵值最大的另一个平衡结构。岩块 B 在力矩作用靠煤壁一端将绕 O 点回转运动,与 C 咬合端由于摩擦力减小则会沿断裂面滑移, B 岩块的滑移过程伴随做功释放能量,其中大部分转化为克服滑移面的摩擦内能,另外 1% ~ 10% 的能量则以震动波的形式释放。该区域通常发生顶板回转失稳型矿震以及顶板剪切滑移型矿震,震动频次较高,但能量一般不大。

2.2 高位亚关键层结构失稳机理

高位亚关键层与低位亚关键层的区别不只是在于所处更高的层位,高位亚关键层因为其断裂线并不重合,断裂线中间的岩块对于开采扰动具有一定的抵抗与缓冲能力。上区段采空区中关键岩块的稳定性与中间岩块的约束作用密切相关。同时,由于垮落岩层的碎胀作用与离层的存在,高位亚关键层下方自由空间高度要小于低位亚关键层,因此其稳定性明显高于低位亚关键层,但是维持其结构平衡也需要满足一定的力学条件,当条件不能满足时,也会发生失稳运动,由于其断裂块度大,初次断裂不充分,其所积聚的能量远高于低位亚关键层结构系统,因此通常情况下高位亚关键层失稳所能释放的能量高于低位亚关键层滑移失稳。高位亚关键层两侧关键块 A 对断裂线之间岩块施加反作用水平推力 T_1 、 T_2 ,作用点位于岩块底表面,此表面与下侧岩层之间的接触面符合莫尔-库伦破坏准则,则由 X 方向应力平衡方程可得

$$\tau = \frac{T_1 - T_2}{S_1} = C' + \frac{Q}{S_2} \tan \varphi'$$

式中 S_1 、 S_2 为上、下表面积; Q 为上表面所受垂直载荷; C' 、 φ' 为下部接触面黏聚力与内摩擦角。

本区段工作面高位亚关键层处于向下破断运动时,由于其旋转作用,对底面的作用力越来越大,超出接触面强度准则后,将会沿底面发生剪切破坏,在铰接点出现结构的变形失稳,并发展成破裂面。破裂面的形成不但减弱了中间岩块所能提供的最大水平推力,并且允许两侧岩块 A 向中间发生位移,岩块 A 与 B 之间接触面积随 A 的位移逐渐变小,从面接触到点接触,摩擦因数也变成球面摩擦因数,因此 A、B 之间的摩擦力减小,当剪切力超过摩擦力后,就会沿接触面滑移运动,滑移过程中伴随有岩层震动现象,

形成剪切滑移型矿震,并且在高位亚关键层向下失稳运动过程中,会迫使下位岩层运动,因此高位亚关键层失稳诱发矿震能量级别一般比低位亚关键层高出许多,由上文现场微震定位结果同样可以看出。

2.3 主关键层结构失稳机理

根据关键层理论,主关键层具有厚度大、强度高、断裂步距大的特点。因此,对于某些矿井主关键层为特厚砂岩、火成岩时(如山东鲍店煤矿、淮北海孜煤矿等),其破断步距往往超过单一工作面开采范围,即单一工作面开采完毕后,主关键层并不发生破断,当两个工作面采空区贯通后,主关键层的暴露面积超过其极限跨距。利用弹性板理论的纳维叶法求解,可得主关键层在沿走向与倾向的破断条件为

$$\sigma_{x\max} = \frac{12\mu qa^4 b^2}{\pi^2 h_0^2 (3a^4 + 2a^2 b^2 + 3b^4)} \geq [\sigma_x]$$

$$\sigma_{y\max} = \frac{12\mu qa^2 b^4}{\pi^2 h_0^2 (3a^4 + 2a^2 b^2 + 3b^4)} \geq [\sigma_y]$$

式中, $\sigma_{x\max}$ 、 $\sigma_{y\max}$ 分别为关键层长边、短边最大拉应力, MPa; μ 为关键层泊松比; q 为关键层承受载荷, MPa; a 为关键层倾向跨距, m; b 为关键层走向跨距, m; h_0 为关键层厚度, m; $[\sigma_x]$ 、 $[\sigma_y]$ 分别为关键层长边、短边抗拉极限强度, MPa。

当知道主关键层的物理力学性质后,即可求出主关键层沿走向和倾向的垮落步距,主关键层将会破断滑移,从而形成强烈震动,同时主关键层的运动控制着一直到地表岩层运动,因此关键层断裂造成的矿震往往波及地表,形成矿区有感矿震,由于主关键层一般距开采工作面较远,所以对井下工作面的破坏烈度小于亚关键层失稳,但是能量级别却远高于亚关键层失稳震动。

由以上分析可知,250103 工作面回采过程中,250101 采空区中震动机理主要是由于开采扰动下低位与高位亚关键层的回转、剪切滑移失稳诱发,2501 采区则不存在主关键失稳诱发矿区有感震动,这种现象在兖州煤业集团鲍店煤矿较为常见。

3 采空区关键层诱发震动的防治措施

采空区中关键层失稳诱发震动,震源释放能量的 1% ~ 10% 将以震动形式向外传播,并以应力波形式对煤岩体施加动载荷^[14]。由煤岩动力破坏的能量机理可知,当煤岩系统自身积聚的弹性能 U_E 与外来应力波能量 U_S 叠加之和超过煤岩体破坏消耗能量 U_P 与冲击所需最小冲能 U_K 之和后,煤岩体将发生冲击矿压破坏,即

$$U_E + U_S \geq U_P + U_K \quad (5)$$

由式(5)可以看出,要防止采空区震动造成工作面以及回风巷和运输巷破坏,首先要减小系统自身存储的弹性能与震动波能量,即减小系统能够释放的弹性能;其次要增大煤岩体破坏所耗散的能量以及最小冲能。基于此,首先提出对回风巷采用顶板深孔爆破切断较长悬顶,从而减少顶板岩层积聚的弹性能以及破断后诱发震动的能量,250103 工作面开采后,一直进行系统的顶板深孔爆破,极大地改善了工作面安全条件;其次,针对小煤柱大多已经处于塑性破坏状态,抵抗冲击能量有限,需加大支护强度,最好能够形成“O 型蓄能”支护体系^[15],人为提高最小冲能,从而保证巷道稳定性与人员设备安全。

4 结 论

(1) 综放多工作面回采后,小煤柱不能有效隔开采空区之间的联系与影响,在本工作面开采扰动作用下,相邻采空区关键层会发生二次失稳诱发矿井微震,并对本工作面巷道造成破坏。

(2) 震源时空间分布表明,相邻采空区岩层失稳滞后于本工作面岩层运动,采空区中震动呈现低层位低能量向高层位高能量转移,大能量震动集中在上区段工作面回采顶板岩层形成结构区间。

(3) 相邻采空区震动机理归结为 3 种基本形式:低位亚关键层回转滑移失稳、高位亚关键层剪切滑移失稳、主关键层极限破断失稳。

(4) 震动频次上低位亚关键层最高,高位亚关键层次之,主关键层极限破断失稳震动最少,震动能量上则相反;对本工作面破坏烈度上则是高位亚关键层剪切滑移失稳最强,低位亚关键层失稳震动次之,主关键层最小。

参考文献:

- [1] 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.
- [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.
- [3] 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(S1): 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(S1): 3 277-3 282.
- [4] 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.
- [5] 窦林名, 何学秋. 冲击矿压防治理论与技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.
- [6] 窦林名, 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] 谢广祥, 杨科, 常聚才, 等. 综放采场围岩支撑压力分布及动力灾害的层厚效应 [J]. 煤炭学报, 2006, 31(6): 731 - 735.
Xie Guangxiang, Yang Ke, Chang Jucan, et al. Surrounding rock abutment pressure distribution and thickness effect of dynamic catastrophic in fully mechanized sublevel mining stope [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(6): 731 - 735.
- [8] 陆菜平, 窦林名, 郭晓强, 等. 顶板岩层破断诱发矿震的频谱特征 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 1 017 - 1 022.
Lu Caiping, Dou Linming, Guo Xiaoqiang, et al. Frequency-spectrum characters of microseismic signals induced by roof stratum fracture [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 1 017 - 1 022.
- [9] 姜福兴, Xun Luo, 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 Luo, 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.
- [10] 贺虎, 窦林名, 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.
- [11] 曹安业, 窦林名, 秦玉红, 等. 高应力区微震监测信号特征分析 [J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(8): 146 - 149.
Cao Anye, Dou Linming, Qin Yuhong, et al. Characteristic of microseismic monitoring signal in high stressed zone [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(8): 146 - 149.
- [12] 巩思园, 窦林名, 曹安业, 等. 矿微震监测台网优化布设研究 [J]. 地球物理学报, 2010, 53(2): 457 - 465.
Gong Siyuan, Dou Linming, Cao Anye, et al. Study on optimal configuration of seismological observation network for coal mine [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(2): 457 - 465.
- [13] 谢文兵, 殷少举, 史振凡. 综放沿空留巷几个关键问题的研究 [J]. 煤炭学报, 2004, 29(2): 146 - 149.
Xie Wenbing, Yin Shaoju, Shi Zhenfan. The key problem study about gob-side entry retaining in top-coal caving mining face [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(2): 146 - 149.
- [14] Glibowicz S J, Kijko A. 矿震学引论 [M]. 修济刚, 译. 北京: 地震出版社, 1996.
- [15] 贺虎, 窦林名, 巩思园, 等. 巷道防冲机理及支护控制研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 40 - 44.
He Hu, Dou Linming, Gong Siyuan, et al. Mechanism of rockburst prevention and supporting control technology in roadways [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 40 - 44.

本刊讯: 根据 Ei 中国信息部发布的最新收录结果, 本刊 2010 年第 35 卷增刊共发表论文 50 篇, 其中 Ei Compendex 收录论文 50 篇, 收录率为 100%。