

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.04.027

华亭煤田冲击地压定向解危技术

李鹏波^{1,2}, 王金安^{1,3}

(1.北京科技大学 土木与环境工程学院, 100083 北京; 2.煤炭资源与安全开采国家重点实验室(中国矿业大学), 221116 江苏 徐州; 3.金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室(北京科技大学), 100083 北京)

摘 要: 针对华亭煤田各煤矿冲击地压显现时底板鼓起严重的现象,采用横向(巷道横截面)卸压和纵向(沿巷道走向)卸压相结合的方式消除冲击危险。在巷道两脚布置钻孔,水平应力在钻孔上分解后形成的静摩擦力会挤压底板使之向下运动,并通过两侧钻孔卸压爆破形成底板裂隙区来隔断底板深部传来的应力;同时在巷道中每隔一段距离设置一个破碎带,破碎带起到“弹簧体”的作用,吸收沿巷道走向方向水平应力所带来的能量。研究表明,经计算定向解危方法吸收能量(10^8 J)远大于微震系统已经测得的矿区冲击危险源产生的能量级别(10^6 J),对底板型的冲击地压现象能够起到很好的防治作用。现场实施情况良好,有效减轻了煤矿巷道底板鼓起的现象。

关键词: 冲击地压;解危技术;爆破卸压;钻孔卸压;底板卸压

中图分类号: TD324 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)04-0161-05

Rockburst orientation controlling technology for Huating coal mine

LI Pengbo^{1,2}, WANG Jinan^{1,3}

(1.School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, 100083 Beijing, China;
2.State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining(China University of Mining and Technology), 221116 Xuzhou, Jiangsu, China; 3.Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines(University of Science and Technology Beijing), Ministry of Education, 100083 Beijing, China)

Abstract: According to the serious phenomenon of floor swelling during the coal mine burst in Huating coal field, measures which the transverse pressure relief (roadway cross-section) and the longitudinal pressure relief (along the roadway) were taken to eliminate the danger of rockburst. The static friction, which is caused by the horizontal stress in the borehole of roadway floor, would squeeze the floor causing downward movement. The pressure of the floor was relieved through the fissure zone formed by the borehole blasting. A fracture zone in the tunnel was arranged at intervals, which played a role of "the spring body", to absorb the energy caused by the horizontal stress along the tunnel direction. The calculation results show that the energy absorption caused by the orientation controlling method was far greater than the energy level (10^6 J) caused by mining shock hazard tested by the microseism monitoring system. Thus the orientation controlling method can have very good effects on avoiding the floor type rockburst phenomenon. Testing in a mine field, the implementation of the measures for a mine field was good and basically eliminated the phenomenon of tunnel floor swelling.

Keywords: rockburst; controlling technology; blasting distressing; boreholes distressing; floor distressing

随着我国煤炭开采逐年向深部转移^[1-2],煤矿冲击地压灾害将越来越严重,深部煤层巷道的冲击地压防治^[3-5]则成为了亟待解决的问题。冲击地压的

防治主要分为监控、解危和支护等方面,蓝航等^[6]认为开采设计优化方法是从源头上消除应力高度集中,降低冲击地压危险的一类方法。牟宗龙等^[7]采用顶板爆破措施,破坏工作面上方坚硬厚层砂岩顶板的完整性,减弱和消除了冲击地压危险程度。齐庆新等^[8]讨论了深孔断顶爆破的作用机制,认为深孔断顶爆破改变了煤体应力峰值的大小和位置,对坚硬顶板条件下冲击危险区域起到较好的卸压作用。高明仕等^[9]提出的通过减小外界震源载荷,合理设置

收稿日期: 2014-10-27.

基金项目: 国家自然科学基金重点支持(U1361208);煤炭资源开采与环境保护国家重点实验室资助(11KF03).

作者简介: 李鹏波(1982—),男,博士研究生;
王金安(1958—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 李鹏波, 117854536@qq.com.

弱结构和提高支护强度的强弱强结构力学模型就是一种综合防护方法.学者们从不同的方面进行了冲击地压的防治研究和实践.

总体来说,在掘进和开采过程中,解危卸压保护方法可分为以下几种:1)大直径钻孔卸压是通过在巷道两帮及顶底板打 100 mm 以上钻孔,钻孔周边煤层会在应力的作用下向钻孔移动,进而会使钻孔周边煤层积聚的能量缓慢释放出来,达到解除冲击危险的目的;2)注水软化是从改变煤层顶板老顶及周围煤体的物理机械特性入手,在两巷顶部及煤体中进行高压注水,以软化煤层顶板岩体及改变煤体物理性质,从而降低煤体的强度和弹性能指数,达到缓解应力集中,转移释放压力的目的;3)煤体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,卸压爆破在煤体中产生大量裂隙,使煤体的力学性质发生变化,弹性模量减小,强度降低,破坏了冲击矿压发生的强度条件和能量条件^[10-11].以上 3 种方法是冲击地压解危卸压保护常用的做法,但是对于底板来说,因为钻孔条件的限制而很难得到系统的实施和形成合理的方案^[12-14].华亭煤田煤层埋深约在 400~500 m,近年来冲击地压显现频繁,几乎囊括了所有从事采掘活动的工作面,其中巷道底板鼓起现象尤为突出.图 1 所示为华亭煤田某巷道底板鼓起造成的巷道破坏图.



图 1 冲击地压造成的巷道破坏

针对华亭煤田水平应力远大于垂直应力(约为 1.6~1.7 倍)和底板鼓起现象严重的情况,提出了定向解危的方法,采用大直径钻孔和钻孔爆破分别形成“楔形体”的结构解危和裂隙解危,在水平应力大于垂直应力的矿区可以起到良好的解危效果.

1 定向解危

水平应力大于垂直应力的煤田,在冲击地压的显现中,水平应力占主导作用.在水平应力作用下,底板鼓起现象十分明显,而已有的解危措施多注重巷帮和顶板,对底板的重视不够,尤其是底板卸压没有形成系统的方案,在这种情况下应重点考虑底板如何卸压.

1.1 底板应力分布

为找到底板应力分布情况,采用 KSE-II-I 型钻孔应力计对底板应力进行监测.钻孔应力计如图 2(a)所示,由压力传感器和数字显示仪组成的分离型钢弦振动式测频数字仪器,压力传感器的钻孔压力枕采用充油膨胀的特殊结构.图 2(b)为钻孔应力计工作原理,在华亭煤田华亭煤矿 250104 工作面回风顺槽距回采工作面 200 m 外每隔 15 m 设置一个测点,测点埋深从 4~12 m 不等,以检测底板应力大小.

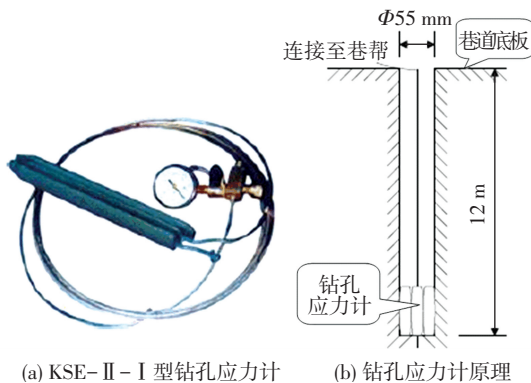


图 2 钻孔应力计测量底板应力

需要指出的是,由于应力计在钻孔完成和应力计放入之间存在一定的时间间隔,导致其测量值普遍偏小,并且随着回采工作面的推进,钻孔应力计的测量值变化较大,图 3 为钻孔应力计测得的底板水平应力曲线图,图 3 中数据点为回采工作面 200 m 外 4 个测点一周内的平均值,可以看出,在底板深度为 8~12 m 左右,底板应力值已在较低水平,可以认为此处已在原岩应力区.

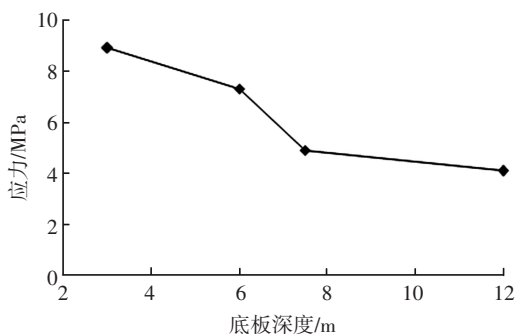


图 3 钻孔应力计测得巷道底板应力曲线

针对上述底板应力分布,考虑在巷道横截面卸压孔形成楔形体,以及在巷道纵向采用重点卸压的手段形成巷道弹簧结构,来进行底板解危卸压.

1.2 横向解危

提出在巷道两帮和底板之间打钻孔的方法,此时底板的横向解危依靠 2 个倾斜角度为 α 的钻孔与底板一起形成的“楔形体”来完成.

图 4 为巷道受力简图,巷道宽度为 a ,取底板分析深度为 b ,侧压系数为 n ,巷道两侧应力影响范围取宽度为 c 、最大应力按照华亭矿区围岩情况取为

$2\sigma_h$, 原岩应力为 σ_h . 忽略巷道底板两侧所受到的剪切应力.

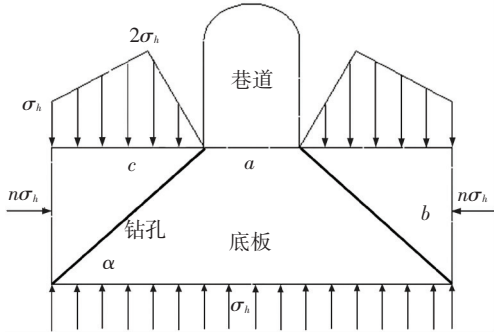


图 4 巷道受力示意

由图 4 可知, 垂直方向静力平衡, 有

$$(a + 2c)\sigma_h = 2x\sigma_h + 3\sigma_h(c - x), \quad (1)$$

式中 x 为巷道周边最大应力处, 通过塑性圈公式计算得到华亭矿区塑性圈范围约在 5.0 m, 则 x 取为 5 m, 巷道宽度为 5 m, 代入式 (1), $c = 10$ m.

取底板中间由钻孔形成的“楔形体”, 楔形体在垂直方向上受力平衡, 有:

$$F_y + f = F_h, \quad (2)$$

$$F_y = 2nb\sigma_h \sin \alpha \cos \alpha + (3c - x)\sigma_h \cos^2 \alpha. \quad (3)$$

式中: F_y 为楔形体两侧压力在垂直方向上的分量, 向下为正; f 为楔形体两侧静摩擦力在垂直方向的分量, 向下为正; F_h 为楔形体底部向上的垂直压力.

将式 (1), 式 (3) 代入式 (2) 得

$$f = (25 - 20n)\sigma_h \sin^2 \alpha. \quad (4)$$

当 $f < 0$ 时, 即 f 方向向上, 楔形体有向下运动趋势, 此时为底板较为理想的状态.

从式 (4) 可以看出, 在工程设计中可以认为摩擦力有 3 个变量, 即钻孔角度 α 、侧压力系数 n 和垂直应力 σ_h , 当 $n > 1.25$, $\alpha < 90^\circ$ 时, 可使静摩擦力方向恒为向上. 进一步分析可知, f 的方向还与塑性区大小有关, 塑性区取极限值零时, 当 $n > 1.5$, $\alpha < 90^\circ$ 时, 可使静摩擦力方向恒为向上. 已知华亭煤田实测侧压系数为 1.6~1.7 之间, 综合考虑矿区实际和施工方便, 建议钻孔角度取为 45° .

当钻孔角度为 45° 时, $f < 0$, 静摩擦力方向向上, 这表示楔形体整体运动趋势为向下运动, 巷道底板鼓起现象可以得到有效遏制. 钻孔角度为 45° 时, $b = 10$ m, 结合图 3 测得的底板应力和矿上实际情况, 建议底板两侧倾斜钻孔以 20 m 为宜, 垂直钻为 15 m.

当冲击危险性较大的时候, 可以在上述楔形体形成之后, 在巷道两侧钻孔内部实行深孔卸压爆破, 如图 5 所示. 此时会在结构底部形成爆破裂隙区, 削弱乃至截断底板深部传来的应力. 图 5 中, “楔形体”下方区域为爆破产生的裂隙区, 巷道正中可视施工难度打大直径钻孔作为爆破临空面.

此时解危爆破透射入岩体中冲击波压力为

$$P = \frac{1}{2} \frac{1}{\gamma + 1} \rho_0 D^2 K^{-2\gamma} l_e n. \quad (5)$$

式中: ρ_0 为炸药的密度, kg/m^3 ; D 为岩体中的炸药爆速, m/s ; γ 为爆轰产物绝热膨胀系数, 通常取 3; K 为装药不耦合系数; l_e 为装药轴向系数; n 为炸药爆炸产物膨胀碰撞孔壁时的压力增大系数, 一般取为 10.

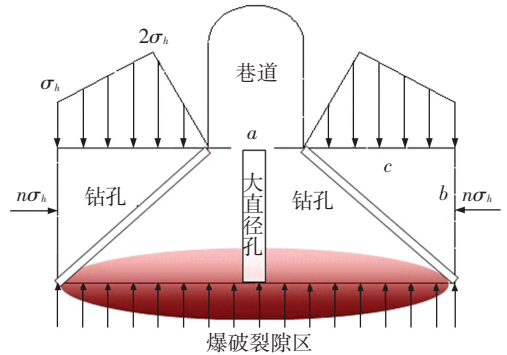


图 5 爆破卸压示意

因爆炸后应力波的传播, 使煤体内应力状态为原岩应力与应力波的叠加, 忽略爆炸的扩孔作用, 则爆炸后煤体内二维应力表示为

$$\begin{cases} \sigma_r = (r_b/r)^\beta P + \sigma_{r0}, \\ \sigma_\theta = \lambda (r_b/r)^\beta P + \sigma_{\theta0}. \end{cases} \quad (6)$$

式中: σ_r 、 σ_θ 分别为煤体内径向、切向应力, MPa ; σ_{r0} 、 $\sigma_{\theta0}$ 分别为煤体内径向和切向方向上的原岩应力, MPa ; β 为爆破荷载的衰减系数, 在爆破冲击区, 取为 3, 在爆破应力波区, 取为 $\beta = 2 - \mu_d / (1 - \mu_d)$; λ 为动侧压力系数, $\lambda = \mu_d / (1 - \mu_d)$; r 为药包半径, m ; r_b 为炮孔半径, m ; μ_d 为岩石泊松比, 一般取为 0.8.

由文献 [15] 煤体内任意一点应力为

$$\sigma_i = [\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2]^{1/2}, \quad (7)$$

将式 (6) 代入式 (7), 得到

$$\sigma_i = [2(r_b/r)^\beta P(\sigma_{r0} + \lambda \sigma_{\theta0}) + (1 + \lambda^2)(r_b/r)^{2\beta} P^2 + \sigma_{r0}^2 + \sigma_{\theta0}^2]^{1/2}. \quad (8)$$

根据 Mises 准则, 发生破坏的条件为

$$\sigma_i \geq \sigma_o = \begin{cases} \sigma_{cd}(\text{粉碎区}), \\ \sigma_{ld}(\text{裂隙区}). \end{cases}$$

式中: σ_{cd} 为围岩动态抗压强度, $\sigma_{cd} = \sigma_c \dot{\epsilon}^{\frac{1}{3}}$. 其中: σ_c 为岩石的单轴静态抗压强度, MPa ; $\dot{\epsilon}$ 为加载应变率, 工程爆破时, 岩石的加载率一般在 $10^0 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 之间.

华亭原岩应力水平应力远大于垂直应力, 以华亭矿 407 m 处实测地应力为原岩应力, 最大主应力 17.85 MPa, 垂直主应力 12.78 MPa, 最小主应力 10.68 MPa, 取炮孔径向水平应力为最大主应力, 相关数值和式 (5) 代入式 (8), 则可得到以 r 为变量的煤体应力, 即 $\sigma_i = f(r)$.

结合华亭煤田资料,泊松比 μ 为 0.38, 15 MPa 围压下抗压强度 σ_c 为 26.47 MPa,抗拉强度按照略大于围岩最大主应力,取为 18.25 MPa.炸药为二级煤矿许用乳化炸药,密度为 1.1 g/cm³,爆速 D 为 3 600 m/s,炮孔直径 r_b 为 65 mm.即可计算得到压缩区范围为 1.80 m,裂隙区范围为 16.19 m,煤矿巷道截面约为 5 m 左右,钻孔最低点距离约为 30 m,裂隙区可以贯通,可以形成应力软化的爆破裂隙区.

同时,为保证裂隙区的顺利产生,在底板中央打一大直径钻孔来作为两侧爆破的临空面,可以有效促使裂隙在整个底板中间产生,从而能够有效减弱底板深部传来的能量.

1.3 纵向解危

在巷道纵向(沿巷道走向)上存在冲击危险的位置布置多组卸压爆破孔,爆破参数由按照光面爆破贯通裂隙需求公式计算为:

$$s = \left\{ p \left[\left(1 + \frac{1}{2}k^2 + \frac{3}{2}k^4 \right) \left(\frac{\mu}{1-\mu} \right) + \frac{3}{2}k^4 - \frac{1}{2}k^2 \right] / \sigma_{ul} \right\}^{\frac{1}{\alpha}} r_b,$$
$$k = \frac{r_b}{r_b + l_p}.$$

式中 l_p 取 0.5,则巷道纵向(走向)爆破孔间距 $s = 5.09$,取为 5 m.

同时如图 6 所示,沿巷道走向上,每隔 30 m(取值为陈矿来压布距)设置一个 4 m 的破碎带,破碎带起到“弹簧体”的作用.从整个巷道来看,众多“弹簧体”串联在一起,有足够的结构和空间来吸收水平应力,从根本上解决巷道底板鼓起现象.

每个破碎带由 5 组间隔 1 m 的钻孔组成,其中: 3 组为爆破孔,孔底装药;2 组为普通钻孔,起爆破临空面的作用.可以吸收来自底板煤体的能量,同时使整个巷道形成间断性的弱结构,使沿巷道走向方向

的应力分量得到释放,对类似水平应力大于垂直应力的煤田可以起到很好的卸压保护效果.

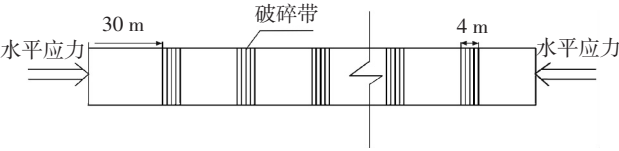


图 6 沿巷道走向卸压示意

忽略爆破裂隙和爆破扩孔对炮孔体积的影响,认为每个爆破孔爆破后周边岩石已经完全破碎,则爆破孔残留空间可以给爆破范围外岩石提供释放能量的空间即为爆破孔体积.则每个重点卸压区至少能够吸收的能量近似为

$$Q = EV = 2.0 \times 10^8 \text{ J},$$

计算的吸收能量远大于微震系统已经测得的矿区冲击危险源产生的能量级别(10^6 J),可以极大地避免冲击危险巷道的安全性.

2 现场实施

对华亭煤田陈家沟煤矿冲击危险性巷道进行解危卸压措施,采用定向解危方法.陈家沟煤矿分层厚度最大 24 m,最小 11.9 m,平均 16.8 m,煤样力学实验表明具有强冲击倾向性;直接底为砂质泥岩 1.2~3.2 m.两侧底板钻孔均已打到砂质泥岩中.

2.1 水平卸压

在两顺槽底板沿工作面推进方向每 5 m 布置 2 个底板爆破深孔和 1 个大直径钻孔,其中两侧巷帮底角各 1 个爆破孔,孔径 65 mm,孔深 20 m,封孔用速凝水泥,长度不小于 6 m,一次爆破不多于 2 个孔.底板深孔爆破钻孔布置示意图如图 7 所示,根据《爆破手册》相关数据选取炸药单耗为 0.15 kg/m³.重点卸压的孔排距为 1 m 计算,单孔装药量为 21.5 g,取为 20 kg,孔底加强装药,孔内串联,孔外并联.

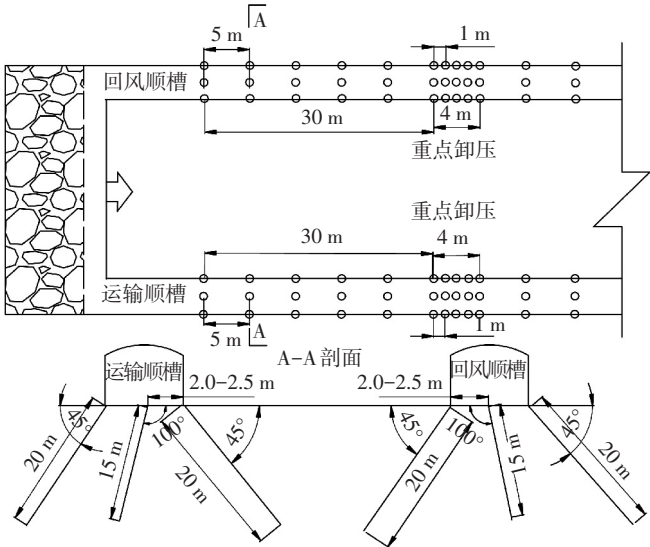


图 7 底板深孔爆破钻孔布置

2.2 重点卸压

在两顺槽底板每隔 30 m 为重点卸压区, 在水平卸压的基础上, 加密爆破孔排距至 1 m. 按照上述计算的单孔装药量 20 kg, 可以保证此段区域煤体充分预裂, 形成重点卸压区, 巷道每隔 30 m 设置一个重点卸压区, 卸压区煤体松软, 弹性模量较小, 煤体因水平应力而积聚的能量在此区域得到充分释放. 整个巷道的卸压区在水平应力条件下形成类似弹簧的机构.

2.3 实施效果

陈家沟煤矿 8 512 工作面 2013 年在两顺槽内间断实施了总长度约 400 m 的试验段, 同其他位置相比, 此段巷道底板鼓起程度明显减轻, 无需返修, 详细统计情况见表 1.

表 1 陈家沟煤矿巷道底板鼓起情况一览表			
时间	矿压显现次数	巷道底板鼓起总长度/m	底板鼓起最大值/cm
2012 年	34	368	53
2013 年	21	160	30
2014 年(上半年)	9	76	37

注: 矿压显现次数和底板鼓起总长度统计数据受人影响较大.

但是因考虑到施工难度和作业成本, 仅在两顺槽存在冲击危险的区域内实施横向解危措施, 而未在全巷道内实施纵向解危方案. 因此, 纵向解危实施效果未得到验证, 但横向解危效果较为明显, 得到矿上的肯定.

3 结 论

1) 在存在冲击地压危险的巷道中采用横向(巷道横截面)卸压和纵向(沿巷道走向)卸压相结合的方式来减弱冲击危险. 通过在巷道底板两侧钻孔来使巷道横截面上形成底板的“楔形体”, 两侧水平应力在楔形体界面上产生向上的静摩擦力, 这表示此时巷道底板有向下的运动趋势, 进而可以有效减弱底板鼓起现象.

2) 在巷道底板两侧钻孔内实行卸压爆破, 在底板内部形成联通的裂隙区, 削弱底板深部传来的应力. 在巷道中每隔一段距离设置一个破碎带, 破碎带起到“弹簧体”的作用, 吸收沿巷道走向方向水平应力所带来的能量, 从根源上来尝试减小巷道底板鼓

起现象的产生.

参考文献

[1] LINKOV A M. Rockbursts and the instability of rock masses [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1996, 33 (7) : 727 - 732.

[2] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (16) : 2803-2813.

[3] 宋振骐. 实用矿山压力控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988.

[4] 宋振骐, 蒋金泉. 煤矿岩层控制的研究重点与方向 [J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15 (2) : 128-134.

[5] 吕伟新, 刘宝, 王磊. 煤矿爆炸后巷道内温度变化规律 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45 (5) : 108-113.

[6] 蓝航, 齐庆新, 潘俊峰, 等. 我国煤矿冲击地压特点及防治技术分析 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39 (1) : 11-15.

[7] 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.

[8] 齐庆新, 雷毅, 李宏艳, 等. 深孔断顶爆破防治冲击地压的理论与实践 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (S1) : 3522-3527.

[9] 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.

[10] 潘一山, 杜广林, 张永利, 等. 煤体振动方法防治冲击地压的机理研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18 (4) : 432- 436 .

[11] 祝方才, 潘长良. 岩爆条件下的防护技术 [J]. 采矿与安全工程学报, 2003, 20 (1) : 109-111.

[12] 曹安业, 朱亮亮, 杜中雨, 等. 巷道底板冲击控制原理与解危技术研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30 (6) : 848-855.

[13] 何全洪. 冲击地压工作面顺槽底板爆破卸压技术 [J]. 煤矿开采, 2000, 39 (2) : 44-45.

[14] 徐学锋. 煤层巷道底板冲击机理及其控制研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.

[15] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.

(编辑 张 红)