

DOI: 10.11779/CJGE201511015

特厚煤层冲击地压重复发生的机理研究

杨伟利¹, 姜福兴¹, 杨 鹏^{2,1}, 朱权洁, 魏全德¹, 王存文¹

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 北京联合大学北京市信息服务工程重点实验室, 北京 100101)

摘 要: 以现场同一区域重复发生冲击地压为工程背景, 通过理论分析、现场监测、数值模拟等方法研究冲击地压重复发生机理, 得出如下结论: ①特厚煤层重复冲击区域存在应力恢复现象, 而力源作用下的特厚煤层的扩容是导致应力恢复的主要原因; ②重复冲击是冲击体受到的冲击力与阻抗力多次博弈的结果, 煤体由完整状态向碎裂状态过渡过程中满足冲击力大于阻抗力的条件而发生多次冲击, 直至煤体进入碎裂状态; ③通过消除力源、阻止应力恢复可防止冲击地压重复发生。研究结果对防治特厚煤层冲击地压具有重要意义。

关键词: 特厚煤层; 冲击地压; 重复冲击; 应力恢复; 力源

中图分类号: TU435; TD35 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)11-2045-06

作者简介: 杨伟利(1979-), 男, 河北石家庄人, 博士研究生, 主要从事矿山压力及岩层控制方面的研究工作。E-mail: Ywli20070101@sina.com。

Mechanism of repeated rock bursts in extra-thick coal seam

YANG Wei-li¹, JIANG Fu-xing¹, YANG Peng^{2,1}, ZHU Quan-jie¹, WEI Quan-de¹, WANG Cun-wen¹

(1. Civil & Environmental Engineering School, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing Key

Laboratory of Information Service Engineering, Beijing Union University, Beijing 100101, China)

Abstract: Taking the rock burst recurring in the same region as the engineering background, the mechanism of the repeated rock bursts is explored by using the methods of theoretical analysis, field monitoring and numerical simulation. The results are as follows: (1) The region with repeated rock bursts in extra-thick coal seam has stress restoration phenomenon, and the extra-thick coal seam expands under source of force is the major reason which leads to stress restoration; (2) The repeated impact is the result of competition of many times between the impact force and the impedance force of the impacted body, and rock burst occurs many times during coal body transfers from relatively complete state to fracturing state when the impact force is greater than impedance force, till the coal body fractures completely. (3) Eliminating the force and stopping stress restoration can prevent the recurrence of rock burst. The results of this study may provide a useful reference for the prevention and control of rock bursts in extra-thick coal seam.

Key words: extra-thick coal seam; rock burst; repeated impact; stress restoration; source of force

0 引 言

近年来, 煤矿冲击地压频繁发生^[1-2], 并呈现一些新的特点, 特厚煤层重复冲击是其一。重复冲击主要表现在 3 个方面: ①巷道掘进期间重复冲击; ②回采期间重复冲击; ③掘进和回采期间同一区域均发生冲击。从发生位置来看, 巷道两帮及底板都可能发生重复冲击。与传统意义上的冲击地压相比, 同一区域重复冲击造成的灾害更加严重。目前, 国内外学者针对冲击地压发生机理做了大量研究, 获得了许多有益的认识, 如谭云亮^[3]认为构造应力场制约着冲击地压的发生; 李玉生^[4]认为冲击地压发生必须满足强度、能量、冲击倾向性 3 个条件; 窦林名等^[5]认为冲击地压

是煤岩体应力超过其强度极限后聚集在巷道周围煤岩体中的能量突然释放; 齐庆新等^[6]提出了冲击地压发生的黏滑失稳机理, 认为冲击地压发生过程就是煤岩地层在力的作用下瞬间滑动过程, 潘一山等^[7]认为冲击地压的发生是失稳后煤体结构弹性区释放其贮存弹性能的结果。这些研究成果为特厚煤层冲击地压防治提供了基础, 但未对冲击地压重复发生机理进行探讨。

课题组经现场勘查, 发现: ①重复冲击区域煤体存在应力恢复现象; ②发生重复冲击的煤层厚度较大;

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2010CB226803); 国家自然科学基金项目(51274022, 51174016)
收稿日期: 2014-09-08

③当煤体处于相对完整、裂隙状态时发生重复冲击，当进入碎裂状态后不再冲击。本文基于上述认识，采用理论分析、现场监测、数值模拟等方法研究冲击地压重复发生机理，以期对冲击地压的防治提供依据。

1 重复冲击现象

1.1 案例 1

辽宁某矿一工作面掘进和回采期间有 3 个区域重复发生冲击，如图 1 所示。区域 1 共发生 4 次冲击，其中 1 次发生在掘进期间，使得 12 m 巷道底板出现轻微底鼓，帮部无变化，其余 3 次发生在回采期间，分别造成巷道底板和帮部破坏 65 m (左 1)，57 m (左 2)、35 m (左 3)。区域 2 在回采期间发生 2 次冲击，分别破坏巷道帮部 40 m (左 1)、15 m (左 2)。区域 3 共发生 5 次冲击，其中 1 次发生在掘进期间，196 m 巷道底板受到不同程度破坏；其余 4 次发生在回采期间，2 次造成巷道底板、帮部破坏，分别为 55 m (左 1)、43 m (左 3)；另 2 次造成巷道底板破坏，分别为 15 m (左 2)，20 m (左 4)。据现场观测，煤体处于相对完整、裂隙状态时重复冲击，当进入碎裂状态后不再冲击 (图 2)，另外，监测结果表明重复冲击区域煤体存在应力恢复现象。该工作面沿顶板布置巷道，采高 3.7 m，煤层均厚 30 m，煤体具有强冲击倾向性；工作面埋深 890~925 m；煤层顶、底板为泥质粉砂岩和砂岩，厚度 57~81 m。重复冲击区域 1、2 到 3318 采空区的垂直距离为 25 m；重复冲击区域 3 受工作面上方 69 m 处外侧的 3227 采空区影响。

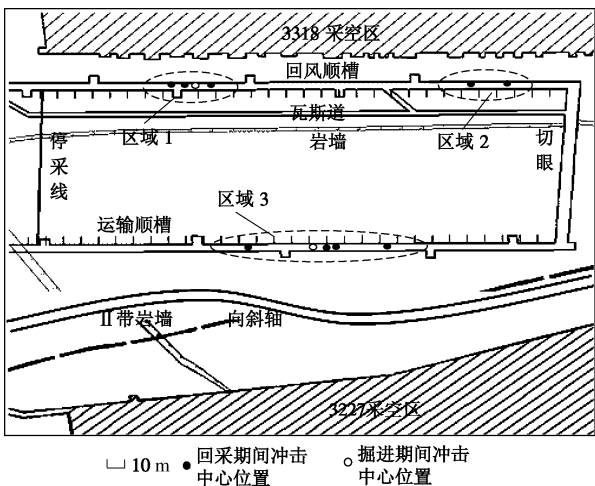


图 1 案例 1 工作面平面图及重复冲击区域
Fig. 1 Plan of working face and regions with repeated rock bursts in case 1

1.2 案例 2

黑龙江某矿一工作面掘进及回采期间有 3 个区域

重复发生冲击，如图 3 所示。区域 1 共发生 3 次冲击，其中掘进期间发生 2 次，分别造成巷道底板、帮部破坏 65 m (左 1)、57 m (左 2)；回采期间发生 1 次，造成巷道底板、帮部破坏 50 m。区域 2 在回采期间发生 2 次冲击，分别造成巷道底板、帮部破坏 72 m (左 1)，45 m (左 2)。区域 3 共发生 2 次冲击，1 次发生在掘进期间，破坏巷道底板、帮部 65 m，1 次发生在回采期间，破坏巷道底板、帮部 49 m。上述冲击与案例 1 中工作面重复冲击相似，当煤体处于相对完整、裂隙状态时重复冲击，但是彻底进入碎裂状态后不再冲击，并且经现场监测，重复冲击区域煤体也存在应力恢复现象。该工作面沿顶板布置巷道，平均采高 4 m，煤层均厚 11.2 m，煤体具有冲击倾向性；工作面埋深 482~583 m；工作面顶板依次为 5.2 m 凝灰质粉砂岩、12~55 m 的中粗砂岩，底板为依次 4.9 m 凝灰岩、3.6 m 细砂岩、5.8 m 中砂岩；工作面上方 9 层煤柱与工作面垂直间距 213~218 m；区域 1、2、3 到同层煤采空区距离分别为 27，24，14 m。

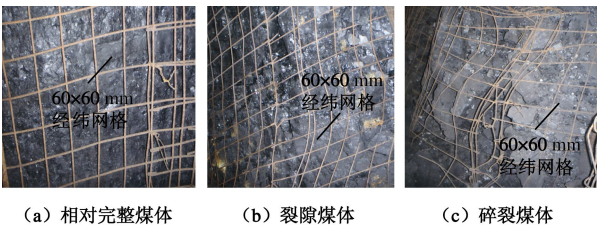


图 2 3 种状态的煤体照片
Fig. 2 Photos of three states of coal body

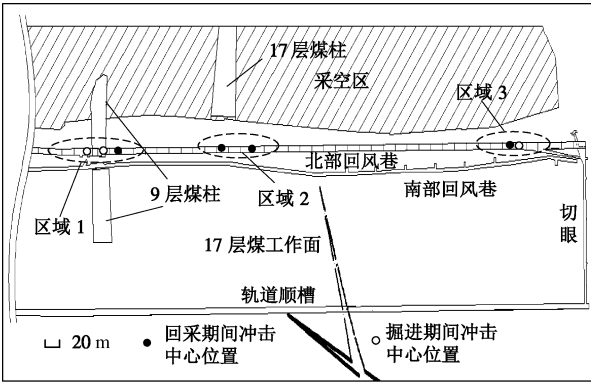


图 3 案例 2 工作面平面图及重复冲击区域
Fig. 3 Plan of working face and regions with repeated rock bursts in case 2

通过分析上述工作面采矿地质条件和重复冲击现象，得出如下认识：①上述工作面回采煤层都为特厚煤层；②重复冲击区域受煤柱等因素影响，存在应力集中现象；③相对完整或裂隙煤体易发生重复冲击，碎裂煤体不冲击。

2 冲击地压重复发生机理分析

2.1 现场监测揭示的应力恢复现象

特厚煤层重复冲击区域在力源作用下存在冲击后应力恢复现象, 以案例 1 工作面重复冲击区域煤体应力恢复现象为例进行说明。案例 1 工作面回采前布置了煤体应力监测站, 测站到切眼的距离如图 4 所示, 每个测站布置两个应力测点, 深度分别为 9, 15 m。图 5 (a) 为该工作面回采期间区域 1 内距切眼 210 m 处测站浅部测点所测到的重复冲击后在力源 (受到超前影响前为煤柱高应力影响, 受到超前影响后为两者共同影响) 作用下的应力恢复曲线。从图中可以看出, 回采期间该区域共发生 3 次冲击, 每次冲击后煤体应力急剧下降, 持续一段时间后开始恢复。可见, 煤体应力恢复导致了冲击地压的重复发生。

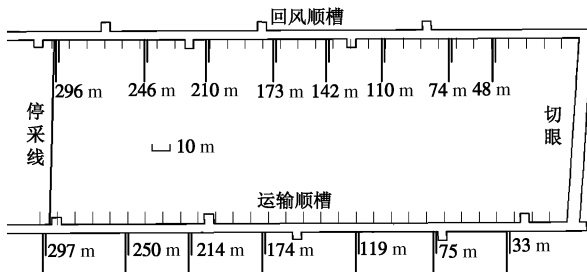
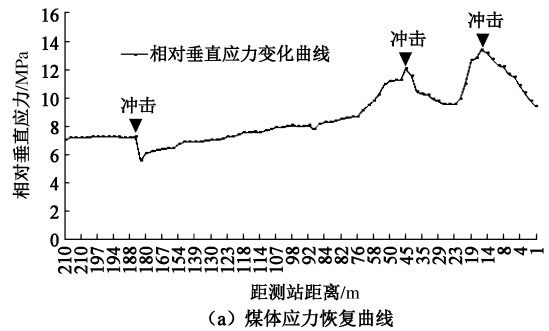


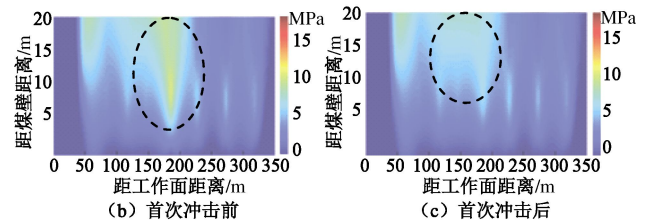
图 4 案例 1 工作面应力监测站布置

Fig. 4 Layout of stress observation stations of working face in case 1

图 5 (b) ~ (g) 为 3 次冲击前后的煤体应力云图。2013 年 7 月 8 日, 工作面距离测站 185 m 时区域 1 发生冲击 (此时受煤柱高应力影响), 冲击发生后煤体相对应力由 7.2 MPa 下降到 5.5 MPa, 据现场观测, 冲击前煤体处于相对完整状态, 冲击后煤体内产生大量裂隙; 此后随着工作面推采煤体应力逐渐恢复, 8 月 18 日, 工作面距离测站 76 m 时应力恢复加快, 8 月 27 日工作面距离测站 45 m 时煤体应力达到 12 MPa, 并于当天发生第 2 次冲击, 冲击前的煤体应力较首次冲击前高, 冲击后煤体应力下降, 此时, 煤体内部分裂隙贯通, 但仍保持完整性; 第 2 次冲击后, 煤体应力下降, 于 9 月 4 日达到 9.4 MPa, 9 月 5 日开始恢复, 在 9 月 10 日工作面距离测站 15 m 时达到峰值 13.4 MPa, 并于当天发生第 3 次冲击, 冲击发生后煤体应力一直处于下降状态, 未再发生冲击, 冲击发生前煤体应力集中程度较前两次大, 冲击发生后, 距离巷道 10 m 内煤体应力释放, 而根据现场观测, 此时煤体完全进入碎裂状态。另外, 区域 2、3 也存在煤体应力恢复现象。

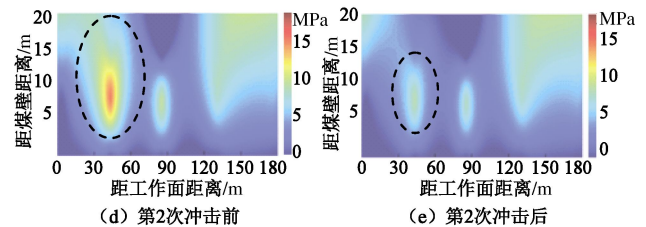


(a) 煤体应力恢复曲线



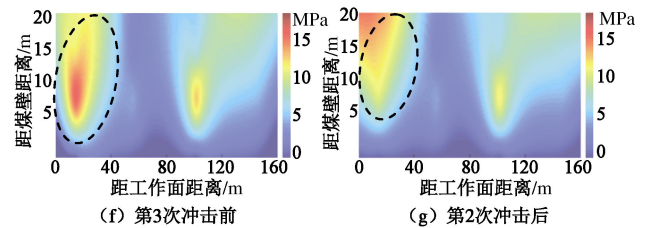
(b) 首次冲击前

(c) 首次冲击后



(d) 第 2 次冲击前

(e) 第 2 次冲击后



(f) 第 3 次冲击前

(g) 第 3 次冲击后

图 5 案例 1 工作面区域 1 煤体应力变化

Fig. 5 Stress variation of coal body in region 1 in working face in case 1

图 6 为案例 1 工作面回风顺槽距离切眼 142 m 处测站浅部测点的相对垂直应力变化曲线, 该测站所处区域未发生冲击。从图中可以看出, 随着工作面的临近, 测点垂直应力持续升高, 当测点进入塑性区后, 垂直应力急剧下降。

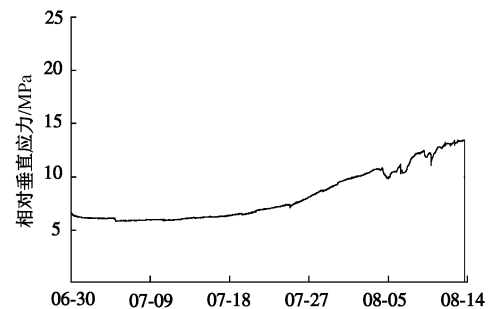


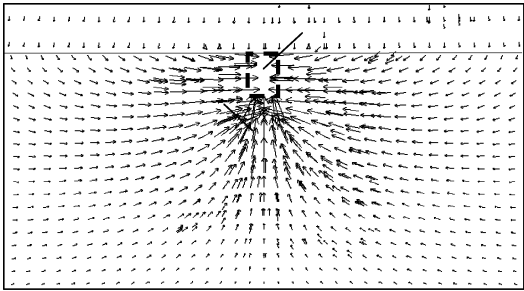
图 6 案例 1 工作面未冲击区域煤体应力变化曲线

Fig. 6 Stress variation of coal body in region without impact in working face in case 1

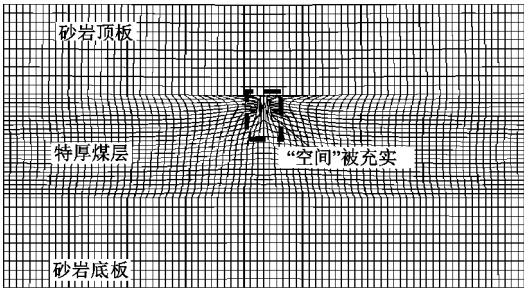
通过对比可知,重复冲击区域应力曲线与正常区域应力曲线不同,重复冲击区域应力曲线具有多个峰值和应力升高、下降过程,而正常区域应力是持续升高的,直至进入塑性状态后,应力下降,即呈现单峰特点。另外,冲击与煤体的状态相关,相对完整或裂隙煤体易重复发生冲击,而碎裂煤体不易冲击。

2.2 特厚煤层应力恢复特性分析

特厚煤层易发生应力恢复的主要原因是其具有显著的扩容特性^[11]。为用 FLAC^{3d} 数值模拟软件模拟特厚煤层的扩容特性,将煤体冲击后内部形成的若干裂隙合并成为一“空间”,而煤层扩容将造成该“空间”被充实,从而为应力恢复提供了条件。图 7 所示为数值模拟揭示的煤体扩容充实“空间”的现象。从图 7 中可以看出,除顶板岩体未参与充实空间外,“空间”两侧和下方煤体因扩容都向“空间”发生位移,从而造成“空间”被扩容煤体充实。总之,特厚煤层扩容使得冲击后煤体内裂隙闭合而重新成为力的良好承载体,因此导致了煤体的应力恢复。



(a) “空间”周围煤体位移矢量图



(b) “空间”充实后状态

图 7 数值模拟揭示的煤体扩容充实“空间”现象

Fig. 7 Phenomenon of filling space owing to coal body expansion revealed by numerical simulation

2.3 力源对应力恢复的影响

应力恢复除了需要煤层具有显著的扩容特性外,还必须满足一定的力源条件。图 8 中曲线 1、2、3 分别为煤体的轴向应力应变曲线、体积应力应变曲线和侧向应力应变曲线,从图中可以看出,煤体失去承载力之前,曲线 1、2、3 可分为 4 个阶段,即压实阶段(OA),弹性阶段(AB),微裂纹稳定发展阶段(BC),裂纹的非稳定性发展和煤体宏观破裂阶段(CD)。当

加载的轴向应力小于 σ_1 时,曲线 1、2、3 在 OC 段为直线,煤体不发生扩容,但是当煤体应力达到 σ_1 时,曲线 1、2、3 开始偏离直线,说明煤体开始进入扩容阶段,此时当煤体应力再增加时,煤体扩容加剧。可见,煤体是否扩容与其应力条件有关,若煤体应力小于扩容应力时,煤体不产生扩容,也不会发生明显应力恢复,只有当煤体应力大于扩容应力时,煤体才可能产生应力恢复。

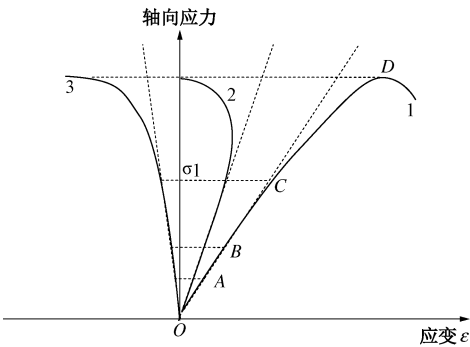


图 8 煤体应力应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of coal body

2.4 应力恢复的原因分析

对于沿顶板掘进的特厚煤层巷道,成巷后巷帮向外依次是塑性区、弹性区和原始应力区,如图 9 所示。从图中可以看出,造成应力恢复的原因有二:一是塑性区煤体在应力作用下进一步扩容;二是弹性区与塑性区交界处的煤体在高应力作用下逐层破裂,破裂煤体向塑性区内急剧扩容。可见,力源是应力恢复的主要原因,煤层厚度大是应力恢复的有利条件。

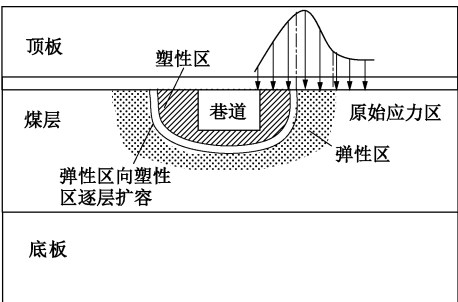


图 9 煤体应力恢复原理图

Fig. 9 Schematic diagram of stress restoration of coal body

2.5 冲击地压重复发生的机理

冲击地压发生过程具有明显动力失稳特征,其实质为作用在冲击区域煤体上的冲击力大于其受到的阻力。冲击力是使冲击体发生冲击的动力,阻力是冲击体受到的反力。冲击地压重复发生是冲击力与阻力多次博弈的结果,巷道两帮及底板都可能发生重复冲击。重复冲击区域煤体存在相对完整、裂隙、碎

裂 3 种形态。相对完整煤体为未受到冲击影响的煤体, 内部裂隙较少, 可看作一整体; 裂隙煤体为受到冲击影响的煤体, 内部出现大量裂隙, 且有部分裂隙贯通, 但仍然具有一定的完整性; 碎裂煤体为受到冲击严重影响的煤体, 内部大量裂隙贯通, 被切割成形状不一、大小不等的块状结构体, 且该结构体易被分离。下面以巷帮重复冲击为例分析 3 种状态煤体重复冲击特性与机理。

成巷后巷帮煤体垂直应力向深部转移, 当垂直应力集中到一定程度时导致突变的水平力将塑性区煤体整体瞬间推出而发生冲击。取巷帮塑性区煤体 (图 10 (a)) 建立巷帮冲击力学模型 (图 10 (b)), 图中 σ_y 为塑性区煤体上的垂直应力; P_b 为巷帮支护阻力; τ_d 和 τ_m 分别为顶板和煤体对巷帮塑性区煤体的阻力; m 为塑性区深度; $\lambda b\sigma_y$ 为塑性区煤体上的冲击力, 其中 λ 为侧压系数, b 为巷道高度; 由于巷帮冲出煤体重力相对冲击力和阻力来说很小, 可忽略。

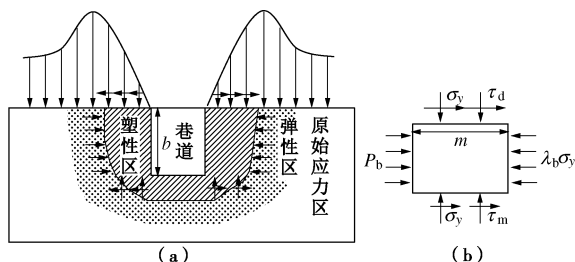


图 10 巷帮冲击力学模型

Fig. 10 Mechanical model for impact at sides of roadway

(1) 相对完整煤体冲击机理

相对完整煤体发生冲击时表现为图 10 (b) 中塑性区煤体整体瞬间冲出, 巷帮冲击力学条件为

$$P_b + \tau_d + \tau_m < \lambda b \sigma_y \quad (1)$$

式中, $P_b + \tau_d + \tau_m$ 为冲击体受到的阻力 M_1 , 其中 $\tau_d = (c_1 + \sigma_y \tan \varphi_1)m$, $\tau_m = (c_2 + \sigma_y \tan \varphi_2)m$, c_1 , φ_1 分别为煤体与顶板接触面的黏聚力和摩擦角, c_2 , φ_2 分别为煤体的黏聚力和摩擦角。

(2) 裂隙煤体冲击机理

受过冲击影响的煤体, 其脆性降低, 但仍可能具有冲击倾向^[9], 此时煤体冲击需要克服一定的阻力, 其值相对于完整煤体来说减小, 裂隙煤体阻力主要为裂隙界面的黏聚力和块体之间的滑动摩擦力, 裂隙煤体阻力 M_2 的计算公式为

$$M_2 = bK\sigma_c \quad (2)$$

式中, σ_c 为煤体单轴抗压强度 (MPa), K 为煤体的完整性系数^[10], $K = \left(\frac{V_{ml}}{V_{cl}}\right)^2$, 其中 V_{ml} 为完整煤体中弹性波纵波传播速度, V_{cl} 为不同程度裂隙煤体中弹性波

纵波传播速度。

需要说明的是, 当裂隙煤体发生冲击后, 如未进入碎裂状态, 内部裂隙仍可被煤体扩容充实, 从而承受较大的应力, 在高应力作用下仍可满足冲击力大于阻力, 进而再次发生冲击。

(3) 碎裂煤体冲击特性分析

受到多次冲击后的煤体破裂为块体, 此时阻力为结构块体之间的滑动摩擦力, 其值大大减小, 在外力作用下结构块体滑动, 从而造成冲击力及时释放, 避免应力积聚和冲击, 此时阻力 M_3 的计算公式与式 (2) 相同, 但取 K 为碎裂煤体的完整性系数。

现以案例 1 工作面为例, 分析巷帮重复冲击过程。当煤体处于相对完整状态时, 取 $P_b=525$ kN, $\sigma_y=33$ MPa, $m=7$ m, $c_1=1.2$ MPa, $\varphi_1=34^\circ$, $c_2=0.9$ MPa, $\varphi_2=30^\circ$, 代入 $M_1=P_b+\tau_d+\tau_m$, 得 $M_1=304.4$ MN; 当煤体处于裂隙状态时, 取 $K=0.7$, $\sigma_c=20$ MPa, $b=3.7$ m, 代入式 (2), 得 $M_2=51.8$ MN; 当煤体处于碎裂状态时, 取 $K=0.3$, 代入式 (2), 得 $M_3=24$ MN。根据计算结果绘制巷帮重复冲击区域巷帮煤体阻力与其完整性之间的关系曲线, 如图 11 所示。图 11 中曲线 2 为巷帮重复冲击区域煤体的应力恢复曲线。

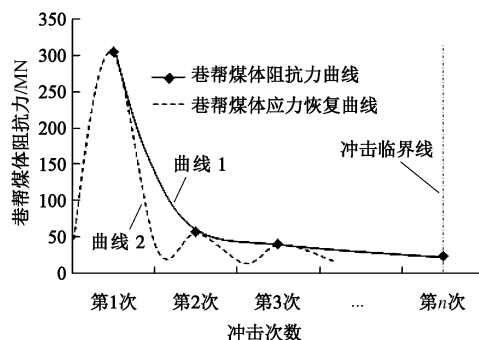


图 11 巷帮冲击地压重复发生的机理

Fig. 11 Mechanism of repeated occurrence of rock burst at sides of roadway

从图 11 中可以看出, 当应力达到冲击区域相对完整煤体的极限阻力时发生首次冲击, 冲击后煤体应力下降, 但在一定时间内逐渐恢复, 当应力恢复达到裂隙煤体的极限阻力时, 发生二次冲击, 同理可能发生三次冲击, 直至煤体彻底进入碎裂状态。底板重复冲击机理与巷帮重复冲击机理类似, 具体煤体在同一状态下是发生巷帮冲击、底板冲击还是巷帮和底板同时冲击取决于该状态下巷帮和底板各自阻力的大小。

3 重复冲击的防治措施

基于对冲击地压重复发生的机理分析可知, 力源和特厚煤层应力恢复特性是重复冲击的主要原因。因

此,可通过消除力源、减弱应力恢复来防止冲击地压重复发生。

(1) 力源消除措施

上层煤开采过程中,要不留设或留设小煤柱,以避免形成应力传递结构而对下层煤开采造成危险;同层煤开采与采空区之间隔离煤柱不要留设或留设小煤柱,以免在煤柱上形成应力集中;对于已存在的力源,如上层煤柱传递高应力,隔离煤柱高应力,要在巷道两帮卸压,使得应力峰值向深部转移,以减少对巷道的影响。

(2) 减弱煤体应力恢复措施

完整或裂隙煤体具有显著的应力恢复特性,而碎裂煤体的应力恢复特性不明显。因此,可通过弱化煤体达到减弱其应力恢复的目的。具体措施有煤层大直径钻孔、煤层注水、煤层爆破等。需要说明的是,当实施这些措施时应避免巷帮煤体被过度破坏,以免出现支护生效和巷道失稳问题。

4 结 论

以现场同一区域重复发生冲击地压为工程背景,采用理论分析、现场监测、数值模拟等方法对冲击地压重复发生机理进行了研究,得出以下3点结论。

(1) 特厚煤层重复冲击区域存在应力恢复现象,而力源作用下的特厚煤层扩容是导致应力恢复的主要原因。

(2) 重复冲击是冲击体受到的冲击力与阻力多次博弈的结果,煤体由完整状态向碎裂状态过渡过程中满足冲击力大于阻力的条件而发生多次冲击,直至煤体进入碎裂状态。

(3) 通过实施煤层大直径钻孔、煤层注水、煤层爆破等措施消除力源、减弱应力恢复可有效防止冲击地压重复发生。

参考文献:

- [1] 潘立友, 牛学良. 放顶煤开采对控制冲击地压的认识[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 14 - 16. (PAN Li-you, NIU Xue-liang. Knowledge of sub-level caving method to control underground impact pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1): 14 - 16. (in Chinese))
- [2] 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: 41 - 44. (DOU Lin-ming, ZHAO Cong-guo, YANG Si-guang, et al. Prevention and control of rock burst in coal mine[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2006: 41 - 44. (in Chinese))
- [3] 谭云亮. 门头沟井田构造应力场与冲击地压的关系[J]. 山东矿业学院学报, 1990, 9(3): 264 - 267. (TAN Yun-liang. The relation between tectonic Stress field and rock burst of Mentougou coalmine field[J]. Journal of Shandong Mining Institute, 1990, 9(3): 264 - 267. (in Chinese))
- [4] 李玉生. 冲击地压机理及其初步应用[J]. 中国矿业学院学报, 1985(3): 37 - 43. (LI Yu-sheng. Mine pressure bump mechanism and its preliminary application[J]. Journal of China College of Mining & Technology, 1985(3): 37 - 43. (in Chinese))
- [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. (DOU Lin-ming, HE Xue-qiu. Control theory and technology of pressure bump[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001. (in Chinese))
- [6] 齐庆新, 史元伟, 刘天泉. 冲击地压黏滑失稳机理的实验研究[J]. 煤炭学报, 1997, 22(2): 144 - 148. (QI Qing-xin, SHI Yuan-wei, LIU Tian-quan. Experimental study on mechanism of stick slip in rock bursts[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(2): 144 - 148. (in Chinese))
- [7] 潘一山, 章梦涛. 冲击地压失稳理论的解析分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(增刊): 504 - 510. (PAN Yi-shan, ZHANG Meng-tao. Analytical analysis of destabilization theory in rock bursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(S0): 504 - 510. (in Chinese))
- [8] 潘立友, 张文革, 杨慧珠. 冲击煤体扩容特性的实验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2005, 24(1): 18 - 20. (PAN Li-you, ZHANG Wen-ge, YANG Hui-zhu. Experimental research on volume-expanding properties of impact coal mass[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2005, 24(1): 18 - 20. (in Chinese))
- [9] 姜耀东, 赵毅鑫, 何满潮, 等. 冲击地压机理的细观实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 901 - 907. (JIANG Yao-dong, ZHAO Yi-xin, HE Man-chao, et al. Investigation on mechanism of coal mine bumps based on mesoscopic experiments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 901 - 907. (in Chinese))
- [10] FENG X T, WANG Y J, YAO J G. A neural network model on real-time prediction of roof pressure in coal mines[J]. Int J of Rock Mech Min Sci, 1996, 33(6): 647 - 653.