

文章编号: 0253-9993(2005)06-0690-05

冲击矿压的强度弱化减冲理论及其应用

窦林名, 陆莱平, 牟宗龙, 秦玉红, 姚精明

(中国矿业大学 能源与安全工程学院, 教育部矿山开采与安全重点实验室 江苏 徐州 221008)

摘要: 提出冲击矿压的强度弱化减冲理论, 即采取松散煤岩体, 降低强度和冲击倾向性, 使得应力高峰区向岩体深部转移, 并降低应力集中程度, 使发生冲击矿压的强度降低, 使得煤岩体中所积聚的弹性应变能达不到最小冲击能, 从而防治冲击矿压的发生。强度弱化减冲理论在三河尖矿的生产实践中得到了有效的验证。

关键词: 冲击矿压; 强度弱化减冲理论; 减冲解危; 危险降低

中图分类号: TD324 **文献标识码:** A

Intensity weakening theory for rockburst and its application

DOU Lin-ming LU Cai-ping MOU Zong-long QIN Yu-hong YAO Jing-ming

(School of Energy and Safety Engineering, Key Laboratory of Mining and Safety, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008 China)

Abstract Put forward the intensity weakening theory for rockburst, it is the strength and rockburst liability of the coal rock body reduced to weaken the danger of rockburst by the loosening coal rock body. The peak district of the stress move to the deep department of rock body and the concentration degree of the stress. The intensity of rockburst is reduced after taking the measures of weakening rockburst in dangerous district of rockburst. The rockburst is eliminated when making the elastic energy below the standard with prevention methods. The intensity weakening theory for rockburst was got effective result in production practice of Sanhejian Mine.

Key words rockburst; the intensity weakening theory for rockburst; weaken rockburst and reduced danger; danger reduction

冲击矿压是一种较为典型的矿山灾害动力现象, 主要表现为煤岩体中所积聚的弹性应变能突然、剧烈的释放过程, 其发生的突然性和剧烈的破坏特征对矿山安全构成很大的威胁。特别是随着煤矿开采深度以 10 m/a 的速度增加, 冲击矿压问题越来越突出^[1]。我国的徐州、大同、抚顺等矿务局都面临冲击矿压的威胁问题。冲击矿压是矿山压力的动力现象, 其发生的机理十分复杂。各国学者在对冲击矿压现场调查及实验室研究的基础上, 从不同角度相继提出了一系列的重要理论, 如强度理论、刚度理论、能量理论、冲击倾向理论、三准则理论和变形系统失稳理论、弹塑性脆性流变理论等^[2]。

从实质上讲, 冲击矿压的发生必须要满足强度条件 (煤岩体上所受的应力要超过煤岩体的强度, 煤岩体才会发生破坏)、能量条件 (煤岩体中要不断聚集能量, 并且能够突然释放)、煤岩体具有冲击倾向性 (具有发生脆性破坏的能力) 等 3 个条件^[3]。这里, 前一个条件是必要条件, 后两个是充分条件, 即

收稿日期: 2005-04-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50474068 50490273 50074030); 教育部博士点基金资助项目 (20030290017)

作者简介: 窦林名 (1963-), 男, 青海平安人, 博士, 教授, 博士生导师. E-mail: hdou@cumt.edu.cn

煤岩体所受的应力没有超过煤岩体的强度，煤岩体就不会发生破坏，就不会出现冲击矿压现象；煤岩体中虽然能够聚集能量，但耗散的速度大于聚集的速度，就不会突然释放，也不会发生冲击矿压；而煤岩体没有突然破坏的能力，也就不会发生冲击矿压现象。本文根据上述冲击矿压发生的原因，率先提出冲击矿压的强度弱化减冲理论，并进行相应的工程实践，从而为冲击矿压的有效防治提供理论依据和实践经验。

1 冲击矿压的强度弱化减冲理论

冲击矿压的强度弱化减冲理论具有 3 个方面的含义：① 在冲击危险区域，采取松散煤岩体的方式，降低煤岩体的强度和冲击倾向性，使得冲击危险性降低；② 对煤岩体的强度进行弱化后，使得应力高峰区向岩体深部转移，并降低应力集中程度；③ 采取一定的减冲解危措施后，使得发生冲击矿压时，冲击的强度降低。工作面两巷周围的煤岩体内存在有固定支承压力，并且随着时间的推移，煤岩体要产生变形，缓慢释放能量。而工作面前方煤岩体内存在移动支承压力，而且随着工作面的推进，移动支承压力向前推移。在工作面推进过程中，煤岩体破碎，向外释放能量。

一般情况下，煤岩体内聚集的能量由弹性变形能、顶板运动时产生的动能、矿震发生时传播出来的地震能、热能等组成。假设：① 煤岩体中初始积聚和耗散的弹性应变能之差为 U_0 ；② 极限弹性应变能为 U_{kmin} （发生冲击时煤岩体中所积聚的最小弹性应变能）；③ 任意时刻煤岩体内弹性应变能的增量（聚集的弹性应变能能量与耗散的能量之差），即 $U_t = U_t(\sigma, \epsilon, T) = U_s - U_p$ ；④ 实施卸压爆破一次释放的能量为 U_e （ U_e 与炸药装药量的多少有关，装药量一定时， U_e 为一定值）。在工作面回采或巷道掘进过程中，任意时刻煤岩体内弹性应变能的增量 U_t 是一个随时间不断变化的变量，其中 σ, ϵ, T 为控制变量。弹性应变能增量 U_t 的变化可能会出现如下的 3 种可能性：① 当 $\partial U_t / \partial t < 0$ 说明煤岩体内聚集的弹性能多于耗散的弹性能，弹性应变能增量 U_t 随时间增加；② 当 $\partial U_t / \partial t = 0$ 说明煤岩体内聚集多少弹性能，就耗散多少弹性能，能量的聚集与耗散处于平衡状态；③ 当 $\partial U_t / \partial t > 0$ 说明煤岩体内耗散的弹性能多于聚集的弹性能，弹性应变能增量 U_t 随时间不断降低。

因此，工作面前方或巷道周围煤岩体内弹性能的变化可由如下模型来表示，如图 1 所示，已知

$$\frac{\partial U_t}{\partial t} = U'_t(\sigma) \frac{d\sigma}{dt} + U'_t(\epsilon) \frac{d\epsilon}{dt} + U'_t(T) \frac{dT}{dt}$$

为便于研究，假设 $dT/dt = 0$ （不考虑温度对冲击的影响）， $\sigma - \epsilon$ 服从广义虎克定律（考虑弹性应变能），则

$$\partial U_t / \partial t = A U'_t(\sigma) d\sigma$$

式中， A 为与煤体弹性常数有关的参数，该参数能综合反映煤体的弹性特征。

当 $\partial U_t / \partial t > 0$ 时，说明煤岩体内所聚集的能量大于耗散的能量，能量不断增加。但只要 $U_t < U_{kmin}$ ，都不会出现冲击危险。 $U_t - U_{kmin}$ 越小，冲击的危险性就越大。当 $U_{kmin} = U_t$ 时，再有小的能量增加，就会发生冲击矿压。在这种情况下，就可以采用卸压爆破的手段，来释放弹性能，减小 U_s ，使得 $U_t < U_{kmin}$ ，即 $U_t - U_e < U_{kmin}$ 。如果 $U \geq U_{kmin}$ ，而且不及时采取卸压爆破等方法来释放弹性能，则在工作面回采或掘进过程中，其能量进一步增加，就会发生冲击矿压。当 $\partial U_t / \partial t < 0$ 时，说明煤岩体内耗散的弹性能大于聚集的弹性能，弹性能逐渐释放，能量不断减少， $U_t - U_{kmin}$ 越来越大，冲击的危险性也就越来越小，这种情况下，不采用任何卸压释放能量的措施，也不会出现冲击危险。

因此，随着回采工作面的推进（巷道的掘进），在回采工作面（掘进巷道）周围煤岩体中，存在着能量的积聚、转移、释放的过程。而冲击矿压的防治则可以采用边回采（掘进）、边监测、边治理的强度弱化减冲技术，即“工作面回采（掘进）→冲击危险监测→能量积聚→卸压爆破→能量释放→生产→再监测→...”。这就是冲击矿压的强度弱化减冲理论实现的过程。

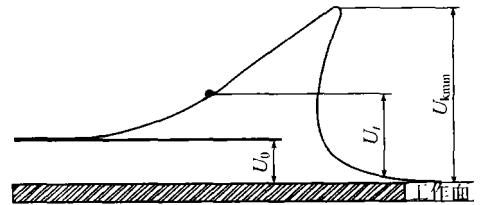


图 1 工作面前方弹性能的变化

Fig. 1 The elasticity energy change in the front of working face

1.1 矿震的作用分析

矿震是矿山开采中发生的动力现象，是在煤岩介质中，由于采掘活动引起的高应力集中，聚集大量的弹性能，造成采掘空间周围岩体破裂和突然卸压。这种情况下，这些能量以震动、地震波的形式释放出来^[1-4]，并向外传播。研究表明，煤岩体内矿震产生的能量到达巷道或工作面时，由于部分能量的损失，其剩余能量^[1-4,5]为 $U_f = U_w e^{-\lambda l}$ ；其中 U_w 为震动中心的震动能量； l 为震动中心距工作面的距离； λ 为能量的衰减系数，它与巷道和工作面类型、震中释放能量的大小有关^[5]。震中释放的能量越大， λ 也越大。

图 2 为传播到巷道和工作面的能量与震中释放能量、传播距离之间的关系 (M_L 为里氏震级)。由此可知，震动中心释放的震动能量 U_w 越大，传播到巷道或工作面的能量 U_f 也就越大；震动中心的位置距巷道或工作面越近，传播到巷道或工作面的能量 U_f 也越大。

从以上分析可知，在产生矿山震动的情况下，当地震波传播到工作面前方（巷道周围）时，其能量突然增加了 U_f ，这时的总能量为 $U_i + U_f$ ，有可能超过发生冲击矿压的最小能量，即 $U_i + U_f - U_{kmin} > 0$ 从而发生冲击矿压。但是，如果 $U_i + U_f - U_{kmin} < 0$ 再大的矿震也不会引发冲击矿压，这就是为什么并不是每次矿震都能产生冲击矿压的原因。

1.2 顶板运动的作用分析

如果煤层上方的顶板是坚硬岩层，在其来压时，顶板断裂、下沉是非常剧烈的，工作面及其周围巷道的矿压显现是非常明显的。图 3 为某坚硬顶板工作面顶板断裂来压前 24 h 的顶板下沉速度的变化情况。从图中可以看出，在坚硬顶板条件下，顶板运动速度是非常快的，其动能是非常大的。

如果顶板来压时，顶板加速运动，其运动的加速度为 d^2u_1/dt^2 。这时因顶板运动而释放的能量为

$$U_d = \frac{1}{2} m_1 \left(\frac{du_1}{dt} \right)^2$$

在坚硬顶板来压运动的情况下，工作面前方（巷道周围）的能量突然增加了 U_d ，这时的总能量为 $U_i + U_d$ ，有可能超过发生冲击矿压的最小能量，即 $U_i + U_d - U_{kmin} > 0$ 从而发生冲击矿压，这就是为什么坚硬顶板来压时容易产生冲击矿压的原因。但是，如果 $U_i + U_d - U_{kmin} < 0$ 就不会引发冲击矿压。

1.3 卸压爆破的作用分析

卸压爆破是对已形成冲击危险的煤体，用爆破方法减缓其应力集中程度的一种解危措施。卸压爆破的作用有两种：① 同时局部解除冲击矿压发生的强度条件和能量条件。即在有冲击矿压危险的工作面卸压和在近煤壁一定宽度的条带内破坏煤的结构，改变煤层的物理力学特性，加长煤体破坏峰后的长度，降低峰后曲线的斜率，使它不能积聚弹性能或达不到威胁安全的程度。这样在工作面前方形成一条卸压保护带，隔绝了工作空间与处于煤层深处的高应力区，并且提高了发生冲击矿压的最小能量水平。② 监测到有冲击危险的情况下，利用较多药量进行爆破，释放大量的爆破能量 U_e 。人为地诱发冲击矿压，使冲击矿压发生在一定的时间和地点，从而避免更大的损害。这种爆破一般采用大药量、集中装药和同时引爆的方法，以便使煤岩体强烈震动，诱发冲击矿压，或造成煤体强烈卸压、释放能量，把高应力带移向煤体深处，集中爆破的药量越多，诱发冲击矿压的可能性越大，因为这样在煤体中造成的动应力就大，动应力叠

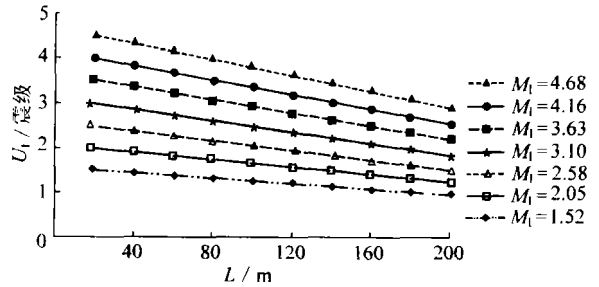


图 2 U_f 与 M_L 、传播距离 L 的关系

Fig. 2 Relationship between U_f and M_L , distance L

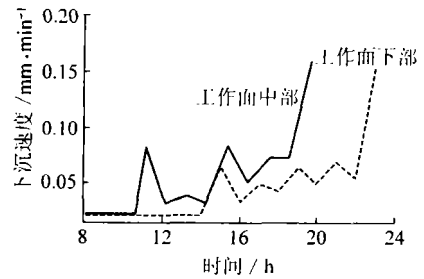


图 3 某工作面初次来压期间顶板速度曲线

Fig. 3 Curves of subsidence rate during the first pressure in working face

加在原来存于煤体中的静应力上的总和越大，超过临界应力值的机会就愈多，就会诱发冲击矿压。

因此，可以说卸压爆破的作用是改变煤岩体从物理学性质、诱发冲击矿压，并且使高应力区向煤岩体的深部转移。即在爆破的瞬间释放炸药的爆炸能 U_e ，使得 $U_t + U_e > U_{kmin}$ ，诱发冲击矿压；并且炸药爆破后，释放爆炸能 U_e ，使得 $U_t - U_e < U_{kmin}$ ，从而达到释放能量、卸压和防治冲击矿压发生的目的。

1.4 能量聚集程度的监测

研究表明^[6 7]：煤岩体等材料在载荷作用下，内部将产生塑性变形或裂纹，当裂纹形成和扩展时，将瞬态释放应变能而产生弹性波的现象。伴随着这种现象，将会有声发射产生。

同样当煤岩体等材料受载变形破裂时，将会产生向外以电磁能的形式释放弹性能的现象。伴随着这种现象，将会有电磁辐射产生，电磁辐射主要有两种形式：①当岩体受载应力越大时，电磁辐射强度就越大；②当岩体变形破裂过程越强烈，电磁辐射信号越强，电磁辐射的脉冲数就越大^[6 8 9]。

煤岩体的变形破坏程度可采用岩石的损伤因子来描述^[10]。岩石的损伤因子 $D(t)$ 的增长过程与声发射和电磁辐射的能量释放紧密相关。一般情况下，煤岩体在受载条件下，变形破坏时能量的变化 ΔU 可由 $\Delta U = \sigma \Delta \epsilon = \sigma (\epsilon_2 - \epsilon_1)$ 确定。设破坏程度的损坏因子与变形呈线性关系 $\epsilon = C_1 D - C_0$ ，则 $\Delta U = \sigma [(C_1 D_2 - C_0) - (C_1 D_1 - C_0)]$ ，由此得 ΔU 与损伤因子的增量 $D(t) = D(t_2) - D(t_1)$ 成正比，即 $D(t) \propto U \propto u(t) \propto \epsilon$ 。如果 σ 为常数，且 $D \propto \epsilon$ ，则在弹脆性场中出现破坏时，破坏速率表现在瞬间能量 $u(t)$ 的释放中。煤岩体的破坏情况可通过瞬间能量的释放表现出来，即产生声发射和电磁辐射。因此，可采用声发射和电磁辐射技术来预测煤岩体中聚集的能量大小。

2 高冲击危险区强度弱化减冲理论的实践

徐州矿务集团三河尖煤矿主采煤层为 7 煤和 9 煤，间距约 30 m，开采深度达 750 m 以下，冲击矿压的危险性越来越大，其中 9202 工作面为高冲击危险区域，其开采深度达 -850 m，上覆有 7 煤 7202 工作面残留的煤柱，应力集中程度相当严重。9202 工作面煤层厚度平均 2.2 m，工作面倾角平均 22°，工作面倾斜长度 150 m，走向长度 750 m。煤层直接顶为粉砂岩，厚 1.2 m，硬度为 4~6；老顶为中砂岩，厚 9.3 m，硬度 8~10；底板为粉细砂岩，厚 8.9 m，硬度系数 6~10。在 9202 工作面掘进回采过程中，随时都有可能发生冲击矿压。为了降低冲击危险，采取冲击矿压的强度弱化减冲原理，取得较好的防治效果。

(1) 冲击矿压的强度弱化减冲方案 针对 9202 工作面存在的危险区域，利用 KBD5 电磁辐射监测仪进行监测，确保煤体变形所释放的弹性应变能达不到发生冲击的能量。如果监测到电磁辐射幅值接近临界值时，说明煤体释放的能量增加，有可能达到发生冲击的能量，这时可以利用卸压爆破进行弹性能的释放，从而降低冲击矿压发生的危险，不影响掘进的进度，从而实现冲击矿压的强度弱化减冲的目的。

(2) 卸压爆破弱化冲击危险 如图 4 所示。当掘进工作面进入 7202 煤柱区后，于 10 月 20 日早班掘进工作面上帮测点出现电磁辐射剧烈波动，最大值接近 130 mV，经过当班卸压爆破以后，其幅值下降到 20 mV 左右；10 月 22 日早班掘进工作面下帮测点呈现整体大幅度的波动，此时，极有可能发生冲击危

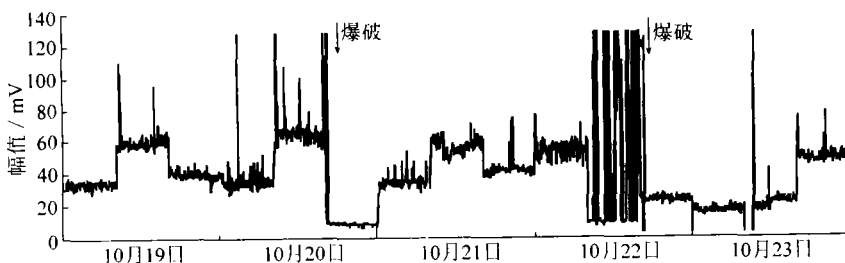


图 4 材料道进入 7202 煤柱区卸压爆破前、后电磁辐射幅值变化

Fig. 4 Change of EME amplitude in the 7202 pillar named and before and after relieving shot

险, 当班实施了卸压爆破, 幅值下降到 20 mV 左右, 说明卸压爆破起到较好的卸压效果, 降低了冲击危险性。

由图 5 可知, 当观测到电磁辐射有较大幅度的上升以后, 采用卸压爆破的方式, 释放聚集在煤体前方高应力区之内的弹性能, 使其处于发生冲击矿压所需的最小能量以下。

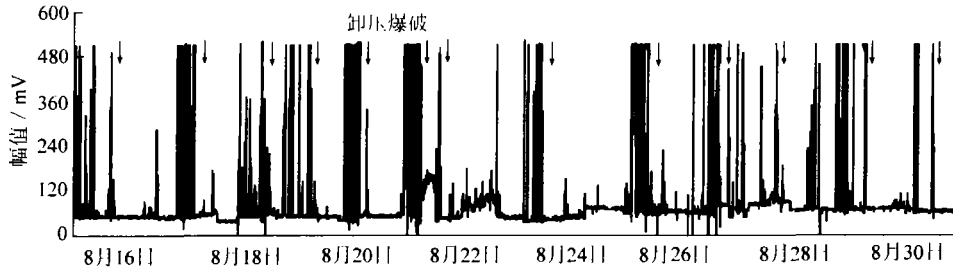


图 5 9202工作面上出口向下 15 m 处卸压爆破前、后电磁辐射幅值变化

Fig 5 Change of amplitude of EME downward 15 m of the working face exit and before and after relieving shot

从以上分析看出, 每当电磁辐射幅值接近临界值时, 即煤体所释放的能量接近灾变极限能量时, 就会存在冲击危险。通过卸压爆破释放能量以后, 电磁辐射幅值均能回落到临界值以下, 说明煤体中所积聚的弹性能得到很大程度的释放。利用电磁辐射监测煤体所聚集和释放的能量、卸压爆破进行弹性能的释放, 从而达到了控制冲击矿压的目的, 说明了强度弱化减冲理论的实施取得了很好的效果。

3 结 论

一定应力状态的煤体具有一定的极限冲击能, 如果煤体中所积聚的能量超过极限弹性能, 则部分释放、转移。释放与转移的能量将造成煤体的塑性变形、破裂甚至诱发冲击矿压。冲击矿压的强度弱化减冲理论, 就是在强冲击危险区域, 采取松散煤岩体的方式, 降低煤岩体的强度和冲击倾向性, 使冲击危险性降低; 其次是对煤岩体的强度进行弱化后, 使得应力高峰期向岩体深部转移, 并降低应力集中程度; 最后采取减冲解危措施后, 降低发生冲击矿压的强度。工作面周围煤岩体中的能量存在积聚、转移、释放的过程。而冲击矿压的防治则可以采用边回采(掘进)、边监测、边治理的动态防治技术, 即“工作面生产→冲击危险监测→能量积聚→卸压爆破→能量释放→生产→再监测→……”。当煤岩体中所积聚的弹性应变能接近极限值时, 有可能造成能量的突然释放, 发生冲击矿压。积聚和释放能量的大小可通过电磁辐射来监测, 当接近最小冲击能时, 利用卸压爆破释放煤体中所积聚的大量弹性能, 可达到降低冲击危险的目的。三河尖矿 9202工作面在生产过程中, 采用了冲击矿压的强度弱化减冲理论, 取得了很好的效果。

参考文献:

- [1] 龚林名, 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] 陈炎光, 钱鸣高. 中国煤矿采场围岩控制 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994.
- [3] 钱鸣高, 刘昕成. 矿山压力及其控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [4] Konopko W. Doswiadczalne podstawy kwalifikowania w robisk gorniczych w kopalniach wegla kamiennego do stopni zagrozenia upaniami. Katowice [J]. Prace Naukowe w GIG, 1994, 795: 81~93.
- [5] Dubinski J, Konopko W. Tapnia - ocena prognoza zwalczanie [M]. Katowice: Główny Instytut Gornictwa, 2000.
- [6] 龚林名, 何学秋. 采矿地球物理学 [M]. 北京: 中国科学文化出版社, 2002.
- [7] 华安增. 地下工程周围岩体能量分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1054~1059.
- [8] 龚林名, 何学秋. 由煤岩变化破坏引起的电磁辐射 [J]. 清华大学学报, 2001, 41(12): 86~88.
- [9] 何学秋, 刘明举. 含瓦斯煤岩破坏电磁动力学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995.
- [10] 谢和平. 岩石混凝土损伤力学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.