

顶板岩层对冲击矿压的影响规律研究

牟宗龙^{1,2}, 窦林名¹, 倪兴华², 张明伟¹

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;
2. 兖州煤业股份有限公司 兖矿集团博士后工作站, 山东 邹城 273500)

摘要: 采用模拟试验方法研究了顶板岩层对煤体应力状态的影响, 并根据震动能量对煤体的破坏效应和在岩体中的传播衰减规律, 从能量角度分析了煤层上方不同厚度和强度的顶板岩层对煤体冲击的影响程度. 结果表明, 顶板释放的能量与岩层强度呈对数关系、与顶板厚度呈指数关系, 坚硬、厚层顶板岩层会对煤体产生更为强烈的扰动, 使冲击矿压危险性明显升高. 另外, 具有一定厚度和强度且距离煤层较近的老顶岩层运动产生的冲击载荷对煤体的影响作用较大. 某矿一个工作面的冲击矿压防治工程实践表明, 对该煤层上方的顶板岩层实施爆破弱化处理技术措施后, 可有效降低工作面回采过程中的冲击危险性.

关键词: 冲击矿压; 顶板岩层; 断裂; 震动能量

中图分类号: TD 324 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1964(2010)01-0040-05

Research on the Influence of Roof Strata on Rock Burst Risk

MU Zong-long^{1,2}, DOU Lin-ming¹, NI Xing-hua¹, ZHANG Ming-wei¹

(1. School of Mines, State Key Laboratory of Coal Resources and Safety Mining,
China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;
2. Postdoctoral Workstation, Yanzhou Mining Group, Zoucheng, Shandong 273500, China)

Abstract: The influence of the roof stratum on the stress state of a coal mass was studied by simulation methods. The attenuation of seismic waves through the rock mass, and the damage from the action of seismic energy on the coal mass, was treated by considering the energy of the waves. The danger of rock burst was analyzed by considering roof strata of different thicknesses and strengths. The energy released during roof rupture is logarithmically related to the roof stratum strength and exponentially related to its thickness. A harder and thicker roof stratum generates higher dynamic stresses on the coal mass and increases the danger of rock burst. Strata of a particular thickness and strength located near the coal seam often have greater influence on rock burst. Control practices at the working face of one coal mine suggested pre-splitting the roof strata above the coal seam by blasting can reduce the danger of rock burst.

Key words: rock burst; roof stratum; rupture; seism energy

近年来,我国煤矿冲击矿压灾害的发展趋势是逐渐增多,日趋严重,冲击矿压已经成为煤矿重大自然灾害之一,进行冲击矿压的机理、影响因素、预测预报及防治研究十分必要和迫切^[1-2]. 实践表明,

很多冲击矿压事故是由开采后顶板岩层的运动引起的,煤矿冲击煤层的顶板厚而坚硬,冲击矿压经常发生在顶板岩层突然垮落时^[3-8].

除了采深和煤层冲击倾向性外,我国冲击矿井

收稿日期: 2009-02-08

基金项目: “十一五”国家支撑计划项目(2006BAK04B02); 中国矿业大学青年科技基金项目(2007A004); 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放研究基金项目(08KF09)

作者简介: 牟宗龙(1979-),男,山东省胶州市人,讲师,工学博士,从事冲击矿压和采场顶板控制及监测方面的研究.

E-mail: muzonglong@163.com Tel: 0516-83885904

在进行冲击矿压危险性评估时一般都要重点考虑煤层上方顶板岩层的赋存情况. 目前, 关于顶板岩层对煤体冲击危险性影响的评价主要有 2 种方法, 一种是煤炭行业标准中关于对顶板冲击倾向性的评价方法, 即将煤层上方 30 m 范围内复合顶板弯曲能量指数 U_{wq} 作为顶板岩层冲击倾向性分类标准, 按照相应指标, 可将顶板岩层分为强冲击倾向、弱冲击倾向和无冲击倾向. 另一种是将以砂岩为标准的顶板岩层厚度特征参数 L_{st} 作为判别系数, 即对煤层上方 100 m 范围内的不同分层按照相对弱面系数进行累加, 得到顶板岩层厚度特征参数^[4]

$$L_{st} = \sum h_i r_i, \quad (1)$$

式中: h_i 为顶板在 100 m 范围内第 i 层岩层的总厚度; r_i 为所给岩层的弱面递减系数. 冲击矿压经常发生的条件是, 顶板岩层厚度参数值 $L_{st} \geq 50$. 这 2 种评价方法实质上都表明了坚硬、厚层且距离煤层较近的顶板对冲击矿压危险性的影响相对要大.

研究表明^[3-4], 煤岩体内聚集的弹性能 U_w 与顶板悬顶长度 L 的 5 次方成正比, 即 L 值越大, 积聚的能量也越多, 厚度越大的坚硬岩层越不易冒落, 形成的 L 值也就越大

$$U_w = \frac{q^2 L^5}{8EJ}, \quad (2)$$

式中: q 为单位长度悬顶重量与上覆岩层附加荷载; E 为悬顶的弹性模量; J 为悬顶的断面惯性矩; L 为悬顶长度.

坚硬厚层顶板破断或滑移过程中, 由于大量的弹性能突然释放而形成强烈震动^[9], 由于受到岩体的阻尼作用, 震动波能量随传播距离以指数函数或乘幂函数趋势迅速衰减^[10-11], 即大部分能量在震源近区被消耗掉. 文献^[10]研究了巷道外围的冲击震动源产生的震动波传播到巷道时对巷道稳定性的影响, 并建立了巷道围岩控制的强弱强结构控制模型. 若震源能量是确定的, 当震源距离自由煤体较远时, 在传播到煤体之前震动能量已被大量消耗, 而距离煤层较近的震源对煤体的影响会更大. 因此, 震源的强度和位置(距自由煤体的距离)对煤体冲击危险性具有重要影响作用.

1 顶板岩层对煤体应力状态的影响

煤层开采后形成自由空间, 顶板岩层失去支承力, 在覆岩压力作用下, 顶板岩层发生弯曲变形直至断裂滑移和垮落, 一般情况下, 回采工作面老顶的厚度和初次垮落步距之比在 1/10~1/30 之间. 在采面初采期间, 老顶在达到极限跨距前呈矩形板

状暴露于采空区上方. 根据板模型四周的边界条件不同, 有 4 种情况, 即: 四周均为实体煤的固支板; 一边简支(采空区侧或断层侧), 三边固支的板; 两邻边简支, 两邻边固支的板; 三边简支, 一边固支(孤岛工作面条件下的板状结构)的板. 随着采面的推进, 老顶岩层的跨距逐渐增加, 其中的应力也逐渐增加, 当老顶岩层内的应力超过岩层的极限强度时, 发生断裂破坏. 自切眼起, 随工作面推进, 顶板岩层产生初次破断和周期性破断, 工作面煤体及支护系统经历顶板初次来压和周期来压.

本文利用离散元程序 UDEC4.0 对煤层直接上覆顶板岩层的强度、厚度及断裂对煤体冲击矿压危险性的影响规律进行了模拟, 根据库仑-莫尔准则建立采场平面应变模型, 模型水平长度为 600 m, 竖直方向高度为 400 m, 模拟煤层的采深为 800 m. 结果表明, 工作面的推进会引引起顶板的加速运动, 使煤体应力状态在一定程度上产生突变, 这种突变在顶板岩层达到极限跨距而发生断裂期间表现得尤为明显.

顶板岩层在断裂垮落过程中释放的能量明显增加, 可产生能量峰值, 释放的能量与岩层的厚度和强度均有关系, 见图 1~图 2.

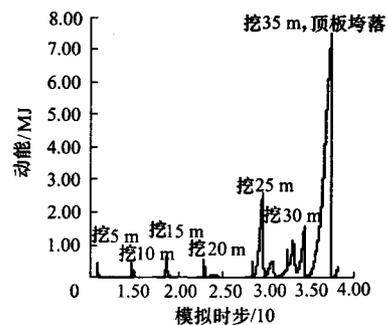


图 1 岩体强度为 120 MPa 时的动能
Fig. 1 Kinetic energy when the roof strength is 120 MPa

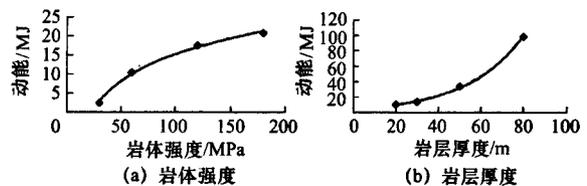


图 2 动能随岩层参数改变而变化
Fig. 2 Kinetic energy changing with roof parameters

从统计结果来看, 顶板运动产生的动能与岩层强度呈对数关系、与厚度呈指数关系增长, 动能 E_k 随顶板岩层强度 σ 、厚度 h 的变化规律分别为

$$E_k = A \ln \sigma - B, E_k = \gamma e^{\lambda h}, \quad (3)$$

式中: A, B, γ, λ 为系数, 因此坚硬厚层顶板岩层运动时对煤体冲击的危险性影响更大.

2 顶板断裂震动对煤体冲击危险性的影响

运用混凝土材料模拟顶板断裂时的震动情况,将顶板岩层初次断裂时的力学结构简化为简支梁结构,试验模型如图 3 所示.在荷载能力为 5 000 kN 的试验机上模拟顶板岩层的断裂,岩板长 2 m,

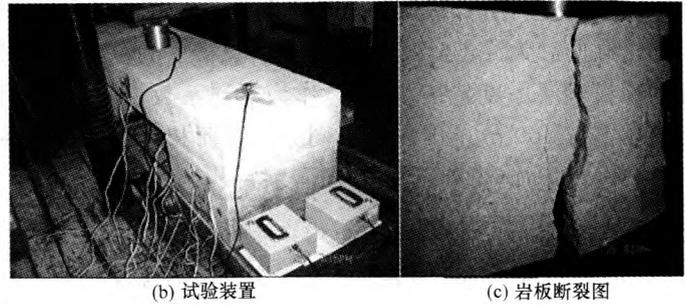
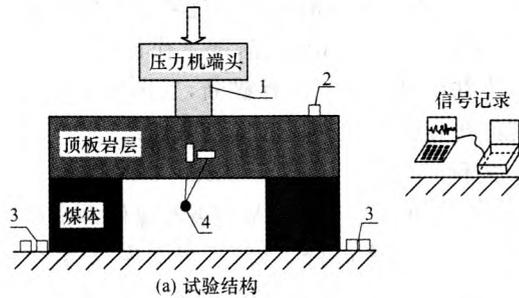
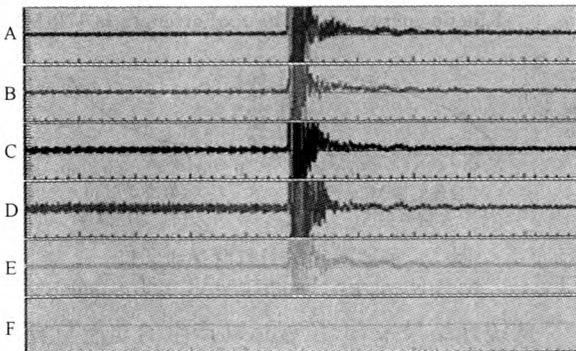
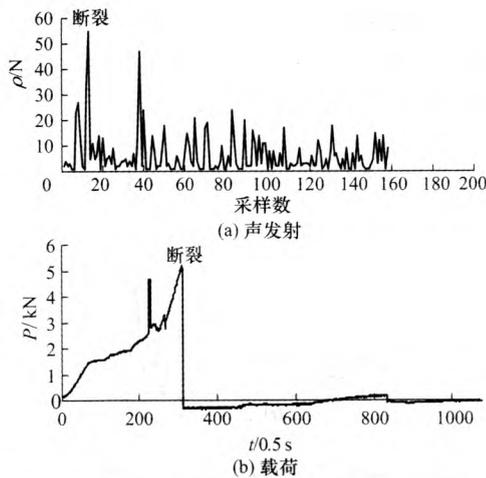


图 3 试验模型

Fig. 3 Experimental model

1. 荷载传感器; 2. 24 K 声发射探头; 3. 微震探头; 4. 应变片

试验结果表明,顶板断裂瞬间,震动波、声发射、应力等发生突变,且断裂产生的震动波可持续一段时间,见图 4.



(c) 信号变化

图 4 顶板断裂时产生的信号变化

Fig. 4 Various signals caused by roof stratum rupture

实践证明,在顶板来压期间,煤体的冲击危险性会有所升高,此时,煤体可在高夹持应力作用下发生破坏,聚集的能量突然释放形成冲击矿压(煤

宽 0.5 m,通过变化岩板的厚度(分别为 0.2,0.2,0.31 和 0.36 m)进行 4 组试验.试验仪器主要包括 TDS-6 微震采集系统、Disp 声发射采集系统和荷载传感器,以测定岩板断裂过程中的震动、声发射和应力等变化情况.

层型冲击矿压),也可以是处于较高应力状态的煤体在硬厚顶板岩层突然破断产生的强烈震动作用下发生冲击破坏(顶板型冲击矿压).

顶板断裂产生的震动波诱发煤体冲击的条件可从能量或应力角度考虑.一方面,煤体发生动力破坏时,其能量转化遵循煤岩体动力破坏的最小能量原理^[12],即煤体破坏需要的能量为单向应力状态下的最小破坏能量,即 $E_{1min} = \sigma_c^2/2E$ 或 $E_{1min} = \tau_c^2/2G$,如果是处于三向应力的煤体破坏,则所需能量为 $E_{2min} = K_0 \sigma_c^2/2E$ 或 $E_{2min} = K_0 \tau_c^2/2G$,其中, K_0 为大于 1 的系数.另一方面,震动波可在邻近自由表面的煤帮附近造成相当高的拉应力,当拉应力大于该处煤体的屈服极限,即 $\sigma \geq \sigma_0$ 、且维持一定时间后会造成员体破坏^[13],一般条件可记为 $\int_0^t [\sigma(t) - \sigma_0]^\alpha dt = k$, t 为层裂时间, α, k 为常数.

设顶板岩层断裂时释放的震动能量为 E_k ,震源距离巷道自由煤体的距离为 l ,该能量在岩体中以指数形式衰减,衰减(阻尼)指数为 η ,传播到煤体的能量为

$$E = E_k e^{-\eta l} \tag{4}$$

设巷道煤体在原岩应力场中积聚的弹性变形能为 E_0 ,则巷道煤体系统中积聚的总能量为

$$E_z = E_k e^{-\eta l} + E_0 \tag{5}$$

故巷道煤体系统中的弹性余能 E_r 为

$$E_r = E_k e^{-\eta l} + E_0 - E_x \tag{6}$$

式中 E_x 为其它各种形式的能量耗散,如岩体的塑性变形损耗的塑性能等.根据单向受力煤体冲击破坏的最小能量原理,当 $E_r \geq E_{1min}$,即

$$E_k e^{-\gamma l} \geq E_{1min} + E_x - E_0 \quad (7)$$

时,巷道煤体可能发生冲击破坏,此时

$$E \geq E_{1min} + E_x - E_0,$$

或
$$E_k \geq (E_{1min} + E_x - E_0)e^{\gamma l}. \quad (8)$$

式(7)也称为巷道煤体结构在震源冲击扰动时破坏失稳的能量准则^[10,14].如某层位顶板断裂时释放的震动能量 E_k 能满足式(7)或(8),则该岩层对煤体冲击有明显影响作用,可称为诱冲岩层,通过弱化处理该岩层可有效降低震源强度和降低煤岩冲击危险性.

3 工程实例

济三煤矿位于山东省济宁市东部,该矿在开采六采区 6303 面期间,曾发生多起严重的冲击矿压显现.6303 面临近 6302 面采空区,通过现场观测,6303 面轨巷临近 6302 面采空区一侧的顶板存在较大范围的悬顶,导致煤体内部产生相对高的应力,如图 5 所示.且悬顶本身聚集了大量弹性能,随工作面推进周期性冒落,巨大的弹性能量突然释放形成强烈冲击和震动,该能量传递到 6303 面巷道煤体上,当叠加后的应力超过煤体应力极限时,造成顶板型冲击矿压的发生.

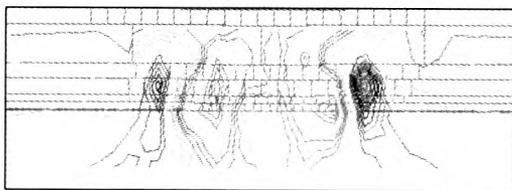


图 5 巷道周围煤体垂直应力分布

Fig. 5 Stress distribution of coal seam around roadway

按照岩层赋存条件和属性,可将煤层上方的顶板划分为 3 层,1# 层顶板厚约 5 m,2# 层厚约 20 m,3# 层厚约 50 m,根据数值模拟及计算结果,各层顶板断裂产生的震动能量及衰减规律如图 6 所示.

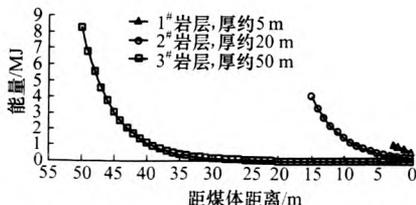


图 6 震动能量及衰减规律

Fig. 6 Seism energy and its damp transmitting rule

可见,煤层上方的 3 层顶板在形成悬顶时不仅会对煤体施加夹持载荷,导致煤体应力集中程度增加,且在断裂时产生的震动能量可传播到巷道煤体(尤其是 1# 层和 2# 层),使煤体的冲击危险性升

高.

实践中采用顶板爆破预裂措施弱化顶板,炮眼距采空区侧巷帮 300 mm,与水平方向成 75° 夹角朝向 6302 面采空区,眼深 10~13 m,装药长 6 m,联线方式为孔内并联、孔间串联,一次爆破 5 个炮孔.通过爆破,在顶板内形成裂隙,降低顶板整体强度,减小悬顶长度和顶板断裂时对煤层的冲击震动.经钻孔窥视仪、电磁辐射法和钻屑法检测,实施的爆破措施及冲击解危效果良好,保证了 6303 面顺利回采完毕.

4 结 论

1) 顶板的加速运动使工作面前方煤体应力始终处于不断变化状态.顶板断裂产生的动能与顶板厚度呈指数关系、与岩层强度呈对数方式关系增长,坚硬厚层顶板岩层会对煤体产生更为强烈的扰动,致使冲击矿压发生的危险性增大.

2) 顶板岩层断裂是一个力学状态和能量的突变过程,伴随着震动波、声波等基本同步变化,断裂前,各项参量变化平缓,断裂过程中,各项参量发生突变,顶板断裂产生的震动可持续一段时间,使煤体冲击危险性升高.

3) 坚硬厚层顶板岩层对煤体冲击的影响有 2 种情况,一种是当顶板悬顶长度增加时,煤体可在高夹持应力作用下发生冲击破坏,第 2 种是在初次和周期断裂期间产生较强烈的震动,其冲击动载可诱发工作面附近已处于高应力状态的煤体发生突发性破坏,形成顶板型冲击矿压.

4) 实践证明,对煤层上方的部分诱冲顶板岩层实施爆破弱化处理后,可有效降低工作面开采过程中的冲击矿压危险性.

参考文献:

[1] 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.
 [2] 齐庆新,窦林名.冲击地压理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2008.
 [3] GOSZCZ, ANTONI. Roof rock bursts and ways to combat them [J]. Archiwum Gornictwa, 1991, 36 (3):239-261.
 [4] HUWE. Untersuchung der geologischen Einflussfaktoren auf die Gebirgsschlaggefahr[J]. Glueckauf Forschungshefte, 1998,59(3):72-76.
 [5] 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,2002.
 [6] 牟宗龙,窦林名,张广文,等.坚硬顶板型冲击矿压

- 灾害防治研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(6): 737-741.
- MU Zong-long, DOU Lin-ming, ZHANG Guang-wen, et al. Study of prevention methods of rock burst disaster caused by hard rock roof[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(6): 737-741.
- [7] 李希勇, 张修峰. 典型深部重大冲击地压事故原因分析及防治对策[J]. 煤炭科学技术, 2003, 31(2): 15-17.
- LI Xi-yong, ZHANG Xiu-feng. Accident cause analysis and prevention measures of typical deep mine heavy pressure bump[J]. Coal Science and Technology, 2003, 31(2): 15-17.
- [8] 王慧明. 三河尖煤矿冲击矿压的特点及治理[J]. 矿山压力与顶板管理, 2004, 20(3): 115-117.
- WANG Hui-ming. The characteristics and prevention of rock burst in Sanhejian coal mine[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2004, 20(3): 115-117.
- [9] 窦林名, 何学秋, 王恩元, 等. 冲击矿压与震动的机理及预报研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 1999, 15(增 1): 199-203.
- DOU Ling-ming, HE Xue-qiu, WANG En-yuan, et al. The mechanism of rock burst and seismic waves and its prevention[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1999, 15(Suppl): 199-203.
- [10] 高明仕, 窦林名, 张 农, 等. 冲击矿压巷道围岩控制的强弱强力学模型及其应用分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 359-364.
- GAO Ming-shi, DOU Lin-ming, ZHANG Nong, et al. Strong-soft-strong mechanical model for controlling roadway surrounding rock subjected to rock burst and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 359-364.
- [11] 牛滨华. 地震波传播理论与应用: 半空间介质与地震波传播[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [12] 赵阳升. 岩体动力破坏的最小能量原理[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1781-1783.
- ZHAO Yang-sheng, FENG Zeng-chao, WAN Zhi-jun. Least energy principle of dynamical failure of rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1781-1783.
- [13] 马晓青. 冲击动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1992.
- [14] 孙振武, 代 进, 杨春苗, 等. 矿山井巷和采场冲击地压危险性的弹性能判据[J]. 煤炭学报, 2007, 32(8): 794-798.
- SUN Zhen-wu, DAI Jin, YANG Chun-miao, et al. Elastic energy criterion of rock burst in road way and coal face of mine[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(8): 794-798.

(责任编辑 王继红)